

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEMİN YAPI ETKİLEŞİMİNİN HASAR
OLASILIĞINA ETKİSİ

Hülagü ETHEMOĞLU

DOKTORA TEZİ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Programı

Danışman
Doç. Dr. Murat Serdar Kırçıl

Şubat, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEMİN YAPI ETKİLEŞİMİNİN HASAR OLASILIĞINA ETKİSİ

Hülagü ETHEMOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 12.02.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Murat Serdar KIRÇIL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Murat Serdar KIRÇIL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Güray ARSLAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Müberra ESER AYDEMİR, Üye
İstanbul Aydın Üniversitesi

Prof. Dr. Bilge DORAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Alper İLKİ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Murat Serdar KIRÇIL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Zemin Yapı Etkileşimin Hasar Olasılığına Etkisi 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.

Hülagü ETHEMOĞLU

Anneme, babama

ve

kardeşlerime

TEŞEKKÜR

Bu doktora tezinin hazırlanmasında, bana güvenen, beni destekleyen, zaman ve mekan gözetmeden sorularıma büyük bir sabırla cevap veren hocam Doç. Dr. Murat Serdar KIRÇIL' a minnettarım. Tez izleme komitemde yer alan Prof. Dr. Güray ARSLAN ve Prof. Dr. Müberra Eser AYDEMİR'e çalışmama yapmış oldukları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Bu doktora tezinin tez savunma sınavında jüride bulunmayı kabul eden Prof. Dr. Bilge DORAN ve Prof. Dr. Alper İLKİ'ye teşekkür ederim.

Bana desteklerini bir an olsun esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime şükranlarımı sunarım.

Hülagü ETHEMOĞLU

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xix
ABSTRACT	xxi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Hipotez	10
1.4 Zemin Yapı Etkileşimi.....	10
1.5 Zemin Yapı Ortak Davranışı	13
1.6 Zemin Yapı Etkileşimi Analiz Yöntemleri	16
1.7 Çeşitli Dokümanlarda Zemin Yapı Etkileşimi Analiz Metotları	19
2 GENEL	22
2.1 Örnek Binalar.....	22
2.2 Zemin Sınıfları	25
2.3 Deprem Kayıtları	26
3 YÖNTEM	33
3.1 Doğrusal Elastik Olmayan Analiz.....	33
3.2 Örnek Binaları Mesnetleme Özellikleri.....	35
3.3 Analizlerin Ölçeklenmesi	37
3.4 Analiz Platformu	38
3.5 Örnek Binaların Doğrusal Olmayan Analizleri.....	40
3.6 Örnek Binaların Periyotlarındaki Değişimler	43
3.7 Örnek Binaların Doğrusal Olmayan Analizleri.....	43
3.8 Örnek Binaların Hasar Sınırlarına Karşı Gelen Spektral İvmeleri.....	46
3.9 Örnek Binaların Hasar Sınırlarına Karşı Gelen Görelî Kat Ötelemeleri.....	50
4 PERFORMANSA DAYALI DEĞERLENDİRME	54
4.1 Deprem Yönetmelikleri ve Performans Kavramı	54
4.2 Kesit Hasar Sınırları	55

4.3 Kesit Hasar Bölgeleri	55
4.4 Yapı Performans Düzeyleri	57
4.5 Analizlerdeki Performans Düzeyi Kabulleri	58
5 HASAR OLASILIK EĞRİLERİ	60
5.1 Olasılık Kavramı.....	60
5.2 Olasılık Modelleri	61
5.3 Hasar Olasılık Eğrileri.....	62
5.4 Analitik Yöntem Kullanılarak Hasar Olasılık Eğrilerinin Oluşturulması	64
5.5 Örnek Hasar Olasılık Eğrisinin Çizilmesi	67
5.6 Örnek Binaların Hasar Olasılık Eğrileri	71
5.7 Örnek Binaların Hasar Olasılıkları.....	76
5.8 Göreli Kat Ötelemesi Sınırları ve Güven Aralıkları.....	77
5.9 Hasar Sınırları ve Güven Aralıkları	92
6 SONUÇ ve ÖNERİLER	111
KAYNAKÇA	113
A 5 KATLI ÖRNEK BİNA DONATI DETAYLARI	116
B 10 KATLI ÖRNEK BİNA DONATI DETAYLARI	118
C 15 KATLI ÖRNEK BİNA DONATI DETAYLARI	120
D B SINIFI ZEMİN İÇİN DEPREM KAYITLARI ve İVME SPEKTRUMLARI	123
E C SINIFI ZEMİN İÇİN DEPREM KAYITLARI ve İVME SPEKTRUMLARI	127
F D SINIFI ZEMİN İÇİN DEPREM KAYITLARI ve İVME SPEKTRUMLAR	131
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	135

SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal Frekans
ζ_D	Analizlerdeki Belirsizliklerden Kaynaklanan Standart Sapma
σ_D	Analizlerden Elde Edilen Değerlerin Standart Sapması
I_0	Atalet Momenti
F	Birim Kuvvet
P	Birikimli Standart Normal Olasılık
n	Değişken Sayısı
Δ	Deplasman
$\ddot{x}_g$	Deprem İvmesi
σ_r	Deprem Kayıtlarındaki Rastgelelik ile İlgili Standart Sapma
M_w	Depremim Moment Büyüklüğü
$p(t)$	Dış yük
c_v	Düşey Sönüm Katsayısı
k_v	Düşey Yay Katsayısı
ε_s	Donatı Çeliği Birim Şekil değiştirmesi
θ	Dönme
S_{ae}	Elastik Spektral İvme
PGA	En Büyük Yer İvmesi
PGV	En Büyük Yer Hızı
PGD	En Büyük Yer Yerdeğiştirme
r_0	Eşdeğer Yarıçap
ε_{cg}	Etriye İçindeki Bölgenin En Dış Lifindeki Beton Basınç Birim Şekildeğiştirmesi
σ	Güven Aralığının Standart Sapması
α	Güven Düzeyi
$\langle m \rangle_{1-\alpha}$	(1- α) Güven Düzeyindeki Güven Aralığı
$\dot{x}$	Hız
x_i	i Numaralı Değişken
$\ddot{x}$	İvme
δ	Katlar arasındaki yatay öteleme farkı
ρ_s	Kesitte Mevcut Enine Donatı Hacımsal Oranı

ρ_{sm}	Kesitte Bulunması Gereken Hacımsal Donatı Oranı
ϵ_{cu}	Kesitin En Dış Lifindeki Beton Basınç Birim Şekildeğiştirmesi
m	Kütle
$f_x(X)$	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
x	Lognormal Dağılan Değişken
x_m	Lognormal Dağılan Değişkenin Orta Değeri
λ	Lognormal Dağılan Değişkenin Ortalama Değeri
ζ	Lognormal Dağılan Değişkenin Standart Sapması
σ_c	Malzeme Dayanımındaki Rastgelelik ile İlgili Standart Sapma
$k_{\alpha/2}$	$(1-\alpha/2)$ Olasılığına Karşılık Gelen Standart Normal Değişken
N	Örnek Sayısı
T	Periyot
υ	Poisson Oranı
SD	Sınır Durum
ζ_{SD}	Sınır Durum Standart Sapması
S_a	Spektral İvme
S_d	Spektral İvme
S_v	Spektral Hız
$S(T)$	Spektrum Katsayısı
T_A	Spektrum Karakteristik Periyodu
T_B	Spektrum Karakteristik Periyodu
s	Standart Normal Değişkenin Değeri
$\bar{x}$	Standart Normal Ortalama,
$\Phi(s)$	Standart Normal Olasılık
ξ	Sönüm Oranı
s_x	Standart Sapma
A_0	Temel Alanı
$dmaks$	Tepkinin En Büyük Değeri
d_{SD}	Tepkinin Sınır Durumu
k_x	x Yönündeki Yay Katsayısı
σ_m	Yapı Modelinde Yapılan Basitleştirme (Tek Serbestlik Dereceli Sistem veya Çok Serbestlik Dereceli Sistem) ile İlgili Standart Sapma
k	Yay katsayısı
c_h	Yatay Sönüm Katsayısı
k_h	Yatay Yay Katsayısı

g	Yer çekimi İvmesi
x	Yer Değişirme
h	Yükseklik
k_{yy}	y Yönündeki Dönme Yay Katsayısı
t	Zaman
Δt	Zaman aralığı
ρ	Zeminin Birim Hacim Kütlesi
v_s	Zemin Kayma Dalgası Hızı
c_s	Zemin Kayma Dalgası Hızı Katsayısı
$\tilde{\Delta}$	Zemin Yapı Etkileşimine Bağlı Yerdeğiştirme
$\tilde{T}$	Zemin Yapı Etkileşimine Bağlı Periyot
u_f	Zemin Yapı Etkileşimine Bağlı Öteleme
k_z	z Yönündeki Yay Katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

ASCE	The American Society of Civil Engineers
FEMA	Federal Emergency Management Agency
NEHRP	National Earthquake Hazards Reduction Program
PEER	The Pacific Earthquake Engineering Research

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Zemin Yapı Etkileşimi	11
Şekil 1.2 Depremler için Genel Zemin Enkesiti	12
Şekil 1.3 Farklı Zeminler Sınıfları için Elastik İvme Spektrumları	13
Şekil 1.4 Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Farklı Mesnetlenme Şekilleri, ((a) Zemine Ankastre Bağlı, (b) Zemin Yapı Etkileşimli)	13
Şekil 1.5 Periyodun Uzaması ve Spektral İvmenin küçülmesi	16
Şekil 1.6 Periyodun Uzaması ve Spektral İvmenin Büyümesi	16
Şekil 1.7 Zemin Yapı Etkileşimi Analiz Yöntemleri	17
Şekil 1.8 Ortak Sistem Analiz Modeli	18
Şekil 1.9 Kinematik ve Eylemsizlik Etkileşimleri	19
Şekil 2.1 A Sınıfı Zemin İvme Spektrumu	24
Şekil 2.2 Örnek Binaları Kalıp Planı ve Kesiti	24
Şekil 2.3 Örnek Binaları Düşey Kesitleri	25
Şekil 2.4 Deprem Kayıtlarının Kayma Dalgası Hızı ve Büyüklük Grafiği	30
Şekil 2.5 Deprem Kayıtlarının Büyüklük ve Maksimum Yer İvmesi Grafiği	31
Şekil 2.6 Deprem Kayıtlarının Büyüklük ve Faya Uzaklık Grafiği	31
Şekil 2.7 Deprem Kayıtlarının Faya Uzaklık ve Maksimum Yer İvmesi Grafiği	31
Şekil 3.1 Örnek Binaların Mesnetlenme Şekilleri, Zemin Yapı Etkileşimsiz ve Etkileşimli	37
Şekil 3.2 Örnek Binaların Spektral İvme Çözüm Setleri	38
Şekil 3.3 Tipik Betonarme Kesitin Liflerine Ayrılması	39
Şekil 3.4 Eleman Boyunca Tipik Betonarme Kesitin Gösterimi	39
Şekil 3.5 Eleman Boyunca Dikkate Alınan Kesitler	40
Şekil 3.6 Mander Beton Modeli Birim Şekil Değiştirme Gerilme Değişimi	41
Şekil 3.7 Donatı Çeliği Birim Şekil Değiştirme Gerilme Değişimi	41
Şekil 3.8 Menegotto – Pinto Çevrimsel Çelik Modeli	42
Şekil 3.9 Mander Çevrimsel Beton Modeli	42
Şekil 3.10 5 Katlı Örnek Bina, Etkileşimsiz durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri	44
Şekil 3.11 5 Katlı Örnek Bina, Etkileşimli durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri	44

Şekil 3.12	10 Katlı Örnek Bina, Etkileşimsiz durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri	45
Şekil 3.13	10 Katlı Örnek Bina, Etkileşimli durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri	45
Şekil 3.14	15 Katlı Örnek Bina, Etkileşimsiz durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri	46
Şekil 3.15	15 Katlı Örnek Bina, Etkileşimli durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri	46
Şekil 3.16	5 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiğı	47
Şekil 3.17	5 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiğı	47
Şekil 3.18	5 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiğı	47
Şekil 3.19	10 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiğı	48
Şekil 3.20	10 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiğı	48
Şekil 3.21	10 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiğı	48
Şekil 3.22	15 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiğı	49
Şekil 3.23	15 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiğı	49
Şekil 3.24	15 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiğı	49
Şekil 3.25	5 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri.....	50
Şekil 3.26	5 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri.....	50
Şekil 3.27	5 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri.....	51
Şekil 3.28	10 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri.....	51
Şekil 3.29	10 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri.....	51
Şekil 3.30	10 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri.....	52

Şekil 3.31 15 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri.....	52
Şekil 3.32 15 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri.....	52
Şekil 3.33 15 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri.....	53
Şekil 4.1 Yapı Performansının Belirlenmesi Süreci	54
Şekil 4.2 Kesit Hasar Sınırları.....	55
Şekil 4.3 Kesit Hasar Sınırları ve Bölgeleri.....	56
Şekil 4.4 Yapı Performans Düzeyleri	58
Şekil 4.5 Performans Düzeyleri ve Hasar Tanımlamaları	58
Şekil 4.6 Analiz Süreçleri	59
Şekil 5.1 Norma ve Lognormal Dağılım Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları	61
Şekil 5.2 Lognormal Dağılımın Frekans Eğrisi (M. S. KIRÇIL)	63
Şekil 5.3 Lognormal Dağılımın Olasılık Eğrisi (M. S. KIRÇIL)	63
Şekil 5.4 Tipik Lognormal Değişkenin Hasar Olasılık Eğrisi (M. S. KIRÇIL).....	64
Şekil 5.5 Spektral İvmelerin Lognormal Olasılık Kağıdı	70
Şekil 5.6 Görelî Kat Ötelemelerinin Olasılık Kağıdı	71
Şekil 5.7 Hasar Olasılık Eğrisi.....	71
Şekil 5.8 5 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri.....	72
Şekil 5.9 5 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri.....	72
Şekil 5.10 5 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri	73
Şekil 5.11 10 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri	73
Şekil 5.12 10 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri	74
Şekil 5.13 10 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri.....	74
Şekil 5.14 15 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri	75
Şekil 5.15 15 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri	75
Şekil 5.16 15 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri.....	76
Şekil 5.17 Toplu Görelî Kat Ötelemeleri Olasılık Kağıdı	89
Şekil 5.18 Minimum Hasar Sınırı Görelî Kat Ötelemelerinin Güven Düzeylerini İçeren Hasar Olasılık Eğrileri	90
Şekil 5.19 Güvenlik Hasar Sınırı için Güven Aralıklarındaki Görelî Kat Ötelemesi Olasılıkları.....	91
Şekil 5.20 Göçme Hasar Sınırı için Güven Aralıklarındaki Görelî Kat Ötelemesi Olasılıkları.....	91

Şekil D.1 HECTOR000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	123
Şekil D.2 HECTOR090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	123
Şekil D.3 ARE000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	123
Şekil D.4 ARE090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	124
Şekil D.5 TMZ000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	124
Şekil D.6 TMZ270 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	124
Şekil D.7 AND250 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	124
Şekil D.8 AND340 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	125
Şekil D.9 TUJ262 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	125
Şekil D.10 TUJ352 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	125
Şekil D.11 CHY000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	125
Şekil D.12 CHY090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	126
Şekil D.13 CPE147 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	126
Şekil D.14 CPE237 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	126
Şekil E.1 FRN224 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	127
Şekil E.2 FRN314 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	127
Şekil E.3 TAF021 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	127
Şekil E.4 TAF111 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	128
Şekil E.5 DLT262 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	128
Şekil E.6 DLT352 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	128
Şekil E.7 SHI000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	128
Şekil E.8 SHI090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	129
Şekil E.9 DZC180 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	129
Şekil E.10 DZC270 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	129
Şekil E.11 YER270 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	129
Şekil E.12 YER360 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	130
Şekil E.13 FRN044 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	130
Şekil E.14 FRN314 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	130
Şekil F.1 E11140 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	131
Şekil F.2 E11230 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	131
Şekil F.3 ICC000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	131
Şekil F.4 ICC090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	132
Şekil F.5 CHY047-N Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	132

Şekil F.6 CHY047-W Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	132
Şekil F.7 WAT180 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	132
Şekil F.8 WAT270 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	133
Şekil F.9 A01000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	133
Şekil F.10 A01090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri.....	133
Şekil F.11 H-C02000 Bileşeni Deprem İvme Spektrumu Grafikleri	133
Şekil F.12 H-C02090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	134
Şekil F.13 IVW090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	134
Şekil F.14 IVW360 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri	134

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Örnek Binaları Betonarme Eleman Boyutları	23
Tablo 2.2 Örnek Binaların Boyutları	23
Tablo 2.3 Zemin Sınıfları	26
Tablo 2.4 B Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 1	27
Tablo 2.5 B Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 2	28
Tablo 2.6 C Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 1	28
Tablo 2.7 C Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 2	29
Tablo 2.8 D Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 1	29
Tablo 2.9 D Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 2	30
Tablo 2.10 Deprem Kayıtları İstatiksel Bilgileri	32
Tablo 3.1 Koni Modeli Formülleri	36
Tablo 3.2 Koni Modeli için Belirlenen Sabit Değerler	37
Tablo 3.3 Örnek Binaların Periyotları (s)	43
Tablo 3.4 Göreli Kat Ötelemelerinin Karşılaştırması	53
Tablo 5.1 Lognormal Olasılık Kağıdı için İşlenen Veriler - 1	68
Tablo 5.2 Lognormal Olasılık Kağıdı için İşlenen Veriler - 2	69
Tablo 5.3 5 Katlı Örnek Bina Hasar Olasılıkları	76
Tablo 5.4 10 Katlı Örnek Bina Hasar Olasılıkları	77
Tablo 5.5 15 Katlı Örnek Bina Hasar Olasılıkları	77
Tablo 5.6 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 1	80
Tablo 5.7 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 2	81
Tablo 5.8 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 3	82
Tablo 5.9 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 4	83
Tablo 5.10 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 5	84
Tablo 5.11 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 6	85
Tablo 5.12 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 7	86
Tablo 5.13 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 8	87
Tablo 5.14 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 9	88
Tablo 5.15 Minimum Hasar Sınırı İstatiksel Sonuçları	90
Tablo 5.16 Güvenlik Hasar Sınırı İstatiksel Sonuçları	91

Tablo 5.17 Göçme Hasar Sınırı İstatiksel Sonuçları	92
Tablo 5.18 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	93
Tablo 5.19 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	94
Tablo 5.20 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	95
Tablo 5.21 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	96
Tablo 5.22 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	97
Tablo 5.23 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	98
Tablo 5.24 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	99
Tablo 5.25 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	100
Tablo 5.26 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	101
Tablo 5.27 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	102
Tablo 5.28 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	103
Tablo 5.29 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	104
Tablo 5.30 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	105
Tablo 5.31 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	106
Tablo 5.32 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	107
Tablo 5.33 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	108
Tablo 5.34 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	109
Tablo 5.35 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)	110
Tablo A.1 Kiriş Donatı Detayları	116

Tablo A.2 Kolon Donatı Detayları.....	117
Tablo B.1 Kiriş Donatı Detayları	118
Tablo B.1 Kiriş Donatı Detayları (devam)	119
Tablo B.2 Kolon Donatı Detayları.....	119
Tablo C.1 Kiriş Donatı Detayları.....	120
Tablo C.1 Kiriş Donatı Detayları (devam)	121
Tablo C.2 Kolon Donatı Detayları	122

Zemin Yapı Etkileşiminin Hasar Olasılığına Etkisi

Hülagü ETHEMOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Murat Serdar KIRÇIL

Yapılar üzerine inşa edildikleri zeminlerle deprem anında belirginleşen bir etkileşim içindedir. Zemin yapının davranışını etkilerken, yapı da zeminin davranışını etkiler. Dolayısıyla zemin yapı etkileşimi zemin ve yapı arasında karşılıklı olarak gelişen bir olaydır. Yönetmeliklerde zemin sınıflarına göre verilen elastik ivme spektrumları zeminin yapıya etkisini göstermekte fakat yapının zemine etkisini göstermemektedir. Yani etkileşim tek yönlüdür. Ayrıca yönetmelikler yapıların zemine ankastre bağlı olarak tasarlanmasına izin vermekte veya zemin yapı etkileşimini dikkate almak için deprem kuvvetlerinin azaltılmasına izin vermektedir. Ancak yapılan bu kabuller deprem anındaki yapı davranışıyla ve yapının hasar görülebilirliği ile farklılaşmaktadır. Bu çalışmada zemin yapı etkileşiminin hasar olasılığı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle 3 adet (5, 10 ve 15 katlı) betonarme bina tasarlanmıştır. 3 adet zemin sınıfı ve her zemin sınıfında meydana gelmiş 7 adet deprem kaydı seçilmiştir. Doğrusal elastik olmayan artımsal dinamik analizler etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için yapılmıştır ve binaların performans seviyeleri belirlenmiştir. Bu çalışmada bina performans seviyeleri kesit hasarları cinsinden belirlenmiştir. 3 farklı hasar kriteri dikkate alınmış ve hasar olasılık eğrileri bu

hasar kriterleri için hazırlanmıştır. Etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için hazırlanan hasar olasılık eğrileri spektral ivme ve görelî kat ötelemeleri bağı olarak hazırlanmıştır. Zemin yapı etkileşiminin yapıların hasar olasılığını arttırdığı, mevcut yapıların deprem performansının değerlendirilmesinde dikkate alınması gerektiğı ulaşılan temel sonuçlar arasındadır.

Anahtar Kelimeler: Zemin Yapı Etkileşimi, Hasar Olasılık Eğrisi, Artımsal Dinamik Analiz, Koni Modeli.

Effect of Soil Structure Interaction on the Probability of Damage

Hülagü ETHEMOĞLU

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Murat Serdar Kırçıl

The structures interact with the soil on which they are built, evident during an earthquake. Soil affects the behavior of the structure, while the structure affects the behavior of the soil. As can be seen, the interaction of the ground structure is a mutually evolving event between the ground and the structure. Elastic acceleration spectra given in the regulations according to soil classes show the field effect of the soil to the structure but not the effect of the structure on the soil. Thus, interaction between structure and soil is one-way. In addition, regulations allow structures to be designed with fixed support to soil or allow earthquake forces to be reduced to take into account soil structure interaction. However, these assumptions differ with the behavior of the building at the time of the earthquake and the vulnerability of the building. In this study, it is aimed to evaluate the effect of soil structure interaction on fragility of structures. For this reason, 3 (5, 10 and 15 floor) sample buildings were designed. 3 soil classes and 7 earthquakes recorded in each soil class were selected. Linear inelastic analyzes were performed for interactive and non-interactive situations. The performance evaluation of the buildings was also carried out according to 3 damage criteria and relative floor shifting criteria. Damage probability curves are the fastest way to estimate the

vulnerability of a structure without risk. Although damage probability curves have been developed for fixed support structures in soil, these curves do not fully meet the requirements in the interactive structure. Therefore, the fragility curves were obtained to include the interaction of soil structure. Comparisons of damage probability curves in noninteractive and interactive state were made. As a result, according to the damage level taken into consideration, it is provided to determine the vulnerability of a structure with a certain spectral acceleration and soil class.

Keywords: Soil Structure Interaction, Damage Probability Curve, Incremental Dynamic Analysis, Kone Model.

1.1 Literatür Özeti

P. Rajeev ve S. Tesfamariam çalışmalarında hasar olasılık eğrilerini spektral ivmeye bağlı olarak yapının zemine ankastre bağlı ve zemin yapı etkileşimli durumları için hazırlamışlardır. Çalışmalarını 3 katlı, 5 katlı ve 9 katlı, 3 açıklıklı ve açıklıkları eşit, sünek olmayan düzlem betonarme çerçeveler üzerinde yapmışlardır. Zemin yapı ilişkisini doğrusal ötesi davranışı dikkate alan yaylar ile sağlamışlardır. Hasar olasılık eğrilerinde 3 hasar kriterini (hemen kullanım, can güvenliği ve göçme güvenliği) dikkate almışlardır. Doğrusal elastik olmayan analizlerde Toplam 30 adet deprem kaydı EC-8 verilen spektrum ile eşleştirilerek kullanılmıştır. Çalışmalarında sadece bir zemin sınıfı kullanmışlardır. Çalışmalarında hasar olasılık eğrileri verdikten sonra özetle; zemin yapı etkileşiminin hasar olasılık eğrileri ciddi şekilde etkilediğini ve zemin yapı etkileşimli durumda yapının davranışında depremlerin karakteristik özelliklerinin belirleyici olduğunu belirtmişlerdir [1].

F. Hosseinpour ve A. E. Abdelnaby çalışmalarında hasar olasılık eğrilerini artçı depremleri dikkate alarak hazırlamışlardır. Çalışmalarını 3 katlı, 7 katlı ve 12 katlı, 4 açıklıklı ve açıklıkları eşit orta derecede sünek düzlem betonarme çerçeveler üzerinde yapmışlardır. Düzlem çerçeveleri zemine ankastre bağlı olarak dikkate almışlardır. Hasar olasılık eğrilerini spektral ivmeye ve 4 hasar kriterine (hasarsız, kullanılabilir hasarlı, can güvenliği ve göçme güvenliği) göre hazırlamışlardır. Çalışmalarında 6 adet deprem kaydı kullanmışlardır. Çalışmalarında hasar olasılık eğrilerini verdikten sonra özetle; yapılarda kat sayısının artışı ile hasarın arttığını, hasar olasılık eğrilerinin depremin karakteristik ve depremin meydana geldiği bölgenin özelliklerinden etkilendiğini, hasar olasılık eğrileri arasındaki aralığın yapının kat sayısının artışı ile azaldığını belirtmişlerdir [2].

M. Mekki ve diğerkleri çalışmalarında hasar olasılık eğrilerini spektral deplasmana bağlı olarak yapının zemine ankastre bağlı ve zemin yapı etkileşimli durumları için hazırlamışlardır. alışmalarında 4 farklı zemin sınıfı, tek serbestlik sistem kullanmışlardır. Tek serbestlik dereceli sistemin, deprem yükünü ve zemine ait bilgileri ortalama ve standart sapmaya bağlı olarak olasılık dağılımı yardımı ile belirlenmiştir. Zemin yapı ilişkisi yay ve sönüm elemanları ile sağlanmıştır. Çalışmada 5 farklı hasar kriteri (hasarsız, az hasarlı, orta hasarlı, çok hasarlı ve çökme) kullanılmıştır. alışmalarında hasar olasılık eğrileri verdikten sonra özetle; yapının deprem anındaki davranışının yapının dinamik karakteri yanında yapının üzerinde bulunduğu zemin özelliklerine ve temeline de bağlı olduğunu belirtmişlerdir [3].

F. Behnamfar ve M. Banizadeh çalışmalarında görece kötü zeminlerdeki farklı taşıyıcı sistemlerin zemin yapı etkileşimi altındaki performanslarını incelemişlerdir. İncelenen binalar 3, 5, 6, 8 ve 9 katlı, 3 açıklıklı düzlem çerçeveli ve perdeli olarak seçilmiştir. Zemin yapı ilişkisi yay ve sönüm elemanları ile sağlanmıştır. Hemen kullanım, can güvenliği ve göçme güvenliği olmak üzeri 3 farklı hasar kriteri dikkate alınmıştır. Yapıların analizleri zemin yapı etkileşimli ve zemine ankastre bağlı olarak 55 adet deprem kaydı kullanılarak yapılmıştır. alışmalarının sonucunda özetle; zemin yapı etkileşiminin plastik deformasyonları ve deprem hasarını alt katlarda artırdığını, yapının yanal deplasmanının arttığını ve hasarın artarken taban kesme kuvvetinin azaldığını belirtmişlerdir [4].

M. E. Aydemir çalışmasında zemin yapı etkileşiminin deprem yükü azaltma katsayısına olan etkisini incelemiştir. Taşıyıcı sistemler 3, 6 ve 9 katlı 3 açıklı düzlem çerçeveli olarak seçilmiştir. Çalışmada 4 farklı zemin sınıfı dikkate alınmış ve analizlerde 64 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda özetle tüm zemin sınıflarında zemin yapı etkileşimli durumda deprem yükü azaltma katsayısının azaldığını belirtmiştir [5].

N. Hassani ve diğerkleri çalışmalarında tek serbestlik dereceli sistemin zemin yapı etkileşimli ve zemine ankastre bağlı olarak elastik ve elastik olmayan deplasmanlarını incelemişlerdir. Görece kötü zeminlerdeki analizlerde 19 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Zemin yapı ilişkisi koni modeli kullanılarak yay ve

sönüm elemanları ile sağlanmıştır. Analizlerde 4 adet yük deplasman modeli, 3 adet narinlik oranı ve 5 adet deprem yükü azaltma katsayısı kullanılmıştır. Çalışmalarının sonucunda özetle; etkileşimli durumda periyodu çok kısa yapılar hariç elastik olmayan deplasmanın arttığı, eşit deplasman kuralının zemin yapı etkileşiminde geçerli olmadığı, periyodu çok küçük yapıların deprem yükü azaltma katsayısının artmasına ve azalmasına karşı hassas olmadığını, periyodu büyük olan yapıların deprem yükü azaltma katsayısının büyümesiyle elastik olmayan deplasmanlarının arttığını ve büyük periyotlu yapılarda narinlik oranının artmasıyla elastik olmayan deplasmanın arttığını belirtmişlerdir [6].

F. Khosravikia ve diğerleri çalışmalarında yapıların deprem riskini zemin yapı etkileşimi altında incelemiştir. Tek serbestlik dereceli sistem, 3 adet görece kötü zemin modeli, 4 adet narinlik oranı dikkate alınmış, zemin yapı ilişkisi ise yay ve sönüm elemanları ile sağlanmıştır. Analizler etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için yapılmıştır. Hasar kriterleri olasılıklara bağlı olarak belirlenmiştir. Çalışmalarının sonucunda özetle; görece kötü zeminlerdeki yapılarda zemin yapı ilişkisinin sonuçları için çıkarım yapmanın güç olduğu, ancak bu sınıftaki alçak yapılarda zemin yapı etkileşiminin yararlı olabileceği, görece az kötü zeminlerdeki küçük periyotlu binalarda zemin yapı etkileşiminin etkili olmadığı, bu sınıftaki zemin yapı etkileşiminin küçük periyotlu yapılara zararlı etkilerinin daha büyük olasılık olduğunu, bu sınıftaki büyük periyotlu yapılara zemin yapı etkileşiminin yararlı olduğu ve görece iyi zeminlerdeki yapılara yapının periyodundan bağımsız olarak zemin yapı etkileşiminin bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir [7].

C. C. Mitropoulou ve diğerleri çalışmalarında hasar olasılık eğrilerini spektral ivmeye bağlı olarak hazırlamışlardır. Çalışmalarında betonarme ve çelik yapıları 2, 4 ve 8 katlı olarak, zemine ankastre, zemin yapı etkileşimli ve zemin yapı etkileşimli kazıklı temeller olarak kullanmışlardır. Yapılar her iki yönde aynı aks açıklığına sahipken bir yönde 3 açıklı diğer yönde ise 5 açıklı olarak tasarlanmıştır. Zemin yapı ilişkisi yaylar ile sağlanmıştır. Yapılar ortak sistem yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapılara itme analizi uygulanmış ve 4 farklı hasar kriteri (az hasarlı, orta hasarlı, çok hasarlı ve göçme) kullanılmıştır. Çalışmalarının sonucunda özetle; 2 ve

4 katlı yapılarda yapının performansına temel sisteminden etkilenmediği ve 8 katlı yapılarda yapı performansının temel sisteminden etkilendiğini belirtmişlerdir [8].

S. T. Karapetrou ve diğerleri çalışmalarında hasar olasılık eğrilerini maksimum yer ivmesine bağlı olarak vermişlerdir. Çalışmalarında 9 katlı betonarme düzlem çerçeveyi ortak sistem yöntemiyle analiz etmişlerdir. Analizlerinde kayma dalgası hızı farklı olan 3 katmanlı zemin modeli ve tek katmandan oluşan zemin modeli ve görece kuvvetli zeminde meydana gelmiş 15 adet deprem kaydı kullanmışlardır. Çalışmalarında 2 hasar kriterini (hemen kullanım ve göçme öncesi) dikkate almışlardır. Çalışmalarının sonunda özetle; yapıların zemine ankastre bağlı olarak hazırlanan hasar olasılık eğrilerinin güvensiz sonuçlar verdiğini, zemin yapı etkileşiminin ve zemin durumunun çok önemli olduğunu, zemin yapı etkileşimin hasar olasılığını arttırdığını, bu artışın katmanlı zeminde tek katmana göre daha fazla olduğunu ve yapının dinamik davranışının depremin, zeminin ve yapının kendi özelliklerinden bağlı olduğunu belirtmişlerdir [9].

A. Khaloo ve diğerleri makalelerinde hasar olasılık eğrilerini spektral ivmeye bağlı olarak hazırlamışlardır. Çalışmalarında 5, 10 ve 20 katlı düzlem betonarme çerçeve ile 20 adet deprem kaydı kullanmışlardır. Analizlerde deprem kayıtlarını kısaltmadan ve kısalttıktan sonra (%5 - %95) kullanmışlardır ve 2 hasar kriteri (hemen kullanım ve göçme öncesi) dikkate almışlardır. Çalışmalarının sonucunda özetle; deprem kayıtları arasındaki farktan hasar olasılık eğrilerinin etkilendiğini, bu etkilenmenin göz ardı edilemeyeceği ve etkilenmenin kat sayısının artışı ile arttığını belirtmişlerdir [10].

E. Saez ve diğerleri çalışmalarında hasar olasılık eğrilerini maksimum yer ivmesine bağlı olarak hazırlamışlardır. Çalışmalarında toplam yüksekliği 28 m olan bir yönde perdeli betonarme bir yapıyı kullanmışlardır. Analizlerini ortak sistem yöntemi ile 2 ve 3 boyutlu olarak yapmışlardır. Analizlerinde tabakalı zemin ve 500 adet üretilmiş deprem kaydı kullanmışlardır. Hasar kriteri olarak az ve orta hasar kriterlerini kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda özetle; 2 boyutlu analizin düzenli binalarda yeteri doğrulukta sonuçlar verdiğini, hasar olasılık eğrilerinin doğrusal elastik olmayan zaman tanım alanındaki analizlerin özeti olduğunu, zemin yapı etkileşiminin deprem talebini azalttığını, bunun sebebinin

sönüm ve zeminin davranışı olduğunu belirtmişlerdir. Ancak zemin yapı etkileşiminin yapının, depremin ve zeminin özelliklerine bağlı olarak depremi talebini artırabileceğini ve azaltabileceğini de vurgulamışlardır [11].

D. Cardone ve diğerleri çalışmalarında hasar olasılık eğrilerini spektral ivmeye bağlı olarak hazırlamışlar. Çalışmalarında betonarme 4, 6 ve 8 katlı yapıları zemine ankastre bağlı olarak kullanmışlardır. Çalışmada 4 hasar kriteri (hasarsız, hemen kullanım, kontrollü hasar ve can güvenliği), 3 deprem bölgesi ve 2 zemin sınıfı dikkate alınmıştır. Çalışmalarının sonucunda özetle; hazırladıkları hasar olasılık eğrilerinin gerçek hayatta kullanılabileceğini belirtmişlerdir [12].

