

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞININ
ENERJİ ESASLI ANALİZİ**

İnşaat Yük. Müh. Baykal HANCIOĞLU

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 08 Ekim 2009

Tez Danışmanı : Prof. Zekeriya POLAT (YTÜ)

Eş Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Murat S. KIRÇIL (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. M. Nuray AYDINOĞLU (BÜ)

: Prof. Dr. Zekai CELEP (İTÜ)

: Prof. İbrahim EKİZ (YTÜ)

: Doç. Dr. Bülent AKBAŞ (GYTE)

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖNSÖZ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Temel Sismik Enerji Terimleri.....	1
1.1.1 Bir Serbestlik Dereceli (BSD) Sistemlere Sismik Enerji Girişi	1
1.1.1.1 Bağlı Enerji Terimleri	3
1.1.1.2 Mutlak Enerji Terimleri	7
1.1.2 Çok Serbestlik Dereceli (ÇSD) Sistemlere Sismik Enerji Girişi	10
1.2 Literatür Araştırması.....	10
1.2.1 Giriş Enerjisi ve Çevrimsel Enerjinin Değerlendirilmesi	10
1.3 Yer Hareketi Veritabanı	18
1.4 Hata Ölçütleri ve İstatistiksel Değerlendirme	25
2. SİSMİK ENERJİ	28
2.1 Giriş Enerjisi.....	28
2.1.1 Duyarlılık Analizi	28
2.1.1.1 İstatistiksel Analizler	42
2.1.2 Giriş Enerjisinin Tahmini.....	62
2.1.3 Giriş Enerjisi için Önerilmiş Farklı Bağlılıkların Karşılaştırılması.....	75
2.1.4 Karakteristik Periyodun Tahmini	81
2.1.4.1 Karakteristik Periyot için Önerilmiş Farklı Bağlılıkların Karşılaştırılması	87
2.1.4.2 Dayanımın Karakteristik Periyoda Etkisi	90
2.2 Çevrimsel Enerjinin Tahmini	100
3. EN BÜYÜK YERDEĞİŞTİRME İSTEMİ.....	107
3.1 En Büyük Yerdeğiştirme İsteminin Tahmini	107
3.2 İteratif Yöntem	122
3.3 Önerilen Yöntemin Farklı Yaklaşımlarla Karşılaştırılması	137
4. DEĞERLENDİRME	150
4.1 Çevrimsel İstem.....	150
4.2 Park-Ang Hasar İndeksi	163

4.3	Önerilen Yöntemin Uygulamaları	165
4.3.1	Uygulama 1: Köprü Ayağı	165
4.3.2	Uygulama 2: Üç Katlı Bina	170
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	178
KAYNAKLAR		186
EKLER		191
Ek 1	Eşdeğer Giriş Enerjisi Hızı için Hata Histogramları, Olasılıksal ve Birikimli Dağılım Eğrileri	192
Ek 2	Çevrimsel Enerji için Hata Histogramları, Olasılıksal ve Birikimli Dağılım Eğrileri	200
Ek 3	Elastik Olmayan Yerdeğiştirme Oranı için Hata Histogramları, Olasılıksal ve Birikimli Dağılım Eğrileri	208
Ek 4	Eşdeğer Çevrim Sayısı için Hata Histogramları, Olasılıksal ve Birikimli Dağılım Eğrileri	230
ÖZGEÇMİŞ		252

SİMGE LİSTESİ

a_g	Yer hareketi ivmesi
α	Çevrimsel enerjinin giriş enerjisine oranı
AOH	Ağırlıklı ortalama hata
c	Viskoz sönüm katsayısı
cdf	Birikimli dağılım fonksiyonu
C_R	Elastik olmayan yerdeğiştirme oranı
CV	Varyasyon katsayısı
CV_{RMSE}	Hataların varyasyon katsayısı
χ^2	Ki-kare istatistiği
χ_{cr}^2	Kritik ki-kare istatistiği
DI	Hasar indeksi
DI_{PA}	Park-Ang hasar indeksi
E_k	Bağıl kinetik enerji
E_k'	Mutlak kinetik enerji
E_d	Viskoz sönüm ile dağıtılan enerji
E_s	Geri dönebilen şekil değiştirme enerjisi
E_h	Plastik şekil değiştirmeyle dağıtılan enerji, çevrimsel enerji
E_a	Soğurulan enerji
E_i	Bağıl giriş enerjisi
E_i'	Mutlak giriş enerjisi
f_s	Yapısal kuvvet
F	F-istatistiği
FS	Fourier genlik spektrumu
I_A	Arias şiddeti
I_D	Cosenza ve Manfredi sismik indeksi
I_E	İvme kaydı şiddeti
k	BSD sistemin yatay rijitliği
L	En küçük kareler hata fonksiyonu
m	BSD sistemin kütlesi

M	Deprem moment büyüklüğü
μ	Süneklik katsayısı
μ_c	Çevrimsel süneklik katsayısı
n_{eq}	Eşdeğer çevrim sayısı (Manfredi, 2001)
N	Çözüm sayısı, örnek sayısı
N_a	Normalleştirilmiş soğurulan enerji
N_e	Eşdeğer çevrim sayısı
N_h	Normalleştirilmiş çevrimsel enerji
OH	Ortalama hata, hataların aritmetik ortalaması
Ort	Aritmetik ortalama
Ω_v	Eşdeğer giriş enerjisi hızı için büyültme çarpanı
Ω_v^*	Büyültme çarpanının en büyük değeri
ω	Açısal frekans
pdf	Olasılıksal dağılım fonksiyonu
PGA	En büyük yer ivmesi
PGV	En büyük yer hızı
PSA	Spektral sözde ivme
PSV	Spektral sözde hız
PSV_{T_e}	Sözde hız spektrumunda karakteristik periyoda karşılık gelen spektral sözde hız
R	Korelasyon katsayısı
R_{epc}	Dış merkez uzaklığı
R_y	Dayanım azaltma katsayısı
RMSE	Hataların karelerinin ortalamasının karekökü, standart hata
R^2, r^2	Hesaba katılan varyans oranı
σ	Standart sapma
SD	Spektral yerdeğiştirme
SH	Standart hata
S_I	Spektrum şiddeti
SSE	Hataların karelerinin toplamı
t	Yer kaydı süresi, t-istatistiği
t_d	Etkili yer hareketi süresi (Trifunac ve Brady, 1975)

t_{d75}	Etkili yer hareketi süresi (Somerville vd., 1997)
t_{uni}	Üniform yer hareketi süresi (Bolt, 1973)
T	BSD sistemin doğal titreşim periyodu
T_1	Geçiş periyodu
T_e	Karakteristik periyot, eşdeğer doğal titreşim periyodu
T_g	Yer hareketinin hâkim periyodu
T_s	%5 sönümlü elastik sözde hız spektrumunda spektral sözde hızın en büyük değerini aldığı periyot
τ	Normalleştirilmiş periyot (T/T_e)
u	BSD sistemde kütlelerin yere göre bağıl yerdeğiştirmesi
u_e	En büyük elastik yerdeğiştirme
u_g	Taban yerdeğiştirmesi
u_m	En büyük elastik olmayan yerdeğiştirme
u_y	Elastik olmayan sistemde akma yerdeğiştirmesi
\dot{u}	Bağıl hız
\ddot{u}	Bağıl ivme
\ddot{u}_g	Yer ivmesi
\ddot{u}_t	Toplam ivme
V_e	Eşdeğer giriş enerjisi hızı
V_{s30}	30m derinliğe kadarki ortalama kayma dalga hızı
ξ_e	Eşdeğer viskoz sönüm oranı

KISALTMA LİSTESİ

ANOVA	Analysis of variance
ATC	Applied Technology Council
BSD	Bir serbestlik dereceli
ÇSD	Çok serbestlik dereceli
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GNR	R_y grupları için grup numarası
GNtd	t_d grupları için grup numarası
NEHRP	National Earthquake Hazards Reduction Program
NGA	Next generation attenuation of ground motions
PEER	Pacific Earthquake Engineering Research Center
YB	Yer hareketinin yatay bileşeni
ZS	NEHRP tanımlamasına göre zemin sınıfı
ZTAÇ	Zaman tanım alanında çözümleme

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Yer hareketi etkisindeki BSD elastik sistemin matematiksel modeli.....	2
Şekil 1.2	Yatay kuvvet etkisindeki BSD elastik sistemin matematiksel modeli	2
Şekil 1.3	BSD elastik bir sistemde bağıl giriş enerjisi	5
Şekil 1.4	BSD elastoplastik bir sistemde bağıl giriş enerjisi	6
Şekil 1.5	BSD elastoplastik bir sistemde bağıl ve mutlak giriş enerjileri	9
Şekil 1.6	Değişik yazarlar tarafından önerilmiş yakın-fay tanımlamaları.....	19
Şekil 2.1	BSD elastoplastik sistemlerde kinetik ve giriş enerjileri	29
Şekil 2.2	Giriş enerjisi spektrumları (Yerel zemin sınıfı: B).....	30
Şekil 2.3	Giriş enerjisi spektrumları (Yerel zemin sınıfı: C).....	31
Şekil 2.4	Giriş enerjisi spektrumları (Yerel zemin sınıfı: D).....	31
Şekil 2.5	Farklı zemin sınıfları için ortalama giriş enerjisi spektrumları	32
Şekil 2.6	Farklı dayanım azaltma katsayıları için ortalama giriş enerjisi spektrumları	33
Şekil 2.7	Farklı zemin sınıfları için ortalama elastik sözde hız ve eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları	34
Şekil 2.8	Farklı zemin sınıfları için normalleştirilmiş giriş enerjisi spektrumları	35
Şekil 2.9	Farklı zemin sınıfları için normalleştirilmiş ortalama giriş enerjisi spektrumları	36
Şekil 2.10	Farklı zemin sınıfları için normalleştirilmiş eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları.....	36
Şekil 2.11	Normalleştirilmiş elastik sözde-hız ve eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları....	37
Şekil 2.12	Normalleştirilmiş elastik sözde-hız ve eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları....	38
Şekil 2.13	Ortalama enerji spektrumları (Zemin Sınıfı: B)	39
Şekil 2.14	Ortalama enerji spektrumları (Zemin Sınıfı: C)	40
Şekil 2.15	Ortalama enerji spektrumları (Zemin Sınıfı: D).....	41
Şekil 2.16	Doğal titreşim periyotlarının histogramı.....	43
Şekil 2.17	Normalleştirilmiş periyotların histogramı.....	43
Şekil 2.18	Değişik parametreler için saçılım grafikleri ve korelasyonları	45
Şekil 2.19	Değişik parametreler için saçılım grafikleri ve korelasyonları	46
Şekil 2.20	Değişik parametreler için saçılım grafikleri ve korelasyonları	47
Şekil 2.21	Değişik parametreler için saçılım grafikleri ve korelasyonları	48
Şekil 2.23	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=1)	51
Şekil 2.24	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=2)	52
Şekil 2.25	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=3)	52
Şekil 2.26	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=4)	53

Şekil 2.27	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=5)	53
Şekil 2.28	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=6)	54
Şekil 2.29	Farklı R_y grupları için t-testi sonucunda elde edilen t değerleri spektrumu.....	55
Şekil 2.30	Farklı R_y grupları için ANOVA sonucunda elde edilen F değerleri spektrumu ...	56
Şekil 2.32	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNtd=1).....	58
Şekil 2.33	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNtd=2).....	58
Şekil 2.34	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNtd=3).....	59
Şekil 2.35	Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNtd=4).....	59
Şekil 2.36	Farklı t_d grupları için t-testi sonucunda elde edilen t değerleri spektrumu	61
Şekil 2.37	Farklı t_d grupları için ANOVA sonucunda elde edilen F değerleri spektrumu.....	61
Şekil 2.38	Ortalama giriş enerjisi hızı spektrumları (m/s) ve varyasyon katsayıları	62
Şekil 2.39	Gözlenen ve tahmin edilen giriş enerjisi hızı değerleri ($0.1 \leq T/T_e < 1.0$).....	64
Şekil 2.40	Gözlenen ve tahmin edilen giriş enerjisi hızı değerleri ($1.0 \leq T/T_e \leq 3.0$).....	65
Şekil 2.41	Gözlenen ve tahmin edilen giriş enerjisi hızı değerleri ($0.1 \leq T/T_e \leq 3.0$).....	65
Şekil 2.42	Ortalama giriş enerjisi spektrumları (m^2/s^2).....	66
Şekil 2.43	Ortalama giriş enerjisi hızı spektrumları (m/s) ve ağırlıklı ortalama hatalar	66
Şekil 2.44	Toplam sapmalar ve standart hatalar (2.4 denklemi).....	67
Şekil 2.45	Hataların varyasyon katsayıları (2.4 denklemi).....	67
Şekil 2.46	Önerilen alternatif denklem (2.5 denklemi) için ağırlıklı ortalama hatalar ve varyasyon katsayıları	68
Şekil 2.47	Hataların olasılıksal ve birikimsel dağılım eğrileri ($T/T_e=1.5$).....	70
Şekil 2.48	Ortalama hatalar ve hatalar için güven aralıkları (2.4 denklemi).....	71
Şekil 2.49	Ortalama eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumu ve hatalar için güven aralıkları (2.4 denklemi).....	71
Şekil 2.50	Ortalama giriş enerjisi hızı spektrumları (m/s).....	72
Şekil 2.51	Ağırlıklı ortalama hatalar (2.4 denklemi)	73
Şekil 2.52	Hataların varyasyon katsayıları (2.4 denklemi).....	73
Şekil 2.53	Gözlenen ve tahmin edilen en büyük giriş enerjisi hızı değerleri	75
Şekil 2.54	Farklı λ değerleri için giriş enerjisi hızlarının değerlendirilmesi	76
Şekil 2.55	Farklı λ değerleri için giriş enerjisi hızlarının değerlendirilmesi	77
Şekil 2.56	Ortalama giriş enerjisi hızı spektrumları (m/s).....	78
Şekil 2.57	Ağırlıklı ortalama hatalar	78
Şekil 2.58	Standart hatalar	79
Şekil 2.59	Toplam saplamalar.....	79
Şekil 2.60	Hataların varyasyon katsayıları	80

Şekil 2.61	Şematik giriş enerjisi spektrumu	81
Şekil 2.62	İdealleştirilmiş sözde-ivme ve sözde-hız spektrumları.....	82
Şekil 2.63	BSD elastik sistemlerde sözde-ivme, sözde-hız ve giriş enerjisi spektrumları.....	83
Şekil 2.64	T_e ve (2.1) denklemi ile bulunan T_1 periyotları.....	84
Şekil 2.65	T_e ve T_s periyotları.....	84
Şekil 2.66	Zaman tanım alanında çözümleme ve önerilen denklem ile bulunan T_e değerleri	86
Şekil 2.67	Hataların histogramı	86
Şekil 2.68	Ortalama ve standart hatalar	88
Şekil 2.69	T_e ve (2.15) denklemi ile bulunan T_1 periyotları	89
Şekil 2.70	T_e ve (2.16) denklemi ile bulunan T_1 periyotları	89
Şekil 2.71	Farklı dayanımlar için karakteristik periyotlar	90
Şekil 2.72	Farklı dayanımlar için ortalama ve standart sapmalar	91
Şekil 2.73	Zaman tanım alanında hesaplanan α oranları.....	101
Şekil 2.74	Zaman tanım alanında hesaplanan ve tahmin edilen çevrimsel enerji değerleri .	102
Şekil 2.75	Zaman tanım alanında hesaplanan ortalama giriş ve çevrimsel enerji spektrumları.....	102
Şekil 2.76	Zaman tanım alanında hesaplanan ortalama giriş ve çevrimsel enerji spektrumları.....	103
Şekil 2.77	Ortalama çevrimsel enerji spektrumları.....	103
Şekil 2.78	Ortalama çevrimsel enerji spektrumları ve ağırlıklı ortalama hatalar (2.23 denklemi).....	104
Şekil 2.79	Standart hatalar (2.23 denklemi)	104
Şekil 2.80	Toplam sapma (2.23 denklemi)	105
Şekil 2.81	Hataların varyasyon katsayıları (2.23 denklemi).....	105
Şekil 2.82	Ortalama hatalar ve güven aralıkları.....	106
Şekil 2.83	Ortalama çevrimsel enerji spektrumu ve hatalar için güven aralıkları	106
Şekil 3.1	ZTA hesaplanan ve tahmin edilen süneklik katsayısı değerleri	111
Şekil 3.2	ZTA hesaplanan ve tahmin edilen süneklik katsayısı değerleri	112
Şekil 3.3	ZTA hesaplanan ve tahmin edilen süneklik katsayısı değerleri	112
Şekil 3.4	Zaman tanım alanında hesaplanan ve tahmin edilen en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme değerleri (m).....	113
Şekil 3.5	Ortalamalar ve varyasyon katsayıları (ZTAÇ sonuçları)	113
Şekil 3.6	Farklı dayanımlar için ortalamalar ve varyasyon katsayıları (ZTAÇ sonuçları). 114	
Şekil 3.7	Ortalama enerji spektrumları ve yerdeğiştirme sünekliği istemleri.....	114

Şekil 3.8	Çevrimsel enerji ve yerdeğiştirme sünekliği istemleri (ZTAÇ sonuçları).....	115
Şekil 3.9	Normalleştirilmiş çevrimsel enerji ve yerdeğiştirme sünekliği istemleri	116
Şekil 3.10	Farklı dayanımlar için normalleştirilmiş çevrimsel enerji ve yerdeğiştirme sünekliği istemleri (ZTAÇ sonuçları)	117
Şekil 3.11	Ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri	118
Şekil 3.12	Ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri	118
Şekil 3.13	Ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri	119
Şekil 3.14	Ağırlıklı ortalama hatalar (3.2 denklemi)	120
Şekil 3.15	Hataların varyasyon katsayıları (3.2 denklemi).....	120
Şekil 3.16	Önerilen alternatif denklem (3.7 denklemi) için ağırlıklı ortalama hatalar ve varyasyon katsayıları.....	121
Şekil 3.17	Önerilen iteratif yaklaşımın akış şeması	123
Şekil 3.18	ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama normalleştirilmiş çevrimsel enerji istemleri.....	124
Şekil 3.19	ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama normalleştirilmiş çevrimsel enerji istemleri.....	124
Şekil 3.20	ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri.....	125
Şekil 3.21	ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri.....	126
Şekil 3.22	ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri.....	126
Şekil 3.23	ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama μ/R_y oranları	127
Şekil 3.24	ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama μ/R_y oranları	128
Şekil 3.25	Ortalama μ/R_y oranları ve ağırlıklı ortalama hatalar	129
Şekil 3.26	Farklı dayanımlar için ağırlıklı ortalama hatalar (önerilen yöntem)	129
Şekil 3.27	Toplam sapmalar (önerilen yöntem).....	130
Şekil 3.28	Standart hatalar (önerilen yöntem)	130
Şekil 3.29	Hataların varyasyon katsayıları (önerilen yöntem)	131
Şekil 3.30	Farklı dayanımlar için hataların varyasyon katsayıları (önerilen yöntem)	131
Şekil 3.31	Hataların olasılıksal ve birikimsel dağılım eğrileri ($T/T_e=1.5$).....	133
Şekil 3.32	Ortalama hata (μ/R_y) ve güven aralıkları	134
Şekil 3.33	Ortalama (μ/R_y) ve hatalar için güven aralıkları	134

Şekil 3.34	Farklı R_y 'ler için ortalama hata (μ/R_y) ve güven aralıkları.....	135
Şekil 3.35	Farklı R_y 'ler için ortalama (μ/R_y) ve hatalar için güven aralıkları	136
Şekil 3.36	Farklı yöntemler ile hesaplanan C_R oranlarının ortalamaları	139
Şekil 3.37	Ağırlıklı ortalama hatalar	140
Şekil 3.38	Toplam sapmalar	140
Şekil 3.39	Hataların varyasyon katsayıları	141
Şekil 3.40	Ortalamalar.....	142
Şekil 3.41	Ağırlıklı ortalama hatalar	143
Şekil 3.42	Hataların varyasyon katsayıları	144
Şekil 3.43	Doğal titreşim periyotlarının histogramı (filtrelenmiş veritabanı)	146
Şekil 3.44	Normalleştirilmiş periyotlarının histogramı (filtrelenmiş veritabanı)	146
Şekil 3.45	Farklı dayanımlar için ortalamalar ve varyasyon katsayıları (ZTAÇ sonuçları). 147	
Şekil 3.46	Farklı yöntemler ile hesaplanan C_R oranlarının ortalamaları (filtrelenmiş veritabanı).....	148
Şekil 3.47	Ağırlıklı ortalama hatalar (filtrelenmiş veritabanı)	148
Şekil 3.48	Hataların varyasyon katsayıları (filtrelenmiş veritabanı)	149
Şekil 4.1	Eşdeğer çevrim sayısının tanımı.....	150
Şekil 4.2	Puerta La Cruz yer hareketi kaydı yatay bileşeni.....	152
Şekil 4.3	Newport Bch yer hareketi kaydı yatay bileşeni.....	152
Şekil 4.4	Mercato San Severino yer hareketi kaydı yatay bileşeni	153
Şekil 4.5	Oakland Title&Trust yer hareketi kaydı yatay bileşeni.....	153
Şekil 4.6	B sınıfı zemin grubu için ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri.....	154
Şekil 4.7	C sınıfı zemin grubu için ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri.....	154
Şekil 4.8	D sınıfı zemin grubu için ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri.....	155
Şekil 4.9	Ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri ve varyasyon katsayıları.....	155
Şekil 4.10	Çevrimsel enerji, yerdeğiştirme sünekliği ve eşdeğer çevrim sayısı istemleri ...	156
Şekil 4.11	Normalleştirilmiş çevrimsel enerji, yerdeğiştirme sünekliği ve eşdeğer çevrim sayısı istemleri	157
Şekil 4.12	Ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri ve ağırlıklı ortalama hatalar.....	158
Şekil 4.13	Toplam sapmalar, standart hatalar ve hataların varyasyon katsayıları.....	159
Şekil 4.14	Ortalama hata (N_e) ve güven aralıkları.....	160
Şekil 4.15	Ortalama (N_e) ve hatalar için güven aralıkları.....	160
Şekil 4.16	Farklı R_y 'ler için ortalama hata (N_e) ve güven aralıkları	161
Şekil 4.17	Farklı R_y 'ler için ortalama (N_e) ve hatalar için güven aralıkları.....	162
Şekil 4.18	Deney elemanı geometrisi (Lehman ve Moehle, 2000).....	166

Şekil 4.19 Köprü ayağının göçme öncesi hasar durumu (Lehman ve Moehle, 2000).....	166
Şekil 4.20 İkili doğrusal kapasite eğrisi	167
Şekil 4.21 Olema-Point Reyes Sta. yer hareketi kaydı.....	167
Şekil 4.22 Binanın matematiksel modeli (Sap2000 ver.10)	170
Şekil 4.23 Tipik kat planı ve kolon-kiriş kesitleri.....	171
Şekil 4.24 Tasarım spektrumları (FEMA 450, $S_{DS}=1.00g$, $S_{D1}=0.90g$)	172
Şekil 4.25 Kapasite eğrisi	172
Şekil 4.26 Kapasite diyagramı	173
Şekil 4.27 Kapasite diyagramı	175
Şekil 5.1 Önerilen yöntem	180

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	B sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri	20
Çizelge 1.2	C sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri	21
Çizelge 1.3	C sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri (devam)	22
Çizelge 1.4	D sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri	23
Çizelge 1.5	D sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri (devam)	24
Çizelge 2.1	Korelasyon katsayıları matrisi	44
Çizelge 2.2	Dayanımlara göre oluşturulan gruplar.....	50
Çizelge 2.3	Etkili yer hareketi sürelerine göre oluşturulan gruplar.....	57
Çizelge 2.4	Ortalama ve standart hatalar	87
Çizelge 2.5	Ortalama ve standart hatalar	88
Çizelge 2.6	Farklı dayanımlar için ortalama ve standart sapmalar	91
Çizelge 2.7	Karakteristik periyot değerleri	92
Çizelge 2.8	Karakteristik periyot değerleri (devam)	93
Çizelge 2.9	Karakteristik periyot değerleri (devam)	94
Çizelge 2.10	Karakteristik periyot değerleri (devam)	95
Çizelge 2.11	Karakteristik periyot değerleri (devam)	96
Çizelge 2.12	Karakteristik periyot değerleri (devam)	97
Çizelge 2.13	Karakteristik periyot değerleri (devam)	98
Çizelge 2.14	Karakteristik periyot değerleri (devam)	99
Çizelge 4.1	Hasar indeksi (Park, Ang ve Wen, 1987).....	164
Çizelge 4.2	Malzeme özellikleri, MPa (Lehman ve Moehle, 2000).....	165
Çizelge 4.3	İterasyon özeti.....	169
Çizelge 4.4	Çözümleme sonuçları	170
Çizelge 4.5	İterasyon özeti.....	177

ÖNSÖZ

Mühendislik hayatım boyunca akıl hocalığımı yapmış, desteğini hiç esirgememiş olan Prof. Zekeriya Polat'a, bu çalışmaya katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. O'nun gibi değerli bir bilimadamı, düşünür ve müthiş bir mühendis ile çalışmış olmak benim için tarif edilemez bir onur kaynağıdır. Meslek hayatımın emekleme döneminde, Prof. Zekeriya Polat ile birlikte, Yrd. Doç. Dr. Murat Serdar Kırçıl ile de tanışma ve çalışma fırsatını yakalamış olmam, eğitim hayatımda bir dönüm noktası olmuştur. Bu iki değerli bilim adamının üzerimdeki emekleri benim için tartışılmazdır. Bu çalışmanın her aşamasında, en az benim kadar katkıları bulunan; bugüne kadar bana bir baba ve ağabey yakınlığında davranan bu iki değerli insana minnettarım.

"Mühendis-Bilimadamı nasıl olmalıdır?" sorusuna cevap olarak verebileceğim iki örnek isimden birisi Prof. Zekeriya Polat ise, diğeri şüphesiz ki Prof. Dr. Mehmet Nuray Aydınoglu'dur. Her fırsatta değerli fikirlerine başvurduğum; gerek çalışmalarından, gerekse ikili görüşmelerimizden feyzaldığım değerli hocama, hiç esirgememiş olduğu desteğinden, ilgisinden ve çalışmaya katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

İlk aşamasından beri çalışmaya değerli fikirleriyle önemli katkılar sağlamış olan Doç. Dr. Bülent Akbaş'a teşekkürlerimi sunarım. Kurumdaki çalışma ortamımı verimli kılan, desteğini hiç eksik etmeyen değerli hocam Prof. İbrahim Ekiz'e, bana gösterdiği sabır ve duyduğu güven için teşekkür ederim.

Benim için en anlamlı, aynı zamanda tarif etmekte en çok zorlandığım gönül borcu, şüphesiz ki sevgili eşim Didem'e duyduğum minnettir. Verdiği sınırsız destek ve gösterdiği sabrın yanında, yazımdaki katkıları için de kendisine ne kadar teşekkür etsem azdır. O olmasaydı, bu çalışma da var olamazdı.

Yetişmemdeki en büyük rol sahipleri biricik annem ve babam, Gülsen ve Erol Hancıoğlu'na; en küçük kardeş olmanın güzelliğini bana hep hissettiren, yeri geldiğinde bana anne ve babalık yapmış olan sevgili kardeşlerim, ablam Necmiye Ünver ve ağabeyim Süleyman Hancıoğlu'na sonsuz şükranlarımı sunarım.

O'nun eksikliğini tarif etmeye kelimeler yetmez. Varolduğum sürece benimle yaşayacak olan sevgili babam, güzel insan Erol Hancıoğlu'nun anısına...

Baykal Hancıoğlu

İstanbul, Temmuz 2009

ÖZET

Güncel sismik tasarım yöntemleri; yeni yapıların depreme dayanıklı tasarımında veya mevcut yapıların sismik değerlendirilmesinde, performansa dayalı tasarım kavramına yönelmektedir. Bu bağlamda; enerji isteminin değerlendirilmesi, tasarımı iyileştirmede, hasar değerlendirmelerinde veya sismik risk tahmininde etkili bir araç olarak kabul edilebilir.

Bu çalışmada; sıkı zeminlerde kaydedilmiş uzak-fay yer hareketleri altında, dayanımı belirli bir-serbestlik-dereceli (BSD) elastoplastik sistemlerde *giriş enerjisi*, *çevrimsel enerji* ve *en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme istemi* için istatistiksel değerlendirmeler yapılmış ve bunların tahmini için bazı yapısal ve sismik parametrelere bağlı bağıntılar geliştirilmiştir. Aynı zamanda; elastik davranış spektrumlarından hareketle, *yer hareketinin karakteristik periyodunun* tahmin edilmesine yönelik bir bağıntı da önerilmiştir.

Çevrimsel enerji ve yerdeğiştirme sünekliği istemi, yapı davranışının doğası gereği birbirine bağlı parametrelerdir. Bu nedenle, yerdeğiştirme sünekliği isteminin çevrimsel enerjiye bağlı olarak tahmin edilebilmesine izin veren iteratif bir yöntem geliştirilmiş ve önerilmiştir. Önerilen yöntem ile hem elastik olmayan yerdeğiştirme hem de enerji isteminin tahmin edilebilmesi; çevrimsel istemin bir göstergesi sayılabilecek eşdeğer çevrim sayısı ve bazı enerji esaslı, düşük-çevrimli yorulma etkisini dikkate alan hasar indekslerinin tahminini de olanaklı kılmaktadır.

Giriş enerjisi ve yerdeğiştirme sünekliğinin tahmininde girdi olarak kullanılan sismik parametrelerin (etkili yer hareketi süresi ve Cosenza ve Manfredi sismik indeksi I_D) yeterince güvenilir olarak tahmin edilemediği durumlar da göz önüne alınarak, önerilen bağıntılar belli bir güvenilirlikle basitleştirilmiştir. Böylelikle; önerilen yöntem ile dayanımı belli BSD bir sistem için *giriş enerjisi*, *çevrimsel enerji*, *en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme istemi* ve bunlara bağlı olarak *çevrimsel istem (eşdeğer çevrim sayısı)* sadece elastik davranış spektrumları girdi olarak kullanılarak tahmin edilebilmektedir.

Bu çalışmada önerilen bağıntılar ve yöntem, literatürde yer alan benzer başlıca yaklaşımlarla karşılaştırılmış ve önerilen yaklaşımın oldukça tatminkâr olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: çevrimsel enerji, giriş enerjisi, karakteristik periyot, en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme, eşdeğer çevrim sayısı, çevrimsel istem

ABSTRACT

The current seismic design methodologies for both earthquake resistant design of new structures and assessment of seismic vulnerability of existing structures are tending to the concept of the performance based design. In this sense, the evaluation of the seismic energy demand becomes an effective tool to optimize the design and to estimate the potential seismic damage and seismic hazard.

In this study, an iterative procedure is proposed in order to estimate the maximum inelastic displacement demand of a single-degree-of-freedom (SDOF) system with a certain lateral strength through the energy dissipated under an earthquake ground motion excitation. Thus, various statistical analyses are performed to develop the equations for estimating hysteretic and input energy spectra in terms of a number of structural and seismic parameters, considering an extensive earthquake ground motion database which includes a total of 268 far-field records, two horizontal components from 134 recording stations located on firm soil sites. Moreover, an equation is proposed for estimation of the characteristic period of ground motion by use of only elastic response spectra.

Estimation of hysteretic energy and maximum inelastic displacement demands by proposed method allows further evaluation on cyclic demand by means of equivalent number of cycles and on certain energy based damage indices which consider the low cycle fatigue.

The simplified version of the proposed equations estimating the input energy and maximum inelastic displacement are also developed considering the absence of reliable estimations of the seismic parameters used in the proposed equations such as the effective duration of strong ground motion and the Cosenza and Manfredi seismic index I_D . Thus, the proposed method allows to estimate the input energy, the hysteretic energy, the maximum inelastic displacement and the cyclic demands of a SDOF system by using only the elastic response spectra.

The input energy and the maximum inelastic displacement demands estimated by proposed method in this study are compared with those estimated by the approaches previously proposed by other authors and it is found that the proposed method yields satisfactory results.

Keywords: hysteretic energy, input energy, characteristic period, maximum inelastic displacement, equivalent number of cycles, cyclic demand

1. GİRİŞ

Yapıların deprem davranışının tahmini için gerekli olan bilgiler temelde üç grupta toplanabilir: Deprem girdisi, yapıdan beklenen performansa bağlı olarak yer hareketinin yapıdan istemi (talep) ve yapının kapasitesi. İstem; deprem girdisine, yapının davranış ve kapasitesiyle istemin karşılıklı etkileşimine bağlıdır ve bu nedenle tahmini karmaşıktır. İstem doğrusal olmayan zaman tanım alanında çözümlemeyle elde edilmesi çoğu zaman karışık ve zaman alıcıdır. Bu nedenle birçok ön-standart, standart ve benzeri belgede doğrusal olmayan zaman tanım alanında çözümleme yerine, doğrusal-elastik veya doğrusal olmayan davranışı dikkate alan ancak nispeten kısıtlı seviyede sismik ve yapısal parametreyi içeren yaklaşımlar önerilmiştir. Doğrusal olmayan davranışı dikkate alan önemli yaklaşımlardan bazıları şunlardır: Kapasite Spektrumu Yöntemi (ATC 40) ve Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi (FEMA 356).

Depremler oldukça düzensiz yer hareketleri olmalarına karşın, yapıya geçen giriş enerjisi (input energy) oldukça kararlı bir parametredir (Chou ve Uang, 2000; Manfredi, 2001; Akbaş ve Shen, 2003). Yer hareketi ile yapıya geçen giriş enerjisinin bir kısmı sönüm ile dağıtılırken (dissipated damping energy), diğer kısmı çevrimsel enerji ile dağıtılmaktadır (dissipated hysteretic energy). Yer hareketi sonunda yapılarda oluşan hasar ise sadece elastik olmayan şekil değiştirmeler ile dağıtılan enerjiyle (çevrimsel enerji) ilişkilidir (Manfredi, 2001). Bu çalışmada; yapının en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme istemi ile yapının enerji soğurma ve dağıtma kapasitesi (yapının kinetik enerjisi soğurma yeteneği ve/veya yapıya geçen kinetik enerjisi dönüştürme hızı) arasındaki ilişkinin irdelenmesi ve değişik sismik ve yapısal parametrelerin sismik enerji ve en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme istemi üzerindeki duyarlılığının incelenmesi amaçlanmıştır.

1.1 Temel Sismik Enerji Terimleri

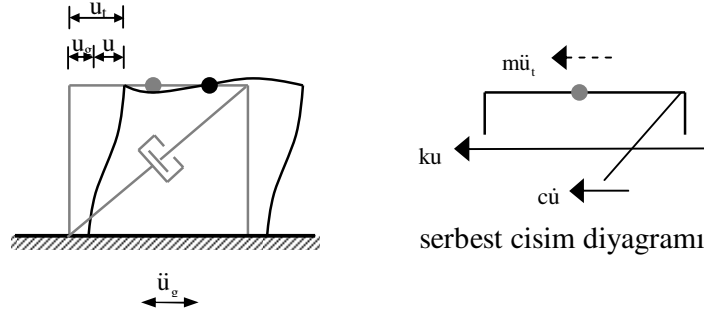
1.1.1 Bir Serbestlik Dereceli (BSD) Sistemlere Sismik Enerji Girişi

Şekil 1.1'de matematiksel modeli görülen, yer hareketi etkisinde sönümlü tek serbestlik dereceli elastik bir sistemin herhangi bir t anındaki genel hareket denklemi, D'Alembert prensibine göre

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + ku = 0 \quad (1.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada m kütleyi, c viskoz sönüm katsayısını, k sistemin yatay rijitliğini,

$u_t (=u+u_g)$ kütle için toplam yerdeğiştirmesini, u sistem kütle için yere (mesnedine) göre bağlı yerdeğiştirmesini ve u_g taban yerdeğiştirmesini (yer hareketini) göstermektedir.



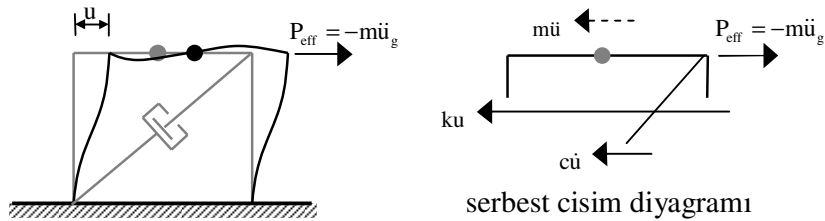
Şekil 1.1 Yer hareketi etkisindeki BSD elastik sistemin matematiksel modeli

Elastik olmayan sistemler içinse, (1.1) eşitliğinde “ ku ” elastik tepkisi yerine $f_s(u, \dot{u})$ doğrusal olmayan tepkisi yerleştirilirse, (1.2) hareket denklemi elde edilir. Burada $f_s(u, \dot{u})$ yapısal kuvvettir (restoring force).

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = 0 \quad (1.2)$$

(1.1) denklemi ile verilen BSD sistemin yer hareketi etkisindeki davranışını farklı bir şekilde tanımlamak da mümkündür. (1.1) de \ddot{u}_t yerine $\ddot{u}_t = \ddot{u}_g + \ddot{u}$ yerleştirilip, denklem uygun şekilde tekrar düzenlenirse, matematiksel modeli Şekil 1.2’de verilen, sabit tabanlı, $P_{\text{eff}} (= -m\ddot{u}_g)$ deprem yükü etkisindeki BSD sistemin hareket denklemine dönüşür:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (1.3)$$



Şekil 1.2 Yatay kuvvet etkisindeki BSD elastik sistemin matematiksel modeli

Benzer şekilde elastik olmayan sistemler için de hareket denklemi,

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g \quad (1.4)$$

şeklinde yazılabilir.

(1.1) ve (1.3) eşitliklerinde hareket denklemleri verilmiş iki farklı modelde, tanımlanmış olan bağıl yerdeğiştirmeler birbirine denk olmasına rağmen, hareket denklemlerinin integrasyonu ile elde edilen kinetik ve giriş enerjilerinin tanımları farklı olur. Matematiksel modeli Şekil 1.1’de verilmiş, tabanı u_g yer hareketi etkisinde yer değiştiren sistemin hareket denklemlerinden elde edilen kinetik ve giriş enerjisi terimlerine *mutlak enerji* (absolute energy); matematiksel modeli Şekil 1.2’de verilmiş tabanı sabit, kütle m ve $P_{eff} (= -m\ddot{u}_g)$ kuvveti etkileyen sistemin hareket denklemlerinden elde edilen kinetik ve giriş enerjisi terimlerine ise *bağıl enerji* (relative energy) denir. Mutlak ve bağıl giriş (transfer) enerjilerinin zaman tanım alanındaki değişimleri birbirinden oldukça farklı olmasına rağmen; sabit bir süneklik katsayısı için mutlak ve bağıl enerji girişlerinin en büyük değerleri, mühendislik pratiğinde önemli olan 0.3s~5s periyot aralığındaki yapılar için birbirine oldukça yakındır (Uang ve Bertero, 1990). Burada; yapısal kuvvetlerin bağıl hız ve bağıl yerdeğiştirmeye bağlı olmasından hareketle, enerji terimlerini, mutlak hız ve yerdeğiştirme yerine bağıl hareket terimlerinden elde etmek daha anlamlıdır (Chopra, 2001, Bruneau ve Wang, 1996).

1.1.1.1 Bağıl Enerji Terimleri

Elastik olmayan bir sistemde bağıl enerji, (1.3) de verilmiş olan hareket denkleminin integrasyonu ile elde edilebilir:

$$\int_0^u m\ddot{u}(t)du + \int_0^u c\dot{u}(t)du + \int_0^u f_s(u, \dot{u})du = -\int_0^u m\ddot{u}_g(t)du \quad (1.5)$$

(1.5) eşitliğinin sağ tarafı, deprem hareketinden dolayı sisteme geçen enerjiyi gösterir:

$$E_i(t) = -\int_0^u m\ddot{u}_g(t)du \quad (1.6)$$

(1.6) da tanımlanan giriş enerjisi (input energy) E_i , sisteme etkileyen P_{eff} kuvvetinin bağıl yerdeğiştirmeye yaptığı işe eşittir.

(1.5) in ilk terimi, kütle m ’nin bağıl hareketiyle oluşan kinetik enerjidir:

$$E_k(t) = \int_0^u m\dot{u}(t)du = \int_0^{\dot{u}} m\dot{u}(t)d\dot{u} = \frac{m[\dot{u}(t)]^2}{2} \quad (1.7)$$

(1.5) in sol tarafındaki ikinci terim, viskoz sönüm ile dağıtılan enerjiyi tarif eder:

$$E_d(t) = \int_0^u c \dot{u}(t) du \quad (1.8)$$

(1.5) eşitliğinin üçüncü terimi ise; geri dönebilen (elastik) şekil değiştirme enerjisi E_s ile plastik şekil değiştirmeyle dağıtılan enerji (plastik şekil değiştirme enerjisi) E_h 'nin toplamıdır. E_h için çalışmanın bundan sonraki kısımlarında *çevrimsel enerji* (hysteretic energy) deyimini kullanılacaktır. Geri dönebilen şekil değiştirme enerjisi,

$$E_s(t) = \frac{[f_s(t)]^2}{2k} \quad (1.9)$$

ile belirlenebilir. Burada k elastik olmayan sistemin başlangıç (elastik) rijitliğidir. Böylelikle çevrimsel enerji (1.10) eşitliğiyle bulunabilir.

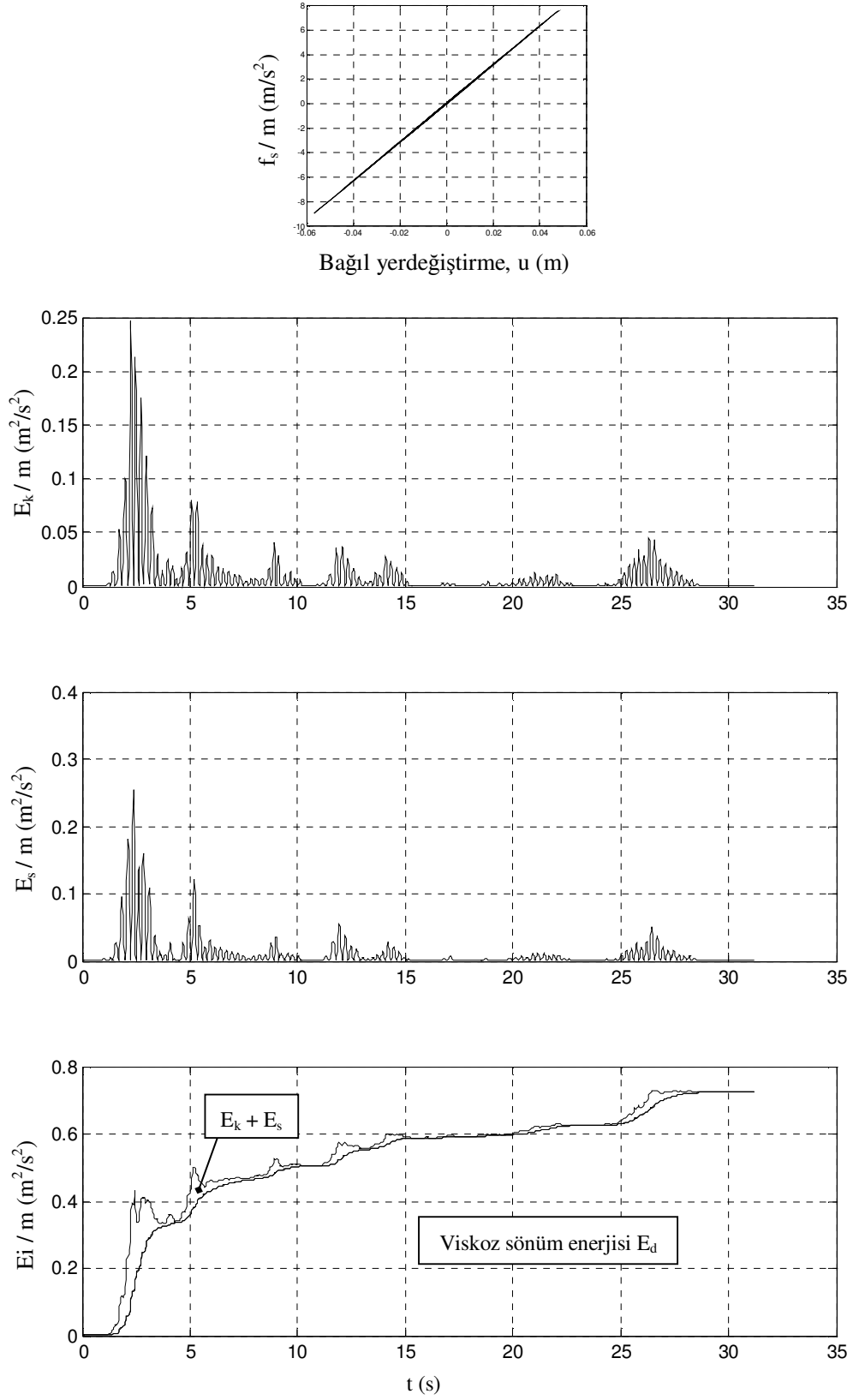
$$E_h(t) = \left[\int_0^u f_s(u, \dot{u}) du \right] - E_s(t) \quad (1.10)$$

Bu enerji terimlerini zamana bağlı integrasyon ile tanımlamak da mümkündür:

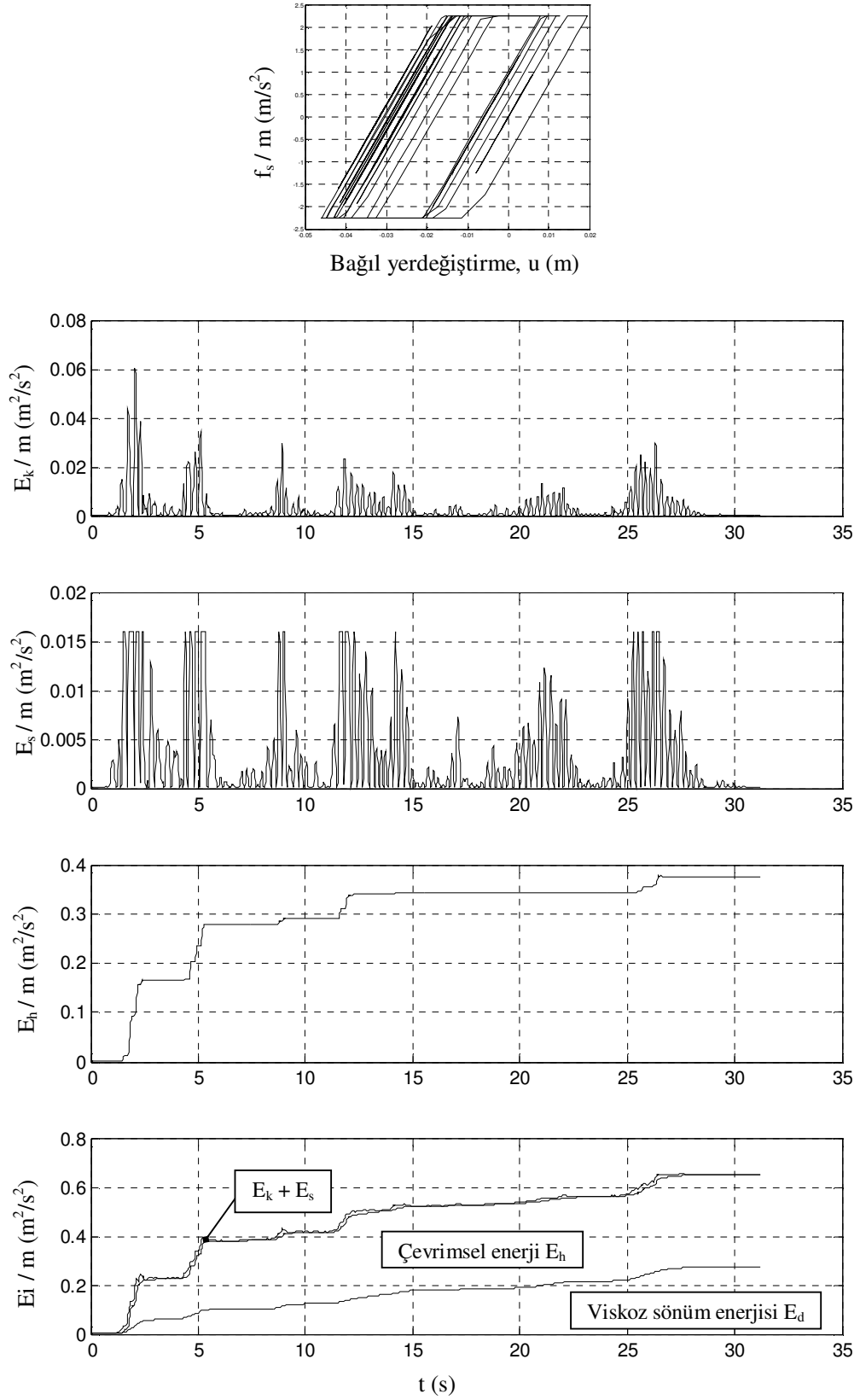
$$E_d(t) = \int_0^t c [\dot{u}(t)]^2 dt \quad (1.11)$$

$$E_h(t) = \left[\int_0^t \dot{u}(t) f_s(u, \dot{u}) dt \right] - E_s(t) \quad (1.12)$$

Örnek olarak aşağıda; serbest titreşim periyodu 0.5s, viskoz sönüm oranı $\xi = 0.05$ olan elastik bir sistem ile elastik bölgede aynı özelliklere sahip, dayanım azaltma katsayısı $R_y=4$ olan elastoplastik bir sistemin El Centro yer hareketi (K-G bileşeni, Imperial Valley 1940 Depremi) altında enerji terimleri hesaplanmıştır. Hesaplanan enerji terimlerinin zamana bağlı değişimleri ve sistemlerin *kuvvet – yerdeğiştirme* ilişkileri Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.3 BSD elastik bir sistemde bağıl giriş enerjisi, $T=0.5s$, $\xi = 0.05$ (El Centro yer hareketi, K-G bileşeni, Imperial Valley 1940 Depremi)



Şekil 1.4 BSD elastoplastik bir sistemde bağıl giriş enerjisi, $T=0.5s$, $\xi = 0.05$, $R_y=4$ (El Centro yer hareketi, K-G bileşeni, Imperial Valley 1940 Depremi)

Şekil 1.3 ve 1.4'ten de görüldüğü gibi; elastik sistemin periyodu ve elastik olmayan sistemin başlangıç periyodu ile viskoz sönüm oranları aynı olmasına rağmen, aynı yer hareketi altında sistemlere giren enerji miktarları farklıdır; en azından teorik olarak böyledir. Kinetik ve geri dönebilen şekil değiştirme enerjisi yer hareketinin sonuna doğru iyice azalmakta olduğundan; yapıya giren toplam enerji elastik sistemde viskoz sönümle, elastik olmayan sistemde ise viskoz sönüm ve akmayla (plastik şekil değiştirmeyle) dağıtılmaktadır. Yer hareketi altında elastik olmayan sistemde oluşan bağıl hızlar, elastik sisteme göre daha küçük olduğundan; viskoz sönümle dağıtılan enerji de, elastik sisteme göre daha azdır.

Şekil 1.4'te gösterilen çevrimsel enerji yapıya gelen istemin bir göstergesidir. Eğer bu enerji istemi, sistemin akmasıyla dağıtılabiliyorsa, dayanım azaltma katsayısı $R_y=4$ alınarak tasarım yapılabilir demektir. Ne var ki, tekrarlanan akmayla dağıtılan enerji yapıda hasara yol açmakta ve yer hareketi sonunda plastik şekil değiştirme meydana gelmektedir (Chopra, 2001).

1.1.1.2 Mutlak Enerji Terimleri

Elastik olmayan bir sistemde mutlak enerji, (1.2) de verilmiş olan hareket denkleminin integrasyonu ile elde edilebilir:

$$\int_0^u m\ddot{u}_t(t)du + \int_0^u c\dot{u}(t)du + \int_0^u f_s(u, \dot{u})du = 0 \quad (1.13)$$

(1.13) ün ilk teriminde bağıl yerdeğiştirme u yerine $u = u_t - u_g$ yazılırsa,

$$\begin{aligned} \int_0^u m\ddot{u}_t(t)du &= \int_0^u m\ddot{u}_t(t)(du_t - du_g) = \int_0^{u_t} m \frac{d\dot{u}_t(t)}{dt} du_t - \int_0^{u_g} m\ddot{u}_t(t)du_g \\ &= \int_0^{u_t} m\dot{u}_t(t)d\dot{u}_t - \int_0^{u_g} m\ddot{u}_t(t)du_g = \frac{m\dot{u}_t(t)^2}{2} - \int_0^{u_g} m\ddot{u}_t(t)du_g \end{aligned} \quad (1.14)$$

elde edilir. (1.14) eşitliği (1.13) de ilk terimin yerine yazılırsa, (1.15) de görülen mutlak enerji eşitliği bulunur.

$$\frac{m[\dot{u}_t(t)]^2}{2} + \int_0^u c\dot{u}(t)du + \int_0^u f_s(u, \dot{u})du = \int_0^{u_g} m\ddot{u}_t(t)du_g \quad (1.15)$$

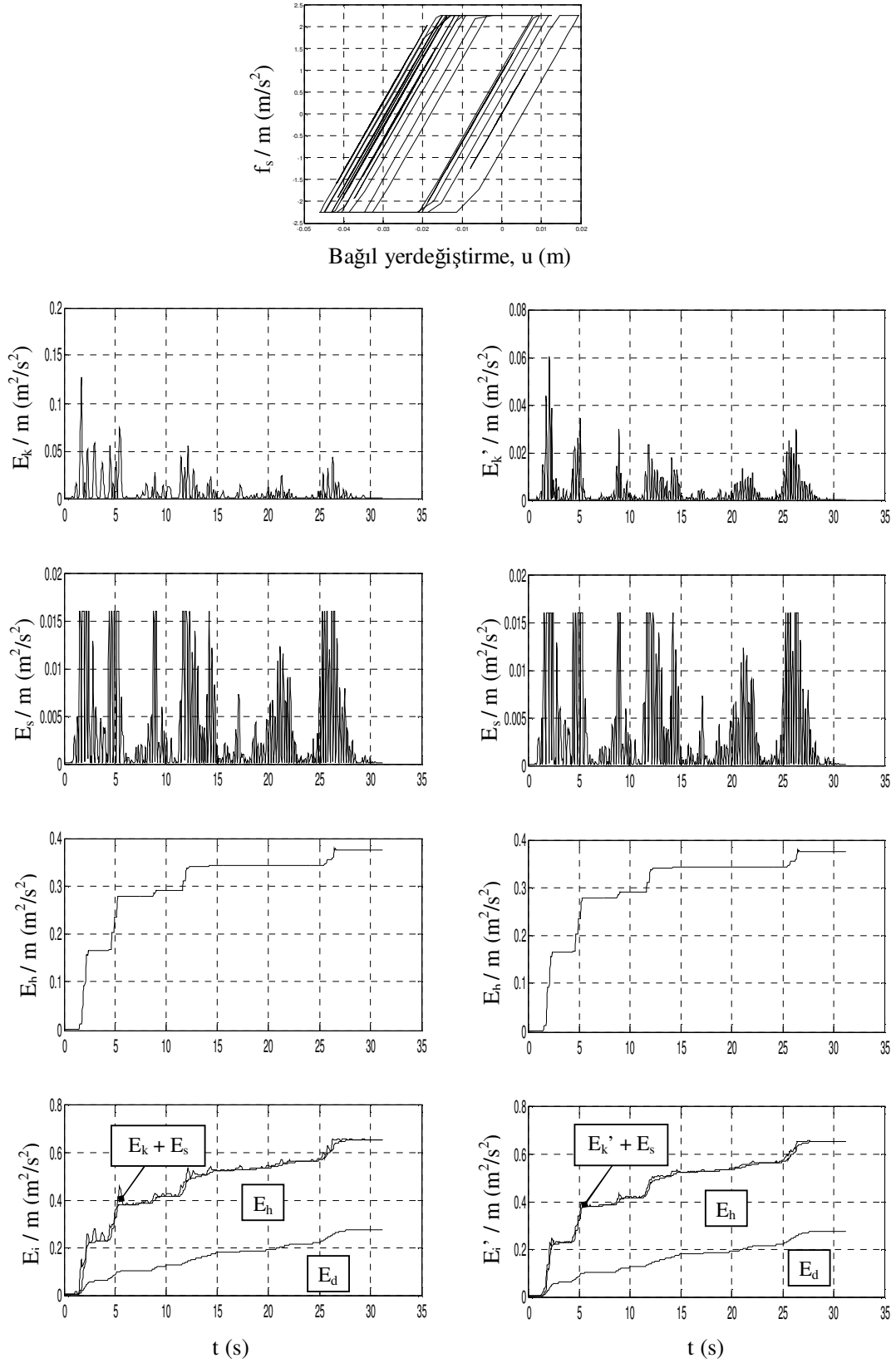
Burada (1.15) in ilk terimi E'_k , mutlak kinetik enerjiyi göstermektedir:

$$E'_k = \frac{m[\dot{u}_t(t)]^2}{2} \quad (1.16)$$

(1.15) eşitliğinin sağ tarafı ise mutlak giriş enerjisini verir ve taban kesme kuvvetinin taban yerdeğiştirmesi u_g ile yaptığı işi tarif eder:

$$E'_i = \int_0^{u_g} m\ddot{u}_t(t)du_g \quad (1.17)$$

(1.15) in ikinci ve üçüncü terimleri, sırasıyla, viskoz sönüm ve yapısal kuvvet ile dağıtılan enerjileri ifade eder ve bağıl enerji eşitliğindeki terimlerle (1.8-1.10) tanım olarak aynıdır. Şekil 1.5'te El Centro yer hareketi (K-G bileşeni, Imperial Valley 1940 Depremi) altında BSD elastoplastik bir sisteme giren bağıl ve mutlak giriş enerjileri zaman tanım alanında gösterilmiştir.



Şekil 1.5 BSD elastoplastik bir sistemde bağıl ve mutlak giriş enerjileri, $T=0.5s$, $\xi = 0.05$, $R_y=4$ (El Centro yer hareketi, K-G bileşeni, Imperial Valley 1940 Depremi)

1.1.2 Çok Serbestlik Dereceli (ÇSD) Sistemlere Sismik Enerji Girişi

ÇSD sistemler için enerji terimleri, BSD sistemler için tanımlananlara benzer şekilde elde edilebilir. N katlı bir bina için mutlak enerji girişi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E_i = \int_0^{u_g} \left(\sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_{ij}(t) \right) du_g \quad (1.18)$$

Burada m_j j. katın toplu kütlelerini ve \ddot{u}_{ij} j. kütlelerin toplam ivmesini gösterir. Bir başka deyişle E_i , her kattaki toplam atalet kuvvetlerinin taban yerdeğiştirmesi u_g ile yaptıkları işin toplamıdır. Orta yükseklikteki karma sistem çelik yapılarda (medium rise steel dual systems) gerçekleştirilen deneylerin sonuçları; çok-katlı binalardaki giriş enerjisinin, çok-katlı binanın hâkim periyodu esas alınarak BSD sistemlere giren enerjinin hesap edilmesiyle yeterli hassasiyetle tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur (Uang ve Bertero, 1990).

1.2 Literatür Araştırması

1.2.1 Giriş Enerjisi ve Çevrimsel Enerjinin Değerlendirilmesi

Enerji esaslı tasarım ilk olarak G. W. Housner (1956) tarafından önerilmiştir. Housner, yer hareketi sırasında bir yapıya geçen enerjinin bir kısmının sönüm ve yapının doğrusal olmayan davranışıyla dağıtıldığını, geri kalan kısmının ise kinetik ve elastik şekil değiştirme enerjisi olarak depolandığını göstermiştir. Housner birim kütleyle etkileyen spektral giriş enerjisinin

$$\frac{E_i}{m} = \frac{1}{2} (PSV)^2 \quad (1.19)$$

eşitliğiyle hesaplanabileceğini belirtmiştir. Burada m yapının kütlelerini, PSV ise sözde-spektral hızı göstermektedir. Housner (1.19) eşitliğinin hem elastik hem de elastik olmayan davranışta geçerli olduğu varsayımını yapmıştır.

Enerji esaslı tasarım fikrinin gelişimiyle, yer hareketinden dolayı sisteme giren enerji ve bu enerjinin sistem tarafından nasıl dağıtıldığı birçok araştırmaya konu olmuştur. McKevitt vd. (1980) dört adet ivme kaydı altında (El Centro S00E 1940, Taft N69W 1952, Parkville N65E 1956 ve Pacoima Dam S16E 1971) BSD sistemlere ve 3 ile 10 katlı yapısal özellikleri farklı binalara giren giriş enerjisini, çevrimsel enerjii ve birikimli çevrimsel enerjinin giriş enerjisine oranını hesaplamışlardır. Yazarlar, elastik olmayan şekil değiştirmeler nedeniyle dağıtılan enerjinin kuvvet-şekil değiştirme özelliklerine, akma dayanımına ve sönüme bağlı

olduğunu göstermiştir. Bununla beraber, belli bir dayanım oranı için, çevrimsel enerjinin giriş enerjisine oranının tüm sistemlerde yaklaşık olarak aynı kaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca yazarlar, ÇSD sistemlerde çevrimsel enerjinin giriş enerjisine oranının tahmini için; aynı hâkim periyoda, akma dayanımına ve sönüm oranına sahip BSD sistemlerden yararlanılabileceğini belirtmişlerdir.

Iwan (1980) elastik olmayan davranış spektrumunu, eşdeğer bir sönüm oranı ve eşdeğer bir periyot ile elastik spektrumdan yaklaşık olarak elde edebilen bir yaklaşım ortaya koymuştur. On iki adet yer hareketi kullanılan çalışmada, eşdeğer viskoz sönüm oranı (ξ_e) ve eşdeğer doğal titreşim periyodu (T_e) için

$$\xi_e = \xi + 0.0587(\mu - 1)^{0.371} \quad (1.20)$$

$$\frac{T_e}{T} = 1 + 0.121(\mu - 1)^{0.939} \quad (1.21)$$

denklemleri önerilmiştir. Burada ξ nominal viskoz sönüm oranını, T doğal titreşim periyodunu ve μ sistem süneklik katsayısını gösterir.

Zahrah ve Hall (1984) California bölgesinde kaydedilmiş sekiz adet ivme kaydı kullanarak yapısal özelliklerin giriş enerjisine duyarlılığını incelemiş ve bilineer davranışa sahip yapılarda süneklik isteminin, sönümün ve akma sonrası rijitlik oranının giriş enerjisini pek az etkilediğini belirtmişlerdir.

Akiyama (1985) üç adet yer hareketi kaydı göz önüne alarak (1.19) eşitliğinin, *kısa periyotlu* yapılar hariç, elastik olmayan durumda da kabul edilebilir olduğunu ve söz konusu çalışmada (1.19) eşitliğinde PSV yerine V_e eşdeğer hızının kullanılabileceğini belirtmiştir:

$$\frac{E_i}{m} = \frac{1}{2}(V_e)^2 \quad (1.22)$$

Bilineer bir eşdeğer hız spektrumu önerilmiş; yani kısa periyot aralığında doğrusal olarak artan, orta ve uzun periyot aralıklarında ise sabit kalan bir giriş enerjisi spektrumu kabul edilmiştir. V_e eşdeğer hızı için aşağıdaki değerler önerilmiştir:

$$\begin{aligned} V_e &= 2.5T & T &\leq T_g \\ V_e &= 2.5T_g & T &\geq T_g \end{aligned} \quad (1.23)$$

Burada T BSD sistemin doğal titreşim periyodunu, T_g ise yer hareketinin hâkim periyodunu

gösterir. Ayrıca Akiyama (1985) sabit sözde-hız bölgesi için çok katlı kayma çerçevesi tipi binalara enerji girişinin (1.19) eşitliğiyle, m yerine binanın toplam kütlesi alınarak tahmin edilebileceğini göstermiştir.

Park ve Ang (1985) betonarme yapılarda deprem hasarının değerlendirilmesi için bir hasar modeli önermişlerdir. Önerilen model; yapıda depremden dolayı oluşan hasarın, en büyük şekil değiştirme ve çevrimsel enerjiyle ilişkili olduğu önermesine dayanır.

Kuwamura ve Galambos (1989) bir-katlı yapıların sismik güvenilirlik değerlendirmesi için (seismic reliability assessment) enerji esaslı bir limit durum kriteri geliştirmişlerdir. Bu amaçla bilineer bir giriş spektrumu kabul edilmiş ve (1.22) eşitliğindeki V_e için aşağıdaki değerler önerilmiştir:

$$\begin{aligned} V_e &= \frac{\sqrt{T_g I_E}}{2} \frac{1.2T}{T_g} & T &\leq \frac{T_g}{1.2} \\ V_e &= \frac{\sqrt{T_g I_E}}{2} & T &> \frac{T_g}{1.2} \end{aligned} \quad (1.24)$$

Burada T yapının doğal titreşim periyodunu, T_g yer hareketinin hâkim periyodunu, I_E ivme kaydı şiddetini (accelerogram intensity) gösterir:

$$I_E = \int_0^t \ddot{u}_g^2 dt \quad (1.25)$$

Denklemden t ivme kaydı süresi, \ddot{u}_g yer ivmesidir. Yer hareketi sonundaki giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyodun, yaklaşık olarak yer hareketinin hakim periyoduna eşit olduğunu; ancak artan plastik çevrimin etkisiyle azalan rijitlikten dolayı söz konusu periyodun hakim periyottan daha kısa değerlere doğru kaydığı belirtilmiştir. Ayrıca yazarlar; yer hareketi etkisindeki elastik olmayan BSD sistemlerin sayısal çözümleme sonuçlarına bağlı olarak, yer hareketi sonundaki giriş enerjisinin, yapının yatay dayanımına çok da bağlı olmadığını, kritik sönümün değişikliğinden çok az etkilendiğini ve eşdeğer giriş enerjisi hız spektrumunun (V_e - T), elastik sönümlü BSD sistemin *sözde-hız spektrumuna* çok benzediğini göstermişlerdir.

Fajfar vd. (1989) kırk adet ivme kaydı göz önüne aldıkları çalışmalarında; orta-periyot aralığındaki (davranış spektrumunda hız-kontrollü bölge – intermediate periods) farklı dayanım oranlarına sahip BSD sistemler için giriş enerjisini hesaplamışlardır. Yazarlar, en büyük giriş enerjisinin tahmini için (1.26) eşitliğini önermişlerdir.

$$\left(\frac{E_1}{m}\right)_{\text{maks}} = 2.2t_d^{0.5}PGV^2 \quad (1.26)$$

Burada PGV en büyük yer hızını, t_d Trifunac ve Brady (1975) tarafından tanımlanan etkili yer hareketi süresini (effective duration of strong ground motion) gösterir:

$$t_d = t_{0.95} - t_{0.05} \quad (1.27)$$

Burada $t_{0.05}$ ve $t_{0.95}$ sırasıyla, yer hareketi sırasında (1.28) eşitliğinde verilen Arias şiddetinin (Arias, 1970) %5 ve %95'ine ulaştığı zamanları göstermektedir.

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^t \ddot{u}_g^2 dt \quad (1.28)$$

Kısa periyot aralığındaki BSD sistemlerde; hem giriş enerjisi hem de en büyük yerdeğiştirmenin yapısal ve yer hareketi parametrelerine önemli derecede bağılı olduğu belirtilmiştir.

Uzun periyot aralığındaki BSD sistemlerde ise; en büyük yerdeğiştirmenin esas olarak yerin yerdeğiştirmesine ve sönüme bağılı, kararlı bir parametre olduğu belirtilmiştir. Yapısal tasarımda en büyük yerdeğiştirmenin hâkim parametre olmasından dolayı, yazarların giriş enerjisinin tahmini için herhangi bir girişimde bulunmadıkları anlaşılmaktadır.

Fajfar vd. söz konusu çalışmada, kısa periyot aralığından orta periyot aralığına geçiş periyodunun (T_1) tahmini için Heidebrecht'in (Fajfar vd., 1989) önerdiği bağıntıyı kullanmıştır:

$$T_1 = 4.3 \frac{PGV}{PGA} \quad (1.29)$$

(1.29) eşitliğinin elastik yapısal davranışta geçerli olduğu, elastik olmayan davranışta ise; dayanıma ve çevrimsel kuvvet – yerdeğiştirme ilişkisine bağılı olarak daha küçük T_1 değerlerinin meydana geldiği belirtilmiştir. Daha kısa periyotlara doğru olan bu ötelenmenin, dayanımdaki azalma ve çevrimsel modeldeki şişmanlıkla (fatness) birlikte artmakta olduğu gösterilmiştir.

Uang ve Bertero (1990) birim kütleyle etkiyen giriş enerjisini mutlak ve bağılı hareketleri esas alarak iki farklı şekilde hesaplamış ve sonuçları değerlendirmiştir. Yazarlar, sabit bir süneklik katsayısı için mutlak ve bağılı enerji girişlerinin yer hareketi sırasında aldıkları en büyük

değerlerin; kısa ve uzun periyot aralıklarında oldukça farklı, mühendislik pratiğinde önemli olan 0.3s~5s periyot aralığındaki yapılar için birbirine oldukça yakın olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca çalışmada mutlak giriş enerjisi (E'_i) ile en büyük yer hızı (PGV) ve etkili yer hareketi süresi (t_d) arasındaki ilişki, beş adet yer hareketi kaydı için incelemiştir. %5 sönümlü, süneklik katsayısı $\mu=5$ olan BSD bir sistemde en büyük giriş enerjisinin tahmini için (1.30) eşitliği önerilmiştir.

$$\left(\frac{E'_i}{m}\right)_{\text{maks}} = \frac{1}{2}(1+0.12t_d)^2 \text{PGV}^2 \quad (1.30)$$

Leger ve Dussault (1992) üç farklı sönüm modeli (kütle orantılı, rijitlik orantılı, Rayleigh) dikkate alarak; yedi adet yapının (1,3,5,10,15,20 ve 25 katlı) enerji dağıtma istemlerine söz konusu sönüm modellerinin etkisini incelemiştir. Çalışmada üç adet yer hareketi kaydı kullanılmış ve hâkim periyodu 0.5 saniyeden kısa olan yapılarda rijitlik orantılı, 0.5 saniyeden uzun yapılarda ise Rayleigh sönüm modellerinin kullanılması önerilmiştir.

Kuwamura vd. (1994) sönümsüz elastik BSD sistemlerde eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumunun, yer ivmesinin Fourier genlik spektrumuna eşit olduğunu göstermişlerdir:

$$V_e = |\text{FS}(\omega)| = \sqrt{\frac{2E_i}{m}} \quad (1.31)$$

Burada ω açısal frekansı gösterir. Ayrıca yazarlar, çok serbestlik dereceli bir sistemde spektral giriş enerjisinin, yapının tüm modları için hesaplanmış giriş enerjilerinin doğrudan toplamıyla elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Nakashima vd. (1996) akma öncesi ve sonrası rijitlik oranlarındaki değişimin, enerji dağıtma istemi üzerindeki etkisini incelemiştir. Söz konusu çalışmada, çözümlemeler BSD ve ÇSD birçok yapı (5,10,13,15,17 ve 20 katlı) ve üç adet yer hareketi kaydı için yapılmıştır. Yazarlar, akma öncesi ve sonrası rijitlik oranının; çevrimsel enerji dağılımını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca ÇSD bir yapıya giren enerjinin eşdeğer BSD sistemden yararlanarak hesaplanabileceğini ortaya koymuşlardır.

Bruneau ve Wang (1996) dikdörtgen alanlı çarpma ve sinüs dalgası dış kuvvet (rectangular pulse and sine-wave excitation) etkisindeki BSD sistemler için kapalı formda enerji bağıntıları önermişlerdir. Uang ve Bertero (1990) tarafından önerilen mutlak ve bağıl enerji terimlerini de bu kapsamda inceleyen yazarlar; darbe şeklindeki dış etki (pulse excitation) durumunda, mutlak giriş enerjisinin hareket bitiminde dahi dalgalanmaya devam ettiğini gözlemiş ve bu

nedenle kavram (concept) olarak bir çelişki içerdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca yazarlar; bağıl enerji terimlerinin, mühendislik pratiğinde yaygın olarak kullanılan parametrelerle yakın ilişkileri nedeniyle, mutlak enerji terimlerine göre tercih edilebilir olduğunu belirtmişlerdir.

Chai vd. (1998) süre-bağımlı elastik olmayan sismik tasarım spektrumu geliştirmek için bir yaklaşım önermişlerdir. Yaklaşım, uzun süreli bir yer hareketi etkisinde yapıda ortaya çıkması muhtemel elastik olmayan çevrim sayısındaki artışın, yapının yatay dayanımındaki artışla dengelenebileceği varsayımına dayanır. Sismik giriş enerjisi, istemin bir parçası olarak göz önüne alınmış ve bu enerji için yer hareketi süresine bağıl ampirik bir tahmin yapılmıştır. Çalışmada, Akiyama (1985) ve Kuwamura ve Galambos (1989) tarafından önerilen bilineer eşdeğer hız spektrumu benimsenmiştir. Yazarlar, eşdeğer giriş enerjisi hızını en büyük yer hızı (PGV) ve bir büyültme çarpanının (Ω_v) çarpımı şeklinde tanımlamıştır:

$$V_e = \Omega_v PGV \quad (1.32)$$

Buradaki büyültme çarpanı Ω_v yer hareketi parametrelerine ve yapının doğal titreşim periyoduna (T) bağlıdır. Eşdeğer giriş enerjisi hız spektrumunu tanımlayan büyültme çarpanı için

$$\Omega_v = \begin{cases} 1.2\Omega_v^* T/T_g & \text{eğer } T \leq T_g/1.2 \\ \Omega_v^* & \text{eğer } T > T_g/1.2 \end{cases} \quad (1.33)$$

eşitliği önerilmiştir. Burada T_g yer hareketinin hâkim periyodunu, Ω_v^* ise eşdeğer giriş enerjisi hızı için en büyük büyültme çarpanını göstermektedir:

$$\Omega_v^* = 0.69 \left(\frac{PGA}{PGV} t_d \right)^{3/8} \quad (1.34)$$

Burada t_d Trifunac ve Brady (1975) tarafından tanımlanan etkili yer hareketi süresidir.

Ye ve Otani (1999) nin çalışmasında, orta ve uzun periyot aralığındaki elastik ve elastik olmayan sistemler için çevrimsel enerji girişinin (cyclic energy input) eşit olması varsayımına dayanarak basitleştirilmiş bir ilişki önerilmiştir. Newmark'ın eşit enerji kuralı önerilen ilişkinin üst sınırını belirlerken, en büyük yerdeğiştirme yanıtının (mukabele) alt sınırı içinse yeni bir öneri geliştirilmiştir. Yazarlar, en büyük yerdeğiştirmenin ilk çevrimde meydana geldiğini varsaymıştır. Bu varsayım herhangi bir yakın-fay deprem hareketi altında yeterli akma dayanımına sahip elastik olmayan bir sistem için geçerli olabilir (örnekse; Hyogo-ken

Nanbu depremi, Kobe Marina Gözlemevi kaydı). Ancak uzak fay depremleri altında, özellikle düşük dayanımlı ve kısa periyotlu elastik olmayan sistemlerde geçerliliğini yitirir.

Chou ve Uang (2000) elastik olmayan bir sistemde geri dönebilen elastik şekil değiştirme enerjisiyle, plastik şekil değiştirme enerjisinin toplamı olan *soğurulan enerjiyi* (absorbed energy) bir *azalım ilişkisi* (attenuation relationship) önererek tahmin etmiştir. Soğurulan enerjinin kullanılmasının tercih nedeni olarak, elastik durumda sözde-hız ile doğrudan ilişkili olmasını göstermişlerdir. Önerilen *azalım ilişkisi*; toplamda 273 yer hareketi kaydı esas alınarak belirli bir deprem büyüklüğü, kaynak ile incelenen bölge arasındaki mesafe (source-to-site distance), yerel zemin sınıfı ve süneklik katsayısı için çıkarılmıştır. Yazarlar azalım ilişkisinden buldukları enerji spektrumlarına göre; sünek BSD bir sistemde istemi temsil etmesi açısından soğurulan enerjinin *kararlı bir gösterge* (indeks) olduğunu ve çevrimsel modeldeki pekleşmeye karşı duyarlılığının pek olmadığını göstermişlerdir. Ayrıca zemin sınıfının soğurulan enerji üzerinde oldukça etkili, sözde-hızın ise elastik olmayan bir sistemin enerji istem tahmininde zayıf bir gösterge olduğu belirtilmiştir.

Chai ve Fajfar (2000) Fourier genlik spektrumundan hareketle eşdeğer giriş enerjisi hızını (equivalent input energy velocity) tahmin etmiştir. Yazarlar, enerji esaslı tasarımda yaygın kullanılan bir yaklaşımla eşdeğer giriş enerjisi hızını, en büyük yer hızı (PGV) ve bir büyültme çarpanının (Ω_v) çarpımı şeklinde tanımlamıştır:

$$V_e = \Omega_v PGV \quad (1.35)$$

Eşdeğer giriş enerjisi hız spektrumunu tanımlayan büyültme çarpanı için:

$$\Omega_v = \begin{cases} \Omega_v^* \left[\frac{T}{T_g} \right] & \text{eğer } 0 \leq T \leq T_g \\ \Omega_v^* \left[\frac{T}{T_g} \right]^{-\lambda} & \text{eğer } T_g < T < \infty \end{cases} \quad (1.36)$$

denklemleri önerilmiştir. Burada $\lambda (\geq 0)$ yer hareketinin hâkim periyodundan (T_g) büyük periyotlar için spektral şekli tanımlayan bir çarpanıdır. Ω_v^* ise eşdeğer giriş enerjisi hızı için en büyük büyültme çarpanını göstermektedir:

$$\Omega_v^* = \frac{1}{Z} \frac{PGA}{PGV} \sqrt{t_d T_g} \sqrt{\frac{\lambda + 1/2}{2\lambda + 2}}, \lambda \geq 0 \quad (1.37)$$

Burada t_d Trifunac ve Brady (1975) tarafından tanımlanan etkili yer hareketi süresi, Z ise en

büyük yer ivmesinin, yer ivmesi karelerinin ortalamasının kareköküne (RMS) oranını gösteren bir çarpandır. Çalışmada bu çarpan için $Z=4$ sabit değeri önerilmiştir.

Manfredi (2001) çevrimsel ve giriş enerjisi spektrumları için basitleştirilmiş bir ifade elde etmeye imkân veren bir yöntem geliştirmiştir. Yöntem esasta depremin karakteristik özelliklerine bağlı olarak eşdeğer çevrim sayısının değerlendirilmesine dayanır. Yöntem kullanılarak süneklik istemine, sismik indeks I_D 'ye ve en büyük sözde hıza bağlı olarak çevrimsel ve giriş enerjisi elde edilebilir. Deprem karakteristik özelliklerini temsil eden sismik indeks I_D

$$I_D = \frac{I_E}{PGA \cdot PGV} \quad (1.38)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada I_E (1.25) eşitliğinde verilen ivme kaydı şiddetini, PGA ve PGV ise sırayla en büyük yer ivmesi ve hızını göstermektedir.

Manfredi, %5 sönüm oranı için eşdeğer çevrim sayısının tahmininde (1.39) eşitliğini önermiştir.

$$n_{eq} = 1 + 0.18(R_y - 1)^{3/5} I_D \tau^{-1/2} \quad (T > T_1 \rightarrow \tau = 1) \quad (1.39)$$

Burada R_y dayanım azaltma katsayısı, $\tau = T/T_1$, T_1 Newmark-Hall spektral gösteriminde orta-periyot aralığından uzun-periyot aralığına geçişi periyodu ve T sistemin elastik periyodudur. Ayrıca Manfredi, (1.39) eşitliğiyle belirlenen eşdeğer çevrim sayısına bağlı olarak spektral çevrimsel enerji ve spektral giriş enerjisinin tahmini için de aşağıdaki eşitlikleri önermiştir:

$$\frac{E_h}{m} = (\mu_c - 1) n_{eq} (PSV)^2 \left(\frac{1}{R_y} \right)^2 \quad (1.40)$$

$$\frac{E_i}{m} = 1.4 \mu_c n_{eq} (PSV)^2 (1/R_y)^2 \quad (1.41)$$

Burada μ_c çevrimsel süneklik katsayısını ($= 1 + \Delta x_{max}/x_y \geq 2$), Δx_{max} plastik çevrimin en büyük genliğini ve x_y akma yerdeğiştirmesini göstermektedir. Ayrıca Manfredi, Cosenza ve Manfredi (1997) tarafından önerilen R - μ ilişkisini (1.42 eşitliği) kullanarak, enerji istemlerini sadece çevrimsel sünekliğe bağlı olarak tahmin etmiştir.

$$R_y = 1 + 1.5(\mu - 1)^{4/5} \tau^{3/4} \quad (T > T_1 \rightarrow \tau = 1) \quad (1.42)$$

$$\mu = 1 + 0.6(R_y - 1)^{5/4} \tau^{-15/16}$$

Decanini ve Mollaioli (2001) belirli bir süneklik katsayısı için elastik olmayan giriş enerjisi tasarım spektrumu geliştirmiştir. Yazarlar, elastik olmayan enerji istemini elastik durumdan yararlanarak elde etmek amacıyla iki yeni parametre tanımlamışlardır; bunlar: elastik giriş enerjisi spektral değerinin, elastik olmayan spektral değere oranını gösteren R_e *davranış düzeltme çarpanı* (response modification factor) ve 0.05-4s periyot aralığında elastik olmayan giriş enerjisi spektrumunun altında kalan alan ile elastik spektrumun altında kalan alanın oranını temsil eden α çarpanı. Önerilen tasarım spektrumu, yerdeğiştirme sünekliğine, yerel zemin sınıfına, kaynaktan bölgeye olan mesafeye ve deprem büyüklüğüne bağlıdır. Ayrıca yazarlar, çevrimsel enerjinin giriş enerjisine oranını da incelemiş ve bu oran için literatürde periyottan bağımsız önerilen bazı bağıntıların aksine, bu oranın yapının doğal titreşim periyoduna da bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Kunnath ve Chai (2004) spektral giriş enerjisinin tahmini için Chai ve Fajfar (2000) tarafından önerilen prosedürdeki büyültme çarpanı (1.36 eşitliği) için bir kalibrasyon çalışması yapmışlardır. Büyültme çarpanı için:

$$\Omega_v = \begin{cases} \Omega_v^* \left(\frac{2T}{T_g} - \left[\frac{T}{T_g} \right]^2 \right) & \text{eğer } T < T_g \\ \Omega_v^* \left[\frac{T}{T_g} \right]^{-\lambda} & \text{eğer } T > T_g \end{cases} \quad (1.43)$$

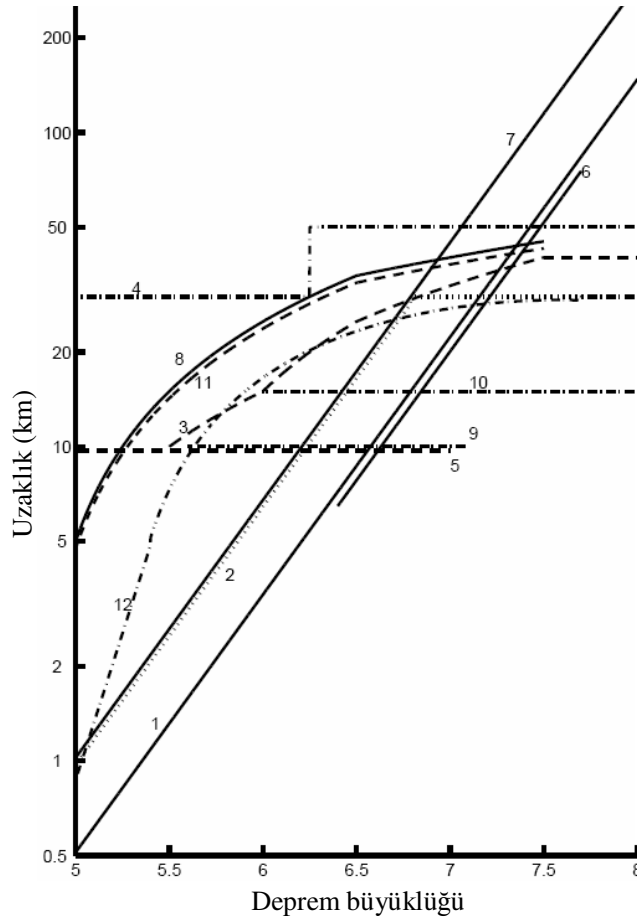
denklemleri önerilmiştir. Buradaki en büyük büyültme çarpanı Ω_v^* için Chai ve Fajfar (2000) tarafından önerilen (1.37) eşitliği aynen kullanılmıştır.

1.3 Yer Hareketi Veritabanı

Bu çalışmada kullanılan yer hareketi veritabanı; dünyanın değişik bölgelerinde, büyüklükleri 5.2 ila 7.9 arasında değişen 24 farklı deprem sırasında sıkı zeminlerde (firm soil sites) kaydedilmiş 134 adet yer hareketinin yatay bileşenlerinden oluşmaktadır (toplam 268 ivme kaydı). Kullanılan ivme kayıtları PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) NGA yer hareketi veritabanından sağlanmıştır. Depremlerin dış merkez (epicenter) mevkileri, büyüklükleri, yer hareketi istasyonları ve bunların dış merkezden uzaklıkları, yerel zemin sınıfları (NEHRP Zemin Sınıflandırması, FEMA 450, 2003) Çizelge 1.1-1.5'te verilmiştir.

Oluşturulan yer hareketi veritabanı uzak-fay deprem kayıtlarından oluşmaktadır. Yakın-fay, uzak-fay ayrımı için literatürde birçok farklı tanımlama mevcuttur. Şekil 1.5'te değişik

araştırmacılar tarafından önerilmiş, uzaklığa ve depremin büyüklüğüne bağlı çeşitli yakın-fay tanımlamaları gösterilmiştir.



Şekil 1.6 Değişik yazarlar tarafından önerilmiş yakın-fay tanımlamaları: (1) Berrill (1975), (2) Tocher vd. (1977), (3) Shteinburg vd. (1980), (4) Campbell (1981); Campbell ve Bozorgnia (1994), (5) Bolt ve Abrahamson (1982), (6) Ambraseys ve Menu (1988), (7) Hudson (1988), (8) Krinitzsky vd. (1993), (9) Nisar ve Golesorkhi (1995), (10) Ambraseys ve Simpson (1996), (11) Hu vd. (1996), (12) Mart´inez-Pereira (1999) – (Ambrasey ve Douglas, 2000 - ESEE Raporu No. 00-4)

Bu tanımlamalar dikkate alınarak literatürde yapılmış birçok çalışma sonuçlarının birbirleriyle tutarsız olması (Ambrasey ve Douglas, 2000) ve yaygın olarak kabul görmüş bir yakın-fay tanımlamasının olmaması sebebiyle; bu çalışmada deprem büyüklüğüne bağlı bir kriter kullanılmamıştır. Veritabanını yakın-fay kayıtlardan arındırmak için, dış merkez uzaklığı yaklaşık olarak 40km ve üzerinde olan istasyonların kayıtları seçilmiştir. Bu ayrıma rağmen faydan yeterli sayılabilecek uzaklıkta kaydedilmiş bazı kayıtlarda da yakın-fay özelliklerine rastlamak mümkündür. Bu tür kayıtlar da yer hareketi veritabanından çıkarılmıştır.

Çizelge 1.1 B sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri

Deprem		İstasyon	No ^{*1}	M ^{*2}	R _{epc} ^{*3}	ZS ^{*4}	Vs30 ^{*5}	
Big Bear-01	1992	Rancho Cucamonga - Deer Can	23598	6.5	69	B	822	CDMG
Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP065	99999	7.6	173	B	1023	CWB
		TAP077	99999	7.6	170	B	1023	CWB
		TCU085	99999	7.6	107	B	1000	CWB
		TTN042	99999	7.6	105	B	845	CWB
Chi-Chi, Taiwan-05	1999	TTN042	99999	6.2	92	B	845	CWB
Denali, Alaska	2002	Carlo (temp)	Carl	7.9	68	B	964	ANSS/UA
Irpinia, Italy-01	1980	Arienzo	99999	6.9	77	B	1000	ENEL
Loma Prieta	1989	Piedmont Jr High	58338	6.9	92	B	895	CDMG
		Point Bonita	58043	6.9	104	B	1316	CDMG
		SF - Pacific Heights	58131	6.9	96	B	1250	CDMG
		SF - Rincon Hill	58151	6.9	94	B	873	CDMG
		So. San Francisco, Sierra Pt.	58539	6.9	84	B	1021	CDMG
Morgan Hill	1984	Gilroy Array #1	47379	6.2	39	B	1428	CDMG
Norcia, Italy	1979	Bevagna	99999	5.9	36	B	1000	ENEL
Northridge-01	1994	Anacapa Island	25169	6.7	77	B	822	CDMG
		Antelope Buttes	24310	6.7	64	B	822	CDMG
		Lake Hughes #4 - Camp Mend	24469	6.7	50	B	822	CDMG
		Littlerock - Brainard Can	23595	6.7	61	B	822	CDMG
		Mt Wilson - CIT Seis Sta	24399	6.7	46	B	822	CDMG
		Rancho Cucamonga - Deer Can	23598	6.7	90	B	822	CDMG
		Sandberg - Bald Mtn	24644	6.7	62	B	822	CDMG
		Vasquez Rocks Park	24047	6.7	38	B	996	CDMG
		Wrightwood - Jackson Flat	23590	6.7	78	B	822	CDMG
San Fernando	1971	Pasadena - Old Seismo Lab	266	6.6	39	B	969	USGS
Sierra Madre	1991	Vasquez Rocks Park	24047	5.6	40	B	996	CDMG
Whittier	1987	LA - Wonderland Ave	90017	6.0	28	B	1223	USC
Narrows-01		Vasquez Rocks Park	24047	6.0	54	B	996	CDMG

*¹ No: İstasyon ID numarası*² M: Deprem moment büyüklüğü*³ R_{epc}: Dış merkez (epicenter) uzaklığı (km)*⁴ ZS: NEHRP tanımlamasına göre zemin sınıfı*⁵ Vs30: 30m derinliğe kadarki ortalama kayma dalga hızı (m/s)

Çizelge 1.2 C sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri

Deprem	İstasyon	No ^{*1}	M ^{*2}	R _{epc} ^{*3}	ZS ^{*4}	Vs30 ^{*5}	
Big Bear-01	1992 Newport Bch - Irvine Ave. F.S	13160	6.5	118	C	405	CDMG
Chi-Chi, Taiwan	1999 HWA029	99999	7.6	77	C	614	CWB
	HWA038	99999	7.6	69	C	643	CWB
	HWA046	99999	7.6	88	C	618	CWB
	ILA031	99999	7.6	132	C	649	CWB
	KAU012	99999	7.6	117	C	474	CWB
	TAP035	99999	7.6	140	C	438	CWB
	TAP052	99999	7.6	148	C	474	CWB
	TAP075	99999	7.6	160	C	553	CWB
	TTN025	99999	7.6	108	C	705	CWB
	TTN032	99999	7.6	90	C	474	CWB
	TTN044	99999	7.6	100	C	474	CWB
	TTN046	99999	7.6	107	C	474	CWB
Drama, Greece	1985 Kavala	99999	5.2	47	C	660	ITSAK
Irpinia, Italy-01	1980 Torre Del Greco	99999	6.9	80	C	660	ENEL
	Tricarico	99999	6.9	72	C	460	ENEL
Kern County	1952 Pasadena - CIT	80053	7.4	126	C	415	CIT
	Athenaeum						
	Santa Barbara Courthouse	283	7.4	88	C	515	USGS
Landers	1992 Arcadia - Campus Dr	90093	7.3	148	C	368	USC
	Glendale-Las Palmas	90063	7.3	165	C	446	USC
	Glendora-N Oakbank	90065	7.3	133	C	446	USC
	LA - Fletcher Dr	90034	7.3	167	C	446	USC
	La Habra - Briarcliff	90074	7.3	145	C	361	USC
	Puerta La Cruz	12168	7.3	100	C	371	CDMG
Loma Prieta	1989 Berkeley LBL	58471	6.9	98	C	597	CDMG
	Hayward - BART Sta	58498	6.9	72	C	371	CDMG
	SF - Cliff House	58132	6.9	99	C	713	CDMG
	SF - Diamond Heights	58130	6.9	92	C	583	CDMG
	SF - Presidio	58222	6.9	98	C	594	CDMG
	SF - Telegraph Hill	58133	6.9	97	C	713	CDMG
	Sunol - Forest Fire Station	1688	6.9	62	C	401	USGS
N. Palm Springs	1986 Anza - Tule Canyon	5231	6.1	60	C	685	USGS
	Murrieta Hot Springs	13198	6.1	66	C	685	CDMG
	Puerta La Cruz	12168	6.1	76	C	371	CDMG
	Temecula - 6th & Mercedes	13172	6.1	75	C	371	CDMG

Çizelge 1.3 C sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri (devam)

Deprem	İstasyon	No ^{*1}	M ^{*2}	R _{epc} ^{*3}	ZS ^{*4}	Vs30 ^{*5}	
Northridge-01	1994 Glendora - N Oakbank	90065	6.7	62	C	446	USC
	Huntington Beach - Lake St	13197	6.7	79	C	371	CDMG
	Newport Bch - Irvine Ave. F.S	13160	6.7	88	C	405	CDMG
	Newport Bch - Newport & Coast	13610	6.7	87	C	371	CDMG
	Palmdale - Hwy 14 & Palmdale	24521	6.7	57	C	552	CDMG
	Rancho Palos Verdes - Hawth	14404	6.7	53	C	478	CDMG
	Rancho Palos Verdes - Luconia	90044	6.7	56	C	509	USC
	Riverside Airport	13123	6.7	106	C	371	CDMG
	Seal Beach - Office Bldg	14578	6.7	66	C	371	CDMG
	San Fernando	1971 Upland - San Antonio Dam	287	6.6	75	C	446
Wrightwood - 6074 Park Dr		290	6.6	72	C	486	USGS
Whittier Narrows-01	1987 Castaic - Old Ridge Route	24278	6.0	77	C	450	CDMG
	Huntington Beach - Lake St	13197	6.0	44	C	371	CDMG
	Leona Valley #5 - Ritter	24055	6.0	63	C	446	CDMG
	Malibu - Las Flores Canyon	90050	6.0	51	C	623	USC
	Moorpark - Fire Sta	24283	6.0	78	C	405	CDMG
	Pacific Palisades - Sunset	90049	6.0	44	C	446	USC

*¹ No: İstasyon ID numarası*² M: Deprem moment büyüklüğü*³ R_{epc}: Dış merkez uzaklığı (km)*⁴ ZS: NEHRP tanımlamasına göre zemin sınıfı*⁵ Vs30: 30m derinliğe kadarki ortalama kayma dalga hızı (m/s)

Çizelge 1.4 D sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri

Deprem	İstasyon	No ^{*1}	M ^{*2}	R _{epc} ^{*3}	ZS ^{*4}	Vs30 ^{*5}	
Chi-Chi, Taiwan	1999 CHY065	99999	7.6	116	D	273	CWB
	KAU085	99999	7.6	119	D	261	CWB
	TAP026	99999	7.6	147	D	215	CWB
	TAP090	99999	7.6	156	D	324	CWB
	TAP095	99999	7.6	158	D	215	CWB
Dinar, Turkey	1995 Cardak	99999	6.4	50	D	339	ERD
Friuli, Italy-01	1976 Conegliano	8005	6.5	90	D	275	
Imp. Valley-06	1979 Coachella Canal #4	5066	6.5	84	D	345	USGS
Irpinia, Italy-01	1980 Bovino	99999	6.9	52	D	275	ENEL
Irpinia, Italy-02	1980 Mercato San Severino	99999	6.2	48	D	350	ENEL
Kern County	1952 LA-Hollywood S.FF	24303	7.4	118	D	316	CDMG
Kobe, Japan	1995 HIK	99999	6.9	136	D	256	
Kocaeli, Turkey	1999 Atakoy	99999	7.5	100	D	275	ITU
	Botas	99999	7.5	171	D	275	KOERI
	Cekmece	99999	7.5	108	D	346	KOERI
	Fatih	99999	7.5	94	D	339	KOERI
	Zeytinburnu	99999	7.5	95	D	275	ITU
Landers	1992 Amboy	21081	7.3	75	D	271	CDMG
	Boron Fire Station	33083	7.3	143	D	345	CDMG
	Burbank - N Buena Vista	90012	7.3	174	D	271	USC
	Compton - Castlegate St	90078	7.3	166	D	309	USC
	Fort Irwin	24577	7.3	121	D	345	CDMG
	Fountain Valley - Euclid	90002	7.3	149	D	270	USC
	LA - Obregon Park	24400	7.3	162	D	349	CDMG
	LB - Orange Ave	90080	7.3	164	D	270	USC
	Lakewood - Del Amo Blvd	90084	7.3	158	D	235	USC
	Pomona - 4th & Locust FF	23525	7.3	122	D	230	CDMG
	San Bernardino - E & Hospitality	23542	7.3	80	D	271	CDMG
	Tarzana - Cedar Hill	24436	7.3	193	D	257	CDMG
Lazio-Abruzzo, Italy	1984 Garigliano-Centrale Nucleare	99999	5.8	51	D	200	ENEL
Loma Prieta	1989 Oakland - Outer Harbor Wharf	58472	6.9	94	D	249	CDMG
	Oakland - Title & Trust	58224	6.9	92	D	306	CDMG
	Olema - Point Reyes Station	68003	6.9	138	D	339	CDMG
	Richmond City Hall	58505	6.9	107	D	260	CDMG

Çizelge 1.5 D sınıfı zeminde (NEHRP) kaydedilmiş yer hareketleri (devam)

Deprem	İstasyon	No ^{*1}	M ^{*2}	R _{epc} ^{*3}	ZS ^{*4}	Vs30 ^{*5}	
Manjil, Iran	1990 Rudsar	99999	7.4	87	D	275	BHRC
Morgan Hill	1984 Los Banos	56012	6.2	80	D	271	CDMG
	SF Intern. Airport	58223	6.2	71	D	190	CDMG
N. Palm Springs	1986 Anza Fire Station	5160	6.1	50	D	339	USGS
	Colton Interchange - Vault	754	6.1	64	D	275	CDOT
	Indio - Coachella Canal	12026	6.1	53	D	345	CDMG
Northridge-01	1994 Anaheim - W Ball Rd	90088	6.7	70	D	235	USC
	Baldwin Park - N Holly	90069	6.7	55	D	309	USC
	Brea - S Flower Av	90087	6.7	69	D	309	USC
	Featherly Park - Maint	13122	6.7	86	D	309	CDMG
	Hemet - Ryan Airfield	13660	6.7	151	D	339	CDMG
	Huntington Bch - Waikiki	90083	6.7	71	D	235	USC
	San Bernardino - E & Hospitality	23542	6.7	117	D	271	CDMG
	San Jacinto - CDF Fire Sta	12673	6.7	154	D	271	CDMG
	Tustin - E Sycamore	90089	6.7	86	D	235	USC
	Loma Linda; VA Hospital, North Freefield	5229	6.7	121	D	275	USGS
	Loma Linda; VA Hospital, South Freefield	5229	6.7	121	D	275	USGS
San Fernando	1971 Gormon - Oso Pump Plant	994	6.6	50	D	308	CDWR
Whittier Narrows-01	1987 Lancaster - Med Off FF	24526	6.0	71	D	271	CDMG
	Rosamond - Goode Ranch	24274	6.0	88	D	271	CDMG

*¹ No: İstasyon ID numarası

*² M: Deprem moment büyüklüğü

*³ R_{epc}: Dış merkez uzaklığı (km)

*⁴ ZS: NEHRP tanımlamasına göre zemin sınıfı

*⁵ Vs30: 30m derinliğe kadarki ortalama kayma dalga hızı (m/s)

1.4 Hata Ölçütleri ve İstatistiksel Değerlendirme

Bu çalışmada, elastik olmayan BSD sistemlerin yer hareketi altındaki tepkilerinin (sismik enerji ve yer değiştirme istemleri) tahmini için basitleştirilmiş bağıntılar ve iteratif bir yöntem önerilmiştir. Önerilen bağıntılar ve/veya iteratif yöntem ile tahmin edilen tepkiler $(X_i)_{\text{tahmin}}$, doğrusal olmayan zaman tanım alanında çözümlene sonuçları $(X_i)_{\text{gerçek}}$ ile karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında çözümlene ile belirlenen tepkiler, sadece kabul edilen özelliklere sahip BSD sistemler için ve belirli yer hareketleri altında “gerçek”tir. Mevcut binalara ait yapısal veya olası yer hareketlerine ait sismik parametrelerin tayinine ait varsayımlardaki belirsizlikler göz önüne alınmamıştır.

Önerilen yaklaşık yöntemlerin hassasiyetini (accuracy) bir başka deyişle uyum iyiliğini (goodness of fit) değerlendirmek için bazı istatistikler hesaplanmıştır:

Hata Ölçütü

Hata, gerçek değerler ile yaklaşık yöntemlerden elde edilmiş değerlerin farkı olarak tanımlanmıştır:

$$H_i = (X_i)_{\text{tahmin}} - (X_i)_{\text{gerçek}} \quad (1.44)$$

Hatanın sıfırdan büyük değerleri, önerilen yöntemin gerçek değeri olduğundan büyük, sıfırdan küçük değerleri ise küçük tahmin ettiğini gösterir.

Ağırlıklı Ortalama Hata

Ortalamada önerilen yöntemin gerçek değerleri olduğundan büyük veya küçük tahmin ettiğinin belirlenmesi için, ağırlıklı ortalama hata değeri hesaplanmıştır:

$$AOH = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N w_i \cdot H_i \quad (1.45)$$

Burada N örnek sayısını, w_i ağırlık parametresini gösterir. Bazı yer hareketleri altında, özellikle küçük periyotlu sistemlerde ($T < 0.3s$) meydana gelen çok büyük istemler; ilgili spektral bölgede ortalama hatada büyük sapmalara sebep olmaktadır. Dolayısıyla hataların aritmetik ortalaması alınarak yapılan değerlendirme (ortalama hata, OH) yanıltıcı olabilmektedir. Bu nedenle ortalama hatalar, gözlenen (gerçek) değere göre ağırlıklı olarak hesaplanmıştır:

$$AOH = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{1}{(X_{\text{gerçek}})_i} \cdot H_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{1}{(X_{\text{gerçek}})_i} \cdot [(X_{\text{tahmin}})_i - (X_{\text{gerçek}})_i] \quad (1.46)$$

Ayrıca ağırlıklı ortalama hatalar, göz önüne alınan her normalleştirilmiş periyot değeri (çalışmanın ilerleyen kısımlarında açıklanacaktır) ve her dayanım azaltma katsayısı için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu nedenle herhangi bir spektral bölgedeki olduğundan küçük tahmin (underestimation), diğer bölgelerdeki olduğundan büyük tahminler (overestimation) tarafından dengelenmeyecektir.

Hataların Karelerinin Toplamı (Summed squares of Errors, SSE)

Bu istatistik; tahmin edilen değerlerin gerçek değerlerden toplam sapmasını gösterir ve sifıra yaklaşan değerleri, ilgili tahmin modelinin görel olarak daha kullanışlı olduğunu gösterir.

$$SSE = \sum_i^N (H_i)^2 \quad (1.47)$$

Hataların Karelerinin Ortalamasının Karekökü (Root Mean Squared Error, RMSE)

Ortalamada, tahminin gerçek değerlere ne kadar yaklaştığının bilinmesi tek başına bir istatistiksel değerlendirme için yetersiz olmaktadır. Hataların ne kadar saçıldığının bir göstergesi olarak ise hataların karelerinin ortalamasının karekökü hesaplanmıştır.

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_i^N (H_i)^2 \right)^{1/2} \quad (1.48)$$

Bu istatistik aynı zamanda *önerilen yöntemin standart hatası* veya *regresyonun standart hatası* (standard error of the regression) olarak da bilinmektedir (MathWorks, Inc., 2009). Sifıra yaklaşan değerleri, ilgili tahmin modelinin görel olarak daha kullanışlı olduğunu gösterir.

Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında aksi belirtilmedikçe RMSE için “standart hata (SH)” deyiimi kullanılacaktır.

Varyasyon Katsayısı

Hataların varyasyon katsayısı CV_{RMSE} , hataların karelerinin ortalamasının karekökünün (RMSE) gerçek değerlerin ortalamasına oranı olarak tanımlanabilir (UCLA ATS, 2009):

$$CV_{RMSE} = \frac{RMSE}{Ort(X)_{\text{gerçek}}} \quad (1.49)$$

Normalleştirilmiş RMSE olarak da bilinen (1.49) denklemleri, hataların gerçek değerlerin ortalamasına göre yüzde olarak saçılmasını ifade eder.

2. SİSMİK ENERJİ

2.1 Giriş Enerjisi

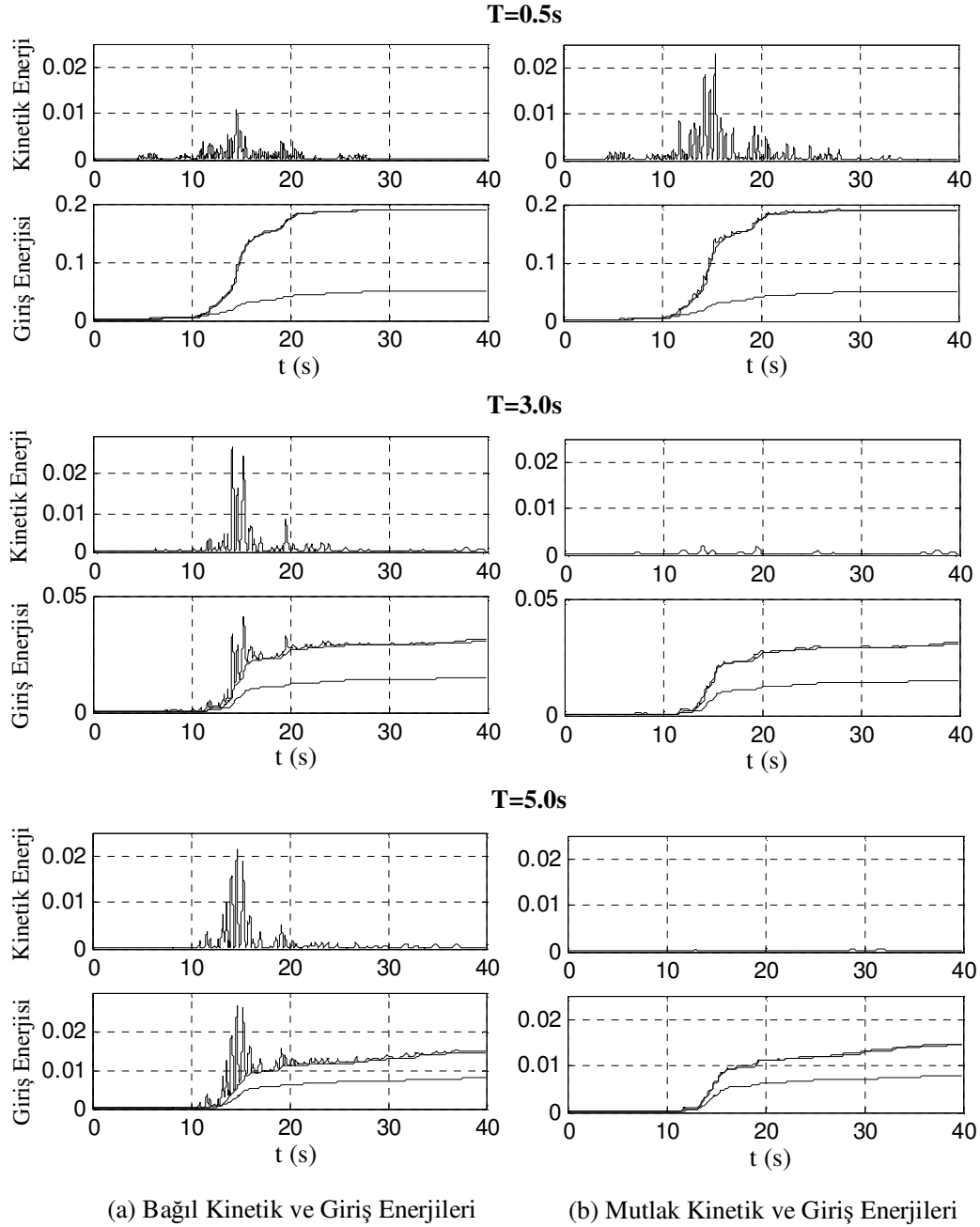
2.1.1 Duyarlılık Analizi

Akiyama (1985) yer hareketi sırasında BSD bir sisteme giren enerjinin; hem yer hareketinin karakteristik özelliklerine (etkili yer hareketi süresi, frekans içeriği, vb.), hem de sistemin yapısal özelliklerine (kütle, doğal titreşim periyodu, dayanım) bağlı olduğunu belirtmiştir (Akbaş ve Shen, 2003). Çalışmanın bu bölümünde giriş enerjisinin çeşitli parametrelere karşı duyarlılığı incelenmiştir.

BSD bir sisteme giren enerjiyi analitik olarak iki farklı şekilde; mutlak ve bağıl enerji terimlerini kullanarak tanımlamak mümkündür (Bölüm 1.1). Örnek olarak Şekil 2.1’de; Loma Prieta (1989) depremi sırasında kaydedilmiş bir yer hareketi (Oakland - Title & Trust kaydı, TIB200 yatay bileşeni) etkisinde BSD elastoplastik bir sisteme giren mutlak ve bağıl enerjiler zaman tanım alanında gösterilmiştir. Uang ve Bertero’nun (1990) çalışmasından ve Şekil 2.1’den de görülebileceği üzere; mutlak giriş enerjisi en büyük değerini yer hareketi sonunda alırken; özellikle uzun periyot aralığındaki sistemlerde ($T > 5.0s$) bağıl giriş enerjisi, yer hareketi sırasındaki herhangi bir anda yer hareketi sonundaki değerden daha büyük bir değer alabilmektedir. Bağıl giriş enerjisinin en büyük değerine ulaştığı bu anda enerjinin büyük bir kısmı bağıl kinetik enerji şeklinde soğurulmaktadır.

Mutlak ve bağıl giriş enerjileri arasındaki esas fark, kinetik enerji tanımlarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Yer hareketi sonunda rijit cisim kinetik enerjisi sıfır olduğundan ($\dot{u}_g = 0$), mutlak ve bağıl kinetik enerji tanımları arasındaki fark ortadan kalkmakta, dolayısıyla hesaplanan mutlak ve bağıl kinetik enerjiler ve buna bağlı giriş enerjileri birbirlerine eşit olmaktadır.

Önceki çalışmaların sonuçları göstermektedir ki; yer hareketi sırasında yapıda oluşacak olası hasar, soğurulan kinetik enerjiden daha çok en büyük bağıl yerdeğiştirme ve çevrimsel enerjiye bağlıdır. Bu yüzden bu çalışmada, tanım farklılığının yanılğısından uzak kalmak için, yer hareketi sırasında oluşacak en büyük bağıl giriş enerjisi yerine yer hareketi sonunda hesaplanan bağıl giriş enerjisi dikkate alınmıştır. Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında aksi belirtilmedikçe “bağıl giriş enerjisi” yerine “giriş enerjisi” deyimini kullanılacaktır.

