T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK BİNALARIN DEPREM DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Mustafa Taha ÇOBAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Barış SEVİM

Mart, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK BİNALARIN DEPREM DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Mustafa Taha ÇOBAN tarafından hazırlanan tez çalışması 06.03.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Barış SEVİM
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Barış SEVİM, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Suat AKBULUT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ferit ÇAKIR, Üye
Gebze Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Barış SEVİM sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Binaların Deprem Davranışının Belirlenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mustafa Taha ÇOBAN

İmza

Canım Aileme,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda ve diğer tüm süreçlerde bana desteğini esirgemeyen, bilgi ve birikimiyle yardımcı olan, sabır ve yol gösteren danışmanım Sayın Prof. Dr. Barış SEVİM hocama, yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgiler edindiğim Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümündeki hocalarıma tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren Prof. Dr. Suat AKBULUT ve Prof. Dr. Ferit ÇAKIR hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca, yaşantımın her anında benden desteklerini esirgemeyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim babam Erhan ÇOBAN'a, annem Nuray ÇOBAN'a, abim Emir Kaan ÇOBAN'a ve kardeşim Ömer Yiğit ÇOBAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa Taha ÇOBAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiv

ÖZET xvi

ABSTRACT xviii

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti ... 2

1.2 Tezin Amacı ... 13

1.3 Orijinal Katkı ... 14

2 YAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİMİ 15

2.1 Giriş ... 15

2.2 Yapı-Zemin Etkileşimi Analiz Yöntemleri ... 18

2.2.1 Doğrudan Yöntem ... 18

2.2.2 Altsistem Yöntemi ... 21

3 DEPREM ETKİSİ ALTINDA DAVRANIŞ VE PERFORMANS KAVRAMI 26

3.1 Deprem Yer Hareketleri ... 27

3.1.1 Deprem Yer Hareketi Düzeyleri ... 27

3.1.2 Deprem Yer Hareketi Spektrumları ... 28

3.1.3 Deprem Yer Hareketi Tanımlanması ... 31

3.2 Doğrusal Olmayan Davranış ve Plastik Mafsal Kavramı ... 32

3.3 Bina Performans Düzeyleri ... 34

3.4 Kesit Hasar Bölgeleri ve Sınırlar ... 35

3.5 Doğrusal Olmayan Hesap ... 36

3.5.1 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi ... 37

3.6 Zeminlerin Dinamik Davranışı ... 37

4 SAYISAL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR 41

4.1 Yapı Özellikleri ve Modelleme ... 41

4.2 Zemin Özellikleri ve Modelleme ... 47

4.2.1 Altsistem Yöntemi Modeli ... 48

4.2.2 Doğrudan Yöntem Modeli ... 49

4.3 Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi 51
4.4 Analiz Bulguları 57
4.4.1 Yapı Periyotları 57
4.4.2 Kat Yerdeğiştirmeleri 58
4.4.3 Göreli Kat Ötelemeleri 62
4.4.4 Taban Kesme Kuvvetleri 64
4.4.5 Yapı Elemanları Hasar Durumları 66
5 SONUÇ VE ÖNERİLER **89**
KAYNAKÇA **92**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **97**

SİMGE LİSTESİ

Φ_y	Akma eğriliği
f_{ce}	Betonun ortalama (beklenen) basınç dayanımı
H	Bina yüksekliği
S_1	Bir (1.0) saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
S_{D1}	Bir (1.0) saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
F_1	Bir (1.0) saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
a_0	Boyutsuz frekans parametresi
M_w	Depremin büyüklüğü
k_j	Dinamik rijitlik
ε_s	Donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi
f_{ye}	Donatının ortalama (beklenen) akma dayanımı
f_{ywe}	Enine donatının ortalama (beklenen) akma dayanımı
A	Etkili alan
ω_{we}	Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı
Φ_u	Göçme öncesi eğrilik
$\varepsilon_s^{(GÖ)}$	Göçmenin önlenmesi hasar performans düzeyi için izin verilen donatı çeliği şekildeğiştirme sınırı
$\theta_P^{(GÖ)}$	Göçmenin önlenmesi hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı
$\varepsilon_c^{(GÖ)}$	Göçmenin önlenmesi hasar performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması sınırı
Q	Hareketli yük
n	Hareketli yük azaltma katsayısı
A_L	Her bir döngü anında harcanan enerji
h	Kat yüksekliği
τ_c	Kayma gerilmesi
G	Kayma modülü
G/G_{sec}	Kayma modülü oranı
γ_c	Kayma şekildeğiştirmesi
L_S	Kesme açıklığı
F_S	Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı

S_S	Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
S_{DS}	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
$\varepsilon_s^{(KH)}$	Kontrollü hasar performans düzeyi için izin verilen donatı çeliği şekildeğiştirme sınırı
$\theta_P^{(KH)}$	Kontrollü hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı
$\varepsilon_c^{(KH)}$	Kontrollü hasar performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması sınırı
ε_{su}	Maksimum dayanıma karşı gelen donatı birim uzaması
G_{max}	Maksimum kayma modülü
V_p	P dalgası kayma hızı
L_P	Plastik mafsal boyu
ϑ	Poisson oranı
α_j	Rijitlik düzeltme katsayısı
α_{se}	Sargı donatısı etkinlik katsayısı
G_{sec}	Sekant kayma modülü
$\varepsilon_s^{(SH)}$	Sınırlı hasar performans düzeyi için izin verilen donatı çeliği şekildeğiştirme sınırı
$\theta_P^{(SH)}$	Sınırlı hasar performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırı
$\varepsilon_c^{(SH)}$	Sınırlı hasar performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması sınırı
α_{se}	Sargı donatısı etkinlik katsayısı
D	Sönüm oranı
Δ_h	Sonlu eleman boyutu
K_j	Statik rijitlik
R	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
β_f	Temel sönümü
B	Temel yarı genişliği
L	Temel yarı uzunluğu
A_T	Üçgen alanı
C_s, C_p	Viskoz geçirgen sınır için sönüm katsayıları
K_{xx}	x- ekseninde yüzeysel temelde statik dönme rijitliği
K_x	x- ekseninde yüzeysel temelde statik ötelenme rijitliği
K_{yy}	y- ekseninde yüzeysel temelde statik dönme rijitliği
K_y	y- ekseninde yüzeysel temelde statik ötelenme rijitliği

T	Yapı periyodu
T'	Yapı-zemin sistemi periyodu
β_0	Yapı-zemin sistemi sönümü
T_A, T_B	Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu
$S_{ae}(T)$	Yatay elastik tasarım spektral ivmesi
T_L	Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu
g	Yerçekimi ivmesi
K_{zz}	z- ekseninde yüzeysel temelde statik dönme rijitliği
K_z	z- ekseninde yüzeysel temelde statik ötelenme rijitliği
ρ	Zemin birim hacim ağırlığı
f	Zemin frekansı
β_s	Zemin sönümü
V_S	Zeminin kayma dalgası hızı
$V_{S,30}$	Zeminin üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı

KISALTMA LİSTESİ

AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
BKS	Bina Kullanım Sınıfı
BYS	Bina Yükseklik Sınıfı
DTS	Deprem Tasarım Sınıfı
GÖ	Göçmenin Önlenmesi
KH	Kontrollü Hasar
KK	Kesintisiz Kullanım
PEER	Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi
PGA	En Büyük İvme
PGV	En Büyük Hız
SH	Sınırlı Hasar
TBDY-2018	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)
YZE	Yapı-Zemin Etkileşimi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Yapı-zemin etkileşiminde deprem dalgalarının hareketi…….	16
Şekil 2.2	Yapıda meydana gelen şekildeğiştirmeler; (a) ankastre mesnet (b) yapı zemin etkileşimli……	18
Şekil 2.3	Yapı-zemin ortak modeli…….	19
Şekil 2.4	Viskoz sönümleyiciler……..	20
Şekil 2.5	Yapı-zemin etkileşim probleminin altsistem yöntemi ile çözümü..	23
Şekil 2.6	Yüzeysel dikdörtgen temel geometrisi……...	25
Şekil 3.1	Türkiye deprem tehlike haritası…….	27
Şekil 3.2	Yatay elastik tasarım ivme spektrumu……...	30
Şekil 3.3	Kirişte plastik mafsal noktaları……...	34
Şekil 3.4	Bina performans düzeyleri……..	35
Şekil 3.5	Kesit hasar bölgeleri……	36
Şekil 3.6	Çevrimsel yükleme altında kayma modülü……..	38
Şekil 3.7	Çevrimsel yükleme altında kayma modülü ve sönüm oranı……..	39
Şekil 3.8	Kayma modülü azalım ve zemin sönüm oranı eğrileri……...	40
Şekil 4.1	Yapı planı……..	41
Şekil 4.2	Kolon ve kiriş kesitleri…….	43
Şekil 4.3	5- ve 10- katlı yapı modelleri……..	43
Şekil 4.4	Kirişte plastik mafsalların tanımlanması……...	45
Şekil 4.5	Kolonda plastik mafsalların tanımlanması……...	46
Şekil 4.6	Yapı-zemin sisteminin yaylar ile temsili……...	48
Şekil 4.7	Yapı-zemin etkileşim modeli……..	50
Şekil 4.8	Kayma modülü azalım ve zemin sönüm oranı eğri uydurma……	51
Şekil 4.9	Orijinal ve ölçekli deprem spektrumları……...	52

Şekil 4.10 Orijinal ve ölçekli deprem ivme kayıtları…….. 53

Şekil 4.11 Deepsoil programı arayüzü……. 54

Şekil 4.12 Anakayaya indirilen depremlerin ivme kayıtları…….. 55

Şekil 4.13 Deprem kayıtlarının tanımlanması…… 56

Şekil 4.14 5- katlı yapıların kat yerdeğiştirmeleri; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi……. 60

Şekil 4.15 10- katlı yapıların kat yerdeğiştirmeleri; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi……. 61

Şekil 4.16 Superstition-02 depremi için 5- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları…….. 62

Şekil 4.17 Imperial Valley_06 depremi için 5- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları……... 62

Şekil 4.18 Loma Prieta depremi için 5- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları…….. 63

Şekil 4.19 Loma Prieta depremi için 10- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları…….. 63

Şekil 4.20 Imperial Valley_06 depremi için 10- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları……... 63

Şekil 4.21 Loma Prieta depremi için 10- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları…….. 64

Şekil 4.22 5- katlı yapıda kiriş hasar dağılımı; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi…… 67

Şekil 4.23 5- katlı yapıda kolon hasar dağılımı; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi…… 68

Şekil 4.24 10- katlı yapıda kiriş hasar dağılımı; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi…… 70

Şekil 4.25 10- katlı yapıda kolon hasar dağılımı; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi……. 71

Şekil 4.26 Hasar sonuçları verilen zemin kat kolon ve kirişler……. 72

Şekil 4.27 Ankastre model için 5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları..... 76

Şekil 4.28 Altsistem model için 5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları..... 77

Şekil 4.29 Doğrudan model için 5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları..... 77

Şekil 4.30 Ankastre model için 5- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları..... 78

Şekil 4.31 Altsistem model için 5- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları..... 78

Şekil 4.32 Doğrudan model için 5- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları..... 79

Şekil 4.33 Ankastre model için 5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları..... 79

Şekil 4.34 Altsistem model için 5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları..... 80

Şekil 4.35 Doğrudan model için 5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları..... 80

Şekil 4.36 Ankastre model için 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları..... 84

Şekil 4.37 Altsistem model için 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları..... 85

Şekil 4.38 Doğrudan model için 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları..... 85

Şekil 4.39 Ankastre model için 10- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları..... 86

Şekil 4.40 Altsistem model için 10- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları..... 86

Şekil 4.41 Doğrudan model için 10- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları..... 87

Şekil 4.42 Ankastre model için 10- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları..... 87

Şekil 4.44 Doğrudan model için 10- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları..... 88

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Rijit dikdörtgen temellerin statik rijitlik formülleri……	25
Tablo 3.1	Deprem yer hareketi düzeyleri……	28
Tablo 3.2	Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları F_S……	29
Tablo 3.3	1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları F_1……	29
Tablo 3.4	Yerel zemin sınıfları……	31
Tablo 3.5	İzin verilen kesit hasar sınır değerleri……	35
Tablo 4.1	Yapı özellikleri……	42
Tablo 4.2	Kirişlerde moment-eğrilik analizi……	44
Tablo 4.3	Kolonlarda moment-eğrilik analizi……	45
Tablo 4.4	Zemin özellikleri……	48
Tablo 4.5	Yay rijitlik değerleri……	49
Tablo 4.6	Seçilen deprem kayıtları özellikleri……	52
Tablo 4.7	Titreşim periyodu sonuçları……	57
Tablo 4.8	X doğrultusunda maksimum tepe yerdeğiştirme sonuçları……	58
Tablo 4.9	Y doğrultusunda maksimum tepe yerdeğiştirme sonuçları……	59
Tablo 4.10	X doğrultusunda maksimum taban kesme kuvveti sonuçları……	65
Tablo 4.11	Y doğrultusunda maksimum taban kesme kuvveti sonuçları……	66
Tablo 4.12	5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için zemin kat kiriş hasar durumu……	73
Tablo 4.13	5- katlı yapıda Imperial Valley_06 depremi için zemin kat kiriş hasar durumu……	73
Tablo 4.14	5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için zemin kat kiriş hasar durumu……	74
Tablo 4.15	5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için zemin kat kolon hasar durumu……	74

Tablo 4.16 5- katlı yapıda Imperial Valley_06 depremi için zemin kat kolon hasar durum…….. 75

Tablo 4.17 5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için zemin kat kolon hasar durumu…….. 75

Tablo 4.18 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için zemin kat kiriş hasar durumu……. 81

Tablo 4.19 10- katlı yapıda Imperial Valley_06 depremi için zemin kat kiriş hasar durumu……. 81

Tablo 4.20 10- katlı yapıda Loma Prieta depremi depremi için zemin kat kiriş hasar durumu……. 82

Tablo 4.21 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için zemin kat kolon hasar durumu…….. 83

Tablo 4.22 10- katlı yapıda Imperial Valley_06 depremi için zemin kat kolon hasar durumu…….. 83

Tablo 4.23 10- katlı yapıda Loma Prieta depremi için zemin kat kolon hasar durumu…….. 84

ÖZET

Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Binaların Deprem Davranışının Belirlenmesi

Mustafa Taha ÇOBAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Barış SEVİM

Mühendislik uygulamalarında, binaların ankastre mesnete sahip olduğu varsayılır ve yapı-zemin etkileşimi çoğu bina için genellikle dikkate alınmaz. Ancak, geçmişte yaşanan depremler yapı-zemin dinamik etkileşiminin binaların sismik davranışlarında meydana gelen olumsuz etkilerini göstermiştir. Bu etkilerin ortaya konabilmesi deprem mühendisliği açısından önemlidir. Bu çalışma ile yumuşak zeminde yer alan farklı yükseklikteki betonarme binaların dinamik davranışı yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak incelenmiştir.

Bu tez kapsamında, yüksek sünekliğe sahip 5- ve 10- katlı betonarme binalar, zemin etkilerinin göz önünde bulundurulduğu ve bulundurulmadığı durumlar için zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemiyle incelenmiştir. Yapı-zemin etkileşimi iki farklı yaklaşımla modellenmiştir. Bu yaklaşımlar, empedans fonksiyonları ile temsil edilen zemin yaylarının kullanıldığı altsistemler yöntemi ve zemin ile yapının birlikte modellenip analiz edildiği doğrudan yöntemdir. Betonarme binaların doğrusal olmayan davranışları kolon ve kiriş uçlarına tanımlanan plastik mafsallar ile modellenmiştir.

Bu çalışmada TBDY-2018'in yerel zemin sınıflandırmasına göre ZE zemin sınıfında bulunan yumuşak zemin dikkate alınmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap için zemin sınıfı ile uyumlu 3 farklı deprem kaydı seçilmiş ve bu kayıtlar ölçeklendirilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında yapıların periyotları, kat yerdeğiştirmeleri, göreli kat öteleme oranları, taban kesme kuvvetleri ve yapı elemanlarının kesit hasar durumları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Analizler sonucunda, pratikte ankastre mesnetli kabul edilen yapıların sismik davranışlarının zeminin etkisi dikkate alındığında ve yapı yüksekliği arttığında olumsuz yönde değişebileceği görülmüştür. Özellikle yumuşak zeminlerdeki farklı yapıların sismik tasarımında dinamik yapı-zemin etkileşimi etkilerinin göz önünde bulundurulmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapı-zemin etkileşimi, doğrudan yöntem, altsistem yöntemi, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz

ABSTRACT

Determination of Earthquake Behavior of Buildings Considering Soil-Structure Interaction

Mustafa Taha ÇOBAN

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Barış SEVİM

In engineering applications, buildings are assumed to be fixed base and soil-structure dynamic interaction is usually not considered for most buildings. However, past earthquakes have shown the negative effects of the soil-structure interaction on the seismic behavior of buildings. Demonstrating these effects is important in terms of earthquake engineering. With this study, the dynamic behavior of reinforced concrete buildings of different heights resting on soft soil was investigated by considering the soil-structure interaction.

In this thesis, high ductility 5- and 10- storey reinforced concrete structures were investigated with nonlinear time history method for cases with or without soil effects. Soil-structure interaction is modeled by two approaches. These approaches are the substructure method using springs represented by impedance functions, and the direct method in which soil and structure are modeled and analyzed together. The nonlinear behavior of reinforced concrete buildings is modeled with plastic hinges assigned to the column and beam ends. In this study, soft soil in ZE soil class was considered according to the local soil classification of TBEC-2018.

For the nonlinear time history analyses, three different earthquake records suitable for the soil class were selected and scaled, then analyses were carried out.

Within the scope of the study, period, storey displacement, storey drift ratio, storey shear force and sectional damage of structural elements for different building models were examined comparatively. As a result of the analyses, it has been seen that the seismic behavior of the structures, which are considered to fixed base in practice, can change negatively when the effect of the soil is considered and the height of the structure increases. It is concluded that considering dynamic soil-structure interaction effects in seismic design of different buildings resting on soft soil classes is essential.

Keywords: Soil-structure interaction, direct method, substructure method, nonlinear time history analysis

1
GİRİŞ

Depremler, hem mal hem de can kaybına sebep olabilen doğal afetlerdendir. Dünya genelinde ve ülkemizde meydana gelen geçmiş depremler can ve mal kayıplarının ne derecede büyük olabileceğini göstermiştir. Deprem etkilerine karşı dayanıklı ve güvenli yapı tasarımı, özellikle ülkemiz gibi aktif fay hattında bulunan ülkelerde mühendislik açısından çok büyük öneme sahiptir. Bu güvenli tasarımın sağlanması için önemli konulardan biri, yapıların oturacağı geoteknik ortamın özelliklerinin iyi bilinmesi ve hesaplara uygun şekilde aktarılmasıdır.

Geçmişte yaşanan depremlerden görüldüğü gibi, zemin koşullarının deprem hareketinin içeriğini değiştirerek yapıya iletmesiyle deprem aktivitesi yüksek bölgelerde taşıma kapasitesi düşük yumuşak zeminler üzerine inşa edilmiş yapılarda önemli derecede hasarlar meydana gelmiş ve bundan dolayı yapıların tasarımında yapı-zemin etkileşimi sorunu önemli hale gelmiştir.

Deprem hareketinin zemin üzerindeki etkisi için ana kayadan gelen deprem hareketinin sadece zemin içindeki dağılımı incelenmesi, yapı-zemin ilişkisinin ifade edilmesi açısından yeterli değildir. Deprem esnasında yapı ve zemin birlikte hareket ederek etkileşime girdikleri için ikisinin davranışları arasındaki uyum önem kazanacaktır. Sismik yükler etkisinde yapı-zemin ortak sistem davranışlarını gerçeğe daha yakın olarak incelemek için birbirine bağlı olan üstyapı, yapı temeli ve temelin altındaki zemin ortamının karşılıklı dinamik etkileşiminin birlikte değerlendirilmesi gerekir.

Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin betonarme binaların deprem davranışına etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için çeşitli analizler yapılmış, bu analizlerin sonucuna göre değerlendirmeler yapılarak öneriler sunulmuştur.

1.1 Literatür Özeti

Tabatabaiefar ve Massumi [1] yapı-zemin etkileşimini incelemek için farklı rijitliğe sahip zeminlerdeki 4 farklı kat yüksekliğine sahip betonarme binaların dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Yapı-zemin etkileşimi için doğrudan yöntem seçilmiş ve SAP2000 programında sınırlı modeller oluşturulmuştur. Analizler için 4 farklı deprem kaydı seçilmiş, 3 farklı zemin türü için ölçeklenmiştir. Çalışmada, farklı zemin tipleri üzerindeki yerdeğiştirmeler, kat kesme kuvvetleri ve göreli kat ötelemeleri incelemiştir. Analizler sonucunda yerdeğiştime ve göreli kat ötelemelerinde kat sayısının artması ve zemin rijitliğinin düşmesiyle artışlar, taban kesme kuvvetinde ise azalmalar görülmüştür. Kayma dalgası hızı yüksek olan zemin üzerindeki binaların sonucunda belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Kayma dalgası hızı orta olan zeminlerde 7 kat ve daha yüksek binalar, kayma dalgası hızı düşük olan zeminlerde ise 3 kat ve daha yüksek binalar için yapı-zemin etkileşiminin önemli olabileceği sonucuna varılmıştır. Çalışmada, $V_s/fh<10$ olduğu durumlar için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması gerektiğini vurgulamış ve ankastre mesnetli yapılardan elde edilen yerdeğiştirmeler bir katsayı ile çarpılarak yapı-zemin modelinin yerdeğiştirme değerinin bulunabileceği basitleştirilmiş bir metot önermişlerdir.

Nguyen vd. [2] yapı-zemin etkileşiminin, sığ temellere sahip betonarme binaların dinamik tepkileri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla ABAQUS programı ile 7 farklı boyuttaki sığ temeller üzerine oturan 15- katlı betonarme yapının doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Yapı-zemin sisteminin modellenmesi için doğrudan yöntem kullanılmıştır. Zemin boyutları deprem hareketinin uygulandığı yönde 160 m, diğer yönde ise 30 m seçilmiş, zemin sınırları için sonsuz sınır elemanları tanımlanmıştır. Analizler için PEER veri tabanından faya yakınlık durumlarına göre 4 farklı deprem kaydı seçilmiştir. Farklı boyutlardaki temellere ve ankastre mesnet koşullarına sahip yapılar için yerdeğiştirmeler, göreli kat ötelemeleri, dönme açıları ve kat kesme kuvveti sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, yapı-zemin etkileşimin dikkate alınması yerdeğiştirmeleri artırırken, temel boyutu küçüldüğünde doğal periyot uzaması nedeniyle taban kesme kuvvetlerinde önemli bir azalma meydana gelmiştir. Sığ bir temelin boyutu,

yapı ve zemin arasındaki etkileşim nedeniyle binanın dinamik tepkilerini önemli şekilde etkilediği için tasarımda dikkat edilmesi gereken bir konu olduğu sonucuna varılmıştır.

Livaoğlu ve Doğangün [3] ayaklı su tankı için sıvı-yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak temel gömülmesinin sismik davranışa etkilerini araştırmıştır. Ortak sistemler ANSYS programında doğrudan yöntem ile modellenmiştir. Zemin boyutları x ve y yönünde 40 m, anakaya derinliği 20 m olacak şekilde seçilmiş ve sınırlara viskoz sönümleyiciler tanımlanmıştır. 6 farklı zemin türü ve farklı temel gömülme oranlarına göre modellemeler yapılarak yerdeğiştirmeler, taban kesme kuvvetleri ve çalkalanma tepkileri karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, temel gömülme durumu tüm zemin tipleri için sıvı çalkalanma tepkisini etkilememiş, zeminin de rijitliğine bağlı olarak yerdeğiştime ve taban kesme kuvvetlerinde değişikliklere sebep olmuştur. Ayaklı su tankları için sıvı-yapı-zemin etkileşiminin özellikle düşük dayanımlı zeminlerde davranışı önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Ghandil ve Behnamfar [4] yapı-zemin etkileşiminin etkilerini incelemek için 3 farklı zemin türü ve 6 farklı betonarme yapı için SAP2000 programında zaman tanım alanında hesap yöntemi ile analizler gerçekleştirmiştir. Yapı-zemin etkileşimi doğrudan yöntem kullanılarak modellenmiştir. Çalışmada eşdeğer doğrusal metot ile oluşturulan zemin profili parçalara bölünerek her bir bölümdeki şekildeğiştirmeler hesaplanmıştır. Temelin çevresinde büyük şekildeğiştirmelerin görülmesinden dolayı bu kısımlar için zemin kayma modülünü azaltarak yakın alan metodu adını verdikleri yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yaklaşımı doğrulamak için seçilen deprem kayıtlarını ölçeklendirerek dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, önerilen yöntemin doğrusal olmayan modellemeyi eşdeğer doğrusal metoda göre daha iyi şekilde yansıttığı ve yapı-zemin etkileşim analizlerinde daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, zemin etkilerinin dikkate alınması ile yapı kat yerdeğiştirmelerinin arttığı ve kat kesme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür.

Fatahi ve Tabatabaiefar [5] üç farklı kat yüksekliğine sahip ve farklı yumuşak zemin üzerindeki binaları hem ankastre mesnetli hem de yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak analizlerde kullanılan eşdeğer doğrusal metot ile doğrusal olmayan yöntemleri karşılaştırmayı amaçlamıştır. Yapı-zemin etkileşim modeli doğrudan yöntem kullanılarak FLAC2D programı ile modellenmiştir. Zemin profili yapı tabanının 5 katı kadar genişlikte ve anakaya derinliği 30 m olacak şekilde modellenmiş, sınırlarına ise viskoz sönümleyiciler yerleştirilmiştir. 4 farklı deprem kaydı ile dinamik analizler gerçekleştirilerek binaların yerdeğiştirmeleri, göreli kat ötelemeleri ve taban kesme kuvvetleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Analizler sonucunda, doğrusal metot ile modellenen yumuşak zeminlerde yer alan betonarme binaların yapısal güvenliğinin olumsuz etkilenebileceği sonucuna varılmıştır.

Güllü ve Jaf [6] tarihi bir yığma kemer köprünün yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak davranışını incelemeyi amaçlamıştır. SAP2000 programında ankastre mesnet ve doğrudan yöntem ile yapı-zemin etkileşim sonlu eleman modelini oluşturarak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmişlerdir. Tabakalı zemin profili köprü uzunluğunun 2 katı, genişliğinin 3 katı ve anakaya derinliği 35 m olacak şekilde modellenmiştir. AFAD veri tabanından seçilen tek bir deprem kaydı dikkate alınmıştır. Çalışmada yerdeğiştirme, ivme, dönme, frekans, mod şekilleri, taban kesme kuvvetleri ve gerilme sonuçları incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, zemin etkilerinin dikkate alınması ile periyot, yerdeğiştirme ve dönme sonuçları artarken taban kesme kuvveti, devrilme momenti ve ivmelerde azalmalar görülmüş, gerilme sonuçlarında belirgin bir değişim olmamıştır. İncelenen kemer köprü sonuçlarından elde edilen gözlemler ile yapı-zemin etkileşim etkilerinin ayrıntılı bir şekilde modellenmesinin, deprem etkisinde sistem davranışının doğru tahmini için gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Behnamfar ve Banizadeh [7] farklı iki yumuşak zeminde yer alan 3-, 5-, 6-, 8- ve 9- katlı betonarme binaların dinamik davranışlarını yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak incelemiştir. Çalışmada, farklı kat yüksekliğindeki yapıların çerçeve ve perde taşıyıcı sistemli olmalarına göre oluşabilecek farklılıkları incelemek için PEER veri tabanından farklı zeminler ile uyumlu olarak seçilen deprem kayıtlarını

ölçeklendirerek doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yapıların doğrusal olmayan davranışı plastik mafsallar ile yansıtılmıştır. Çalışmada zemin modeli doğrusal ve doğrusal olmayan winkler kiriş yayları kullanılarak oluşturulmuştur. Analizler sonucunda, maksimum taban kesme kuvvetleri, kat yerdeğiştirmeleri, kolon ve kiriş elemanların plastik dönmeleri, kesit hasar bölgelerinin zemin türüne ve taşıyıcı sisteme göre nasıl değiştiğinin sonuçlarını sunmuşlardır. Yapı-zemin etkileşiminin, çerçeve ve perde sistemli binaların performans seviyesini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varmışlardır.

Ghandil ve Aldaikh [8] yumuşak zeminde bulunan 5-, 10-, 15- ve 20- katlı çelik binaların çarpışma etkilerini yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak incelemiştir. SAP2000 programında binalar arasında farklı ikili kombinasyonlar oluşturulmuştur. İkili binalar arasında doğrusal olmayan çarpışma elemanları modellenmiştir. Yapı-zemin etkileşimi doğrudan yöntem ile oluşturulmuş, zeminin doğrusal olmayan davranışı eşdeğer doğrusal metot kullanılarak modellenmiştir. Zemin boyutları 101 m x 40 m ve 45 m anakaya derinliğinde olacak şekilde seçilmiştir. Zaman tanım alanında analizler için PEER veri tabanından seçilen yüzey deprem kayıtları, zemin büyütmelerinden arındırılarak dekonvolüsyon işlemi ile anakayadaki deprem kayıtlarına dönüştürülmüştür. Analizlerde yapı-zemin-yapı ve ankastre mesnet modellerinin kat kesme kuvvetleri, sismik hasar seviyeleri, çarpışma etkileri ve minimum çarpışma mesafeleri karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, zemin etkilerinin dikkate alınması ile komuşu yapıların taban kesme ve sismik hasar seviyelerinde yapıların kat yüksekliğine ve aralarındaki mesafelere göre önemli değişiklikler görülmüştür.

Hökelekli ve Al-Helwani [9] mevcut bir cami minaresinin yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak davranışını incelemeyi amaçlamıştır. ABAQUS programında ankastre mesnet ve doğrudan yöntem ile yapı-zemin etkileşim sonlu eleman modelini oluşturarak 3 farklı zemin türü ve bir deprem kaydı kullanarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmişlerdir. Zemin profili minare taban boyutlarının 5 katı kadar, anakaya derinliği 30 m olacak şekilde ve zemin sınırları sonsuz elemanlar ile modellenmiştir. Çalışmada frekans, yerdeğiştirme, asal gerilmeler ve hasar durumları incelenmiştir. Yapılan analizler

sonucunda, zemin etkilerinin dikkate alınması ile tepe yerdeğiştirmeleri artarken frekansta azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca, ankastre mesnet durumunda hasar oluşması beklenen minarenin, yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığında herhangi bir hasar oluşmadığı görülmüştür. Yapıdaki hasar oranları sert zemin koşullarından yumuşak zemin koşullarına geçişte önemli bir değişim göstermiştir. Yapı-zemin etkileşiminin, yapıda meydana gelen hasar durumları ve yerdeğiştirmeleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu sonucu ortaya konulmuştur.

Tabatabaiefar vd. [10] yapı-zemin etkileşiminin etkilerini araştırmak için sığ bir temel üzerine oturan 10- katlı betonarme binanın farklı zemin türleri için dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Yapılar hem doğrusal hem de doğrusal olmayan davranış benimsenerek modellenmiştir. Yapı-zemin etkileşim modeli doğrudan yöntem kullanılarak FLAC2D programı ile modellenmiştir. Zemin profili yapı tabanının 5 katı genişlikte ve anakaya derinliği 30 m olacak şekilde modellenmiş, sınırlarına ise viskoz sönümleyiciler yerleştirilmiştir. 4 farklı deprem kaydı seçilerek dinamik analizler gerçekleştirilmiş, binaların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının dikkate alındığı durumlar için periyotlar, taban kesme kuvvetleri ve göreli kat ötelemeleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Analizlerde zemin etkilerinin dikkate alınması ile taban kesme kuvvetlerinin azaldığı, sert zeminde bulunan yapıların performans seviyesinin belirgin şekilde değişmediği, yumuşak zeminlerdeki yapıların performans seviyesinin ise hem doğrusal hem de doğrusal olmayan durumlar için önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Bu nedenle yumuşak zeminlerde bulunan yapılar için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Güllü ve Karabekmez [11] tarihi Kurtuluş Camisi'nin yakın fay ve uzak fay depremleri etkisindeki davranışlarını yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak incelemiştir. SAP2000 programında ankastre mesnet ve doğrudan yöntem kullanılarak yapı-zemin etkileşim sonlu eleman modeli oluşturulmuş, farklı sınır şartlarının da varlığı dikkate alınması ile zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Zemin profili yapı tabanının her iki yönde de 3 katı kadar genişlikte ve anakaya derinliği 30 m olacak şekilde modellenmiştir. Yakın ve uzak

fay hareketi için farklı deprem kayıtları seçilerek ölçeklendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, yakın ve uzak fay etkilerinden dolayı yapı-zemin etkileşiminin genliği ve gerilmeleri arttırdığı gözlemlenmiştir. Hem yakın hem de uzak fay depremlerinin ankastre ve zemin etkilerinin dikkate alındığı durumda tarihi camide önemli tepkilere yol açtığı görülmüş, tarihi cami yapılarında uzak ve yakın fay etkilerinin birlikte dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Kabtamu vd. [12] 7- ve 12- katlı betonarme yapıların ankastre mesnetli ve yumuşak zemin üzerinde olması durumundaki davranışlarını incelemiştir. SAP2000 programını kullanarak, yumuşak zemin modelini oluştururken hem altsistem yönteminden winkler yayları hem de doğrudan yöntemi kullanmışlardır. Zaman tanım alanındaki analizler ile yapıların periyotlarını, kat yerdeğiştirmelerini, göreli kat ötelemelerini, ikinci mertebe etkilerini ve kat kesme kuvvetlerini yapı yüksekliğine bağlı araştırıp bir karşılaştırma yapmışlardır. Zeminin dikkate alındığı her iki durumda da titreşim periyotları ile göreli kat ötelemeleri artarken, taban kesme kuvvetinin ankastre mesnetli modele göre azaldığını belirtmişlerdir. Yapı-zemin etkileşiminden kaynaklanan taban kesme kuvvetinin azalmasının her zaman faydalı olmayabileceği sonucuna varmışlardır.

Ghandil ve Behnamfar [13] farklı yumuşak zeminler üzerinde yer alan 4 farklı kat yüksekliğine sahip yapıların davranışını yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak incelemiştir. Doğrudan yöntem kullanılarak SAP2000 programı ile modellenen yumuşak zemin profilinin boyutları 80 m x 40 m, anakaya derinliği 45 m seçilerek sınırlarına viskoz sönümleyiciler yerleştirilmiştir. Yapının doğrusal olmayan davranışı plastik mafsallar ile, zemin ortamının davranışı ise eşdeğer doğrusal metot ile yansıtılmıştır. Zaman tanım alanında analizler için PEER veri tabanından seçilen 7 farklı yüzey deprem kayıtları ölçeklendirilmiş, daha sonra dekonvolüsyon işlemi yapılarak anakayadaki deprem kayıtlarına dönüştürülmüştür. Çalışmada yapıların periyotlarını, göreli öteleme oranlarını, kat kesme kuvvetlerini ve süneklik taleplerini incelemişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, zemin etkilerinin dikkate alınması periyot, kat öteleme oranı ve süneklik taleplerini artırırken, taban kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olmuştur. Yapı-zemin etkileşiminin yapıların dinamik davranışına önemli etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Ada ve Ayvaz [14] 2 farklı zemin için 3-, 6-, 12- katlı betonarme binaların yapı-zemin-yapı etkileşimini incelemiştir. Önce farklı yükseklikteki yapılar, zemin etkilerinin dikkate alınması ve ankastre mesnetli olacak şekilde, daha sonra komşu yapıların varlığının etkilerini belirlemek için dinamik analizler yapılmıştır. ANSYS programını kullanılarak oluşturulan modellerde zemin boyutları her iki yönde de 208 m olacak şekilde seçilmiş ve bağlı sınır koşulları kullanılmıştır. Dinamik analizler için deprem tasarım spektrumu ile uyumlu 2 farklı yapay deprem kaydı oluşturulmuş ve bu kayıtlar dekonvolüsyon işlemi ile anakaya seviyesine indirilmiştir. Analizlerde, yapı-zemin etkilerinin dikkate alınması periyotları artırmış, ivme sonuçlarında ise azalmaya sebep olmuştur. Yerdeğiştirmelerde ve kat ötelemelerinde deprem türlerine göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Az katlı yapılarda yapı-zemin etkileşiminin etkisi daha fazla görülmüştür. Yapı-zemin-yapı analizlerinde ise, yapıların ivme ve bodrum kat ötelenme oranları sonuçlarının yapılar arasındaki net mesafe, yapı kat sayıları, zemin rijitliği, deprem içeriği ve yapıların yerleşimine göre farklı olabileceği görülmüştür. Yapı-zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmasının, dinamik özelliklere bağlı olarak yapıların davranışlarını olumlu veya olumsuz yönde değiştirebileceği görülmüş bu nedenle tasarımında komşu yapının etkilerinin göz önünde bulundurulması sonucuna varılmıştır.