M. Ghandil ve diğerleri çalışmalarında komşu yapıların yapısal parametrelerini zemin yapı ilişkini dikkate alarak incelemişlerdir. Çalışmada yapılar çelik konstrüksiyon ve 10, 15 ve 30 olarak dikkate alınmıştır. Analizler ortak sistem yöntemi ile yapılmıştır. Analizlerde 2 adet zemin profili ve 7 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Çalışmalarının sonucunda özetle; zemin yapı etkileşimli durumda yapı periyodunun arttığını, yanal deplasmanların arttığını, temel dönmelerinin arttığını, kat kesme kuvvetlerinin azaldığını, sistemin sönümünün arttığını ve yanal deplasmanların en çok alt katlarda değiştiğini belirtmişlerdir [13].

A. Krishnamoorthy ve S. Anita çalışmalarında zemin yapı ilişkisini yapı mesnetlerinde izolatörler dikkate alarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda özetle; zemin yapı ilişkisinin sıradan yapılarda depremin özelliklerinden etkilendiğini, deprem anında yapının davranışını değiştirdiğini ve olumlu veya olumsuz etkileri olabileceğini belirtmişlerdir [14].

H. Torabi M. T. Rayhani çalışmalarında ortak sistem analizi ile zemin yapı etkileşimini incelemişlerdir. Çalışmalarında 4, 6, 8 ve 10 katlı temelleri yüzeysel olan yapılar, görece iyi tek bir zemin çeşidi ve analizlerde 2 adet deprem kaydı kullanmışlardır. 1985 Mexico City ve 1989 Loma Prieta depremlerinde zemin yapı etkileşimine bağlı hasarların görüldüğü belirtilen çalışmanın sonucunda özetle; zemin özelliklerinin temelin sönüm oranını etkilediğini, yüksek yapıların periyotlarının uzayacağını, periyottaki bu değişim yapı temelinin davranışını da değiştireceği, bu durumun görece kötü zeminlerde daha da önemli hale geleceğini, zemin ve temel arasında rezonans olabileceğini, yüzeysel temele ve görece kötü

zemine mesnetli yapılarda zemin yapı etkileşiminin önemli olduğunu belirtmişlerdir [15].

E. Kausel çalışmasında zemin yapı etkileşiminin erken tarihi anlatmıştır. Çalışmasında yapı zemin ilişkisinin önceleri statik sonraları ise dinamik olarak dikkate alındığını, zemin yapı etkileşimini 3 adım yöntemi ile analiz edilebileceğini (kinematik etkileşim, yapı temelinin yay ve sönüm elemanları ile tanımlanması ve eylemsizlik etkileşimi) belirtmiştir [16].

V. Anand ve S. R. S. Kumar çalışmalarında zemin yapı etkileşimini incelemişlerdir. Çalışmalarında 1989 Loma Prieta ve 1995 Kobe depremlerinde zemin yapı etkileşimine bağlı hasarlar görüldüğü belirtmişlerdir. Çalışmalarında geleneksel olarak zemin yapı etkileşiminin yararlı olarak düşünüldüğü, yönetmeliklerin zemin yapı etkileşimi dikkate almama veya deprem yükü azaltarak kullanma yönünde hazırlandığını belirttikten sonra zemin yapı etkileşiminin yapıyı esneklettiğini ve buna bağlı olarak yapının periyot ve sönümünün arttığını eklemişlerdir. Tasarımların da deprem yükünü azaltılmadan yapılmasında rağmen deprem sonrasında yapılan incelemelerin farklı sonuçlar ortaya koyduğu vurgulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda özetle; modern zemin yapı etkileşimi araştırmalarının hasar görebilirlik, doğrusal elastik olmayan deplasman, deprem yükü azaltma katsayısı, süneklilik talebi ve yapının dinamik davranışını tanımlayan parametreler üzerinde yapıldığını belirtmişlerdir [17].

H.R. Tabatabaiefar ve B. Fatahi çalışmalarında orta yükseklikteki binalarda zemin yapı etkileşimi etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında betonarme 5, 10 ve 15 katlı yapıları, 4 adet deprem kaydını ve 3 adet zemini sınıfını kullanmışlardır. Analizleri yapıları zemin ankastre bağlı ve zemin yapı etkileşimli durumda, düzlem çerçeve olarak ve ortak sistem modelini kullanarak yapmışlardır. Analizlerde 4 hasar kriteri (hemen kullanım, az hasarlı, can güvenliği ve göçme) dikkate almışlardır. Çalışmalarının başında zeminin kayma dalgası hızı 600 m/s'den büyük olan zeminlerde zemin yapı etkileşimi olmadığını, daha düşük kayma dalgası hızına sahip olan zeminlerde ise zemin yapı etkileşimine bağlı olarak periyodun, sönümün ve yana deplasmanın arttığını, depremin, zeminin ve yapının özelliklerine bağlı olarak taban kesme kuvvetinin değiştiğine yer vermişlerdir.

Çalışmalarının sonucunda özetle; görece kuvvetli zeminlerde zemin yapı etkileşiminin görülmediğini, görece kötü zeminlerdeki orta yükseklikteki binalarda zemin yapı etkileşiminin önemli olduğu ve bu durumun tasarımda dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir [18].

M. A. Ghannad ve H. Jahankhah çalışmalarında zemin yapı etkileşimli durumda deprem yükü azaltma katsayındaki değişimi zemin durumuna bağlı olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında tek serbestlik dereceli sistemi dikkate almışlardır. Zemin yapı ilişkisi koni modeli kullanılarak yay ve sönüm elemanları ile sağlanmıştır. Analizlerde farklı yapısal özelliklere sahip tek serbestlik dereceli sistemler ve 54 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Çalışmalarının sonucunda özetle zemin yapı etkileşiminin yapının doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan dayanım talebini azalttığı, görece iyi zeminlerde ihmal edilebileceğini ve görece kötü zeminlerde önemli duruma geldiğini belirtmişlerdir [19].

S. Renzi ve diğerleri çalışmalarında betonarme çerçeveli bir binanın zemine ankastre bağlı ve zemin yapı etkileşimi altında davranışını değerlendirmişlerdir. 20 katlı betonarme çerçeveli ve radye temelli bina tek serbestlik dereceli sisteme dönüştürülerek analiz edilmiştir. Tek serbestlik dereceli sistemin zemin yapı ilişkisi yay ve sönüm elemanları ile sağlanmıştır. Analizlerde 3 adet zemin (görece iyi, görece kötü) dikkate alınmıştır. Çalışmalarının sonucunda özetle; zemin yapı etkileşiminin yapının periyodunu ve sönümünü arttırdığı, bu değişlere bağlı olarak yanal deplasmanı, ikinci mertebe etkilerini ve yapının deprem talebini arttırdığını, yapının davranışını önemli derecede etkilediğini ve yapının narinlik oranının zemin yapı etkileşiminde önemli olduğunu belirtmişlerdir [20].

E. Nazarrimofrad ve S. M. Zahrai çalışmalarında zemin yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar altında halatlar ile çaprazlanmış çok katlı, planda asimetrik çelik bir yapının davranışını değerlendirmişlerdir. Çalışmada 10 katlı bina ile görece sert ve yumuşak zeminler dikkate alınmıştır. Çalışmalarında sonucunda özetle; dinamik davranış parametrelerinden olan periyot, sönüm ve mod şekillerinin zemin koşullarında bağlı değiştiğini, görece yumuşak zeminler zemin durumunun hesaba katılması gerektiğini, yörece yumuşak zeminlerin yapının

yanal deplasmanını arttırdığını ve görece sert zeminlerdeki yapıların zemine ankastre bağlı olarak düşünülebileceğini belirtmişlerdir [21]

S. C. Dutta ve diğerleri çalışmalarında az katlı yapıların zemin yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumda davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı kat sayısına ve açıklığa sahip olan yapıları, 3 adet zemini (görece yumuşak, orta sert ve sert) yakın fay depremlerini ve kolonlar arasındaki dolgu duvarlarını da dikkate almışlardır. Çalışmalarının sonucunda özetle; az katlı yapılarda zemin yapı davranışının taban kesme kuvvetini arttırabileceğini, orta ve çok katlı yapılarda taban kesme kuvvetinin azalacağını, zemin yapı etkileşiminin depremin özelliklerinden ciddi bir şekilde etkilendiğini ve özellikle de yakın fay depremlerinde bu durumun belirgin olduğunu belirtmişlerdir [22].

Y. Lu ve diğerleri çalışmalarında zemin yapı etkileşimi altında yapıların performansını incelemişlerdir. Çalışmalarında 1, 5, 10,15 ve 20 katlı binaların zemin yapı ilişkisini koni modeli kullanarak dikkate almışlardır. 3 adet zeminin (görece iyi zemin, kötü zemin ve çok kötü zemin) dikkate alındığı çalışmada çelik ve betonarme yapılar kullanılmış, deprem kuvvetleri ise farklı formlarda yapılara etkitilmiştir. Çalışmalarının başında zemin yapı etkileşiminin yapının periyodunu uzatmasına bağlı olarak tasarım spektral ivmesini azalttığını, sönümün arttığını, rijit yapılarda zemin yapı etkileşiminin görülmediğini belirtmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda özetle; zemin yapı etkileşiminin yapının dayanım talebini azalttığını, rijit yapılar için, yönetmeliklerdeki deprem yükü etkime biçimlerinin zemin yapı etkileşimli durumda uzun periyotlu yapılar için geçerli olduğu ve kısa periyotlu yapılar için geçerli olmadığını belirtmişlerdir [23].

S. M. Hoseyni ve diğerleri çalışmalarında bir nükleer santralin hasar olasılık eğrilerini zemin yapı etkileşimini de dikkate alarak elde etmişlerdir. Çalışmada 5 adet deprem kaydının her iki yatay bileşeni, tabakalı zemin ve 5 farklı güvenlik seviyesini dikkate alınmıştır. Hasar olasılık eğrileri maksimum yer ivmesine göre çizilmiştir. Analizlerde ortak sistem yöntemi kullanılmıştır. Analizler yapının zemine ankastre bağlı ve zemin yapı etkileşimli durumları için yapılmıştır. Çalışmalarının sonucunda özetle; zemin yapı etkileşiminin ihmal edilmesinin sırdan yapılar da bile yanlış olduğunu ve yapının çok ağır ve rijit olması sebebiyle

zemin yapı etkileşiminin önemli derecede deprem etkisini azalttığını, zemin yapı etkileşiminin ihmal edilmemesi halinde yüksek riskli bir yapı olacağını belirtmişlerdir [24].

R. Tomeo ve diğerleri çalışmalarında zemin yapı etkileşimi altında betonarme çerçevelerin davranışını incelemişlerdir. Çalışmada 4 ve 8 katlı çerçeveler zemine ankastre bağlı ve ortak sistem yöntemi ile 21 deprem kaydı kullanılarak görece iyi ve kötü zeminler dikkate alınarak analiz edilmiştir. Zemin yapı ilişkisi yaylar tarafından sağlanmıştır. Çalışmalarının sonucunda özetle; zemin yapı etkileşiminin özellikle yumuşak zeminlerdeki betonarme çerçeveler için önemli olduğunu, zemin yapı ilişkisinin deprem talebini azalttığını ve yanal deplasmanı arttırdığını belirtmişlerdir [25].

H. Rahnema ve diğerleri çalışmalarında 2 boyutlu zemin yapı etkileşimi probleminin farklı çözüm yollarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında ortak sistem yöntemini ve zemin yapı ilişkisinin yaylar ile sağlandığı modelleri kullanmışlardır. Çalışmada 5 katlı betonarme çerçeve ve farklı zeminler dikkate alınmıştır. Çalışmalarını sonucunda özetle; zemin yoğunluğunun zemin yapı etkileşimini için çok önemli olduğunu ve yanal deplasmanı üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir [26].

1.2 Tezin Amacı

Zemin yapı ilişkisinin dikkate alınması ve alınmaması durumlar için hasar olasılık eğrilerinin hazırlanması, yapısal parametrelerdeki ve yapının davranışında meydana gelen değişimlerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi bu tezin temel amaçlarıdır. Bu sebeplerle örnek binalar tasarlanmış, farklı zemin sınıfları ve bu zemin sınıflarında meydana gelmiş deprem seçilmiş, etkileşimli ve etkileşimsiz durumda zaman tanım alanında doğrusal olmayan artımsal dinamik analizler yapılmış, elde edilen sonuçlar güven aralıkları dikkate alınarak işlenmiş ve değerlendirilmiştir. Güncel deprem yönetmelikleri yapıların zemine ankastre bağlı olarak tasarlanmasına izin verse bile yapılar üzerine inşa edildikleri zemin ile deprem anında belirginleşen karşılıklı bir etkileşim içindedir. Başka bir deyişle yapının mesnetlenme koşullarının değişimine bağlı olarak da hem yapısal parametreleri hem de davranışı değişebilecektir. Bu durum ise yapıların deprem

performansını etkileyen faktörlerden biridir. Güncel yönetmelikler yapıların zemin yapı etkileşimini dikkate alarak tasarlanması için çeşitli yöntemler tarif etmektedir. Ancak geçmişte, hem yönetmelikte bu konunun yeterince yer bulmamış olması hem de bilgisayar teknolojisindeki yetersizlikler binaların tasarımıda zemin yapı etkileşiminin yeterince ayrıntılı dikkate alınmamasına neden olmuştur. Dolayısı ile bu yapıların hasar olasılıkları gerçekte var olan ancak tasarımıda dikkate alınmayan zemin yapı etkileşiminden etkilenmektedir. Bu çalışmanın amacı sözü edilen etkileşimin hasar olasılığına etkisini incelemektir.

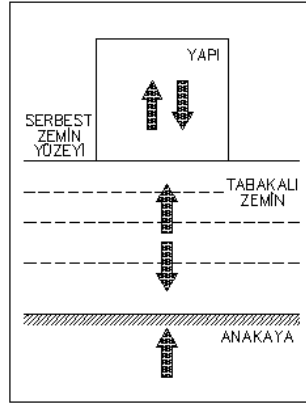
1.3 Hipotez

Yapılan çalışmalarda zemin yapı etkileşiminin yapının varsayılan davranışını değiştirdiği ve olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu tepkinin görece zemin koşullarının kötüleşmesi ve yapı yüksekliğinin artışı ile artacağı düşünülmektedir. Bu sebeple etkileşimsiz ve etkileşimli analizlere ait sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma için farklı kat sayılarında örnek betonarme binalar tasarlanmış, farklı zemin sınıfları dikkate alınmış ve bu zemin sınıflarında meydana gelmiş depremlerden deprem grupları oluşturulmuştur. Spektral ivme ve görelî kat ötelemeleri temel analiz çıktıları olarak istatistiksel olarak değerlendirmelere tabi tutulmuştur. Çalışmanın birinci bölümünde zemin yapı etkileşiminin literatürde nasıl yer bulduğuna bakılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde analizlerde ihtiyaç duyulacak bilgiler oluşturulmuştur. Çalışmanın üçüncü bölümünde analiz süreçlerinin detaylarına bakılmıştır. Çalışmanın dördüncü bölümünde yapıların performans analizleri değinilmiştir. Tezin amaçları arasında olan hasar olasılık eğrilerinin elde edilmesine beşinci bölümde yer verilmiştir. Altıncı bölümde olan sonuç ve önerilerde elde edilen sonuçlar toplu olarak verilmiştir. Zemin yapı etkileşiminin ise yapının hasar görebilirliğini arttıracığı söylenebilir.

1.4 Zemin Yapı Etkileşimi

Yapılar üzerlerine inşa edildikleri zeminlerle özellikle deprem anında belirgin bir hal alan etkileşim içerisinde olurlar. Bu etkileşim depremin, zeminin ve yapının özelliklerine bağlı olarak gelişir. Bu sebeple zemin yapı etkileşiminin tanımı;

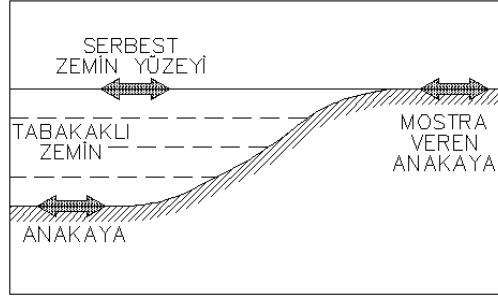
zeminin, yapı temelinin ve üst yapının deprem anında birbirlerini karşılıklı olarak etkilemesi olarak yapılmıştır. Zemin ortamının geometrik, mekanik ve dinamik özellikleri üst yapıya aktarılan deprem dalgalarını etkiler. Aynı zamanda üst yapının geometrik, mekanik ve dinamik özellikleri de zeminden üstyapıya ve üst yapıdan zemine geri yansıyan deprem dalgalarını değişikliğe uğratar. Karşılıklı bu etkileşim zemin yapı etkileşiminin temel mantığını oluşturur (Şekil1.1).



Şekil 1.1 Zemin Yapı Etkileşimi

Zemin ve yapı arasındaki durum böyle iken zemin yapı etkileşiminin asıl sebebi olan deprem dalgaları için durum şöyledir: Anakayada meydana gelen depremler iki farklı yol izleyerek zemin yüzeyine dolayısı ile yapıya ulaşır. Bunlardan birinci mostra veren anakaya yolu olup, ikincisi ise tabakalı zemin katmanlarından geçerek zemin yüzeyine ulaşmaktır (Şekil 1.2). Zemin katmanlarından geçerek zemin yüzeyine ulaşan deprem dalgaları içinden geçtikleri zemin katmanlarının özelliklerine bağlı olarak değişime uğrarken mostra veren anakayadaki deprem dalgalarında ise değişim olmadığı kabul edilmektedir. Tabakalı zemin durumunda tabakalar görece zayıf ise deprem dalgaları bu tabakalardan geçerken depremin ölçülen büyüklüklerinden olan ivme genliklerinde büyümeler meydana gelir. Bu durum literatürde zemin büyütmesi olarak bilinmekte olup yapı için olumsuz bir duruma karşı gelmektedir. Eğer zemin tabakaları görece kuvvetli ise bu durumda depremin ivme genliklerinde azalmalar meydana gelir. Bu durum ise literatürde zemin azaltması olarak bilinmekte olup yapı için olumlu bir duruma karşı gelmektedir. Bu sebeple yapılan araştırmaların sonunda görece sağlam zeminlerde zemin yapı etkileşimi olmadığı ulaşılan sonuçlar arasındadır. Bu arada anakayadan

zemin yüzeyine ulaşan deprem dalgalarının zemin yüzeyinde yatay ve düşey zemin hareketlerini oluşturduğunu ve depremlerin serbest zemin yüzeyinde kaydedildiğini de eklemek gereklidir.



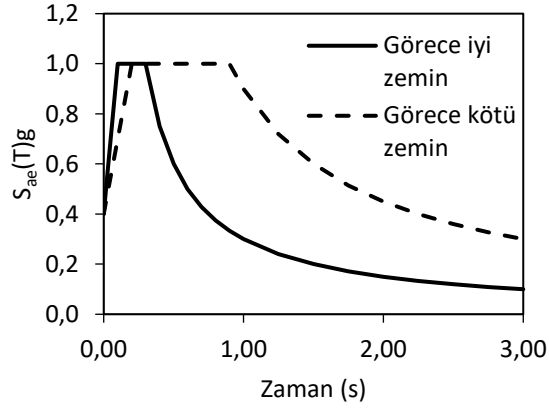
Şekil 1.2 Depremler için Genel Zemin Enkesiti

Deprem süresince zemin ile yapı arasında karşılıklı olarak meydana gelen etkileşim döngüsü zeminden yapıya ve yapıdan zemine olmak üzere 2 adımdan oluşur. Bu etkileşim adımları deprem dalgalarının yapı temelinden yansıması, yapıya geçişi, bu yansıma ve geçişlerdeki sönümleri ile zeminin, yapı temelinin ve yapının özelliklerine bağlı olarak gelişmekte ve şekillenmektedir.

Yukarıda görüldüğü üzere zemin yapı etkileşimi deprem dalgalarının zemin yüzeyinde sebep olduğu dinamik bir olaydır. Bu dinamik olay yapının davranışına ilişkin tasarım aşamasında yapılan varsayımdan farklı bir duruma karşı gelmektedir. Çünkü tasarım aşamasında zemine ankastre bağlı kabul edilen yapının deprem anındaki mesnetlenme koşulu zemin durumu ile yapı temelinin özelliklerine göre gelişen bir hal alır. Bu durum yapının dinamik özelliklerini tanımlayan periyot ve mod şekillerinin değiştiği anlamına gelir. Bu sebeple bir yapının deprem performansının belirlenmesinde veya deprem yükü altında davranışının detaylarının belirlenmesinde zemin yapı etkileşiminin veya zemin yapı sisteminin dinamik özelliklerinin de anlaşılması ve incelenmesi gereklidir.

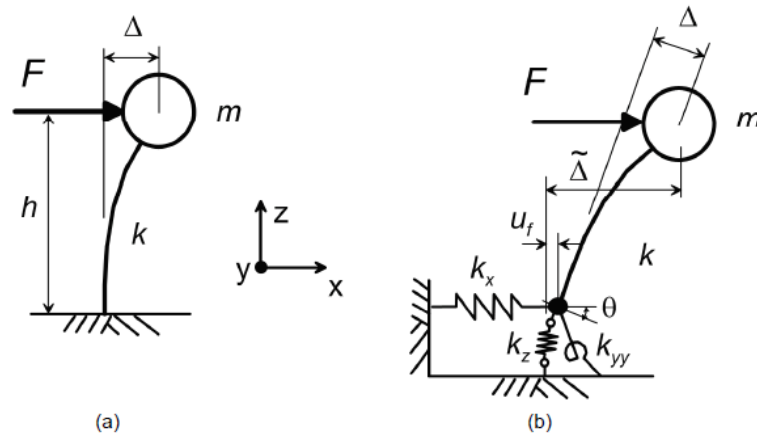
Günümüzde yönetmelikler tasarımcılara zemin yapı etkileşimini dikkate almadan tasarım yapmasına izin vermektedir. Bununla beraber güncellenen yönetmeliklerde zemin yapı ilişkisi daha fazla yer bulmaktadır. Yönetmeliklerin zemin yapı ilişkisini dikkate alma şekli tasarımcıya hangi durumlarda zemin yapı etkileşiminin dikkate alınması gerektiğini belirterek olmaktadır. Yönetmeliklerde zemin sınıflarına bağlı olarak verilen geleneksel ivme spektrumları ise serbest

zemin yüzeyindeki depremi tanımlar (Şekil 1.3). Bu durum zemin özelliklerinin yapıya olan etkisini tanımlarken yapınız zemine olan etkisini tanımlamaz. Yani etkileşim tek yönlüdür, karşılıklı değildir (M. N. AYDINOĞLU).



Şekil 1.3 Farklı Zeminler Sınıfları için Elastik İvme Spektrumları

1.5 Zemin Yapı Ortak Davranışı



Şekil 1.4 Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Farklı Mesnetlenme Şekilleri, ((a) Zemine Ankastre Bağlı, (b) Zemin Yapı Etkileşimli)

Zemine ankastre bağlı tek serbestlik dereceli sistemin açılal frekansı sistemin rijitliğine ve kütesine bağlı olarak Denklem 1.1'de verilmiştir.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.1)$$

Burada ω acısal frekans, k tek serbestlik dereceli sistemin rijitliği, m ise kütlesidir. Tek serbestlik dereceli sistemin periyodunu veren denklem de açısal frekansa bağlı olarak Denklem 3.3'de verilmiştir.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1.2)$$

Denklem 1.1 ve Denklem 1.2 düzenlenirse zemine ankastre bağlı tek serbestlik dereceli sistemin periyodu Denklem 1.3'de elde edilir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1.3)$$

Rijitliğin tanımı birim kuvvet F etkisinde oluşan deplasman Δ olduğuna göre Denklem 1.3 aşağıdaki duruma gelir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{F/\Delta}} \quad (1.4)$$

Denklem 1.4 düzenlenirse Denklem 1.5 elde edilir. Bu denklem zemine yaylar ile bağlı tek serbestlik dereceli sistemin periyodunun hesabında kullanılacaktır.

$$T^2 = (2\pi)^2 \frac{m\Delta}{F} \quad (1.5)$$

Zemine yaylar ile bağlı (çökme, öteleme, dönme) tek serbestlik dereceli sistemin yer değiştirmesi ($\tilde{\Delta}$) Denklemi 1.6 ile verilmiştir.

$$\tilde{\Delta} = \frac{F}{k} + u_f + \theta h \quad (1.6)$$

Burada u_f tek serbestlik dereceli sistemin yatay yer değiştirmesi, θ dönmesi ve h ise yüksekliğidir. Denklem 1.6 kendi içinde düzenlenirse Denklem 1.7 elde edilir.

$$\tilde{\Delta} = \frac{F}{k} + \frac{F}{k_x} + \left(\frac{Fh}{k_{yy}} \right) h \quad (1.7)$$

Burada k_x x yönündeki yay ve k_{yy} dönme yayıdır. Zemine yaylar ile bağlı sistem için yer değiştirme belli olduğundan Denklem 1.5’de yerine yazılarak Denklem 1.8 elde edilir.

$$\tilde{T}^2 = (2\pi)^2 \frac{m}{F} \left(\frac{F}{k} + \frac{F}{k_x} + \left(\frac{Fh}{k_{yy}} \right) h \right) \quad (1.8)$$

Zemine ankastre bağlı tek serbestlik dereceli sistemin kütlesi periyoda bağlı olarak Denklem 1.9’da verilmiştir.

$$m = \frac{T^2 k}{(2\pi)^2} \quad (1.9)$$

Denklem 1.8 ve Denklem 1.9 ortak olarak düzenlendiğinde Denklem 1.11 elde edilir (Veletsos ve Meek, 1974) (Şekil 1.4).

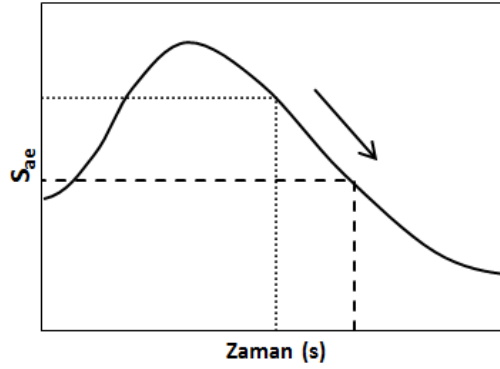
$$\tilde{T}^2 = (2\pi)^2 \frac{\frac{T^2 k}{(2\pi)^2}}{F} \left(\frac{F}{k} + \frac{F}{k_x} + \left(\frac{Fh}{k_{yy}} \right) h \right) \quad (1.10)$$

$$\frac{\tilde{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{kh^2}{k_{yy}}} \quad (1.11)$$

Burada $\tilde{T}$ zemin yapı etkileşimli durumda yapının periyodudur. Denklem 1.11 incelendiğinde zemin yapı etkileşimli durumda yapı yüksekliğine, temel boyutlarına ve temel dönmesine bağlı olarak yapının periyodunun uzadığı görülebilir [27].

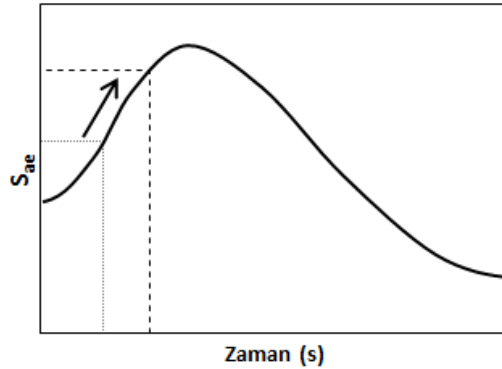
Periyotta meydana gelen değişim yapının taban kesme kuvvetinde de değişikliğe sebep olur. Zemin yapı etkileşimli durumda sönümün artması dikkate alınmaz ise yapının taban kesme kuvvetindeki değişim spektral ivme eğrisi üzerinden açıklanabilir. Yapının zemine ankastre olarak bağlı olduğu durumda periyoduna karşı gelen spektral ivme, zemin yapı etkileşimli durumda yapının periyodunun uzaması ile elde edilen spektral ivmeden büyük olabilir. Periyodun uzamasıyla spektral ivmenin küçülmesi ise genel olarak karşılaşılan durumdur. Bu durum

zemin yapı etkileşimi nedeniyle çoğu zaman yapıya etkiyen taban kesme kuvvetinin azalması anlamına gelir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Periyodun Uzaması ve Spektral İvmenin küçülmesi

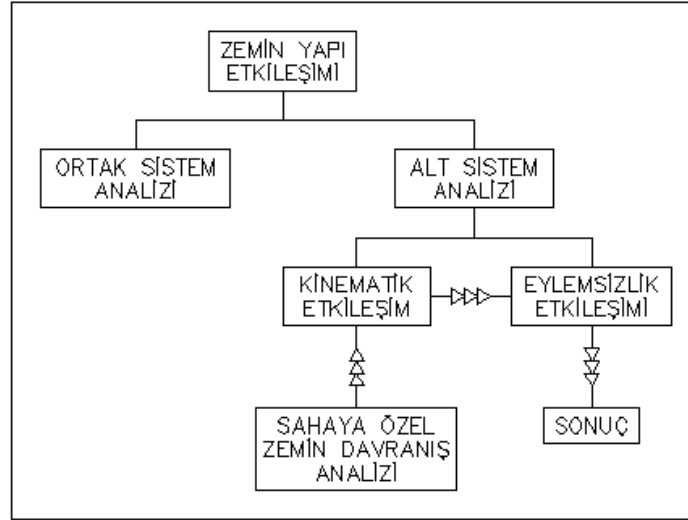
İkinci bir olasılık, yapının zemine ankastre olarak bağlı olduğu durumda periyoduna karşı gelen spektral ivmenin zemin yapı etkileşimli durumda yapının periyodunun uzaması ile elde edilen spektral ivmeden küçük olmasıdır. Bu durum ise yapıya etkiyen taban kesme kuvveti artacaktır (Şekil 1.6). Periyodun uzaması ve spektral ivmenin büyümesi kısa periyotlu yapılarda karşılaşılan bir durumdur.



Şekil 1.6 Periyodun Uzaması ve Spektral İvmenin Büyümesi

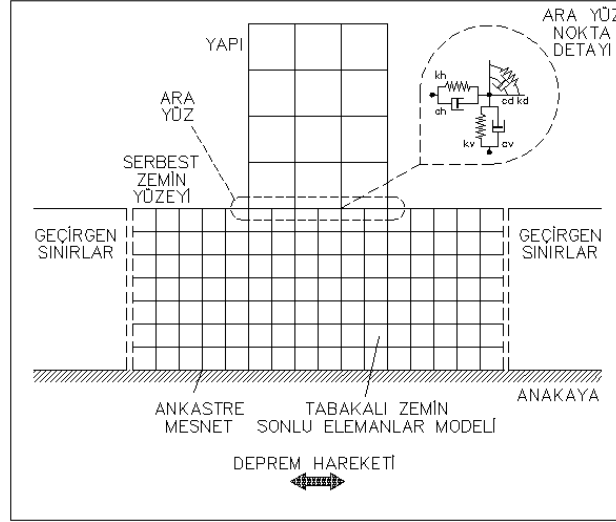
1.6 Zemin Yapı Etkileşimi Analiz Yöntemleri

Zemin yapı etkileşimi problemleri iki yöntem ile analiz edilebilir. Bunlar Ortak Sistem ve Alt Sistem Analizi olup Şekil 1.7’de bu analizler ve bu analizlere ait alt yöntemler şema halinde görülebilir.



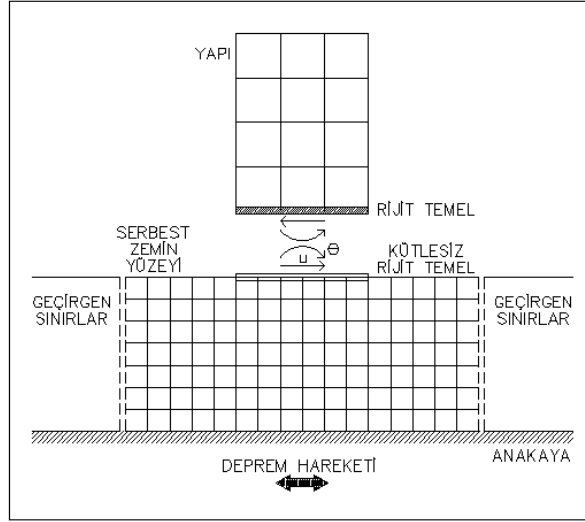
Şekil 1.7 Zemin Yapı Etkileşimi Analiz Yöntemleri

Ortak Sistem Analizi adından da anlaşılacağı gibi zeminin, yapı temelini ve yapının bir bütün olarak modellendiği analiz yöntemidir. Bu yöntemle 2 veya 3 boyutlu yapıların doğrusal elastik veya doğrusal elastik olmayan kabuller ile zemin yapı etkileşimi analizleri yapılabilir. Bu yöntemde anakaya üzerine tanımlanmış zemin profili, zemine arayüz elemanları ile bağlanmış yapı temeli ve yapı, anakayaya etkitilen deprem altında çözülür. Zemin profili her iki yanına geçirgen sınırlar tanımlanarak kurgulanan model içinde deprem dalgalarının geri yansımaları önlenmiş olur. Arayüz elemanlarının amacı ise zemin yapı davranışının sağlanmasıdır. Zeminin profilinin geometrik, mekanik ve dinamik özellikleri ise sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmektedir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 Ortak Sistem Analiz Modeli

Alt Sistem Analizinde zeminle birlikte temel ve yapı ayrı ayrı analiz edilmektedir. Alt Sistem Analizinde zemin temel sisteminin analiz edildiği aşamaya Kinematik Etkileşim, bu analizden elde edilen sonuçların yapı sisteminin analizinde girdi olarak kullanıldığı analiz aşamasına da Eylemsizlik Etkileşimi denilmektedir. Bu yöntemde de analizler 2 ve 3 boyutlu, doğrusal elastik olan ve doğrusal elastik olmayan yöntemler ile yapılabilir (Şekil 1.9). Kinematik etkileşim analizinde zeminin kütlesi gözönüne alınırken temelin kütlesi dikkate alınmaz. Üst yapı temelinin yüzeysel olması ve kütlesi göz önüne alınmadığından zemin yüzeyindeki deprem ile temeldeki deprem aynıdır. Kinematik etkileşimde, anakayada tanımlanan depremin tabakalı zeminden geçerek temele ulaşmasıyla, temelin merkezindeki ivme zaman değişimleri ile öteleme ve dönme yani temel hareketleri elde edilir. Bu veriler yatay düzlemler için yapılırken düşey düzlemdeki etkiler ihmal edilir. Eylemsizlik etkileşiminde kinematik etkileşimden elde edilen veriler üst yapının temel alt seviyesinden iletilir. Üst yapı mesnetlerinin ise bu durumda yay ve sönüm elemanları ile tanımlanması ile deprem analizi yapılır [28]. Bu süreç literatürde 3 Adım Yöntemi olarak yer almaktadır.