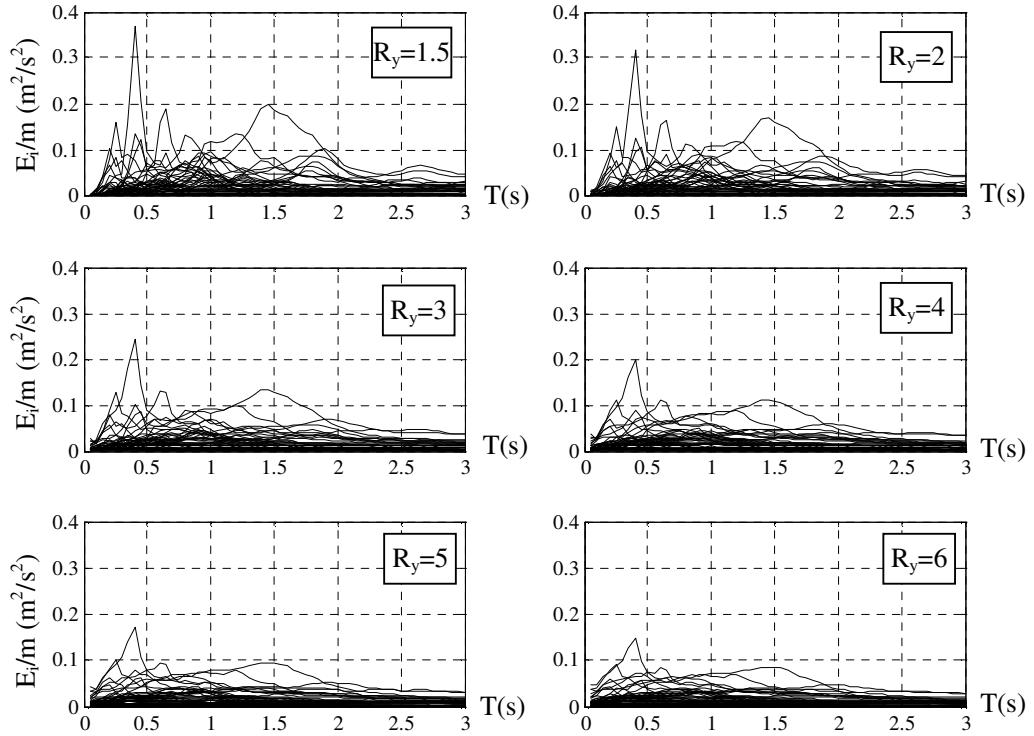


Şekil 2.1 BSD elastoplastik sistemlerde kinetik ve giriş enerjileri (m^2/s^2), $\xi = 0.05$, $R_y=4$
(Oakland - Title & Trust kaydı, TIB200 yatay bileşeni, Loma Prieta 1989 Depremi)

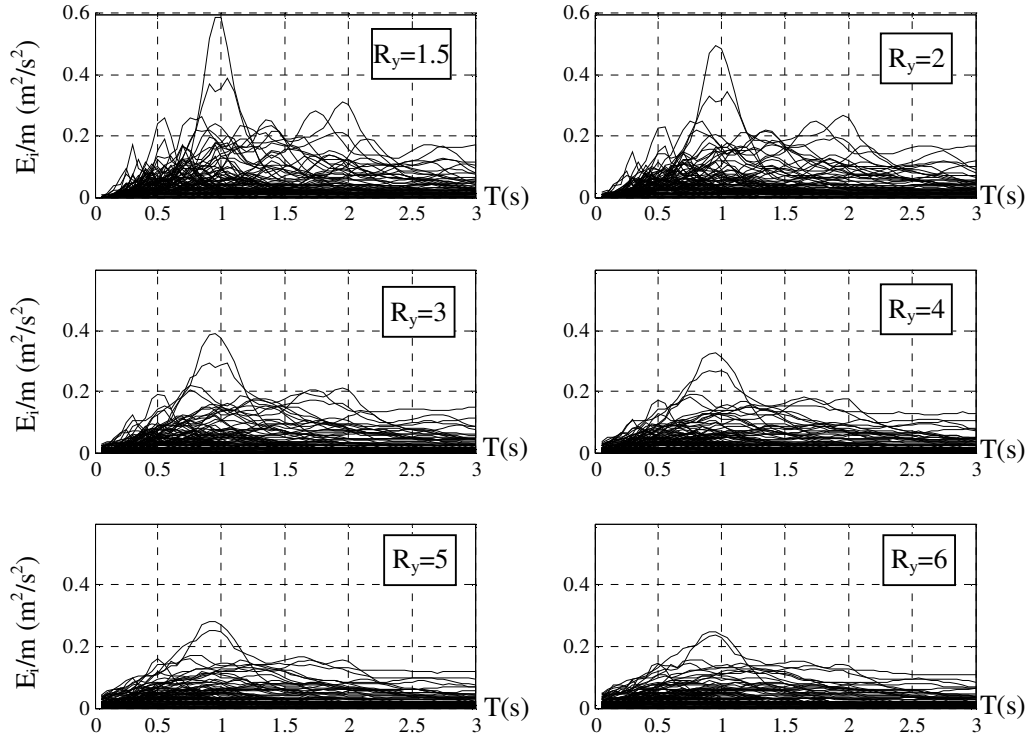
Çizelge 1.1-1.5'te verilen yer hareketleri etkisinde; doğal titreşim periyotları 0.05s ile 3.0s arasında (sabit 0.05 aralıklarla) değişen farklı dayanım azaltma katsayılarına sahip ($R_y=1.5, 2, 3, 4, 5, 6$) %5 sönümlü toplam 96480 adet BSD elastoplastik sistemin giriş enerjileri hesaplanmıştır. Zaman tanım alanında çözümlenmeler Newmark integrasyon yöntemi (ortalama-ivme) kullanılarak yapılmıştır (Chopra, 2001). Şekil 2.2-2.6'da göz önüne alınan

yerel zemin sınıflarına (NEHRP Zemin Sınıflandırması, FEMA 450, 2003) ve dayanım azaltma katsayılarına bağlı olarak giriş enerjisi spektrumları gösterilmiştir.

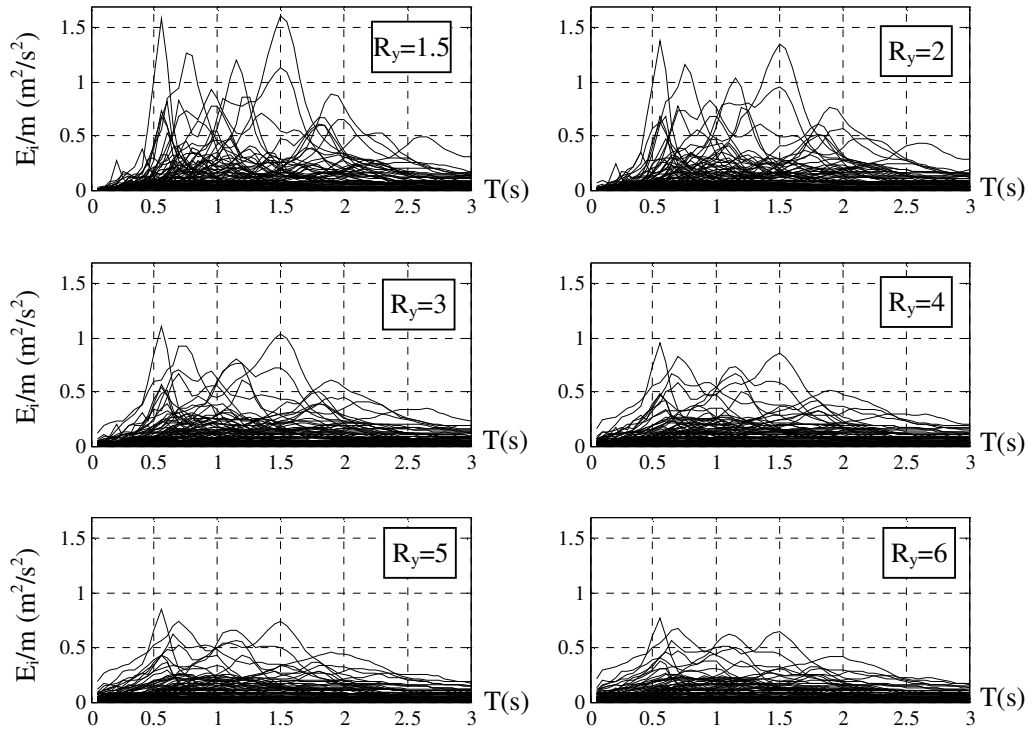
Yerel zemin sınıfının giriş enerjisi üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Zemin sıkılaştıkça sistemlere giren enerjiler de azalmaktadır. Dayanım azaltma katsayısı R_y arttıkça, küçük periyotlu yapılarda giriş enerjisinin az da olsa arttığı, büyük periyotlu yapılarda ise giriş enerjisinde azalma eğilimi bulunduğu gözlenmiştir. Şekil 2.7'de ise; farklı zemin sınıfları için ortalama elastik sözde-hız ve eşdeğer giriş enerjisi hızı ($V_e = \sqrt{2E_i/m}$) spektrumları verilmiştir.



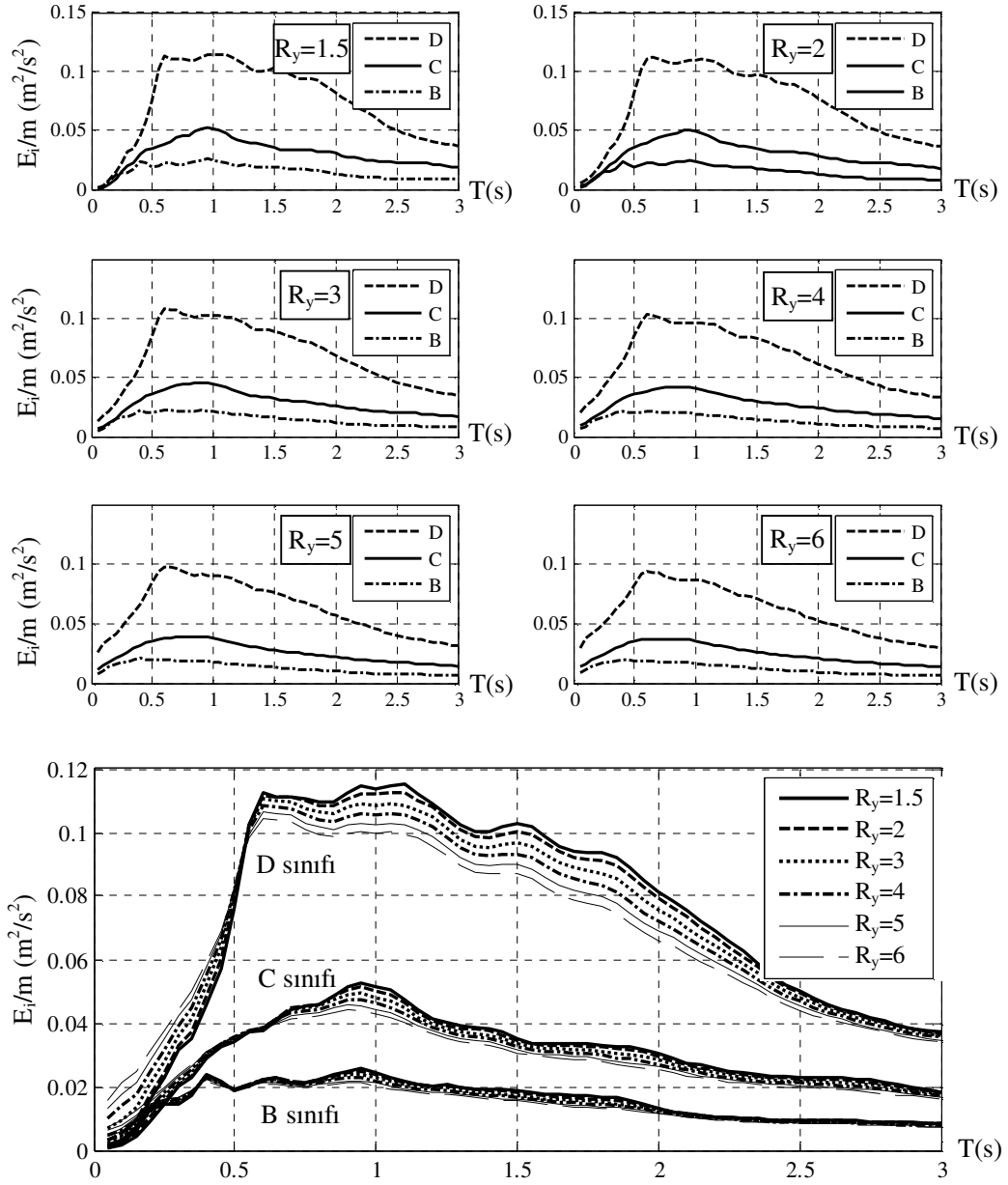
Şekil 2.2 Giriş enerjisi spektrumları (Yerel zemin sınıfı: B)



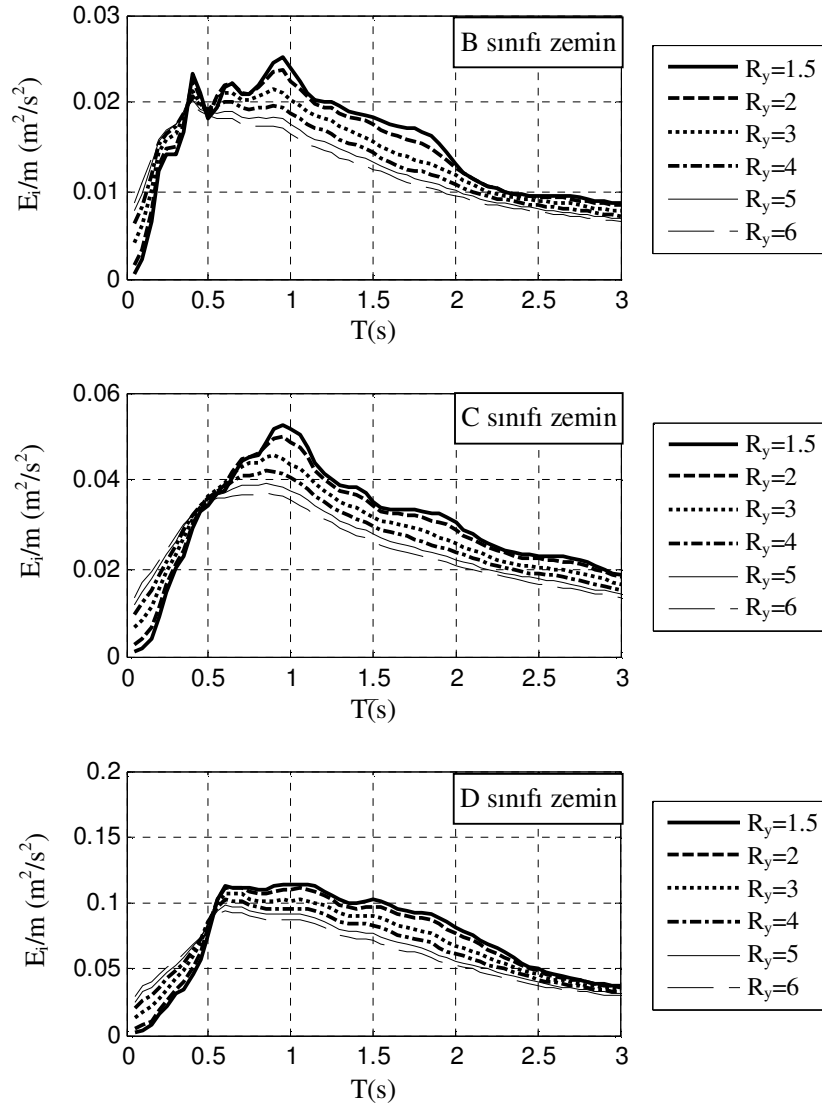
Şekil 2.3 Giriş enerjisi spektrumları (Yerel zemin sınıfı: C)



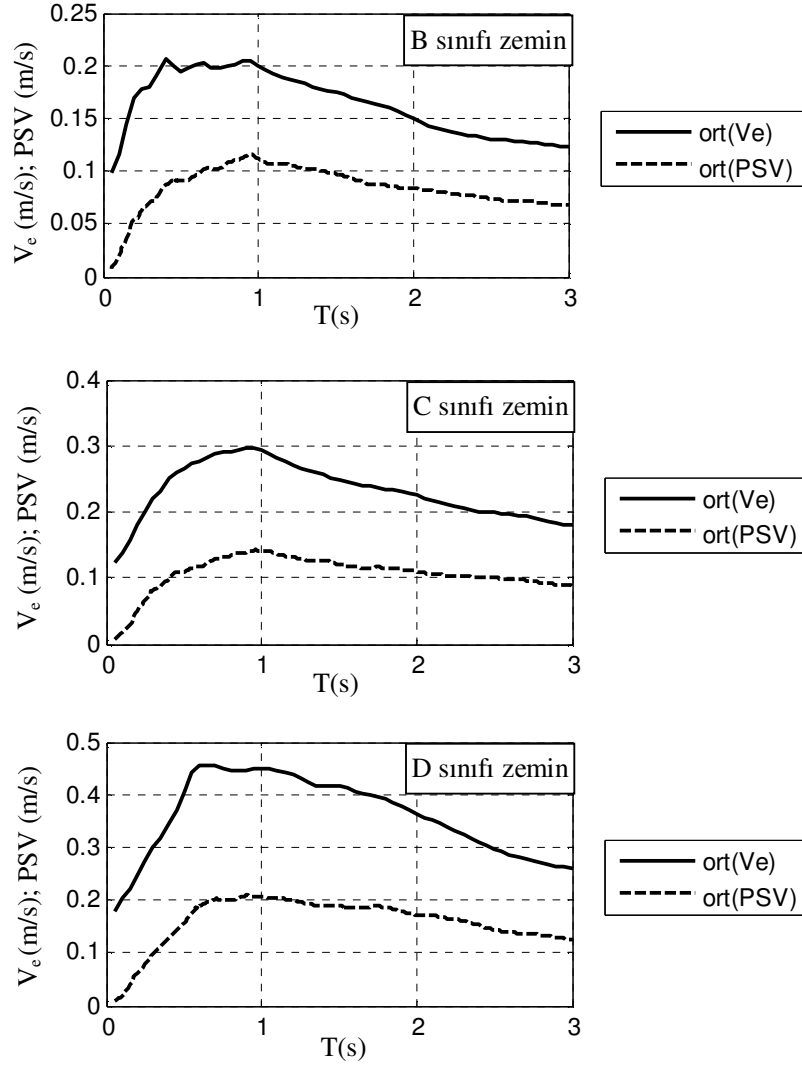
Şekil 2.4 Giriş enerjisi spektrumları (Yerel zemin sınıfı: D)



Şekil 2.5 Farklı zemin sınıfları için ortalama giriş enerjisi spektrumları



Şekil 2.6 Farklı dayanım azaltma katsayıları için ortalama giriş enerjisi spektrumları



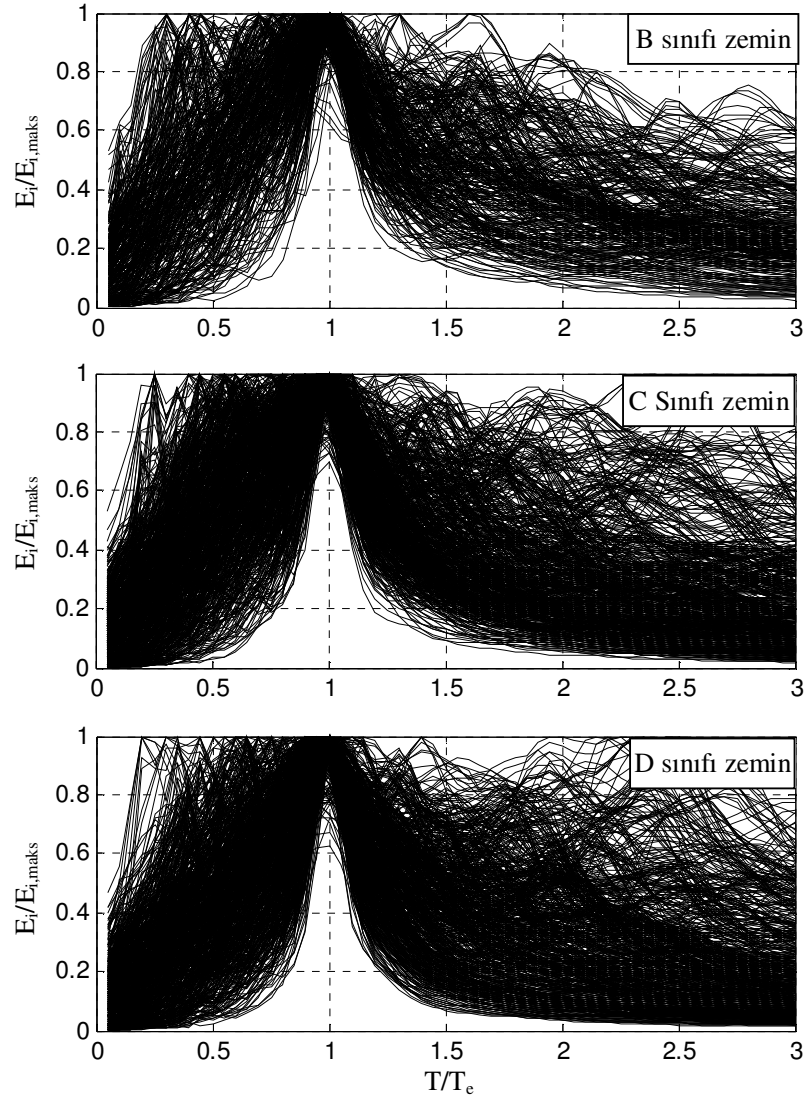
Şekil 2.7 Farklı zemin sınıfları için ortalama elastik sözde hız ve eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları

Normalleştirilmiş Giriş Enerjisi Spektrumları

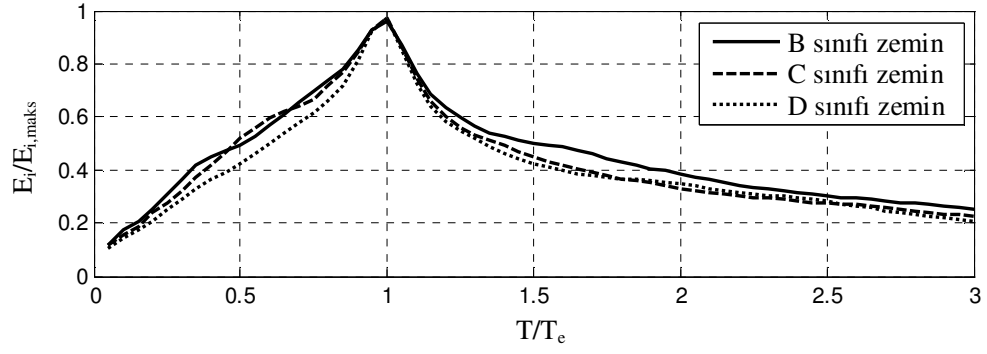
Şekil 2.2-2.4'te gösterilen giriş enerjisi spektrumlarındaki saçılmayı ortadan kaldırmak için; spektral giriş enerjisi (E_i) giriş enerjisi spektrumundaki en büyük enerji değerine ($E_{i,maks}$), sistemin doğal titreşim periyodu T ise spektral giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyoda (T_e) bölünerek boyutsuz koordinatlarla çalışılmıştır. Aksi belirtilmedikçe; çalışmanın bundan sonraki kısımlarında “spektral giriş enerjisi” yerine “giriş enerjisi”, “giriş enerjisi spektrumundaki en büyük enerji değeri” yerine de “en büyük giriş enerjisi” deyimleri kullanılacaktır.

Farklı dayanım azaltma katsayılarına sahip ($R_y=1.5, 2, 3, 4, 5, 6$), T/T_e değerleri 0.05 ile 3.0

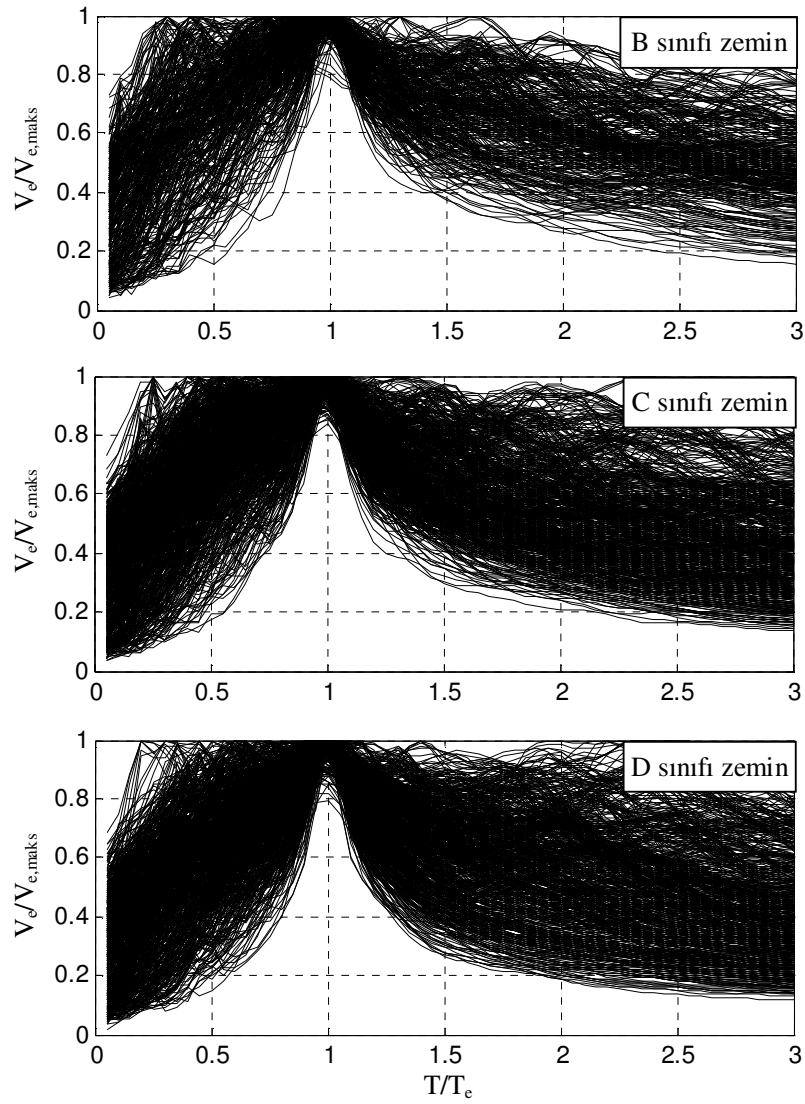
arasında (sabit 0.05 aralıklarla) değişen %5 sönümlü toplam 96480 adet BSD elastoplastik sistem için normalize edilmiş enerji spektrumları ve eşdeğer enerji hızları Şekil 2.8-2.15'te görülebilir.



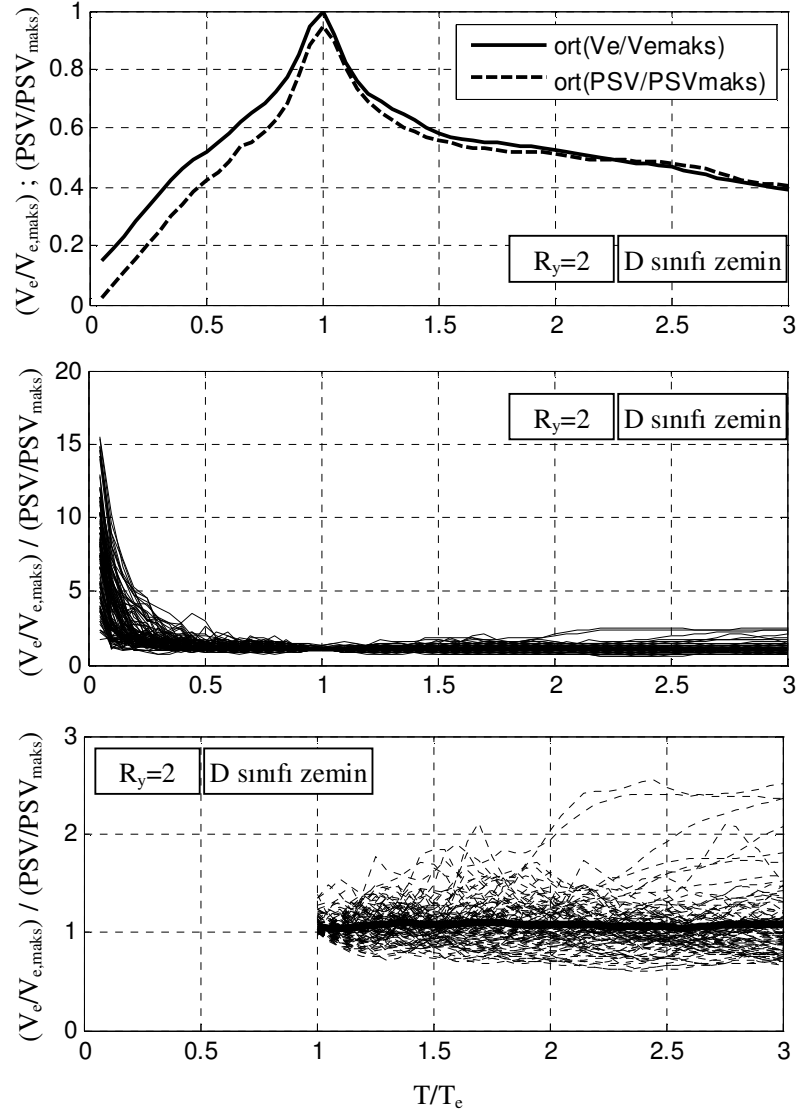
Şekil 2.8 Farklı zemin sınıfları için normalize edilmiş giriş enerjisi spektrumları



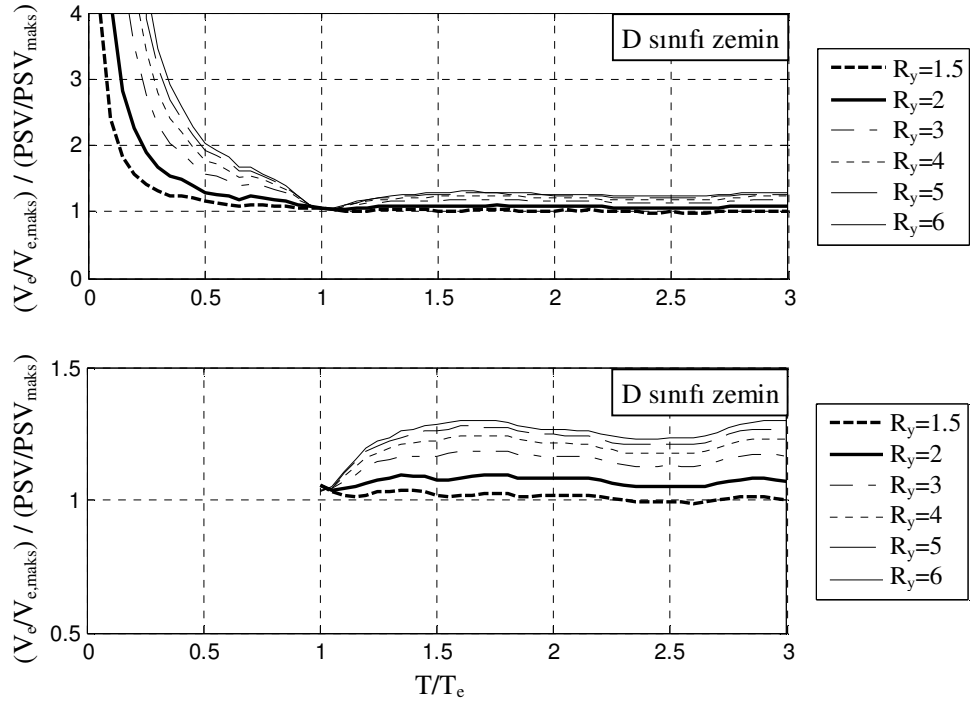
Şekil 2.9 Farklı zemin sınıfları için normalleştirilmiş ortalama giriş enerjisi spektrumları



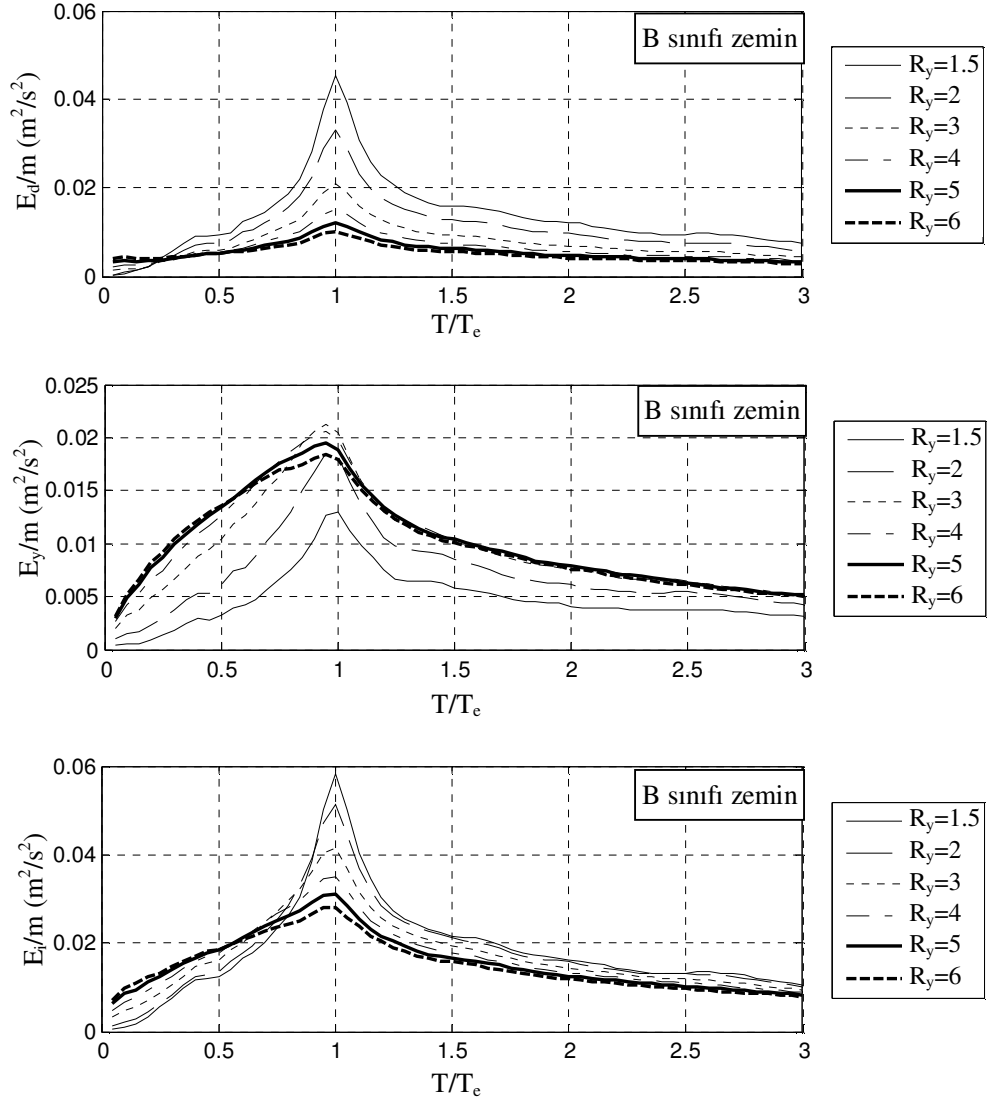
Şekil 2.10 Farklı zemin sınıfları için normalleştirilmiş eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları



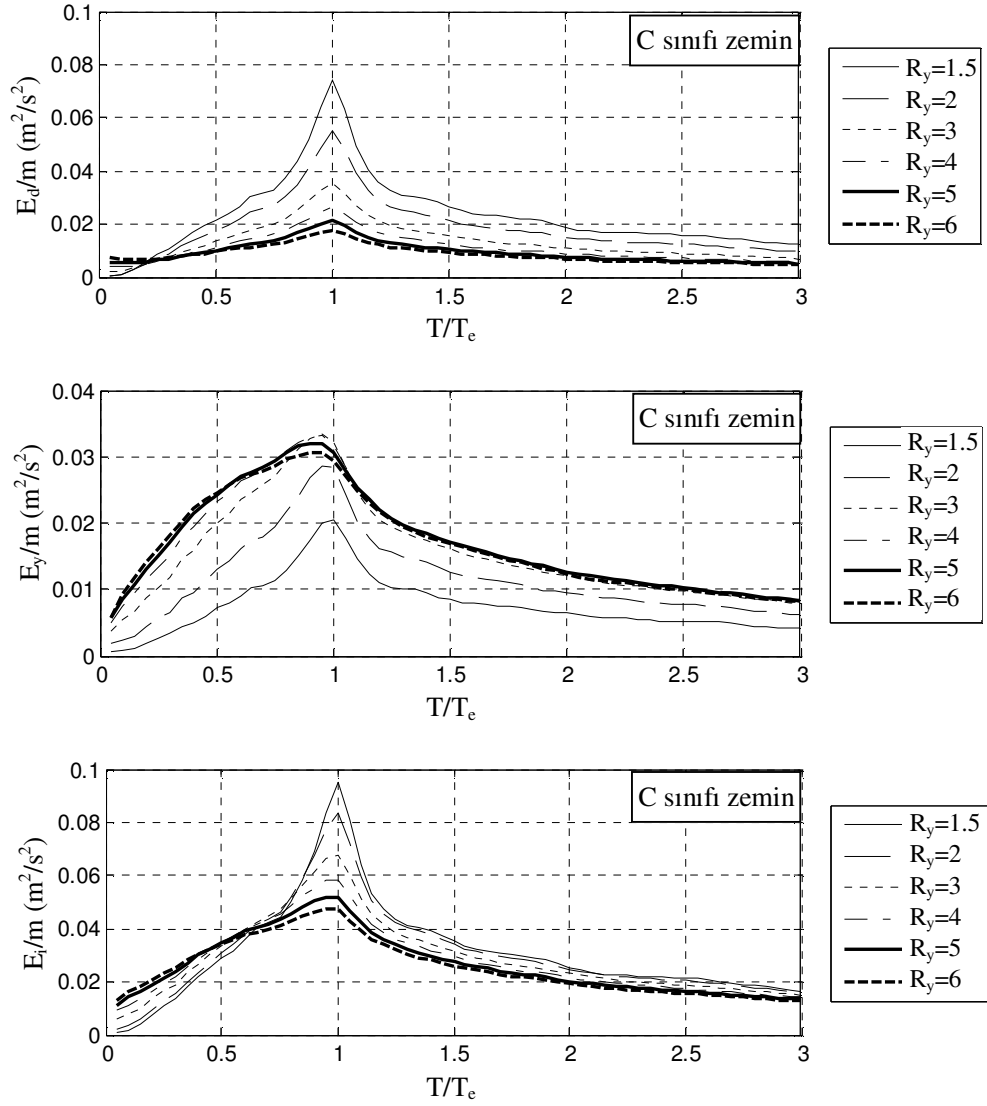
Şekil 2.11 Normalleştirilmiş elastik sözde-hız ve eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları



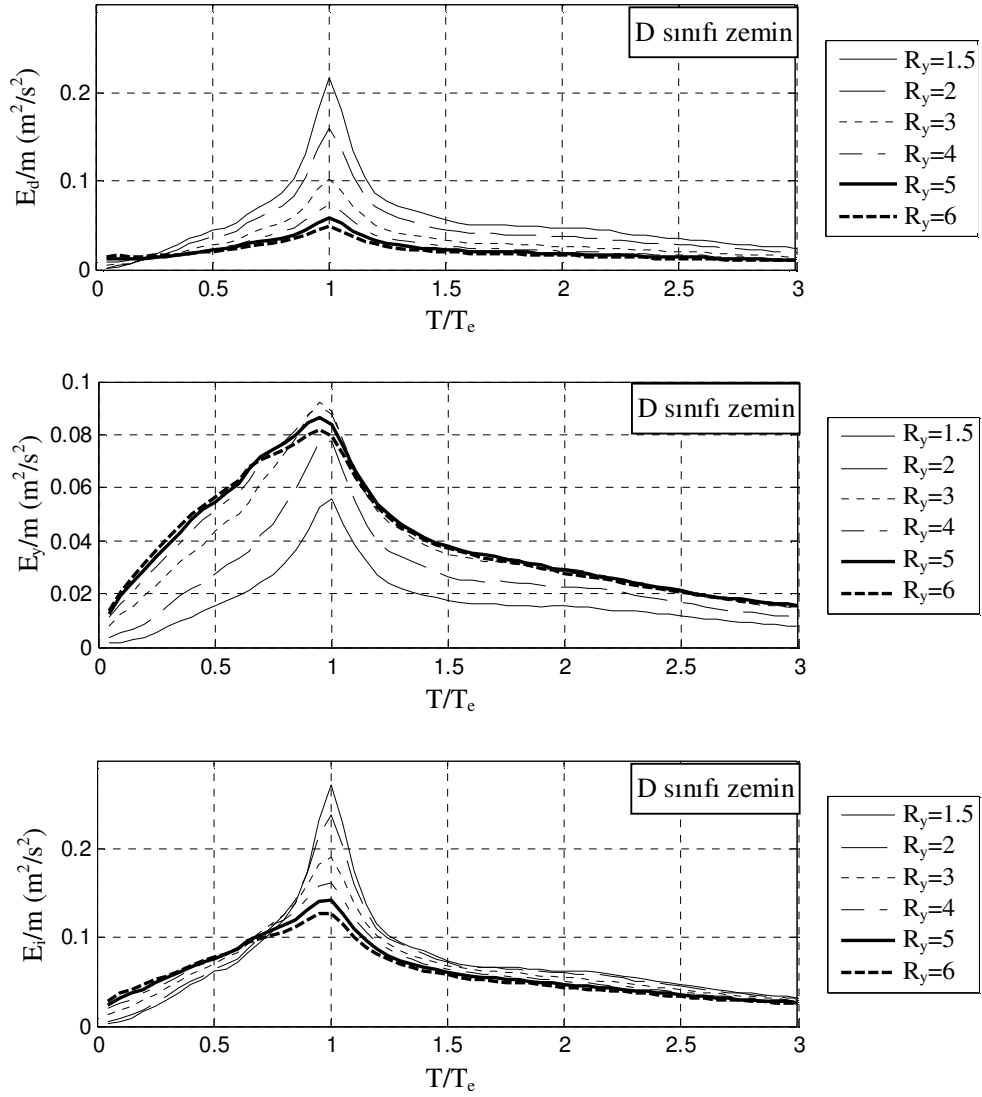
Şekil 2.12 Normalleştirilmiş elastik sözde-hız ve eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları



Şekil 2.13 Ortalama enerji spektrumları (Zemin Sınıfı: B)



Şekil 2.14 Ortalama enerji spektrumları (Zemin Sınıfı: C)

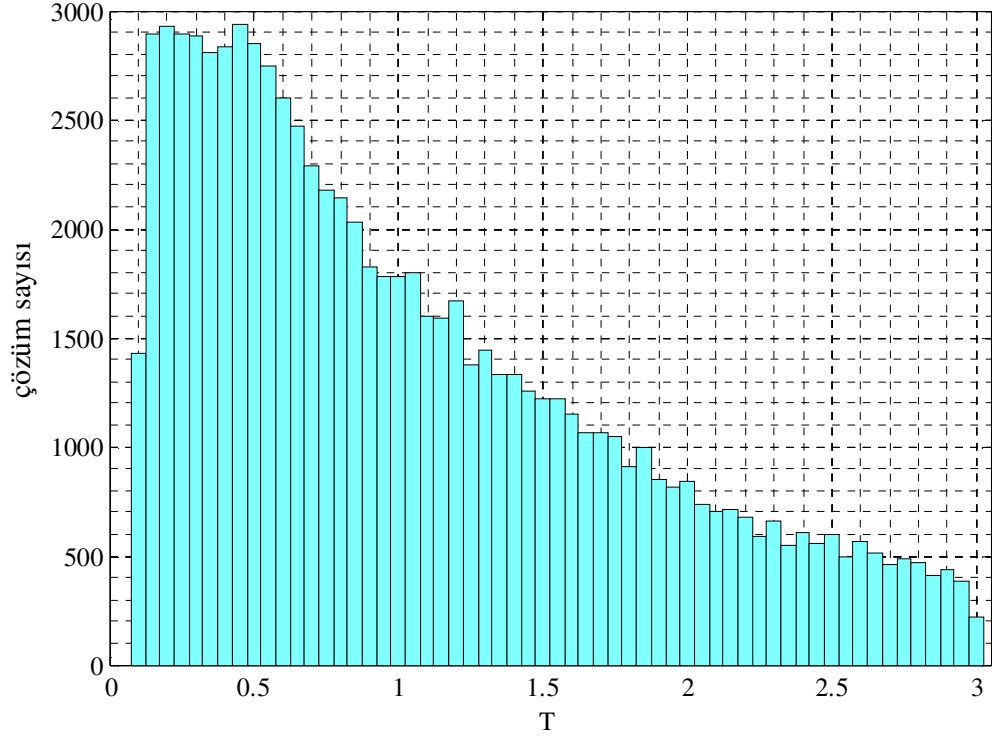


Şekil 2.15 Ortalama enerji spektrumları (Zemin Sınıfı: D)

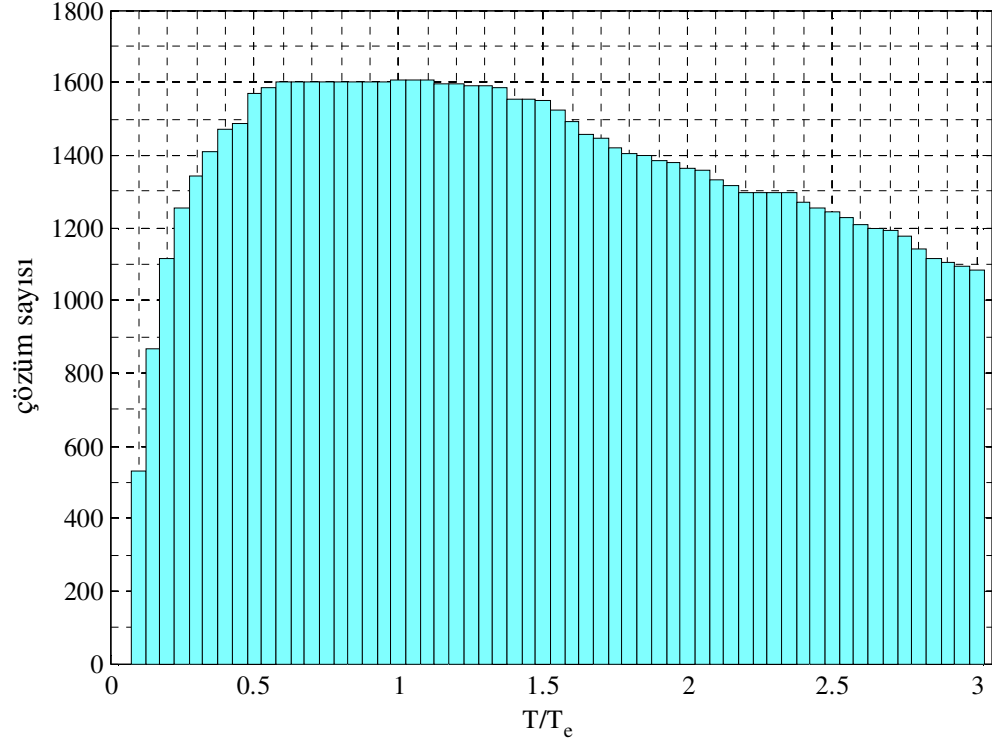
2.1.1.1 İstatistiksel Analizler

Bazı yapısal (doğal titreşim periyodu T , karakteristik periyoda göre normalleştirilmiş doğal titreşim periyodu T/T_e , dayanım azaltma katsayısı R_y) ve sismik parametrelerin [karakteristik periyot T_e , en büyük yer ivmesi PGA , en büyük yer hızı PGV , ivme kaydı şiddeti I_E , spektrum şiddeti S_1 , Cosenza ve Manfredi sismik indeksi I_D , Trifunac ve Brady (1975) tarafından önerilmiş etkili yer hareketi süresi t_d , Somerville vd. (1997) tarafından önerilmiş etkili yer hareketi süresi t_{d75} ve Bolt (1973) tarafından önerilen üniform yer hareketi süresi t_{uni}] giriş enerjisi hızı üzerine etkisini irdelemek için bazı istatistiksel çözümler yapılmıştır. Çözümlerinde; farklı dayanımlara sahip ($R_y=1.5, 2, 3, 4, 5, 6$), doğal titreşim periyodu $0.1s$ ile $3.0s$ arasında değişen %5 sönümlü toplam 81654 adet BSD elastoplastik sistem dikkate alınmıştır. Göz önüne alınan BSD sistemlerin; doğal titreşim periyotlarının histogramı Şekil 2.16'da, normalleştirilmiş periyotlarının histogramı ise Şekil 2.17'de verilmiştir.

Giriş enerjisi hızı ile göz önüne alınan her bir parametre arasındaki korelasyon katsayıları Çizelge 2.1'de ve saçılım grafikleri (scatter plots) Şekil 2.18-2.21'de verilmiştir. Bilindiği gibi; korelasyon katsayısı iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi temsil etmektedir (Statistica Text Book - Statsoft, Inc., 2001). Korelasyon katsayısı, genel anlamda göz önüne alınan değişkenin etkisini göstermekle beraber, değişkenler arasında doğrusal olmayan bir ilişki söz konusu ise başkaca istatistiksel irdelemeler de yapmak gereklidir. Bu amaçla bazı parametreler için (R_y ve t_d) birtakım hipotez testleri yapılmıştır: Ki-kare uyum iyiliği testi (chi-square goodness of fit test), t-test ve ANOVA (analysis of variance).



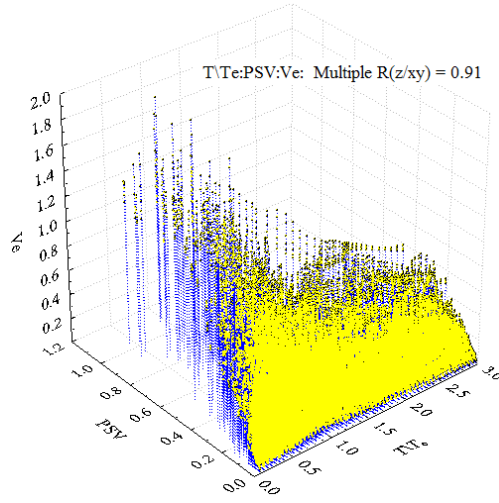
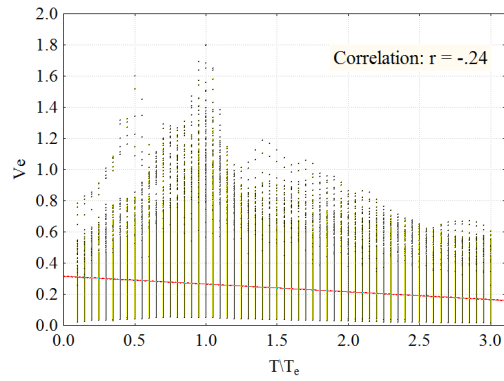
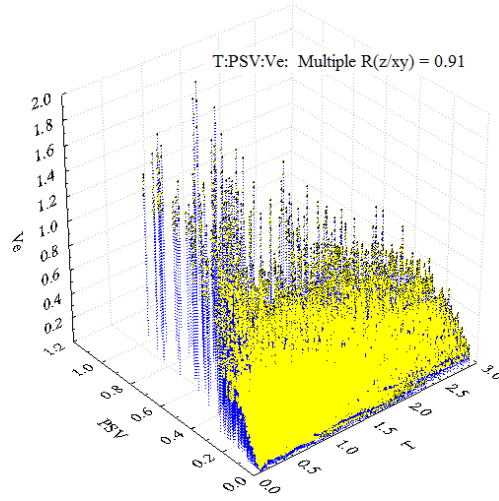
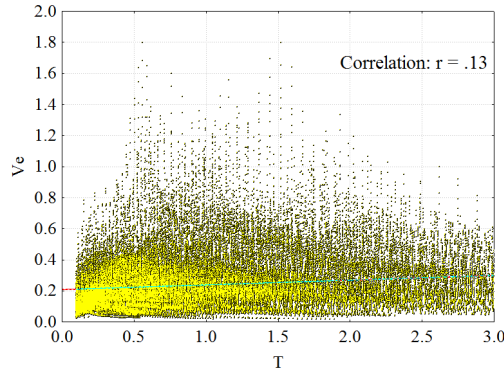
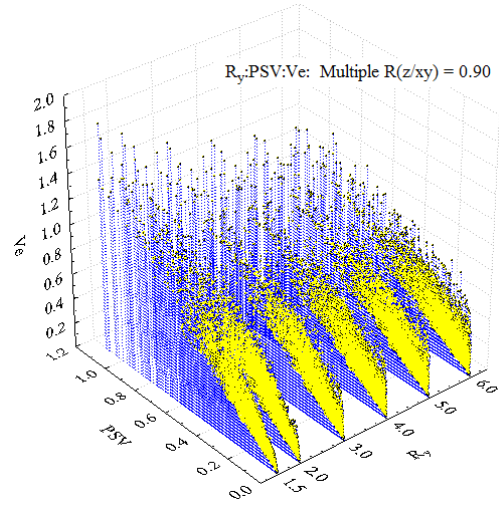
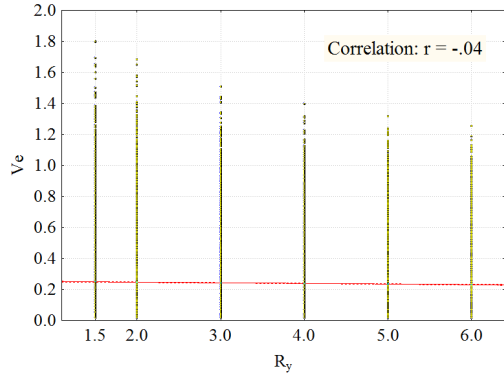
Şekil 2.16 Doğal titreşim periyotlarının histogramı



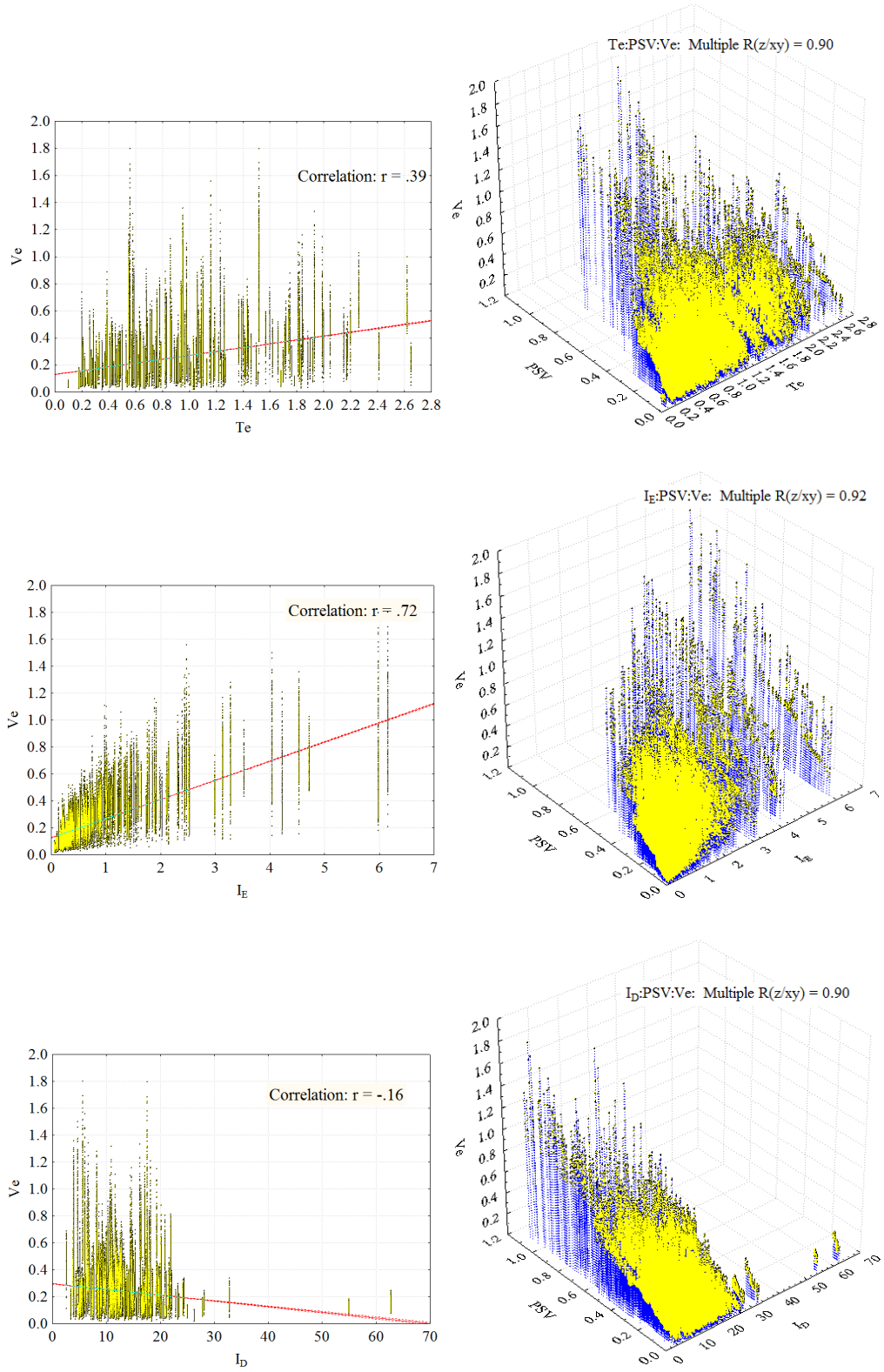
Şekil 2.17 Normalleştirilmiş periyotların histogramı

Çizelge 2.1 Korelasyon katsayıları matrisi

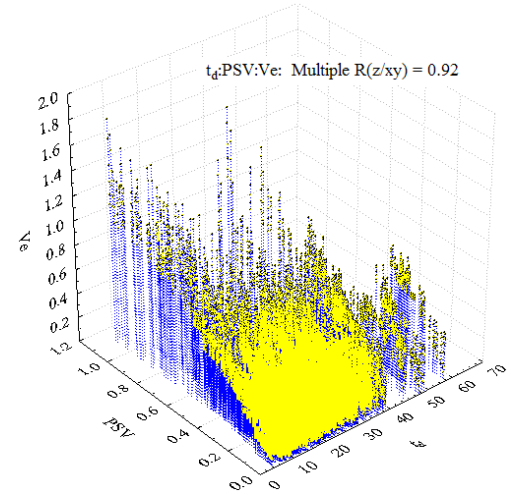
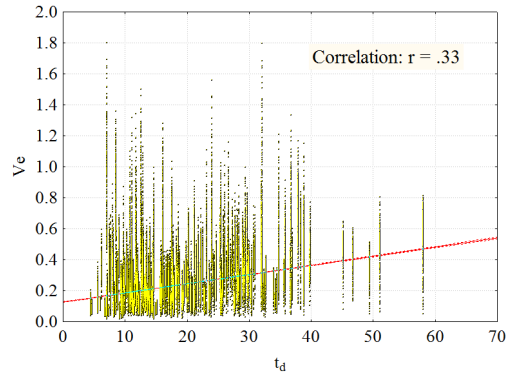
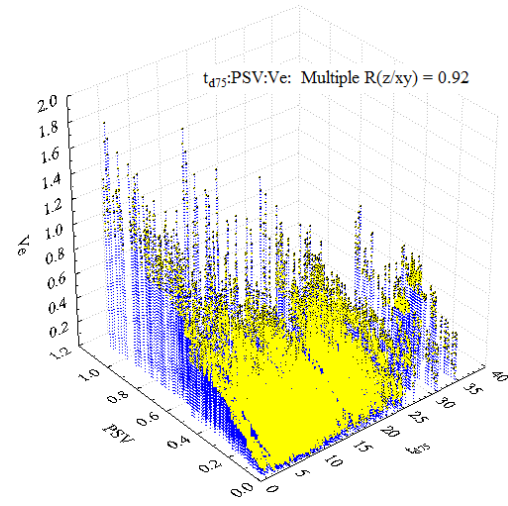
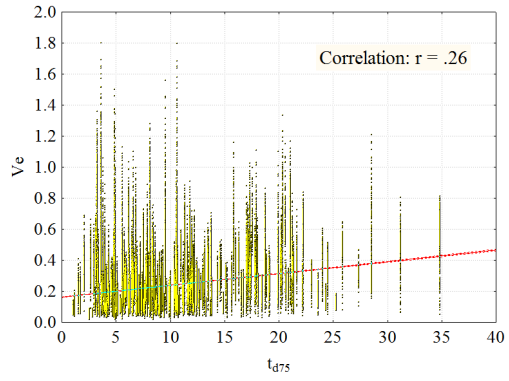
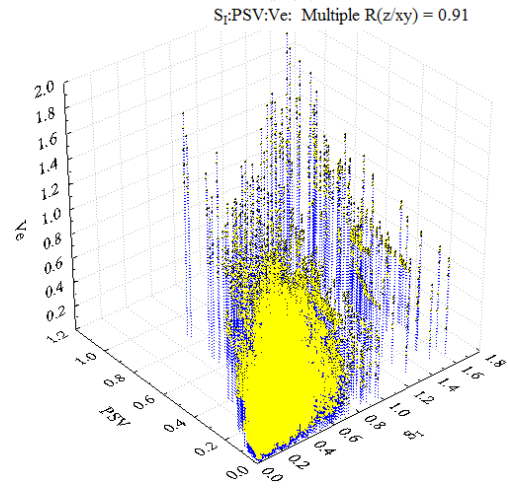
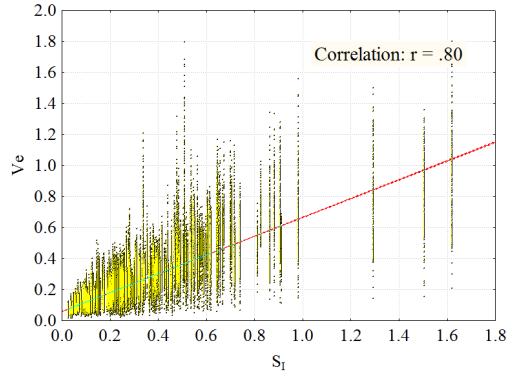
Ort.	Std.Sap.		V_e	$\frac{V_e}{PSV}$	$V_{e,maks}$	$\frac{V_{e,maks}}{PSV_{T_e}}$	R_y	T	T/T _e	T _e	I _E	I _D	S _I	t _{d75}	t _d	t _{uni}	PGA	PGV	PSV	PSV _{T_e}	
0.24	0.17	V_e	1.00																		
2.16	1.23	V_e/PSV	-0.07	1.00																	
0.39	0.26	$V_{e,maks}$	0.80	0.01	1.00																
1.75	0.47	$V_{e,maks}/PSV_{T_e}$	-0.10	0.19	-0.07	1.00															
3.58	1.59	R_y	-0.04	0.03	-0.17	-0.41	1.00														
1.06	0.74	T	0.13	-0.34	0.23	-0.22	0.00	1.00													
1.50	0.81	T/T _e	-0.24	-0.33	-0.10	0.10	0.00	0.56	1.00												
0.78	0.47	T _e	0.39	-0.07	0.37	-0.35	0.00	0.50	-0.30	1.00											
0.80	0.87	I _E	0.72	0.02	0.86	-0.06	0.00	0.11	-0.05	0.18	1.00										
13.11	6.70	I _D	-0.16	0.22	-0.19	0.70	0.00	-0.17	0.06	-0.23	-0.10	1.00									
0.30	0.22	S _I	0.80	-0.05	0.85	-0.28	0.00	0.32	-0.14	0.53	0.76	-0.34	1.00								
10.25	5.99	t _{d75}	0.26	0.20	0.20	0.42	0.00	0.16	-0.11	0.35	0.11	0.45	0.12	1.00							
19.19	9.54	t _d	0.33	0.19	0.28	0.35	0.00	0.19	-0.09	0.33	0.18	0.34	0.19	0.90	1.00						
14.58	8.07	t _{uni}	0.34	0.20	0.29	0.38	0.00	0.21	-0.12	0.41	0.16	0.46	0.21	0.93	0.90	1.00					
0.78	0.39	PGA	0.53	-0.08	0.66	-0.23	0.00	0.01	0.01	-0.03	0.80	-0.37	0.63	-0.30	-0.19	-0.30	1.00				
0.08	0.06	PGV	0.76	-0.06	0.85	-0.28	0.00	0.27	-0.12	0.43	0.79	-0.41	0.95	0.03	0.13	0.12	0.72	1.00			
0.13	0.11	PSV	0.90	-0.31	0.70	-0.22	0.00	0.27	-0.09	0.39	0.63	-0.27	0.79	0.09	0.14	0.15	0.54	0.75	1.00		
0.24	0.17	PSV _{T_e}	0.76	-0.04	0.92	-0.34	0.00	0.27	-0.12	0.44	0.82	-0.33	0.92	0.02	0.10	0.11	0.71	0.91	0.74	1.00	



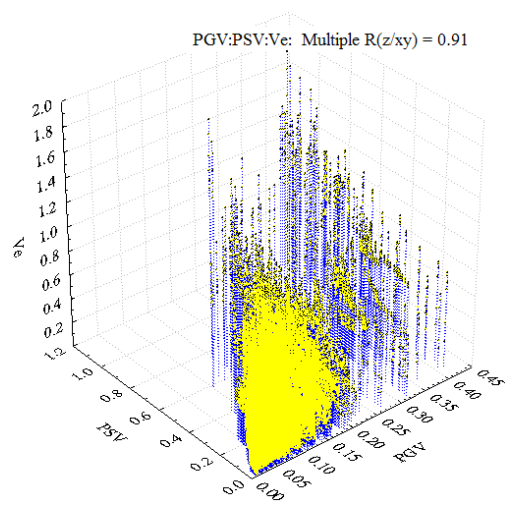
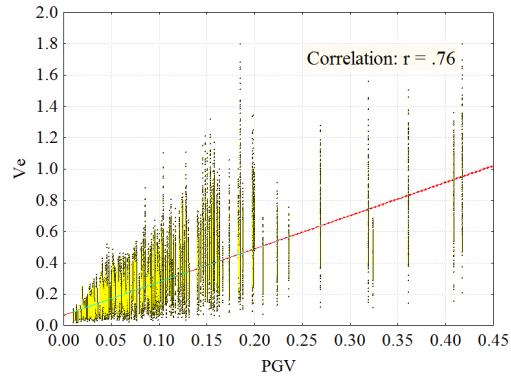
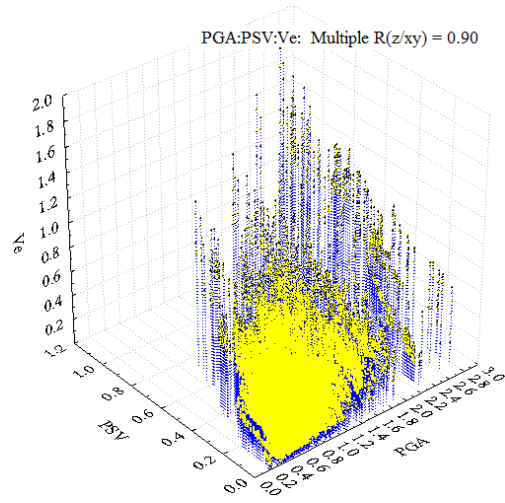
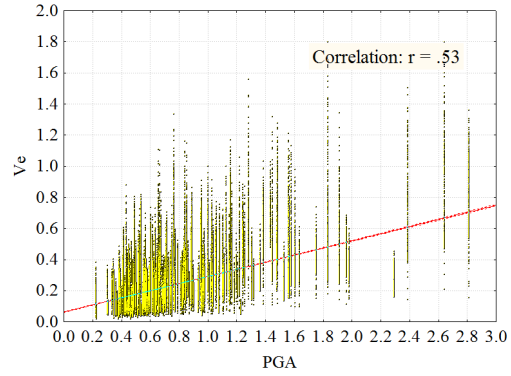
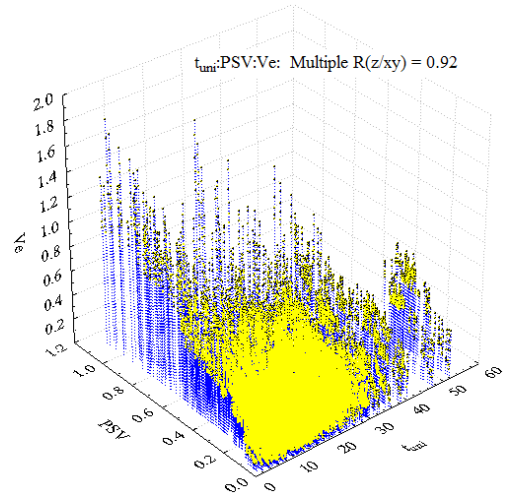
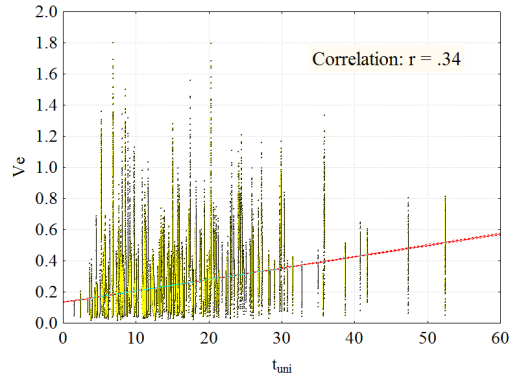
Şekil 2.18 Değişik parametreler için saçılım grafikleri ve korelasyonları



Şekil 2.19 Değişik parametreler için saçılım grafikleri ve korelasyonları



Şekil 2.20 Değişik parametreler için saçılım grafikleri ve korelasyonları



Şekil 2.21 Değişik parametreler için saçılım grafikleri ve korelasyonları

Ki-kare uyum iyiliği testi (chi-square goodness of fit test) esas olarak, göz önüne alınan parametreye bağlı olarak, giriş enerjisi için varsayılan teorik dağılımın geçerliliğini test etmek için kullanılmıştır. Varsayılan teorik dağılım için hesaplanan ki-kare (χ^2) istatistik değeri, kabul edilen istatistiksel doğruluk seviyesi (statistical significance level, bu çalışmada p-level=%5 kabul edilmiştir) için belirlenen kritik ki-kare istatistiği (χ_{cr}^2) ile kıyaslanır. χ^2 istatistiği χ_{cr}^2 değerinden küçükse; kabul edilen istatistiksel doğruluk seviyesi için varsayılan teorik dağılım kabul edilebilir demektir. Bununla beraber; birden fazla aday dağılım karşılaştırılıyorsa, en küçük χ^2 değerine sahip dağılım, genelde uygun kabul edilir (Ang ve Tang, 1975; Sucuoğlu vd., 1998).

İstatistikte yaygın olarak kullanılan t-testi ise, esas olarak, birbirinden farklı iki grup popülasyonun ortalamaları arasındaki farkı değerlendirmeye dayanır. Teoride, karşılaştırılan gruplardaki popülasyonların normal dağılıma uyması gerekmektedir. Gözlenen değerlerin ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak hesaplanan t istatistik değeri, kabul edilen istatistiksel doğruluk seviyesi (statistical significance level, bu çalışmada p-level=%5 kabul edilmiştir) için belirlenen kritik t istatistik değeri (t_{cr}) ile kıyaslanır (Sucuoğlu vd., 1998). Hesaplanan t-istatistik değeri, belirlenen kritik t-değerinden (t_{cr}) büyükse; kabul edilen istatistiksel doğruluk seviyesi için “iki grupta gözlenen değerlerin ortalamaları arasında fark yoktur” hipotezi (null-hypothesis) reddedilir. Bu durumda, alternatif hipotez “gruplarda gözlenen değerlerin ortalamaları eşit değildir” geçerli olur. Burada hipotez testi sonucu elde edilen t-istatistik değerine karşılık gelen p-değeri; öne sürülen “iki grupta gözlenen değerlerin ortalamaları arasında fark yoktur” hipotezinin reddi için hata olasılığını gösterir (Statistica Text Book - Statsoft, Inc., 2001).

Varyasyon analizinin amacı (Analysis of Variance, ANOVA); genel olarak, farklı grupların ortalamaları arasında önemli bir fark olup olmadığını, grupların varyasyonları üzerinden test etmektir (Statistica Text Book - Statsoft, Inc., 2001). Eğer sadece iki grup karşılaştırılıyorsa; ANOVA, t-test ile aynı sonucu verir. ANOVA’da karşılaştırılan grupların normal dağılıma uyduğu ön-kabulü yapılır. ANOVA ile hesaplanan F istatistik değeri, kabul edilen istatistiksel doğruluk seviyesi (statistical significance level, p-level=%5) için belirlenen kritik F istatistik değeri (F_{cr}) ile kıyaslanır. Hesaplanan F-istatistik değeri, belirlenen kritik F-değerinden (F_{cr}) büyükse; “iki grupta gözlenen değerlerin ortalamaları arasında fark yoktur” hipotezi (null-hypothesis) reddedilir. Bu durumda, alternatif hipotez “gruplarda gözlenen değerlerin ortalamaları eşit değildir” geçerli olur.

Testlerde kullanılan giriş enerjisi veritabanı; Bölüm 1.3'te detayları verilen yer hareketleri kullanılarak, farklı dayanım ve rijitliklere sahip elastoplastik BSD sistemler için hesaplanmış giriş enerjisi değerlerinden oluşmaktadır. Bu bölümde yapılan tüm istatistiksel testler için, MATLAB (Mathworks, Inc., 2007) ortamında yazılan kod kullanılmıştır.

Dayanımın Etkisi

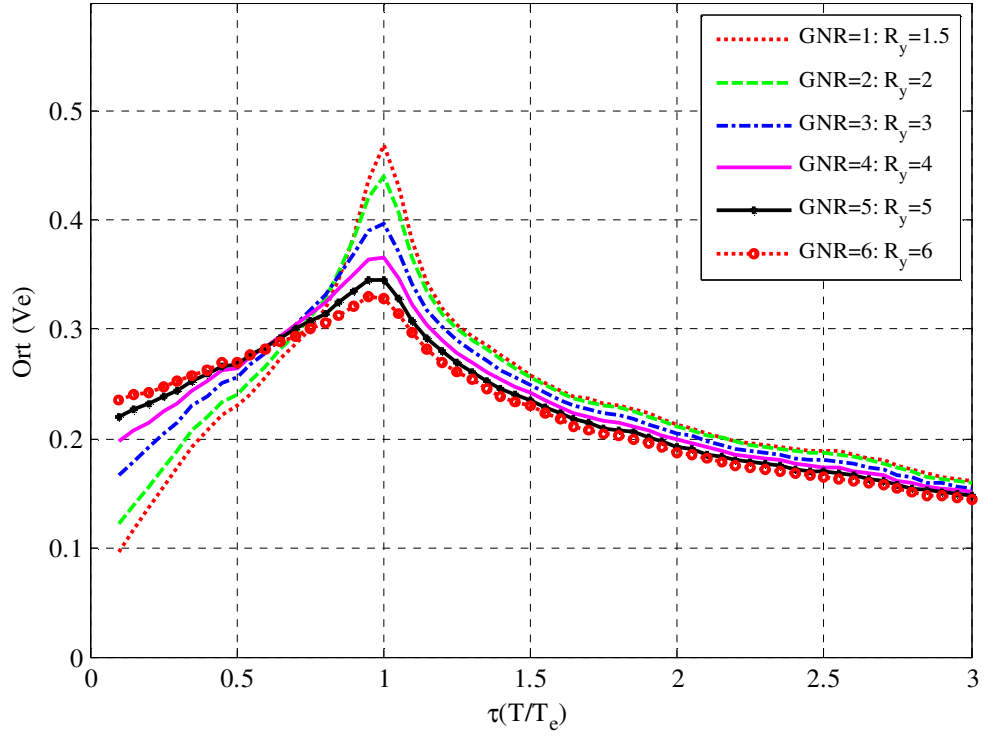
Her bir T/T_e değeri için dayanım azaltma katsayılarına göre altı gruba ayrılan (Çizelge 2.2) veri tabanı için yapılan *ki-kare uyum iyiliği* testi sonucunda; karşılaştırılan dağılımlar arasında (normal, lognormal, üstel) en uygun dağılımın, tüm R_y grupları için *lognormal dağılım* olduğu belirlenmiştir.

Her bir T/T_e değerinde aday dağılımlar için hesaplanmış χ^2 değerleri Şekil 2.23-28'de verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere, bazı T/T_e değerlerinde *teorik lognormal dağılım* için belirlenmiş χ^2 istatistikleri, %5 istatistiksel doğruluk seviyesindeki χ_{cr}^2 değerlerini aşmaktadır. Yine de, karşılaştırılan tüm aday dağılımlar arasında en küçük χ^2 değerleri lognormal dağılımda gözlenmektedir.

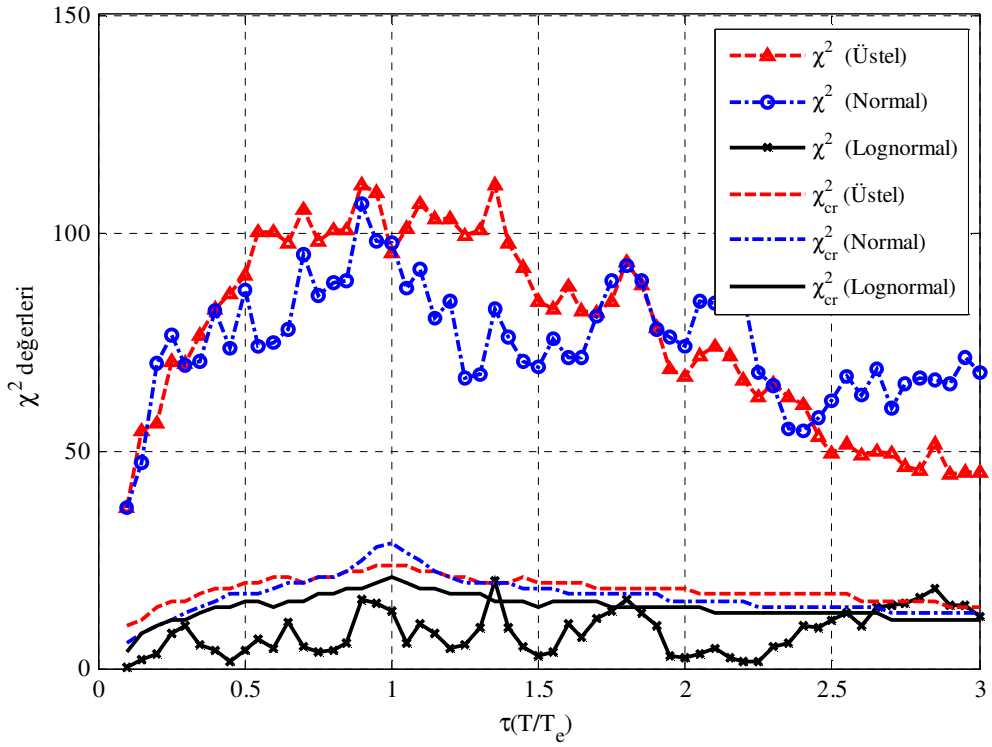
Çizelge 2.2 Dayanımlara göre oluşturulan gruplar

R_y grupları (GNR)	R_y değeri
1	1.5
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6

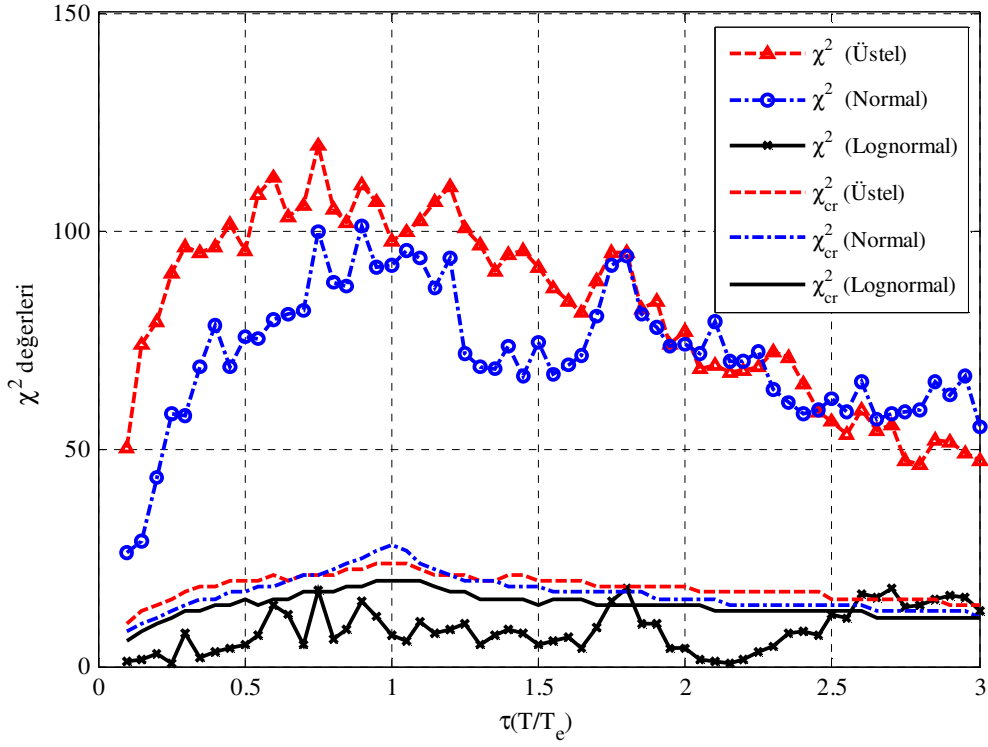
R_y grupları için ortalama eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları Şekil 2.22'de verilmiştir.



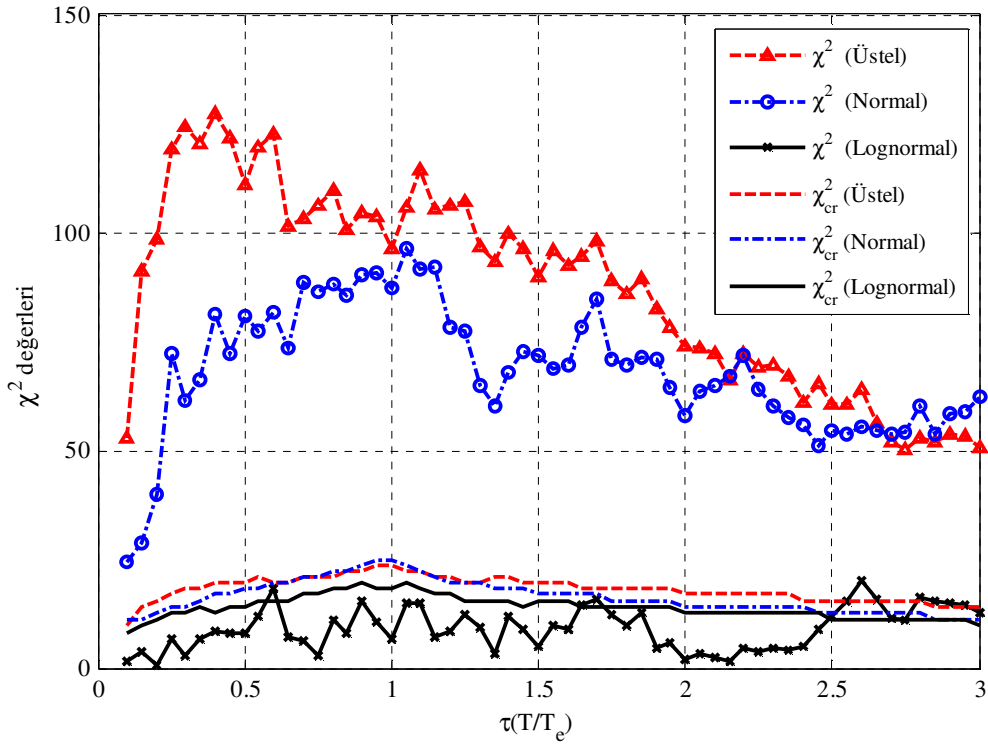
Şekil 2.22 Göz önüne alınan R_y grupları için ortalama giriş enerjisi hızları



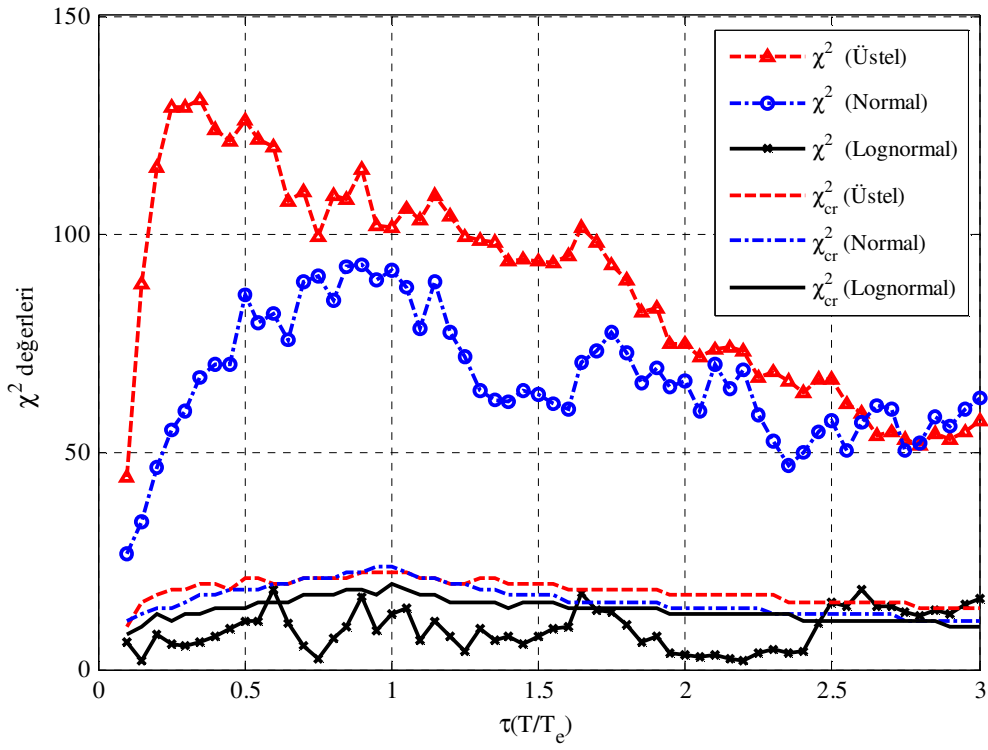
Şekil 2.23 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri ($GNR=1$)



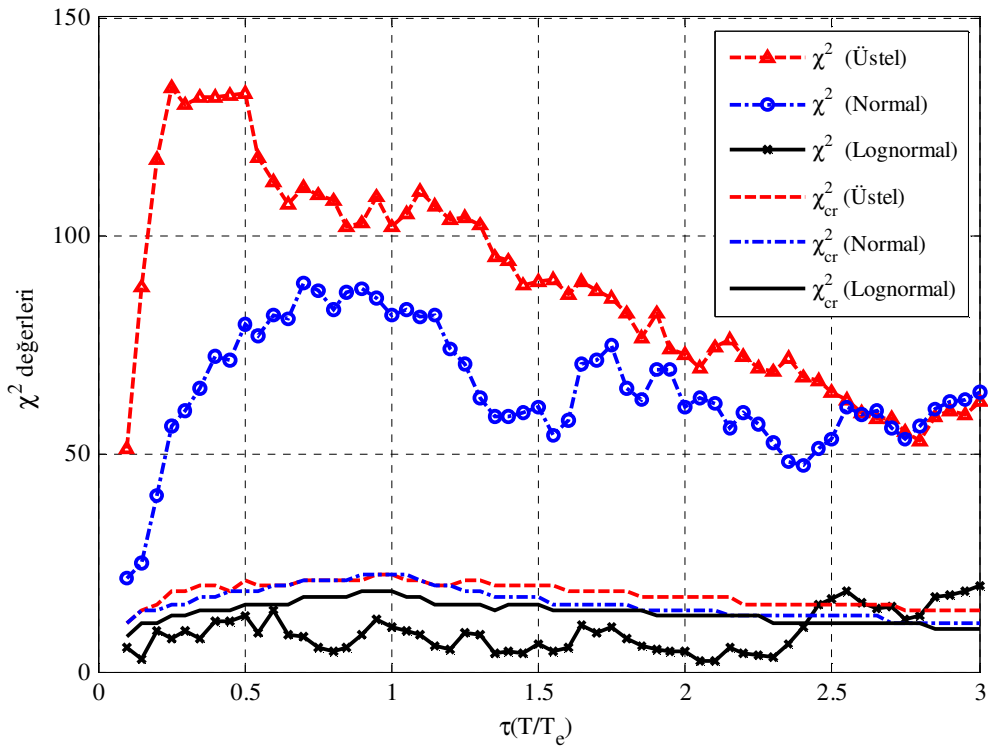
Şekil 2.24 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=2)



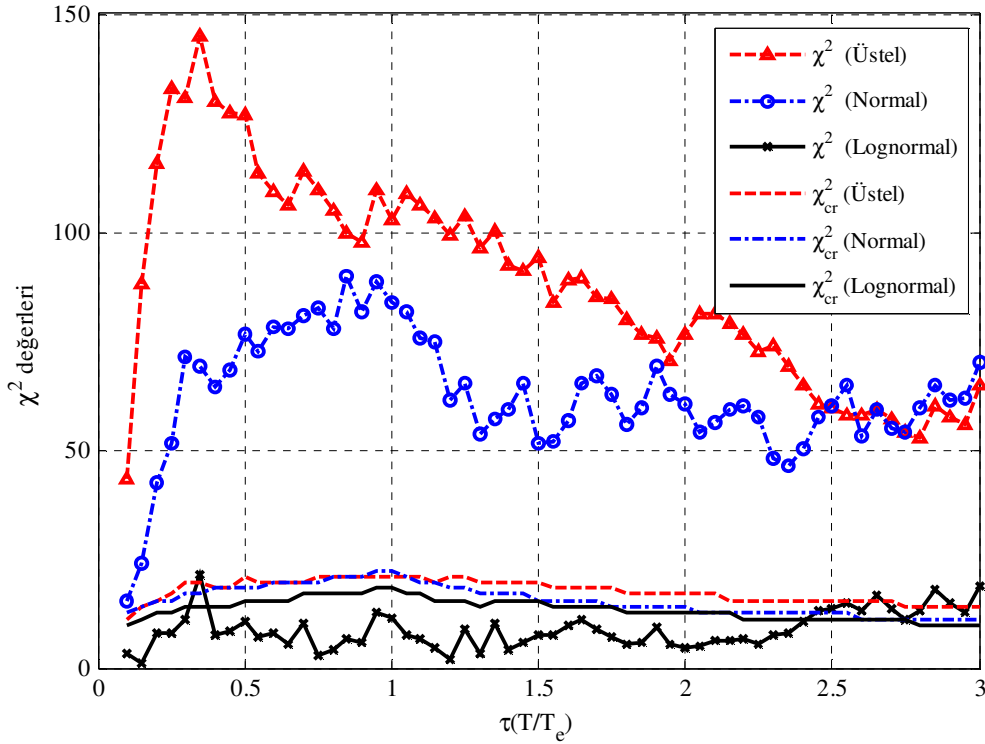
Şekil 2.25 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=3)



Şekil 2.26 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=4)



Şekil 2.27 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=5)

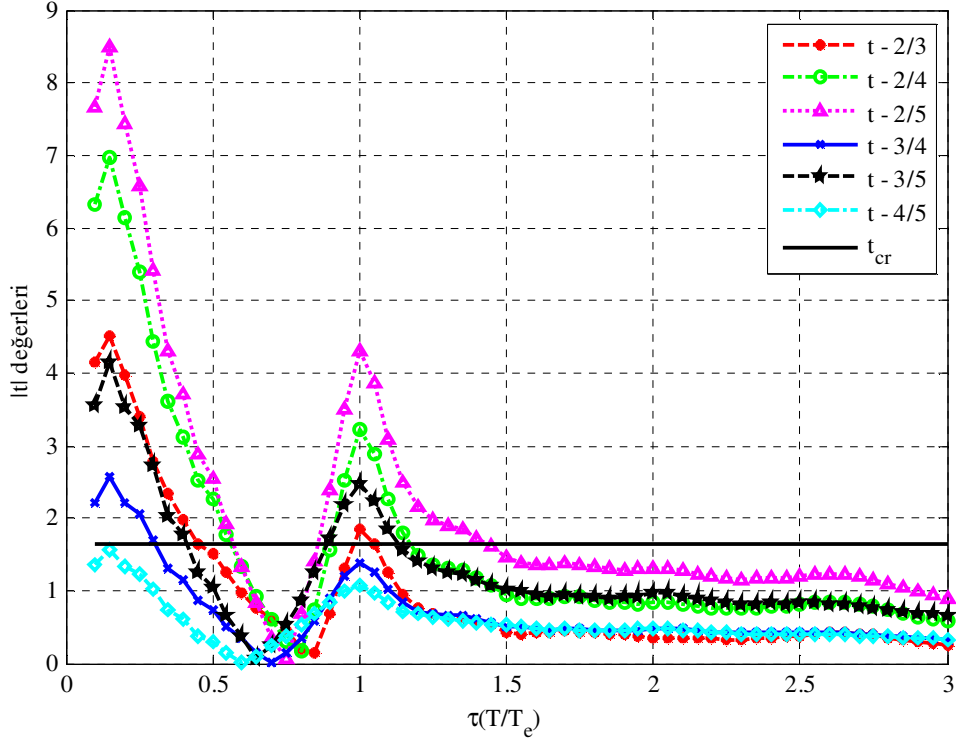


Şekil 2.28 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNR=6)

Göz önüne alınan R_y grupları lognormal dağıldığı için, gruplardaki eşdeğer hız değerlerinin doğal logaritması alınmış ve 2, 3, 4 ve 5 numaralı gruplara ($R_y=2, 3, 4$ ve 5) ikişerli olarak t-testi uygulanmıştır. Testler sonucunda elde edilen t-istatistik değerleri Şekil 2.29’da verilmiştir. Şekil 2.29’da; Grup 2/3, 2/4, 2/5, 3/4, 3/5 ve 4/5 sırasıyla 2 ile 3, 2 ile 4, 2 ile 5, 3 ile 4, 3 ile 5 ve 4 ile 5 numaralı grupların karşılaştırılması sonucunda elde edilen t-istatistik değerlerini gösterir. Şekil 2.29’da %5 istatistiksel doğruluk seviyesi için gösterilen t_{cr} değerleri; tüm grup eşleşmeleri için, her bir T/T_e değerindeki serbestlik derecesine bağlı olarak farklıdır. Ancak eşleşmelerdeki serbestlik dereceleri birbirine eşit olduğu için, herhangi bir T/T_e değerindeki t_{cr} değerleri de tüm eşleşmeler için birbirine eşit olmaktadır. Bununla beraber T/T_e değerlerindeki serbestlik dereceleri de birbirine yakın olduğu için, t_{cr} tüm spektral bölgelerde yaklaşık olarak 1.65 değerine eşit çıkmaktadır.

Şekil 2.29’dan da görülebileceği üzere, 3 ile 4 ve 4 ile 5 gruplarının eşleşmesi için hesaplanan t-istatistik değerleri, neredeyse tüm spektral bölgelerde %5 istatistiksel doğruluk seviyesi için hesaplanan kritik t-istatistik değerlerinden (t_{cr}) küçüktür. Diğer grup eşleşmelerinde ise; $0.1 < T/T_e < 0.6$ spektral bölgesi ve doğal titreşim periyodu T ’nin karakteristik periyoda yaklaştığı spektral bölgede, hesaplanan t-istatistik değerlerinin t_{cr} değerinden büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durumda bu bölgeler için “gruplar arasındaki ortalamalar farklı değildir”

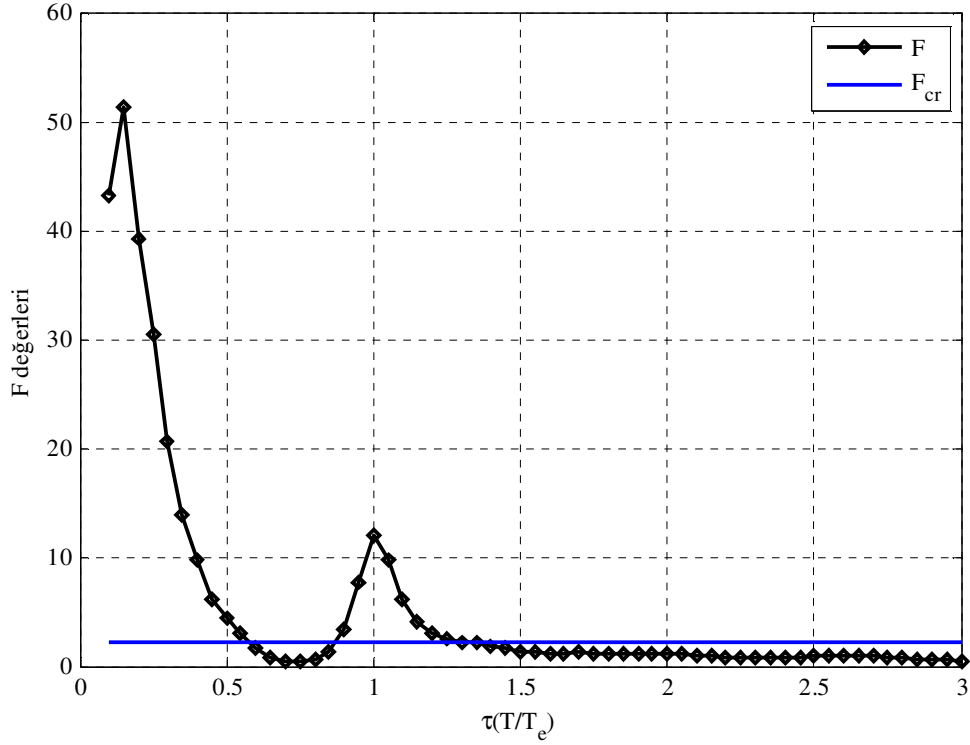
hipotezi (null hypothesis) kabul edilemez ve alternatif hipotez “gruplar arasındaki ortalamalar farklıdır” geçerli olur. Bir başka deyişle, bu spektral bölgelerde BSD sistemin dayanımı, eşdeğer giriş enerjisi hızı üzerinde etkili olabilmektedir. Ayrıca $0.8 < T/T_e < 1.2$ spektral bölgesinde tüm grup eşleşmeleri için hesaplanan t-istatistik değerlerindeki artış, dayanımın en büyük giriş enerjisi üzerinde etkili olduğunu da göstermektedir.



Şekil 2.29 Farklı R_y grupları için t-testi sonucunda elde edilen t değerleri spektrumu

Tüm R_y grupları göz önüne alınarak yapılan varyasyon analizi (ANOVA) sonuçları her bir T/T_e değeri için Şekil 2.30'da verilmiştir. t-testi sonuçlarına benzer şekilde; ANOVA ile hesaplanan F-istatistik değerleri de, $0.1 < T/T_e < 0.6$ spektral bölgesi ve doğal titreşim periyodu T 'nin karakteristik periyoda yaklaştığı spektral bölgede, %5 istatistiksel doğruluk seviyesi için hesaplanan F_{cr} değerinden büyük olduğu için, “gruplar arasındaki ortalamalar farklı değildir” hipotezi (null hypothesis) kabul edilemez ve alternatif hipotez “gruplar arasındaki ortalamalar farklıdır” geçerli olur.

Ayrıca hem t-testi hem de ANOVA sonuçlarına göre, $1.5 < T/T_e < 3.0$ spektral bölgesinde dayanımın eşdeğer giriş enerjisi hızı üzerinde etkili olmadığı söylenebilir.



Şekil 2.30 Farklı R_y grupları için ANOVA sonucunda elde edilen F değerleri spektrumu

Yer Hareketi Süresinin Etkisi

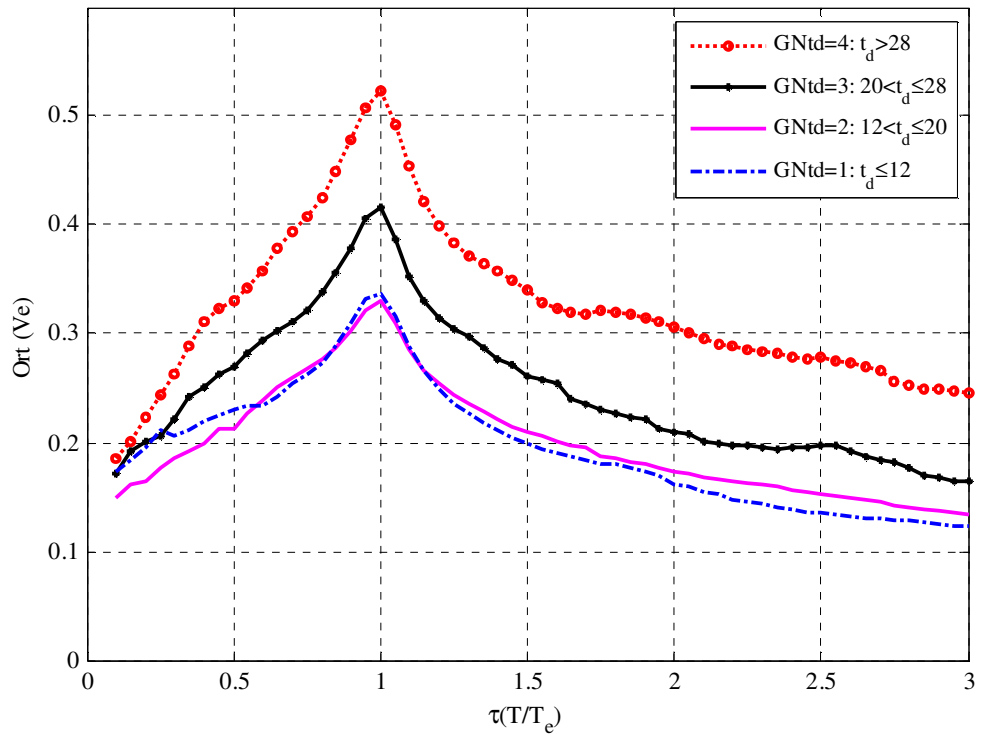
Giriş enerjisi hızına yer hareketi süresinin etkisini irdelemek amacıyla, literatürde yer alan üç farklı yer hareketi süresi tanımı göz önüne alınmıştır: Trifunac ve Brady (1975) tarafından önerilmiş etkili yer hareketi süresi t_d , Somerville vd. (1997) tarafından önerilmiş etkili yer hareketi süresi t_{d75} ve Bolt (1973) tarafından önerilen üniform yer hareketi süresi t_{uni} . Çizelge 2.1’de verilen korelasyon katsayılarından görülebileceği üzere; üç farklı tanım için de giriş enerjisi hızı benzer eğilim göstermektedir. Ayrıca Trifunac ve Brady (1975) tarafından önerilmiş etkili yer hareketi süresi t_d ’ye göre dört gruba ayrılan (Çizelge 2.3) veri tabanı için bazı hipotez testleri (ki-kare uyum iyiliği, t-test ve ANOVA) yapılmıştır. Şekil 2.31’de göz önüne alınan t_d grupları için ortalama eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları verilmiştir.

Ki-kare uyum iyiliği testi sonucunda; tüm t_d grupları için en uygun dağılımın *lognormal dağılım* olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.32-35’te her bir T/T_c değerinde aday dağılımlar için hesaplanmış χ^2 değerleri verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere, bazı T/T_c değerlerinde *teorik lognormal dağılım* için belirlenmiş χ^2 istatistikleri, %5 istatistiksel doğruluk seviyesindeki χ_{cr}^2 değerlerini aşmaktadır. Yine de, karşılaştırılan tüm aday dağılımlar arasında

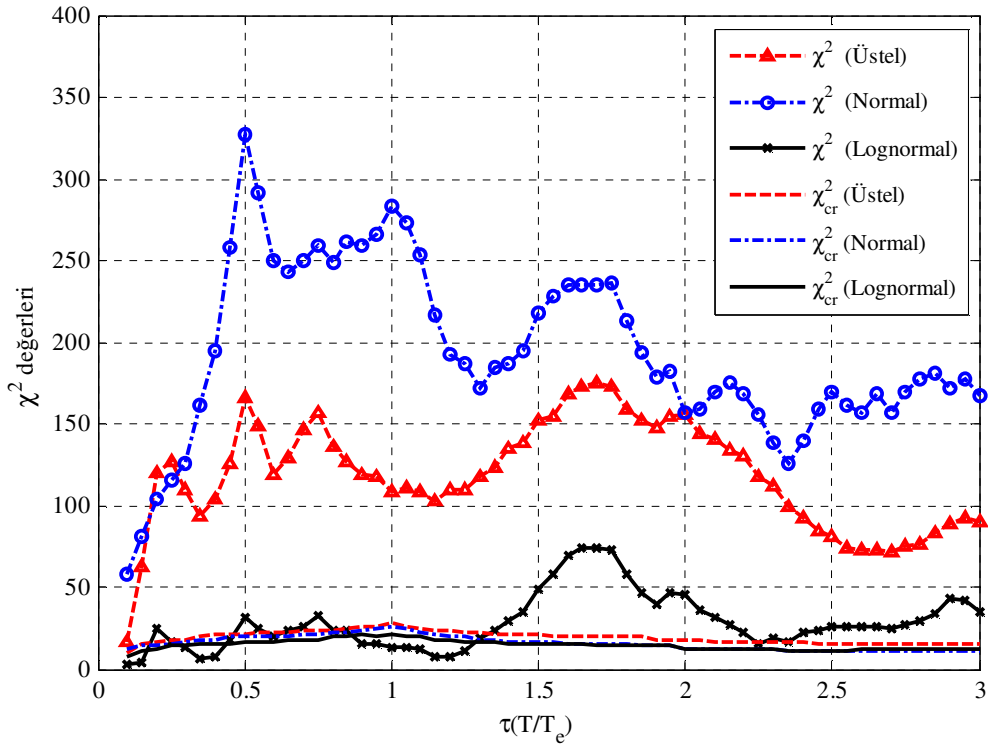
en küçük χ^2 değerleri lognormal dağılımda gözlenmektedir.

Çizelge 2.3 Etkili yer hareketi sürelerine göre oluşturulan gruplar

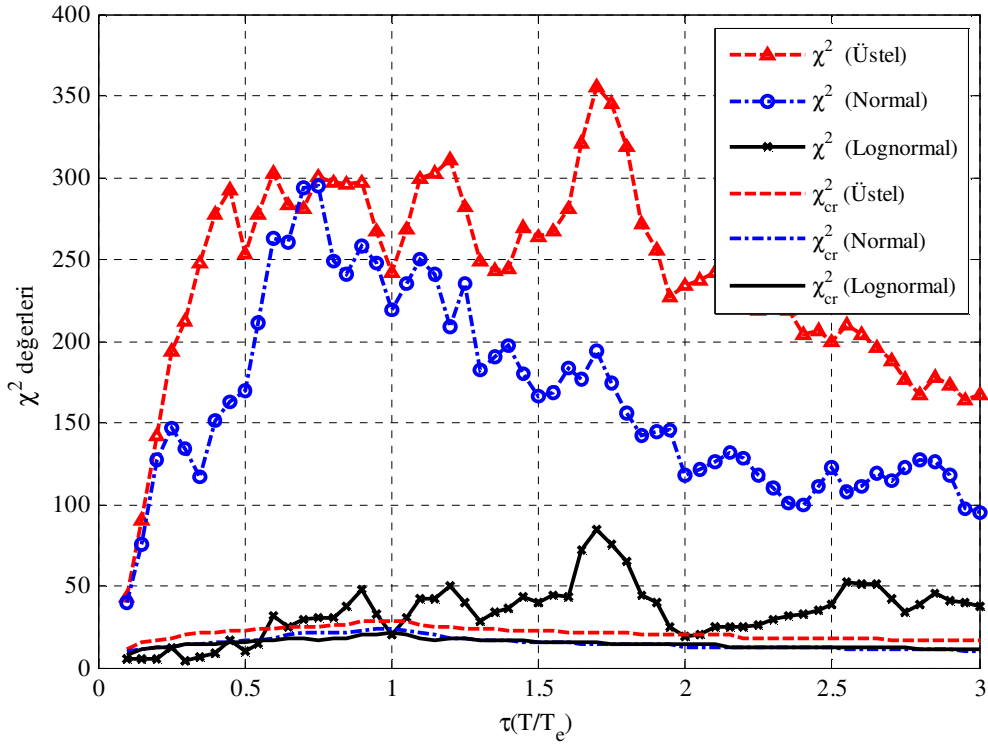
t_d grupları (GNtd)	t_d aralığı (s)	Gruptaki toplam çözüm / ivme kaydı sayısı	Ortalama t_d (s)	Ortalama PGA (g)
1	$t_d \leq 12$	21996 / 70	9.3	0.09
2	$12 < t_d \leq 20$	27090 / 84	15.5	0.08
3	$20 < t_d \leq 28$	15960 / 57	23.6	0.06
4	$t_d > 28$	16608 / 57	34.0	0.08



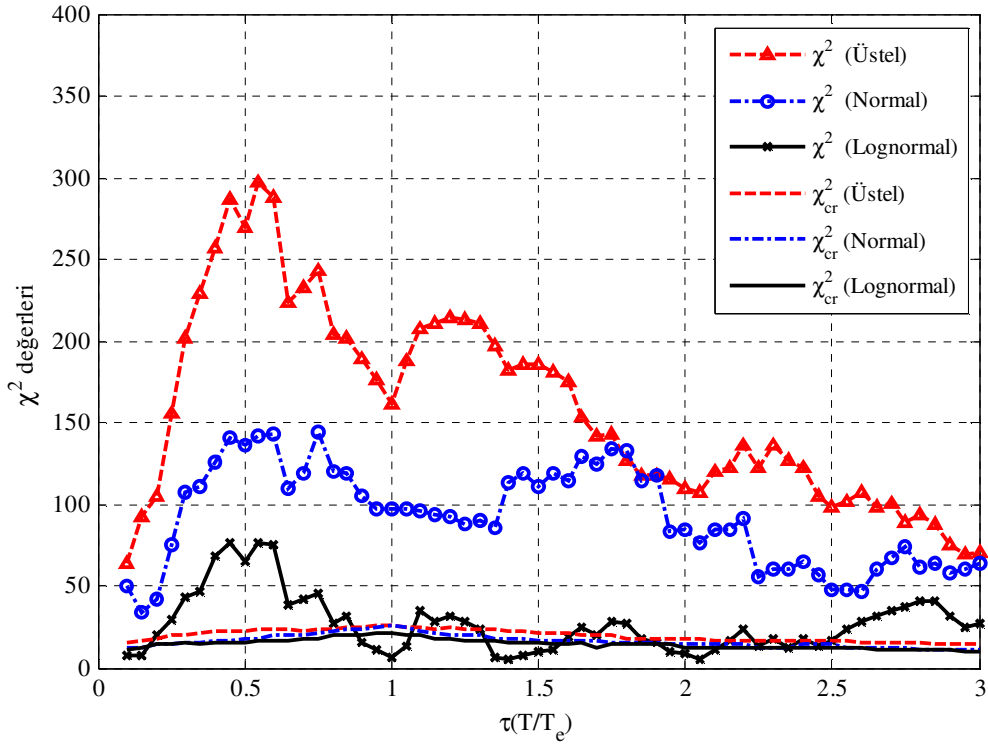
Şekil 2.31 Göz önüne alınan t_d grupları için ortalama giriş enerjisi hızları



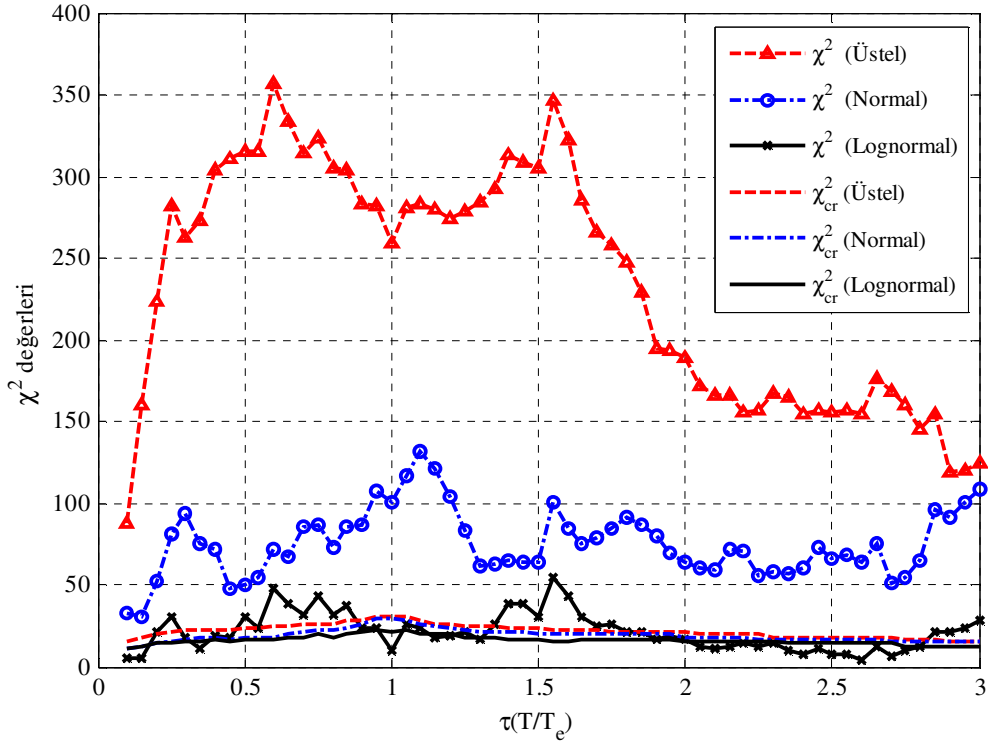
Şekil 2.32 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNtd=1)



Şekil 2.33 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNtd=2)



Şekil 2.34 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNtd=3)



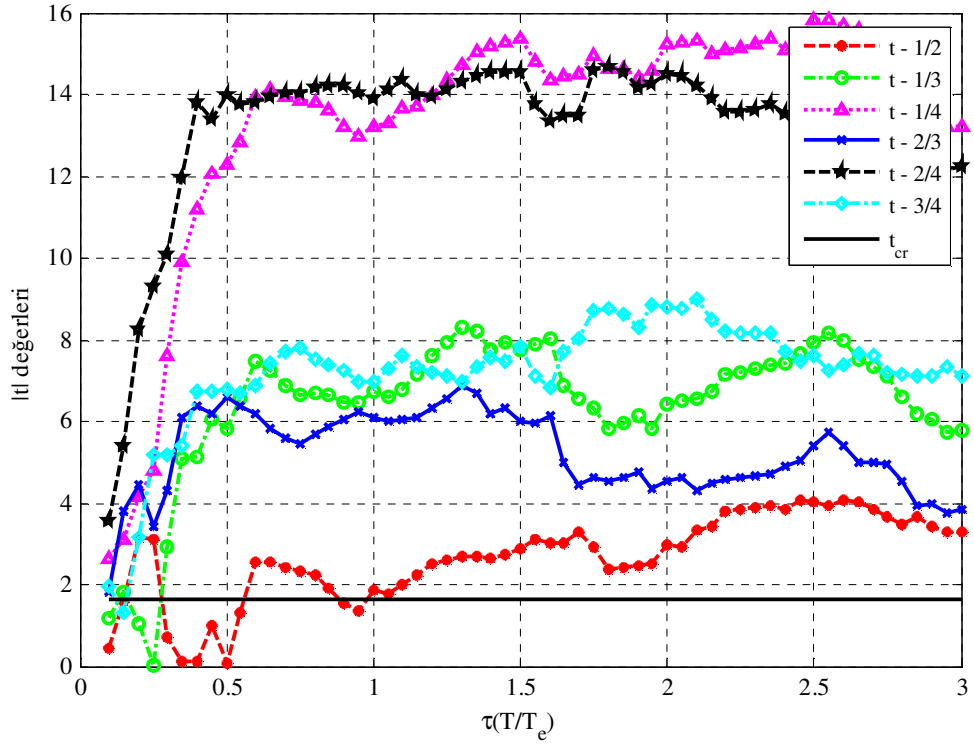
Şekil 2.35 Karşılaştırılan aday dağılımlar için ki-kare istatistik değerleri (GNtd=4)

Göz önüne alınan t_d grupları lognormal dağıldığı için, gruplardaki eşdeğer hız değerlerinin doğal logaritması alınmış ve tüm gruplara ikişerli olarak t-testi uygulanmıştır. Testler sonucunda elde edilen t-istatistik değerleri Şekil 2.36'da verilmiştir. Şekil 2.36'da; Grup 1/2, 1/3, 1/4, 2/3, 2/4 ve 3/4 sırasıyla 1 ile 2, 1 ile 3, 1 ile 4, 2 ile 3, 2 ile 4 ve 3 ile 4 numaralı grupların karşılaştırılması sonucunda elde edilen t-istatistik değerlerini gösterir. Şekil 2.36'da %5 istatistiksel doğruluk seviyesi için gösterilen t_{cr} değerleri; tüm grup eşleşmeleri için, her bir T/T_e değerindeki serbestlik derecesine bağlı olarak farklıdır. Ancak eşleşmelerdeki serbestlik dereceleri tüm spektral bölgelerde birbirine yakın olduğu için, t_{cr} yaklaşık olarak 1.65 değerine eşit çıkmaktadır.