Fatahi vd. [15] yumuşak zemin üzerindeki binaların sismik davranışında yapı-zemin etkileşimi ve yerel zemin etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmada 5-, 10- ve 15- katlı binalar için 3 farklı durum ele alınmıştır. Birinci durumda deprem kayıtlarının doğrudan etkisi altında ankastre mesnet, ikinci durumda deprem kaydını değiştiren yerel saha etkisini dikkate alan ankastre mesnet ve üçüncü durumda deprem kayıtlarının doğrudan etkisi altında yapı-zemin etkileşimli modeller oluşturularak farklı durumlar için analizler yapılmıştır. Yapı-zemin etkileşim modeli doğrudan yöntem kullanılarak FLAC2D programı ile modellenmiştir. Zemin profili yapı tabanının 5 katı genişlikte ve anakaya derinliği 30 m olacak şekilde modellenmiş, sınırlarına ise viskoz sönümleyiciler yerleştirilmiştir. Doğrusal olmayan analizler için 2 farklı zemin sınıfı ve PEER veri tabanından 4 farklı deprem kaydı seçilmiştir. Çalışmada yapıların yerdeğiştirmeleri, göreli kat ötelemeleri ve taban kesme kuvvetleri 3 farklı durum

için karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre 5- katlı yapılar için, sadece yerel zemin etkisinin dikkate alınması gerçekçi sonuçlar verirken, özellikle yumuşak zeminlerde 10- katlı ve 15- katlı yapılar için güvenliği garanti edemeyeceği görülmüştür. Yerel zemin etkisi taban kesme kuvvetlerini artırırken, yapı-zemin etkileşimi taban kesme kuvvetlerinde önemli bir azalmaya sebep olmuştur. Deprem riski yüksek bölgelerde, yumuşak zeminler üzerindeki yüksek yapıların tasarımında sadece yerel zemin etkisini dikkate almak yerine yapı-zemin etkileşiminin tüm etkilerini göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Türkeli [16] SAP2000 programı ile 75 m yüksekliğindeki betonarme bacanın deprem davranışlarını, yapı-zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli olması durumlarına göre 5 farklı model oluşturarak karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yapı-zemin etkileşim modeli için doğrudan yöntem kullanılmıştır. Zemin tabaka kalınlığı 20 m, boyutları ise baca temeli çapının 2.5 katı olacak şekilde seçilerek viskoz sönümleyicileriyle sınırlandırılmıştır. Zaman tanım alanındaki analiz için tek bir deprem kaydı kullanarak yapının periyotları, tepe yerdeğiştirmeleri ve bacada oluşan maksimum gerilmeleri incelenmiştir. Analizler sonucunda, betonarme bacaların zemin etkilerinin dikkate alınması ile periyotlarında, tepe yerdeğiştirmelerinde ve çekme gerilmelerinde önemli değişimlerin olduğu gözlemlenmiş ve yapı-zemin etkileşiminin önemi vurgulanmıştır.

Çaycı vd. [17] yapı-zemin etkileşiminin farklı yükseklikteki binaların sismik davranışı üzerindeki etkisini, yapısal elemanların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarını göz önünde bulundurarak araştırmıştır. SAP2000 programında modellenen 4- ve 7- katlı betonarme yapıların 4 farklı zemin türü ve PEER veri tabanından 7 farklı deprem kaydı seçilerek analizleri yapılmıştır. Yapı elemanlarına tanımlanan plastik mafsallar ile doğrusal olmayan davranış temsil edilmiştir. Yapı-zemin etkileşimi doğrudan yöntem kullanılarak modellenmiştir. Zemin boyutları x yönünde 80 m, y yönünde 70 m ve 20 m anakaya derinliğine sahip olacak şekilde seçilmiş, sınırlarda viskoz sönümleyiciler kullanılmıştır. SAP2000 programında modellenen zemin modelinin geçerliliği için ABAQUS programından elde edilen yerdeğiştirmeler ve zemin büyütmeleri karşılaştırılarak

sonuçların uyumluluğu gösterilmiştir. Çalışmada yapıların yerdeğiştirmeleri, göreli kat ötelemeleri, kesit hasar sınırları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ile, doğrusal/doğrusal olmayan yapısal modelleme yaklaşımı ve zemin rijitliğine bağlı olarak yapıların yerdeğiştirme taleplerinde ve kesit hasarlarında önemli farklılıklar olduğunu göstererek yapı-zemin etkileşiminin önemini vurgulanmıştır.

Çağlar vd. [18], yumuşak zeminler üzerine inşa edilmiş betonarme 3-10 katlı yapıların yapı-zemin etkileşimlerini, bodrum katın varlığı göz önüne alınarak ve alınmadan karşılaştırmıştır. Yapı-zemin etkileşimi analizleri SAP2000 programında zaman tanım alanında dinamik yöntemle yapılmıştır. Zemin profili boyutları, yapı tabanından 10 kat her iki tarafa uzatılarak 315 m, zemin anakaya derinliği 15 m olarak seçilmiştir. Analizler ile yapıların göreli kat ötelemeleri ve tepe yerdeğiştirme sonuçları elde edilmiştir. Yumuşak zeminlerde bodrum katlı binaların deprem performansında olumlu etkiler gözlemlenmiştir. Ayrıca, yumuşak zeminlerde iki kat bodrumun etkisi tek bodrum katın etkisinden daha iyi deprem performansı sergilemiştir. Sert zeminlerde ise, bodrum katlı binalarda yönetmeliğe göre beklenen yerdeğiştirmelere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bodrumsuz ve sert zeminlerdeki binalarda, yönetmelikte belirlenen yerdeğiştirmeleri aşan sonuçlar elde edilmiştir.

Dok vd. [19] 5- ve 8- katlı betonarme yapıların davranışını dört farklı zemin sınıfını dikkate alarak SAP2000 programı ile doğrusal olmayan analizler ile incelenmiştir. Yapı-zemin dinamik etkileşimi, zeminlerin kayma dalgası hızına bağlı olarak rijitlikleri hesaplanan yaylar ile modellenmiştir. Çalışmada, 3 farklı deprem kaydı seçilmiş ve ölçeklenerek doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yapıda oluşan tepe yerdeğiştirmeler, maksimum taban kesme kuvveti ve göreli kat ötelemeleri karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, yapı-zemin dinamik etkileşiminin hesaba katılmasıyla titreşim periyotlarında değişikler olmuştur. Ayrıca kat sayısının artması ve zemin rijitliğinin azalması ile taban kesme kuvvetinin, tepe yerdeğiştirmelerinin ve göreli kat ötelemelerinin arttığı ve yapı performansını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür.

Kalyanshetti vd. [20] yapı-zemin etkileşiminin 5-, 7-, 10- ve 12- katlı betonarme binaların sismik tepkileri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada sonuçları

karşılaştırmak için ankastre mesnet, winkler yay modeli ve doğrudan yöntem modeli kullanılmıştır. Çalışmanın ilk kısmında yay modeli ve doğrudan yöntem modeli incelenirken ikinci bölümde doğrudan yöntem modelinde yapı-zemin etkileşimine bağ kirişin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Doğrusal olmayan statik itme analizi yapılarak üç farklı modelleme yaklaşımının sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Analizler sonucunda, yapı-zemin etkileşiminin etkileri nedeni ile yerdeğiştirme, periyot, taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerinin arttığı belirtilmiştir. Doğrudan yöntem ile modellemenin yapı-zemin etkileşimini yay modeline göre daha iyi temsil ettiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, taban rijitliğinin artmasını sağlayan bağ kirişlerinin yapı-zemin etkileşiminin etkilerini kontrol edebileceği sonucuna varmışlardır.

Korkmaz ve Demir [21] gerçek davranışı belirlemek için zemin etkilerinin ele alınmasıyla yapı davranışını nasıl etkilediğini doğrusal olmayan analizler ile incelemiştir. Zemin etkisini yansıtmak için farklı zeminler için rijitliği hesaplanan yay modelleri kullanılmıştır. Yapıyı oluşturan malzemelerin doğrusal olmayan davranışı elemanlara plastik mafsal tanımlanması ile yapılmıştır. Artımsal itme yöntemiyle yapılan analizlerde periyot, tepe yerdeğiştirmesi, temel dönmeleri ve göreli kat ötelemelerinin sonuçları incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, elverişsiz zemin ortamında yapı periyotlarının önemli ölçüde değişerek kesitlere gelen yük dağılımları ve yatay yerdeğiştirmeleri etkilenmiş, ikinci mertebe etkileri artmıştır. Düşük dayanımlı zemin üzerindeki yapılarda özellikle ilk katta bulunan kolonlarda burulma ve yumuşak kat davranışına benzeyen sonuçlar görülmüştür. Deprem analizlerinde yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmasının yapıların gerçek davranışını yansıtmak için gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Ahmadı [22] 5 farklı zemin türü için 2-, 4- ve 8- katlı betonarme binaların performans durumlarını incelemiştir. SAP2000 programı ile ankastre mesnet ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı farklı durumlar için modellenen yapı sistemlerinde itme yöntemi ile analizler gerçekleştirilmiştir. Yapı-zemin etkileşimi altsistem yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Temel-zemin arasında tanımlanan elastik yayların rijitlikleri empedans fonksiyonları kullanılarak elde edilmiştir. Yapıların doğrusal olmayan davranışı yapı elemanlarının uçlarına tanımlanan

plastik mafsallar ile yansıtılmıştır. Analizler ile yerdeğiştirme ve taban kesme kuvvet ilişkisi, periyot, göreli kat ötelemesi ve zemin kat kolonlarının hasar durumları farklı modeller için detaylıca incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, yumuşak zeminlerdeki yapıların yüksekliğine de bağlı olarak periyotlarında, yerdeğiştirmelerinde, göreli kat ötelemelerinde sert zeminlere kıyasla artışların meydana geldiği görülmüştür. Yapı-zemin etkileşiminin yumuşak zemin koşullarındaki yapı davranışlarını olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır.

Kamal vd. [23] yapı-zemin etkileşiminin orta yükseklikteki betonarme binaların deprem davranışları üzerindeki çarpışma etkisini belirlemeyi amaçlamıştır. Doğrusal olmayan davranışı plastik mafsallar ile tanımlanan 4- ve 7- katlı betonarme binalar SAP2000 programı ile ankastre mesnetli ve yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak modellenmiştir. Zemin etkilerini hesaba katmak için elastik yaylar ve sönümleyiciler kullanılmıştır. Komşu binalar arasındaki boşluk mesafeleri farklı seçilerek aralarına lineer yaylar tanımlanmıştır. Yapı modellerinin doğrusal olmayan dinamik analizi için PEER veri tabanından 9 farklı deprem kaydı seçilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, ankastre mesnetli modeller için 7- katlı binanın yerdeğiştirme talebinde bir artış olurken, 4- katlı bina için herhangi bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Ayrıca, ankastre mesnetli modelde yerdeğiştirme talepleri üzerinde çarpışma etkileri sınırlıyken, yapı-zemin-yapı etkileşimi modelinde yerdeğiştirme talebinde gözle görülür bir artış olmuştur.

Dok ve Kırtel [24] homojen olmayan zeminde perde-çerçeve sistemi olarak tasarlanan 5- ve 8- katlı betonarme yapıların statik itme analizi ile performans düzeyi araştırmıştır. Çalışmada, SAP2000 programı ile ankastre mesnet ve zemini temsil etmek için empedans fonksiyonlarıyla özellikleri belirlenen yay modeli için taban kesme kuvvetleri, tepe yerdeğiştirmeleri, kat ötelemeleri, plastik mafsal durumları ve titreşim periyotları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, zemin etkilerinin dikkate alınması ile yerdeğiştirme talebi artmış ve plastik mafsal mekanizmalarında değişiklikler olmuştur. Zeminin homojen olmaması nedeniyle zemin rijitliği azaldıkça; tepe yerdeğiştirmeleri, göreli kat ötelemelerinin arttığı ve perde duvarın rijitliğinin azalarak yapıların performans düzeylerinin kat sayının da artmasıyla olumsuz yönde değiştiği görülmüştür.

Çetinkaya vd. [25] farklı zeminler üzerinde yer alan köprü ayağının deprem etkisindeki yapı-zemin etkileşimini altsistem yöntemini kullanarak temel-zemin arakesitinde tanımlanan empedans fonksiyonlarına bağlı incelemiştir. Zemin ortamının etkisi yaylar ile yansıtılmıştır. Farklı zemin türlerine göre PEER veri tabanından 3 farklı deprem kaydı seçilmiştir. Köprü ayağı modeli için seçilen temelin yüzeysel dikdörtgen olması ve gömülü olmamasından dolayı kinematik etkileşim ihmal edilmiş, bundan dolayı deprem kayıtları temel girdi hareketi olarak kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, yumuşak zeminde bulunan yapının zemin etkilerinin dikkate alınması ile periyot ve sönüm değerlerinin önemli derecede arttığı görülmüştür. Ayrıca, taban kesme kuvvetlerinde de zemin etkisiyle artışlar meydana gelmiştir. Bu artışların yumuşak zeminlerde yer alan düşük periyottaki yapılarda önemli seviyelere ulaştığı için hesaplarda kullanılan davranış spektrum eğrilerinin bu etkileri dikkate alarak kullanılması önerilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmadaki temel amaç, yumuşak zemin üzerinde bulunan farklı yükseklikteki betonarme binaların yapı-zemin etkileşimi etkisindeki dinamik davranışlarının zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile araştırılmasıdır.

Çalışma kapsamında yüksek sünekliğe sahip 5- ve 10- katlı modellenen betonarme yapılar ankastre mesnetli ve yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak modellenmiştir. Yapı-zemin dinamik etkileşimi, doğrudan yöntem ve altsistem yöntemi kullanılarak iki farklı şekilde dikkate alınmıştır. Yapıların doğrusal olmayan davranışı yapı elemanlarına tanımlanan plastik mafsal ile sağlanmıştır. Çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (2018) göre ZE sınıfında yer alan yumuşak zemin dikkate alınmıştır. Zeminin doğrusal olmayan davranışı, kayma deformasyonları ile ilişkili olan kayma modülü ve sönüm oranı azalım eğrileri kullanılarak yansıtılmıştır. Yerel zemine sınıfına uygun 3 farklı deprem kaydı seçilmiş ve ölçeklendirilerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapıların periyotları, kat yerdeğiştirmeleri, göreli kat öteleme oranları, taban kesme kuvvetleri ve kesit hasar durumları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

1.3 Orijinal Katkı

Yapıların modellenmesi, çoğunlukla zeminin etkileri ihmal edilip ankastre mesnet kabulü ile yapılmaktadır. Ancak, deprem esnasında yapıların dinamik davranışları zeminin varlığından etkilenerek farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, çalışmada yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak gerçeğe yakın bir modelleme oluşturulmuştur.

Yapı-zemin etkileşimi üzerine yapılan çalışmalarda, altsistem yöntemi veya doğrudan yöntem yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, her iki analiz yöntemini de bir arada kullanarak etkileşim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, betonarme yapılar için TBDY-2018'e göre doğrusal olmayan davranış plastik mafsal tanımlanarak yapılmıştır. Yapı-zemin etkileşimi için literatürde doğrudan yöntem ile yapılan çalışmaların genelinde zeminin doğrusal davranışı dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Zeminin doğrusal modellenmesi, zeminde meydana gelen kayma şekildeğiştirmelerin çok düşük olduğu durumlarda geçerli olabilirken, artan kayma şekildeğiştirmelerinde ise doğrusal olmayan zemin modellemelerinin kullanılması gerekir. Bu çalışmada, zeminin doğrusal olmayan davranışını yansıtmak için, kayma deformasyonlara ile ilişkili olan kayma modülü ve sönüm oranı azalım eğrileri kullanılmıştır.

Bu çalışma ile, modellenen 5- ve 10- katlı betonarme binaların deprem davranışlarını gerçeğe yakın şekilde ortaya koyabilmek için yapı-zemin etkileşiminin farklı modelleme yöntemlerini de dikkate alarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile literatüre katkı sağlanmak istenmiştir.

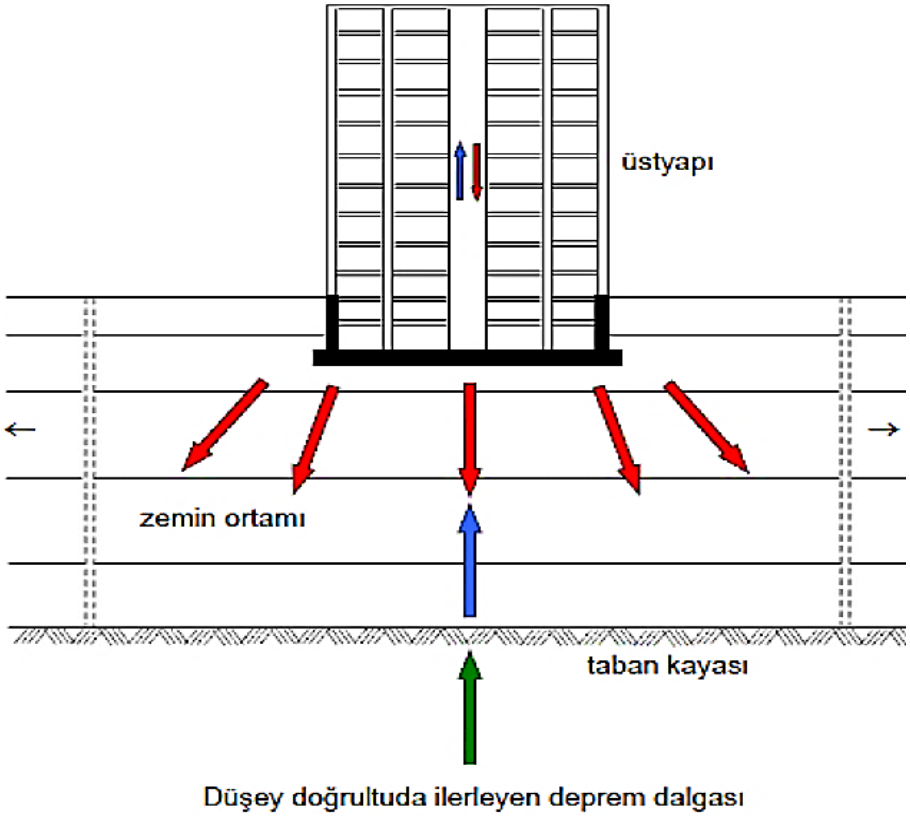
2
YAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİMİ

2.1 Giriş

Deprem, yer kabuğunda meydana gelen kırılmalarla ortaya çıkan enerjinin titreşimler halinde yayılarak yer yüzeyini sarsma olayı olarak tanımlanabilir.

Deprem etkisinde zemin ortamı ile yapının birlikte ele alındığı ortak sistemde, yapı ve zeminin birbirlerini karşılıklı olarak etkilemesi yapı-zemin etkileşimi olarak tanımlanır [26]. Deprem hareketlerinin oluşturduğu ve zemin ortamı içinde yayılan deprem dalgalarının bir kısmı Şekil 2.1'de görüldüğü gibi yapının temelinden geri yansıyarak zemin ortamına dönerken bir kısmı da üstyapıya etki ederek titreşime neden olur ve ardından üstyapıdan geri yansıyarak tekrar zemin ortamına dönerler. Yapı-zemin etkileşimi iki yönlü dinamik bir etkileşimdir. Yapı ve zeminin birbirilerinin davranışını etkilemesi, zeminin ve yapının doğrusal olmayan davranışı gibi çeşitli nedenlerden dolayı yapı-zemin sistemlerinin gerçek davranışının yansıtılması karmaşık bir problemdir.

Genellikle uygulamada yapıların temeli ankastre mesnetlenir, rijit olduğu varsayımıyla zemin ortamının şekil değiştirmediği kabul edilir. Bu varsayım, ancak zemin ortamı üst yapıya göre çok sert olduğu durumda gerçekçi olabilir. Özellikle yumuşak zeminler üzerinde yer alan yapıların sismik davranışlarında önemli değişiklikler meydana geldiği yaşanan depremler sonucunda görülmüştür. Bu nedenle gerçek davranışı yansıtmak için zemin, yapı ile ortak bir sistem gibi düşünülerek tanımlanmalı ve birlikte analiz edilmelidir.



Şekil 2.1 Yapı-zemin etkileşiminde deprem dalgalarının hareketi [26]

Dinamik yapı-zemin etkileşimi kinematik etkileşim ve atalet etkileşimi olmak üzere iki farklı etkileşimden oluşur [26].

Kinematik etkileşim, zeminde rijit bir temelin varlığının, temel girdi hareketini serbest yer hareketinden ayırt etmesidir. Kinematik etkileşim çoğunlukla temelin rijitliği, şekli, gömülme derinliği, dalgaların yayılımı ve ortam özelliklerinin değişiminden etkilenir. Kinematik etkileşim için temel gömülme derinlikleri önemli olduğundan bu etkileşim bazı durumlarda söz konusu olmayabilir. Gömülme derinliğinin temel genişliğine oranı 1/2'den küçük olduğu durumlarda kinematik etkileşim etkilerinin göz ardı edilebileceği belirtilmektedir [27].

Atalet etkileşimi ise, yer hareketi sırasında yapı kütlesinin hareketi nedeniyle yapıda oluşan atalet kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Yer hareketi altındaki bir yapıda eğilme momentleri, burulmalar ve kesme kuvvetleri meydana gelir. Bu kuvvetler ve momentler, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi temel-zemin etkileşim arayüzünde yerdeğiştirmeye ve dönmeye neden olur.

Titreşim periyotları arttığında yapılar daha esnek hale gelir. Velestos ve Meek [28], titreşim periyodundaki artışın miktarını Denklem 2.1 ile ifade etmiştir.

$$\frac{T'}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{kh^2}{k_{yy}}} \tag{2.1}$$

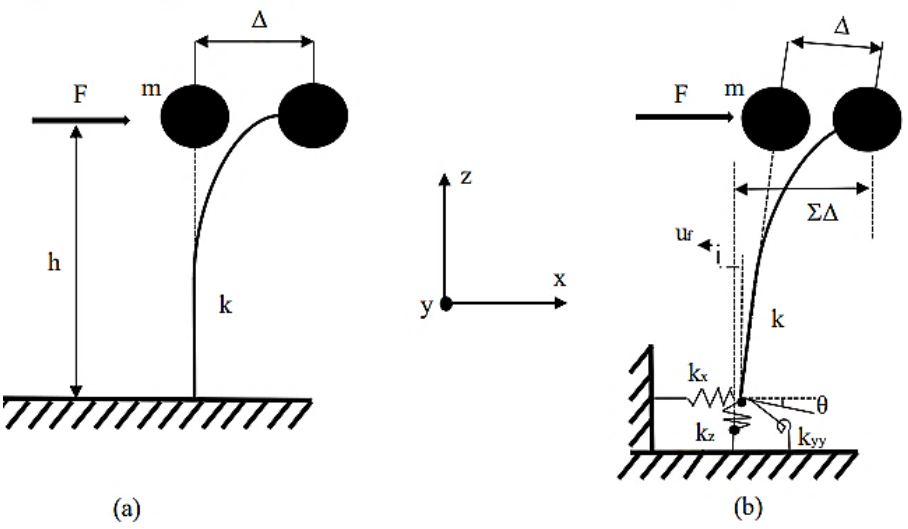
Denklem 2.1'deki k, k_x, k_{yy} ve h ifadeleri sırasıyla rijitlik, temel ötelenme rijitliğini, temel dönme rijitliğini ve yapı yüksekliğini ifade etmektedir.

Ayrıca, temelin serbest alana göre bağıl hareketleri zeminde radyasyon ve histeretik sönüm gelişimine neden olur. Böylece yapı-zemin sisteminin sönümü önemli ölçüde etkilenebilir. Sistem davranışına doğrudan etki eden sönüm Denklem 2.2 ile hesaplanabilmektedir.

$$\beta_0 = \beta_f + \frac{1}{(T'/T)^n}\beta_s \tag{2.2}$$

Denklem 2.2'deki T', β_0, β_f, β_s ve n ifadeleri sırasıyla yapı-zemin sistemi periyodu, toplam sönüm, temel sönümü, yapı sönümü ve katsayıdır.

Zeminin temel hareketlerine karşı gösterdiği rijitlik ve radyasyon sönümü, zeminin empedans fonksiyonlarını kullanarak elde edilebilir.



Şekil 2.2 Yapıda meydana gelen şekildeğiştirmeler; (a) ankastre mesnet (b) yapı-zemin etkileşimli [28]

2.2 Yapı-Zemin Etkileşimi Analiz Yöntemleri

Karmaşık bir konu olan yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasıyla yapılan analizlerde doğru sonuçlar elde edebilmek için çeşitli kabullere göre idealleştirmeler ile modeller oluşturulur. Bu modellerin oluşturulmasında sıklıkla iki yöntem kullanılır. Bunlar; doğrudan yöntem ve altsistem yöntemidir [29].

2.2.1 Doğrudan Yöntem

Dinamik ve statik etkiler altında yapı ile zeminin ortak bir sistem olduğu varsayımıyla sonlu elemanlar modeli ile idealleştirildiği ve tüm sistemin tek aşamada analiz edildiği yöntemdir.

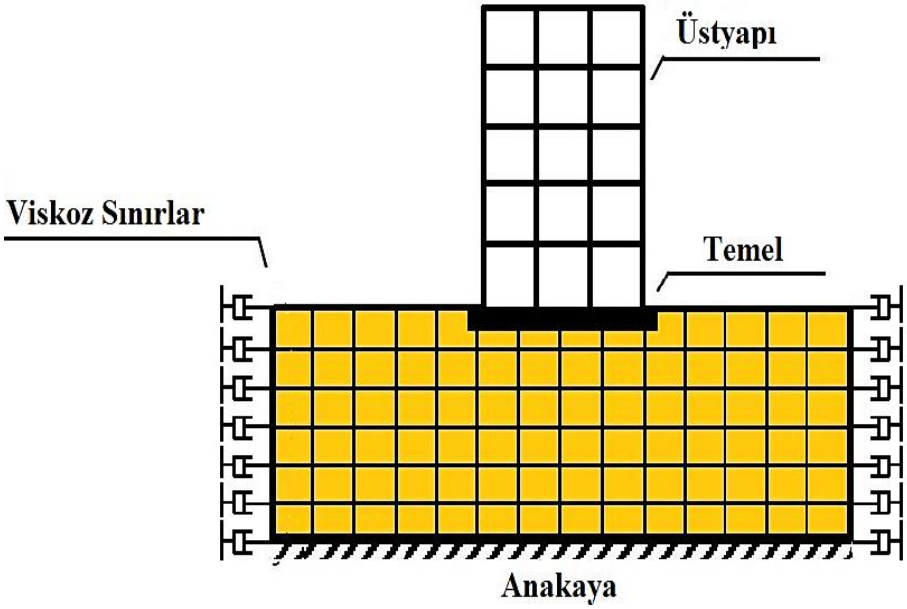
$$[M^*]\{\ddot{u}\} + [C^*]\{\dot{u}\} + [K^*]\{u\} = -[M^*]\{\ddot{u}_{FF}\} \qquad (2.3)$$

Denklem 2.1'de $[M^*], [C^*]$ and $[K^*]$ kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ifade etmektedir.

Yapı-zemin etkileşim problemini zaman tanım alanında, zemin özelliklerini, malzeme ve geometrik davranışlarını, dalgaların yayılmasını, arayüz etkileşimlerini ve sınır koşullarını da göz önüne alabildiği için gerçeğe en yakın sonuç veren doğrudan çözüm yöntemidir [30].

Doğrudan çözüm yöntemi, yapı-zemin etkileşimi problemlerinin hesaplama yükü ve modellemedeki karmaşıklıklar gibi sebeplerden dolayı daha az tercih edilmektedir.

Yapı-zemin etkileşim analizlerinde, sonsuz genişlikteki zemin ortamının modellerde dikkate alınması zor olduğundan statik ve dinamik yükleme durumlarına göre zemin için serbest, tutulu, bağlı ve geçirgen sınırlar gibi çeşitli sınır durumları kullanılmaktadır.



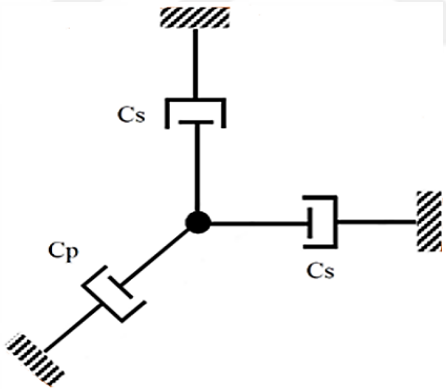
Şekil 2.3 Yapı-zemin ortak modeli

Statik yükler etkisinde, zeminde oluşan etkilerin kaybolduğu mesafede sınırlı zemin profilinin dikkate alınması ve bölgedeki düğüm noktalarında tutulu ya da serbest sınır kullanılması uygun olmaktadır. Dinamik yükler etkisinde ise zemin içerisindeki bazı sismik dalgaların yansıyarak zemine geri dönmesi, yapının ek dalgaların etkisinde kalmasına gibi sıkıntılara neden olabilmektedir. Bu sebeple,

zemin sınırlarının dalgaların sonsuz ortamda dağılımını sağlayabilmesi için yapıdan yeteri kadar uzakta seçilmesi ve bu dalgaların sisteme geri dönmesini engelleyen ya da sönümlenmesini sağlayan sınırlar kullanılmalıdır. Sınırlara ulaşan dalga enerjilerinin sönümlenmesi için yaygın olarak Şekilde 2.4'te gösterilen geçirgen viskoz sınırlar kullanılır. Lysmer ve Kuhlemeyer [31] tarafından önerilen bu viskoz sönümleyici elemanlar zemin sınırlarının normal ve kayma doğrultusunda yerleştirilir. Sönümleyici elemanların sönüm katsayıları Denklem 2.2 ile hesaplanabilir.

$$C_S = \rho A V_S \; ; \; C_P = \rho A V_P \tag{2.4}$$

Denklemdeki A, V_S ve V_P, sınırdaki düğümün etrafındaki tüm elemanların toplam alanı, S dalgası ve P dalgasının dalga hızlarıdır.



Şekil 2.4 Viskoz sönümleyiciler

Ghosh ve Wilson [32], sınırdan yansıyan dalgaların etkilerinin ihmal edilebilmesi için sönümleyicilerin yapı temel boyutunun 3-4 katı kadar uzak bir mesafede olması gerektiğini vurgulamıştır. Rayhani ve Naggar [33] ise yaptıkları çalışmaların sonuçlarına göre zemin boyutlarının yapı temel boyutunun en az 5 katı kadar, anakaya derinliğinin ise en fazla zemin büyütmelerinin meydana geldiği 30 metrede olması gerektiğini belirtmiştir. Zeminin modellenmesinde,

sonlu elemanların uygun boyutlarda seçilmesi dalgaların zemin içerisinde yayılabilmesinin sağlanması açısından önemlidir. Uygun sonlu eleman boyutu hacim elemanlar için, $\Delta_h = V_S/nf_{max}$ formülü ile belirlenebilmektedir. Burada Δ_h sonlu eleman boyutu, V_S kayma dalgası hızı, f_{max} en büyük frekans değeridir. Bir dalga boyu içerisinde bulunması istenilen sonlu eleman sayısının (n) genel olarak 5-8 aralığında seçilmesi yeterli olmaktadır [34]. Sonlu eleman analizlerinde dalgaların doğru bir şekilde yayılabilmesi için her dalga boyunun 10 düğüm noktası içermesi önerilmektedir. Yani n = 10 olarak alınması tavsiye edilmektedir [35]. Ayrıca, zemin analizlerinde dikkate alınacak en büyük frekans değerinin 10 Hz alınması yeterli olmaktadır [36]. Tüm bu etkenler göz önüne alınarak sonlu elemanların boyutları belirlenir.

2.2.2 Altsistem Yöntemi

Yapı ile zeminin ayrı sistemler olduğu varsayımıyla modellenip zeminin yapıya olan etkileşiminin incelendiği çok aşamalı analiz yöntemidir. Yapı ve zemin sistemi farklı parçalara bölünür, birbirinden bağımsız olarak modellenir ve analiz edilir. Ayrı analizlerden sonra kinematik ve atalet etkileşim sonuçları süperpozisyon prensibiyle birleştirilir [29]. Direkt yöntemden daha kısa sürede analizler tamamlandığı için sonuca daha kolay ulaşılır.

Altsitem yöntemi birden fazla adımdan oluşur [37]. Bu yöntemin ilk adımı, kütlesiz bir temel ve yapı varsayılarak temel giriş hareketinin hesaplanmasıdır. Kinematik etkileşim yerdeğiştirmesi, sistem serbest alan hareketine tabi tutularak hesaplanır ve hareket denklemi 2.5'teki gibi yazılır.

$$[M^*_{Zemin}]\{\ddot{u}_{KE}\} + [C^*]\{\dot{u}_{KE}\} + [K^*]\{u_{KE}\} = -[M^*_{Zemin}]\{\ddot{u}_{FF}\} \qquad (2.5)$$

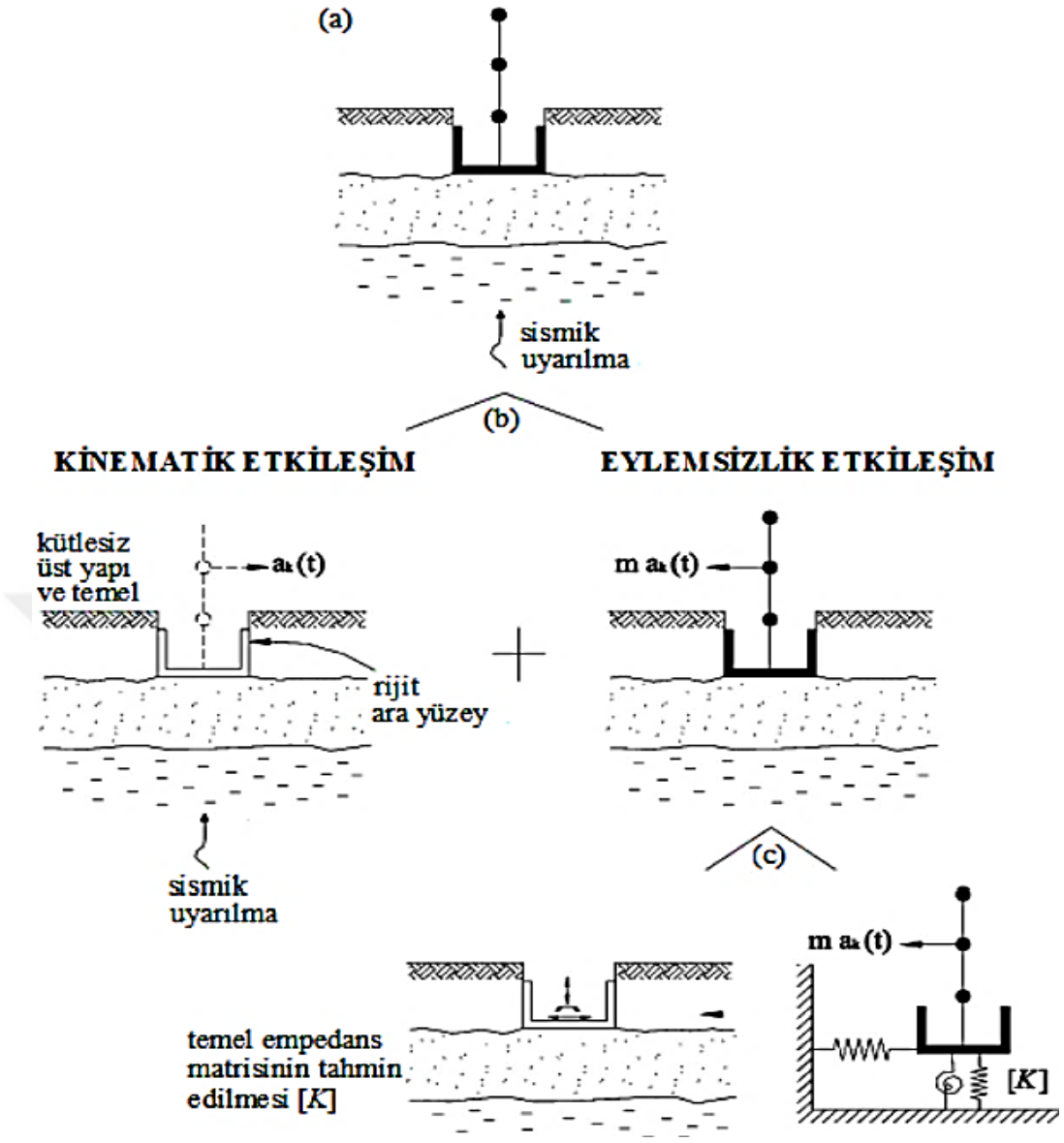
İkinci adım, zemin-temel etkileşiminin rijitlik ve sönümleme özelliklerini temsil eden empedans fonksiyonunu belirlenir. Atalet etkileşimi 2.6'da verilen hareket denklemi ile ifade edilir.

$$[M^*]\{\ddot{u}_{AE}\} + [C^*]\{\dot{u}_{AE}\} + [K^*]\{u_{AE}\} = -\left[M_{Yapı}\right]\{\ddot{u}_{KE} + \ddot{u}_{FF}\} \quad (2.6)$$

Eylemsizlik etkileşimi etkileri, temel-zemin arakesitinde yazılan empedans fonksiyonu aracılığıyla temsil edilebilir. Empedans fonksiyonunu belirlemek için rijit temel için toplamda altı serbestlik derecesi gereklidir. Rijit bir temel için titreşim modu, eksenler boyunca üç yerdeğiştirme ve bu eksenler etrafında üç dönüştür. Her bir titreşim moduyla ilişkili empedans fonksiyonu, rijitlik ve sönümleme katsayısı değerleri belirlenerek hesaplanabilir. Empedans fonksiyonları zemin kayma modülü (G), birim hacim ağırlığı (ρ), kayma dalga hızı (Vs), poisson oranı (ϑ), gömülü/yüzeysel temel olması durumu ve titreşim frekansına bağlıdır.

Empedans fonksiyonunu hesaplamak için, farklı araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Pais ve Causel [38], Gazetas [39] ve Mylonakis vd [40], temel (temel boyutları ve gömme durumu) ve zemin özelliklerini (Poisson oranı, zemin kayma dalgası hızı ve zemin kayma modülü) dikkate alarak yayların ve sönümleyicilerin rijitlik ve sönümleme özelliklerini hesaplamak için basit denklemler geliştirmiştir.

Altsistem yönteminin son adımı ise, yapının empedans fonksiyonlarına göre ve temelin maruz kaldığı yer hareketinin etkisi altında dinamik bir analizinin yapılmasıdır. Şekil 2.5'te bu çözüm adımlarının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.5 Yapı-zemin etkileşim probleminin altsistem yöntemi ile çözümü [41]

Empedans fonksiyonunu hesaplamak için, farklı araştırmacılar tarafından çeşitli analitik bağıntılar geliştirilmiştir [38], [39], [40]. Bunlar arasında en yaygın kullanılan çözüm, elastik bir yarı-uzaya oturan rijit temeller için geliştirilen çözümdür.

Buna göre, yapı-zemin sisteminin sönüm ve rijitlik karakterleri için karmaşık değerli empedans fonksiyonu Denklem 2.7 ile ifade edilebilir.

$$K_j = k_j(a_0, \vartheta) + i\omega c_j(a_0, \vartheta) \quad (2.7)$$

Burada, k_j, c_j, a_0 ve ϑ sırasıyla temel rijitliği, temel-zemin sönümünü, frekans parametresinin ve poisson oranını temsil eder.

Pais ve Causel [38], Gazetas [39] ve Mylonakis vd [40], empedans fonksiyonlarının çözümleri için zeminin özelliklerine (Poisson oranı, kayma dalgası hızı, kayma modülü) ve temelin boyut, gömülme durumlarına bağlı olarak kullanılabilecek yay ve sönümleyicilerin özelliklerini hesaplamak için denklemler önermiştir. Bu denklemlere dikkate alınarak yayların ve sönümleyicilerin rijitlik ve sönümleme özellikleri farklı eksenler boyunca ötelenme ve dönme olmak üzere 6 serbestlik derecesi için hesaplanabilir.

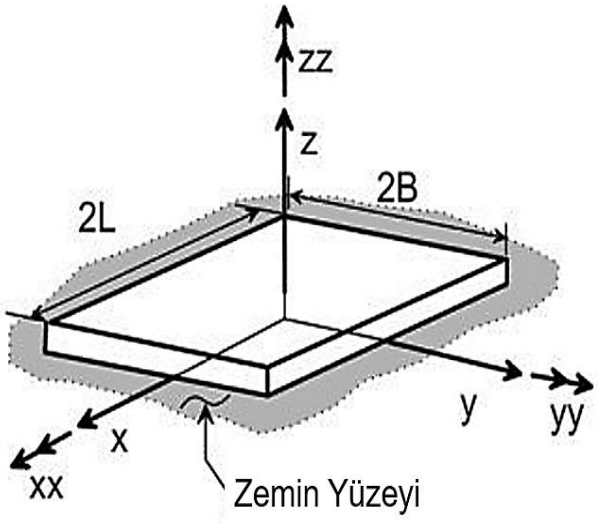
Dinamik rijitlik (k_j); zemin kayma modülü, zemin poisson oranı, temel boyutları ve dinamik düzeltme katsayısı α_j'nin bir fonksiyonu olup Denklem 2.8 ile hesaplanır.

$$k_j = K_j \text{ x } \alpha_j \quad (2.8)$$

$$K_j = GB^m f(B/L, \vartheta) \quad (2.9)$$

$$\alpha_j = f(B/L, a_0) \quad (2.10)$$

Denklemlerdeki K_j frekanstan bağımsız temel statik rijitliğini, a_0 boyutsuz frekansı, ϑ poisson oranını, B ve L temel boyutlarını ifade etmektedir. Ötelenme ve dönme modu için Denklem 2.9'daki m değerleri sırasıyla 1 ve 3 alınmaktadır [25].



Şekil 2.6 Yüzeysel dikdörtgen temel geometrisi [38]

Bu çalışmada temel-zemin ara kesitindeki tanımlanan yayların rijitlikleri, zemin ve temel özelliklerine göre Pais ve Kausel [38] tarafından Şekil 2.6'da gösterilen dikdörtgen temeller için önerilen ve Tablo 2.1'de verilen formüller ile hesaplanmıştır.

Tablo 2.1 Rijit dikdörtgen temellerin statik rijitlik formülleri [38]

Serbeslik Derecesi	Pais ve Causel (1988)
x- ekseninde ötelenme	$K_x = GB/(2\text{-}\vartheta)[6.8(L/B)^{0.65} + 2.4]$
y- ekseninde ötelenme	$K_y = GB/(2\text{-}\vartheta)[6.8(L/B)^{0.65} + 0.8(L/B) + 1.6]$
z- ekseninde ötelenme	$K_z = GB/(1\text{-}\vartheta)[3.1(L/B)^{0.75} + 1.6]$
x- ekseninde dönme	$K_{xx} = GB^3/(1\text{-}\vartheta)[3.2(L/B) + 0.8]$
y- ekseninde dönme	$K_{yy} = GB^3/(1\text{-}\vartheta)[3.73(L/B)^{2.40} + 0.27]$
z- ekseninde dönme	$K_{zz} = GB^3[4.25(L/B)^{2.45} + 4.06]$

3
DEPREM ETKİSİ ALTINDA DAVRANIŞ VE PERFORMANS KAVRAMI

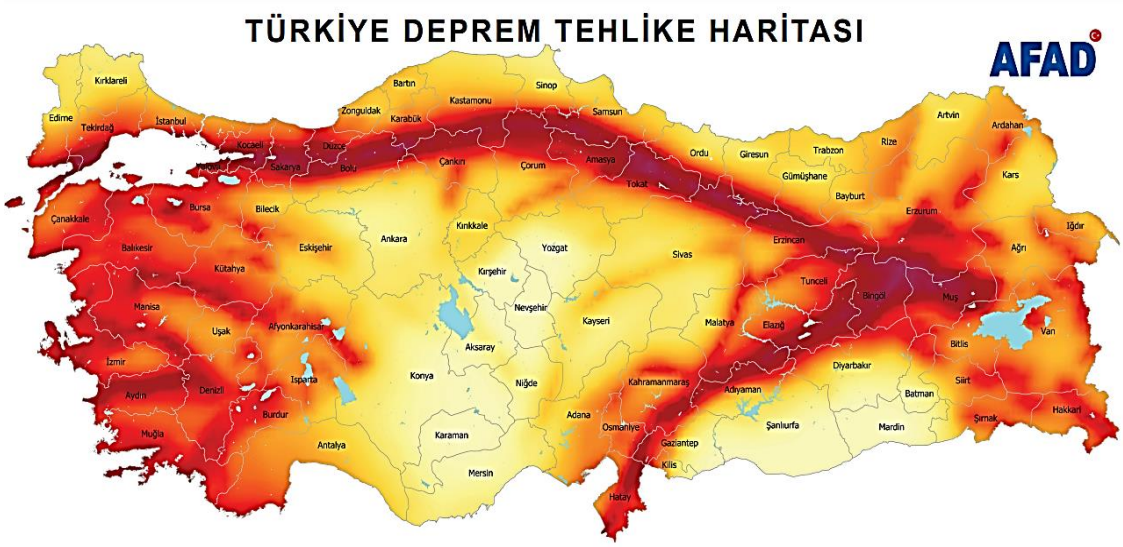
Deprem gibi bir doğal afetin tam olarak ne zaman, nerede, ne kadar büyüklükte olacağını tahmin etmek zor, gerçekleşmesinin önüne geçmek ise imkansızdır. Ancak mühendisler yapıları, deprem hareketlerinin oluşturduğu kuvvetlere dayanacak şekilde tasarlayıp can ve mal kaybını en aza indirebilirler. Birçok araştırmacı, çeşitli zararları en aza indirmek amacıyla yıllarca depreme dayanıklı yapı tasarımı felsefesi geliştirmeye çalışmıştır. Böylece geçmişten günümüze çeşitli tasarım kavramları ve deprem yönetmelikleri ortaya çıkmıştır.

Depreme dayanıklı yapı tasarım konusunda günümüzde daha fazla ön plana çıkan performansa dayalı tasarım kavramı, temel olarak bir binanın depremlere maruz kaldığında oluşacak hasar risklerini belirlemek ve deprem esnasında göstereceği davranışını belirlemek için geliştirilmiştir. Bu tasarım, farklı deprem yer hareketi seviyeleri ve performans kriterleri seçilerek yapının bu kriterleri sağlayacak şekilde tasarlanması esasına dayanmaktadır. Yapıların deprem esnasındaki davranışını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Depremde yapının davranışını tam olarak tahmin etmek zor olduğundan çeşitli parametrelere göre farklı performans seviye sınırları tanımlanarak, yapı ve elemanlarının bu performans seviye sınırlarına göre kontrolleri sağlanmaktadır. Uygun güvenlik sınırları tespit edilip bu sınırlar doğrultusunda hareket edilebilmesini sağlayan performansa dayalı tasarım, gerçekçi ve güvenilir tasarım yöntemi olarak kabul edilmektedir.

Bu bölümde, ülkemizde 2018 yılında güncellenen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde yer alan deprem yer hareketi düzeyleri, deprem yer hareketi spektrumları, yerel zemin sınıfları, deprem yer hareketinin tanımlanması, doğrusal olmayan davranış, bina performans düzeyleri, kesit hasar sınırları, doğrusal olmayan analiz yöntemleri ve ayrıca zeminlerin dinamik davranışları kısaca anlatılmıştır.

3.1 Deprem Yer Hareketleri

Deprem hareketi etkisindeki binalar için deprem yer hareketleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e [42] göre çeşitli parametreler kullanılarak tanımlanmaktadır. 2018 yılında değişen deprem yönetmeliği ile birlikte Türkiye deprem tehlike haritasında da değişiklik olmuştur. Deprem verileri, istenilen farklı konum ve deprem yer hareketi düzeyleri için Şekil 3.1'de verilen yeni 'Türkiye Deprem Tehlike Haritası' kullanılarak elde edilebilmektedir.



Şekil 3.1 Türkiye deprem tehlike haritası [43]

3.1.1 Deprem Yer Hareketi Düzeyleri

Yönetmeliğimizde deprem yer hareketi düzeyleri, belli büyüklükteki depremlerin tekrarlanma periyoduna ve 50 yılda aşılma olasılığına göre Tablo 3.1'deki gibi dört farklı şekilde tanımlanmıştır.

Tablo 3.1 Deprem yer hareketi düzeyleri

Deprem Yer Hareketi Düzeyleri	Aşılma Olasılığı (50 Yıl)	Tekrarlanma Periyodu (Yıl)
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1)	%2	2475
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2)	%10	475
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3)	%50	72
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4 (DD-4)	%68	43

3.1.2 Deprem Yer Hareketi Spektrumları

Bir deprem yer hareketi altında, belirli bir sönüm oranı için farklı periyotlara sahip tek serbestlik dereceli sistemlerin maksimum tepkilerinin fonksiyonu, deprem yer hareketi spektrumu olarak tanımlanmaktadır.

TBDY-2018'e göre deprem yer hareketi spektrumu, farklı deprem yer hareket düzeyine, yerel zemin etki katsayısına ve harita spektral ivme katsayısına bağlı tanımlamaktadır. Yeni yönetmelikle birlikte farklı deprem yer hareketi düzeylerine göre istenen veriler, AFAD'ın web adresinden elde edilebilir.

Türkiye Deprem Tehlike Haritaları kullanılarak farklı deprem yer hareketi düzeyleri için tanımlanan harita spektral ivme katsayıları, yerel zemin etki katsayıları dikkate alınarak Denklem 3.1'de verilen formüller ile tasarım spektral ivme kayıtlarına dönüştürülür. Denklemde, S_1 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısını, S_S kısa periyot bölgesi için harita spektral ivme katsayısını temsil etmektedir.

$$S_{DS} = S_S F_S \;\; ; \;\; S_{D1} = S_{S1} F_1 \tag{3.1}$$

Zemin koşulları ve harita spektral ivme katsayılarına göre belirlenen kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (F_S) Tablo 3.2'de ve 1.0 s periyot için yerel

zemin etki katsayısı (F_1) Tablo 3.3'te verilmiştir. Bu tablolarda yer almayan harita spektral ivme katsayıları için enterpolasyon yapılmaktadır.

Tablo 3.2 Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları F_S

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için F_S					
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S = 1.25$	$S_S \geq 0.30$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılır.					

Tablo 3.3 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları F_1

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için F_1					
	$S_S \leq 0.10$	$S_S = 0.20$	$S_S = 0.30$	$S_S = 0.40$	$S_S = 0.50$	$S_S \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılır.					

Yatay elastik tasarım spektral ivmeleri $S_{ae}(T)$, doğal titreşim periyoduna bağlı olarak Denklem 3.2'de verilen formül ile hesaplanmaktadır. Yatay elastik tasarım spektrumunun köşe periyotları olan T_A ve T_B değerleri Denklem 3.3'ten elde edilir. T_L sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodudur.

$$S_{ae}(T) = (0.4 + 0.6\frac{T}{T_A})S_{DS} \qquad (0 \le T \le T_A)$$

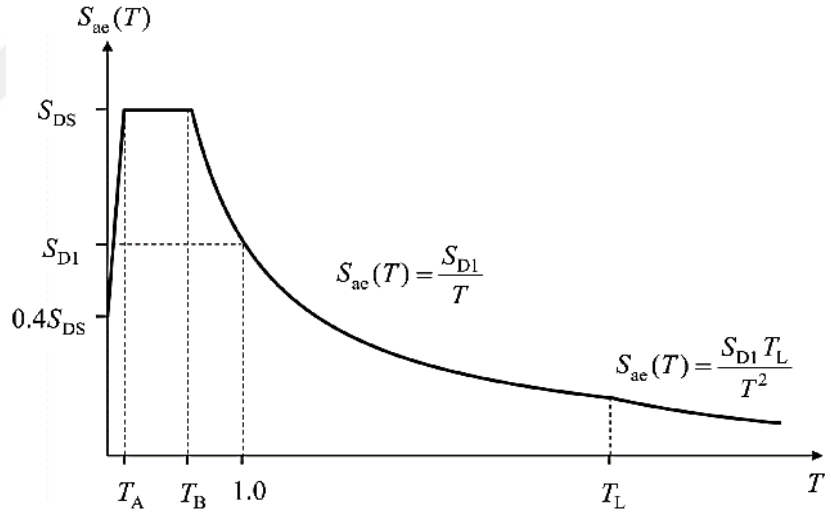
$$S_{ae}(T) = S_{DS} \qquad (T_A \le T \le T_B)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \qquad (T_B \le T \le T_L) \qquad (3.2)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \qquad (T_L \le T)$$

$$T_A = 0.2\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \qquad T_B = \frac{S_{D1}}{S_D} \qquad T_L = 6 \text{ sn} \qquad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak elde edilen veriler ile Şekil 3.2'de gösterilen yatay elastik tasarım spektrumu oluşturulabilir.



Şekil 3.2 Yatay elastik tasarım ivme spektrumu

Zeminlerin farklı türlerine göre elastik tasarım ivme spektrumunun değerleri değişkenlik göstermektedir. TBDY-2018'de altı farklı şekilde sınıflandırılan ZA, ZB, ZC, ZD, ZE ve ZF zeminlerine ait tanımlamalar ve zeminlerin 30 m derinliğindeki ortalama kayma dalgası hız değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Yerel zemin sınıfları

Zemin Sınıfı	Tanımlama	$V_{S,30}$ (m/s)
ZA	Sağlam, sert kayalar	>1500
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760-1500
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360-760
ZD	Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180-360
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak-katı kil tabakaları veya PI>20 ve w>%40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (cu<25 kPa) içeren profiller	<180
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler	

3.1.3 Deprem Yer Hareketi Tanımlanması

Zaman tanım alanında analizlerin yapılabilmesi için tasarım deprem yer hareketine uygun deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Bu kayıtlar seçilirken bölgenin depremsellik özelliği, faya yakınlık, fay mekanizması, zemin özellikleri gibi parametrelere dikkat edilmesi gerekmektedir.

Dikkate alınan bölgeye ait önceden yaşanmış deprem kayıtlarının elde edilebilmesi durumunda analizlerde bu kayıtlar kullanılabilir. Gerçek deprem kayıtları ile sağlıklı bilgiler elde edilebileceği için gerçek deprem kayıtlarının kullanımı önerilmektedir [44]. İstenilen koşullara uygun deprem tanımlamasının güç olması durumunda, bölgede yaşanmış deprem parametreleri ile uyumlu olacak şekilde benzetilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Analizlerde kullanılacak deprem yer hareketinin özelliklerine göre yapıların davranışı farklılık göstereceğinden dolayı zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesaplarda en az 11 deprem yer hareketi takımı kullanılmalı ve kayıt takımı sayısı da aynı deprem için üçten fazla olmamalıdır.

Yönetmelikte, uygun olarak seçilen deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için spektral uyuşum sağlayacak şekilde ölçeklendirme ve basit ölçeklendirme yöntemi olarak iki farklı yöntemden bahsedilmiştir.

Basit ölçeklendirme yönteminde; bir veya iki boyutlu hesaplarda dikkate alınacak deprem kayıtlarının spektrumları ortalamasının $0.2T_p$ ile $1.5T_p$ arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerinden büyük olacak şekilde ölçeklendirmeler yapılır. Üç boyutlu hesaplarda ise seçilen her bir deprem kaydı için elde edilen bileşke spektrumlarının ortalamasının $0.2T_p$ ile $1.5T_p$ arasındaki genliklerinin, deprem yer hareketi için belirlenen tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranı 1.3'ten büyük olacak şekilde deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilir.

Spektral uyuşum sağlayacak şekilde ölçeklendirme yönteminde, dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumunun ordinatlarından daha büyük olmalıdır. Deprem kayıtlarının spektral uyuşumun sağlanacak şekilde ölçeklendirilmesi çeşitli programlar kullanılarak yapılabilmektedir.

3.2 Doğrusal Olmayan Davranış ve Plastik Mafsal Kavramı

Yapıların taşıyıcı sistemlerinin maruz kaldığı çeşitli dış yükler sonucunda elemanlarda meydana gelen gerilmeler malzemelerin elastik sınırının ötesine geçebilmektedir. Bu nedenle dış yükler altında taşıyıcı sistemlerin davranışı tanımlanırken gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için yapı tasarımında doğrusal olmayan davranış dikkate alınır.

Yapı malzemelerinin doğrusal davranmaması sebebiyle gerilme-şekildeğiştirme davranışının doğrusal olmayışı ve geometrik şekildeğişimlerinden dolayı denge bağıntılarının doğrusal olmayışı, yapı sistemlerinin düşey ve yatay yükler altında doğrusal olmayan davranış göstermesinin temel nedenleridir.

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan analizinde, belirli bir dayanım kapasitesine sahip yapı elemanlarında yüklerin artmasıyla birlikte rijitlik kaybı meydana gelir ve elemanlar bazı bölgelerde maksimum dayanım değerlerine ulaşırlar. Daha

sonra bu elemanlar sabit yük altında deformasyon yapmaya devam ederek kapasitelerini kaybedene kadar enerji sönümlemeyi sürdürür.

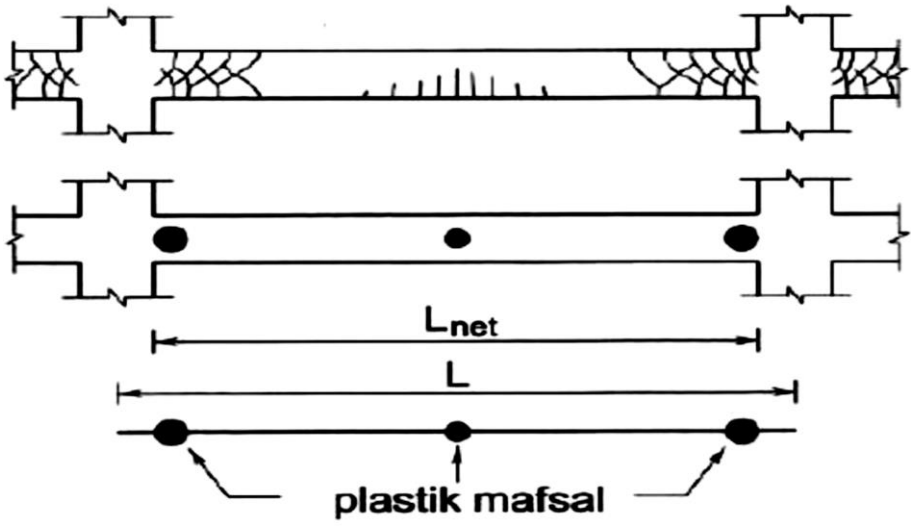
Yapı taşıyıcı sistemini oluşturan elemanlarının elastik sınırları aşarak doğrusal olmayan davranış göstermesi sonucu taşıyıcı sistemde hasar olarak adlandırılan plastik şekildeğiştirmeler oluşur. Doğrusal olmayan davranış, bu plastik şekildeğiştirmelerin oluştuğu bölgelere plastik mafsal tanımlaması yapılarak modellenebilir.

TBDY-2018'e göre plastik mafsal davranış modelleri, iki farklı şekilde yayılı plastik mafsal davranışı ve yığılı plastik mafsal davranışı olarak sınıflandırılmıştır.

Yayılı plastik davranış modelinde, dış yüklerden dolayı yapı elemanlarındaki şekildeğiştirmelerin yalnızca belirli bölgelerle sınırlı kalmayıp elemanların uzunluğu boyunca yayılı olacak bir biçimde meydana geleceği kabulüne dayanır. Bu modelde doğrusal olmayan davranışı daha hassas şekilde elde edebilmek için kesit yeterli sayıda sonlu hücrelere bölünür. Bu hücrelerde beton ve donatı temsil edilerek gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri göz önüne alınabilir. Yayılı plastik davranış modeli çoğunlukla perde elemanların doğrusal olmayan modellenmesinde kullanılmaktadır.

Yığılı plastik davranış modeli ise, dış yüklerden dolayı yapı elemanlarındaki şekildeğiştirmelerin belirli noktalarda toplanacağı kabulüne dayanmaktadır. Bu davranış modelinde, plastik mafsal bölgelerinin dışında kalan bölgelerde kesitin elastik davrandığı kabul edilmektedir. Bu davranış modelinde plastik şekildeğiştirmelerin, iç kuvvetlerin plastik kapasitelerine ulaştığı sonlu uzunluktaki bölgeler boyunca yayılı biçimde oluştuğu varsayılır ve bu bölgenin uzunluğu plastik mafsal boyu (L_p) olarak adlandırılmaktadır. TBDY-2018'e göre plastik mafsal boyu, kesit boyunun yarısı ($L_p = 0.5h$) kabul edilir. Yığılı plastik mafsal, kiriş elemanların uçlarına moment-eğrilik ilişkisi ile tanımlanırken, kolon elemanların uçlarına kolonların taşıma gücü eksenel yük ile değiştiğinden dolayı karşılıklı etki diyagramı ile tanımlanmaktadır.

Deprem sırasında plastik mafsalların genellikle kirişlerin mesnet bölgelerinde, kolonlarda ise daha çok zorlanan alt ve üst kesit bölgelerinde oluşması beklenir. Şekil 3.3'te kirişlerde plastik mafsal meydana gelebilecek yerler gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Kirişte plastik mafsal noktaları [45]

3.3 Bina Performans Düzeyleri

Bina performans hedefleri, deprem etkisi altındaki bina taşıyıcı sistemleri için TBDY-2018'de Şekil 3.4'te gösterdiği gibi dört farklı bina performans düzeyi tanımlanmıştır.

- **Kesintisiz Kullanım (KK) Performans Düzeyi**

Yapı taşıyıcı elemanlarında hasarın meydana gelmediği veya meydana gelen hasarın ihmal edilebilir ölçüde kaldığı performans düzeyidir.

- **Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi**

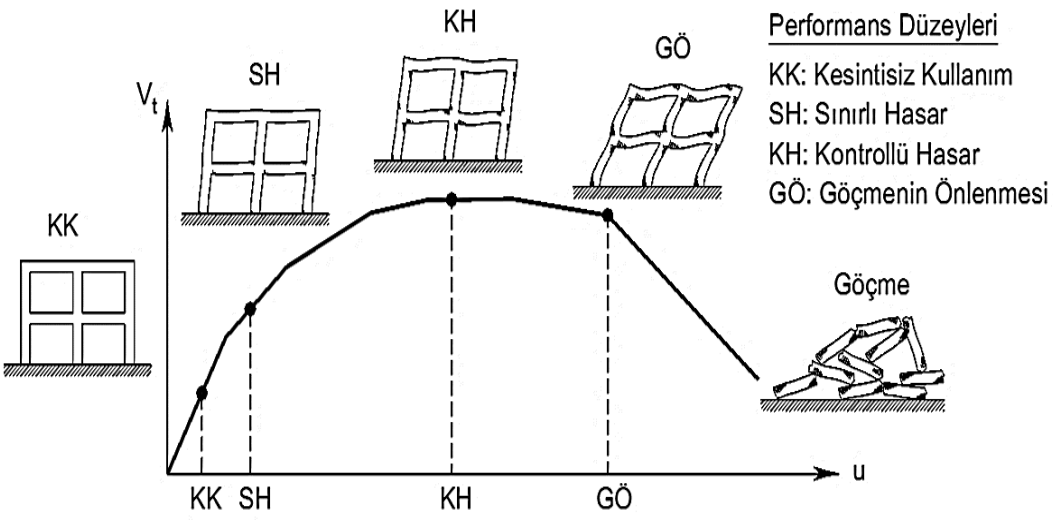
Yapı taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği, doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı performans düzeyidir.

- **Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi**

Yapı taşıyıcı sistem elemanlarında can güvenliğini sağlamak üzere, ağır olmayan ve onarılması mümkün olabilecek hasar meydana gelen performans düzeyidir.

- **Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi**

Yapı taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde hasarın meydana geldiği ve binanın kısmen veya tamamen göçmesinin önlendiği performans düzeyidir.



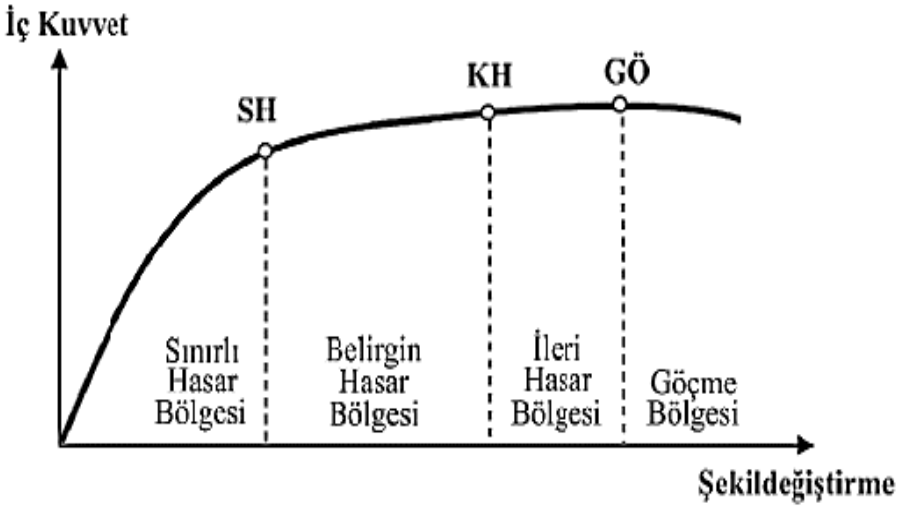
Şekil 3.4 Bina performans düzeyleri [45]

3.4 Kesit Hasar Bölgeleri ve Sınırlar

TBDY-2018'de performans değerlendirilmesinde kullanılmak amacıyla yayılı ve yığılı plastik davranış modelleri dikkate alınarak hesaplanan durumlar için izin verilen kesit hasar sınırları Tablo 3.5'te hasar bölgeleri ise Şekil 5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 İzin verilen kesit hasar sınır değerleri

Sınır	Göçmenin Önlenmesi	Kontrollü Hasar	Sınırlı Hasar
Beton Şekil Değiştirme Sınırı	$\varepsilon_c{}^{GÖ} = 0.0035 + 0.04\sqrt{w_e} < 0.018$	$\varepsilon_c{}^{KH} = 0.75\varepsilon_c{}^{GÖ}$	$\varepsilon_c{}^{SH} = 0.0025$
Donatı Şekil Değiştirme Sınırı	$\varepsilon_s{}^{GÖ} = 0.4\varepsilon_{su}$	$\varepsilon_s{}^{KH} = 0.75\varepsilon_s{}^{GÖ}$	$\varepsilon_s{}^{SH} = 0.0075$
Plastik Dönme Sınırı	$\theta_p{}^{GÖ} = \frac{2}{3}\left[(\Phi_u - \Phi_y)L_p\left(1 - 0.5\frac{L_p}{L_s}\right) + 4.5\Phi_u\, d_b\right]$	$\theta_p{}^{KH} = 0.75\theta_p{}^{GÖ}$	$\theta_p{}^{SH} = 0$



Şekil 3.5 Kesit hasar bölgeleri

3.5 Doğrusal Olmayan Hesap

Deprem etkisindeki yapıların tasarım yaklaşımlarından olan şekildeğiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım, taşıyıcı yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışının hesaba katılmasıyla yönetmeliklerde öngörülen performans hedefleri ile deprem yer hareketleri altındaki sistemin hesabına dayanır.

Şekildeğiştirme esaslı olan yöntemlerde, belirli bir deprem etkisi altında oluşan ve doğrusal olmayan davranışı yansıtan plastik mafsallarda meydana gelecek şekildeğiştirmelerin, olması düşünülen performans hedeflerine göre tanımlanan şekildeğiştirme ve dayanım kapasiteleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmesi hedeflenir.

Şekildeğiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım yaklaşımı kapsamında kullanılan doğrusal olmayan hesap yöntemleri; itme yöntemleri ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntemlerdir. Bu çalışma kapsamındaki analizler zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

3.5.1 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi

Bu yöntem deprem yer hareketi etkisi altında, yapının doğrusal olmayan davranışının dikkate alınması ile taşıyıcı sistem hareket denkleminin doğrudan integrasyon ile adım adım çözüldüğü yöntemdir. Sistem rijitlik matrisinin doğrusal olmayan davranış nedeni ile zamanla değişmesi sonucunda kesitlerde oluşan şekildeğiştirmeler ve iç kuvvet değerleri her bir zaman adımı aşamasında hesaplanarak yapı elemanlarındaki kesit hasar durumları belirlenebilir.

TBDY-2018'e göre zaman tanım alanında yapılacak doğrusal olmayan hesaplarda en az 11 deprem yer hareketi takımı kullanılır. Birbirine dik yatay iki doğrultudaki ivme kayıtları taşıyıcı sistemin (X) ve (Y) asal eksenleri doğrultusunda aynı anda birlikte etki ettirilir. Daha sonra ivme kayıtlarının eksenleri 90° döndürülerek hesap tekrarlanır.

3.6 Zeminlerin Dinamik Davranışı

Dinamik yükler altında zemin davranış ve karakterinin belirlenmesi, yapıların projelendirilmesinde önemli bir yere sahiptir. Depremlerden kaynaklanan tekrarlı yükler, zeminlerin gerilme-deformasyon ve mukavemet özelliklerini değiştirerek zemin davranışında büyük problemlere yol açabilmektedir.

Deprem anında oluşan dalgalar, yüzeye doğru hareket ederken zemin tabakalarının özelliklerini değiştirirken aynı zamanda zemin tabakaları da özelliklerine göre gelen deprem esnasında oluşan dalgaların genliklerinde ve frekans içeriklerinde değişime sebep olurlar. Bu karşılıklı etkileşimin sonuçlarının belirlenebilmesi için zemin özellikleri belirlenerek iyi modellenmesi gerekmektedir.

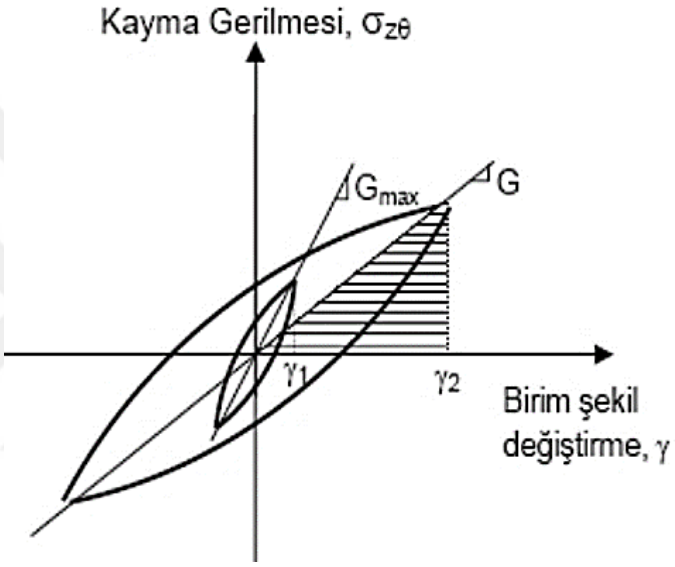
Tekrarlı yükler altında zemin dinamik özelliklerini belirleyen iki önemli parametre kayma modülü ve sönüm oranıdır [46]. Bu parametrelerin belirlenmesi yapılacak analizler için önemlidir.

Zeminin kayma rijitliğini ifade eden kayma modülü (G) değeri, artan kayma birim şekildeğiştirmeyle azalmaktadır. Şekil 3.6'da gösterildiği gibi birim

şekildeğiştirmesinin küçük olduğu başlangıç durumunda, kayma modülü en büyük (G_{max}) değerindedir ve Denklem 3.4 ile belirlenebilmektedir.

$$G_{max} = \rho V_S^2 \tag{3.4}$$

Bu denklemdeki V_S zeminin kayma dalgası hızı, ρ ise zeminin birim hacim ağırlığıdır.



Şekil 3.6 Çevrimsel yükleme altında kayma modülü

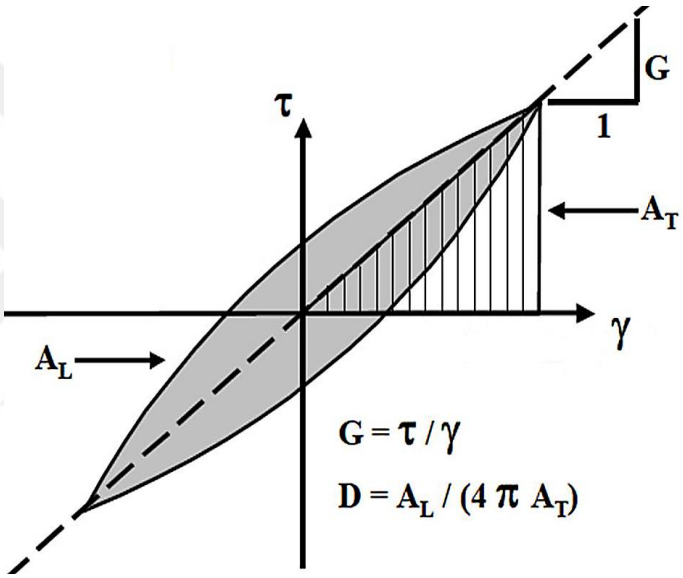
Zemin kayma gerilmesinin (τ), kayma birim şekildeğiştirmesine (γ) bölünmesi ile zeminlerin kayma modülleri (G) hesaplanmaktadır. Dinamik yükler altında kayma modülü yükleme döngüsü boyunca değişir. Ancak çevrimsel döngülerin tamamı için ortalama değeri Denklem 3.5 ile hesaplanabilir.

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \tag{3.5}$$

Bu denklemdeki τ_c ve γ_c sırasıyla kayma gerilmesini ve kayma şekildeğiştirmesini ifade etmektedir [47].

Kayma modülü çevrimsel döngünün eğimi ile ilgiliyken, çevrimsel döngünün genişliği ise döngü sonucunda sönümlenen enerjinin miktarı ile ilgilidir. Bir döngünün sönümlediği enerji miktarı Şekil 3.7'de gösterilen döngünün içerisindeki alan ile gösterilmektedir. Zeminin sönüm oranı Denklem 3.6 ile elde edilebilir.

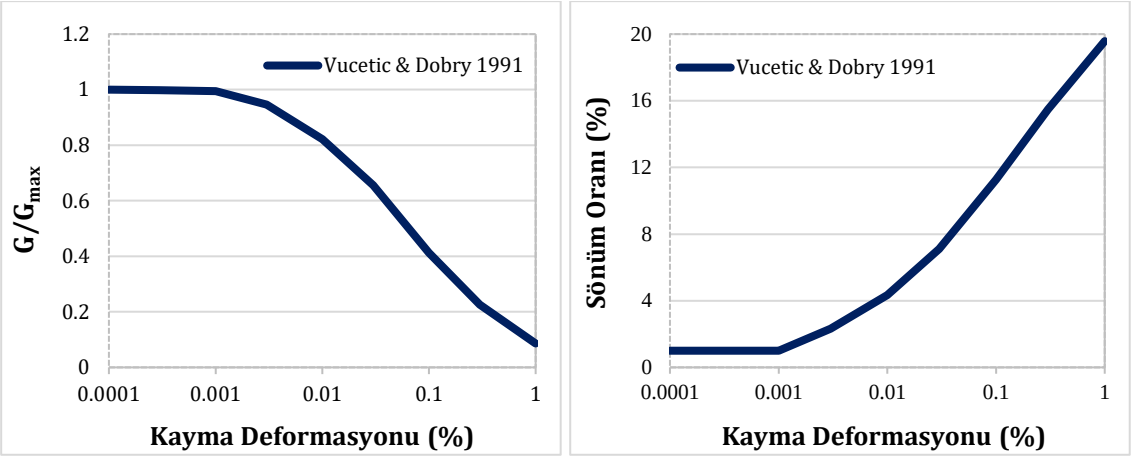
$$D = \frac{A_L}{4\pi A_T} = \frac{A_L}{2\pi G\gamma_C^2} \tag{3.6}$$



Şekil 3.7 Çevrimsel yükleme altında kayma modülü ve sönüm oranı [46]

Zeminin düşük kayma deformasyonlarında sekant kayma modülü yüksek olurken, çevrimsel döngüler ile artan deformasyonlar için bu değerin azaldığı Şekil 3.6'da görülmektedir. Çevrimsel döngülerin uçlarına denk gelen noktalar omurga (iskelet) eğrisi olarak tanımlanmaktır. Kayma modülü-kayma deformasyonları ile sönüm oranı-kayma deformasyonları arasındaki ilişkiyi temsil eden omurga eğrileri çeşitli araştırmacılar tarafından araştırılmıştır [46], [48], [49].

Bu çalışmada Vucetic ve Dobry [48] tarafından önerilen ve Şekil 3.8'de verilen omurga eğrileri kullanılmıştır.



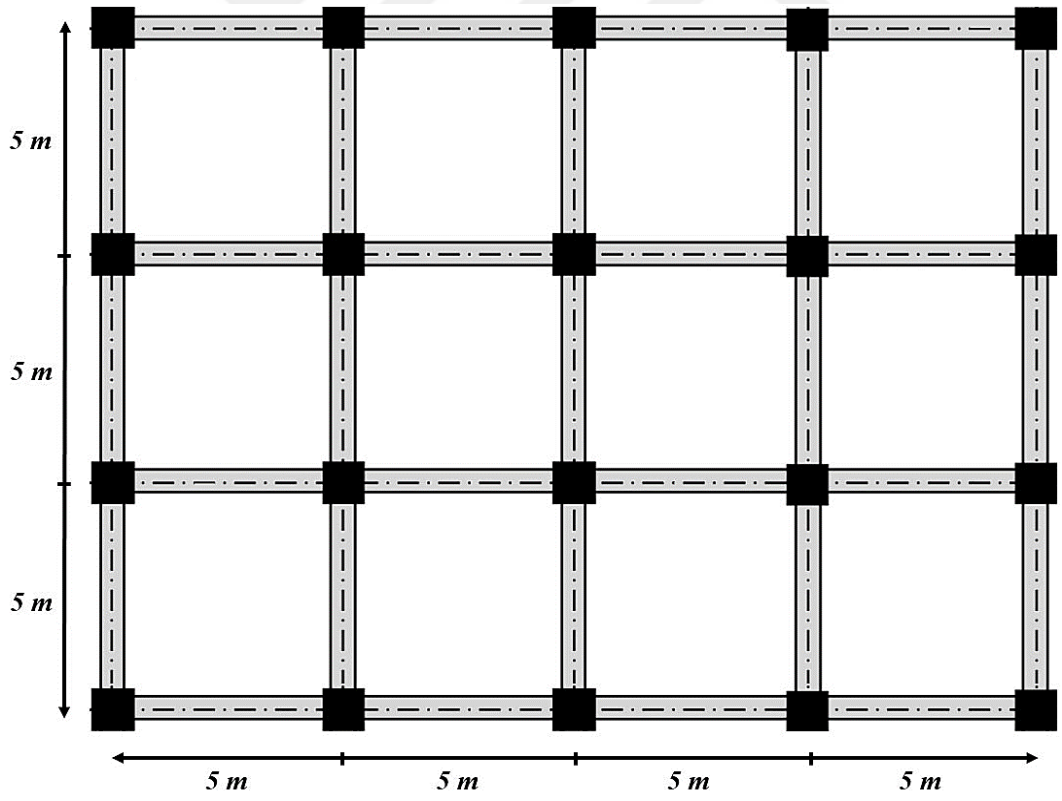
Şekil 3.8 Kayma modülü azalım ve zemin sönüm oranı eğrileri

Deprem hareketiyle birlikte zemin tabakalarının davranışını ve oluşacak etkilerin belirlenmesi zemin tepki analizleri ile yapılmaktadır. Zemin tepki analizinde, zemin davranışını tanımlamak için kayma modülü ve sönüm parametreleri kullanılırken doğrusal olmayan davranış için çevrimsel döngünün belirlenmesi gerekir. Zemin tepki analizleri, eşdeğer doğrusal zemin davranışı veya doğrusal olmayan zemin davranışı dikkate alınarak bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu yapılabilmektedir. Kayma deformasyonlarının düşük olduğu durumlarda eşdeğer doğrusal analiz yöntemi iyi sonuçlar verebilirken, deformasyonların büyük olduğu durumlarda ise doğrusal olmayan analiz yöntemi daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Yapılan çeşitli çalışmalarda doğrusal olmayan zemin modellemesinin özellikle yumuşak zeminlerin davranışını daha fazla etkilediği sonucuna varılmıştır [4], [5], [50]. Ayrıca, yer tepki analizlerinde kullanılacak olan deprem kayıtlarının seçimi de önemli yere sahiptir. Bu çalışmada, zemin tepki analizleri Vucetic ve Dobry [48] tarafından killi zeminler için önerilen eğriler dikkate alınarak DEEPSOIL [56] programında gerçekleştirilmiştir.

4
SAYISAL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

4.1 Yapı Özellikleri ve Modelleme

Çalışmada, 5- ve 10- katlı betonarme yapılar göz önüne alınmıştır. Yapı modelleri, TBDY-2018'e göre üç boyutlu çerçeve sistemler olarak modellenmiştir. Yapı planları Şekil 4.1'de gösterildiği gibi x yönünde 4x5 m, y yönünde 3x5 m'dir. Kat yükseklikleri tüm yapılarda 3 m olarak alınmıştır. Yapı kullanım tipi konut olarak seçilmiş ve DD-2 tasarım depremi (50 yılda aşılma olasılığı %10) dikkate alınarak farklı bina modellerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir.

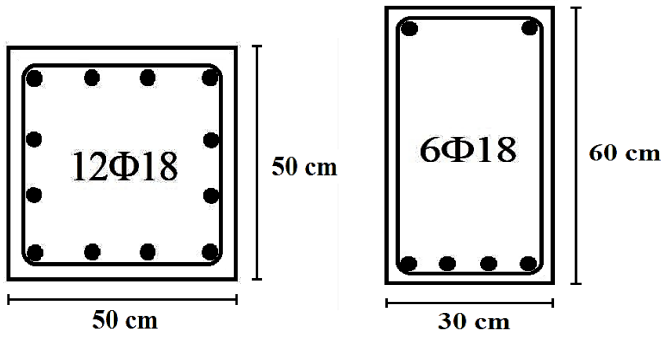


Şekil 4.1 Yapı planı

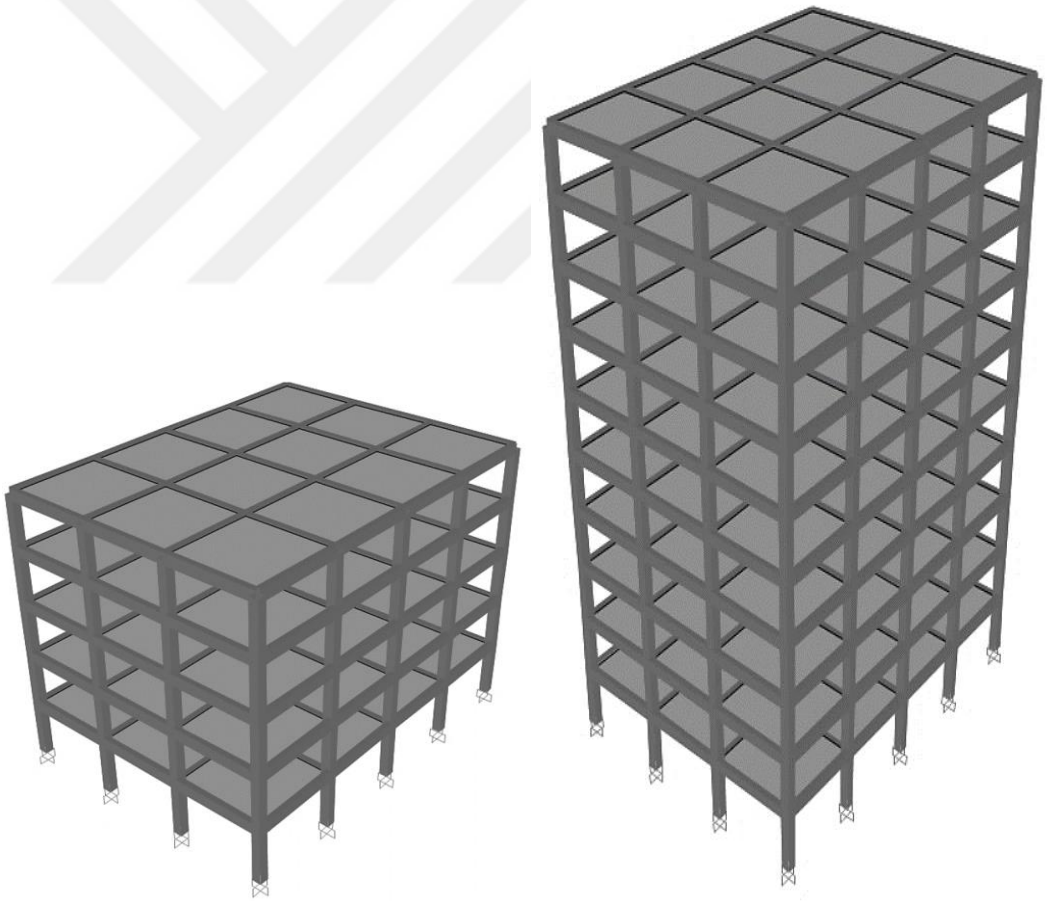
Şekil 4.2'de gösterildiği gibi tüm katlarda kiriş boyutları 30x60 cm, kolon boyutları 50x50 cm ve döşeme kalınlığı 15 cm olarak belirlenmiştir. Beton basınç dayanımı 30 MPa, çelik akma dayanımı ise 420 MPa seçilmiştir. Yüksek süneklik düzeyine göre tasarlanan yapı modellerinde taşıyıcı sistem davranış katsayı 8, hareketli yük azaltma katsayısı ise konut tipi için 0.3 alınmıştır. Yapıların tüm özellikleri Tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4.1 Yapı özellikleri

Özellikler	Parametreler	Değerler
Yapı Özellikleri	Kat yüksekliği (h)	3 m
	Toplam yükseklik (H)	15 m ve 30 m
	Yapı tipi	Konut
	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)	8
	Yapı önem katsayısı (I)	1
	Bina yükseklik sınıfı (BYS)	5
	Deprem tasarım sınıfı (DTS)	1, 1a
Kesit Özellikleri	Kolon boyutları	0.5x0.5 m
	Kiriş boyutları	0.3x0.6 m
	Döşeme kalınlığı	0.15 m
	Kolon donatıları	12ϕ18
	Kiriş donatıları	Üst 2ϕ18 Alt 4ϕ18
Malzeme Özellikleri	Beton özellikleri	C30 (30 MPa)
	Çelik özellikleri	S420 (420 MPa)
	Beton elastisite modülü	32 GPa
	Çelik elastisite modülü	200 GPa
Yapı Yükleri	İç duvar yükü	2.5 kN/m^2
	Dış duvar yükü	4.0 kN/m^2
	Sabit yük (G)	2.5 kN/m^2
	Hareketli yük (Q)	2.0 kN/m^2
	Kar yükü (S)	0.75 kN/m^2
Spektral Parametreler	Deprem yer hareketi düzeyi	DD-2
	Kısa periyot spektral ivme katsayısı (S_S)	0.968
	1 s periyot spektral ivme katsayısı (S_1)	0.269
	Kısa periyot yerel zemin etki katsayısı (F_S)	1.126
	1 s periyot yerel zemin etki katsayısı (F_1)	2.955
	En büyük yer ivmesi (PGA)	0.398 g
	En büyük hız (PGV)	24.56 m/s
	Kısa periyot için spektral ivme katsayısı (S_{DS})	1.09
	1 s periyot için spektral ivme katsayısı (S_{D1})	0.795
	Tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (T_A)	0.049 s
	Tasarım ivme spektrumu köşe periyodu (T_B)	0.243 s



Şekil 4.2 Kolon ve kiriş kesitleri



Şekil 4.3 5- ve 10- katlı yapı modelleri

Farklı yüksekliğe sahip yapılar Şekil 4.3'te gösterildiği gibi SAP2000 [51] programında modellenmiş olup, kolon ve kiriş yapı elemanları çubuk eleman olarak düşünülmüştür. Programda 'section designer' arayüzü kullanılarak yapılara ait kolon ve kiriş eleman kesitlerinin özellikleri tanımlanmıştır.

Doğrusal olmayan yapı davranışı, kolon ve kiriş uçlarında yığılı plastik davranış özelliğindeki plastik mafsalların tanımlanmasıyla sağlanmıştır. Kiriş ve kolon elemanların uç bölgelerine denk gelecek şekilde plastik mafsal ataması yapılmıştır. Plastik mafsalların tanımlanabilmesi için kolon ve kiriş eleman kesitleri SAP2000 programında tanımlanmış ve moment-eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Eksenel kuvvet etkisinde olmayan ve basit eğilmeye çalışan kirişler için M3 plastik mafsal özelliği seçilmiştir.

Tablo 4.2'de, 300 mm x 600 mm boyutlarındaki kiriş kesiti için moment-eğrilik analizi gerçekleştirilerek sonuçlar verilmiştir.

Tablo 4.2 Kirişlerde moment-eğrilik analizi

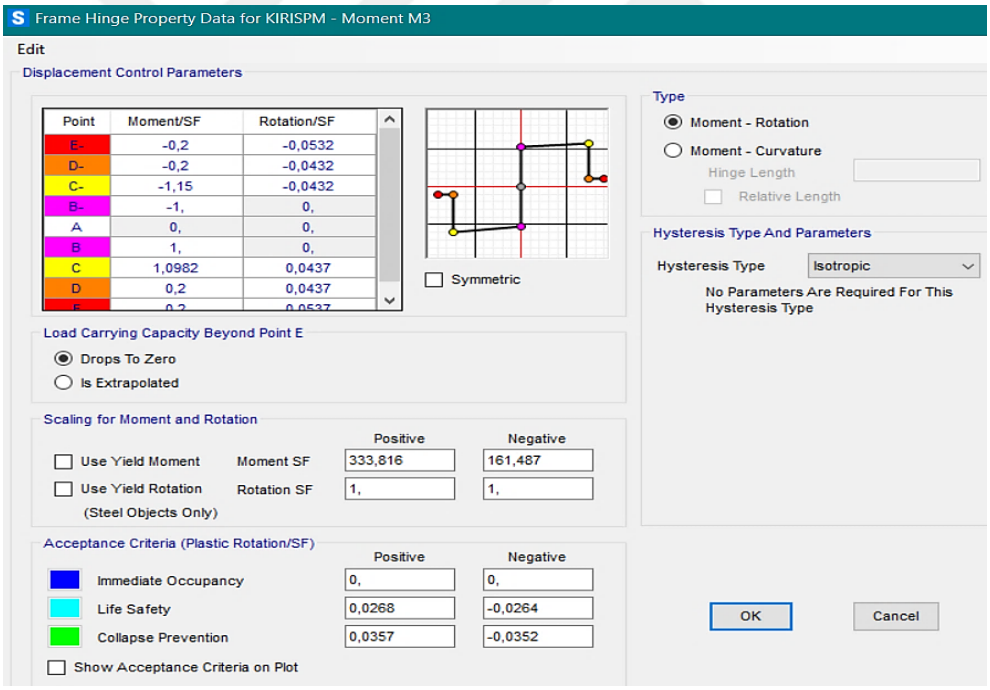
Etkileşim Yüzeyi	L_P (m)	M_Y (kNm)	Φ_Y (rad/m)	M_U (kNm)	Φ_U (rad/m)	θ_P (rad)	M_U/M_Y
0°	0.30	333.82	0.00804	366.61	0.1536	0.04367	1.098
180°	0.30	161.49	0.00718	185.67	0.1510	0.04315	1.150

Kolonlar hem eğilme hem de eksenel kuvvet etkisinde olduğundan plastik mafsal özellikleri P-M2-M3 tipinde seçilmiştir. Kolonlarda moment-eğrilik diyagramlarının elde edilmesinde, 0, 45 ve 90 derece etkileşim yüzeyleri için kolonların eksenel basınç kapasitelerinin %15'ine ve %45'ine karşılık gelen yükler altında oluşan moment-eğrilik ilişkileri kullanılmıştır [52], [53].

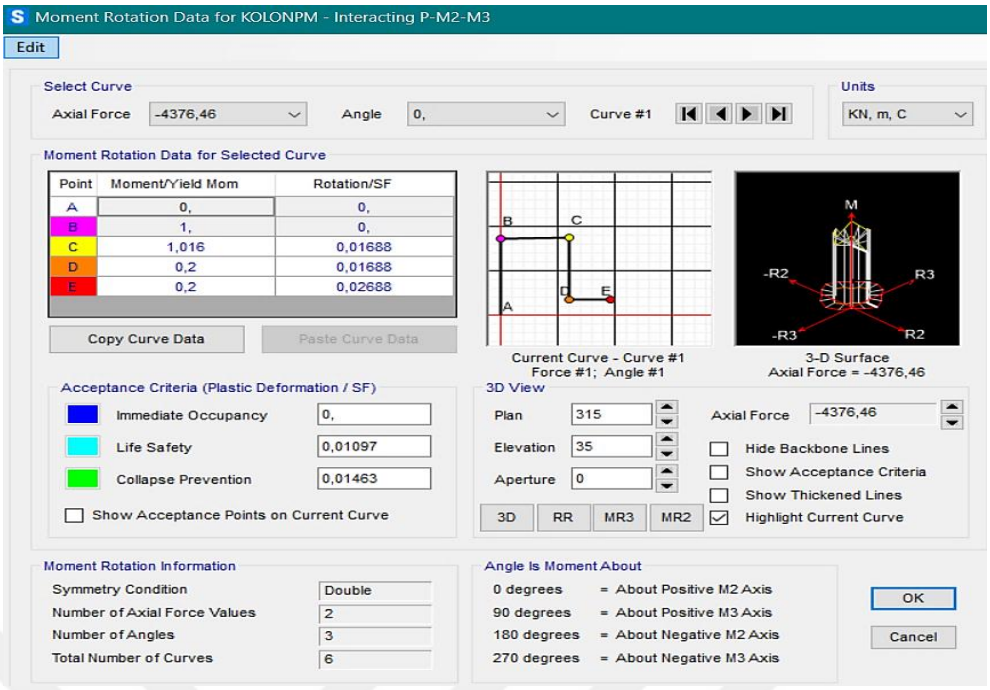
500 mm x 500 mm boyutlarındaki kolon kesiti için moment-eğrilik analizi gerçekleştirilerek sonuçlar Tablo 4.3'te verilmiştir. Elde edilen moment-dönme verileri ile plastik mafsal tanımlamaları kiriş elemanlar için Şekil 4.4'te, kolon elemanlar için ise Şekil 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.3 Kolonlarda moment-eğrilik analizi

Normal Kuvvet Yüzdesi	15%		45%	
N (kN)	-1458.82		-4376.46	
Açı	0-90°	45°	0-90°	45°
M_Y (kNm)	633.439	612.071	861.837	813.420
Φ_Y (rad/m)	0.01142	0.00954	0.01238234	0.00940
M_U (kNm)	660.469	636.873	875.633	831.343
Φ_U (rad/m)	0.1696	0.0818	0.0799	0.0558
L_P (m)	0.25	0.25	0.25	0.25
θ_P (rad)	0.03955	0.01806	0.01688	0.01159
M_U/M_Y	1.043	1.041	1.016	1.022



Şekil 4.4 Kirişte plastik mafsalların tanımlanması



Şekil 4.5 Kolonda plastik mafsalların tanımlanması

Yönetmelikte verilen yığılı plastik mafsal özelliklerine göre modellenen kiriş ve kolon yapı elemanlarında çatlamış (etkin) kesit rijitliği, TBDY-2018'de verilen Denklem 4.1'deki formül ile hesaplanmış ve yapı elemanlarına yansıtılmıştır.

$$(EI)_e = \frac{M_y}{\theta_y}\frac{L_s}{3} \tag{4.1}$$

Denklemde M_y ve θ_y sırasıyla akma momentini ve elemanların uçlarındaki plastik mafsal akma dönmesini ifade etmektedir. L_s değeri kiriş ve kolonlarda açıklığın yarısı olarak alınmıştır. Plastik mafsal akma dönmesi Denklem 4.2 ile hesaplanmıştır.

$$\theta_y = \frac{\Phi_y L_s}{3} + 0.0015\eta\left(1 + 1.5\frac{h}{L_s}\right) + \frac{\Phi_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}} \qquad (4.2)$$

Denklem 4.2'de yer alan Φ_y, akma eğriliğini, h kesit yüksekliğini, d_b mesnete kenetlenmiş donatı çaplarının ortalamasını, f_{ye} ve f_{ce} ise malzemelerin beklenen dayanımını ifade etmektedir. η değeri kolon ve kirişlerde 1 değerini almaktadır.

Kolonların etkin kesit rijitlikleri, kolon üzerindeki düşey yükler altında meydana gelen eksenel kuvvetler dikkate alınarak belirlenmiştir. Yapının G+nQ yüklemesi etkisinde analizi yapılmış, bu sonuçlara göre kolon üzerinde oluşan eksenel kuvvetler dikkate alınmıştır.

Yapı elemanları yığılı plastik davranışa göre modellenmiş ve plastik dönme sınırları, Göçmenin Önlenmesi (GÖ), Kontrollü Hasar (KH), Sınırlı Hasar (SH) seviyeleri için Denklem 4.3'te verilen yönetmelikteki sınırlara göre belirlenmiştir.

$$\theta_p{}^{GÖ} = \frac{2}{3}\left[(\Phi_u - \Phi_y)L_p\left(1 - 0.5\frac{L_p}{L_s}\right) + 4.5\Phi_u d_b\right]$$

$$\theta_p{}^{KH} = 0.75\theta_p{}^{GÖ} \qquad (4.3)$$

$$\theta_p{}^{SH} = 0$$

4.2 Zemin Özellikleri ve Modelleme

Karışık bir problem olan yapı-zemin sistemleri Bölüm 2'de detayları verilen altsistem yöntemi ve doğrudan yöntemi kullanılarak çözülebilmektedir. Yapı-zemin etkileşim problemi bu iki farklı analiz yöntemi kullanılarak sonuçlar arasındaki farklılıklar değerlendirilmiştir.

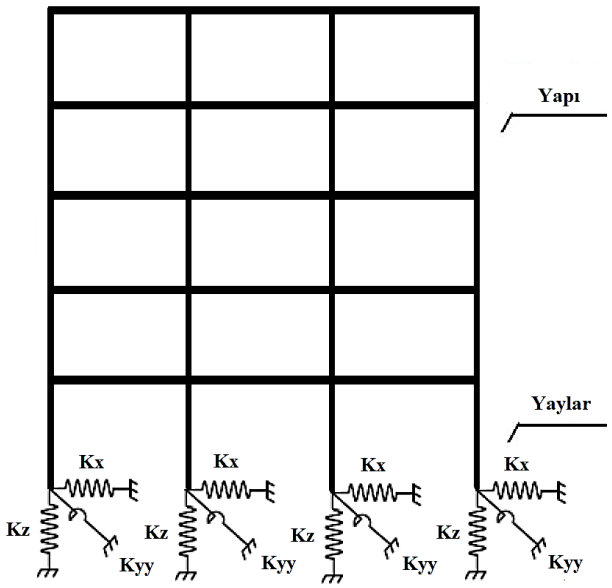
Çalışma kapsamında, TBDY-2018'e göre ZE zemin sınıfında yer alan ve 30 m derinliğinde killi tabakadan oluşan zemin dikkate alınmıştır. Tablo 4.4'te dikkate alınan zemine ait özellikler verilmiştir.

Tablo 4.4 Zemin özellikleri

Zemin sınıfı	V_s (m/s)	ρ (kN/m^3)	ϑ (Poisson oranı)	G (kN/m^2)
ZE	100	16	0.35	16000

4.2.1 Altsistem Yöntemi Modeli

Yapı-zemin etkileşiminin sismik tepkiler üzerindeki iki ana etkisi, atalet etkileşimi ve kinematik etkileşimi Bölüm 2'de açıklanmıştır. Bu çalışmada sadece atalet etkileşimi etkileri dikkate alınmıştır. Yapı temelleri 2 x 2 m boyutlarında yüzeysel tekil kare temel olarak modellenmiştir. Temeller rijit kabul edilmiş ve gömme etkileri ihmal edilmiştir. Örnek olarak, Şekil 4.6'da 5- katlı model için yapı-zemin sisteminin eşdeğer yaylarla temsili gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Yapı-zemin sisteminin yaylar ile temsili

Zemin elastik yaylar kullanılarak modellenmiştir. Pais ve Kausel [38] tarafından önerilen rijitlik katsayıları, yayların her bir serbestlik derecesi için zemin özelliklerine ve temel boyutuna bağlı olarak temel-zemin ara kesitinde tanımlanan empedans fonksiyonları ile elde edilmiş ve Tablo 4.5'te hesaplanan değerler verilmiştir.

Tablo 4.5 Yay rijitlik değerleri

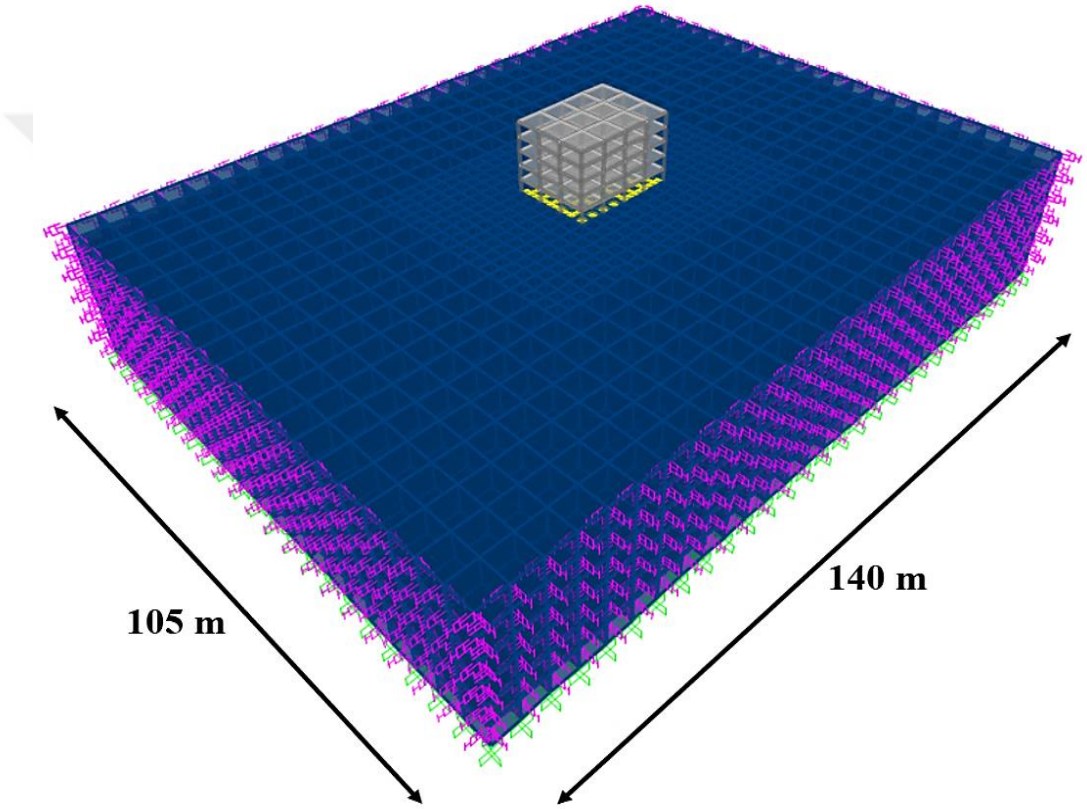
Zemin Tipi	**ZE**
2L (m)	2.0
2B (m)	2.0
Statik Rijitlik Değerleri	
K_x (kN/m)	89212.12
K_y (kN/m)	89212.12
K_z (kN/m)	115692.31
K_{xx} (kNm/rad)	98461.54
K_{yy} (kNm/rad)	98461.54
K_{zz} (kNm/rad)	132960.00

Çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin kinematik etkileşimi, temellerin yüzeysel kabul edilmesi ile ihmal edilmiştir. Sönüm oranıyla ilgili olarak, analizde tüm yapısal sistem için sabit bir %5 sönüm olduğu varsayılmıştır.

4.2.2 Doğrudan Yöntem Modeli

Doğrudan yöntem ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı üç boyutlu ortak sistem modelleri SAP2000 programında oluşturulmuştur. Bu modellerde 0.4 m kalınlığında radye temel kullanılmıştır. Yapı ile zemin arasında oluşabilecek göreceli yerdeğiştirmelerin ihmal edilebilmesi için arayüz elemanlar kullanılmamıştır. Anakaya derinliği 30 m olarak seçilmiştir ve anakayanın uygun bir sınır koşulu ile temsil edilebilmesi için literatürdeki çeşitli çalışmalarda kullanılan rijit sınır (ankastre), zemin profilinin taban yüzeyine tanımlanmıştır [1], [4], [5], [13].

Sonlu elemanlar ile zemin profilinin modellenmesi hesaplama açısından maliyetli olduğundan zemin profilinin düşey kenarlarında Lysmer ve Kuhlemeyer [31] tarafından önerilen ve birçok çalışmada kullanılan, sınırlardan yansıyan enerjiyi absorbe edebilen viskoz sönümleyiciler tanımlanarak sınırlı boyutta bir model oluşturulmuştur [2], [3], [10], [15]. Eşdeğer sönüm değerleri ρVA katsayıları ile hesaplanan bu sönümleyiciler, sınırın normali ve teğetleri doğrultusunda yerleştirilmiştir. A, ρ ve V sırasıyla etkili alan, zemin birim hacim ağırlığı ve zemin kayma dalgasını temsil etmektedir.

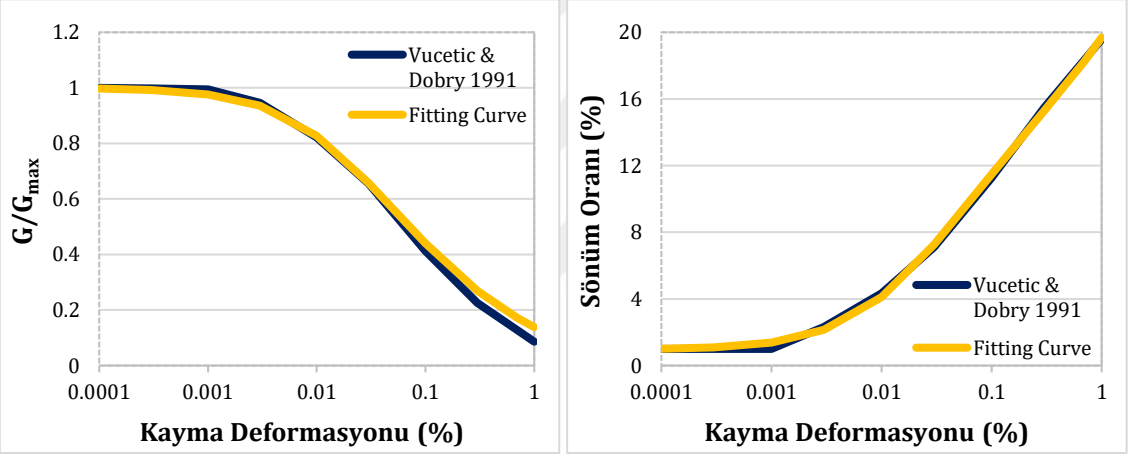


Şekil 4.7 Yapı-zemin etkileşim modeli

Sınırdan yansıyan dalgaların etkilerinin ihmal edilebilmesi için farklı çalışmalar göz önünde bulundurularak sönümleyiciler ilgili bölgeden yeterince uzağa yerleştirilmiştir [1], [5], [10], [13]. Zemin boyutları, yapı temel boyutlarının 7 katı olacak şekilde x yönünde 140 m, y yönünde 105 m olarak modellenmiştir. Anakaya derinliği ise 30 m olacak şekilde dikkate alınmıştır.

Ayrıca, deprem dalgalarının modellenen zemin profili içinde doğru şekilde yayılmasının sağlanması için sonlu elemanların boyutları yapıya yakın bölgelerde 2.5 m, uzak bölgelerde ise 5 m olarak belirlenmiştir.

Çalışmada deprem anında zeminin gerçek davranışının analizlere yansıtılabilmesi için doğrusal elastik olmayan zemin modeli benimsenmiştir. Bunun için kayma deformasyonları ile ilişkili sönüm ve kayma modülü azalım eğrileri dikkate alınmış, analizlerde kullanılan zeminler için Vucetic ve Dobry [48] tarafından önerilen omurga eğrileri kullanılarak Şekil 4.8'de gösterildiği gibi eğri uydurulması gerçekleştirilmiştir. G/G_{max} ve sönüm oranı eğrileri SAP2000 programına tanımlanmıştır.



Şekil 4.8 Kayma modülü azalım ve zemin sönüm oranı eğri uydurma

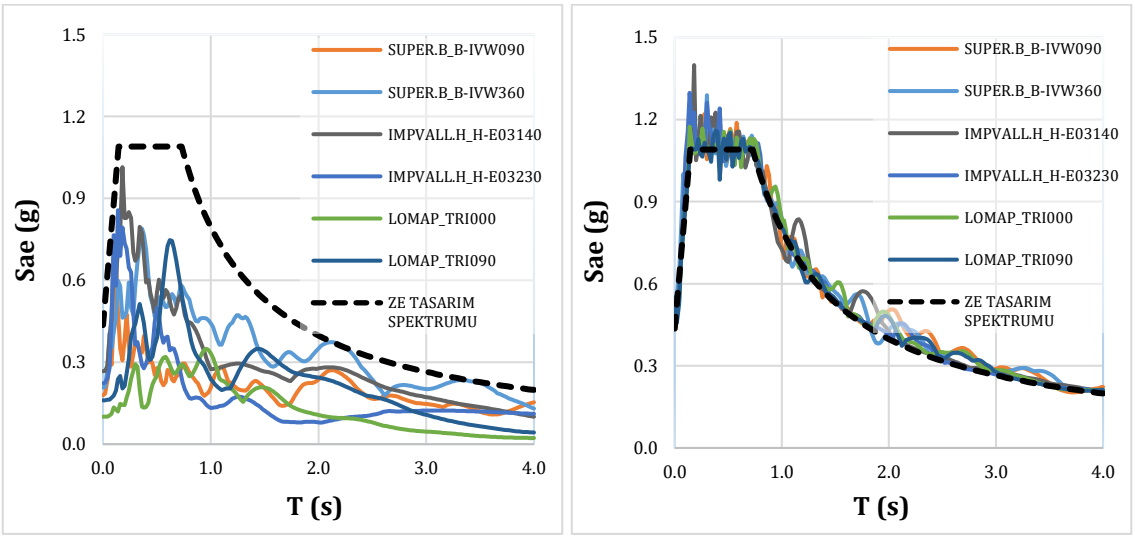
4.3 Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, TBDY-2018'de verilen tasarım ivme spektrumu dikkate alınarak 3 farklı deprem kaydı seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Deprem kayıtlarının seçilmesinde PEER [54] veri tabanı kullanılmıştır. Deprem büyüklükleri 6.5 ile 7.0 arasında, kayıt istasyonlarının faya olan uzaklıkları 10 ile 80 km arasında, ZE zemin sınıfında yer alan kayma dalgası hızları 180 m/s'den küçük 3 farklı ivme kaydı seçilmiş ve seçilen kayıtlar Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

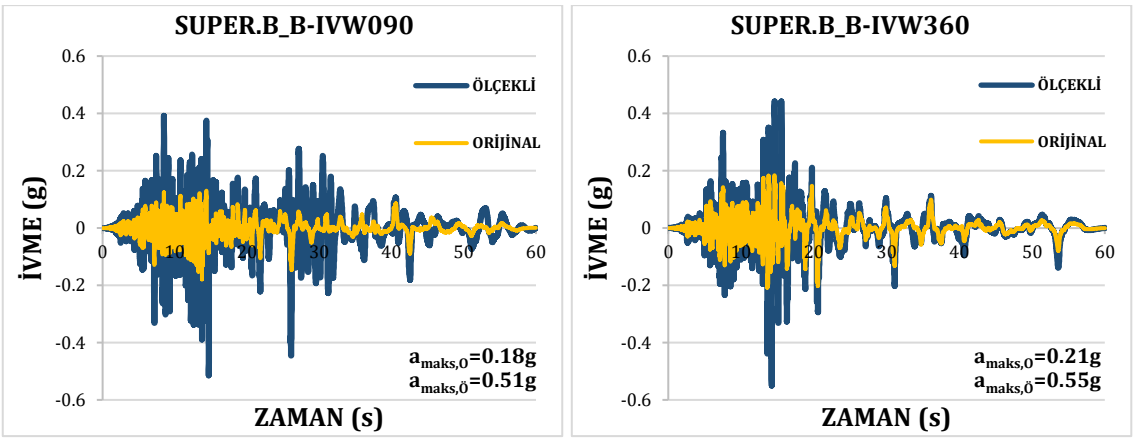
Tablo 4.6 Seçilen deprem kayıtları özellikleri

Deprem	İstasyon	Yıl	Büyüklük (Mw)	PGA (g)	PGV (cm/s)	V_S (m/s)	R_{rup} (km)
Imperial Valley-06	El Centro Array 3	1979	6.53	0.267	47.97	162.94	12.85
Superstition Hills-02	Imperial Valley Wildlife Liquefaction Array	1987	6.54	0.208	36.21	179.00	23.85
Loma Prieta	Treasure Island	1989	6.93	0.160	33.2	155.11	77.42

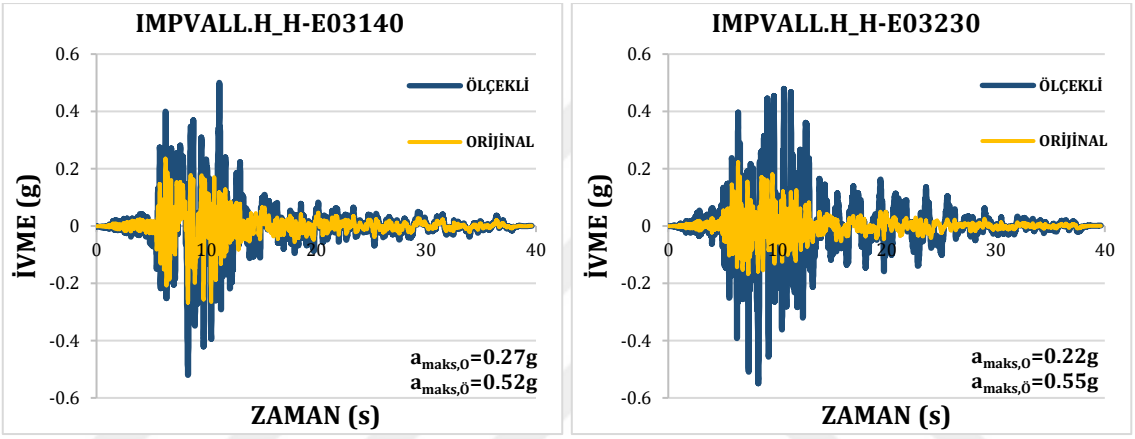
Deprem kayıtlarının ölçeklendirme işleminde SEISMOMATCH [55] programı kullanılmıştır. Orijinal ve ölçekli deprem kayıtlarına ait deprem spektrum grafikleri Şekil 4.9'da, ivme-zaman grafikleri ise Şekil 4.10'da verilmiştir. Ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtları SAP2000 programına tanımlanmıştır.



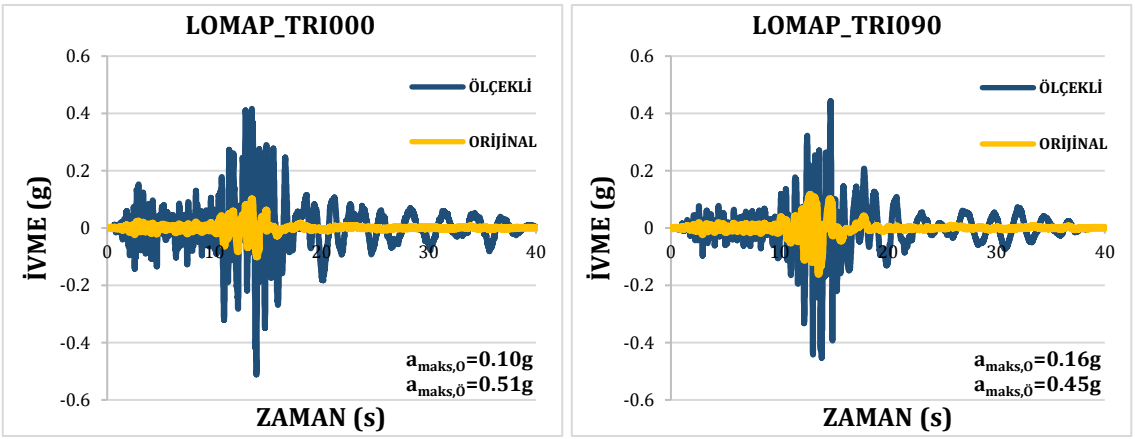
Şekil 4.9 Orijinal ve ölçekli deprem spektrumları



(a)



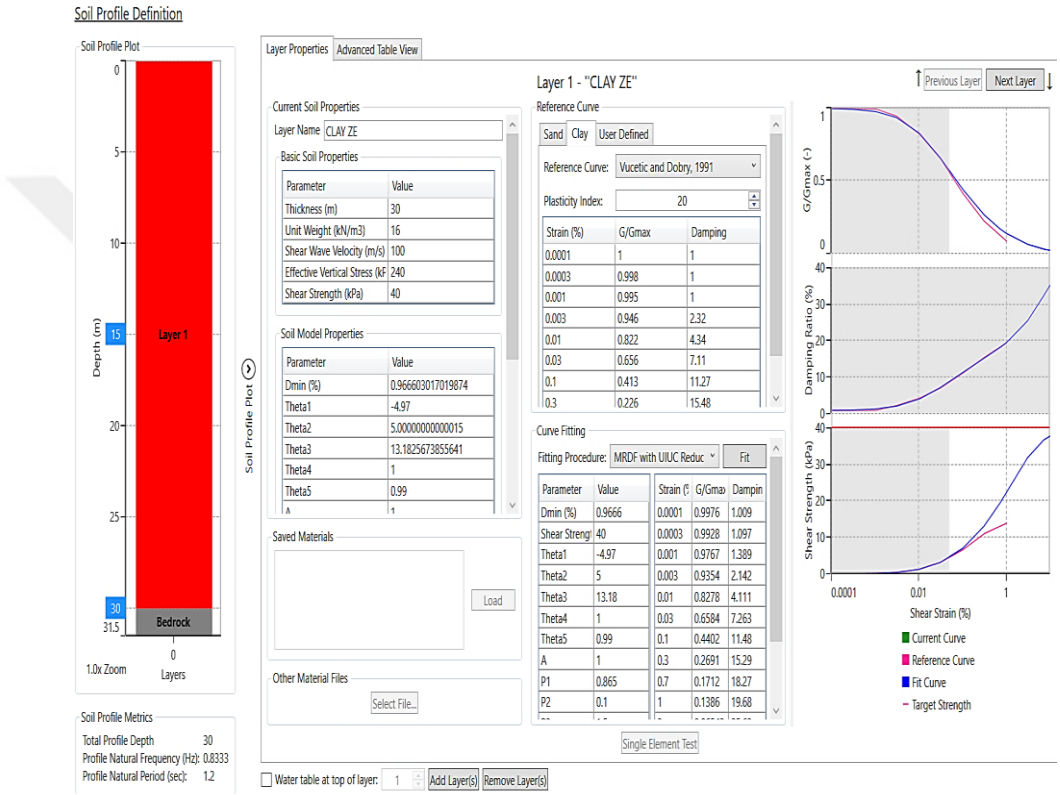
(b)



(c)

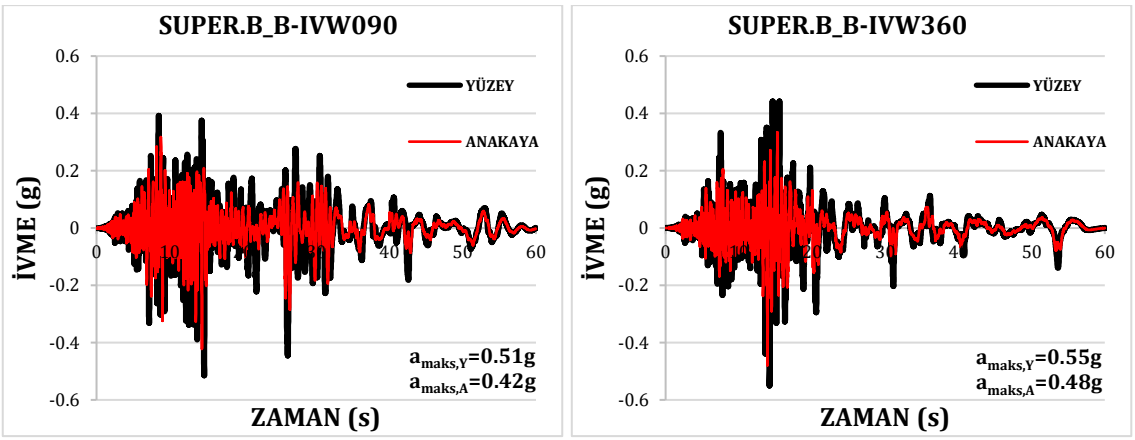
Şekil 4.10 Orijinal ve ölçekli deprem ivme kayıtları; a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi

Seçilen deprem kayıtları zemin yüzeyinden elde edilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Bu kayıtlar ankastre mesnetli ve altsistem yöntemi ile modellenen yapıların analizinde kullanılmıştır. Doğrudan yöntem ile analizi yapılan yapılarda ise deprem kayıtları anakayada karşılık gelen kayıtlara dönüştürülmüştür. Dekonvolüsyon adı verilen bu dönüşüm için DEEPSOIL [56] programı kullanılmıştır.

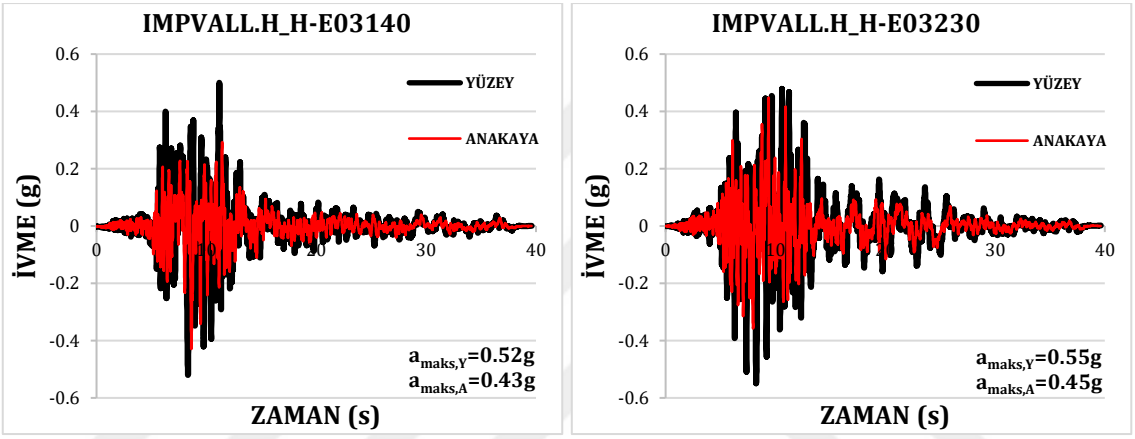


Şekil 4.11 Deepsoil programı arayüzü

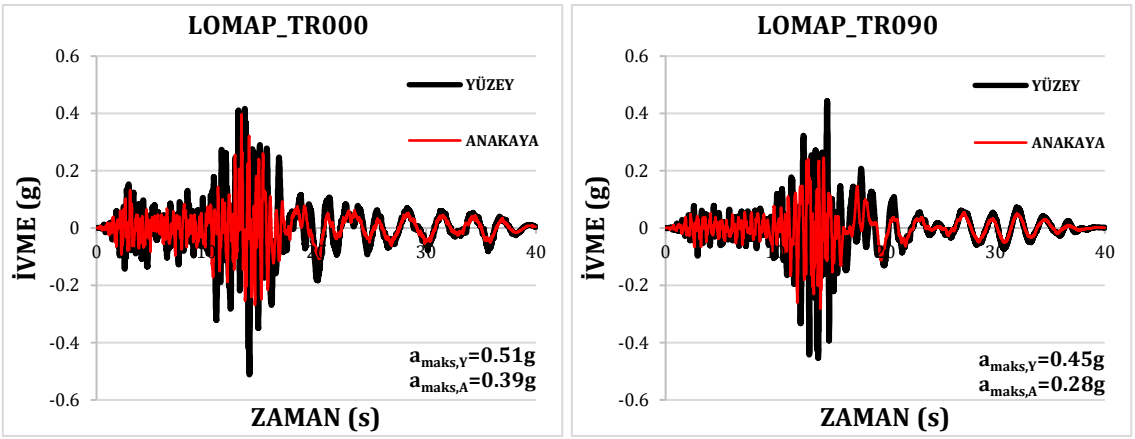
Kayma deformasyonlarıyla ilişkili kayma modülü oranı (G/G_{max}) ve sönüm oranı eğrileri Vucetic ve Dobry [48] tarafından önerilen referans eğriler dikkate alınarak, seçilen zemin özelliklerine bağlı eğri uydurması ile anakaya üzerindeki kayıtlara dönüştürülen ivme kayıtları Şekil 4.11'de verilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.12 Anakayaya indirilen kayıtların ivme kayıtları; a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi

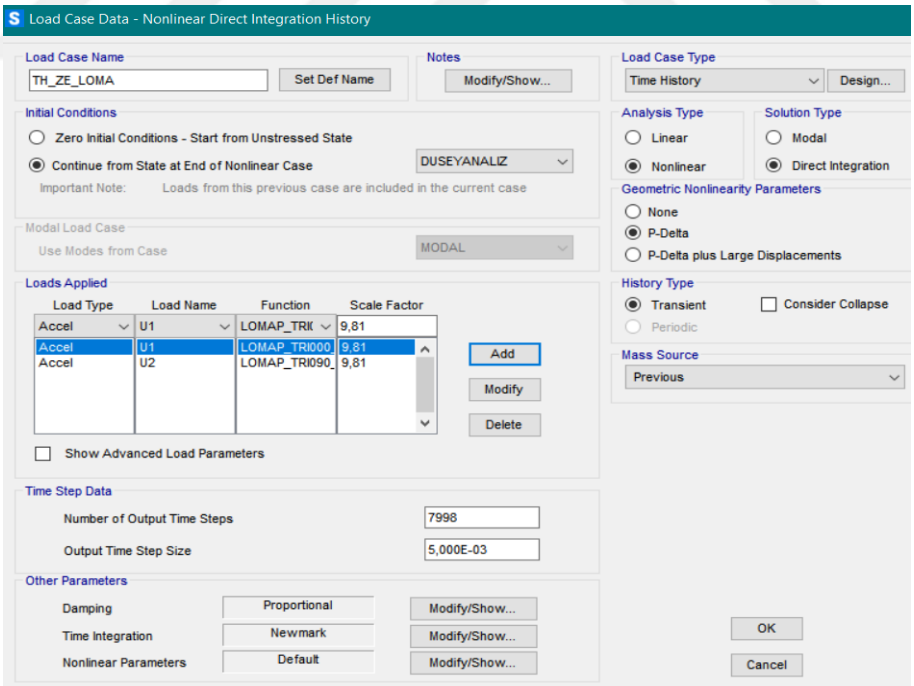
Depremde düşey yük etkileri TBDY-2018'de verilen Denklem 4.4 ve Denklem 4.5'e göre dikkate alınmıştır.

$$G+Q_e+0.2S+0.3E_d^{(Z)} \tag{4.4}$$

$$E_d^{(Z)}=2/3\ S_{DS}G \tag{4.5}$$

Denklemlerde $E_d^{(Z)}$ düşey deprem etkilerini, G sabit yükleri, S kar yüklerini ve Q_e ise hareketli yüklerin etkisini ifade etmektedir.

Deprem hesapları yapılmadan önce, statik hesap tanımlaması için yapı sistemine artımsal olarak statik düşey yükler uygulanmıştır. Başlangıç koşulları için doğrusal olmayan statik analizin sonuçları dikkate alınmış ve deprem yükleri Şekil 4.13'teki gibi programa tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13 Deprem kayıtlarının tanımlanması

4.4 Analiz Bulguları

Çalışmada, 5- ve 10- katlı betonarme yapılar için ankastre ve yapı-zemin etkileşimini farklı yöntemlerle dikkate alarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmadaki analizler kapsamında farklı yüksekliğe ve modellere sahip yapıların periyotları, kat yerdeğiştirmeleri, göreli kat öteleme oranları, taban kesme kuvvetleri ve kolon-kiriş yapı elemanlarının kesit hasar durumları karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir.

4.4.1 Yapı Periyotları

Zemin etkilerinin dikkate alınması ile yapı esnekliğinde değişmeler meydana gelmektedir. Esnekliğin değişmesi ile yapıların doğal titreşim periyotlarında da değişiklikler meydana gelir. Yapılan analizler sonucu, incelenen binaların modal analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.7'de verilmiştir. Sonuçlara göre; zemin etkilerinin altsistem yöntemi ile dikkate alınması durumunda temel titreşim periyotları; 5- katlı yapılarda %5.94, 10- katlı yapılarda %6.18 oranında artarken, doğrudan yöntem ile dikkate alınması durumunda ise 5- katlı yapılarda %6.58, 10- katlı yapılarda %7.13 oranında artmıştır. Periyotların artış oranı ilk modlarda daha yüksektir. Ayrıca, periyotların artış oranının yapı yüksekliğine ve zemin etkilerinin dikkate alınma yöntemlerine göre değiştiği görülmüştür.

Tablo 4.7 Titreşim periyodu sonuçları

Yapılar	Modeller	Mod 1 (s)	Mod 2 (s)
5- Katlı	Ankastre Model	1.414	1.394
	Altsistem Model	1.498	1.470
	Doğrudan Model	1.507	1.473
	Maks. Değişim (%)	6.58	5.67
10- Katlı	Ankastre Model	2.849	2.799
	Altsistem Model	3.025	2.943
	Doğrudan Model	3.052	2.959
	Maks. Değişim (%)	7.13	5.72

4.4.2 Kat Yerdeğiştirmeleri

Yapıların deprem etkisi altındaki davranışları incelendiğinde, yapıların ankastre mesnetli olması ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumları için elde edilen yerdeğiştirme sonuçları karşılaştırılmış ve belirgin farklar meydana gelmiştir. Bu farkların miktarının yapı-zemin etkileşiminin modelleme yöntemine, deprem içeriğine ve yapı kat yüksekliğine göre değiştiği görülmüştür.

Tablo 4.8'de verilen x doğrultusunda maksimum tepe yerdeğiştirme sonuçlarına göre; Imperial Valley-06 depremi için altsistem yöntemi ile modellenen 5- katlı yapılarda %3.88, 10- katlı yapılarda %5.45 artış görülürken, doğrudan yöntem ile modellenen 5- katlı yapılarda %37.88, 10- katlı yapılarda %31.01 artış meydana gelmiştir. Superstition Hills-02 depremi için altsistem yöntemi ile modellenen 5- katlı yapılarda %11.99 azalma, 10- katlı yapılarda %14.75 artış görülürken, doğrudan yöntem ile modellenen 5- katlı yapılarda %28.58, 10- katlı yapılarda %52.03 artış meydana gelmiştir. Loma Prieta depremi için altsistem yöntemi ile modellenen 5- katlı yapılarda %19.09, 10- katlı yapılarda %3.12 artış görülürken, doğrudan yöntem ile modellenen 5- katlı yapılarda %54.30, 10- katlı yapılarda %60.20 artış meydana gelmiştir.

Tablo 4.8 X doğrultusunda maksimum tepe yerdeğiştirme sonuçları

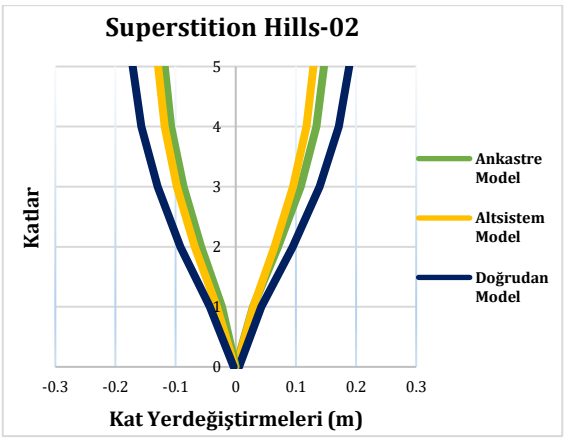
		Ankastre Model	Altsistem Model		Doğrudan Model	
Deprem	Yapı	Maks. Yer Değiştirme (cm)	Maks. Yer Değiştirme (cm)	Değişim (%)	Maks. Yer Değiştirme (cm)	Değişim (%)
Imperial Valley-06	5	17.898	18.592	3.88	24.677	37.88
	10	40.410	42.614	5.45	52.940	31.01
Superstition Hills-02	5	14.672	12.913	-11.99	18.865	28.58
	10	36.696	42.109	14.75	55.790	52.03
Loma Prieta	5	11.160	13.290	19.09	17.202	54.30
	10	13.342	13.758	3.12	21.374	60.20

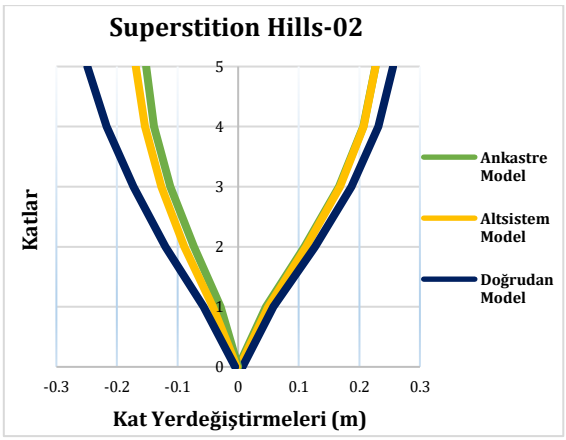
Tablo 4.9'da verilen y doğrultusunda maksimum tepe yerdeğiştirme sonuçlarına göre; Imperial Valley-06 depremi için altsistem yöntemi ile modellenen 5- katlı yapılarda %6.94 azalma, 10- katlı yapılarda %11.92 artış görülürken, doğrudan yöntem ile modellenen 5- katlı yapılarda %69.24, 10- katlı yapılarda %18.25 artış meydana gelmiştir. Superstition Hills-02 depremi için altsistem yöntemi ile modellenen 5- katlı yapılarda %0.093, 10- katlı yapılarda %8.86 artış görülürken, doğrudan yöntem ile modellenen 5- katlı yapılarda %12.85, 10- katlı yapılarda %27.60 artış meydana gelmiştir. Loma Prieta depremi için altsistem yöntemi ile modellenen 5- katlı yapılarda %14.23 artış, 10- katlı yapılarda %4.85 azalma görülürken, doğrudan yöntem ile modellenen 5- katlı yapılarda %46.11, 10- katlı yapılarda %23.41 artış meydana gelmiştir.

Tablo 4.9 Y doğrultusunda maksimum tepe yerdeğiştirme sonuçları

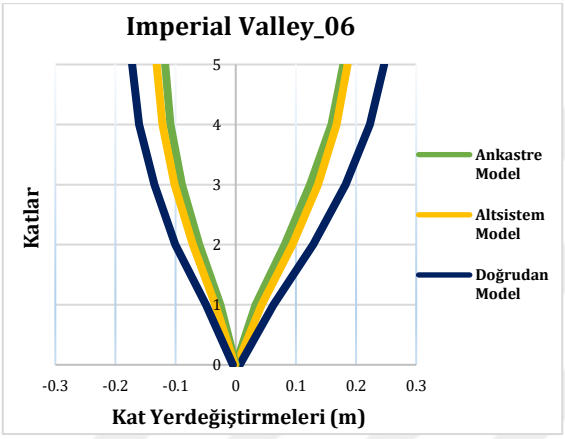
		Ankastre Model	Altsistem Model		Doğrudan Model	
Deprem	Yapı	Maks. Yer Değiştirme (cm)	Maks. Yer Değiştirme (cm)	Değişim (%)	Maks. Yer Değiştirme (cm)	Değişim (%)
Imperial Valley-06	5	9.658	8.988	-6.94	16.345	69.24
	10	36.049	40.345	11.92	42.627	18.25
Superstition Hills-02	5	22.664	22.685	0.093	25.577	12.85
	10	47.056	51.226	8.86	60.045	27.60
Loma Prieta	5	18.691	21.350	14.23	27.310	46.11
	10	28.929	27.529	-4.85	35.701	23.41

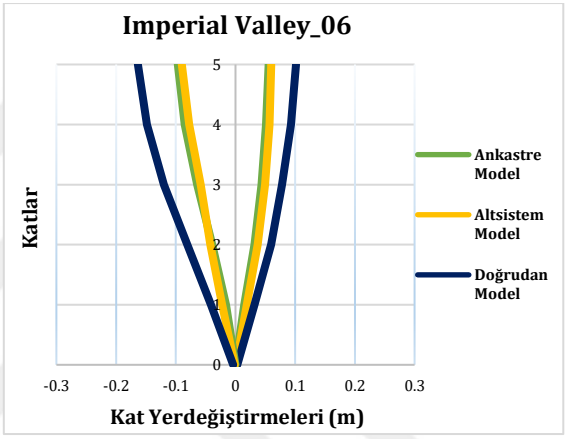
Dinamik analizler sonucunda, yapı-zemin etkileşimli ve ankastre modeller için x ve y doğrultusunda elde edilen kat yerdeğiştirme sonuçları 5- katlı yapılar için Şekil 4.14'te, 10- katlı yapılar için Şekil 4.15'te verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, farklı yüksekliklerdeki iki yapı için de zemin etkilerinin dikkate alınması ile kat yerdeğiştirmelerinde önemli miktarda artışlar meydana gelmiştir.



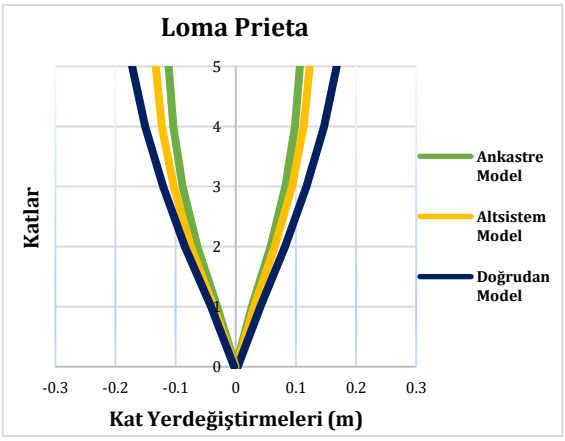


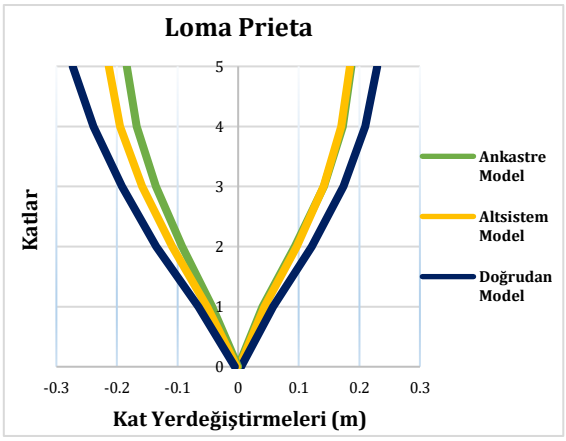
(a)





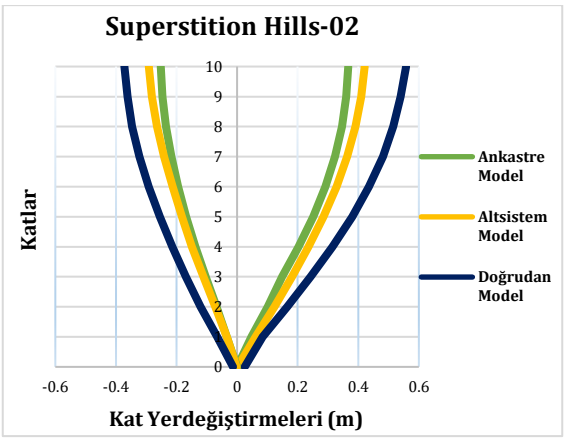
(b)

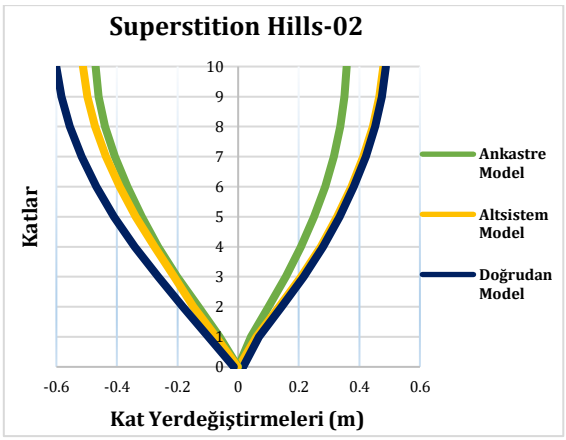




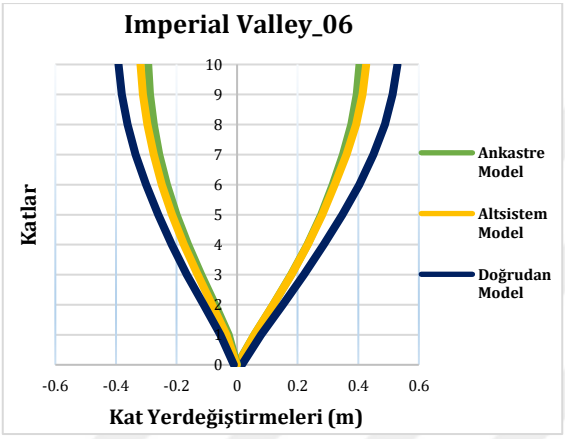
(c)

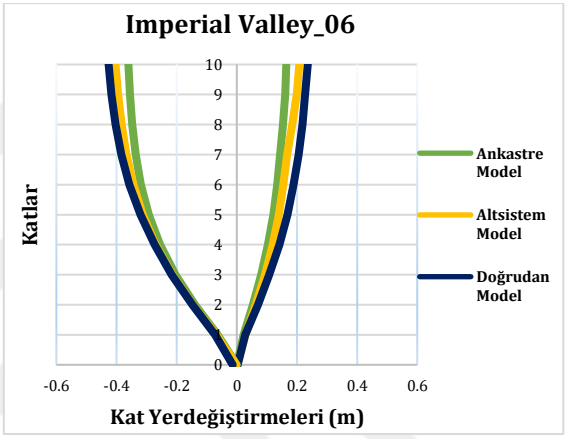
Şekil 4.14 5- katlı yapıların kat yerdeğiştirmeleri; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi



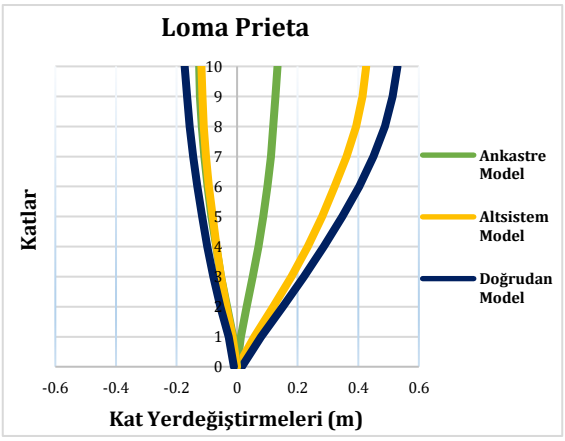


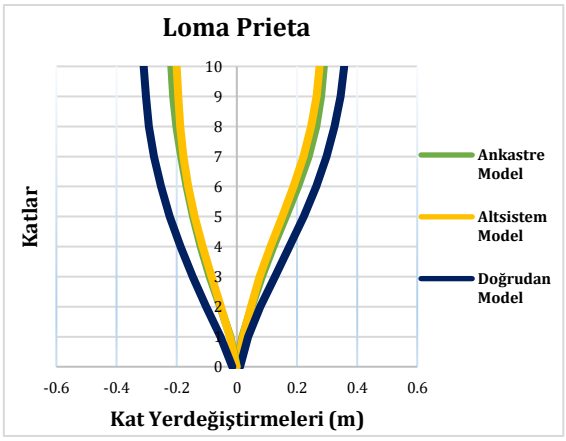
(a)





(b)





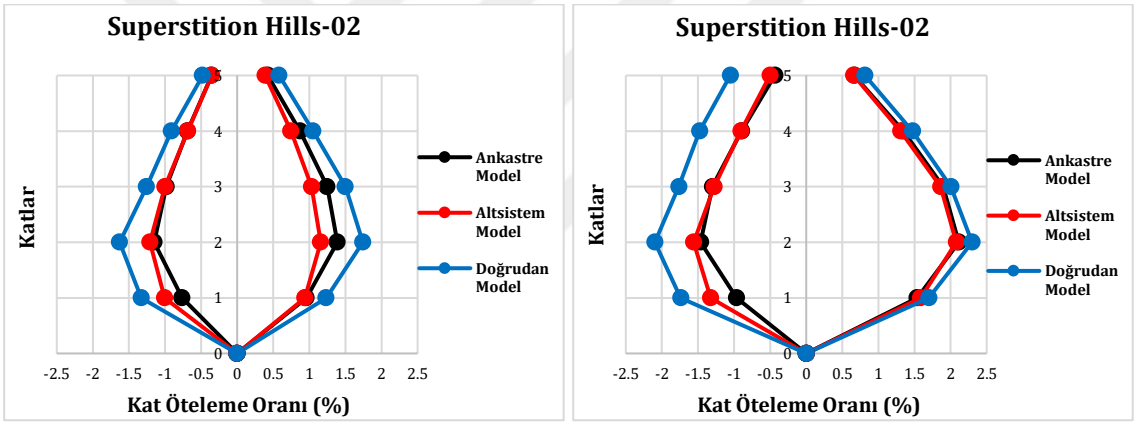
(c)

Şekil 4.15 10- katlı yapıların kat yerdeğiştirmeleri; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi

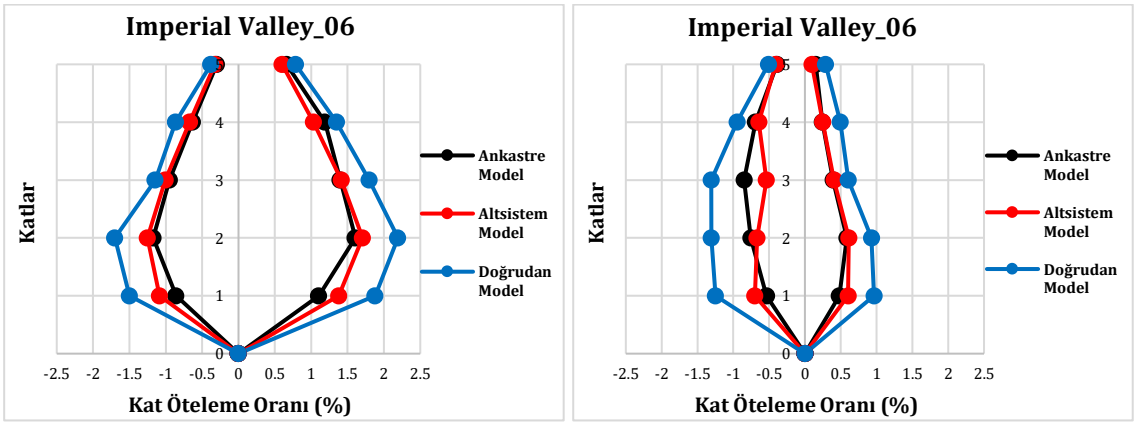
4.4.3 Göreli Kat Ötelemeleri

Katlar arası yerdeğiştirmelerin kat yüksekliğine bölünmesiyle elde edilen göreli kat öteleme oranı sonuçları, yapı-zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli 5- katlı yapılar için Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18'de, 10- katlı yapılar için Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21'de verilmiştir.

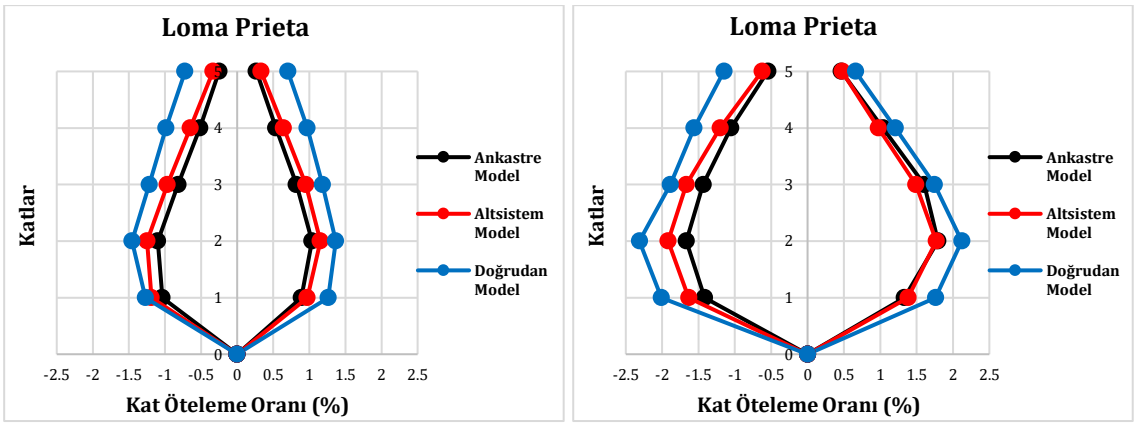
Yumuşak zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla göreli kat öteleme oranlarında artış meydana gelmiştir. Bu artış doğrudan yöntem ile modellenen yapılarda daha belirgin olduğu görülmüştür. Göreli kat ötelemelerinin artışı, yapı yüksekliği boyunca değişkendir. Maksimum kat öteleme oranları, her iki yönde de 5- ve 10-katlı yapıların ilk 3 katında meydana gelirken üst katlara doğru azalma gerçekleşmiştir.



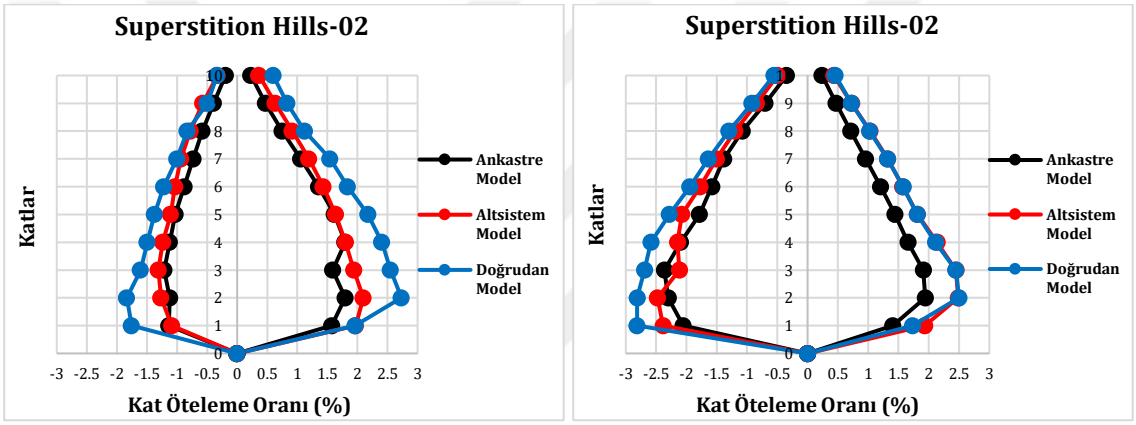
Şekil 4.16 Superstition-02 depremi için 5- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları



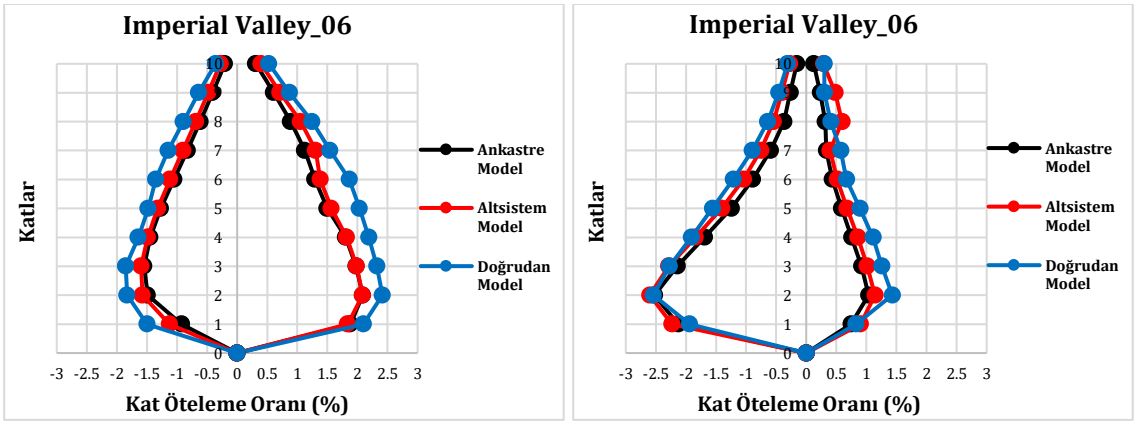
Şekil 4.17 Imperial Valley_06 depremi için 5- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları



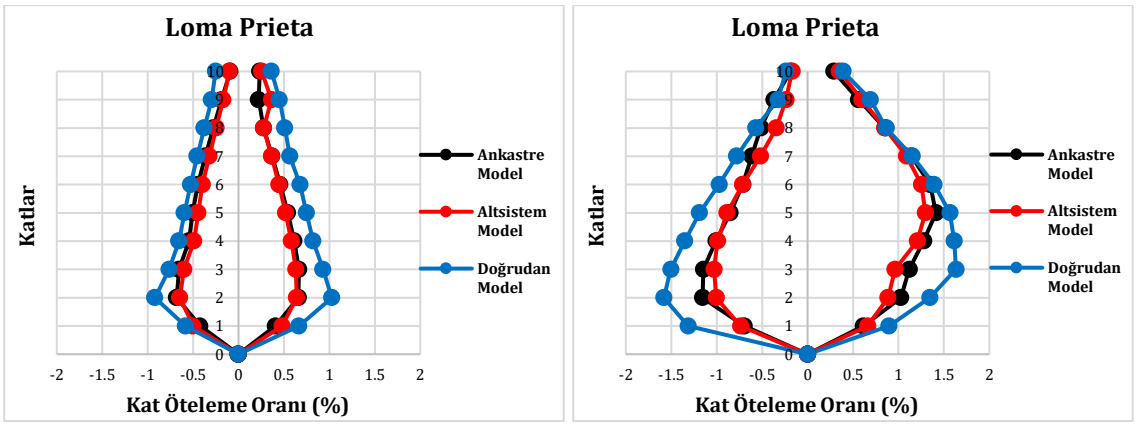
Şekil 4.18 Loma Prieta depremi için 5- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları



Şekil 4.19 Loma Prieta depremi için 10- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları



Şekil 4.20 Imperial Valley_06 depremi için 10- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları



Şekil 4.21 Loma Prieta depremi için 10- katlı yapıların göreli kat öteleme oranları

4.4.4 Taban Kesme Kuvvetleri

Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla daha esnek hale gelen yapıların farklı doğrultular için Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de sonuçları verilen maksimum taban kesme kuvvetlerinde azalmalar meydana geldiği görülmüştür.

5- katlı yapılarda zemin etkilerinin dikkate alındığı yapıların maksimum taban kesme kuvvetinin ankastre mesnetli yapıların maksimum taban kesme kuvvetine oranı; Imperial Valley-06 depremi için x doğrultusunda altsistem yönteminde %99.84, doğrudan yönteminde %88.52, Superstition Hills-02 depremi için x doğrultusunda altsistem yönteminde %98.51, doğrudan yönteminde %83.18, Loma Prieta depremi için x doğrultusunda altsistem yönteminde %98.33, doğrudan yönteminde %93.52'dir.

10- katlı yapılarda ise zemin etkilerinin dikkate alındığı yapıların maksimum taban kesme kuvvetinin ankastre mesnetli yapıların maksimum taban kesme kuvvetine oranı; Imperial Valley-06 depremi için x doğrultusunda altsistem yönteminde %98.96, doğrudan yönteminde %80.18, Superstition Hills-02 depremi için x doğrultusunda altsistem yönteminde %99.65, doğrudan yönteminde %88.83, Loma Prieta depremi için x doğrultusunda altsistem yönteminde %97.99, doğrudan yönteminde %84.92'dir.

Tablo 4.10 X doğrultusunda maksimum taban kesme kuvveti sonuçları

Deprem	Yapı	Ankastre Model	Altsistem Model		Doğrudan Model	
		Maks. Taban Kesme Kuvveti V (kN)	Maks. Taban Kesme Kuvveti V' (kN)	V'/V	Maks. Taban Kesme Kuvveti V' (kN)	V'/V
Imperial Valley-06	5	4073.06	4066.35	0.9984	3605.44	0.8852
	10	7724.56	7685.76	0.9896	6986.44	0.8018
Superstition Hills-02	5	3242.12	3193.81	0.9851	2696.90	0.8318
	10	7501.00	7488.89	0.9965	7110.02	0.8883
Loma Prieta	5	2521.53	2479.23	0.9833	2356.18	0.9352
	10	5574.45	5462.40	0.9799	5337.06	0.8492

5- katlı yapılarda zemin etkilerinin dikkate alındığı yapıların maksimum taban kesme kuvvetinin ankastre mesnetli yapıların maksimum taban kesme kuvvetine oranı; Imperial Valley-06 depremi için y doğrultusunda altsistem yönteminde %97.71, doğrudan yönteminde %85.84, Superstition Hills-02 depremi için y doğrultusunda altsistem yönteminde %98.46, doğrudan yönteminde %87.49, Loma Prieta depremi için x doğrultusunda altsistem yönteminde %99.37, doğrudan yönteminde %89.34'tür

10- katlı yapılarda ise zemin etkilerinin dikkate alındığı yapıların maksimum taban kesme kuvvetinin ankastre mesnetli yapıların maksimum taban kesme kuvvetine oranı; Imperial Valley-06 depremi için y doğrultusunda altsistem yönteminde %99.57, doğrudan yönteminde %86.37, Superstition Hills-02 depremi için y doğrultusunda altsistem yönteminde %96.01, doğrudan yönteminde %92.60, Loma Prieta depremi için x doğrultusunda altsistem yönteminde %97.28, doğrudan yönteminde %87.35'tir.

Tablo 4.11 Y doğrultusunda maksimum taban kesme kuvveti sonuçları

Deprem	Yapı	Ankastre Model	Altsistem Model		Doğrudan Model	
		Maks. Taban Kesme Kuvveti V (kN)	Maks. Taban Kesme Kuvveti V' (kN)	V'/V	Maks. Taban Kesme Kuvveti V' (kN)	V'/V
Imperial Valley-06	5	1993.97	1948.35	0.9771	1711.64	0.8584
	10	4274.72	4256.38	0.9957	3692.16	0.8637
Superstition Hills-02	5	4643.48	4571.97	0.9846	4062.98	0.8749
	10	8354.03	8021.16	0.9601	7735.85	0.9260
Loma Prieta	5	3691.95	3668.82	0.9937	3298.23	0.8934
	10	6354.52	6181.68	0.9728	5550.86	0.8735

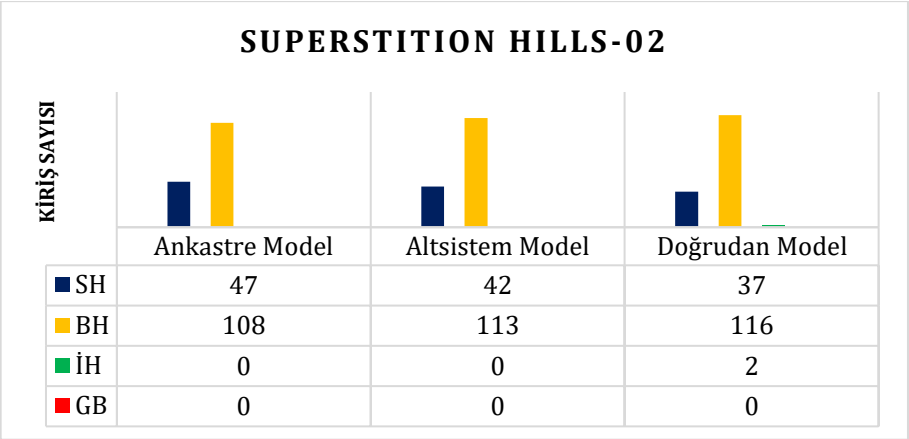
4.4.5 Yapı Elemanları Hasar Durumları

Yığılı plastik mafsal için yönetmelikte verilen hasar sınır değerleri dikkate alınarak seçilen farklı depremlerin etkisi altında doğrusal olmayan analizlerle kolon ve kiriş taşıyıcı elemanlarının hasar seviyeleri belirlenmiştir.

Sınır değerinin hesaplanmasında kolon ve kiriş elemanlar için Bölüm 4.1'de verilen akma eğriliği Φ_y ve göçme öncesi eğrilik Φ_u değerleri kullanılmıştır. 3 farklı deprem kaydı ile yapılan analizlerden plastik dönme θ_p talepleri elde edilmiştir. Elde edilen bu taleplerin en elverişsiz olanı ile hasar sınır değerleri karşılaştırılarak her bir elemanın hasar durumu belirlenmiştir.

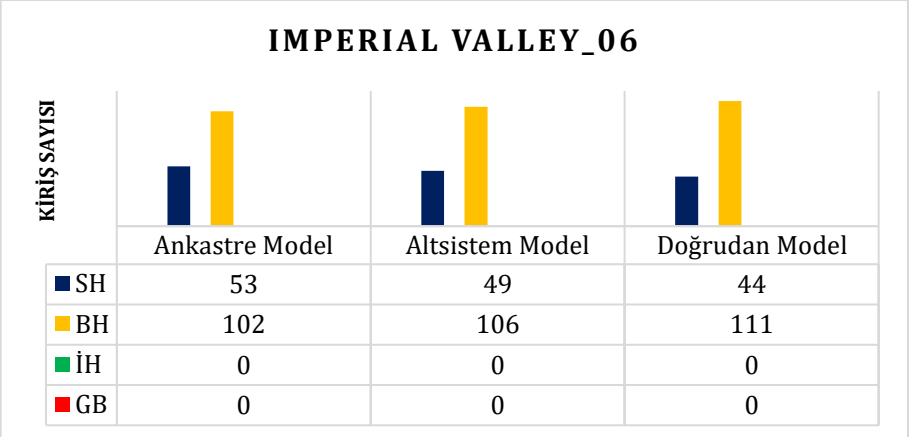
3 farklı deprem kaydı için 5- katlı yapılarda hasar meydana gelen kiriş elemanlarının sayısı Şekil 4.22'de, kolon elemanlarının sayısı ise Şekil 4.23'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

5- katlı yapıların kiriş elemanlarının hiçbirinde göçme görülmemiştir. Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla birlikte tüm depremler için kiriş elemanlarında sınırlı hasar bölgesinden belirgin hasar bölgesine geçişler görülmüştür. Hasar bölgesi değişimi doğrudan yöntem modelinde daha fazla sayıda gerçekleşmiştir.



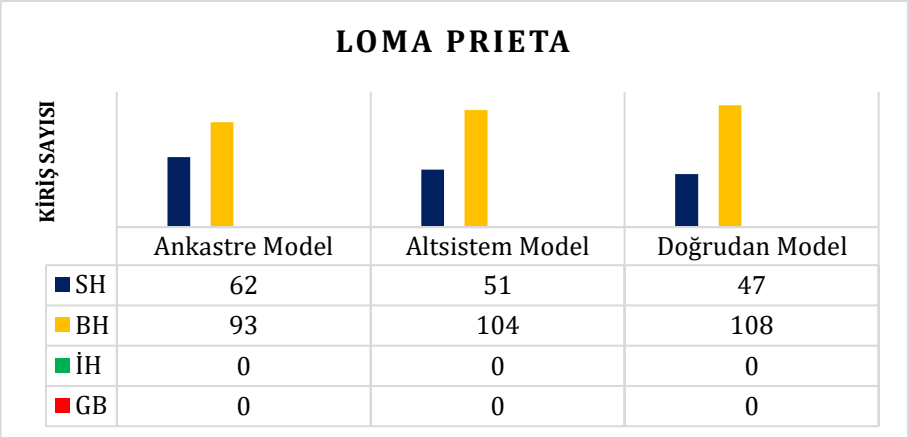
	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	47	42	37
BH	108	113	116
İH	0	0	2
GB	0	0	0

(a)



	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	53	49	44
BH	102	106	111
İH	0	0	0
GB	0	0	0

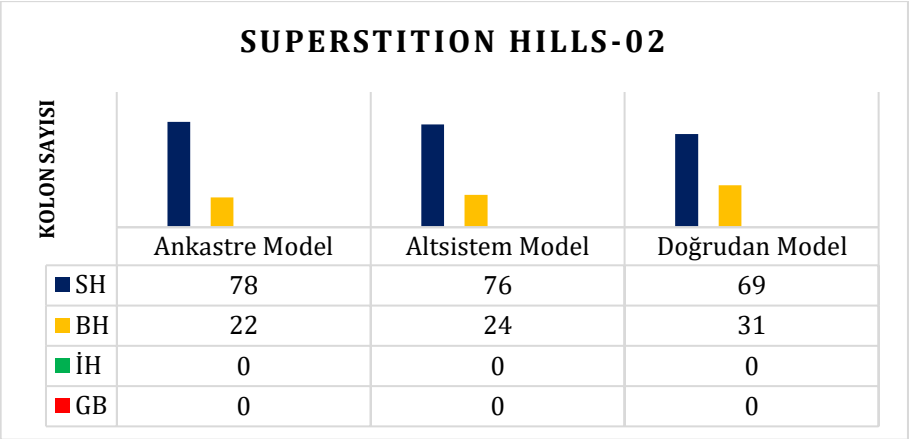
(b)



	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	62	51	47
BH	93	104	108
İH	0	0	0
GB	0	0	0

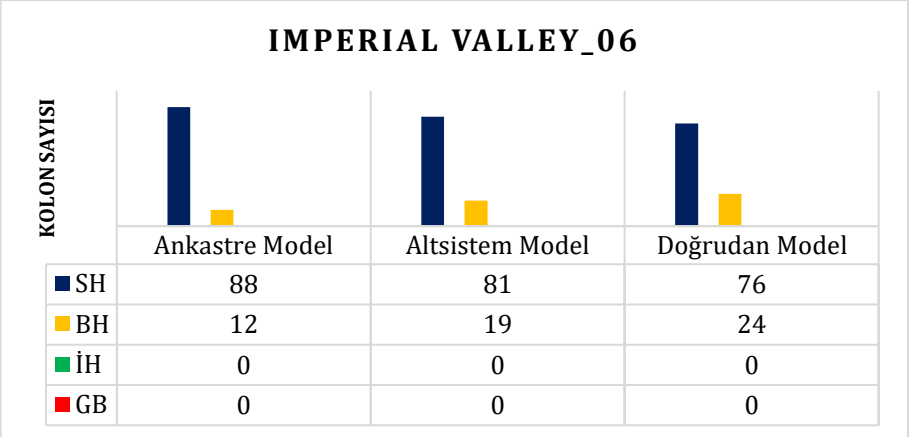
(c)

Şekil 4.22 5- katlı yapıda kiriş hasar dağılımı; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi



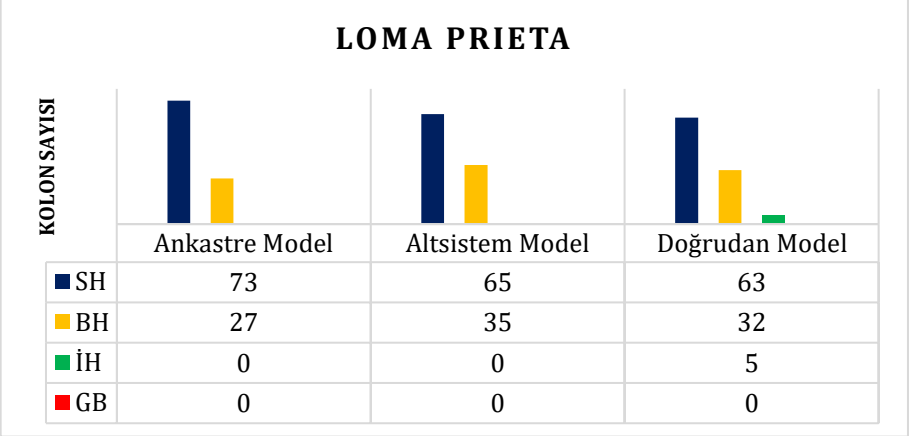
	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	78	76	69
BH	22	24	31
İH	0	0	0
GB	0	0	0

(a)



	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	88	81	76
BH	12	19	24
İH	0	0	0
GB	0	0	0

(b)



	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	73	65	63
BH	27	35	32
İH	0	0	5
GB	0	0	0

(c)

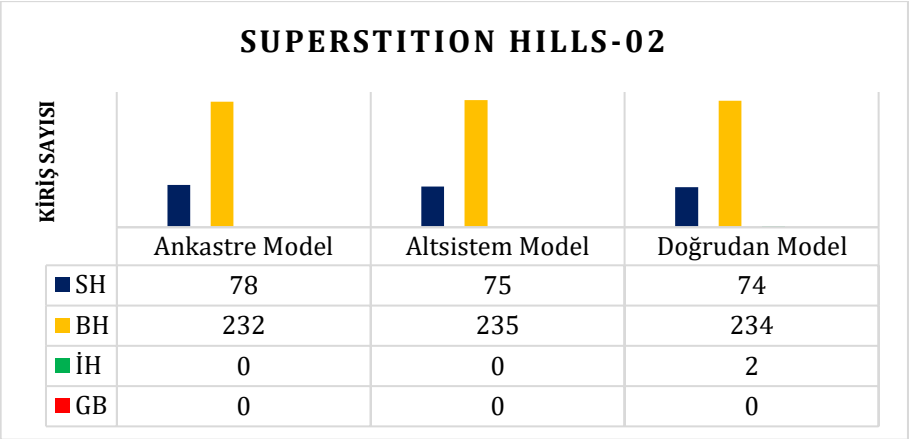
Şekil 4.23 5- katlı yapıda kolon hasar dağılımı; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi

5- katlı yapıların farklı depremler için kolon elemanlarının hiç birinde göçme görülmemiştir. Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla birlikte tüm depremler için kolon elemanlarında sınırlı hasar bölgesinden belirgin hasar bölgesine geçişler görülmüştür. Hasar bölgesi değişimi doğrudan yöntem modelinde daha fazla sayıda gerçekleşmiştir.

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te ise 10- katlı yapılarda hasar meydana gelen kiriş ve kolon elemanlarının sayısı karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ile yapı elemanlarındaki hasar bölgelerinin depremin içeriğine de bağlı olarak önemli derecede değiştiği görülmüştür.

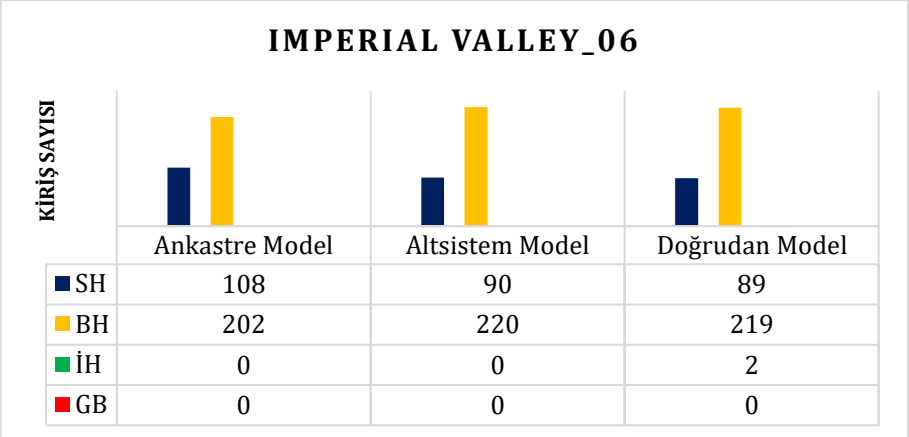
10- katlı yapıların kiriş elemanlarının hiç birinde göçme görülmemiştir. Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla birlikte tüm depremler için kiriş elemanlarında sınırlı hasar bölgesinden belirgin hasar bölgesine geçişler görülmüştür.

10- katlı yapıların farklı depremler için kolon elemanlarının hasar durumlarında önemli ölçüde değişiklikler meydana gelmiştir. Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla birlikte tüm depremler için kolon elemanlarında yönetmeliğe göre belirlenen hasar bölgelerindeki eleman sayılarında ankastre mesnetli modele göre önemli değişiklikler görülmüştür. Hasar bölgesi değişimi doğrudan yöntem modelinde daha fazla sayıda gerçekleşmiş ve göçme durumundaki kolon sayılarında gözle görülür artışlar meydana gelmiştir.



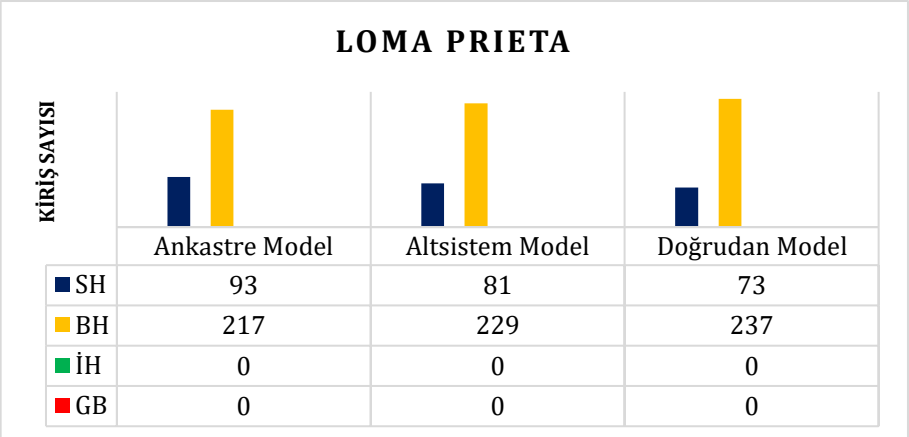
	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	78	75	74
BH	232	235	234
İH	0	0	2
GB	0	0	0

(a)



	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	108	90	89
BH	202	220	219
İH	0	0	2
GB	0	0	0

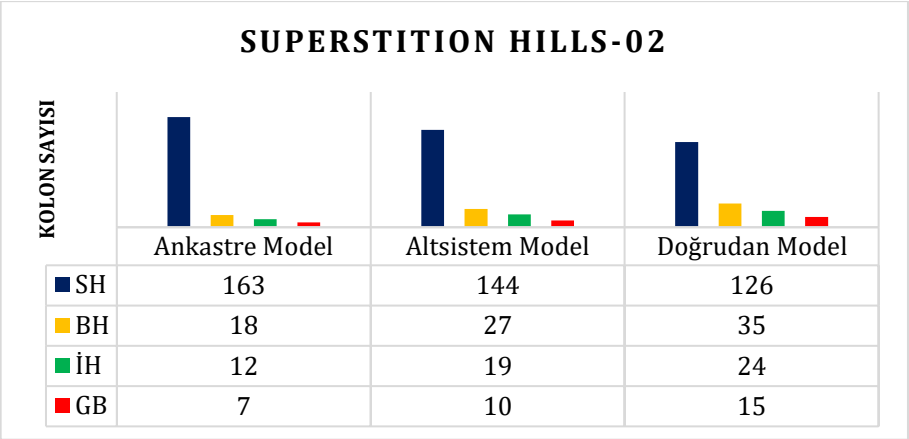
(b)



	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	93	81	73
BH	217	229	237
İH	0	0	0
GB	0	0	0

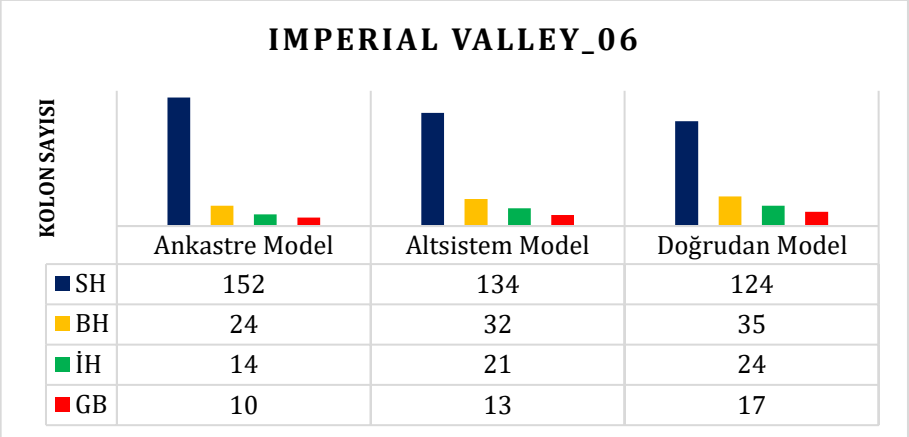
(c)

Şekil 4.24 10- katlı yapıda kiriş hasar dağılımı; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi



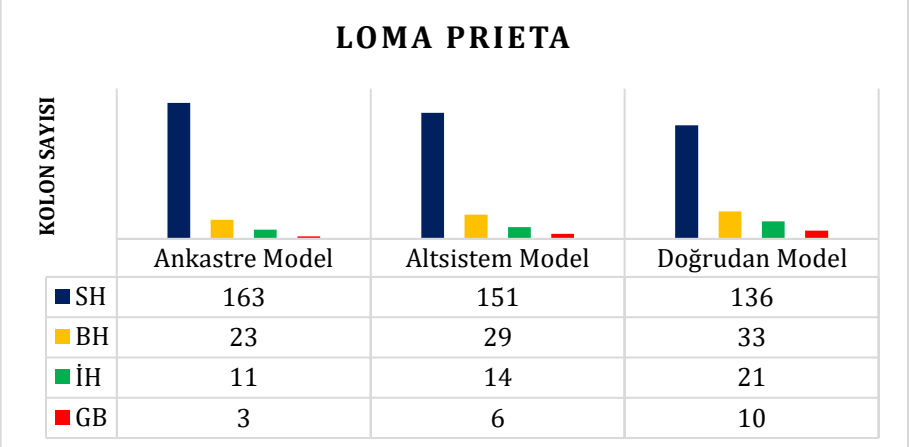
	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	163	144	126
BH	18	27	35
İH	12	19	24
GB	7	10	15

(a)



	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	152	134	124
BH	24	32	35
İH	14	21	24
GB	10	13	17

(b)

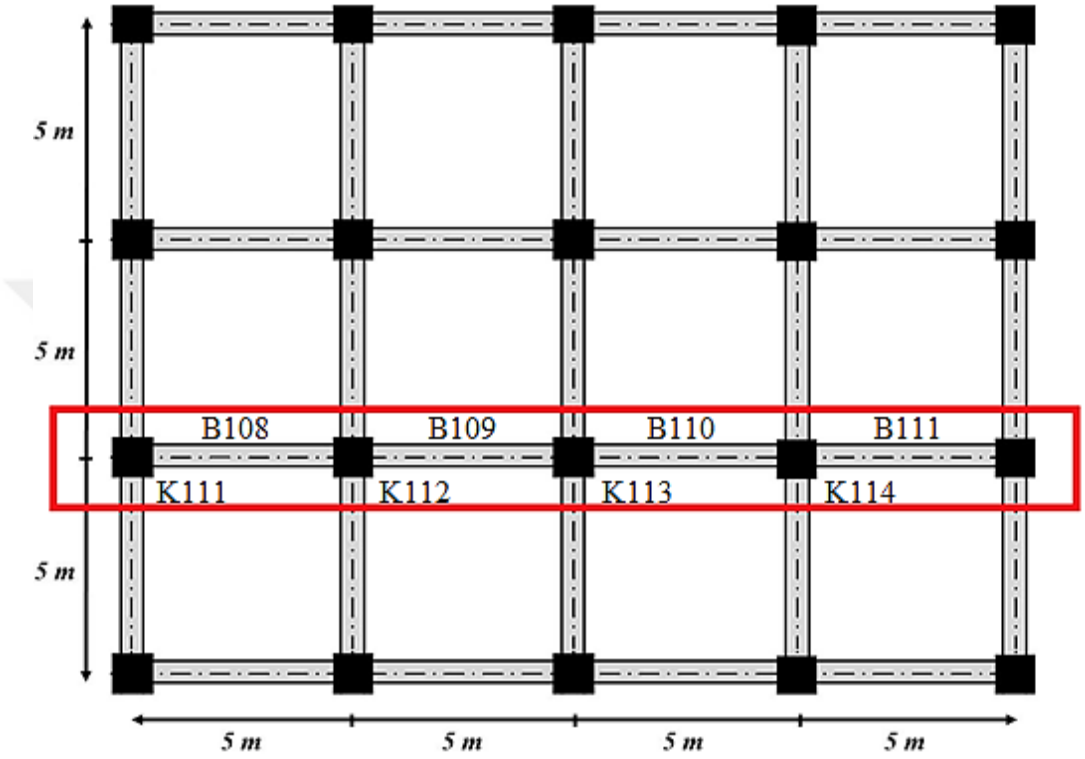


	Ankastre Model	Altsistem Model	Doğrudan Model
SH	163	151	136
BH	23	29	33
İH	11	14	21
GB	3	6	10

(c)

Şekil 4.25 10- katlı yapıda kolon hasar dağılımı; (a) Superstition-02 depremi, (b) Imperial Valley_06 depremi, (c) Loma Prieta depremi

5- katlı ve 10- katlı yapılar için farklı depremlerin analizleri sonucu elde edilen kolon ve kirişlere ait kesit hasar durumları Şekil 4.26'da gösterilen aksta yer alan zemin kat durumları için verilmiştir.



Şekil 4.26 Hasar sonuçları verilen zemin kat kolon ve kirişler

5- katlı yapıların zemin kat kirişleri için elde edilen sonuçlar, Superstition Hills-02 depremi için Tablo 4.12'de, Imperial Valley_06 depremi için Tablo 4.13'te ve Loma Prieta depremi için Tablo 4.14'te sınır değerlerle karşılaştırılıp hasar durumları belirlenerek 3 farklı model için ayrı ayrı verilmiştir.

Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla birlikte zemin kat kirişlerinde meydana gelen plastik dönmelerinde depremin içeriğine bağlı olarak farklı elemanlar için artış ve azalışlar meydana gelmiş ancak yapı elemanlarının hasar durumunun değişmediği ve belirgin hasar bölgesinde kaldığı görülmüştür.

Tablo 4.12 5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için zemin kat kiriş hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	B108	0.00708	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00593	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00587	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.00747	0.03566	0.02674	0	BH
Altsistem Model	B108	0.00767	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00566	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00569	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.00683	0.03566	0.02674	0	BH
Doğrudan Model	B108	0.01040	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00879	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00824	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.00924	0.03566	0.02674	0	BH

Tablo 4.13 5- katlı yapıda Imperial Valley_06 depremi için zemin kat kiriş hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	B108	0.00933	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00796	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00782	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01002	0.03566	0.02674	0	BH
Altsistem Model	B108	0.00894	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00939	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00932	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01181	0.03566	0.02674	0	BH
Doğrudan Model	B108	0.01247	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.01266	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.01353	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01665	0.03566	0.02674	0	BH

Tablo 4.14 5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için zemin kat kiriş hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	B108	0.00564	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00371	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00378	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.00491	0.03566	0.02674	0	BH
Altsistem Model	B108	0.00722	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00458	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00461	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.00494	0.03566	0.02674	0	BH
Doğrudan Model	B108	0.00761	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00398	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00362	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.00486	0.03566	0.02674	0	BH

Tablo 4.15 5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için zemin kat kolon hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	K111	0.00748	0.01983	0.01487	0	BH
	K112	0.01038	0.01579	0.01184	0	BH
	K113	0.01063	0.01882	0.01412	0	BH
	K114	0.01052	0.01571	0.01178	0	BH
	K115	0.00735	0.02050	0.01538	0	BH
Altsistem Model	K111	0.01051	0.01880	0.01410	0	BH
	K112	0.01204	0.01678	0.01259	0	BH
	K113	0.01223	0.01879	0.01409	0	BH
	K114	0.01244	0.01671	0.01253	0	BH
	K115	0.01120	0.01963	0.01472	0	BH
Doğrudan Model	K111	0.01268	0.02028	0.01521	0	BH
	K112	0.01582	0.02309	0.01731	0	BH
	K113	0.01641	0.02274	0.01706	0	BH
	K114	0.01699	0.02267	0.01700	0	BH
	K115	0.01556	0.02107	0.01580	0	BH

Tablo 4.16 5- katlı yapıda Imperial Valley_06 depremi için zemin kat kolon hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	K111	0.00548	0.01967	0.01475	0	BH
	K112	0	0.01734	0.01300	0	SH
	K113	0	0.01951	0.01463	0	SH
	K114	0	0.01733	0.01299	0	SH
	K115	0	0.02035	0.01526	0	SH
Altsistem Model	K111	0	0.01915	0.01436	0	SH
	K112	0.01238	0.01784	0.01338	0	BH
	K113	0.01345	0.01949	0.01462	0	BH
	K114	0	0.01783	0.01338	0	SH
	K115	0	0.01992	0.01494	0	SH
Doğrudan Model	K111	0.01023	0.02034	0.01526	0	BH
	K112	0.01320	0.02232	0.01674	0	BH
	K113	0.01445	0.02238	0.01679	0	BH
	K114	0.01416	0.02201	0.01651	0	BH
	K115	0.01169	0.02112	0.01584	0	BH

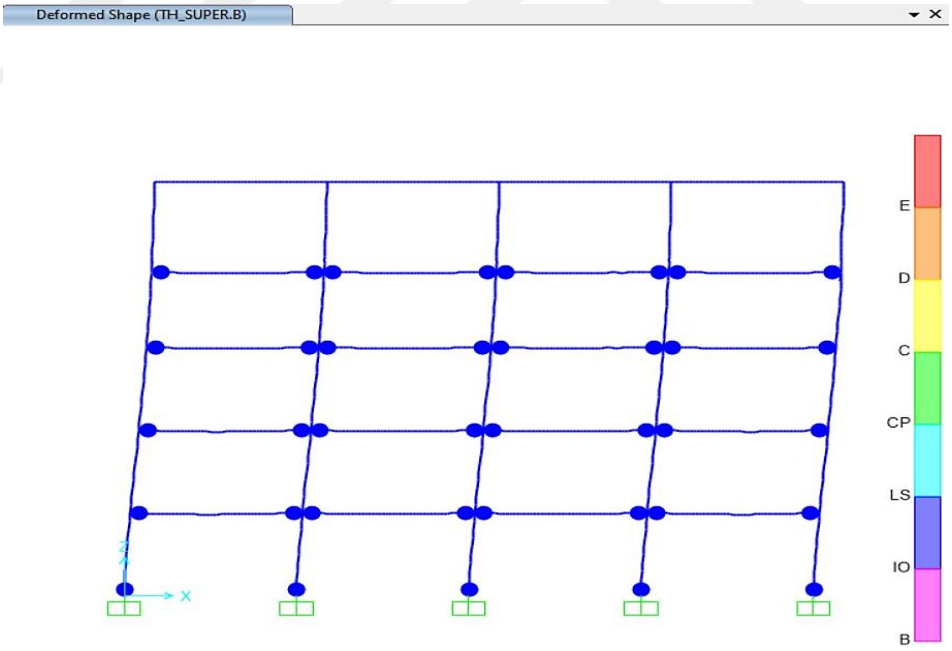
Tablo 4.17 5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için zemin kat kolon hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	K111	0.00899	0.01878	0.01409	0	BH
	K112	0.01121	0.01583	0.01187	0	BH
	K113	0.01143	0.01827	0.01370	0	BH
	K114	0.01148	0.01576	0.01182	0	BH
	K115	0.00927	0.01950	0.01463	0	BH
Altsistem Model	K111	0.01107	0.01949	0.01462	0	BH
	K112	0.01330	0.01889	0.01417	0	BH
	K113	0.01368	0.02019	0.01514	0	BH
	K114	0.01406	0.01895	0.01421	0	BH
	K115	0.01278	0.02020	0.01515	0	BH
Doğrudan Model	K111	0.01283	0.02041	0.01531	0	BH
	K112	0.01673	0.02154	0.01616	0	İH
	K113	0.01695	0.02203	0.01652	0	İH
	K114	0.01677	0.02135	0.01601	0	İH
	K115	0.01431	0.02117	0.01588	0	BH

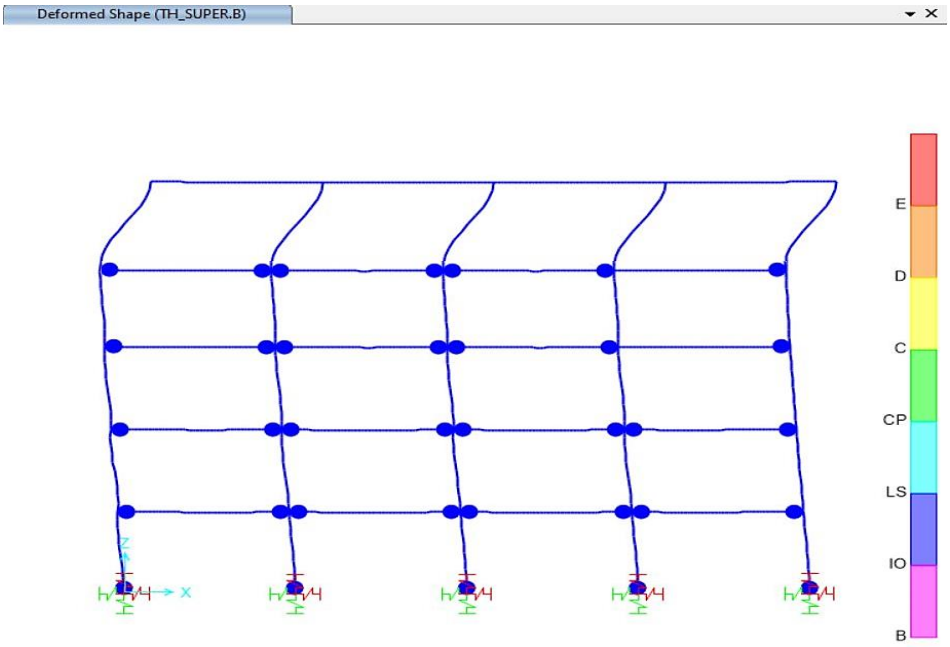
5- katlı yapıların zemin kat kolonları için elde edilen sonuçlar, Superstition Hills-02 depremi için Tablo 4.15'te, Imperial Valley_06 depremi için Tablo 4.16'da ve Loma Prieta depremi için Tablo 4.17'de sınır değerlerle karşılaştırılıp hasar durumları belirlenerek 3 farklı model için ayrı ayrı verilmiştir.

Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla birlikte zemin kat kolonlarında meydana gelen plastik dönmelerinde depremin içeriğine bağlı olarak farklı elemanlar için artış ve azalışlar meydana gelmiştir. Yapı elemanlarının hasar durumunda sadece Loma Prieta ve Imperial Valley_06 depremi için doğrudan modeldeki kolonlarda değişiklik görülmüştür.

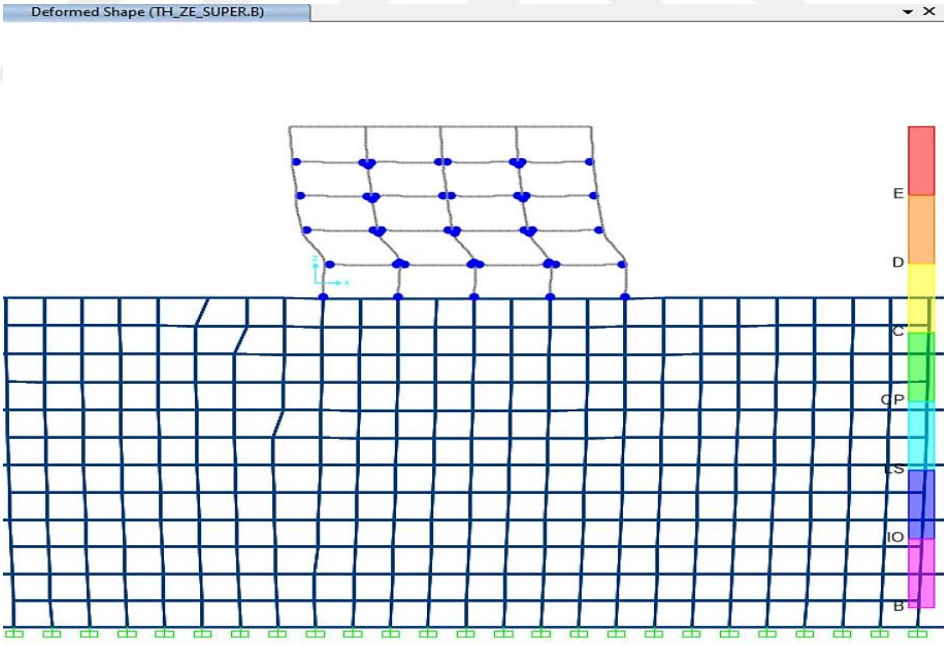
5- katlı yapılar için farklı depremlerin analizleri sonucu elde edilen kolon ve kirişlere ait plastik mafsal durumları Şekil 4.26'da gösterilen aks için verilmiştir.



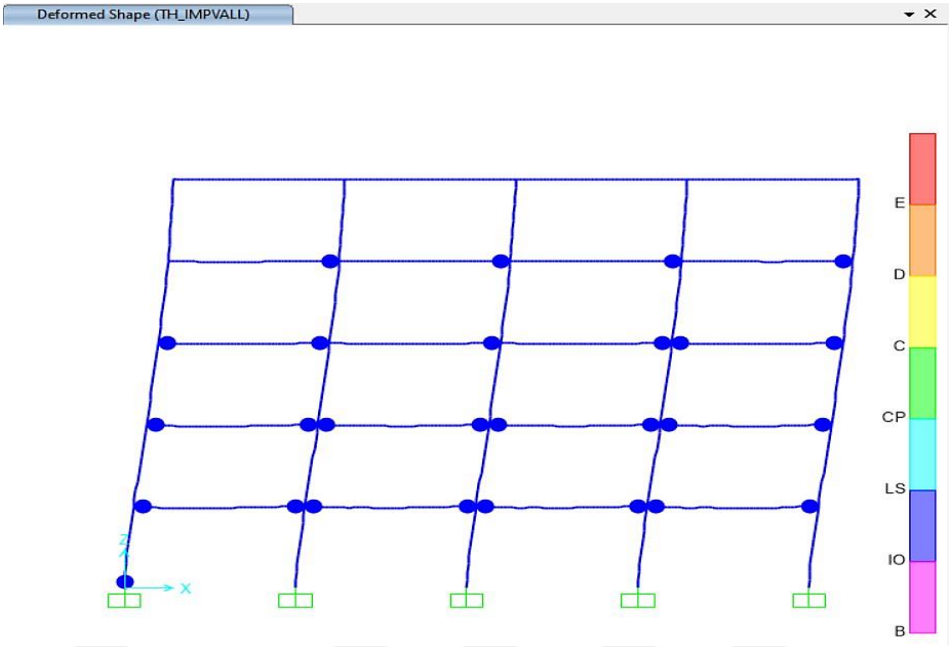
Şekil 4.27 Ankastre model için 5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları



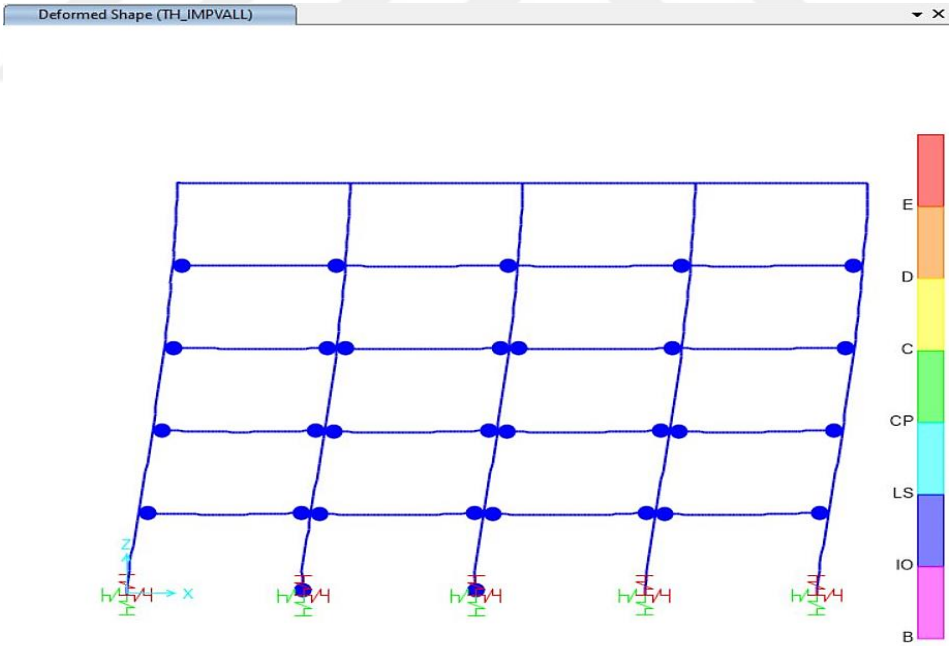
Şekil 4.28 Altsistem model için 5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları



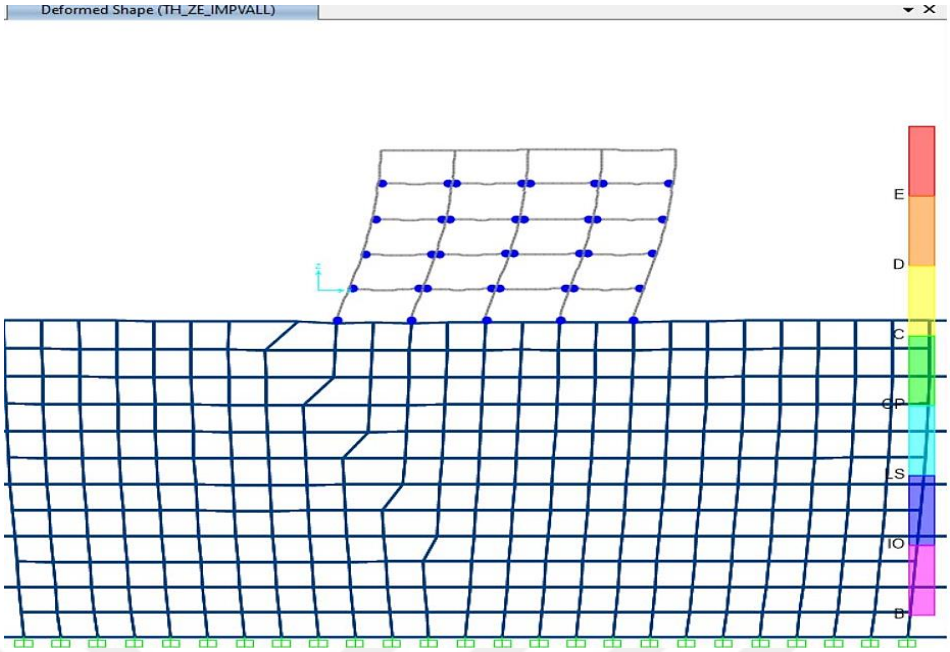
Şekil 4.29 Doğrudan model için 5- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları



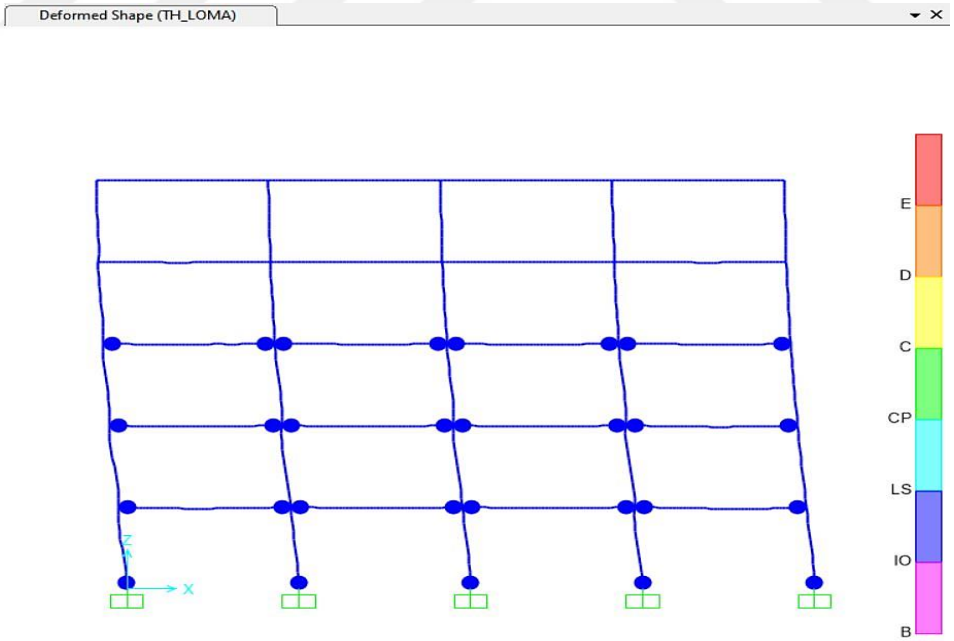
Şekil 4.30 Ankastre model için 5- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları



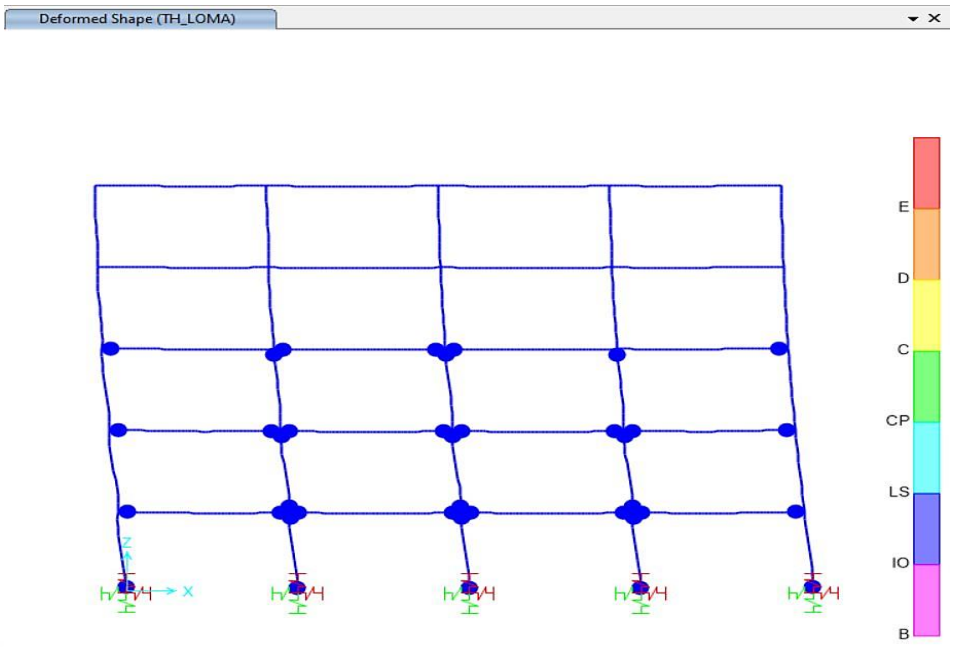
Şekil 4.31 Altsistem model için 5- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları



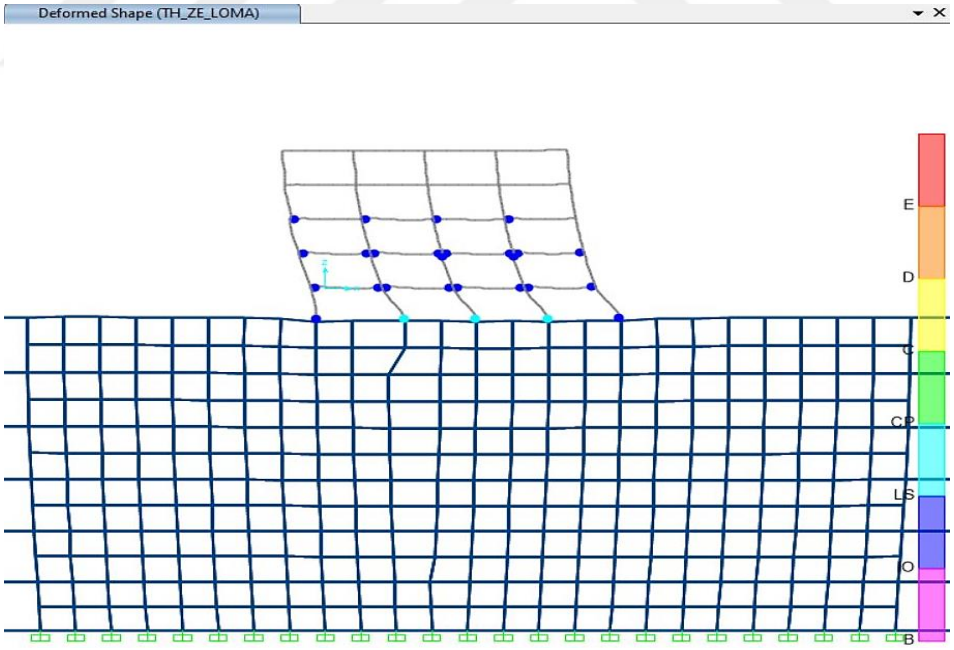
Şekil 4.32 Doğrudan model için 5- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları



Şekil 4.33 Ankastre model için 5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları



Şekil 4.34 Altsistem model için 5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları



Şekil 4.35 Doğrudan model için 5- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları

10- katlı yapıların zemin kat kirişleri için elde edilen sonuçlar, Superstition Hills-02 depremi için Tablo 4.18'de, Imperial Valley_06 depremi için Tablo 4.19'da ve Loma Prieta depremi için Tablo 4.20'de sınır değerlerle karşılaştırılıp hasar durumları belirlenerek 3 farklı model için ayrı ayrı verilmiştir. Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla birlikte zemin kat kirişlerinde meydana gelen plastik dönmelerinde depremin içeriğine bağlı olarak farklı kiriş elemanları için artış ve azalışlar meydana gelmiş ancak yapı elemanlarının hasar durumunun değişmediği ve belirgin hasar bölgesinde kaldığı görülmüştür.

Tablo 4.18 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için zemin kat kiriş hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	B108	0.01008	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00841	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00846	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01192	0.03566	0.02674	0	BH
Altsistem Model	B108	0.01046	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.01148	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.01137	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01479	0.03566	0.02674	0	BH
Doğrudan Model	B108	0.01233	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.01193	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.01189	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01603	0.03566	0.02674	0	BH

Tablo 4.19 10- katlı yapıda Imperial Valley_06 depremi için zemin kat kiriş hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	B108	0.01155	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.01003	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00979	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01391	0.03566	0.02674	0	BH
Altsistem Model	B108	0.00895	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.01003	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.01019	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01348	0.03566	0.02674	0	BH

Tablo 4.19 10- katlı yapıda Imperial Valley_06 depremi için zemin kat kiriş hasar durumu (devamı)

Doğrudan Model	B108	0.01231	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.01204	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.01199	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01643	0.03566	0.02674	0	BH

Tablo 4.20 10- katlı yapıda Loma Prieta depremi için zemin kat kiriş hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	B108	0.00904	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.00876	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.00886	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01207	0.03566	0.02674	0	BH
Altsistem Model	B108	0.00971	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.01076	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.01078	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01414	0.03566	0.02674	0	BH
Doğrudan Model	B108	0.01169	0.03566	0.02674	0	BH
	B109	0.01138	0.03566	0.02674	0	BH
	B110	0.01134	0.03566	0.02674	0	BH
	B111	0.01542	0.03566	0.02674	0	BH

10- katlı yapıların zemin kat kolonları için elde edilen sonuçlar, Superstition Hills-02 depremi için Tablo 4.21'de, Imperial Valley_06 depremi için Tablo 4.22'de ve Loma Prieta depremi için Tablo 4.23'te sınır değerlerle karşılaştırılıp hasar durumları belirlenerek 3 farklı model için ayrı ayrı verilmiştir.

Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla ve kat yüksekliğinin artmasıyla birlikte zemin kat kolonları plastik dönmelerinde ve kesit hasar durumlarında önemi değişiklikler meydana gelmiştir. Doğrudan yöntemin kullanılması ile birlikte zemin katta seçilen akstaki kolonların tümünün göçme bölgesine geçtiği görülmüştür.

Tablo 4.21 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için zemin kat kolon hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	K111	0.01791	0.02296	0.01722	0	İH
	K112	0.02153	0.02083	0.01562	0	GB
	K113	0.02392	0.02310	0.01731	0	GB
	K114	0.02126	0.02082	0.01562	0	GB
	K115	0.01822	0.02382	0.01787	0	İH
Altsistem Model	K111	0.01986	0.02506	0.01879	0	İH
	K112	0.02286	0.02256	0.01692	0	GB
	K113	0.02441	0.02402	0.01801	0	GB
	K114	0.02464	0.02252	0.01689	0	GB
	K115	0.02111	0.02607	0.01956	0	İH
Doğrudan Model	K111	0.02620	0.02565	0.01924	0	GB
	K112	0.02987	0.02409	0.01806	0	GB
	K113	0.03162	0.02614	0.01961	0	GB
	K114	0.03068	0.02406	0.01804	0	GB
	K115	0.02913	0.02769	0.02077	0	GB

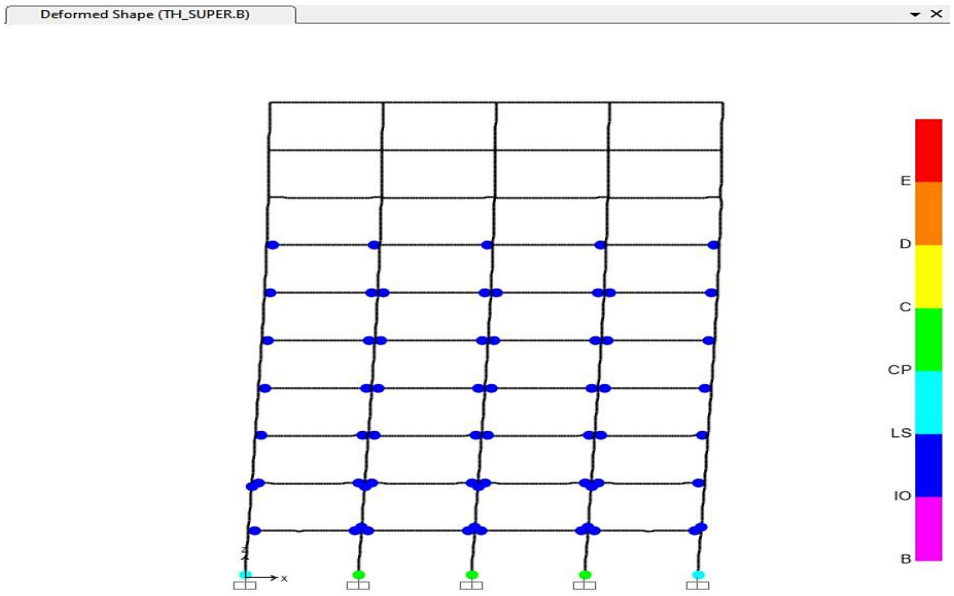
Tablo 4.22 10- katlı yapıda Imperial Valley_06 depremi için zemin kat kolon hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	K111	0.02206	0.02698	0.02024	0	İH
	K112	0.02571	0.02493	0.01869	0	GB
	K113	0.02874	0.02732	0.02049	0	GB
	K114	0.02597	0.02491	0.01868	0	GB
	K115	0.02668	0.02559	0.01919	0	GB
Altsistem Model	K111	0.02678	0.02632	0.01974	0	GB
	K112	0.03084	0.02493	0.01870	0	GB
	K113	0.03352	0.02695	0.02022	0	GB
	K114	0.03144	0.02489	0.01867	0	GB
	K115	0.02797	0.02617	0.01963	0	GB
Doğrudan Model	K111	0.03041	0.02885	0.02164	0	GB
	K112	0.03369	0.02721	0.02040	0	GB
	K113	0.03615	0.02947	0.02210	0	GB
	K114	0.03447	0.02717	0.02038	0	GB
	K115	0.03169	0.02989	0.02242	0	GB

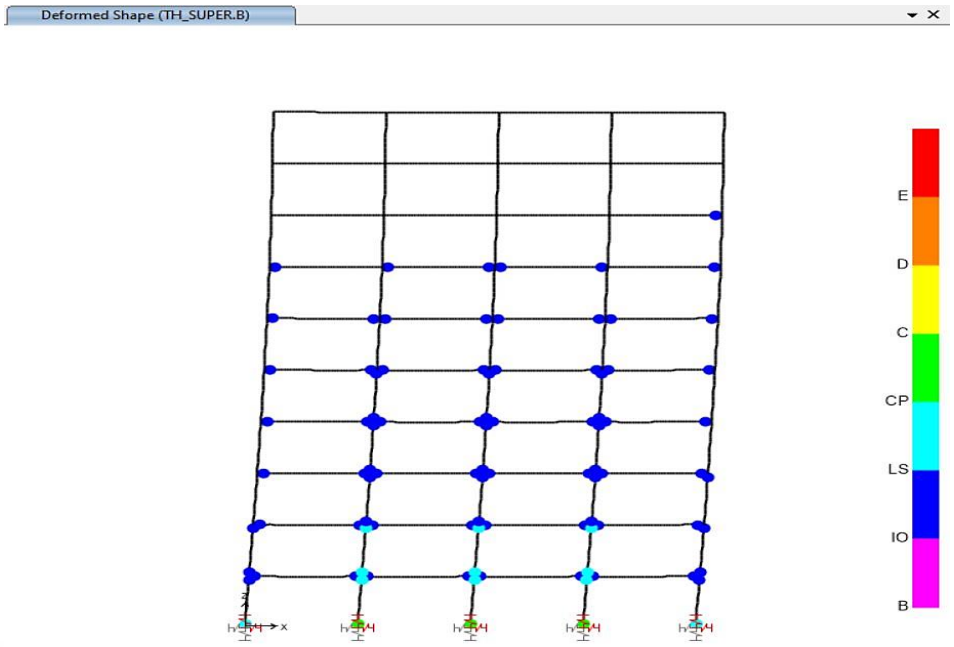
Tablo 4.23 10- katlı yapıda Loma Prieta depremi için zemin kat kolon hasar durumu

Model	Kesit	θ_p (rad)	$\theta_p^{(GÖ)}$ (rad)	$\theta_p^{(KH)}$ (rad)	$\theta_p^{(SH)}$ (rad)	Hasar
Ankastre Model	K111	0.01701	0.02252	0.01689	0	İH
	K112	0.01946	0.02595	0.01946	0	BH
	K113	0.02002	0.02615	0.02021	0	BH
	K114	0.01982	0.02694	0.02020	0	BH
	K115	0.01731	0.02446	0.0183	0	BH
Altsistem Model	K111	0.01919	0.02593	0.01945	0	BH
	K112	0.02141	0.02388	0.01791	0	İH
	K113	0.02363	0.02450	0.01838	0	İH
	K114	0.02204	0.02324	0.01743	0	İH
	K115	0.02124	0.02291	0.01719	0	İH
Doğrudan Model	K111	0.02484	0.02665	0.01998	0	GB
	K112	0.02807	0.02493	0.01869	0	GB
	K113	0.03029	0.02713	0.02036	0	GB
	K114	0.02875	0.02490	0.01868	0	GB
	K115	0.02685	0.02588	0.01941	0	GB

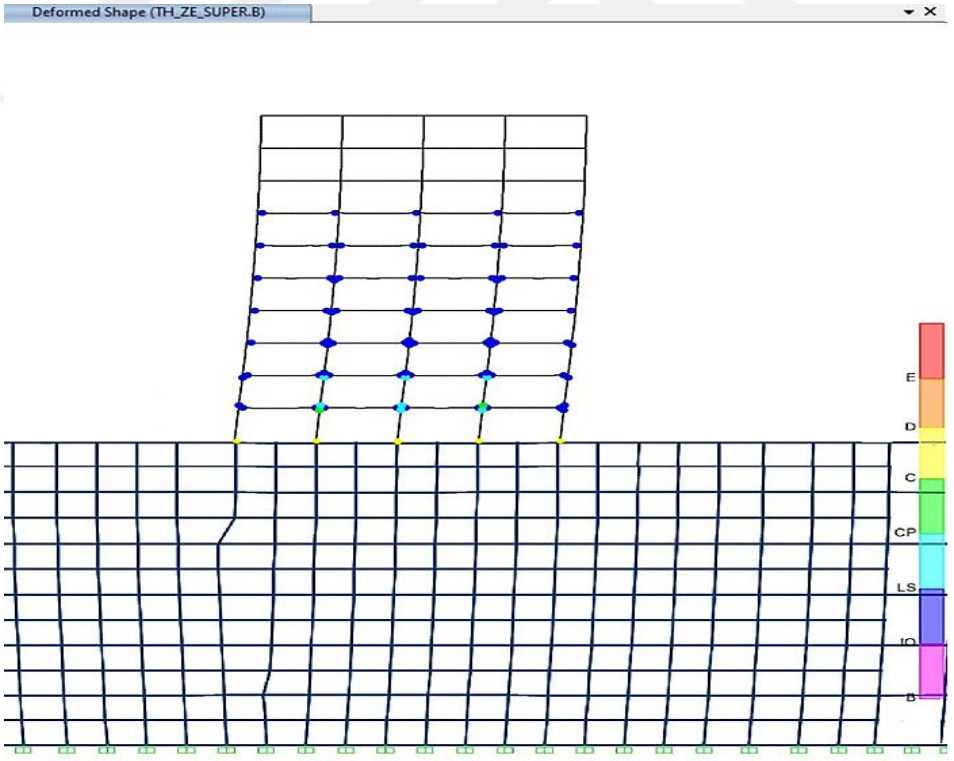
10- katlı yapılar için farklı depremlerin analizleri sonucu elde edilen kolon ve kirişlere ait plastik mafsal durumları Şekil 4.26'da gösterilen aks için verilmiştir.



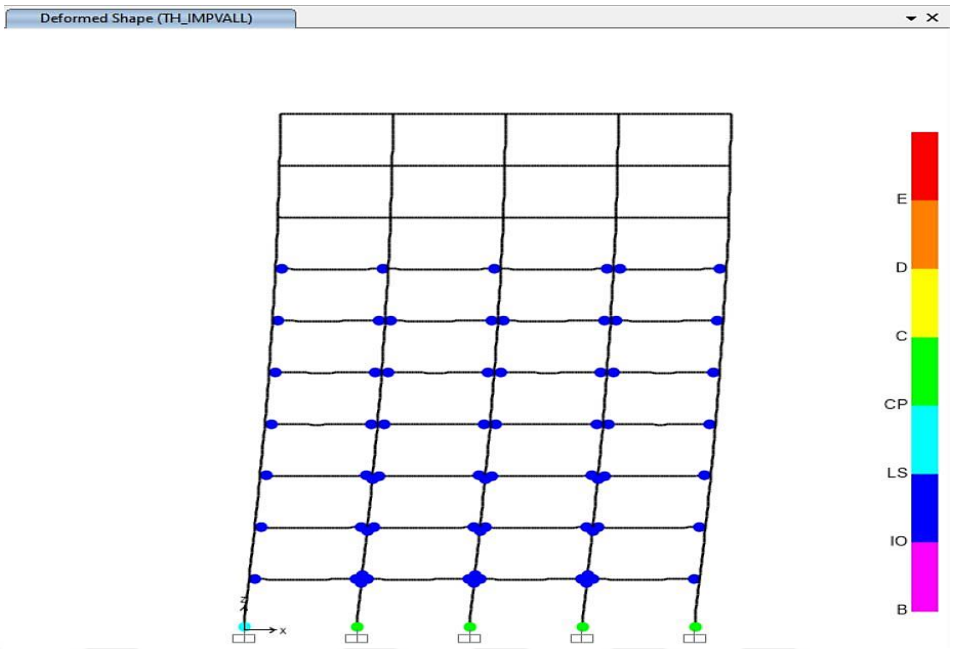
Şekil 4.36 Ankastre model için 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları



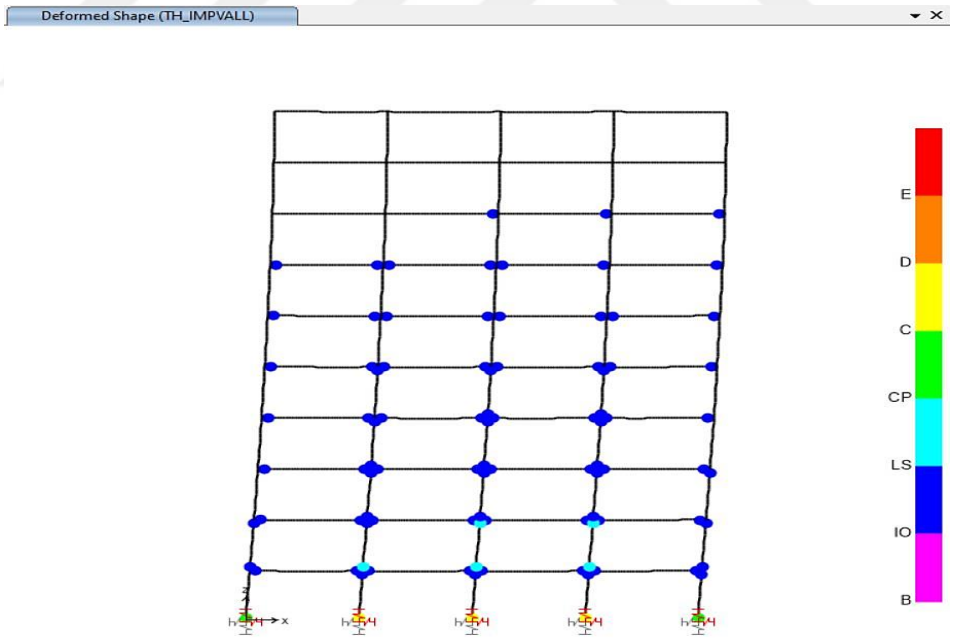
Şekil 4.37 Altsistem model için 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları



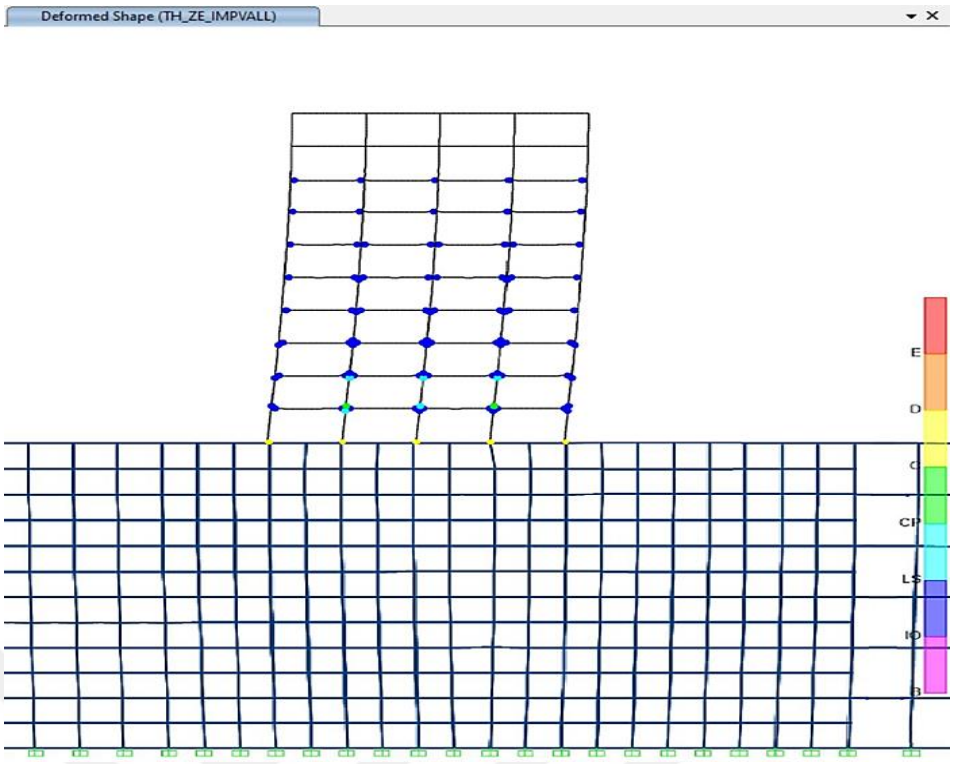
Şekil 4.38 Doğrudan model için 10- katlı yapıda Superstition Hills-02 depremi için hasar durumları



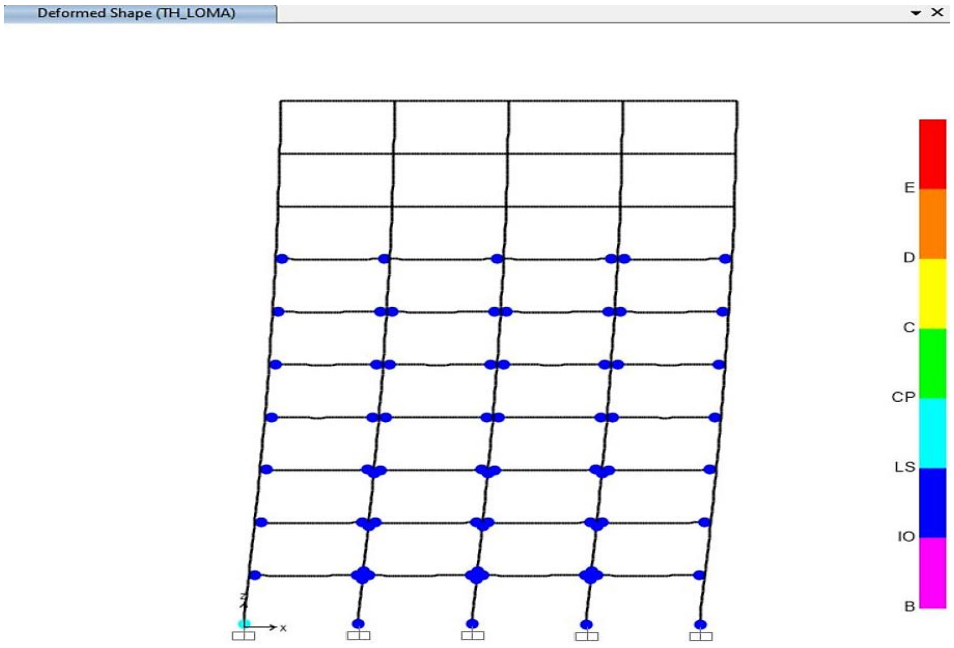
Şekil 4.39 Ankastre model için 10- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları



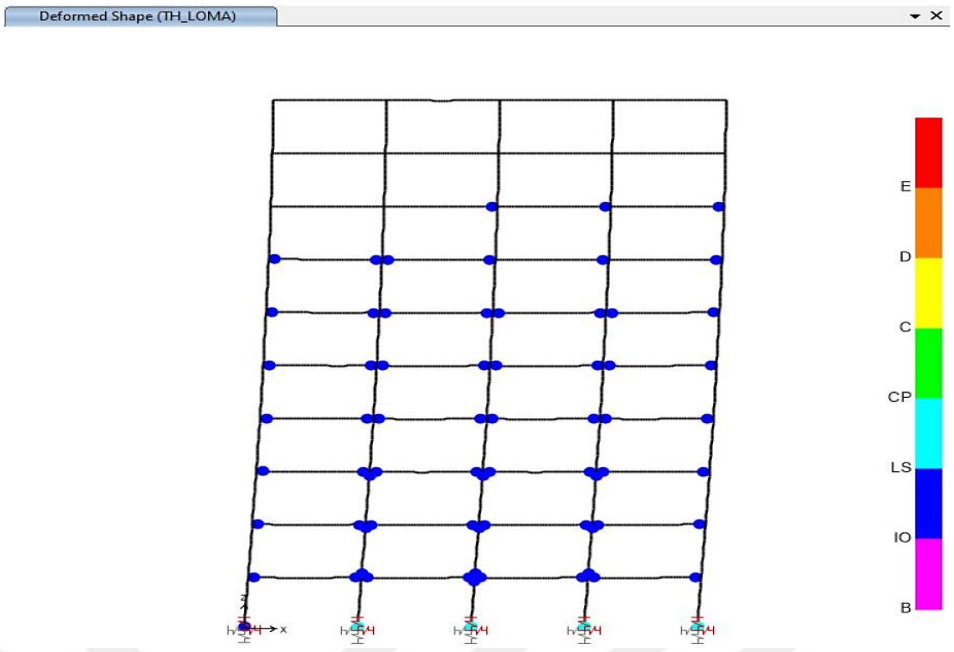
Şekil 4.40 Altsistem model için 10- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları



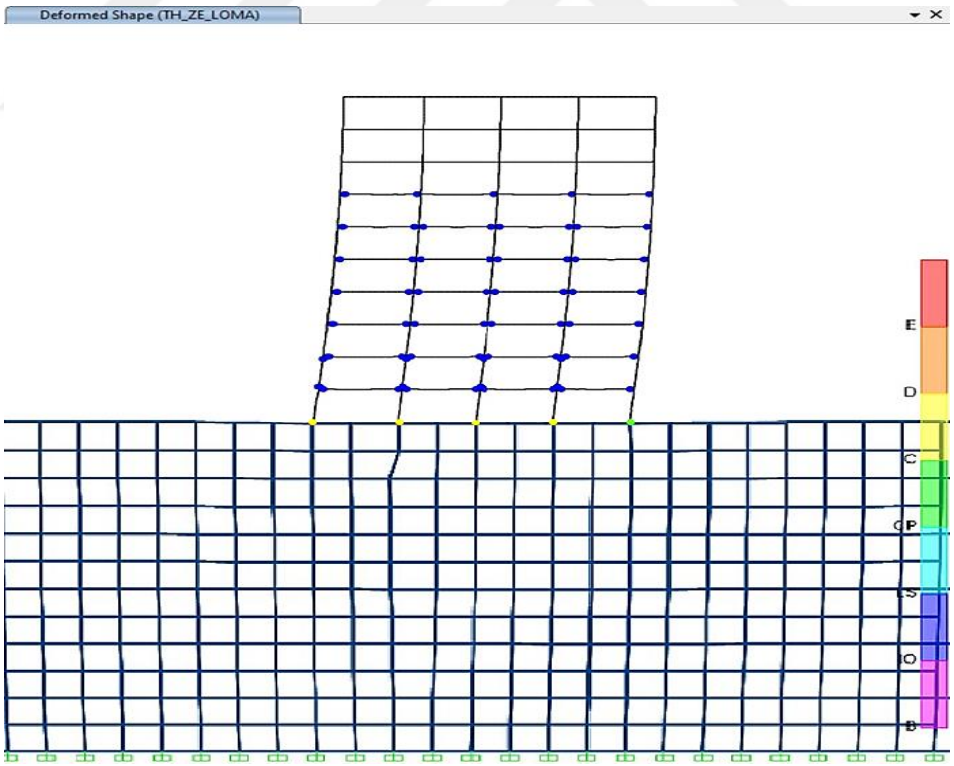
Şekil 4.41 Doğrudan model için 10- katlı yapıda Impvall Valley_06 depremi için hasar durumları



Şekil 4.42 Ankastre model için 10- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları



Şekil 4.43 Altsistem model için 10- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları



Şekil 4.44 Doğrudan model için 10- katlı yapıda Loma Prieta depremi için hasar durumları

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yüksek sünekliğe sahip 5- ve 10- katlı betonarme yapılar ankastre mesnetli ve yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak modellenmiş, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Yapı-zemin dinamik etkileşimi, hem altsistem yöntemi hem de doğrudan yöntem kullanılarak modellenmiştir. Altsistem yöntemi için literatürde kullanılan yayların rijitlikleri hesaplanarak zemin modellenirken, doğrudan modelde yapı-zemin ortak sistemi sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Yapılar için doğrusal olmayan davranış kiriş ve kolon kesitlerine tanımlanan plastik mafsallar ile yansıtılırken, zeminin doğrusal olmayan davranışı sonlu elemanlar modeli için kayma modülü oranı ve sönüm oranı ile kayma deformasyonları arasındaki ilişki dikkate alınarak modellere yansıtılmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için TBDY-2018'deki ZE zemin sınıf tanımına uygun yumuşak zemin türü için 3 farklı deprem kaydı seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapıların periyotları, tepe nokta yerdeğiştirmeleri, göreli kat öteleme oranları, taban kesme kuvvetleri ve yapı elemanlarının hasar durumları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmadaki analizlerden elde edilen verilere göre,

1) Zeminin etkilerinin dikkate alınmadan yapılan analizler ile yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak yapılan analizlerdeki periyot sonuçlarında değişimler meydana gelmiştir. Zemin etkilerinin dikkate alınması, yapı esnekliğini artırarak titreşim periyotlarının artmasına sebep olmuştur. Periyotların, doğrudan yöntem ile modellenen yapılarda, altsistem yöntemi ile modellenen yapılara kıyasla daha fazla arttığı görülmüştür. Ayrıca yapı kat yüksekliğinin artması ile periyotlardaki artış miktarları daha fazla olmuştur.

2) Yapıların tepe noktası maksimum yerdeğiştirmelerinde ve kat yerdeğiştirmelerinde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasıyla gözle

görülür değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimler, her iki doğrultuda da altsistem yöntemi modelleri için depremin içeriğine bağlı olarak artış veya azalış olabilirken, zeminin doğrudan yöntem ile modellendiği yapılarda üç farklı deprem içinde daha belirgin şekilde artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca, kat yüksekliklerinin artmasıyla hem ankastre mesnetli hem de yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı modellerin yerdeğiştirmelerinde artışlar görülmüştür.

3) Göreli kat öteleme oranları incelendiğinde, zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla artış meydana gelmiştir. Bu artışın doğrudan yöntem ile modellenen yapılarda daha belirgin olduğu görülmüştür. Göreli kat ötelemelerinin artışı, yapı yüksekliği boyunca değişkendir. Maksimum kat öteleme oranları, her iki doğrultuda da 5- ve 10- katlı yapıların ilk 3 katında meydana gelirken üst katlara doğru azalma gerçekleşmiştir.

4) Zemin etkilerinin dikkate alınmasıyla daha esnek hale gelen yapıların maksimum taban kesme kuvvetlerinde azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Bu azalmalar altsistem yöntemi modellerinde çok belirgin olmamakla birlikte, doğrudan yöntemde azalmaların daha belirgin olduğu görülmektedir. Ayrıca yapı yüksekliğinin artmasıyla birlikte taban kesme kuvveti azalma oranı depremler arasında farklılık göstermektedir.

5) Kesit hasar durumları incelendiğinde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ile birlikte yapı elemanlarının plastik dönmelerinde ve yapı hasar durumlarında önemli değişiklikler meydana gelmiştir. 5- katlı yapılarda zemin etkileriyle farklı depremler altında kolon ve kiriş elemanların hasar bölgelerinde değişiklikler olmuştur. Bu değişiklikler doğrudan yöntem modelinde daha belirgindir. 10- katlı yapılarda ise kat yüksekliğinin de artmasıyla birlikte hasar durumlarında ciddi değişiklikler görülmüştür. Özellikle zemin katlardaki kolonlarda göçme durumları meydana gelmiştir.

Bu çalışmada yumuşak zeminler üzerindeki farklı yükseklikteki yapıların doğrusal olmayan analizleri sonucunda zemin özelliklerinin dikkate alınması sonucunda yapıların periyotlarında, yerdeğiştirmelerinde, kat ötelemelerinde ve kesit hasar durumlarında önemli değişiklikler görüldüğünden dolayı; mühendislik uygulamalarında genellikle ankastre mesnetli tasarlanan yapıların her zaman doğru sonuçlar veremeyeceği ve çeşitli olumsuz sonuçlara neden olabileceği için özellikle deprem aktivitesi yüksek bölgelerde ve yumuşak zeminler üzerine inşa edilecek yüksek katlı yapıların sismik tasarımında ve analizlerinde yapı-zemin etkileşimi etkilerinin göz önünde bulundurulmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerde, yumuşak zemini temsil eden 30 m derinliğinde ZE zemin sınıfı kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda TBDY-2018'e göre tanımlanan ZA, ZB, ZC, ZD ve ZF zemin sınıflarında veya farklı zemin tabaka derinliklerinde yapı-zemin etkileşiminin sismik davranışlara olan etkileri incelenebilir. Ayrıca, analizler için sadece 5- ve 10- katlı betonarme binalar dikkate alınmıştır. Daha yüksek katlı binalar dikkate alınarak yapı-zemin sisteminin sismik davranışları incelenebilir. Çalışmada zemin ile uyumlu 3 farklı deprem kaydı seçilerek analizler yapılmıştır. Deprem sayısı artırılarak daha fazla sonuç elde edilebilir. Tez kapsamında tekli bina modelleri için yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır. Ancak mevcut stokta bulunan yapıların çoğu bitişik yapılar olmaktadır. Bu nedenle bitişik yapılar dikkate alınarak bunların arasındaki yapı-zemin etkileşimi araştırılıp, bitişik binalar arasındaki boşluk mesafelerinin önemi belirlenebilir.

KAYNAKÇA

[1] H.R. Tabatabaiefar ve A. Massumi, "A simplified method to determine seismic responses of reinforced concrete moment resisting building frames under influence of soil-structure interaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 30, sy. 11, ss. 1259-1267, 2010.

[2] Q. V. Nguyen, B. Fatahi ve A. S. Hokmabadi, "The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil-foundation-structure interaction", Structural Engineering and Mechanics, c. 58, sy. 6, ss. 1045-1075, 2016.

[3] R. Livaoglu ve A. Dogangun, "Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 27, sy. 9, ss. 855–863, 2007.

[4] M. Ghandil ve F. Behnamfar, "The near-field method for dynamic analysis of structures on soft soils including inelastic soil-structure interaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 75, ss. 1-17, 2015.

[5] B. Fatahi ve S.H.R. Tabatabaiefar, "Fully nonlinear versus equivalent linear computation method for seismic analysis of midrise buildings on soft soils", International Journal of Geomechanics, c. 14, sy. 4, 2014.

[6] H. Güllü ve H. S. Jaf, "Full 3D nonlinear time history analysis of dynamic soil-structure interaction for a historical masonry arch bridge", Environmental Earth Sciences, c. 75, sy. 21 ss. 1-17, 2016.

[7] F. Behnamfar ve M. Banizadeh, "Effects of soil-structure interaction on distribution of seismic vulnerability in RC structures" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 80, ss. 73-86, 2016.

[8] M. Ghandil ve H. Aldaikh, "Damage-based seismic planar pounding analysis of adjacent symmetric buildings considering inelastic structure-soil-structure interaction", Earthquake Engineering Structural Dynamics c. 46, sy. 7, ss. 1141-1159, 2013.

[9] E. Hökelekli ve A. Al-Helwani, "Effect of soil properties on the seismic damage assessment of historical masonry minaret-soil interaction systems", The Structural Design of Tall and Special Buildings, c. 29, sy. 2, 2019.

[10] H.R. Tabatabaiefar, B. Fatahi ve B. Samali, "Seismic behaviour of building frames considering dynamic soil-structure interaction", International Journal of Geomechanics, c. 13, sy. 4, ss. 409-420, 2012.

[11] H. Güllü ve M. Karabekmez, “Effect of near-fault and far-fault earthquakes on a historical masonry mosque through 3D dynamic soil-structure interaction”, Engineering Structures, c. 152, sy. 1, ss. 465-492, 2017.

[12] H. G. Kabtamu, G. Peng ve D. Chen, “Dynamic analysis of soil-structure interaction effect on multi story RC frame”, Open Journal of Civil Engineering, c. 8, sy. 4, ss. 426-446, 2018.

[13] M. Ghandil ve F. Behnamfar, “Ductility demands of MRF structures on soft soils considering soil-structure interaction”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 92, ss. 203-214, 2017.

[14] M. Ada ve Y. Ayvaz, “The structure-soil-structure interaction effects on the response of the neighbouring frame structures”, Latin American Journal of Solids and Structures, c. 16, sy. 8, 2019.

[15] B. Fatahi, H.R. Tabatabaiefar ve B. Samali, “Soil-structure interaction vs site effect for seismic design of tall buildings on soft soil”, Geomechanics and Engineering, c. 6, sy. 3, ss. 293-320, 2014.

[16] E. Türkeli, “Effect of soil-structure interaction on the seismic behavior of RC chimneys”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, c. 7, sy. 1, ss. 505-518, 2019.

[17] B.T. Cayci, M. Inel ve E. Ozer, “Effect of soil-structure interaction on seismic behavior of mid- and low-rise buildings”, International Journal of Geomechanics, c. 21, sy. 2, 2021.

[18] N. Çağlar, Z. Ş. Garip ve S. Atasoy, “Yumuşak zeminlerde yapılan binaların deprem davranışına bodrum kat etkisi”, 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 18-20 Haziran 2014, Karabük.

[19] G. Dok, M. Aktaş ve O. Kırtel “Farklı zemin türleri ve yapı yüksekliklerinin yapı-zemin dinamik etkileşimi ile doğrusal olmayan davranışa etkisi: Betonarme çerçeve örneği”, 8. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 11-14 Mayıs 2015, İstanbul.

[20] M. G. Kalyanshetti, S. A. Halkude ve Y. C. Mhamane, “Seismic response of R.C. building frames with strap footing considering soil-structure interaction”, International Journal of Research in Engineering and Technology, c. 4, sy. 25, ss. 7–14, 2015.

[21] A. K. Korkmaz ve F. Demir, “Yapı-zemin etkileşiminin yapıların deprem davranışlarına etkileri”, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, c. 3, sy. 1, ss. 12-17, 2012.

[22] M. Ahmadı, “Inelastıc static (pushover) analysis for estimating seismic demands of RC buildings including soil-structure interaction”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2020.

[23] M. Kamal, E. Ozer, B. T. Çaycı, M. Inel, “Seismic pounding between adjacent buildings considering soil-structure interaction”, 13th International Congress on Advances in Civil Engineering, 12-14 Eylül 2018, İzmir

[24] G. Dok ve O. Kırtel, “Soil-structure interaction in nonlinear pushover analysis of shear wall-frame RC structures: nonhomogeneous soil condition”, 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, 4-6 Mayıs 2018, Sakarya.

[25] M. Y. Çetinkaya, E. Çelebi ve O. Kırtel, “Yapı-temel-zemin sismik etkileşim probleminin Adapazarı bölgesi için empedans fonksiyonları yardımıyla analizi”, Journal of Polytechnic, c. 20, sy. 2, ss. 325-332, 2017.

[26] M. N. Aydınoğlu, “Deprem etkisi altında yapı-kazık-zemin etkileşimi”, İleri Mühendislik Uygulamaları ve Sorunları Konferansı, 8 Kasım 2013, Ankara.

[27] M. Halabian, “Dynamic behaviour of tall slender structures on flexible foundations subjected to extreme events”, Ph.D. thesis, University of Western Ontario, 2001.

[28] A.S. Veletsos ve J.W. Meek, “Dynamic behavior of building-foundation systems”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, ss. 121–138, 1974.

[29] J.P. Wolf, “Dynamic Soil-Structure Interaction”, 1st ed. New Jersey, USA, Prentice-Hall, 1985.

[30] M. Ada, “Bina grupları üzerindeki yapı-zemin-yapı etkileşiminin incelenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2020.

[31] J. Lysmer ve R. L. Kuhlemeyer, “Finite Dynamic Model for Infinite Media”, J Eng Mech Div-ASCE, c. 95, sy. 6, ss. 859-877, 1969.

[32] S. Ghosh, E. L. Wilson, “Dynamic stress analysis of axi-symmetric structures under arbitrary loading”, California, 1969.

[33] M. H. Rayhani ve E. L. Naggar, “Numerical modeling of seismic response of rigidfoundation on soft soil”, International Journal of Geomechanics, c. 8, sy. 6, ss. 336-346, 2008.

[34] R. Livaoglu, “The numerical and empirical evaluation of chimneys considering soil-structure interaction and high temperature effects”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 66, 2014.

[35] T. J. R. Hughes, “The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.

[36] B. Jeremic, G. Jie, M. Preisig ve N. Tafazzoli, “Time domain simulation of soil foundation-structure interaction in non-uniform soils”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, c. 38, sy. 5, ss. 699–718, 2009.

[37] J.P. Stewart, G.L. Fenves, R.B. Seed, “Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical methods,” Journal of Geotechnical Engineering, 1999.

[38] A. Pais, E. Kausel, “Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 7, sy. 4, ss. 213- 227, 1988.

[39] G. Gazetas, “Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations”, Journal of Geotechnical Engineering, c. 117, sy. 9, ss. 1363–1381, 1991.

[40] G. Mylonakis, S. Nikolaou, G. Gazetas, “Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 26, ss. 824-853, 2006.

[41] E. Kausel, J.M. Roesset ve J.T. Christian, “Nonlinear behavior in soil-structure interaction”, Journal of Geotechnical Engineering Division, c. 102, ss. 1159–1178, 1976.

[42] TBDY 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara.

[43] “Türkiye Deprem Tehlike Haritası İndeksi”, https: // www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi (Erişim; Ocak, 11, 2022).

[44] Y. Fahjan, “Selection and scaling of real earthquake accelerograms to fit the Turkish Design Spectra”, Teknik Dergi, c. 19, sy. 3, ss. 4423-4444, 2008.

[45] K. Darılmaz, “Depreme Dayanıklı Binaların Tasarımına Giriş”, Birsen Yayınevi, 2019.

[46] M.B. Darendeli, “Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves”, Ph.D. Thesis, The University of Texas at Austin, 2001.

[47] S.L. Kramer, “Geotechnical Earthquake Engineering”, Prentice Hall,1996.

[48] M. Vucetic, R. Dobry, “Effect of soil plasticity on cyclic response,” Journal of Geotechnical Engineering, c. 117, sy. 1, ss. 89-107, 1991.

[49] J. I. Sun, R. Golesorkhi, ve B. Seed, “Dynamic module and damping ratios for cohesive soils”, Earthquake Engineering Research Centre, Report No. UCB/EERC-88/15, University of California, 1998.

[50] R. Scarfone, M. Morigi and R. Conti, “Assessment of dynamic soil-structure interaction effects for tall buildings: A 3D numerical approach”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, c. 128, 2020.

[51] SAP2000, (2022). "Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc.", California.

[52] A. Karabulut, “TDY2007 yönetmeliği ve FEMA 440 raporunda tanımlanan doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin mevcut betonarme binalar için karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2011.

[53] F. Kürkçü, “20 katlı betonarme bir yapının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’ne göre tasarımı ve deprem performansının belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2019.

[54] PEER-NGA Deprem Kayıtları Veri Bankası, 30.01.2021, https://ngawest2.berkeley.edu/

[55] SEISMOMATCH, (2022). "Response Spectrum Matching, Seismosoft Company", Pavia.

[56] DEEPSOIL v7.0, (2020). Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns, University of Illinois at Urbana-Champaign.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M. T. ÇOBAN, B. SEVİM, “Yapı-Zemin Etkileşiminin Sismik Davranışa Etkileri”, 4. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi, İstanbul, 2022