Şekil 1.9 Kinematik ve Eylemsizlik Etkileşimleri

1.7 Çeşitli Dokümanlarda Zemin Yapı Etkileşimi Analiz Metotları

ASCE 7-16 (Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures) dokümanında, 19. bölüm zemin yapı etkileşimine ayrılmıştır. Dokümanda deprem hesabında kullanılacak taban kesme kuvvetinin belli oranda azaltılmasına izin verilmektedir. Bu oran yapının taşıyıcı sistem davranış katsayısına (R) göre farklılık göstermekte olup maksimum %30'dur. Taban kesme kuvvetindeki azaltılmanın limit değeri yapının taşıyıcı sistem davranış katsayısının artması ile azalmaktadır. Bunun anlamı ise yapının süneklilik düzeyi ile zemin yapı etkileşimine maruz kalması arasında doğru bir orantı olduğunu gösterir. Dokümanda zeminler 5 ana ve 1 alt sınıfa ayrılmış olup (A, B, C, D, E ve F) zemin yapı etkileşiminin A ve B sınıfı zeminler için dikkate alınamayabileceği belirtmiştir. Bunun anlamı ise görece iyi zeminlerde zemin yapı etkileşimi dikkate alınmasına gerek olmadığı olup yapılan çalışmalarda da bu yönde sonuca ulaşıldığı bilgisi yeri geldikçe verilmiştir [29].

Mart 2007'de yayınlanan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik' zemin yapı etkileşimi konusuna Bölüm 6'da kazıklı temeller kapsamında değinilmiştir [30].

Mayıs 2018'de yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde, Ek 16C zemin yapı etkileşimine ayrılmıştır. Bu bölümde çoğunlukla kazıklı temeller kapsamında zemin yapı ilişkisi değerlendirmiştir. 16C.1.1'de zemin yapı etkileşimi hakkında

genel bilgiler verilirken 16C.1.2’de yüzeysel temeli binaların (bodrumlu binalar dahil) zemin yapı etkileşimi için bilgiler verilmiştir. Burada, özetle, görece yumuşak zeminlerdeki binalar için zemin yapı etkileşiminin binayı elverişli yönde etkilediği, bu durumda deprem yüklerinin azaldığı, güvenli yönde kalınması için etkileşimin ihmal edilebileceği belirtilmiştir. 16C1.3’te zemin yapı etkileşiminin kazıklı temellerin davranışını önemli derecede etkilediği belirtilerek zemin yapı etkileşimi analiz metotları hakkında bilgiler verilmiştir [28].

FEMA 440 (Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures) dokümanında bölüm 8 ve Ek E zemin yapı etkileşimi için ayrılmıştır. Doküman özellikle kinematik etkileşim ve görece zayıf zeminlerde önemli olan temel sönümü üzerinde durmuştur. Dokümanda özellikle kısa periyotlu ve temelleri geniş alana yayılan yapılar için zemin yapı etkileşiminin önemi vurgulanmıştır [31].

FEMA 356 (Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings) dokümanında zemin yapı etkileşimi için madde 3.2.6 ayrılmıştır. Doküman periyodun artışı ile spektral ivmenin arttığı binalar için zemin yapı etkileşimini dikkate alınmasını zorunlu hale getirmiş diğerleri için ise ihmal edilebileceğini belirtmiştir. FEMA 356 zemin yapı etkileşiminin basitleştirilmiş hesabı için ASCE 7 dokümanını işaret etmiştir ve zemin yapı etkileşimi altında deprem anında yapının davranışının değişebileceğini de belirtmiştir [32].

FEMA 302 NEHRP (Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures) dokümanında zemin yapı etkileşimi için bölüm 5.5 ayrılmıştır. Dokümanda zemin yapı etkileşiminin dikkate alınması taban kesme kuvvetini azaltırken yanal deplasmanı ve ikinci mertebe etkilerine bağlı olarak oluşan kuvvetleri arttırabileceğine yer verilmiştir [33].

Eurocode 8 (Design of Structures for Earthquake Resistance) Bölüm 5 (Foundations, retaining Structures and Geotechnical Aspect) zemin yapı etkileşimine ayrılmıştır. Dokümanda zemin yapı etkileşiminin görece yumuşak zeminlerdeki yapılar ve narin yüksek yapılar için dikkate alınması istemiştir. Zemin yapı etkileşimli durumda yapı periyodunun uzayacağı ve yapının dinamik davranışını tanımlayan mod şekillerinin değişeceği ifade edilmiştir. Sıradan binalar

için yapı zemin ilişkisinin eğilme momentlerini ve kesme kuvvetlerini azalttığı için yararlı olacağı bilgisi de bu dokümanda yer bulmuştur [34].

Soil – Structure Interaction for Building Structures dokümanında ise zemin yapı etkileşimi tüm yönleri ile ele alınmıştır [27].

2.1 Örnek Binalar

Zemin yapı etkileşiminin yapılar üzerindeki etkilerinin görülebilmesi için bu çalışmada 5, 10 ve 15 katlı 3 adet örnek bina tasarlanmıştır. Örnek binalar süneklik düzeyi yüksek ve deprem yüklerinin tamamının çerçevelerle taşındığı radye temelli yapılardır. Örnek binalar yatayda her iki doğrultuda da simetrik, planda ve düşeyde düzensizliği bulunmayan, kat kütleleri aynı yapılardır ve çerçeveler birbirine dik doğrultuda düzenlenmiştir. Burulma düzensizliği, yumuşak kat ve zayıf kat düzensizlikleri bulunmamaktadır. Döşemeler deprem yüklerinin taşınmasına olan katkılarından dolayı boşluksuz olarak tasarlanmıştır. Özetle örnek binalar modellemedeki belirsizliklerin analiz sonuçlarına olan etkisinin azaltılması ve yapısal davranışın olabildiğince sadeleştirilmesi amacıyla düzenli tasarlanmıştır.

Binaların deprem performansı binaların plandaki şekilleriyle de ilişkilidir. Planda dikdörtgen ve kare şekilli olan yani planda düzenli binalar deprem kuvvetlerini karmaşık şekilli yani planda düzensiz binalara göre (X, Y, V, L, T) daha direk yoldan zemine iletirler. Planda düzensiz binalar deprem yükleri dikkate alınarak tasarlanırsa bile depremlerde eylemsizlik kuvvetlerinin zemine iletilmesinde izledikleri yollar sebebiyle dikkate çekici derecede hasar görebilirler. Bu hasarların en temel nedenleri olarak katlardaki düzensiz kütle dağılımları ve ağırlık merkezi ile kütle merkezi arasındaki büyük dış merkezliktir. Bu sebeple bir binanın geometrisi ile deprem performansı arasındaki ilişki planda düzenli binalar üzerinde daha iyi anlaşılabilir. Planda düzenli binalar deprem performansı en iyi olan ve göçme mekanizması önceden büyük bir yaklaşıklıkla belirlenebilen binalardır [35].

Örnek binaların tasarımında C30 sınıfı beton ve S420a donatı kullanılmıştır. Örnek binalar 0.4g deprem ivmesine göre zemine ankastre bağlı olarak tasarlanmıştır. Örnek binaların tasarımına ait bilgiler Tablo 2.1’de ve Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Örnek Binaları Betonarme Eleman Boyutları

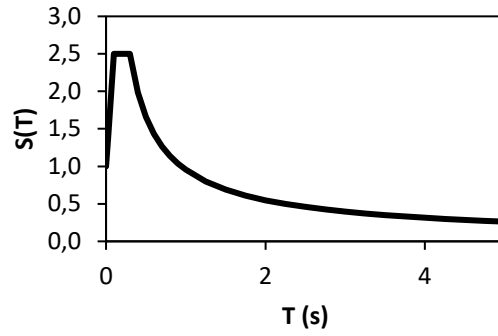
Kat Sayısı	Kolon Boyutları (cm)	Kiriş Boyutları (cm)	Temel Tipi ve Kalınlığı (cm)	Döşeme Kalınlığı (cm)
5	50/50	25/50	Radye, 50	15
10	70/70	30/50	Radye, 60	15
15	80/80	25/60	Radye, 70	15

Tablo 2.2 Örnek Binaların Boyutları

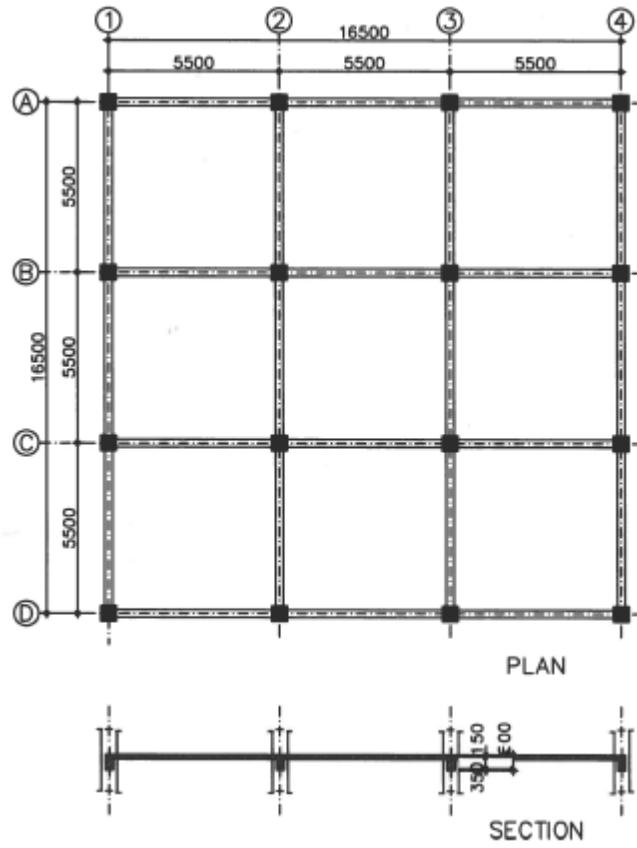
Kat	Açıklık Sayısı	Aks Açıklığı (m)	Toplam Açıklık r (m)	Kat Yüksekliği (m)	Toplam Yükseklik h (m)	Narinlik Oranı h/r
5	3	5.5	16.5	3	15	0.91
10	3	5.5	16.5	3	30	1.82
15	3	5.5	16.5	3	45	2.73

5, 10, 15 katlı örnek binaların zemine ankastre bağlı olarak yapılan analizlerinde birinci doğal titreşim periyotları sırasıyla 0.69, 1.19 ve 1.46 s olarak elde edilmiştir. Örnek binaların tasarımında mod birleştirme yöntemi kullanılarak doğrusal elastik olarak yapılmıştır. Analizlerde sönüm oranı (ξ) %5 olarak dikkate alınmış ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan tasarım depremi kullanılmıştır. Yapı önem katsayısı

1.0 alınmıştır. Örnek binaların kalıp planı Şekil 2.2’de ve kesitleri Şekil 2.3’de verilmiştir. Donatıları ile ilgili bilgiler EK A, B ve C’de görülebilir.

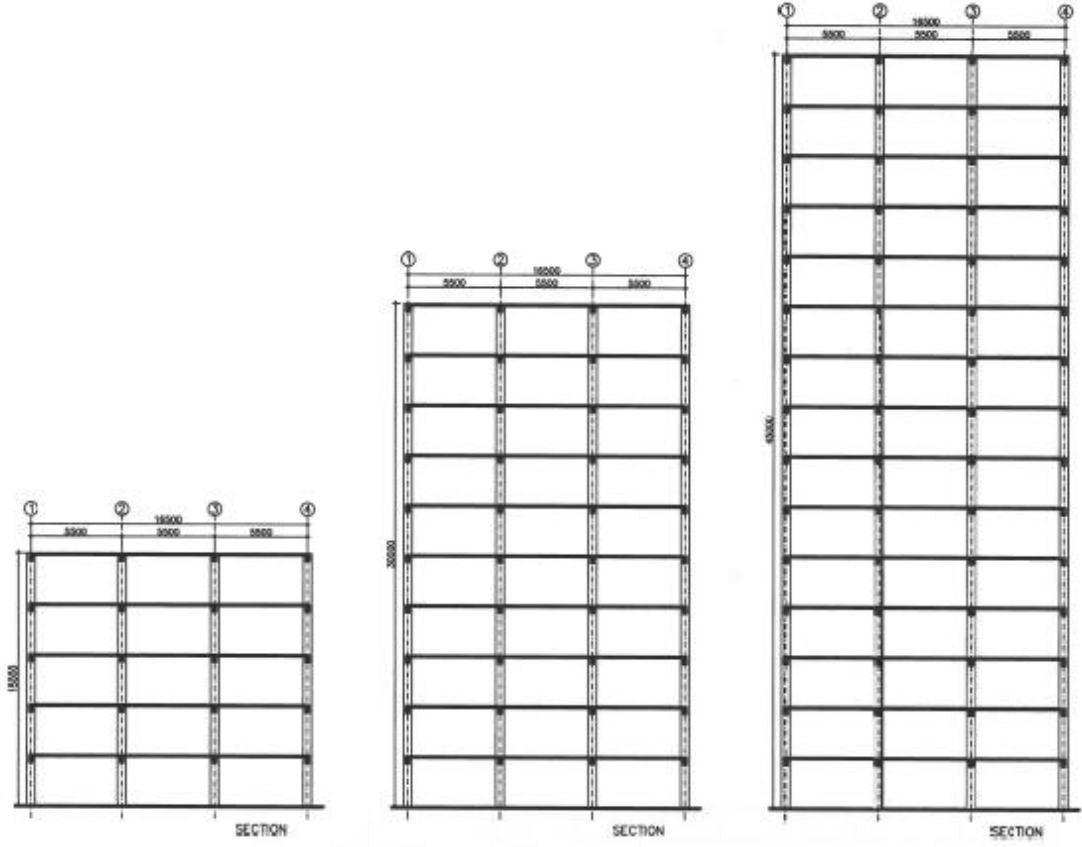


Şekil 2.1 A Sınıfı Zemin İvme Spektrumu



Şekil 2.2 Örnek Binaları Kalıp Planı ve Kesiti

Örnek binaların tasarımı A sınıfı zeminde, 0.4g devrem ivmesine ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007’ye göre tasarlanmıştır. Kolon boyutlarında üst katlara çıkıldıkça küçültme yapılmamıştır.



Şekil 2.3 Örnek Binaları Düşey Kesitleri

2.2 Zemin Sınıfları

Yönetmeliklerde zeminler, zeminin standart penetrasyon sayısı, relatif sıkılığı, serbest basınç direnci, plastisite indisi, kohezyon katsayısı ve kayma dalgası gibi parametrelere bağlı olarak sınıflara ayrılmıştır. Kayma dalgası hızı zeminin dinamik özelliklerini tanımlayan önemli parametrelerdendir (K. ÖZAYDIN ve diğerleri). Bu çalışmada örnek binaların farklı mesnetlenme koşullarını temsil edecek zemin sınıfları için Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007'deki zemin sınıflandırması dikkate alınmıştır (Tablo 2.3).

Tablo 2.3 Zemin Sınıfları

Zemin Sınıfı	Zemin Sınıfı Tanımı	Kayma Dalgası Hızı V_s (m/s)
A	Sert Kaya	>750
B	Yumuşak Kaya veya Sıkı Zemin	360-750
C	Sıkı Zemin	180-360
D	Yumuşak Zemin	<180

2.3 Deprem Kayıtları

Yönetmeliklerde bina ve bina türü yapıların doğrusal veya doğrusal olmayan zaman tanım alanındaki analizlerinde kullanılmak üzere deprem kayıtlarının nasıl seçileceğine ait kriterler bulunmaktadır. Deprem kayıtlarının seçiminde bölgedeki geçmiş deprem kayıtlarının veya benzerleştirilmiş deprem kayıtlarının kullanımı öne çıkan seçim kriterleridir. Bu çalışmada zemin sınıflarının kayma dalgası hızına bağlı olarak yapılmış zemin sınıflandırmasına göre dikkate alınan zemin sınıfında meydana gelmiş deprem kayıtları seçilmiştir.

Depremler FEMA P695’de meydana geldikleri fay ile kaydedildikleri nokta arasındaki mesafeye bağlı olarak da iki farklı gruba ayrılmıştır [36]. Bu gruplamaya göre depremin meydana geldiği fay ile kaydedildiği nokta arasındaki mesafe 10 km’ye eşit ve büyük ise “Uzak Fay” depremi, 10 km’den küçük ise “Yakın Fay” depremi olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada uzak fay depremleri kullanılmıştır.

Zaman tanım alanındaki analizlerde kullanılmak üzere FEMA P695 ve ATC40’da yakın ve uzak fay depremlerinden oluşmuş deprem setleri verilmiştir [36]. ATC40’daki yakın ve uzak fay deprem grupları 10’ar depremden ve 8 farklı deprem kaydından oluşmaktadır. FEMA P695’de uzak fay deprem grubu 22 ve yakın fay deprem grubu 28 adet depremden oluşmaktadır. Bu deprem setleri ise 19 farklı deprem kaydı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada öncelikle FEMA P695’de

verilen depremler dikkate alınmış ve tüm deprem kayıtları PEER [37] veri tabanından sağlanmıştır.

Yapılan çalışmalarda A sınıfı zeminlerde zemin yapı ilişkisi gözlemlenmediğinden analizler B, C ve D sınıfı için yapılmış ve dolayısı ile bu zeminler için deprem grupları oluşturulmuştur. Analizler deprem kayıtlarının her iki bileşeni için yapılmıştır. B, C ve D sınıfı zeminler için seçilen deprem kayıtlarının özellikleri Tablo 2.4, Tablo 2.5, Tablo 2.6, Tablo 2.7, Tablo 2.8 ve Tablo 2.9’da verilmiştir.

Tablo 2.4 B Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 1

Sıra No	Depremin Adı	Büyüklik (Mw)	Faya Uzaklık (Km)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)
1	Hector Mine, 1999	7.1	10.35	685
2	Kocaeli, 1999	7.7	10.56	523
3	Friuli, 1976	6.5	14.97	505
4	Loma Prieta, 1989	6.9	19.90	489
5	Northridge, 1994	6.7	19.10	550
6	Kobe, 1995	6.9	49.90	609
7	Imperial Valley,1979	6.5	15.19	472

Tablo 2.5 B Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 2

Sıra No	İstasyon Adı	1. Bileşen	PGA (g)	2. Bileşen (g)	PGA (g)
1	Hector	HEC000	0.263	HEC090	0.360
2	Arçelik	ARE000	0.218	ARE090	0.140
3	Tolmezzo	TMZ000	0.344	TMZ270	0.302
4	Anderson	AND250	0.250	AND340	0.262
5	Big Tujunga	TUJ262	0.165	TUJ352	0.255
6	Chihaya	CHY000	0.094	CHY090	0.106
7	Cerro Prieto	CPE147	0.167	CPE237	0.147

Tablo 2.6 C Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 1

Sıra No	Deprem Adı	Büyüklik (Mw)	Faya Uzaklık (Km)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)
1	Northern, 1967	5.6	27.36	219
2	Kern County, 1952	7.4	38.42	385
3	Imperial Valley, 1979	6.5	22.03	242
4	Kobe, 1995	6.9	19.14	256
5	Kocaeli, 1999	7.5	13.60	282
6	Landers, 1992	7.3	23.62	354
7	Northern, 1954	6.5	26.72	219

Tablo 2.7 C Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 2

Sıra No	İstasyon Adı	1. Bileşen	PGA (g)	2. Bileşen (g)	PGA (g)
1	Ferndale	FRN224	0.268	FRN314	0.110
2	Taft	TAF021	0.156	TAF111	0.183
3	Delta	DLT262	0.239	DLT352	0.333
4	Shin	SCI000	0.238	SHI090	0.212
5	Düzce	DZC180	0.325	DZC270	0.360
6	Yermo	YER270	0.226	YER360	0.148
7	Ferndale	FRN044	0.172	FRN314	0.200

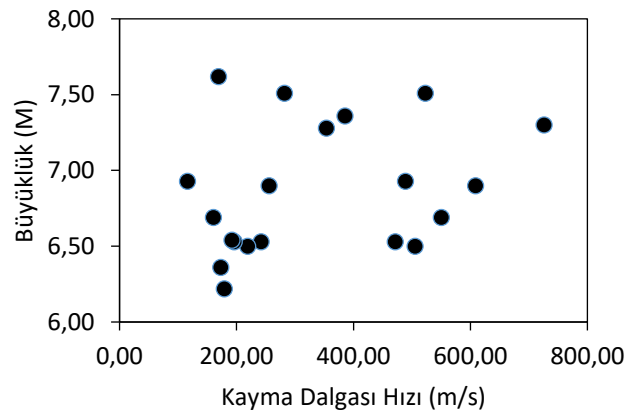
Tablo 2.8 D Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 1

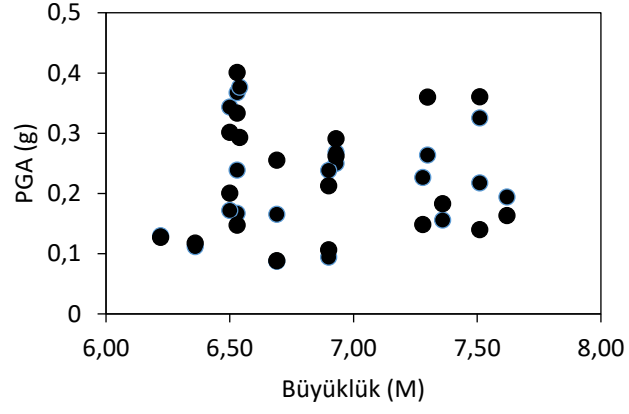
Sıra No	Deprem Adı	Büyüklik (Mw)	Faya Uzaklık (Km)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)
1	İmperial Valley, 1979	6.5	12.56	196
2	Supersition Hills, 1987	6.5	18.20	192
3	Chi Chi, 1999	7.6	24.13	170
4	Northridge, 1994	6.7	45.55	161
5	Loma Prieta, 1983	6.9	43.77	116
6	Coalinga, 1983	6.4	43.83	173
7	Supersition Hills, 1987	6.2	17.59	179

Tablo 2.9 D Sınıfı Deprem Kayıtları ve Özellikleri - 2

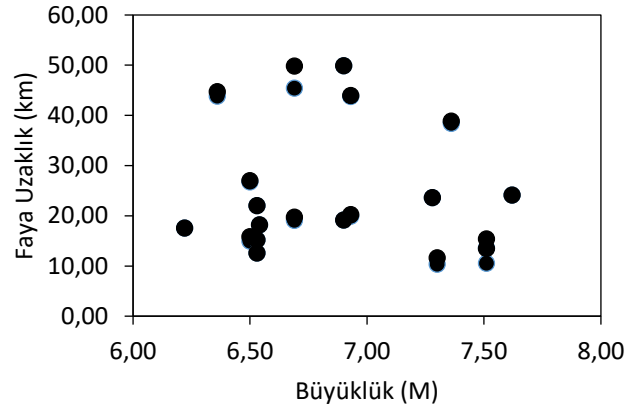
Sıra No	İstasyon Adı	1. Bileşen	PGA (g)	2. Bileşen (g)	PGA (g)
1	El Centro	E11140	0.367	E11230	0.401
2	El Centro	ICC000	0.376	ICC090	0.293
3	CHY047	CHY047-N	0.194	CHY047-W	0.163
4	Carson Water	WAT180	0.087	WAT270	0.088
5	Foster City	A01000	0.268	A01090	0.291
6	Parkfield	H-C02000	0.112	H-C-2090	0.117
7	Imperial Valley	IVW090	0.130	IVW360	0.127

Seçilen depremlere ait zeminin kayma dalgası hızı – depremin büyüklüğü grafiği Şekil 2.4’de, depremin büyüklüğü – depremin maksimum yer ivmesi grafiği Şekil 2.5’de, depremin büyüklüğü – faya uzaklık grafiği Şekil 2.6’ da, faya uzaklık – depremin maksimum yer ivmesi grafiği Şekil 2.7’de verilmiştir. Yukarıdaki tablolardaki 21 adet deprem 13 adet deprem kaydı kullanılarak oluşturulmuştur.

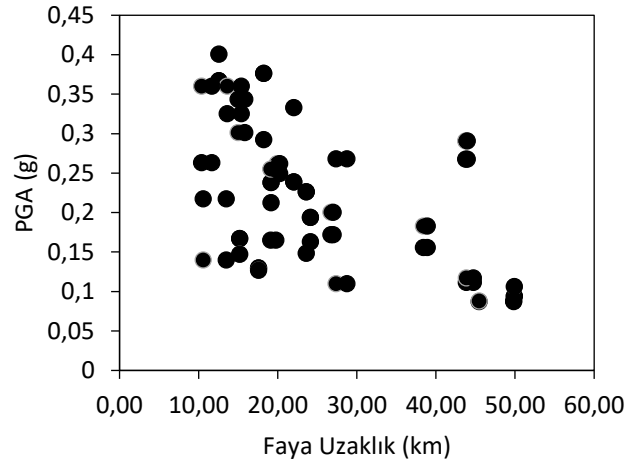
**Şekil 2.4** Deprem Kayıtlarının Kayma Dalgası Hızı ve Büyüklük Grafiği



Şekil 2.5 Deprem Kayıtlarının Büyüklük ve Maksimum Yer İvmesi Grafiği



Şekil 2.6 Deprem Kayıtlarının Büyüklük ve Faya Uzaklık Grafiği



Şekil 2.7 Deprem Kayıtlarının Faya Uzaklık ve Maksimum Yer İvmesi Grafiği

Tablo 2.10'da seçilne deprem kayıtlarına ait özet istatiksel bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.10 Deprem Kayıtları İstatiksel Bilgileri

Zemin Sınıfı	Ortalama PGA (g)	Ortalama Faya Uzaklık (km)	Ortalama Kayma Dalgası Hızı (m/s)
B	0.220	21	548
C	0.230	25	280
D	0.220	30	170

3.1 Doğrusal Elastik Olmayan Analiz

Örnek binaların deprem yükleri altında zemin yapı etkileşimini içeren ve içermeyen yani farklı mesnet koşullarına göre zaman tanım alanında analizleri doğrusal elastik olmayan yöntem ile yapılmıştır. Çünkü analizi yapılan yapının ilk akmadan göçme durumuna gelmesi yapının elastik ötesi davranışını dikkate almayı gerektirmektedir. Bu hesap metodunda deprem kaydındaki her bir ivme değeri için yapıya ait hareket denklemi çözülerek zaman bağılı olarak yapıya ait istenen sonuçlar (yer değiştirme, kesit tesirleri, şekil değiştirmeler vb.) elde edilebilir. Çok serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi Denklem 3.1' de verilmiştir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p(t) \quad (3.1)$$

Burada çok serbestlik dereceli sistemin $\ddot{x}$ ivmesi, $\dot{x}$ hızı, x yer değiştirmesi, m kütlesi, sönümü oranı ve k ise rijitliğidir. Dış yük bu denklemde $p(t)$ ile gösterilmiş olup dış yükün deprem olması durumunda çok serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi Denklem 3.2'de verilmiştir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (3.2)$$

Deprem ivmesi $\ddot{x}_g$ zamana bağılı olarak çok düzensiz bir değişim gösterdiğinden çözümün analitik olarak elde edilmesi olası olmamakta ancak sayısal integrasyon ile elde edilebilmektedir. Hareket denkleminin çözümü için çeşitli yaklaşık yöntemler olup bu yöntemlerden biri Newmark yöntemidir. Bu yöntemde yapının t_i anındaki davranışından yararlanılarak t_{i+1} anındaki davranışına ulaşılır. Ancak çözümün yapılabilmesi için sayısal integrasyon boyunca deprem ivmesinin nasıl değiştiğine karar verilmesi gereklidir. Bu çözümde kullanılan γ ve β katsayıları deprem ivmesinin değişimine göre farklı değerler almaktadır. Deprem ivmesinin

değişimi için 3 farklı kabul yapılmaktadır. Bunlar sabit ivme yöntemi, sabit ortalama ivme yöntemi ve doğrusal ivme yöntemidir. Sabit ortalama ivme yönteminde Δt zaman aralığı boyunca ivmenin sabit kaldığı ve değerinin t_i ve t_{i+1} anlarındaki ivmelerin ortalaması olduğu kabul edilmektedir. Bu çalışmada sabit ortalama ivme yöntemi kullanılmış olup $\gamma=0.5$ ve $\beta=0.25$ değerini almıştır. Literatürde bu yöntemin yapı mühendisliğinde çok tercih edildiğine vurgu yapılmıştır (K. DARILMAZ, M.S. KIRÇIL).

Zaman tanım alanında hesap metodu ile yapılan analizde kullanılan deprem kaydı, yapının doğrusal olan veya olmayan davranış evrelerinden sadece birine karşı gelmektedir. Elde edilen sonuçlar ise yapının deprem yükü altında davranışı ve performans seviyesi hakkında yeterli netlikte bilgi içermez. Çünkü elde edilen sonuçlar sadece dikkate alınan deprem için geçerlidir. Ancak beklenen ve görülmek istenen, yapının öncelikle doğrusal elastik sonrasında doğrusal elastik olmayan davranış evrelerini, performans seviyelerini geçerek göçme durumunda geleceği davranış süreçlerinin elde edilmesi ve bu süreçlerde elde edilen çıktıların değerlendirmelere tabi tutulmasıdır. Bunun için dikkate alınan deprem kaydının ölçeklenmesi ve her bir ölçek için yapının doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap metodu ile analizi gerekli olmaktadır. Bu yöntem literatürde Artımsal Dinamik Analiz olarak adlandırılmıştır. Bu yöntem 1977 yılında V. V. BERTERO tarafından kullanılmıştır (D. VAMVATSIKOS ve C. A. CORNELL). Sonraki yıllarda ise araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Son olarak da 2002 yılında D. VAMVATSIKOS ve C. A. CORNELL tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Artımsal Dinamik analiz yöntemi 2 yolla uygulanabilir. Bunlardan ilki depremin şiddetini ifade eden parametrenin analizlerde ölçeklenmesidir. İkincisi ise depremin şiddetini ifade eden parametrenin karşılığı olan ve hasarı ifade eden yapısal davranış parametresinin ölçeklenmesidir. Şiddet parametresinin ölçeklendirilmesi içinse genel olarak iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan biri doğrudan ivmenin ölçeklenmesi, diğeri ise birinci titreşim moduna ait spektral ivme değerinin temel alınarak ivmenin ölçeklenmesidir. Bu çalışmada şiddet parametresi olarak spektral ivme kullanılmıştır. Görüldüğü gibi artımsal dinamik analiz yöntemi çoklu bir analiz yöntemidir. Her iki durumda da, analizlerde,

depremin süresi ve frekans içeriği aynı kalmaktadır. Eğer analizler birden fazla sayıda deprem için yapılırsa elde edilen sonuçlar yapının deprem yükü altında davranışı için gerçekçi sonuçlar verecektir. Artımsal dinamik analizde genel olarak ve elde edilen sonuçların başında yapının tepe noktası deplasmanı - taban kesme kuvveti grafiği gelmektedir.

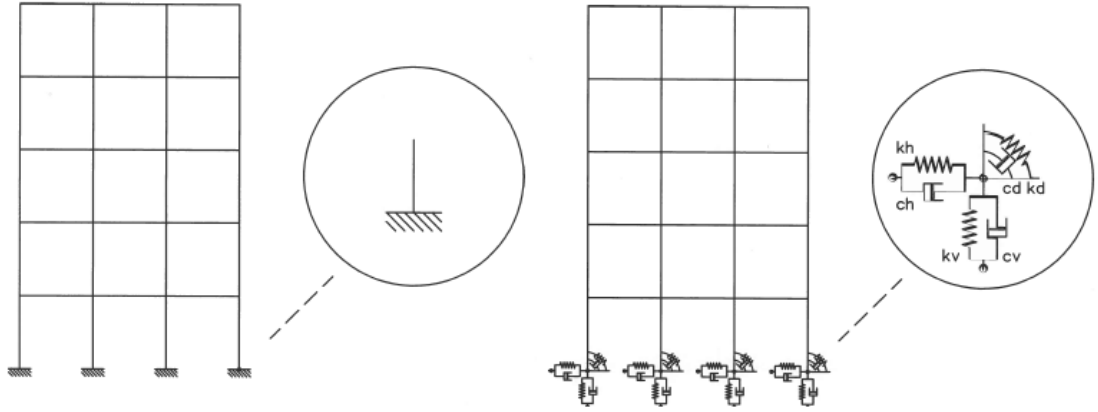
3.2 Örnek Binaları Mesnetleme Özellikleri

Zemin yapı etkileşiminin etkilerinin görülebilmesi için yapıların mesnetleme koşullarının değiştirilmesi gereklidir. Zemin yapı etkileşiminin olmadığı durumlarda doğrusal elastik olmayan analizler örnek binaların zemine ankastre bağlı olduğu kabulü ile yapılmıştır. Zemin yapı etkileşiminin dikkate alındığı durumlarda ise mesnetleme koşullarının yay ve sönüm elemanları ile tanımlanması gereklidir. Bu durumda depremin yapıya olan etkisi ve yapının zemine olan etkisi elde edilebilmektedir. Bu çalışmada zemin ile yapı arasındaki ilişkinin tanımlanabilmesi için Koni Modeli kullanılmıştır (Tablo 3.1). Bu hesap metodunda yapı temelinin boyutları ile zeminin birim hacim ağırlığı, poisson oranı, kayma dalgası hızına bağlı olarak formüller yardımı ile yay ve sönüm elemanları hesaplanmaktadır [38]. Özellikleri hesaplanan bu elemanlar örnek binaların mesnetlerine atanarak doğrusal elastik olamayan analizler yapılmıştır (Şekil3.1).

Tablo 3.1 Koni Modeli Formülleri

Hareket	Yatay	Düşey	Dönme
Eşdeğer Yarıçap, r_0	$\sqrt{\frac{A_0}{\pi}}$	$\sqrt{\frac{A_0}{\pi}}$	$\sqrt[4]{\frac{4I_0}{\pi}}$
Boyut Oranı, $\frac{z_0}{r_0}$	$\frac{\pi}{8}(2 - \nu)$	$\frac{\pi}{4}(1 - \nu)\left(\frac{V_s}{c_s}\right)^2$	$\frac{9\pi}{32}(1 - \nu)\left(\frac{V_s}{c_s}\right)^2$
Poisson Oranı, ν	Bütün Değerler İçin, ν	$\leq \frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} < \nu \leq \frac{1}{2}$	$\leq \frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} < \nu \leq \frac{1}{2}$
Kayma Dalgası Hızı, V_s	c_s	$c_s \quad 2c_s$	$c_s \quad 2c_s$
Yay Elemanına Ait Değer	$K = \rho V_s^2 \frac{A_0}{z_0}$		$K_\theta = 3\rho V_s^2 \frac{I_0}{z_0}$
Sönüm Elemanına Ait Değer	$c = \rho V_s A_0$		$c_\theta = \rho V_s I_0$

Burada A_0 temel alanı, I_0 temel atalet momenti, r_0 eşdeğer yarıçap, ν zeminin poisson oranı, v_s zeminin kayma dalgası hızı ve ρ zeminin birim hacim kütleini göstermektedir.