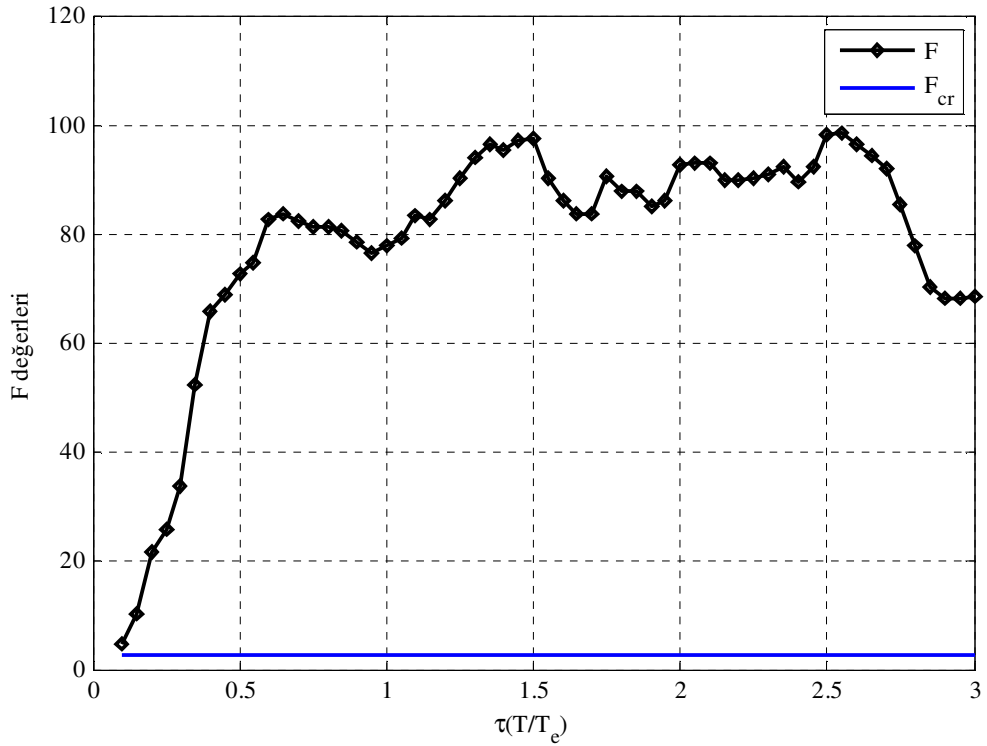
Şekil 2.36'dan da görülebileceği üzere, göz önüne alınan tüm grup eşleşmeleri için hesaplanan t-istatistik değerleri, neredeyse tüm spektral bölgelerde %5 istatistiksel doğruluk seviyesi için hesaplanan kritik t-istatistik değerlerinden (t_{cr}) büyüktür. Dolayısıyla, “gruplar arasındaki ortalamalar farklı değildir” hipotezi (null hypothesis) kabul edilemez ve alternatif hipotez “gruplar arasındaki ortalamalar farklıdır” geçerli olur.

1 ile 2 eşleşmesi için hesaplanan t-istatistik değerleri, 2 ile 3 ve 3 ile 4 grup eşleşmeleri için hesaplanan değerlerden daha küçük çıkmaktadır. Bu durum; etkili yer hareketi süresinin artmasıyla beraber, etkili yer hareketi süresindeki değişimin giriş enerjisi üzerinde nispeten daha etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 1 ile 4 ve 2 ile 4 numaralı grupların eşleşmesinden dolayı hesaplanan t-istatistik değerlerinin diğerlerinden çok daha büyük olması; etkili yer hareketi süreleri arasındaki farkın artmasıyla, ortalama eşdeğer giriş enerjisi hızları arasındaki farkın da artmakta olduğunu göstermektedir.

Tüm t_d grupları göz önüne alınarak yapılan varyasyon analizi (ANOVA) sonuçları tüm T/T_e değerleri için Şekil 2.37'de verilmiştir. ANOVA ile hesaplanan F-istatistik değerleri, tüm spektral bölgelerde, %5 istatistiksel doğruluk seviyesi için hesaplanan F_{cr} değerinden büyük olduğu için, “gruplar arasındaki ortalamalar farklı değildir” hipotezi (null hypothesis) kabul edilemez ve alternatif hipotez “gruplar arasındaki ortalamalar farklıdır” geçerli olur. Tüm gruplar için hesaplanan F-istatistik değerinin, F_{cr} değerinden oldukça büyük olması da göz önüne alınarak; yer hareketi süresinin eşdeğer giriş enerjisi hızı üzerinde önemli derecede etkili olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 2.36 Farklı t_d grupları için t-testi sonucunda elde edilen t değerleri spektrumu



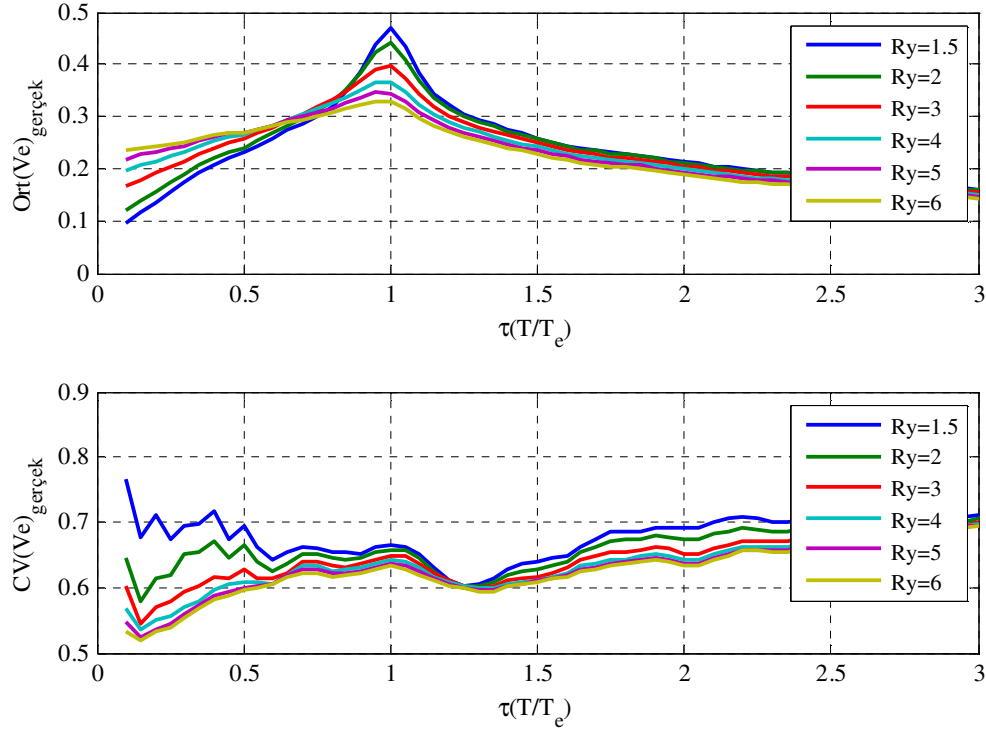
Şekil 2.37 Farklı t_d grupları için ANOVA sonucunda elde edilen F değerleri spektrumu

2.1.2 Giriş Enerjisinin Tahmini

BSD sisteme giren enerji E_i , eşdeğer hız tanımı yapılarak (2.1) denklemi ile ifade edilebilir:

$$V_e = \sqrt{\frac{2 \cdot E_i}{m}} \quad (2.1)$$

Burada m BSD sistemin kütlesidir. Zaman tanım alanında çözümlenmelerle hesaplanan eşdeğer giriş enerjisi hızları için ortalama spektrumlar ve varyasyon katsayıları farklı dayanımlar için Şekil 2.38'de verilmiştir. Dayanıma bağlı olarak giriş enerjisi iki spektral bölgede farklı eğilim göstermektedir: Yaklaşık olarak doğal titreşim periyodu $0.7T_e$ 'den küçük sistemlerde dayanım arttıkça giriş enerjisinin ortalamada azalma, $0.7T_e$ 'den büyük sistemlerde ise artma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca dayanım arttıkça, giriş enerjisinin saçılmaları da artmaktadır.



Şekil 2.38 Ortalama giriş enerjisi hızı spektrumları (m/s) ve varyasyon katsayıları (ZTAÇ sonuçları)

Eşdeğer giriş enerjisi hızının tahmini için güvenilir bir istatistiksel değerlendirme yapılabilmesi amacıyla; analizlerde, detayları Bölüm 1.3'te verilen geniş bir uzak-fay yer hareketi veritabanı kullanılmıştır. τ (T/T_e) değerleri 0.1 ile 3.0 arasında değişen, farklı dayanımlara sahip ($R_y=1.5, 2, 3, 4, 5, 6$) %5 sönümlü BSD elastoplastik sistemler için doğrusal

olmayan zaman tanım alanında çözümlenmeler yapılarak giriş enerjileri hesaplanmıştır. Eşdeğer giriş hızını veren bağıntı aşağıda sıralanan adımlar izlenerek elde edilmiştir:

- Daha uygun olduğu görülerek üstel bir bağıntı (power function) seçilmiştir:

$$V_e = a \cdot \delta_1^b \cdot \delta_2^c \cdot \delta_3^d \cdot \delta_4^e \quad (2.2)$$

Burada a, b, c, d ve e istatistiksel regresyonla tahmin edilen katsayılar, δ_1 , δ_2 , δ_3 ve δ_4 elastik spektral sözde hız PSV, dayanım azaltma katsayısı R_y , normalleştirilmiş periyot τ (T/T_e) ve Trifunac ve Brady (1975) tarafından önerilmiş etkili yer hareketi süresi t_d 'ye bağlı parametrelerdir.

- Zaman tanım alanında çözümlenme sonucunda elde edilen eşdeğer giriş enerjisi hızı değerleri ile önerilen bağıntı ile elde edilen değerler karşılaştırılarak regresyon çözümlenmesi yapılmıştır.
- En küçük kareler hata fonksiyonunu (least squares loss function, L) en küçük yapan en elverişli katsayılar seçilmiştir.

$$L = \left[(V_e)_{\text{gerçek}} - (V_e)_{\text{tahmin}} \right]^2 \quad (2.3)$$

- Standart hatayı en küçük yapan en elverişli katsayılar seçilmiştir.

İstatistiksel regresyon analizi sonucunda (2.4) denklemi elde edilmiştir:

$$V_e = \begin{cases} 0.66 \cdot \text{PSV}^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T-0.55)} \cdot t_d^{0.27} \cdot \tau^{-0.2} & T < T_e \\ 0.66 \cdot \text{PSV}^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T-0.55)} \cdot t_d^{0.27} & T \geq T_e \end{cases} \quad (2.4)$$

(2.4) denklemi için hesaba katılan varyans oranı $T < T_e$ için $R^2 = \%85$, $T \geq T_e$ için $R^2 = \%93$ bulunmuştur. Zaman tanım alanında çözümlenmelerle hesaplanan ve önerilen bağıntıyla tahmin edilen değerler Şekil 2.39-2.41'de gösterilmiştir. Regresyon analizlerinde doğal titreşim periyotları 0.1s ile 3.0s arasında değişen BSD sistemler göz önüne alınmıştır. Yapılan değerlendirmelerde, önerilen denklem doğal titreşim periyodu 3.0s ile 5.0s arasında olan sistemler için de yaklaşık aynı standart hata ile sonuç vermektedir.

Önerilen (2.4) denklemi ile tahmin edilen ortalama eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumları, farklı dayanım azaltma katsayıları için Şekil 2.42'de gösterilmiştir. Önerilen denklem için ağırlıklı ortalama hata, standart hata, toplam sapma ve hatalar için varyasyon katsayıları ise Şekil 2.43-2.45'te verilmiştir.

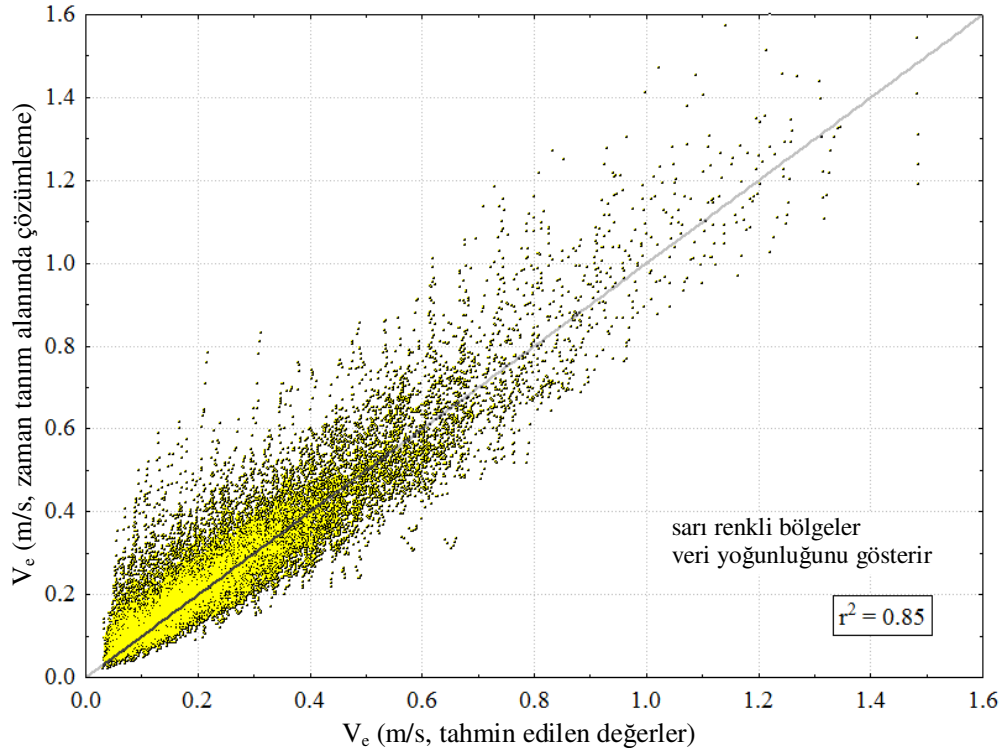
Tasarım sürecinde etkili yer hareketi süresi t_d 'yi tahmin etmek çoğu zaman mümkün olmayabilir. t_d 'nin yeterli güvenilirlikte tahmin edilemediği durumlarda $t_d=19s$ alınarak, eşdeğer giriş enerjisi hızının tahminine izin veren (2.4) denklemi basitleştirilebilir. Bu durumda (2.4) denklemi

$$V_e = \begin{cases} 1.45 \cdot PSV^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T-0.55)} \cdot \tau^{-0.2} & T < T_c \\ 1.45 \cdot PSV^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T-0.55)} & T \geq T_c \end{cases} \quad (2.5)$$

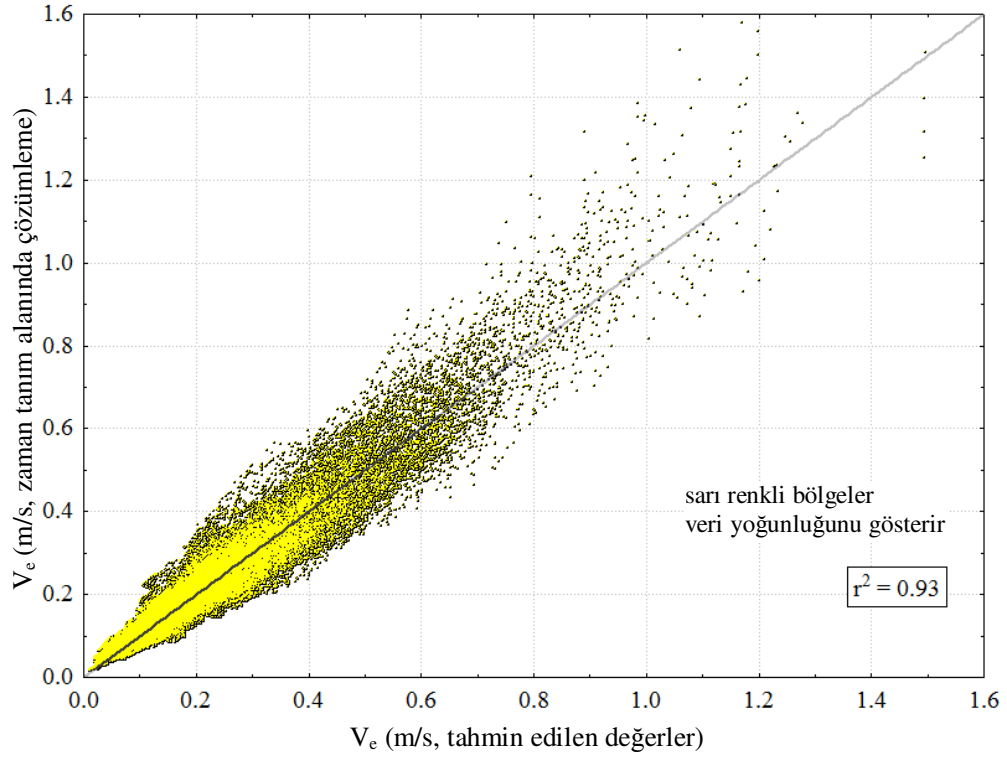
şeklini alır. (2.5) denklemi ile tahmin edilen eşdeğer giriş enerjisi hızı için ağırlıklı ortalama hatalar ve hataların varyasyon katsayıları Şekil 2.46'da verilmiştir.

Yer hareketi sonunda birim kütleye giren toplam giriş enerjisi (2.1) ve (2.4) denklemleri kullanılarak (2.6) denklemi ile tahmin edilebilir:

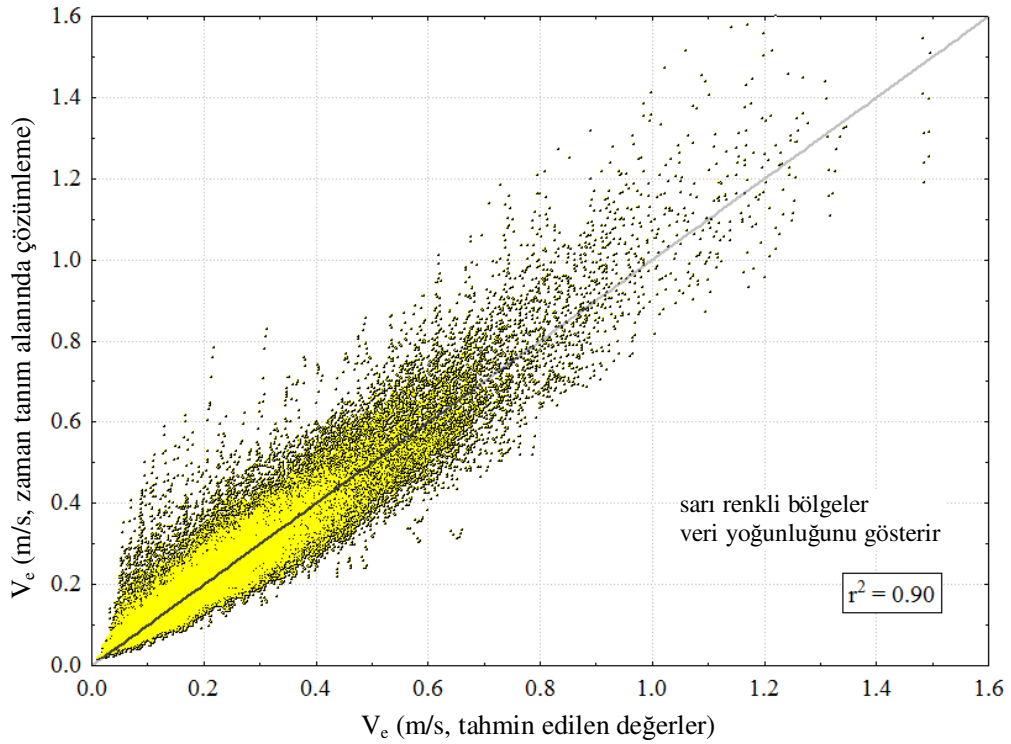
$$\frac{E_i}{m} = \frac{1}{2} \cdot V_e^2 = \begin{cases} 0.22 \cdot PSV^{1.72} \cdot R_y^{-0.2(T-0.55)} \cdot t_d^{0.54} \cdot \tau^{-0.4} & T < T_c \\ 0.22 \cdot PSV^{1.72} \cdot R_y^{-0.2(T-0.55)} \cdot t_d^{0.54} & T \geq T_c \end{cases} \quad (2.6)$$



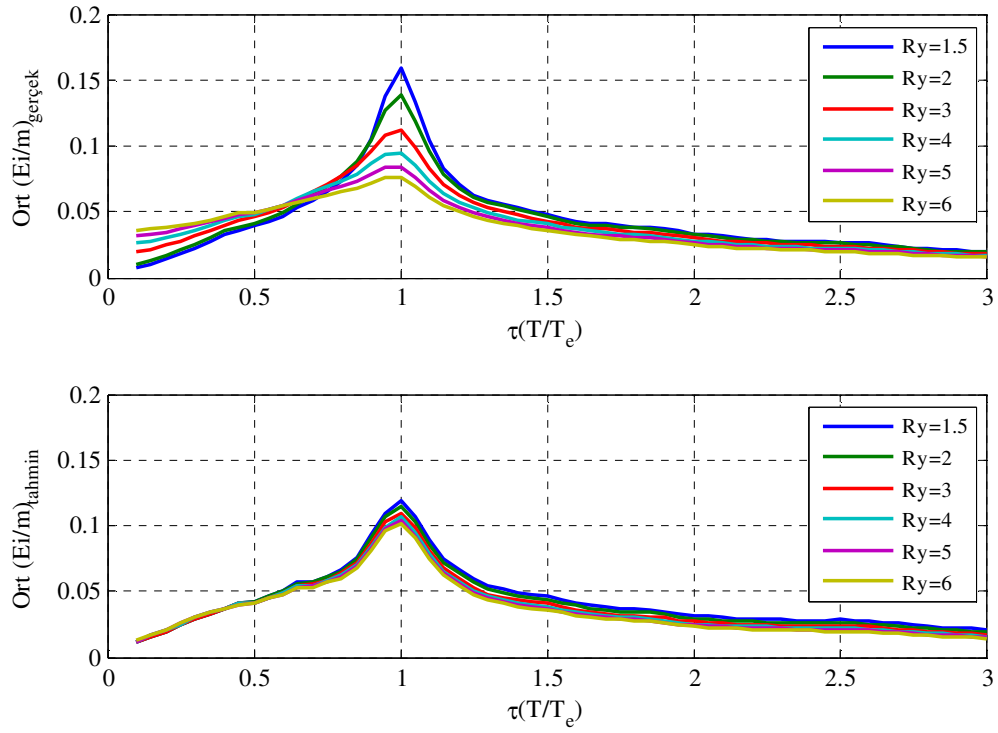
Şekil 2.39 Gözlenen ve tahmin edilen giriş enerjisi hızı değerleri ($0.1 \leq T/T_c < 1.0$)



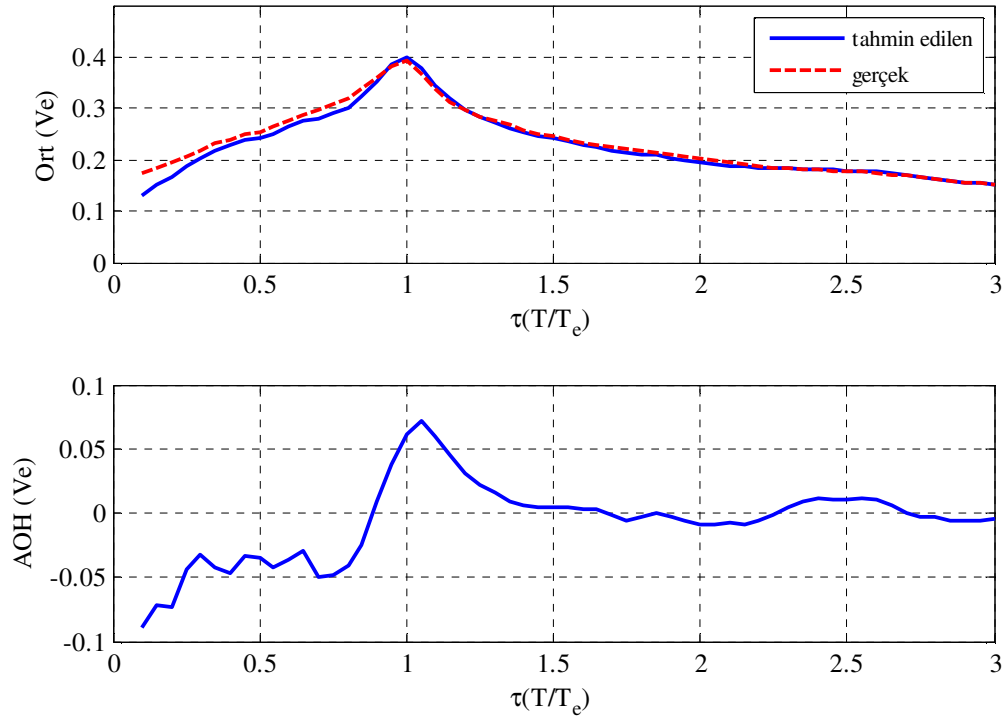
Şekil 2.40 Gözlenen ve tahmin edilen giriş enerjisi hızı değerleri ($1.0 \leq T/T_e \leq 3.0$)



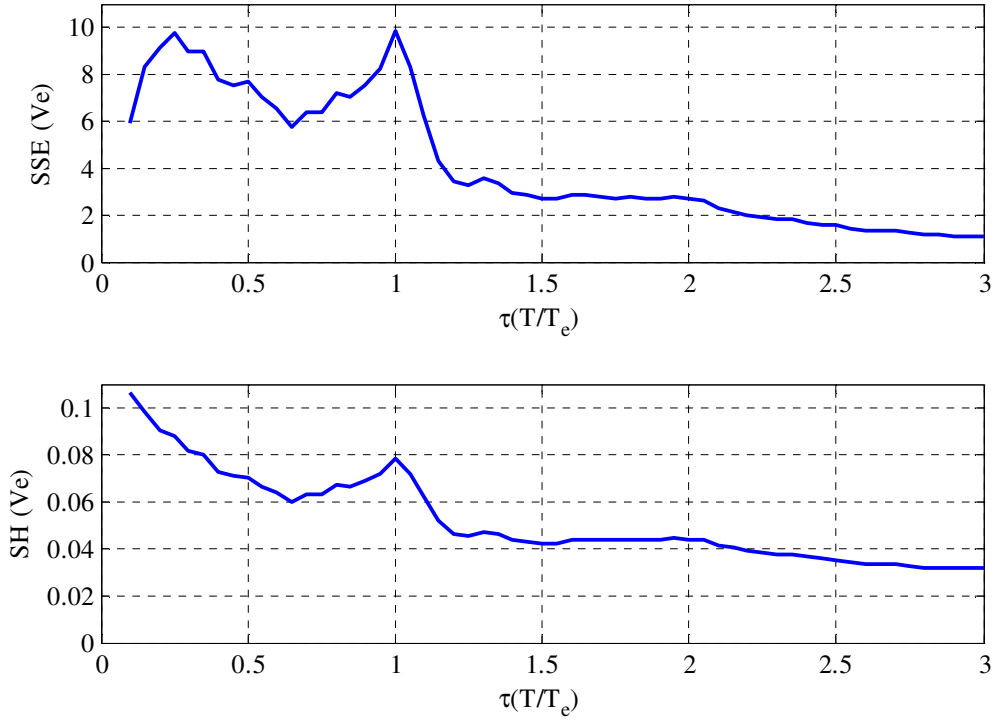
Şekil 2.41 Gözlenen ve tahmin edilen giriş enerjisi hızı değerleri ($0.1 \leq T/T_e \leq 3.0$)



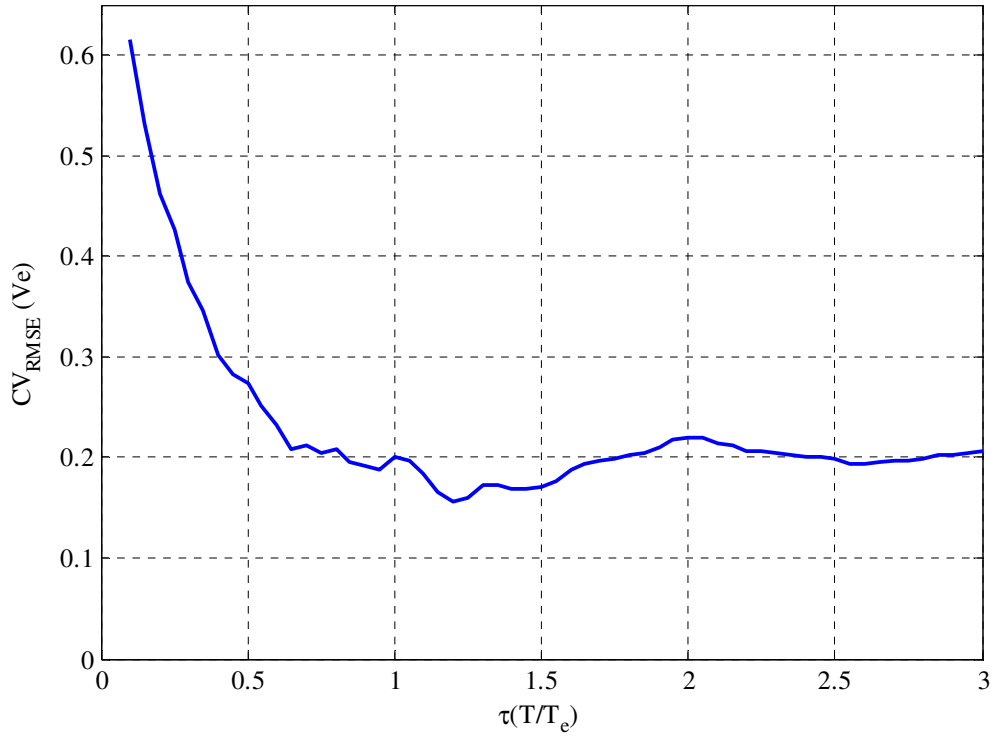
Şekil 2.42 Ortalama giriş enerjisi spektrumları (m^2/s^2)



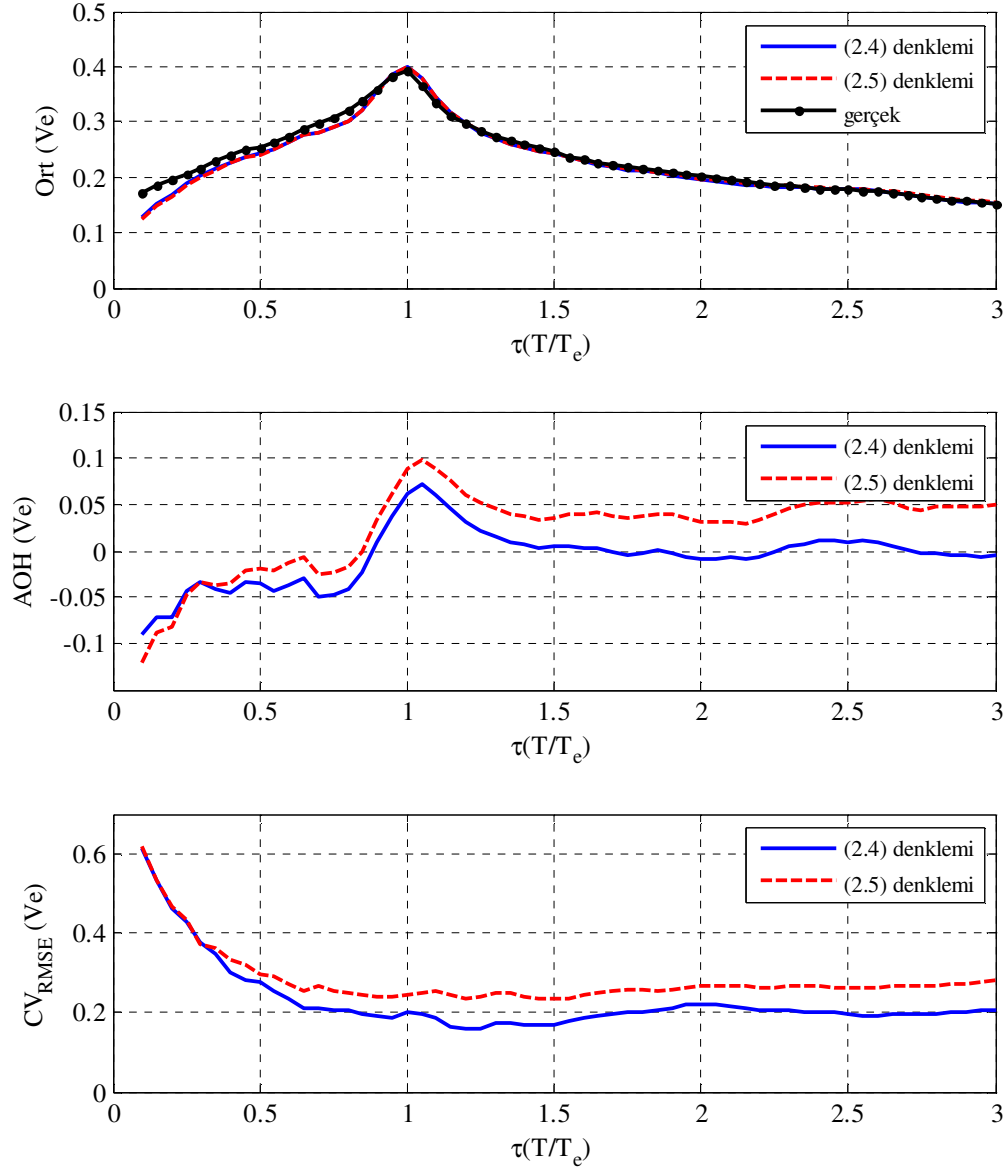
Şekil 2.43 Ortalama giriş enerjisi hızı spektrumları (m/s) ve ağırlıklı ortalama hatalar



Şekil 2.44 Toplam sapmalar ve standart hatalar (2.4 denklemi)



Şekil 2.45 Hataların varyasyon katsayıları (2.4 denklemi)



Şekil 2.46 Önerilen alternatif denklem (2.5 denklemleri) için ağırlıklı ortalama hatalar ve varyasyon katsayıları

Güven Aralıkları

Her bir normalleştirilmiş periyot değeri için, önerilen bağıntı ile bulunan hataların olasılıksal veya birikimli dağılım eğrileri belirlenebilir. Bu eğriler yardımıyla; belirli bir olasılık değeri ve göz önüne alınan veritabanı için, önerilen bağıntının hata miktarı bulunabilir. Böylelikle; yer hareketi ile yapıya geçen giriş enerjisi belirli bir güven aralığında tahmin edilebilir.

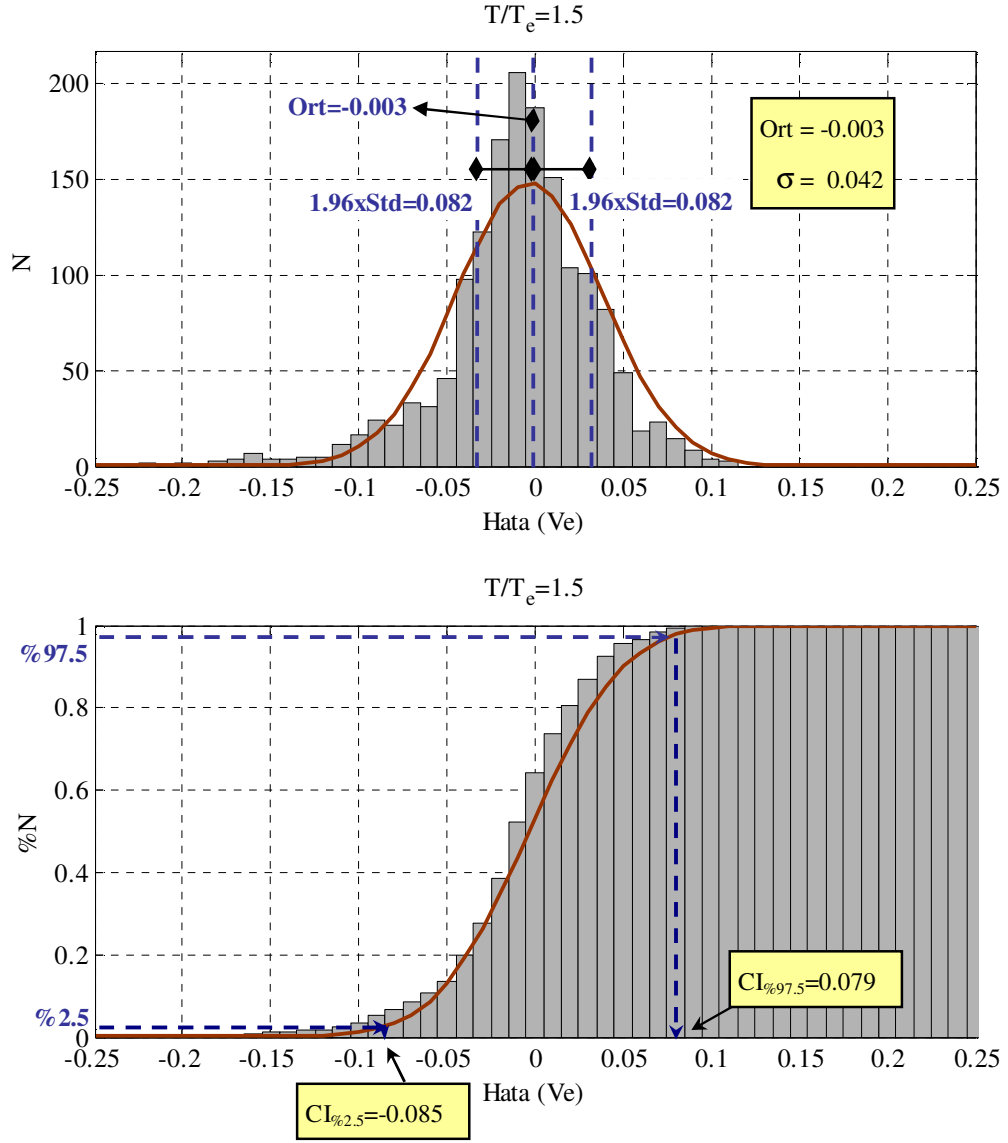
Belirli bir T/T_e değerinde, normal dağılıma uyan hatalar için olasılıksal dağılım fonksiyonu (pdf, probability distribution function) (2.7) denkleminde bulunabilir:

$$\text{pdf}(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \text{Ort})^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (2.7)$$

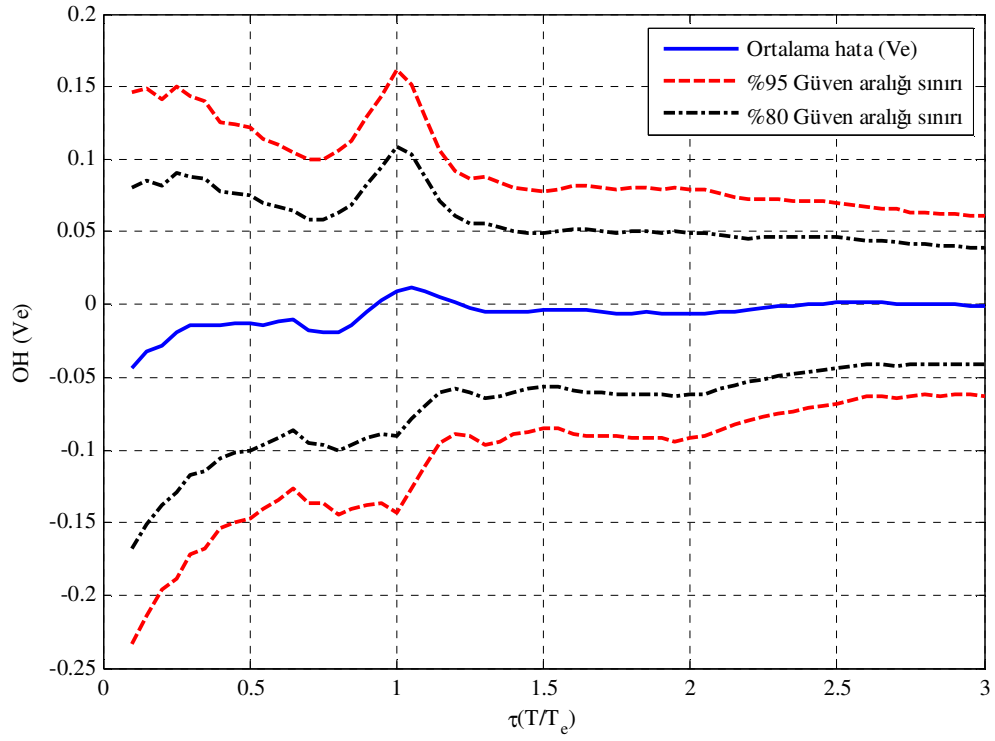
Burada σ hataların standart sapmasını, Ort hataların ortalamasını gösterir.

Örnek olarak Şekil 2.47’de, $T/T_e=1.5$ için, önerilen bağıntı ile tahmin edilen V_e değerlerinin hatalarının olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri gösterilmiştir. Bilindiği üzere; normal dağılıma uyan bir değişkende, olasılıksal dağılım eğrisinin altında kalan alanın %95’ini sınırlayan değerler “Ort \pm 1.96 σ ” olmaktadır. Bir başka deyişle; gözlenen hataların bu sınır değerler arasında kalma olasılığı %95’tir. Bu istatistik, birikimli dağılım eğrisi kullanılarak da bulunabilir: birikimli dağılım eğrisinde “Ort+1.96 σ ” değerinden daha büyük hata gözlenme olasılığı %97.5, “Ort-1.96 σ ” değerinden daha küçük gözlenme olasılığı ise %2.5’tir (Şekil 2.47). Bu durumda %95 olasılıklı güven aralığı sınır değerleri yine “Ort \pm 1.96 σ ” olmaktadır.

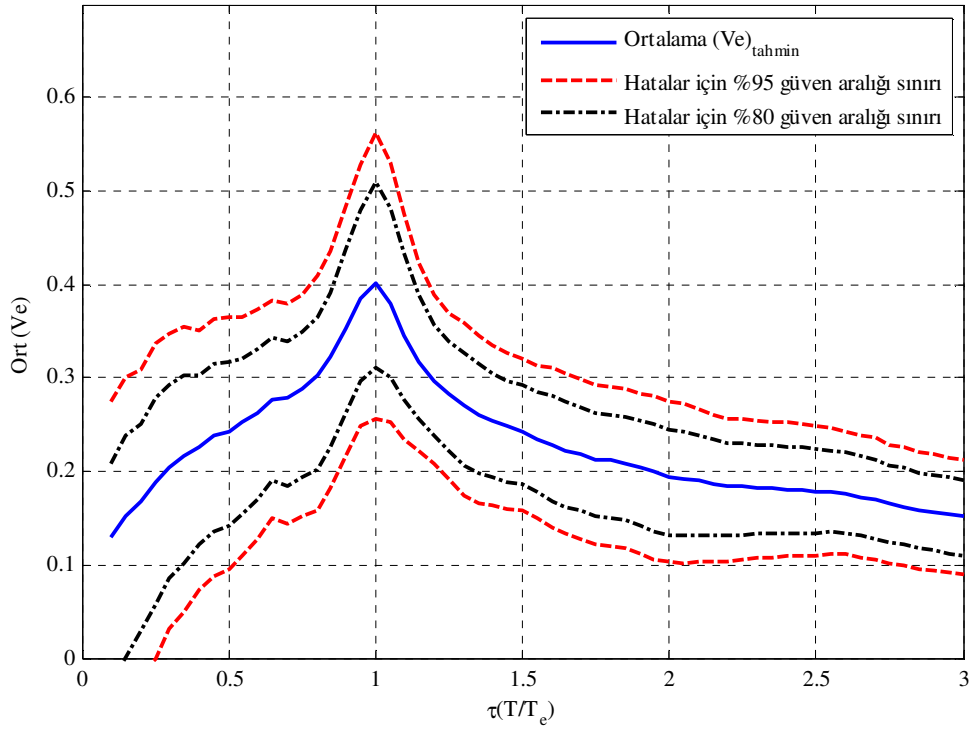
Önerilen bağıntı ile tahmin edilen V_e değerlerinin hataları için belirlenen güven aralıkları Şekil 2.48 ve 2.49’da verilmiştir. Ayrıca farklı T/T_e değerleri için hata histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri Ek 1’de verilmiştir.



Şekil 2.47 Hataların olasılıksal ve birikimsel dağılım eğrileri ($T/T_e=1.5$)



Şekil 2.48 Ortalama hatalar ve hatalar için güven aralıkları (2.4 denklemi)

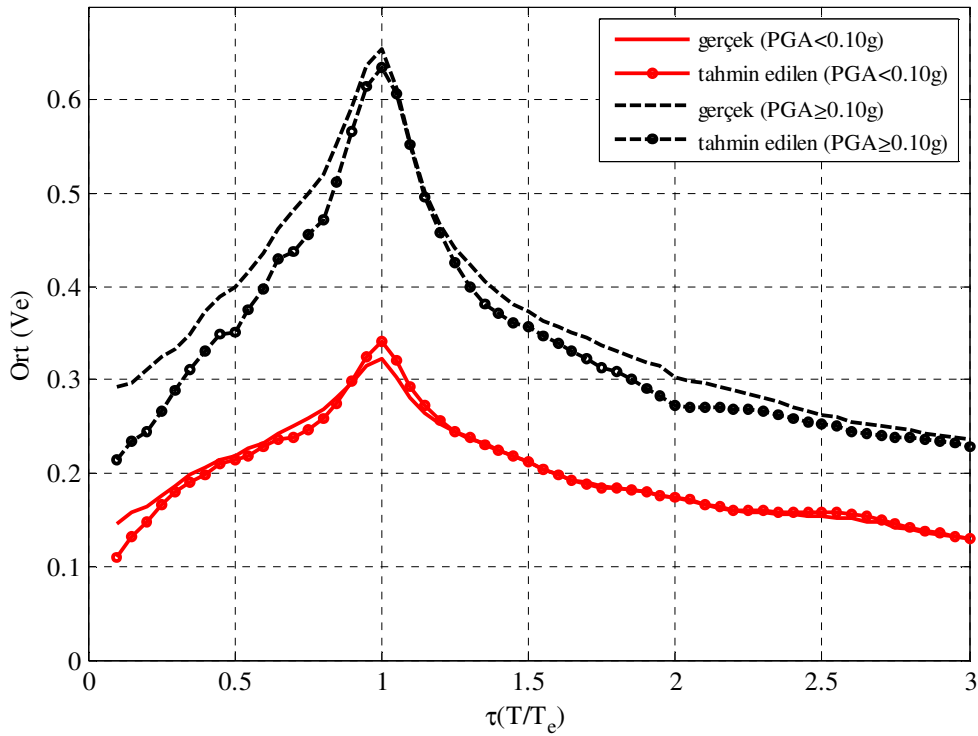


Şekil 2.49 Ortalama eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumu ve hatalar için güven aralıkları (2.4 denklemi)

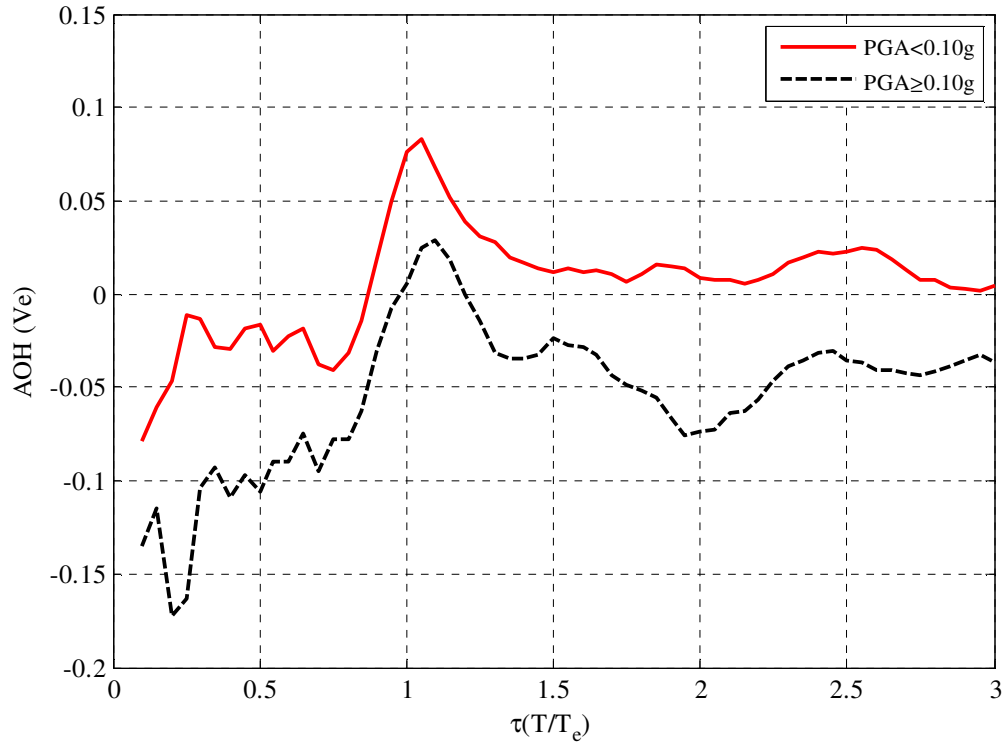
En Büyük Yer Hareketi İvmesi PGA'nın Etkisi

En büyük yer hareketi ivmesi PGA, Çizelge 2.1'de verilen korelasyon katsayılarından da görülebileceği üzere, eşdeğer giriş enerjisi hızı üzerinde oldukça etkilidir. Önerilen (2.4) denkleminde, bu etki spektral elastik sözde-hız PSV ile göz önüne alınmıştır.

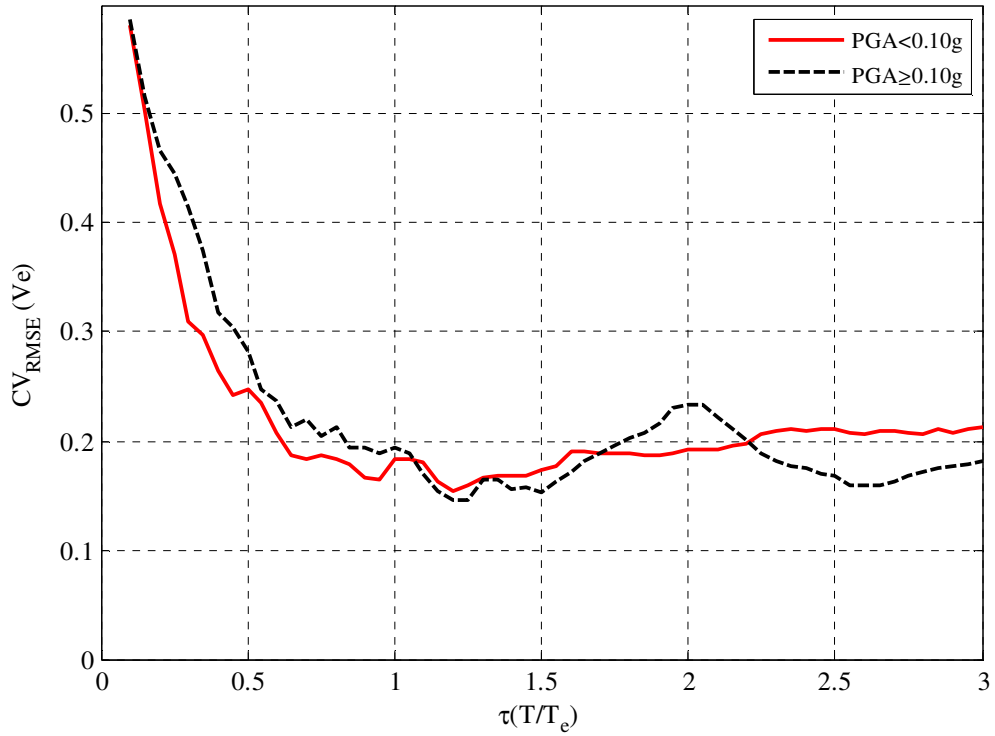
(2.4) denkleminin farklı PGA değerleri için duyarlılığını irdelemek amacıyla; yer hareketi veritabanı PGA'ya göre iki gruba ayrılmıştır ($PGA < 0.10g$ ve $PGA \geq 0.10g$). Gruplardaki yer hareketlerinin PGA ortalamaları, $0.06g$ ve $0.14g$ 'dir. Yapılan çözümlenmelerde; grupların ağırlıklı ortalama hata ve standart hataları karşılaştırıldığında; önerilen denklemin iki ayrı yer ivmesi grubu için de benzer hatalar gösterdiği anlaşılmaktadır (Şekil 2.50-2.52).



Şekil 2.50 Ortalama giriş enerjisi hızı spektrumları (m/s)



Şekil 2.51 Ağırlıklı ortalama hatalar (2.4 denklemi)



Şekil 2.52 Hataların varyasyon katsayıları (2.4 denklemi)

En Büyük Giriş Enerjisi

Giriş enerjisinin en büyük değerinin tahmini de incelenmeye değer önemli bir konudur (Manfredi, 2000). Giriş enerjisinin pik değerini aldığı periyot olarak tanımlanan karakteristik periyot T_e için (2.4) denklemi tekrar düzenlenirse:

$$(V_e)_{\text{maks}} = 0.66 \cdot \text{PSV}_{T_e}^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T_e-0.55)} \cdot t_d^{0.27} \quad (2.8)$$

(2.8) denklemi ile en büyük giriş enerjisi hızı tahmin edilmiş olur. Burada PSV_{T_e} %5 sönümlü elastik sözde hız spektrumunda T_e periyoduna karşılık gelen spektral sözde hızı gösterir. (2.8) denklemi için hesaba katılan varyans oranı $R^2 = \%92$ bulunmuştur. En büyük giriş enerjisi hızı için ağırlıklı ortalama hata ve standart hata değerleri sırasıyla $\text{AOH} = 0.041$ ve $\text{SH} = 0.075$, varyasyon katsayısı (CV_{RMSE}) ise 0.195 bulunmuştur. Tahmin edilen ve zaman tanım alanında çözümlenme ile bulunan $(V_e)_{\text{maks}}$ değerleri Şekil 2.53'te verilmiştir.

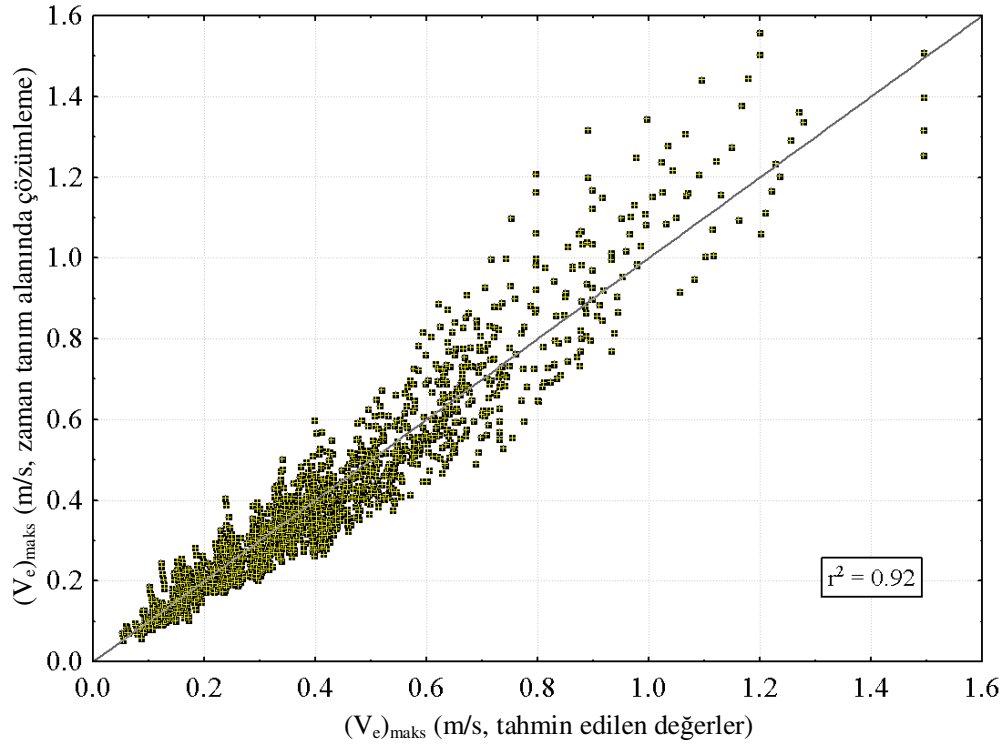
En büyük giriş enerjisi ise (2.9) denklemi ile bulunabilir:

$$\left(\frac{E_i}{m}\right)_{\text{maks}} = \frac{1}{2} \cdot (V_e)_{\text{maks}}^2 = 0.22 \cdot \text{PSV}_{T_e}^{1.72} \cdot R_y^{-0.2(T_e-0.55)} \cdot t_d^{0.54} \quad (2.9)$$

Eşdeğer giriş hızına benzer şekilde, etkili yer hareketi süresinin tahmin edilemediği durumlarda, yaklaşık olarak $t_d = 19\text{s}$ alınarak en büyük eşdeğer giriş enerjisi hızı $(V_e)_{\text{maks}}$ ve en büyük giriş enerjisi $(E_i)_{\text{maks}}$ bulunabilir (2.10 ve 2.11). Bu durumda en büyük eşdeğer giriş enerjisi hızı $(V_e)_{\text{maks}}$ için ağırlıklı ortalama hata ve standart hata sırasıyla $\text{AOH} = 0.073$ ve $\text{SH} = 0.093$, varyasyon katsayısı (CV_{RMSE}) ise 0.240 olmaktadır.

$$(V_e)_{\text{maks}} = 1.45 \cdot \text{PSV}_{T_e}^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T_e-0.55)} \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{E_i}{m}\right)_{\text{maks}} = \frac{1}{2} \cdot (V_e)_{\text{maks}}^2 = 1.05 \cdot \text{PSV}_{T_e}^{1.72} \cdot R_y^{-0.2(T_e-0.55)} \quad (2.11)$$



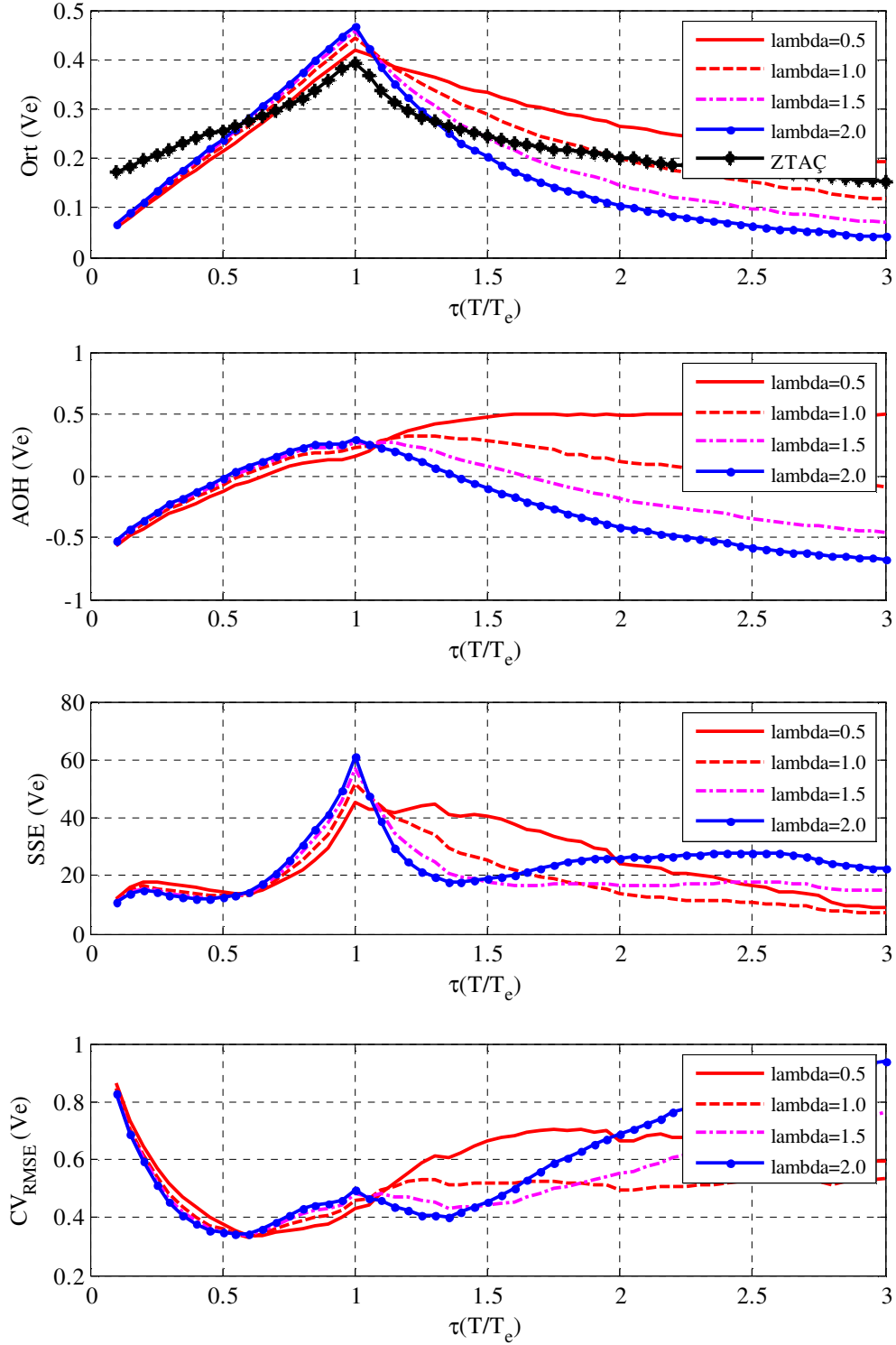
Şekil 2.53 Gözlenen ve tahmin edilen en büyük giriş enerjisi hızı değerleri

2.1.3 Giriş Enerjisi için Önerilmiş Farklı Bağıntıların Karşılaştırılması

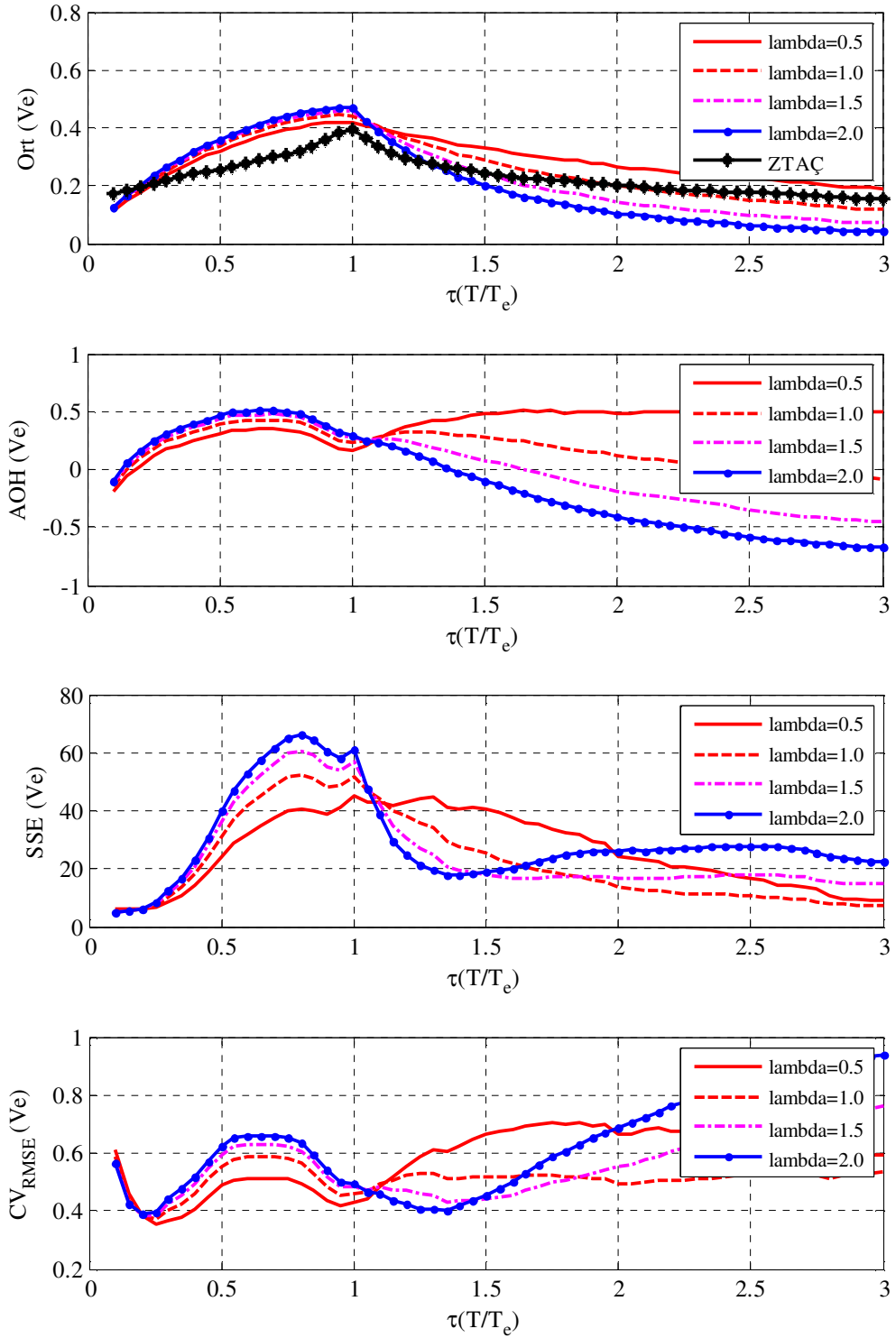
Bu çalışmada önerilen bağıntı, giriş enerjisi için önerilmiş literatürdeki bazı diğer bağıntılarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan bağıntılarla ilgili detaylar Bölüm 1.2’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan yer hareketi veritabanı için yapılan çözümler sonucunda; karşılaştırılan bağıntılarla elde edilen eşdeğer giriş enerjisi hızları için ortalama spektrumlar, ağırlıklı ortalama hatalar, standart hatalar, toplam sapmalar ve hataların varyasyon katsayıları Şekil 2.56-2.60’da verilmiştir.

Chai ve Fajfar (2000) ve Kunnath ve Chai (2004) tarafından önerilen giriş enerjisi hızı denklemlerinde; yer hareketinin hakim periyodundan daha uzun sistemlerde spektral şekil bir λ katsayısına bağlı olarak tanımlanmıştır. Kullanılan yer hareketi veritabanına bağlı olarak değişen bu katsayı için Chai ve Fajfar (2000) $\lambda=1.0$, Kunnath ve Chai (2004) ise $\lambda=0.5$ değerinin daha uygun sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada önerilen (2.4) denklemiyle sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi için; karşılaştırmada kullanılan yer hareketi veritabanı (Bölüm 1.3) göz önüne alınarak dört farklı λ katsayısı (0.5, 1.0, 1.5, 2.0) için söz konusu yazarlar tarafından önerilen denklemler irdelenmiştir (Şekil 2.54-2.55). Ağırlıklı ortalama hatalar ve hataların varyasyon katsayıları göz önüne alındığında, bu

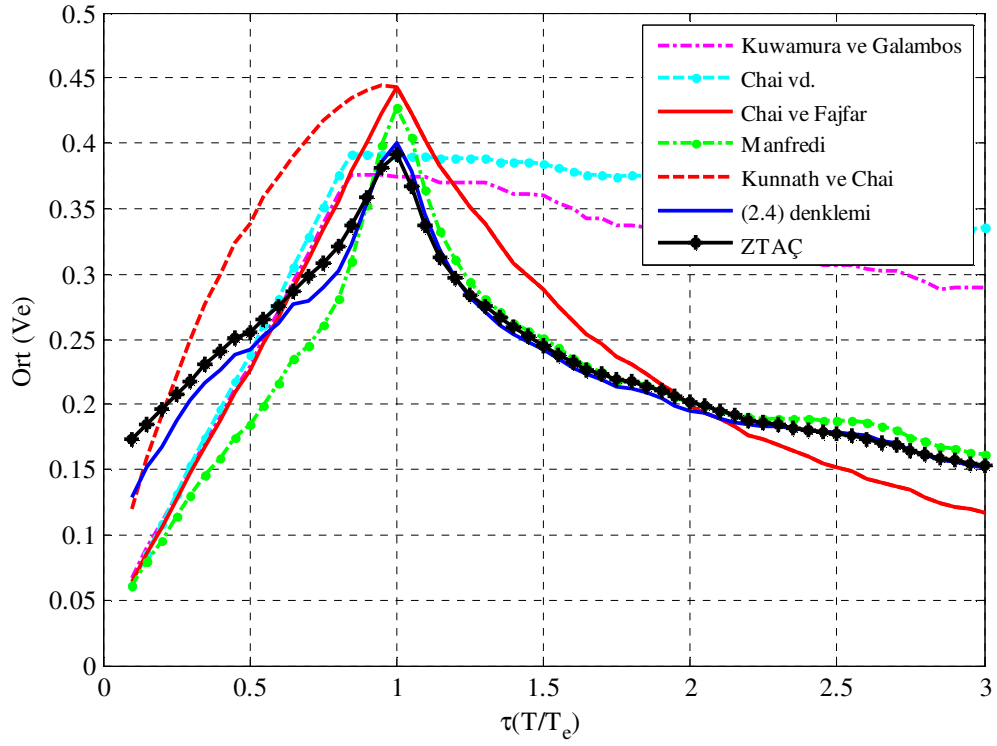
çalışmada kullanılan yer hareketi veritabanı için en uygun λ değerinin $\lambda=1.0$ olduğu gözlenmiştir.



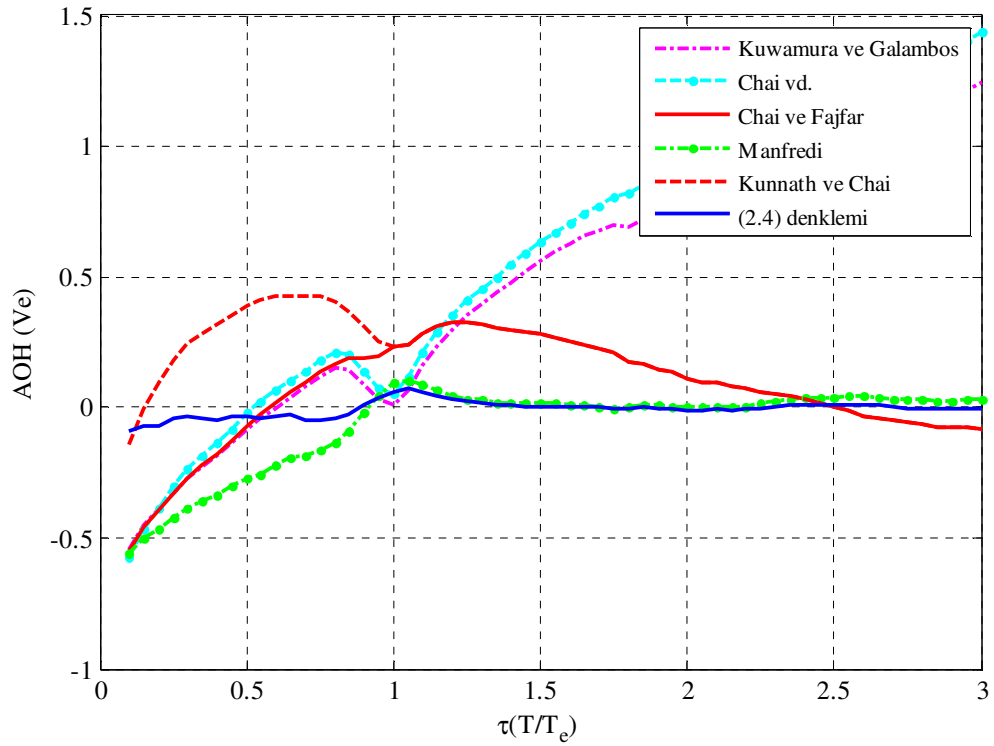
Şekil 2.54 Farklı λ değerleri için giriş enerjisi hızlarının değerlendirilmesi (Chai ve Fajfar, 2000)



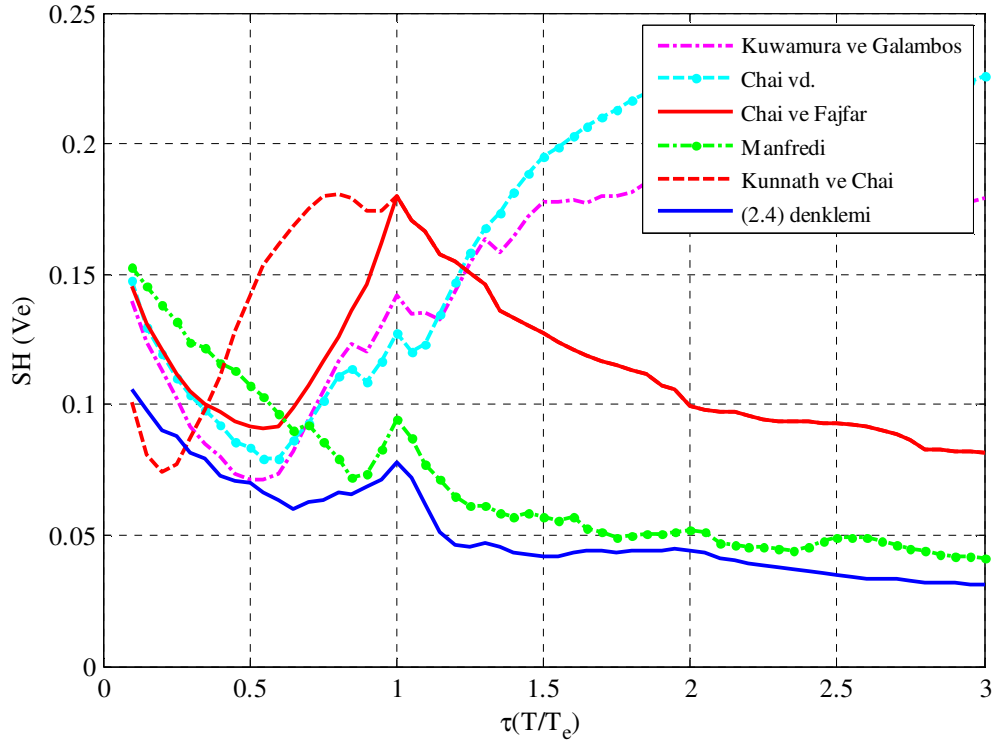
Şekil 2.55 Farklı λ değerleri için giriş enerjisi hızlarının değerlendirilmesi (Kunnath ve Chai, 2004)



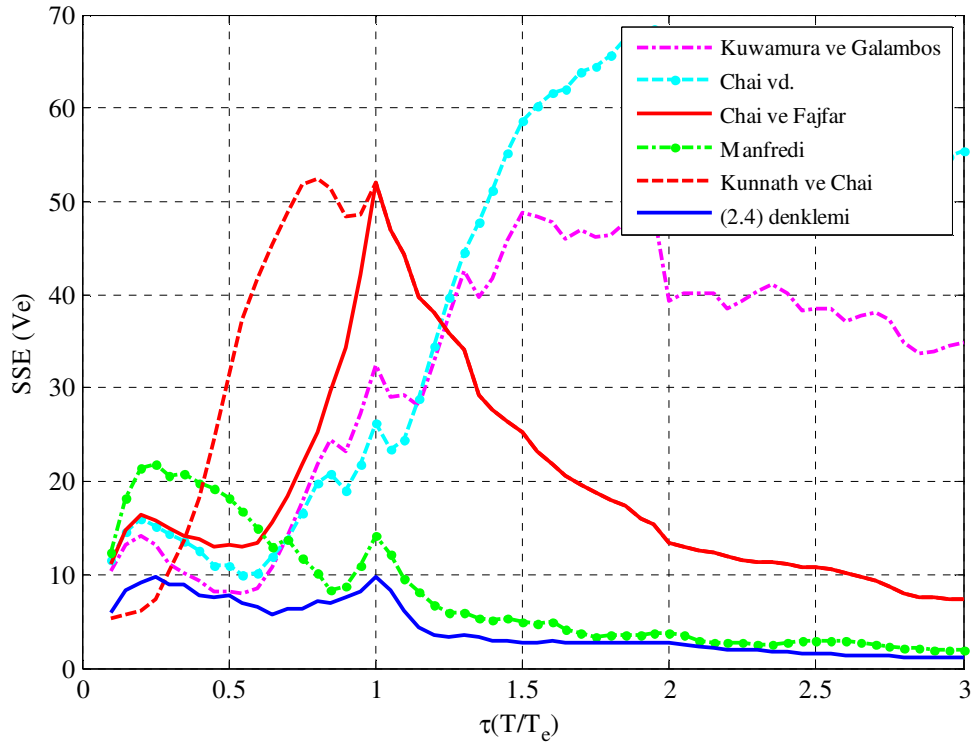
Şekil 2.56 Ortalama giriş enerjisi hızı spektrumları (m/s)



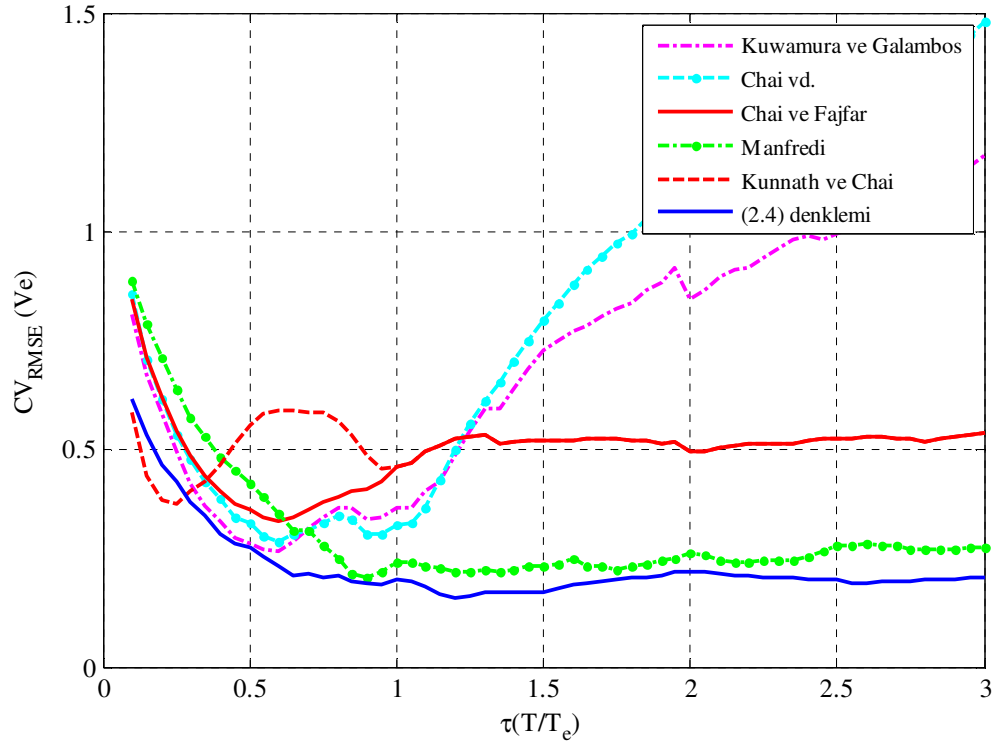
Şekil 2.57 Ağırlıklı ortalama hatalar



Şekil 2.58 Standart hatalar



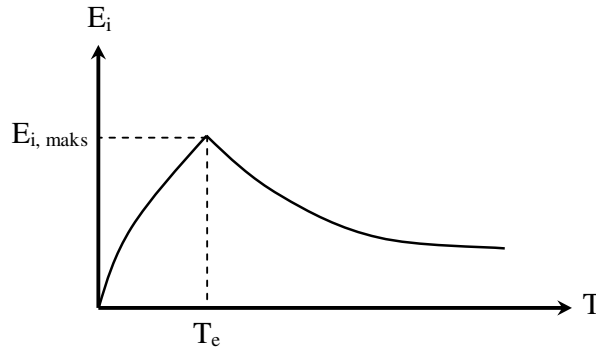
Şekil 2.59 Toplam saplamalar



Şekil 2.60 Hataların varyasyon katsayıları

2.1.4 Karakteristik Periyodun Tahmini

Giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyot olarak tanımlanan karakteristik periyot; bir önceki bölümde önerildiği biçimde, giriş enerjisinin tahmininde etkili bir parametre olarak kullanılabilir. Bunun yanında, literatürde, giriş enerjisi spektrumunu (Şekil 2.61) karakteristik periyoda göre iki parçaya ayırarak inceleyen başkaca yaklaşımlar da mevcuttur (Akiyama, 1985; Kuwamura ve Galambos, 1989; Chai vd., 1998; Chai vd Fajfar, 2000; Kunnath ve Chai, 2004). Bu tür yaklaşımlarda, giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyot T_e anahtar parametredir.

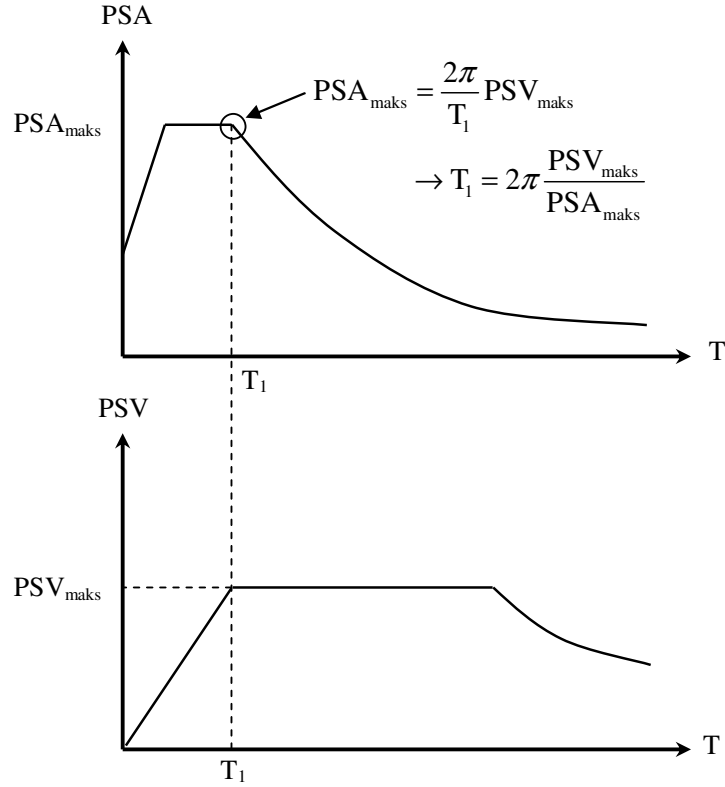


Şekil 2.61 Şematik giriş enerjisi spektrumu

Sönümsüz BSD elastik sistemlerde eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumu, yer ivmesinin genlik spektrumuna eşittir (Kuwamura vd., 1994). Dolayısıyla; giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyot, yer hareketi hakim periyodu olarak kabul edilebilir. Yer hareketi hakim periyodu, yapısal parametrelerden bağımsız olmasına karşın, burada tanımlanan *karakteristik periyot* elastik olmayan yapısal davranışa bağlı olarak değişmektedir. Ne var ki, elastik ve elastik olmayan sistemler arasındaki bu fark çoğu zaman ihmal edilebilecek düzeyde kalmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada %5 sönümlü BSD elastik sistemlerde giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyot, *karakteristik periyot* olarak kabul edilmiştir.

Karakteristik periyodun tahmininde kullanılacak bağıntının pratik bir anlam kazanabilmesi için bağıntıda yer alacak parametrelerin yapı ve/veya deprem mühendisliğinde kolay elde edilebilir olması tercih edilir. Karakteristik periyot T_e 'nin kısa periyot aralığından orta periyot aralığına geçiş periyodu T_1 ile ilişkilendirilmesi literatürde yer alan yaygın bir yaklaşımdır. Geçiş periyodu T_1 , idealleştirilmiş sözde-ivme ve sözde-hız spektrumlarından yararlanılarak (2.12) denklemi ile bulunabilir (Şekil 2.62) (Lam vd., 2000).

$$T_1 = 2\pi \frac{PSV_{maks}}{PSA_{maks}} \quad (2.12)$$



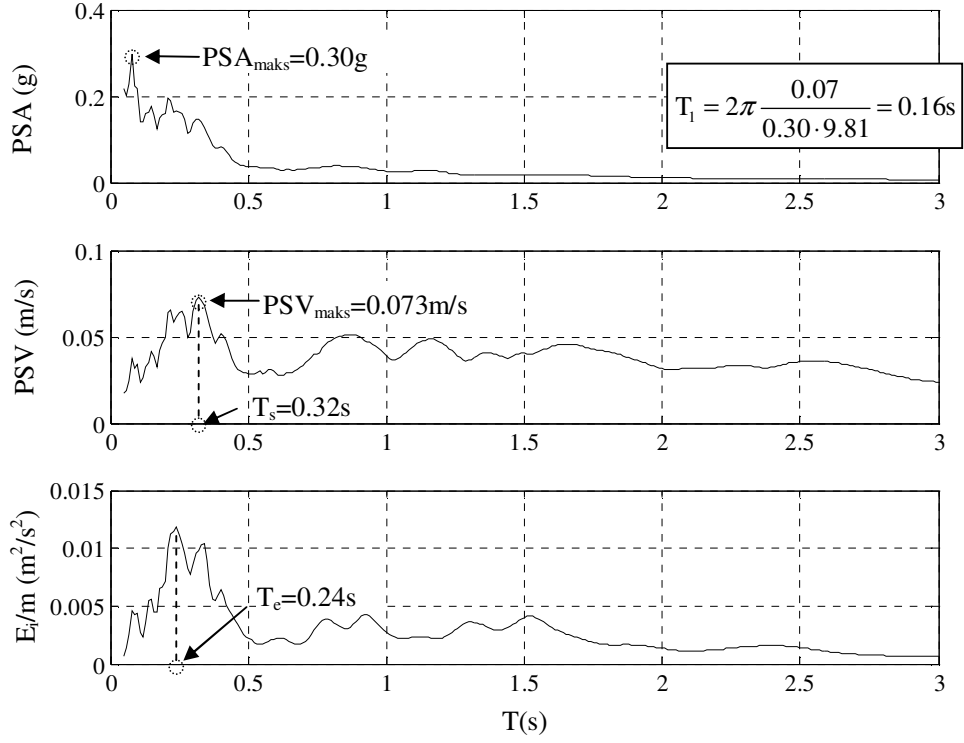
Şekil 2.62 İdealleştirilmiş sözde-ivme ve sözde-hız spektrumları

Açıktır ki, herhangi bir yer hareketi için oluşturulmuş davranış spektrumlarında spektral sözde hız ve spektral sözde ivmenin en büyük değerleri her zaman aynı periyotta meydana gelmeyebilir. Ancak yine de, (2.12) denklemi ile bulunan T_1 periyodu karakteristik periyoda yakın değerler alabilmektedir. Örnekse, Gilroy Array #1 ivme kaydı (G01230 yatay bileşeni, Morgan Hill 1984 Depremi) için karakteristik periyot $T_e=0.24s$, T_1 ise (2.12) denklemi kullanılarak $0.16s$ bulunmuştur (Şekil 2.63). Bölüm 1.3'te detayları verilen, sıkı zeminlerde kaydedilmiş 268 adet uzak-fay yer hareketi kaydı için hesaplanan T_1 ve T_e periyot değerleri Şekil 2.64 ve Çizelge 2.7-2.14'te verilmiştir.

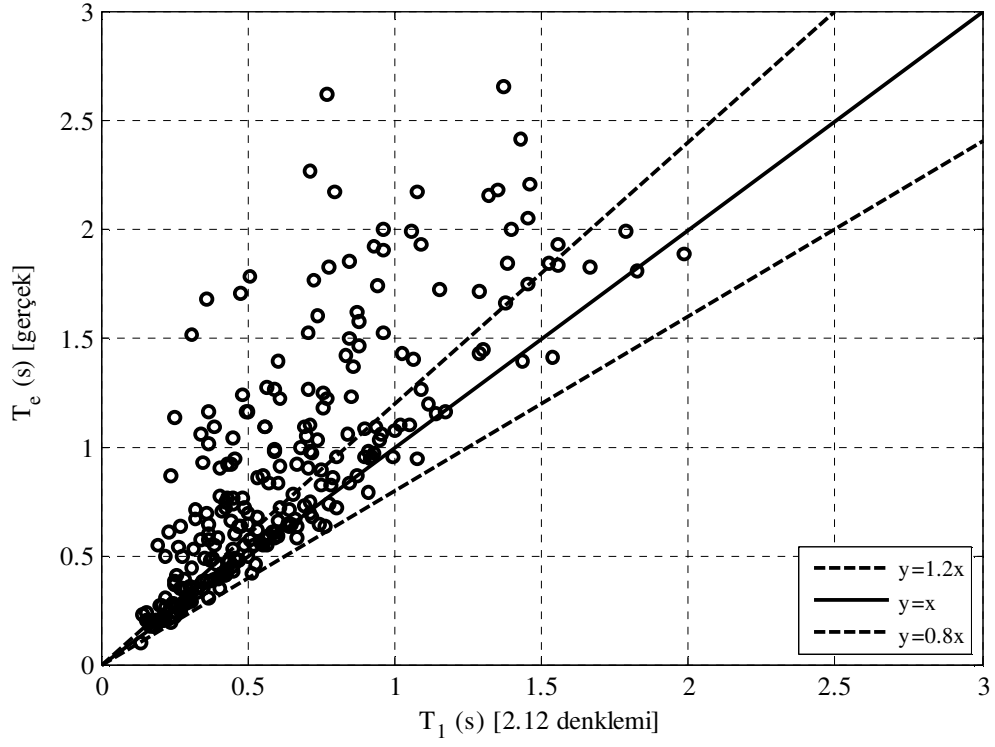
Şekil 2.64'ten de görülebileceği üzere T_1 periyodu tek başına karakteristik periyodun tahmininde yetersiz kalmaktadır ($AOH=-0.21$ ve $SH=0.43$). Bu nedenle istatistiksel çözümlemelerde ikinci bir parametreye ihtiyaç duyulmuştur. Giriş enerjisi spektrumu ile elastik sözde-hız spektrumu arasındaki benzerlik bilinmektedir (Şekil 2.7). İki spektrum arasındaki benzerlik, spektral sözde-hız ve giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyotlar arasında

da gözlenmiştir. Miranda (1993) yer hareketinin karakteristik periyodunun tahmini için, %5 sönümlü elastik sözde-hız spektrumunda spektral sözde-hızın en büyük değerini aldığı periyot değerinden (T_s) yararlanmıştır.

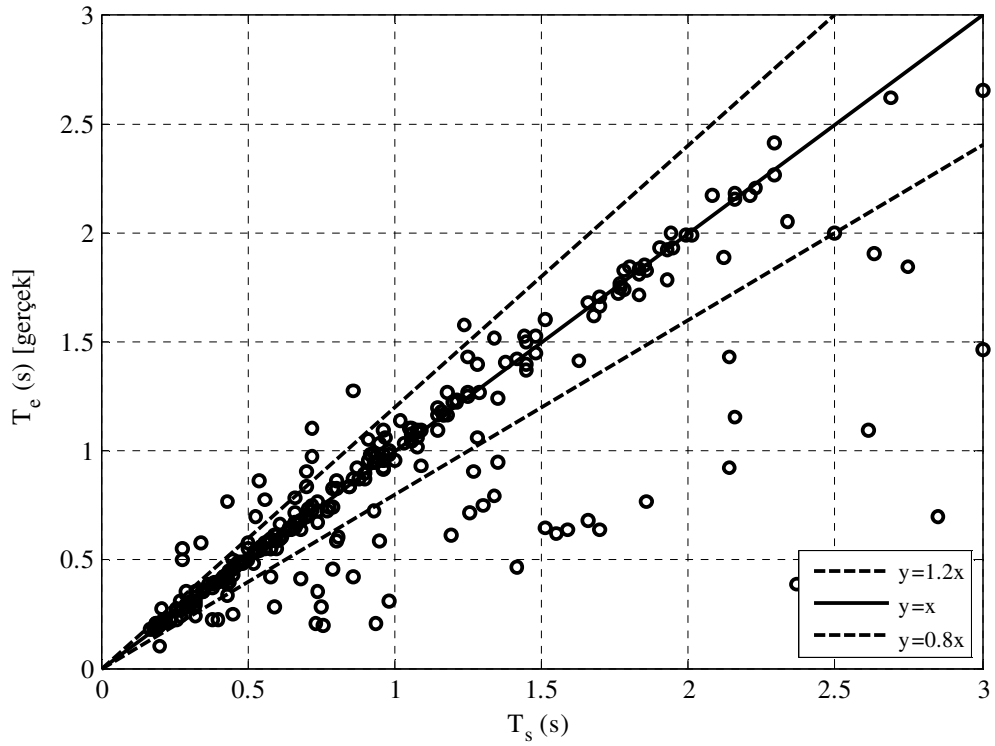
Bölüm 1.3'te detayları verilen 268 adet yer hareketi kaydı için, T_s ile karakteristik periyot T_e arasındaki ilişki Şekil 2.65 ve Çizelge 2.7-2.14'te verilmiştir (AOH=0.22, SH=0.37).



Şekil 2.63 BSD elastik sistemlerde sözde-ivme, sözde-hız ve giriş enerjisi spektrumları, $\xi = 0.05$, (Gilroy Array #1 ivme kaydı, G01230 yatay bileşeni, Morgan Hill 1984 Depremi)



Şekil 2.64 T_e ve (2.1) denklemi ile bulunan T_1 periyotları



Şekil 2.65 T_e ve T_s periyotları

Regresyon Çözümlemesi

Karakteristik periyot T_e için güvenilir bir istatistiksel değerlendirme yapılabilmesi amacıyla; çözümlemede, Çizelge 1.1-1.3'te detayları verilen, sıkı zeminlerde kaydedilmiş uzak-fay yer hareketlerinden oluşan geniş bir veritabanı kullanılmıştır. Karakteristik periyodun tahminine izin veren analitik bağıntı, aşağıda sıralanan adımlar izlenerek elde edilmiştir:

- T_e için aşağıdaki bağıntı seçilmiştir:

$$T_e = a \cdot T_s \cdot \exp(b \cdot (T_s / T_1)) \quad (2.13)$$

Burada a ve b istatistiksel regresyonla tahmin edilen katsayılardır.

- Zaman tanım alanında çözümleme sonucunda elde edilen karakteristik periyot değerleri ile önerilen bağıntı ile elde edilen T_e değerleri karşılaştırılarak regresyon çözümlemesi yapılmıştır.
- En küçük kareler hata fonksiyonunu (least squares loss function, L) en küçük yapan en elverişli katsayılar seçilmiştir.

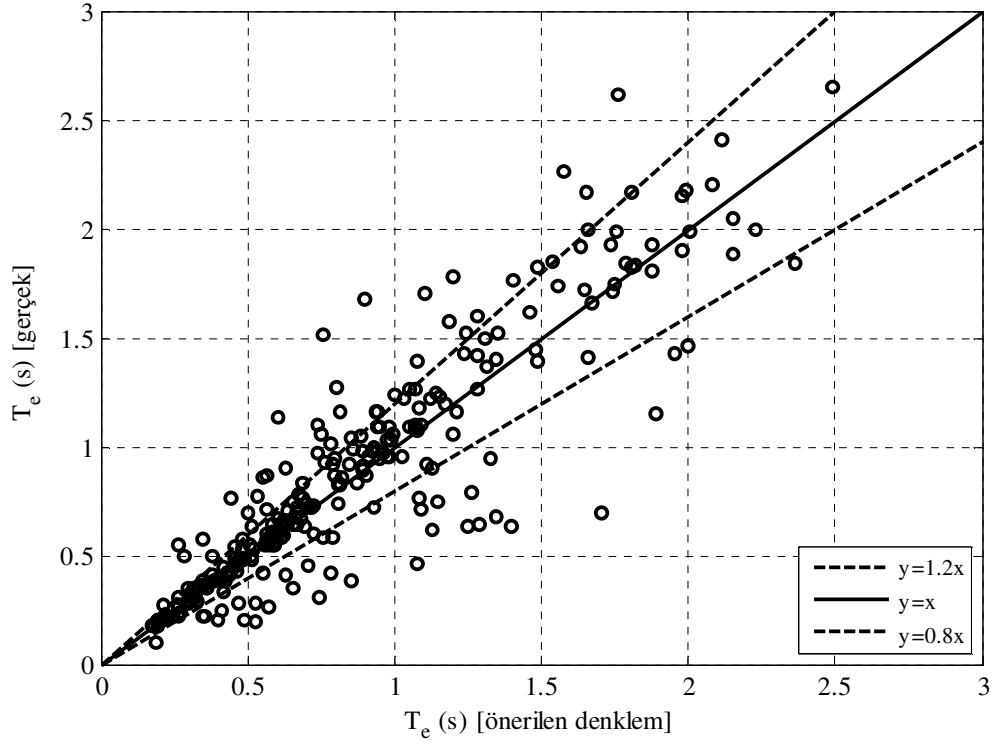
$$L = \left[(T_e)_{\text{gerçek}} - (T_e)_{\text{tahmin}} \right]^2$$

- Standart hatayı en küçük yapan en elverişli katsayılar seçilmiştir.

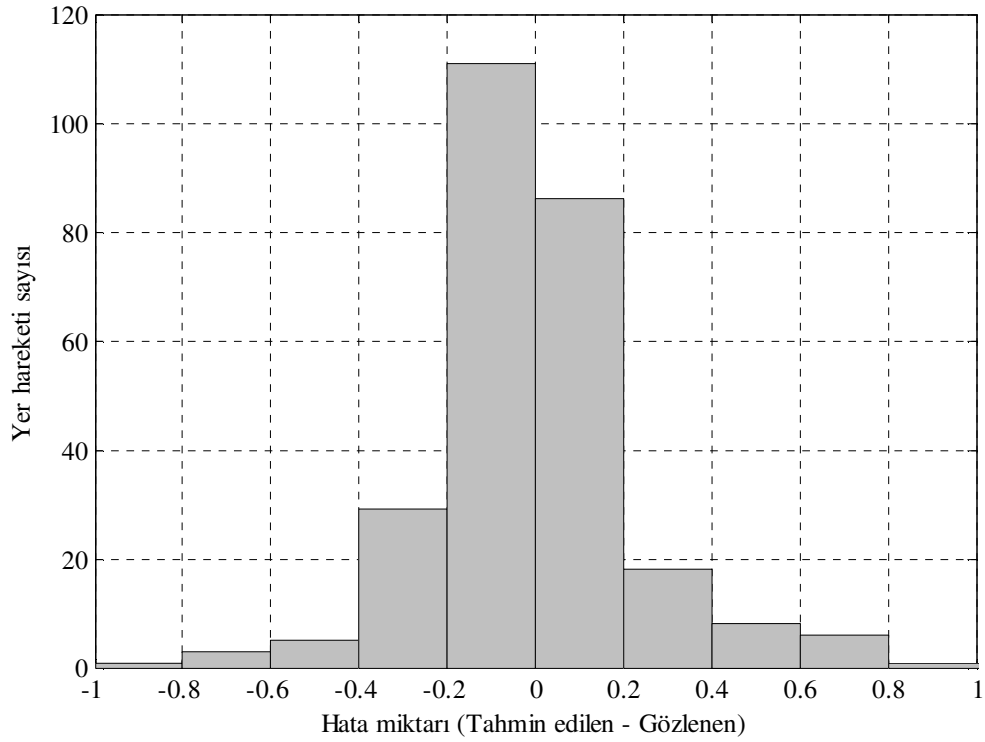
İstatistiksel regresyon çözümlemesi sonucunda karakteristik periyot T_e için (2.14) denklemi elde edilmiştir. Önerilen denklem için hesaba katılan varyans oranı $R^2=0.82$ bulunmuştur. Önerilen denklem ile bulunan ortalama ve standart hatalar farklı zemin gruplarına göre Çizelge 2.4'te verilmiştir.

$$T_e = 1.23 \cdot T_s \cdot \exp(-0.18 \cdot (T_s / T_1)) \quad (2.14)$$

Zaman tanım alanında çözümleme ile hesaplanan ve (2.14) denklemi ile elde edilen T_e değerleri Şekil 2.66'da, önerilen denklem ile yapılan hataların histogramı ise Şekil 2.67'de verilmiştir. Hataların normal dağılıma uyduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.66 Zaman tanım alanında çözümleme ve önerilen denklem ile bulunan T_e değerleri



Şekil 2.67 Hataların histogramı

Çizelge 2.4 Ortalama ve standart hatalar

NEHRP zemin sınıflandırmasına göre	OH	AOH	SH	CV _{RMSE}	Ortalama (T _e) _{gerçek}
B sınıfı	-0.03	0.06	0.21	0.29	0.74
C sınıfı	-0.03	0.03	0.21	0.25	0.83
D sınıfı	0.01	0.08	0.27	0.28	0.97
Tüm sınıflar	-0.02	0.06	0.23	0.27	0.87

2.1.4.1 Karakteristik Periyot için Önerilmiş Farklı Bağlılıkların Karşılaştırılması

Literatürde yer hareketinin hakim periyodunu tahmin etmek için önerilen yaklaşımlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Akiyama (1985) giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyodu yer hareketinin hakim periyodu olarak tanımlamıştır. Bu periyot değeri için zemin sınıfına bağlı olarak sabit değerler önermiştir: dip kaya formasyonunu içeren 1. sınıf zeminler için T_g=0.4s, 2.sınıf zeminler için T_g=0.6s, 3.sınıf zeminler için T_g=0.8s, ve en yumuşak zeminleri kapsayan 4.sınıf zeminler için T_g=1.0s.

Fajfar vd. (1989) T₁ geçiş periyodunun tahmini için Heidebrecht (1987) tarafından önerilen (2.15) denklemini kullanmışlardır.

$$T_1 = 4.3 \frac{PGV}{PGA} \quad (2.15)$$

Yazarlar (2.15) denkleminin elastik yapı davranışında geçerli olduğunu; elastik olmayan davranışta, dayanıma ve çevrimsel kuvvet-yerdeğiştirme modeline bağlı olarak daha küçük T₁ değerlerinin oluştuğunu belirtmişlerdir.

Miranda (1993) %5 sönümlü elastik sözde-hız spektrumunda, spektral sözde-hızın en büyük değerini aldığı periyodu yer hareketinin hakim periyodu olarak kabul etmiştir.

Vidic vd. (1994) Newmark-Hall elastik tasarım spektrumunda ivme-kontrollü bölgeden hız-kontrollü bölgeye geçiş periyodunun yaklaşık olarak yer hareketinin hakim periyodunu temsil ettiğini ve bu geçiş periyodunun (2.16) denklemi ile tahmin edilebileceğini belirtmiştir.

$$T_1 = 2\pi \frac{c_v}{c_a} \frac{PGV}{PGA} \quad (2.16)$$

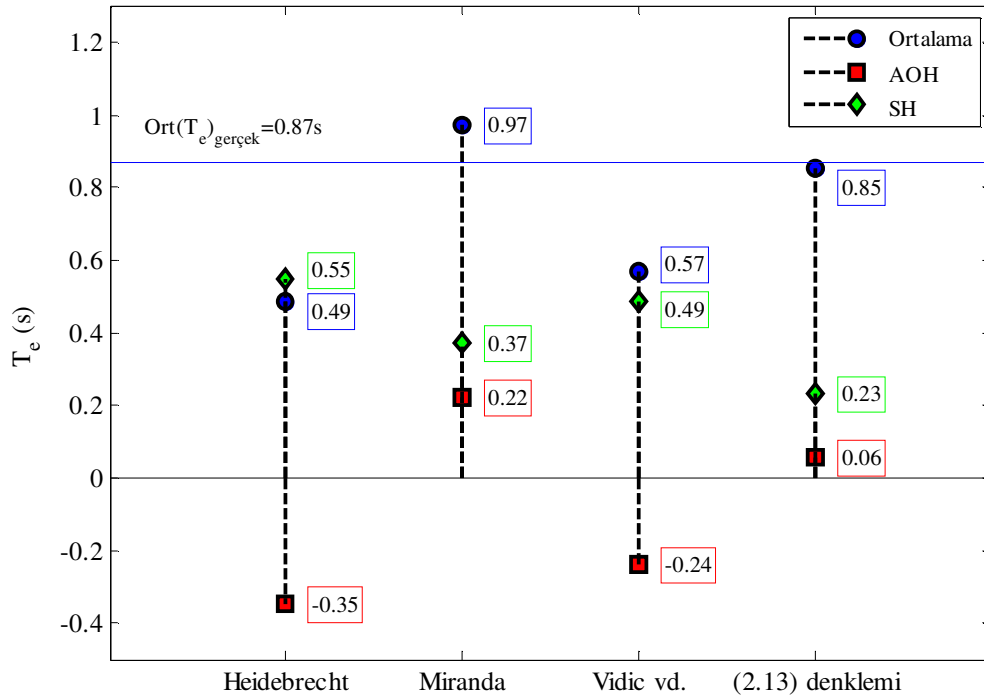
Burada c_v ve c_a yer hareketi özelliklerine bağlı büyültme çarpanlarıdır, standart olarak sırasıyla 2.0 ve 2.5 değerleri önerilmiştir. Özellikle giriş enerjisi spektrumunun tahmini

konusunda çalışan birçok araştırmacı (Chai vd., 1998; Chai ve Fajfar, 2000; Kunnath ve Chai, 2004) (2.15) denkleminle önerilen geçiş periyodunu, karakteristik periyodun ve/veya yer hareketinin hakim periyodunun tahmininde kullanmışlardır.

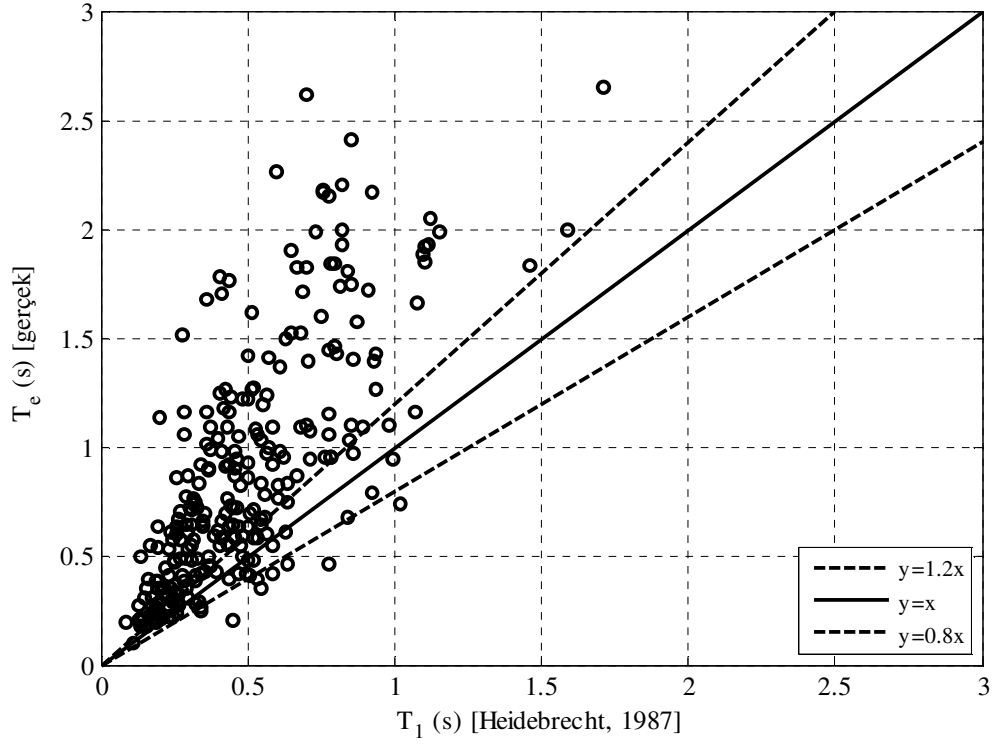
Bölüm 1.3'te detayları verilen yer hareketi veritabanı için; yukarıda özetlenen yaklaşımlar ve bu çalışmada önerilen yöntem ile tahmin edilen karakteristik periyotlar, zaman tanım alanında çözümleme ile hesaplananlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan denklemler için bulunan ortalama ve standart hatalar Çizelge 2.5'te ve Şekil 2.68'de verilmiştir. Miranda (1993) tarafından önerilen yaklaşım karakteristik periyodu, zaman tanım alanında çözümleme sonuçlarına göre genelde daha büyük (Şekil 2.65 ve 2.68); Heidebrecht (1987) ve Vidic vd. (1994) tarafından önerilen denklemler ise daha küçük tahmin etmektedir (Şekil 2.68, 2.69 ve 2.70).

Çizelge 2.5 Ortalama ve standart hatalar

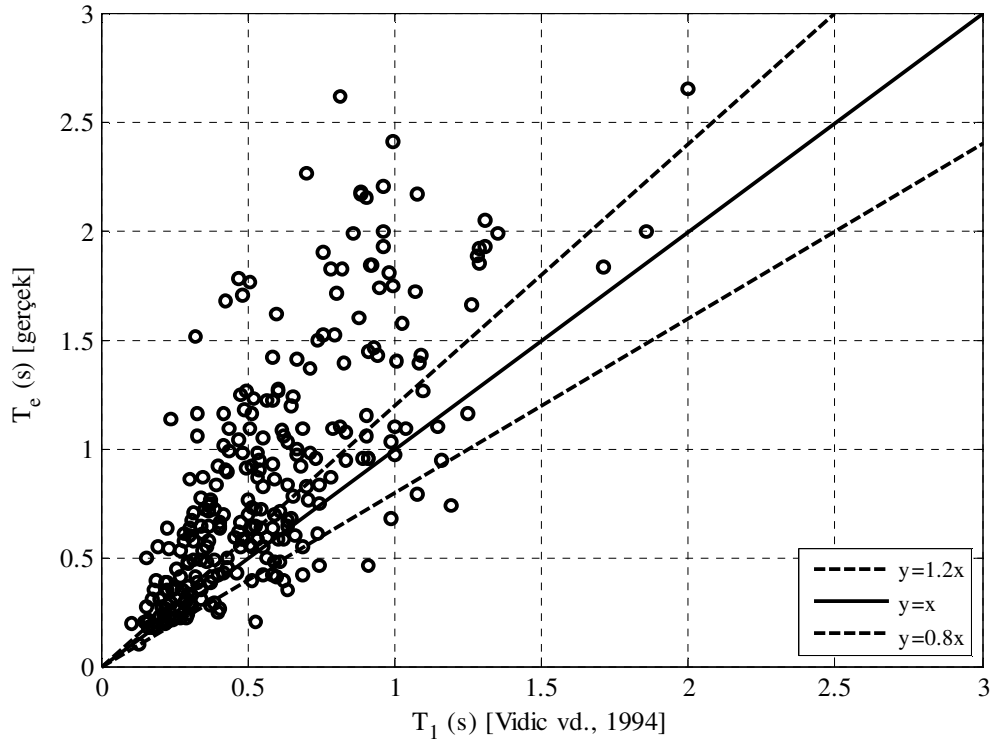
	OH	AOH	SH	CV_{RMSE}
Heidebrecht, 1987	-0.38	-0.35	0.55	0.63
Miranda, 1993	0.11	0.22	0.37	0.43
Vidic vd., 1994	-0.30	-0.24	0.49	0.56
2.13 denklemin	-0.02	0.06	0.23	0.27



Şekil 2.68 Ortalama ve standart hatalar



Şekil 2.69 T_e ve (2.15) denklemi ile bulunan T_1 periyotları

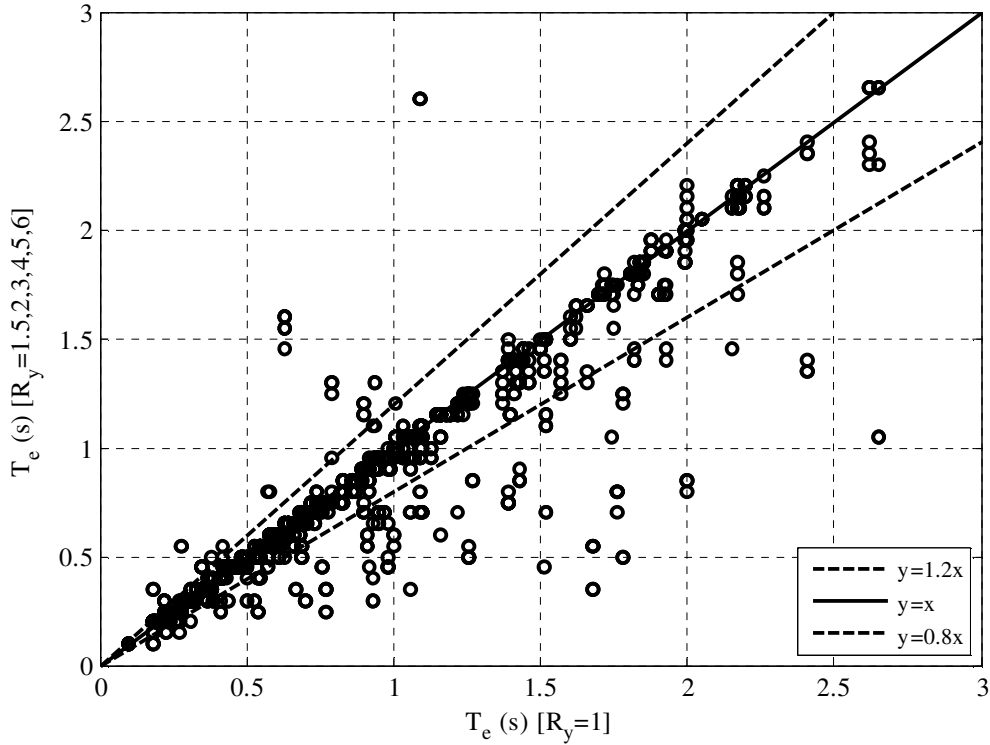


Şekil 2.70 T_e ve (2.16) denklemi ile bulunan T_1 periyotları

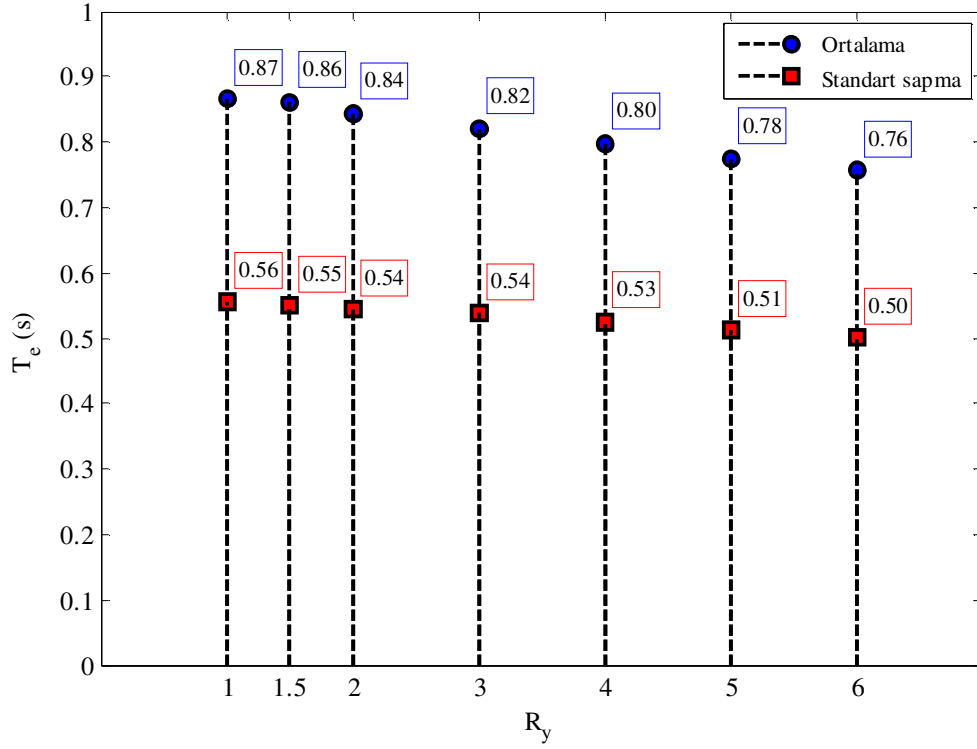
2.1.4.2 Dayanımın Karakteristik Periyoda Etkisi

Bir yer hareketi için tek bir hakim periyot söz konusu iken, giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyot olarak tanımlanan karakteristik periyot, yapının elastik olmayan davranışına bağlı olarak değişebilmektedir. Fajfar vd. (1989) yer hareketinin karakteristik periyodunu tahmin etmek amacıyla önerdikleri geçiş periyodunun; elastik olmayan sistemlerde, dayanıma ve kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisine bağlı olarak değişebileceğini belirtmişlerdir.

Bölüm 1.3'te detayları verilen 268 adet yer hareketi kaydı için karakteristik periyotlar; farklı dayanımlara ($R_y=1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6$) sahip BSD sistemler dikkate alınarak zaman tanım alanında çözümlenmiş ve bulunmuştur. Şekil 2.71'de farklı dayanımlar için hesaplanan karakteristik periyotların, elastik duruma göre dağılımları gösterilmiştir. Şekil 2.72 ve Çizelge 2.6'da ise farklı dayanım azaltma katsayıları için hesaplanan karakteristik periyotların ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir. Azalan dayanımla beraber karakteristik periyodun daha küçük değerlere doğru kaydığı gözlenmiştir.



Şekil 2.71 Farklı dayanımlar için karakteristik periyotlar



Şekil 2.72 Farklı dayanımlar için ortalama ve standart sapmalar

Çizelge 2.6 Farklı dayanımlar için ortalama ve standart sapmalar

	$R_y=1$	$R_y=1.5$	$R_y=2$	$R_y=3$	$R_y=4$	$R_y=5$	$R_y=6$
Ortalama	0.87	0.86	0.84	0.82	0.80	0.78	0.76
Standart sapma	0.56	0.55	0.54	0.54	0.53	0.51	0.50

Çizelge 2.7 Karakteristik periyot değerleri

Deprem	İstasyon	YB ^{*1}	PGA	PGV	PSV	PSA	T ₁	T _s	T _e	
Big Bear-01	1992	Rancho Cucamonga - YB1	0.50	0.03	0.12	2.10	0.35	0.35	0.35	
		Deer Can	YB2	0.31	0.02	0.07	1.13	0.41	0.70	0.70
		Newport Bch - Irvine Ave. F.S	YB1	0.53	0.05	0.18	1.46	0.76	1.25	1.25
Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP065	YB2	0.43	0.05	0.13	1.15	0.71	1.27	0.90
			YB1	0.39	0.10	0.28	0.88	1.98	2.12	1.88
			YB2	0.23	0.08	0.19	0.79	1.56	1.83	1.83
		TAP077	YB1	0.35	0.07	0.22	1.48	0.95	0.95	1.03
			YB2	0.30	0.12	0.26	1.18	1.38	3.00	2.65
		TCU085	YB1	0.62	0.08	0.25	2.39	0.67	0.80	0.58
			YB2	0.53	0.06	0.12	1.37	0.56	0.86	1.27
		TTN042	YB1	0.58	0.06	0.19	1.75	0.69	0.71	0.73
			YB2	0.58	0.05	0.13	1.51	0.53	1.55	0.62
		HWA029	YB1	0.95	0.14	0.45	3.38	0.84	0.85	0.83
			YB2	0.77	0.16	0.35	2.48	0.88	1.24	1.57
		HWA038	YB1	0.34	0.09	0.21	1.42	0.93	1.93	1.92
			YB2	0.58	0.07	0.17	1.87	0.57	0.70	0.83
		HWA046	YB1	0.85	0.09	0.28	2.94	0.59	0.98	0.98
			YB2	0.74	0.10	0.23	3.13	0.46	0.81	0.60
		ILA031	YB1	0.56	0.10	0.15	2.48	0.39	0.46	0.46
			YB2	0.75	0.09	0.21	2.78	0.47	0.47	0.48
		KAU012	YB1	0.85	0.10	0.29	2.59	0.71	2.85	0.69
			YB2	0.46	0.10	0.24	1.86	0.80	2.21	2.17
		TAP035	YB1	0.66	0.08	0.20	3.06	0.40	0.74	0.35
			YB2	0.84	0.08	0.28	3.49	0.50	0.70	0.69
		TAP052	YB1	0.65	0.17	0.37	2.75	0.85	1.85	1.85
			YB2	1.25	0.24	0.59	3.92	0.95	1.78	1.74
		TAP075	YB1	0.49	0.10	0.28	1.69	1.02	1.05	1.10
			YB2	0.81	0.10	0.25	2.10	0.74	1.03	1.03
		TTN025	YB1	0.34	0.04	0.10	1.65	0.38	0.48	0.48
			YB2	0.49	0.05	0.15	2.36	0.40	0.40	0.39
		TTN032	YB1	0.52	0.10	0.31	2.05	0.96	1.94	2.00
			YB2	0.76	0.13	0.40	2.49	1.00	1.06	1.07
		TTN044	YB1	0.54	0.10	0.34	1.95	1.09	1.95	1.93
			YB2	0.47	0.10	0.23	2.05	0.69	1.15	1.09
		TTN046	YB1	0.66	0.07	0.25	3.17	0.50	0.50	0.50
	YB2	1.11	0.11	0.41	5.31	0.49	0.50	0.55		
CHY065	YB1	1.16	0.16	0.47	5.25	0.56	0.58	0.55		
	YB2	0.96	0.12	0.43	4.06	0.66	0.66	0.78		
KAU085	YB1	0.53	0.12	0.36	2.09	1.08	1.35	0.94		
	YB2	0.49	0.11	0.32	1.88	1.05	1.06	1.10		

*¹ YB: Yatay Bileşen

Çizelge 2.8 Karakteristik periyot değerleri (devam)

Deprem		İstasyon	YB ^{*1}	PGA	PGV	PSV	PSA	T ₁	T _s	T _e
Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP026	YB1	0.72	0.14	0.42	2.47	1.06	1.38	1.40
			YB2	0.75	0.12	0.38	2.77	0.87	0.88	0.87
	TAP090	YB1	0.89	0.16	0.40	2.96	0.84	1.28	1.06	
		YB2	1.28	0.32	0.77	4.13	1.18	1.18	1.16	
		TAP095	YB1	0.96	0.19	0.44	3.81	0.72	1.66	0.68
			YB2	1.48	0.27	0.83	5.22	0.99	1.00	0.95
Chi-Chi, Taiwan-05	1999	TTN042	YB1	0.59	0.03	0.09	2.06	0.26	0.54	0.54
Denali, Alaska	2002	Carlo (temp)	YB2	0.43	0.03	0.08	1.06	0.46	0.47	0.48
			YB1	0.98	0.08	0.15	2.68	0.36	0.47	0.49
Dinar, Turkey	1995	Cardak	YB2	0.86	0.10	0.31	2.73	0.71	1.18	1.26
			YB1	0.60	0.03	0.10	2.54	0.24	0.75	0.28
Drama, Greece	1985	Kavala	YB2	0.64	0.04	0.14	2.21	0.40	0.56	0.77
			YB1	0.48	0.02	0.09	1.89	0.29	0.29	0.29
Friuli, Italy-01	1976	Conegliano	YB2	0.38	0.01	0.06	1.25	0.29	0.33	0.35
			YB1	0.48	0.04	0.13	1.80	0.45	0.78	0.74
Imperial Valley-06	1979	Coachella Canal #4	YB2	0.67	0.04	0.13	2.76	0.30	0.32	0.32
			YB1	1.13	0.12	0.28	3.30	0.52	0.58	0.55
Irpinia, Italy-01	1980	Arienzo	YB2	1.26	0.16	0.47	5.24	0.56	0.58	0.58
			YB1	0.30	0.03	0.09	1.07	0.51	1.93	1.78
		Torre Del Greco	YB2	0.41	0.02	0.08	1.37	0.37	0.50	0.57
			YB1	0.62	0.07	0.23	2.12	0.67	0.68	0.63
		Tricarico	YB2	0.39	0.09	0.16	1.26	0.78	0.79	0.74
			YB1	0.47	0.04	0.12	2.12	0.37	1.08	1.01
		Bovino	YB2	0.35	0.06	0.23	1.33	1.08	2.08	2.17
			YB1	0.37	0.03	0.08	1.45	0.37	0.66	0.64
		Mercato San Severino	YB2	0.52	0.03	0.08	2.09	0.24	0.38	0.22
			YB1	0.41	0.03	0.13	1.85	0.43	0.72	0.75
Kern County	1952	Pasadena - CIT Athenaeum	YB2	0.42	0.03	0.14	1.82	0.48	0.74	0.76
			YB1	0.44	0.06	0.18	1.70	0.66	0.66	0.67
		Santa Barbara Courthouse	YB2	0.52	0.09	0.28	2.19	0.81	0.91	0.95
			YB1	0.85	0.12	0.41	3.02	0.86	1.45	1.37
		LA-Hollywood S.FF	YB2	1.24	0.15	0.50	3.31	0.95	0.97	1.06
			YB1	0.41	0.08	0.23	1.68	0.88	3.00	1.46
Kobe, Japan	1995	HIK	YB2	0.57	0.06	0.20	1.78	0.70	0.91	1.05
			YB1	1.39	0.16	0.60	6.19	0.61	0.61	0.59
			YB2	1.45	0.15	0.68	7.24	0.59	0.60	0.58

*¹ YB: Yatay Bileşen

Çizelge 2.9 Karakteristik periyot değerleri (devam)

Deprem	İstasyon	YB ^{*1}	PGA	PGV	PSV	PSA	T ₁	T _s	T _e	
Kocaeli, Turkey	1999 Atakoy	YB1	1.03	0.22	0.47	2.69	1.09	1.29	1.26	
		YB2	1.61	0.16	0.47	5.30	0.56	1.08	1.09	
	Botas	YB1	1.01	0.10	0.23	2.91	0.50	1.17	1.16	
		YB2	0.87	0.12	0.21	1.94	0.68	0.98	1.00	
	Cekmece	YB1	1.75	0.18	0.34	9.73	0.22	0.73	0.20	
		YB2	1.31	0.10	0.29	5.67	0.33	0.66	0.71	
	Fatih	YB1	1.83	0.19	0.90	10.28	0.55	0.55	0.56	
		YB2	1.56	0.15	0.43	7.07	0.39	0.60	0.55	
	Zeytinburnu	YB1	1.06	0.19	0.37	3.12	0.74	1.51	1.60	
		YB2	1.08	0.15	0.35	5.05	0.43	0.43	0.76	
	Landers	1992 Arcadia - Campus Dr	YB1	0.45	0.10	0.33	1.47	1.44	1.45	1.39
			YB2	0.50	0.13	0.31	1.42	1.38	1.70	1.66
		Glendale-Las Palmas	YB1	0.43	0.06	0.14	1.63	0.53	1.42	0.46
			YB2	0.69	0.04	0.16	2.30	0.44	0.46	0.47
Glendora - N Oakbank		YB1	0.39	0.05	0.26	1.06	1.54	1.63	1.41	
		YB2	0.61	0.10	0.37	1.81	1.29	1.83	1.71	
LA - Fletcher Dr		YB1	0.44	0.06	0.19	1.57	0.75	0.80	0.82	
		YB2	0.39	0.04	0.16	1.39	0.72	1.77	1.76	
La Habra - Briarcliff		YB1	0.50	0.10	0.30	1.31	1.43	2.29	2.41	
		YB2	0.52	0.09	0.38	1.83	1.32	2.16	2.15	
Puerta La Cruz		YB1	0.46	0.02	0.04	1.58	0.16	0.94	0.20	
		YB2	0.43	0.02	0.06	1.69	0.21	0.21	0.20	
Amboy		YB1	1.13	0.18	0.50	4.09	0.77	2.69	2.62	
		YB2	1.43	0.20	0.53	4.72	0.71	2.29	2.26	
Boron Fire Station		YB1	1.17	0.13	0.54	4.30	0.78	0.79	0.82	
		YB2	0.88	0.10	0.41	3.21	0.81	0.93	0.72	
Burbank - N Buena Vista		YB1	0.48	0.07	0.25	1.62	0.96	2.63	1.90	
		YB2	0.67	0.10	0.61	2.30	1.66	1.78	1.82	
Compton-Castlegate St		YB1	0.63	0.12	0.44	1.91	1.46	2.23	2.20	
		YB2	0.62	0.13	0.42	2.28	1.15	1.76	1.72	
Fort Irwin		YB1	1.11	0.10	0.22	4.95	0.28	0.28	0.50	
		YB2	1.20	0.16	0.29	4.09	0.45	2.14	0.92	
Fountain Valley - Euclid		YB1	0.67	0.15	0.40	1.97	1.29	2.14	1.43	
		YB2	0.57	0.10	0.35	1.92	1.14	2.16	1.15	
LA - Obregon Park		YB1	0.42	0.15	0.30	1.34	1.40	2.50	2.00	
		YB2	0.63	0.08	0.26	1.90	0.87	1.68	1.62	
LB - Orange Ave		YB1	0.54	0.09	0.34	1.60	1.35	2.16	2.18	
		YB2	0.60	0.11	0.43	1.94	1.39	2.75	1.84	

*¹ YB: Yatay Bileşen

Çizelge 2.10 Karakteristik periyot değerleri (devam)

Deprem	İstasyon	YB ^{*1}	PGA	PGV	PSV	PSA	T ₁	T _s	T _e	
Landers 1992	Lakewood - Del Amo Blvd	YB1	0.53	0.14	0.45	1.58	1.79	1.99	1.99	
		YB2	0.49	0.13	0.46	2.00	1.46	2.34	2.05	
	Pomona - 4th & Locust FF	YB1	0.66	0.13	0.64	2.21	1.83	1.83	1.81	
		YB2	0.43	0.09	0.41	1.79	1.45	1.77	1.75	
	San Bernardino - E & Hospitality	YB1	0.76	0.20	0.75	3.02	1.56	1.90	1.93	
		YB2	0.85	0.15	0.50	2.96	1.06	2.01	1.99	
	Tarzana - Cedar Hill	YB1	0.65	0.09	0.19	2.08	0.59	0.59	0.61	
		YB2	0.42	0.05	0.16	1.33	0.75	1.51	0.64	
	Lazio-Abruzzo, 1984 Italy	Garigliano-Centrale Nucleare	YB1	0.57	0.06	0.25	2.56	0.61	0.96	0.91
			YB2	0.73	0.07	0.24	2.53	0.60	0.61	0.66
Loma Prieta 1989	Piedmont Jr High	YB1	0.82	0.08	0.19	1.98	0.59	1.25	1.26	
		YB2	0.70	0.09	0.18	2.30	0.48	1.35	1.24	
	Point Bonita	YB1	0.70	0.11	0.29	2.35	0.78	1.86	1.82	
		YB2	0.71	0.13	0.47	2.26	1.30	1.48	1.44	
	SF - Pacific Heights	YB1	0.60	0.13	0.28	1.91	0.91	1.34	0.79	
		YB2	0.46	0.09	0.24	1.60	0.93	0.94	0.97	
	SF - Rincon Hill	YB1	0.77	0.07	0.21	2.18	0.59	0.93	0.99	
		YB2	0.90	0.10	0.27	2.03	0.83	1.42	1.42	
	So. San Francisco, Sierra Pt.	YB1	0.55	0.07	0.15	1.80	0.53	0.68	0.68	
		YB2	1.03	0.09	0.22	3.44	0.41	0.70	0.90	
	Berkeley LBL	YB1	0.56	0.09	0.28	1.89	0.91	0.93	0.94	
		YB2	1.15	0.21	0.52	3.50	0.92	0.96	0.95	
	Hayward - BART Sta	YB1	1.56	0.15	0.57	5.02	0.71	0.96	0.98	
		YB2	1.53	0.11	0.26	6.80	0.24	0.90	0.87	
	SF - Cliff House	YB1	0.73	0.11	0.29	2.59	0.71	1.30	0.75	
		YB2	1.06	0.20	0.47	2.89	1.03	1.25	1.43	
	SF - Diamond Heights	YB1	0.96	0.10	0.38	3.90	0.61	0.72	0.72	
		YB2	1.11	0.13	0.25	3.64	0.42	0.68	0.41	
	SF - Presidio	YB1	0.98	0.13	0.39	3.41	0.72	0.72	0.97	
		YB2	1.96	0.32	0.55	5.72	0.60	1.28	1.39	
	SF - Telegraph Hill	YB1	0.35	0.03	0.10	1.37	0.45	1.06	1.04	
		YB2	0.75	0.07	0.15	1.72	0.56	1.09	1.09	
	Sunol - Forest Fire Station	YB1	0.83	0.09	0.25	3.46	0.46	0.94	0.94	
		YB2	0.64	0.10	0.20	3.19	0.39	2.61	1.09	
	Oakland - Outer Harbor Wharf	YB1	2.81	0.41	1.11	7.77	0.90	0.96	0.95	
		YB2	2.64	0.42	1.11	9.94	0.70	1.48	1.52	

*¹ YB: Yatay Bileşen

Çizelge 2.11 Karakteristik periyot değerleri (devam)

Deprem		İstasyon	YB ^{*1}	PGA	PGV	PSV	PSA	T ₁	T _s	T _e
Loma Prieta	1989	Oakland - Title & Trust	YB1	1.91	0.20	0.77	5.71	0.85	1.21	1.23
			YB2	2.39	0.36	0.97	6.33	0.97	1.44	1.52
		Olema - Point Reyes Station	YB1	1.58	0.19	0.73	5.78	0.79	0.80	0.86
			YB2	1.00	0.16	0.55	4.88	0.72	0.72	1.10
		Richmond City Hall	YB1	1.22	0.17	0.67	4.62	0.91	0.92	0.98
			YB2	1.04	0.14	0.41	2.74	0.94	0.96	1.09
Manjil, Iran	1990	Rudsar	YB1	0.95	0.12	0.32	3.13	0.64	1.26	0.71
			YB2	0.84	0.15	0.69	2.83	1.53	1.80	1.84
Morgan Hill	1984	Gilroy Array #1	YB1	0.68	0.03	0.07	2.93	0.16	0.32	0.24
			YB2	0.96	0.03	0.09	2.93	0.19	0.19	0.20
		Los Banos	YB1	0.50	0.06	0.21	1.69	0.76	1.70	0.63
			YB2	0.56	0.08	0.21	1.55	0.85	1.45	1.50
		SF Intern. Airport	YB1	0.47	0.03	0.10	1.66	0.37	0.98	0.31
			YB2	0.47	0.03	0.10	2.03	0.30	0.31	0.30
N. Palm Springs	1986	Anza - Tule Canyon	YB1	1.08	0.07	0.22	2.95	0.47	0.64	0.63
			YB2	0.93	0.08	0.22	2.69	0.50	0.65	0.64
		Murrieta Hot Springs	YB1	0.52	0.02	0.05	1.69	0.18	0.19	0.18
			YB2	0.48	0.01	0.05	2.13	0.14	0.20	0.10
		Puerta La Cruz	YB1	0.74	0.02	0.10	2.88	0.22	0.22	0.21
			YB2	0.54	0.02	0.05	2.03	0.16	0.20	0.20
		Temecula - 6th & Mercedes	YB1	1.19	0.07	0.24	4.92	0.30	0.32	0.31
			YB2	0.96	0.05	0.14	3.51	0.25	1.02	1.13
		Anza Fire Station	YB1	0.97	0.06	0.12	2.92	0.26	0.27	0.24
			YB2	0.66	0.04	0.10	1.69	0.37	0.62	0.60
		Colton Interchange - Vault	YB1	0.42	0.03	0.11	1.93	0.36	1.66	1.68
			YB2	0.64	0.04	0.12	1.77	0.43	0.43	0.41
		Indio-Coachella Canal	YB1	0.52	0.05	0.17	1.58	0.67	0.87	0.92
			YB2	0.49	0.03	0.10	1.72	0.37	1.17	1.16
Norcia, Italy	1979	Bevagna	YB1	0.39	0.02	0.07	1.78	0.23	1.19	0.61
			YB2	0.23	0.01	0.04	1.04	0.27	0.64	0.63
Northridge-01	1994	Anacapa Island	YB1	0.66	0.03	0.09	2.70	0.21	0.21	0.21
			YB2	0.36	0.02	0.05	1.49	0.22	0.40	0.22
		Antelope Buttes	YB1	0.45	0.04	0.08	1.78	0.27	0.45	0.25
			YB2	0.67	0.04	0.09	1.80	0.31	1.34	1.51
		Lake Hughes #4 - Camp Mend	YB1	0.56	0.07	0.14	2.59	0.35	1.09	0.93
			YB2	0.83	0.06	0.12	3.08	0.24	0.59	0.28

*¹ YB: Yatay Bileşen

Çizelge 2.12 Karakteristik periyot değerleri (devam)

Deprem	İstasyon	YB ^{*1}	PGA	PGV	PSV	PSA	T ₁	T _s	T _e
Northridge-01 1994	Littlerock - Brainard Can	YB1	0.71	0.06	0.26	2.17	0.75	0.90	0.89
		YB2	0.59	0.06	0.16	1.86	0.55	0.86	0.87
	Mt Wilson-CIT S.Sta	YB1	2.29	0.07	0.25	8.37	0.19	0.19	0.20
		YB2	1.32	0.06	0.17	4.88	0.22	0.22	0.21
	Rancho Cucamonga - Deer Can	YB1	0.70	0.04	0.12	2.93	0.25	0.38	0.37
		YB2	0.50	0.06	0.12	1.84	0.41	0.58	0.42
	Sandberg - Bald Mtn	YB1	0.89	0.12	0.33	4.04	0.51	0.86	0.42
		YB2	0.97	0.09	0.27	3.72	0.45	0.45	0.43
	Vasquez Rocks Park	YB1	1.48	0.18	0.47	7.70	0.39	0.39	0.39
		YB2	1.36	0.11	0.39	5.18	0.47	0.65	0.63
	Wrightwood – J. Flat	YB1	0.55	0.05	0.20	2.15	0.57	0.58	0.59
		YB2	0.36	0.03	0.14	1.55	0.57	0.57	0.58
	Glendora-N Oakbank	YB1	0.40	0.03	0.11	1.57	0.43	0.74	0.72
		YB2	0.90	0.05	0.13	2.56	0.32	0.53	0.53
	Huntington Beach - Lake St	YB1	0.89	0.05	0.18	2.10	0.54	0.54	0.86
		YB2	0.68	0.06	0.20	2.87	0.43	0.43	0.43
	Newport Bch - Irvine Ave. F.S	YB1	0.40	0.04	0.13	1.76	0.45	1.86	0.76
		YB2	0.60	0.05	0.18	2.53	0.45	0.45	0.45
	Newport Bch - Newport & Coast	YB1	1.01	0.06	0.21	4.19	0.31	0.32	0.29
		YB2	0.83	0.06	0.21	3.24	0.41	0.42	0.41
	Palmdale - Hwy 14 & Palmdale	YB1	0.60	0.07	0.29	2.00	0.90	1.08	1.08
		YB2	0.66	0.08	0.36	2.04	1.12	1.15	1.19
	Rancho Palos Verdes - Hawth	YB1	0.71	0.05	0.15	1.90	0.49	0.77	0.72
		YB2	0.53	0.03	0.11	2.02	0.34	1.08	1.06
	Rancho Palos Verdes - Luconia	YB1	1.64	0.10	0.34	7.25	0.29	0.30	0.29
		YB2	1.15	0.09	0.30	4.53	0.41	0.42	0.42
	Riverside Airport	YB1	0.58	0.03	0.09	2.44	0.24	0.24	0.22
		YB2	0.62	0.03	0.10	2.77	0.22	0.22	0.22
	Seal Beach - Office Bldg	YB1	0.60	0.06	0.15	2.41	0.40	0.95	0.58
		YB2	0.82	0.07	0.21	3.59	0.36	0.53	0.69
	Anaheim-W Ball Rd	YB1	0.71	0.05	0.23	2.89	0.51	0.56	0.57
		YB2	0.65	0.05	0.19	2.81	0.43	0.96	0.92
	Baldwin Park - N Holly	YB1	0.89	0.04	0.14	3.93	0.22	0.27	0.26
		YB2	1.20	0.08	0.22	3.65	0.38	0.49	0.49

*¹ YB: Yatay Bileşen

Çizelge 2.13 Karakteristik periyot değerleri (devam)

Deprem	İstasyon	YB ^{*1}	PGA	PGV	PSV	PSA	T ₁	T _s	T _e		
Northridge-01	1994	Brea - S Flower Av	YB1	1.04	0.07	0.26	3.57	0.46	0.48	0.49	
			YB2	1.06	0.09	0.25	3.45	0.45	0.79	0.45	
		Featherly Park-Maint	YB1	1.02	0.08	0.25	4.21	0.37	0.38	0.38	
			YB2	0.98	0.06	0.21	3.97	0.33	0.43	0.33	
		Hemet-Ryan Airfield	YB1	0.63	0.05	0.23	2.31	0.63	0.64	0.64	
			YB2	0.45	0.05	0.24	2.37	0.65	0.65	0.64	
		Huntington Bch - Waikiki	YB1	0.85	0.05	0.19	2.81	0.44	0.52	0.48	
			YB2	0.67	0.07	0.22	3.24	0.42	0.42	0.42	
		San Bernardino - E & Hospitality	YB1	0.83	0.06	0.27	3.06	0.55	0.56	0.55	
			YB2	0.94	0.06	0.25	3.44	0.45	0.52	0.53	
		San Jacinto - CDF Fire Sta	YB1	0.79	0.08	0.27	2.65	0.64	1.59	0.63	
			YB2	0.97	0.08	0.30	3.11	0.60	0.85	0.83	
		Tustin - E Sycamore	YB1	0.69	0.04	0.11	2.71	0.25	0.26	0.22	
			YB2	0.73	0.04	0.11	2.48	0.29	0.29	0.28	
		Loma Linda; VA Hospital, North Freefield	YB1	0.55	0.06	0.24	1.93	0.77	1.21	1.22	
			YB2	0.45	0.04	0.20	1.65	0.76	1.16	1.18	
	Loma Linda; VA Hospital, South Freefield	YB1	0.42	0.05	0.15	1.53	0.61	1.20	1.22		
		YB2	0.56	0.05	0.17	2.16	0.50	1.15	1.16		
San Fernando	1971	Pasadena - Old Seismo Lab	YB1	0.87	0.05	0.15	3.70	0.26	0.26	0.27	
			YB2	1.98	0.11	0.31	7.48	0.26	0.26	0.26	
		Upland - San Antonio Dam	YB1	0.57	0.03	0.12	2.38	0.31	0.44	0.44	
			YB2	0.77	0.03	0.13	3.21	0.25	0.37	0.38	
		Wrightwood - 6074 Park Dr	YB1	0.60	0.03	0.11	1.83	0.36	0.43	0.38	
			YB2	0.43	0.03	0.07	1.62	0.29	0.29	0.29	
	Gormon-Oso P. Plant	YB1	0.82	0.08	0.22	2.91	0.48	1.70	1.70		
		YB2	1.03	0.07	0.13	2.36	0.35	2.37	0.38		
Sierra Madre	1991	Vasquez Rocks Park	YB1	1.23	0.03	0.08	2.69	0.19	0.20	0.19	
			YB2	0.96	0.03	0.12	3.66	0.21	0.21	0.27	
Whittier Narrows-01	1987	LA-Wonderland Ave	YB1	0.38	0.02	0.05	1.22	0.24	0.76	0.19	
			YB2	0.46	0.01	0.05	1.48	0.22	0.45	0.50	
			Vasquez Rocks Park	YB1	0.59	0.02	0.06	2.39	0.17	0.17	0.18
				YB2	0.59	0.02	0.05	2.23	0.15	0.24	0.23

*¹ YB: Yatay Bileşen

Çizelge 2.14 Karakteristik periyot değerleri (devam)

Deprem	İstasyon	YB ^{*1}	PGA	PGV	PSV	PSA	T ₁	T _s	T _e
Whittier Narrows-01	1987 Castaic - Old Ridge Route	YB1	0.69	0.04	0.16	2.99	0.34	0.34	0.57
		YB2	0.64	0.04	0.22	2.33	0.60	0.60	0.61
	Huntington Beach - Lake St	YB1	0.44	0.02	0.05	1.61	0.20	0.28	0.55
		YB2	0.43	0.03	0.07	1.60	0.27	2.63	0.26
	Leona Valley #5 - Ritter	YB1	0.46	0.02	0.09	2.11	0.27	0.32	0.35
		YB2	0.55	0.03	0.08	1.81	0.28	0.29	0.35
	Malibu - Las Flores Canyon	YB1	0.64	0.02	0.06	1.77	0.22	0.27	0.31
		YB2	0.54	0.02	0.06	1.79	0.20	0.28	0.27
	Moorpark - Fire Sta	YB1	0.39	0.03	0.10	1.34	0.45	0.67	0.66
		YB2	0.41	0.03	0.10	1.91	0.32	0.74	0.67
	Pacific Palisades - Sunset	YB1	0.62	0.02	0.08	2.72	0.18	0.18	0.18
		YB2	0.37	0.02	0.06	1.50	0.26	0.41	0.41
	Lancaster - Med Off FF	YB1	0.66	0.03	0.11	2.45	0.28	0.44	0.39
		YB2	0.70	0.03	0.12	2.40	0.30	0.31	0.31
	Rosamond - Goode Ranch	YB1	0.69	0.04	0.16	2.81	0.35	0.35	0.35
		YB2	0.64	0.03	0.10	2.08	0.30	0.35	0.36

*¹ YB: Yatay Bileşen

2.2 Çevrimsel Enerjinin Tahmini

BSD bir sistemde yapısal kuvvetin (f_s) yerdeğiştirmeye dağıttığı enerji (soğurulan enerji, absorbed energy) zaman tanım alanında,

$$E_a(t) = \int_0^u f_s(u, \dot{u}) du = E_h(t) + E_s(t) \quad (2.17)$$

$$E_s(t) = \frac{[f_s(t)]^2}{2k} \quad (2.18)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada (2.18) denkleminle tanımlanan geri dönebilen şekil değiştirme enerjisi E_s yer hareketi sonunda sıfırlanacağından, soğurulan enerji E_a çevrimsel enerjiye (E_h) eşit olur. Yer hareketi sonunda:

$$E_a = E_h \quad (2.19)$$

Sistem tarafından dağıtılan çevrimsel enerji sisteme giren toplam enerjinin belirli bir oranı olarak tarif edilebilir:

$$E_h = \alpha \cdot E_i \quad (2.20)$$

Çevrimsel enerjinin giriş enerjisine oranını gösteren α katsayısı için Fajfar ve Vidic (1994) yerdeğiştirme sünekliğine ($\mu = u_{maks}/u_y$) bağlı bir bağıntı önermiştir:

$$\alpha = a \frac{(\mu - 1)^b}{\mu} \quad (2.21)$$

Bu çalışmada, Fajfar ve Vidic'in (1994) önermiş olduğu (2.21) denklemi, Bölüm 1.3'te detayları verilmiş yer hareketi veritabanı kullanılarak revize edilmiştir. Bu amaçla; dayanım ve doğal titreşim periyotları farklı ($0.1s \leq T \leq 3.0s$) BSD sistemler için, zaman tanım alanında çözümlenme ile hesaplanmış α oranları göz önüne alınarak regresyon analizi yapılmıştır.

Regresyon analizi sonucunda elde edilen (2.22) denklemi için; hesaba katılan varyans oranı $R^2=0.77$, ortalama hata OH=-0.005, ağırlıklı ortalama hata AOH=0.043, standart hata SH=0.082 ve varyasyon katsayısı $CV_{RMSE}=0.163$ bulunmuştur.

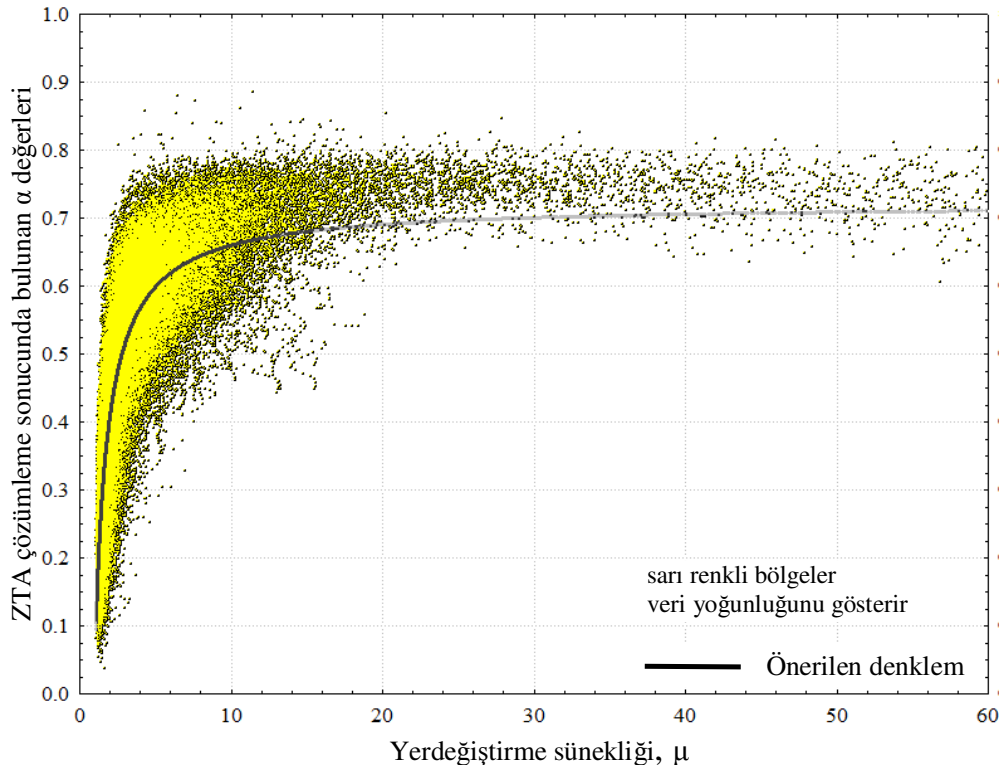
$$\alpha = 0.72 \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right)^{0.84} \quad (2.22)$$

Zaman tanım alanında çözümlene sonucunda bulunan α oranları, yerdeğiştirme sünekliğine bağlı olarak; önerilen (2.22) denklemini temsil eden eğri ile beraber Şekil 2.73'te verilmiştir. Şekil 2.73'ten de görülebileceği üzere; α oranı, yerdeğiştirme sünekliğinin küçük değerleri için ($1 < \mu < 4$) artan süneklik istemiyle beraber hızlı bir Şekilde artmaktadır. Yerdeğiştirme sünekliğinin daha büyük değerlerinde ($\mu > 10$) ise sabit doğrusal bir eğilim göstermekte ($\alpha \cong 0.70$) ve süneklik isteminden bağımsız hale gelmektedir.

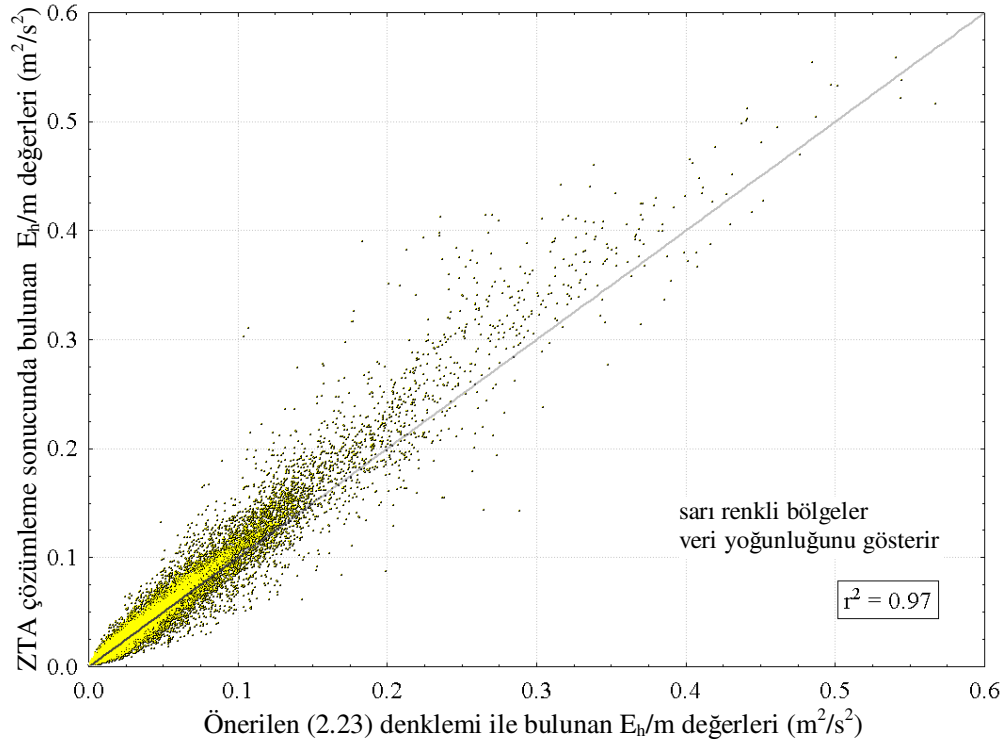
Çevrimsel enerji istemi ise; yerdeğiştirme sünekliğine bağlı olarak (2.23) denklemi ile tahmin edilebilir:

$$E_h = 0.72 \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right)^{0.84} \cdot E_i \quad (2.23)$$

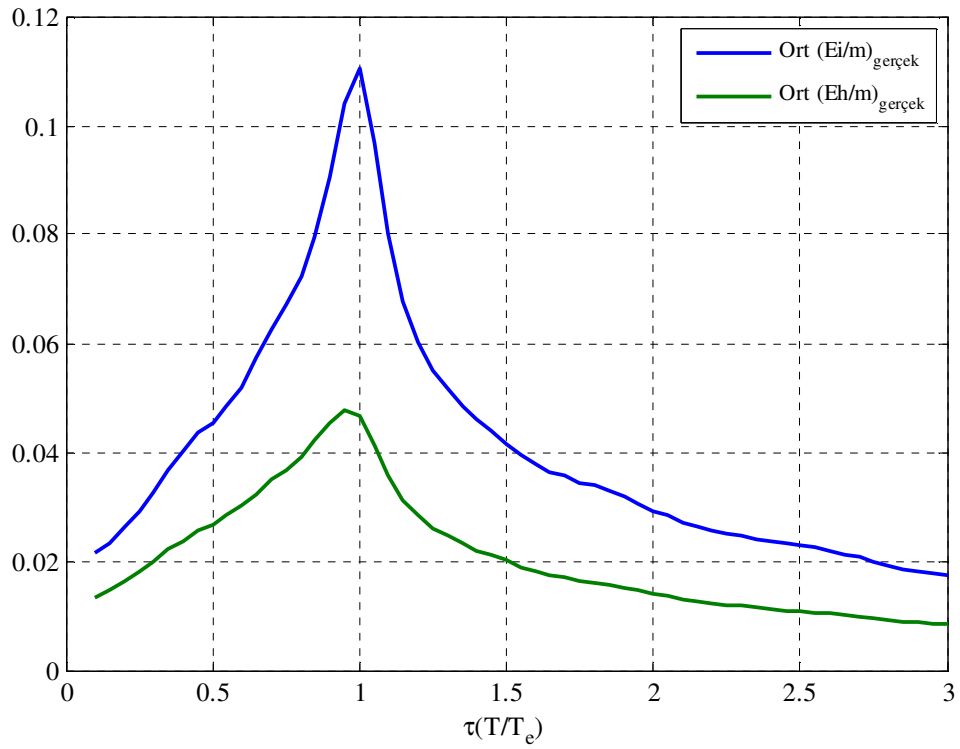
Zaman tanım alanında çözümlene sonucunda bulunan çevrimsel enerji değerleri ile (2.23) denklemi ile tahmin edilen değerler Şekil 2.74'te görülebilir. (2.23) denklemi için hesaba katılan varyans oranı $R^2 = \%97$ bulunmuştur. Ortalama çevrimsel enerji spektrumları, ortalama ve standart hatalar, hatalar için varyasyon katsayıları ve güven aralıkları Şekil 2.77-2.83'te verilmiştir. (2.23) denklemi ile yapılan hataların histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri ise Ek 2'de verilmiştir.



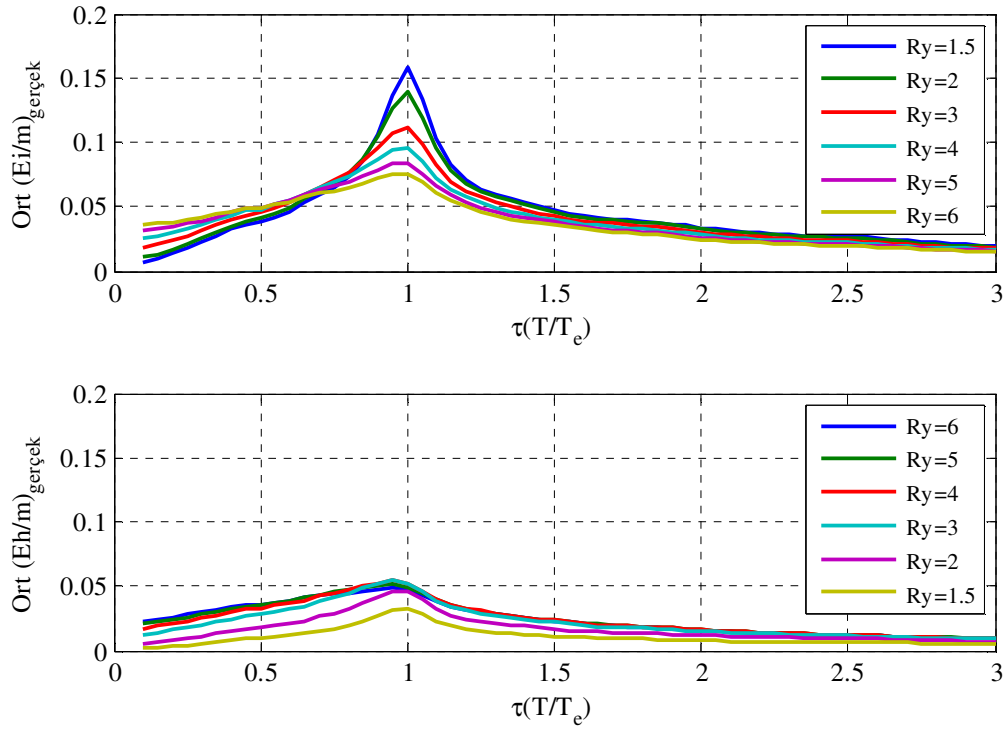
Şekil 2.73 Zaman tanım alanında hesaplanan α oranları



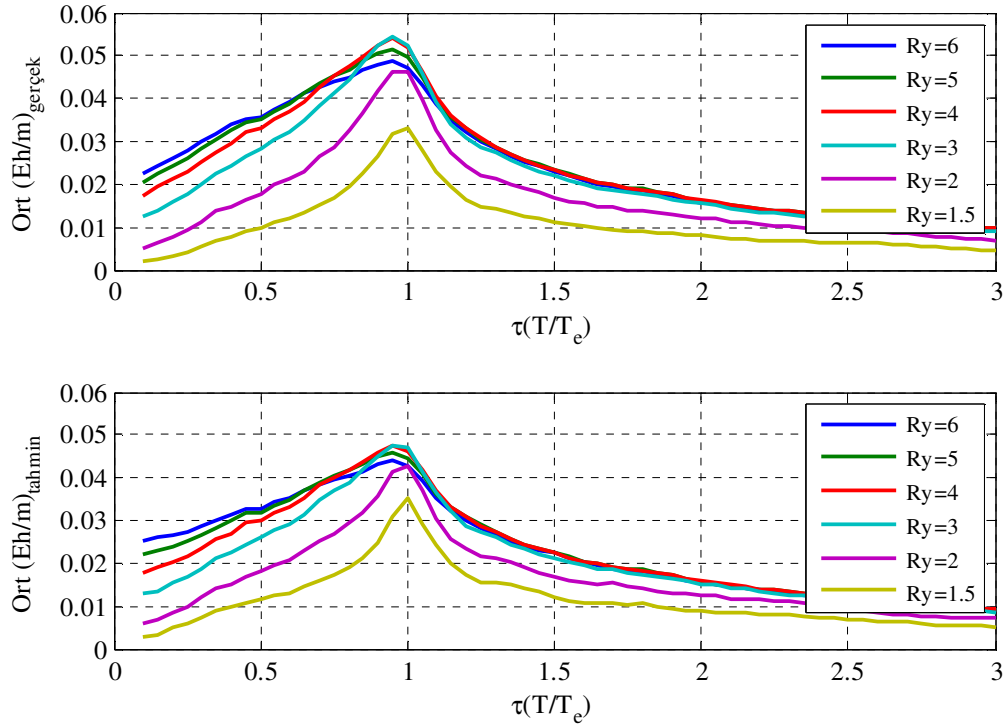
Şekil 2.74 Zaman tanım alanında hesaplanan ve tahmin edilen çevrimsel enerji değerleri



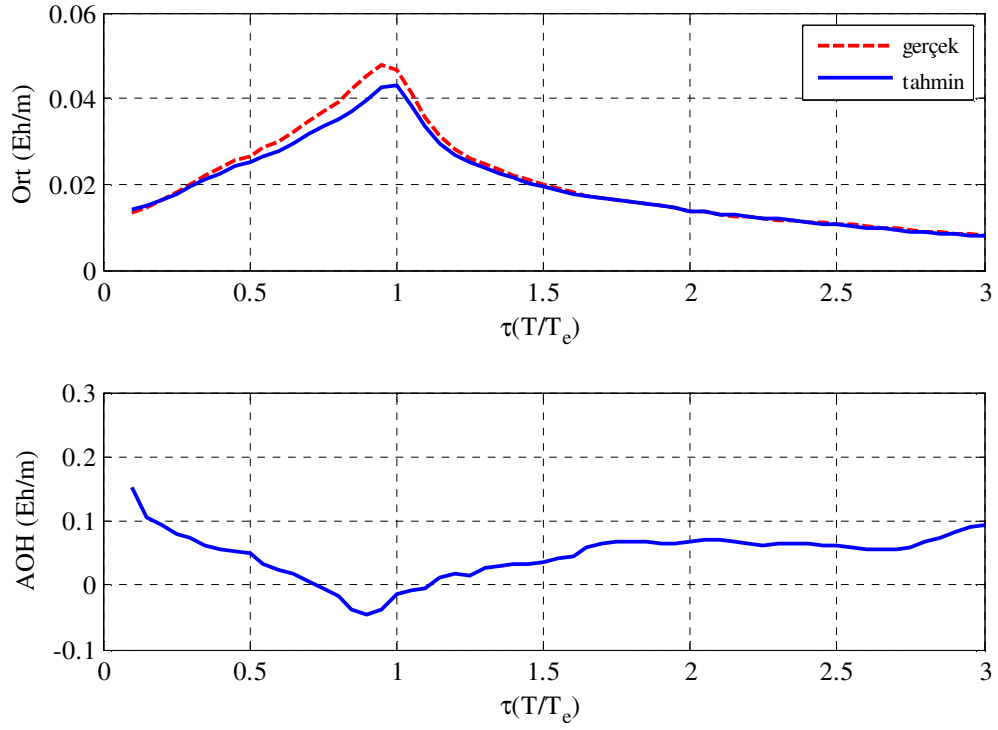
Şekil 2.75 Zaman tanım alanında hesaplanan ortalama giriş ve çevrimsel enerji spektrumları



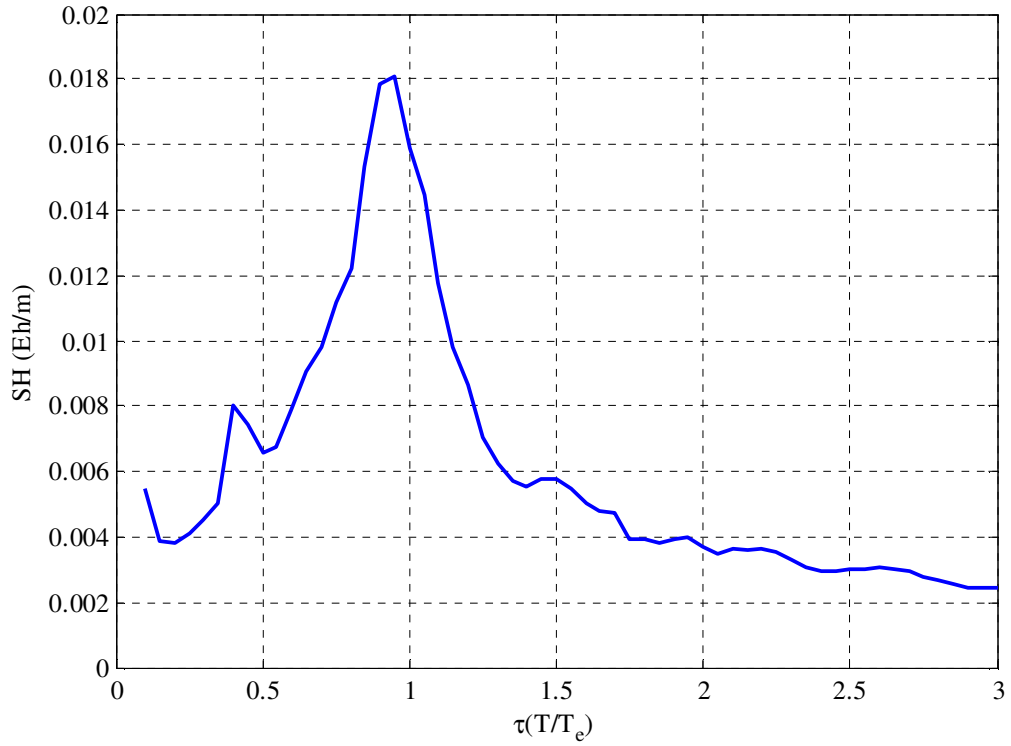
Şekil 2.76 Zaman tanım alanında hesaplanan ortalama giriş ve çevrimsel enerji spektrumları



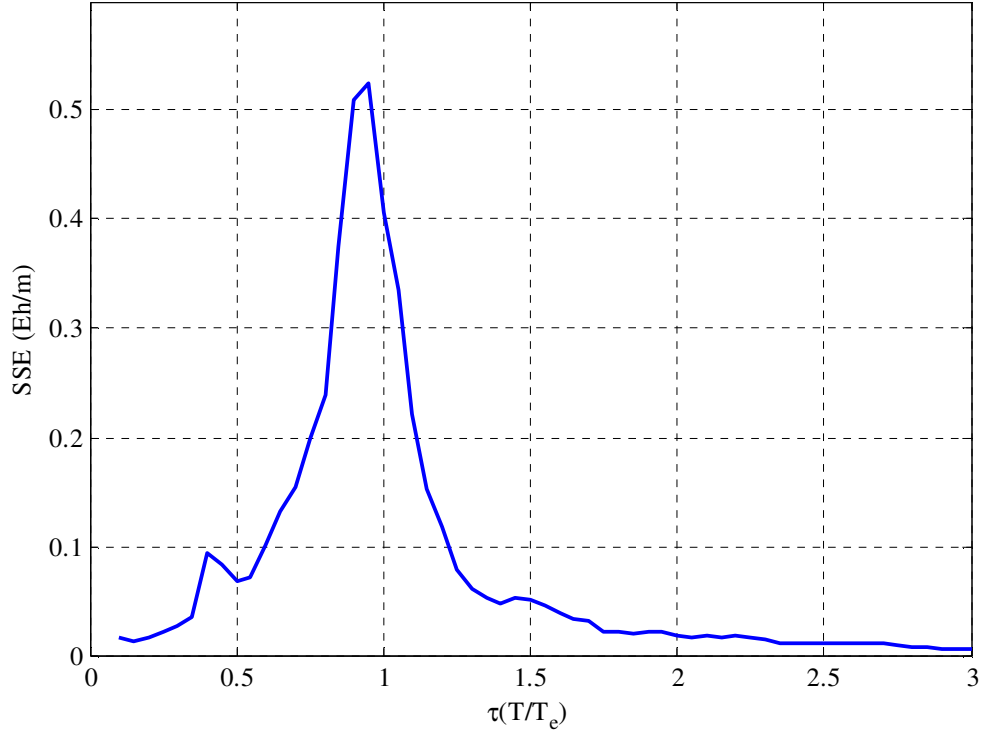
Şekil 2.77 Ortalama çevrimsel enerji spektrumları



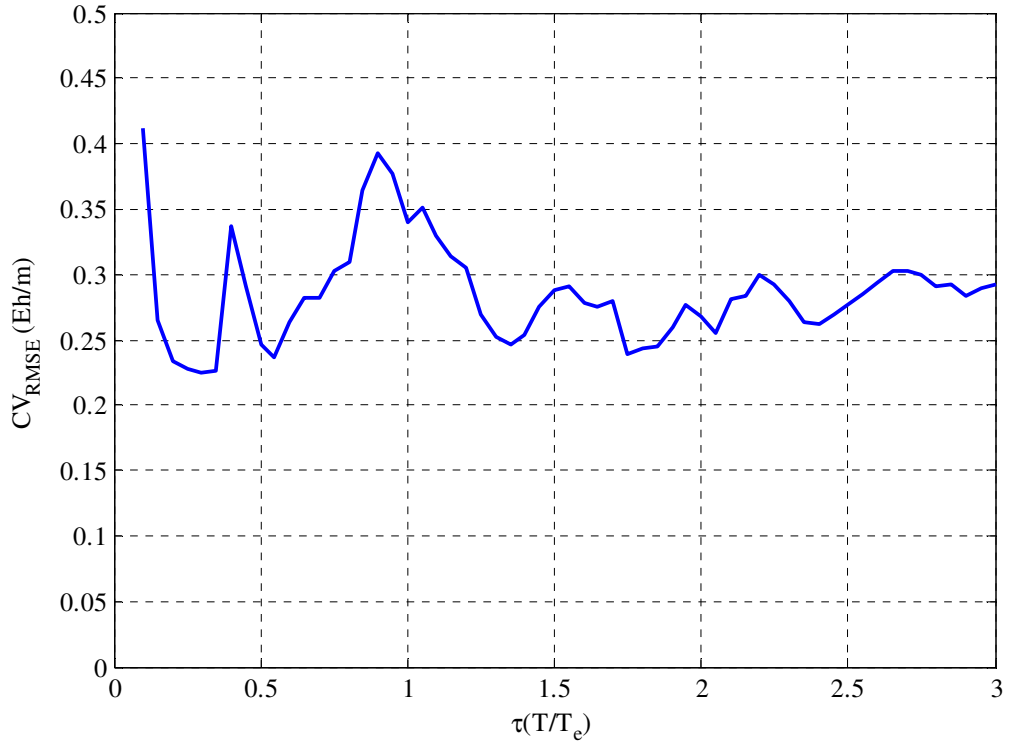
Şekil 2.78 Ortalama çevrimsel enerji spektrumları ve ağırlıklı ortalama hatalar (2.23 denklemi)



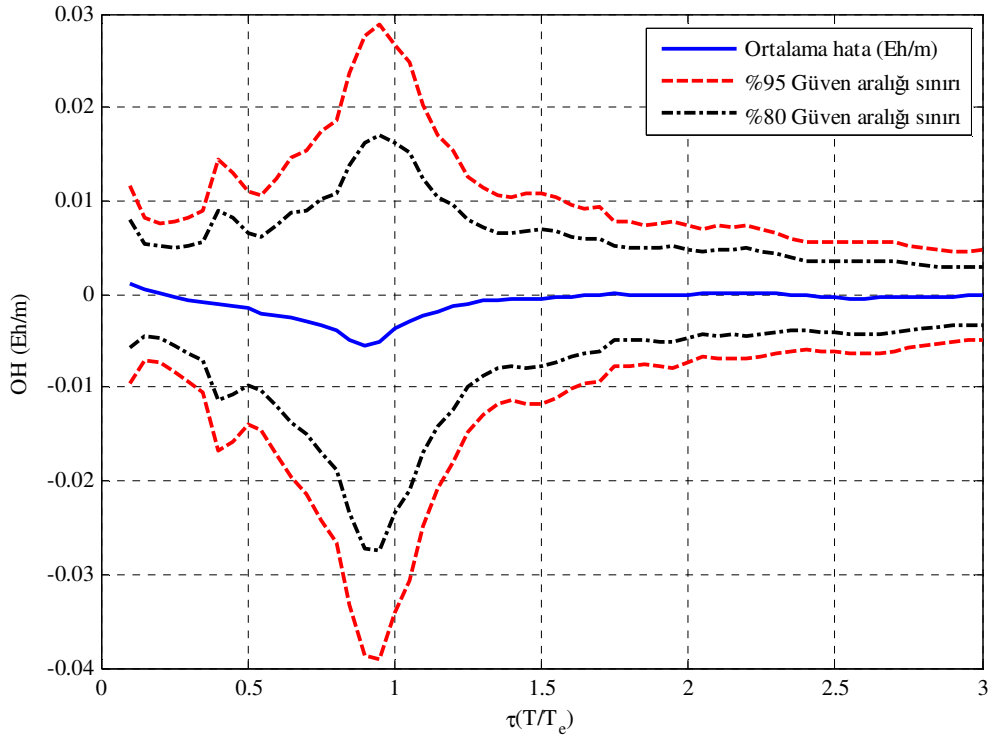
Şekil 2.79 Standart hatalar (2.23 denklemi)



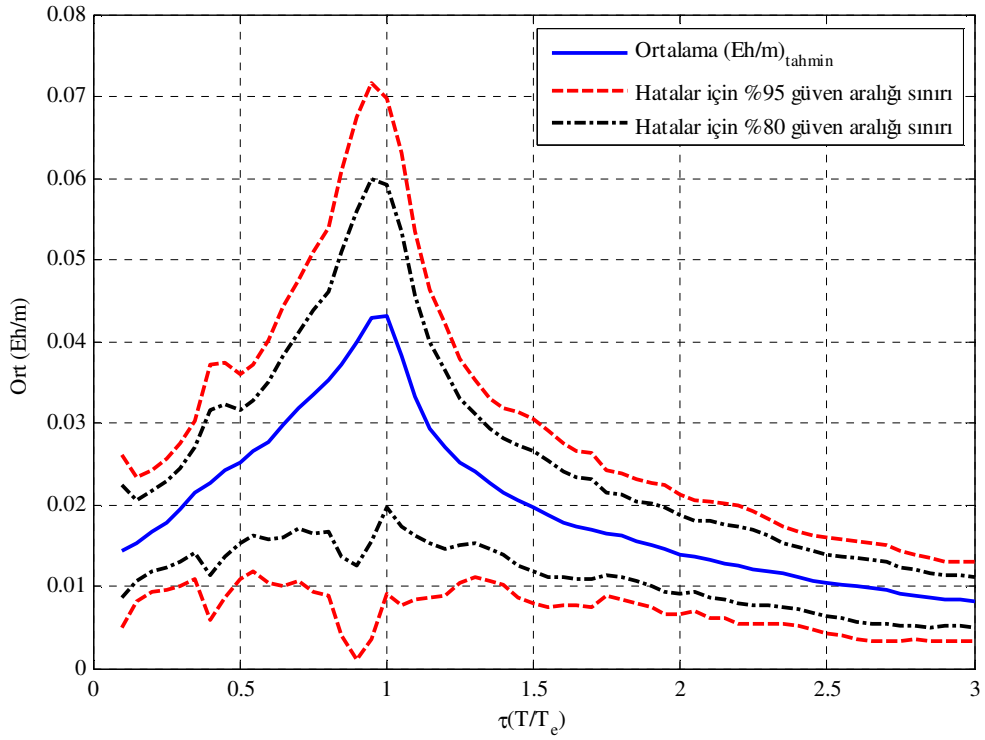
Şekil 2.80 Toplam sapma (2.23 denklemi)



Şekil 2.81 Hataların varyasyon katsayıları (2.23 denklemi)



Şekil 2.82 Ortalama hatalar ve güven aralıkları



Şekil 2.83 Ortalama çevrimsel enerji spektrumu ve hatalar için güven aralıkları

3. EN BÜYÜK YERDEĞİŞTİRME İSTEMİ

Güncel yapı tasarım yöntemleri; esas olarak, şiddetli yer hareketleri sırasında taşıyıcı sistemin kontrollü elastik olmayan davranış göstermesine dayanır. Dolayısıyla taşıyıcı sistemin elastik olmayan bölgedeki davranışının tahmini ve değerlendirilmesi önem kazanmaktadır. Yer hareketi sırasında oluşabilecek en büyük yerdeğiştirme isteminin tahmini; gerek performansa dayalı tasarımda, gerekse hasar indekslerine bağlı olarak performans ve/veya hasar değerlendirilmesinde önemli yer teşkil etmektedir. Güncel birçok ön-standart, standart ve benzeri dokümanda; en büyük yerdeğiştirmenin tahminine yönelik, doğrusal olmayan davranışı göz önüne alan bazı yaklaşımlar önerilmiştir. Bunlardan en önemlileri; Kapasite Spektrumu Yöntemi (ATC 40) ve Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi (FEMA 356) olarak sıralanabilir. Ayrıca son zamanlarda birçok araştırmacı tarafından, Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi'ndeki elastik olmayan yerdeğiştirme oranı için alternatif bağıntılar önerilmiştir (Aydınoglu ve Kaçmaz, 2002; Ruiz-Garcia ve Miranda, 2003; Chopra ve Chintanapakdee, 2003; FEMA 440, 2005). Tüm bu yaklaşımlar; doğrusal olmayan davranışı dikkate alan ancak nispeten kısıtlı seviyede sismik ve yapısal parametreyi içeren basitleştirilmiş yaklaşımlardır.

Yer hareketi sırasında yapılarda oluşabilecek olası hasar; sistemin en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme istemi ile beraber, sistemin enerji dağıtabilme kapasitesine/istemine de bağlıdır (Park ve Ang, 1985). En büyük yerdeğiştirme isteminin yer hareketi sırasında sisteme geçen enerjiye bağlı olarak tahmin edilebilmesi; elde edilen yerdeğiştirme istemine bağlı olarak, global veya kesit bazında performans/hasar değerlendirilmesinin yanında, enerji esaslı bazı hasar indekslerine (Park ve Ang, 1985) bağlı olarak değerlendirme yapılabilmesine de olanak tanır.

3.1 En Büyük Yerdeğiştirme İsteminin Tahmini

Bu çalışmada; yer hareketi sırasında oluşabilecek en büyük yerdeğiştirme isteminin, sistemin akmayla dağıttığı enerjiye bağlı olarak tahminine dayanan bir yöntem önerilmiştir. Bölüm 1.3'te ayrıntısı verilen geniş bir uzak-fay yer hareketi veritabanı kullanılarak, farklı dayanım ve doğal titreşim periyotlarına sahip elastoplastik BSD sistemlere zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözümlenmeler yapılmış ve elde edilen sonuçlara bağlı olarak yerdeğiştirme sünekliği ($\mu = u_m/u_y$) için istatistiksel regresyon ile yaklaşık bir bağıntı önerilmiştir. Regresyon analizlerinde; mühendislik pratiğinde anlamlı olan, doğal titreşim periyotları 0.1s ile 3.0s arasında değişen BSD sistemler göz önüne alınmıştır. Bununla beraber; yapılan değerlendirmelerde, önerilen denklemin doğal titreşim periyodu 3s ile 5s arasında olan

sistemler için de aynı standart hata ile sonuç verdiği gözlenmiştir. Yerdeğiştirme sünekliğini veren bağıntı aşağıda sıralanan adımlar izlenerek elde edilmiştir:

- Daha uygun olduğu görülerek üstel bir bağıntı (power function) seçilmiştir:

$$\mu = 1 + a \cdot \beta_1^b \cdot \beta_2^c \cdot \beta_3^d \quad (3.1)$$

Burada a, b, c ve d istatistiksel regresyonla tahmin edilen katsayılardır. β_1 , β_2 ve β_3 normalleştirilmiş çevrimsel enerji N_h (3.3 denklemi), sismik indeks I_D (3.5 denklemi, Cosenza ve Manfredi, 1997), normalleştirilmiş periyot τ (T/T_c) ve dayanım azaltma katsayısı R_y 'ye bağlı parametrelerdir.

- Zaman tanım alanında çözümlene sonucunda elde edilen yerdeğiştirme sünekliği katsayısı değerleri ile önerilen bağıntı ile elde edilen değerler karşılaştırılarak regresyon çözümlenmesi yapılmıştır.
- Özellikle küçük periyot değerlerinde ($T < 0.3s$), bazı yer hareketleri altında meydana gelen çok yüksek istemler büyük sapmalara yol açmaktadır (Şekil 3.1 ve 3.6). Bu sapmaların etkisini azaltmak için; en küçük kareler hata fonksiyonu (least squares loss function, L) ağırlıklı olarak alınarak regresyon yapılmıştır:

$$L = \omega \cdot [\mu_{\text{gerçek}} - \mu_{\text{tahmin}}]^2 = \frac{1}{\mu_{\text{gerçek}}} \cdot [\mu_{\text{gerçek}} - \mu_{\text{tahmin}}]^2$$

- Standart hatayı en küçük yapan en uygun katsayılar seçilmiştir.

İstatistiksel regresyon analizi sonucunda (3.2) denklemi elde edilmiştir:

$$\mu = \begin{cases} 1 + 0.70 \cdot N_h^{0.70} \cdot I_D^{-0.35} \cdot \tau^{(1-R_y)/23} & T < T_c \\ 1 + 0.70 \cdot N_h^{0.70} \cdot I_D^{-0.35} & T \geq T_c \end{cases} \quad (3.2)$$

Önerilen (3.2) denklemi için hesaba katılan varyasyon oranı $T < T_c$ için $R^2 = \%85$, $T \geq T_c$ için $R^2 = \%70$ bulunmuştur. Zaman tanım alanında hesaplanmış (gerçek) süneklik istemleri ile beraber (3.2) denklemiyle tahmin edilen süneklik istemleri Şekil 3.1-3.3'te verilmiştir.

Normalleştirilmiş Çevrimsel Enerji

Normalleştirilmiş çevrimsel enerji N_h , yer hareketi sonunda elastoplastik BSD sistemin akmayla dağıttığı birikimli çevrimsel enerjinin (E_h), yer hareketi sırasında sistem tarafından soğurulan en büyük geri dönebilen elastik şekil değiştirme enerjisine ($E_{s,\text{maks}}$) oranı olarak

tanımlanmıştır:

$$N_h = \frac{E_h/m}{E_{s,maks}/m} = \frac{E_h/m}{\frac{F_y \cdot u_y}{2 \cdot m}} = \frac{E_h/m}{\frac{PSA \cdot SD}{2 \cdot R_y^2}} \quad (3.3)$$

Burada F_y ve u_y , sırasıyla, elastoplastik BSD sistemde akma seviyesine karşılık gelen yapısal kuvvet ve yerdeğiştirmedir. PSA elastik spektral sözde ivme, SD elastik spektral yerdeğiştirme ve R_y dayanım azaltma katsayısıdır. (3.3) denklemi ile tanımlanan normalleştirilmiş çevrimsel enerji, (Chou ve Uang, 2000) tarafından tanımlanmış normalleştirilmiş soğrulan enerjiye (3.4 denklemi, normalized absorbed energy) denk gelmektedir. Soğrulan enerji ($E_a=E_h+E_s$), yer hareketi sonunda geri dönebilen şekil değiştirme enerjisi E_s 'nin sıfırlanması nedeniyle çevrimsel enerjiye eşit olur.

$$N_a = \frac{E_a}{E_{s,maks}} \quad (3.4)$$

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözümleme sonucunda hesaplanan normalleştirilmiş çevrimsel enerji değerleri, farklı dayanım azaltma katsayıları ve normalleştirilmiş periyotlar için Şekil 3.7, 3.9 ve 3.10'da verilmiştir.

Cosenza ve Manfredi Sismik İndeksi

İstatistiksel regresyon çözümlenmeleri sırasında birçok karakteristik yer hareketi parametresinin (en büyük yer ivmesi PGA, en büyük yer hızı PGV, Arias şiddeti I_A , spektrum şiddeti S_I , Trifunac ve Brady (1975) tarafından önerilmiş etkili yer hareketi süresi t_d , Somerville vd. (1997) tarafından önerilmiş etkili yer hareketi süresi t_{d75} ve Bolt (1973) tarafından önerilen üniform yer hareketi süresi t_{uni}) yerdeğiştirme sünekliğine duyarlılığı incelenmiş ve en etkili parametrenin Cosenza ve Manfredi sismik indeksi (I_D) olduğu bulunmuştur:

$$I_D = \frac{I_E}{PGA \cdot PGV} \quad (3.5)$$

Burada I_E (3.6) eşitliğinde verilen ivme kaydı şiddetini, PGA ve PGV ise sırasıyla en büyük yer ivmesi ve hızını göstermektedir.

$$I_E = \int_0^t \ddot{u}_g^2 dt \quad (3.6)$$

Tasarım sürecinde sismik indeks I_D 'yi tahmin etmek çoğu zaman mümkün olmayabilir. Sismik indeks I_D 'nin yeterli güvenilirlikte tahmin edilemediği durumlarda $I_D=13$ alınarak, yerdeğiştirme sünekliğinin tahminine izin veren (3.2) denklemi basitleştirilebilir. Bu durumda (3.2) denklemi

$$\mu = \begin{cases} 1 + 0.30 \cdot N_h^{0.70} \cdot \tau^{(1-R_y)/23} & T < T_e \\ 1 + 0.30 \cdot N_h^{0.70} & T \geq T_e \end{cases} \quad (3.7)$$

şeklini alır. (3.7) denklemi ile tahmin edilen yerdeğiştirme sünekliği istemleri için ağırlıklı ortalama hatalar ve hatalar için varyasyon katsayıları Şekil 3.16'da verilmiştir.

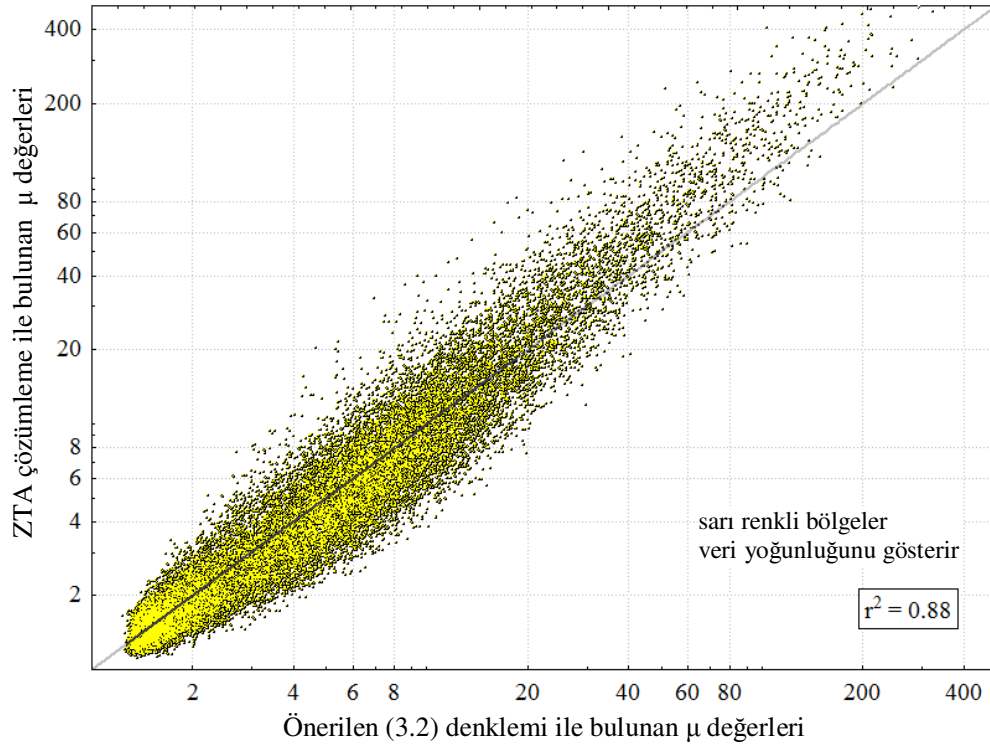
Zaman tanım alanında hesaplanan süneklik istemlerinin her bir T/T_e değerindeki ortalama ve standart sapma değerleri Şekil 3.5-3.6'da verilmiştir. $0.1 < T/T_e < 1$ aralığında süneklik istemlerinde gözlenen nispeten büyük saçılmalar; özellikle doğal titreşim periyodu 0.3s'den kısa, düşük dayanımlı sistemlerde meydana gelen yüksek süneklik istemlerinden kaynaklanmaktadır. Süneklik istemlerindeki saçılmalar, $T < T_e$ için periyot azaldıkça artarken, $T > T_e$ için normalleştirilmiş periyoda göre sabit bir eğilim göstermektedir. Gözlenen saçılmalar dayanıma göre de değişiklik göstermektedir: $0.5 < T/T_e < 3.0$ aralığında dayanım azaltma katsayısı arttıkça, saçılmalar artmaktadır. Belli bir dayanımın altındaki sistemlerde ($R_y > 4$), dayanımdaki değişime bağlı olarak saçılma oranlarında gözlenen bu fark oldukça azalmaktadır.

Şekil 3.7-3.9'da zaman tanım alanında hesaplanan ortalama enerji ve süneklik istemi spektrumları verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği üzere, çevrimsel enerji ve yerdeğiştirme sünekliği karakteristik iki spektral bölgede (T_e 'den önce ve sonra) farklı eğilimler göstermektedir: $T < T_e$ spektral bölgesinde, çevrimsel enerji artma eğilimindeyken, süneklik istemi azalmakta; $T > T_e$ spektral bölgesinde ise, çevrimsel enerji azalırken, süneklik istemi ortalamada neredeyse sabit kalmaktadır. Bununla birlikte; çevrimsel enerjinin (E_h) en büyük geri dönebilen şekil değiştirme enerjisine ($E_{s,max}$) oranı olan normalleştirilmiş çevrimsel enerji (N_h), her iki spektral bölgede de ortalamada süneklik istemine benzer eğilim göstermektedir.

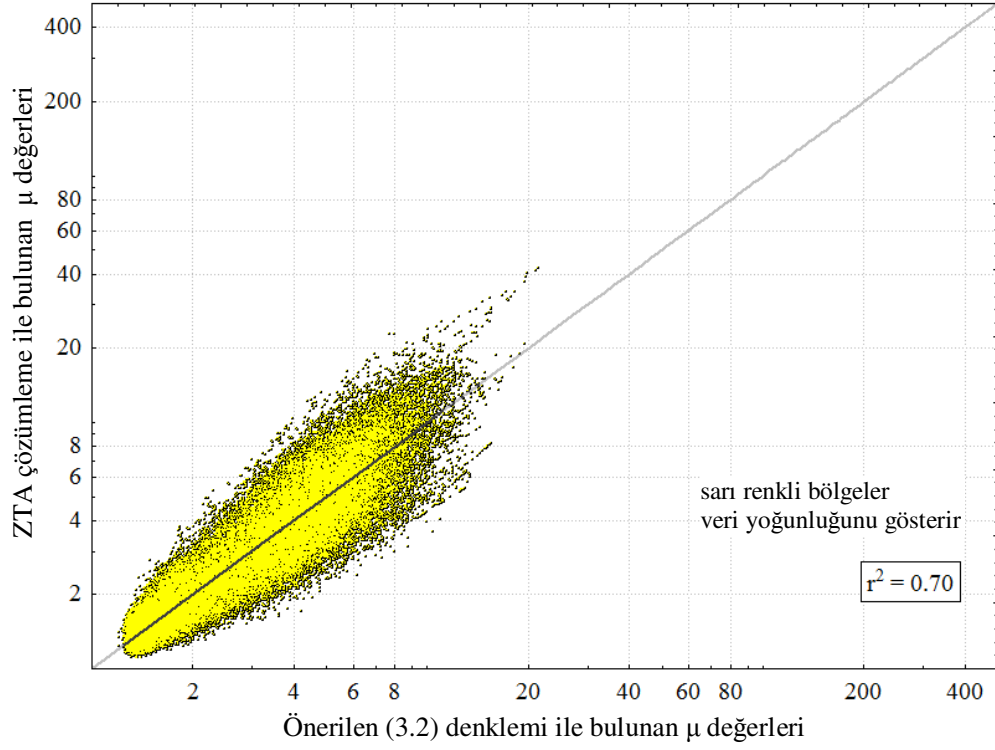
Şekil 3.10'da farklı dayanım azaltma katsayıları için verilen $N_h - \mu - \mu/R_y$ (normalleştirilmiş çevrimsel enerji – yerdeğiştirme sünekliği istemi – elastik olmayan yerdeğiştirme oranı) spektrumları, dayanımın ortalamada bu istemler üzerindeki etkisini göstermektedir. Dayanım azaldıkça, tüm spektral bölgelerde normalleştirilmiş çevrimsel enerji ve süneklik istemi

ortalamada artmaktadır. Elastik olmayan yerdeğiştirme oranı ise karakteristik iki spektral bölgede farklı eğilim göstermektedir: $T < T_e$ spektral bölgesinde titreşim periyodu arttıkça etkisi azalmakla beraber, dayanım azaldıkça artmakta, karakteristik periyottan uzun sistemlerden ise dayanımındaki değişim ortalama spektrumları etkilememektedir.

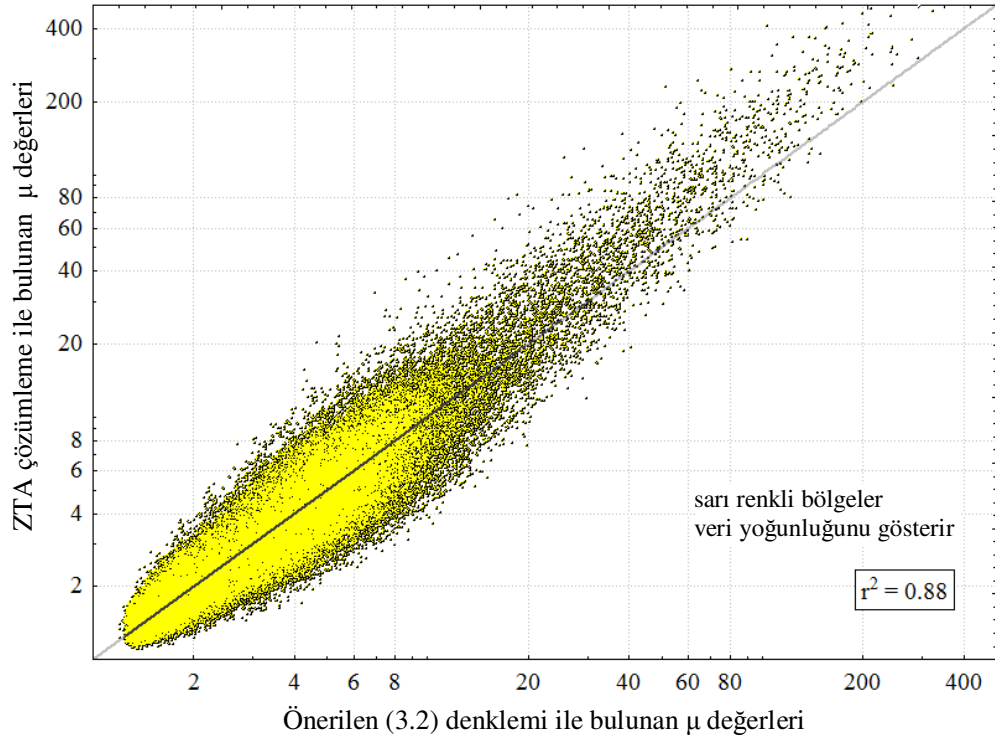
Şekil 3.11’de, her bir T/T_e için zaman tanım alanında hesaplanan ve (3.2) denklemi ile tahmin edilen ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri verilmiştir. Şekil 3.12 ve 3.13’te ise, bu istemler farklı dayanım azaltma katsayıları için verilmiştir. Son olarak Şekil 3.14 ve 3.15’te, önerilen (3.2) denklemi ile tahmin edilen süneklik istemleri için her bir T/T_e değerindeki ağırlıklı ortalama hatalar ve hataların varyasyon katsayıları verilmiştir. ZTA çözümlene ile hesaplanan süneklik istemlerinde olduğu gibi; $0.5 < T/T_e < 3.0$ spektral aralığında dayanım azaltma katsayısı arttıkça, bunların tahmininde önerilen denklem ile yapılan hataların saçılmaları da azalarak artmaktadır.



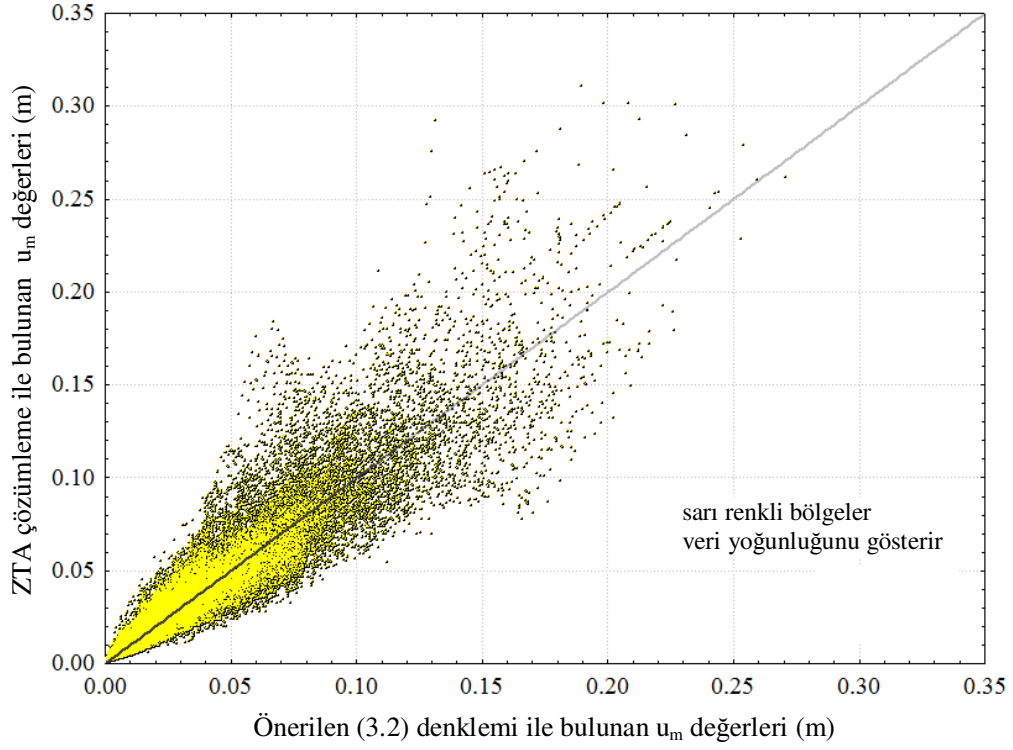
Şekil 3.1 ZTA hesaplanan ve tahmin edilen süneklik katsayısı değerleri ($0.1 \leq T/T_e \leq 1.0$)



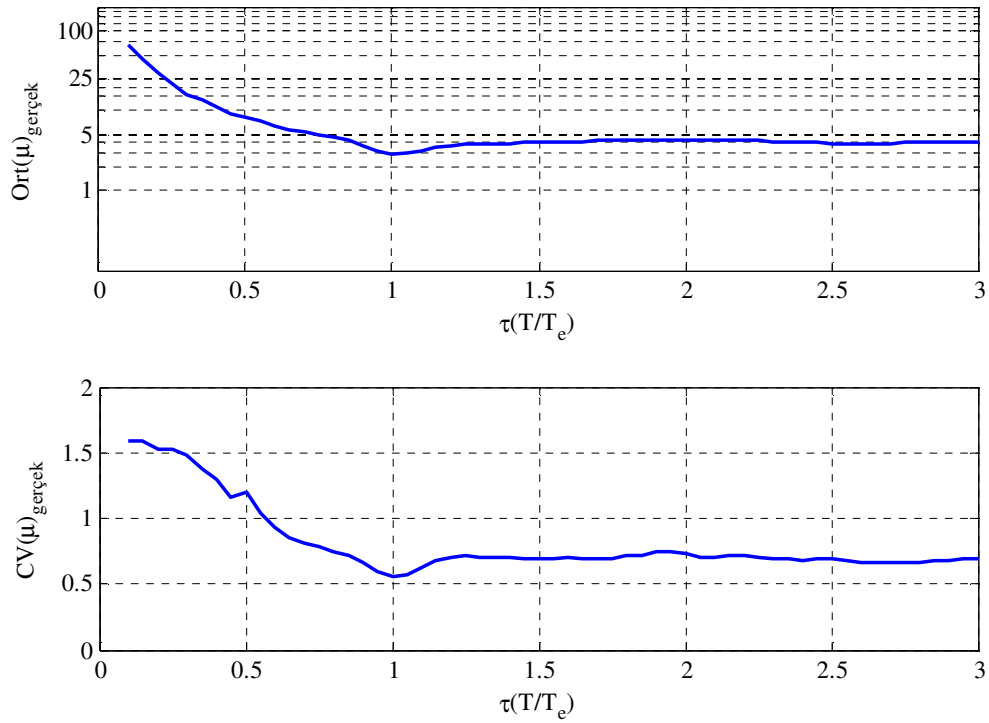
Şekil 3.2 ZTA hesaplanan ve tahmin edilen süneklik katsayısı değerleri ($1.0 \leq T/T_e \leq 3.0$)



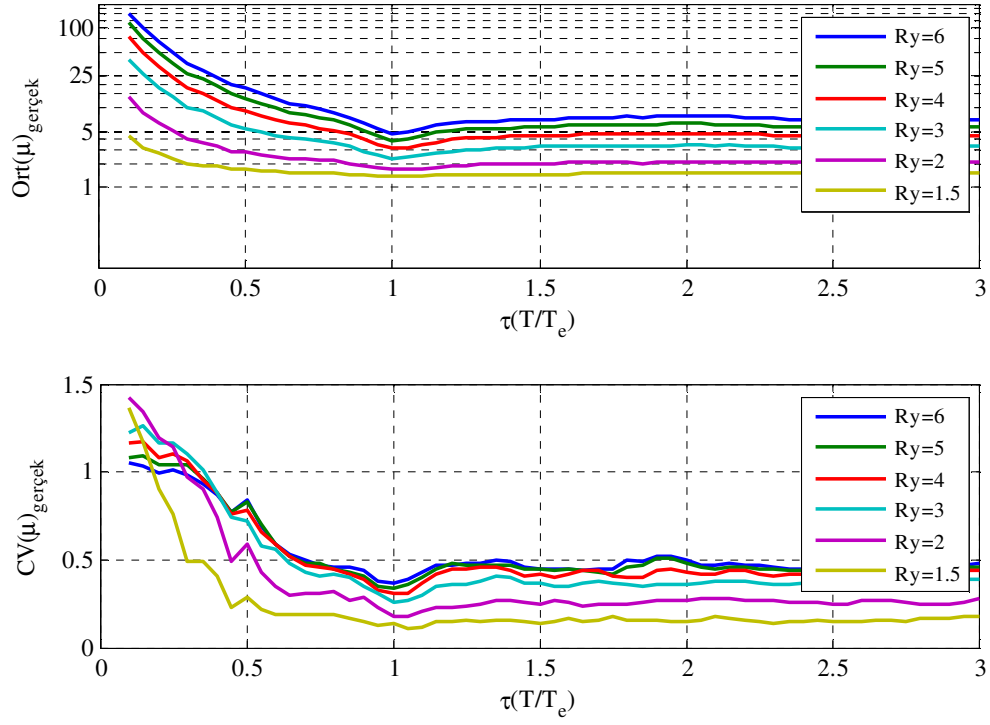
Şekil 3.3 ZTA hesaplanan ve tahmin edilen süneklik katsayısı değerleri ($0.1 \leq T/T_e \leq 3.0$)



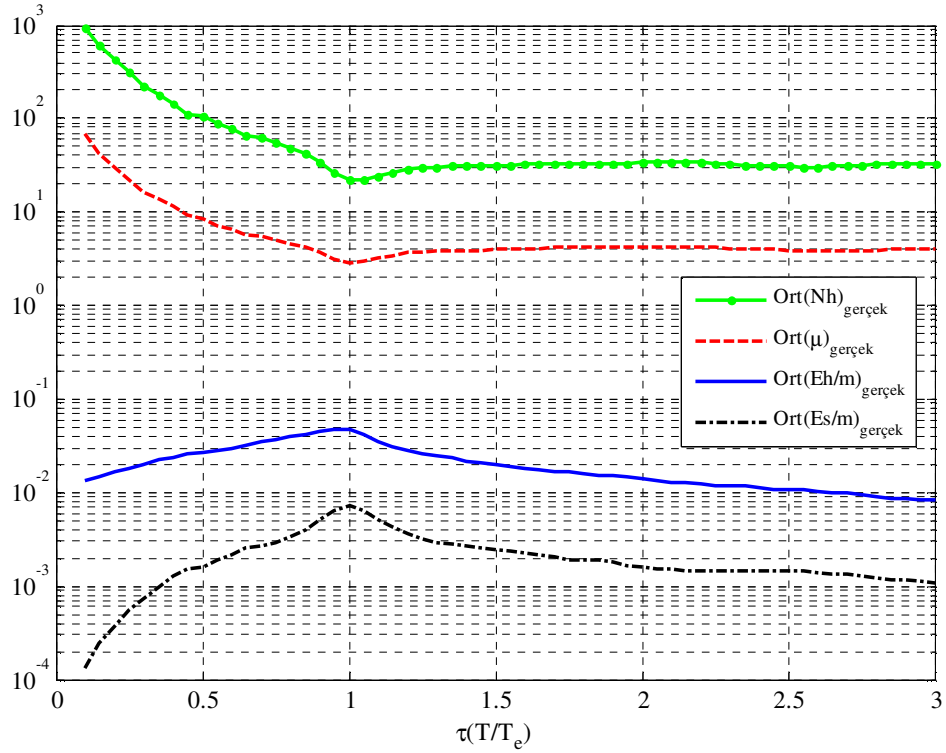
Şekil 3.4 Zaman tanım alanında hesaplanan ve tahmin edilen en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme değerleri (m)



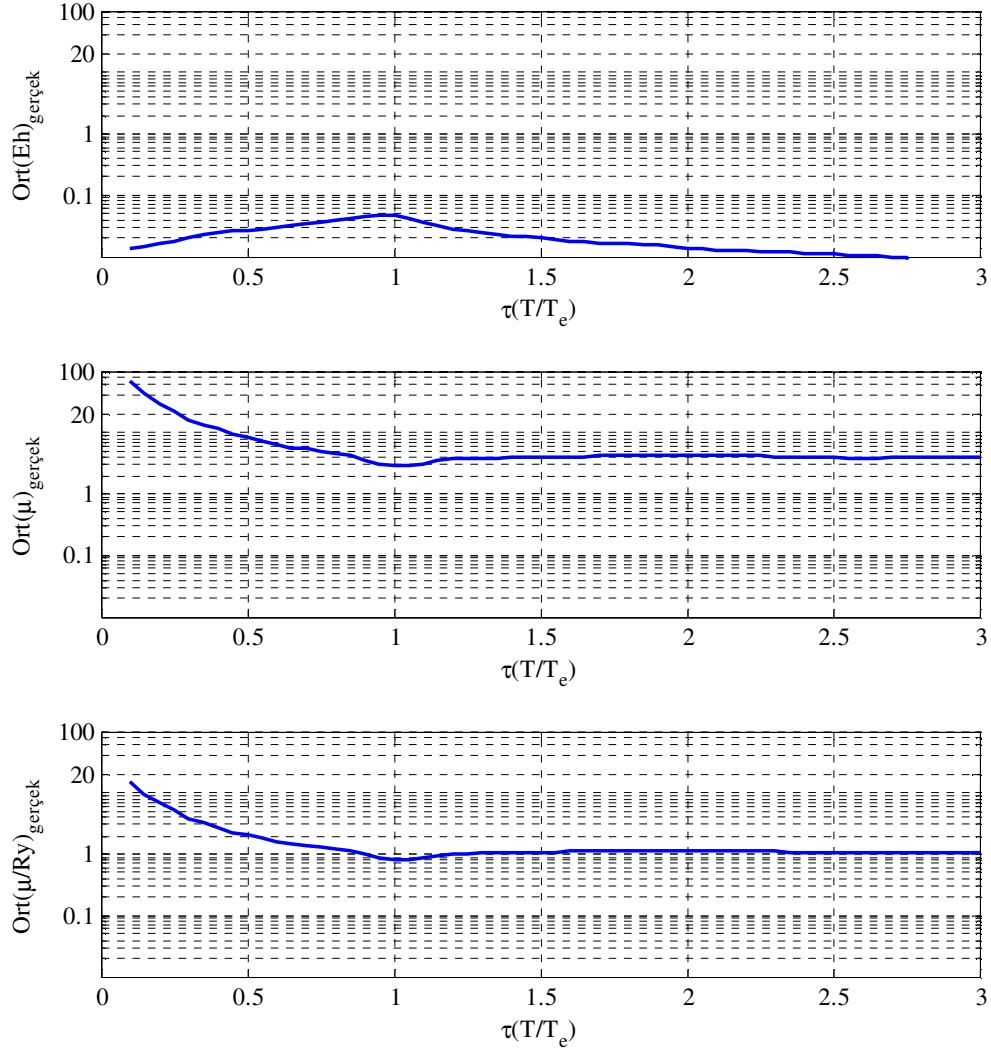
Şekil 3.5 Ortalamalar ve varyasyon katsayıları (ZTAÇ sonuçları)



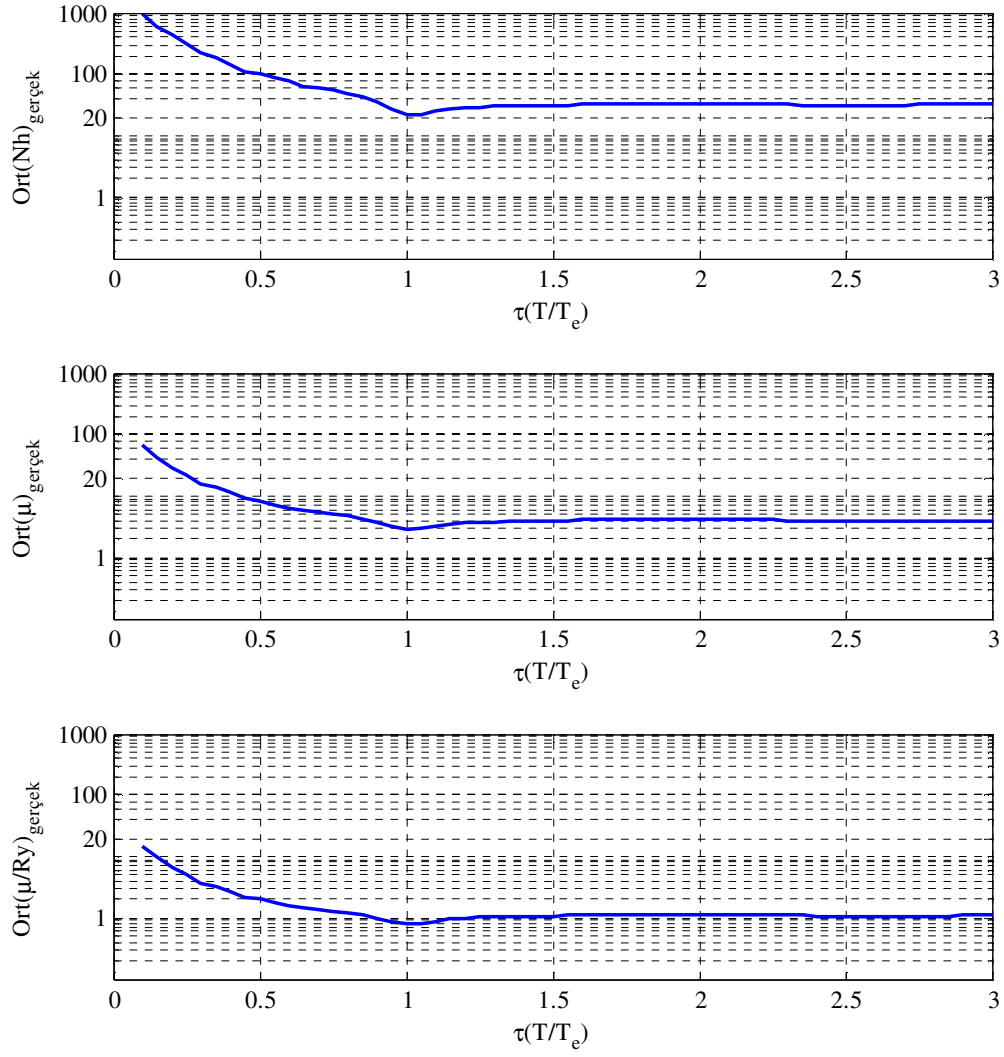
Şekil 3.6 Farklı dayanımlar için ortalamalar ve varyasyon katsayıları (ZTAÇ sonuçları)



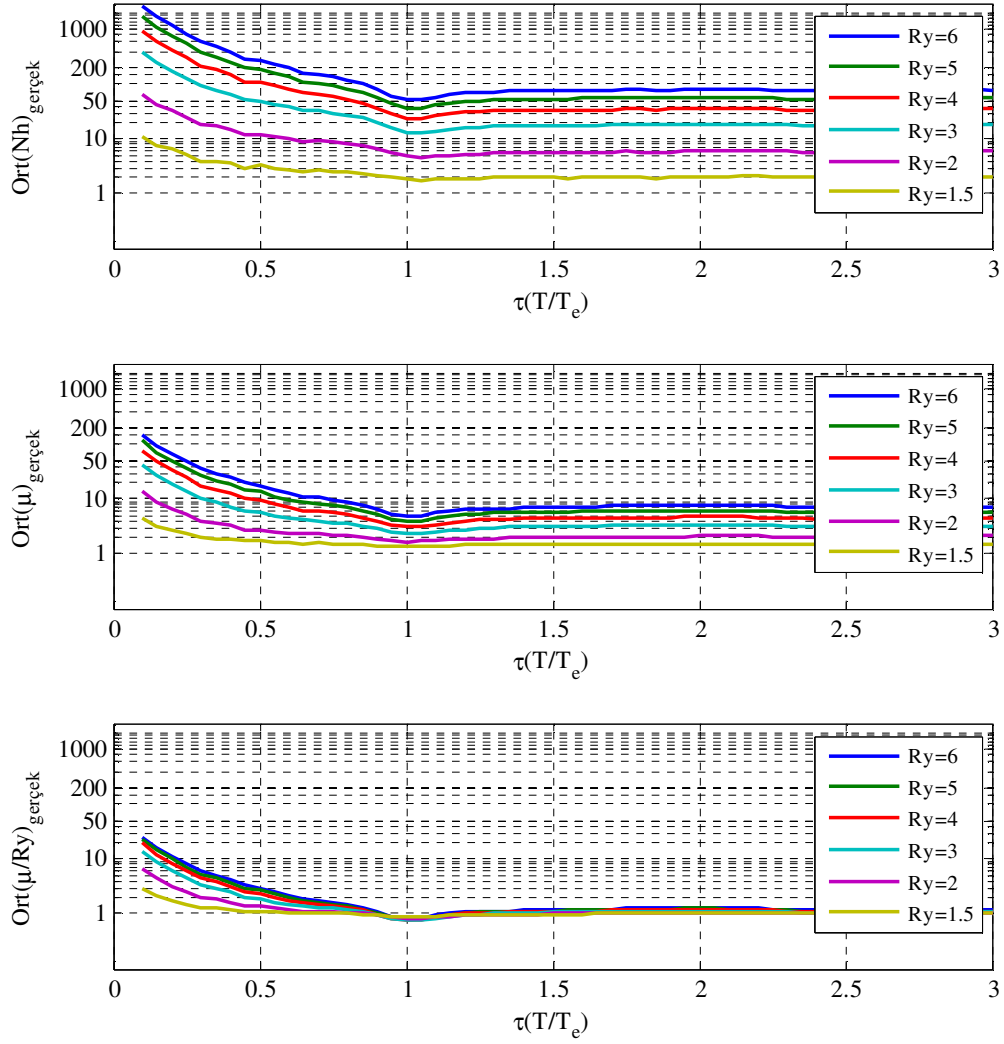
Şekil 3.7 Ortalama enerji spektrumları ve yerdeğiştirme süneklği istemleri



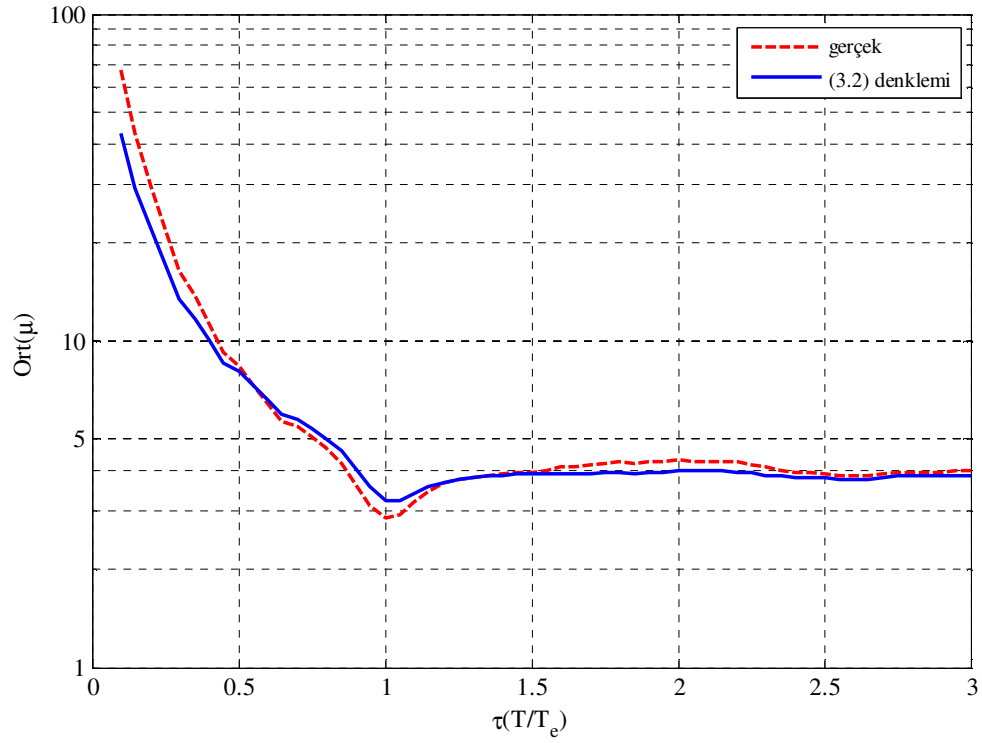
Şekil 3.8 Çevrimsel enerji ve yerdeğiştirme sünekliği istemleri (ZTAÇ sonuçları)



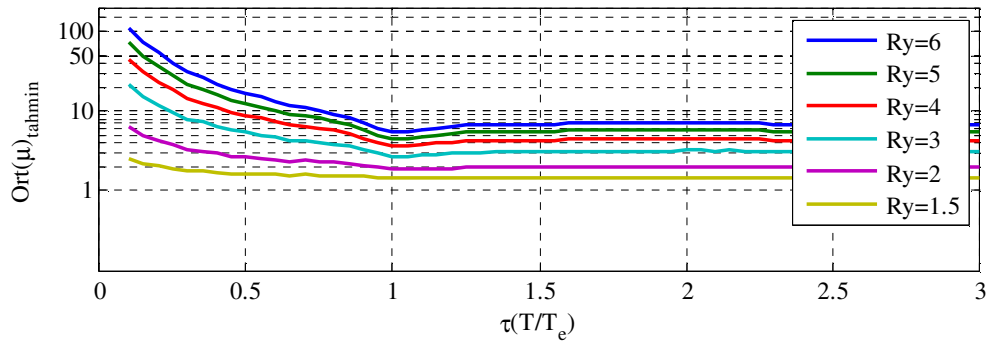
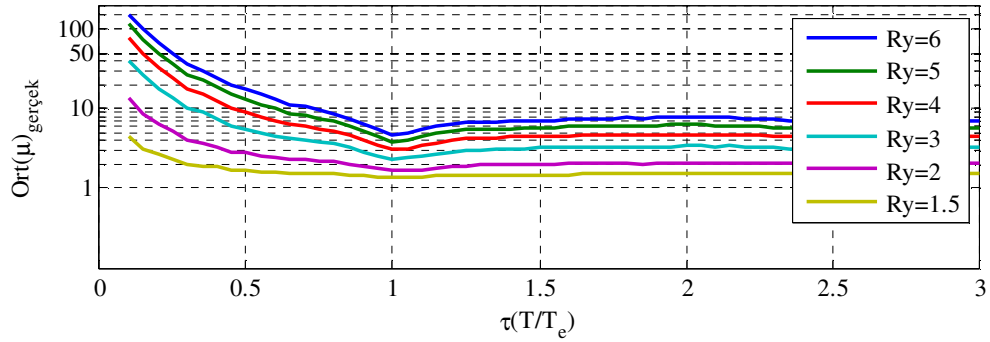
Şekil 3.9 Normalleştirilmiş çevrimsel enerji ve yerdeğiştirme sünekliği istemleri (ZTAÇ sonuçları)



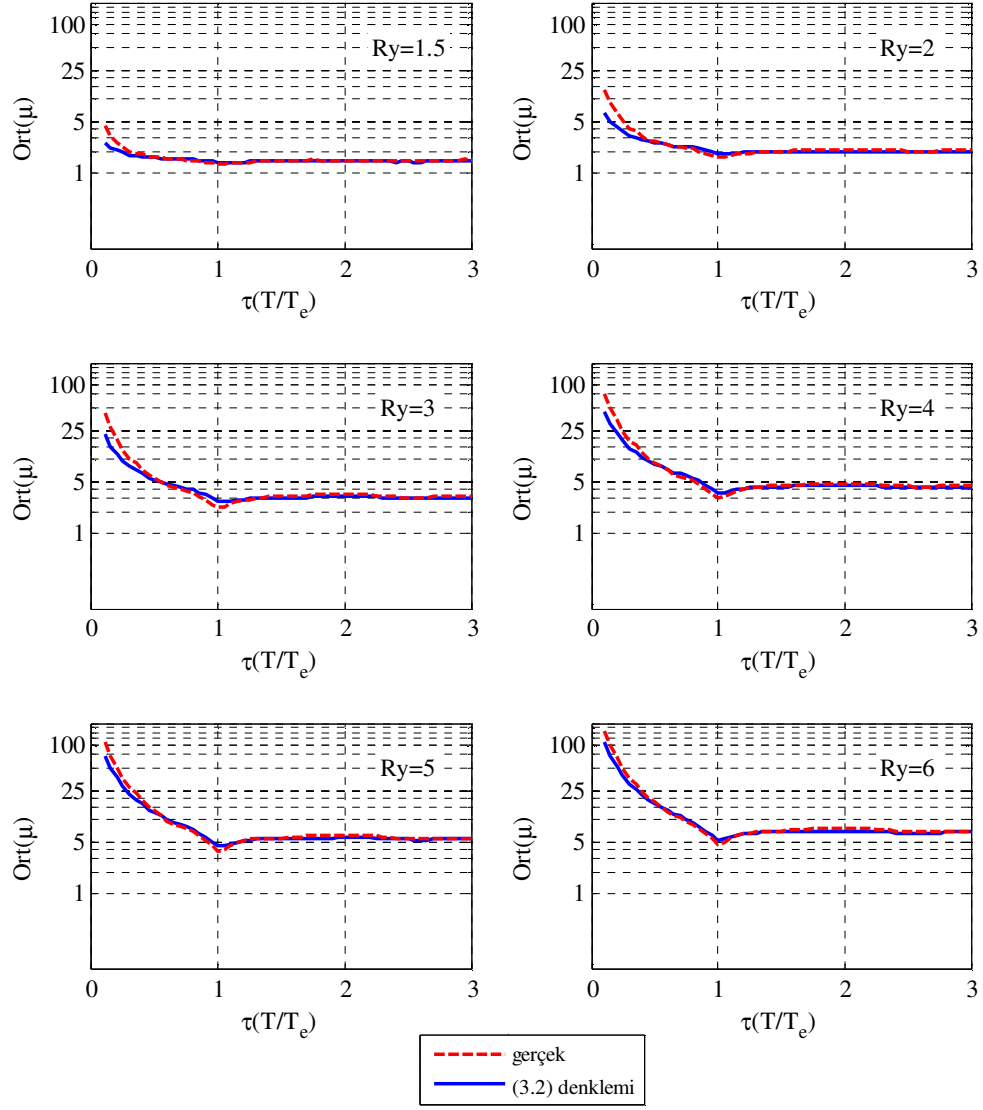
Şekil 3.10 Farklı dayanımlar için normalleştirilmiş çevrimsel enerji ve yerdeğiştirme sünekliği istemleri (ZTAÇ sonuçları)