Şekil 3.1 Örnek Binaların Mesnetlenme Şekilleri, Zemin Yapı Etkileşimsiz ve Etkileşimli

Koni Modelinde hesaplamaların yapılabilmesi için zeminin kayma dalgası hızına, birim hacim ağırlığına ve poisson oranına ihtiyaç bulunmaktadır. Dikkate alınan her bir zemin için bu değerler değişse bile sınıflara ayrılarak dikkate alınan zeminler için bu değerler sabit kabul edilerek yay ve sönüm elamanlarının değerleri hesaplanmış ve Tablo 3.2’de verilmiştir. (M.E. AYDEMİR).

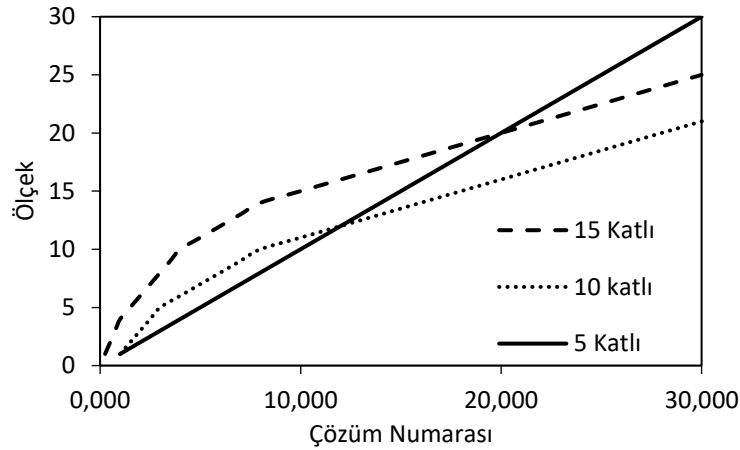
Tablo 3.2 Koni Modeli için Belirlenen Sabit Değerler

Zemin Sınıfı Tanımı	Zemin Sınıfı	Kayma Dalgası Hızı (m/s)	Birim Hacim Ağırlığı (KN/m ³)	Poisson Oranı
Yumuşak Kaya veya Sıkı Zemin	B	400	21	0.3
Sıkı Zemin	C	250	20	0.4
Yumuşak Zemin	D	150	18	0.5

3.3 Analizlerin Ölçeklenmesi

Hasar olasılık eğrileri bu çalışmada spektral ivmeye bağlı olarak çizilecektir. Eğer analizler bir deprem kaydı için yapılsaydı spektral ivmenin değerinin önceden belirlenmesine gerek kalmayacaktı. Ancak analizler birden fazla deprem kaydı için yapıldığından analizlerin yapılacağı spektral ivme değerlerinin önceden

belirlenmesi gerekli olmuştur. Bu çalışmada 3 adet örnek bina olduğundan 3 farklı spektral ivme çözüm seti belirlenmiş ve yapılan bütün analizlerde bu spektral ivme setleri kullanılmıştır. Artımsal dinamik analizin her bir adımında da depremin maksimum yer ivmesi ölçeklendiğinden belirlenen her bir spektral ivme değerine göre depremin maksimum yer ivmesinin ölçeklenmiştir. Belirlenen spektral ivme çözüm setleri için hazırlanan grafik Şekil 3. 2' de verilmiştir.



Şekil 3.2 Örnek Binaların Spektral İvme Çözüm Setleri

Analizlerde kullanılan ölçek ise aşağıdaki formül yardımı ile belirlenmiştir.

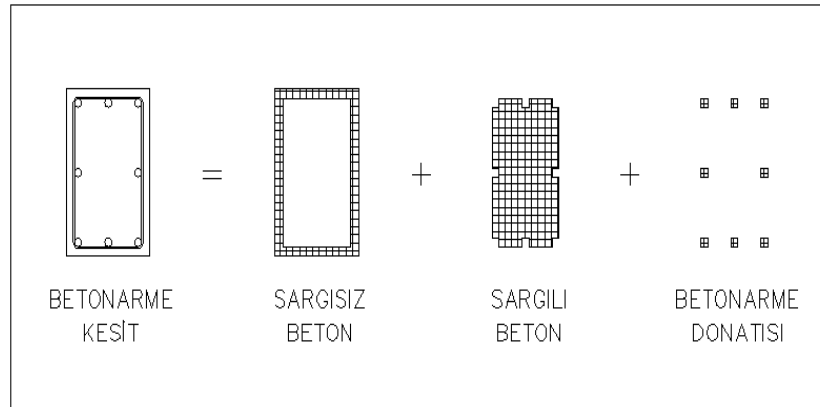
$$\text{Ölçek} = \frac{S_{a,Talep}}{S_{a,\text{Örnek Bina}}} \text{PGA} \quad (3.3)$$

Burada $S_{a,Talep}$ daha önceden belirlenmiş spektral ivme, $S_{a,\text{Örnek Bina}}$ örnek binanın periyoduna karşı gelen spektral ivme, PGA depremin maksimum yer ivmesidir.

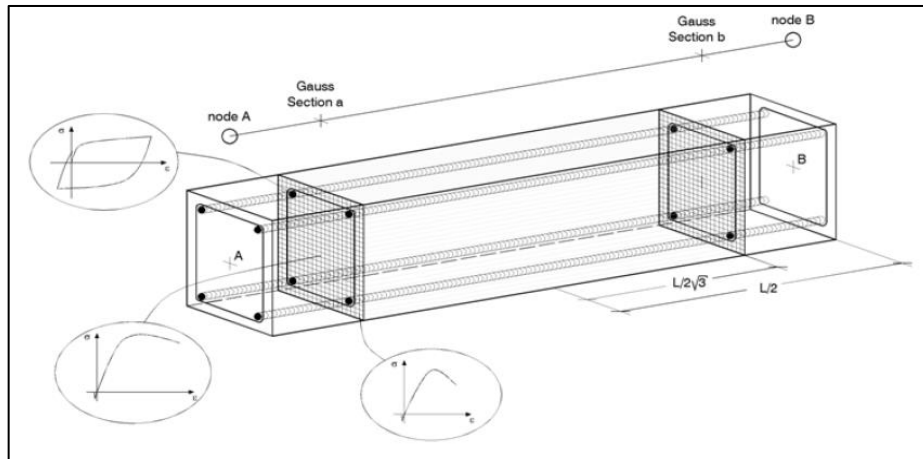
3.4 Analiz Platformu

Bütün analizler doğrusal elastik olmayan analiz yapabilen Seismostruc [39] programı ile yapılmıştır. Program Ön İşlemci Modülü, İşlemci Modülü ve Art İşlemci Modülü olmak üzere 3 modülden meydana gelmektedir. Ön işlemci modülünde analiz türünün seçimi, malzeme tanımlamaları, modellemeler, yüklemeler ve performans kriterleri belirlenmektedir. İşlemci modülünde ise hazırlanan modelin analizi yapılmakta ve analiz sürecinde performans kriterleri ulaşılması durumunda ise programın vermiş olduğu uyarılar görülebilmektedir. Aynı zamanda bu uyarılar dosya olarak kaydedilmektedir. Art işlemci modülüyle

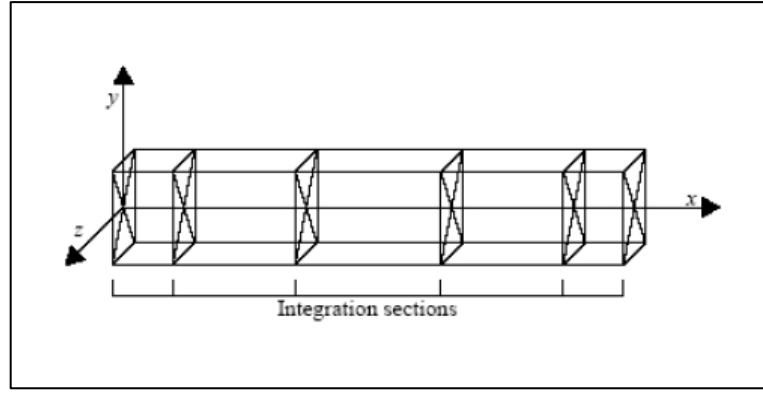
de istenen kriterlere göre sonuçlar görüntülenebilmektedir. Program elemanlardaki ikinci mertebe etkileri ile yapıdaki büyük yer değiştirme ve dönmeleri dikkate alabilmektedir. Programda doğrusal olmayan malzeme davranışı yayılı plastik mafsallar kabulü ile dikkate alınmaktadır. Kabuk betonu, donatı ve çekirdek olarak ayrılan betonarme eleman kesitleri lifler yardımı ile modellenmektedir. Kesite ait gerilme - şekil değiştirme durumu kesitteki her lifin malzeme davranışının integrasyonu ile belirlenmektedir (Şekil 3.3). Betonarme bir elemanda integrasyonu yapılacak kesit sayısı programa verilebilir ve kesit sayısı arttıkça sonuçların hassasiyeti artacak fakat çözüm süresi de uzayacaktır (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5).



Şekil 3.3 Tipik Betonarme Kesitin Liflerine Ayrılması



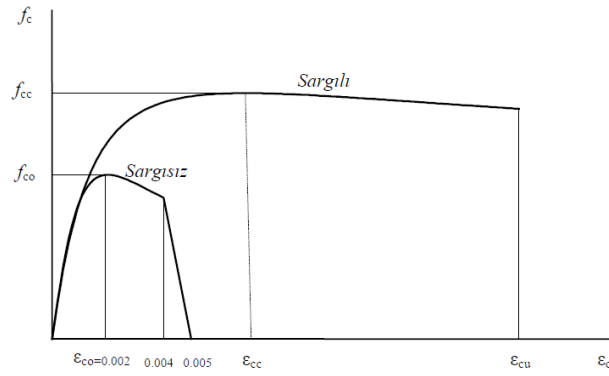
Şekil 3.4 Eleman Boyunca Tipik Betonarme Kesitin Gösterimi



Şekil 3.5 Eleman Boyunca Dikkate Alınan Kesitler

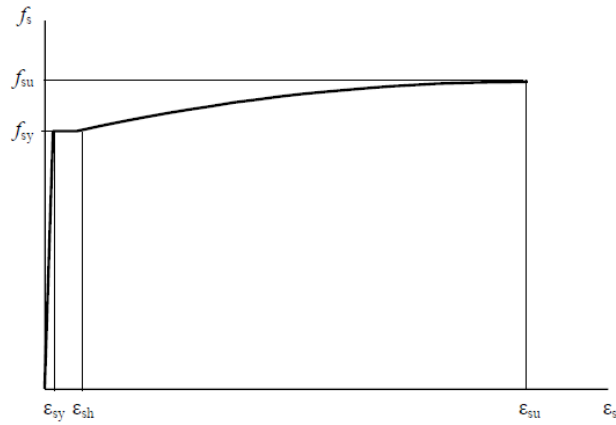
3.5 Örnek Binaların Doğrusal Olmayan Analizleri

Örnek binalar 3 boyutlu olarak modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. Kolon ve kirişler çubuk elemanlar olarak tanımlanmıştır. Analizlerde deprem kayıtlarının her iki bileşeni için yapılmış ve düşey deprem etkisi ihmal edilmiştir. Analizlerde yaylı plastik mafsallı model kullanılmıştır. Her eleman için sol uç, sağ uç ve elemanın orta noktası olmak üzere 3 kesit tanımlanarak doğrusal olmayan davranışın bu noktalarda meydana geldiği kabul edilmiştir. Mafsallar arasında kalan elemanların ise doğrusal davrandığı kabul edilmiştir. Zemin yapı etkileşiminin dikkate alınmadığı durum için örnek binaların mesnetlerine ankastre mesnet atanmıştır. Zemin yapı etkileşimini dikkate almak için de örnek binaları mesnetlerine değerleri Koni modelinden hesaplanan yay ve sönüm elemanları tanımlanmıştır. Örnek binalarda eleman düzeyinde bir sonraki bölümde açıklanan 3 farklı kesit hasar kriteri tanımlanmıştır. İkinci mertebe etkileri dikkate alınmıştır. Analizlere yapı göçme durumuna gelinceye kadar belirlenen spektral ivme setine bağlı kalınarak devam edilmiştir. Kolon kiriş birleşim noktalarında 6 serbestlik derecesi dikkate alınmıştır. Artımsal dinamik analizlerde Newmark yöntemi ve ivme değişimi için ise sabit ortalama ivme yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal elastik olmayan performans analizinde sargılı ve sargısız beton için Mander beton modeli kullanılmış olup birim şekil değiştirme gerilme grafiği Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Mander Beton Modeli Birim Şekil Değiştirme Gerilme Değişimi

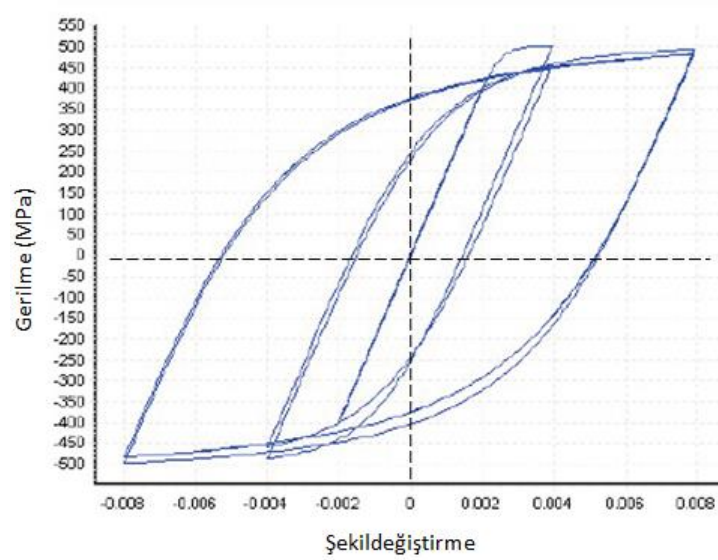
Doğrusal elastik olmayan analizlerde donatı çeliği için birim şekildeğiştirme gerilme grafiği de Şekil 3.7’de verilmiştir.



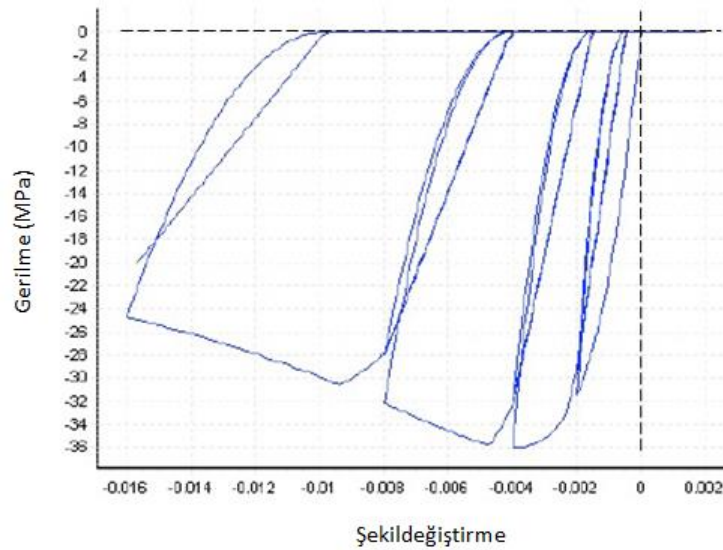
Şekil 3.7 Donatı Çeliği Birim Şekil Değiştirme Gerilme Değişimi

Betonarme elemanların dolasıyla yapının deprem anındaki yön değiştiren tekrarlı yükler altında davranışı donatı çeliğinin ve betonun yön değiştiren tekrarlı yükler altında davranışının bilinmesi ile mümkündür. Bu bilgi ile tasarlanan betonarme elemanlar deprem anında elastik olmayan davranış gösterecek, sünek davranacak ve deprem yükleri karşında yapıdan beklenen performans elde edilebilecektir. Bu çalışmada donatı çeliği modeli için Menegotto – Pinto çelik modeli (1973) ve beton modeli için Mander beton modeli (1988) kullanılmıştır. Donatı çeliği için kullanılan model nervürlü donatı çeliği için uygun olup pekileşmeyi dikkate almaktadır. Tek eksenli çekme kuvveti altındaki donatı çeliğinin iki doğrudan oluştuğu ve tekrarlı yükleme durumunda şekildeğiştirme gerilme eğrisi bu iki doğru arasında gelişmektedir. Akma dayanımına kadar da Hook kanunu geçerlidir. Genel olarak da

donatı çeliğinin çekme ve basınç kuvvetleri altındaki davranışının aynı olduğu kabul edilmiştir. Beton modeli ise sargı etkisini, sargı donatısının boyut ve yerleşim gibi özelliklerini dikkate almakta olup, kare, dikdörtgen veya dairesel kesit için uygundur. Bu modelde çekme kuvveti altında gerilme şekil değiştirme ilişkisi tanımlanabilmekte, ancak bu özellik bu çalışmada kullanılmamıştır. Betonun tekrarlı yükleme durumunda şekil değiştirme gerilme eğrisinin iskeleti tek eksenli basınç kuvveti altındaki betonun şekil değiştirme gerilme eğrisine olarak kabul edilir.



Şekil 3.8 Menegotto – Pinto Çevrimsel Çelik Modeli



Şekil 3.9 Mander Çevrimsel Beton Modeli

3.6 Örnek Binaların Periyotlarındaki Değişimler

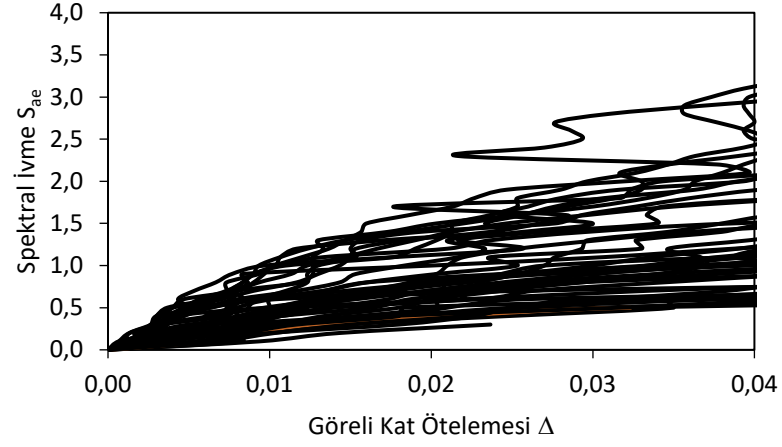
Örnek binaların zemin yapı etkileşimsiz ve etkileşimli durumdaki periyotları Tablo 3.1’de verilmiştir. Tablodan görüleceği üzeri örnek binaların periyotları zemin yapı etkileşimli durumda etkileşimsiz duruma göre uzamıştır ve literatürdeki sonuçlar ile tutarlıdır. Periyottaki bu değişim yapının mesnetlenme koşullarının değişiminden başka bir deyişle yapının mesnetlendiği zemin sınıfının özelliklerinden (zeminin kayma dalgası hızı, zeminin birim hacim ağırlığı, zeminin poisson oranı) kaynaklanmakta olup görece zemin özellikleri kötüleştikçe binanın periyodu büyümektedir.

Tablo 3.3 Örnek Binaların Periyotları (s)

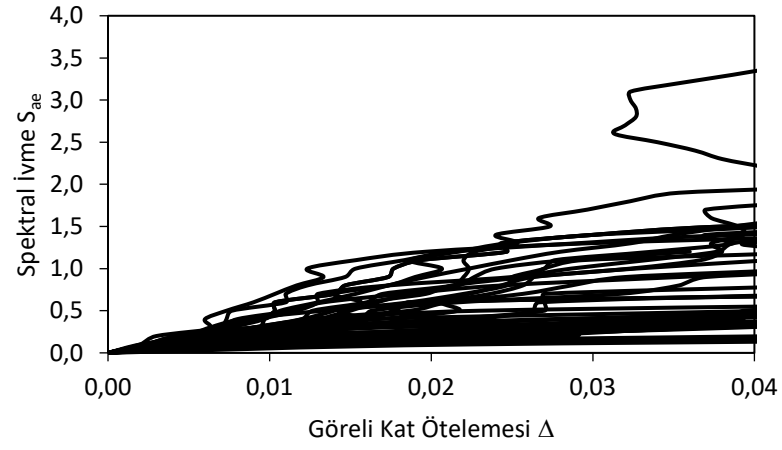
Kat Sayısı	Zemin Yapı Etkileşimsiz Durum	Zemin Yapı Etkileşimli Durum		
		B Sınıfı Zemin	C Sınıfı Zemin	D Sınıfı Zemin
5	0.69	0.70	0.72	0.76
10	1.19	1.23	1.28	1.41
15	1.46	1.56	1.69	1.99

3.7 Örnek Binaların Doğrusal Olmayan Analizleri

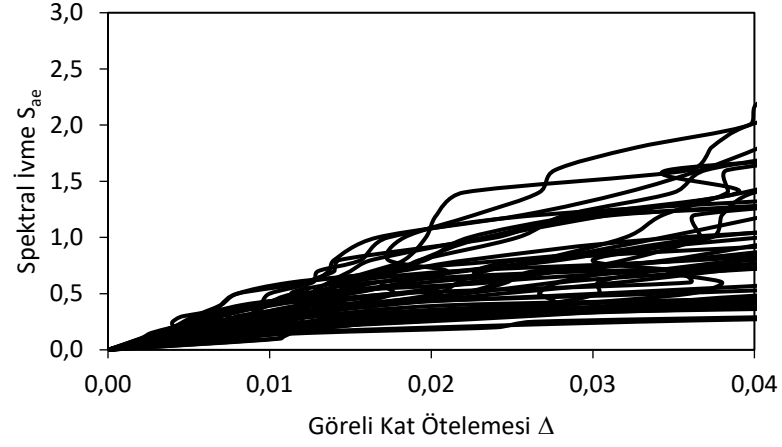
Örnek binaların zemin yapı etkileşimli ve etkileşimsiz analizlerine ait göreceli kat ötelemesi spektral ivme grafikleri aşağıda verilmiştir.



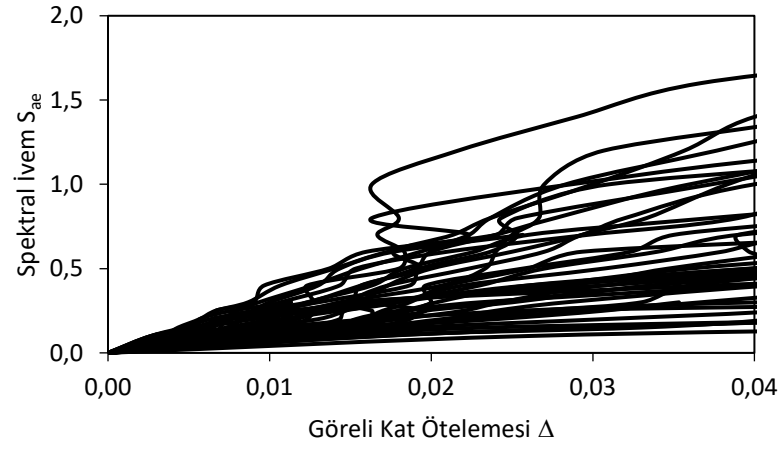
Şekil 3.10 5 Katlı Örnek Bina, Etkileşimsiz durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri



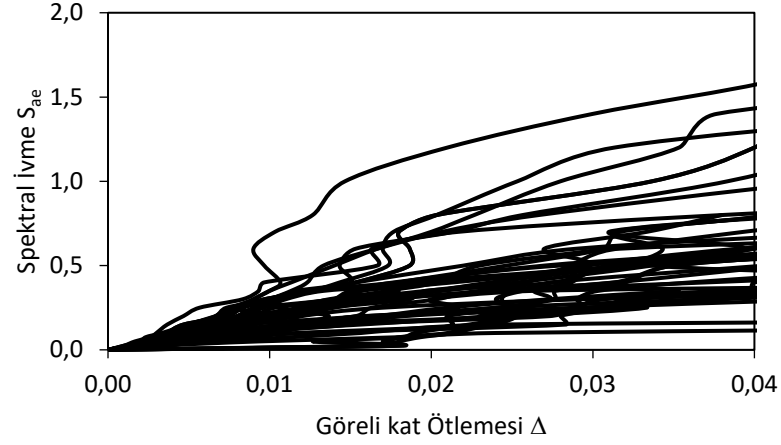
Şekil 3.11 5 Katlı Örnek Bina, Etkileşimli durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri



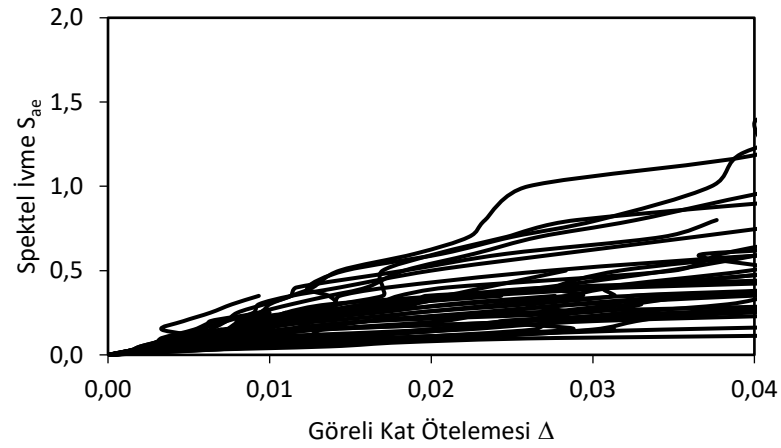
Şekil 3.12 10 Katlı Örnek Bina, Etkileşimsiz durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri



Şekil 3.13 10 Katlı Örnek Bina, Etkileşimli durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri



Şekil 3.14 15 Katlı Örnek Bina, Etkileşimsiz durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri

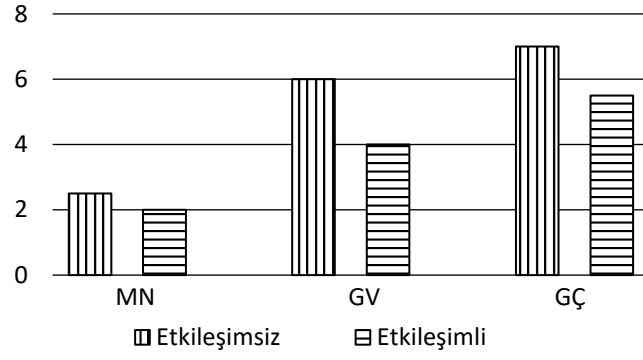


Şekil 3.15 15 Katlı Örnek Bina, Etkileşimli durum, Görelî Kat Ötelemesi Spektral İvme Grafikleri

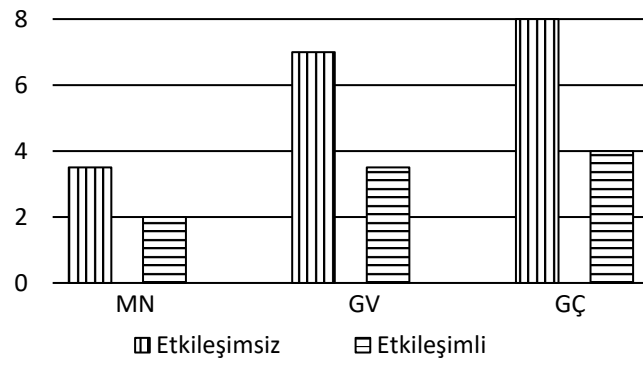
Spektral ivme grafiklerinin zemin yapı etkileşimsiz ve etkileşimli durumları karşılaştırıldığında, etkileşimli durumda daha küçük küçük spektral ivmeler ile aynı görelî kat ötelemelerine ulaşıldığı görülmektedir.

3.8 Örnek Binaların Hasar Sınırlarına Karşı Gelen Spektral İvmeleri

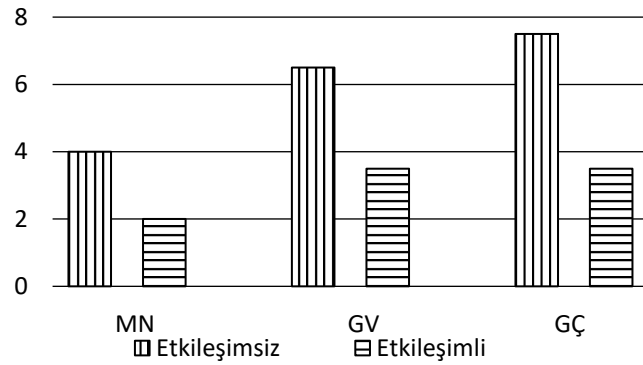
Örnek binaların zemin sınıflarına göre zemin yapı etkileşimsiz ve etkileşimli hasar sınırlarına karşı gelen spektral ivme grafikleri aşağıda verilmiştir.



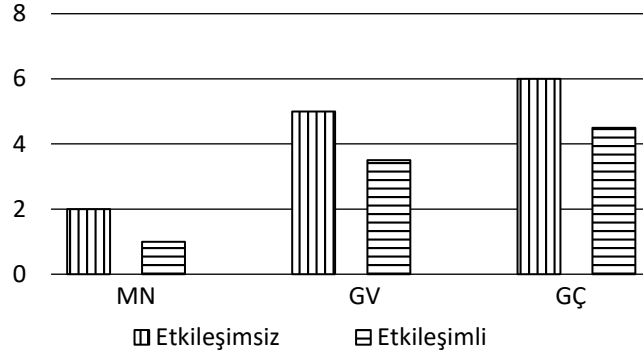
Şekil 3.16 5 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiği



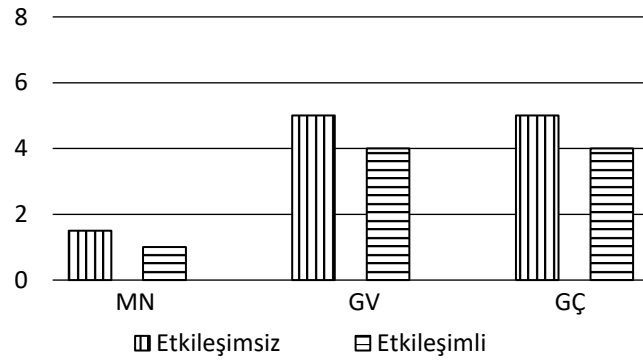
Şekil 3.17 5 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiği



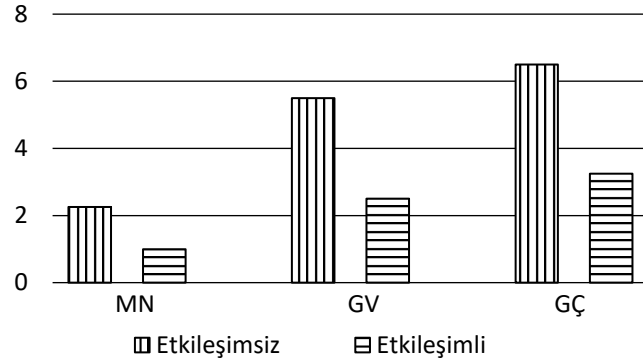
Şekil 3.18 5 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiği



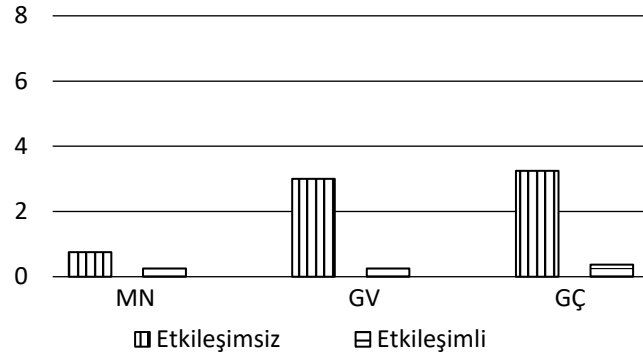
Şekil 3.19 10 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiği



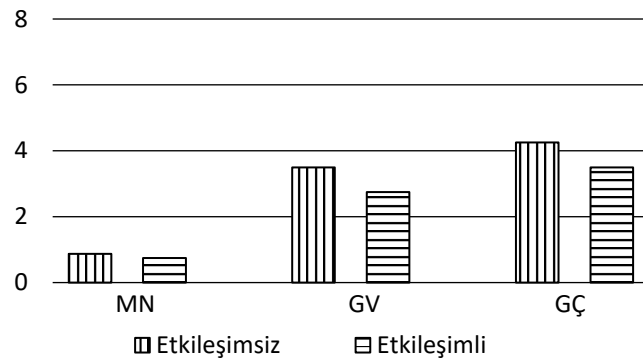
Şekil 3.20 10 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiği



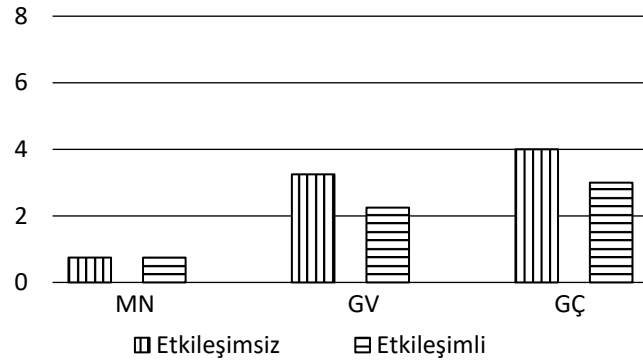
Şekil 3.21 10 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiği



Şekil 3.22 15 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiği



Şekil 3.23 15 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiği



Şekil 3.24 15 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırları ve Spektral İvme Grafiği

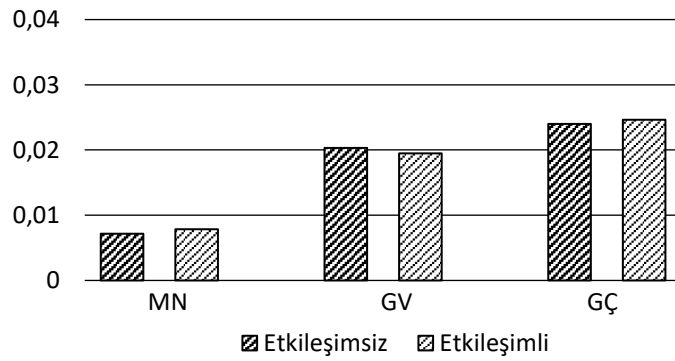
Kat sayısı artıkça, zemin yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumda, her zemin sınıfında hasar sınırına ulaşmak veya hasar görebilirlik kolaylaşmaktadır. Başka bir deyişle daha küçük spektral ivmelerle aynı hasar sınırlarına ulaşılmaktadır. Zemin yapısı etkileşimli durumda, etkileşimsiz duruma göre hasar sınırına ulaşmak veya hasar görebilirlik kolaylaşmaktadır. Başka bir deyişle daha küçük spektral

ivmelerle aynı hasar sınırlarına ulaşılmaktadır. Bu durum yapının mesnetlenme koşullarının değişiminin veya zemin yapı etkileşiminin bir sonucudur ve literatürdeki sonuçlar ile tutarlıdır.