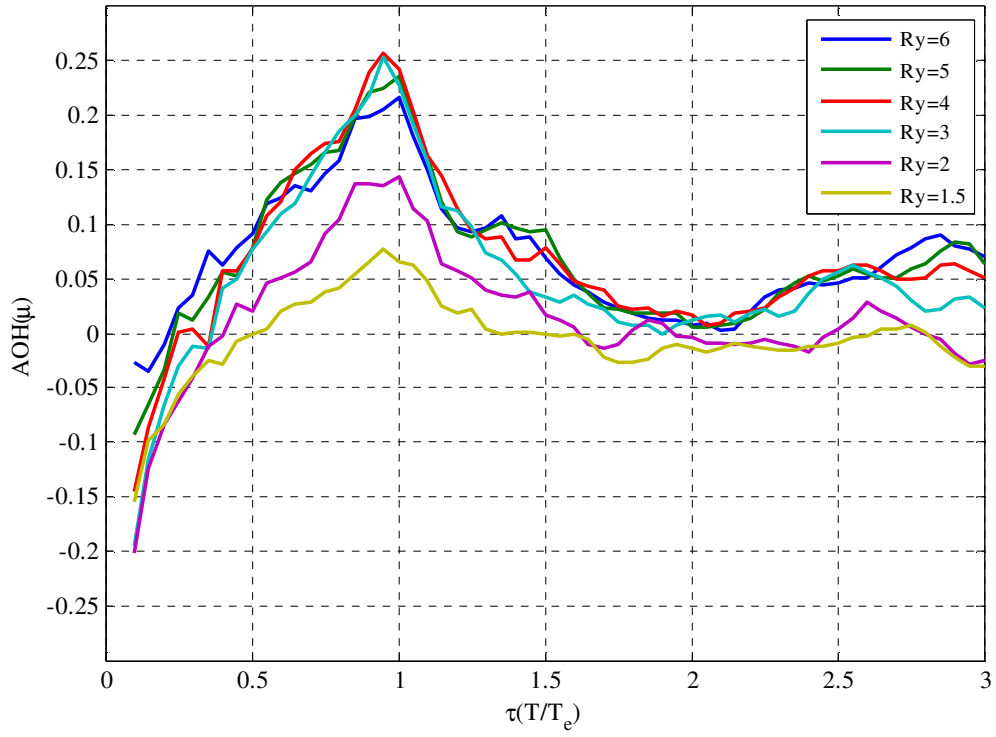
Şekil 3.11 Ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri



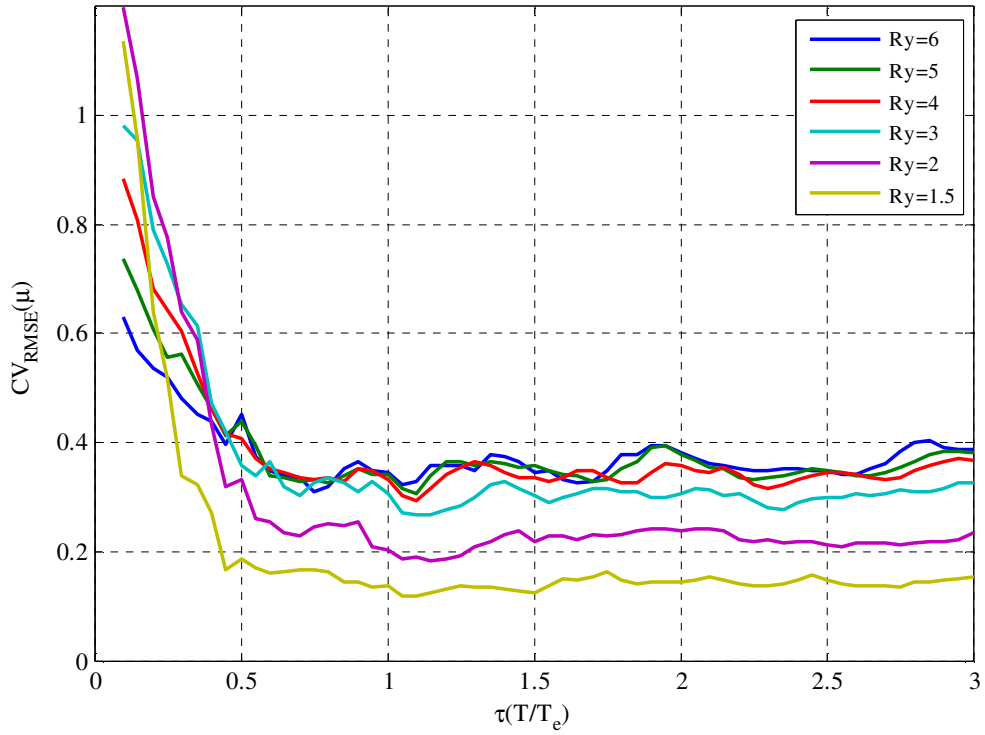
Şekil 3.12 Ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri



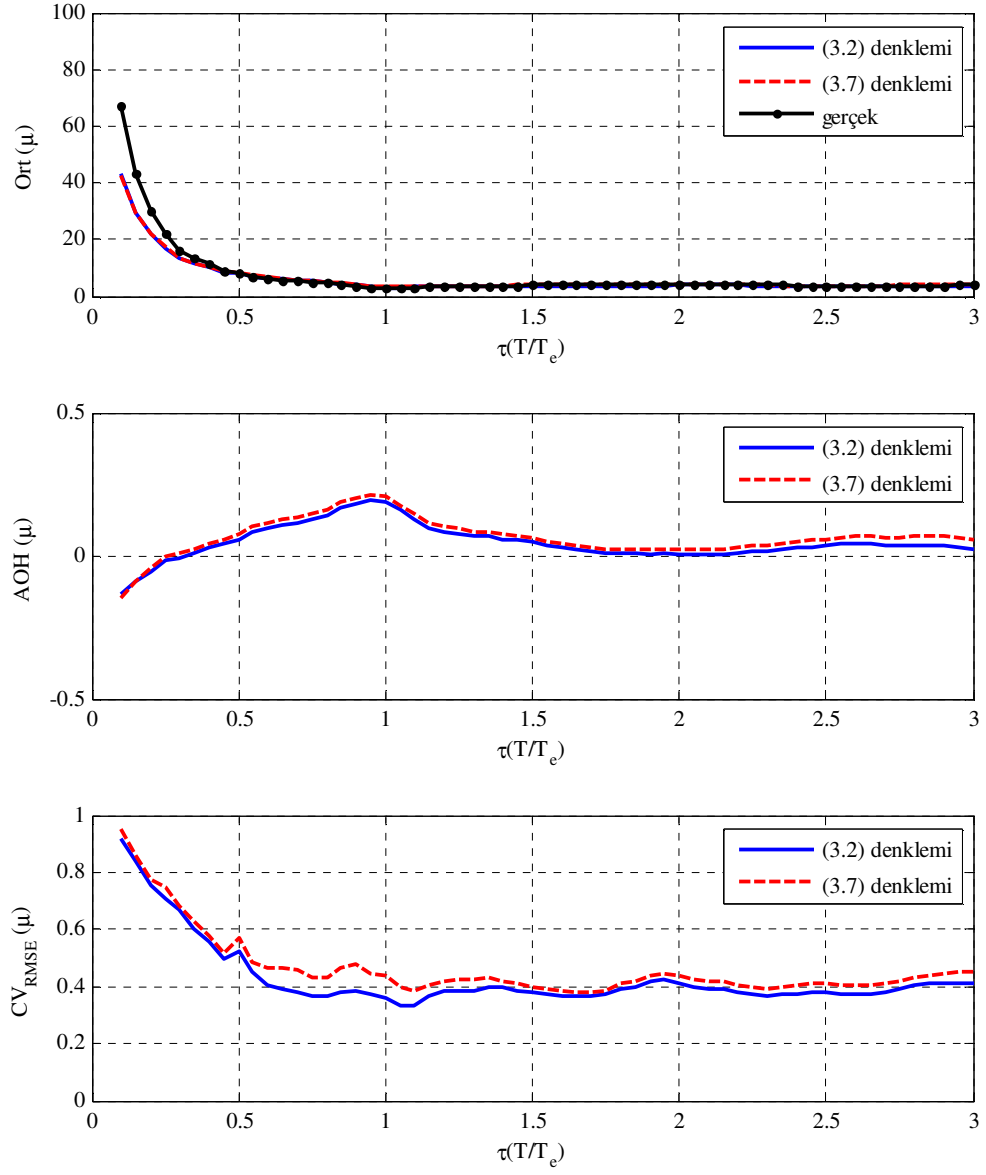
Şekil 3.13 Ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri



Şekil 3.14 Ağırlıklı ortalama hatalar (3.2 denklemi)



Şekil 3.15 Hataların varyasyon katsayıları (3.2 denklemi)

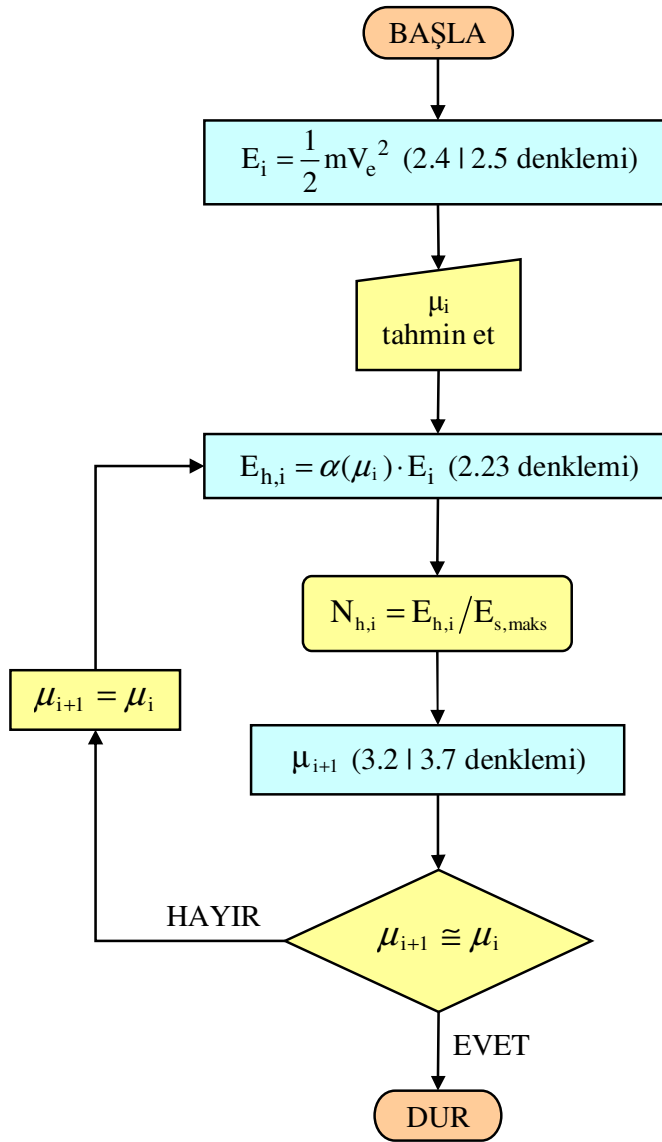


Şekil 3.16 Önerilen alternatif denklem (3.7 denklemi) için ağırlıklı ortalama hatalar ve varyasyon katsayıları

3.2 İteratif Yöntem

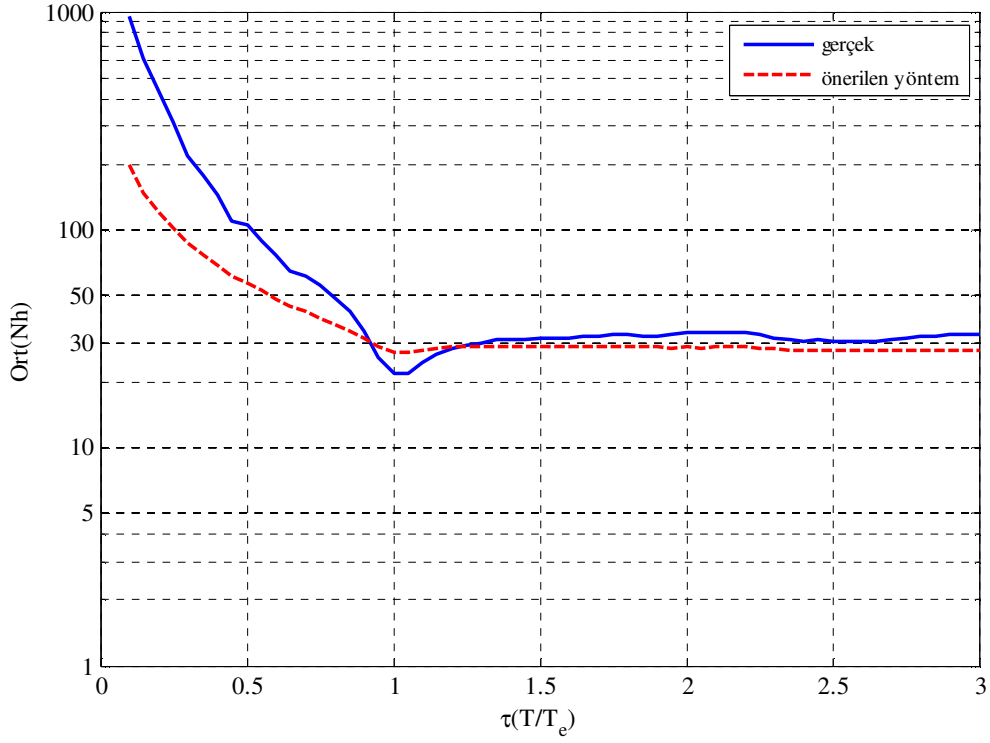
Önerilen (3.2) denklemlerle en büyük yerdeğiştirme, yer hareketi sonunda sistem tarafından akıyla dağıtılan çevrimsel enerjiye bağı olarak tahmin edilmiştir. Ne var ki, çevrimsel enerji aynı zamanda yer değıştirme istemine de bağıdır. Bu nedenle yerdeğıştirme isteminin sismik enerjiye bağı olarak tahmininde iteratif bir yaklaşım izlenebilir. Çalışma kapsamında önerilen iteratif yaklaşım Şekil 3.17'de özetlenmiştir. Buna göre:

- 1) Yine bu çalışma kapsamında önerilen (2.4) veya (2.5) denklemi ile BSD sistemin giriş enerjisi (E_i) hesaplanacaktır (2.14 denklemi ile T_e tahmin edilebilir).
- 2) İterasyonun ilk adımında olası bir süneklik katsayısı (μ_i) tahmin edilecektir. Örnekse, $T > T_e$ için eşit deplasman kuralı uyarınca sistemin elastik yerdeğıştirme istemi göz önüne alınabilir.
- 3) İkinci maddede göz önüne alınan süneklik katsayısı μ_i kullanılarak (2.23) denklemi ile çevrimsel enerji hesaplanacaktır.
- 4) Bu şekilde tahmin edilen çevrimsel enerji (3.3) denklemi ile normalize edilecektir.
- 5) Bir önceki maddede hesaplanan çevrimsel enerji için (3.2) veya (3.7) denklemi ile yeni bir süneklik katsayısı (μ_{i+1}) bulunacaktır. Bulunan bu yeni süneklik katsayısı ikinci maddede tahmin edilen süneklik katsayısına yeter derecede yakınsa iterasyon sonlandırılabilir ($\varepsilon_i = \left| \frac{\mu_{i+1}}{\mu_i} - 1 \right| < \%5$). Aksi durumda bulunan yeni süneklik katsayısı göz önüne alınarak iterasyona devam edilecektir.

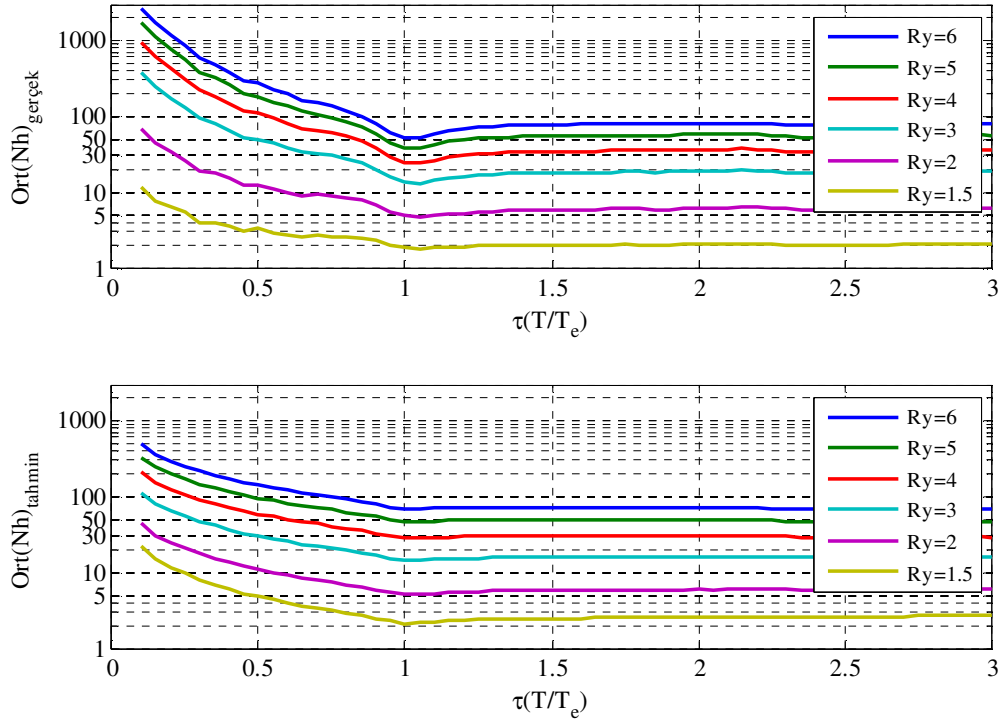


Şekil 3.17 Önerilen iteratif yaklaşımın akış şeması

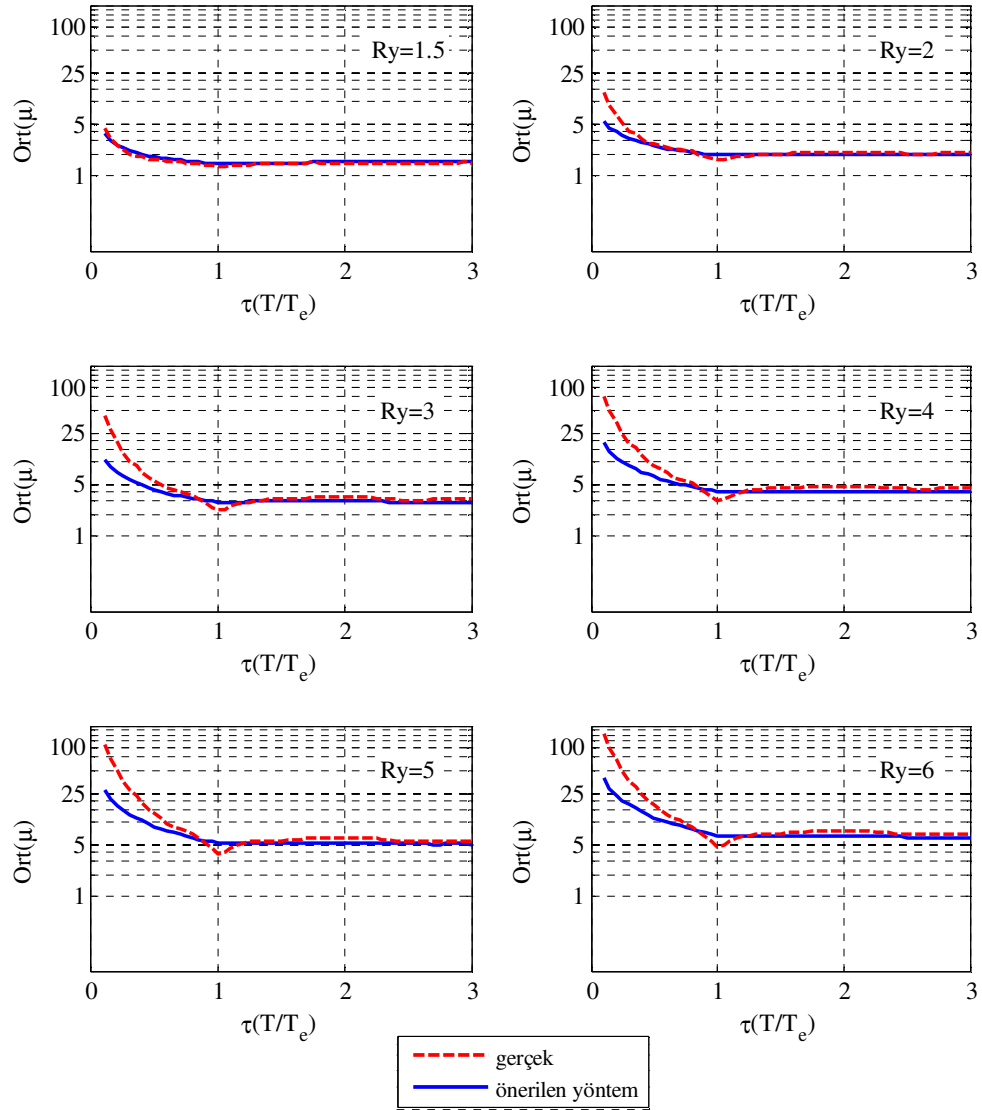
Önerilen yöntem, Bölüm 1.3'te detayları verilmiş uzak-fay yer hareketleri kullanılarak, farklı dayanım ve doğal titreşim periyotlarına sahip BSD elastoplastik sistemler için denenmiştir. Önerilen yöntem ile tahmin edilen normleştirilmiş çevrimsel enerji (N_h), süneklik istemi (μ) ve elastik olmayan yerdeğiştirme oranı (μ/R_y) için ortalama spektrumlar Şekil 3.18-3.24'te verilmiştir. Şekil 3.25-3.30'da ise; her bir T/T_e değerinde elastik olmayan yer değıştirme oranı için önerilen yöntemin ağırlıklı ortalama hataları, toplam sapmaları, standart hataları ve hataların varyasyon katsayıları verilmiştir.



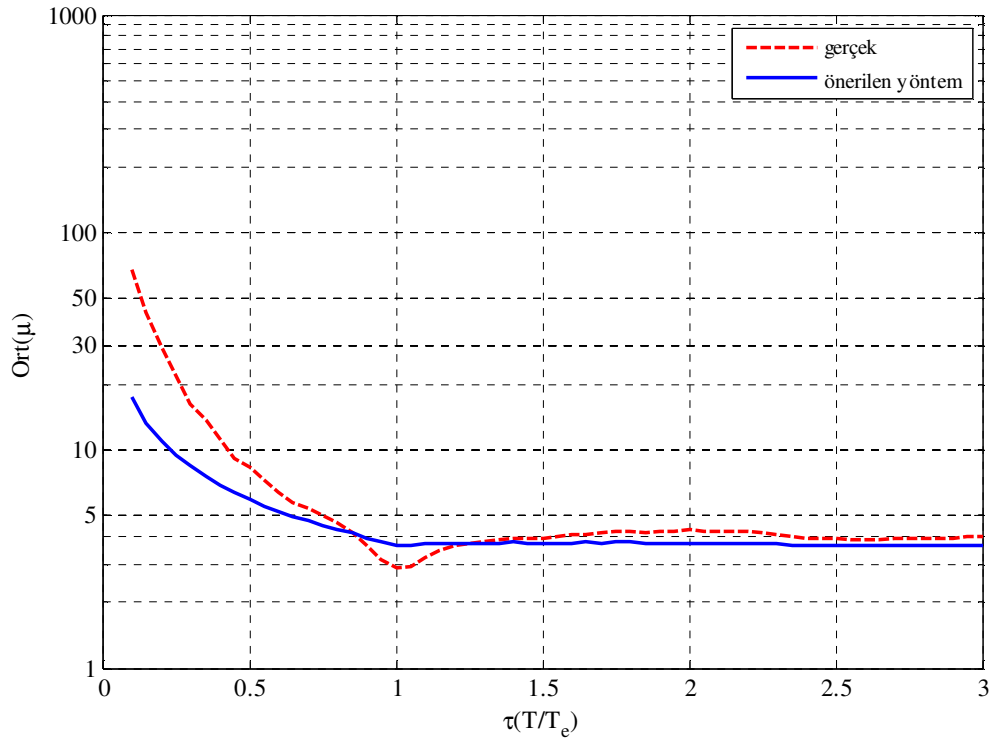
Şekil 3.18 ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama normalleştirilmiş çevrimsel enerji istemleri



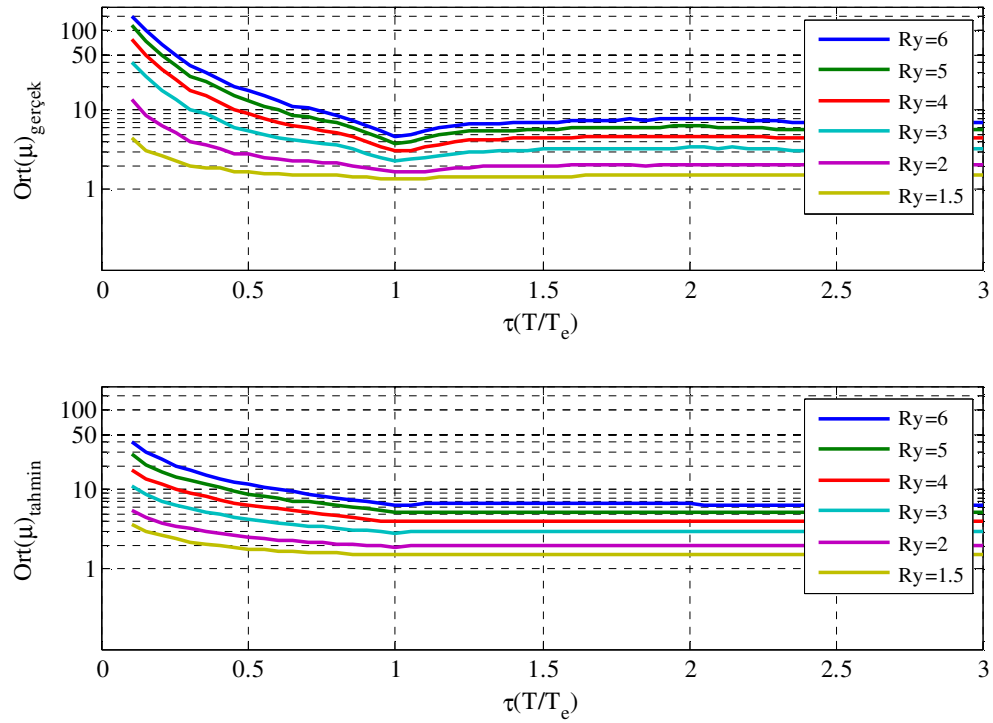
Şekil 3.19 ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama normalleştirilmiş çevrimsel enerji istemleri



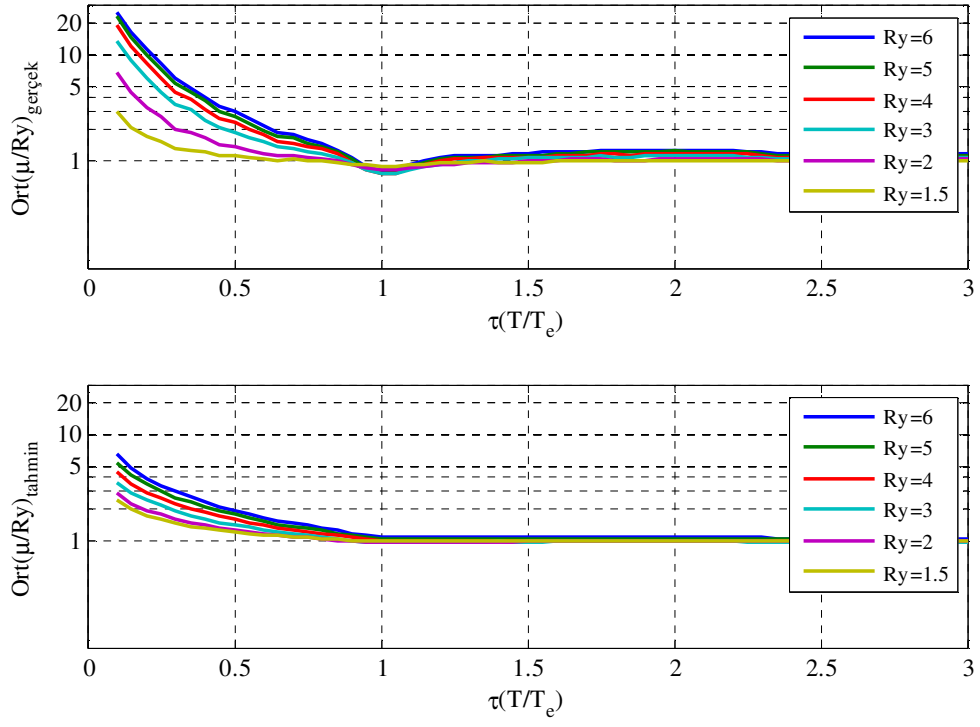
Şekil 3.20 ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri



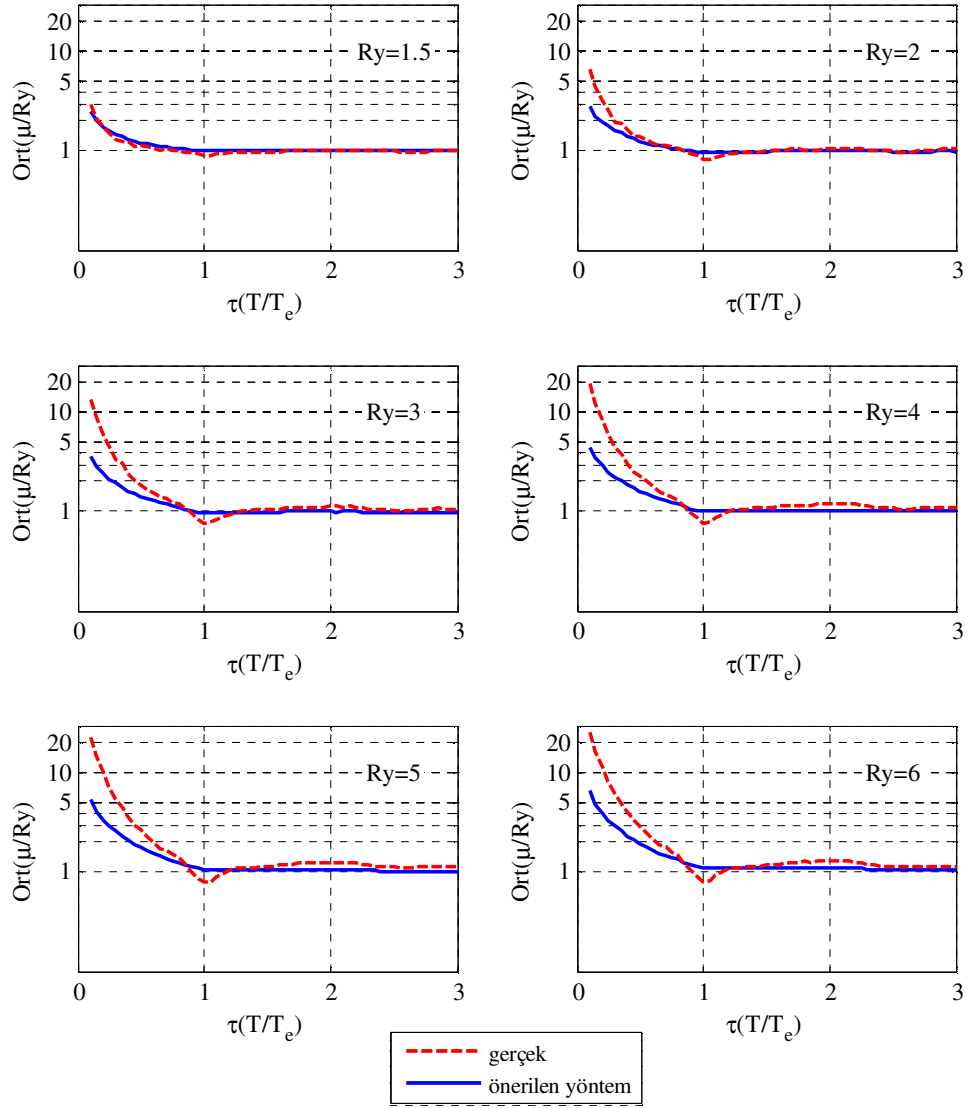
Şekil 3.21 ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri



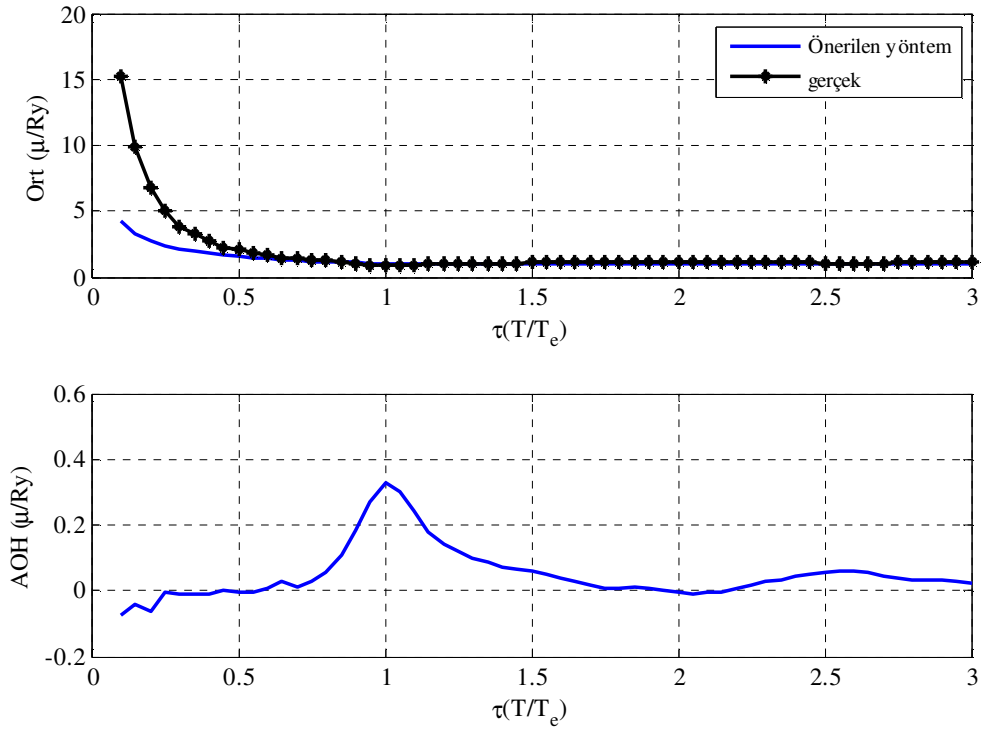
Şekil 3.22 ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama yerdeğiştirme sünekliği istemleri



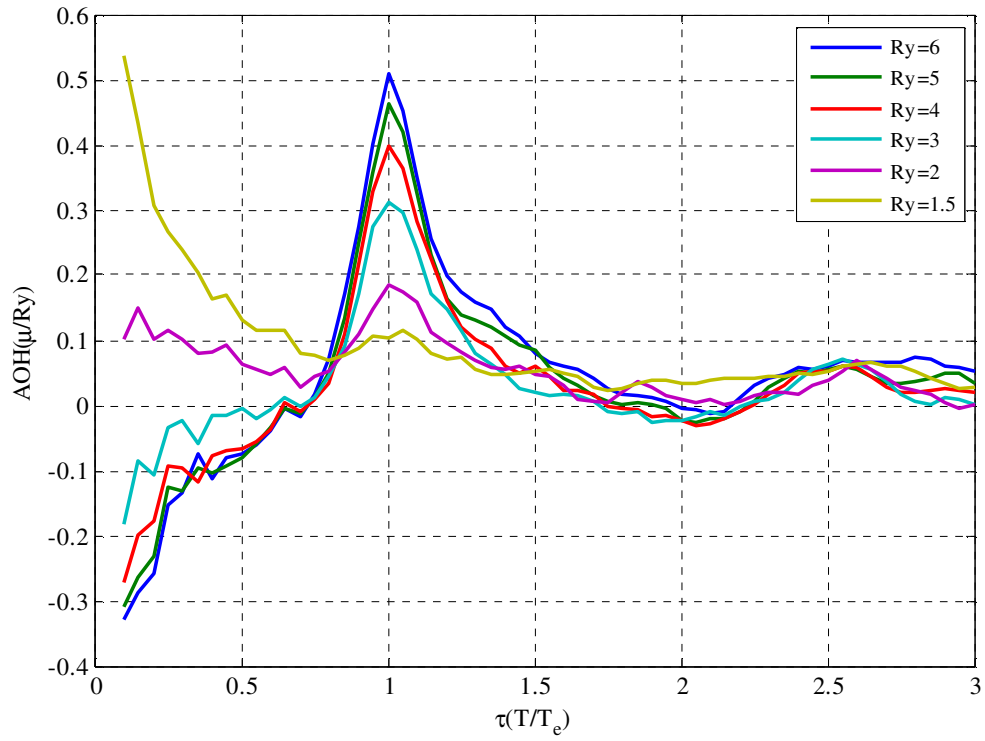
Şekil 3.23 ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama μ/Ry oranları



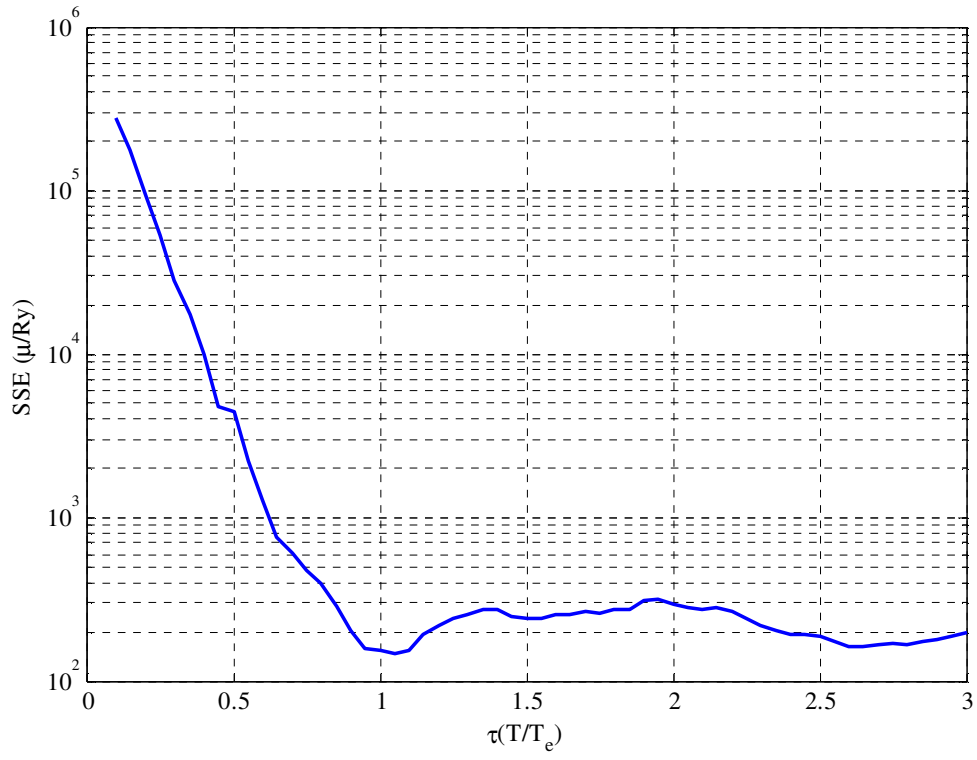
Şekil 3.24 ZTAÇ ile hesaplanan ve önerilen yöntem ile tahmin edilen ortalama μ/Ry oranları



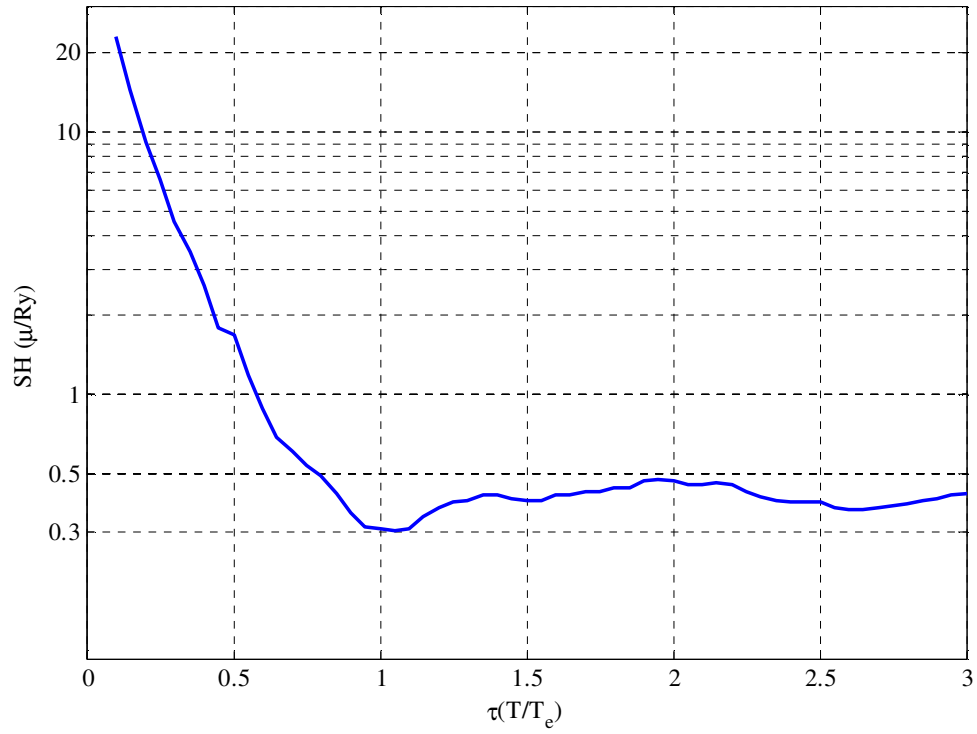
Şekil 3.25 Ortalama μ/Ry oranları ve ağırlıklı ortalama hatalar



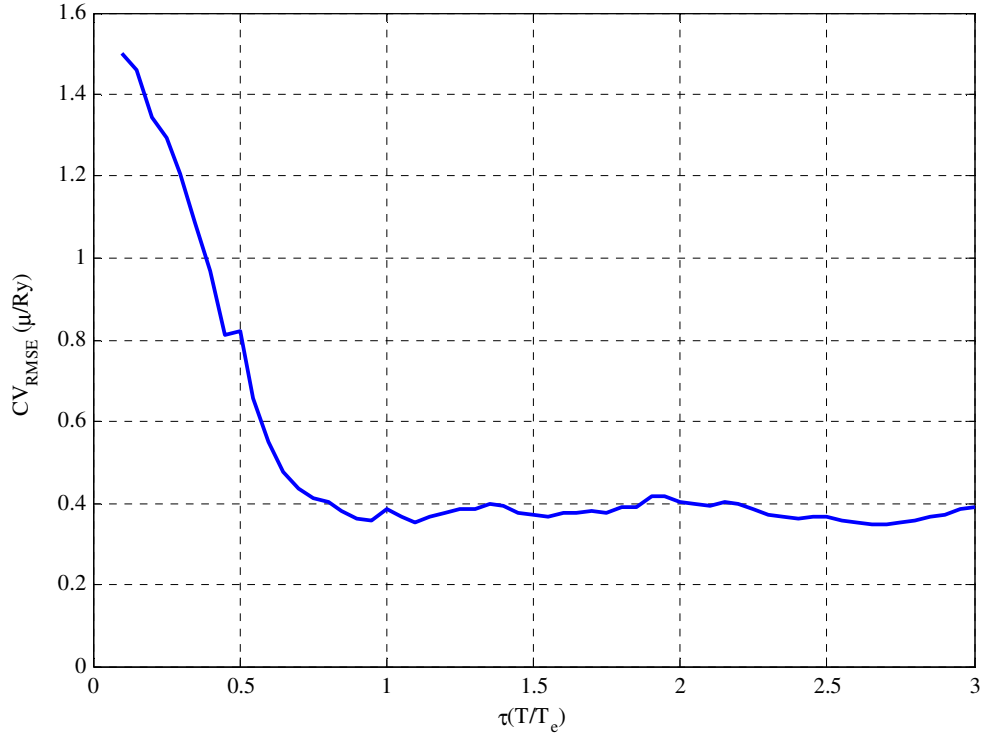
Şekil 3.26 Farklı dayanımlar için ağırlıklı ortalama hatalar (önerilen yöntem)



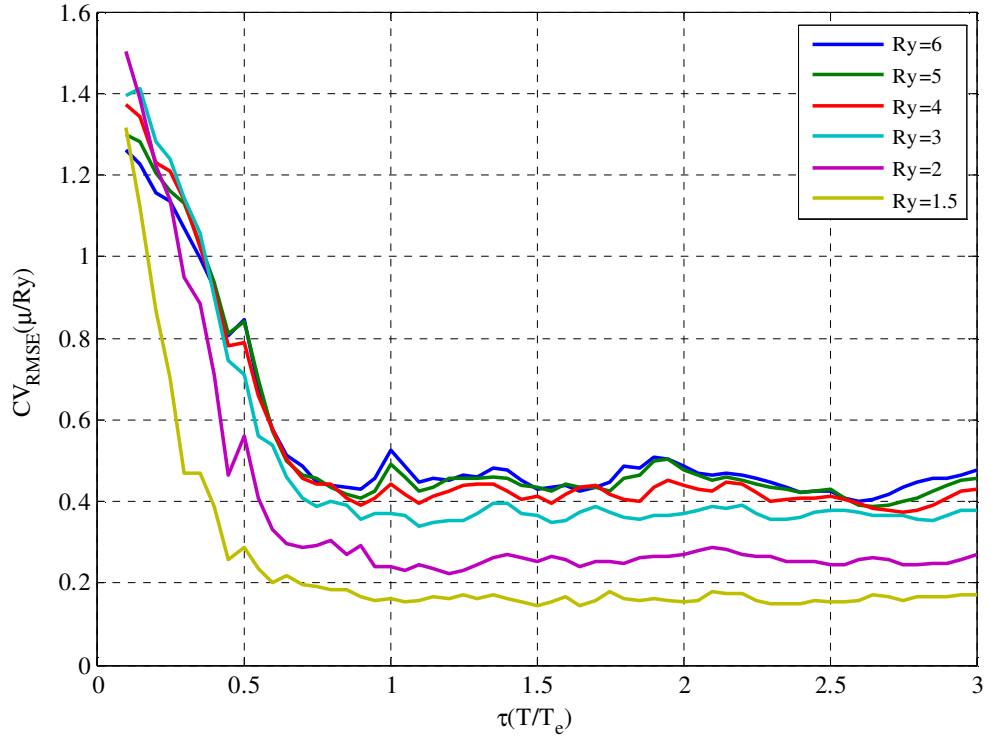
Şekil 3.27 Toplam sapmalar (önerilen yöntem)



Şekil 3.28 Standart hatalar (önerilen yöntem)



Şekil 3.29 Hataların varyasyon katsayıları (önerilen yöntem)



Şekil 3.30 Farklı dayanımlar için hataların varyasyon katsayıları (önerilen yöntem)

Güven Aralıkları

Her bir normalleştirilmiş periyot değeri için, önerilen iteratif yöntem ile bulunan hataların olasılıksal veya birikimli dağılım eğrileri belirlenebilir. Bu eğriler yardımıyla; belirli bir olasılık değeri ve göz önüne alınan veritabanı için, önerilen yöntemin hata miktarı bulunabilir. Böylelikle; gerek tasarımda gerekse de mevcut bir sistemin değerlendirilmesinde, yerdeğiştirme sünekliği istemi belirli bir güven aralığında tahmin edilebilir.

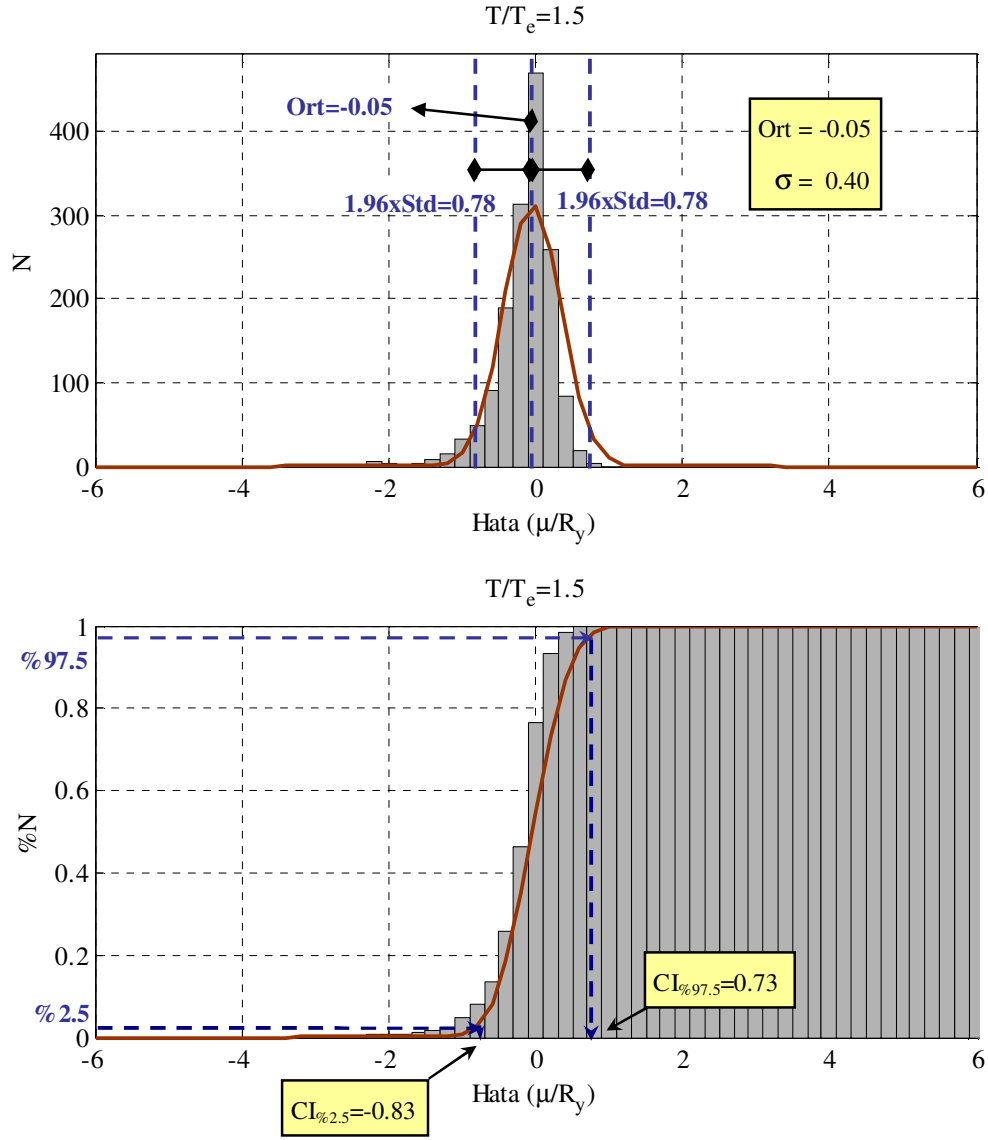
Belirli bir T/T_e değerinde, normal dağılıma uyan hatalar için olasılıksal dağılım fonksiyonu (pdf, probability distribution function) (3.8) denklemiyle bulunabilir:

$$\text{pdf}(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \text{Ort})^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (3.8)$$

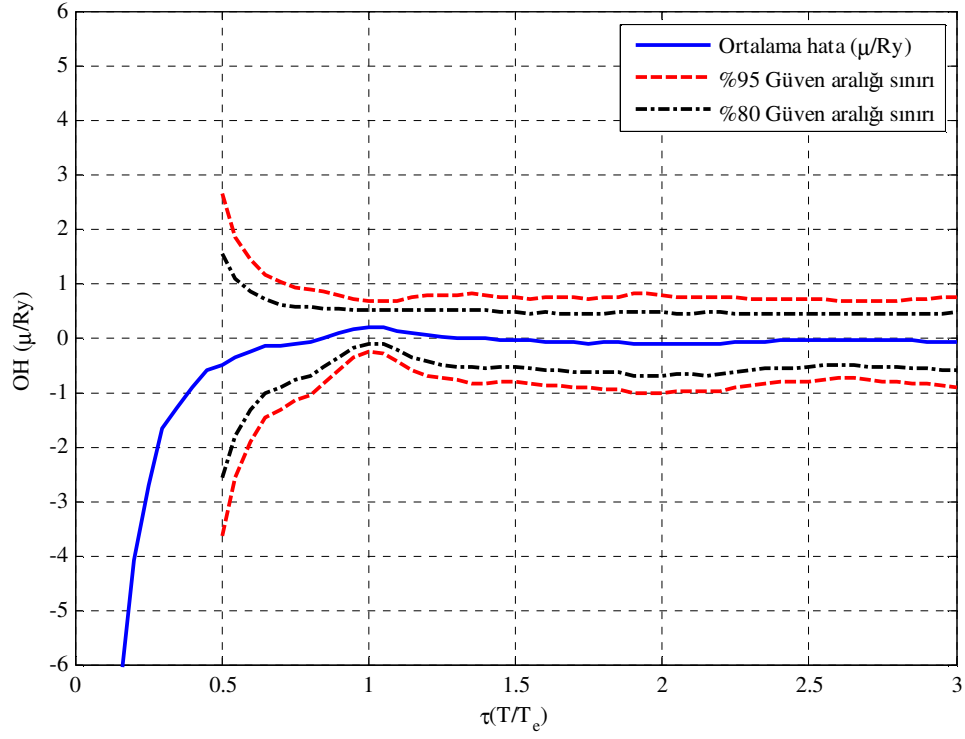
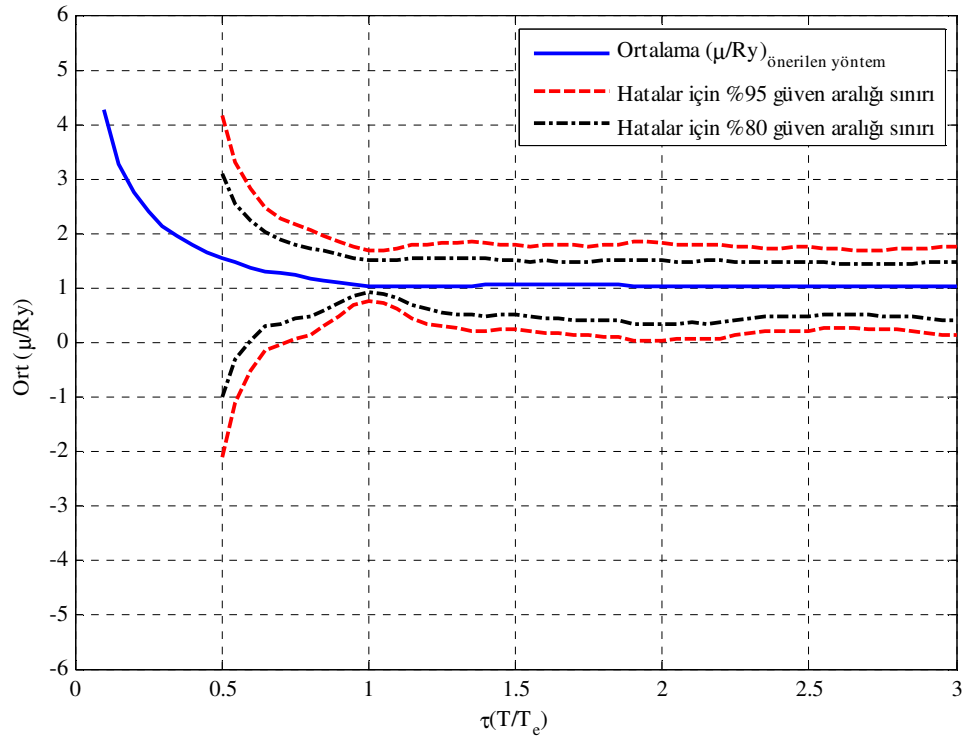
Burada σ hataların standart sapmasını, Ort hataların ortalamasını gösterir.

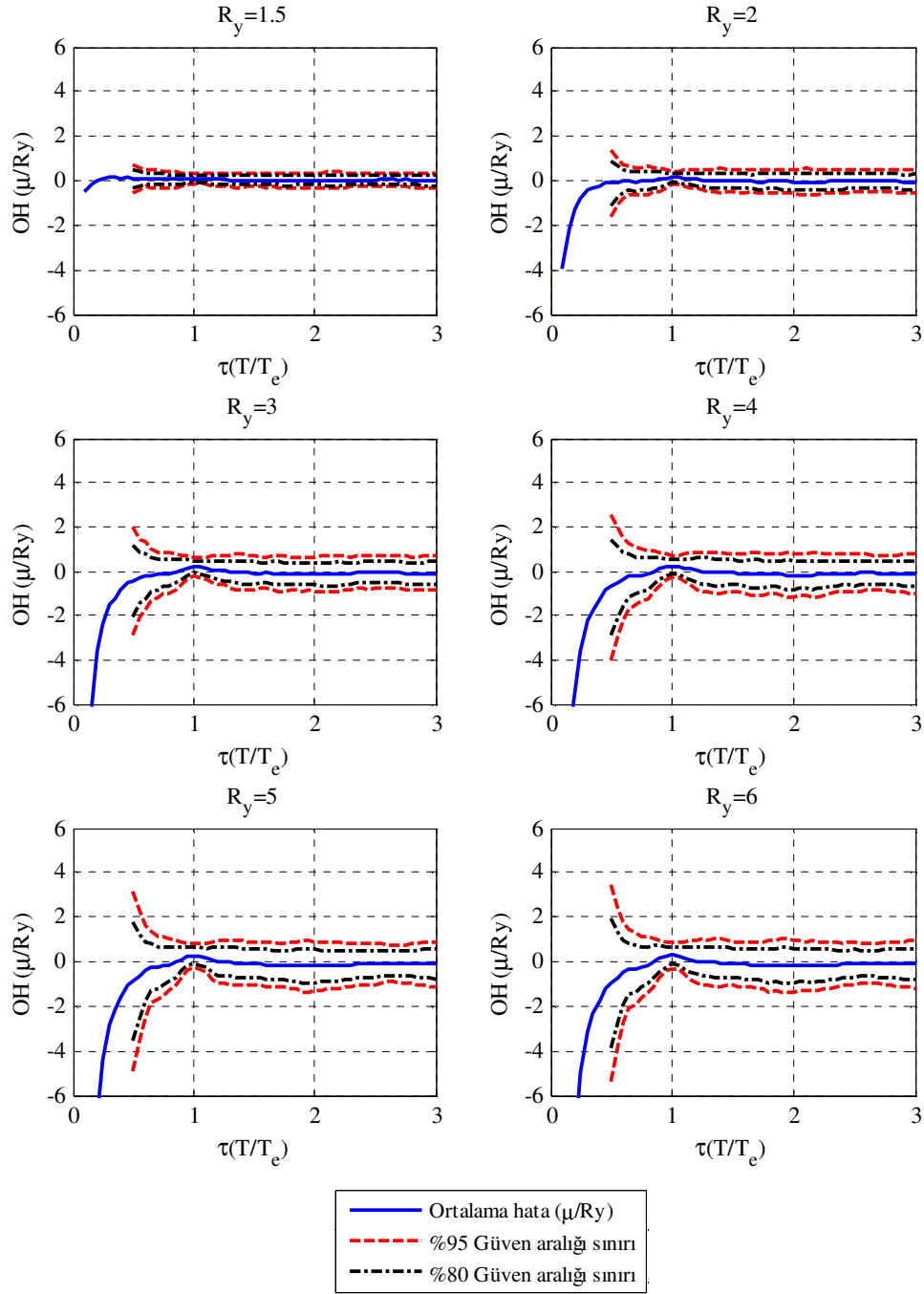
Örnek olarak Şekil 3.31’de, $T/T_e=1.5$ için, önerilen yöntem ile tahmin edilen μ/R_y değerlerinin hatalarının olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri gösterilmiştir. Bilindiği üzere; normal dağılıma uyan bir değişkende, olasılıksal dağılım eğrisinin altında kalan alanın %95’ini sınırlayan değerler “Ort \pm 1.96 σ ” olmaktadır. Bir başka deyişle; gözlenen hataların bu sınır değerler arasında kalma olasılığı %95’tir. Bu istatistik, birikimli dağılım eğrisi kullanılarak da bulunabilir: birikimli dağılım eğrisinde “Ort+1.96 σ ” değerinden daha büyük hata gözlenme olasılığı %97.5, “Ort-1.96 σ ” değerinden daha küçük hata gözlenme olasılığı ise %2.5’tir (Şekil 3.31). Bu durumda %95 olasılıklı güven aralığı sınır değerleri yine “Ort \pm 1.96 σ ” olmaktadır.

Önerilen iteratif yöntemle tahmin edilen μ/R_y değerlerinin hataları için belirlenen güven aralıkları Şekil 3.32-3.35’te verilmiştir. $T/T_e < 0.5$ spektral bölgesinde, özellikle küçük periyotlu sistemlerde ($T < 0.3$) yerdeğiştirme sünekliği isteminde gözlenen büyük saçılmalar hataların normal dağılımını bozduğundan, bu bölgede sağlıklı bir değerlendirme yapılamamıştır. Ayrıca, farklı T/T_e ve R_y değerleri için hata histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri Ek 3’te verilmiştir. Birikimli dağılım eğrilerinden de görüldüğü üzere, $T > T_e$ spektral bölgesinde hataların dağılımında dayanıma göre pek bir değişim oluşmamaktadır. Ancak $T < T_e$ spektral bölgesinde değişim ciddi mertebelere ulaşabilmektedir.

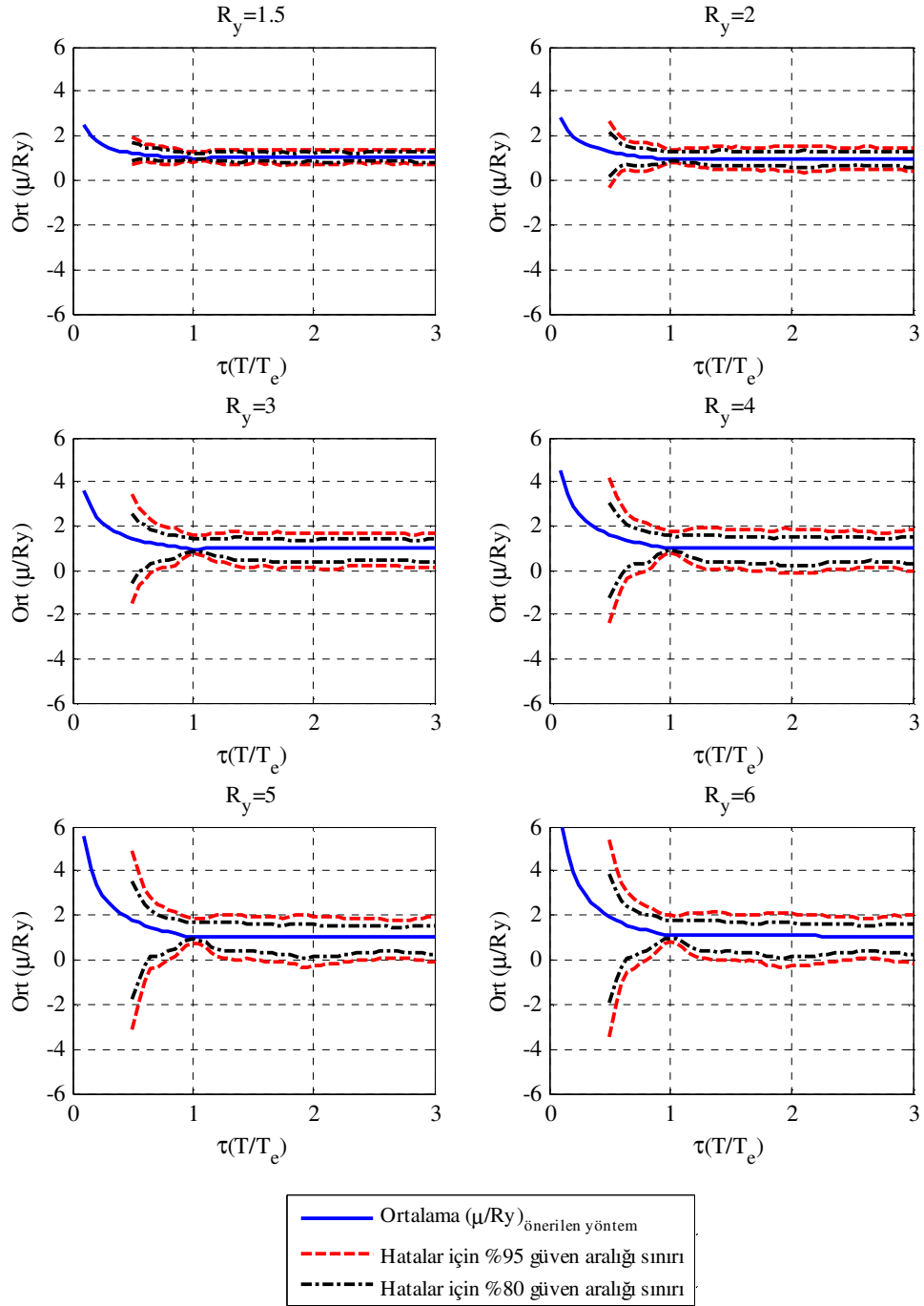


Şekil 3.31 Hataların olasılıksal ve birikimsel dağılım eğrileri ($T/T_c=1.5$)

Şekil 3.32 Ortalama hata (μ/R_y) ve güven aralıklarıŞekil 3.33 Ortalama (μ/R_y) ve hatalar için güven aralıkları



Şekil 3.34 Farklı R_y 'ler için ortalama hata (μ/R_y) ve güven aralıkları



Şekil 3.35 Farklı R_y 'ler için ortalama (μ/Ry) ve hatalar için güven aralıkları

3.3 Önerilen Yöntemin Farklı Yaklaşımlarla Karşılaştırılması

Bu çalışmada önerilen yöntem esas itibariyle; belirli bir yer hareketi veya tasarım depremi altında, “dayanımı belli olan” BSD bir sistem tarafından dağıtılan enerjiyi ve buna bağlı olarak, meydana gelen en büyük yerdeğiştirme istemini tahmin etmektedir. Bu nedenle, önerilen yöntem literatürde yer alan bazı “sabit dayanım azaltmalı yaklaşımlar” (constant strength reduction approach) ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılan dayanım azaltmalı yaklaşımların bazıları da (Nassar ve Krawinkler, 1991 – Vidic, Fajfar ve Fischinger, 1994) esasta sabit süneklikli yaklaşımlardan (constant ductility approach) türetilmiştir (Aydınoglu ve Kaçmaz, 2002).

Elastik Olmayan Yerdeğiştirme Oranı (Inelastic Displacement Ratio)

Dayanımı belli olan BSD bir sistem için elastik olmayan yerdeğiştirme oranı C_R , en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme isteminin (u_m), aynı titreşim periyoduna sahip elastik bir sistemin aynı yer hareketi altındaki en büyük yerdeğiştirme istemine (u_e) oranı olarak tanımlanabilir (Ruiz-Garcia ve Miranda, 2003):

$$C_R = \frac{u_m}{u_e} \quad (3.9)$$

Elastoplastik BSD bir sistemde, dayanım azaltma katsayısı ($R_y = u_e/u_y$) ve yerdeğiştirme sünekliği isteminin ($\mu = u_m/u_y$) tanımlarından faydalanarak elastik olmayan yerdeğiştirme oranı C_R (3.10) denklemi ile de bulunabilir:

$$C_R = \frac{u_m}{u_e} = \frac{\mu}{R_y} \quad (3.10)$$

Nassar ve Krawinkler (1991) tarafından sabit süneklik katsayısı için önerilmiş R_y (T , μ) denkleminde türetilen elastik olmayan yerdeğiştirme çarpanı C_R (3.11) denkleminde verilmiştir (Aydınoglu ve Kaçmaz, 2002):

$$C_R = \frac{1}{R_y} \left[1 + \frac{1}{c} (R_y^c - 1) \right] \quad (3.11)$$

Burada c elastoplastik çevrim modeli için (3.12) denklemi ile bulunabilir:

$$c = T/(1+T) + 0.42/T \quad (3.12)$$

Vidic, Fajfar ve Fischinger (1994) tarafından sabit süneklik katsayısı için önerilmiş R_y (T , μ)

denkleminde türetilen elastik olmayan yerdeğiştirme çarpanı C_R ise (3.13) denkleminde verilmiştir:

$$C_R = \begin{cases} \frac{1}{R_y} \left\{ 1 + \left[0.74(R_y - 1) T_0/T \right]^{1.053} \right\} & T < T_0 \\ \frac{1}{R_y} \left\{ 1 + \left[0.74(R_y - 1) \right]^{1.053} \right\} & T \geq T_0 \end{cases} \quad (3.13)$$

Burada T_0 yerdeğiştirme sünekliği katsayısına ve geçiş periyoduna bağlı karakteristik periyodu gösterir (Aydınoğlu ve Kaçmaz, 2002) ve çözümlenelerde, bu çalışma kapsamında tanımlanan, karakteristik periyot T_e 'ye eşit alınmıştır.

Aydınoğlu ve Kaçmaz (2002) elastik olmayan yerdeğiştirme çarpanı C_R için (3.14) denklemini önermişlerdir:

$$C_R = 1 + \frac{(R_y - 1)^2}{300} + \frac{1}{10 \cdot T^2} \cdot \exp\left(-20 \cdot \frac{T^{0.5}}{R_y^2}\right) \quad (3.14)$$

Ruiz-Garcia ve Miranda (2003) elastoplastik sistemler için (3.15) denklemini önermişlerdir:

$$C_R = 1 + \left[\frac{1}{a(T/T_s)^b} - \frac{1}{c} \right] (R_y - 1) \quad (3.15)$$

Burada $a=50$, $b=1.8$, $c=55$ 'dir. T_s için ise; B, C ve D sınıfı zeminler için (NEHRP zemin sınıflandırması) sırasıyla, 0.75, 0.85 ve 1.05 değerleri önerilmiştir.

Chopra ve Chintanapakdee (2004) farklı yer hareketi grupları için, bilineer sistemlerde elastik olmayan yerdeğiştirme çarpanı C_R 'nin değişimini incelemiştir. Yazarlar elastoplastik sistemler için (3.16) denklemini önermişlerdir:

$$C_R = 1 + \left[\left(\frac{a}{R_y^b} + c \right) \left(\frac{T}{T_c} \right)^d \right]^{-1} \quad (3.16)$$

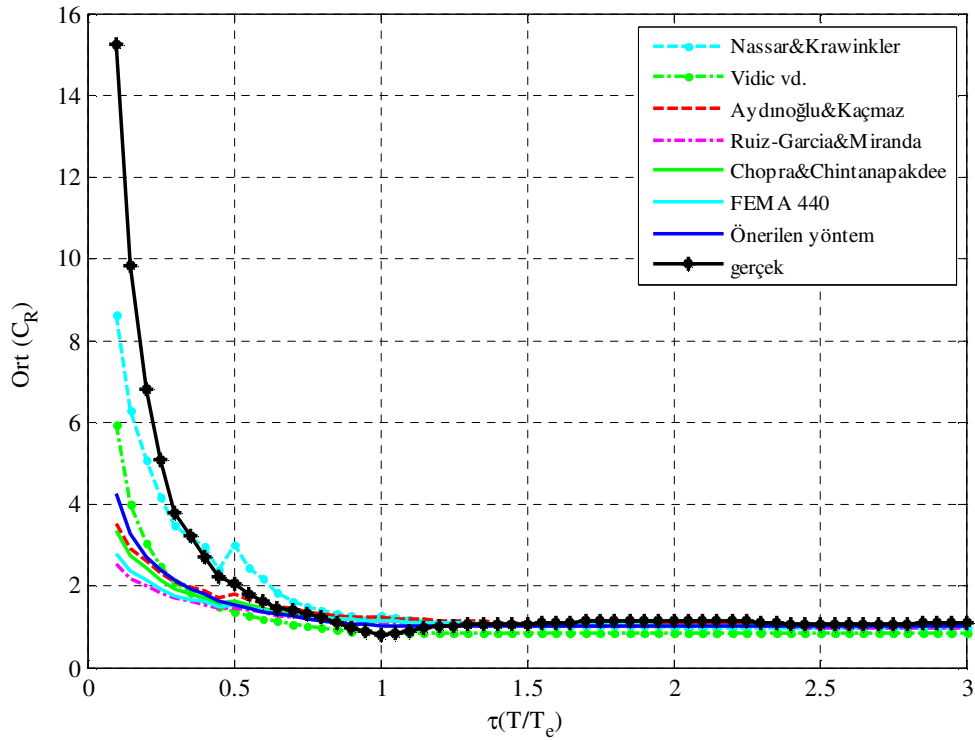
Burada; tüm yer hareketi grupları için $a=61$, $b=2.4$, $c=1.5$ ve $d=2.4$ 'tür. T_c için ise B, C ve D zemin sınıfları için sırasıyla 0.32, 0.33 ve 0.40 değerleri önerilmiştir (Chopra ve Chintanapakdee, 2003).

FEMA 440 (2005) dokümanında elastik olmayan yerdeğiştirme çarpanı için (3.17) denklemi önerilmiştir:

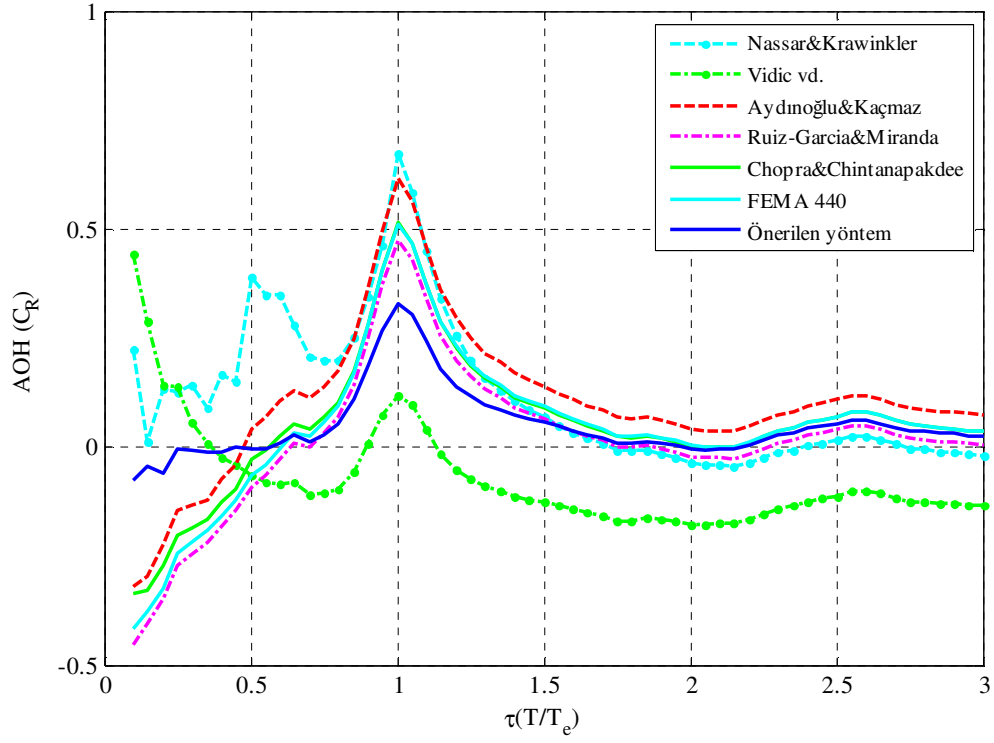
$$C_R = \begin{cases} 1 + \frac{R_y - 1}{a \cdot 0.2^2} & T < 0.2 \\ 1 + \frac{R_y - 1}{a \cdot T^2} & 0.2 \leq T \leq 1.0 \\ 1.0 & T > 1.0 \end{cases} \quad (3.17)$$

Burada a sabiti, NEHRP zemin sınıflandırmasına göre, B, C ve D zemin sınıfları için sırasıyla 130, 90 ve 60'dır.

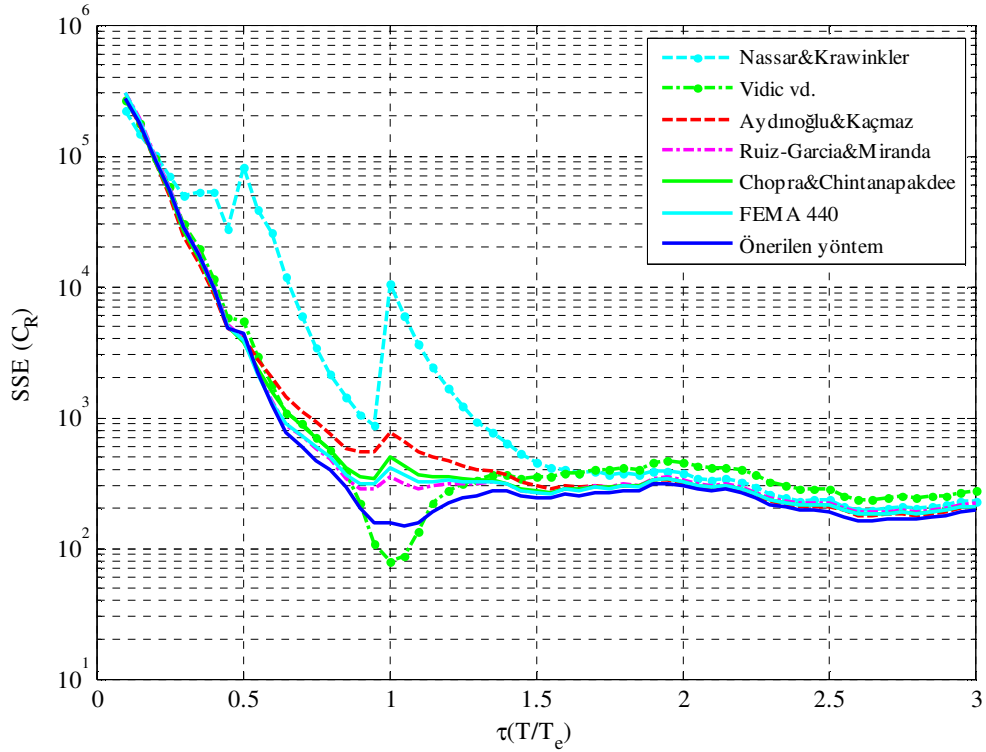
Yukarıda özetlenen farklı yaklaşımlar kullanılarak, Bölüm 1.3'te detayları verilen yer hareketleri altında, dayanımı ($R_y=1.5, 2, 3, 4, 5, 6$) ve doğal titreşim periyodu ($0.1s \leq T \leq 3.0s$) farklı birçok birçok BSD elastoplastik sistem için elastik olmayan yerdeğiştirme oranları hesaplanmıştır. Hesaplanan C_R oranlarının her bir T/T_e değerindeki ortalamaları Şekil 3.36'da, ağırlıklı ortalama hataları, toplam sapmaları ve hatalar için varyasyon katsayıları ise Şekil 3.37-3.42'de verilmiştir.



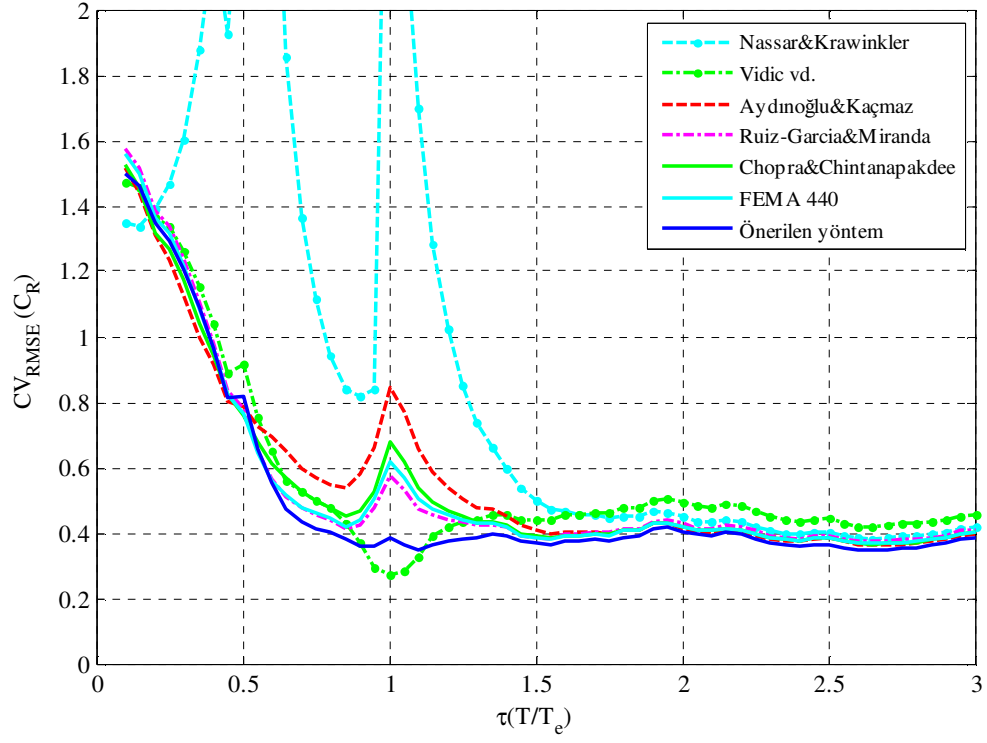
Şekil 3.36 Farklı yöntemler ile hesaplanan C_R oranlarının ortalamaları



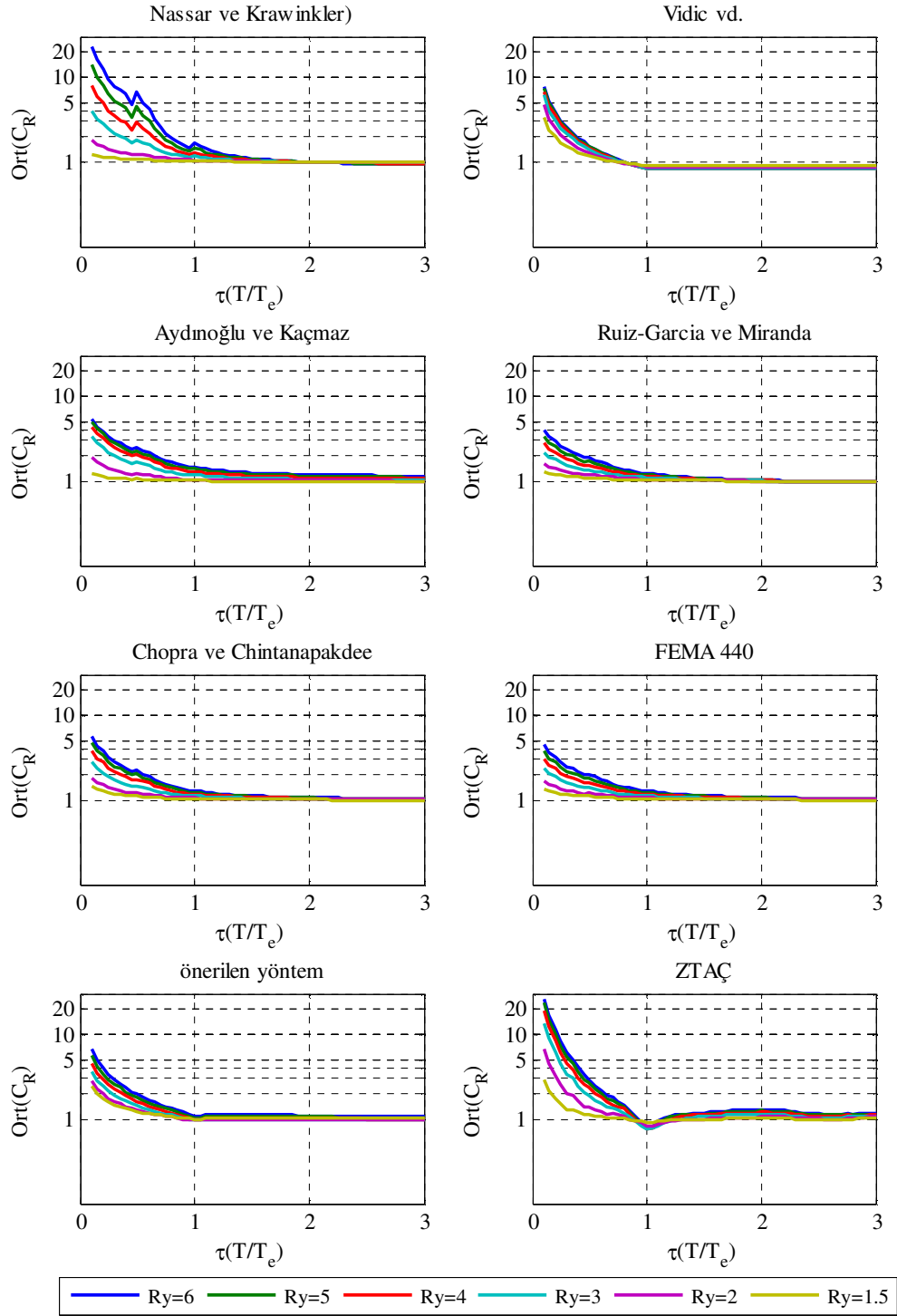
Şekil 3.37 Ağırlıklı ortalama hatalar



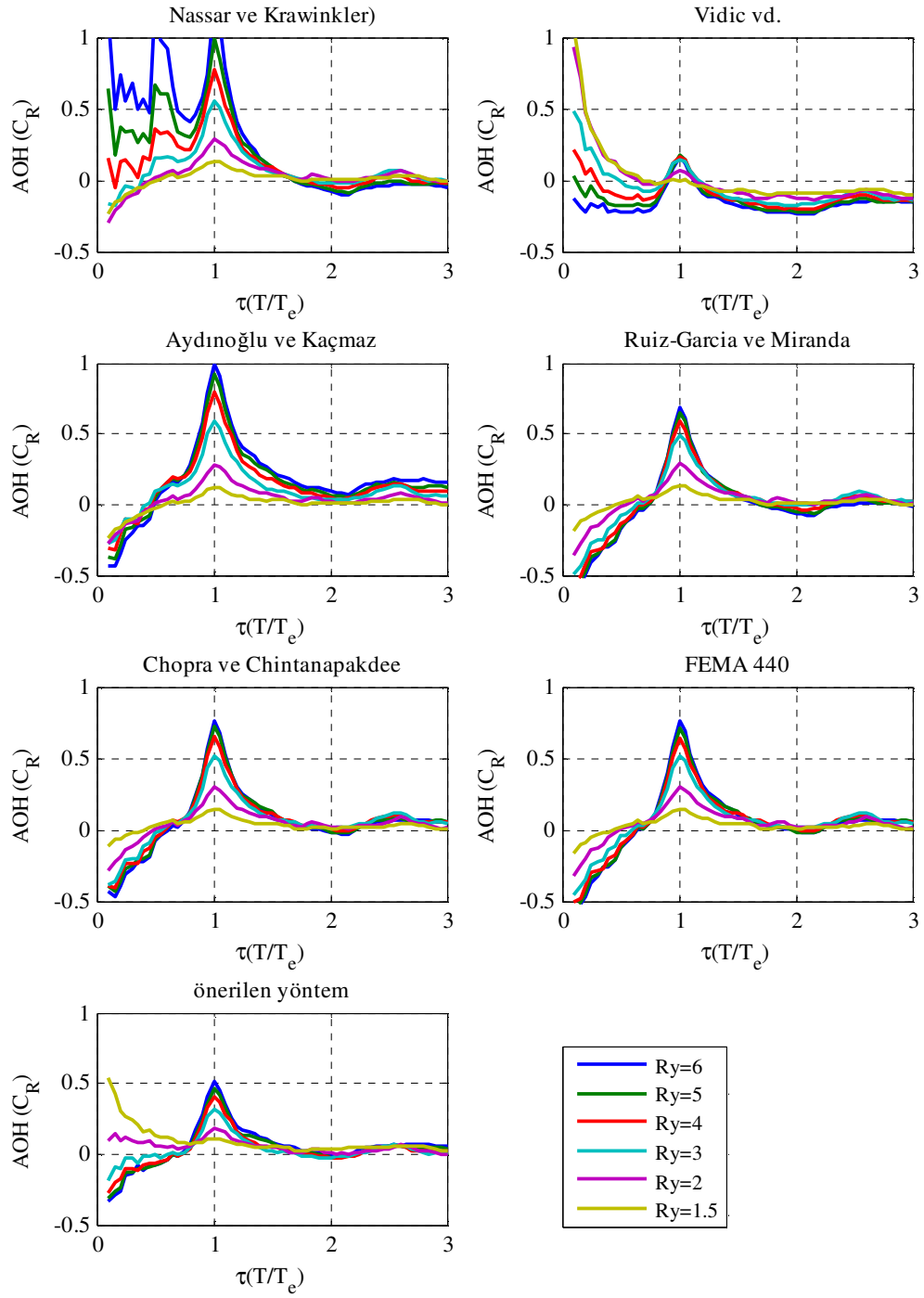
Şekil 3.38 Toplam sapmalar



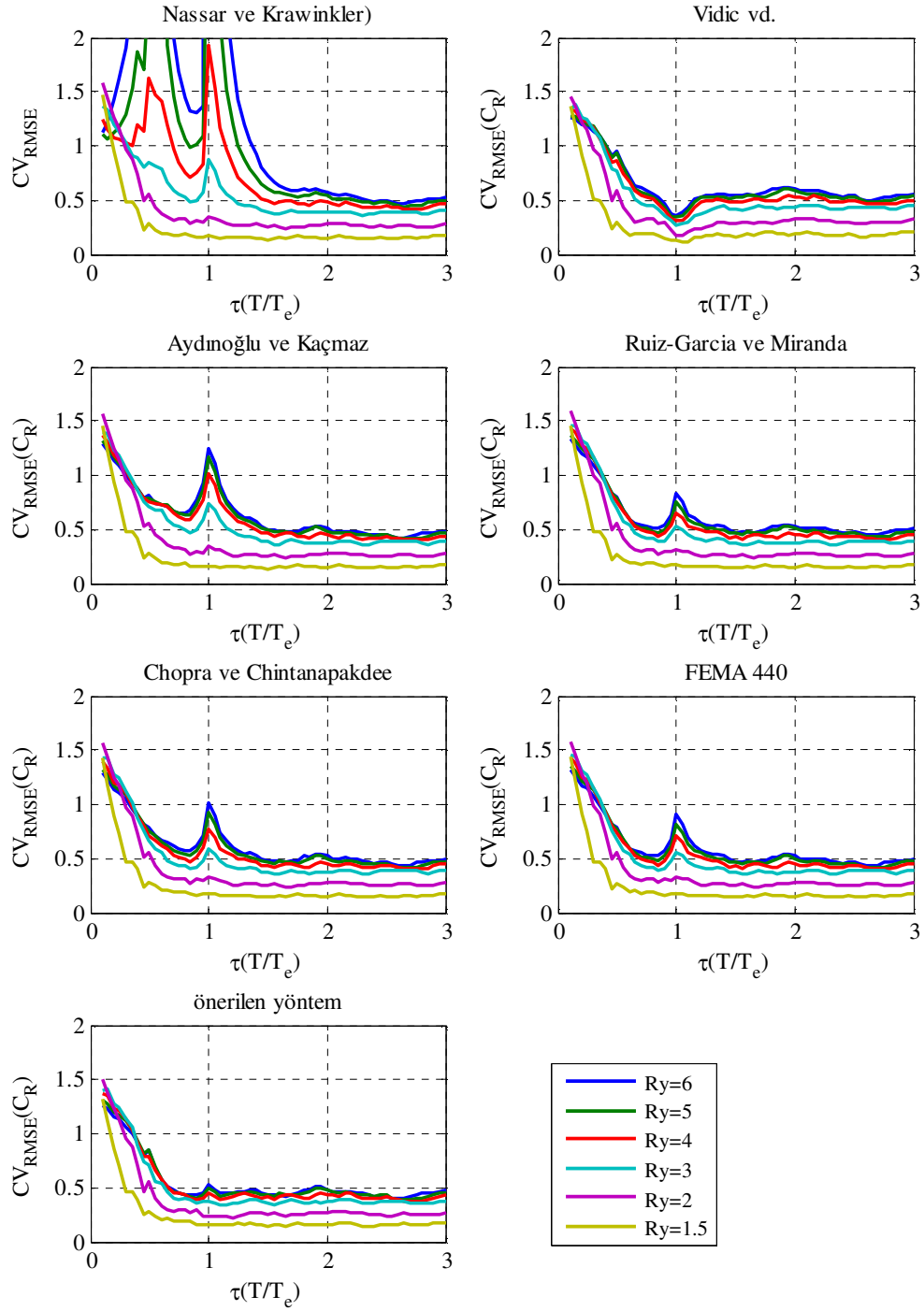
Şekil 3.39 Hataların varyasyon katsayıları



Şekil 3.40 Ortalamalar



Şekil 3.41 Ağırlıklı ortalama hatalar

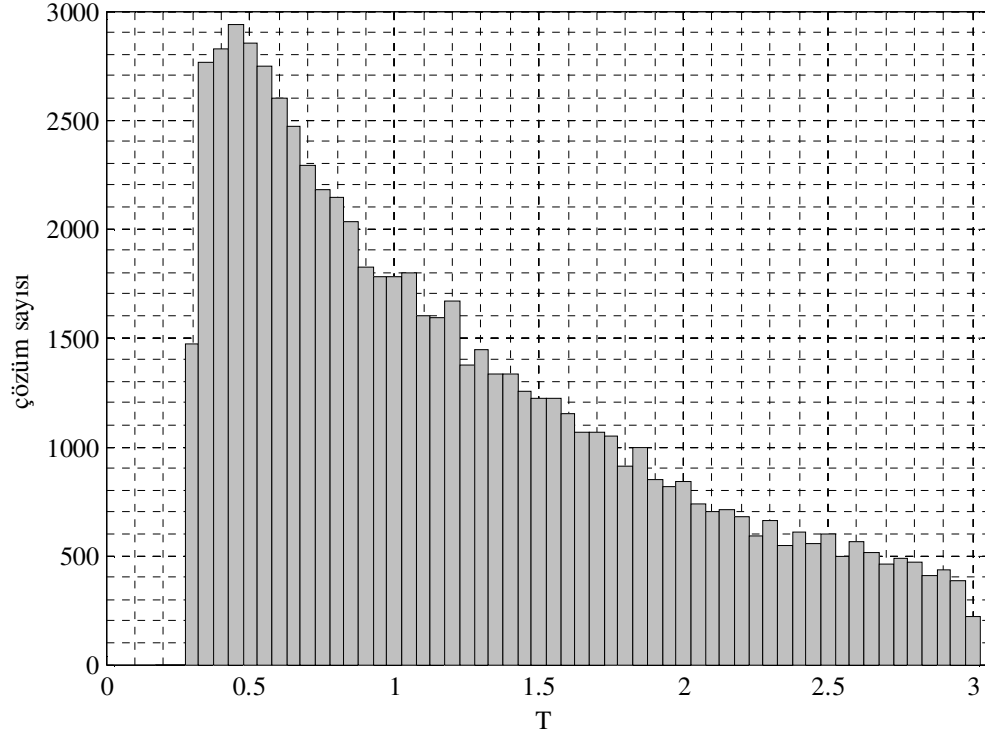


Şekil 3.42 Hataların varyasyon katsayıları

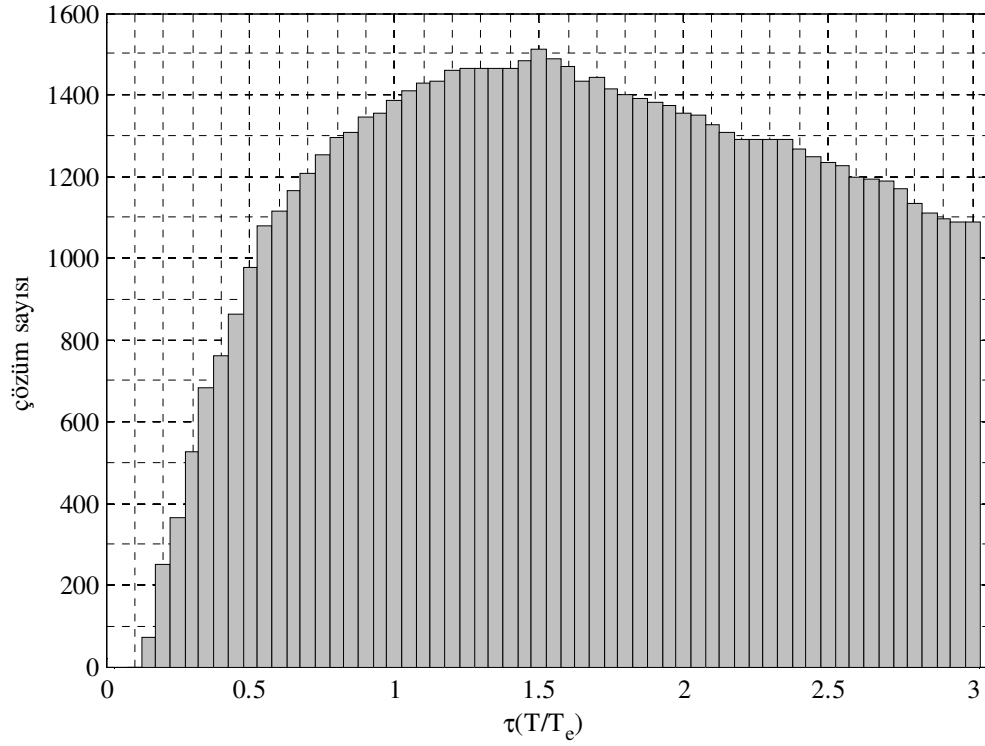
Kısa Periyotlu Sistemlerden ($T < 0.3s$) Arındırılmış Veritabanının İncelenmesi

Bu çalışmada yapılan tüm istatistiksel değerlendirmelerde, doğal titreşim periyotları 0.1s ile 3.0s arasında değişen BSD sistemler göz önüne alınmıştır. Bölüm 3.1’de; özellikle $T < 0.3s$ aralığındaki sistemlerde gözlenen yüksek süneklik istemlerinin (Şekil 3.1), büyük sapmalara yol açtığından bahsedilmişti (Şekil 3.6 ve 3.45). Doğal olarak; karşılaştırılan yöntemlerle süneklik isteminin tahmininde yapılan hatalarda da, söz konusu spektral bölgede nispeten büyük sapmalar gözlenmiştir (Şekil 3.39 ve 3.42).

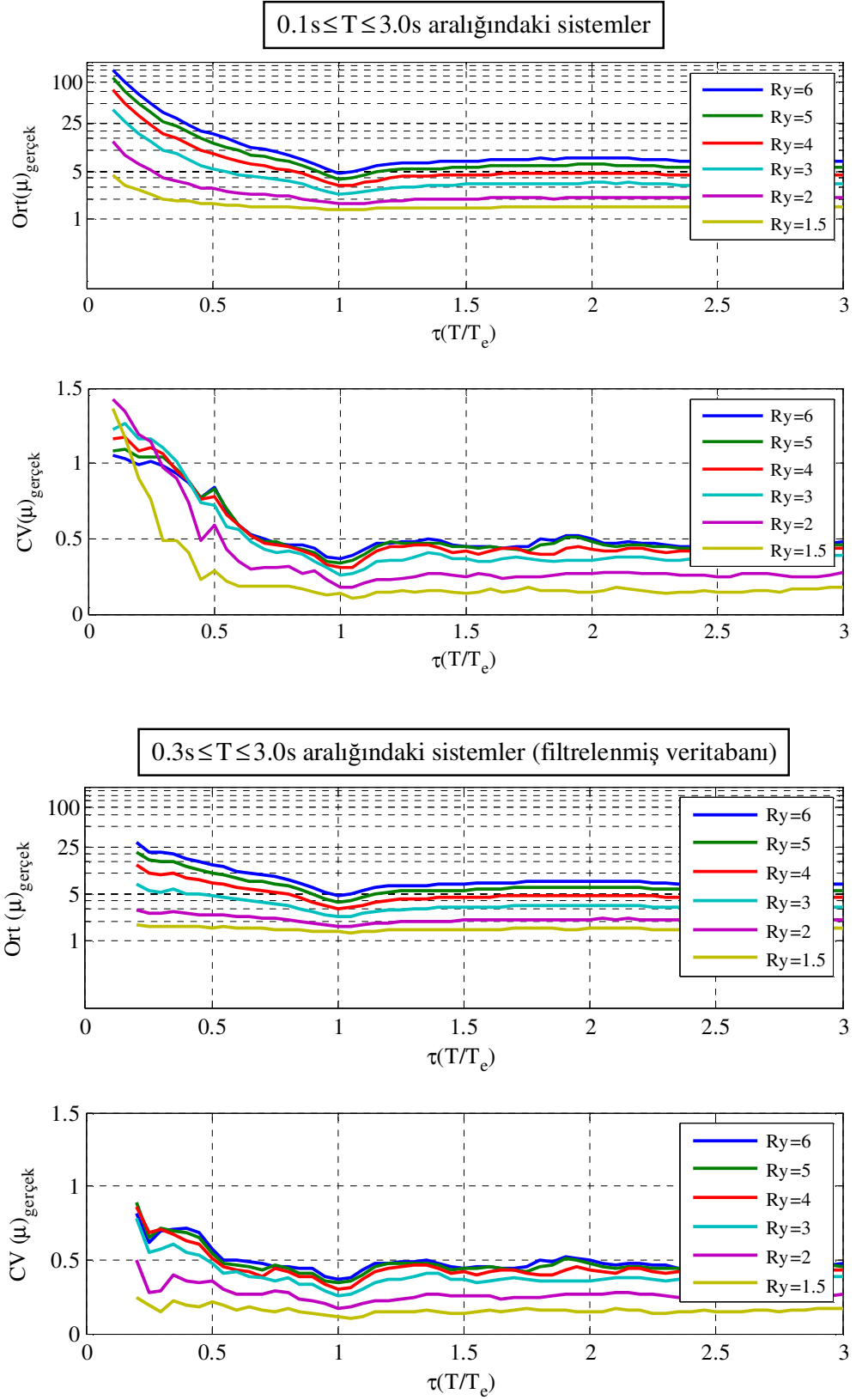
Çalışmanın bu kısmında; veritabanından doğal titreşim periyodu 0.3s’den kısa olan sistemler filtrelenerek, karşılaştırılan tüm yöntemler için tekrar bazı istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Filtrelenmiş veritabanındaki BSD sistemlerin, doğal titreşim periyodu ve normalleştirilmiş periyot histogramları Şekil 3.43-44’te verilmiştir. Şekil 3.44’ten de görülebileceği üzere, $T/T_e < 0.2$ için çözüm sayısı oldukça azaldığından, istatistiksel değerlendirmeler $0.2 \leq T/T_e \leq 3.0$ aralığında yapılmıştır. Karşılaştırılan yöntemlerle tahmin edilen elastik olmayan yerdeğiştirme oranları (C_R), ağırlıklı ortalama hatalar ve hatalar için varyasyon katsayıları sırasıyla Şekil 3.46, 3.47 ve 3.48’de verilmiştir. Şekil 3.46’dan da görülebileceği üzere; $T < T_e$ bölgesinde, zaman tanım alanında çözümlene ile hesap edilen C_R oranlarının ortalama değerleri makul seviyelere inmiştir. Bununla beraber; aynı spektral bölgede, karşılaştırılan yöntemlerle yapılan hataların saçılmalarında da önemli ölçüde azalma gözlenmiştir (Şekil 3.39 ve 3.48).



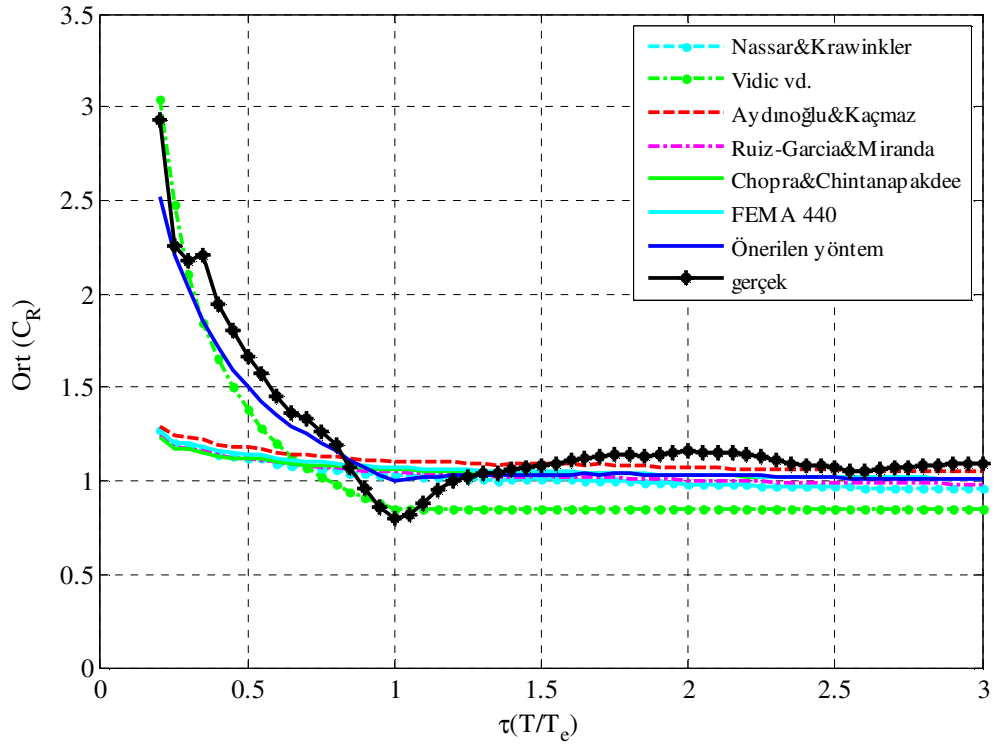
Şekil 3.43 Doğal titreşim periyotlarının histogramı (filtrelenmiş veritabanı)



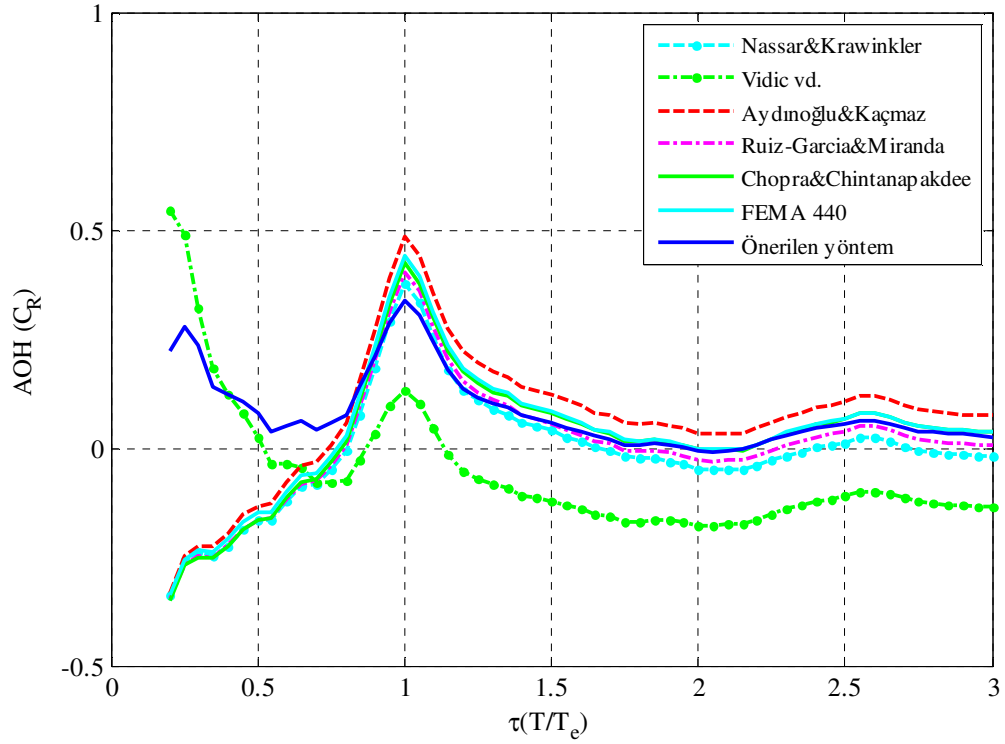
Şekil 3.44 Normalleştirilmiş periyotlarının histogramı (filtrelenmiş veritabanı)



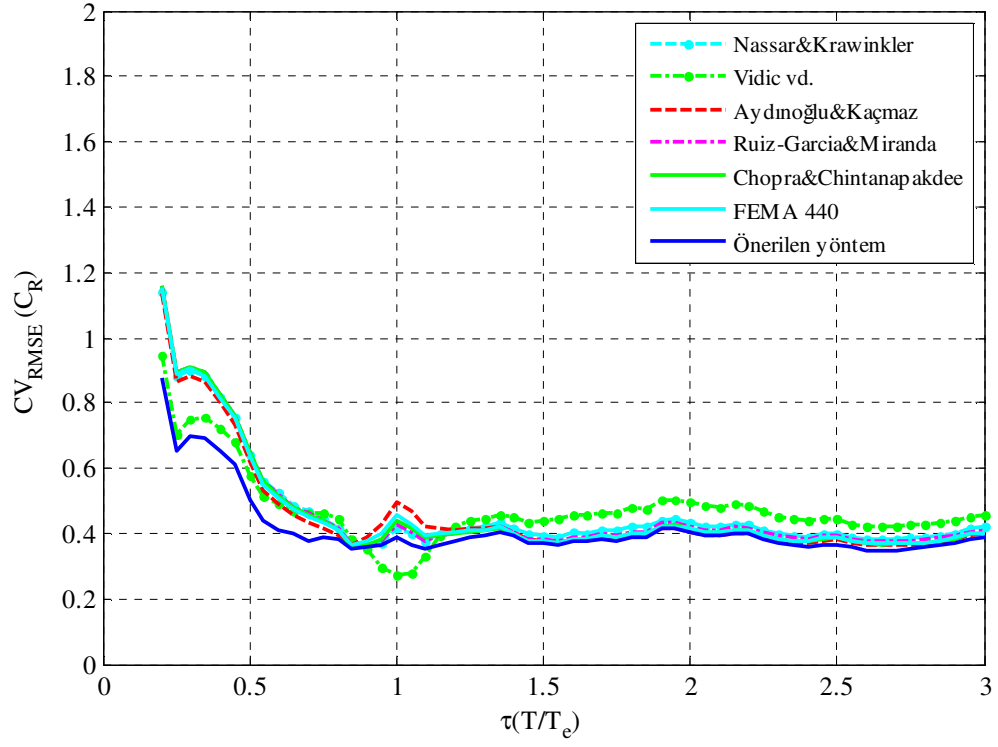
Şekil 3.45 Farklı dayanımlar için ortalamalar ve varyasyon katsayıları (ZTAÇ sonuçları)



Şekil 3.46 Farklı yöntemler ile hesaplanan C_R oranlarının ortalamaları (filtrelenmiş veritabanı)



Şekil 3.47 Ağırlıklı ortalama hatalar (filtrelenmiş veritabanı)



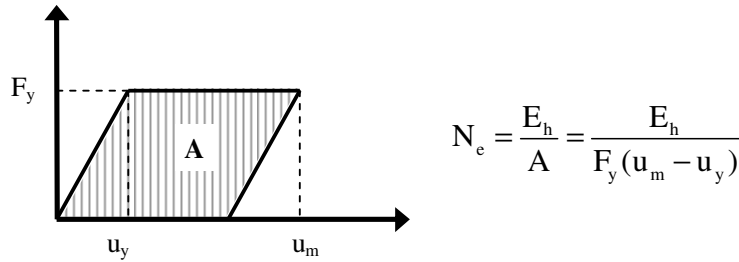
Şekil 3.48 Hataların varyasyon katsayıları (filtrelenmiş veritabanı)

4. DEĞERLENDİRME

4.1 Çevrimsel İstem

Yer hareketi altında yapısal bir sistem tarafından dağıtılan çevrimsel enerji ve süneklik istemi biliniyorsa, çevrimsel istem (cyclic demand) ile çevrimsel enerji arasında bir ilişki kurmak da mümkündür.

Çevrimsel istemin bir göstergesi olarak kabul edilebilecek eşdeğer çevrim sayısı, N_e ; sayısal olarak, yer hareketi altında dağıtılan toplam çevrimsel enerjinin, aynı yerdeğiştirme istemine kadar monotonik yükleme altında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alana oranı olarak tanımlanabilir (Zahrah ve Hall, 1984).



Şekil 4.1 Eşdeğer çevrim sayısının tanımı

$$N_e = \frac{E_h}{F_y (u_m - u_y)} = \frac{E_h}{F_y \cdot u_y (\mu - 1)} \quad (4.1)$$

Eşdeğer çevrim sayısı N_e (3.3) denklemiyle tanımlanan normalleştirilmiş çevrimsel enerjiye bağlı olarak da yazılabilir:

$$N_e = \frac{E_h}{F_y \cdot u_y (\mu - 1)} = \frac{N_h}{2 \cdot (\mu - 1)} \quad (4.2)$$

Eşdeğer çevrim sayısı yer hareketinin hasar potansiyelini değerlendirmede bir gösterge olarak kullanılabilir. Çevrimsel yüklemde tersinmelerin (reversal) sayısında ciddi bir artış olması durumunda; elemanların, monotonik yükleme altında beklenen şekil değiştirme kapasitesinden çok daha düşük seviyelerde göçtüğü deneylerle gösterilmiştir (Park ve Ang, 1985). Literatürde düşük-çevrimli yorulma (low-cycle fatigue) teorisi olarak da tanımlanabilen bu durum; hasar tahminlerinde çevrimlerin nitelik ve niceliklerinin önemini ortaya koymaktadır.

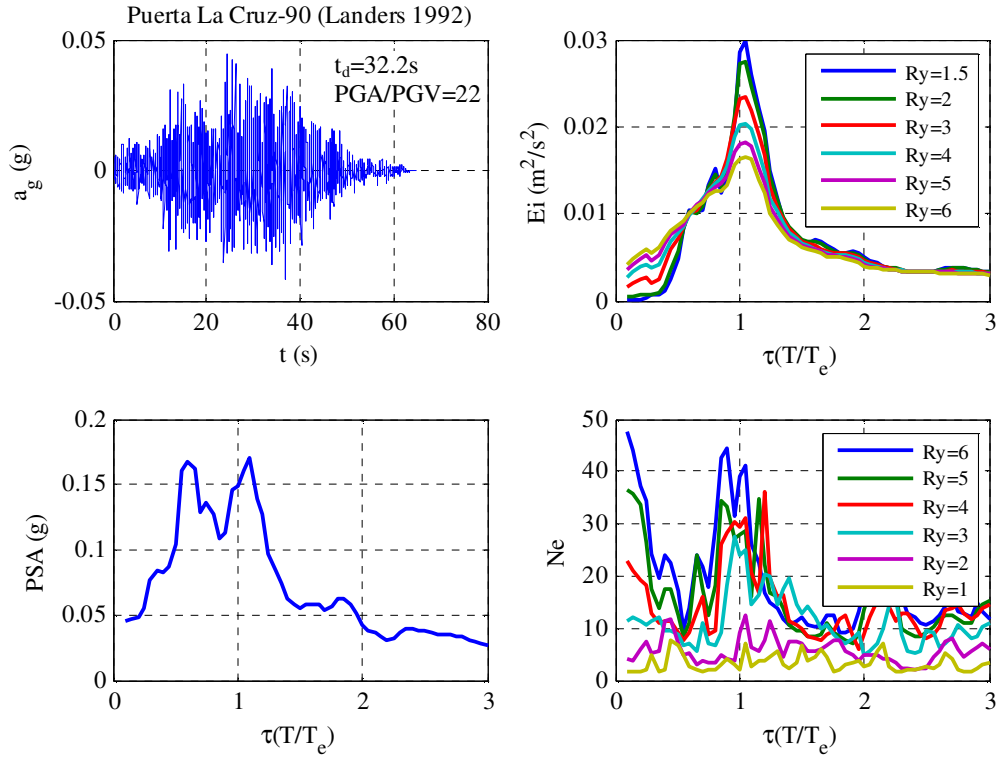
Eşdeğer çevrim sayısı N_e 'nin 1'e yakın düşük değerler alması, doğrusal olmayan davranışta büyük bir plastik çevrimin varlığını; N_e 'nin yüksek değerleri ise çok sayıda plastik çevrimin varlığının göstergesidir. Eşdeğer çevrim sayısı yer hareketinin karakteristik özelliklerinden oldukça etkilenmektedir; impulsif özelliklere sahip, özellikle yakın-fay kayıtlarda düşük çevrim sayılarının, uzun süreli kayıtlarda da genellikle yüksek çevrim sayılarının oluşması beklenebilir (Manfredi, 2001). Yine de; Şekil 4.2-4.5'ten de görülebileceği üzere, bazı benzer özelliklere sahip (yer hareketi süresi, PGA/PGV oranı) uzun süreli uzak-fay yer kayıtları altında da farklı çevrim sayıları gözlenebilmektedir. Frekans içeriklerinin farklılıklarından kaynaklanan bu sapmalar, eşdeğer çevrim sayısının tahmininin güvenilirliğini de azaltmaktadır.

Şekil 4.6-4.8'de farklı dayanım azaltma katsayıları ve zemin sınıfı grupları için eşdeğer çevrim sayısı ortalamalarının değişimi gösterilmiştir. Bu şekillerden de görülebileceği üzere; farklı zemin grupları için birbirine yakın ortalama değerler gözlenmiştir. BSD sistemlerin dayanımlarındaki farklılık ise ortalama çevrim sayısını etkilemekte; dayanım düştükçe eşdeğer çevrim sayısında artış gözlenmektedir.

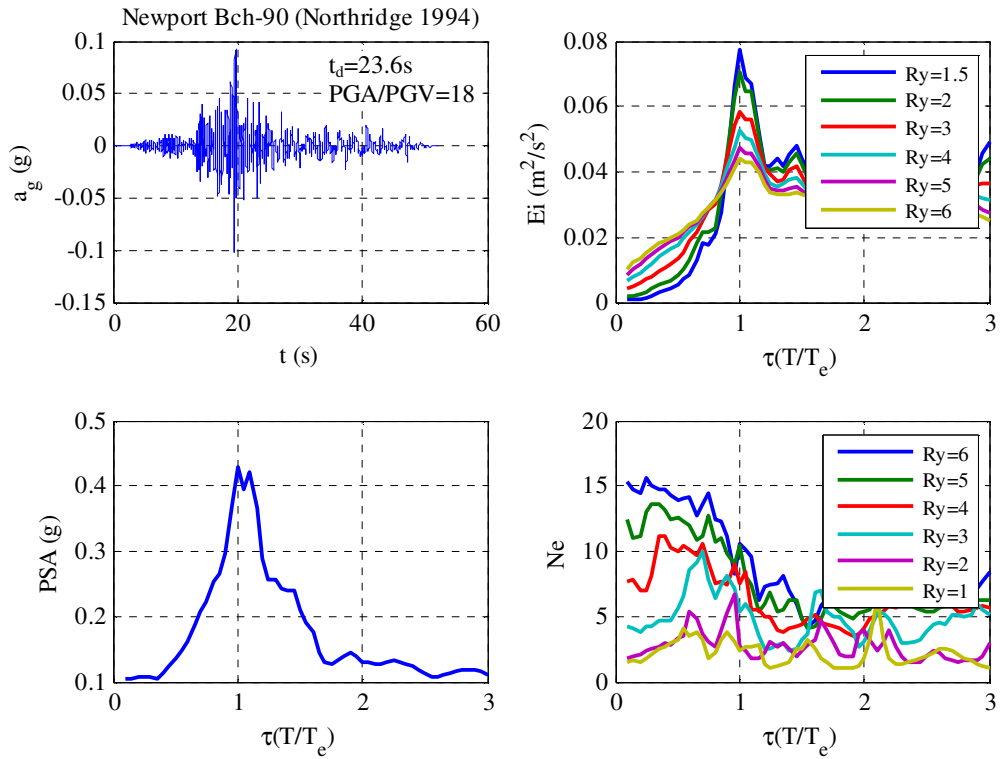
Şekil 4.10 ve 4.11'de sırasıyla, çevrimsel enerji-süneklik istemi-eşdeğer çevrim sayısı ve normalleştirilmiş çevrimsel enerji-süneklik istemi-eşdeğer çevrim sayısı spektrumları verilmiştir. Karakteristik iki spektral bölgede (T_e 'den önce ve sonra) normalleştirilmiş periyoda göre farklı eğilimler gösteren çevrimsel enerji ve süneklik isteminin aksine, eşdeğer çevrim sayısı sabit bir eğilim göstermekte ve normalleştirilmiş periyodun değişiminden pek etkilenmemektedir.

Şekil 4.12 ve 4.13'te ise önerilen yöntem ile tahmin edilen eşdeğer çevrim sayıları için ağırlıklı ortalama hatalar, standart hatalar ve varyasyon katsayıları her bir T/T_e değeri için verilmiştir. Süneklik isteminin tahmininde, özellikle küçük periyot değerlerinde gözlenen nispeten büyük sapmalar, eşdeğer çevrim sayısında gözlenmemiştir.

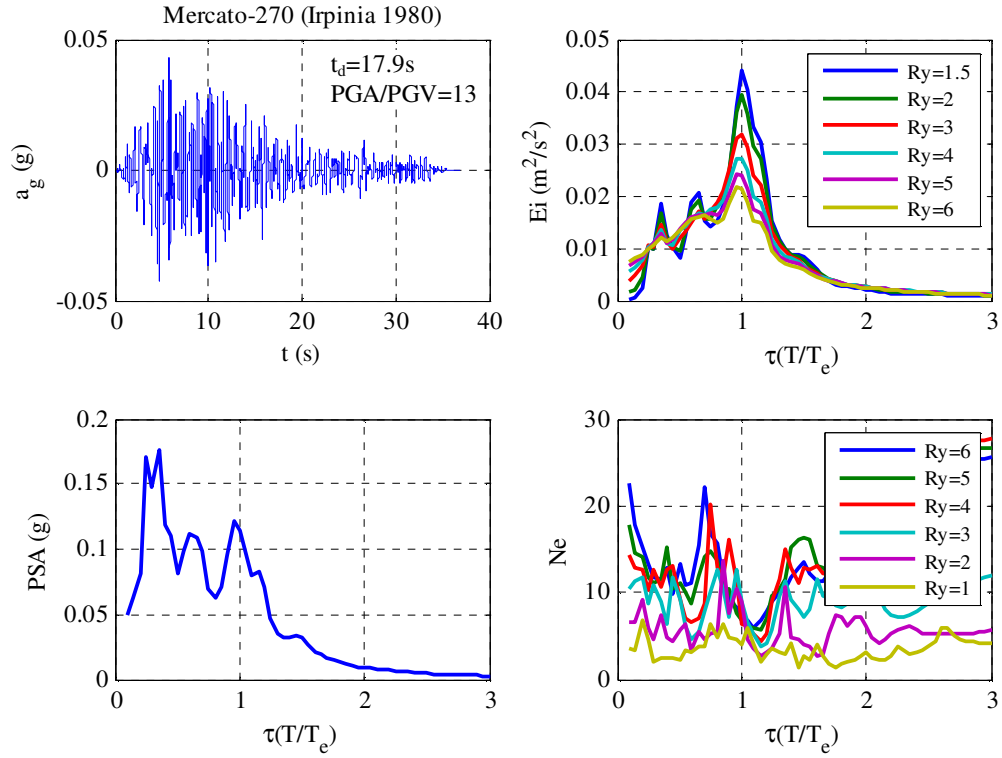
Önerilen yöntem ile eşdeğer çevrim sayısının tahmininde yapılan hataların histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri Ek 4'te; güven aralıkları ise Şekil 4.14-17'de verilmiştir. Hataların, her bir dayanım azaltma katsayısı ve normalleştirilmiş periyot değeri için normal dağılıma uyduğu gözlenmiştir.



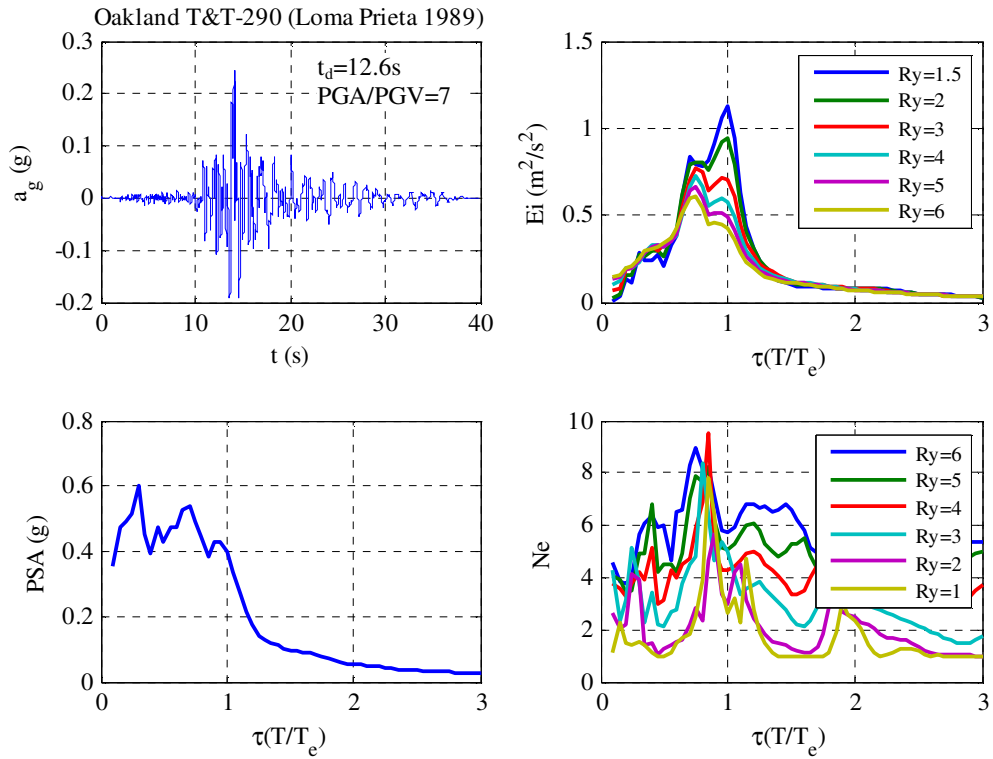
Şekil 4.2 Puerta La Cruz yer hareketi kaydı yatay bileşeni, Landers Depremi 1992



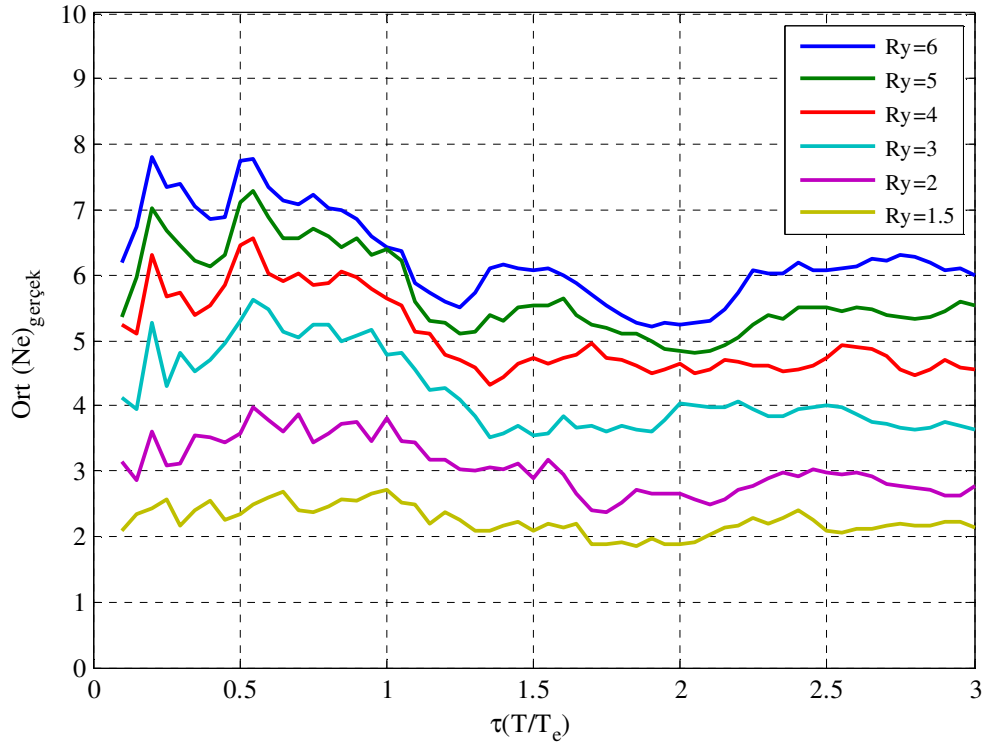
Şekil 4.3 Newport Bch yer hareketi kaydı yatay bileşeni, Northridge Depremi 1994



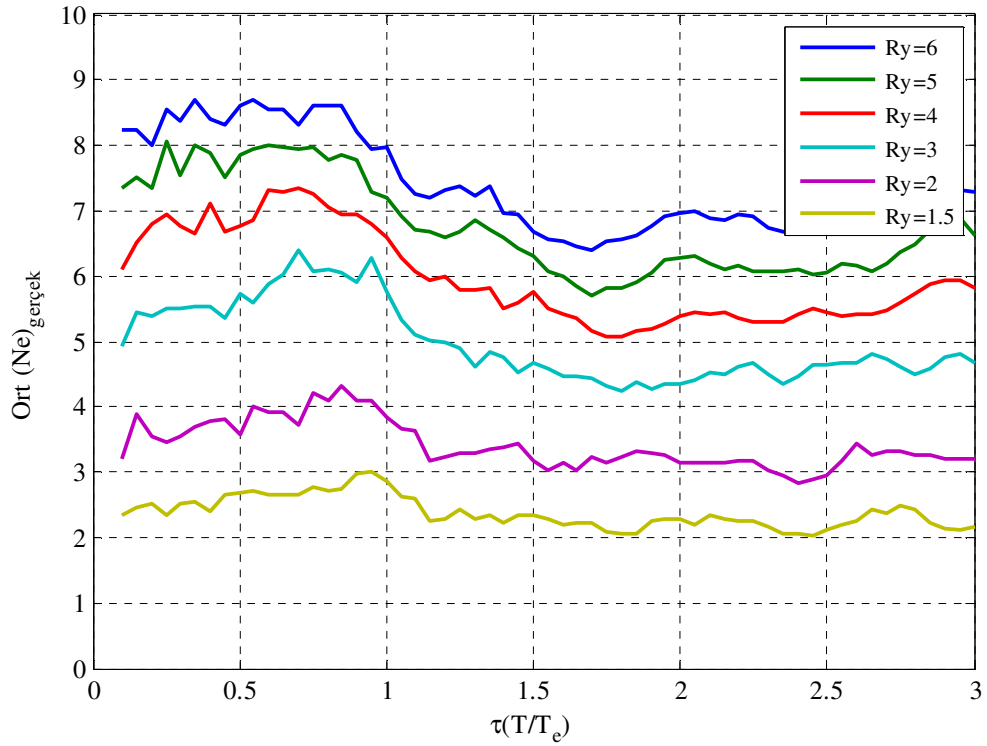
Şekil 4.4 Mercato San Severino yer hareketi kaydı yatay bileşeni, Irpinia Depremi 1980



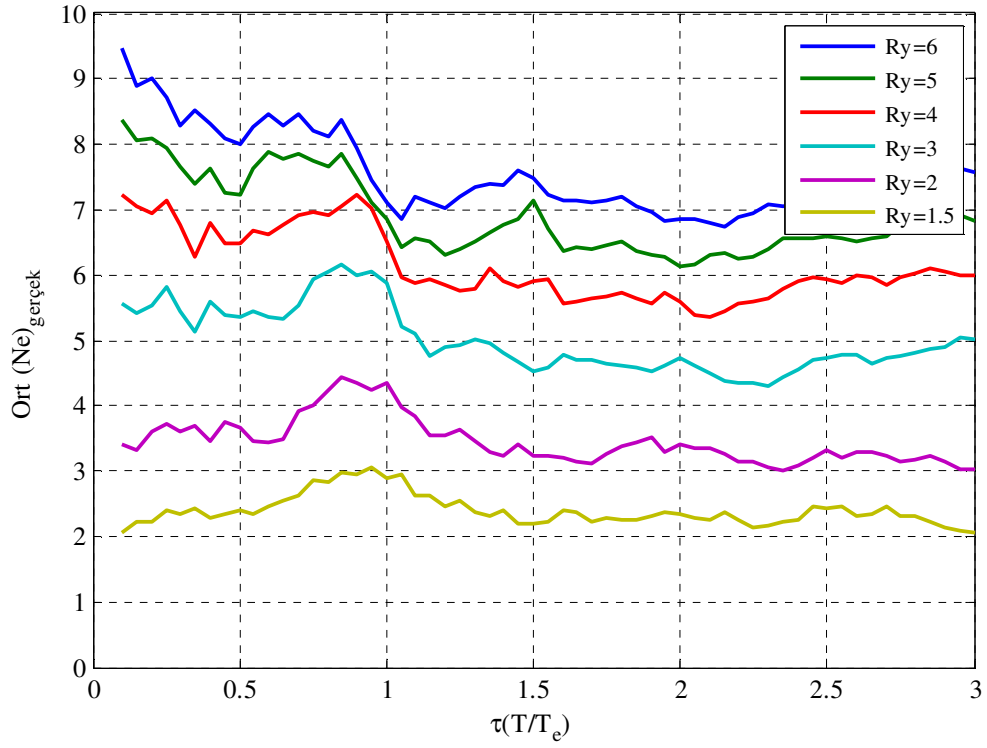
Şekil 4.5 Oakland Title&Trust yer hareketi kaydı yatay bileşeni, Loma Prieta Depremi 1989



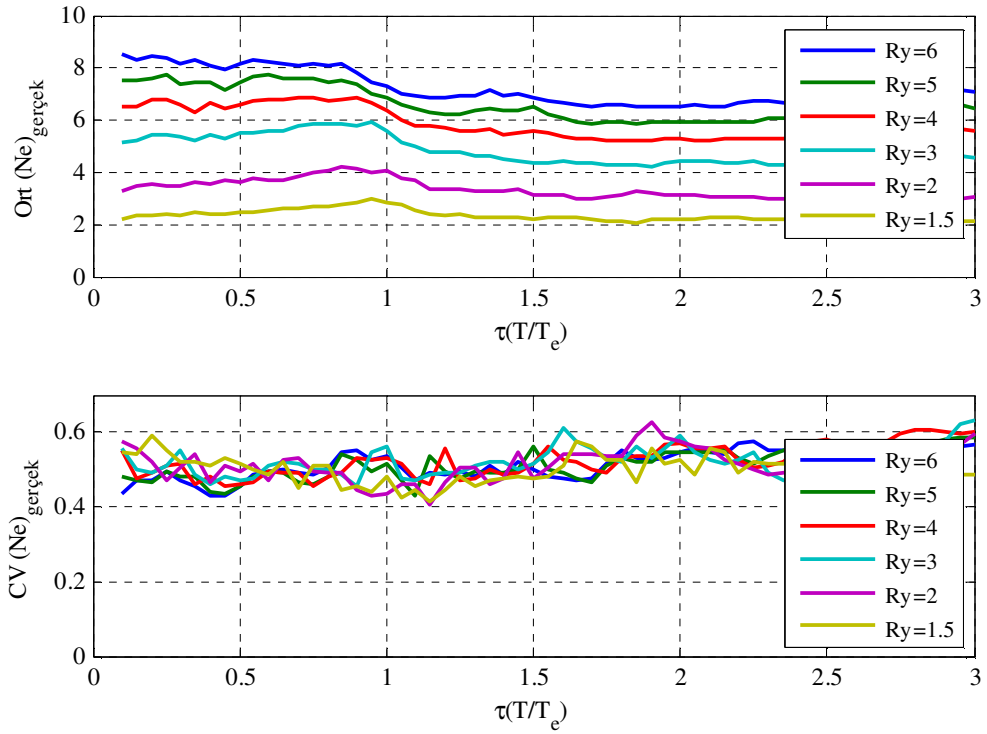
Şekil 4.6 B sınıfı zemin grubu için ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri (ZTAÇ sonuçları)



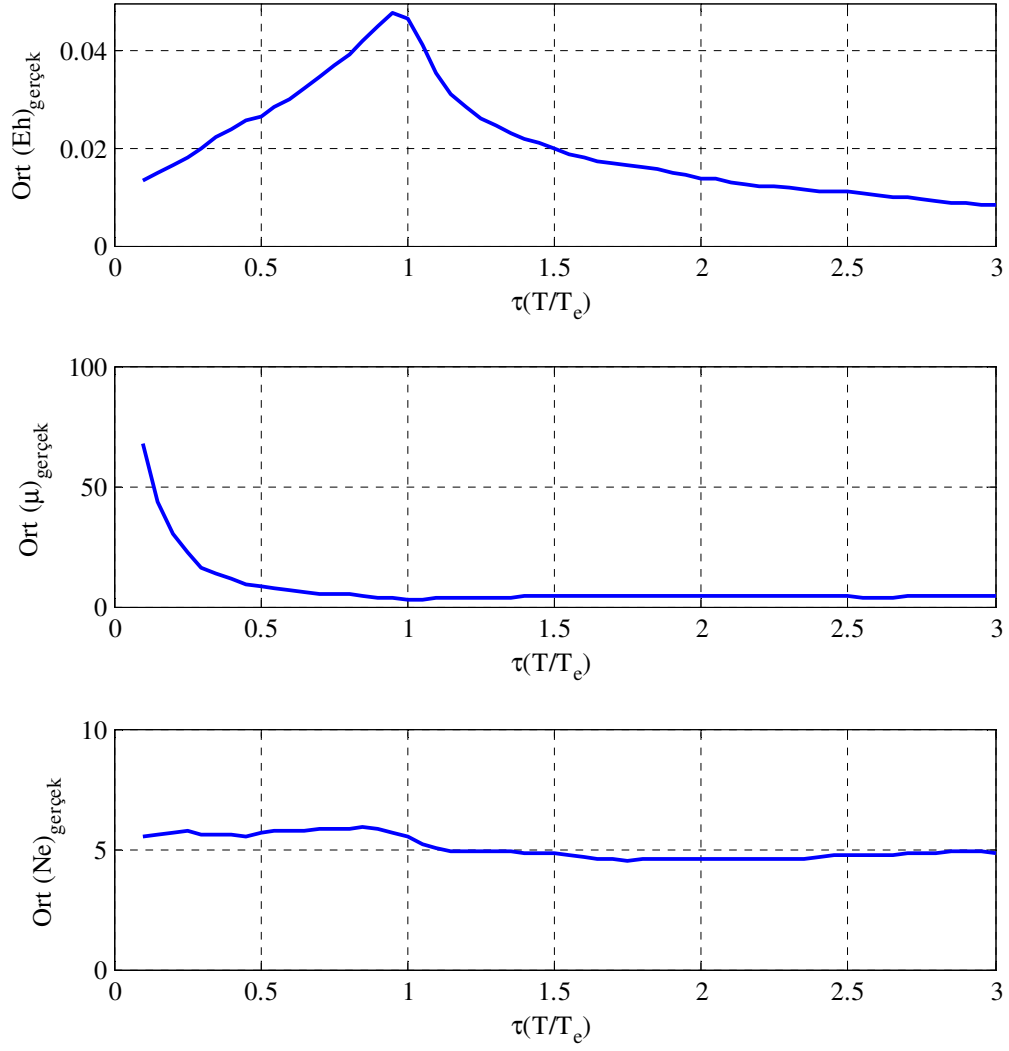
Şekil 4.7 C sınıfı zemin grubu için ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri (ZTAÇ sonuçları)



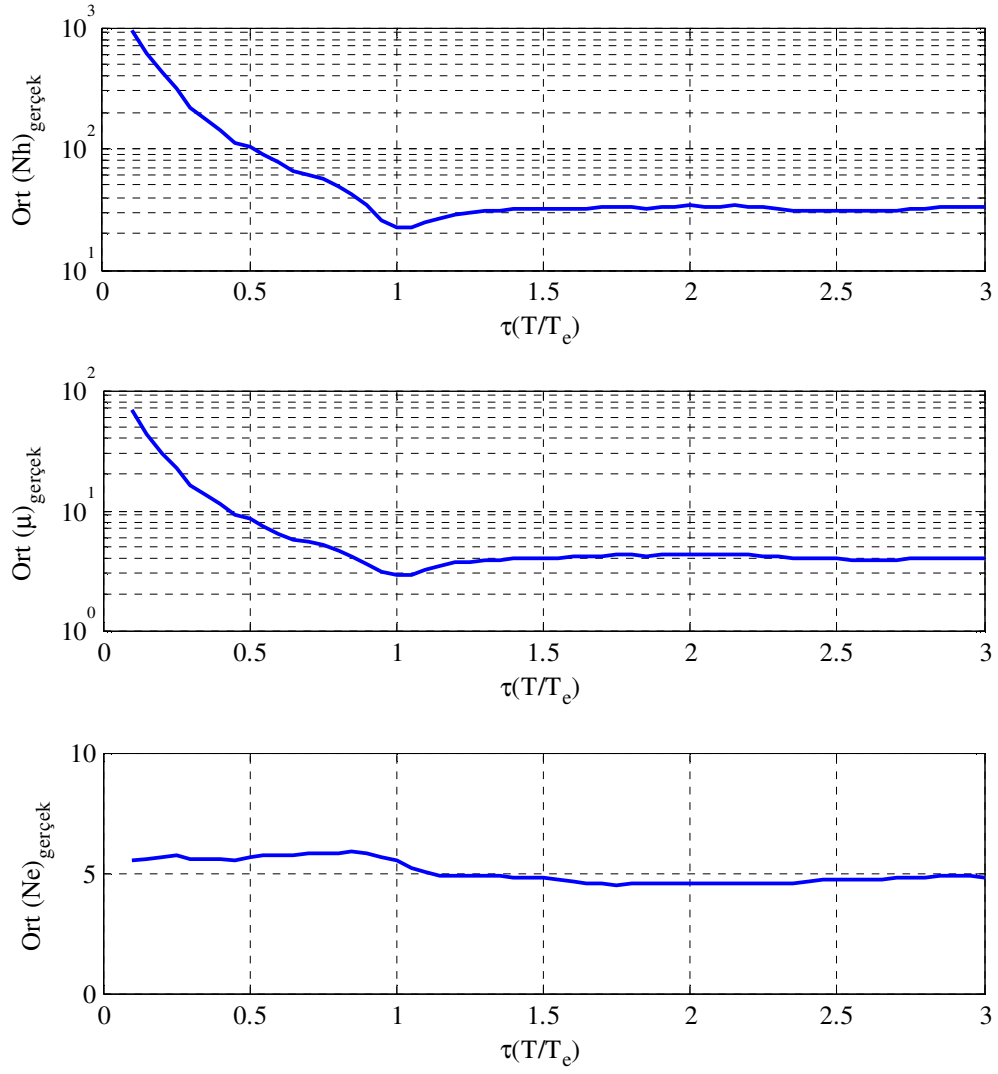
Şekil 4.8 D sınıfı zemin grubu için ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri (ZTAÇ sonuçları)



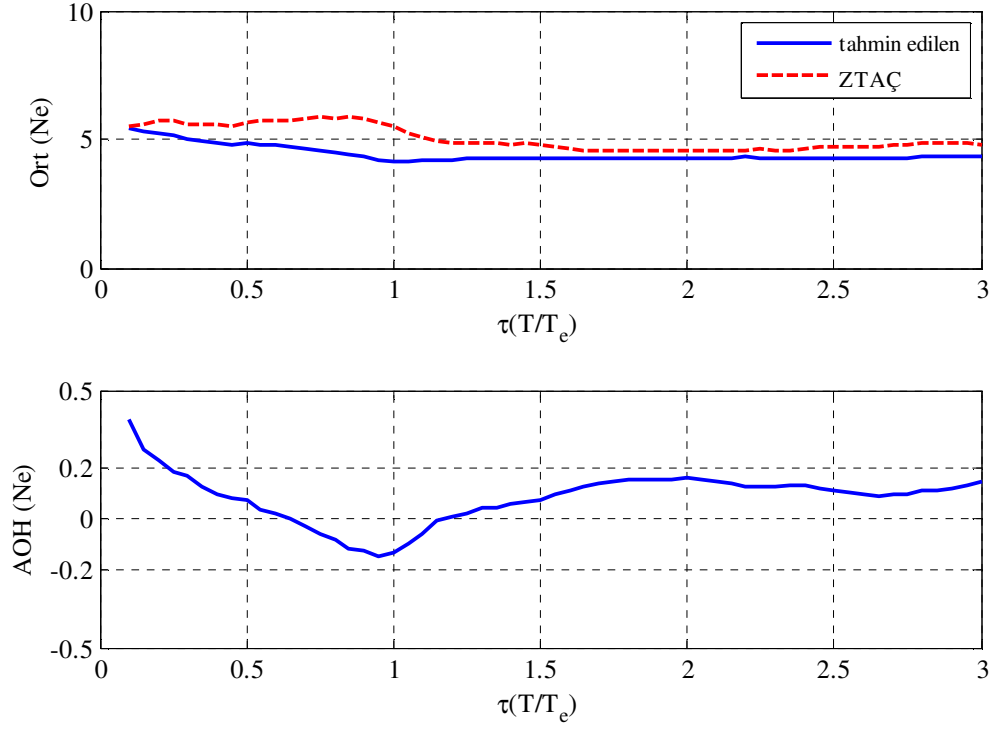
Şekil 4.9 Ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri ve varyasyon katsayıları (Tüm zemin grupları için ZTAÇ sonuçları)



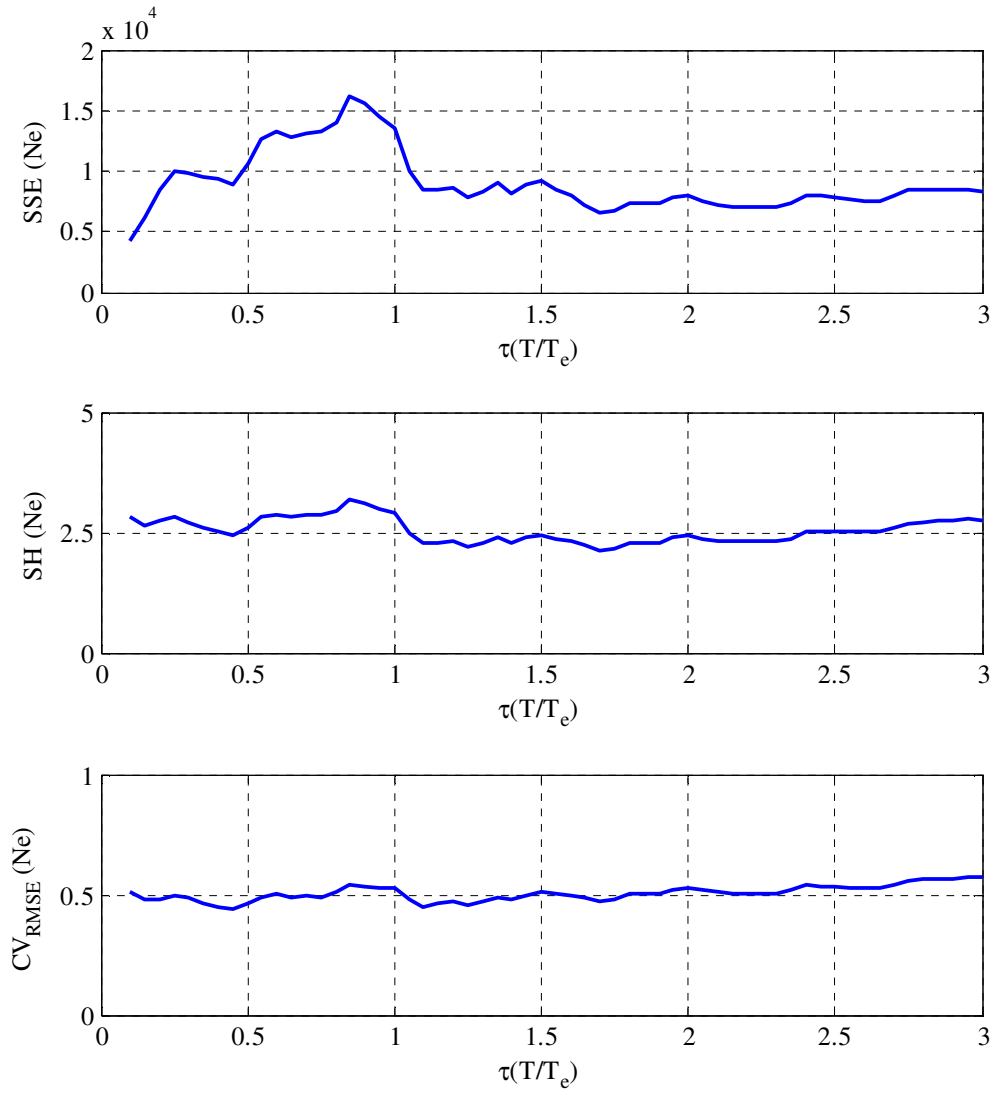
Şekil 4.10 Çevrimsel enerji, yerdeğiştirme sünekliği ve eşdeğer çevrim sayısı istemleri (ZTAÇ sonuçları)



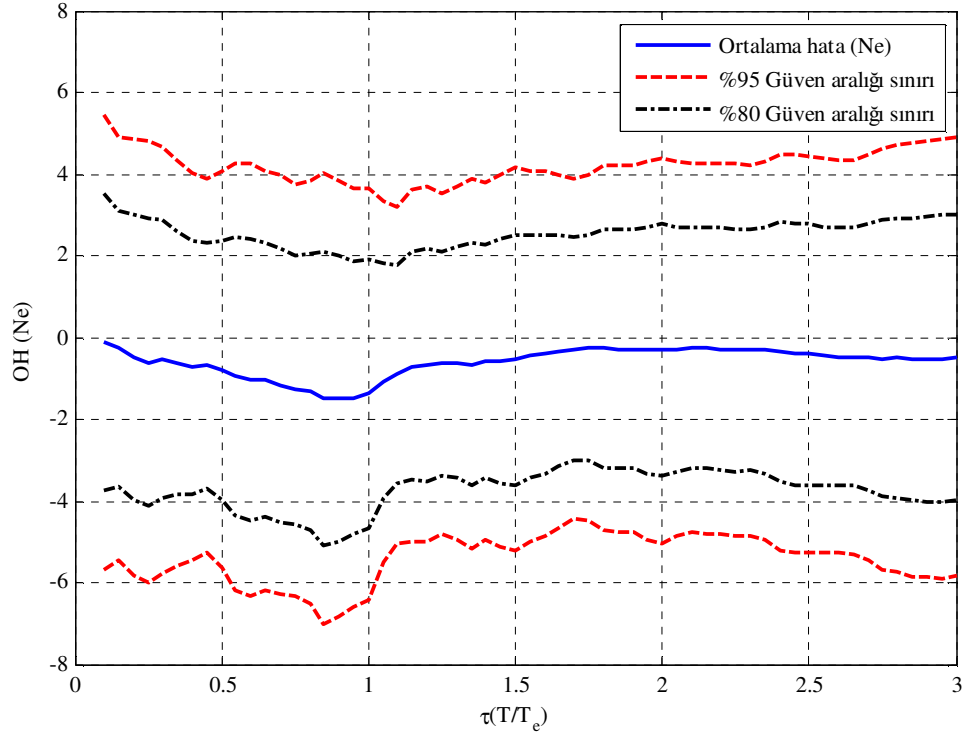
Şekil 4.11 Normalleştirilmiş çevrimsel enerji, yerdeğiştirme sünegliği ve eşdeğer çevrim sayısı istemleri (ZTAÇ sonuçları)



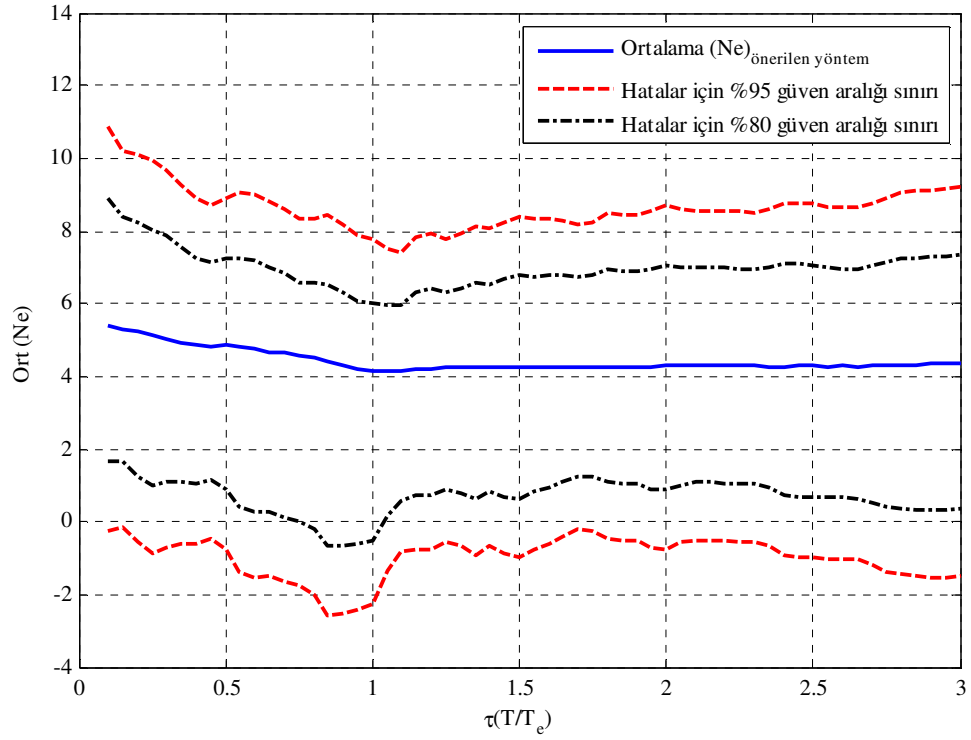
Şekil 4.12 Ortalama eşdeğer çevrim sayısı istemleri ve ağırlıklı ortalama hatalar



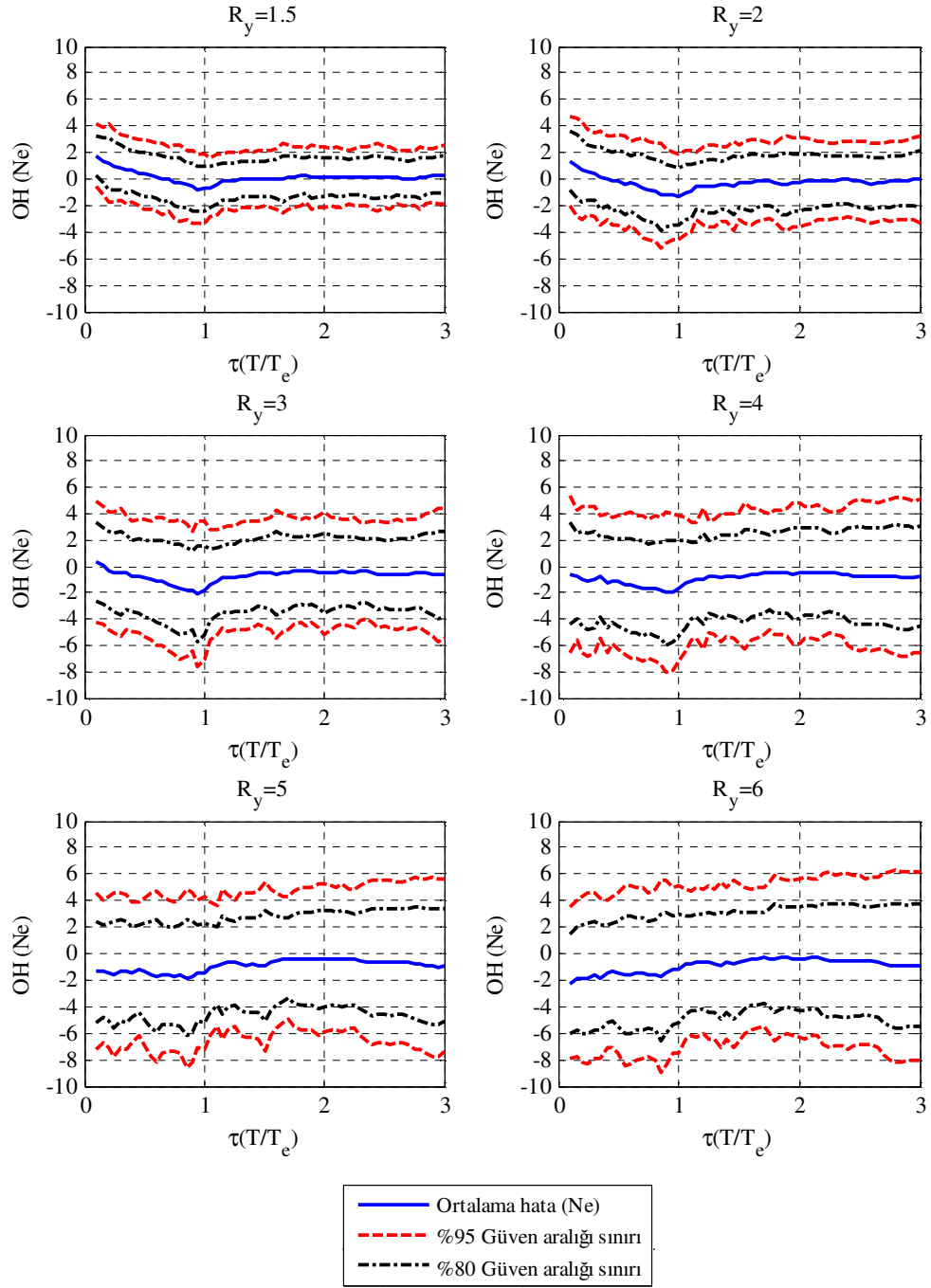
Şekil 4.13 Toplam sapmalar, standart hatalar ve hataların varyasyon katsayıları (önerilen yöntem)



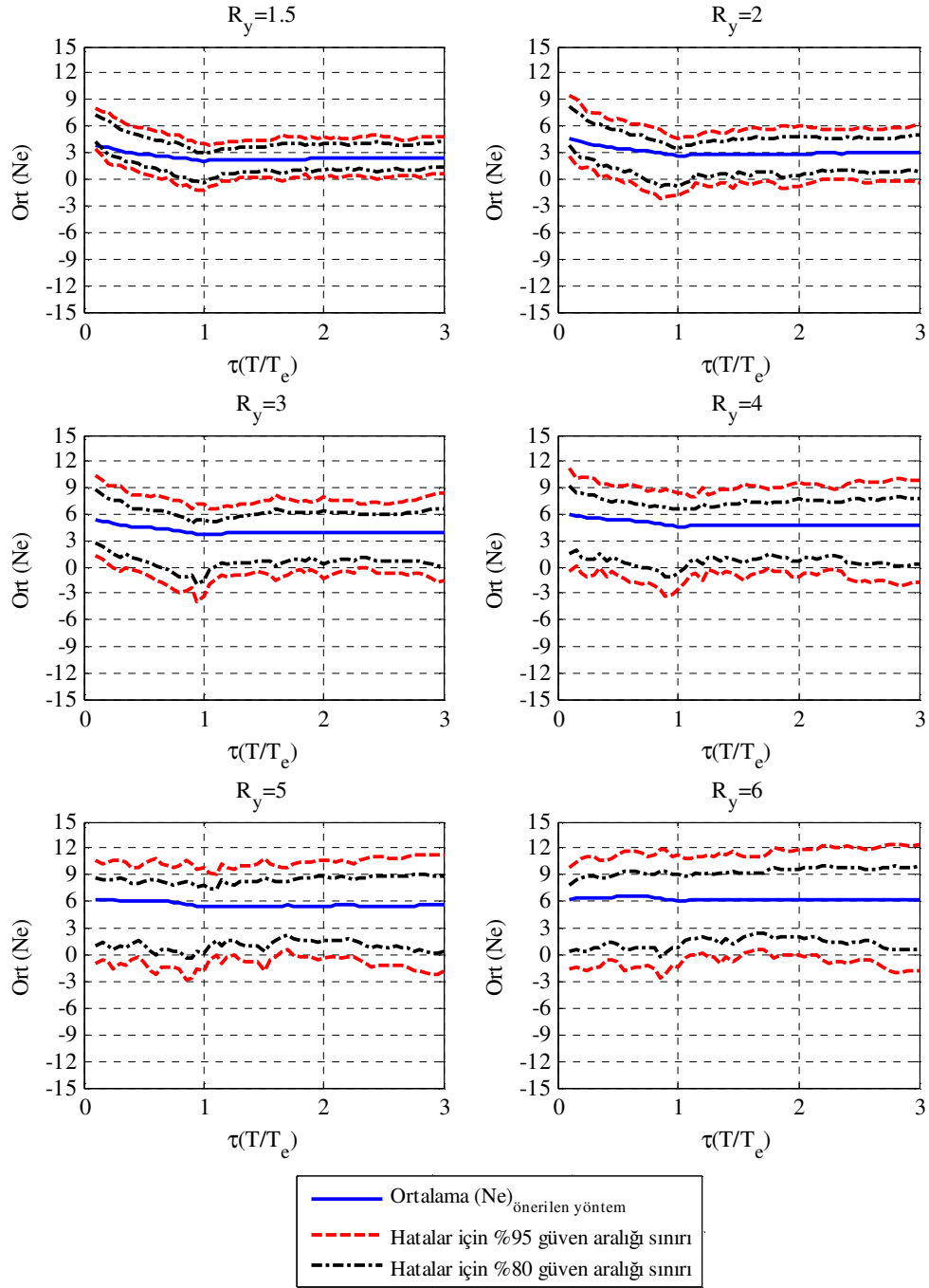
Şekil 4.14 Ortalama hata (Ne) ve güven aralıkları



Şekil 4.15 Ortalama (Ne) ve hatalar için güven aralıkları



Şekil 4.16 Farklı R_y 'ler için ortalama hata (Ne) ve güven aralıkları



Şekil 4.17 Farklı R_y 'ler için ortalama (Ne) ve hatalar için güven aralıkları

4.2 Park-Ang Hasar İndeksi

Yer hareketi altında yapısal sistemin davranışıyla, olası hasar arasında gerçekçi bir ilişki kurmak; performansa dayalı tasarım veya mevcut bir yapının değerlendirilmesinde önemli bir gereksinimdir. Bu nedenle, çevrimsel yük etkisinde elemanda veya sistemde oluşabilecek hasarın bir göstergesi olarak hasar indeksi belirlemek, geçmişte birçok araştırmanın konusu olmuştur. Süneklik istemine veya rijitliğe bağlı birikimsiz etkileri göz önüne alan yaklaşımların yanı sıra; enerji esaslı veya düşük-çevrimli yorulma (low-cycle fatigue) teorisine göre birikimli çevrimsel etkileri göz önüne alan yaklaşımlar da önerilmiştir.

Yer hareketi altında dağıtılan enerjinin, monotonik yükleme altında dağıtılan enerjiye eşit olduğunda yapının göçtüğü varsayımına dayanarak, hasarı fonksiyonel olarak tanımlamak mümkündür. Böylelikle enerji esaslı hasar indeksi, genel olarak, toplam çevrimsel enerji isteminin monotonik yükleme altındaki enerji kapasitesine oranı olarak tanımlanabilir (3.10 denklemi – Lehman ve Moehle, 2000).

$$DI = \frac{E_h}{F_y u_u} \quad (4.3)$$

Genliklerinden bağımsız olarak tüm plastik çevrimler tarafından dağıtılan enerjinin göz önüne alınması, kavramsal olarak gayet açık olmasına rağmen, enerji kriterine kısıtlama getirmektedir. Düşük genlikli plastik çevrimlerin çoğu zaman hasara bir etkisinin olmadığı deneylerle kanıtlandığından, çevrimsel enerjinin sadece hasara sebep olan kısmı göz önüne alınmalıdır. Bu amaçla geliştirilen göçme kriterlerinden biri de Park-Ang (Park ve Ang, 1985) hasar indeksidir (Manfredi, 2000).

Hem bu çalışmada önerilen yöntemin çıktıları ile kolayca hesaplanabilmesi; hem de enerji esaslı hasar indekslerinden en yaygın kullanılanı olması bakımından Park-Ang hasar indeksi bu bölümde özetlenmiştir.

Park ve Ang (1985) tarafından önerilen hasar indeksi; hem çevrimsel enerjiye hem de en büyük yerdeğiştirme istemine bağlı, birleşik bir indekstir (4.4 denklemi). Enerji, birikimli çevrimsel etkileri temsil etmesi için; yerdeğiştirme ise birikimsiz (non-cumulative) etkileri temsil etmesi için kullanılmıştır. Enerji esaslı olan birikimli kısmın hasara olan katkısı, yapısal özelliklere bağlı bir β katsayısıyla (4.3) denkleminin ölçeklendirilmesiyle göz önüne alınmıştır.

$$DI_{PA} = \frac{u_m}{u_u} + \beta \frac{E_h}{F_y u_u} \quad (4.4)$$

Park-Ang hasar modeli basitliğinin yanı sıra, çok sayıda sismik hasar gözlenerek kalibre edilmiştir. Park, Ang ve Wen (1985) onarılabilir ile onarılamaz hasar durumu için eşik değeri $DI=0.4$ olarak önermişlerdir. Yine aynı yazarlar tarafından önerilen, gözlenen hasar seviyelerine göre daha detaylı bir sınıflandırma Çizelge 4.1'de verilmiştir (Williams ve Sexsmith, 1995).

Çizelge 4.1 Hasar indeksi (Park, Ang ve Wen, 1987)

$DI < 0.1$	Hasarsız veya yerel (kısmi) kılcal çatlaklar
$0.1 \leq DI < 0.25$	Hafif hasar – hafif çatlaklar
$0.25 \leq DI < 0.4$	Orta hasar – ağır çatlaklar, betonda yerel (kısmi) dökülme
$0.4 \leq DI < 1.0$	Ağır hasar – betonda ezilme, donatının açığa çıkması
$DI \geq 1.0$	Göçme

Park ve Ang hasar indeksi en yaygın bilinen ve kullanılan hasar indeksi olmasına rağmen; şekil değiştirme kapasitesi u_u ve dayanım azaltma parametresi β 'nin belirlenmesindeki güçlük, (4.4) denkleminin kullanımında bazı zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Park ve Ang kolon ve kiriş deney sonuçlarının (toplam 261 adet) regresyon analizini kullanarak β için (4.5) denklemini önermişlerdir (Park ve Ang, 1985):

$$\beta = \left(-0.447 + 0.73 \frac{L}{D} + 0.24 \frac{P}{A_g f_c} + 0.314 \rho_1 \right) 0.7 \rho_s \quad (4.5)$$

Burada L/D en-boy oranını, $P/A_g f_c$ boyutsuz aksenal kuvveti, ρ_1 boyuna donatı oranını ve ρ_s spiral donatı oranını gösterir. Ne var ki, (4.5) denkleminde bulunan β değerleri oldukça küçük çıkmakta ve birikimli enerjinin indekse katkısını ihmal edilebilir düzeyde bırakmaktadır. Kunnath vd. (1990) ve Stone ve Taylor (1993) β için başkaca bağıntılar önermişlerdir. Bu bağıntılar çoğu zaman birikimli enerjinin payını önemli kılmaktadır (Williams ve Sexsmith, 1995). Park ve Ang bir başka çalışmasında nominal dayanım azalmasında (nominal strength deterioration) β değeri için 0.10 değerini önermişlerdir (Park vd., 1987 – Valles vd., 1996).

4.3 Önerilen Yöntemin Uygulamaları

Bu çalışmada önerilen yöntem, göz önüne alınan bir yer hareketi veya tasarım spektrumu için en büyük yerdeğiştirme istemi ile beraber çevrimsel enerji isteminin de tahminine izin verdiği için, hasar indeksi değerlendirmelerinde oldukça kullanışlı olmaktadır.

Önerilen yöntemi daha anlaşılabilir kılmak için, Bölüm 4.3.1 ve 4.3.2’de sırasıyla bir köprü ayağı ve üç katlı bir bina için yöntemin uygulaması yapılmıştır.

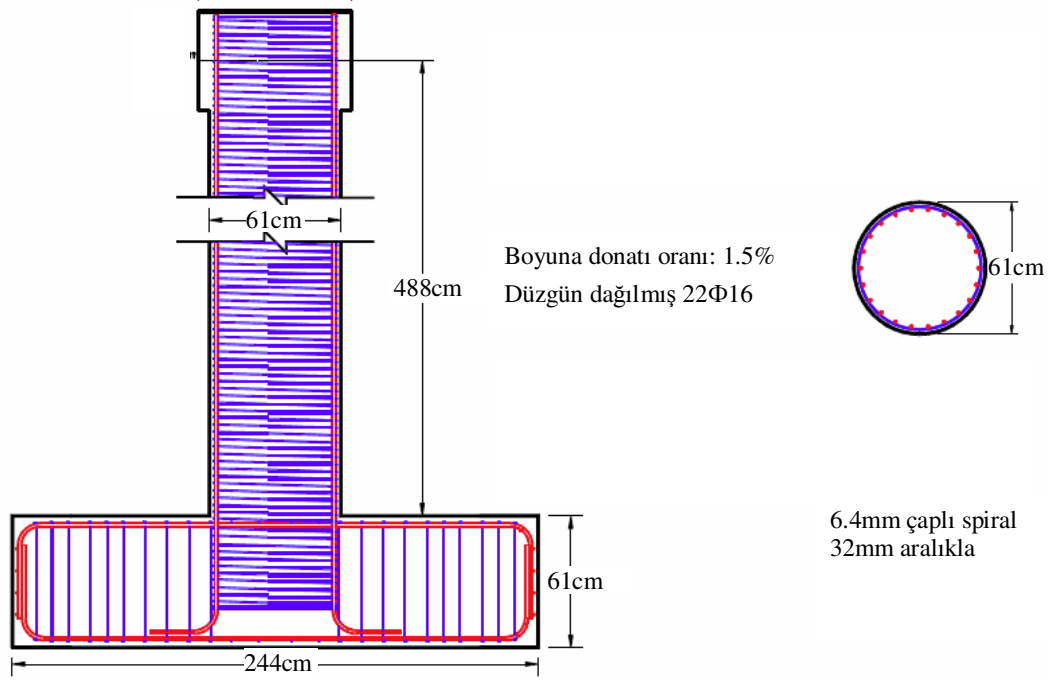
4.3.1 Uygulama 1: Köprü Ayağı

Kapasite eğrisi Lehman ve Moehle (2000) tarafından deneysel olarak belirlenmiş bir köprü ayağının, Olema-Point Reyes Sta. yer hareketi kaydı (yatay bileşeni, Loma Prieta Depremi, 1989 - Şekil 4.21) altındaki en büyük yerdeğiştirme ve çevrimsel enerji istemleri önerilen yöntem ile hesaplanmış ve detayları adım adım aşağıda verilmiştir. Olema-Point Reyes Sta. yer hareketi kaydı için etkili yer hareketi süresi $t_d=12.9s$, sismik indeks $I_D=6.58$ olarak hesaplanmıştır.

Konsol olarak tasarlanmış köprü ayağında, boyuna donatı oranı $\rho_l=1.5\%$, spiral donatı oranı $\rho_s=0.7\%$, en boy oranı $L/D=8$ ve konsol ucuna uygulanan eksenel kuvvet $P=653$ kN’dur. Köprü ayağının tasarım detayları Şekil 4.18’de görülebilir. Deney elemanında kullanılan beton ve donatı çeliğinin tayin edilmiş (specified), beklenen (expected) ve asıl (actual) dayanımları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Malzeme özellikleri, MPa (Lehman ve Moehle, 2000)

Malzeme	Tayin edilmiş (specified)		Beklenen (expected)		Asıl (actual)	
	Akma	Nihai	Akma	Nihai	Akma	Nihai
Boyuna donatı	407	543	448	627	464	633
Spiral	543		597		472	671
	Pik	Kuşatılmış	Pik	Kuşatılmış	Pik	Kuşatılmış
Beton	22.4		28.5	42.7	değişken	belirsiz



Şekil 4.18 Deneysel elemanı geometrisi (Lehman ve Moehle, 2000)



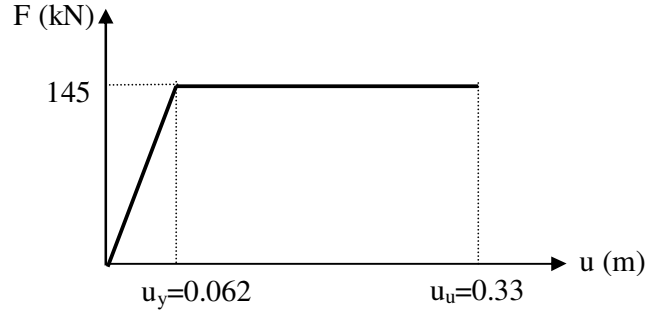
Mesnet kesiti
(bükülmüş boyuna donatının kırılması)



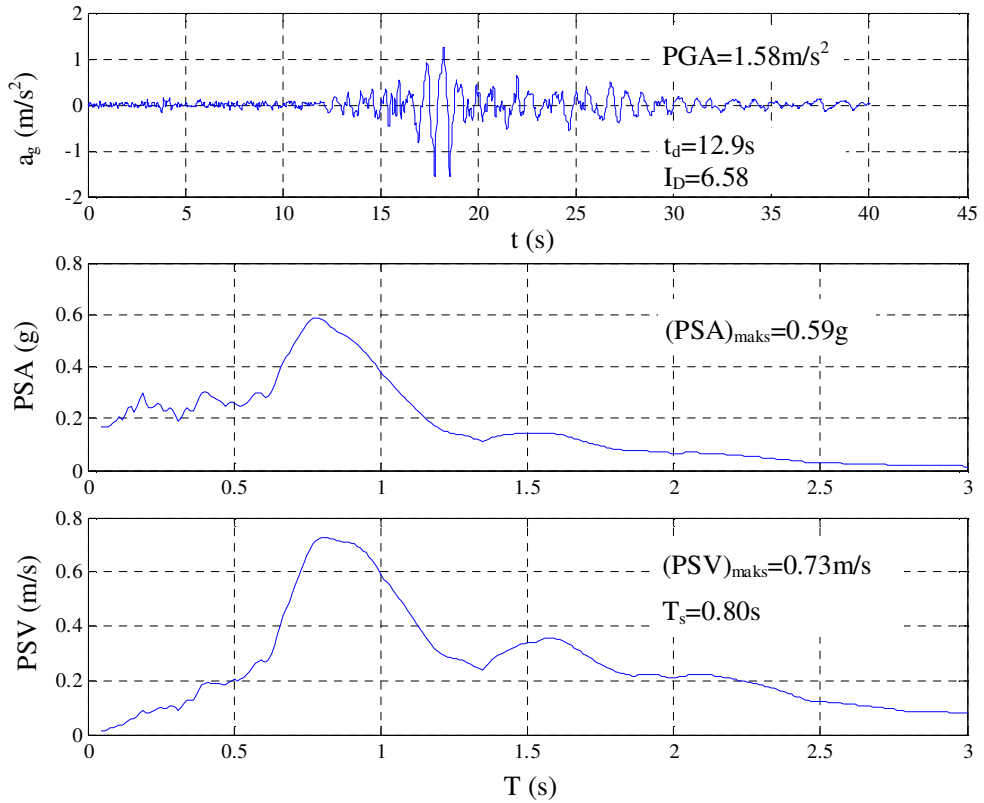
Şekil 4.19 Köprü ayağının göçme öncesi hasar durumu (Lehman ve Moehle, 2000)

Deney sonucunda belirlenmiş kapasite eğrisinin idealleştirilmiş ikili doğrusal hali Şekil 4.20'de verilmiştir. Köprü ayağının eşdeğer periyodu $T=1.06s$ bulunmuştur:

$$k = \frac{145}{0.062} = 2339 \text{ kN/m}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{66.5}{2339}} = 1.06s$$



Şekil 4.20 İkili doğrusal kapasite eğrisi



Şekil 4.21 Olema-Point Reyes Sta. yer hareketi kaydı (yatay bileşeni – Loma Prieta Depremi, 1989)

- (2.14) denklemini ile karakteristik periyot bulunur:

$$T_1 = 2\pi \frac{PSV_{maks}}{PSA_{maks}} = 2\pi \frac{0.73}{0.59 \cdot 9.81} = 0.79s$$

$$T_e = 1.23 \cdot T_s \cdot \exp(-0.18 \cdot (T_s / T_1)) = 1.23 \cdot 0.80 \cdot \exp(-0.18 \cdot (0.80/0.79)) = 0.82s$$

- (2.4) ve (2.1) denklemleri ile sistemin giriş enerjisi (E_i) hesaplanır:

$$T = 1.06s \text{ için } \left\{ \begin{array}{l} PSV = 0.51 \text{ m/s} \\ PSA = 0.307 \text{ g} \\ \tau = \frac{1.06}{0.82} = 1.29 \end{array} \right\}; R_y = \frac{66.5 \cdot 0.307 \cdot 9.81}{145} = 1.38$$

$$V_e = 0.66 \cdot PSV^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T-0.55)} \cdot t_d^{0.27}$$

$$V_e = 0.66 \cdot 0.51^{0.86} \cdot 1.38^{-0.1(1.06-0.55)} \cdot 12.9^{0.27} = 0.726$$

$$\frac{E_i}{m} = \frac{1}{2} \cdot V_e^2 = \frac{1}{2} \cdot 0.726^2 = 0.263$$

- İterasyonun ilk adımında olası bir süneklik katsayısı (μ_1) tahmin edilmiştir. μ_1 için eşit yerdeğiştirme kuralı uyarınca $\mu_1 = R_y = 1.38$ alınmıştır.

- μ_1 için (2.23) denklemini ile çevrimsel enerji hesaplanır:

$$\frac{E_{h,1}}{m} = 0.72 \left(\frac{\mu_1 - 1}{\mu_1} \right)^{0.84} \cdot \frac{E_i}{m}$$

$$\frac{E_{h,1}}{m} = 0.72 \left(\frac{1.38 - 1}{1.38} \right)^{0.84} \cdot 0.263 = 0.064$$

- Çevrimsel enerji (3.3) denklemini ile normalize edilir:

$$N_{h,1} = \frac{E_{h,1}/m}{E_{s,maks}/m} = \frac{E_{h,1}/m}{\frac{f_y \cdot u_y}{2 \cdot m}} = \frac{E_{h,1}/m}{\frac{PSA \cdot SD}{2 \cdot R_y^2}}$$

$$N_{h,1} = \frac{E_{h,1}/m}{\frac{f_y \cdot u_y}{2 \cdot m}} = \frac{0.064}{\frac{145 \cdot 0.062}{2 \cdot 66.5}} = 0.95$$

- (3.2) denklemini ile yeni bir süneklik katsayısı (μ_2) bulunur:

$$\mu_2 = \frac{u_m}{u_y} = 1 + 0.70 \cdot N_{h,1}^{0.70} \cdot I_d^{-0.35}$$

$$\mu_2 = 1 + 0.70 \cdot 0.95^{0.70} \cdot 6.58^{-0.35} = 1.35$$

$$\varepsilon_1 = \left| \frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right| = \left| \frac{1.35}{1.38} - 1 \right| = 0.02 < 0.05$$

Bulunan bu yeni süneklik katsayısı 1. adımda tahmin edilen süneklik katsayısına yeter derecede yakın olduğu için iterasyon sonlandırılır.

İterasyon sonucunda $\mu = 1.35$, $u_m = u_y \cdot \mu = 0.062 \cdot 1.35 = 0.084\text{m}$ ve çevrimsel enerji $E_h = 0.064 \cdot m = 0.064 \cdot 66.5 = 4.26\text{ kNm}$ bulunmuştur. İterasyon Çizelge 4.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.3 İterasyon özeti

	Birim	Formülasyon	Birinci adım ($\mu_1 = 1.38$)
V_e	m/s	$0.66 \cdot \text{PSV}^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T-0.55)} \cdot t_d^{0.27}$	0.726
$\frac{E_i}{m}$	(m/s) ²	$\frac{1}{2} \cdot V_e^2$	0.263
$\frac{E_{h,i}}{m}$	(m/s) ²	$0.72 \left(\frac{\mu_1 - 1}{\mu_1} \right)^{0.84} \cdot \frac{E_i}{m}$	0.064
$N_{h,i}$		$\frac{E_{h,i}/m}{E_{s,\text{maks}}/m} = \frac{E_{h,i}/m}{f_y \cdot u_y} = \frac{E_{h,i}/m}{\frac{\text{PSA} \cdot \text{SD}}{2 \cdot R_y^2}}$	0.95
μ_{i+1}		$1 + 0.70 \cdot N_{h,i}^{0.70} \cdot I_D^{-0.35}$	1.35
ε_i		$\frac{\mu_{i+1}}{\mu_i} - 1$	-0.02
Açıklama			$\varepsilon_1 < \%5$ olduğu için iterasyon sonlandırılır.

Elde edilen veriler ile Park-Ang hasar indeksi hesaplanabilir:

$$\beta = \left(-0.447 + 0.73 \frac{L}{D} + 0.24 \frac{P}{A_g f_c} + 0.314 \rho_1 \right) 0.7 \rho_s$$

$$\beta = \left(-0.447 + 0.73 \cdot 8 + 0.24 \frac{653 \cdot 10^3}{291720 \cdot 22.4} + 0.314 \cdot 0.015 \right) 0.7 \cdot 0.007 = 0.0266$$

$$DI_{PA} = \frac{u_m}{u_u} + \beta \frac{E_h}{F_y u_u} = \frac{0.084}{0.33} + 0.0266 \frac{4.26}{145 \cdot 0.33} = 0.26$$

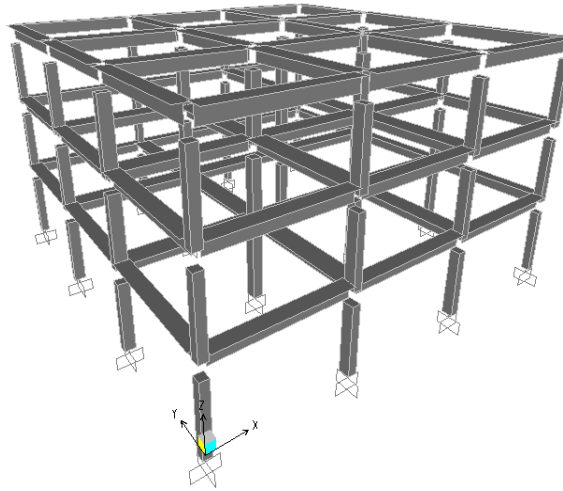
Olema-Point Reyes Sta. yer hareketi kaydı (yatay bileşeni – Loma Prieta Depremi, 1989) için önerilen yöntem ve zaman tanım alanında çözümleme sonuçları Çizelge 4.4’te özetlenmiştir.

Çizelge 4.4 Çözümleme sonuçları

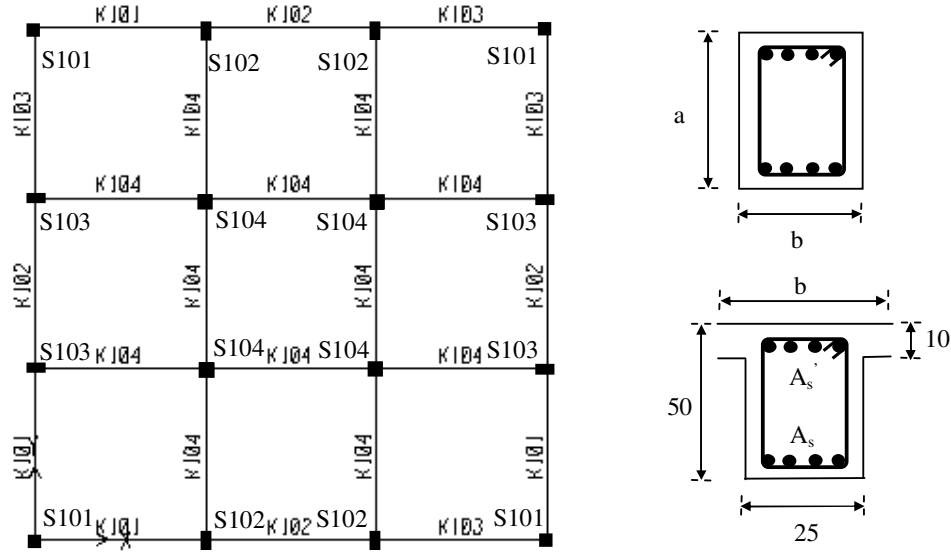
	En büyük yerdeğiştirme, u_m (m)	Giriş enerjisi, E_i (kNm)	Çevrimsel enerji, E_h (kNm)	Park-Ang hasar indeksi, DI_{PA}
Önerilen yöntem	0.084	17.49	4.26	0.26
Zaman tanım alanında çözümleme	0.077	15.92	3.82	0.24
Hata oranı	%9	%10	%12	%8

4.3.2 Uygulama 2: Üç Katlı Bina

Kapasite eğrisi statik itme çözümlemesi ile belirlenmiş üç katlı bir konut binasının, Şekil 4.24’te gösterilen tasarım spektrumu altındaki en büyük yerdeğiştirme ve çevrimsel enerji istemleri önerilen yöntem ile hesaplanmış ve detayları adım adım aşağıda verilmiştir. Göz önüne alınan bina taşıyıcı sisteminin matematiksel modeli Şekil 4.22’de, tipik kat planı ve kolon - kiriş kesitleri Şekil 4.23’te görülebilir.



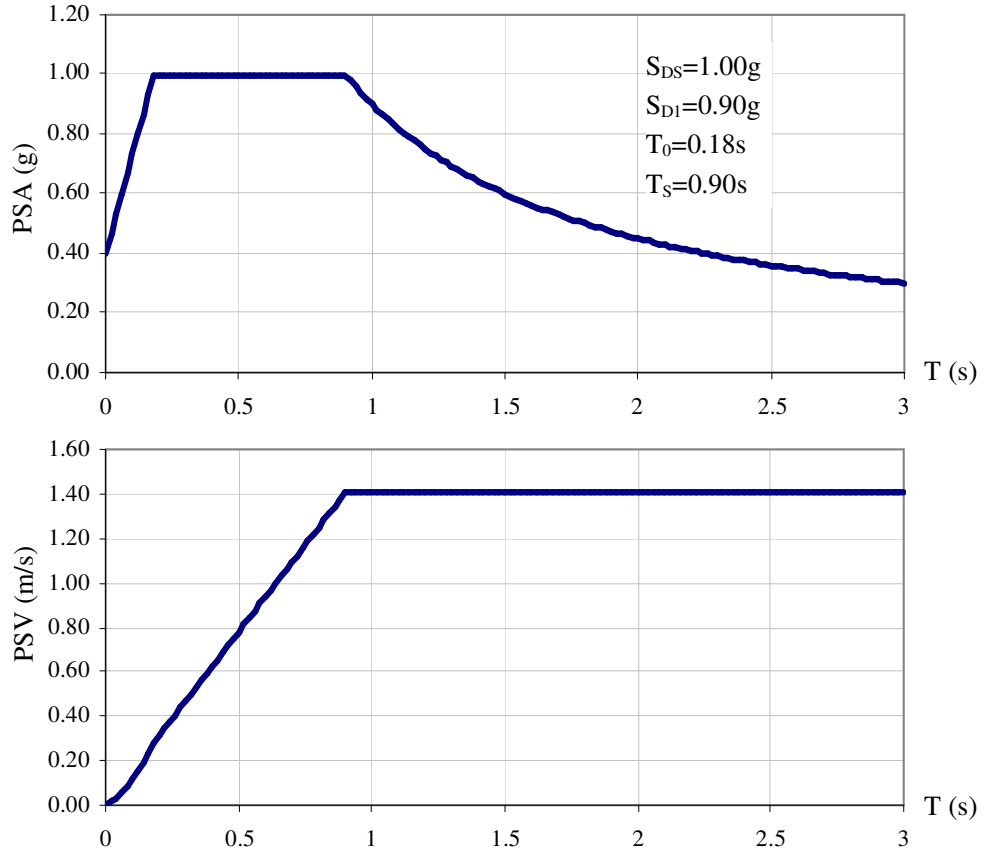
Şekil 4.22 Binanın matematiksel modeli (Sap2000 ver.10)



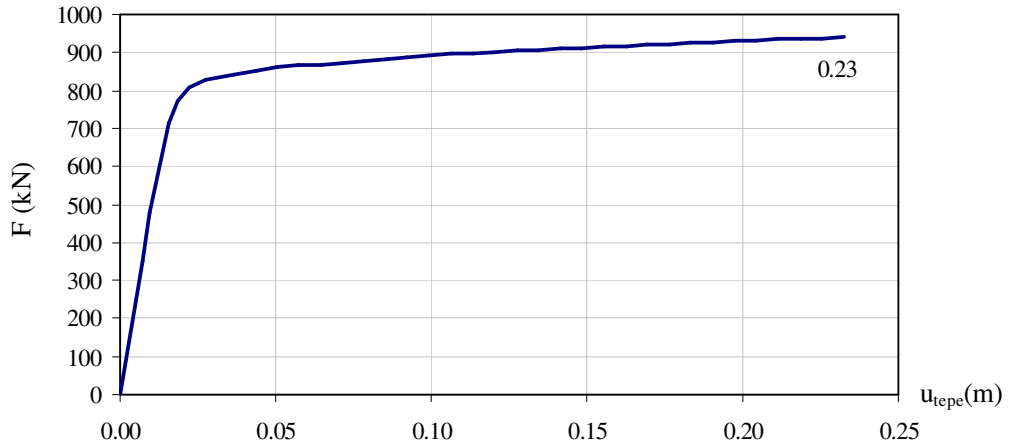
No	b (cm)	A_s (mm ²) sol/sağ	A_s (mm ²) sol/sağ	Enine donatı	No	a (cm)	b (cm)	Boyuna donatı	Enine donatı
K101	53	339/226	766/904	Φ8/20	S101	30	30	4Φ20	Φ8/15
K102	53	226/226	904/904	Φ8/20	S102	40	30	4Φ20	Φ8/15
K103	53	226/339	904/766	Φ8/20	S103	30	40	4Φ20	Φ8/15
K104	80	508/508	1319/1319	Φ8/20	S104	40	40	8Φ18	Φ8/15

Şekil 4.23 Tipik kat planı ve kolon-kiriş kesitleri

Binanın kapasite eğrisi (Şekil 4.25), Sap2000 programı kullanılarak statik itme çözümlenmesi ile belirlenmiştir. Yerdeğiştirme kapasitesi ise, FEMA-356 (2000) dokümanında göçme durumu için verilmiş görece kat ötelemesi sınırı ($\Delta=0.04$) esas alınarak belirlenmiştir. Statik itme çözümlenmesinde, taşıyıcı sistem elemanlarının uç kesitlerine plastik mafsallar atanmıştır. Elastoplastik kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi göz önüne alınan plastik mafsal kesitlerinde, akma noktasına kadar çatlamış kesit rijitliği kullanılmıştır ($I_{eff}=0.5 \cdot I$).



Şekil 4.24 Tasarım spektrumları (FEMA 450, $S_{DS}=1.00g$, $S_{D1}=0.90g$)



Şekil 4.25 Kapasite eğrisi

Kapasite eğrisi belli olan binanın birinci titreşim modu göz önüne alınarak kapasite diyagramı belirlenmiştir (Şekil 4.26). Eşdeğer BSD sistemin akma noktasının tayini için, kapasite diyagramının ikili doğrusal hale dönüştürülmesi gerekmektedir. Yöntemin ilk iterasyonunda

kabul edilen en büyük yerdeğiştirme istemi göz önüne alınarak kapasite diyagramı ikili doğrusal hale dönüştürülebilir.

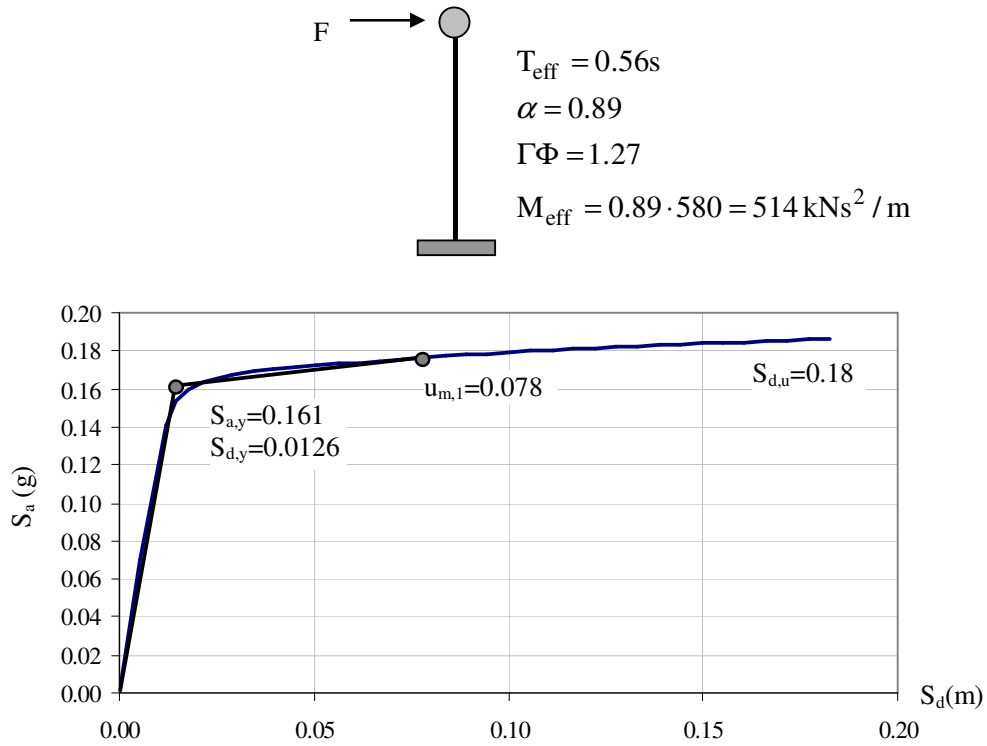
- İterasyonun ilk adımında olası bir yerdeğiştirme istemi ($u_{m,1}$) tahmin edilir. İlk adım için $u_{m,1}$ elastik yerdeğiştirme istemine eşit alınmıştır:

$$PSA(T = 0.56) = 1.00g$$

$$\omega = 2 \cdot \pi / 0.56 = 11.22$$

$$u_{m,1} = SD(T) = PSA(T) / \omega^2 = 0.078m$$

Kabul edilen yerdeğiştirme istemine bağlı olarak kapasite diyagramı ikili doğrusal hale dönüştürülmüş ve eşdeğer BSD sistemin akma noktası belirlenmiştir:



Şekil 4.26 Kapasite diyagramı

- Akma noktası belirlenen eşdeğer BSD sistemin dayanım azaltma katsayısı R_y ve ilk adıma ait süneklik katsayısı bulunur:

$$R_y = \frac{PSA}{S_{a,y}} = \frac{1.00g}{0.161g} = 6.21 = \mu_1 = \frac{u_{m,1}}{S_{d,y}}$$

- Tasarım spektrumu için karakteristik periyot T_e , sabit-ivme bölgesinden sabit-hız bölgesine geçiş periyodu kabul edilebilir.

$$T_e = 0.90s$$

- (2.5) ve (2.1) denklemleri ile sistemin giriş enerjisi (E_i) hesaplanır:

$$T = 0.56s \text{ için } \left\{ \begin{array}{l} \text{PSV} = 1.41 \text{ m/s} \\ \text{PSA} = 1.00 \text{ g} \\ \tau = \frac{0.56}{0.90} = 0.62 \end{array} \right\}$$

$$V_c = 1.45 \cdot \text{PSV}^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T-0.55)} \cdot \tau^{-0.2}$$

$$V_c = 1.45 \cdot 1.41^{0.86} \cdot 6.21^{-0.1(0.56-0.55)} \cdot 0.62^{-0.2} = 2.14$$

$$\frac{E_i}{m} = \frac{1}{2} \cdot V_c^2 = \frac{1}{2} \cdot 2.14^2 = 2.29$$

- $\mu_1 = \frac{u_{m,1}}{S_{d,y}}$ için (2.23) denklemi ile çevrimsel enerji hesaplanır:

$$\frac{E_{h,1}}{m} = 0.72 \left(\frac{\mu_1 - 1}{\mu_1} \right)^{0.84} \cdot \frac{E_i}{m}$$

$$\frac{E_{h,1}}{m} = 0.72 \left(\frac{6.21 - 1}{6.21} \right)^{0.84} \cdot 2.29 = 1.42$$

- Çevrimsel enerji (3.3) denklemi ile normalize edilir:

$$N_{h,1} = \frac{E_{h,1}/m}{E_{s,maks}/m} = \frac{E_{h,1}/m}{\frac{f_y \cdot u_y}{2 \cdot m}} = \frac{E_{h,1}/m}{\frac{\text{PSA} \cdot \text{SD}}{2 \cdot R_y^2}}$$

$$N_{h,1} = \frac{E_{h,1}/m}{\frac{\text{PSA} \cdot \text{SD}}{2 \cdot R_y^2}} = \frac{1.42}{\frac{1.00 \cdot 9.81 \cdot 0.078}{2 \cdot 6.21^2}} = 143$$

- (3.7) denklemi ile yeni bir süneklik katsayısı (μ_2) bulunur:

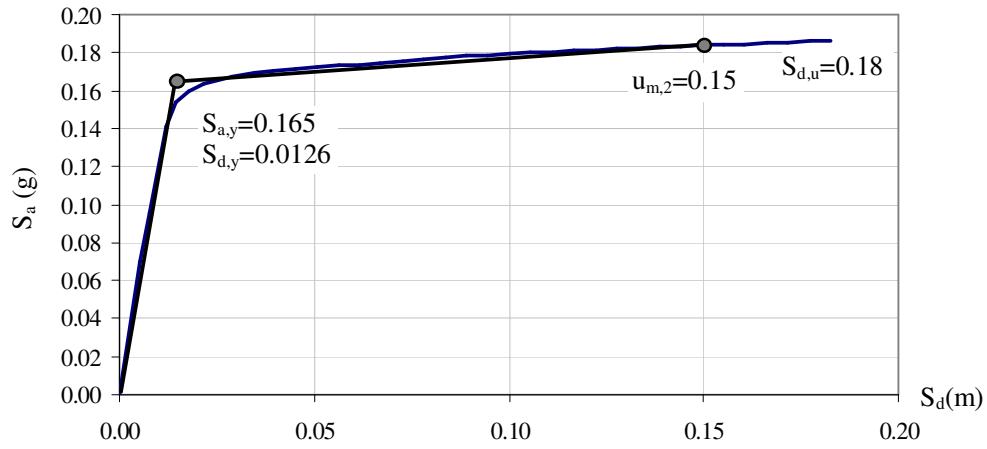
$$\mu_2 = \frac{u_m}{u_y} = 1 + 0.30 \cdot N_{h,1}^{0.70} \cdot \tau^{(1-R_y)/23}$$

$$\mu_2 = 1 + 0.30 \cdot 143^{0.70} \cdot 0.62^{(1-6.21)/23} = 11.79$$

$$\varepsilon_1 = \left| \frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right| = \left| \frac{11.79}{6.21} - 1 \right| = 0.90 > 0.05$$

Bulunan bu yeni süneklik katsayısı 1. adımda tahmin edilen süneklik katsayısına yeter derecede yakınsamadığı için, $u_{m,2} = \mu_2 \cdot S_{d,y} = 11.79 \cdot 0.0126 = 0.15\text{m}$ alınarak iterasyonda 2. adıma geçilir.

İterasyonun ilk adımında bulunan yerdeğiştirme istemine bağlı olarak kapasite diyagramı tekrar ikili doğrusal hale dönüştürülür ve eşdeğer BSD sistemin akma noktası belirlenir:



Şekil 4.27 Kapasite diyagramı

- Akma noktası belirlenen eşdeğer BSD sistemin dayanım azaltma katsayısı R_y ve ilk adıma ait süneklik katsayısı bulunur:

$$R_y = \frac{PSA}{S_{a,y}} = \frac{1.00\text{g}}{0.165\text{g}} = 6.06$$

- Tasarım spektrumu için karakteristik periyot T_e , sabit-ivme bölgesinden sabit-hız bölgesine geçiş periyodu kabul edilebilir.

$$T_e = 0.90\text{s}$$

- (2.5) ve (2.1) denklemleri ile sistemin giriş enerjisi (E_i) hesaplanır:

$$T = 0.56s \text{ için } \left\{ \begin{array}{l} \text{PSV} = 1.41 \text{ m/s} \\ \text{PSA} = 1.00 \text{ g} \\ \tau = \frac{0.56}{0.90} = 0.62 \end{array} \right\}$$

$$V_e = 1.45 \cdot \text{PSV}^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T-0.55)} \cdot \tau^{-0.2}$$

$$V_e = 1.45 \cdot 1.41^{0.86} \cdot 6.06^{-0.1(0.56-0.55)} \cdot 0.62^{-0.2} = 2.14$$

$$\frac{E_i}{m} = \frac{1}{2} \cdot V_e^2 = \frac{1}{2} \cdot 2.14^2 = 2.29$$

- $\mu_2 = \frac{u_{m,2}}{S_{d,y}}$ için (2.23) denklemi ile çevrimsel enerji hesaplanır:

$$\frac{E_{h,2}}{m} = 0.72 \left(\frac{\mu_2 - 1}{\mu_2} \right)^{0.84} \cdot \frac{E_i}{m}$$

$$\frac{E_{h,2}}{m} = 0.72 \left(\frac{11.79 - 1}{11.79} \right)^{0.84} \cdot 2.29 = 1.53$$

- Çevrimsel enerji (3.3) denklemi ile normalize edilir:

$$N_{h,2} = \frac{E_{h,2}/m}{E_{s,maks}/m} = \frac{E_{h,2}/m}{\frac{f_y \cdot u_y}{2 \cdot m}} = \frac{E_{h,2}/m}{\frac{\text{PSA} \cdot \text{SD}}{2 \cdot R_y^2}}$$

$$N_{h,2} = \frac{E_{h,2}/m}{\frac{\text{PSA} \cdot \text{SD}}{2 \cdot R_y^2}} = \frac{1.53}{\frac{1.00 \cdot 9.81 \cdot 0.078}{2 \cdot 6.06^2}} = 147$$

- (3.7) denklemi ile yeni bir süneklik katsayısı (μ_3) bulunur:

$$\mu_3 = \frac{u_m}{u_y} = 1 + 0.30 \cdot N_{h,2}^{0.70} \cdot \tau^{(1-R_y)/23}$$

$$\mu_3 = 1 + 0.30 \cdot 147^{0.70} \cdot 0.62^{(1-6.06)/23} = 11.96$$

$$\varepsilon_2 = \left| \frac{\mu_3}{\mu_2} - 1 \right| = \left| \frac{11.96}{11.79} - 1 \right| = 0.01 < 0.05$$

Bulunan bu yeni süneklik katsayısı 2. adımda tahmin edilen süneklik katsayısına yeter derecede yakın olduğu için iterasyon sonlandırılır.

İterasyon sonucunda $\mu = 11.96$, $u_m = u_y \cdot \mu = 0.0126 \cdot 11.96 = 0.151m$ ve çevrimsel enerji $E_h = 1.53 \cdot m = 1.53 \cdot 514 = 786kNm$ bulunmuştur. İterasyon Çizelge 4.5'te özetlenmiştir. Binanın tepe noktası yerdeğiştirmesi, modal parametreler kullanılarak eşdeğer BSD sistemin yerdeğiştirme isteminden bulunabilir:

$$u_{tepe} = u_m \cdot \Gamma\Phi = 0.151 \cdot 1.27 = 0.192m$$

Çizelge 4.5 İterasyon özeti

	Birim	Formülasyon	Birinci adım ($\mu_1 = 6.21$)	İkinci adım ($\mu_2 = 11.79$)
V_e	m/s	$1.45 \cdot PSV^{0.86} \cdot R_y^{-0.1(T-0.55)} \cdot \tau^{-0.2}$	2.14	2.14
$\frac{E_i}{m}$	(m/s) ²	$\frac{1}{2} \cdot V_e^2$	2.29	2.29
$\frac{E_{h,i}}{m}$	(m/s) ²	$0.72 \left(\frac{\mu_1 - 1}{\mu_1} \right)^{0.84} \cdot \frac{E_i}{m}$	1.42	1.53
$N_{h,i}$		$\frac{E_{h,i}/m}{E_{s,maks}/m} = \frac{E_{h,i}/m}{\frac{f_y \cdot u_y}{2 \cdot m}} = \frac{E_{h,i}/m}{\frac{PSA \cdot SD}{2 \cdot R_y^2}}$	143	147
μ_{i+1}		$1 + 0.30 \cdot N_{h,i}^{0.70} \cdot \tau^{(1-R_y)/23}$	11.79	11.96
ε_i		$\frac{\mu_{i+1}}{\mu_i} - 1$	0.90	0.01
Açıklama			$\varepsilon_1 > \%5$ olduğu için ikinci adıma geçilir.	$\varepsilon_2 < \%5$ olduğu için iterasyon sonlandırılır.

Bölüm 4.2'de özetlenen Park-Ang hasar indeksi BA elemanlar üzerinde denenip, kalibre edildiğinden; literatürde, sistem için global hasar indeksi belirlenmesinde bazı yaklaşımlar kabul edilmiştir. Genel kabul gören yaklaşım; taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan plastik mafsallar için ayrı ayrı belirlenen hasar indekslerinin, dağıtılan enerjiye göre ağırlıklı ortalaması alınıp sistem için global bir hasar indeksi belirlenmesidir (Park, Ang ve Wen, 1987; Kunnath vd., 1992). Eşdeğer BSD sistem için hesaplanan toplam çevrimsel enerji isteminden yararlanılarak, yaklaşık yöntemlerle taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan plastik mafsalların dağıttığı çevrimsel enerji ve buna bağlı olarak hasar indeksi tahmin edilebilir. Ne var ki, konu bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan bu uygulama için Park-Ang hasar indeksi belirlenmemiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kabuller ve Tanımlamalar

Bu çalışmada yapılan genel kabul ve tanımlamalar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Doğal titreşim periyodu ve dayanımı belli BSD bir sistemde *spektral giriş enerjisi* E_i , yer hareketi sonunda sistem tarafından dağıtılan (dönüştürülen, dissipated) toplam bağıl giriş enerjisi;
- *Yer hareketinin karakteristik periyodu* T_e ; elastik giriş enerjisi spektrumunda, giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyot;
- *Yer değiştirme sünekliği istemi* μ , BSD sistemin yer hareketi süresince yaptığı en büyük yerdeğiştirmenin akma yerdeğiştirmesine oranı;
- *Eşdeğer çevrim sayısı* N_e , sayısal olarak, yer hareketi altında dağıtılan toplam çevrimsel enerjinin, aynı yerdeğiştirme istemine kadar monotonik yükleme altında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alana oranı olarak tanımlanmıştır.

İstatistiksel değerlendirmelerde; mühendislik pratiğince anlamlı olan, doğal titreşim periyotları 0.1s ile 3s arasında değişen elastoplastik BSD sistemler göz önüne alınmıştır. Tüm çözümler altı farklı dayanım azaltma katsayısı için yapılmıştır ($R_y=1.5, 2, 3, 4, 5, 6$).

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında; sıkı zeminlerde kaydedilmiş uzak-fay yer hareketleri altında, dayanımı belli BSD elastoplastik sistemlerde *giriş enerjisi*, *çevrimsel enerji* ve *en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme istemi* için istatistiksel değerlendirmeler yapılmış ve bunların tahmini için bazı yapısal ve sismik parametrelere bağlı bağıntılar geliştirilmiştir. Bunlarla birlikte; çevrimsel enerji ve yerdeğiştirme sünekliği isteminin yapı davranışının doğası gereği birbirine bağlı parametreler olması nedeniyle, *yerdeğiştirme sünekliği isteminin* çevrimsel enerjiye bağlı olarak tahminine izin veren iteratif bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca, elastik davranış spektrumları kullanılarak, *yer hareketinin karakteristik periyodunun* tahmin edilmesine yönelik bir bağıntı da geliştirilmiştir. Önerilen bağıntılar ve yöntem, literatürde yer alan benzer başlıca yaklaşımlarla karşılaştırılmış ve tatminkâr sonuçlar alınmıştır.

Giriş enerjisi ve yerdeğiştirme sünekliğinin tahmininde girdi olarak kullanılan sismik

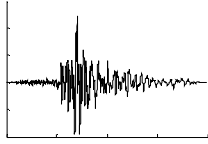
parametrelerin (etkili yer hareketi süresi ve sismik indeks I_D) yeterince güvenilir olarak tahmin edilemediği durumlar da göz önüne alınarak, önerilen bağıntılar belli bir güvenilirlikle basitleştirilmiştir. Böylelikle; önerilen yöntem ile dayanımı belli BSD bir sistem için *giriş enerjisi, çevrimsel enerji, en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme istemi* ve bunlara bağlı olarak *çevrimsel istem (eşdeğer çevrim sayısı)* sadece elastik davranış spektrumları girdi olarak kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Ayrıca en büyük elastik olmayan yerdeğiştirme istemi ile beraber çevrimsel enerji isteminin de tahmin edilebilmesi, bazı enerji esaslı düşük-çevrimli yorulma etkisini dikkate alan hasar indekslerinin tahminini de olanaklı kılmaktadır.

Bu çalışmada önerilen bağıntılar ve yöntem Şekil 5.1'de, yapılan çözümler ve değerlendirmeler sonucunda varılan bulgular ise aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

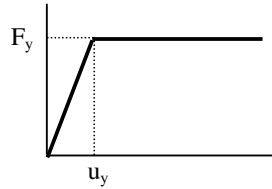
Sismik Enerji

- 1) Yer hareketi kaydının ait olduğu zemin özellikleri, BSD sistem tarafından dağıtılan toplam enerji üzerinde etkilidir. Bu etki giriş enerjisi spektrumunun şeklinden çok, şiddeti üzerinedir (Şekil 2.5 ve 2.9).
- 2) Eşdeğer giriş enerjisi hızı spektrumu ile elastik sözde-hız spektrumu arasındaki benzerlik bilinmektedir (Şekil 2.7, 2.11 ve 2.12). Eşdeğer giriş enerjisi hızının spektral elastik sözde-hıza bağlı olarak tahmin edilebilmesi, zemin özelliklerinin farklılığından kaynaklanan etkilerin de dikkate alınmasını belli bir ölçüde sağlamaktadır.
- 3) Eşdeğer giriş enerjisi hızı V_e 'nin tahmininde, korelasyon katsayılarına göre, spektrum şiddetinin (S_I), göz önüne alınan diğer sismik parametrelere göre daha etkili olduğu gözlenmiştir (Çizelge 2.1). Eşdeğer giriş enerjisi hızının spektral elastik sözde-hıza bağlı olarak tahmin edilmesi ile spektrum şiddetinin bu etkisi de dikkate alınmıştır. Doğal olarak, V_e/PSV oranı için hesaplanan korelasyon katsayısı da S_I için çok düşük çıkmaktadır. V_e/PSV oranı için hesaplanan korelasyon katsayıları arasında en yüksek olanlar sismik indeks I_D ve etkili yer hareketi süresine aittir (Çizelge 2.1). Dolayısıyla bu durum; I_D ve t_d 'nin eşdeğer giriş hızının tahmininde, PSV ile beraber kullanılacak en uygun parametreler oldukları şeklinde yorumlanabilir.
- 4) Eşdeğer giriş enerjisi hızının tahmininde; göz önüne alınan üç farklı yer hareketi süresi tanımı da benzer eğilimler göstermektedir. V_e için ayrı ayrı hesaplanan korelasyon katsayıları da çok yakın çıkmaktadır (Çizelge 2.1, Şekil 2.20 ve 2.21).

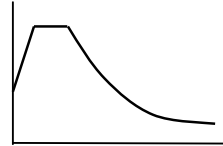
BELİRLİ BİR
YER HAREKETİ



DAYANIMI BELLİ
BSD BİR SİSTEM İÇİN;



VEYA TASARIM DEPREMİ
ALTINDA



KARAKTERİSTİK PERİYOT VE GİRİŞ ENERJİSİ TAHMİN EDİLİR:

$$\frac{E_i}{m} = \frac{1}{2} \cdot V_e^2 = \begin{cases} 0.22 \cdot PSV^{1.72} \cdot R_y^{-0.2(T-0.55)} \cdot t_d^{0.54} \cdot \tau^{-0.4} & T < T_e \\ 0.22 \cdot PSV^{1.72} \cdot R_y^{-0.2(T-0.55)} \cdot t_d^{0.54} & T \geq T_e \end{cases} \quad (2.6)^* \text{ DENKLEMİ}$$

$$T_e = 1.23 \cdot T_s \cdot \exp(-0.18 \cdot (T_s / T_1)) \quad (2.14) \text{ DENKLEMİ}$$

İTERATİF YÖNTEM İLE GİRİŞ ENERJİSİNE BAĞLI OLARAK, ÇEVİRİMSSEL ENERJİ VE SÜNEKLİK İSTEMİ BULUNUR:

1) OLASI BİR SÜNEKLİK İSTEMİ TAHMİN EDİLİR VE BU SÜNEKLİK İSTEMİ İÇİN İTERASYONA BAŞLANIR.

2) ÇEVİRİMSSEL ENERJİ TAHMİN EDİLİR:

$$E_h = 0.72 \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right)^{0.84} \cdot E_i \quad (2.23) \text{ DENKLEMİ}$$

3) NORMALLEŞTİRİLMİŞ ÇEVİRİMSSEL ENERJİ BULUNUR:

$$N_h = \frac{E_h / m}{E_{s, \text{maks}} / m} \quad (3.3) \text{ DENKLEMİ}$$

4) YENİ BİR SÜNEKLİK İSTEMİ TAHMİN EDİLİR:

$$\mu = \begin{cases} 1 + 0.70 \cdot N_h^{0.70} \cdot I_d^{-0.35} \cdot \tau^{(1-R_y)/23} & T < T_e \\ 1 + 0.70 \cdot N_h^{0.70} \cdot I_d^{-0.35} & T \geq T_e \end{cases} \quad (3.2)^* \text{ DENKLEMİ}$$

YENİ BULUNAN SÜNEKLİK İSTEMİ 1. MADDEDE TAHMİN EDİLENE YETER DERECEDE YAKINSA İTERASYON SONLANDIRILIR, AKSİ HALDE SON BULUNAN SÜNEKLİK İSTEMİ BİR SONRAKİ ADIMDA KULLANILARAK İTERASYONA DEVAM EDİLİR.

* (2.6) ve (3.2) denklemleri yerine sırasıyla (2.5) ve (3.7) denklemleri alternatif olarak kullanılabilir.

Şekil 5.1 Önerilen yöntem

- 5) Farklı dayanım azaltma katsayısı (R_y) ve etkili yer hareketi süresi (t_d) grupları için yapılan *ki-kare uyum iyiliği* testleri (chi-square goodness-of-fit test) ile, eşdeğer giriş enerjisi hızının göz önüne alınan bütün T/T_e değerlerinde log-normal dağılıma uyduğu belirlenmiştir (Şekil 2.23-2.28 ve Şekil 2.32-2.35).
- 6) BSD sistemin dayanımı, yer hareketi sonunda dağıtılan enerji üzerinde belirli bir ölçüde etkilidir. Dayanım arttıkça ortalamada sönüm enerjisi artmakta, çevrimsel enerji ise azalmaktadır (Şekil 2.13-2.15). Giriş enerjisi ise iki spektral bölgede farklı eğilim göstermektedir: Yaklaşık olarak; doğal titreşim periyodu $0.7T_e$ 'den küçük sistemlerde dayanım arttıkça giriş enerjisinin ortalamada azalma, $0.7T_e$ 'den büyük sistemlerde ise artma eğiliminde olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.13-2.15 ve 2.22). Hipotez testleri (t-test ve ANOVA) sonuçlarına göre ise; sadece $0.1T_e < T < 0.6T_e$ ve $0.8T_e < T < 1.2T_e$ aralıklarında, %5 istatistiksel doğruluk seviyesi için, dayanımın eşdeğer giriş enerjisi hızı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.29-2.30). Dayanımın doğal titreşim periyodunun karakteristik periyoda yakınlaştığı spektral bölgede etkili olması, en büyük giriş enerjisi üzerinde de etkili olduğu anlamına gelmektedir.
- 7) Hipotez testleri (t-test ve ANOVA) sonuçları; etkili yer hareketi süresi t_d 'nin eşdeğer giriş enerjisi hızı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir (Şekil 2.36-2.37); yer hareketi süresi arttıkça, ortalamada eşdeğer giriş enerjisi hızının da artış eğiliminde olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.31). Ayrıca etkili yer hareketi süresinin artmasıyla beraber, t_d 'deki değişimin giriş enerjisi üzerinde nispeten daha etkili olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.36).
- 8) Zaman tanım alanında çözümlene ile hesaplanan eşdeğer giriş enerjisi hızlarının saçılmaları, BSD sistemin dayanımı arttıkça tüm spektral bölgelerde artmaktadır (Şekil 2.38).
- 9) Eşdeğer giriş enerjisi hızının tahmini için önerilen bağıntının hatalarındaki saçılma, kısa periyotlu BSD sistemlerde ($T < 0.5T_e$) nispeten daha büyük olmaktadır ve bu bölgede periyot azaldıkça saçılma artmaktadır (Şekil 2.45).
- 10) En büyük yer ivmesi PGA'ya göre iki gruba ($PGA < 0.10g$ ve $PGA \geq 0.10g$) ayrılan veritabanı için önerilen bağıntının sonuçları değerlendirilmiş ve her iki grup için de benzer hatalar gözlenmiştir (Şekil 2.50-2.52). Bu durum; seçilen yer hareketlerine ait PGA mertebelerinin, elde edilen sonuçlara etkisinin pratik olarak olmadığını

göstermektedir.

- 11) Literatürde önerilmiş başlıca benzer bağıntılarla yapılan karşılaştırmalar (Bölüm 2.1.3), bu çalışmada önerilen bağıntının, göz önüne alınan istatistiklere göre neredeyse tüm spektral bölgelerde nispeten iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir (Şekil 2.56-2.60).
- 12) Giriş enerjisi spektrumunda, karakteristik periyot T_e 'ye göre iki farklı karakteristik bölge gözlenmektedir. Doğal titreşim periyodu T_e 'den küçük sistemler için spektral giriş enerjisi periyot artıkça artmakta, T_e 'den büyük sistemlerde azalmaktadır (Şekil 2.38, 2.61).
- 13) Karakteristik periyot T_e 'nin elastik davranış spektrumlarından hareketle tahminine dayanan bir bağıntı önerilmiştir (Bölüm 2.1.4). Önerilen bağıntı, literatürde önerilmiş diğer bazı yaklaşımlarla karşılaştırılmış ve tatminkâr sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Şekil 2.68-2.70).
- 14) Elastik olmayan sistemlerde, giriş enerjisinin en büyük değerini aldığı periyot BSD sistemin dayanımına bağlı olarak değişebilmektedir. Azalan dayanımla beraber bu periyodun, daha küçük değerlere doğru kaydığı gözlenmiştir (Şekil 2.71-2.72).
- 15) Yer hareketi sonunda sistem tarafından dağıtılan toplam çevrimsel enerji, giriş enerjisinin süneklik istemine bağlı bir oranı olarak tahmin edilmiştir. Özellikle süneklik isteminin küçük değerlerinde ($\mu < 4$) artan süneklikle beraber, BSD sistem tarafından dağıtılan toplam giriş enerjisinde çevrimsel enerjiyle dağıtılan kısmın payı hızlı bir şekilde artmaktadır. Yüksek süneklik istemlerinde ise ($\mu > 10$) çevrimsel enerjinin bu payı sabit bir oranda kalmakta ($\alpha \cong 0.70$) ve süneklik isteminden bağımsız hale gelmektedir (Şekil 2.73).
- 16) Giriş enerjisinin aksine; BSD sistemin dayanımı arttıkça ortalama çevrimsel enerji azalmaktadır. Ancak özellikle karakteristik periyottan büyük doğal titreşim periyoduna sahip ve dayanım azaltma katsayısı $R_y=3$ 'ten büyük sistemlerde, dayanımdaki değişim ortalama çevrimsel enerjiyi pek etkilememektedir (Şekil 2.76-2.77).
- 17) Eşdeğer giriş enerjisi hızı V_e ve çevrimsel enerji E_h için önerilen bağıntılarla yapılan hataların, her normalleştirilmiş periyot değeri için normal dağılıma uyduğu gözlenmiştir (Ek 1 ve Ek 2).

En Büyük Yerdeğiştirme İstemi

- 18) Özellikle küçük periyot değerlerinde ($T < 0.3s$) ve düşük dayanımlı sistemlerde bazı yer hareketleri altında çok büyük yerdeğiştirme sünekliği istemleri meydana gelmektedir (Şekil 3.1 ve 3.6). Gerçekleştiği spektral bölgede büyük sapmalara yol açan bu istemler, mühendislik pratiğinde pek beklenen bir durum değildir. Süneklik isteminin önerilen yöntem ile tahmininde bu sapmaların etkisini azaltmak için; regresyon çözümlenmeleri, en küçük kareler hata fonksiyonu süneklik istemine göre ağırlıklı alınarak yapılmıştır. Yine de, meydana gelen bu büyük sapmalar, söz konusu spektral bölgede süneklik istemi tahmininin güvenilirliğini azaltmaktadır (Şekil 3.15, 3.30 ve 3.32-3.35).
- 19) Doğal titreşim periyodunun karakteristik periyottan küçük olduğu spektral bölgede, normalleştirilmiş periyot arttıkça çevrimsel enerji ortalama artarken, süneklik istemi azalmaktadır. $1 < T/T_e < 3.0$ spektral bölgesinde ise çevrimsel enerji azalırken, süneklik istemi ortalama sabit bir eğilim göstermektedir. Bununla birlikte; yer hareketi sırasında oluşabilecek en büyük geri-dönebilen şekil değiştirme enerjisine göre normalleştirilmiş çevrimsel enerji, tüm spektral bölgelerde süneklik istemine benzer eğilim göstermektedir (Şekil 3.7-3.10).
- 20) Manfredi (2001) tarafından çevrimsel istemin tahmininde en uygun sismik parametre olarak önerilen sismik indeksin (I_D), bu çalışmada da süneklik isteminin tahmininde diğer göz önüne alınan sismik parametrelere göre daha etkili olduğu gözlenmiştir.
- 21) Dayanım azaltma katsayısı R_y arttıkça, ZTA çözümlenme ile hesaplanan süneklik istemlerindeki saçılmaların da arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte önerilen yöntem ile yapılan hataların saçılmaları da artmaktadır (Şekil 3.6, 3.15 ve 3.30).
- 22) Normalleştirilmiş çevrimsel enerji ve süneklik istemi, tüm spektral bölgelerde dayanım arttıkça azalmaktadır. Elastik olmayan yerdeğiştirme oranı ($C_R = \mu/R_y$) ise $T > T_e$ spektral bölgesinde dayanımdaki değişimden pek etkilenmemekte ve tüm R_y değerleri için ortalama "1" değerine yakınsamaktadır. Karakteristik periyottan küçük periyot değerlerinde ise; dayanımdaki artışla azalma eğiliminde olan (μ/R_y) oranında, doğal titreşim periyodu karakteristik periyoda yaklaştıkça dayanımın değişiminden kaynaklanan fark ortalama azalmaktadır (Şekil 3.10).
- 23) Önerilen yöntem ile süneklik isteminin tahmininde yapılan hataların, $0.5 \leq T/T_e \leq 3.0$ aralığında göz önüne alınan her bir T/T_e değeri için normal dağılıma uyduğu

gözlenmiştir. $0.1 \leq T/T_e < 0.5$ aralığında ise; özellikle küçük periyot değerlerinde ($T < 0.3s$) bazı yer hareketleri altında gözlenen yüksek süneklik istemleri, önerilen yöntem ile yapılan hatalarda büyük sapmalara yol açtığından, hataların dağılımı normal dağılıma uymamaktadır (Ek 3).