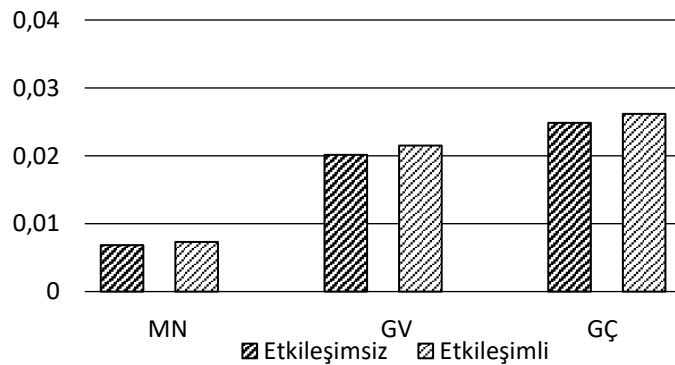
Zemin yapı etkileşimsiz durumda görece zemin sınıfı kötüleştikçe aynı hasar sınırına karşı gelen spektral ivmeler büyümektedir. Bu durum tek yönlü etkileşimin ve deprem kaydının özelliklerinin sonucu olduğu düşünülmektedir.

3.9 Örnek Binaların Hasar Sınırlarına Karşı Gelen Görelî Kat Ötelemeleri

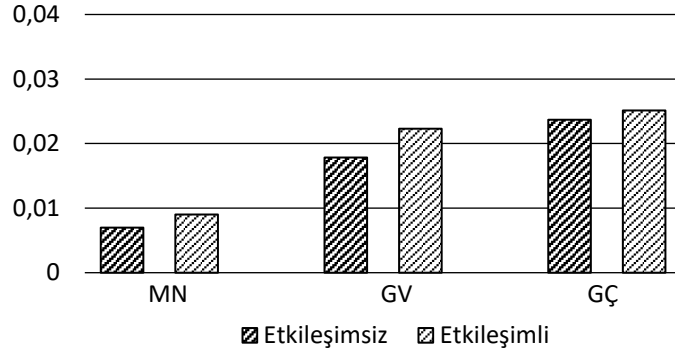
Örnek binaların zemin sınıflarına göre zemin yapı etkileşimsiz ve etkileşimli hasar sınırlarına karşı gelen görelî kat ötelemeleri grafikleri aşağıda verilmiştir.



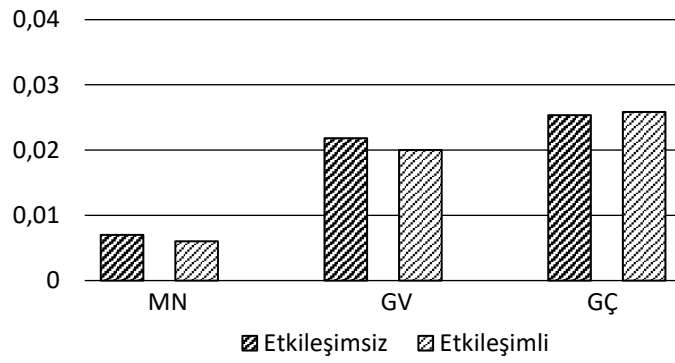
Şekil 3.25 5 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri



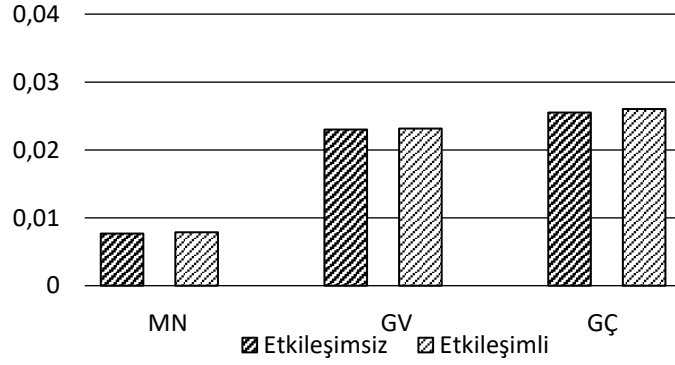
Şekil 3.26 5 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri



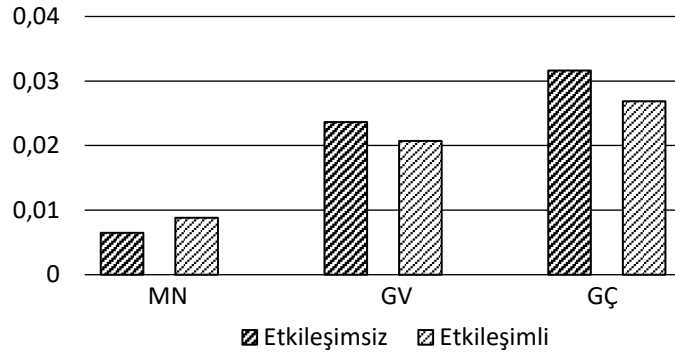
Şekil 3.27 5 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri



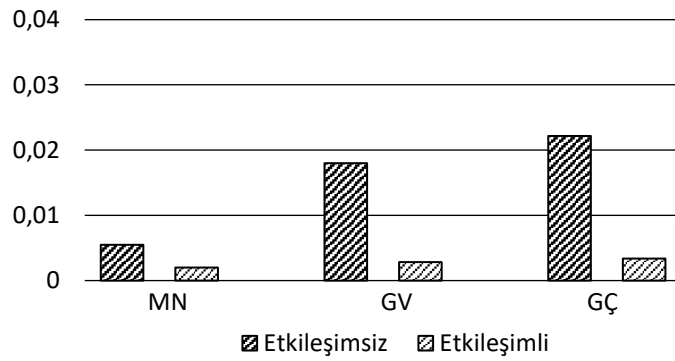
Şekil 3.28 10 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri



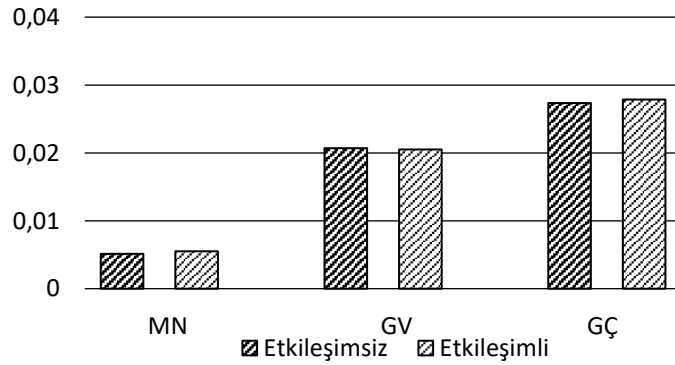
Şekil 3.29 10 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri



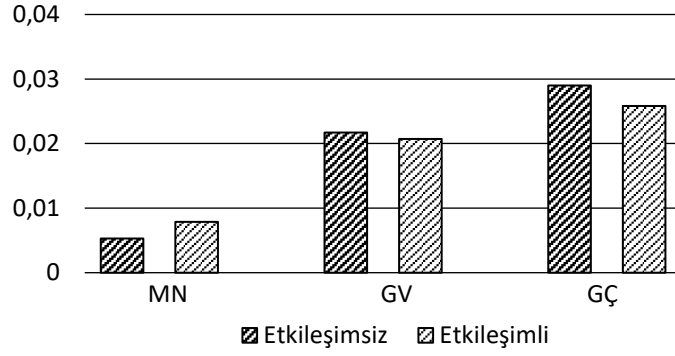
Şekil 3.30 10 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri



Şekil 3.31 15 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri



Şekil 3.32 15 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görelî Kat Ötelemeleri



Şekil 3.33 15 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin, Hasar Sınırlarının Görel Kat Ötelemeleri

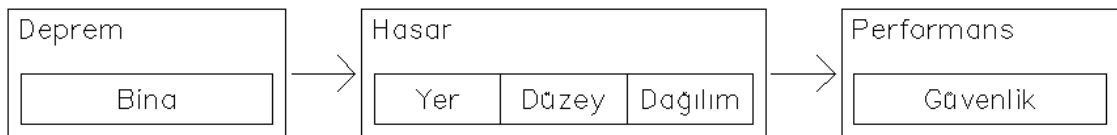
Zemin yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumlarda yönetmeliğin hasar sınırları için verdiği görel kat ötelemelerinden daha küçük görel kat ötelemeleri ile aynı hasar sınırlarına ulaşılmıştır. Bu durumun sebebi; analizlerde dikkate alınan hasar sınırının ilk olduğu andaki görel kat ötelemesinin dikkate alınması, yönetmeliğin yapıların hasar görmesine izin vermesi veya yönetmeliğin yapının deprem anında hasar görmüş ileri bir evresini dikkate alması ve dolaylı olarak da yönetmeliğin ekonomik tasarımı öngörmesidir. Yönetmeliğin vermiş olduğu kat ötelemeleri ile analizler sonucu elde edilen görel kat ötelemelerinin medyan değerleri Tablo 6.5’de verilmiştir.

Tablo 3.4 Görel Kat Ötelemelerinin Karşılaştırması

Görel Kat Ötelemesi	MN Hasar Sınırı	GV Hasar Sınırı	GÇ Hasar Sınırı
Yönetmelik	0.0100	0.0300	0.0400
Hesaplanan	0.0067	0.0207	0.0257

4.1 Deprem Yönetmelikleri ve Performans Kavramı

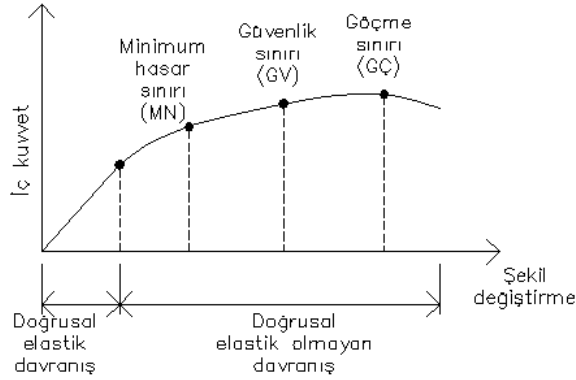
Güncel deprem yönetmelikleri temel olarak deprem dayanıklı yapı tasarımında aynı yaklaşımı öngörmüşlerdir. Bu yaklaşımda “hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı hasar oluşumunun sınırlandırılması” benimsenmiştir. Yapıların deprem yükleri altında öncelikle doğrusal sonrasında ise doğrusal olmayan davranış evlerinin bütünü yapının performansı olarak adlandırılmış olup bu davranış evrelere ayrılarak yapının maruz kalacağı hasarlar tanımlanmıştır. Herhangi bir yapının performansının değerlendirilmesi konusunda FEMA 273, FEMA 274, ATC40 ve FEMA 356 dokümanları yayınlanmıştır [M.S.KIRÇIL]. Ülkemizde ise performans kavramı ilk olarak Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007 [39] ile gündeme gelmiştir. Bir yapının performansı öncelikle kesit hasar durumlarının elde edilmesi gereklidir. Elde edilen kesit hasar durumundan elamanın hasar durumu buradan da kat hasar durumu elde edilebilir. Elde edilen kat hasar durumlarından da yapının performans düzeyi belirlenir. Kat bazında hasar durumu değerlendirmesinin de yapının tüm katları için yapılmalıdır. Son olarak deprem etkiye yönlerine bağlı olarak da yapının performans değerlendirmesi yapılmalıdır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Yapı Performansının Belirlenmesi Süreci

4.2 Kesit Hasar Sınırları

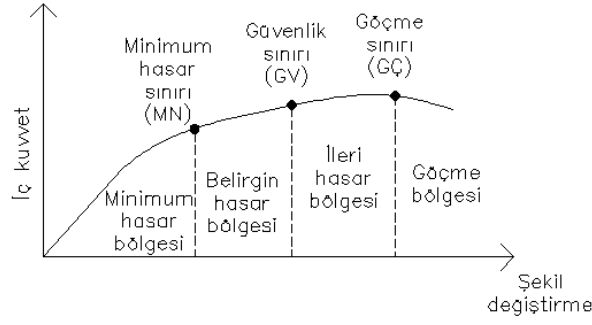
Herhangi bir betonarme kesit için şekil değiştirme ile iç kuvvet arasındaki değişim Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik 2007’de Şekil 4.2 ile gösterilmiştir. Grafikteki eğri incelendiğinde şekil değiştirmenin doğrusal elastik olan ve doğrusal elastik olmayan kısımlardan oluştuğu görülebilir. Bu eğerde doğrusal elastik olan davranışın bitip doğrusal elastik olmayan davranışın başladığı Minimum Hasar Sınırı (MN) olarak adlandırılır. İç kuvvetlerin azalmaya başladığı nokta ise Göçme Sınırı (GÇ) olarak adlandırılır. Güvenlik Hasar Sınırı (GV) bu iki nokta arasında kesitin güvenle hizmet edebileceği son noktadır. Başka bir deyişle kesitin doğrusal elastik olmayan davranış ihtiyacını güvenle sağladığı en son noktadır. Bu tanımlamaların kabullere dayandığı, bu sınırları tam olarak belirlemenin mümkün olmadığını, yönetmelikler arasında ise farklı sınırlar olabileceğini burada belirtmek gereklidir. Böyle bir değerlendirme sünek kesitler için geçerli olup gevrek kesitler için geçerli değildir.



Şekil 4.2 Kesit Hasar Sınırları

4.3 Kesit Hasar Bölgeleri

Betonarme kolon veya kirişlerin uçları deprem yükleri altında en çok zorlanan kesitleridir. Bu uçlardan hangisi daha iler hasar seviyesinde bulunuyorsa elemanın o hasar bölgesinde olduğu kabul edilir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik 2007’de betonarme bir eleman için 4 farklı hasar bölgesi tanımlanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Kesit Hasar Sınırları ve Bölgeleri

Betonarme elemanın en fazla hasar gören kesiti minimum hasar sınırından ulaşmamış ise Minimum Hasar Bölgesinde, minimum hasar sınırı ile güvenlik hasar sınırı arasında ise Belirgin Hasar bölgesinde, güvenlik sınırı ile göçme sınırı arasında ise İleri Hasar Bölgesinde, göçme sınırını aşmış ise Göçme Bölgesinde olduğu kabul edilir.

Yönetmelikte betonarme elemanların kapasiteleri ile hasar sınırları beton ve donatı çeliğinin birim şekil değiştirmeleri cinsinden verilmiştir. Analiz sürecinde elde edilen şekildeğiştirmeler aşağıda verilen birim şekildeğiştirme kapasiteleriyle karşılaştırılarak kesit düzeyinde hasar sınırı, sonrasında hasar bölgesi ve en sonundaysa taşıyıcı sistemin performans düzeyi belirlenmiştir.

Kesit Minimum Hasar Sınırı (MN) için kesitin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi üst sınırları Denklem 4.1’de verilmiştir.

$$(\varepsilon_{cu})_{MN} = 0.0035 ; (\varepsilon_s)_{MN} = 0.01 \quad (4.1)$$

Kesit Güvenlik Sınırı (GV) için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları ise Denklem 4.2’de verilmiştir.

$$(\varepsilon_{cg})_{GV} = 0.0035 + 0.01\left(\frac{\rho_s}{\rho_{sm}}\right) \leq 0.0135 ; (\varepsilon_s)_{GV} = 0.04 \quad (4.2)$$

Kesit Göçme Sınırı (GÇ) için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi üst sınırları ise Denklem 4.3’de verilmiştir.

$$(\epsilon_{cg})_{GC} = 0.004 + 0.014\left(\frac{\rho_s}{\rho_{sm}}\right) \leq 0.018 ; (\epsilon_s)_{GC} = 0.06 \quad (4.3)$$

Burada ϵ_{cu} kesitin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesi, ϵ_s donatı çeliği birim şekil değiştirmesi, ϵ_{cg} etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirmesidir.

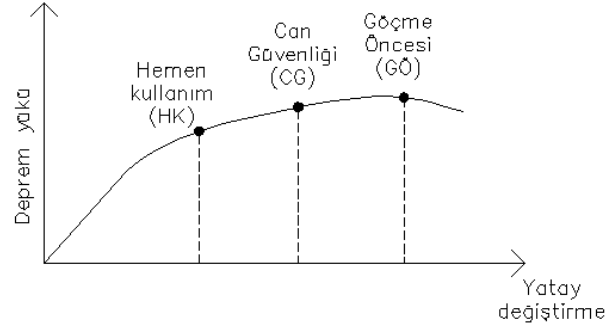
4.4 Yapı Performans Düzeyleri

Kesit hasar sınırı, eleman hasar sınırı ve kat bazında hasar durumu belli olduktan sonra yapının performansının belirlenmesi aşamasına geçilebilir. Yapının performans seviyeleri için deprem yönetmeliğinde 3 farklı tanımlama yapılmıştır.

Hemen Kullanım Performans Düzeyi (HK): Betonarme yapısal elemanlarda hasar görölmez. Hasar görölse bile bu hasarlar çok sınırlıdır. Oluşan bu hasarlar da hemen onarılabilir. Bu durum yapı için doğrusal elastik olmayan davranışın başlangıcı olarak kabul edilebilir. Hemen kullanım performans düzeyi için yapıda çok sınırlı bir doğrusal elastik olmayan davranışa izin verilebilir.

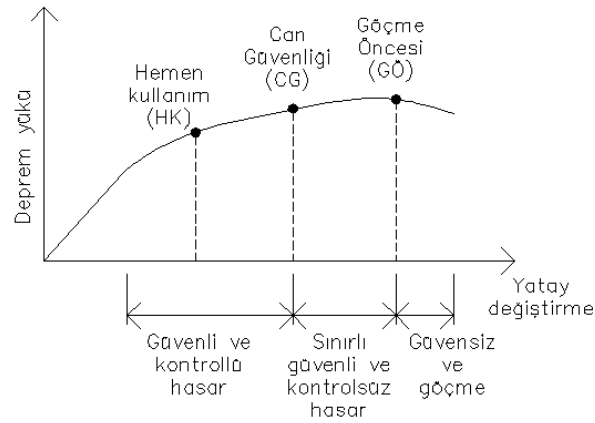
Can Güvenliği Performans Düzeyi (CG): Betonarme yapısal elemanlarda oluşabilecek hasar can güvenliğini tehlikeye atmayacak ölçüttedir. Oluşan bu hasarlar onarılabilir düzeydedir. Yapının davranışı doğrusal olmayan elastik bölgededir. Ancak yapı göçme bölgesinden de yeterince uzaktadır. Bu performans düzeyi taşıyıcı sistemin sınırlı doğrusal elastik olmayan şekil değiştirmelerle yatay yük taşıma kapasitesinin güvenli olarak karşılayabileceği sınırdır.

Göçme Öncesi Performans Düzeyinde (GÖ): Betonarme elemanlarda oluşan hasarlar ileri derecededir. Oluşan bu hasarlar onarılabilir düzeyde değildir. Ancak yapı çökmemiştir. Can güvenliği açısından ise sakıncalıdır. Yapının büyük bir olasılıkla yıkılması gerekecektir. Bu performans düzeyi taşıyıcı sistemin güç tükenmesine karşı gelmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Yapı Performans Düzeyleri

Taşıyıcı sistemin yukarıda verilen performans düzeylerinin sınırlarının kesit hasar sınırlarında olduğu gibi net olarak tanımlanması kolay değildir. Çünkü yapıların tasarımda veya performans değerlendirmesinde kullanılan değişkenlerin ve kullanılan hesap yönteminde belirsizlikler bulunmaktadır. Yönetmeliklerde bu performans seviyeleri için hasar gören elemanların türleri ve bulundukları hasar bölgelerine göre sınır tanımlamalar yapılarak performans değerlendirmesi yapılan yapının hangi performans düzeyini sağladığı tespit edilebilmektedir (Şekil 4.5). Ayrıca göreceli kat ötelemeleri için izin verilen maksimum değerler her performans düzeyi için yönetmelikte tanımlanmıştır.

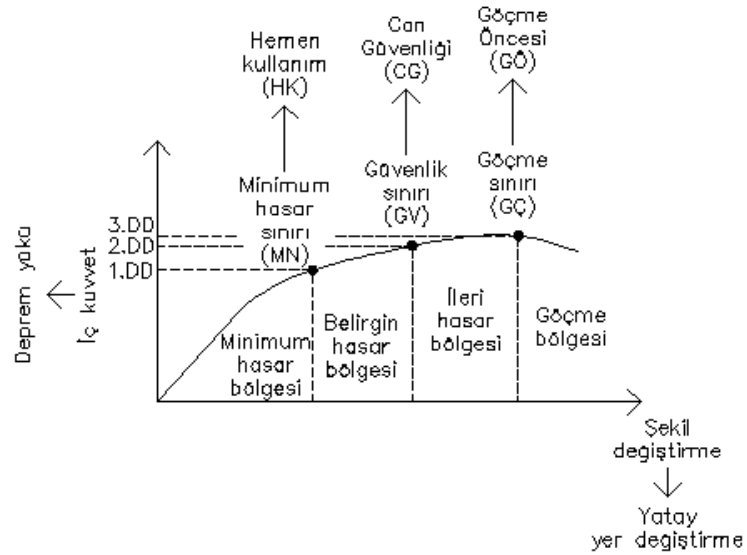


Şekil 4.5 Performans Düzeyleri ve Hasar Tanımlamaları

4.5 Analizlerdeki Performans Düzeyi Kabulleri

Bu çalışma kapsamında ise analiz sürecinde herhangi bir eleman minimum hasar sınırına (MN) ulaştığında elemanın minimum hasar bölgesinde olduğu ve binanın hemen kullanım performans düzeyine (HK) ulaştığı kabul edilmiştir. Analizin

devam eden sürecinde herhangi bir eleman güvenlik sınırına (GV) ulaştığında ise elemanın belirgin hasar bölgesinde olduğu ve binanın can güvenliği performans düzeyine (CG) ulaştığı kabul edilmiştir. Yine aynı analiz sürecinde herhangi bir betonarme elemanın göçme sınırına (GÇ) ulaşması durumunda ise elemanın ileri hasar bölgesinde olduğu ve binanın göçme öncesi performans düzeyine (GÖ) ulaştığı kabul edilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Analiz Süreçleri

5.1 Olasılık Kavramı

Bir olayın olacağı veya olmayacağı önceden bilinebilir. Matematiksel olarak ise olayın olacağı $p=1$ ve olmayacağı $p=0$ olarak ifade edilir. Ancak olayın olacağı veya olmayacağı konusunda net bir görüş yok ise belirsiz olay olarak ifade edilir. Olasılık ise bu belirsizliğin matematiksel ifadesi veya belirsizliği tahmin etme çabasıdır. Bu durumda olasılık 0 ile 1 arasında bir değer alır. Örneğin yapılar servis ömürleri süresinde hangi büyüklükte bir depreme maruz kalacakları da bir belirsizlik konusudur. Bu sebeple yönetmeliklerde tasarım depreminin olma olasılığı verilmiştir. Yapının bu depreme de maruz kalacağı kesin olmadığından yine olma olasılıkları verilmiş tasarım depreminden daha küçük veya daha büyük bir depreme yapı maruz kalabilir. Bu sebeple yapının hasar görme olasılığı 0'dan büyük ve göçme olasılığı veya riski 1'den küçüktür.

Bir olayın gerçekleşmesi sürecinde elde edilen sonuçlar sayısı birden çok olduğu zaman belirsizliklerin ortadan kaldırılması için istatistik biliminden yararlanılır. Yani olayın bütünü için bir yargıda bulunmak ve olaydan farklı çıkarımlar yapabilmek için elde edilen sonuçların yani rasgele değişkenin yorumlanması ve değerlendirilmesi gereklidir. Bu durumda bu çalışma kapsamında öne çıkan değerlendirme kriterleri ortalama değer, medyan ve eğilimsiz standart sapmadır. Ortalama değer sonuçların merkezindeki değer (Denklem 5.1), medyan orta değer ve standart sapma sonuçların ortalama değer çevresinde nasıl dağıldığının göstergesidir (Denklem 5.2). Burada eğilimsiz standart sapma $(n-1)$ kullanılmasının sebebi ise standart sapmadaki hataların ortadan kaldırılmasıdır.

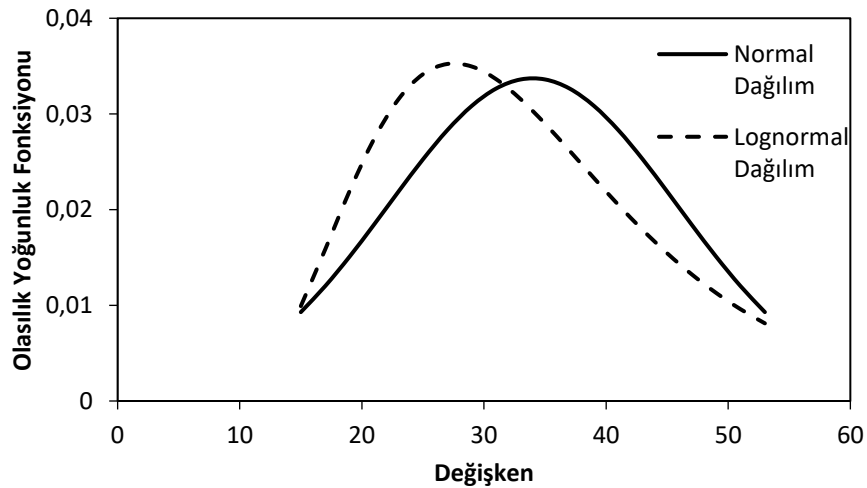
$$\bar{x} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

$$s_x = \left[\left(\frac{1}{n-1} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

Burada n değişken sayısı, x_i i numaralı değişken, n değişken sayısı, $\bar{x}$ değişkenlerin ortalaması ve s_x standart sapmadır.

5.2 Olasılık Modelleri

Yapılan bir araştırma sonucunda elde edilen rasgele değişkenin dağılımı ile olasılık dağılımını tanımlayan fonksiyon arasında yapısal uygunluk olmalıdır. Yani seçilen fonksiyonun teorik dağılımı ile rasgele değişkene ilişkin deneysel dağılım olabildiğince benzeşmeli veya örtüşmelidir. Olasılık problemlerinin çözümünde değişkenin dağılım türü dolayısı ile yoğunluk fonksiyonu belirlendikten sonra o değişkene ait farklı bilinmeyenlerin olasılıkları hesaplanabilmektedir. Mühendislik çalışmalarında rasgele değişkenlerin genellikle lognormal dağıldığı kabul edilir ve bu dağılım modeli kullanılır. Normal dağılım ile lognormal dağılım arasındaki temel fark lognormal dağılımdaki değerlerin tümüyle pozitif olmasıdır. Ama normal dağılımdaki değerler arasında negatif değerler de olabilir. Normal dağılım grafiği simetrikken lognormal grafiği ise sağa yatıktır. Örnek olarak Şekil 5.1’de herhangi bir x değişkeni için normal ve lognormal olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri karşılaştırma yapılabilmesi için verilmiştir.



Şekil 5.1 Norma ve Lognormal Dağılım Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları

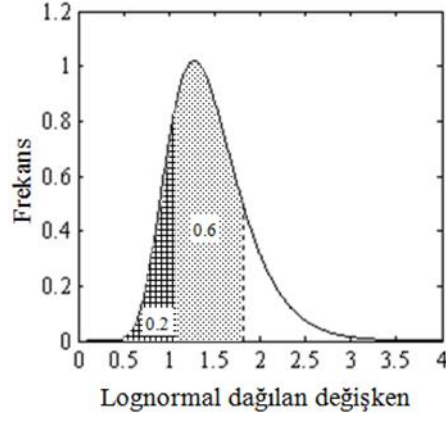
Lognormal dağılımda olasılık yoğunluk fonksiyonu Denklem 5.3'de verilmiştir. Burada λ $\ln x$ 'in ortalama değeri ve ζ $\ln x$ 'in standart sapmasıdır.

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\zeta_x}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2 \right] \quad (5.3)$$

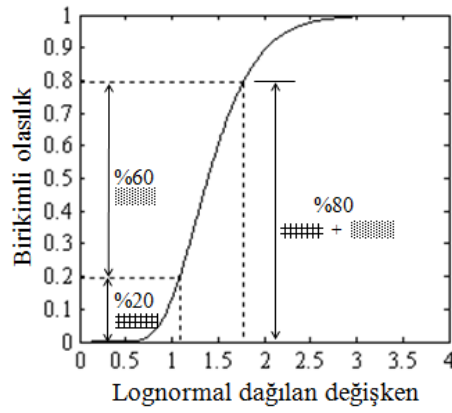
5.3 Hasar Olasılık Eğrileri

Kırılma eğrileri olarak da bilinen olasılık eğrileri önceden belirlenen bir sınır duruma ulaşma veya aşma olasılığını verir. Başka bir deyişle sınır durumun birikimli olasılığını verir. Olasılık eğrileri riskin meydana gelmesinden önce hazırlanabilirler. Dolayısıyla olasılık eğrileri gelecekte karşı karşıya kalınacak riskin tahmin edilmesinin en hızlı yollarından biridir. Riskin boyutları da belirlendikten sonra koruyucu önlemler gerçeğe en yakın olarak alınabilmektedir. Aslında hasar olasılık eğrileri risk yönetiminin de gerekliliğidir. Deprem hasarlarının tahmini de deprem öncesinde hazırlanan hasar olasılık eğrileri ile yapılabilmektedir.

Olasılık eğrileri 4 farklı biçimde elde edilebilir. Bunlar: Gözleme dayalı olasılık eğrileri, Yargıya dayalı olasılık eğrileri, Analitik olasılık eğrileri ve Birleştirilmiş olasılık eğrileridir. Gözleme dayalı olasılık eğrileri geçmiş olayların gözlemlerine dayanır. Fakat gözlemler belli bir olay veya olaylara dayandığından tam bir genelleme içermez. Kullanımı gözlemlerin çerçevesi ile sınırlıdır. Yargıya dayalı olasılık eğrileri uzmanların tecrübeleri ile elde edilir. Bu olasılık eğrileri de olayın içeriğine ve uzmanın tecrübesine bağlıdır. Analitik olasılık eğrileri modellerin analizlerinden elde edilen rasgele değişkenlerin istatistik bilimine göre değerlendirilmesinden elde edilir. Modelde ve analizlerde yapılan kabuller bu olasılık eğrilerinin zayıf yönünü oluşturur. Birleştirilmiş olasılık eğrileri gözleme ve yargıya dayalı öznel olasılık eğrilerinin analitik olasılık eğrilerindeki zayıf yönlerinin giderilmesine dayanmaktadır.



Şekil 5.2 Lognormal Dağılımın Frekans Eğrisi (M. S. KIRÇIL)

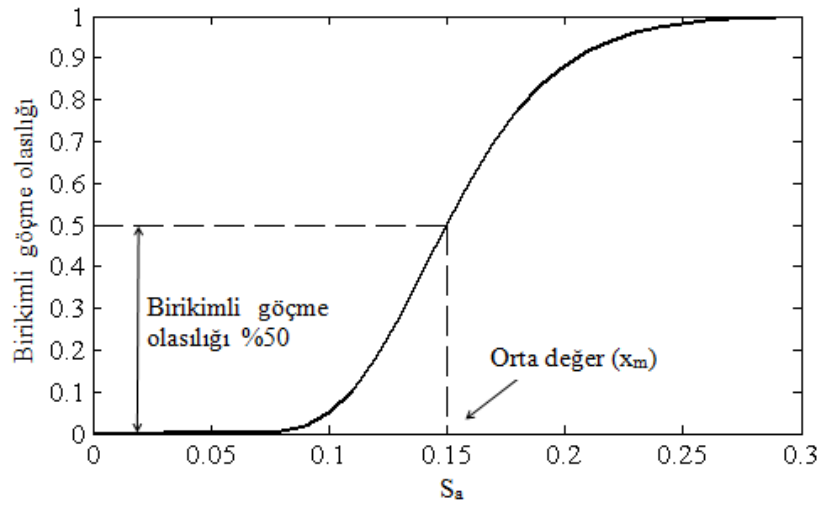


Şekil 5.3 Lognormal Dağılımın Olasılık Eğrisi (M. S. KIRÇIL)

Şekil 5.2'de lognormal dağılan bir rasgele değişkene ait frekans dağılımı ve Şekil 5.3'de ise aynı değişkenin birikimli olasılık eğrisi gösterilmiştir. Bu grafiklere göre rasgele değişkenin 1.09 değeri için birikimli olasılığın %20 olduğu görülebilir. Bu durumda, başlangıçtan 1.09'a kadar frekans eğrisinin altında kalan alan 0.20 değerini almaktadır. Rasgele değişkenin 1.78 değeri için ise birikimli olasılığın %80 olduğu görülebilir. Frekans eğrisinin altında kalan alan ise, bu kez, başlangıçtan rasgele değişkenin 1.78 değerine kadar 0.8'dir. Görüldüğü gibi bir birikimli olasılık eğrisi, esasen, rasgele değişkenin ilgili değeri için, değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu altında kalan alanı göstermektedir. Bir başka deyişle, olasılık eğrisi ile birikimli frekans eğrisi özdeştir.

5.4 Analitik Yöntem Kullanılarak Hasar Olasılık Eğrilerinin Oluşturulması

Hasar olasılık eğrileri yapısal hasar ile depremin yapılar üzerindeki etkisini ifade eden büyüklük arasındaki ilişkiyi gösterirler. Bir başka deyişle deprem etkisini ifade eden büyüklüğün belirli bir değeri için hasarın birikimli olasılığını verirler. Bu büyüklük - lognormal dağılan değişken - maksimum yer ivmesi (PGA), maksimum yer hızı (PGV), maksimum yer değiştirmesi (PGD), spektral ivme (S_a), spektral hız (S_v) veya spektral yer değiştirme (S_d) olabilir. Yapının kütesinin ilk modda toplandığı (≥ 90) sıradan yapılarda S_a ve S_d büyüklükleri seçilebilir. Bu çalışmada büyüklük olarak spektral ivme S_a kullanılmıştır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Tipik Lognormal Değişkenin Hasar Olasılık Eğrisi (M. S. KIRÇIL)

Şekil 5.4'de görüleceği gibi, eğri spektral ivmenin (lognormal değişken - rasgele değişken) herhangi bir değerine karşı gelen birikimli göçme olasılığını göstermektedir. Olasılığın %50 değerine karşılık gelen spektral ivme orta değer (medyan) olarak adlandırılır. Ayrıca eğriyi karakterize eden diğer parametre de standart sapmadır. Lognormal dağılan bir değişken için birikimli standart normal olasılık Denklem 5.4 ile bulunur.

$$P = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{x_m} \right)}{\zeta} \right) \quad (5.4)$$

Bu bağıntıda P birikimli standart normal olasılığı, x lognormal dağılan değişkeni, x_m lognormal dağılan değişkenin orta değerini, ζ standart sapmayı, Φ ise standart normal olasılığı ifade eder. Denklem 5.5'deki dönüşümü kullanılarak Denklem 5.4, Denklem 5.6'daki şekliyle ifade edilebilir.

$$\lambda = \ln x_m \quad (5.5)$$

$$P = \Phi \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right) \quad (5.6)$$

Denklem 5.6'daki ζ 'nin açılımı Denklem 5.7'de verilmiştir.

$$\zeta = \sqrt{\zeta_{SD}^2 + \zeta_D^2} \quad (5.7)$$

Burada; ζ_{SD} sınır durumun standart sapması ve ζ_D analizlerdeki belirsizliklerden kaynaklanan standart sapmadır. ζ_{SD} 'nin açılımı Denklem 5.8'de verilmiştir.

$$\zeta_D = \sqrt{\ln \left(1 + \left(\frac{\sigma_r}{\bar{d}_{max}} \right)^2 \right) + \ln \left(1 + \left(\frac{\sigma_c}{\bar{d}_{max}} \right)^2 \right) + \dots} \quad (5.8)$$

$$\sqrt{\dots + \ln \left(1 + \left(\frac{\sigma_m}{\bar{d}_{max}} \right)^2 \right) + \ln \left(1 + \left(\frac{\sigma_D}{\bar{d}_{max}} \right)^2 \right)}$$

Burada σ_r deprem kayıtlarındaki rastgelelik ile ilgili standart sapma, σ_c malzeme dayanımındaki belirsizlik ile ilgili standart sapma, σ_m yapı modelinde yapılan basitleştirmeden ileri gelen standart sapma, σ_D analizlerden elde edilen her bir performans seviyesine ait göreceli kat ötelemelerinin standart sapmasıdır. σ_r her zemin sınıfı 7 adet deprem kaydı ve her deprem kaydının yataydaki iki bileşeni kullanıldığından dikkate alınmamıştır. σ_c malzeme dayanımlarında bir belirsizlik olmadığından veya direk malzeme dayanımları ile çalışıldığından dikkate alınmamıştır. σ_m çok serbestlik dereceli sistem yani 3 boyutlu yapı modeli ile çalışıldığından dikkate alınmamıştır. σ_D analizlerden elde edilen sonuçlar yardımı ile hesaplanacaktır.

Bu çalışma kapsamında lognormal dağıldığı kabul edilen değişken spektral ivmedir. Hasar olasılık eğrisinin çizimi, esasen, bu eğriyi karakterize eden λ ve ζ 'nin belirlenmesinden ibarettir. λ ve ζ , her bir hasar olasılık eğrisi için, o eğriye esas alınan lognormal rasgele değişkenin (spektral ivme) ilgili hasar seviyesi için artımsal dinamik analiz sonuçlarından elde edilen değerlerin yardımı ile belirlenir. λ ve ζ istatistiklerinin belirlenmesi için bu çalışmada lognormal olasılık kağıdı kullanılmıştır. Literatürde olasılık kağıdının tanımı; verilerin ve bu veriler karşılığı birikimli frekansların ya da birikimli olasılıkların işlendiği grafik kağıtları olarak verilmiştir. Lognormal olasılık kağıdının düşey eksenine, lognormal dağılan değişkenin doğal logaritmaları, yatay eksenine ise bu değerlerin karşılığı olan standart normal s değişkeni yazılır. s değişkeni veri takımının ilgili değişkeninin birikimli olasılığından elde edilir. Her bir verinin birikimli olasılığı birikimli frekansı ile orantılıdır. N sayıda veri olması durumunda i birikimli olasılığı hesaplanacak verinin numarası olmak üzere $\frac{i}{N+1}$ 'in birikimli olasılığının tahmincisidir. N yerine N+1 kullanılmasının sebebi ise birikimli olasılıkta oluşacak hatayı ortadan kaldırmak içindir (eğilimsiz tahminci). Lognormal değişkenler olasılık kağıdına aktarıldığında ise bu verileri temsil edecek bir doğru elde edilebilir. Değişkenlerin logaritmalarının lognormal olasılık kağıdında bir doğru oluşturması değişkenlerin lognormal ve logaritmalarının ise normal dağıldığı anlamına gelir. Bu doğrunun denklemi ise Denklem 5.6'dan hareketle Denklem 5.11'de verilmiştir.

$$s = \frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \quad (5.9)$$

$$P = \Phi(s) \quad (5.10)$$

$$\ln x = \zeta s + \lambda \quad (5.11)$$

Belirli bir deprem için elde edilen yapı tepkisinin belli bir sınır durum değerini aşma olasılığı ise Denklem 5.12'de verilmiştir.

$$P(SD) = P[(d_{SD} \leq d_{maks})] = 1 - \Phi(s) \quad (5.12)$$

Burada SD sınır durum, d_{SD} yapı tepkisinin sınır durum değeri, d_{maks} belirli bir deprem için elde edilen yapı tepkisinin en büyük değeri ve s standart normal değişkendir.

5.5 Örnek Hasar Olasılık Eğrisinin Çizilmesi

Örnek olarak 5 katlı örnek binanın, B sınıfı zeminde, zemine ankastre mesnetlenme durumu ve minimum hasar sınırına ait spektral ivme sonuçlarının olasılık kâğıdının hazırlanması adımları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.1 Lognormal Olasılık Kağıdı için İşlenen Veriler - 1

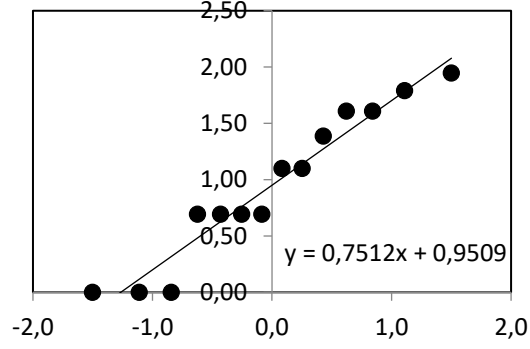
Zemin Sınıfı	Deprem No	Deprem Bileşeni	Çözüm No	S_{ae}	Sıralı Sa
B	1	1	1	2.00	1.00
		2	2	1.00	1.00
B	2	1	3	2.00	1.00
		2	4	7.00	2.00
B	3	1	5	1.00	2.00
		2	6	3.00	2.00
B	4	1	7	2.00	2.00
		2	8	4.00	3.00
B	5	1	9	3.00	3.00
		2	10	1.00	4.00
B	6	1	11	5.00	5.00
		2	12	5.00	5.00
B	7	1	13	2.00	6.00
		2	14	6.00	7.00

Tablo 5.1’de B sınıfı zeminde 7 adet deprem kaydı kullanılarak toplam 14 adet analiz yapıldığı, minimum hasar sınırı için elde edilen spektral ivmeler ve bunların küçükten büyüğe sıralanması görülebilir.

Tablo 5.2 Lognormal Olasılık Kağıdı için İşlenen Veriler - 2

ln(Sa)	i/(N+1)	s	Yeni S_{ae}	Olasılık
0.00	0.0667	-1.5011	0.001	0.0000
0.00	0.1333	-1.1108	0.5	0.0251
0.00	0.2000	-0.8416	1	0.1286
0.69	0.2667	-0.6229	1.5	0.2579
0.69	0.3333	-0.4307	2	0.3794
0.69	0.4000	-0.2533	3	0.5699
0.69	0.4667	-0.0837	4	0.6981
1.10	0.5333	0.0837	4.848	0.7728
1.10	0.6000	0.2533	6.47	0.8626
1.39	0.6667	0.4307	8	0.9107
1.61	0.7333	0.6229	10	0.9464
1.61	0.8000	0.8416	15	0.9819
1.79	0.8667	1.1108	20	0.9926
1.95	0.9333	1.5011	23.7	0.9958

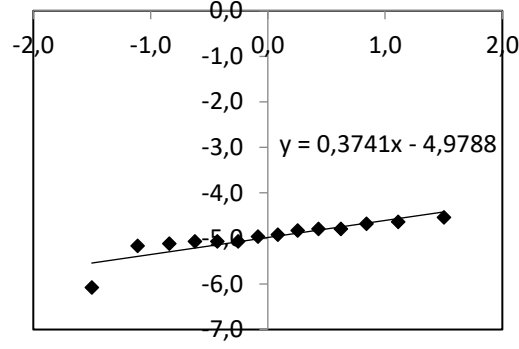
Tablo 5.2’de spektral ivmelerin doğal logaritmalarının alındığı, eğilimsiz tahmin için değişken sayısının bir fazlasıyla çalışıldığı ve birikimli olasılıktan standart normal değişken geçilerek yapıldığı görülebilir. Lognormal olasılık kâğıdı ise Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.5 Spektral İvmelerin Lognormal Olasılık Kağıdı

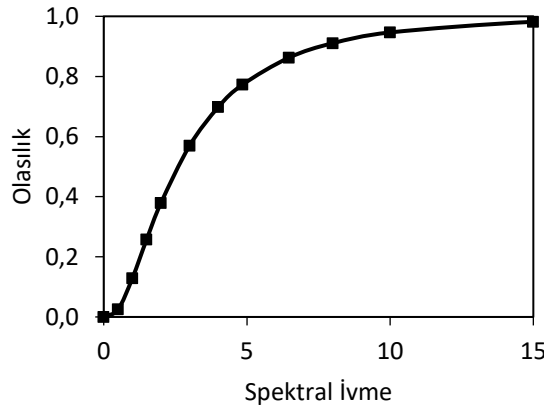
Yukarıdaki analiz sonuçları için ortalama değer $\lambda=0.950$ ve standart sapma $\zeta=0.667$ 'dir. Ancak değişkenlerin lognormal olasılık kağıdına işlenmesi ve bu değişkenleri temsil eden doğrunun denkleminde yararlanılarak elde edilen ortalama değerin $\lambda=0.951$ ve standart sapmanın $\zeta=0.751$ olduğu görülebilir.

ζ_D belirlenmesi için analiz sonucu elde edilen görel kat ötelemelerinden yararlanılacaktır. Yukarıdaki yöntem izlenerek, 5 katlı örnek binanın, B sınıfı zeminde, zemine ankastre mesnetlenme durumu ve minimum hasar sınırına ait görel kat ötelemesi olasılık kâğıdı Şekil 5.6' da verilmiştir. Görel kat ötelemelerini temsil eden doğrunun denkleminde ortalama değerin $\lambda=-4.979$ ve standart sapmanın $\zeta=0.374$ olduğu doğrunun denkleminde görülebilir. Hasar olasılık eğrisinin çiziminde kullanılacak standart sapma, spektral ivme ve görel kat ötelemesi olasılık kağıtlarından bulunan standart sapmalarının karelerinin kare kökü alınarak, ortalaması ise spektral ivme olasılık kağıdından alınarak kullanılacaktır.



Şekil 5.6 Göreli Kat Ötelemelerinin Olasılık Kağıdı

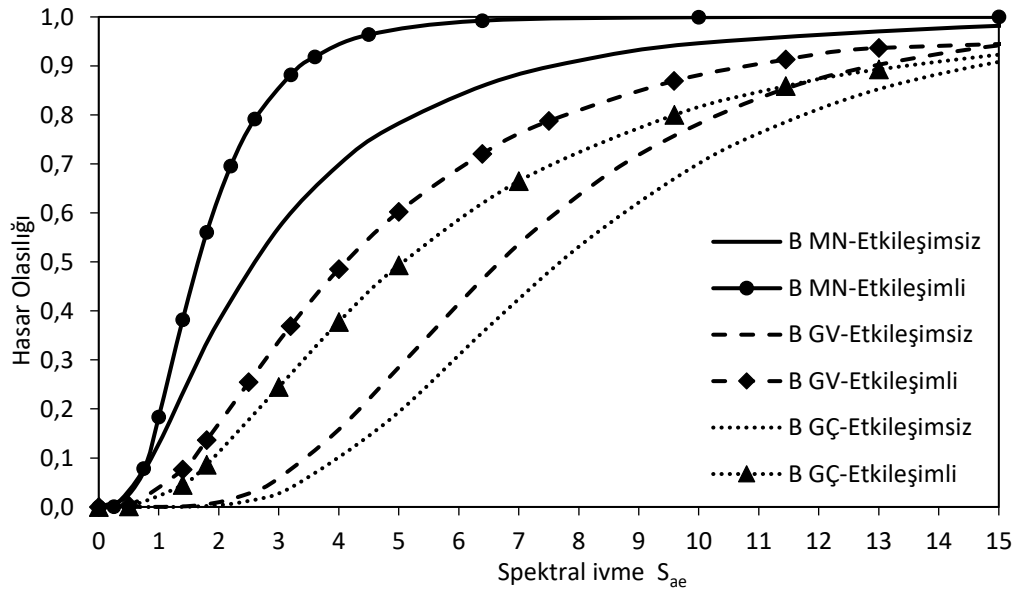
Hasar olasılık eğrisinin çizimi için Tablo 5.2’de eğriyi temsil edecek olan spektral ivmelerin tanımlandığı ve bu spektral ivmelerin olasılıklarının hesaplandığı görülebilir. Sonuç olarak Şekil 5.7’de 5 katlı örnek binanın, B sınıfı zeminde, zemine ankastre bağlı durumda minimum hasar sınırı için hasar olasılık eğrisi verilmiştir.



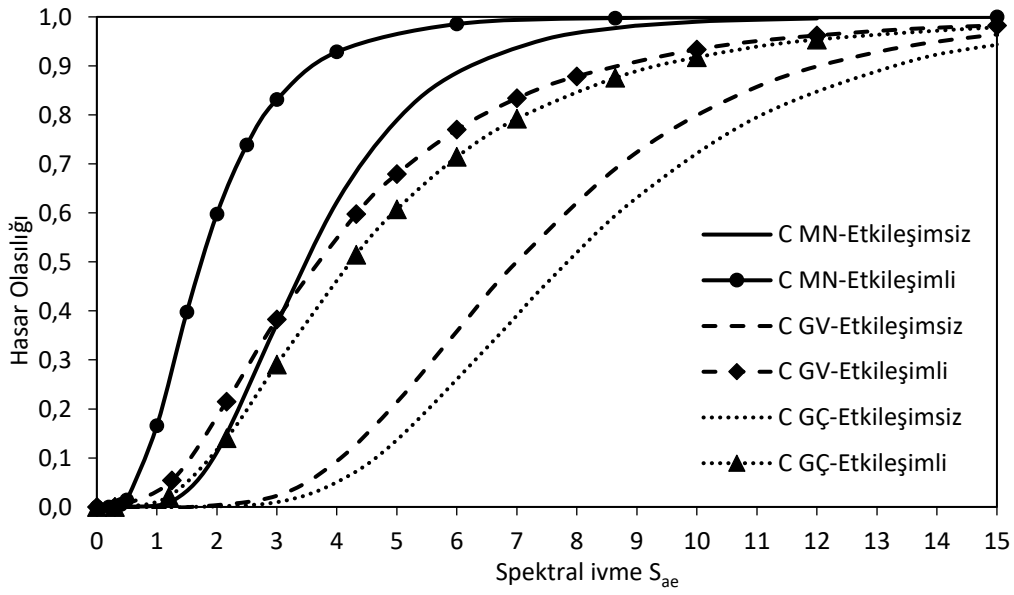
Şekil 5.7 Hasar Olasılık Eğrisi

5.6 Örnek Binaların Hasar Olasılık Eğrileri

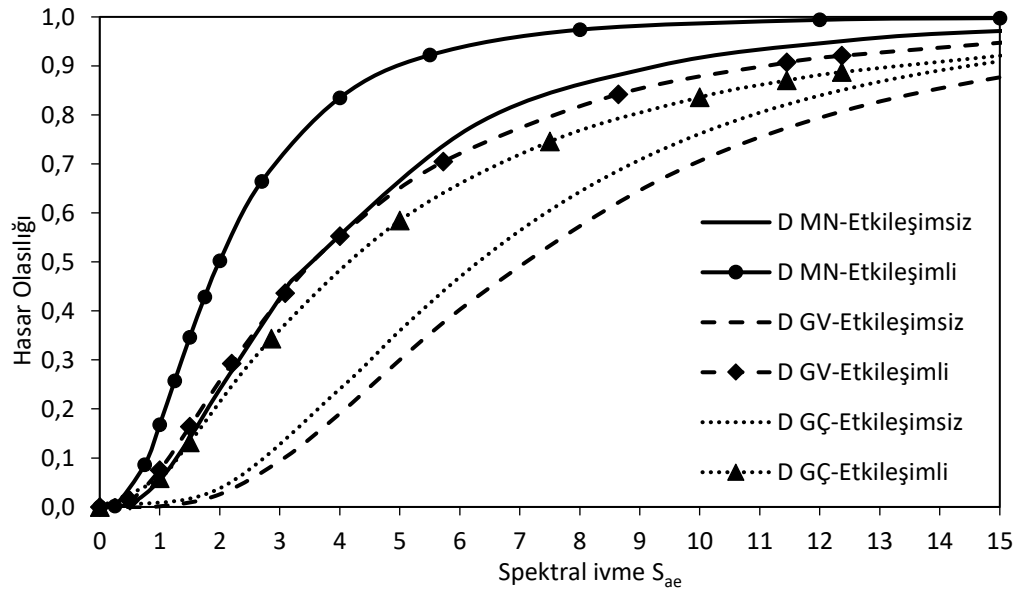
Örnek binaların zemin sınıflarına göre zemin yapı etkileşimsiz ve etkileşimli hasar olasılık eğrileri Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilmiştir.



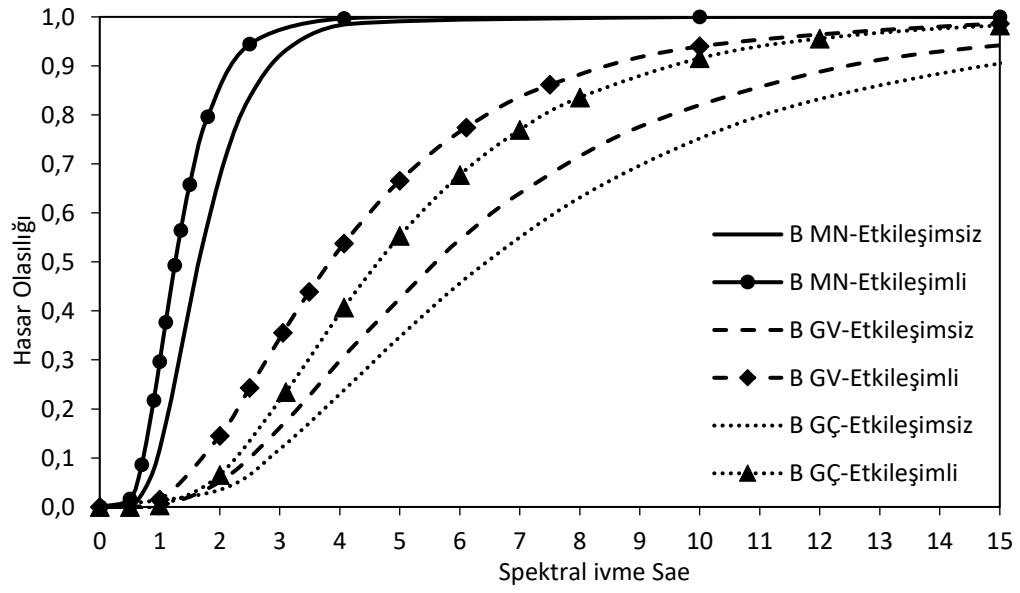
Şekil 5.8 5 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri



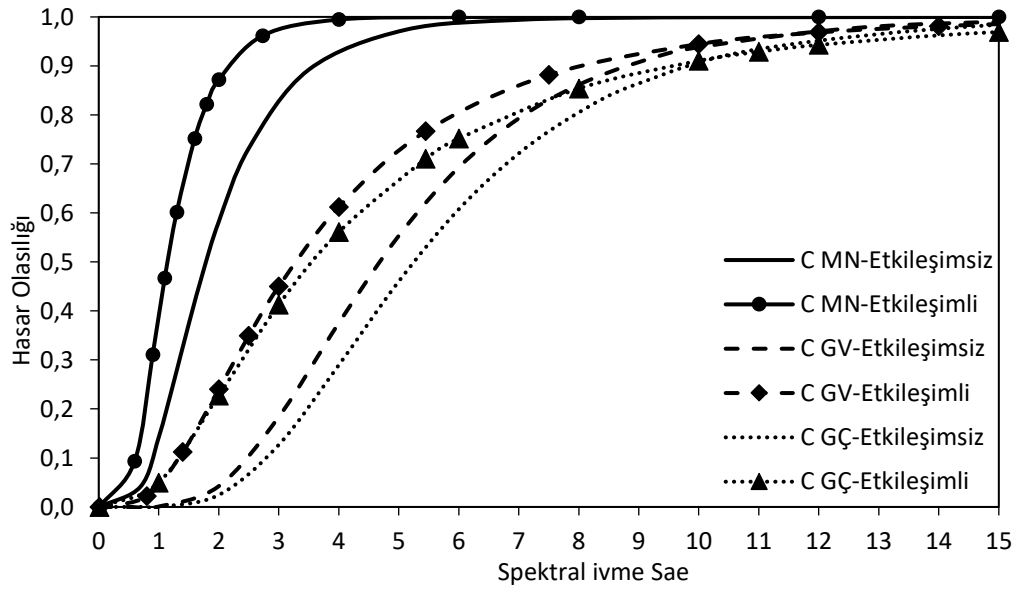
Şekil 5.9 5 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri



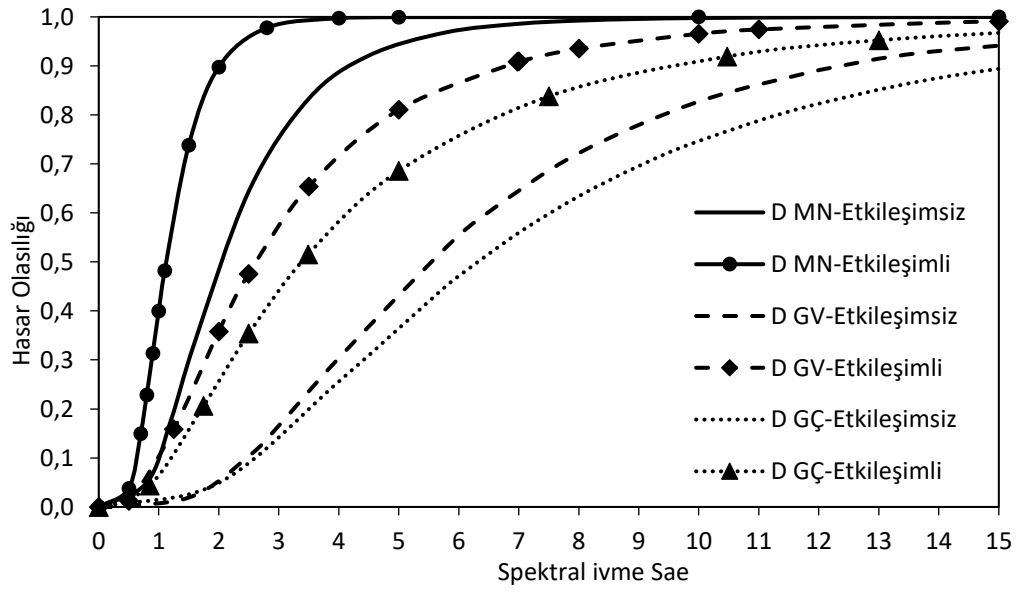
Şekil 5.10 5 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri



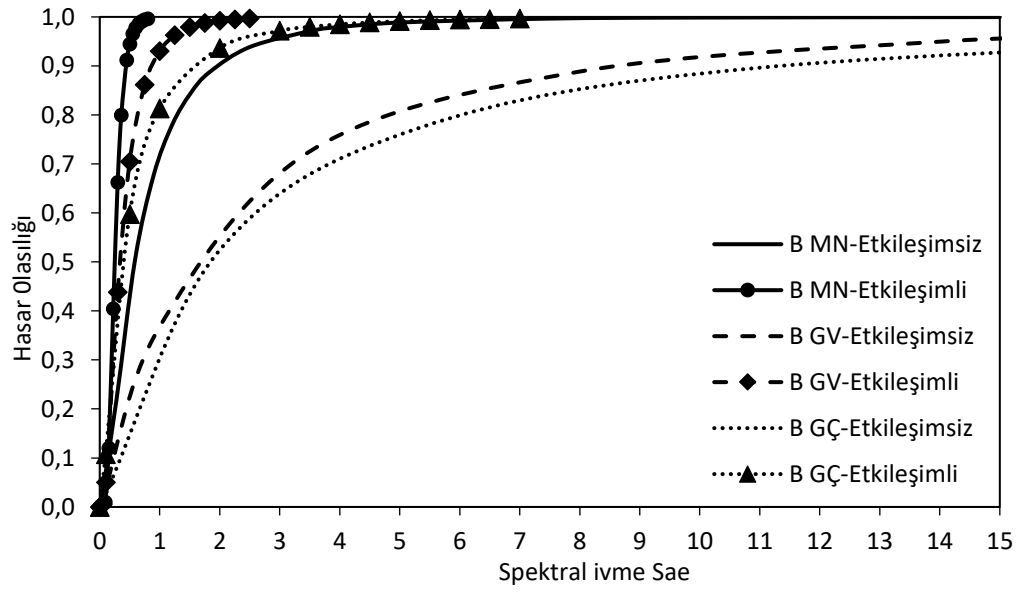
Şekil 5.11 10 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri



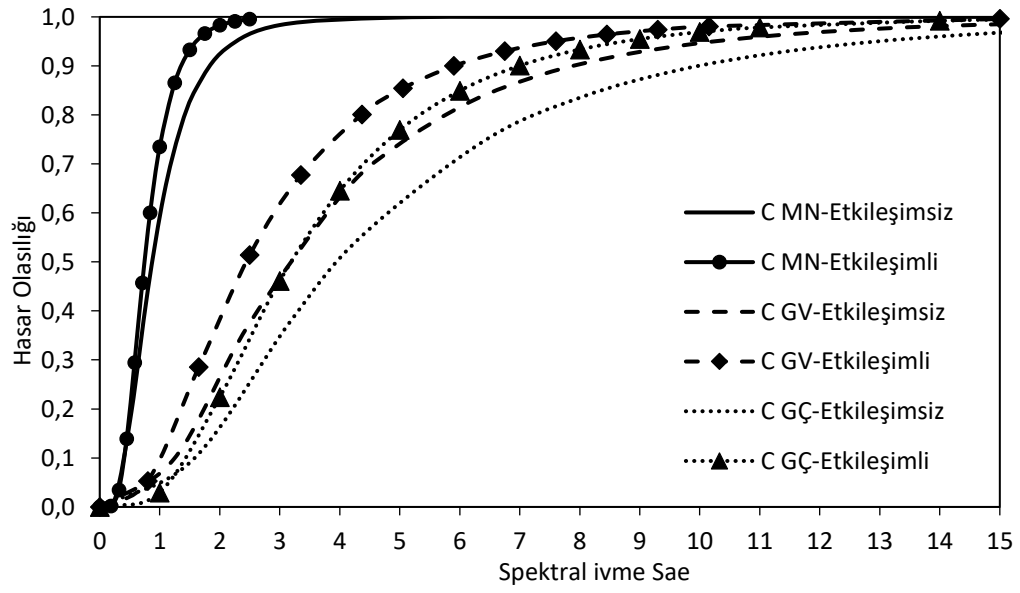
Şekil 5.12 10 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri



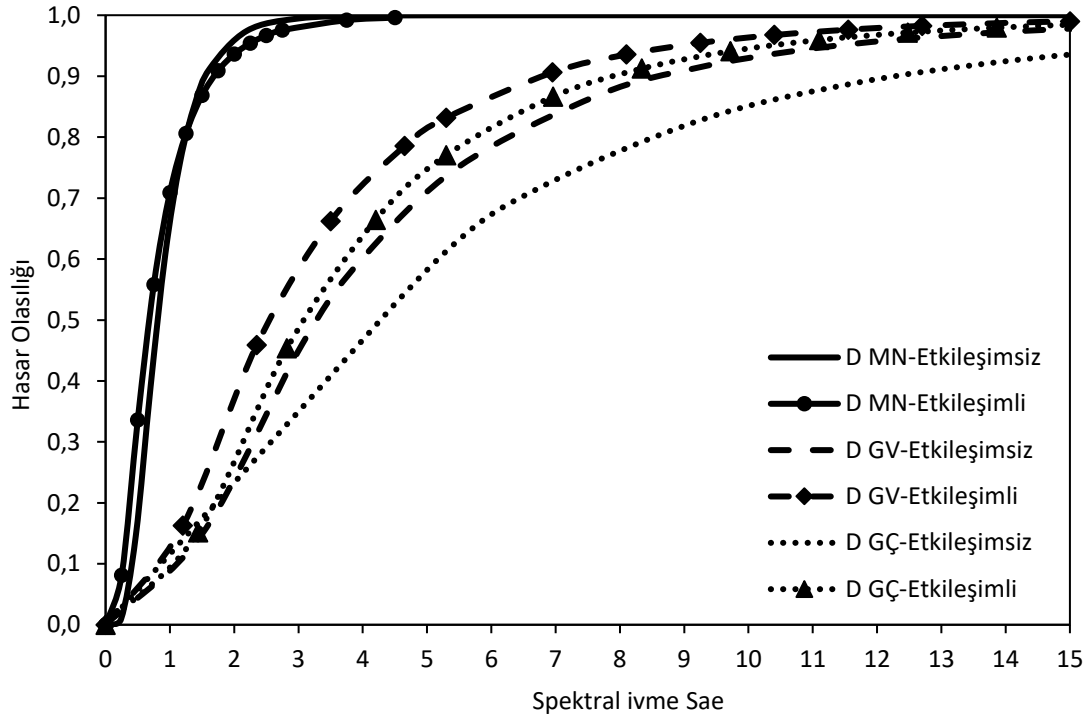
Şekil 5.13 10 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri



Şekil 5.14 15 Katlı Örnek Bina, B Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri



Şekil 5.15 15 Katlı Örnek Bina, C Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri



Şekil 5.16 15 Katlı Örnek Bina, D Sınıfı Zemin Hasar Olasılık Eğrileri

5.7 Örnek Binaların Hasar Olasılıkları

Aşağıdaki tablolarda örnek binaların hasar olasılıkları hasar sınırları için zemin yapı etkileşimsiz ve etkileşimli durumlar Tablo 5.3, Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.3 5 Katlı Örnek Bina Hasar Olasılıkları

Zemin Yapı Etkileşimsiz Durum				Zemin Yapı Etkileşimli Durum			
Hasar	Zemin Sınıfı			Hasar			
Sınırı	B	C	D	Sınırı	B	C	D
MN	%86	%98	%95	MN	%99	%100	%99
GV	%47	%72	%81	GV	%72	%90	%91
GÇ	%36	%63	%72	GÇ	%62	%88	%87

Tablo 5.4 10 Katlı Örnek Bina Hasar Olasılıkları

Zemin Yapı Etkileşimsiz Durum				Zemin Yapı Etkileşimli Durum			
Hasar Sınırı	Zemin Sınıfı			Hasar Sınırı	Zemin Sınıfı		
	B	C	D		B	C	D
MN	%99	%98	%99	MN	%100	%100	%100
GV	%32	%67	%72	GV	%54	%77	%91
GÇ	%25	%58	%63	GÇ	%41	%71	%82

Tablo 5.5 15 Katlı Örnek Bina Hasar Olasılıkları

Zemin Yapı Etkileşimsiz Durum				Zemin Yapı Etkileşimli Durum			
Hasar Sınırı	Zemin Sınıfı			Hasar Sınırı	Zemin Sınıfı		
	B	C	D		B	C	D
MN	%97	%100	%100	MN	%100	%100	%100
GV	%73	%73	%83	GV	%100	%80	%83
GÇ	%68	%62	%72	GÇ	%98	%70	%77

Yukarıdaki tabloların görüleceği üzeri etkileşimli durumda yapılarda hasar olasılığı artmaktadır. Başka bir deyişle zemin yapı etkileşimi dikkate alınmadan tasarlanan yapıların depremde zemin yapı etkileşiminden dolayı hasar görme olasılıkları artmaktadır. 5, 10 ve 15 katlı örnek binalarda zemin kötüleştikçe zemin yapı etkileşimsiz ve etkileşimli durumda hasar olasılığı büyümektedir. Örnek binalarda hasar sınırı büyüdükçe de hasar görülebilirlik oranı küçülmektedir.

5.8 Göreli Kat Ötelemesi Sınırları ve Güven Aralıkları

Buraya kadar hasar olasılık eğrilerinin çiziminde analizler sonucu her hasar sınır durumu için elde edilen spektral ivmeler kullanılmıştır. Ancak aynı yöntem

kullanılarak hasar olasılık eğrilerinin çiziminde analizlerin bir diğer çıktısı olan görelî kat ötelemeleri de kullanılabilir. Yapılan değerlendirmelerde görelî kat ötelemelerinde yapı kat sayısının, zemin sınıfının ve mesnetlenme durumunun etkisi olmadığı görüldüğünden analizler sonucunda elde edilen tüm görelî kat öteleme her sınır durumu için birleştirilerek hasar olasılık eğrileri oluşturulacaktır. Minimum hasar sınırı, güvenlik hasar sınırı ve göçme hasar sınırı olasılık eğrileri için 3 örnek bina, 3 zemin sınıfı, 7 adet deprem, depremin 2 bileşeni ve 2 mesnetlenme durumu için toplam 252 görelî kat ötelemesi kullanılacaktır (Tablo 5.6). Ayrıca elde edilen bu eğriler için güven aralıkları belirlenerek sınırlı bir olasılık için hasar sınırlarının sınır değerleri olarak kullanılabilir. Bu çalışmada güven aralıkları %90 ve %10 olmak üzere iki farklı güven düzeyi belirlenmiştir. Normal dağılan bir değişken için $(1-\alpha)$ güven düzeyindeki güven aralığı Denklem 5.13 ile hesaplanabilir.

$$\langle m \rangle_{1-\alpha} = \left[\bar{x} - \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right) k_{\frac{\alpha}{2}}; \bar{x} + \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right) k_{\alpha/2} \right] \quad (5.13)$$

Bu bağıntıda $\langle m \rangle_{1-\alpha}$ $(1-\alpha)$ güven düzeyindeki güven aralığını, $\bar{x}$ örnek ortalamasını, σ standart sapmayı, N örnek sayısını ve $k_{\alpha/2}$ $(1-\alpha/2)$ olasılığına karşılık gelen standart normal değişkeni temsil eder ve lognormal olasılık kâğıdında s ile gösterilen değer aynıdır. Lognormal dağılım durumunda, veri takımını oluşturan örnek değerlerin doğal logaritmaları normal dağılır. Bu şekilde bulunacak olan güven aralığı da orta değerın doğal logaritması için, yani λ parametresi için bulunmuş olacaktır. Bu bilgilere göre Denklem 5.13, Denklem 5.14'teki gibi yazılabilir.

$$\langle \lambda \rangle_{1-\alpha} = \left[\lambda - \left(\frac{\zeta}{\sqrt{N}} \right) k_{\frac{\alpha}{2}}; \lambda + \left(\frac{\zeta}{\sqrt{N}} \right) k_{\alpha/2} \right] \quad (5.14)$$

$$k_{\alpha/2} = \Phi^{-1} \left[1 - \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (5.15)$$

Bu bağıntıda $\langle \lambda \rangle_{1-\alpha}$ $(1-\alpha)$ güven düzeyindeki güven aralığını, ζ lognormal dağılan veri takımının standart sapmasını göstermektedir. Şekil 5.17'de 5 katlı örnek binanın minimum hasar sınırına ait görelî kat ötelemeleri için lognormal olasılık

kâğıdı verilmiştir. Noktaları temsil eden ve hasar olasılık eğrisinin çiziminde kullanılacak doğrunun denkleminde ortalamanın $\lambda=-4.962$ ve standart sapmanın $\zeta=0.463$ olduğu görülebilir.

Tablo 5.6 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 1

Zemin Sınıfı	Deprem No	Deprem Bileşeni No	Kesit Minimum Hasar Sınırı
B	1	1	0,0060
		2	0,0093
B	2	1	0,0057
		2	0,0080
B	3	1	0,0083
		2	0,0083
B	4	1	0,0073
		2	0,0107
B	5	1	0,0063
		2	0,0023
B	6	1	0,0063
		2	0,0063
B	7	1	0,0070
		2	0,0097
B	1	1	0,0093
		2	0,0130
B	2	1	0,0110
		2	0,0077
B	3	1	0,0080
		2	0,0063
B	4	1	0,0097
		2	0,0053
B	5	1	0,0057
		2	0,0070
B	6	1	0,0063
		2	0,0057
B	7	1	0,0130
		2	0,0107

Tablo 5.7 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 2

B	1	1	0,0057
		2	0,0103
B	2	1	0,0060
		2	0,0060
B	3	1	0,0107
		2	0,0057
B	4	1	0,0117
		2	0,0097
B	5	1	0,0057
		2	0,0060
B	6	1	0,0063
		2	0,0053
B	7	1	0,0053
		2	0,0067
B	1	1	0,0057
		2	0,0103
B	2	1	0,0060
		2	0,0060
B	3	1	0,0107
		2	0,0057
B	4	1	0,0117
		2	0,0097
B	5	1	0,0057
		2	0,0060
B	6	1	0,0063
		2	0,0053
B	7	1	0,0053
		2	0,0067

Tablo 5.8 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 3

B	1	1	0,0050
		2	0,0053
B	2	1	0,0097
		2	0,0057
B	3	1	0,0170
		2	0,0163
B	4	1	0,0180
		2	0,0183
B	5	1	0,0040
		2	0,0047
B	6	1	0,0050
		2	0,0047
B	7	1	0,0067
		2	0,0043
B	1	1	0,0023
		2	0,0037
B	2	1	0,0017
		2	0,0017
B	3	1	0,0033
		2	0,0043
B	4	1	0,0027
		2	0,0030
B	5	1	0,0017
		2	0,0027
B	6	1	0,0013
		2	0,0013
B	7	1	0,0017
		2	0,0017

Tablo 5.9 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 4

C	1	1	0,0063
		2	0,0063
C	2	1	0,0060
		2	0,0057
C	3	1	0,0067
		2	0,0067
C	4	1	0,0073
		2	0,0077
C	5	1	0,0070
		2	0,0070
C	6	1	0,0080
		2	0,0087
C	7	1	0,0077
		2	0,0063
C	1	1	0,0053
		2	0,0073
C	2	1	0,0060
		2	0,0070
C	3	1	0,0070
		2	0,0070
C	4	1	0,0073
		2	0,0067
C	5	1	0,0073
		2	0,0107
C	6	1	0,0160
		2	0,0160
C	7	1	0,0130
		2	0,0133

Tablo 5.10 Minimum Hasar Sınırı Görelî Kat Ötelemeleri - 5

C	1	1	0,0120
		2	0,0070
C	2	1	0,0077
		2	0,0090
C	3	1	0,0133
		2	0,0150
C	4	1	0,0070
		2	0,0060
C	5	1	0,0260
		2	0,0130
C	6	1	0,0080
		2	0,0073
C	7	1	0,0070
		2	0,0070
C	1	1	0,0120
		2	0,0070
C	2	1	0,0077
		2	0,0090
C	3	1	0,0133
		2	0,0150
C	4	1	0,0070
		2	0,0060
C	5	1	0,0260
		2	0,0130
C	6	1	0,0080
		2	0,0073
C	7	1	0,0070
		2	0,0070

Tablo 5.11 Minimum Hasar Sınırı Görelî Kat Ötelemeleri - 6

C	1	1	0,0047
		2	0,0050
C	2	1	0,0070
		2	0,0050
C	3	1	0,0067
		2	0,0047
C	4	1	0,0043
		2	0,0060
C	5	1	0,0093
		2	0,0050
C	6	1	0,0053
		2	0,0057
C	7	1	0,0053
		2	0,0050
C	1	1	0,0050
		2	0,0043
C	2	1	0,0053
		2	0,0047
C	3	1	0,0067
		2	0,0067
C	4	1	0,0057
		2	0,0047
C	5	1	0,0137
		2	0,0067
C	6	1	0,0053
		2	0,0077
C	7	1	0,0060
		2	0,0050

Tablo 5.12 Minimum Hasar Sınırı Görelî Kat Ötelemeleri - 7

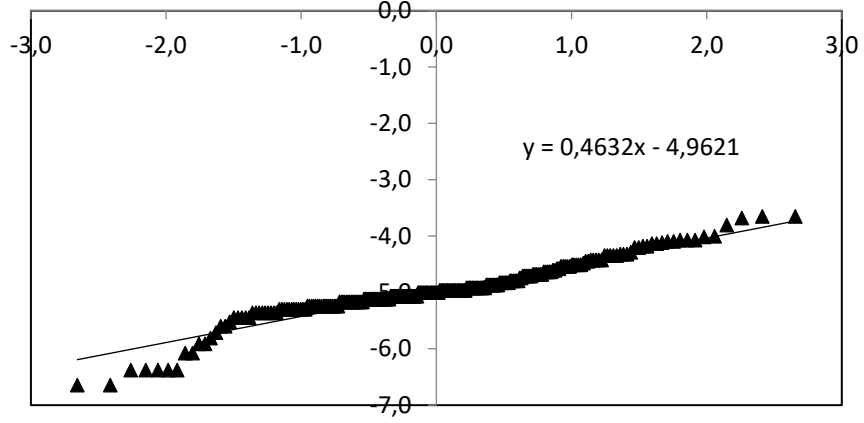
Zemin Sınıfı	Deprem No	Deprem Bileşeni No	Kesit Minimum Hasar Sınırı
D	1	1	0,0060
		2	0,0100
D	2	1	0,0090
		2	0,0067
D	3	1	0,0083
		2	0,0067
D	4	1	0,0070
		2	0,0070
D	5	1	0,0083
		2	0,0100
D	6	1	0,0067
		2	0,0073
D	7	1	0,0067
		2	0,0053
D	1	1	0,0073
		2	0,0053
D	2	1	0,0253
		2	0,0223
D	3	1	0,0090
		2	0,0120
D	4	1	0,0063
		2	0,0090
D	5	1	0,0113
		2	0,0070
D	6	1	0,0077
		2	0,0093
D	7	1	0,0077
		2	0,0090

Tablo 5.13 Minimum Hasar Sınırı Görelî Kat Ötelemeleri - 8

D	1	1	0,0153
		2	0,0167
D	2	1	0,0110
		2	0,0170
D	3	1	0,0120
		2	0,0073
D	4	1	0,0063
		2	0,0083
D	5	1	0,0093
		2	0,0110
D	6	1	0,0060
		2	0,0063
D	7	1	0,0063
		2	0,0073
D	1	1	0,0153
		2	0,0167
D	2	1	0,0110
		2	0,0170
D	3	1	0,0120
		2	0,0073
D	4	1	0,0063
		2	0,0083
D	5	1	0,0093
		2	0,0110
D	6	1	0,0060
		2	0,0063
D	7	1	0,0063
		2	0,0073

Tablo 5.14 Minimum Hasar Sınırı Göreli Kat Ötelemeleri - 9

D	1	1	0,0067
		2	0,0067
D	2	1	0,0063
		2	0,0050
D	3	1	0,0050
		2	0,0053
D	4	1	0,0047
		2	0,0047
D	5	1	0,0047
		2	0,0057
D	6	1	0,0057
		2	0,0050
D	7	1	0,0053
		2	0,0060
D	1	1	0,0080
		2	0,0053
D	2	1	0,0050
		2	0,0063
D	3	1	0,0060
		2	0,0087
D	4	1	0,0037
		2	0,0073
D	5	1	0,0063
		2	0,0077
D	6	1	0,0043
		2	0,0053
D	7	1	0,0080
		2	0,0070



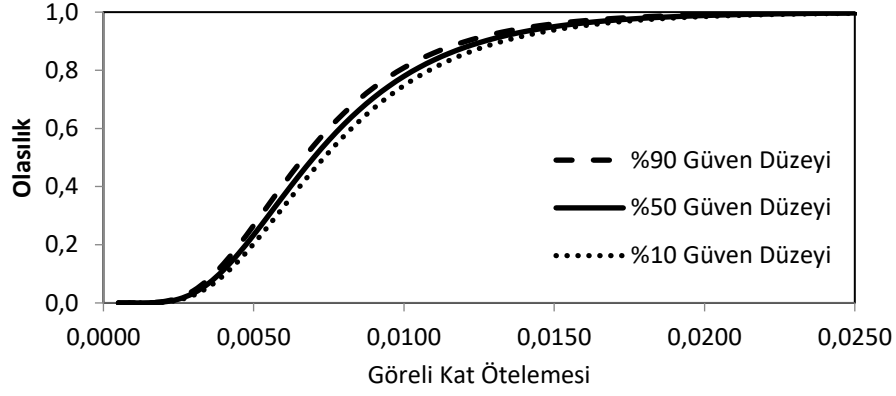
Şekil 5.17 Toplu Görelî Kat Ötelemeleri Olasılık Kağıdı

%90 için güven düzeyi için ise $1-\alpha=90/100$, $\alpha=0.10$, $k_{\alpha/2} = \Phi^{-1}[0.05]$ ve $k_{\alpha/2}=1.645$ 'dir. %90 ve %10 güven aralıkları için kullanılacak ortalama değerler Denklem 5.16 yardımı ile bulunmuş ve Denklem 5.17 sonuçlar verilmiştir. %50 güven düzeyi için ise ortalama değer -4.962 olarak lognormal olasılık kâğıdındaki denklemden okunabilmekte ve her üç güven düzeyinin olasılık hesaplarında standart sapma ζ ise sabit kalmaktadır.

$$\langle \lambda \rangle_{\%90} = \left[-4.962 - \left(\frac{0.463}{\sqrt{252}} \right) 1.645 ; -4.962 + \left(\frac{0.463}{\sqrt{252}} \right) 1.645 \right] \quad (5.16)$$

$$\langle \lambda \rangle_{\%90} = [-5.010 ; -4.914] \quad (5.17)$$

Minimum Hasar Sınırı için güven aralıklarını da içeren hasar olasılık eğrisi ise Şekil 5.18'de verilmiştir.



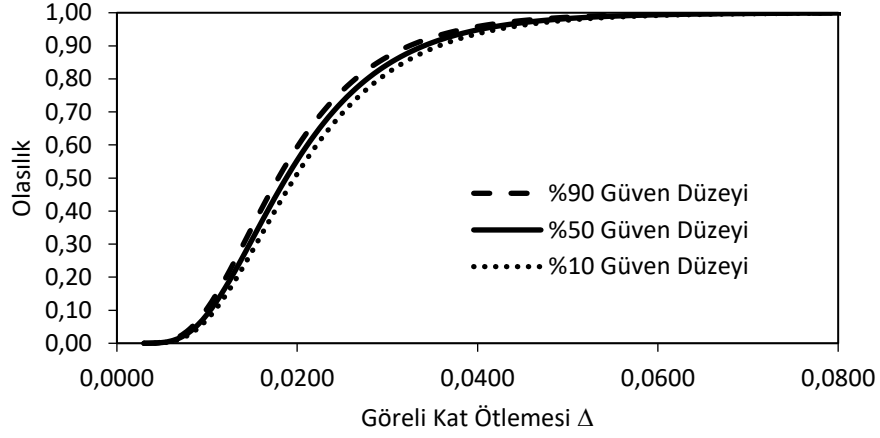
Şekil 5.18 Minimum Hasar Sınırı Görelî Kat Ötelemelerinin Güven Düzeylerini İçeren Hasar Olasılık Eğrileri

Tablo 5.15 Minimum Hasar Sınırı İstatiksel Sonuçları

Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
10%	-4.914	0.463	0.0073	0.0041
50%	-4.962	0.463	0.0070	0.0039
90%	-5.010	0.463	0.0067	0.0037

%90 güven düzeyine sahip hasar olasılık eğrisi kullanılarak, akma olasılığının minimum hasar olasılığının %10'luk değerine karşılık bulunan görelî kat ötelemesi değeri 0.0037'dir. Herhangi bir katta görelî kat ötelemesinin değeri 0.0037'e eşit olduğunda, binaların en fazla %10'u minimum hasar sınırına gelecektir. Başka bir deyişle, görelî kat ötelemesinin 0.0037'nin altında tutulması durumunda %90 olasılıkla, minimum hasar sınırı seviyesi sağlanacaktır. Tablo 5.7'de minimum hasar sınırı farklı güven düzeyleri için, istatiksel sonuçlar verilmiştir.

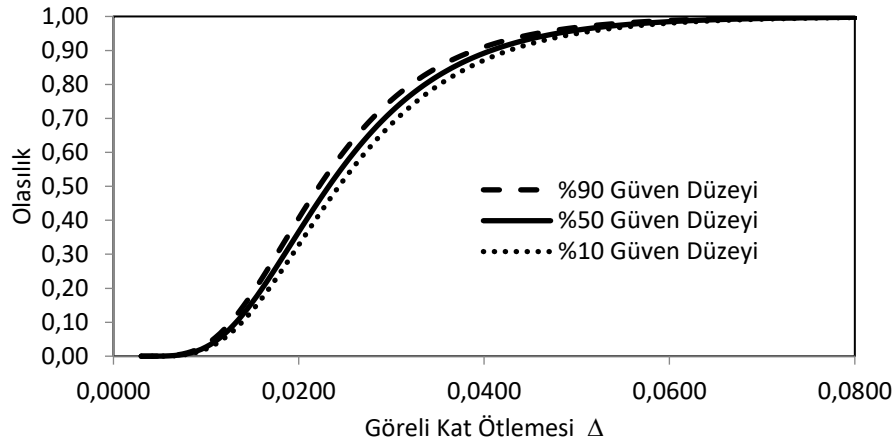
Güvenlik Hasarı Sınır ve Göçme Hasar Sınırı güven aralıklarını içeren hasar olasılık eğrileri Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de verilmiştir. Bu hasar sınırlarına ait istatiksel sonuçlar ise Tablo 5.8 ve Tablo 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.19 Güvenlik Hasar Sınırı için Güven Aralıklarındaki Görelî Kat Ötelemesi Olasılıkları

Tablo 5.16 Güvenlik Hasar Sınırı İstatiksel Sonuçları

Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
10%	-3.927	0.4644	0.0197	0.0109
50%	-3.975	0.4644	0.0188	0.0100
90%	-4.023	0.4644	0.0179	0.0099



Şekil 5.20 Göçme Hasar Sınırı için Güven Aralıklarındaki Görelî Kat Ötelemesi Olasılıkları

Tablo 5.17 Göçme Hasar Sınırı İstatiksel Sonuçları

Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
10%	-3.716	0.439	0.0243	0.0139
50%	-3.762	0.439	0.0232	0.0132
90%	-3.808	0.439	0.0222	0.0126

5.9 Hasar Sınırları ve Güven Aralıkları

Betonarme yapıların her bir için mesnetlenme, zemin sınıfları ve hasar sınırları için güven aralıklarına bağlı istatiksel sonuçlar Tablolarda halinde aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.18 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		5		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.282	0.751	3.604	1.376
%50	0.951	0.751	2.588	0.988
%90	0.620	0.751	1.858	0.710
Kat		5		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	2.098	0.448	8.153	4.590
%50	1.901	0.448	6.691	3.767
%90	1.703	0.448	5.490	3.091
Kat		5		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	2.253	0.483	9.519	5.129
%50	2.041	0.483	7.694	4.146
%90	1.828	0.483	6.220	3.351

Tablo 5.19 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		5		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.436	0.432	4.203	2.417
%50	1.245	0.432	3.474	1.998
%90	1.055	0.432	2.872	1.651
Kat		5		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	2.119	0.394	8.323	5.026
%50	1.946	0.394	6.997	4.225
%90	1.772	0.394	5.882	3.552
Kat		5		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	2.233	0.394	9.330	5.628
%50	2.059	0.394	7.840	4.730
%90	1.885	0.394	6.589	3.975

Tablo 5.20 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		5		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.568	0.745	4.795	1.847
%50	1.239	0.745	3.453	1.330
%90	0.911	0.745	2.487	0.958
Kat		5		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	2.232	0.632	9.320	4.148
%50	1.954	0.632	7.054	3.139
%90	1.675	0.632	5.339	2.376
Kat		5		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	2.406	0.624	11.087	4.986
%50	2.131	0.624	8.422	3.788
%90	1.856	0.624	6.397	2.877

Tablo 5.21 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		5		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.694	0.432	2.002	1.151
%50	0.504	0.432	1.655	0.951
%90	0.313	0.432	1.367	0.786
Kat		5		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.661	0.560	5.266	2.570
%50	1.414	0.560	4.114	2.008
%90	1.168	0.560	3.214	1.569
Kat		5		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.899	0.625	6.679	2.997
%50	1.623	0.625	5.069	2.275
%90	1.347	0.625	3.848	1.727

Tablo 5.22 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		5		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.730	0.401	2.075	1.241
%50	0.553	0.401	1.738	1.039
%90	0.376	0.401	1.456	0.871
Kat		5		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.531	0.528	4.624	2.350
%50	1.298	0.528	3.663	1.862
%90	1.065	0.528	2.902	1.475
Kat		5		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.672	0.525	5.325	2.716
%50	1.441	0.525	4.224	2.154
%90	1.209	0.525	3.350	1.709

Tablo 5.23 5 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		5		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.926	0.536	2.524	1.270
%50	0.689	0.536	1.993	1.003
%90	0.453	0.536	1.573	0.792
Kat		5		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.608	0.766	4.995	1.871
%50	1.271	0.766	3.563	1.335
%90	0.933	0.766	2.541	0.952
Kat		5		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.776	0.814	5.904	2.081
%50	1.417	0.814	4.124	1.454
%90	1.058	0.814	2.881	1.015

Tablo 5.24 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		10		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.675	0.392	1.963	1.188
%50	0.502	0.392	1.652	1.000
%90	0.329	0.392	1.390	0.841
Kat		10		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.982	0.591	7.254	3.400
%50	1.721	0.591	5.589	2.620
%90	1.460	0.591	4.306	2.019
Kat		10		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	2.123	0.589	8.357	3.928
%50	1.863	0.589	6.445	3.029
%90	1.604	0.589	4.970	2.336

Tablo 5.25 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		10		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.802	0.500	2.229	1.175
%50	0.581	0.500	1.788	0.943
%90	0.361	0.500	1.435	0.756
Kat		10		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.712	0.384	5.542	3.390
%50	1.543	0.384	4.680	2.863
%90	1.374	0.384	3.952	2.417
Kat		10		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.827	0.382	6.214	3.808
%50	1.658	0.382	5.250	3.218
%90	1.490	0.382	4.436	2.719

Tablo 5.26 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		10		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.949	0.545	2.582	1.285
%50	0.708	0.545	2.031	1.010
%90	0.468	0.545	1.597	0.795
Kat		10		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.957	0.562	7.081	3.445
%50	1.710	0.562	5.526	2.689
%90	1.462	0.562	4.313	2.099
Kat		10		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	2.128	0.648	8.395	3.661
%50	1.842	0.648	6.310	2.752
%90	1.557	0.648	4.743	2.068

Tablo 5.27 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		10		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.368	0.312	1.445	0.969
%50	0.231	0.312	1.260	0.845
%90	0.093	0.312	1.098	0.736
Kat		10		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.579	0.529	4.850	2.461
%50	1.346	0.529	3.840	1.949
%90	1.112	0.529	3.041	1.543
Kat		10		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.753	0.494	5.773	3.065
%50	1.535	0.494	4.643	2.465
%90	1.317	0.494	3.734	1.983

Tablo 5.28 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		10		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.231	0.215	1.260	0.956
%50	0.136	0.215	1.146	0.870
%90	0.041	0.215	1.042	0.791
Kat		10		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.490	0.686	4.437	1.841
%50	1.187	0.686	3.278	1.360
%90	0.885	0.686	2.422	1.005
Kat		10		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.604	0.760	4.972	1.878
%50	1.269	0.760	3.557	1.344
%90	0.934	0.760	2.544	0.961

Tablo 5.29 10 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		10		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.191	0.171	1.211	0.973
%50	0.116	0.171	1.123	0.902
%90	0.041	0.171	1.041	0.837
Kat		10		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.257	0.670	3.514	1.489
%50	0.961	0.670	2.615	1.108
%90	0.666	0.670	1.946	0.825
Kat		10		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.561	0.775	4.765	1.764
%50	1.219	0.775	3.385	1.253
%90	0.877	0.775	2.405	0.890

Tablo 5.30 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		15		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.850	0.703	2.340	0.950
%50	0.540	0.703	1.716	0.697
%90	0.230	0.703	1.258	0.511
Kat		15		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.036	1.327	2.818	0.515
%50	0.451	1.327	1.570	0.287
%90	-0.134	1.327	0.875	0.160
Kat		15		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.223	1.397	3.397	0.567
%50	0.607	1.397	1.834	0.306
%90	-0.010	1.397	0.991	0.165

Tablo 5.31 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		15		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.374	0.539	1.453	0.729
%50	0.136	0.539	1.146	0.575
%90	-0.101	0.539	0.904	0.453
Kat		15		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.436	0.662	4.203	1.799
%50	1.144	0.662	3.139	1.344
%90	0.852	0.662	2.344	1.004
Kat		15		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.675	0.672	5.337	2.257
%50	1.379	0.672	3.969	1.679
%90	1.082	0.672	2.952	1.248

Tablo 5.32 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimsiz, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		15		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	0.432	0.494	1.540	0.818
%50	0.214	0.494	1.238	0.658
%90	-0.004	0.494	0.996	0.529
Kat		15		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.512	0.725	4.538	1.792
%50	1.193	0.725	3.296	1.301
%90	0.873	0.725	2.394	0.945
Kat		15		
Durum		Etkileşimsiz		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.781	0.806	5.934	2.112
%50	1.425	0.806	4.159	1.480
%90	1.070	0.806	2.915	1.037

Tablo 5.33 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, B Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		15		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	-1.386	0.000	0.250	0.250
%50	-1.386	0.000	0.250	0.250
%90	-1.386	0.000	0.250	0.250
Kat		15		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	-0.899	0.430	0.407	0.234
%50	-1.089	0.430	0.336	0.194
%90	-1.279	0.430	0.278	0.160
Kat		15		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		B		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	-0.733	0.517	0.480	0.248
%50	-0.961	0.517	0.382	0.197
%90	-1.189	0.517	0.304	0.157

Tablo 5.34 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, C Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		15		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	-0.136	0.355	0.873	0.554
%50	-0.292	0.355	0.746	0.474
%90	-0.449	0.355	0.638	0.405
Kat		15		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.156	0.598	3.177	1.476
%50	0.892	0.598	2.440	1.134
%90	0.628	0.598	1.874	0.871
Kat		15		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		C		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.406	0.561	4.079	1.987
%50	1.158	0.561	3.185	1.551
%90	0.911	0.561	2.486	1.211

Tablo 5.35 15 Katlı Betonarme Yapı İstatiksel Sonuçları (Etkileşimli, D Sınıfı Zemin, MN, GV, GÇ Hasar Sınırları)

Kat		15		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		MN		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	-0.104	0.652	0.901	0.391
%50	-0.391	0.652	0.676	0.293
%90	-0.679	0.652	0.507	0.220
Kat		15		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GV		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.255	0.728	3.508	1.379
%50	0.934	0.728	2.544	1.000
%90	0.613	0.728	1.845	0.726
Kat		15		
Durum		Etkileşimli		
Zemin Sınıfı		D		
Hasar Sınırı		GÇ		
Güven Düzeyi	λ	ζ	x_m	x
%10	1.435	0.709	4.200	1.694
%50	1.123	0.709	3.073	1.239
%90	0.810	0.709	2.248	0.907

Yapılan analizler sonucunda zemin yapı etkileşimli durumda yapıların mesnetlenme koşulları değişmesine bağlı olarak veya görece yumuşamasına bağlı olarak yapıların periyodunda uzamalar meydana gelmiştir. Görece zemin kötüleştikçe periyottaki uzama artmıştır. Bu durum beklenen bir sonuç olup literatür ile de uyumludur.

Zemin yapı etkileşimli durumda hasar olasılık eğrileri spektral ivmeden bağımsız olarak etkileşimsiz duruma ait hasar olasılık eğrisinin üzerinde kalmaktadır. Eğer etkileşimsiz ve etkileşimli durumlara ait spektral ivmeler biliniyorsa hazırlanan bu hasar olasılık eğrileri yardımı ile yapının hasar görme olasılığı bulunabilir. Binanın kat sayısı artıkça da etkileşimsiz ve etkileşimli durumlar ait eğriler arasındaki açıklık azalmaktadır, eğriler birbirlerine yaklaşmaktadır.

Zemin yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumdaki görelî kat ötelemeleri arasında belirgin bir fark görülememiştir. Bu sebeple göre kat ötelemelerine göre hazırlanan hasar olasılık eğrileri; zemin durumu, kat sayısı ve etkileşimli etkileşimsiz durumlar göz ardı edilerek kesit hasar sınırları için (MN, GV, GÇ) için hazırlanmıştır. Ayrıca yönetmeliğin verdiği görelî kat ötelemeleri sınır değerlerinden daha küçük görelî kat ötelemeleri ile kesit hasar sınırlarına ulaşılmıştır. Bu durum yönetmeliğin her hasar sınır için yapının hasar görmüş daha ileri bir seviyesini dikkate aldığını göstermektedir.

Zemin yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumlarda spektral ivmeler arasında belirgin farklar görülmüştür. Etkileşimli durumda aynı hasar sınırına etkileşimsiz duruma göre daha küçük spektral ivme ile ulaşılmakta, başka bir deyişle yapı etkileşimli durumda etkileşimsiz duruma göre daha kolay hasar görmektedir.

Zemin yapı etkileşimli durumda etkileşimsiz duruma göre hasar olasılığı artmaktadır. Etkileşimli ve etkileşimsiz durumlarda hasar sınırı artıkça hasar

görme olasılığı azaltmaktadır. Görece zemin durumu kötüleştikçe hasar olasılığı ise artmaktadır.

Zemin yapı etkileşiminin hasar olasılığı arttırdığı yönündeki sonuçlar beklenene sonuçlar olup literatür ile de uyumludur.

Dikkate alınan herhangi bir yapı için (örneğin bu çalışmada için 5 katlı bina olsun) hasar sınırı artışı ile hasar olasılıkları arasındaki fark artmaktadır. Kat sayısının artışı ile de bu fark azalmaktadır. Örneğin bu çalışmadaki 15 katlı binanın diğer binalara göre hasar görme olasılıkları arasındaki fark daha azdır. Zeminlerin görece kötüleşmesiyle de hasar olasılıkları arasındaki fark azalmaktadır. Başka bir deyişle zeminler görece kötüleştikçe hasar görme olasılıkları arasındaki fark azaltmaktadır.

Görüldüğü gibi mevcut yapıların hasar görme olasılıkları zemin yapı etkileşimi dikkate alınmadan doğru tahmin edilememektedir. Zemin yapı etkileşiminin dikkate alınmadan tasarlanan yapılar ise zemin yapı etkileşiminden kaynaklı risk altındadır. Bu sebeple yapıların hasar olasılıklarının tam olarak belirlenmesi için zemin yapı etkileşiminin dikkate alınmasının gerekli olduğu düşünülmektedir.

Yönetmeliklerde zemin yapı etkileşiminin dikkate alınması için tasarım taban kesme kuvvetinin azaltılması veya yüzeysel temelli yapılar için zemin yapı etkileşiminin dikkate alınmaması gibi yaklaşımlar mevcuttur. Ancak bu çalışmada da zemin yapı etkileşiminin hasar olasılığını arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle yapıların hasar görme olasılığının eksiksiz belirlenmesi için zemin yapı etkileşiminin dikkate alınması önerilir.

- [1] P. Rajeev ve S. Tesfamariam, "Seismic fragilities of non-ductile reinforced concrete frames with consideration of soil structure interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 40, pp. 78-86, 2012.
- [2] F. Hosseinpour ve A. E. Abdelnaby, "Fragility curves for RC frames under multiple earthquakes," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 98, pp. 222-234, 2017.
- [3] M. Mekki, S. M. Elachachi, D. Breysse ve M. Zoutat, "Seismic behavior of R.C. structures including soil-structure interaction and soil variability effects," *Engineering Structures*, vol. 126, pp. 15-26, 2016.
- [4] F. Behnamfar ve M. Banizadeh, "Effects of soil-structure interaction on distribution of seismic vulnerability in RC structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 80, pp. 73-86, 2016.
- [5] M. E. Aydemir, "Soil structure interaction effects on multistorey R/C structures," *International Journal of Electronics; Mechanical and Mechatronics Engineering*, vol. 2, pp. 298-302, 2012.
- [6] N. Hassani, M. Bararnia ve G. G. Amiri, "Effect of soil-structure interaction on inelastic displacement ratios of degrading structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 104, pp. 75-87, 2018.
- [7] F. Khosravikia, M. Mahsuli ve M. A. Ghannad, "The effect of soil-structure interaction on the seismic risk to building," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 16, pp. 3653-3673, 2018.
- [8] C. Ch. Mitropoulou, C. Kostopanagiotis, M. Kapanos, D. Ioakim ve N. D. Lagaros, "Influence of soil-structure interaction on fragility assesment of building structures," *Structures*, vol. 6, pp. 85-98, 2016.
- [9] S. T. Karapetrou, S. D. Fotopoulou, ve K. D. Pitilakis, "Seismic vulnerability assesment of high-rise non-ductile RC buildings considering soil-structure effect," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 73, pp. 42-57, 2015.
- [10] A. Khaloo, S. Nozhati, H. Masoomi ve H. Faghihmaleki, "Influence of earthquake record truncation on fragility curves of RC frames with different damage indices," *Journal of Building Engineering*, vol. 7, pp. 23-30, 2016.
- [11] E. Saez, F. Lopez-Caballero ve A. Modaressi-Farahmand-Razavi, "Effect of the inelastic dynamic soil-structure interaction on the seismic vulnerability assessment," *Structural Safety*, vol. 33, pp. 51-63, 2011.
- [12] D. Cardone, M. Rossino ve G. Gesualdi, "Estimating fragility curves of pre-70 RC frame building considering different performance limit states," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 115, pp. 868-881, 2018.

- [13] M. Ghandil, F. Behnamfar ve M. Vafaeian, "Dynamic responses of structure-soil-structure systems with an extension of the equivalent linear soil modeling," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 80, pp. 149-162, 2016.
- [14] A. Krishnamoorthy ve S. Anita, "Soil-structure interaction of a FPS-isolated structure using finite element model," *Structures*, vol. 5, pp. 44-57, 2016.
- [15] H. Torabi, ve M. T. Rayhani, "Three dimensional finite element modeling of seismic soil-structure interaction in soft soil," *Computers and Geotechnics*, vol. 60, pp. 9-19, 2014.
- [16] E.Kausel, "Early history of soil-structure interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 20, pp. 822-832, 2010.
- [17] V. Anand ve S. R. S. Kumar, "Seismic soil-structure interaction: A state-of-art review," *Structures*, vol. 16, pp. 317-326, 2018.
- [18] H. R. Tabatabaiefar ve B. Fatahi, "Idealisation of soil-structure system to determine inelastic seismic response of mid-rise building frames," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 66, pp. 339-351, 2014.
- [19] M. A. Ghannad ve H. Jahankhah, "Site-dependent strength reduction factors for soil-structure systems," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 27, pp. 99-110, 2007.
- [20] S. Renzi, C. Madiati ve G. Vannucchi, "A simplified empirical method for assessing seismic soil-structure interaction effects on ordinary shear-type buildings," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 55, pp.100-107, 2013.
- [21] E. Nazarimofrad ve S. M. Zahrai, "Seismic control of irregular multistory building using active tendons considering soil-structure interaction effect," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 89, pp. 100-115, 2016.
- [22] S. C. Dutta, K. Bhattacharya ve R. Roy, "Response of low-rise buildings under seismic ground excitation incorporating soil-structure interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 24, pp.893-914, 2004.
- [23] Y. Lu, I. Hajirasouliha ve A. M. Marshall, "Performance-based seismic design of flexible considering soil-structure interaction," *Engineering Structures*, vol. 108, pp. 90-103, 2016.
- [24] S. M. Hoseyni, F. Yousefpour, A. A. Araei, K. Karimi ve S. M. S. Mohsen Hoseyni, "Effects of soil-structure interaction on fragility and seismic risk; a case study of power plant containment," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 32, pp. 276-285, 2014.
- [25] R. Tomeo, D. Pitilakis, A. Bilotta ve E. Nigro, "SSI effects on seismic demand of reinforced concrete moment resisting frames," *Engineering Structures*, vol. 173, pp. 559-572, 2018.
- [26] H. Rahnema, S. Mohaseb ve B. JavidSharifi, "2-D soil structure interaction in time domain by the SBFEM and two non-linear soil models," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 88, pp. 152-175, 2016.

- [27] NIST GCR 12-917-21, Soil-Structure Interaction for Building Structures, National Institute of Standards and Technology, 2012.
- [28] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi altında Binaların Tasarımı için Esaslar, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018.
- [29] ASCE 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and Other Structures, American Society of Civil Engineers, 2016.
- [30] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007.
- [31] Fema 440, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, 2005.
- [32] Fema 356, Prestandard and Commentary for The seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [33] FEMA 302 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [34] Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, 2004.
- [35] P. Badry ve N. Satyam, "Seismic soil structure interaction analysis for asymmetrical buildings supported on piled raft for the 2015 Nepal earthquake," Journal of Asian Earth Sciences, vol. 133, pp. 102-113, 2017.
- [36] FEMA P695 Quantification of Building Seismic Performance Factors, Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [37] Pacific Earthquake Research Center (PEER) Strong Motion Database.
- [38] J. P. Wolf, "Simple physical models for foundation Dynamics", Developments in Geotechnical Engineering", 1983, pp. 1-70.
- [39] SeismoStruct 2016, Seismosoft Earthquake Engineering software solutions, <https://seismosoft.com/>

5 KATLI ÖRNEK BİNA DONATI DETAYLARI

Tablo A.1 Kiriş Donatı Detayları

Kat Numarası	Kiriş Sol ve Sağ Mesneti Donatısı	Donatı Miktarı	Etriye Miktarı
1	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ14	
2	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ14	
3	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ14	
4	Üst	5Φ14	Φ8/10
	Alt	3Φ14	
5	Üst	4Φ14	Φ8/10
	Alt	3Φ14	

Tablo A.2 Kolon Donatı Detayları

Kat Numarası	Kolon Donatısı	Donatı Miktarı	Etriye Miktarı
Tümü	Boyuna	8Φ20	Φ8/10

10 KATLI ÖRNEK BİNA DONATI DETAYLARI

Tablo B.1 Kiriş Donatı Detayları

Kat Numarası	Kiriş Sol ve Sağ Mesneti Donatısı	Donatı Miktarı	Etriye Miktarı
1	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ14	
2	Üst	6Φ16	Φ8/10
	Alt	4Φ14	
3	Üst	6Φ16	Φ8/10
	Alt	4Φ14	
4	Üst	6Φ16	Φ8/10
	Alt	4Φ14	
5	Üst	6Φ16	Φ8/10
	Alt	4Φ14	
6	Üst	6Φ16	Φ8/10
	Alt	4Φ14	

Tablo B.1 Kiriş Donatı Detayları (devam)

7	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	4Φ14	
8	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ14	
9	Üst	4Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ14	
10	Üst	4Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ14	

Tablo B.2 Kolon Donatı Detayları

Kat Numarası	Kolon Donatısı	Donatı Miktarı	Etriye Miktarı
Tümü	Boyuna	12Φ24	Φ8/10

15 KATLI ÖRNEK BİNA DONATI DETAYLARI

Tablo C.1 Kiriş Donatı Detayları

Kat Numarası	Kiriş Sol ve Sağ Mesneti Donatısı	Donatı Miktarı	Etriye Miktarı
1	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ16	
2	Üst	6Φ16	Φ8/10
	Alt	4Φ16	
3	Üst	6Φ18	Φ8/10
	Alt	4Φ16	
4	Üst	6Φ18	Φ8/10
	Alt	4Φ16	
5	Üst	6Φ18	Φ8/10
	Alt	4Φ16	
6	Üst	6Φ18	Φ8/10
	Alt	4Φ16	

Tablo C.1 Kiriş Donatı Detayları (devam)

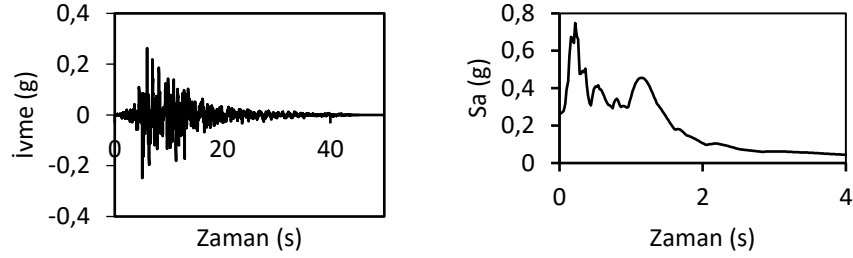
7	Üst	5Φ18	Φ8/10
	Alt	4Φ16	
8	Üst	5Φ18	Φ8/10
	Alt	4Φ16	
9	Üst	5Φ18	Φ8/10
	Alt	3Φ16	
10	Üst	5Φ18	Φ8/10
	Alt	3Φ16	
11	Üst	5Φ18	Φ8/10
	Alt	3Φ16	
12	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ16	
13	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ16	
14	Üst	5Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ16	
15	Üst	4Φ16	Φ8/10
	Alt	3Φ16	

Tablo C.2 Kolon Donatı Detayları

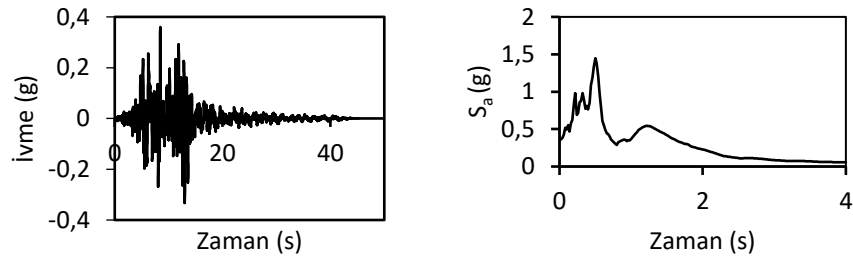
Kat	Kolon	Donatı	Etriye
Numarası	Donatısı	Miktarı	Miktarı
Tüm	Boyuna	16Φ24	Φ8/10

D

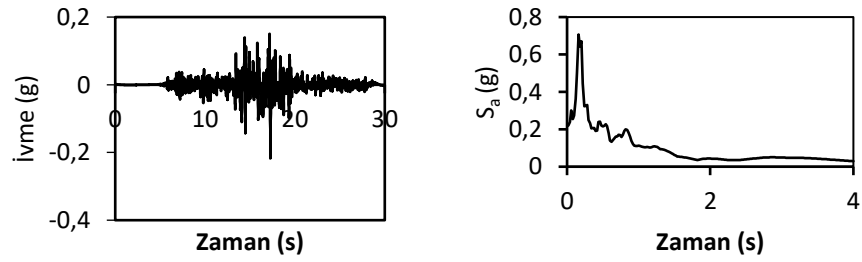
B SINIFI ZEMİN İÇİN DEPREM KAYITLARI ve İVME SPEKTRUMLARI



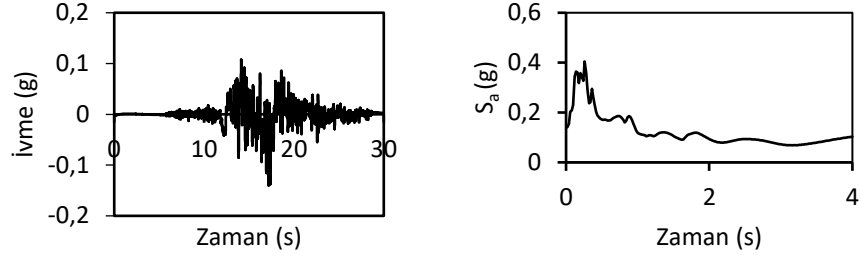
Şekil D.1 HECTOR000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



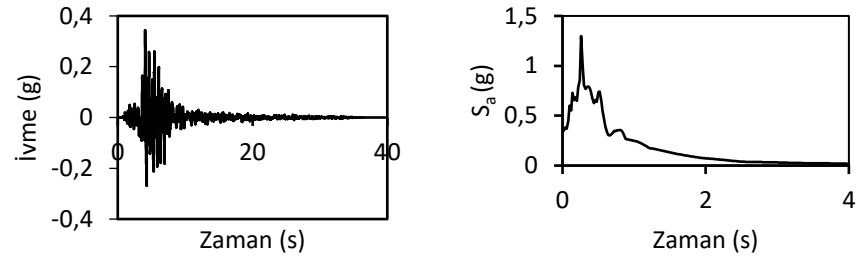
Şekil D.2 HECTOR090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



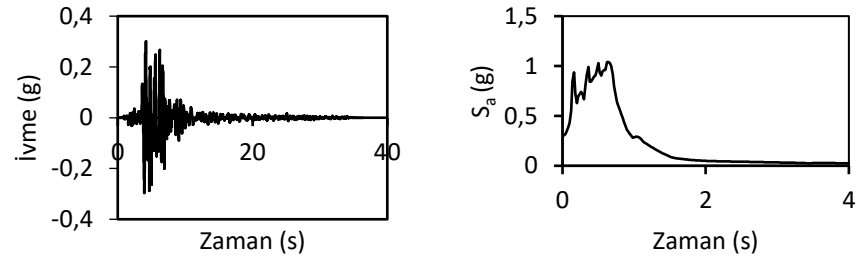
Şekil D.3 ARE000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



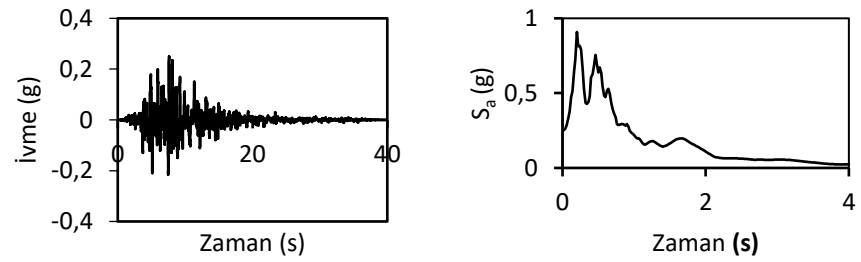
Şekil D.4 ARE090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



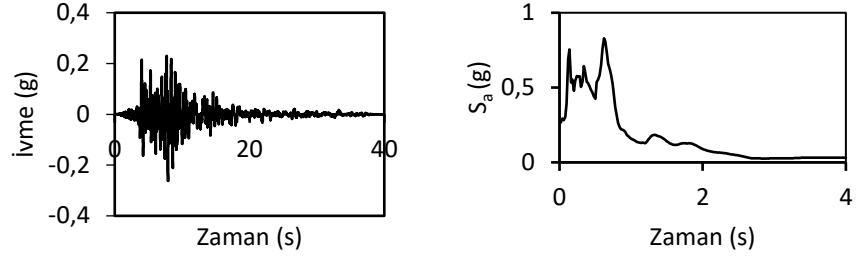
Şekil D.5 TMZ000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



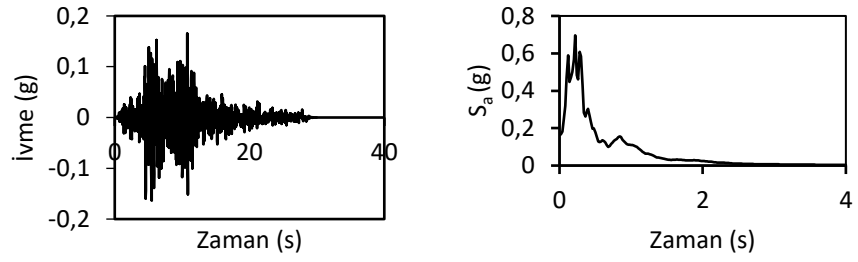
Şekil D.6 TMZ270 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



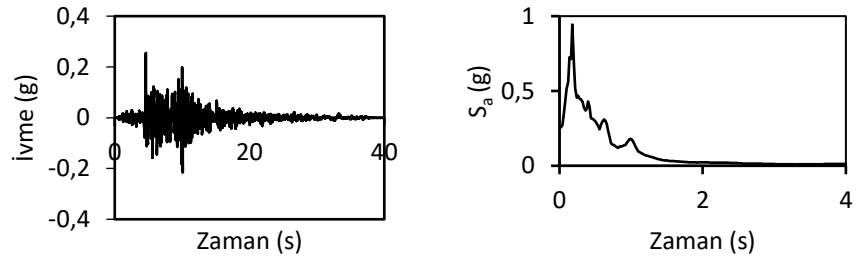
Şekil D.7 AND250 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



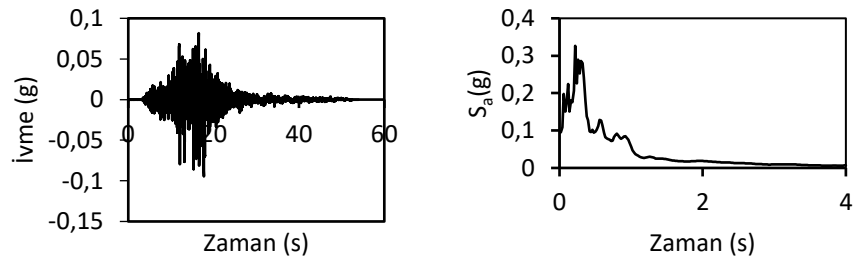
Şekil D.8 AND340 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



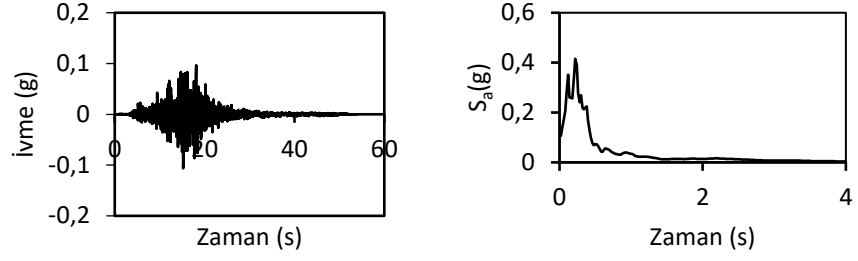
Şekil D.9 TUJ262 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



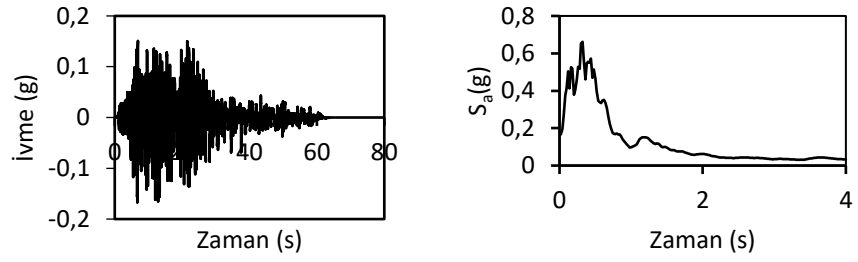
Şekil D.10 TUJ352 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



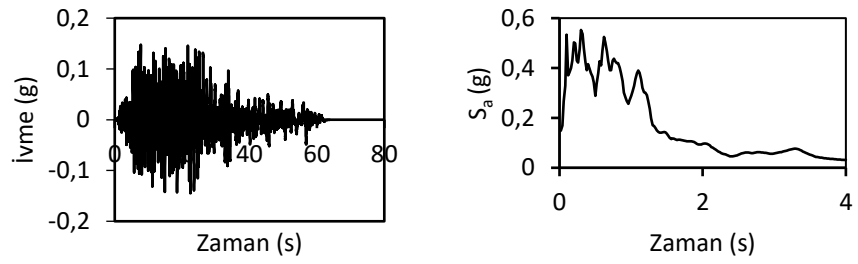
Şekil D.11 CHY000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



Şekil D.12 CHY090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri

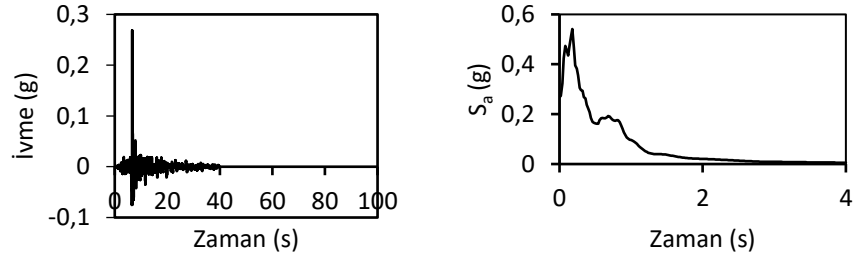


Şekil D.13 CPE147 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri

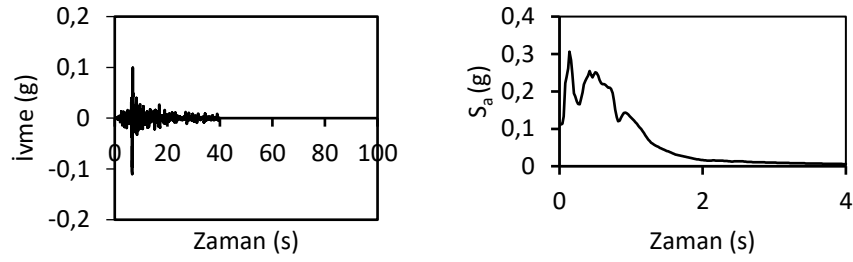


Şekil D.14 CPE237 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri

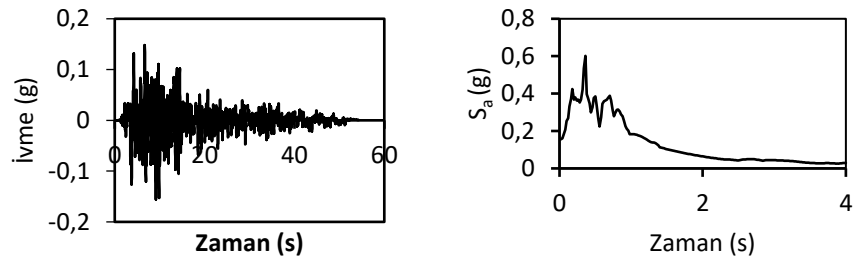
C SINIFI ZEMİN İÇİN DEPREM KAYITLARI ve İVME SPEKTRUMLARI



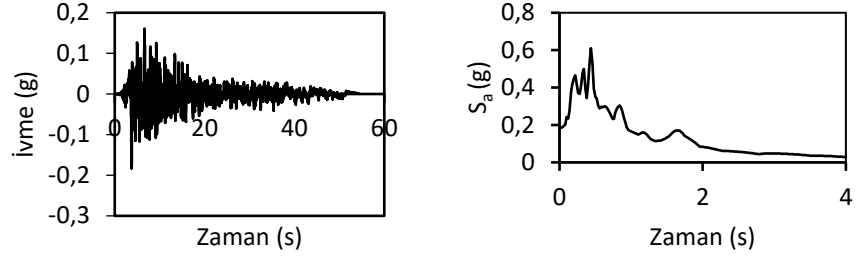
Şekil E.1 FRN224 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



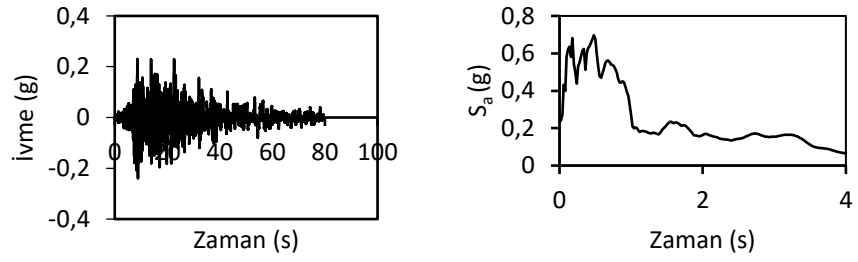
Şekil E.2 FRN314 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



Şekil E.3 TAF021 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



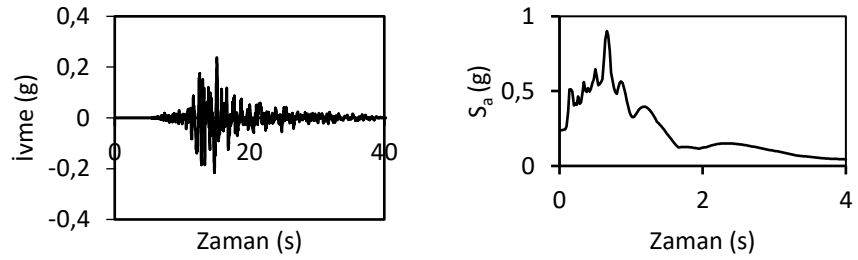
Şekil E.4 TAF111 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



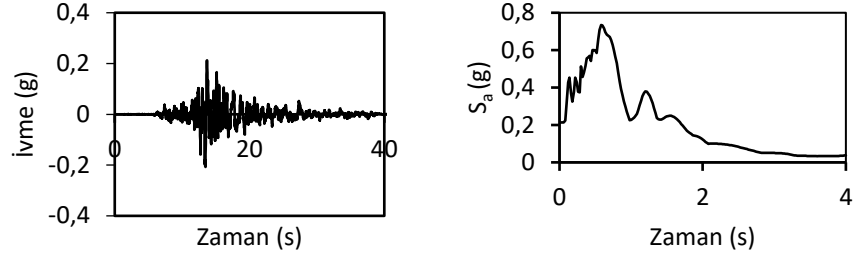
Şekil E.5 DLT262 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



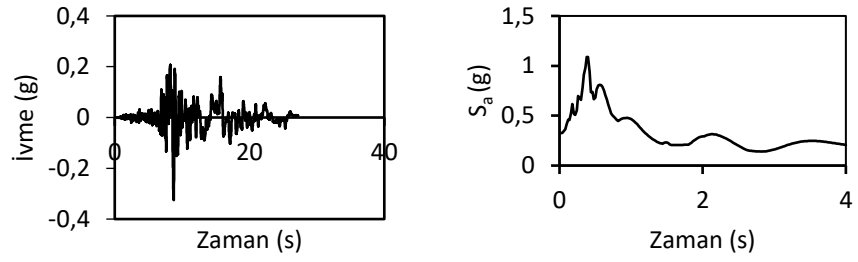
Şekil E.6 DLT352 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



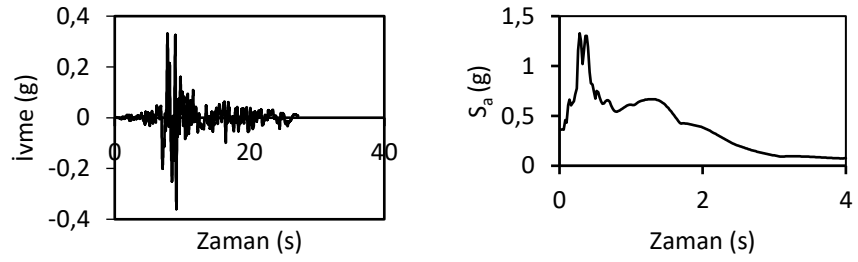
Şekil E.7 SHI000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



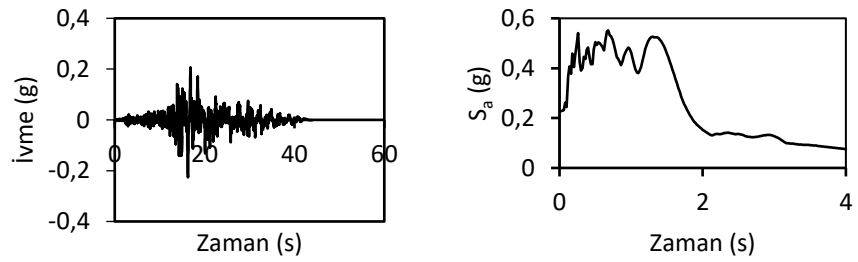
Şekil E.8 SHI090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



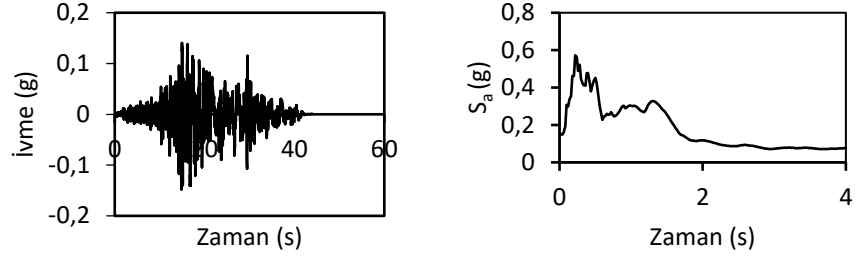
Şekil E.9 DZC180 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



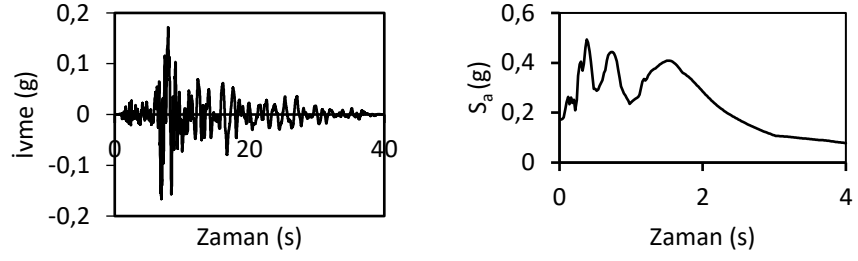
Şekil E.10 DZC270 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



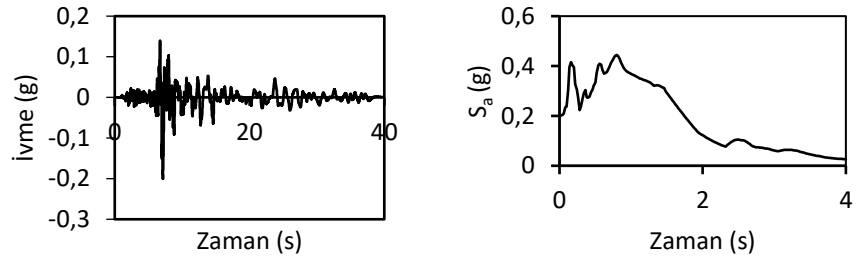
Şekil E.11 YER270 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



Şekil E.12 YER360 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri

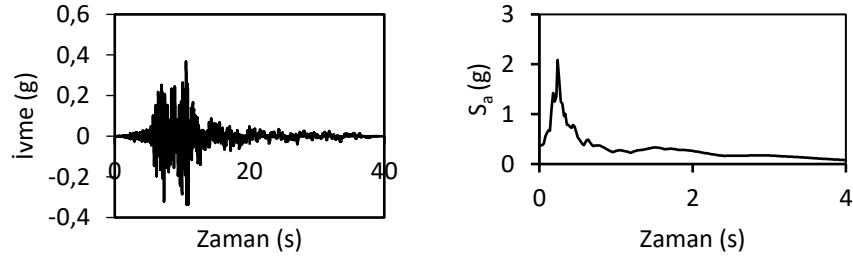


Şekil E.13 FRN044 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri

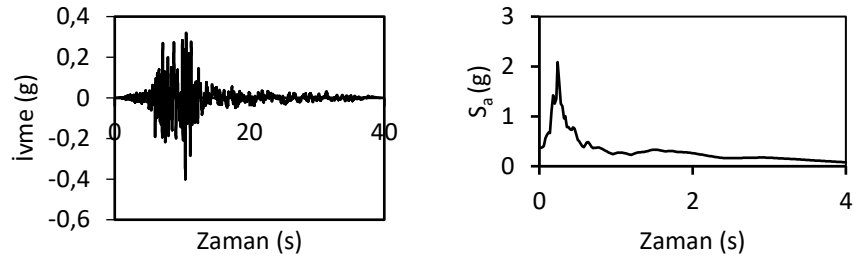


Şekil E.14 FRN314 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri

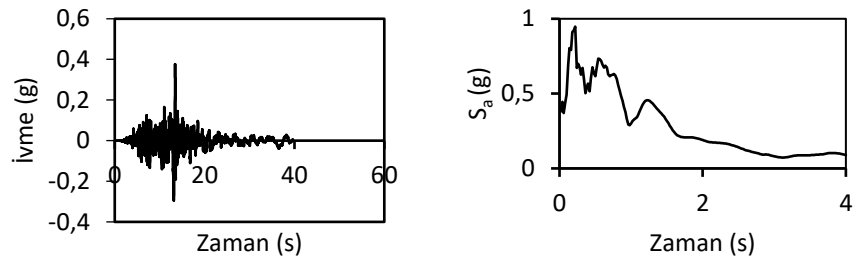
D SINIFI ZEMİN İÇİN DEPREM KAYITLARI ve İVME SPEKTRUMLAR



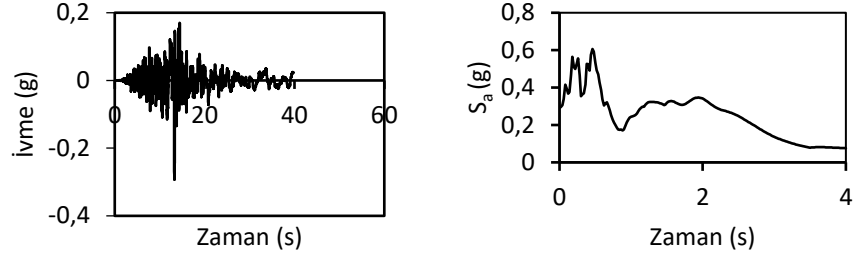
Şekil F.1 E11140 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



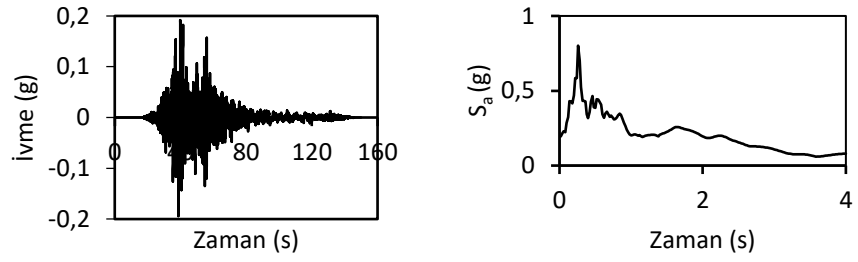
Şekil F.2 E11230 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



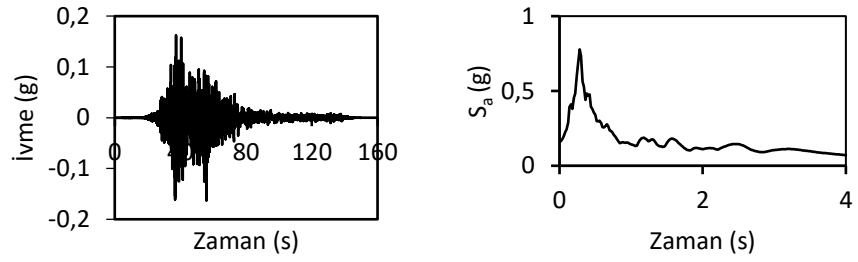
Şekil F.3 ICC000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



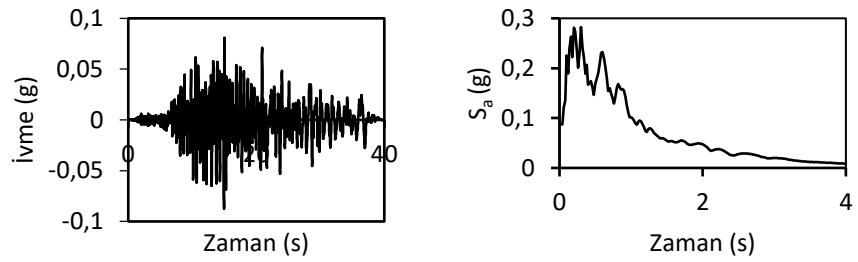
Şekil F.4 ICC090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



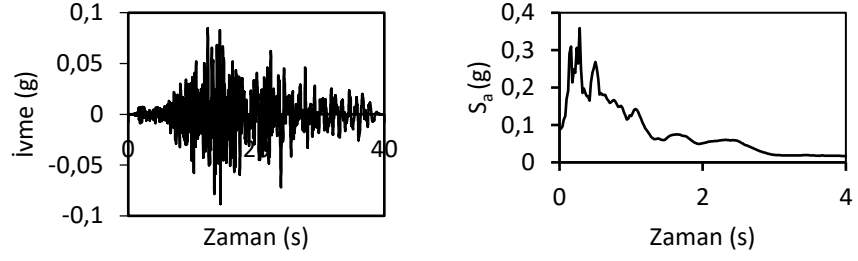
Şekil F.5 CHY047-N Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



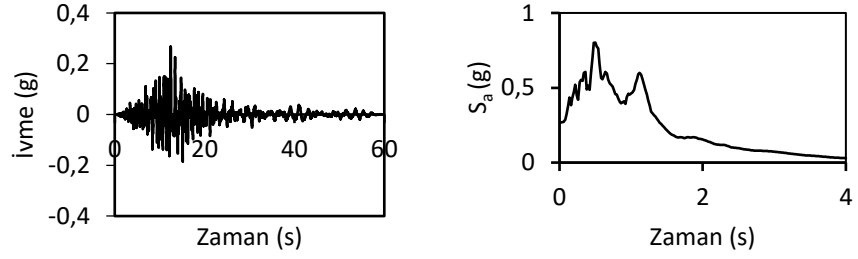
Şekil F.6 CHY047-W Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



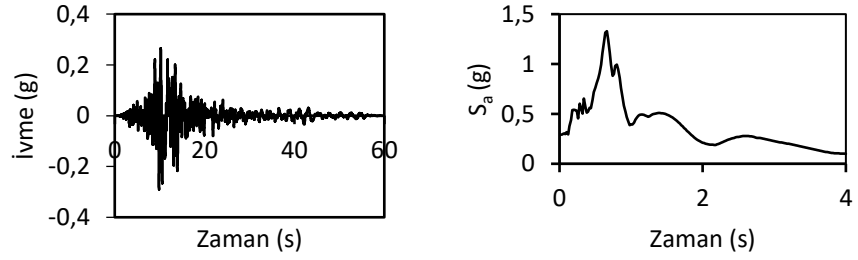
Şekil F.7 WAT180 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



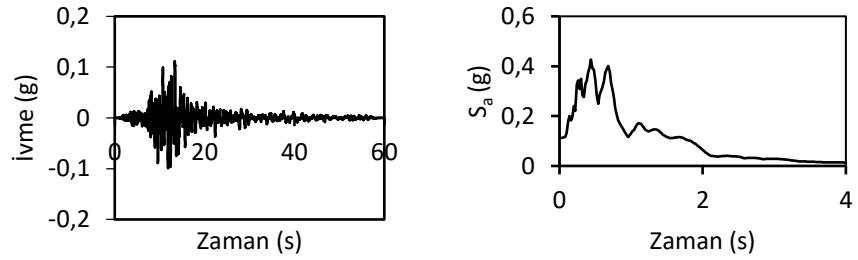
Şekil F.8 WAT270 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



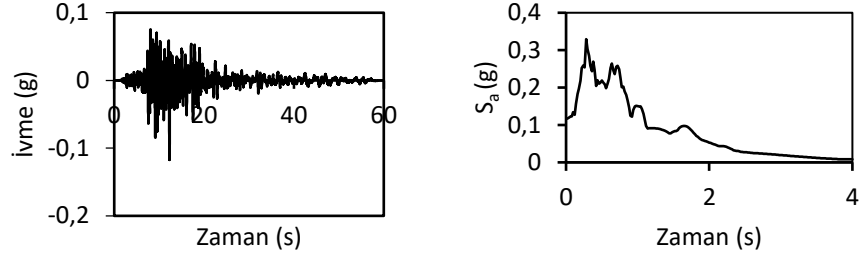
Şekil F.9 A01000 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



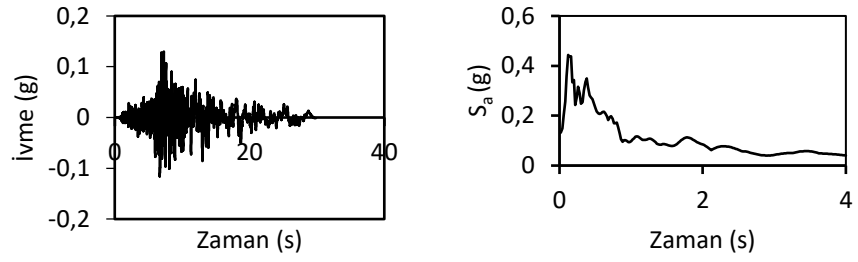
Şekil F.10 A01090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



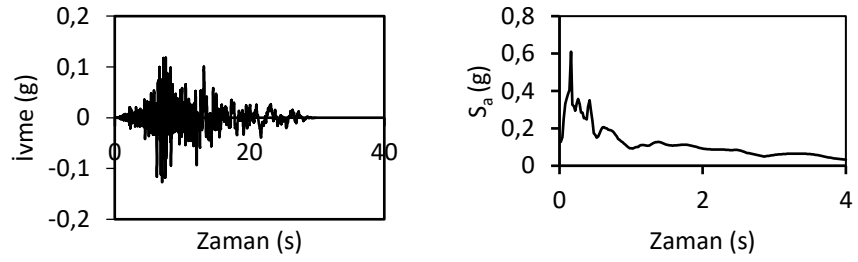
Şekil F.11 H-C02000 Bileşeni Deprem İvme Spektrumu Grafikleri



Şekil F.12 H-C02090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



Şekil F.13 IVW090 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri



Şekil F.14 IVW360 Bileşeni İvme ve Spektral İvme Grafikleri

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: hulaethem@yahoo.com

Konferans Bildirileri

1. H. Ethemoglu ve M. S. Kırçıl, “Zemin Yapı Etkileşiminin Hasar Olasılığına Etkisi”, idRc 2019, International Disaster & Resilience Congress, 26-28 Haziran 2019, Eskişehir, ISBN: 978-605-031-286-7, sayfa 577-581.