- 24) Bu çalışmada önerilen yöntem ile tahmin edilen elastik olmayan yerdeğiştirme oranları (μ/R_y), literatürde önerilmiş bazı diğer yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır (Bölüm 3.3). Karşılaştırmalar sonucunda; yapılan istatistiksel değerlendirmelere göre önerilen yöntem tatminkâr sonuçlar vermektedir (Şekil 3.37-3.42).
- 25) Özellikle küçük periyot değerlerinde bazı yer hareketleri altında gözlenen yüksek süneklik istemleri, karşılaştırılan tüm yaklaşımların hatalarında büyük saçılmalara yol açmaktadır (Şekil 3.39 ve 3.42). Doğal titreşim periyodu 0.3s'den küçük olan sistemlerin veritabanından filtrelenmesiyle yapılan değerlendirmelerde, söz konusu sapmaların tüm yaklaşımlar için makul seviyeye indiği gözlenmiştir (Şekil 3.48).

Eşdeğer Çevrim Sayısı

- 26) Çevrimsel istemin bir göstergesi olarak kabul edilebilecek eşdeğer çevrim sayısı; yer hareketinin karakteristik özelliklerinden oldukça etkilenmektedir. Yer hareketlerinin frekans içeriklerindeki rastgele değişkenlik, eşdeğer çevrim sayısının tahminini de zorlaştırmaktadır. Yine de, bu çalışmada önerilen yöntem ile eşdeğer çevrim sayısının nispeten daha kararlı bir parametre olan sismik enerjiye bağlı olarak tahmini, belirli bir güvenilirlikte tatminkâr sonuçlar vermiştir (Şekil 4.12-4.17).
- 27) ZTA çözümleme ile hesaplanan eşdeğer çevrim sayılarının, farklı zemin grupları için ortalamada birbirine yakın değerler aldığı gözlenmiştir (Şekil 4.6-4.8).
- 28) BSD sistemlerin dayanımlarındaki farklılık ortalamada eşdeğer çevrim sayısını etkilemekte; dayanım düştükçe eşdeğer çevrim sayısında artış gözlenmektedir (Şekil 4.9).
- 29) Karakteristik iki spektral bölgede (T_e 'den önce ve sonra) normalleştirilmiş periyoda göre farklı eğilimler gösteren çevrimsel enerji ve süneklik isteminin aksine, eşdeğer çevrim sayısı ortalamada sabit bir eğilim göstermekte ve normalleştirilmiş periyodun değişiminden pek etkilenmemektedir (Şekil 4.10 ve 4.11).
- 30) Önerilen yöntem ile eşdeğer çevrim sayısının tahmininde yapılan hataların, her bir R_y ve T/T_e değeri için normal dağılıma uyduğu gözlenmiştir (Ek 4).

Öneriler

Bu çalışmada yapılan tüm çözümler ve değerlendirmeler, elastoplastik çevrimsel kuvvet-yerdeğiştirme modeli göz önüne alınarak yapılmıştır. Elastoplastik çevrimsel model, betonarme yapı davranışının temsili için bazı durumlarda yeterli olmayabilir. Elastoplastik model referans kabul edilerek; bu çalışmada önerilen yöntem, betonarme yapı davranışını temsil eden bazı diğer modeller kullanılarak geliştirilebilir. Örnekte; Decanini ve Mollaioli (2001) tarafından yapılan çalışma, sıkı zeminlerde çevrimsel modeldeki farklılıkların giriş enerjisinin değişimi üzerinde pek etkili olmadığını ortaya koymaktadır. Bu noktadan hareketle bu çalışmada, sadece çevrimsel enerji için önerilmiş bağıntı değişik çevrimsel modeller için revize edilerek, önerilen yöntemin bu anlamda genişletilebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar her ne kadar göz önüne alınan yer hareketi veritabanı için geçerli olsa da; kullanılan veritabanının genişliği göz önüne alındığında, sonuçların bu veritabanı dışındaki yer hareketleri için de kabul edilebilir bir hata ile genelleştirilebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada üstü kapalı olarak, yapısal sistemlerin eşdeğer BSD model ile temsil edilebileceği kabul edilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada önerilen bağıntılar, birinci modu hakim olan yapısal sistemler için geçerlidir. Çok modlu davranışın etkisini incelemek için ilave çalışmalar gerekebilir.

KAYNAKLAR

- Akbaş, B., Shen, J., 2003, “Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı ve Enerji Kavramı”, İMO Teknik Dergi, 2877-2901.
- Akiyama, H., 1985, “Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings,” the University of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- Ambraseys, N.N., Menu, J., 1988, Earthquake-induced ground displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 985–1006.
- Ambraseys, N.N., Simpson, K.A., 1996, Prediction of vertical response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(4), 401–412.
- Ambraseys, N., Douglas, J., 2000, Reappraisal of the effect of vertical ground motions on response, *Engineering Seismology and Earthquake Engineering*, ESEE Report No. 00-4.
- Ang AHS, Tang WH., 1975, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Basic Principles*, vol. 1. Canada: Wiley.
- Arias, A., 1970, “A Measure of Earthquake Intensity,” R.J. Hansen, Ed. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 438-483.
- ATC-40, 1996, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40 Report, Volumes 1 and 2, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Aydinoğlu, M.N., Kaçmaz, Ü., 2002, *Strength-Based Displacement Amplification Spectra for Inelastic Seismic Performance Evaluation*, Department of Earthquake Engineering Report No.2002/2, KOERI, Boğaziçi University, İstanbul.
- Berrill, J.B., 1975, *A study of high-frequency strong ground motion from the San Fernando earthquake*. Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Bertero VV., 1997, Performance-based seismic engineering: a critical review of proposed guidelines. In: Fajfar P, Krawinkler H, editors. *Proceedings of the International Workshop on Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*. Rotterdam: Balkema, p.1±31.
- Bolt, B., A., 1973, “Duration of strong ground motions”, *Proc. Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 1, Rome, 1304-1313.
- Bolt, B.A., Abrahamson, N.A., 1982, New attenuation relations for peak and expected accelerations of strong ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(6), 2307–2321.
- Bommer, Julian J., Martinez-Pereira, A., 1999, “The effective duration of earthquake strong motion”, *Journal of Earthquake Engineering*, 3:2, 127-172.
- Bruneau, M., Wang, N., 1996, “Some Aspects of Energy Methods for the Inelastic Seismic Response of Ductile SDOF Structures, *Engineering Structures*, Vol.18 No.1, pp.1-12.
- Campbell, K.W., 1981, Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2039–2070.
- Campbell, K.W., Bozorgnia, Y., 1994, Near-source attenuation of peak horizontal acceleration from worldwide accelerograms recorded from 1957 to 1993. Pages 283–292 of: *Proceedings of the Fifth U.S.National Conference on Earthquake Engineering*, vol. III.

- Chai YH, Fajfar P, Romstad KM., 1998, "Formulation of duration-dependent inelastic seismic design spectrum", *J of Struct Eng, ASCE*;124(8):913±21.
- Chai, Y., H., Fajfar, P., 2000, "A Procedure for Estimating Input Energy Spectra for Seismic Design", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 4, 539-561.
- Chopra, A., K., 2001, *Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 844 pp.
- Chopra A.,K., Chintanapakdee, C., 2003, "Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures", Report No. EERC-2003-09, Earthquake Engineering Research Center, Univ. Of California, Berkeley, CA.
- Chopra A.,K., Chintanapakdee, C., 2004, "Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: single-degree-of-freedom bilinear systems", *J of Struct Eng, ASCE*, Vol. 130, No.9, 1309-1319.
- Chou, C-C, Uang, C-M., 2000, "Establishing absorbed energy spectra—an attenuation approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 29(10):1441–1455.
- Clough, R.W., 1966, *Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements*, University of California, Dept. of Civil Engineering, Berkeley, California.
- Cosenza E, Manfredi G, Ramasco R., 1993, "The use of damage functionals in earthquake engineering: a comparison between different methods" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 22:855-868.
- Cosenza E, Manfredi G, 1997, The improvement of the seismic-resistant design for existing and new structures using damage criteria, In: Fajfar P, Krawinkler H, editors. *Proceedings of the International Workshop on Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*. Rotterdam: Balkema, p.1±31.
- Decanini, L., D., Mollaioli, F., 2001, "An energy-based methodology for the assessment of seismic demand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 21, 113±137.
- Fajfar, P., Vidic, T., Fischinger, M., 1989, "Seismic Design in Medium- and Long- Period Structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, pp. 1133-1144.
- Fajfar, P., 1992, "Equivalent Ductility Factors Taking into Account Low-cycle Fatigue," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, No.10, pp. 837 - 848.
- Fajfar P, Vidic T, Fishinger M., 1992, "On energy demand and supply in SDOF systems", In: Fajfar P, Krawinkler H, editors. *Nonlinear seismic analysis of reinforced concrete buildings*. London: Elsevier, p.41±61.
- Fajfar P, Vidic T., 1994, "Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 23:523±32.
- FEMA 356, 2000, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA 450, 2003, *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA 440, 2005, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

- Foutch, D.A., and Shi, S., 1998, "Effects of hysteresis type on the seismic response of buildings," Proceedings, 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Paper 409, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- Heidebrecht, 1987, "Fajfar P, Vidic T., (1989) tarafından yapılan sözlü iletişim".
- Housner, G.W., 1956, "Limit design of structures to resist earthquakes," Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering, California, USA, 5, pp. 5-1 to 5-13.
- Hu, Y.-X., Liu, S.-C., Dong, W., 1996, Earthquake engineering. 1st edn. E & FN Spon, Imprint of Chapman and Hall, London.
- Hudson, D.E., 1988, Some recent near-source strong motion accelerograms. Pages 271–276 of: Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, vol. II.
- Iwan, W., D., 1980, "Estimating inelastic response spectra from elastic spectra", Earthquake eng. str. dyn. vol.8, 375-388.
- Khashae, P., 2004, Energy-Based Seismic Design and Damage Assessment for Structures, PhD Thesis, University of Tehran.
- Krinitzsky, E.L., Gould, J.P., Edinger, P.H., 1993, Fundamentals of Earthquake Resistant Construction. John Wiley and Sons.
- Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M., Lobo R.F., 1992, IDARC2D Version 3.0: A Computer Program for the Inelastic Damage Analysis of RC Structures, Technical Report NCEER-92-0022, State University of New York, Buffalo NY.
- Kunnath, S.K., Valles-Mattox, R.E., Reinhorn, A.M., 1996, "Evaluation of Seismic Damageability of a Typical R/C Building in Midwest United States", Eleventh World Conference in Earthquake Engineering (11WCEE) Acapulco, Mexico.
- Kunnath, S.K., Chai, Y.H., 2004, "Cumulative damage-based inelastic cyclic demand spectrum", Earthquake Engng Struct. Dyn.; 33:499–520.
- Kuwamura, H., Galambos, T.V., 1989, "Earthquake Load For Structural Reliability," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 6, pp. 1446-1462.
- Kuwamura, H., Kirino, Y., Akiyama, H., 1994, "Prediction of Earthquake Energy Input from Smoothed Fourier Amplitude Spectrum", Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol. 23, No.10, pp. 1125-1137.
- Lam, N., Wilson, J., Chandler, A., Hutchinson, G., 2000, "Response Spectrum Modelling for Rock Sites in Low and Moderate Seismicity Regions Combining Velocity, Displacement and Acceleration Predictions", Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol. 29, pp. 1491-1525.
- Léger, P., Dussault, S., 1992, "Seismic-Energy Dissipation in MDOF Structures," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, pp. 1251-1269.
- Lehman, D.E., Moehle, J.P., 2000, Seismic Performance of Well-Confined Concrete Bridge Columns, PEER Report 1998/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Manfredi, G., 2001, "Evaluation of Seismic Energy Demand," Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol. 30, pp. 485-499.

- Manfredi, G., Polese, M., Cosenza, E., 2003, "Cumulative demand of the earthquake ground motions in the near source", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*; 32:1853–1865.
- Martínez-Pereira, A., 1999, The characterisation of near-field earthquake ground-motions for Engineering design. Ph.D. thesis, University of London.
- MathWorks, Inc., 2007, MATLAB (Programming Language), version 2007a, www.mathworks.com.
- MathWorks, Inc., 2009, MATLAB Technical Documentation, http://www.mathworks.com/access/helpdesk_r13/help/toolbox/curvefit/ch_fit9.html
- McKevitt, W.E., Anderson, D.L., Cherry, S., 1980, "Hysteretic Energy Spectra in Seismic Design," *Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 7, pp. 487-494.
- Miranda, E., 1993, "Evaluation of site-dependent inelastic seismic design spectra.", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 119(5), 1319–1338.
- Nakashima, M., Saburi, K., Tsuji, B., 1996, "Energy Input and Dissipation Behavior of Structures with Hysteretic Dampers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, No.1, pp. 77-90.
- Nassar, A.A., Krawinkler, H., 1991, *Seismic demands for SDOF and MDOF systems*, John A. Blume Earthquake Engineering and Research Center, Report No.95, Stanford University, CA.
- Nisar, A., Golesorkhi, C., 1995, Development of vertical design response spectrum for use in near-field. Pages 1075–1082 of: *Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation*, vol. II.
- Park, Y.J., Ang, A.H.S., 1985, "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 722-739.
- Park, Y.J., Ang, A.H.S., Wen, Y.K., 1985, "Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 740-757.
- Park, Y.J., Ang, A.H.S., Wen, Y.K., 1987, "Damage-limiting aseismic design of buildings" *Earthquake Spectra*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-26.
- Park, Y.J., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., 1987, IDARC: Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Frame – Shear-Wall Structures, Technical Report NCEER-87-0008, State University of New York at Buffalo.
- PEER, NGA Strong Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, <http://peer.berkeley.edu/nga/>, Ocak 2007.
- Ruiz-Garcia, J., Miranda, E., 2003, "Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 32:1237–1258.
- Sap2000 Advanced ver.10, 2006, Structural Analyses Program, Computers and Structures, Inc.
- Shteinburg, V.V., Chernov, Yu.K., Ivanova, T.G., 1980, Near field ground motion. Pages 373–378 of: *Proceedings of Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, vol. 2.
- StatSoft, Inc., 2001, STATISTICA (data analysis software system), version 6, www.statsoft.com.

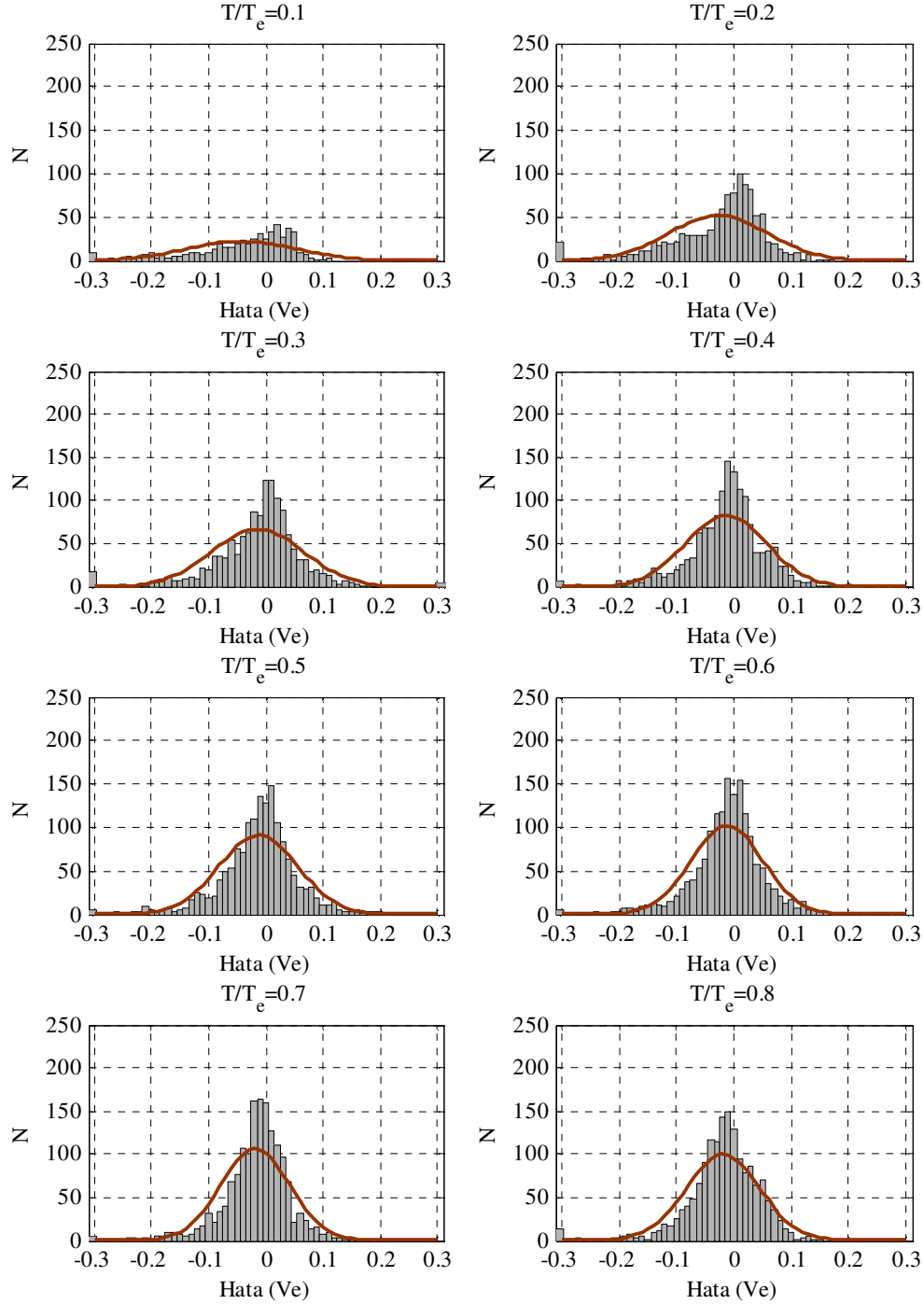
- StatSoft, Inc., 2001, Electronic Statistics Textbook. Tulsa, OK: StatSoft. <http://www.statsoft.com/textbook/stathome.html>.
- Somerville, P.G., Smith, N. F., Graves, R.W., Abrahamson, N.A., 1997, "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", *Seismological Research Letters* 68(1), 199-222.
- Sucuoğlu, H., Yüçemen, S., Gezer, A., Erberik, A., 1998, "Statistical evaluation of the damage potential of earthquake ground motions", *Structural Safety*, 20:357-378.
- Tocher, D., Patwardhan, A.S., Cluff, L.S., 1977, Estimation of near field characteristics of Earthquake motion. Pages 470–476 of: *Proceedings of Sixth World Conference on Earthquake Engineering*, vol. I.
- Trifunac, M.D., Brady, A.G., 1975, "A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion," *Bulletin of Seismological Society of America*, 65, pp.581-626.
- Uang CM, Bertero VV., 1990, "Evaluation of seismic energy in structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 19:77-90.
- UCLA: Academic Technology Services, Statistical Consulting Group, "Definition of CV", www.ats.ucla.edu/stat/mult_pkg/faq/general/coefficient_of_variation.htm, Şubat 2009.
- Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C., Madan A., 1996, IDARC2D Version 4.0: A Computer Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings, Technical Report NCEER-96-0010, State University of New York, Buffalo NY.
- Vidic T., Fajfar P, Fishinger M., 1994, "Consistent inelastic design spectra: strength and displacement", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 23:507±21.
- Williams, M.S., Sexsmith, R.G., 1995, "Seismic Damage Indices for Concrete Structures: A State-of-the-Art Review" *Earthquake Spectra*, Vol. 11, No. 2, pp. 319-349.
- Ye, L., Otani, S., 1999, "Maximum Seismic Displacement of Inelastic Systems Based on Inelastic Systems Based on Energy Concept", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol. 28, pp. 1483-1499.
- Zahrah T, Hall J., 1984, "Earthquake energy absorption in SDOF structures", *Journal of Structural Engineering*; 110(8):1757-1772.

EKLER

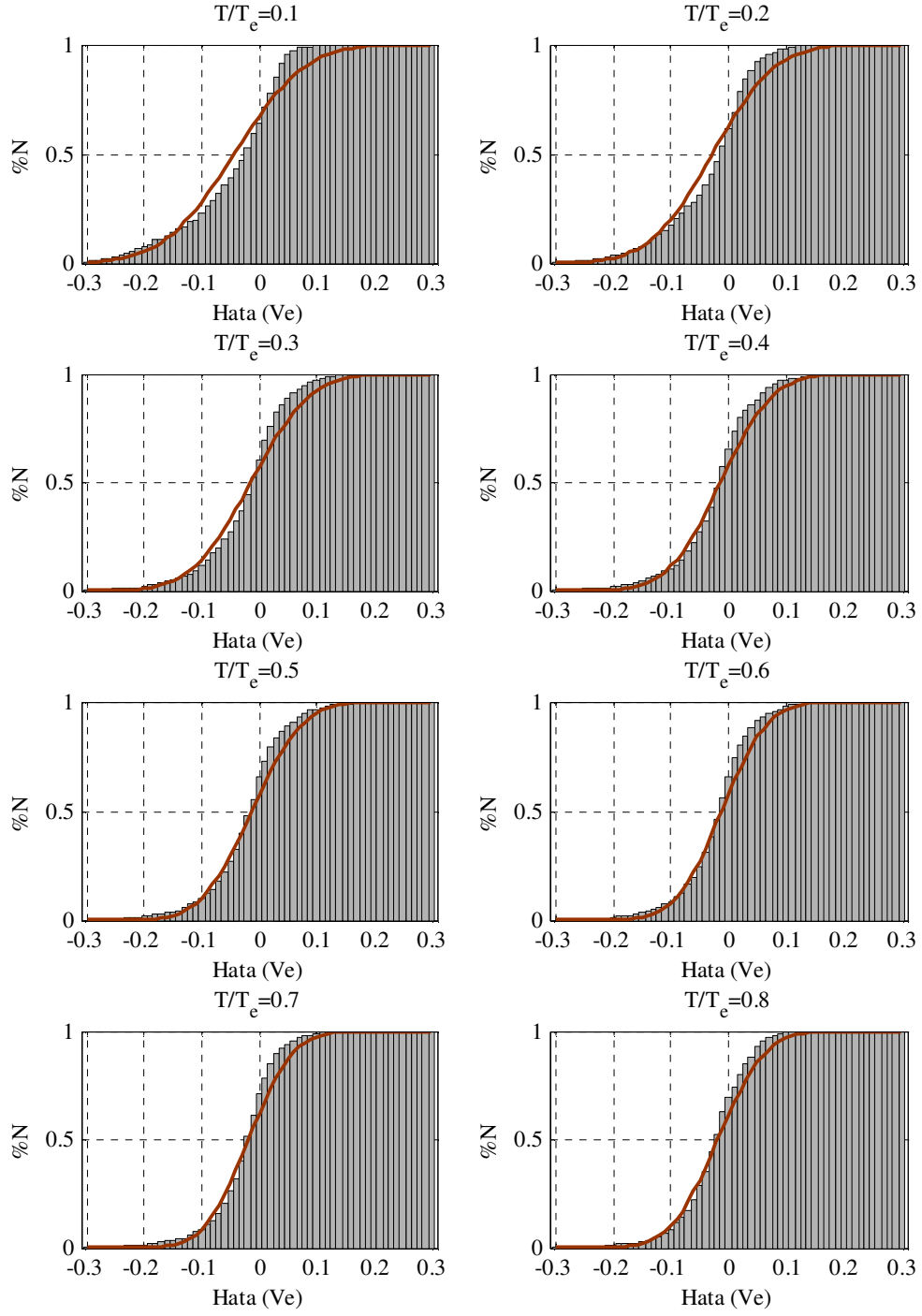
- Ek 1 Eşdeğer giriş enerjisi hızı için hata histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri
- Ek 2 Çevrimsel enerji için hata histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri
- Ek 3 Elastik olmayan yerdeğiştirme oranı için hata histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri
- Ek 4 Eşdeğer çevrim sayısı için hata histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri

Ek 1 Eşdeğer Giriş Enerjisi Hızı için Hata Histogramları, Olasılıksal ve Birikimli Dağılım Eğrileri

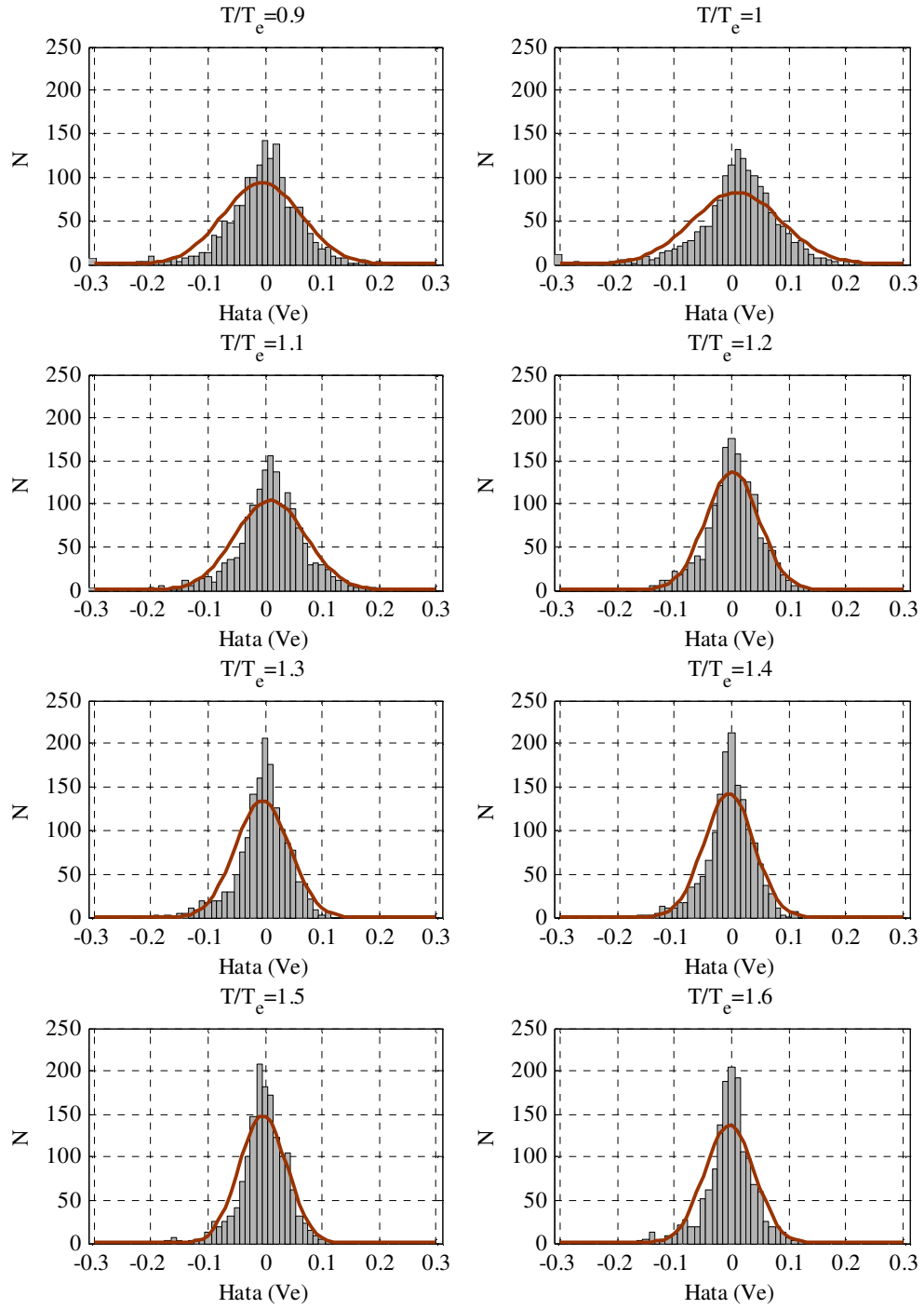
Önerilen bağıntı ile yapılan hataların histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri bazı $\tau(T/T_e)$ değerleri ($\tau = 0.1:0.1:3.0$) için aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



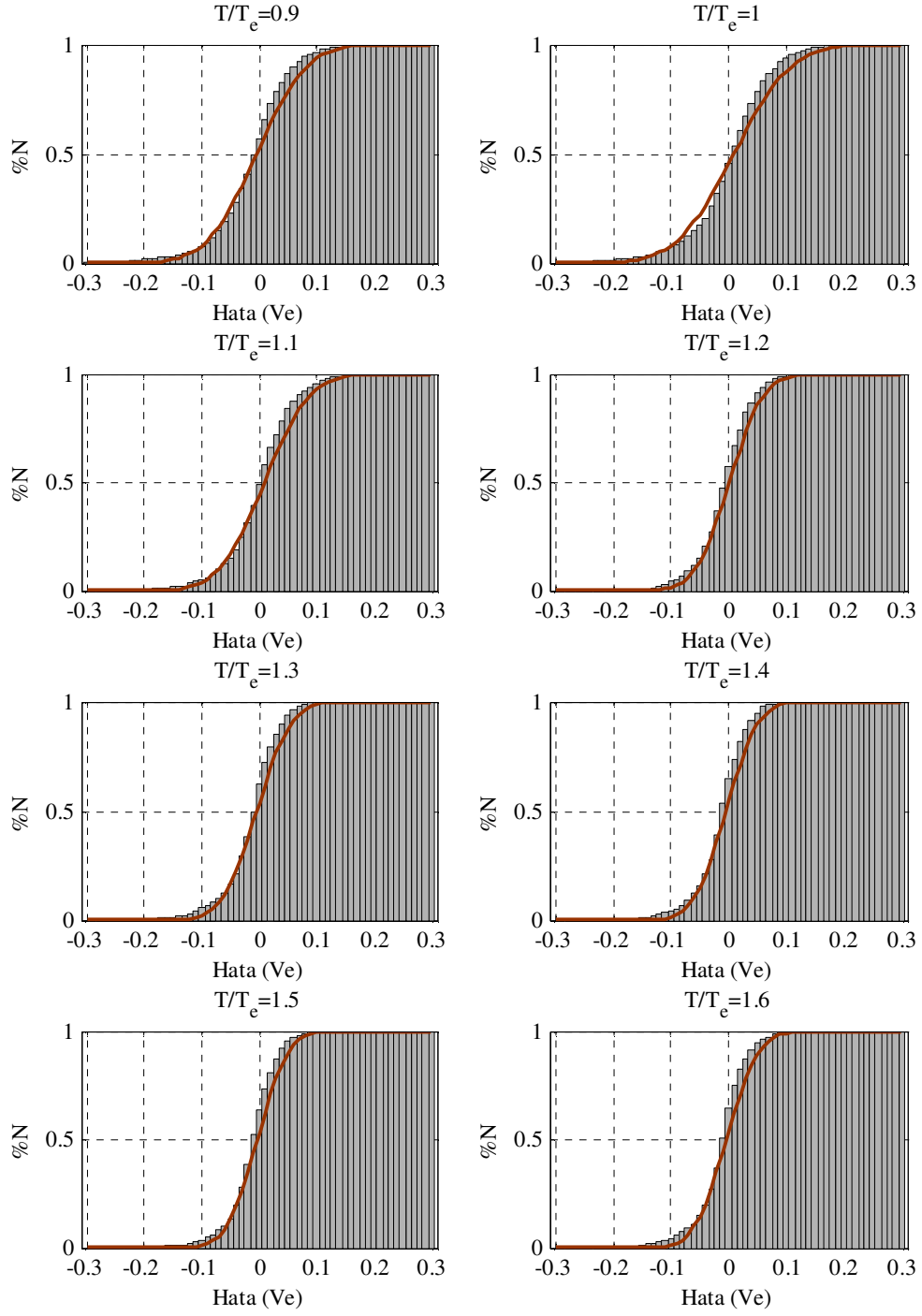
Şekil Ek 1.1 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



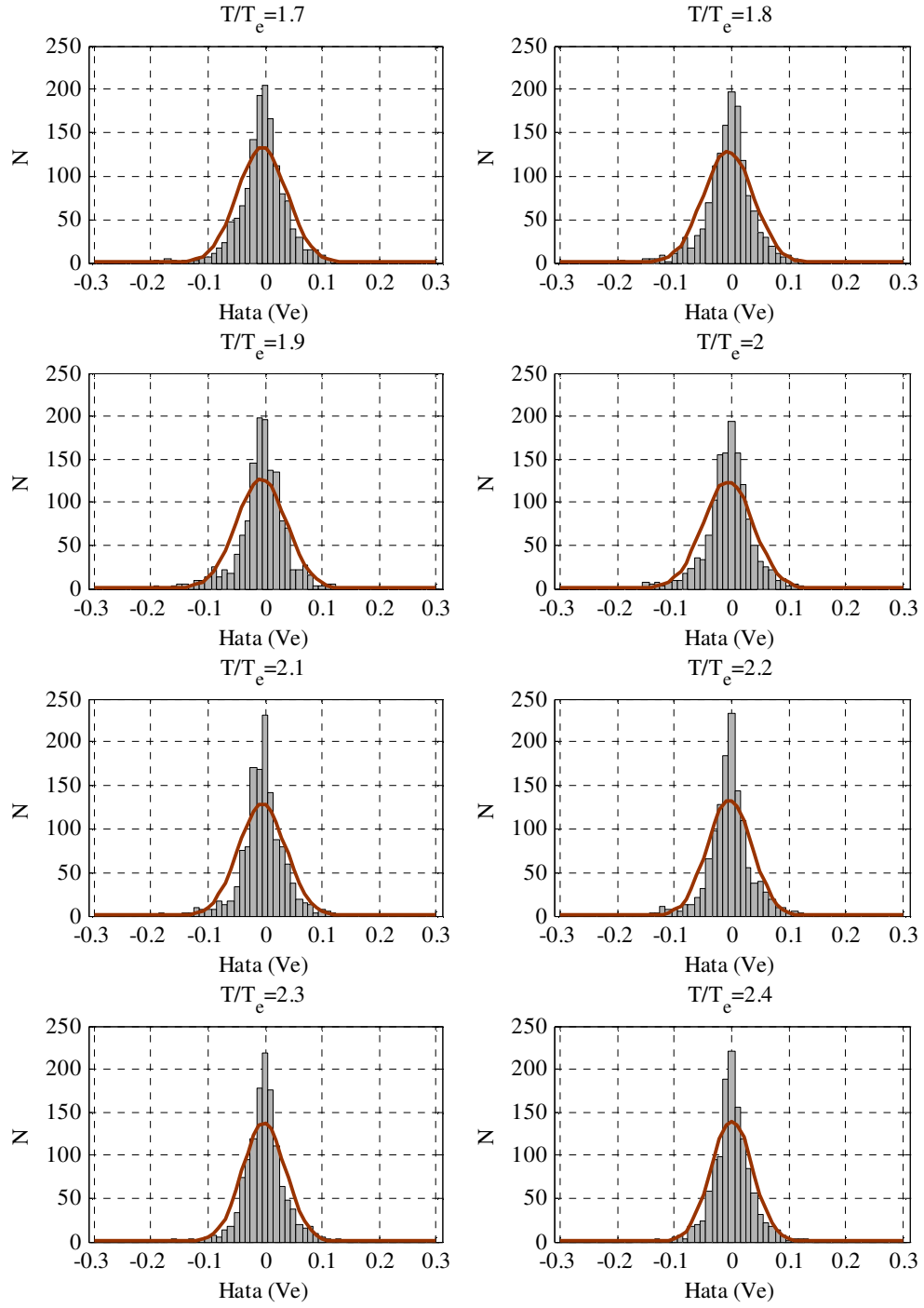
Şekil Ek 1.2 Birikimli dağılım eğrileri



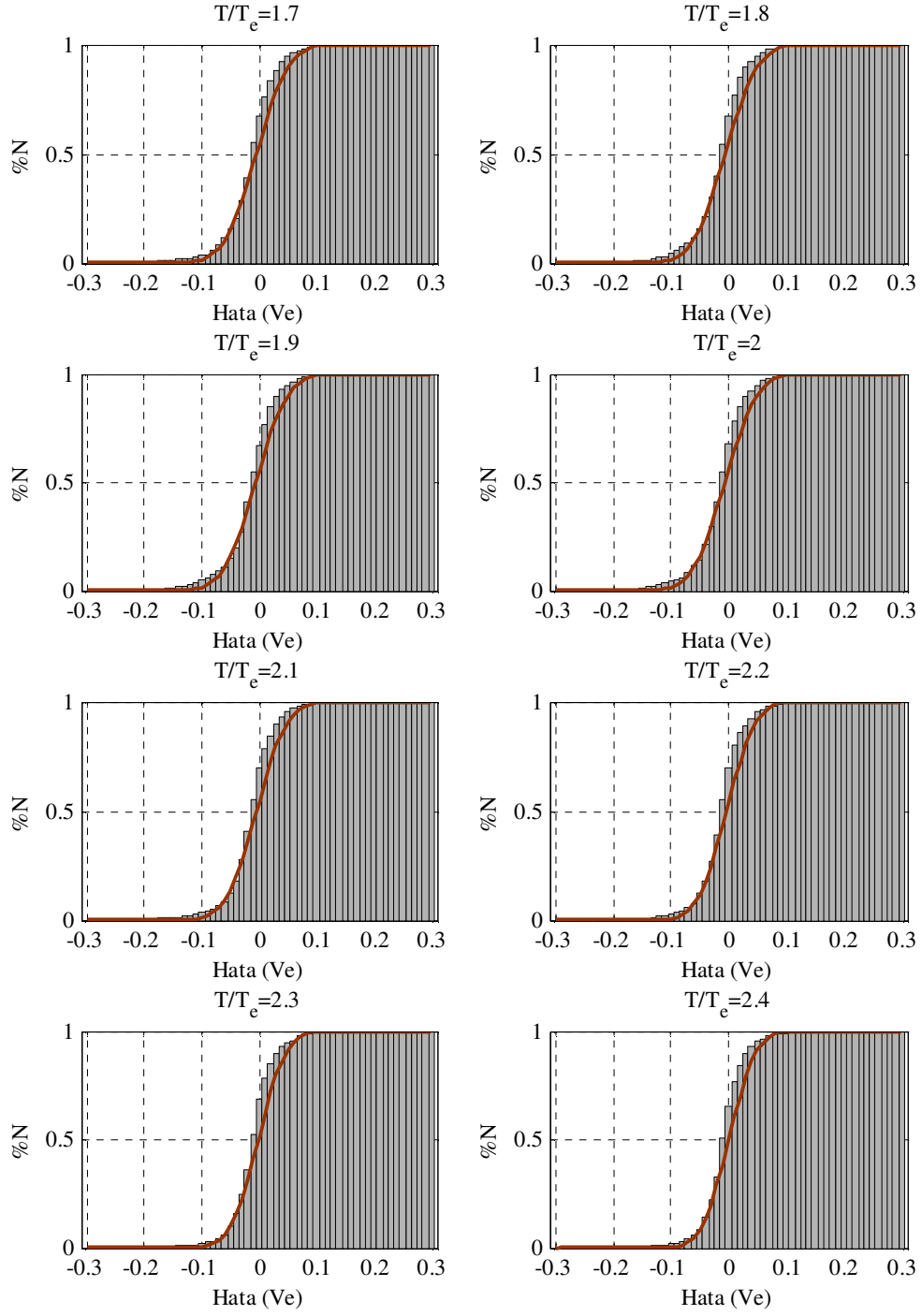
Şekil Ek 1.3 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



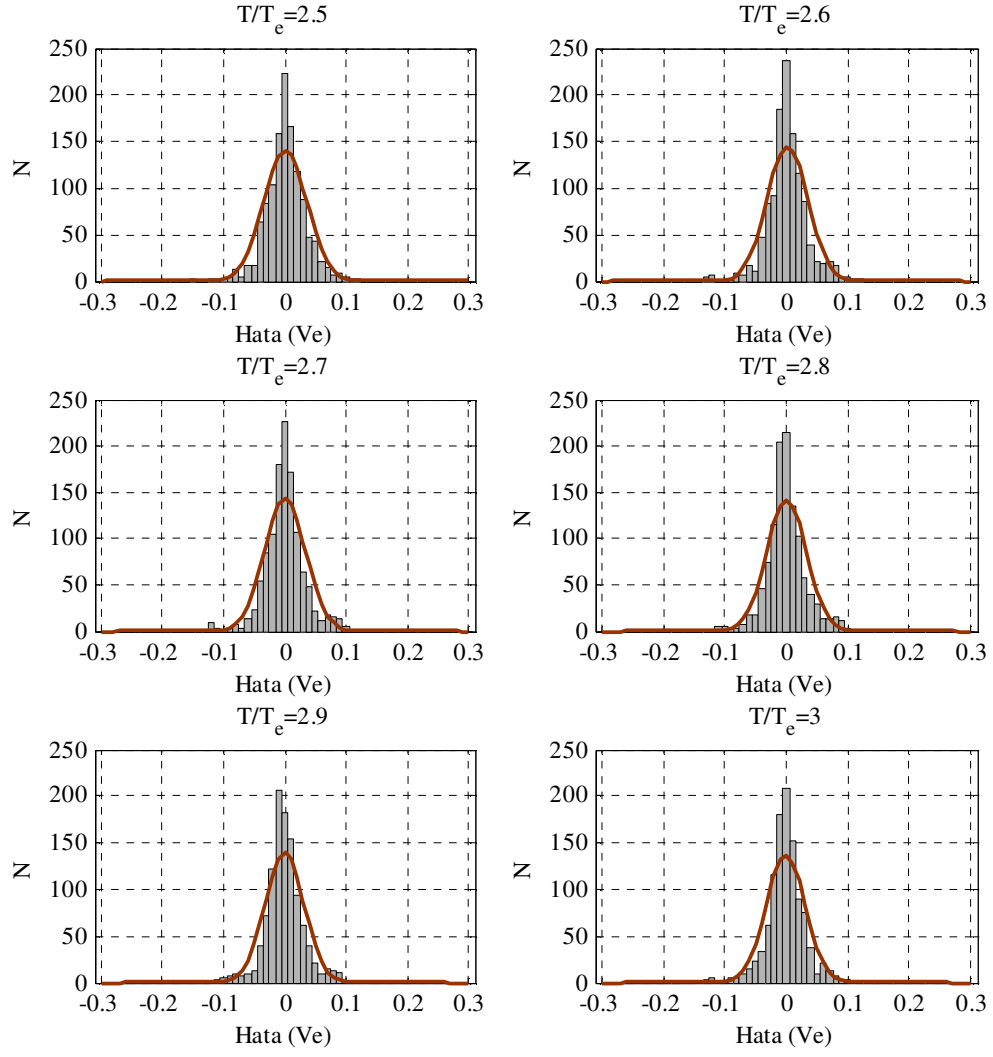
Şekil Ek 1.4 Birikimli dağılım eğrileri



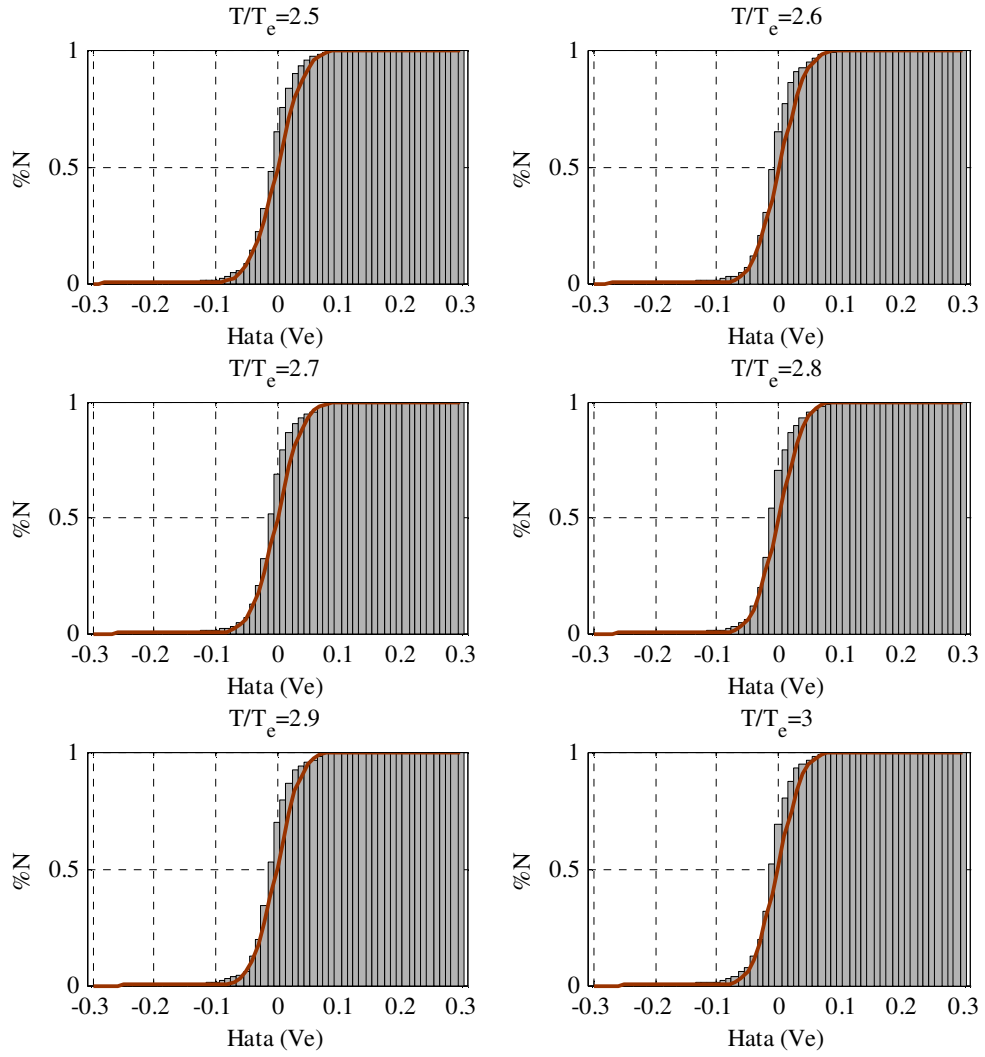
Şekil Ek 1.5 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



Şekil Ek 1.6 Birikimli dağılım eğrileri



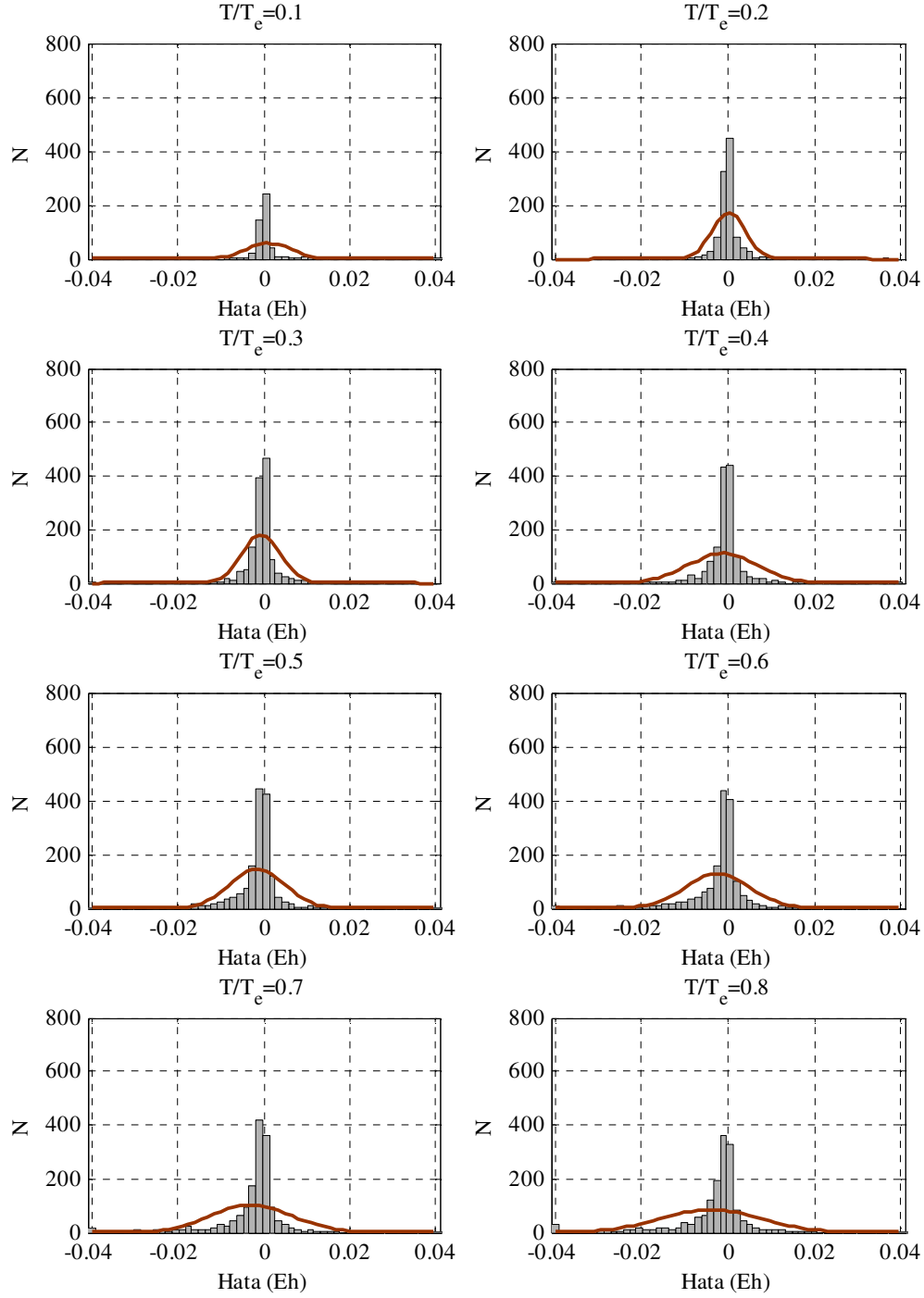
Şekil Ek 1.7 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



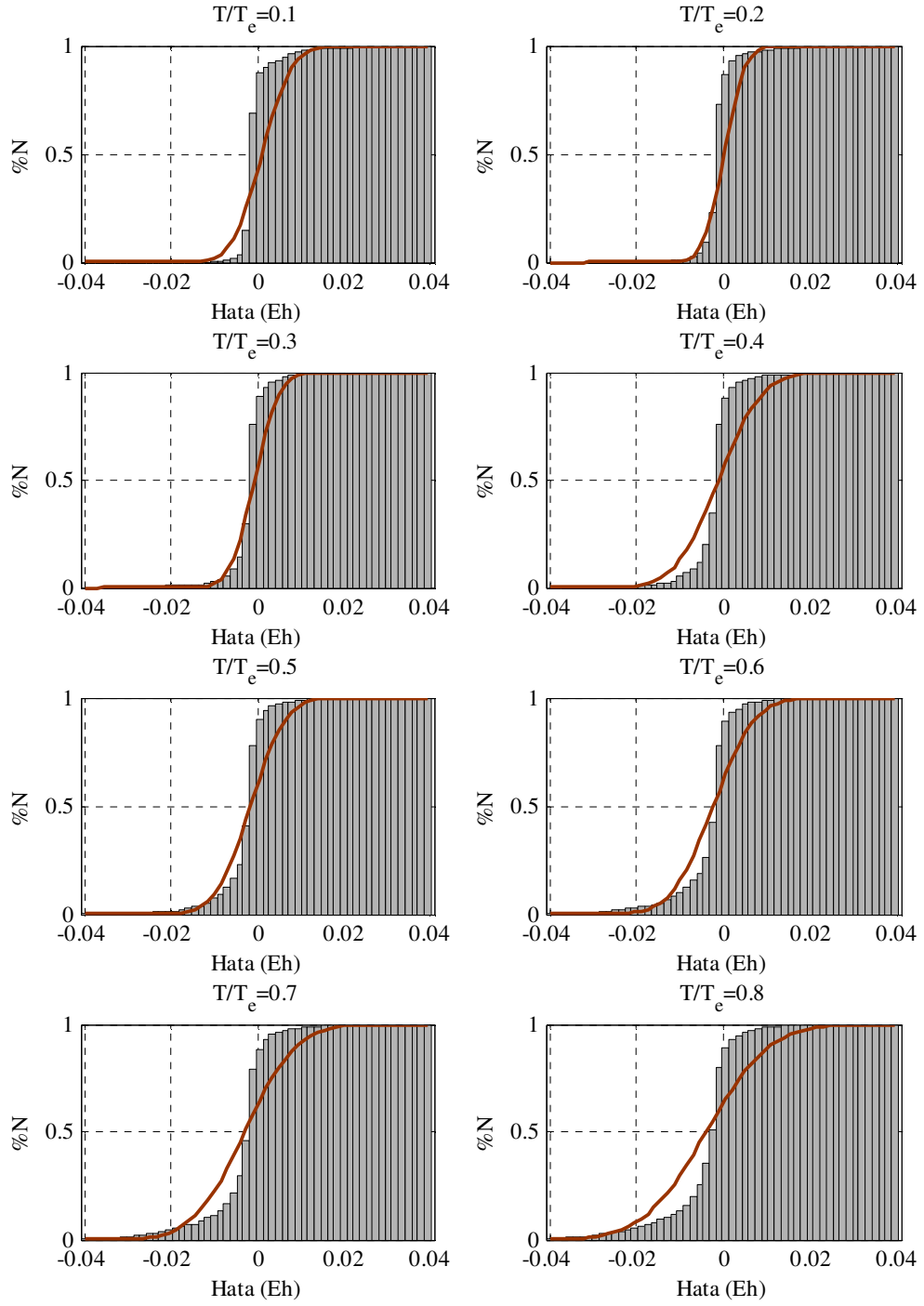
Şekil Ek 1.8 Birikimli dağılım eğrileri

Ek 2 Çevrimsel Enerji için Hata Histogramları, Olasılıksal ve Birikimli Dağılım Eğrileri

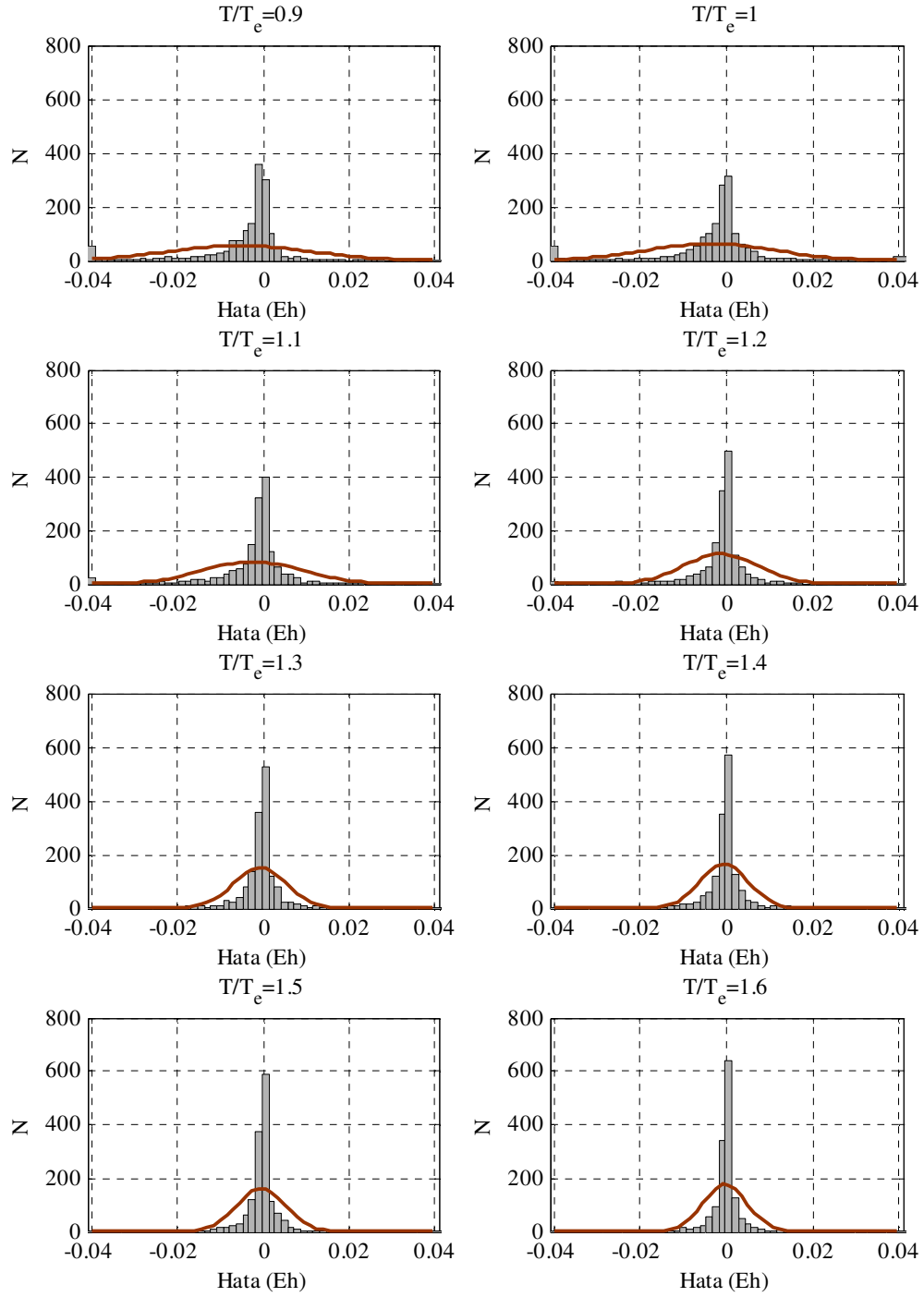
Önerilen bağıntı ile yapılan hataların histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri bazı $\tau(T/T_e)$ değerleri ($\tau=0.1:0.1:3.0$) için aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



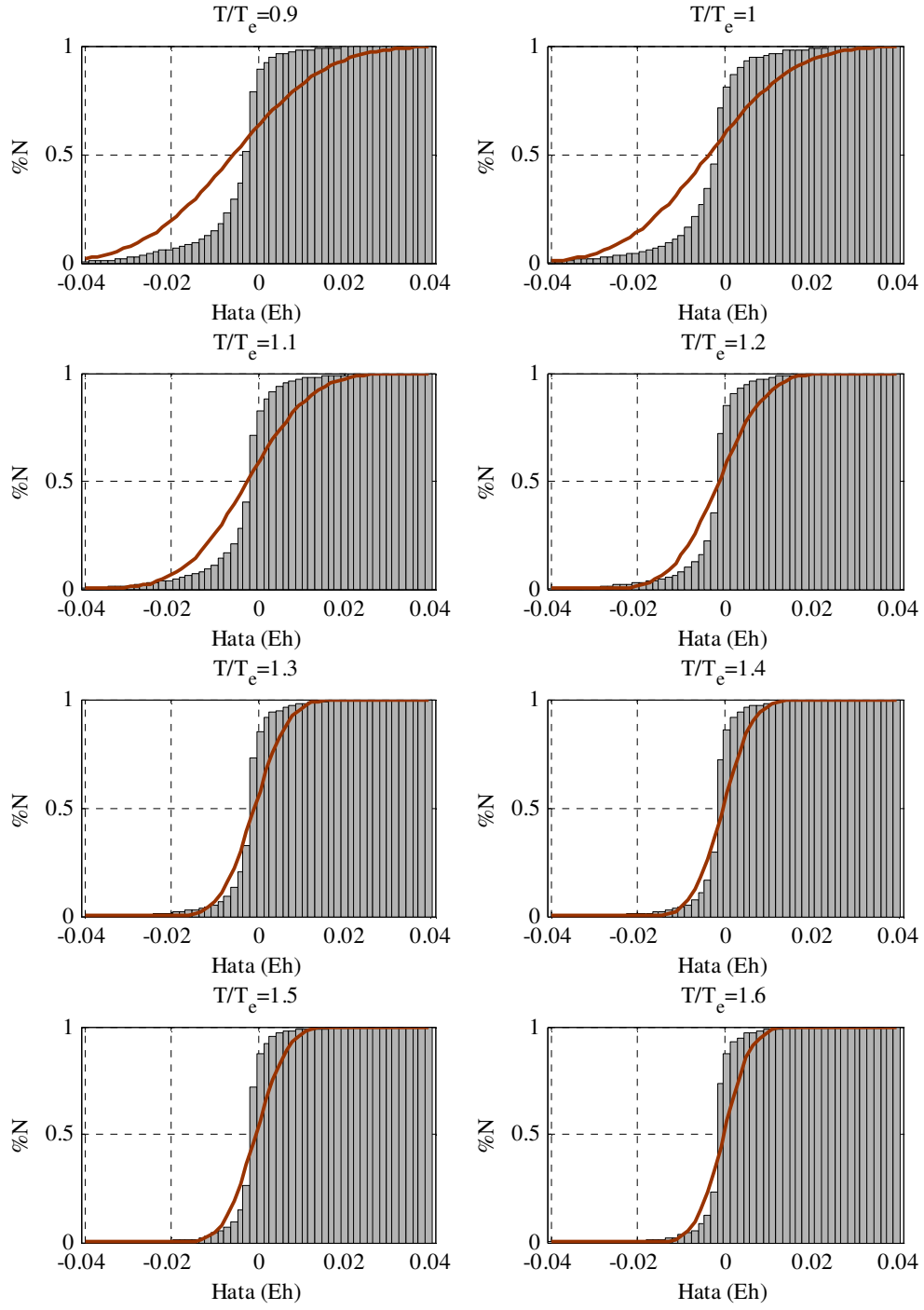
Şekil Ek 2.1 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



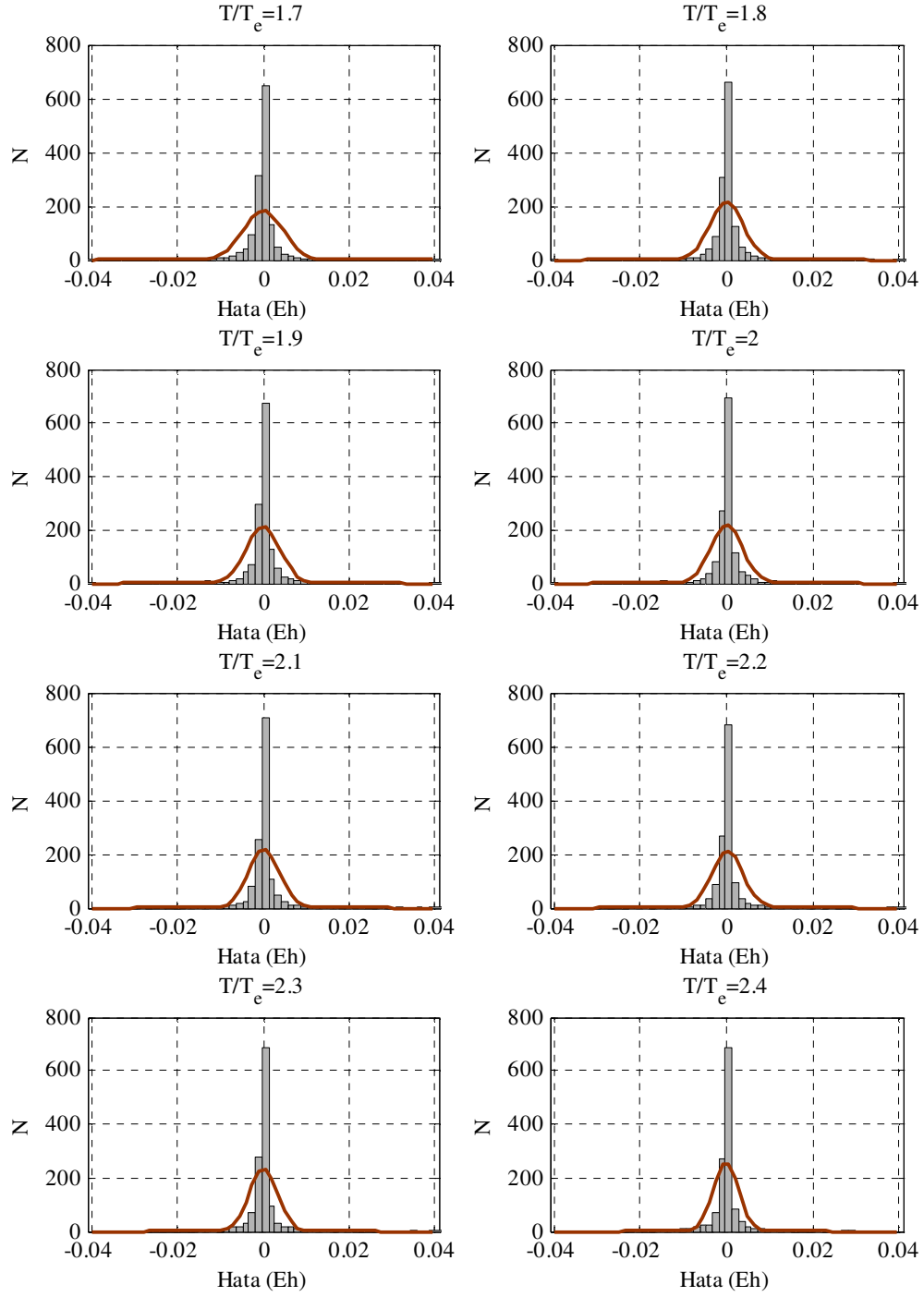
Şekil Ek 2.2 Birikimli dağılım eğrileri



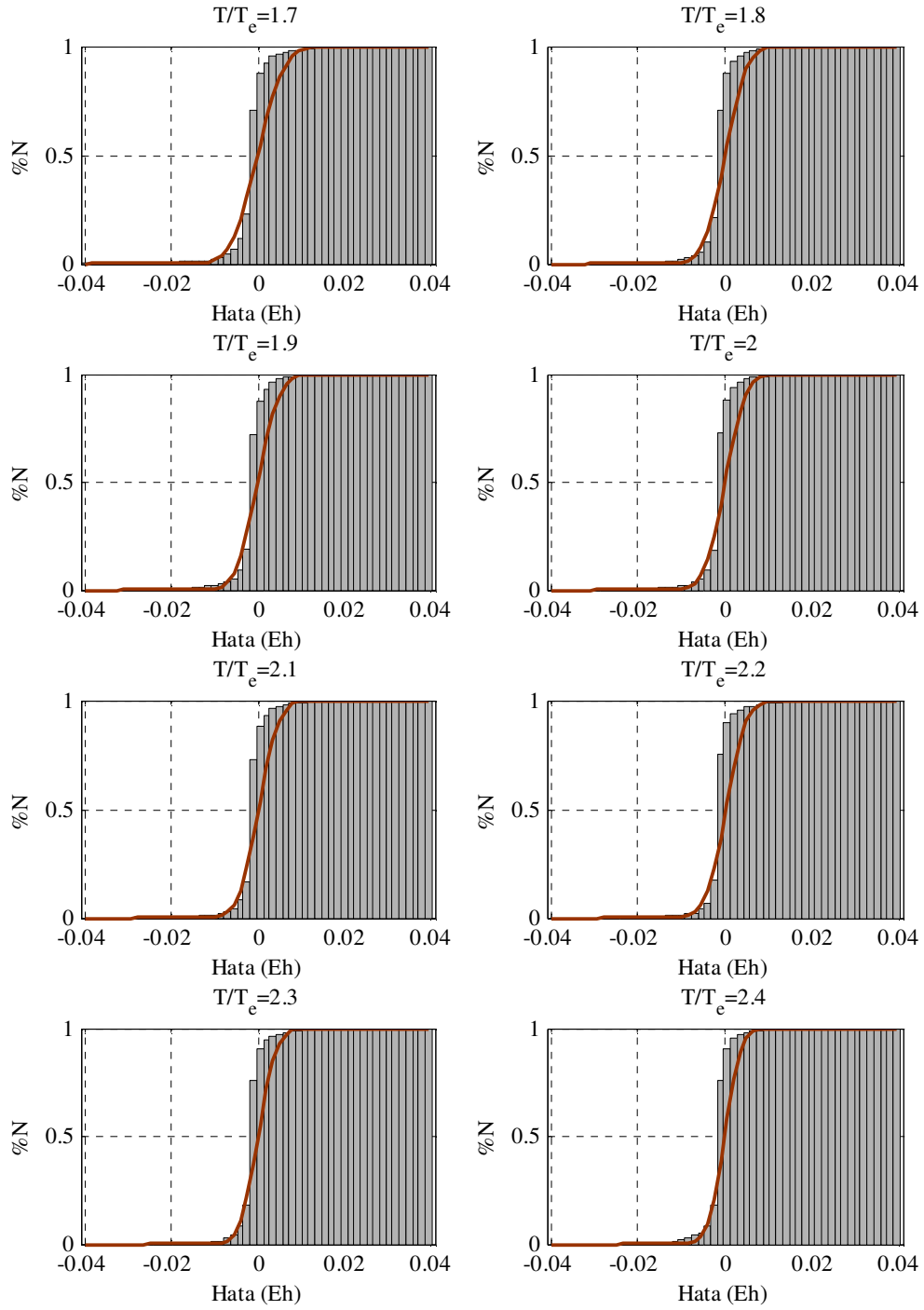
Şekil Ek 2.3 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



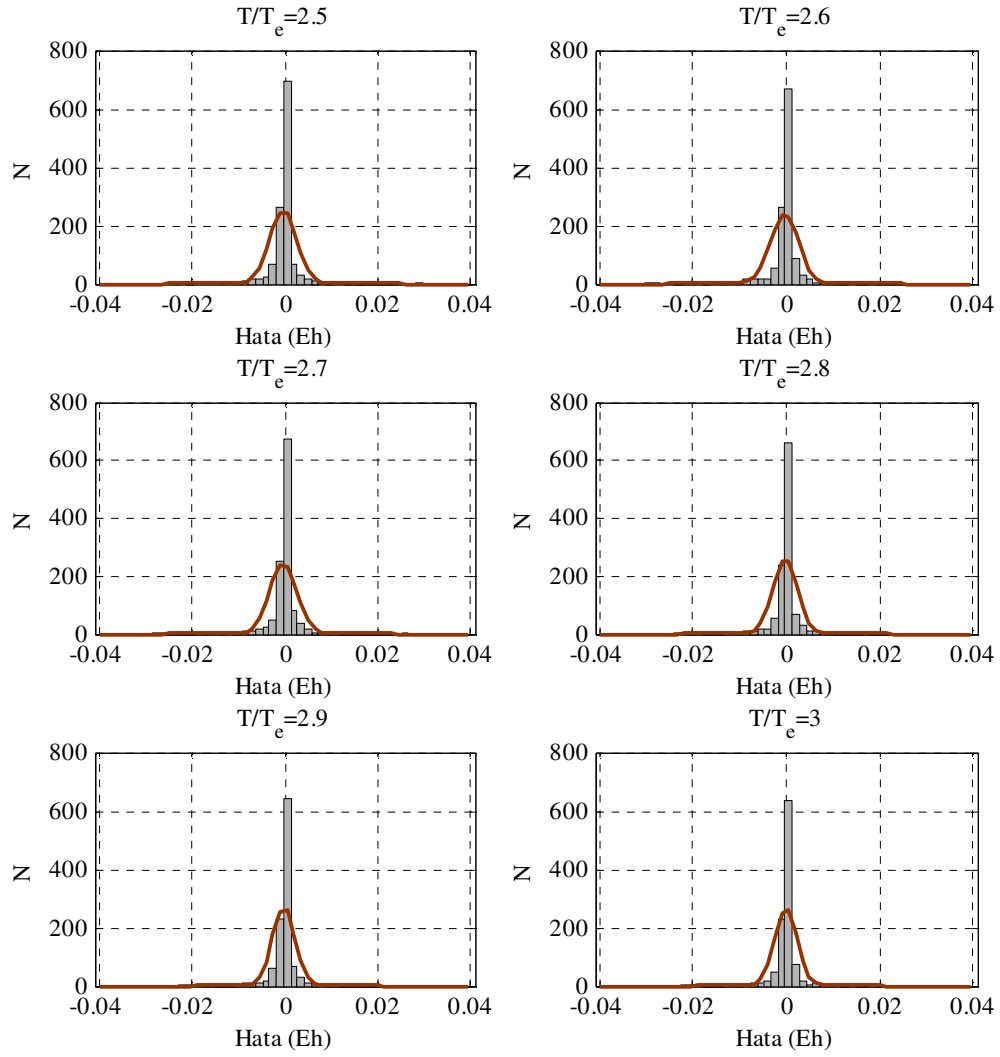
Şekil Ek 2.4 Birikimli dağılım eğrileri



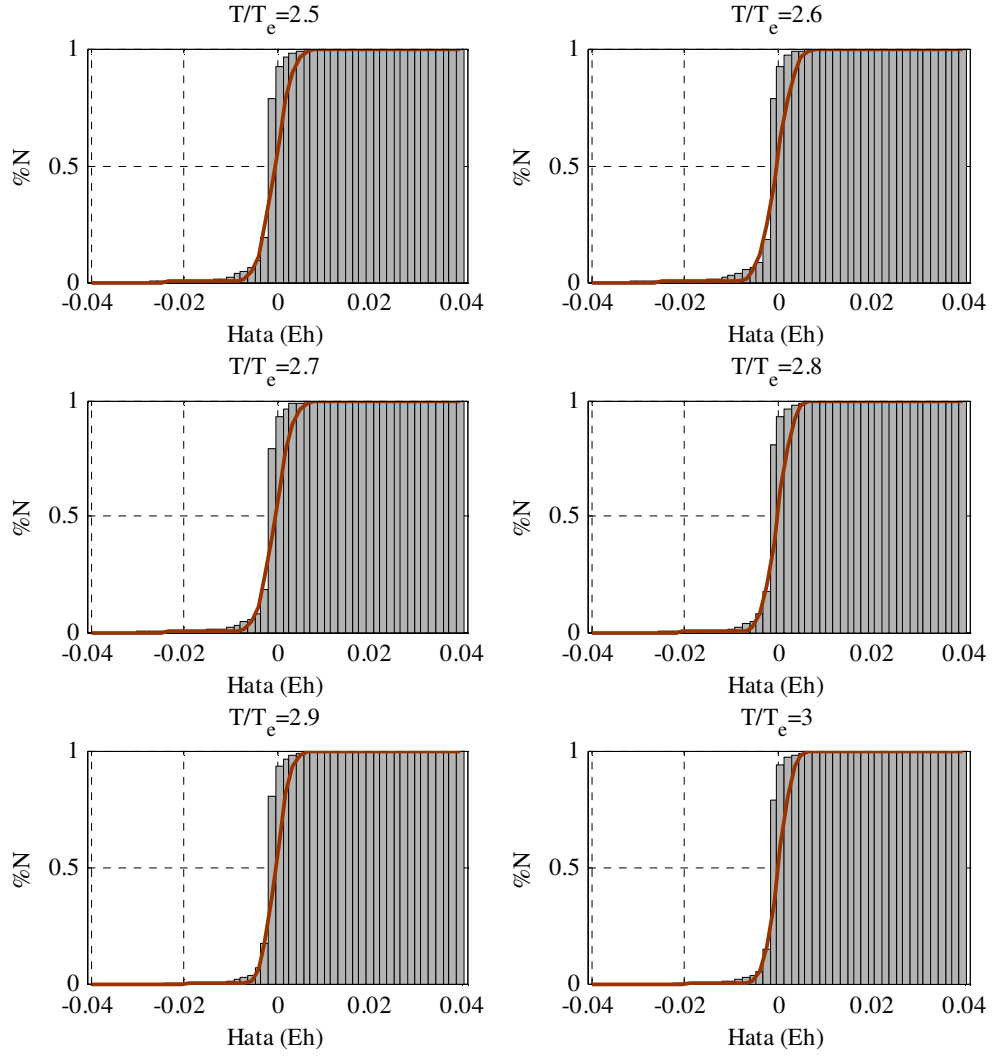
Şekil Ek 2.5 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



Şekil Ek 2.6 Birikimli dağılım eğrileri



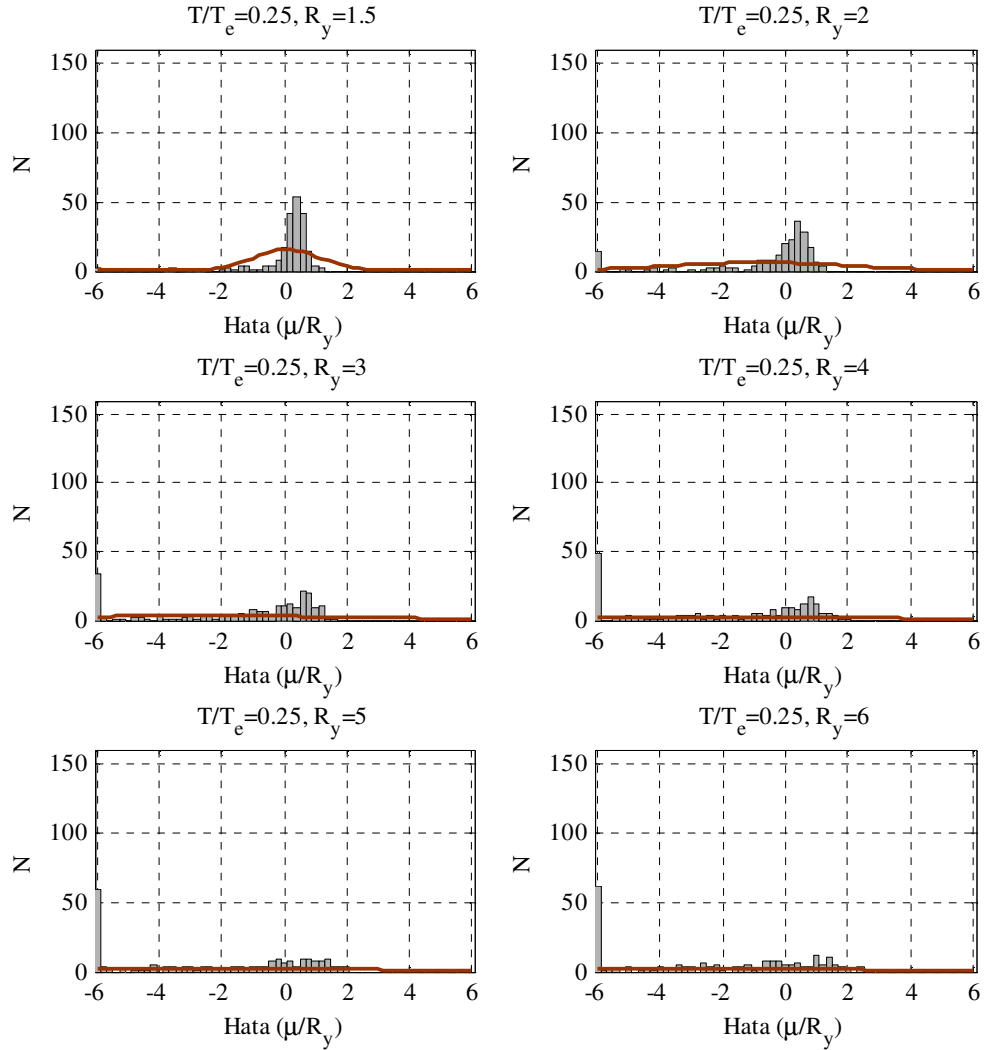
Şekil Ek 2.7 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



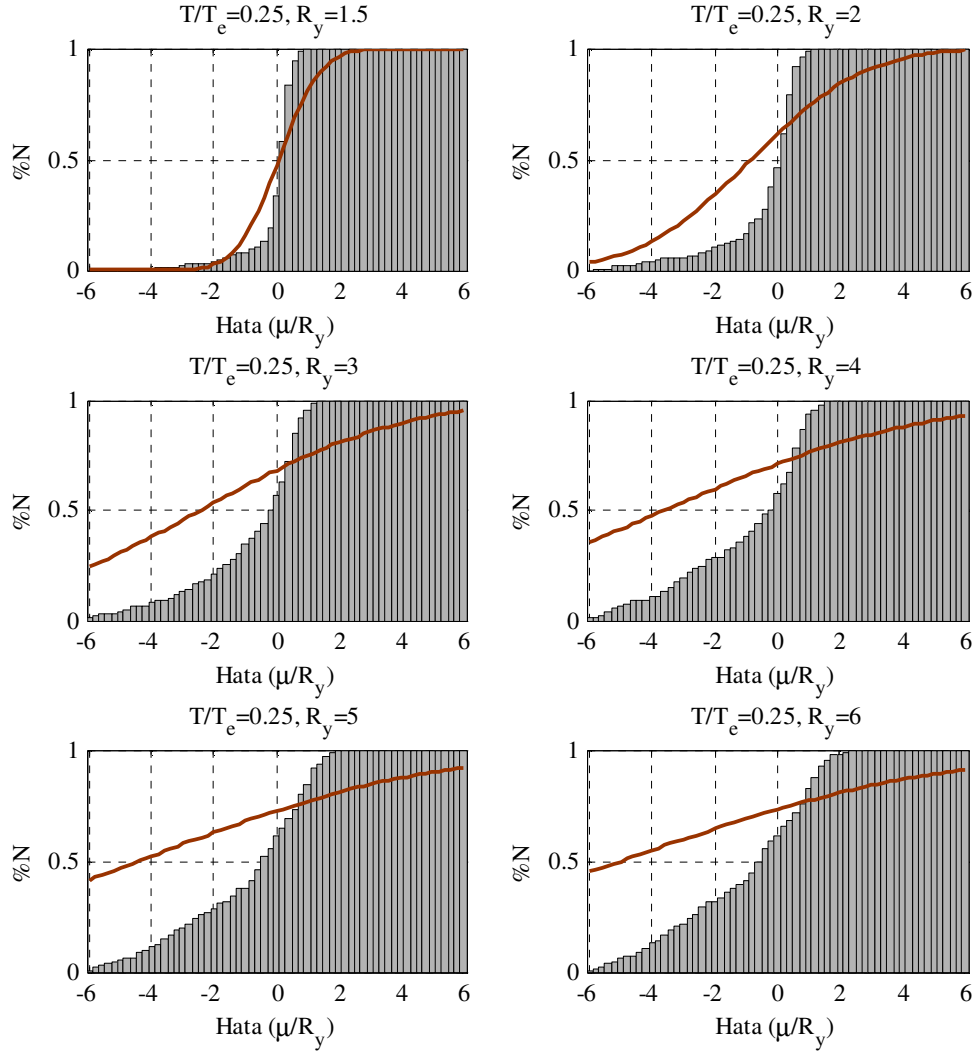
Şekil Ek 2.8 Birikimli dağılım eğrileri

Ek 3 Elastik Olmayan Yerdeğiştirme Oranı için Hata Histogramları, Olasılıksal ve Birikimli Dağılım Eğrileri

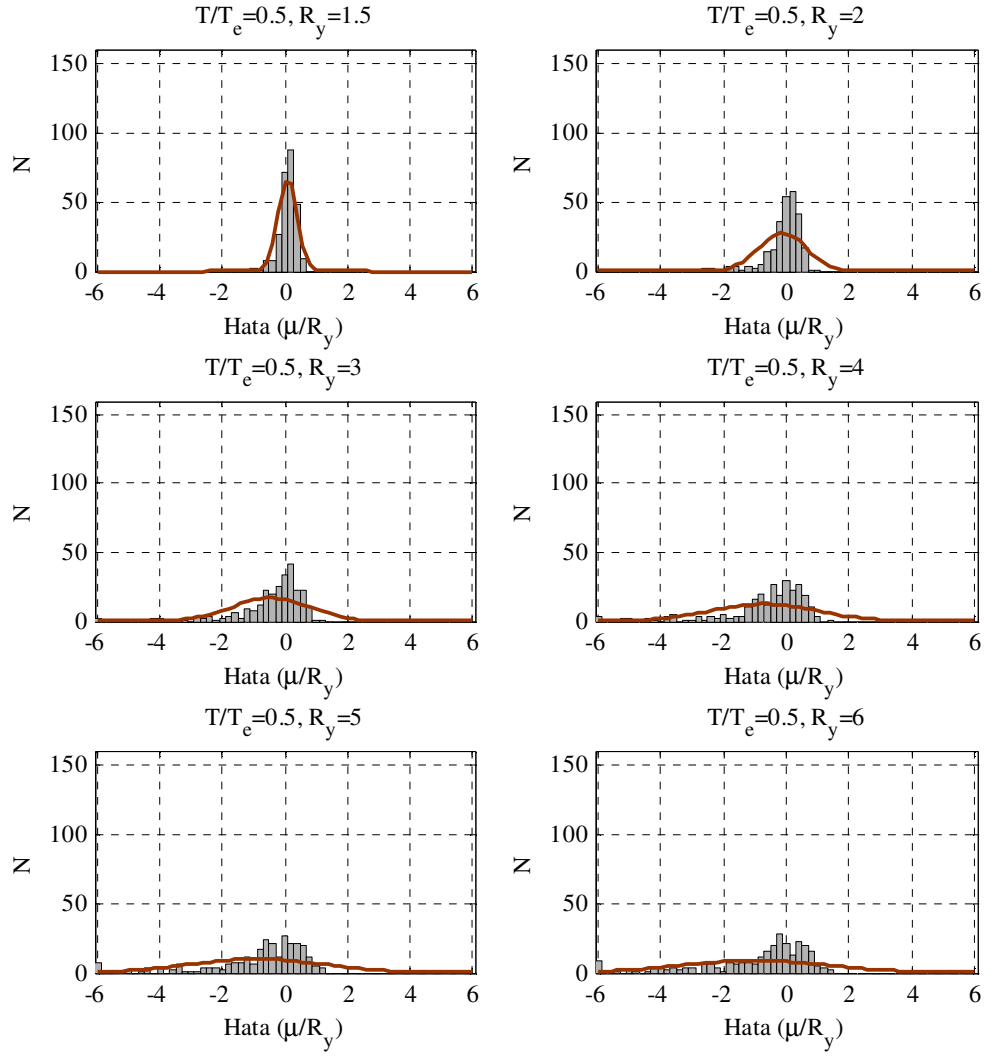
Önerilen iteratif yöntem ile yapılan hataların histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri bazı $\tau(T/T_e)$ değerleri için aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



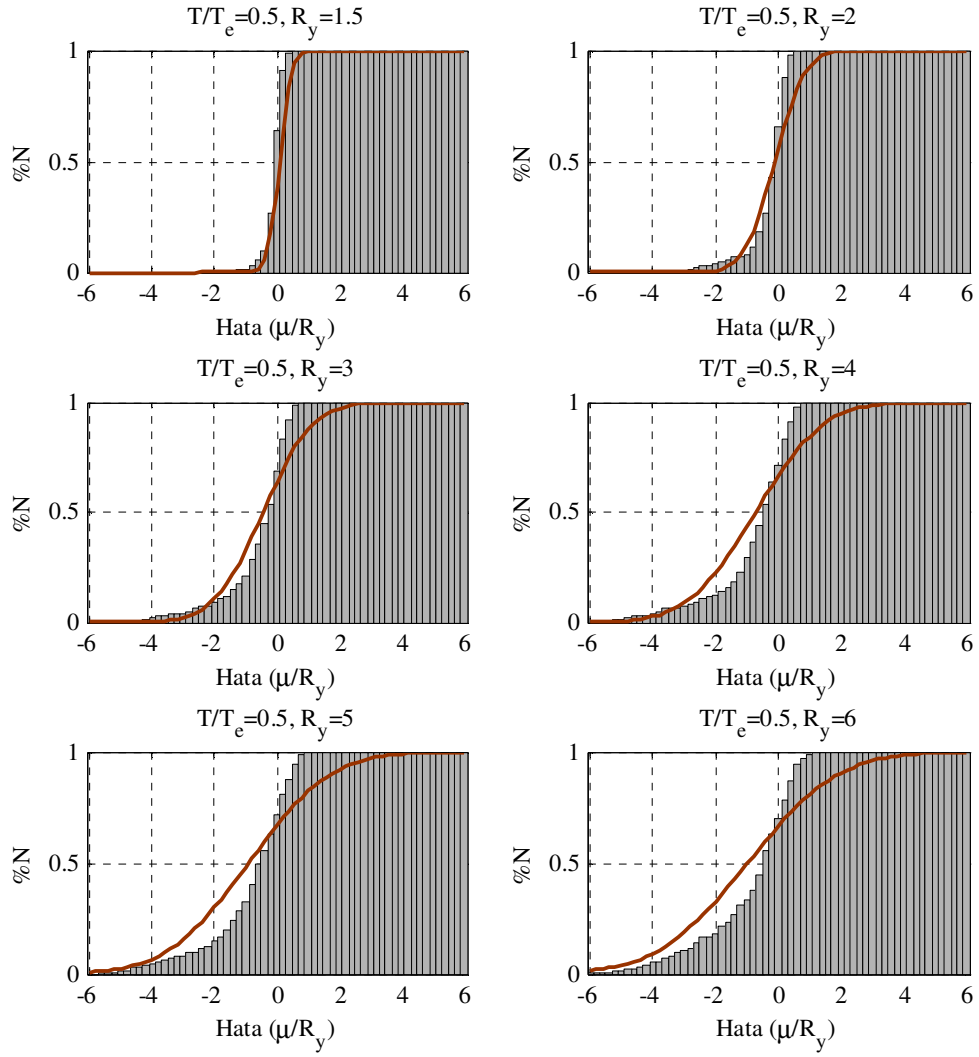
Şekil Ek 3.1 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



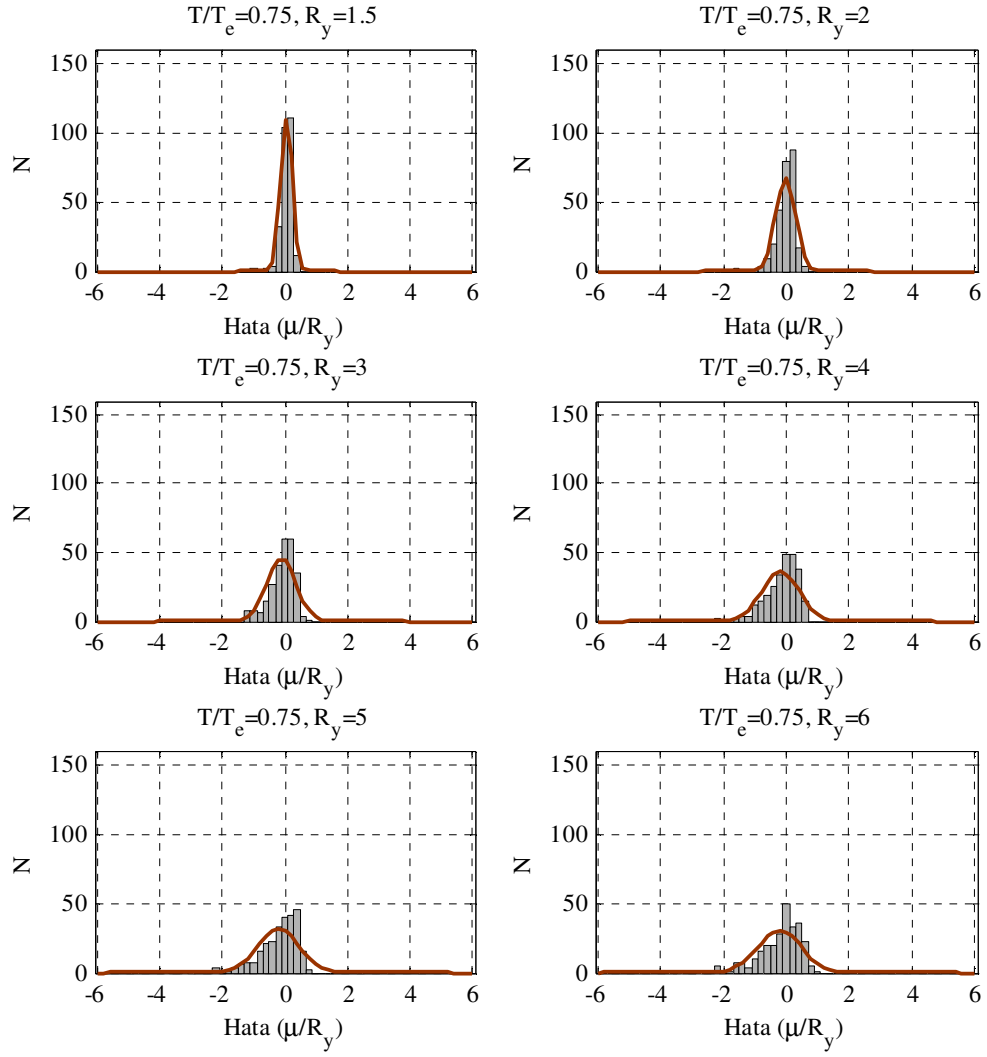
Şekil Ek 3.2 Birikimli dağılım eğrileri



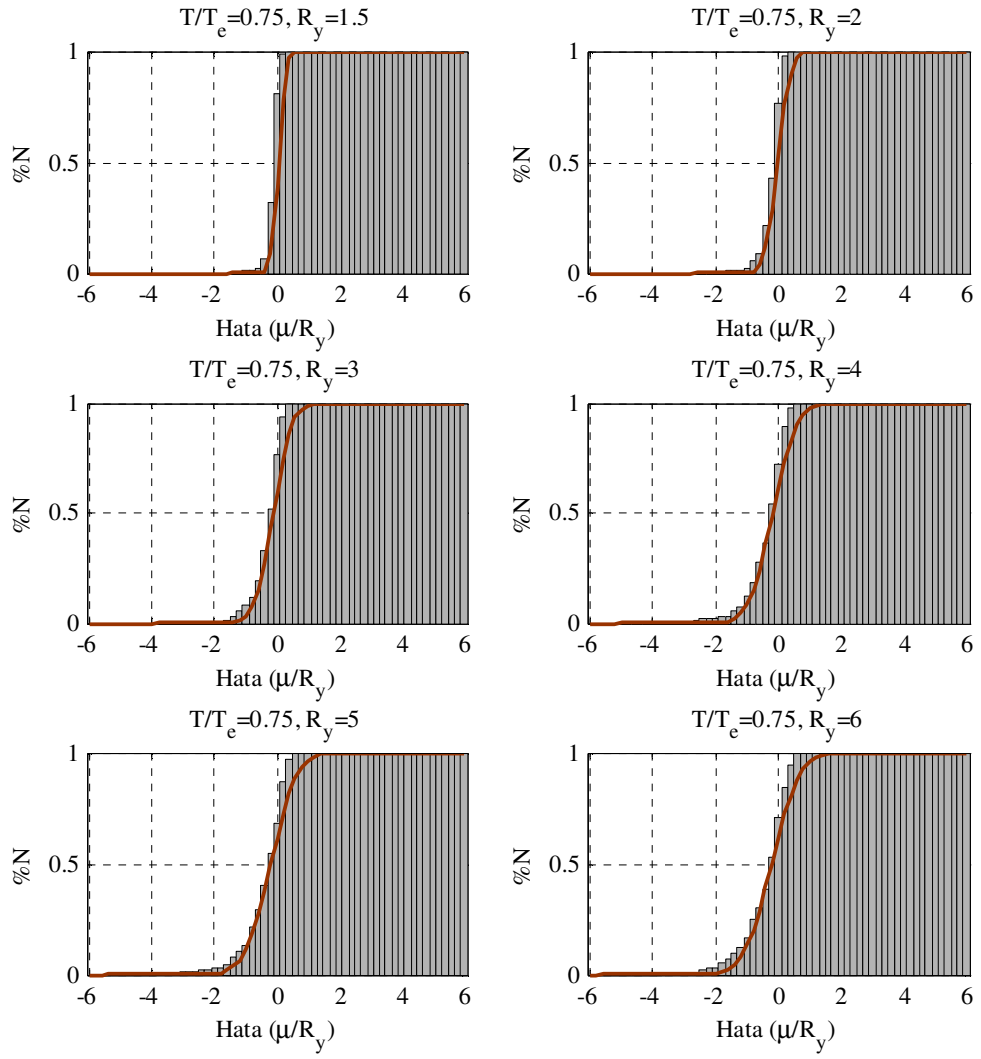
Şekil Ek 3.3 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



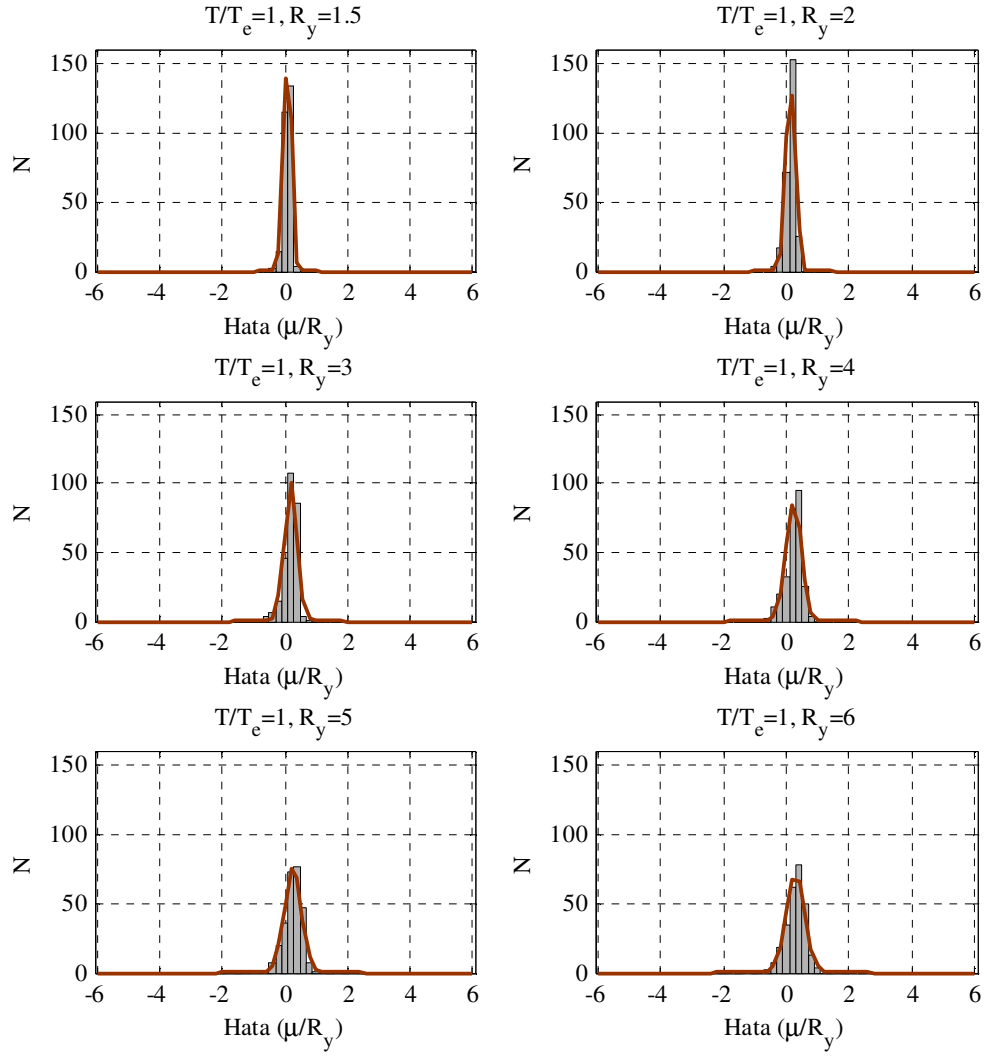
Şekil Ek 3.4 Birikimli dağılım eğrileri



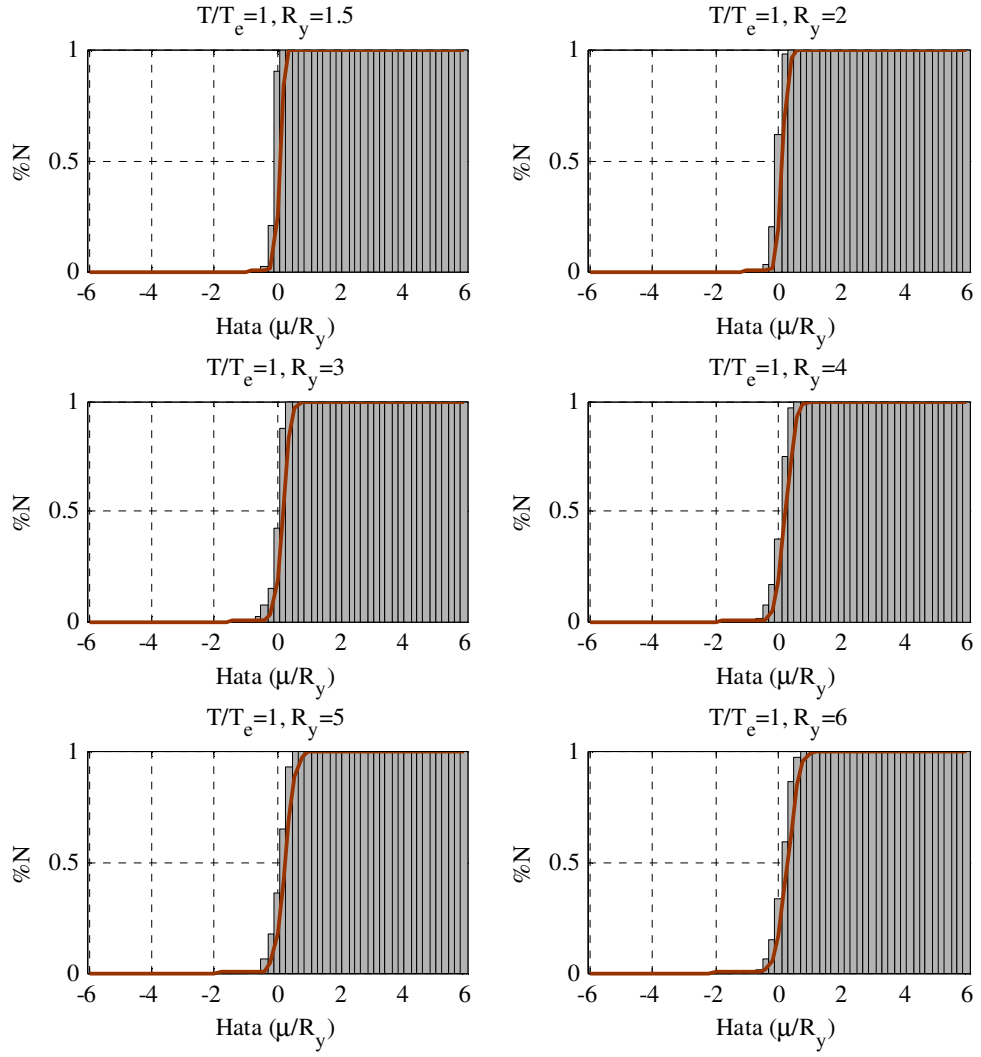
Şekil Ek 3.5 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



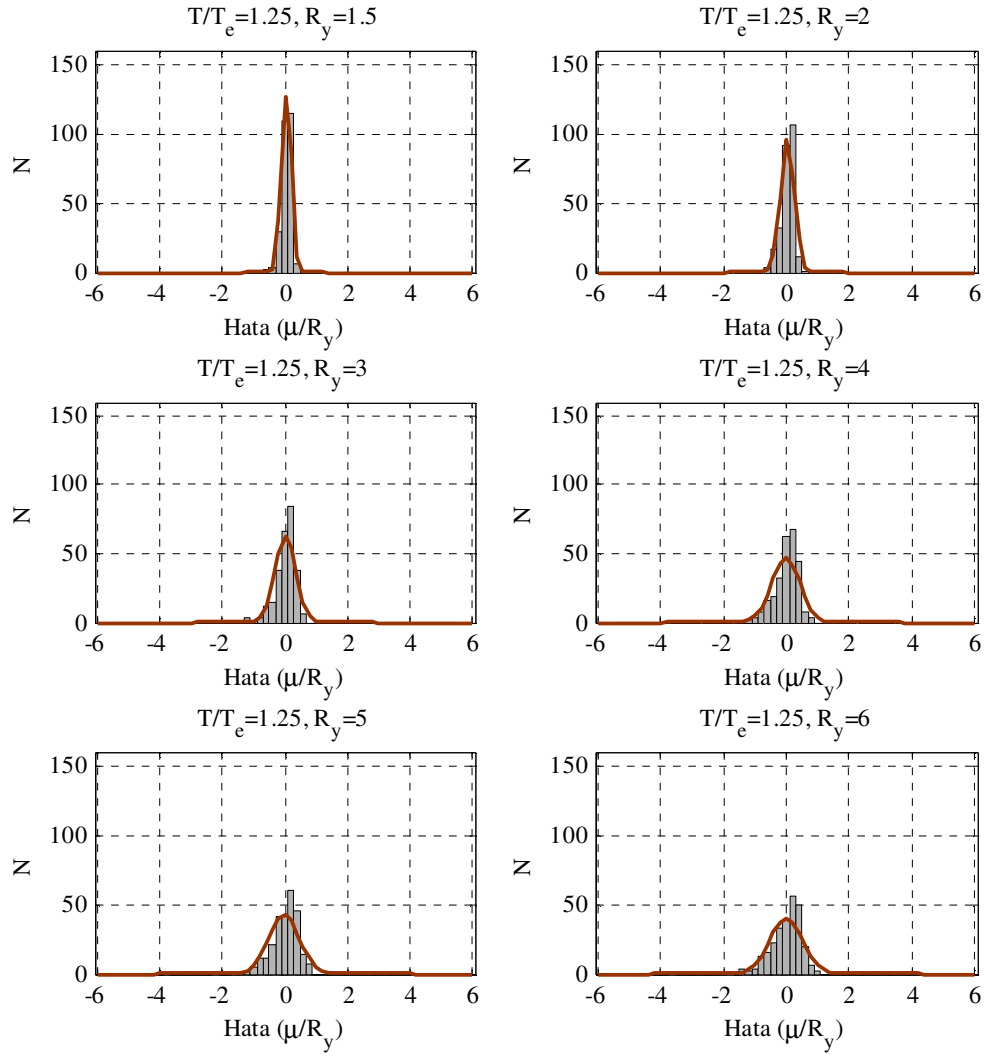
Şekil Ek 3.6 Birikimli dağılım eğrileri



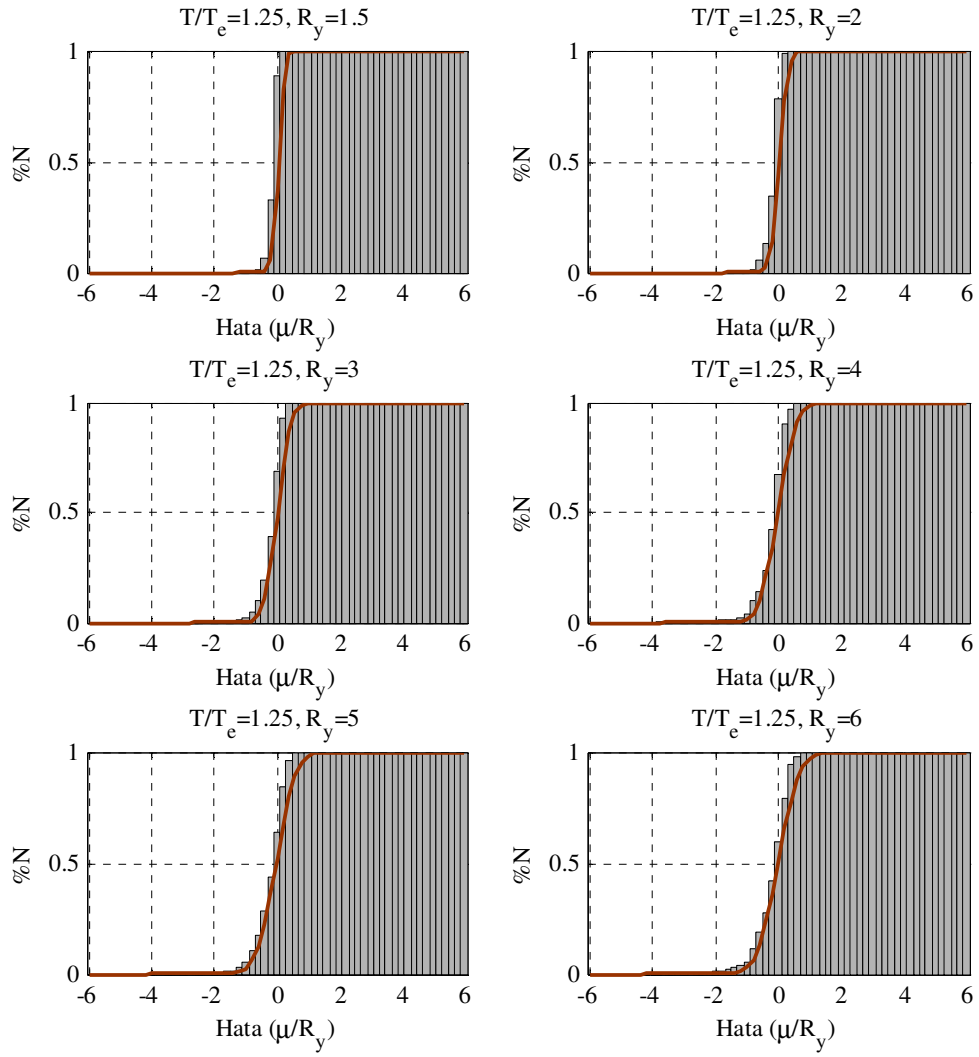
Şekil Ek 3.7 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



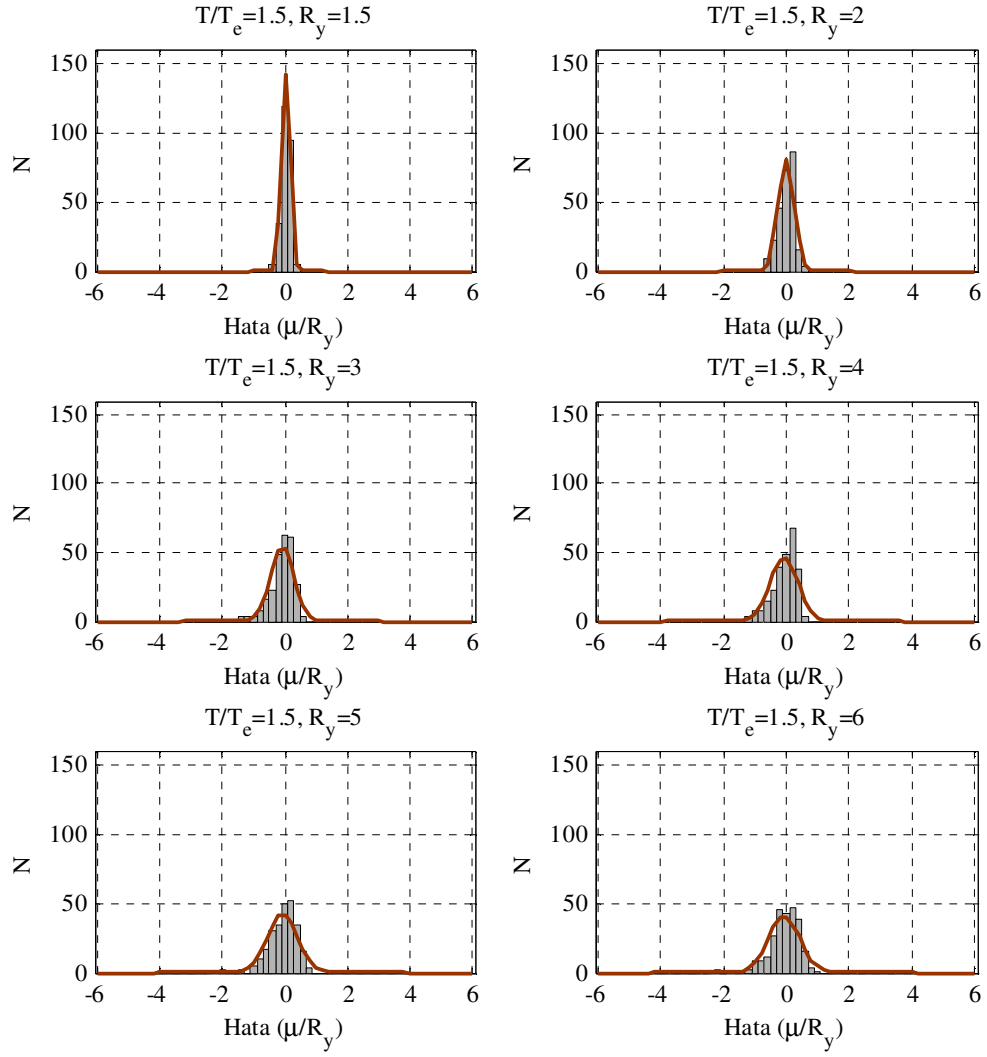
Şekil Ek 3.8 Birikimli dağılım eğrileri



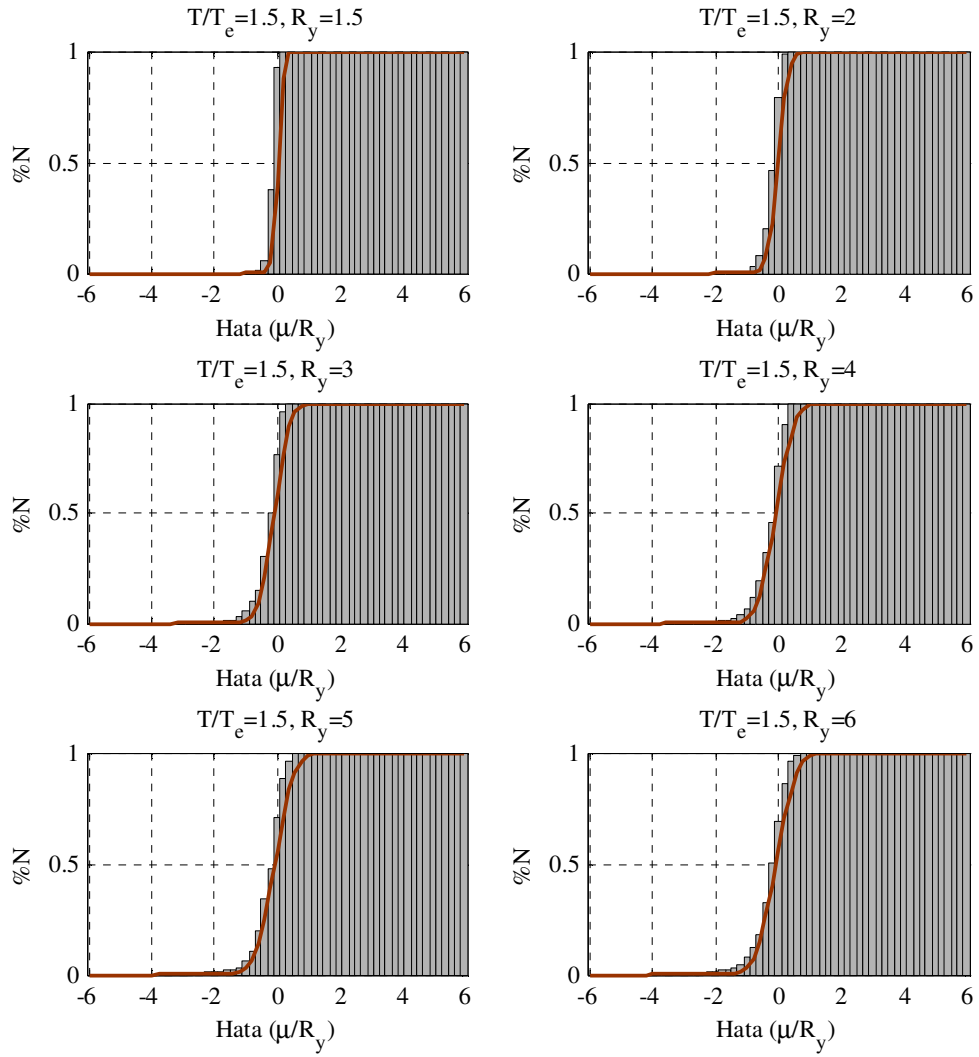
Şekil Ek 3.9 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



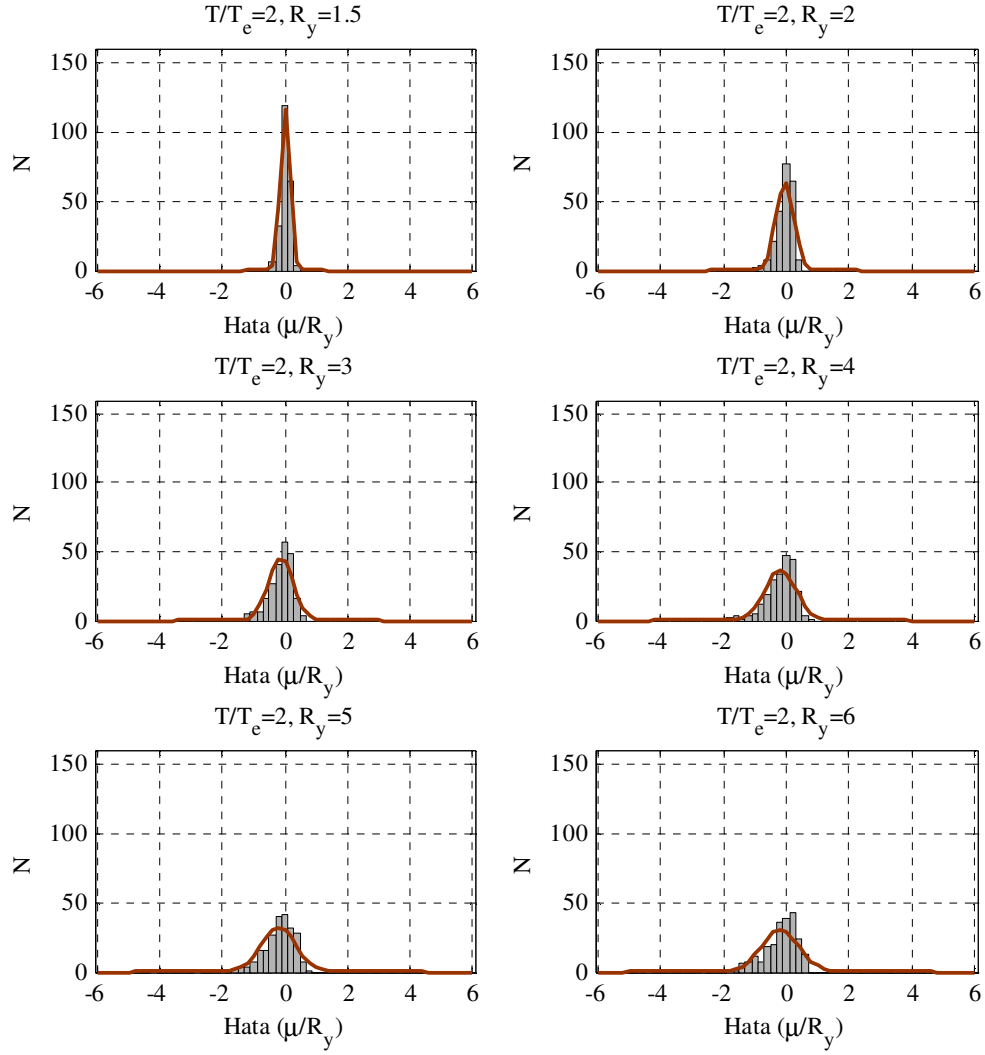
Şekil Ek 3.10 Birikimli dağılım eğrileri



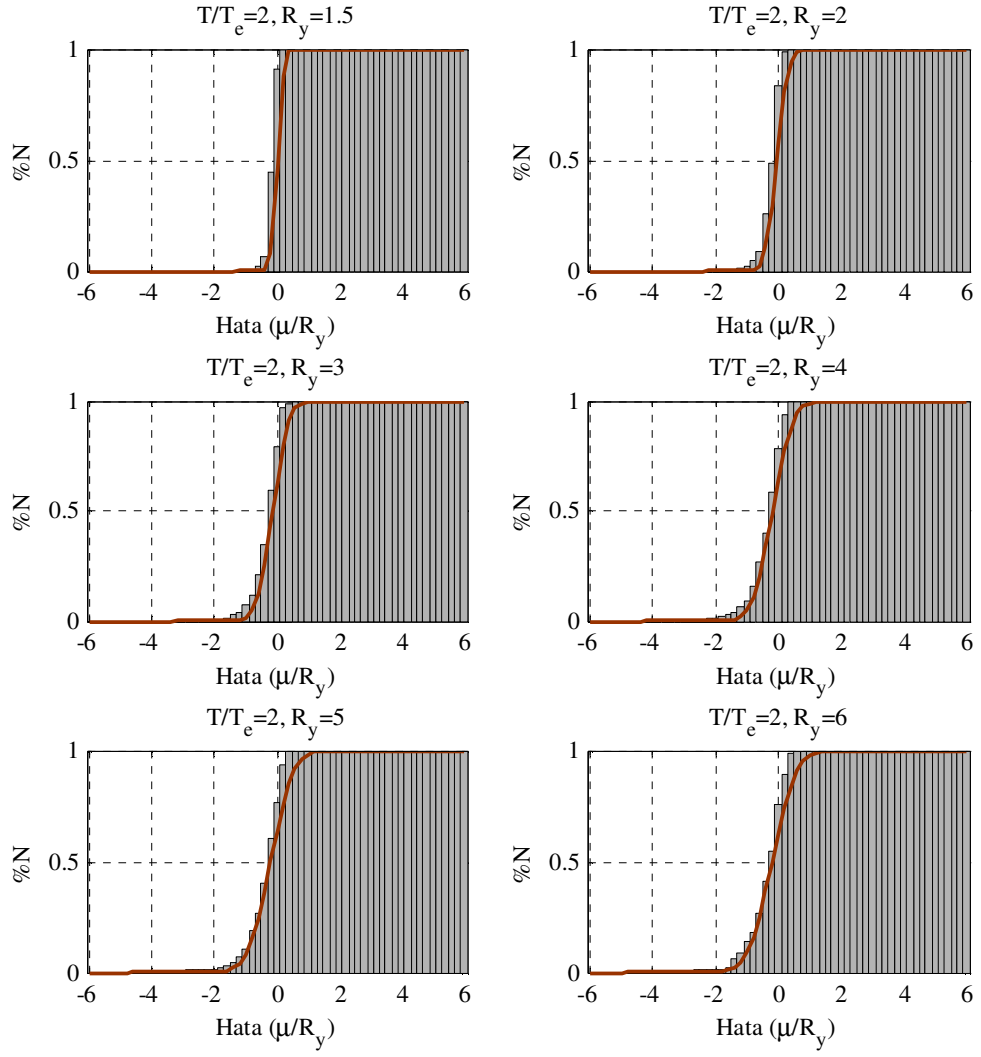
Şekil Ek 3.11 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



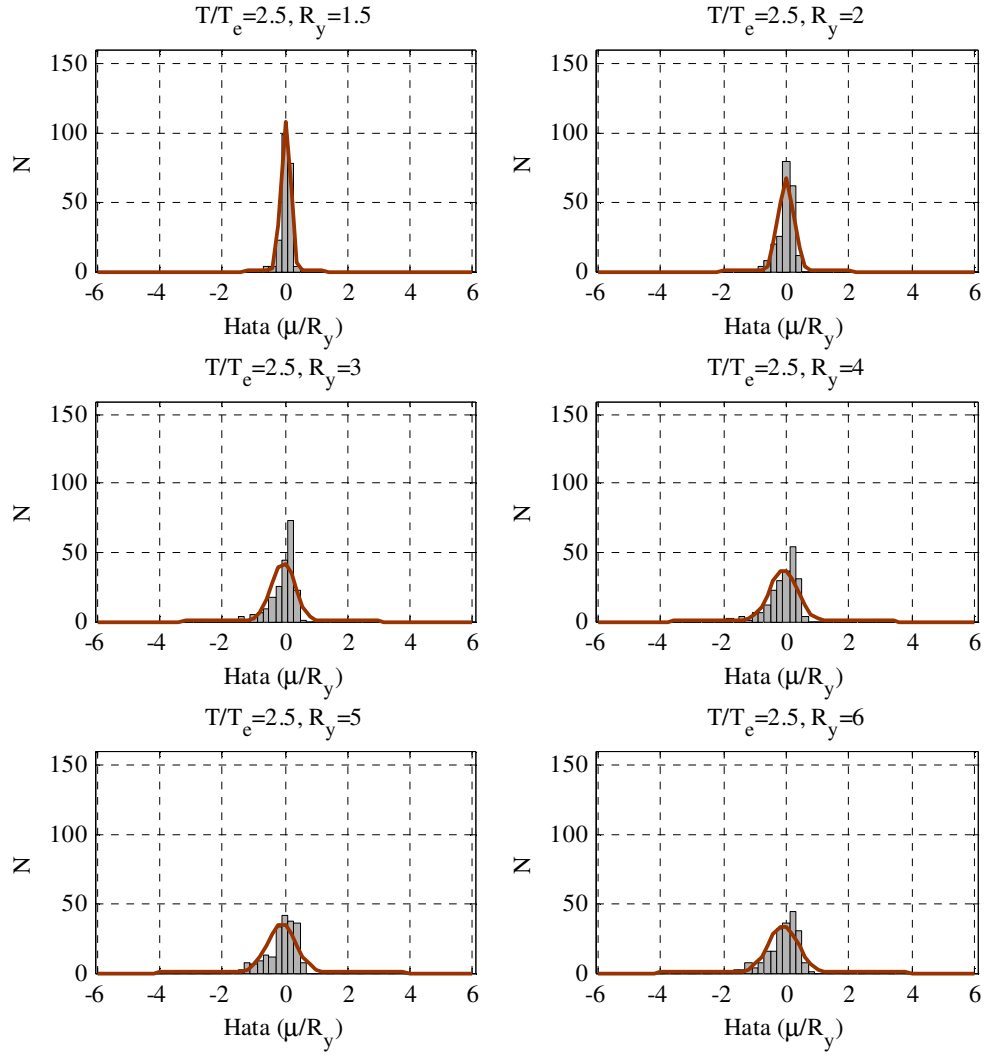
Şekil Ek 3.12 Birikimli dağılım eğrileri



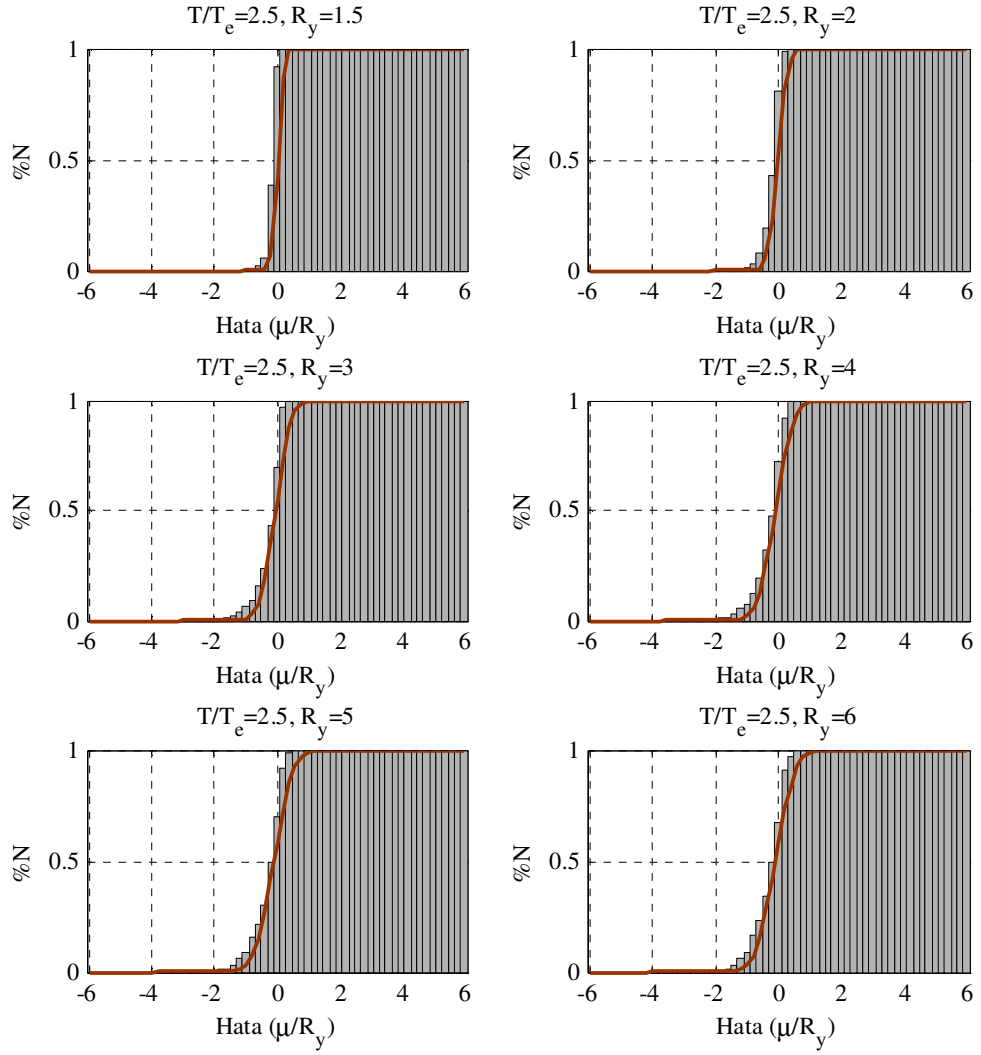
Şekil Ek 3.13 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



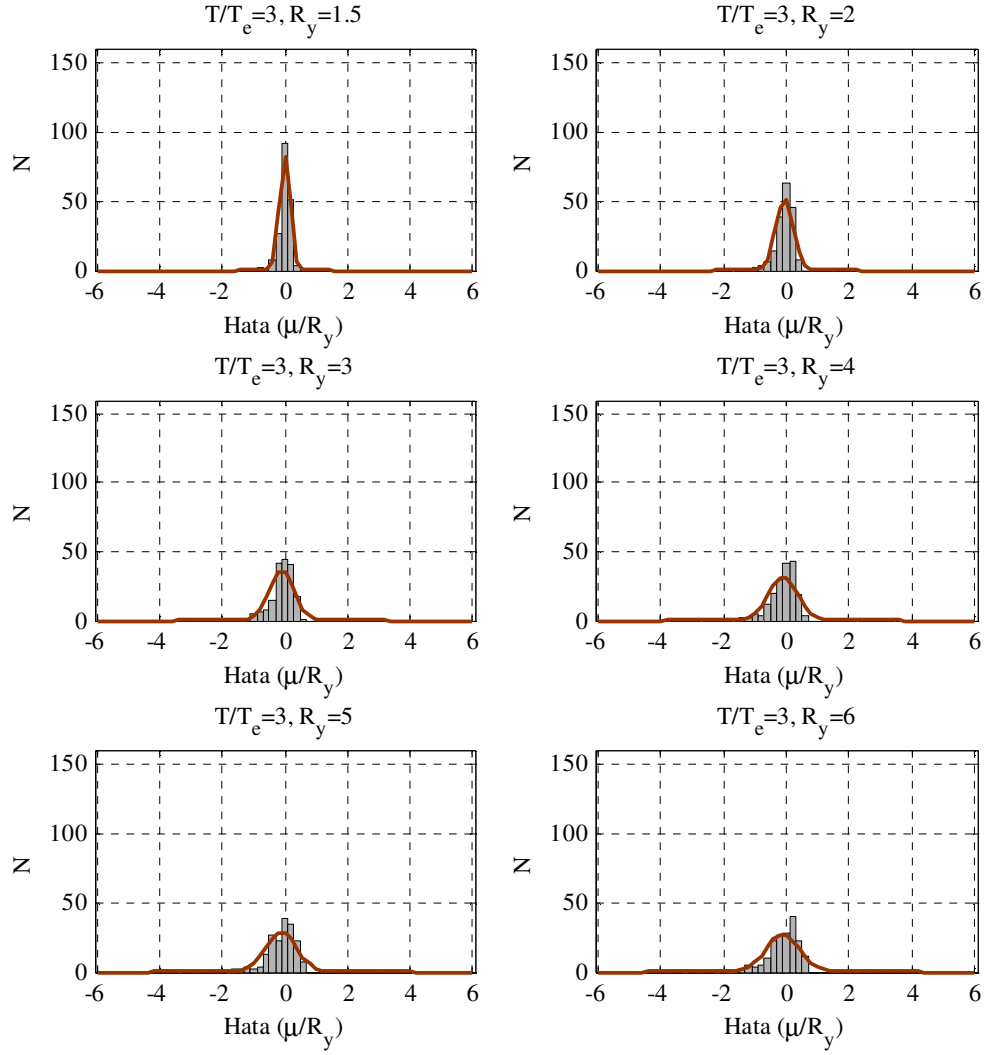
Şekil Ek 3.14 Birikimli dağılım eğrileri



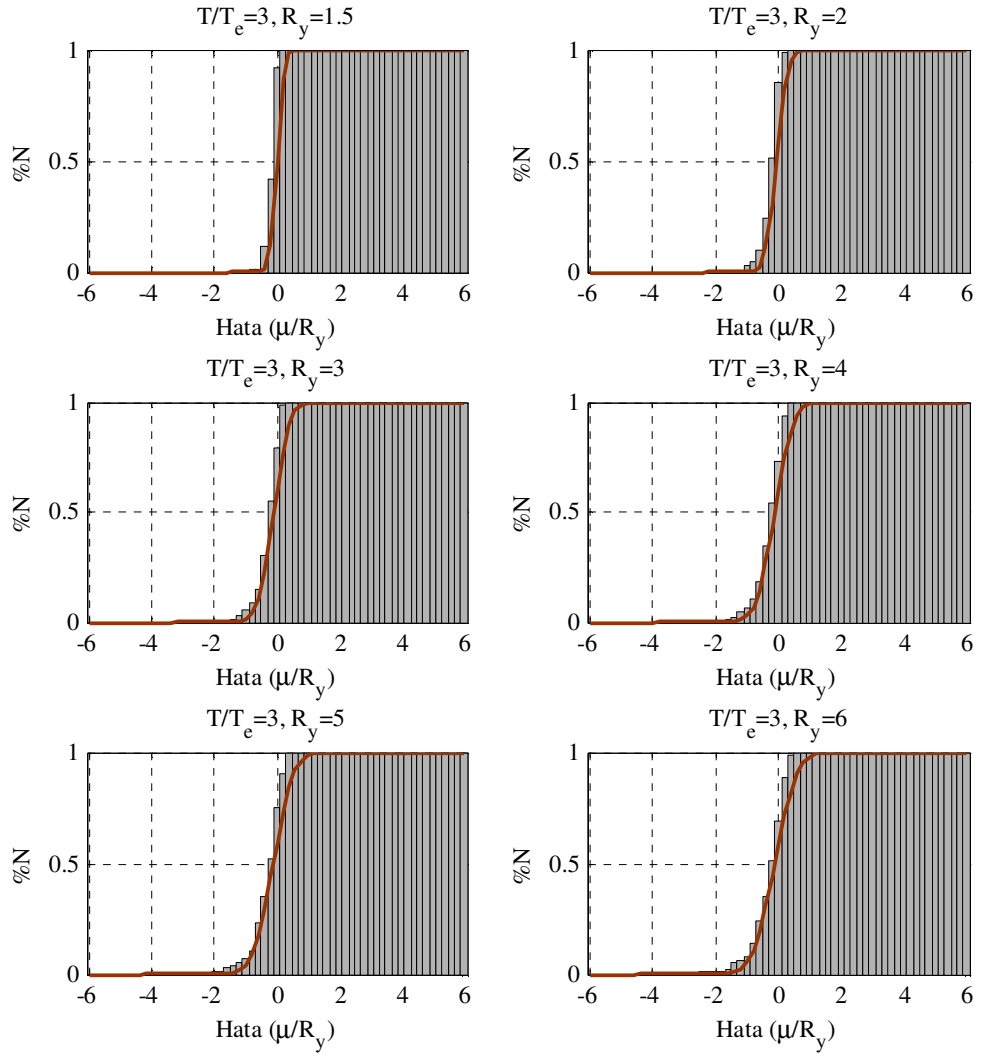
Şekil Ek 3.15 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



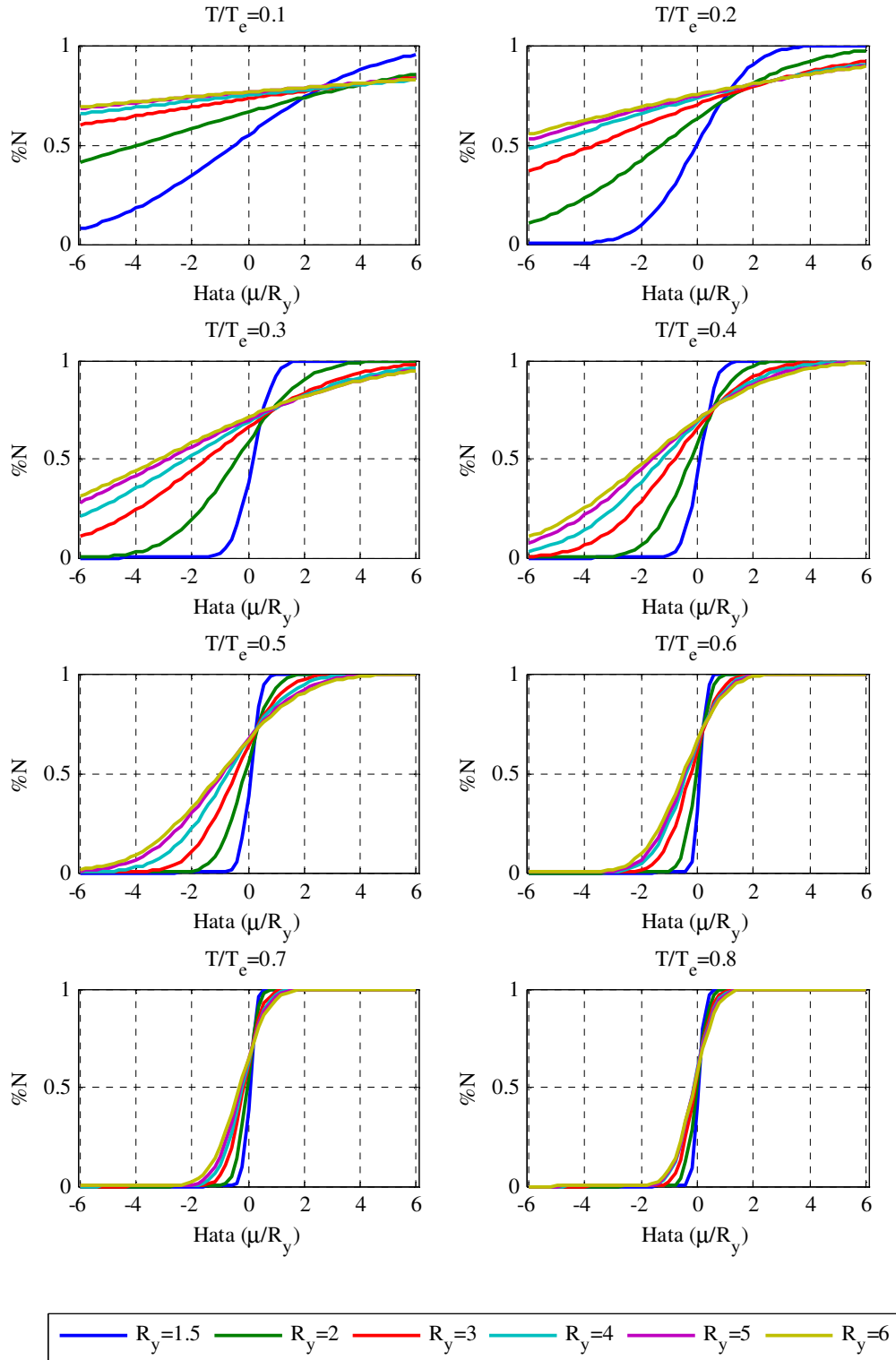
Şekil Ek 3.16 Birikimli dağılım eğrileri



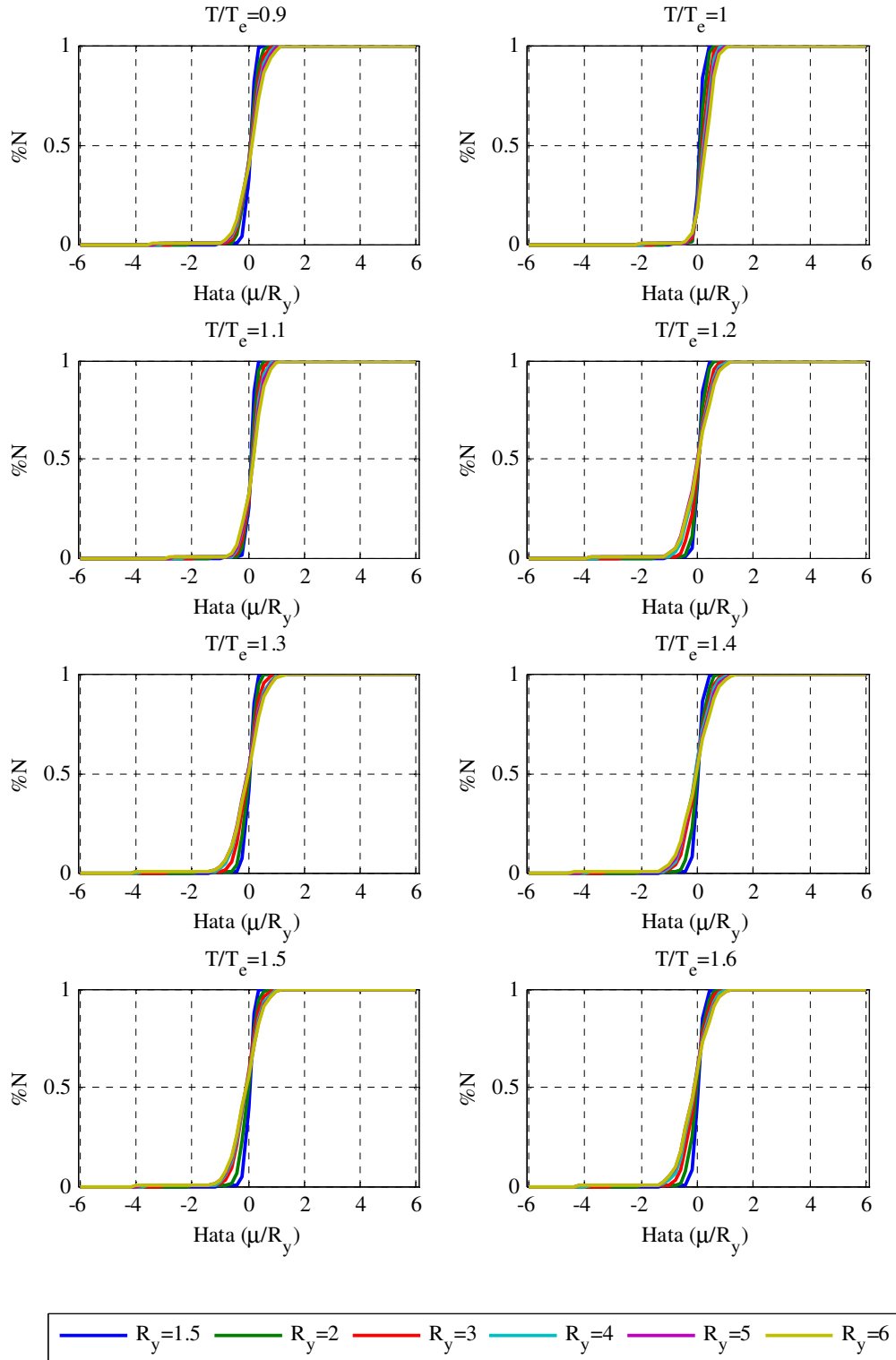
Şekil Ek 3.17 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



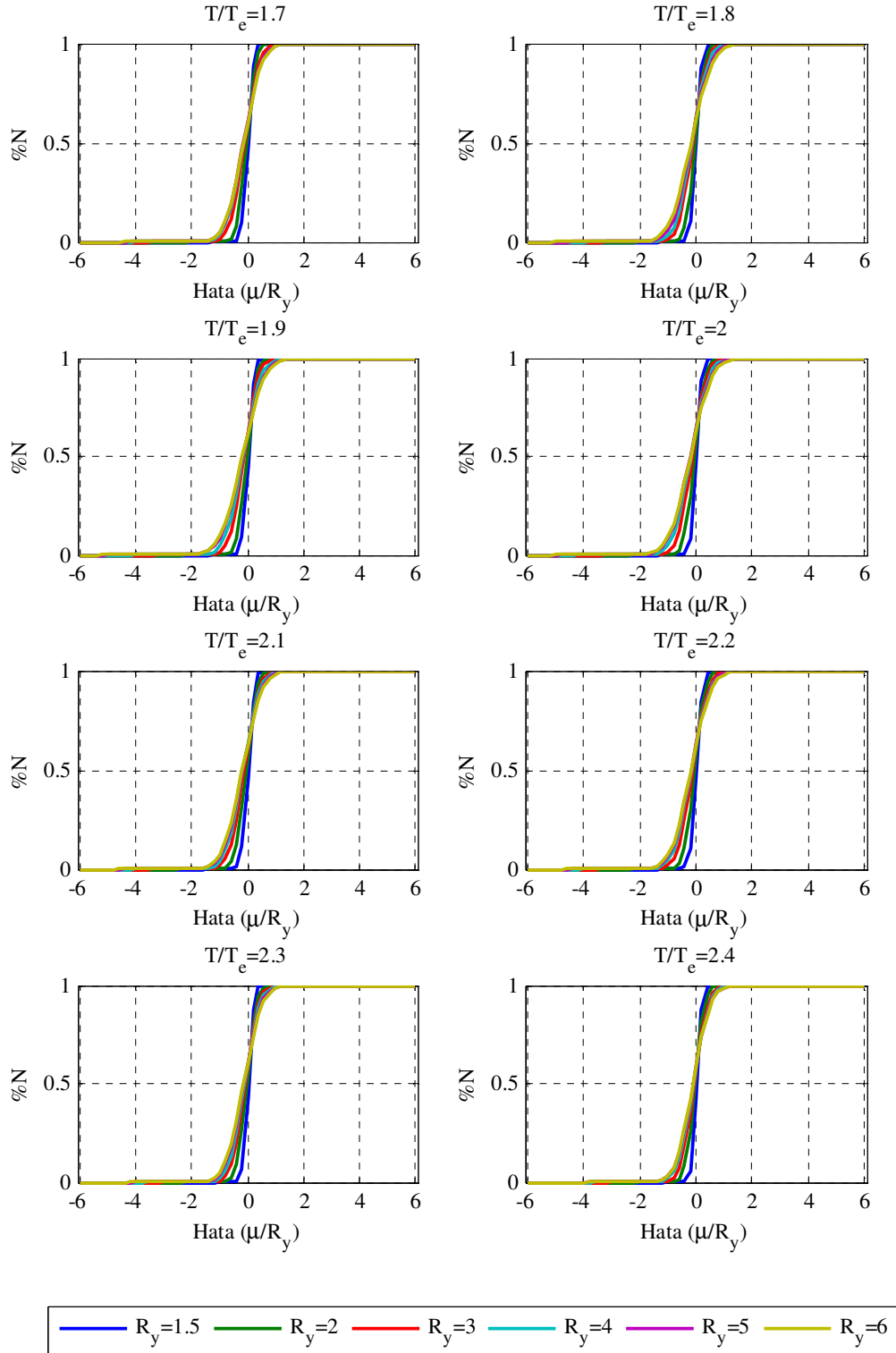
Şekil Ek 3.18 Birikimli dağılım eğrileri



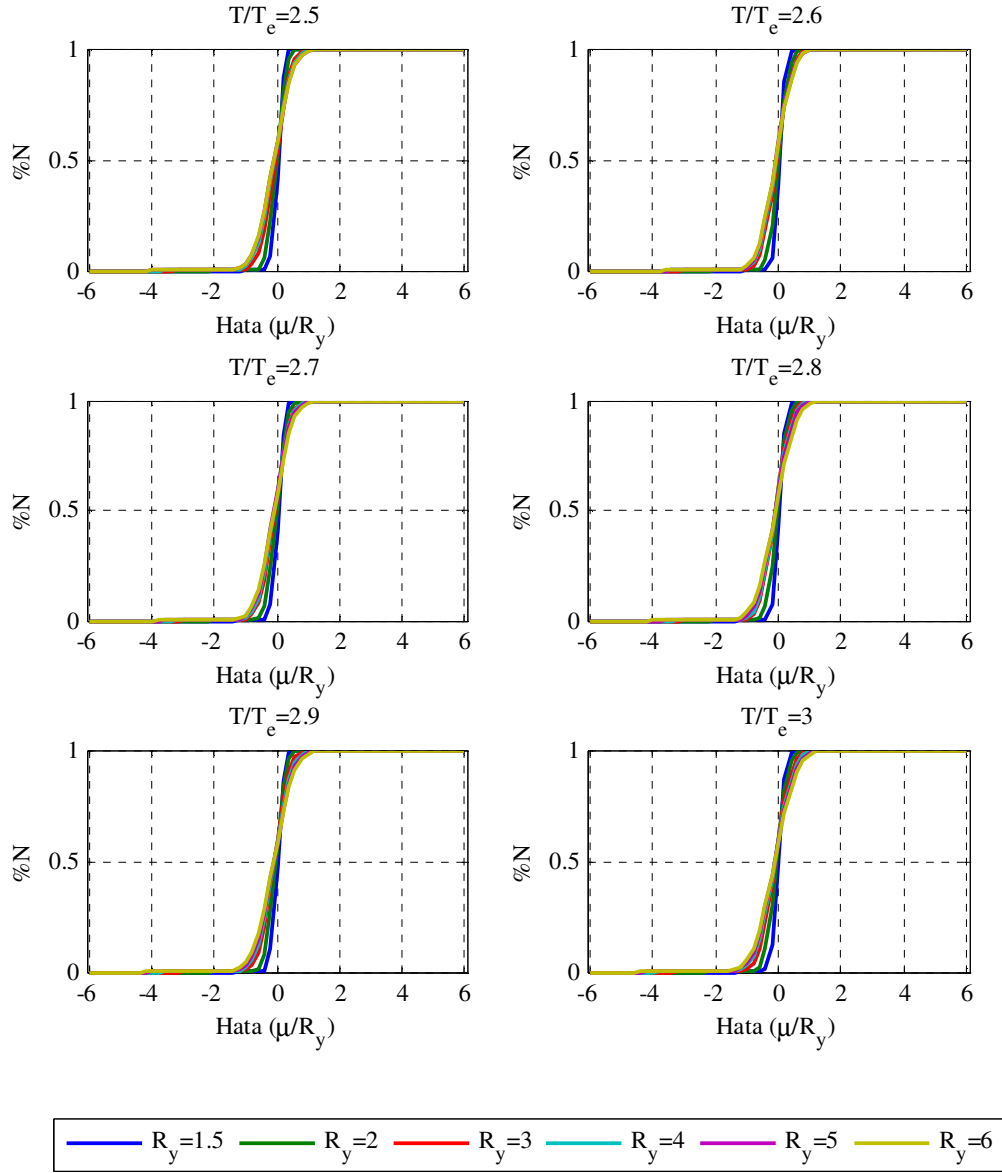
Şekil Ek 3.19 Birikimli dağılım eğrileri



Şekil Ek 3.20 Birikimli dağılım eğrileri



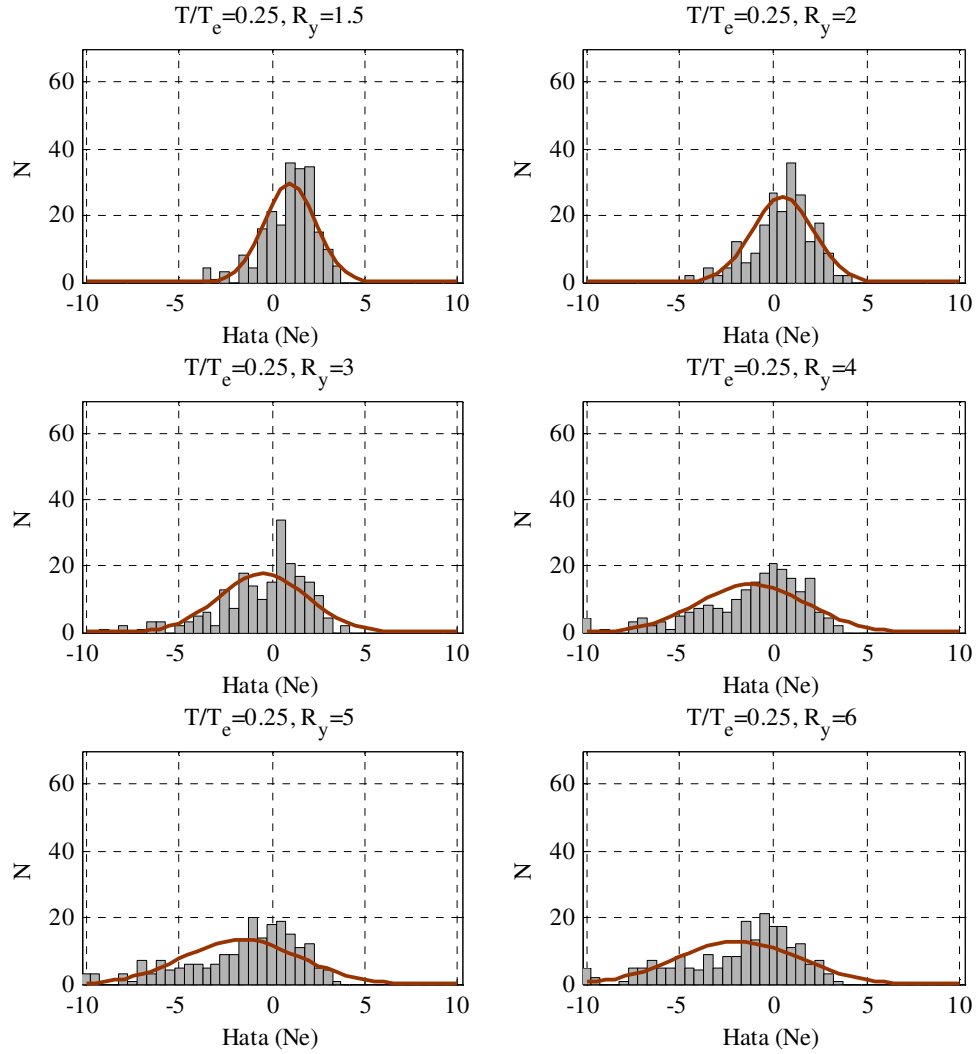
Şekil Ek 3.21 Birikimli dağılım eğrileri



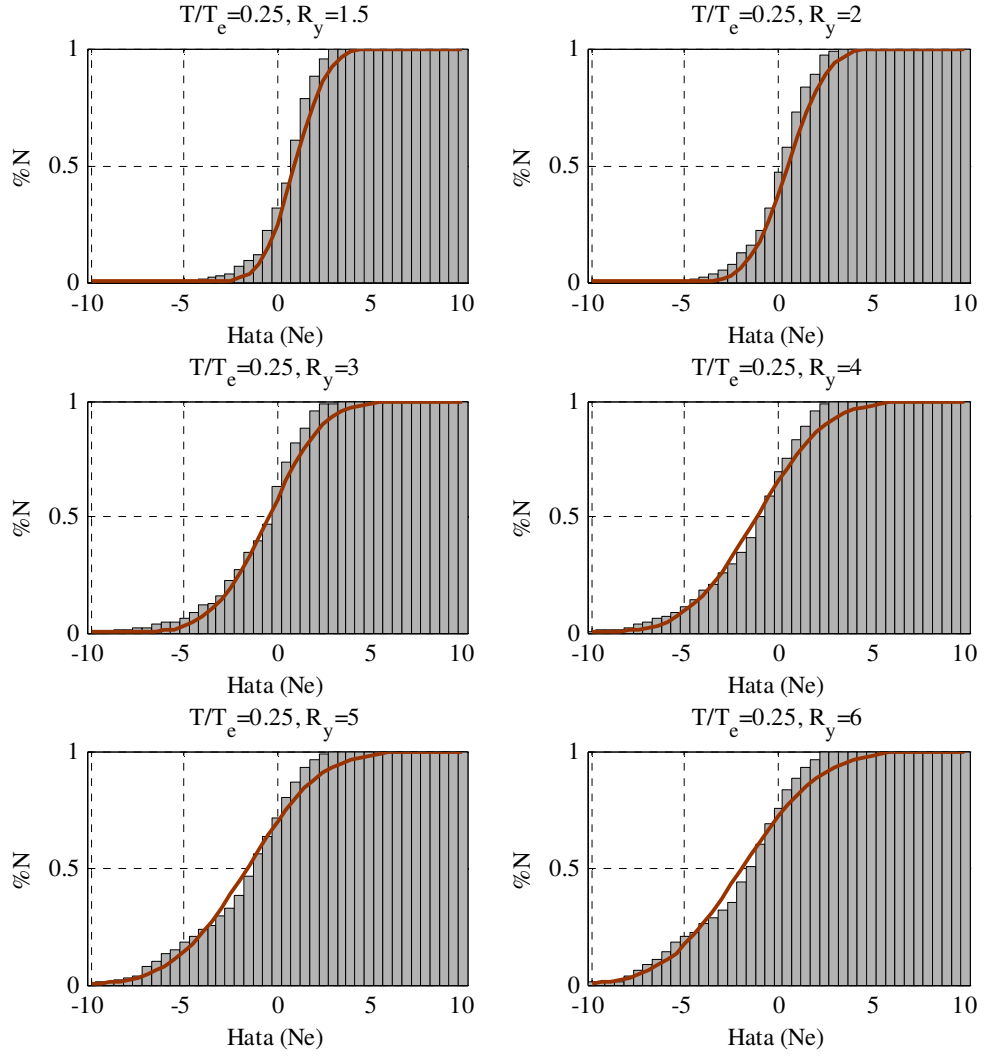
Şekil Ek 3.22 Birikimli dağılım eğrileri

Ek 4 Eşdeğer Çevrim Sayısı için Hata Histogramları, Olasılıksal ve Birikimli Dağılım Eğrileri

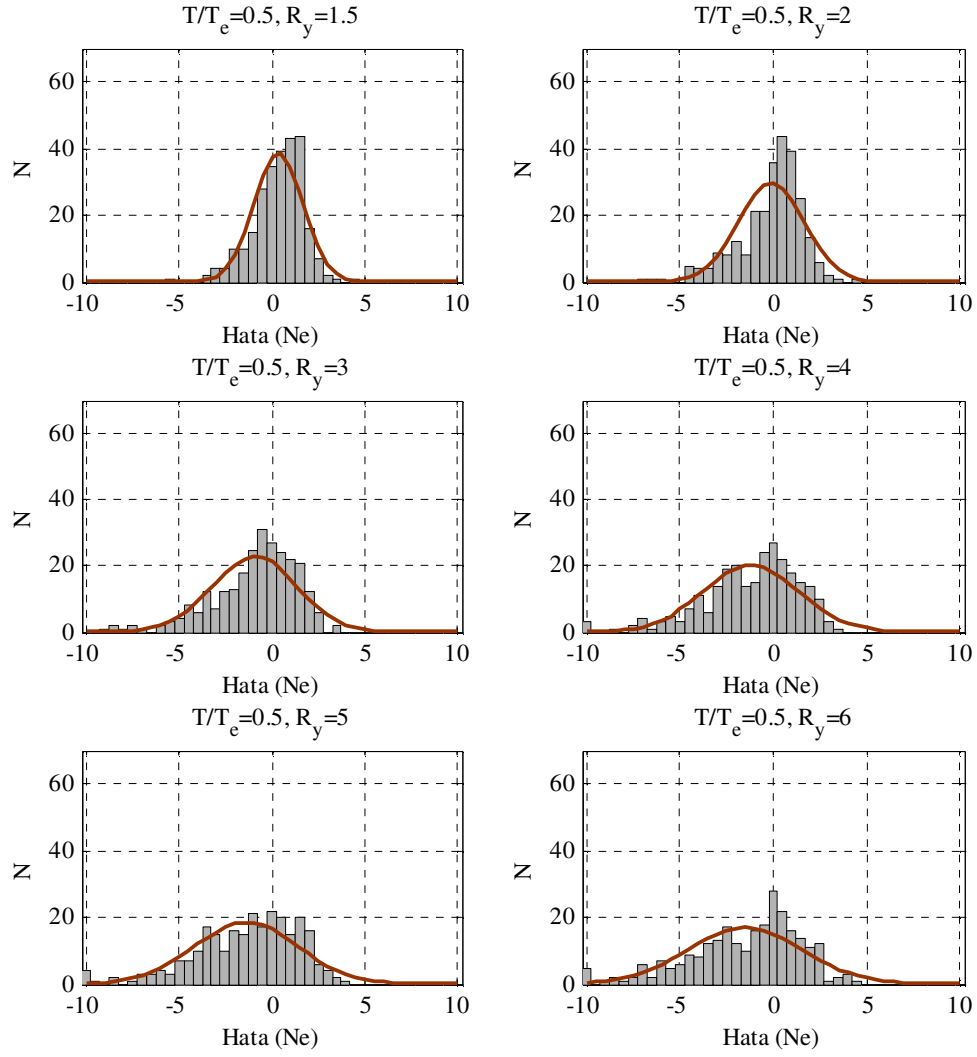
Önerilen iteratif yöntem ile yapılan hataların histogramları, olasılıksal ve birikimli dağılım eğrileri bazı $\tau(T/T_e)$ değerleri için aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



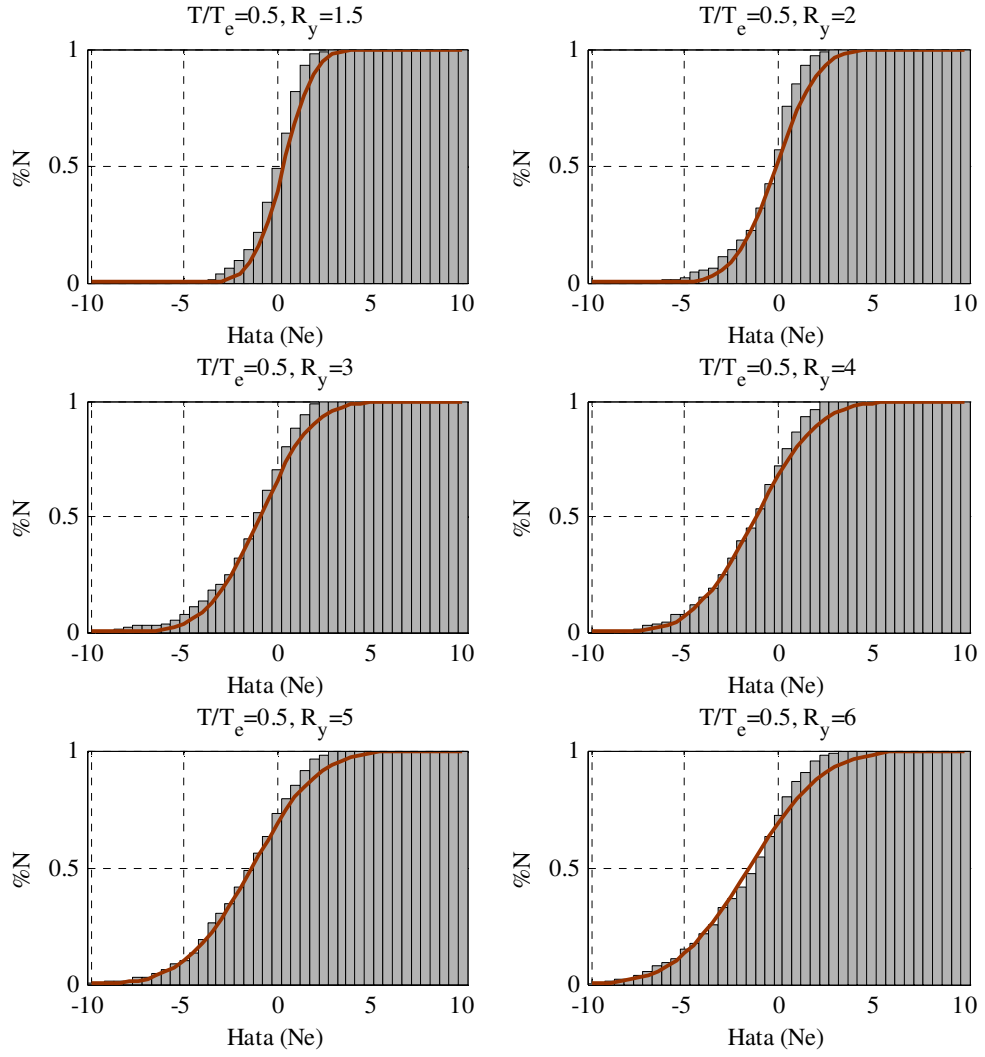
Şekil Ek 4.1 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



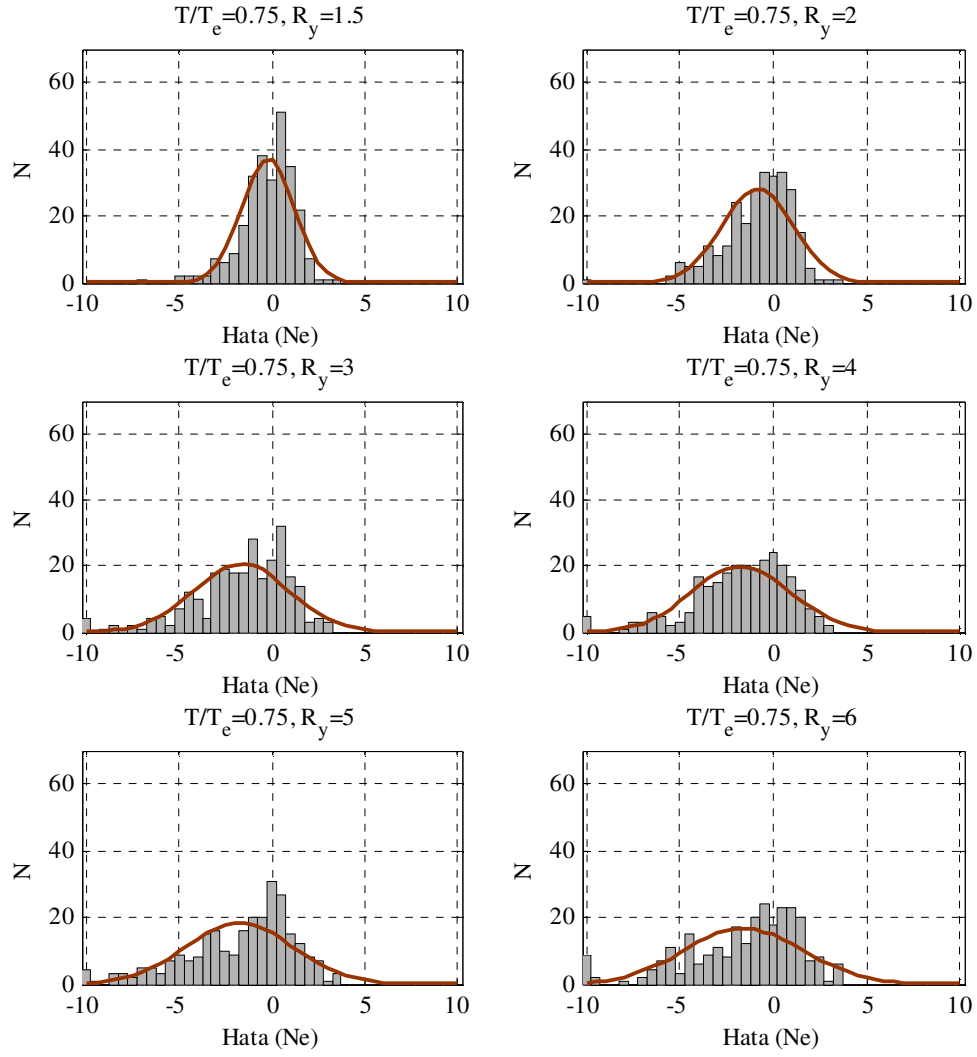
Şekil Ek 4.2 Birikimli dağılım eğrileri



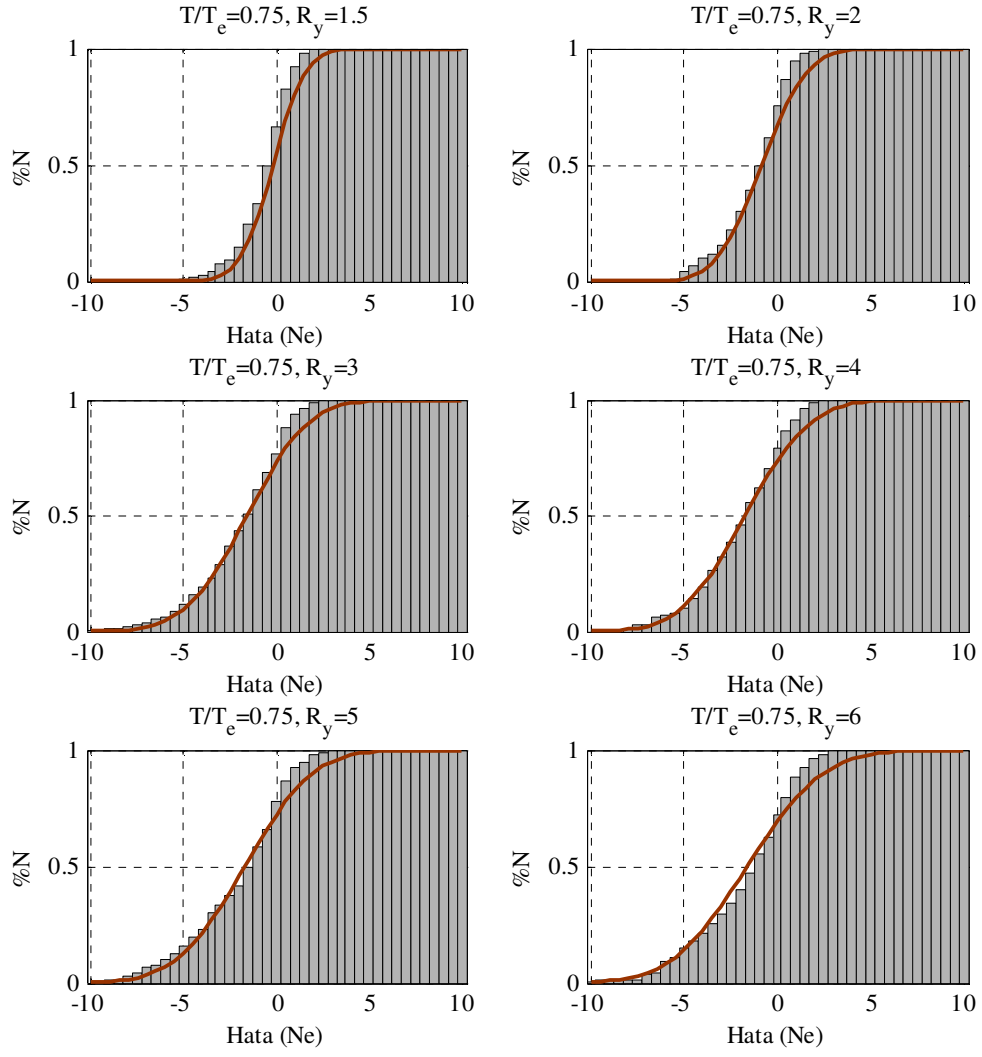
Şekil Ek 4.3 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



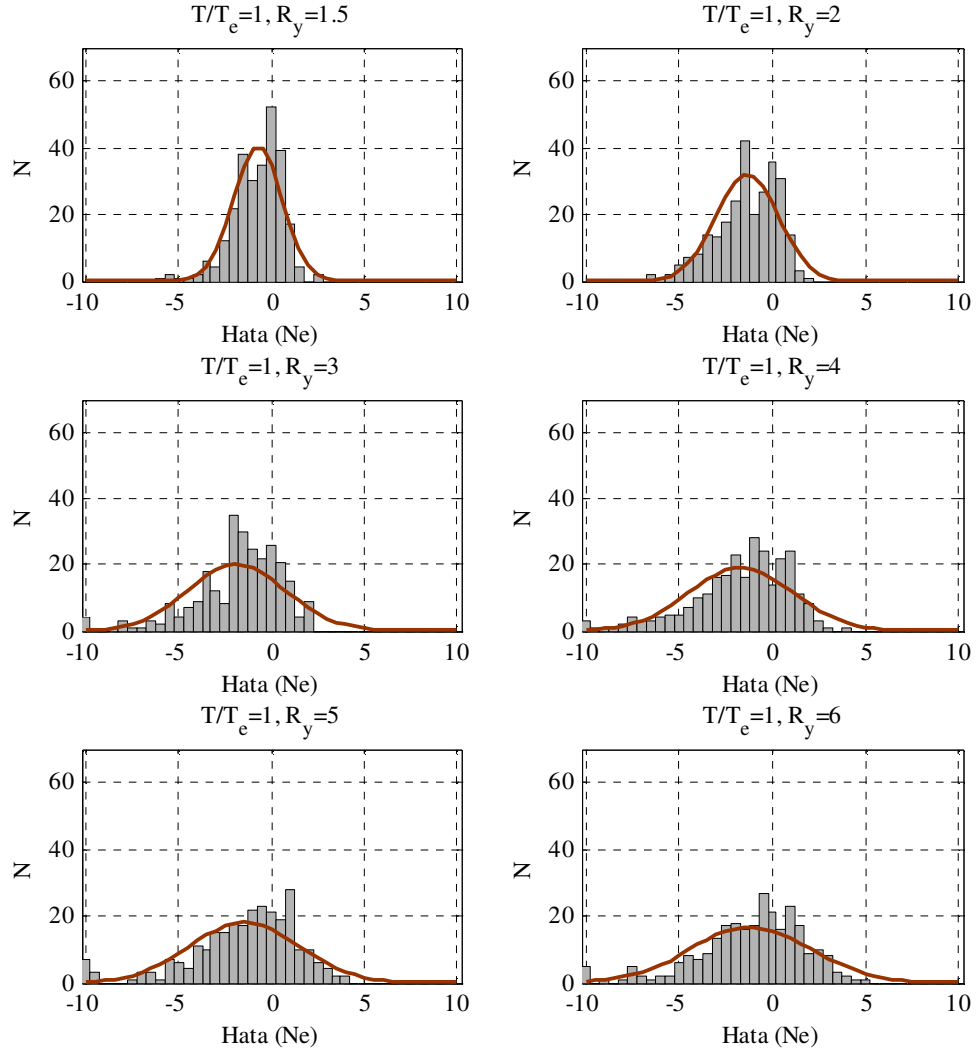
Şekil Ek 4.4 Birikimli dağılım eğrileri



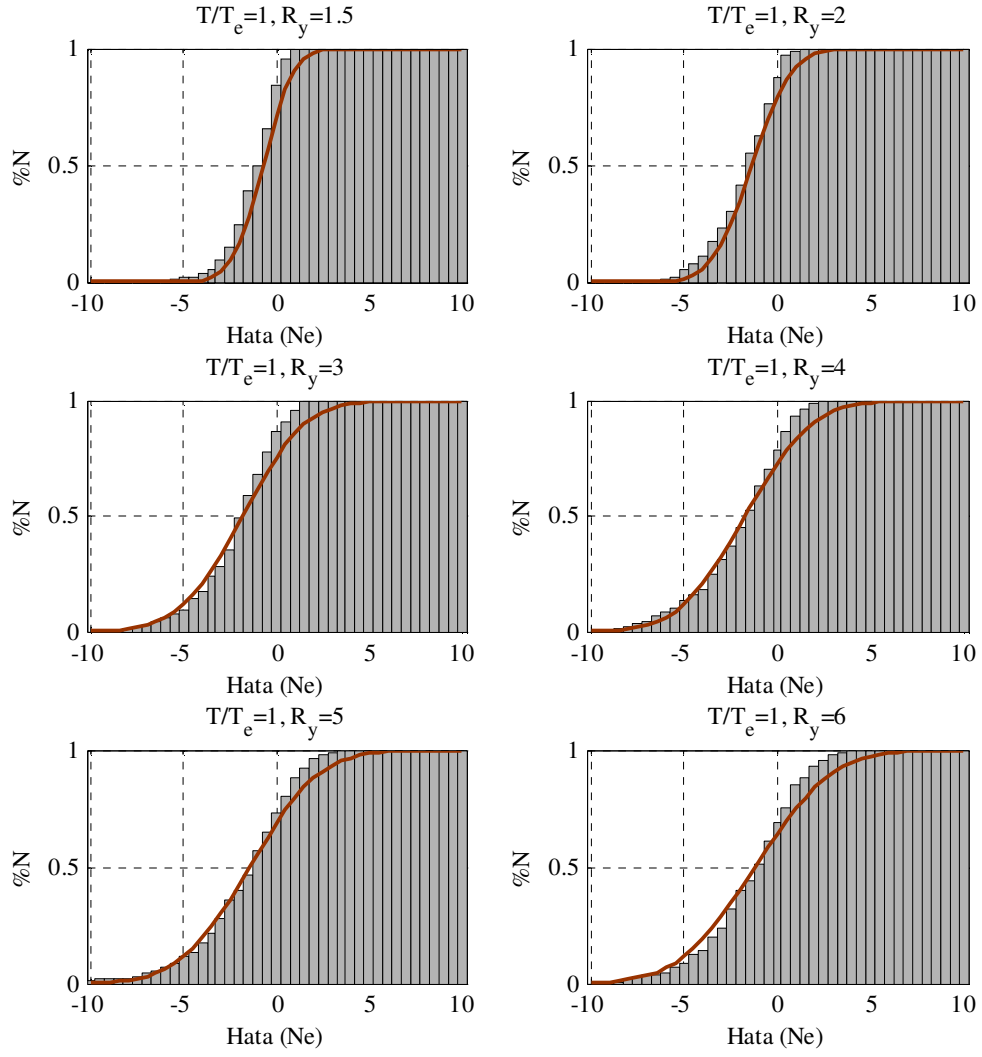
Şekil Ek 4.5 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



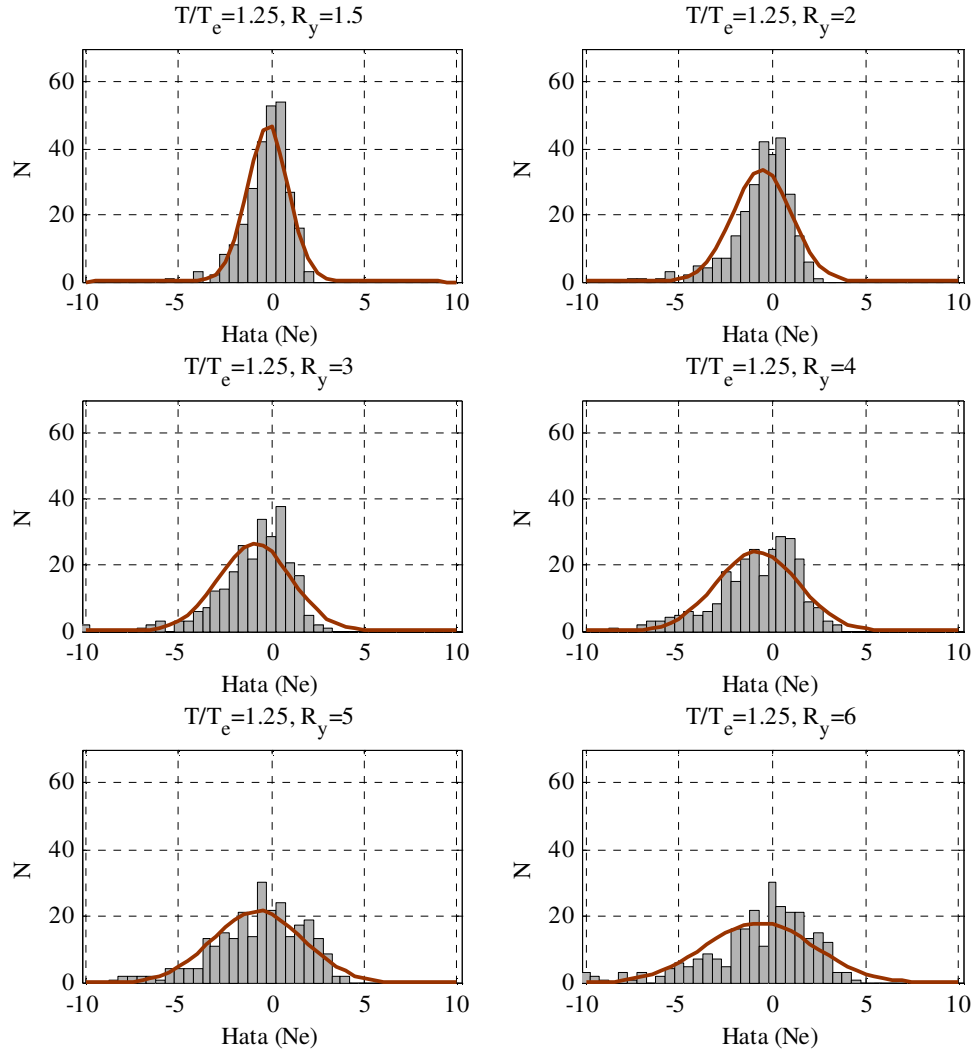
Şekil Ek 4.6 Birikimli dağılım eğrileri



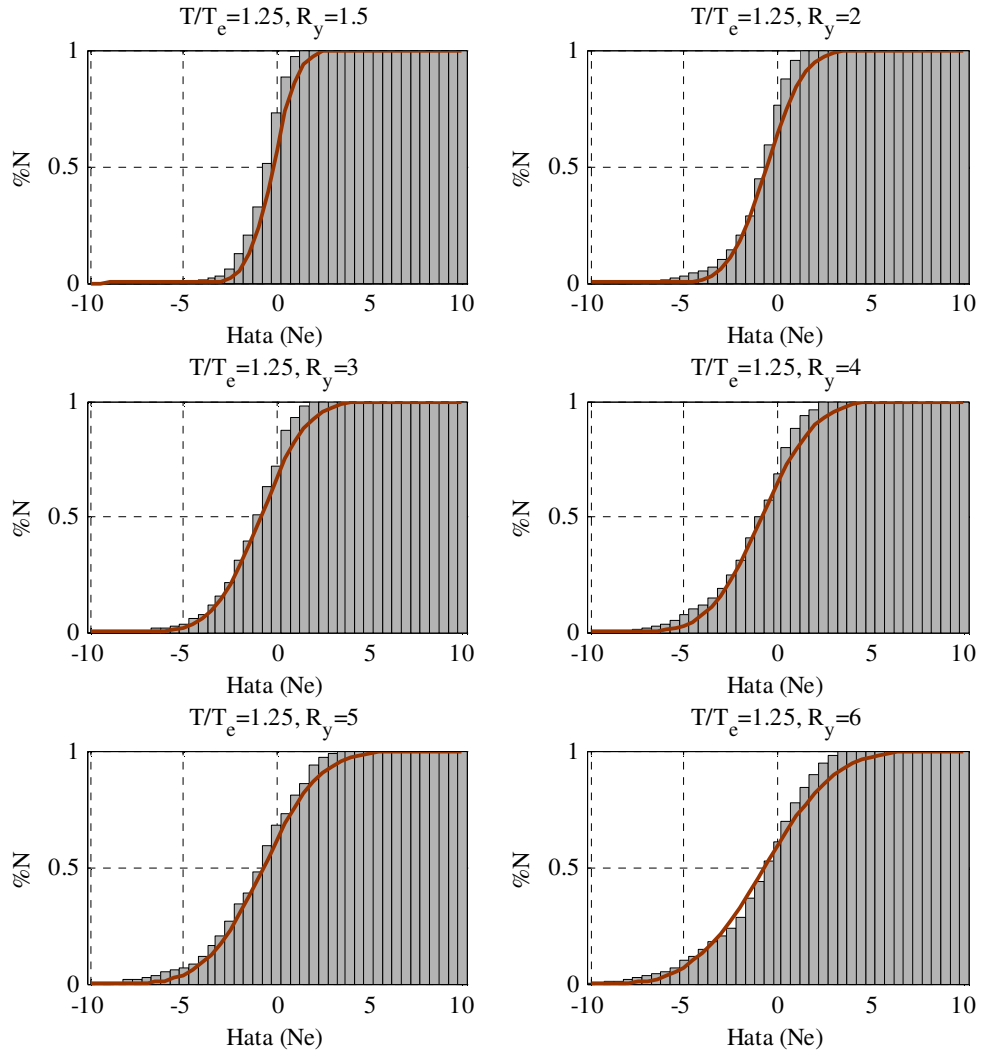
Şekil Ek 4.7 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



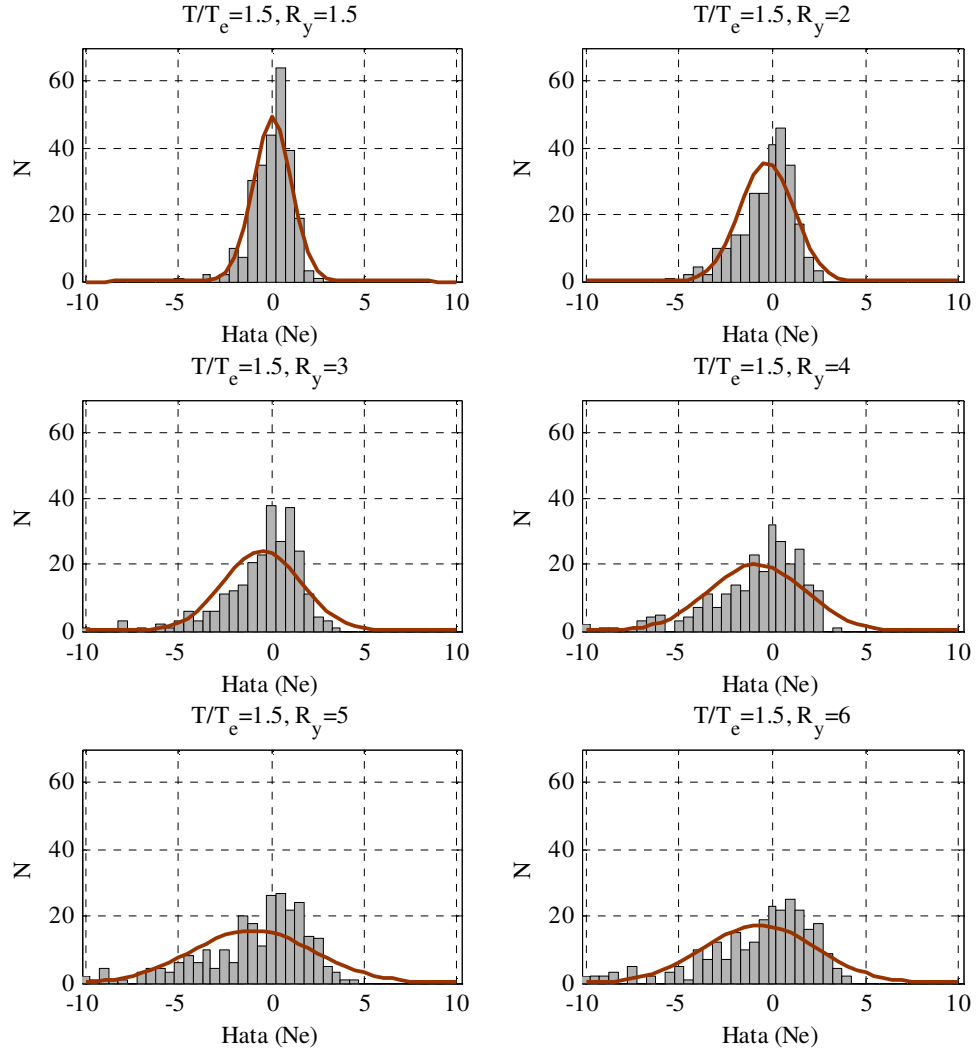
Şekil Ek 4.8 Birikimli dağılım eğrileri



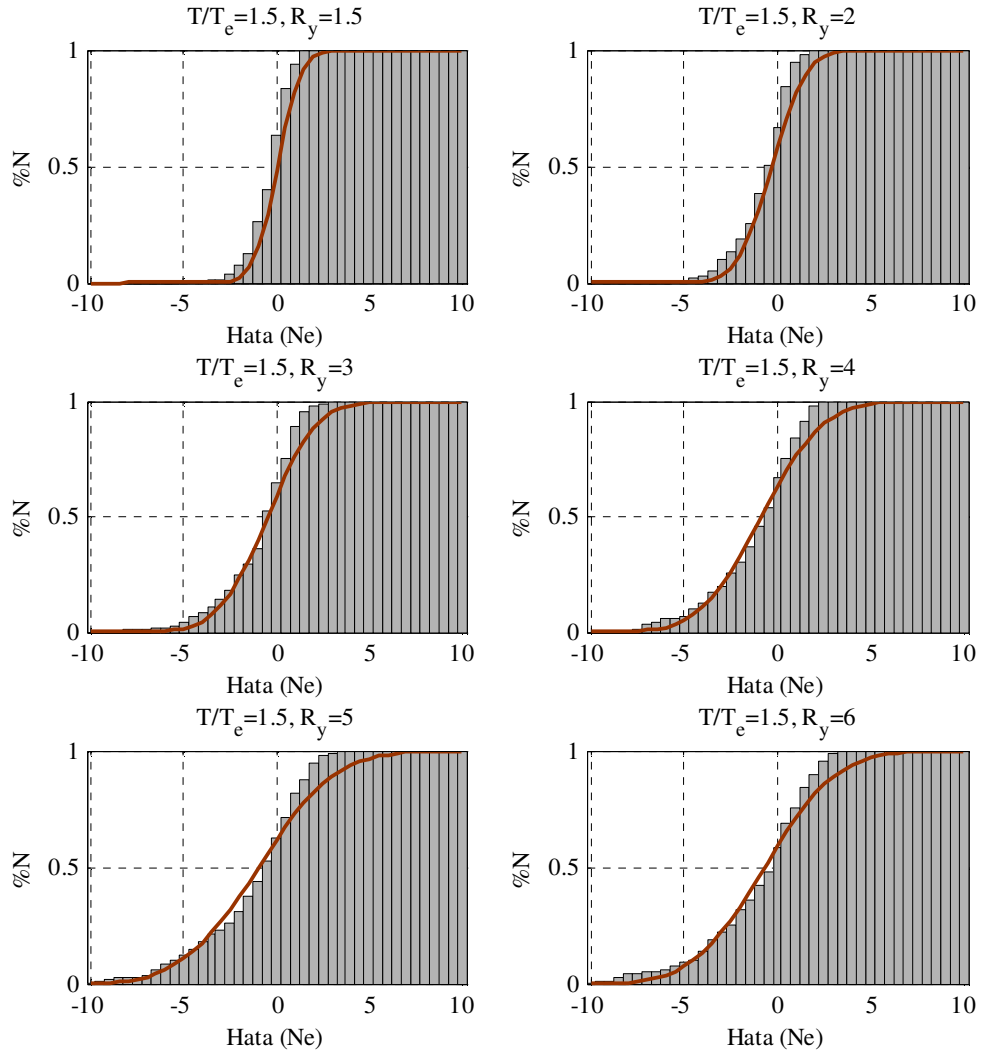
Şekil Ek 4.9 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



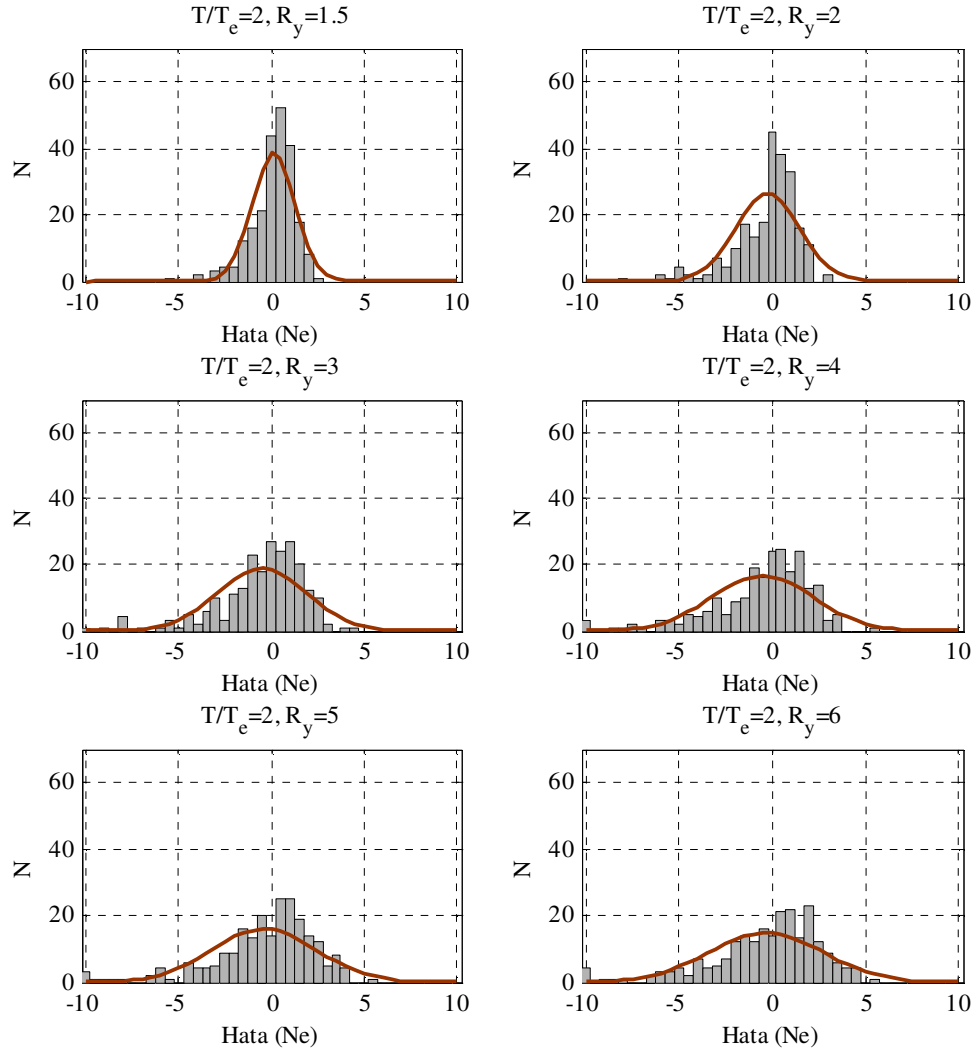
Şekil Ek 4.10 Birikimli dağılım eğrileri



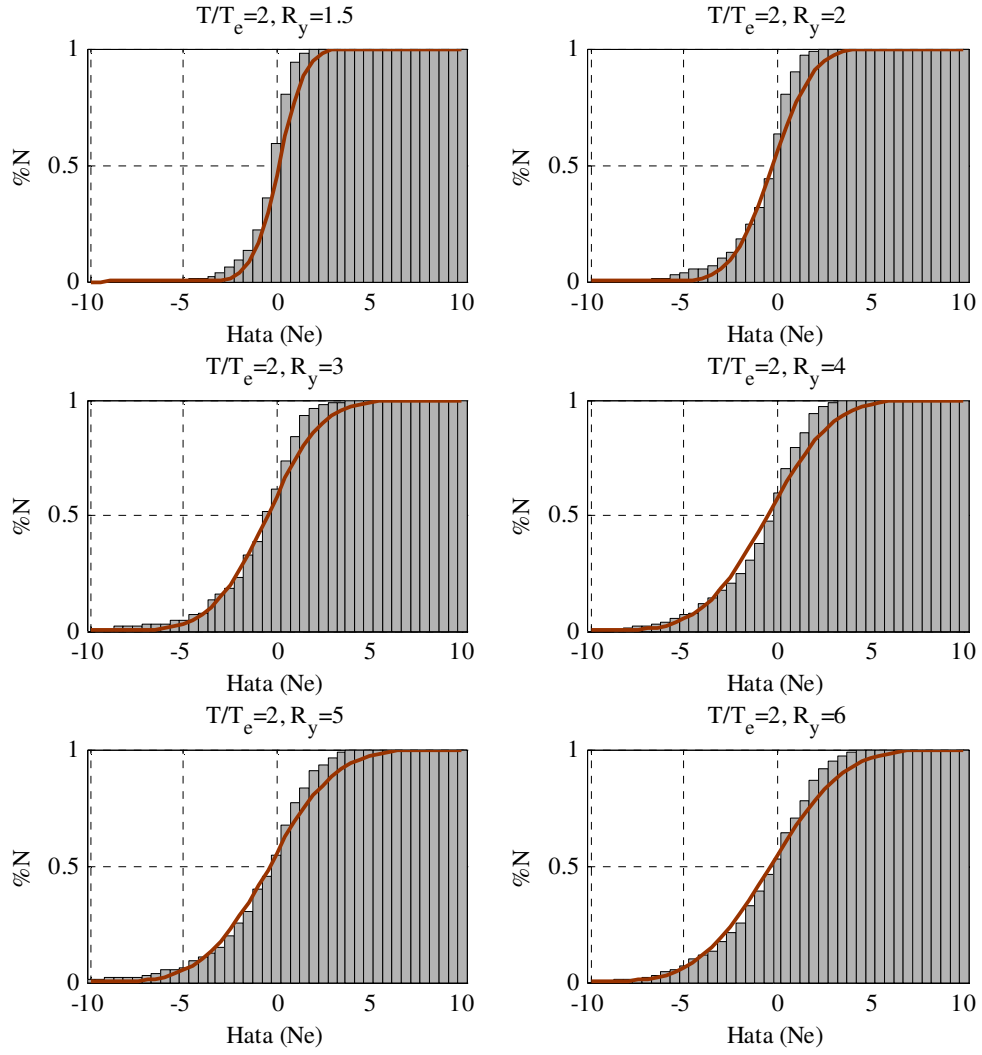
Şekil Ek 4.11 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



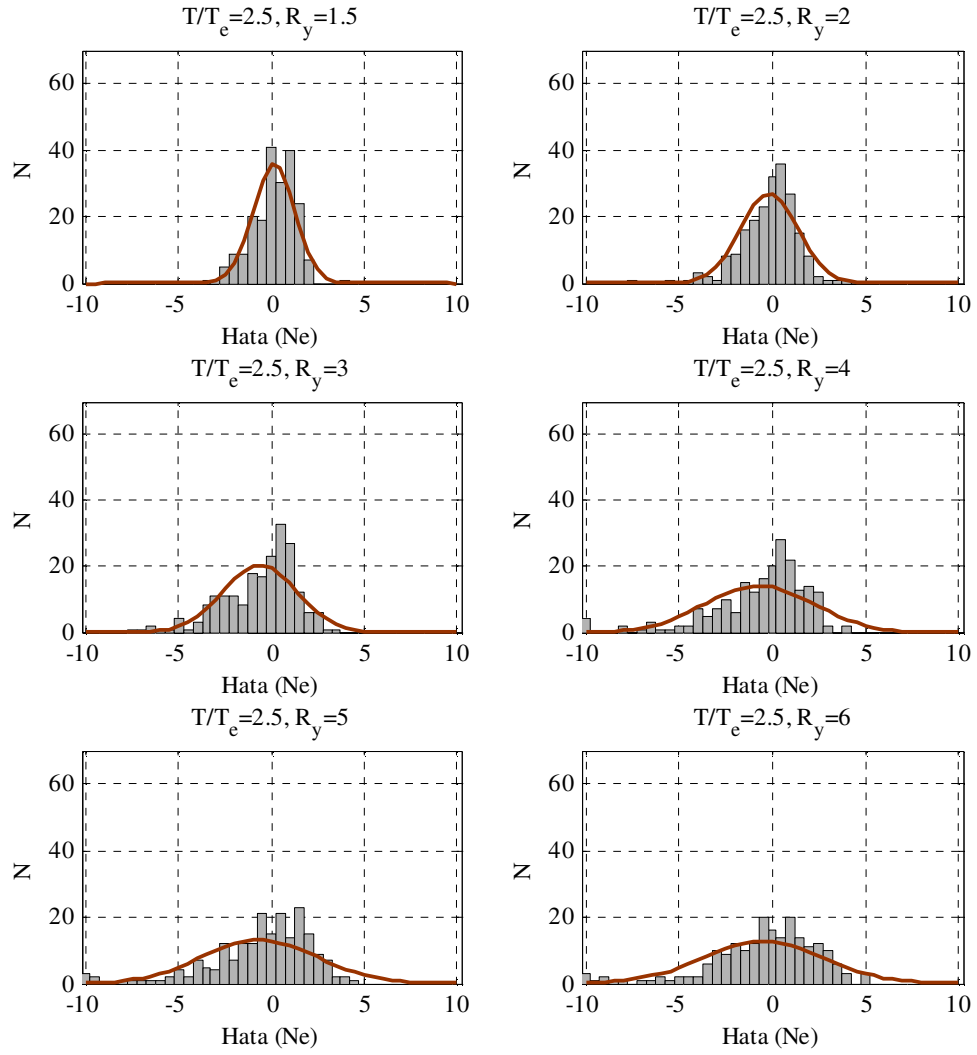
Şekil Ek 4.12 Birikimli dağılım eğrileri



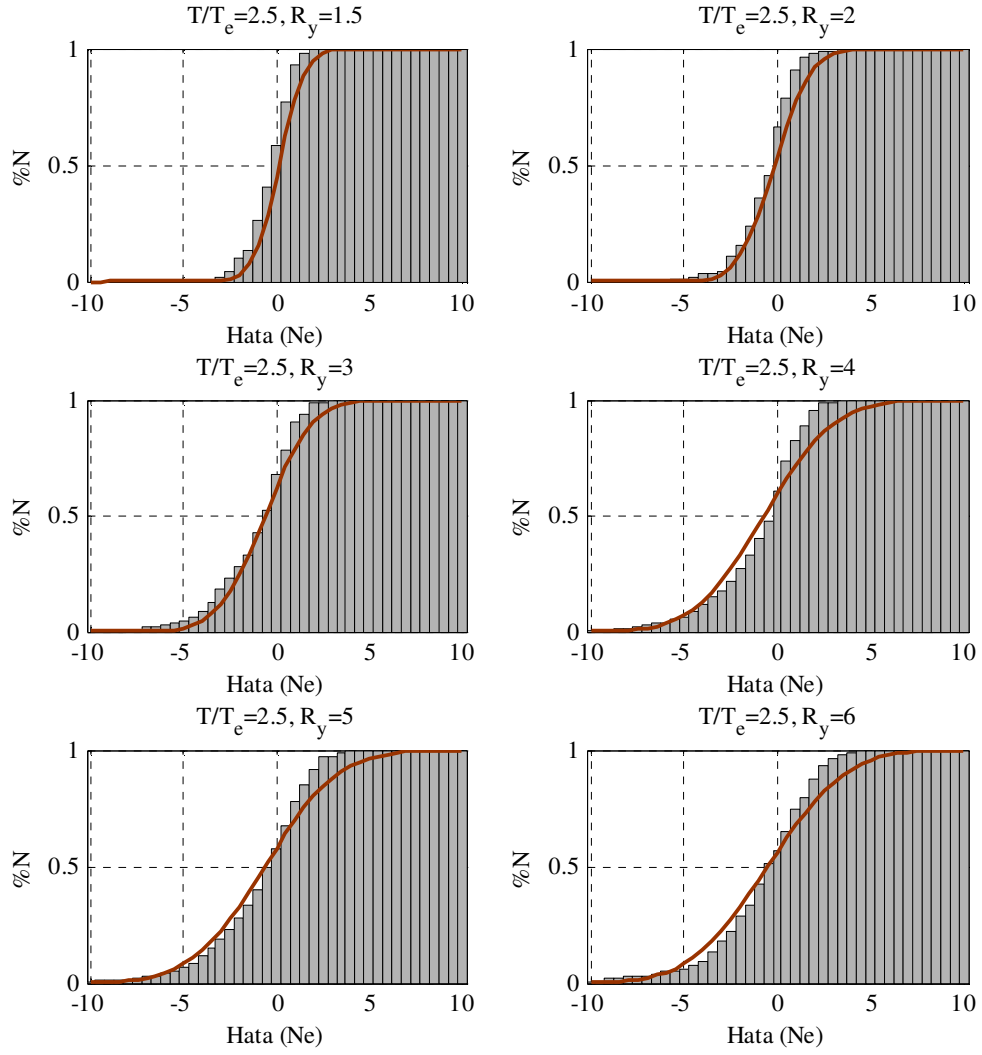
Şekil Ek 4.13 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



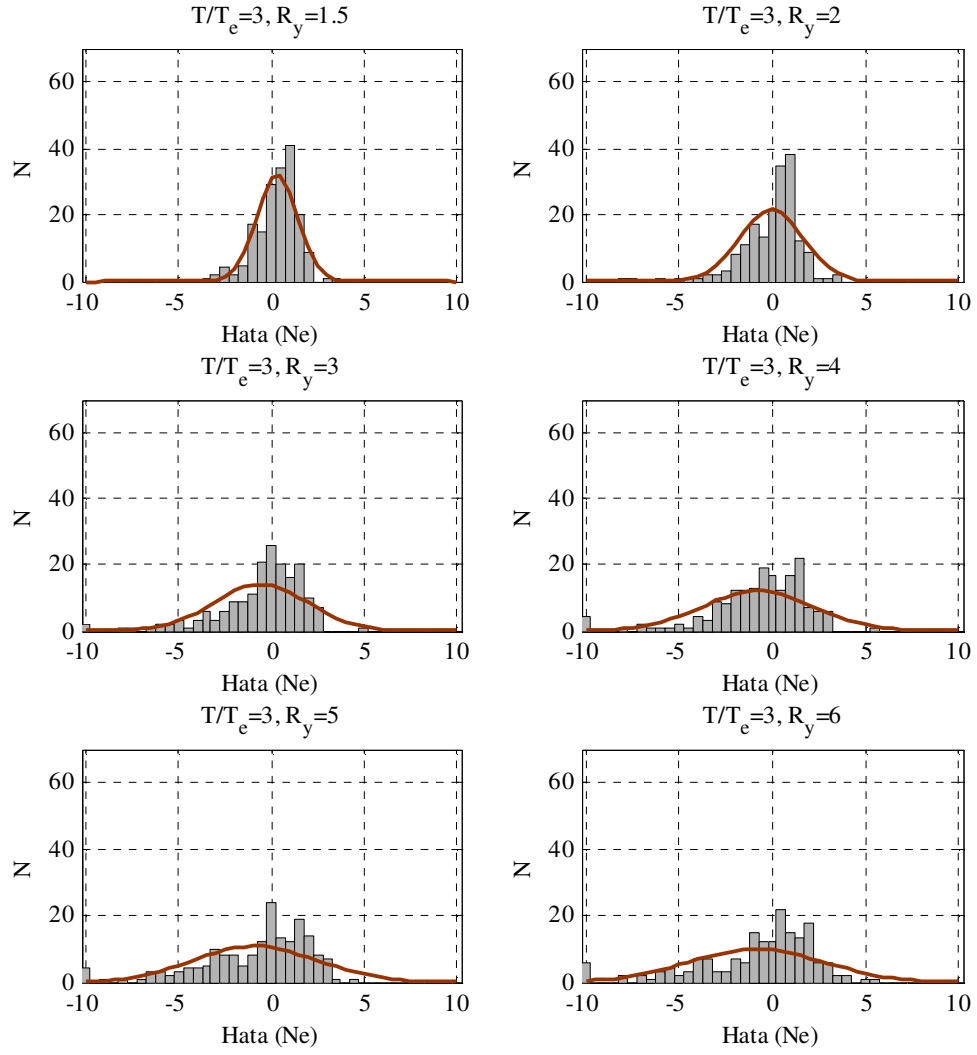
Şekil Ek 4.14 Birikimli dağılım eğrileri



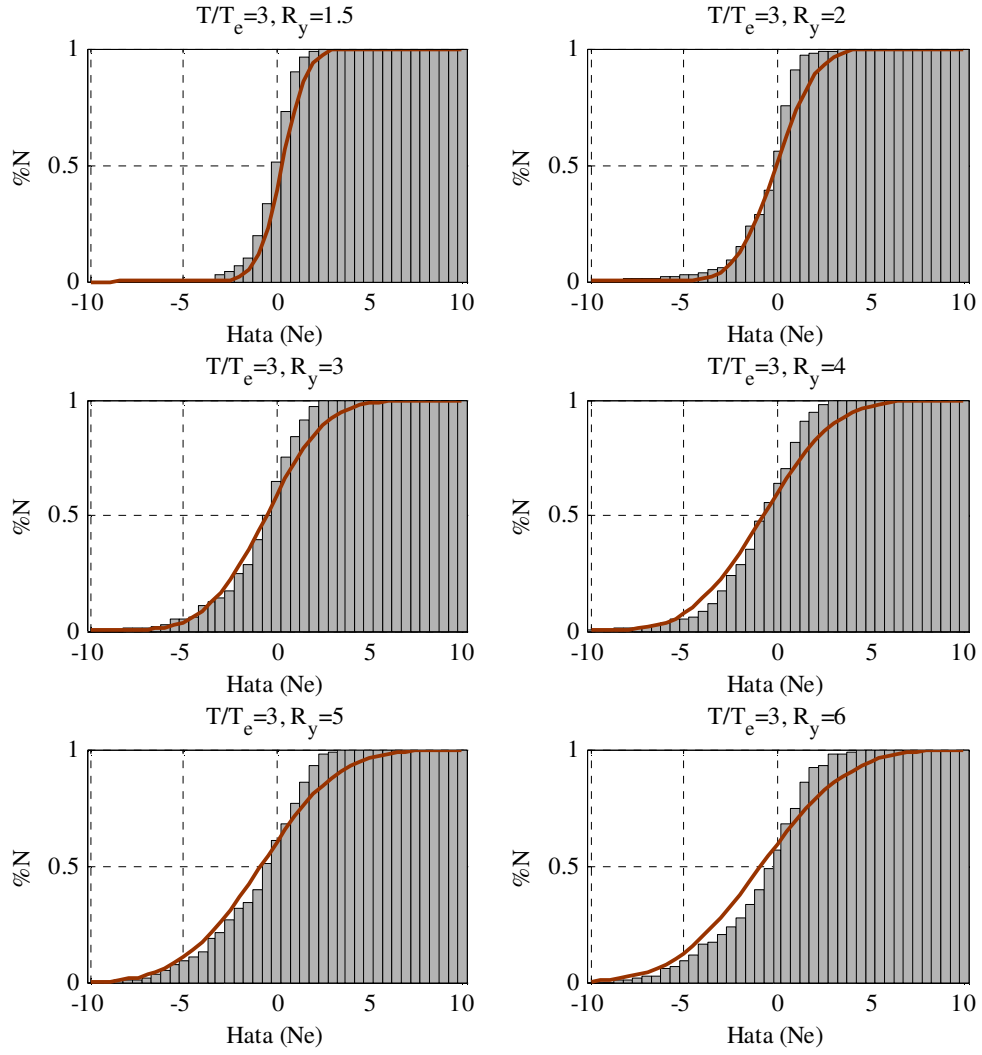
Şekil Ek 4.15 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



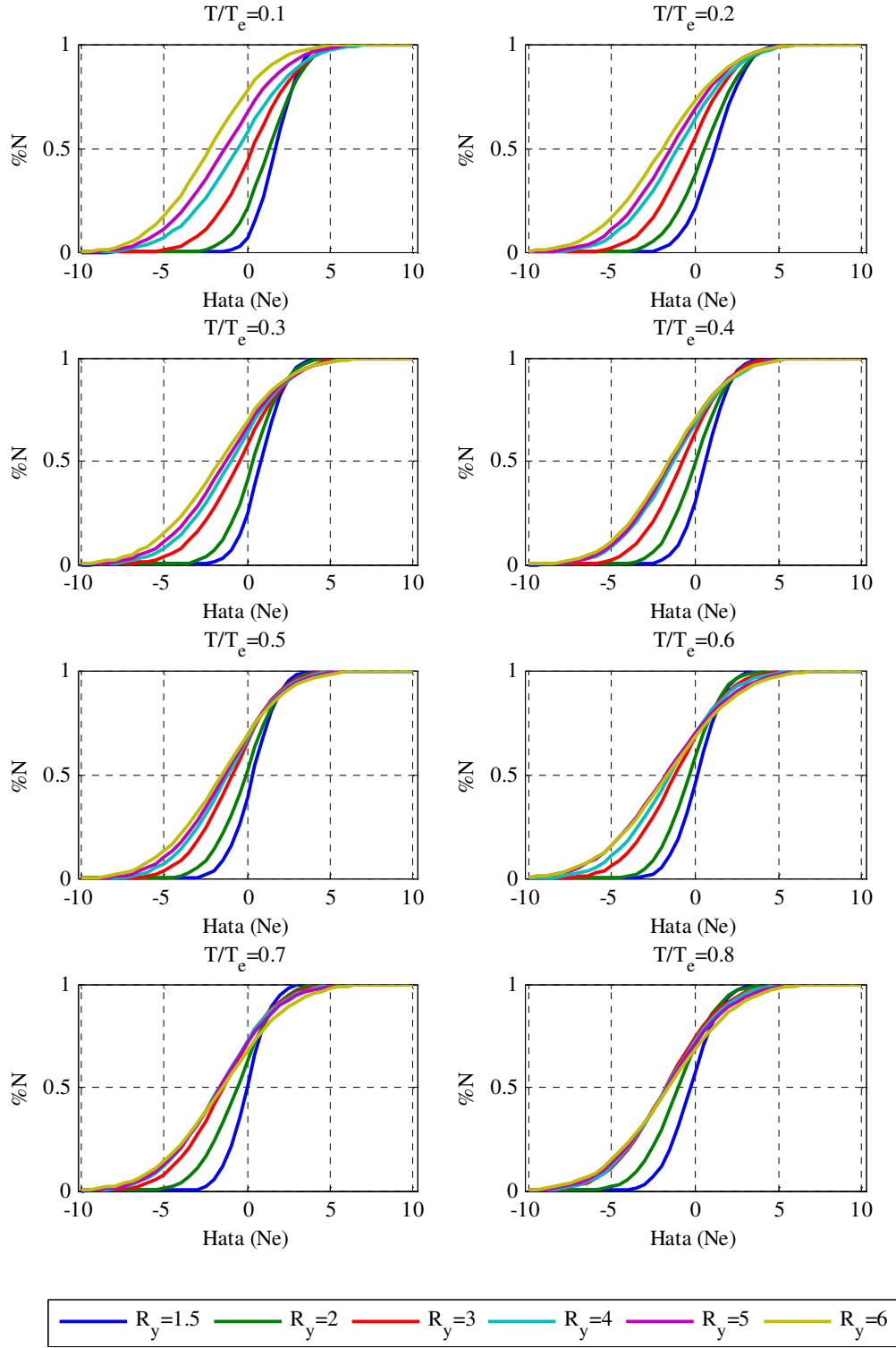
Şekil Ek 4.16 Birikimli dağılım eğrileri



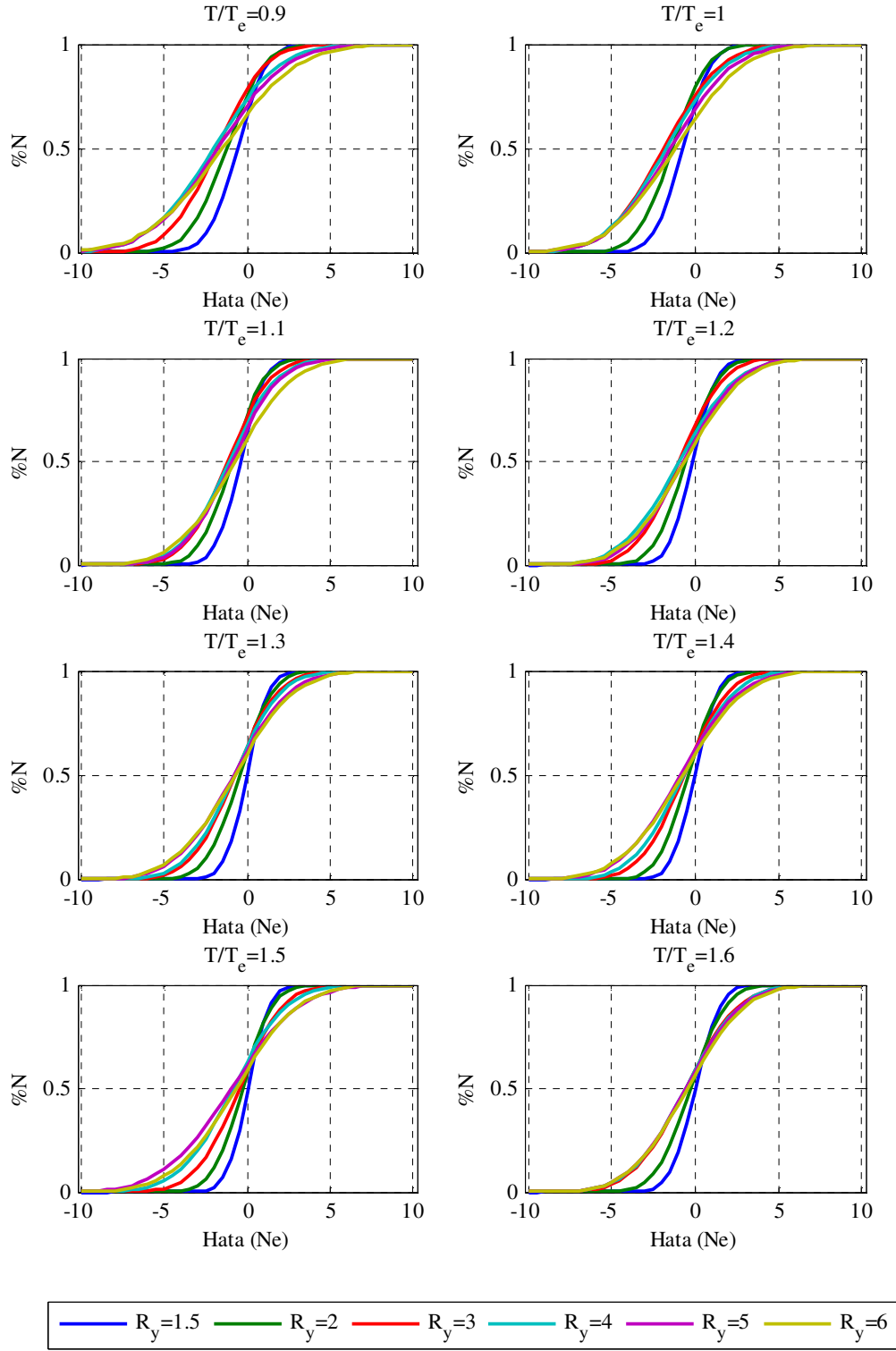
Şekil Ek 4.17 Histogramlar ve olasılıksal dağılım eğrileri



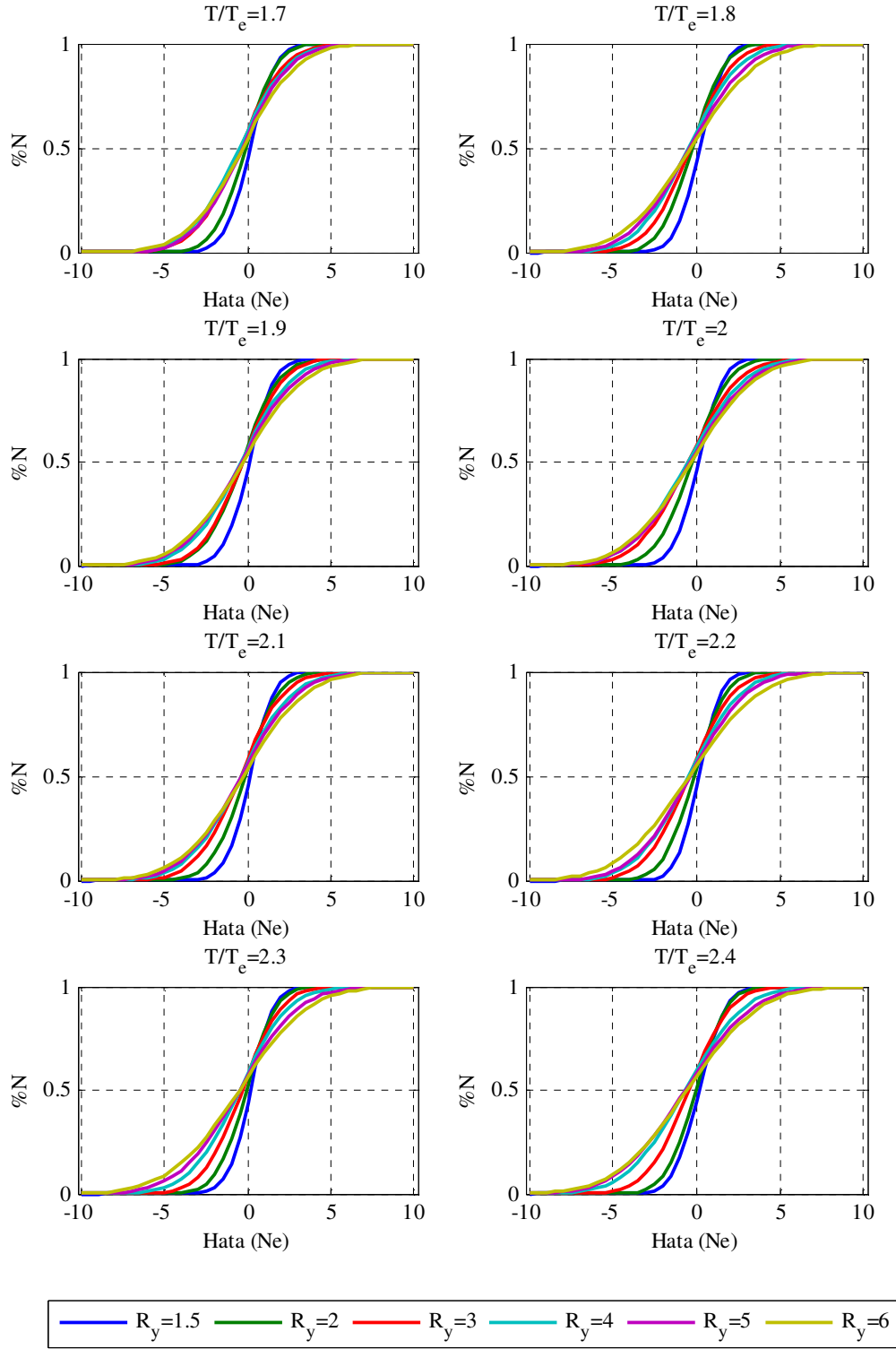
Şekil Ek 4.18 Birikimli dağılım eğrileri



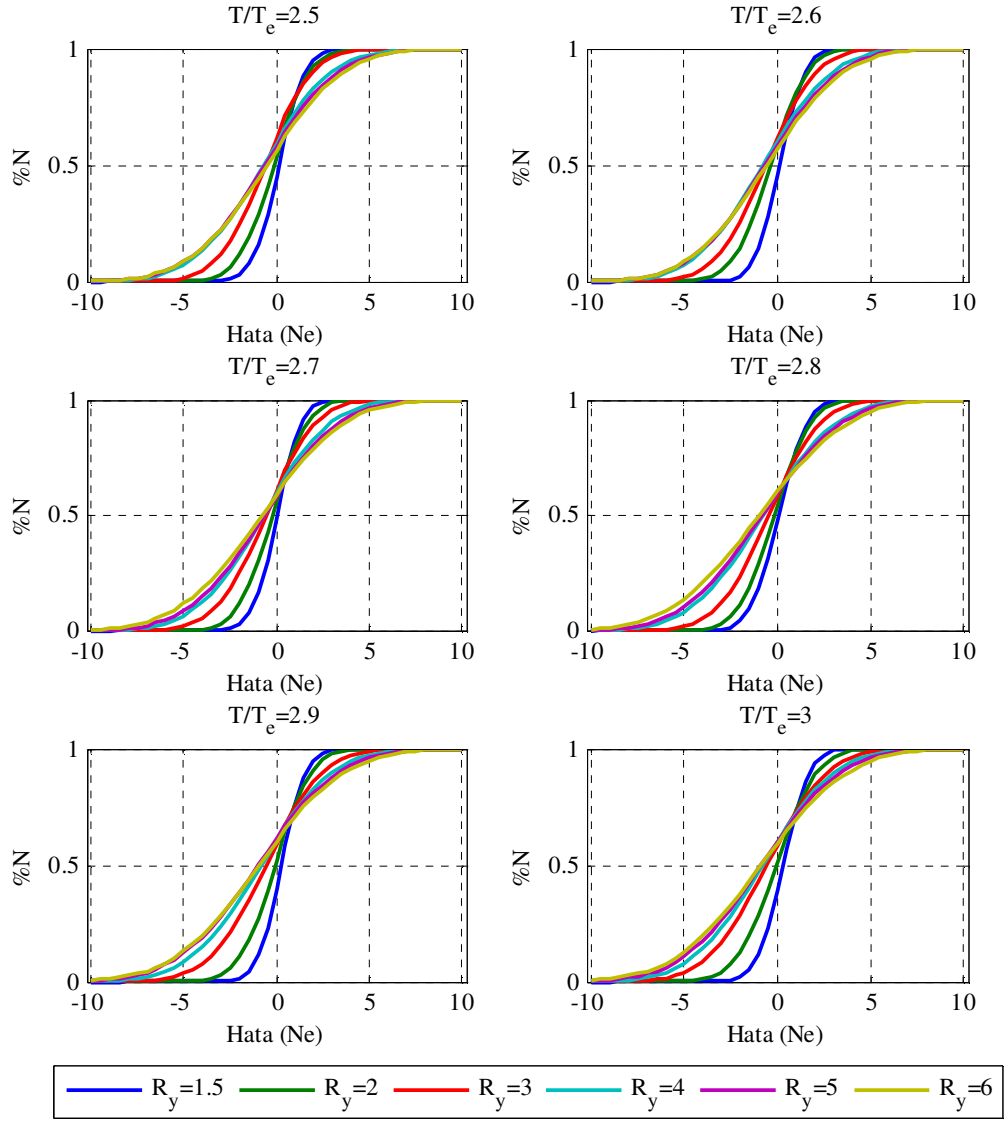
Şekil Ek 4.19 Birikimli dağılım eğrileri



Şekil Ek 4.20 Birikimli dağılım eğrileri



Şekil Ek 4.21 Birikimli dağılım eğrileri



Şekil Ek 4.22 Birikimli dağılım eğrileri

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	21.06.1980	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1994-1997	Bursa Özel Namık Sözeri Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı
Doktora	2004-2009	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurum

2001-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi