

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

SPEKTRAL ANALİZ TEKNİKLERİ VE HASSASİYET

139777

İnş. Yük. Müh. Nuri ÖZHENDEKÇİ

F.B.E İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 20 Ocak 2003

Tez Danışmanı : Prof. Zekeriya POLAT (YTÜ)

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

: Prof. Dr. Zekai CELEP (İTÜ)

İSTANBUL, 2003

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KÜTÜPHANE MERKEZİ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Modal Spektral Büyüklükler ve Birleştirme Teknikleri	1
1.2 Önceki Çalışmalar	2
2. YAPILARIN DİNAMİK HAREKET DENKLEMLERİ VE ÇÖZÜMLERİ	4
2.1 Bir Serbestlik Dereceli Sistemin Dinamik Hareket Denklemi	4
2.2 Çok Serbestlik Dereceli Sistemin Dinamik Hareket Denklemi	5
2.3 Bir Serbestlik Dereceli Sistemin Titreşim Diferansiyel Denkleminin Çözümü	6
2.4 Çok Serbestlik Dereceli Sistemin Sönümsüz Serbest Titreşim Diferansiyel Denkleminin Çözümü	8
2.5 Modların Dikliği (Ortogonalitesi)	9
2.6 Çok Serbestlik Dereceli Sistemin Sönümsüz Titreşim Diferansiyel Denkleminin Ayrıklaştırılarak Çözümü	10
3. SPEKTRAL HESAP TEKNİKLERİ VE HASSASİYET	12
3.1 Giriş	12
3.2 Bir Serbestlik Dereceli Sistemler	12
3.3 Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	16
3.4 Maksimumların Dağılımı	18
3.5 Modların Birleştirilmesi	22
3.6 Üç Boyutlu Olarak Ele Alınan Yapılarda Modların İsimlendirilmesi	24
3.7 CQC ve SRSS Birleştirme Yöntemlerinde Hassasiyet ve Hatânın Bağlı Olduğu Yeni Bir Parametre	25
3.8 Parametrik Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve CQC İçin Yeni Bir Kullanım Biçimi Önerisi	38
3.9 Burulmanın Yapı Cevabına Olan Katkısının, Yatay Bir Doğrultudaki Deprem Etkisi İçin Araştırılması	42
4. PARAMETRİK ÇÖZÜM GRAFİKLERİ	50

5.	HATÂ GRAFİKLERİNİN ÇOK KATLI YAPILAR İÇİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	123
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	148
	KAYNAKLAR.....	151
	EKLER.....	153
Ek1.	Rijitlik Hesaplamalarında Kullanılan Yöntemler ve Kabuller.....	154
Ek1.1	Çubuk Elemanlar.....	154
Ek1.2	Perde Elemanlar.....	154
Ek1.2.1	Kullanılan Sonlu Eleman Özellikleri.....	154
Ek1.2.2	Kullanılan Sonlu Elemanın Hassasiyeti.....	157
Ek1.3	Kat Döşemelerinin Tanımı.....	158
Ek1.4	Yazılan “Doğrudan Çözüm Yöntemi”nin Tahkiki.....	158
E2.	Kullanılan programın işleyiş adımları.....	160
E3.	Kullanılan depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtları ve tepki spektrumları.....	161
	ÖZGEÇMİŞ.....	168

SİMGE LİSTESİ

$[I]$	Birim matris
ρ, ρ_0	CQC ve CQC0 yöntemi katsayıları
q	Katılım çarpanı
ϕ	Mod şekli vektörü
ξ	Sönüm oranı
Ψ	Şekil fonksiyonu
ω, ω_D	Sönümsüz ve sönümlü sistemin açısai frekansları
$[c]$	Sönüm matrisi
$[k]$	Yay matrisi
$[m]$	Kütle matrisi
a, b	Doğrusal deprem ivmesi sabitleri
B	Deprem ivmesi etkime doğrultusunu dikkate alan sütun matris
C	Genelleştirilmiş sönüm kuvveti
e	Dış merkezlik
E	Frekans denklemleri katsayıları
F, P_i	Doğal ve i -ci genelleştirilmiş koordinattaki dış yüke ait stokastik işlem
G_1, G_2	İntegral sabitleri
K	Genelleştirilmiş yay kuvveti
M	Genelleştirilmiş kütle
M^*	Harekete katılan etkin kütle
Q	Burulma davranışının dinamik hesaptaki miktarını dikkate alan bir oran
R, S	Otokorelasyon ve Güç spektral yoğunluk fonksiyonları
T	Peryot
t	Zaman
x, y, θ	Serbestlik parametreleri
X, Z	Doğal ve genelleştirilmiş koordinatlardaki serbestliklere ait stokastik işlem
Y	Genelleştirilmiş koordinatlardaki serbestlik parametresi

KISALTMA LİSTESİ

ABS	Absolute Sum – Mutlak Toplam
ABS'	Mutlak maksimumların işaretleri ile birlikte doğrudan toplanması yöntemi
CQC	Complete Quadratic Combination – Tam Karesel Birleştirme
CQC0	CQC yönteminin, ρ katsayıları sıfır dış merkezlik ile hesaplanarak kullanımı
SRSS	Square Root of Sum of The Squares – Kareleri Toplamının Karekökü
ERZ-DB	Erziccan depremi (1992) doğu-batı bileşeni
ERZ-KG	Erzincan depremi (1992) kuzey-güney bileşeni
DNR-DB	Dinar depremi (1995) doğu-batı bileşeni
DNR-KG	Dinar depremi (1995) kuzey-güney bileşeni
ELC-DB	Elcentro depremi (1940) doğu-batı bileşeni
ARC-DB	Kocaeli depremi (1999) Arçelik kaydı doğu-batı bileşeni
ARC-KG	Kocaeli depremi (1999) Arçelik kaydı kuzey-güney bileşeni
YRM-DB	Kocaeli depremi (1999) Yarımca kaydı doğu-batı bileşeni
YRM-KG	Kocaeli depremi (1999) Yarımca kaydı kuzey-güney bileşeni
HEY-DB	Kocaeli depremi (1999) Heybeliada kaydı doğu-batı bileşeni
HEY-KG	Kocaeli depremi (1999) Heybeliada kaydı kuzey-güney bileşeni
BOT-KG	Kocaeli depremi (1999) Botaş kaydı doğu-batı bileşeni

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Bir katlı yapı ve dinamik hareket modeli	4
Şekil 2.2 Çok serbestlik dereceli sistemin dinamik modeli.....	5
Şekil 2.3 Kat kütle merkezinde tanımlı serbestlik parametreleri	5
Şekil 3.1 Çerçeve örnek yapı mod şekilleri.....	26
Şekil 3.2 Bir katlı burulmalı örnek yapı planı	28
Şekil 3.3 $\xi = 0.05$ için örnek yapı orta kolonunda V_x hatâ grafiği	29
Şekil 3.4 Parametrik çalışmada kullanılan örnek yapı tipleri.....	36
Şekil 3.6 $\xi = 0.05$, köşe kolonda, 12 deprem için ortalama V_y/V_x	43
Şekil 3.7 $\xi = 0.05$, köşe kolonda, 12 deprem için ortalama V_y/V_x	43
Şekil 3.8 $\xi = 0.05$, köşe kolonda, 12 deprem için ortalama V_y/V_x	44
Şekil 3.9 $\xi = 0.05$, köşe kolonda, 12 deprem için ortalama V_y/V_x	44
Şekil 4.1- Bina tipi 11 ve 12, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	51
Şekil 4.2- Bina tipi 13 ve 14, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	52
Şekil 4.3- Bina tipi 15 ve 21x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	53
Şekil 4.4- Bina tipi 22x ve 23x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	54
Şekil 4.5- Bina tipi 24x ve 25x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	55
Şekil 4.6- Bina tipi 21y ve 22y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	56
Şekil 4.7- Bina tipi 23y ve 24y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	57
Şekil 4.8- Bina tipi 25y ve 31x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	58
Şekil 4.9- Bina tipi 32x ve 33x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	59
Şekil 4.10- Bina tipi 34x ve 35x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	60
Şekil 4.11- Bina tipi 31y ve 32y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	61
Şekil 4.12- Bina tipi 33y ve 34y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	62
Şekil 4.13- Bina tipi 35y ve 41x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	63
Şekil 4.14- Bina tipi 42x ve 43x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	64
Şekil 4.15- Bina tipi 44x ve 45x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	65
Şekil 4.16- Bina tipi 41y ve 42y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	66
Şekil 4.17- Bina tipi 43y ve 44y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	67
Şekil 4.18- Bina tipi 45y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği	68
Şekil 4.19- Bina tipi 11 ve 12, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	69
Şekil 4.20- Bina tipi 13 ve 14, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	70
Şekil 4.21- Bina tipi 15 ve 21x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	71
Şekil 4.22- Bina tipi 22x ve 23x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	72
Şekil 4.23- Bina tipi 24x ve 25x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	73
Şekil 4.24- Bina tipi 21y ve 22y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	74
Şekil 4.25- Bina tipi 23y ve 24y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	75
Şekil 4.26- Bina tipi 25y ve 31x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	76
Şekil 4.27- Bina tipi 32x ve 33x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	77
Şekil 4.28- Bina tipi 34x ve 35x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	78
Şekil 4.29- Bina tipi 31y ve 32y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	79
Şekil 4.30- Bina tipi 33y ve 34y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	80

Şekil 4.31- Bina tipi 35y ve 41x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	81
Şekil 4.32- Bina tipi 42x ve 43x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	82
Şekil 4.33- Bina tipi 44x ve 45x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	83
Şekil 4.34- Bina tipi 41y ve 42y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	84
Şekil 4.35- Bina tipi 43y ve 44y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	85
Şekil 4.36- Bina tipi 45y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği	86
Şekil 4.38- Bina tipi 13 ve 14, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	88
Şekil 4.39- Bina tipi 15 ve 21x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	89
Şekil 4.40- Bina tipi 22x ve 23x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	90
Şekil 4.41- Bina tipi 24x ve 25x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	91
Şekil 4.42- Bina tipi 21y ve 22y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	92
Şekil 4.43- Bina tipi 23y ve 24y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	93
Şekil 4.44- Bina tipi 25y ve 31x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	94
Şekil 4.45- Bina tipi 32x ve 33x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	95
Şekil 4.46- Bina tipi 34x ve 35x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	96
Şekil 4.47- Bina tipi 31y ve 32y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	97
Şekil 4.48- Bina tipi 33y ve 34y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	98
Şekil 4.49- Bina tipi 35y ve 41x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	99
Şekil 4.50- Bina tipi 42x ve 43x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	100
Şekil 4.51- Bina tipi 44x ve 45x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	101
Şekil 4.52- Bina tipi 41y ve 42y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	102
Şekil 4.53- Bina tipi 43y ve 44y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	103
Şekil 4.54- Bina tipi 45y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği	104
Şekil 4.55- Bina tipi 11 ve 12, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	105
Şekil 4.56- Bina tipi 13 ve 14, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	106
Şekil 4.17- Bina tipi 15 ve 21x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	107
Şekil 4.58- Bina tipi 22x ve 23x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	108
Şekil 4.59- Bina tipi 24x ve 25x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	109
Şekil 4.60- Bina tipi 21y ve 22y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	110
Şekil 4.61- Bina tipi 23y ve 24y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	111
Şekil 4.62- Bina tipi 25y ve 31x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	112
Şekil 4.63- Bina tipi 32x ve 33x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	113
Şekil 4.64- Bina tipi 34x ve 35x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	114
Şekil 4.65- Bina tipi 31y ve 32y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	115
Şekil 4.66 - Bina tipi 33y ve 34y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	116
Şekil 4.67- Bina tipi 35y ve 41x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	117
Şekil 4.68- Bina tipi 42x ve 43x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	118
Şekil 4.69- Bina tipi 44x ve 45x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	119
Şekil 4.70- Bina tipi 41y ve 42y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	120
Şekil 4.71- Bina tipi 43y ve 44y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	121
Şekil 4.72- Bina tipi 45y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği	122
Şekil 5.1 Örnek 1 (5 katlı) kat planı	124
Şekil 5.2 Örnek 2 (5 katlı) kat planı	125

Şekil 5.3 Örnek 3 (10 katlı) kat planı	126
Şekil 5.4 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x mutlak hatâ grafiği	128
Şekil 5.5 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği.....	129
Şekil 5.6 Örnek5, $\xi = 0.05$ için P1'de V_x mutlak hatâ grafiği	130
Şekil 5.7 Örnek5, $\xi = 0.05$ için P1'de V_x göreceli hatâ grafiği	131
Şekil 5.8 Bina tipi 12 ve 13 (5 katlı), $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x mutlak hatâ grafiği	132
Şekil 5.9 Bina tipi 12 ve 13 (5 katlı), $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x göreceli hatâ grafiği	133
Şekil 5.10 Bina tipi 15 ve 42y (5 katlı), $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x mutlak hatâ grafiği	134
Şekil 5.11 Bina tipi 15 ve 42y (5 katlı), $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x göreceli hatâ grafiği	135
Şekil 5.12 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x mutlak hatâ grafiği	136
Şekil 5.13 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği.....	137
Şekil 5.14 Örnek3, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x mutlak hatâ grafiği	138
Şekil 5.15 Örnek3, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği	139
Şekil 5.16 Bina tipi 12 ve 13 (5 katlı), $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x mutlak hatâ grafiği	140
Şekil 5.17 Bina tipi 12 ve 13 (5 katlı), $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği	141
Şekil 5.18 Bina tipi 15 ve 42y (5 katlı), $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x mutlak hatâ grafiği	142
Şekil 5.19 Bina tipi 15 ve 42y (5 katlı), $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği	143
Şekil 5.20 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y (mutlak) hatâ grafiği	144
Şekil 5.21 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y (mutlak) hatâ grafiği.....	145
Şekil 5.22 Örnek5, $\xi = 0.05$ için P2'de V_y (mutlak) hatâ grafiği	146
Şekil Ek1.1 Perde elemanlarını modellemede kullanılan sonlu eleman.....	154
Şekil Ek1.2 Sonlu elemanın 7 numaralı nodunda 1 değerini alan şekil fonksiyonu	155
Şekil Ek1.3 Sonlu elemanın 4 numaralı nodunda 1 değerini alan şekil fonksiyonu	156
Şekil Ek1.4 Perde-kiriş birleşimi.....	157
Şekil Ek1.5 Kesin çözümü belirli bir örnek için 4X2 sonlu eleman modeli	157
Şekil E3.1 Kullanılan depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtları	161
Şekil E3.2 Kullanılan depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtları	162
Şekil E3.3 Kullanılan depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtları	163
Şekil E3.4 Kullanılan depremlerin tepki spektrumları	164
Şekil E3.5 Kullanılan depremlerin tepki spektrumları	165
Şekil E3.6 Kullanılan depremlerin tepki spektrumları	166
Şekil E3.7 Kullanılan depremlerin tepki spektrumları	167

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Burulmalı örnek yapıya ait büyüklükler.....	30
Çizelge 3.1 Örnek yapıya ait büyüklükler (devamı)	31
Çizelge 3.2 Örnek yapılara ait kolon boyutları, ve kat kütle ve ataletleri	37
Çizelge 3.3 Kullanılan yapı tiplerine ait özellikler.....	45
Çizelge 3.3 Kullanılan yapı tiplerine ait özellikler (devamı)	46
Çizelge 3.3 Kullanılan yapı tiplerine ait özellikler (devamı)	47
Çizelge 3.3 Kullanılan yapı tiplerine ait özellikler (devamı)	48
Çizelge 3.3 Kullanılan yapı tiplerine ait özellikler (devamı)	49
Çizelge 5.3 Örneklere ait özellikler.....	127
Çizelge 5.3 Örneklere ait özellikler (devamı)	127
Çizelge Ek1.1 Hatâ karşılaştırmaları	158
Çizelge Ek1.2 Sonuçların kıyaslanması	159



ÖNSÖZ

Malzeme ve inşaat teknolojilerinin yanı sıra tasarım yöntemlerinin gelişmesine paralel olarak, yapıların taşıyıcı elemanlarının kesitleri gittikçe küçülmekte ve buna bağlı olarak daha narin yapılar ortaya çıkmaktadır. Diğer bir ifadeyle, gün geçtikçe daha çok katlı ve yüksek yapı yapılabilirken, yapısal ve dinamik özellikleri itibarıyla daha az rijit (fleksibl) ve daha uzun periyotlu yapılar oluşmaktadır. Bu da yüklerin dinamik olarak dikkate alınması sınırlarını gittikçe genişletmektedir. Bu tür hesapların yapılmasında iki tür zorluk vardır. Birincisi, doğrudan hesap tekniklerinin uygulanmasında bilgisayar zamanı hâlâ uzundur; sonuçların değerlendirilmesine yönelik işlemciler (post-processors) yeterince pratik hâle getirilebilmiş değildir. İkincisi ise uygulamadaki güçlükler pratik anlamda henüz aşılabilmiş değildir; projelendirme standartlarının bu doğrultuda güncelleştirilmesi gerekir. Bu nedenle, dinamik hesabı daha az zahmetli hale getiren spektral yöntem hâlen geçerliliğini korumaktadır. Spektral olarak elde edilen modal büyüklükler, bir hatâ payı bulunan çeşitli birleştirme yöntemleriyle toplanarak, muhtemel maksimumları hesaplanmaktadır. Birleştirme (combination) tekniklerindeki hatâ payı, yapıların dinamik özelliklerine ve hesaplanacak tepkinin türüne de bağlıdır.

Bu çalışmada; yönetmeliklerde yaygın olarak kullanılmakta olan birleştirme tekniklerinden CQC (Complete Quadratic Combination-Tam Karesel Birleştirme) ve SRSS (Square Root of Sum of the Squares-Kareleri Toplamının Karekökü) yöntemlerinde, yapıların planda rijitlik ve ağırlık merkezleri arasındaki dış merkezliğe bağlı hatâ miktarları belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada parametrik yaklaşım yolu izlenmiştir. Bunun için; “kesin çözüm” anlamında zaman alanında çözüm yapan ve bunu bahsedilen spektral birleştirme yöntemleri ile yaptığı çözümlerle karşılaştırıp hatâları belirleyen bir bilgisayar programı kodlanmıştır. Bundan başka, spektral hesabı yapılacak büyüklüğün türüne bağlı olarak, birleştirme yöntemi seçimi incelenmiştir. Ayrıca bu anlamda, CQC yönteminin kullanımı ile ilgili olarak bir kullanım değişikliği önerilmiştir.

Bu çalışmanın hazırlanmasında ilgisini ve yardımlarını esirgemeyen danışman öğretim üyesi Sayın Prof. Zekeriya POLAT’a teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Dünya deprem yönetmeliklerinin çoğunda yer alan CQC modal spektral değer birleştirme yöntemi, kullanım olarak da basittir. Bu basitliği, yöntemin kabullerinden kaynaklanmaktadır. CQC (Complete Quadratic Combination-Tam Karesel Birleştirme) yöntemi, kendisinin bir özel hali olarak da görülebilecek olan SRSS (Square Root of Sum of the Squares-Karelerinin Karekökü) yönteminin gözardı ettiği ardışık doğal frekansların yakınlığını dikkate alır. Bunu, çapraz ilişki katsayıları yolu ile yapar. Bu katsayılar, bir yapı için yalnızca bu yapının sönüm oranı ve doğal frekanslarının yakınlığına bağlıdır. Bu katsayılar bir kere hesaplandıktan sonra, bu yapıya ait her türlü modal spektral büyüklüğün birleştirilmesi için kullanılırlar. Böylece CQC yöntemi ile birleştirmede, birleştirilen büyüklüğün türüne de bağlı olan hatâlar ortaya çıkar.

Bu çalışmada, üç boyutlu olarak ele alınan yapılarda, planda kütle ve rijitlik merkezleri arasındaki dış merkezlik nedeni ile, kolonlardaki kesme kuvvetlerinin CQC yöntemi ile birleştirilmesinde ortaya çıkan göreceli hatâ incelenmiştir. Bir dış merkezlik değerinde oluşan bu göreceli hatâ, bu dış merkezlik değeri ile sıfır dış merkezlik değerinde ortaya çıkan mutlak(toplam) hatâlar arasındaki fark olarak düşünülmüştür. Deprem, örneğin bir "X" doğrultusunda iken kolonlarda, yine bu doğrultuda oluşan maksimum kesme kuvvetlerinin hesaplanması sırasında ortaya çıkan bu göreceli hatânın, doğal frekansların yakınlığından çok modların harekete katılımları ile ilgili olduğu gözlenmiştir. Bunu dikkate alan bir oran (Q) ve dış merkezlik ile, CQC yönteminde ortaya çıkan bu hatâ arasında güvenilir bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu hesaplamalar tek katlı bir yapı dizisi için yapılmıştır. Çok katlı yapılarda da bahsedilen ilişkinin bulunduğu örnekler yardımı ile gösterilmiştir. Bu örneklerden dördü, kullanılan tek katlı yapıların beş katlı halleridir. Diğer üçü ise farklı kat planlarına sahip çok katlı örnek yapılarıdır.

Bu incelemeyi yapabilmek için; önce, üç boyutlu olarak ele alınan perdeli-çerçevesel yapıların dinamik analizini yapan bir program kodlanmıştır. Bu program yardımı ile örnek yapılar, zaman alanında ve bahsedilen birleştirme yöntemleri ile çözülmüş ve parametrik yaklaşımla, yukarıda bahsedilen sonuçlara ulaşılmıştır. Bundan başka, modal maksimum büyüklüklerin işaretleri ile doğrudan, üst üste toplanmalarının diğer ortogonal doğrultu, yani "Y" doğrultusundaki kesme kuvvetlerinin hesabı için daha az değişken hatâlara neden olduğu gözlenmiştir. Ayrıca "Y" doğrultusundaki bu kuvvetlerin hesabı için, CQC yönteminin kullanılmasında yararlı görülen bir düzeltme formülasyonu önerilmiştir.

Yatay yükler altındaki bir yapının, hesaplarda burulmalı bir sistem olarak dikkate alınmasının kriteri, Q oranı ve diğer bazı sistem özelliklerine bağlı olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal Titreşim Modları, Spektral Hesap, Birleştirme Teknikleri, Burulmalı Yapı, Hassasiyet.

ABSTRACT

CQC method included in the most of Earthquake Resistant Design Codes has a basic usage. This is because of the assumptions of the method. CQC method considers the closeness of the successive natural frequencies of the analysing structure unlike its former SRSS. The considerations are made by the cross correlation coefficients which depend on the ratios of the natural frequencies and the damping of the structure. Once these coefficients have been determined, any type of the response is combined by using same coefficients. Hence, some error depending on the response types occur in the method.

A computer program is coded which is capable of making time history and spectral analyses of structures including frames and panels. The program may use the modified earthquake records. Parametric studies have been realized.

In this study, the relative errors arising from combining the shear forces in columns in the same direction with the earthquake analyzed. These types of errors result from the eccentricities as a distance between the mass and rigidity centres in a floor plan in the three dimensional structures. The relative error is defined as a difference between the errors belonging to two states of same structure including and not including the eccentricity, respectively. A relation between the relative error in combined shear forces of columns in the considered earthquake direction when CQC used and the participation masses of the modes rather than the closeness of the successive natural frequencies of the structure are realized. A relation between the relative error and a new ratio (Q) considering the participating masses of modes is obtained.

Apart from that, combining the shear forces in columns in orthogonal direction to the earthquake by adding them together with their signs produced less varying errors than CQC method does. Furthermore, a modification has been proposed on the usage of CQC method.

A condition for considering a structure to behave as a lateral-torsional coupling structure in analyses under earthquake loads has been given. This condition depends on the ratio Q , eccentricity between the mass and rigidity centres and the lateral stiffness ratios of the two orthogonal directions of the structure.

Keywords: Natural Modes, Spectral Analysis, Combination Techniques, Lateral-torsional coupling, Accuracy.

1. GİRİŞ

1.1 Modal Spektral Büyüklükler ve Birleştirme Teknikleri

Yapıların dinamik analizinde, genelde üç ana yöntem kullanılır. Bunlar sırasıyla “eşdeğer statik analiz”, “spektral analiz” ve kesin çözüme karşı gelen “zaman alanında çözüm” yöntemleridir. Dünya deprem yönetmeliklerindeki gelişmelere bakıldığında; eşdeğer statik analizin yerini zamanla spektral yönteme bıraktığı görülür (Earthquake Resistant Regulations – A World List, 1992). Zaman alanında çözüm ise, tasarım için henüz pratik bir yöntem haline ulaştırılamamış olması nedeni ile, tasarımda henüz nadiren, genellikle akademik amaçlı olarak kullanılmaktadır. Nitekim, zaman alanında hesap, bu çalışmada da, spektral hesapta yapılan hatânın belirlenebilmesi amacıyla, kesin çözüm olarak kullanılmıştır.

Spektral hesap; modal spektral (maksimum) değerlerin bulunması ve bunların birleştirilmesi olmak üzere iki temelden oluşur. Modal spektral değerler, belirli birkaç teknikle sayısal veya analitik olarak hesaplanabilirler. Örneğin, sisteme uygulanan ivme fonksiyonları doğrusal veya harmonik olabilir ve bunlara ait açık çözümler vardır. Sayısal yönteme örnek olarak ise Duhamel integralinin sayısal çözümü verilebilir. Bu şekilde hesaplanan her modal değer maksimumu alınarak; modal maksimumlardan oluşan bir bilgi kümesi elde edilir. Bu bilgi, deprem şartnamelerinde, bazı genellemelerden sonra, tasarım spektrumu adı altında verilebilir. Böylelikle; tasarımcı bu hesaplamaları tekrar tekrar yapmak zorunda kalmaz. Yöntemin ikinci aşamasında, bu bilgiler çözüme ulaşılacak şekilde toplanır. Bu birleştirme aşamasında kullanılan yöntemler ise çeşitlilik göstermektedir. Bu yöntemlerden şartnamelerde en çok yer alanları SRSS (Square Root of Sum of the Squares – Kareleri Toplamının Karekökü) ve CQC (Complete Quadratic Combination – Tam Karesel Birleştirme) yöntemleridir.

Spektral hesapta yapılan hatâ, daha çok birleştirme yöntemlerinin yaklaşıklıklarından kaynaklanmaktadır. Örneğin CQC yönteminde yapılan yaklaşımlar, bu yöntemin yumuşak spektruma sahip ve yapının en büyük doğal periyodundan yeterince uzun depremler için kullanılmasını gerektirir (Kiureghian, 1981; Gupta, 1990; Chopra, 1995).

1.2 Önceki Çalışmalar

Spektral hesapta modal maksimumlarının birleştirilmesi için ilk yaklaşım ABS (Absolute Sum-Mutlak Toplam) olarak bilinmektedir. Bu yöntem, modal maksimumları, aynı anda oluşabileceklerini varsayıp mutlak değerce toplamaktadır. Bu yolla elde edilecek sonucun, problemin cevabının üst sınırı olacağı açıktır.

Aşırı konservatif olan bu yöntemin sakıncalarını bir ölçüde gideren bir diğer yöntem ise, SRSS (Square Root of Sum of the Squares-Kareleri Toplamının Karekökü) olarak anılmaktadır (Goodman, Rosenblueth, Newmark, 1953). Bu yöntem, birbirlerinden yeterince uzak frekanslara sahip modların maksimumlarının birleştirilmesinde iyi sonuçlar vermektedir (Gupta, 1990; Kiureghian, 1981; Seismology Committee Structural Engineers Association of California, 1990; Wilson, Kiureghian, Bayo, 1981).

Doğal frekansların yakınlığını dikkate alan bir yöntem Rosenblueth ve Elorduy yöntemidir (Rosenblueth, Elorduy ,1969). Bu yöntem, modların frekans ve sönüm oranına ve depremin etkin uzunluğuna bağlı olarak formüle edilmiştir. Bu uzunluğa karar vermek açık olmadığı için, çeşitli deprem kayıtları ile çalışılarak, parametrik bir formül önerilmiştir (Gupta, Cordero, 1981).

Benzer fakat deprem uzunluğuna bağlı olmayan bir formülasyonu bulunan bir başka yöntem ise, CQC (Complete Quadratic Combination-Tam Karesel Birleştirme) yöntemidir (Kiureghian, 1981). Gupta tarafından önerilen Rosenblueth ve Elorduy yönteminde, CQC formülasyonunun birbirlerinden çok farklı sönüm oranları için aldığı durumdan yararlanarak tekrar düzenleme yapılmıştır. Son iki yöntem, böylelikle, birbirlerine çok yakın sonuçlar verir bir yapı kazanmıştır (Gupta, 1990).

CQC yöntemi, sıfır sönüm oranı değeri için SRSS yöntemine dönüşmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile SRSS ve CQC yöntemlerinin çözüm zamanları arasında çok az bir fark olduğu ve SRSS yönteminin yakın frekanslara sahip sistemlerde kayda değer hatâlar yapabildiği görülerek, CQC yönteminin tamamıyla SRSS yönteminin yerini alması önerilmiştir (Wilson, Kiureghian, Bayo, 1981). Halen, CQC yöntemi, spektral hesapta modal maksimumların birleştirilmesinde dünya deprem yönetmeliklerinin çoğunda yer alan bir yöntemdir. Hassasiyeti üzerine ise bir çok karşılaştırmalar yapılmıştır (Kiureghian, 1981; Gupta, 1990; Seismology Committee Structural Engineers Association of California, 1990; Wilson, Kiureghian, Bayo, 1981; Gupta, Cordero, 1981; Chopra, 1995; Wilson, 1998). Bu karşılaştırmalarda; genellikle çerçeve sistemler ve üç boyutlu olarak ele alınan yapılar

kullanılmıştır. Hatânın kaynağı hakkında ise esas olarak frekansların yakınlığı öne sürülmüştür. Bununla birlikte çerçeve ve üç boyutlu sistemlerin tepki kuvveti oluşturmadaki davranış biçimi farklılığından bahsedilmemiştir. Bu çalışmada, dış merkezlik nedeni ile ortaya çıkan bu davranış farklılığının CQC yönteminde oluşturduğu hatânın bağlı olduğu bir parametre belirlenmiştir.

Yatay yükler altında (Rüzgar yükleri), bir yapının burulmalı olarak ele alınıp alınamayacağına karar vermek için, dış merkezliğe bağlı bir kriter Liang 1997'te verilmektedir. Dış merkezlik %5 değerinden büyük olduğunda, yapı cevabında burulma etkilerinin dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir. Dış merkezlik değerinden başka, yapıya ait hiç bir büyüklük bu kriterde yer almamaktadır. Bu çalışmada, bunun eksik bir tanımlama olduğu, yapıya ait bazı diğer büyüklüklerin de bu kriterde belirleyici olduğu gösterilmiştir.

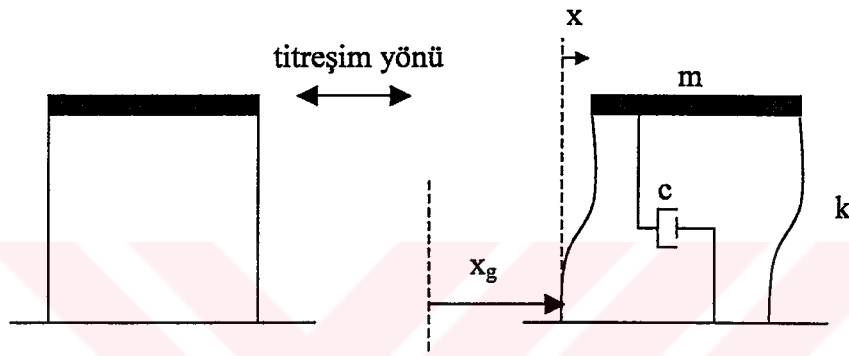
Depreme dik doğrultudaki kolon kesme kuvvetlerinin (veya momentlerinin) CQC yöntemi ile hesabında, bu yöntemin kullanımında bir değişikliğe gidilmesinin hatâyı azaltabildiği görülmüştür.

Önceki çalışmalardan, bu çalışma bağlamında gerekli görülenler, aşağıdaki bölümlerde, yeri geldikçe ayrıca açıklanmış ve değerlendirmeleri yapılmıştır.

2. YAPILARIN DİNAMİK HAREKET DENKLEMLERİ VE ÇÖZÜMLERİ

2.1 Bir Serbestlik Dereceli Sistemin Dinamik Hareket Denklemi

Bir sistemin dinamik modeli oluşturulurken; ilk olarak, bu sistemin hareketini geometrik olarak tanımlamak için gerekli olan koordinat eksenleri ve parametreleri belirlenir. Bu tanımlamayı yapmak için gerekli olan parametre sayısının en azına, bu sistemin dinamik serbestlik derecesi denir. Örneğin yatayda bir yönde hareket eden ve kütlesi kat hizasında toplanmış kabul edilen bir katlı yapının serbestlik derecesi 1 dir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Bir katlı yapı ve dinamik hareket modeli

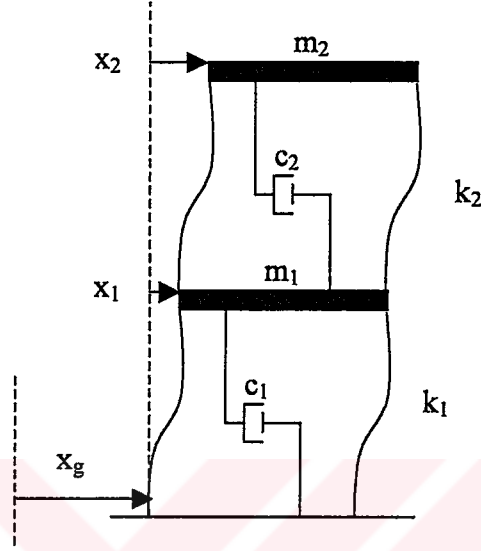
Şekil 2.1 de görülen yapının dinamik hareket denklemi; D'Alambert prensibinden yararlanılarak oluşturulabilir. Atalet kuvvetlerinin de bir dış yük olarak kabul edildiği bir denge ifadesi olan bu prensip uygulandığında, bu yapının diferansiyel hareket denklemi:

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_g) + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

olur. Burada m, yapının kat hizasında toplandığı kabul edilen kütlesidir; k ise kirişlere bağlı kolonların yay katsayısıdır. Örneğin; bu yapının kirişlerinin kolonlarına göre küçük kesitli olduğu ve kolon kiriş birleşimlerinin bu nedenle pek fazla dönmediği kabul edilirse (kayma çerçevesi) bir kolonun yay katsayısı $12EI/\ell^3$ olarak hesaplanabilir. Bir ucu mafsallı olduğunda bu değer $3EI/\ell^3$ olacaktır. Ara durumlar ise, yüksek dereceden hiperstatik sistemlerin çözümünü gerektirecektir. c değeri, viskoz sönüm katsayısıdır. Yapısal sistemlerde genelde sönüm kuvvetinin hız ile orantılı (viskoz) olduğu kabul edilir; buradaki çözümlerde de böyle alınmıştır.

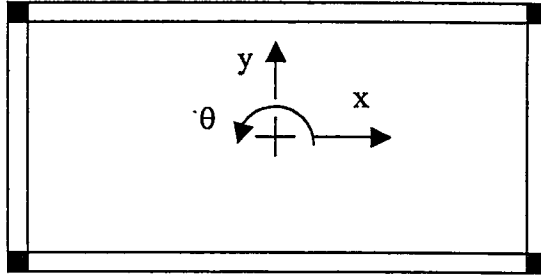
2.2 Çok Serbestlik Dereceli Sistemin Dinamik Hareket Denklemi

Serbestlik derecesi 2 ve daha üstü olan sistemlere çok serbestlik dereceli sistemler denir; Şekil 2.1'deki yapının kat adetleri artırılırsa çok serbestlik dereceli bir sistem elde edilmiş olur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Çok serbestlik dereceli sistemin dinamik modeli

Aynı yapının kat adedi 1 iken bu katın hareket serbestliği artırılırsa yine çok serbestlik dereceli bir sistemden bahsedilir (Şekil 2.3). Bu çalışmada çözülen örneklerde her kata iki yatay doğrultuda öteleme ve düşey eksen etrafında dönme olmak üzere toplam 3 adet dinamik serbestlik ve bunlara karşılık gelen kütle değerleri (kütle, kütleli atalet momenti) verilmiştir.



Şekil 2.3 Kat kütle merkezinde tanımlı serbestlik parametreleri

Serbestlikleri tanımlayacak koordinat eksenleri kütle merkezlerinde alınmıştır (Şekil 2.3). Bu nedenle kütle matrisi, karşılık gelen serbestliklerdeki kütleli değerleri (kütle ya da kütleli atalet momenti) içeren bir köşegen kare matristir.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \quad [k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Rijitlik matrisi ise, aynı boyutta ve sistem lineer olduğu için simetrik bir kare matristir. Sönüm matrisi ise, sistemdeki ξ modal sönüm oranlarının tümü birbirlerine eşit olacak şekilde belirlenmiştir.

$$\xi_1 = \xi_2 = \cdots = \xi_n \quad (2.3)$$

Bu tanımlamalar altında, çok serbestlik dereceli bir sistemin diferansiyel hareket denklemi, yine D'Alambert prensibinden yararlanılarak oluşturulabilir. Yapıyla ilgili bu bilgiler matrislere yerleştirilir ve Bölüm 3.1'deki gibi bir yer ivmesi etkisindeki çok serbestlik dereceli sistemin diferansiyel hareket denklemi :

$$[m](\{\ddot{x}\} + \{I\}\ddot{x}_g) + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = 0 \quad (2.4)$$

olur. Bu ifade, ikinci mertebeden lineer bir diferansiyel denklem sistemidir. Vektörlerin boyutları sistemin serbestlik derecesine eşittir.

2.3 Bir Serbestlik Dereceli Sistemin Titreşim Diferansiyel Denkleminin Çözümü

(2.1) ile verilen denklem düzenlenirse,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (2.5)$$

şeklini alır.

Bu denklem, kütleye uygulanan zamana bağlı bir ivme etkisi içermektedir. Bu çalışmada söz konusu ivme deprem (yer sarsıntısı) ivmesidir. Uygulamada deprem ivmelerinin değerleri 1/100 veya 1/200 s aralıklarla yapılan okumalardır. t_i 'ler okuma zamanlarını göstermek üzere, bu aralıklardaki $\ddot{x}_g(t_i)$ ardışık düzeltilmiş deprem ivmeleri birer doğruyla birleştirilirse, (2.5)'deki yer ivmesi fonksiyonu $a_i t + b_i$ şeklinde, t_i , t_{i+1} aralığında geçerli, çok fakat sonlu sayıda doğru fonksiyonundan oluşur; burada t deprem ivmesinin kaydedildiği zaman aralığının başlangıcından itibaren geçen zamanı gösterir.

Her iki taraf m ile sadeleştirilerek,

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2 x = at + b \quad (2.6)$$

yazılabilir. Elde edilen denklem ikinci mertebeden lineer bir diferansiyel denklemdir. Bu denklemin ikinci tarafsız çözümü :

$$x_h(t) = e^{-\xi\omega t} (G_1 \sin(\omega_D t) + G_2 \cos(\omega_D t)) \quad (2.7)$$

şeklindedir. Burada G_1 ve G_2 integral sabitleridir; ω_D ise sönümlü sistemin titreşim frekansıdır. Sönümsüz sistemin titreşim frekansıyla arasındaki ilişki Denk.(2.8)'de verilmiştir.

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.8)$$

(2.7) çözümü, ξ değerinin $c/2m\omega$ değerinden (kritik sönüm oranından) küçük olduğu durumlar için geçerlidir; bu şart sağlanırsa hareket bir titreşim hareketidir, aksi halde değildir.

Denklem 2.6'nın bir özel çözümü

$$x_p(t) = \frac{a}{\omega^2} t - \frac{2\xi a}{\omega^3} + \frac{b}{\omega^2} \quad (2.9)$$

alınabilir. Bu durumda genel çözüm :

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) = e^{-\xi\omega t} (G_1 \sin(\omega_D t) + G_2 \cos(\omega_D t)) + \frac{a}{\omega^2} t - \frac{2\xi a}{\omega^3} + \frac{b}{\omega^2} \quad (2.10)$$

şeklindedir.

Başlangıç şartları $x(0) = x_0$ ve $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$ ile, integral sabitleri :

$$G_1 = \frac{1}{\omega_D} \left(\dot{x}_0 + \xi\omega x_0 - \frac{\xi b}{\omega} + \frac{(2\xi^2 - 1)a}{\omega^2} \right) \quad (2.11)$$

$$G_2 = x_0 - \frac{b}{\omega^2} + \frac{2\xi a}{\omega^3}$$

bulunur. Bu ifadeler deprem kayıtlarının ölçüldüğü her zaman aralığı için hesaplanmalıdır; diğer bir ifadeyle $t_i - t_{i+1}$ zaman aralığının sonunda, bulunan yerdeğiştirme ve hız değerleri, $t_{i+1} - t_{i+2}$ zaman aralığındaki çözüm için başlangıç şartları olacaktır.

2.4 Çok Serbestlik Dereceli Sistemin Sönümsüz Serbest Titreşim Diferansiyel Denkleminin Çözümü

Çok serbestlik dereceli sistemin dinamik hareket denklemi (2.4)'de verilmişti. Bu denklem yer ivmesi ve sönümün ihmal edildiği (pratik olarak, yapı frekans ve modlarının hesabında bu kabul yapılabilir) hal için düzenlenirse:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = \{0\} \quad (2.12)$$

şeklini alır. Çözümün,

$$x = \{\phi\}\alpha \sin(\omega t + \theta) \quad (2.13)$$

şeklinde olduğu düşünülebilir. Bu ifade Denk.(2.12)'de yerine konulursa

$$\alpha \left[[k] - \omega^2 [m] \right] \{\phi\} \sin(\omega t + \theta) = \{0\} \quad (2.14)$$

elde edilir. Burada ω ve $\{\phi\}$ denklemin sağlanması için belirtilmesi gereken dinamik parametreler, α ve θ ise integral sabitleridir. İkinci tarafı sıfır olan bu lineer denklem sisteminin

$$\left[[k] - \omega^2 [m] \right] = 0 \quad (2.15)$$

determinantının sağlanması gerekir. Bu eşitlik ω^2 ye göre n-ci dereceden bir polinom verir. Burada n serbestlik derecesini göstermektedir. Bu polinomun n adet ω^2 kökü vardır. Her bir ω^2 için bir adet olmak üzere, (2.14) yardımıyla n adet de $\{\phi\}$ genlik vektörü bulunur. Örneğin n adet ω^2 değerinden birincisi için $\{\phi\}$ değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$[E] = [k] - \omega_1^2 [m] \quad (2.16)$$

olsun; $\{\phi_1\}$ değerlerini bulmak için,

$$[E]\{\phi_1\} = \{0\} \quad (2.17)$$

denkleminin çözümü gerekmektedir. Bu denklem sisteminin ikinci tarafı sıfır olduğu için sonsuz adet çözümü vardır. Bu durumda $\{\phi\}$ vektörü ancak bir değere bağlı olarak belirlenebilir. Genelde, $\{\phi\}$ matrisinin ilk elemanı 1 olarak belirlenip diğerleri buna göre hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_{11} & \mathbf{E}_{10} \\ \mathbf{E}_{01} & \mathbf{E}_{00} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ \phi_{0n} \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

şeklinde bir parçalama yapılırsa, bu denklem sisteminin çözümüyle

$$\phi_{0n} = -(\mathbf{E}_{00})^{-1} \mathbf{E}_{01} \quad (2.19)$$

bulunur. Bu durumda

$$\{\phi_1\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ \phi_{0n} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

olarak hesaplanır. Burada $\{\phi\}$ 'ler, yapının mod vektörleri olarak adlandırılır; bunların sayısı serbestlik derecesi kadardır.

Yapıya ait matrislerin diklik (ortagonallik) özellikleri Denklem 2.12'nin çözümüne büyük kolaylıklar getirir.

2.5 Modların Dikliği (Ortagonallığı)

Betti Karşılık Teoreminin uygulanmasıyla mod şekillerinin sahip olduğu diklik özelliği görülebilir. (2.14) yeniden düzenlenerek;

$$[[\mathbf{k}] - \omega^2 [\mathbf{m}]] \{\phi\} = \{0\} \quad (2.21)$$

ve, buradan

$$[\mathbf{k}] \{\phi_i\} = \omega_i^2 [\mathbf{m}] \{\phi_i\} \quad (2.22)$$

elde edilir. Bu eşitlikteki büyüklükler kuvvet anlamındadır. $\{\phi\}$ mod şekli matrisi yerdeğiştirmeye ait bir büyüklüktür. Betti Karşılık Teoremi uygulanırsa,

$$\{\phi_j\}^T [\mathbf{k}] \{\phi_i\} = \{\phi_i\}^T \omega_j^2 [\mathbf{m}] \{\phi_j\} \quad (2.23)$$

ve

$$\{\phi_j\}^T \omega_i^2 [\mathbf{m}] \{\phi_i\} = \{\phi_i\}^T \omega_j^2 [\mathbf{m}] \{\phi_j\} \quad (2.24)$$

elde edilir. Düzenlenirse,

$$(\omega_i^2 - \omega_j^2) \{\phi_i\}^T [\mathbf{m}] \{\phi_j\} = 0 \quad (2.25)$$

bulunur; farklı iki moda ait frekanslar eşit olmayacağı için bu eşitliğin sağlanması,

$$\{\phi_i\}^T [m] \{\phi_j\} = 0 \quad i \neq j \quad (2.26)$$

olmasını gerektirir. İki ayrı modal vektörün kütle matrisi ağırlıklı skaler çarpımı olan eşitlik özelliği nedeni ile, buna modların dikliği denir. Aynı işlem rijitlik matrisi içerilecek şekilde tekrarlanırsa,

$$\{\phi_i\}^T [k] \{\phi_j\} = 0 \quad i \neq j \quad (2.27)$$

elde edilir. Bu eşitlikten, mod şekillerinin rijitlik matrisi ağırlıklı olarak da birbirlerine göre dik oldukları anlaşılır.

2.6 Çok Serbestlik Dereceli Sistemin Sönümsüz Titreşim Diferansiyel Denkleminin Ayrıklaştırılarak Çözümü

Çok serbestlik dereceli sistemin dinamik hareket denklemi (2.4) düzenlenip yer ivmesi fonksiyonu paragraf 2.3'deki gibi $at+b$ ile gösterilirse, bir ivme etkisi altındaki sönümlü çok serbestlik dereceli sistemin diferansiyel hareket denklemi,

$$[m] \{\ddot{x}\} + [c] \{\dot{x}\} + [k] \{x\} = [m] \{B\} (at + b) \quad (2.28)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\{B\}$ vektörü depremin etkime doğrultusunu dikkate alan bir sütun matristir. Örneğin deprem x yönünde etki ediyorsa x yönü ile ilgili serbestliklere karşılık gelen elemanları -1 , diğer elemanları 0 dır.

Bu denklem sistemini,

$$\{x\} = \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} Y_i = [\phi] \{Y\} \quad (2.29)$$

ile,

$$[m] [\phi] \{\ddot{Y}\} + [c] [\phi] \{\dot{Y}\} + [k] [\phi] \{Y\} = [m] \{B\} (at + b) \quad (2.30)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklem sisteminin her iki tarafı soldan i -ci moda ait mod şeklinin transpozitesiyle çarpılır,

$$\{\phi_i\}^T [m] [\phi] \{\ddot{Y}\} + \{\phi_i\}^T [c] [\phi] \{\dot{Y}\} + \{\phi_i\}^T [k] [\phi] \{Y\} = \{\phi_i\}^T [m] \{B\} (at + b) \quad (2.31)$$

ve, (2.26) ve (2.27) ile verilen ortagonallik özellikleri dikkate alırsa,

$$\{\phi_i\}^T [m] \{\phi_i\} \ddot{Y}_i + \{\phi_i\}^T [c] \{\phi_i\} \dot{Y}_i + \{\phi_i\}^T [k] \{\phi_i\} Y_i = \{\phi_i\}^T [m] \{B\} (at + b) \quad (2.32)$$

şeklini alır; bu, (2.28) denklem sisteminin ayrıklaştırılmış (uncoupled) hâlidir. Burada sönüm matrisinin de ortogonal olduğu farzedilmiştir. Kısaltma için,

$$\begin{aligned} M_i &= \{\phi_i\}^T [m] \{\phi_i\} \\ K_i &= \{\phi_i\}^T [k] \{\phi_i\} \\ C_i &= \{\phi_i\}^T [c] \{\phi_i\} \end{aligned} \quad (2.33)$$

şeklinde gösterilir; burada M_i i-ci modal kütle ya da i-ci moda ait genelleştirilmiş kütle, C_i i-ci moda ait genelleştirilmiş sönüm katsayısı, K_i ise i-ci moda ait genelleştirilmiş rijitlik (yay) katsayısı olarak adlandırılır:

$$M_i \ddot{Y}_i + C_i \dot{Y}_i + K_i Y_i = \{\phi_i\}^T [m] \{B\} (at + b) \quad (2.34)$$

Her iki taraf M_i ile bölünürse,

$$\ddot{Y}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{Y}_i + \omega_i^2 Y_i = q_i (at + b) \quad (2.35)$$

şeklini alır. Burada

$$q_i = \frac{\{\phi_i\}^T [m] \{B\}}{M_i} \quad (2.36)$$

olup i-ci moda ait katılım çarpanı adını alır. Bir serbestlik dereceli sisteme benzer şekilde ξ_i ise i-ci moda ait modal sönüm oranıdır.

Denklem 2.37'nin bir serbestlik dereceli sistemin hareket denkleminden şekil itibariyle tek farkı, q katılım çarpanıdır. Bir serbestlik dereceli sistemlerin çözümü genelleştirilmiş koordinatlarda yapılır ve çözümler (2.29)'da yerlerine konularak genel çözüme ulaşılır.

3. SPEKTRAL HESAP TEKNİKLERİ VE HASSASİYET

3.1 Giriş

Yapıların dinamik analizinde spektral hesap, modlara ait cevapların mutlak maksimumlarını kullanır. Hesabın ilk aşamasında modal maksimum değerler hesaplanır. İkinci aşamada ise, hesaplanan bu değerler belirli bir teknikle birleştirilir. Spektral hesap, birleştirme aşamasında kullanılan teknikler açısından çeşitlilik göstermektedir. ABS (Absolute Sum-Tam Toplam), SRSS (Square Root of Sum of The Squares-Kareleri Toplamının Karekökü), CQC (Complete Quadratic Combination-Tam Karesel Birleştirme) bunlardan yaygın olarak kullanılanlardır. Bunlardan SRSS ve CQC, düzgün yapılar için verdikleri yeterli yaklaşıklıkta sonuçları nedeniyle, Dünya deprem yönetmeliklerinin çoğunda yer almaktadırlar (Earthquake Resistant Regulations – A World List, 1992).

Yapıları etkileyen deprem dalgaları tamamen belirli değildir; bu dalgaların özelliklerinde rastgelelik vardır. Zaman parametresine bağlı bu deprem dalgalarının farklı tarihlerde oluşmasıyla bir rastgele olaylar kümesi (işlem) meydana geleceğine göre, bu rastgele kümeleri dikkate alarak dinamik hesap yapıldığında, elde edilen sonuçlarda da bir rastgelelik özelliği bulunacaktır. Bu tür hesaplara “stokastik hesap” denmektedir.

3.2 Bir Serbestlik Dereceli Sistemler

Bir serbestlik dereceli doğrusal elastik sisteme ait diferansiyel hareket denklemi,

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = f_0(t) \quad (3.1)$$

şeklinindedir. Burada ω_0 sistemin doğal titreşim açısal frekansı, ω dış yüke ait frekans, ξ sönüm oranı, $f_0(t)$ ise dış yüküdür. (3.1)'de $f(t) = f_0(t) = e^{i\omega t}$ şeklinde bir karmaşık (complex) yük olarak verilirse, denklemin sıfır başlangıç şartları için çözümü,

$$x(t) = \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\xi\omega_0\omega} f_0(t) = H(i\omega) f_0(t) \quad (3.2a)$$

olarak bulunur. Burada $H(i\omega)$ transfer fonksiyonu adı ile anılır. Her iki tarafın Fourier dönüşümü yapılırsa,

$$V(i\omega) = H(i\omega) P(i\omega) \quad (3.2b)$$

bulunur. Burada $V(\omega)$, Denklem 3.1' in kararlı titreşimine ait frekans alanındaki çözümdür. $P(\omega)$ ise, $f(t)$ 'nin Fourier dönüşümüdür.

Denklem 3.1'in sıfır başlangıç şartları için çözümü, Duhamel integrali yardımı ile,

$$x(t) = \int_0^t h(t-\tau) f(\tau) d\tau \quad (3.3)$$

şeklinde verilebilir Burada $h(t-\tau)$ fonksiyonu, τ anındaki birim darbe etkisine sistemin verdiği cevaptır. Her iki tarafın Fourier dönüşümü yapılırsa,

$$V(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) f(\tau) e^{-i\omega t} d\tau dt \quad (3.4)$$

bulunur. Burada $\theta = t - \tau$ değişken dönüşümü yapılırsa,

$$V(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\theta) e^{-i\omega\theta} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h(\theta) e^{-i\omega\theta} d\theta P(i\omega) \quad (3.5)$$

bulunur. $h(t)$ fonksiyonunun sönümlenen bir fonksiyon olduğu düşünülerek integral sınırlarındaki τ düşürülmüştür. (3.5) ve (3.2b) karşılaştırıldığında transfer fonksiyonunun,

$$H(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.6)$$

şeklinde, birim darbe fonksiyonunun Fourier dönüşümü olduğu görülür.

Farklı tarihlerde oluşan depremlerin stokastik hesap için bir toplum (population) oluşturdukları düşünölsün. Bu depremlerin bir t anındaki toplum boyunca hesaplanan ortalamaları veya beklenen değeri, $\bar{F}(t) = E[F(t)]$ ile gösterilir. Benzer şekilde, t_1 ve t_2 anlarındaki değerlerinin çarpımlarının toplum boyunca olan ortalaması, otokorelasyon fonksiyonu adını alır ve $R_{FF}(t_1, t_2) = E[F(t_1)F(t_2)]$ ile gösterilir. Bu değer, depremlerin birbirlerine bağıllığını gösteren bir büyüklüktür. Aynı büyüklükler yapının depreme cevabı gibi, her rastgele işlem için hesaplanabilir. Bu ortalamalar zaman boyunca da hesaplanırlar ve $\langle F(t) \rangle$, $\langle F(t_1)F(t_2) \rangle$ şeklinde gösterilirler. Eğer bu rastgele işlemde, \bar{F} ve R_{FF} zamandan bağımsız fonksiyonlar ise, pratikte, bu rastgele işleme, kararlı bir işlemdir denebilir. Eğer kararlı bir işlem için zaman boyunca hesaplanan bu ortalamalar birbirlerine eşitse, aynı şekilde pratikte bu işleme ergodik işlem denir. $t_2 - t_1 = \tau$ olmak üzere,

$$S_F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_F(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (3.7)$$

ile “güç spektral yoğunluk fonksiyonu” elde edilir. Bir özel hal olarak; bütün frekans ekseninde boyunca $S_f = \text{sabit}$ ise bu işlem beyaz gürültü denmektedir. Bu durumda S_f tüm topluluk için aynı olduğundan, beyaz gürültü ergodik bir işlem olmaktadır. Aynı zamanda Gauss dağılıma sahiptir (Clough ve Penzien, 1975).

Denklem 3.2’de $f(t)$ fonksiyonu; sıfır ortalamalı, kararlı $F(t)$ rastgele işlemiyle temsil edilsin. Bu durumda $X(t)$ tepki fonksiyonu da bir rastgele işlem olacaktır. Tepki fonksiyonunun ortalama veya beklenen değeri,

$$E[x(t)] = E\left[\int_{-\infty}^t F(\tau)h(t-\tau)d\tau\right] = \int_{-\infty}^t E[F(\tau)]h(t-\tau)d\tau \quad (3.8)$$

olarak bulunur. Burada işlem, sıfır ortalamalı $E[F(\tau)] = 0$ olduğu için,

$$E[x(t)] = 0 \quad (3.9)$$

olarak, tepki işleminin de sıfır ortalamaya sahip olacağı sonucu çıkar.

Tepki işleminin otokorelasyon fonksiyonu,

$$R_{xx} = E[x(t)x(t+\tau)] = E\left[\int_{-\infty}^t F(\theta_1)h(t-\theta_1)d\theta_1 \int_{-\infty}^{t+\tau} F(\theta_2)h(t+\tau-\theta_2)d\theta_2\right] \quad (3.10)$$

şeklindedir.

$$\begin{aligned} u &= t - \theta_1 \\ v &= t + \tau - \theta_2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

değişken dönüşümü yapılırsa,

$$R_{xx} = E\left[\int_{-\infty}^0 F(t-u)h(u)du \int_{-\infty}^0 F(t+\tau-v)h(v)dv\right] \quad (3.12)$$

bulunur. $h(t)$ fonksiyonu $t < 0$ için 0 değerini alır ve t nin büyük değerleri için sönümlenir. Bu durumda integral,

$$R_{xx} = E\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(t-u)F(t+\tau-v)h(u)h(v)du dv\right] \quad (3.13)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede yalnızca F fonksiyonları rastgele olduğuna göre,

$$R_{xx} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E[F(t-u)F(t+\tau-v)]h(u)h(v)du dv = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{FF}(\tau-v+u)h(u)h(v)du dv \quad (3.14)$$

olarak, tepkiye ait otokorelasyon fonksiyonu bulunur. Denklem 3.14'den, R_{xx} tepkinin otokorelasyon fonksiyonununun da yalnızca zaman farkı τ ya bağlı olduğu görülür.

Tepki fonksiyonunun güç spektral yoğunluk fonksiyonu ise, bu işlemin ergodik olduğu kabulü ile, (3.14)'e Fourier dönüşümü uygulanarak bulunabilir:

$$S_{xx} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{FF}(\tau-v+u)h(u)h(v)e^{-i\omega\tau} du dv d\tau \quad (3.15)$$

Bu ifadede, $\theta = \tau - v + u$ değişken dönüşümü yapılırsa,

$$\begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty+u-v}^{\infty+u-v} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{FF}(\theta)h(u)h(v)e^{-i\omega(\theta-u+v)} du dv d\theta \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h(v)e^{-i\omega v} dv \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{FF}(\theta)e^{-i\omega\theta} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} h(u)e^{i\omega u} du \\ &= H(i\omega)S_{FF}H^*(i\omega) \end{aligned} \quad (3.16)$$

bulunur. Burada $H^*(i\omega) = H(-i\omega)$ dır. Diğer bir gösterimle,

$$S_{xx}(\omega) = |H(i\omega)|^2 S_{FF}(\omega) \quad (3.17)$$

olarak yazılabilir. Bu denklem, bir serbestlik dereceli doğrusal sistemlerde tepkinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu, kararlı bir giriş işleminin güç spektral yoğunluk fonksiyonu cinsinden verir. Denklem 3.17'nin ters Fourier dönüşümü, yine bu işlem için otokorelasyon fonksiyonunu verecektir:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} |H(i\omega)|^2 S_{FF}(\omega)e^{i\omega\tau} d\omega \quad (3.18)$$

Denklem 3.9'a göre tepkinin ortalaması sıfırdır. Bu durumda, $\tau = 0$ için,

$$\sigma_x^2 = R_{xx}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} |H(i\omega)|^2 S_{FF}(\omega) d\omega \quad (3.19)$$

olarak bulunabilir.

Eğer giriş işlemi kararlı Gauss dağılımına sahipse, bu işleme ait güç spektral yoğunluk

fonksiyonlarının doğrusal toplamlarıyla elde edilen fonksiyonun ait olduğu işlem de Gauss dağılımına sahip olacaktır (Clough ve Penzien, 1975). Denklem 3.1 lineer bir denklem olduğu için, tepki işlemi de Gauss dağılımına sahip olacaktır. Denklem 3.19 ise bu dağılımı temsil etmeye yeterlidir.

3.3 Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Çok serbestlik dereceli doğrusal elastik siteme ait hareket diferansiyel denklemi (3.1)'e benzer şekilde,

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F\} \quad (3.20)$$

olarak verilebilir. Burada giriş fonksiyonu $\{F\}$ rastgele bir işlem olduğu için, tepki $\{x\}$ de bir rastgele işlem olacaktır. Genelleştirilmiş koordinatlarla ilişkisi, modal koordinatlar cinsinden,

$$\{x\} = [\phi]\{Z\} \quad (3.21)$$

olarak verilebilir. Denklem 3.21 ve türevleri (3.20)'de yerine konulursa,

$$[m][\phi]\{\ddot{Z}\} + [c][\phi]\{\dot{Z}\} + [k][\phi]\{Z\} = \{F\} \quad (3.22)$$

elde edilir. Bu denklemin her iki tarafı, $\{\phi_j\}^T$ j-ci modal vektör ile çarpılırsa, ortogonalite özellikleri de dikkate alınarak,

$$\ddot{Z}_j + 2\xi_j\omega_j\dot{Z}_j + \omega_j^2 Z_j = P_j \quad (3.23)$$

elde edilir. Burada Z_j j-ci modal koordinat, ω_j ve ξ_j sırasıyla j-ci moda ait doğal titreşim açısal frekansı ve sönüm oranıdır. Genelleştirilmiş dış yüke ait ifade ise,

$$P_j = \frac{\{\phi_j\}^T \{F\}}{M_j} \quad (3.24)$$

olarak verilebilir. Burada M_j , j-ci moda ait genelleştirilmiş küttedir. Bu ifadenin otokorelasyon fonksiyonu,

$$[R_{pp}] = [\bar{\phi}]^T [R_{FF}] [\bar{\phi}] \quad (3.25)$$

olarak bulunur. Burada $[\bar{\phi}]$, kütle matrisine göre normalize edilmiş mod şekli matrisidir. Eğer $F(t)$ kararlı ve Gauss dağılımına sahip bir işlem ise, $P(t)$ de kararlı ve Gauss dağılımına

sahip bir işlem olacaktır. Bir serbestlik dereceli sistemlerde olduğu gibi,

$$R_{z_j z_k}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{p_j p_k}(\tau - v + u) h_j(u) h_k(v) du dv \quad (3.26)$$

ve

$$S_{z_j z_k} = H_k(i\omega) S_{p_j p_k} H_j^*(i\omega) \quad (3.27)$$

yazılabilir. Denklem 3.25'in her iki tarafının Fourier dönüşümü yapılırsa,

$$[S_{pp}(\omega)] = [\bar{\phi}^T] [S_{FF}(\omega)] [\bar{\phi}] \quad (3.28)$$

bulunur. Modal koordinatlara ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu ise, (3.27) ve (3.28) yardımıyla,

$$[S_{zz}(\omega)] = [H_z(i\omega)] [\bar{\phi}^T] [S_{FF}(\omega)] [\bar{\phi}] [H_z^*(i\omega)] \quad (3.29)$$

bulunur. Burada $[H_z^*(i\omega)] = [H_z(-i\omega)]$ dir. $[H_z(i\omega)]$ ise köşegeninde ilgili moda ait transfer fonksiyonunu bulunduran köşegen bir matristir. Bu denklem, modal koordinatlara ait güç spektral yoğunluk fonksiyonunu, giriş işleminin güç spektral yoğunluk fonksiyonu cinsinden verir. Bu denklemde,

$$[S_{xx}(\omega)] = [\phi] [S_{zz}(\omega)] [\phi^T] \quad (3.30)$$

bağıntısı dikkate alınırsa,

$$[S_{xx}(\omega)] = [\phi] [H_z(i\omega)] [\bar{\phi}^T] [S_{FF}(\omega)] [\bar{\phi}] [H_z^*(i\omega)] [\phi^T] \quad (3.31)$$

elde edilir. Burada,

$$[H(i\omega)] = [\phi] [H_z(i\omega)] [\bar{\phi}^T] \quad (3.32)$$

olarak gösterilirse, Denklem 3.31,

$$[S_{xx}(\omega)] = [H(i\omega)] [S_{FF}(\omega)] [H^*(i\omega)] \quad (3.33)$$

şeklini alır. Böylece çok serbestlik dereceli sistemlerde, tepki işlemine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu, giriş işlemine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu cinsinden, (3.33) yardımı ile ifade edilmiş olur. $[S_{xx}(\omega)]$ fonksiyonunun ters Fourier dönüşümü yardımı ile

tepki işlemine ait otokorelasyon fonksiyonu ise,

$$[R_{xx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} [S_{xx}(\omega)] e^{i\omega\tau} d\omega \quad (3.34)$$

olarak elde edilebilir.

3.4 Maksimumların Dağılımı

Çok serbestlik dereceli sistemlerin spektral hesabında, bir serbestlik dereceli sistemlerin tepkilerinin maksimumları (modal spektral değerler) kullanılır. Eğer giriş bir rastgele işlem ise, tepki de bir rastgele işlem olacaktır. Bu durumda çok serbestlik dereceli sistemlerin spektral hesabında, bu maksimumların dağılımı hakkındaki bilgiye ihtiyaç vardır.

Dirac delta fonksiyonu $\delta(\cdot)$ ile gösterilir ve aşağıdaki özellikleri sağlar:

$$\delta(x-a) = \begin{cases} 0 & x \neq a \\ \infty & x = a \end{cases} \quad (3.35)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-a) dx = 1$$

Heaviside $H(x)$ fonksiyonu ise,

$$H(x) = \begin{cases} x > 0 & 1 \\ x = 0 & 1/2 \\ x < 0 & 0 \end{cases} \quad (3.36)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

$x(t)$ değeri, belirli sabit bir “a” değeri üzerine çıktığında yapı için kritik durum oluştuğu düşünülün. $x(t)$ fonksiyonunun “a” doğrusunun üzerinde ve altında bulunma adedi ile ilgili fonksiyon,

$$U(t) = H(x(t) - a) \quad (3.37)$$

olarak yazılabilir. Her ne kadar $U(t)$ genelleştirilmiş bir fonksiyon olsa da, Dirac delta fonksiyonu yardımı ile,

$$\dot{U}(t) = \dot{X}(t)\delta(x(t) - a) \quad (3.38)$$

olarak tanımlanabilir. Burada $\dot{U}(t)$, $X(t)$ fonksiyonu “a” değerini aşağıdan yukarıya doğru

kestiği noktada $+\infty$, yukarıdan aşağıya doğru kestiği noktada $-\infty$ değerini alacaktır. $x(t)$ fonksiyonunun “a” doğrusunu $(0,t)$ süresi boyunca kesme sayısı ise Dirac delta fonksiyonu yardımı ile,

$$N(a,t) = \int_0^t \dot{U}(\tau) d\tau = \int_0^t \dot{x}(\tau) \delta(x(\tau) - a) d\tau \quad (3.39)$$

olarak yazılabilir. $f_{x\dot{x}}(x, \dot{x}, t)$, $x(t)$ nin olasılık yoğunluk fonksiyonu olmak üzere, bu sayının beklenen değeri veya ortalaması,

$$\begin{aligned} E[N(a,t)] &= E \left[\int_0^t \dot{x} \delta[x - a] d\tau \right] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^t \dot{x} \delta(x - a) f_{x\dot{x}}(a, \dot{x}, \tau) d\tau dx d\dot{x} \\ &= \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x} f_{x\dot{x}}(a, \dot{x}, \tau) d\dot{x} d\tau \end{aligned} \quad (3.40)$$

şeklinde, kesmenin ortalama değeri olarak bulunur. Birim zamandaki ortalama kesme sayısı ise,

$$v(a,t) = \frac{dE[N(a,t)]}{dt} = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x} f_{x\dot{x}}(a, \dot{x}, t) d\dot{x} \quad (3.41)$$

dir. Bu eşitlik, Rice formülü olarak anılmaktadır (Rice, 1954).

Denklem 3.41, aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya doğru olan kesmelerin toplamının oranıyla ilgilidir. Yalnızca aşağıdan yukarıya doğru olan birim zamandaki kesme sayısı ise, $\dot{x} > 0$ olduğu düşünülerek,

$$v^+(a,t) = \int_0^{\infty} \dot{x} f_{x\dot{x}}(a, \dot{x}, t) d\dot{x} \quad (3.42)$$

olarak yazılabilir. Eğer $x(t)$ sıfır ortalamalı, kararlı Gauss dağılımına sahip bir işlemse, $x(t)$ ve $\dot{x}(t)$ nin olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$$f_{x\dot{x}}(x, \dot{x}) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_{\dot{x}}} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{\dot{x}^2}{2\sigma_{\dot{x}}^2}\right)} \quad (3.43)$$

olarak verilebilir. Burada, σ_x ve $\sigma_{\dot{x}}$, sırasıyla, $x(t)$ ve $\dot{x}(t)$ işlemlerinin standart sapmalarıdır. $x = a$ için (3.43), (3.42)'de yerine konulursa, kesme oranı için,

$$v^+(a) = \frac{\sigma_x}{2\pi\sigma_x} e^{-a^2/2\sigma_x^2} \quad (3.44)$$

bulunur. Bu denklem farklı parametrelerle de ifade edilebilir. $S_x(\omega)$, $X(t)$ işleminin güç spektral yoğunluk fonksiyonu olmak üzere, n-ci dereceden spektral momentler:

$$\lambda_n = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega|^n S_x(\omega) d\omega \quad (3.45)$$

şeklinde tanımlanabilir; $\sigma_x^2 = \lambda_0$ ve $\sigma_x^2 = \lambda_2$ olduğuna göre, Denklem 3.44,

$$v^+(a) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} e^{-a^2/2\lambda_0} \quad (3.46)$$

şeklinde yazılabilir.

$x(t)$ işleminin maksimumlarının dağılımının Poisson dağılımına uyduğu düşünülün. Poisson olasılık dağılım fonksiyonu,

$$P[n] = \frac{(vt)^n}{n!} e^{-(vt)} \quad n = 0, 1, \dots, \infty \quad (3.47)$$

şeklinindedir. Burada v , birim zamanda meydana gelen olay sayısıdır. $P[n]$ ise, (0-t) zaman aralığında n olay meydana gelme olasılığıdır. Bu ifadede v , ortalama kesme oranı olarak düşünülürse, (0-t) zaman aralığında sıfır olay (kesme) meydana gelme olasılığı, (3.47) yardımı ile, $n=0$ için $e^{-(vt)}$ olarak bulunur. Depremin başladığı anda yapının yıkılma olasılığı sıfır kabul edilirse, (0-t) zaman aralığında bu yapının yıkılma olasılığı,

$$P_f = e^{-v^+(a)t} \quad (3.48)$$

olarak verilebilir. Bu değer hesaplanmasında kabul edilen dağılım Poisson dağılımı idi. Düşük söntüm oranına sahip yapılarda ise, maksimumların oluşması kümeler halinde olmaktadır. Başka bir deyişle, "a" sınırı geçildiğinde buna bağlı olarak bir grup ihlal daha olmaktadır. Poisson dağılımı, olaylar arasında bağlantı olmadığını kabul eder. Maksimumların kümeler halinde birbirlerine bağlı oluşmaları ise buna ters düşmektedir. Bu etkiyi dikkate almak için kümelerin dağılımı yani cevabın zarfının (envelope) maksimumu Poisson dağılımına uydurulmuş ve $v^+(a,t)$ için bir düzeltme çarpanı verilmiştir (Vanmarcke, 1972,1975):

$$v_e(r) = 2v^+(r) \frac{1 - e^{(\sqrt{\pi/2} \delta^{1.2} r)}}{1 - e^{(-r^2/2)}} \quad (3.49)$$

Burada $r = a/\sigma_x$ normalize edilmiş sınıır, $v^+(r)$ (3.46) ile verilen yukarı kesme oranı ve

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2}} \quad (3.50)$$

işlemin frekans içeriğinin dağılımı ile ilgili bir katsayıdır.

Denklem 3.49, Denklem 3.48'de $v^+(a)$ yerine konulursa, t süresince X_{\max} işleminin “a” veya $r\sigma_x$ değeri üzerine çıkma olasılığı p bulunmuş olur. Bulunacak bu ifadede $r(t,p)$ parametresi yaklaşık olarak çekilebilir (Vanmarcke, 1977).

$$r(t,p) = \left[2 \log \left\{ 2n \left[1 - e^{-\delta^{1.2} \sqrt{\pi \log(2n)}} \right] \right\} \right]^{1/2} \quad (3.51)$$

Burada p, işlemin t süresince $r\sigma_x$ değerinin altında kalma olasılığı ve

$$n = \frac{\sqrt{\lambda_2/\lambda_0} t}{2\pi(-\log p)} \quad (3.52)$$

olarak tanımlanmıştır.

“a” sınırının normalize edilmiş değeri olan $r(t,p)$, tepe çarpanı adını alır ve işlemin standart sapması σ_x ile çarpımı, t süresi boyunca, p olasılıkla aşılmayacak olan $x_{\max}(t,p)$ değerini verir.

$$x_{\max}(t,p) = r(t,p) \sigma_x \quad (3.53)$$

Bu ifade spektral hesapta, modların maksimumlarının birleştirilmesinde kullanılacak olan, aşılmama olasılığı belirli modal maksimumların hesabı için kullanılabilir.

3.5 Modların Birleştirilmesi

Bir giriş işlemi altında çok serbestlik dereceli sistemin tepkisinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu (3.33) ile verilmişti. Bu matris ifadenin köşegen elemanları,

$$S_{xx}(\omega) = \sum_j \sum_h H_j(i\omega) H_h^*(i\omega) S_{FF}(\omega) \quad (3.54)$$

olarak yazılabilir. Tepkinin varyansı ise, (3.19) yardımı ile,

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega = \sum_j \sum_h \int_{-\infty}^{\infty} H_j(i\omega) H_h^*(i\omega) S_{FF}(\omega) d\omega = \sum_j \sum_h \sigma_{Z_j Z_h} \quad (3.55)$$

olur. Burada $\sigma_{Z_j Z_h}$, modlar arasındaki kovaryanstır. Çapraz ilişki katsayısının

$\rho_{jh} = \sigma_{Z_j Z_h} / \sigma_{Z_j} \sigma_{Z_h}$ tanımı ile, (3.55),

$$\sigma_x^2 = \sum_j \sum_h \rho_{jh} \sigma_{Z_j} \sigma_{Z_h} \quad (3.56)$$

şeklini alır. Burada σ_{Z_j} ve σ_{Z_h} , sırası ile, " ω_j, ξ_j " ve " ω_h, ξ_h " frekans ve sönüm oranlarına sahip modların standart sapmalarıdır. Denklem 3.56, Denklem 3.53'te yerine konulursa,

$$R_x = \sigma_x r_x = \left(\sum_j \sum_h \rho_{jh} \frac{r_x^2}{r_j r_h} R_j R_h \right)^{1/2} \quad (3.57)$$

elde edilir. Burada R_x çok serbestlik dereceli sistemin her hangi bir tepkisine ait spektral değer, r_x ise bu işleme ait tepe çarpanıdır. R_j j-ci moda ait maksimum tepki, $r_j = r(\omega_j, \xi_j, t, p)$ ise aynı moda ait tepe çarpanıdır.

Tepe çarpanları, giriş işleminin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna fazla duyarlı değildirler. Bu sayede, yaklaşık olarak tüm modlara ait tepe çarpanları birbirlerine ve modal birleştirilmesi yapılan tepkilerin tepe çarpanlarına eşit alınabilir (Kiureghian, 1981). Denklem 3.57'de

$r_x^2 / (r_j r_h) \approx 1$ alınırsa,

$$R_x = \sigma_x r_x \cong \left(\sum_j \sum_h \rho_{jh} R_j R_h \right)^{1/2} \quad (3.58)$$

bulunur.

Denklem 3.58 ile verilen birleştirme CQC adıyla anılır. Burada ρ_{jh} , giriş işleminin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna bağlıdır. Eğer giriş işlemi bir beyaz gürültü olursa, bu bağlılık ortadan kalkar. Bu durumda,

$$\rho_{jh} = \frac{8\sqrt{\xi_j \xi_h} (\xi_j + \beta \xi_h) \beta^{3/2}}{(1 - \beta^2)^2 + 4\xi_j \xi_h \beta (1 + \beta^2) + 4(\xi_j^2 + \xi_h^2) \beta^2} \quad (3.59)$$

olarak bulunur (Kiureghian, 1980). Burada, $\beta = \omega_h / \omega_j$ dir. Eğer tüm modal sönüm oranları birbirlerine eşitsele; $\xi_j = \xi_h = \xi$, Denklem 3.59,

$$\rho_{jh} = \frac{8\xi^2 (1 + \beta) \beta^{3/2}}{(1 - \beta^2)^2 + 4\xi^2 \beta (1 + \beta)^2} \quad (3.60)$$

şeklini alır.

Böylece; spektral hesapta modların maksimumlarının birleştirilmesi için kullanılacak olan Denklem 3.58, yalnızca yapının özdeğerlerine ve ilgili tepki spektrumu değerlerine bağlı olur.

Modların maksimumlarının birleştirilmesinde CQC yönteminin kullanımı, giriş depreminin kararlı Gauss dağılımına sahip, geniş bant kaplayan bir işlem olmasıyla daha iyi sonuçlar verir. Böyle olmasa bile pratikte, depremin kuvvetli hareketine ait kısmı, yapının en büyük doğal periyodundan çok defalar büyükse ve maksimum tepki bu bölgede oluşuyorsa, yaklaşım yeterince sağlanmış olur (Kiureghian, 1981). Doğal periyotların bu bölgeden uzaklaşması durumunda hatâ artmakta fakat diğer taraftan, bu frekanslara ait modların yapının cevabına katkısı azalmaktadır. Böylelikle CQC yöntemi, deprem etkisi altındaki yapıların dinamik hesabında kullanılabilir olmaktadır.

Düşük sönüm oranlarına sahip ve modal frekansları birbirlerinden yeterince uzak olan sistemlerde, yaklaşık olarak, $\rho_{jh} = 0$ ($j \neq h$) ve $\rho_{jj} = 1$ alınır, Denklem 3.58,

$$R_x = \sqrt{\sum_j R_j^2} \quad (3.61)$$

şeklini alır. Bu denklem, SRSS (Square Root of the Sum of the Squares-Karelerinin Toplamının Karekökü) olarak anılmaktadır (Goodman, vd., 1953). Bu ifade, modal frekansları birbirlerinden yeterince uzak yapılarda iyi sonuçlar vermektedir (Kiureghian, 1981).

ABSS(Mutlak Toplam) yöntemi ise modal maksimum değerlerin birleştirilmesinde,

$$R_x = \sum_j |R_j| \quad (3.62)$$

eşitliğini kullanır. Denklem 3.62 yardımıyla yapılan birleştirme, çözüm için bir üst sınır teşkil eden abartılı bir değerdir. Bu nedenle pratikte kullanımı sınırlıdır.

3.6 Üç Boyutlu Olarak Ele Alınan Yapılarda Modların İsimlendirilmesi

Spektral hesapta modlara isim verilmesi gerekli değildir. Bununla beraber, bu parametrik çalışmada; yapının dinamik durumda burulma özelliklerini dikkate alan bir Q parametresi tanımlanmasına ihtiyaç duyulmuştur; isimlendirme ise bu parametrenin tanımlanması için gerekli olmuştur.

“X” deprem doğrultusu için, “X” doğrultusundaki en büyük etkin kütle, $\max M_{xx} = \frac{(\{\phi_j\}^T [m] \{1 \ 0 \ 0\}^T)^2}{\{\phi_j\}^T [m] \{\phi_j\}}$, j-ci moddan elde edilsin. Bu mod, en büyük “X” doğrultusu taban kesme kuvveti oluşturabilecek moddur.

“θ” deprem doğrultusu için, “θ” doğrultusundaki en büyük etkin dönme kütlesi, $\max M_{\theta\theta} = \frac{(\{\phi_k\}^T [m] \{0 \ 0 \ 1\}^T)^2}{\{\phi_k\}^T [m] \{\phi_k\}}$, k-cı moddan elde edilsin. Bu mod ise en büyük burulma momenti oluşturabilecek moddur.

Burada, j-ci mod “X” doğrultusunda etkin olan mod, k-cı mod ise “θ” doğrultusunda etkin olan mod olarak isimlendirilebilir. Deprem “X” doğrultusunda iken “X” doğrultusu etkin

kütelleri bu modlar için, $M_{xx}^{(x)} = \frac{(\{\phi_j\}^T [m] \{1 \ 0 \ 0\}^T)^2}{\{\phi_j\}^T [m] \{\phi_j\}}$ ve $M_{xx}^{(\theta)} = \frac{(\{\phi_k\}^T [m] \{1 \ 0 \ 0\}^T)^2}{\{\phi_k\}^T [m] \{\phi_k\}}$

olarak hesaplanabilirler. Burada, parantez içindeki üst indis, yukarıda da bahsedildiği gibi, ilgili modun hangi doğrultuda etkin olduğunu gösteren bir isimlendirmedir. Bu tanımlamalardan sonra bahsedilen parametre,

$$Q_x = \frac{M_{xx}^{(x)}}{M_{xx}^{(\theta)}} \quad (3.63)$$

olarak belirlenebilir.

Aynı isimlendirme “Y” doğrultusu için de yapılabilir. Maksimum etkin kütleler

hesaplandığında bazı etkin modal kütleler birbirlerine eşit çıkmaktadırlar. Bu durum, her iki yatay doğrultudaki rijitlikleri birbirlerine yeterince yakın olan bazı yapılarda ortaya çıkmaktadır. Bu yapıların mod şekilleri antimetrik olarak birbirlerine yakın olmaktadır. Etkin modal kütleler ise aynı kat kütlelerine sahip yapılarda antimetrikliği dikkate almadıkları için her iki yatay doğrultuda birbirlerine eşit çıkmaktadırlar. Bu durumda bahsedilen parametrenin belirlenmesinde, aynı etkin modal kütleyle sahip modlardan daha az burulma bileşenine sahip olan mod, hesaplardaki deprem girişi doğrultusundaki mod; bu iki moddan diğeri ise, deprem doğrultusuna dik yatay doğrultudaki öteleme modu olarak isimlendirilmiştir. Kalan ve en çok dönme bileşeni içeren mod ise, dönme modu olarak adlandırılmıştır.

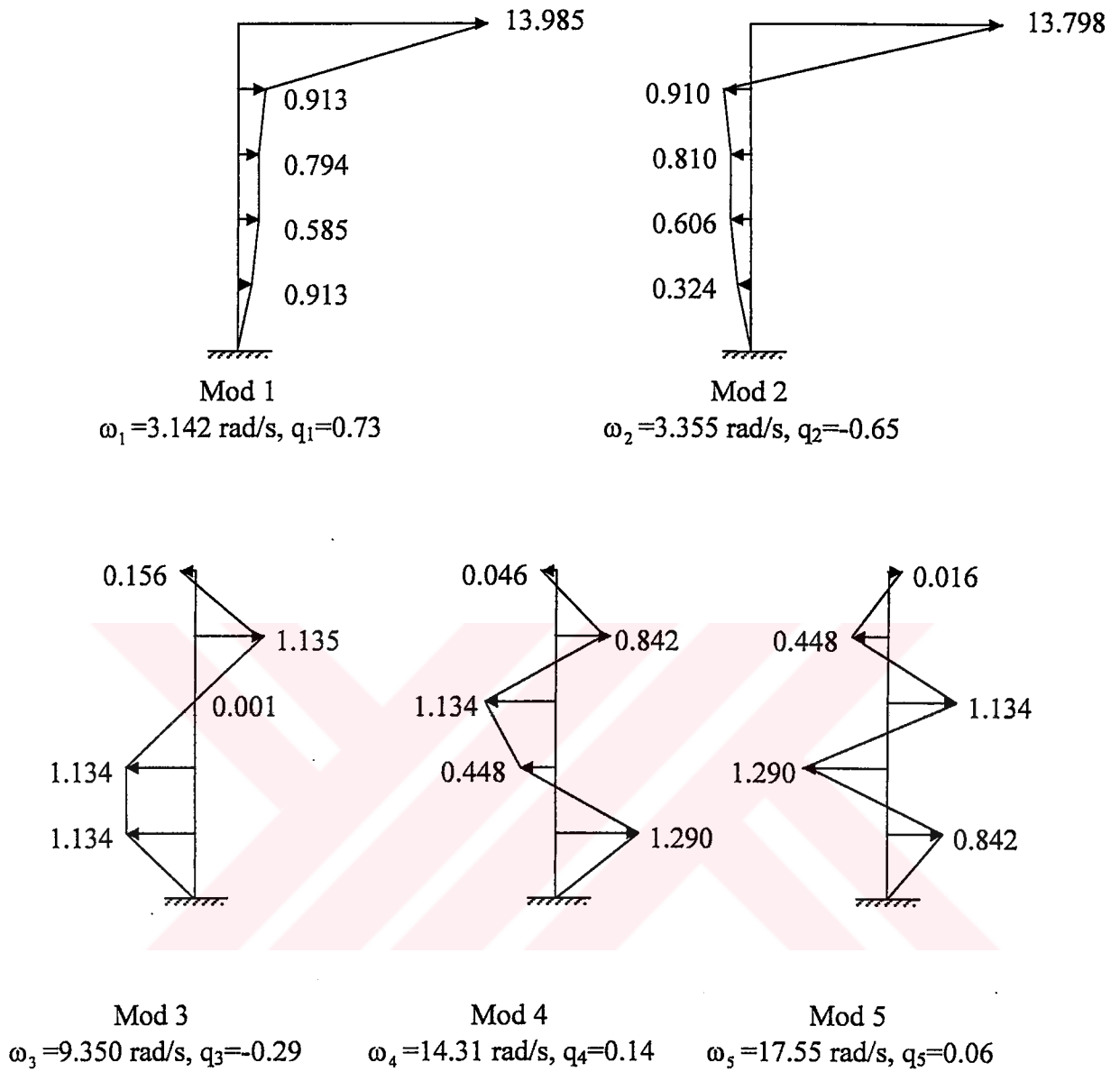
Bunlardan başka, maksimum etkin kütleli veren mod belirlenirken, bu etkin kütlelerin birbirlerine olan yakınlığı da bir parametrik çalışmada dikkate alınmalıdır. Bu durumun etkisini dikkate almak için farklı tiplerde sistemler seçilmeli ve hesaplar her bir tip için tekrarlanmalıdır. Bununla ilgili daha ayrıntılı açıklamalar paragraf 3.7’de yapılmıştır.

3.7 CQC ve SRSS Birleştirme Yöntemlerinde Hassasiyet ve Hatânın Bağlı Olduğu Yeni Bir Parametre

CQC yönteminin, her durumda SRSS yöntemi yerine kullanılmasının mümkün olduğu ifade edilmiştir (Wilson, Kiureghian, Bayo, 1981). Bunun nedeni, SRSS yönteminin CQC yönteminin bir özel hali olması ve ek olarak CQC yönteminin, sonuçları etkileyen yapının doğal frekanslarının yakınlığını dikkate alması olarak açıklanmaktadır. Buna ait bir sayısal örnek Chopra (1995)’de verilmiştir; bu örnek, bu çalışmada gerekli bazı ilavelerle aşağıda özetlenmiştir.

Doğal frekansları yakınlaştırmak için, dış merkezliği bulunmayan bir 4 katlı yapıya, kütlesi çok az olan bir 5-ci kat eklenmiştir. Bununla orantılı olarak 5-ci kata ait rijitlik de düşürülmüştür. Bir çerçeve sistem olan bu yapı, bir doğrultuda 5 modlu olmaktadır. Buna karşılık eklenen kütle ve rijitliğin çok küçük olması, yapıyı 4 modlu gibi tepki vermeye zorlamaktadır.

Bu yapıya ait mod şekilleri ve modal frekanslar Şekil 3.1’de görülmektedir. İlk iki moda ait frekanslar ve mod şekilleri birbirlerine yakındır. Böyle bir durumda bu iki moda ait tepkiler de yakın fazlarda ve üst üste toplanma eğiliminde olacaktır.



Şekil 3.1 Çerçeve örnek yapı mod şekilleri

CQC yöntemi, frekansların yakınlığından kaynaklanan bu etkiyi çapraz ilişki katsayıları yolu ile dikkate alır (Denklem 3.58) :

$$R_x = \left(\sum_j \sum_h \rho_{jh} R_j R_h \right)^{1/2}$$

Buradaki çapraz ilişki katsayıları, bu örnek için ve %5 sönüm oranı ile, (3.60) kullanılarak hesaplanırsa,

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.699 & 0.007 & 0.003 & 0.002 \\ 0.699 & 1 & 0.008 & 0.003 & 0.002 \\ 0.007 & 0.008 & 1 & 0.050 & 0.023 \\ 0.003 & 0.003 & 0.050 & 1 & 0.192 \\ 0.002 & 0.002 & 0.023 & 0.192 & 1 \end{bmatrix}$$

bulunur. Yakın frekanslı modlar için daha büyük katsayılar elde edilmiştir. Taban kesme kuvveti (V_T), CQC yöntemi ile ilk iki mod kullanılarak hesaplanmak istensin. Bu işlem iki aşamada yapılır. İlk aşamada hesaplanacak tepkinin her mod için aldığı maksimum değerler hesaplanır. Bunun için j-ci moda ait maksimum kat atalet kuvvetleri,

$$\{F_j\} = q_j [m] \{\phi_j\} A_j \quad (3.64)$$

olacaktır. Burada q_j ve $\{\phi_j\}$ sırasıyla j-ci modun katılım çarpanı ve mod şeklidir. A_j kullanılan depremin spektrumundan j-ci modun periyodu için okunan maksimum yatay ivme, $[m]$ ise kütle matrisidir. Bu kat kuvvetlerinin toplamı olarak j-ci moda ait maksimum taban kesme kuvveti,

$$V_{T,j} = \sum_{i=1}^5 \{F_j\} \quad (3.65)$$

şeklinde hesaplanabilir.

İkinci aşamada ise her mod için bulunan spektral taban kesme kuvvetleri birleştirilir. CQC yöntemi ile birleştirme yapıldığı ve ilk iki modun dikkate alındığı farz edilirse, (3.58) eşitliği yardımıyla,

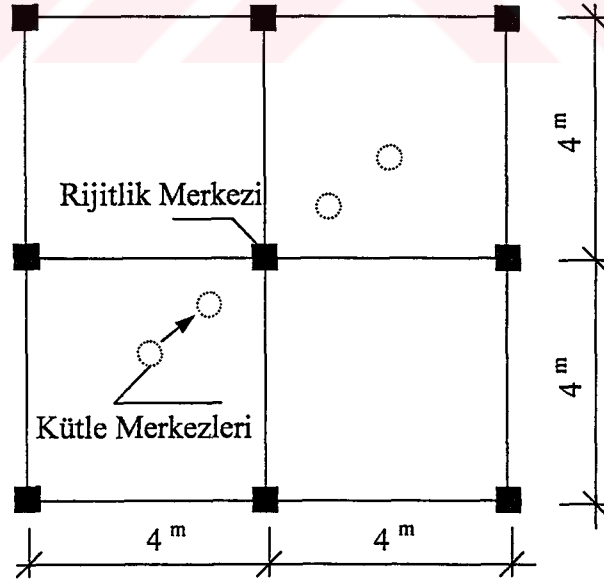
$$R_X = V_T = \left(1 \cdot V_{T,1}^2 + 1 \cdot V_{T,2}^2 + 2 \cdot 0.699 \cdot V_{T,1} \cdot V_{T,2} \right)^{1/2} \quad (3.66)$$

taban kesme kuvveti bulunur.

Spektral hesapta hatâ, ikinci aşamada yani birleştirme aşamasında ortaya çıkar. CQC yöntemindeki hatâ miktarının, depreme ve yapının doğal periyotlarının bu deprem spektrumu üzerinde düştüğü bölgeye de bağlı olduğu bilinmektedir. Bundan başka CQC yönteminin bir özel hali olan SRSS yönteminde doğal frekansların yakınlığı ile hatânın arttığı bilinmektedir. CQC yöntemi ise bu yakınlığı dikkate alır. Literatürde bunu örneklemek için doğal frekansları yakın olan, gerek düzlem çerçeve gerekse üç boyutlu olarak hesaplanan yapılar kullanılmıştır.

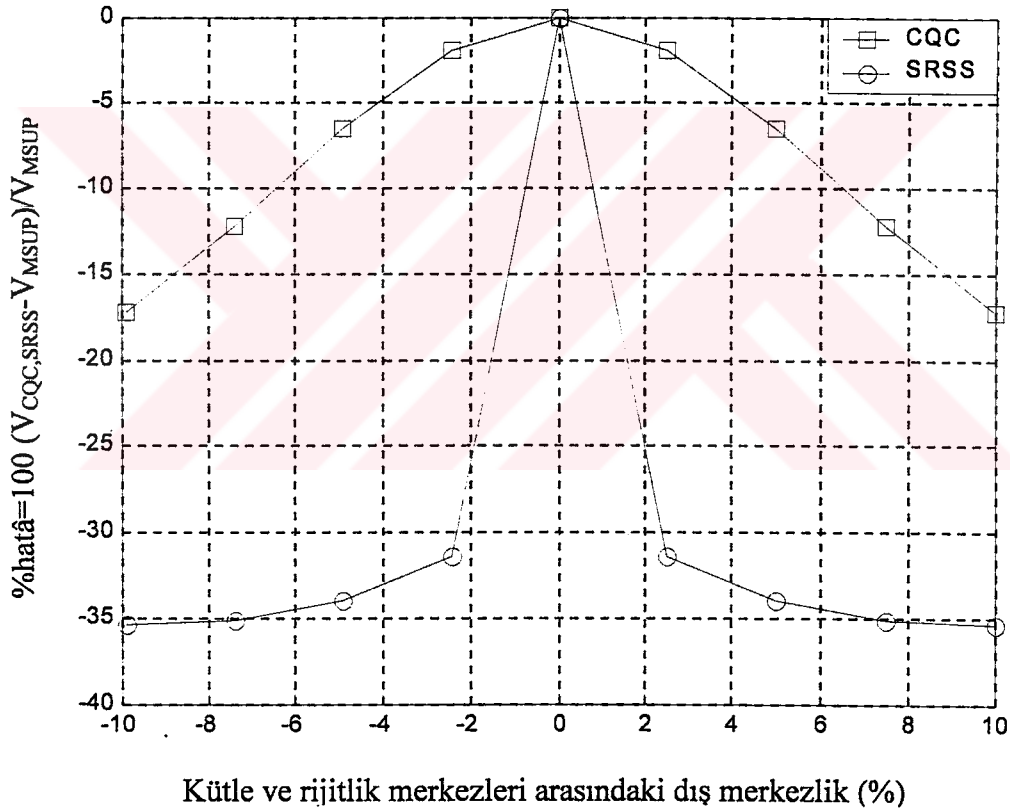
Frekansları yakınlaştırmak için, yukarıdaki örnekte olduğu gibi, bir çerçeve sisteme düşük kütle ve rijitlik değerine sahip bir kat eklenmiştir. Üç boyutlu olarak hesaplanan sistemler için verilen örneklerde ise, her iki yatay doğrultudaki rijitliği aynı değerde olan bir yapı seçilmiş ve kütlesi planında bir dış merkezlik değeri ile yerleştirilmiştir. Böylece yatay yönlere ait modlar için çok yakın doğal frekanslar elde edilmiştir (Wilson, 1998; Chopra, 1995).

Fakat çerçeve ve üç boyutlu sistemlerde kesme kuvvetinin oluşma şekli, ileride (3.67) formüllerinde açıklandığı gibi, birbirlerinden farklıdır. Anılan kaynaklarda bu farktan bahsedilmemiştir. Bu fark nedeni ile, üç boyutlu olarak ele alınan ve diğerinden daha yakın frekanslara sahip iki sistemden yakın frekanslara sahip olan bazı sistemlerde daha az mutlak hatâya rastlanmıştır. Bu durum, SRSS yönteminin doğal frekansları yakın olan her sistemde daha çok hatâ yapacağına dair söylemi doğrulamamaktadır. Aynı tipteki hatâ CQC yönteminde de oluşmaktadır. Davranıştaki bu fark nedeni ile, CQC ve SRSS yöntemlerindeki göreceli hatâların üç boyutlu sistemlerde bir başka parametreye, Q çok daha fazla bağlı olduğu gözlenmiştir. Bu parametre için göreceli hatâ miktarı depreme bağlı olarak ortaya çıkabilmekle birlikte, bu hatâ miktarında artış olması, depremden bağımsız kalmaktadır. Bir dış merkezlik değerinde oluşan bu göreceli hatâ, bu dış merkezlik değeri ile sıfır dış merkezlik değerinde ortaya çıkan mutlak hatâlar arasındaki fark olarak düşünülmüştür. Aşağıdaki sayısal örnek, bu bağlamda açıklayıcı olacaktır.



Şekil 3.2 Bir katlı burulmalı örnek yapı planı

Şekil 3.2’de yapısal plan şeması görülen yapı; 30X30 cm kolon, 25X50 cm kiriş ve 12 cm döşeme kalınlığına sahip bir katlı, üç serbestlik dereceli bir sistemdir. Öteleme ve dönme kütleleri sırasıyla 45 kNs²/m ve 800 kNs²/m dir. Elastiklik modülü ise 2,7.10⁷ kN/m² dir. Çözümlerde birinci serbestlik “X”, ikinci serbestlik “Y” doğrultusunda ötelemeler, üçüncü serbestlik ise düşey eksen etrafında dönme olarak alınmıştır. Kütle merkezleri -%10 dış merkezlik değerinden +%10 dış merkezlik değerine kadar, planda farklı yerlere yerleştirilmiş ve çözümler üretilmiştir. “X” doğrultusunda etkiyen Erzincan depremi doğu-batı bileşeni etkisinde, orta kolonda “X” doğrultusundaki kesme kuvveti için dış merkezlik-hatâ grafiği çizdirilmiştir. Sönüm oranı $\xi = 0.05$ alınmıştır. SRSS ve CQC yöntemleriyle yapılan bu birleştirmelere ait hatâ grafikleri Şekil 3.3’de görülmektedir. Burada V_{MSUP} , zaman tanım alanında yapılan kesin çözümdür.



Şekil 3.3 $\xi = 0.05$ için örnek yapı orta kolonunda V_x hatâ grafiği

Bu çözümlerde kullanılan 8 adet bir katlı, üç serbestlik dereceli sisteme ait büyüklüklerden bazıları Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 Burulmalı örnek yapıya ait büyüklükler						
-%10 dış merkezlik değeri için						
$q_y = 0.373$	$q_x = 0.500$	$q_\theta = 0.127$	$Q_x = 3.93$			
$\omega_1 = 39.9679$ $\omega_1 / \omega_2 = 0.918$	$\omega_2 = 43.5267$	$\omega_3 = 52.5769$ $\omega_2 / \omega_3 = 0.828$	$V_x^1 = 17.83$	$V_x^2 = 21.31$	$V_x^3 = 5.34$	
$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ 0.196 \end{Bmatrix}$	$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{Bmatrix}$	$\phi_3 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ -0.574 \end{Bmatrix}$	$V_{SRSS} = 28.29$	$V_{CQC} = 36.21$	$V_{MSUP} = 43.76$	
			$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.5782 & 0.1157 \\ 0.5782 & 1 & 0.2174 \\ 0.1157 & 0.2174 & 1 \end{bmatrix}$			
-%7.5 dış merkezlik değeri için						
$q_y = 0.390$	$q_x = 0.500$	$q_\theta = 0.111$	$Q_x = 3.93$			
$\omega_1 = 41.1283$ $\omega_1 / \omega_2 = 0.945$	$\omega_2 = 43.5267$	$\omega_3 = 51.0936$ $\omega_2 / \omega_3 = 0.852$	$V_x^1 = 18.57$	$V_x^2 = 21.31$	$V_x^3 = 4.82$	
$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ 0.179 \end{Bmatrix}$	$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{Bmatrix}$	$\phi_3 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ -0.630 \end{Bmatrix}$	$V_{SRSS} = 28.67$	$V_{CQC} = 38.85$	$V_{MSUP} = 44.24$	
			$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.5782 & 0.1157 \\ 0.5782 & 1 & 0.2174 \\ 0.1157 & 0.2174 & 1 \end{bmatrix}$			
-% 5 dış merkezlik değeri için						
$q_y = 0.420$	$q_x = 0.500$	$q_\theta = 0.080$	$Q_x = 6.23$			
$\omega_1 = 42.2310$ $\omega_1 / \omega_2 = 0.970$	$\omega_2 = 43.5267$	$\omega_3 = 49.7595$ $\omega_2 / \omega_3 = 0.875$	$V_x^1 = 19.33$	$V_x^2 = 21.31$	$V_x^3 = 3.42$	
$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ 0.150 \end{Bmatrix}$	$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{Bmatrix}$	$\phi_3 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ -0.767 \end{Bmatrix}$	$V_{SRSS} = 29.00$	$V_{CQC} = 41.00$	$V_{MSUP} = 43.85$	
			$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.9162 & 0.2696 \\ 0.9162 & 1 & 0.3572 \\ 0.2696 & 0.3572 & 1 \end{bmatrix}$			
-% 2.5 dış merkezlik değeri için						
$q_y = 0.467$	$q_x = 0.500$	$q_\theta = 0.033$	$Q_x = 15.17$			
$\omega_1 = 43.1372$ $\omega_1 / \omega_2 = 0.991$	$\omega_2 = 43.5267$	$\omega_3 = 48.7142$ $\omega_2 / \omega_3 = 0.894$	$V_x^1 = 20.35$	$V_x^2 = 21.31$	$V_x^3 = 1.35$	
$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ 0.089 \end{Bmatrix}$	$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{Bmatrix}$	$\phi_3 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ -1.263 \end{Bmatrix}$	$V_{SRSS} = 29.50$	$V_{CQC} = 42.16$	$V_{MSUP} = 43.01$	
			$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.9920 & 0.4025 \\ 0.9920 & 1 & 0.4400 \\ 0.4025 & 0.4400 & 1 \end{bmatrix}$			

Çizelge 3.1 Örnek yapıya ait büyüklükler (devamı)

%2.5 dış merkezlik değeri için					
$q_y = 0.467$	$q_x = 0.500$	$q_\theta = 0.033$	$Q_x = 15.17$		
$\omega_1 = 43.1372$ $\omega_1 / \omega_2 = 0.991$	$\omega_2 = 43.5267$	$\omega_3 = 48.7142$ $\omega_2 / \omega_3 = 0.894$	$V_x^1 = 20.35$	$V_x^2 = 21.31$	$V_x^3 = 1.35$
$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ -0.089 \end{Bmatrix}$	$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{Bmatrix}$	$\phi_3 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ 1.263 \end{Bmatrix}$	$V_{SRSS} = 29.50$	$V_{CQC} = 42.16$	$V_{MSUP} = 43.01$
			$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.9920 & 0.4025 \\ 0.9920 & 1 & 0.4400 \\ 0.4025 & 0.4400 & 1 \end{bmatrix}$		
%5 dış merkezlik değeri için					
$q_y = 0.420$	$q_x = 0.500$	$q_\theta = 0.080$	$Q_x = 6.23$		
$\omega_1 = 42.2310$ $\omega_1 / \omega_2 = 0.970$	$\omega_2 = 43.5267$	$\omega_3 = 49.7595$ $\omega_2 / \omega_3 = 0.875$	$V_x^1 = 19.33$	$V_x^2 = 21.31$	$V_x^3 = 3.42$
$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ -0.147 \end{Bmatrix}$	$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{Bmatrix}$	$\phi_3 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ 0.767 \end{Bmatrix}$	$V_{SRSS} = 28.97$	$V_{CQC} = 41.00$	$V_{MSUP} = 43.85$
			$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.9162 & 0.2696 \\ 0.9162 & 1 & 0.3572 \\ 0.2696 & 0.3572 & 1 \end{bmatrix}$		
%7.5 dış merkezlik değeri için					
$q_y = 0.390$	$q_x = 0.500$	$q_\theta = 0.111$	$Q_x = 4.53$		
$\omega_1 = 41.1283$ $\omega_1 / \omega_2 = 0.945$	$\omega_2 = 43.5267$	$\omega_3 = 51.0936$ $\omega_2 / \omega_3 = 0.852$	$V_x^1 = 18.57$	$V_x^2 = 21.31$	$V_x^3 = 4.82$
$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ -0.179 \end{Bmatrix}$	$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{Bmatrix}$	$\phi_3 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ 0.630 \end{Bmatrix}$	$V_{SRSS} = 28.67$	$V_{CQC} = 38.85$	$V_{MSUP} = 44.24$
			$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.7565 & 0.1736 \\ 0.7565 & 1 & 0.2789 \\ 0.1736 & 0.2789 & 1 \end{bmatrix}$		
%10 dış merkezlik değeri için					
$q_y = 0.373$	$q_x = 0.500$	$q_\theta = 0.127$	$Q_x = 3.93$		
$\omega_1 = 39.9679$ $\omega_1 / \omega_2 = 0.918$	$\omega_2 = 43.5267$	$\omega_3 = 52.5769$ $\omega_2 / \omega_3 = 0.828$	$V_x^1 = 17.83$	$V_x^2 = 21.31$	$V_x^3 = 5.34$
$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ -0.196 \end{Bmatrix}$	$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.000 \end{Bmatrix}$	$\phi_3 = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ -1.000 \\ 0.574 \end{Bmatrix}$	$V_{SRSS} = 28.29$	$V_{CQC} = 36.21$	$V_{MSUP} = 43.76$
			$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.5782 & 0.1157 \\ 0.5782 & 1 & 0.2174 \\ 0.1157 & 0.2174 & 1 \end{bmatrix}$		

Bu çizelgedeki mod şekilleri, Bölüm 4.6'da verilen tanımlamaya uygun olarak isimlendirilmişlerdir; bu isimler ise modlardan bahsederken, sıraları hakkında ayrıca bilgi vermemek için, yalnızca karşılık gelen katılım çarpanlarının (q) alt indislerinde işaret edilmişlerdir. Burada; V_{MSUP} orta kolonda X-doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin mod süperpozisyonu ile bulunan kesin maksimum çözümdür. V_X^i ise i-ci modda bu kuvvetin aldığı maksimum (spektral) değerdir. Q_x , Bölüm 3.6'da tanımlanan parametredir.

Çizelge 3.1 incelendiğinde; %2.5, %5, %7.5 ve %10 dış merkezlik değerlerine sahip yapıların doğal frekans oranlarının, sırasıyla (0.991,0.894), (0.970,0.875), (0.945,0.852) ve (0.918,0.828) olduğu görülür. Parantez içindeki sayıların ilki ω_1/ω_2 , ikincisi ise ω_2/ω_3 (örneğin, bu örnek için $\omega_3 = \omega_6$) anlamındadır. Bu değerler incelendiğinde; dış merkezlik arttıkça frekansların birbirlerinden uzaklaştığı, yani ayrıklaştığı görülmektedir.

Şekil 3.3'de, SRSS yöntemindeki hatâya ait olan eğri incelendiğinde ise; artan dış merkezlik veya ayrıklaşan doğal frekanslar ile birlikte hatânın da arttığı görülmektedir. Bu durum, SRSS yönteminde hatânın frekansların yakın olmasıyla arttığına dair söylemin tersi bir durumdur.

CQC yöntemindeki hatâ ile ilgili olan eğri incelendiğinde yine aynı durumla karşılaşılır (Şekil 3.3). Dış merkezlik değerleri %2.5 ve %10 olan yapılar incelendiğinde, bu yapıların orta kolonlarında oluşan kesme kuvvetinin kesin değerinin sırasıyla $V_{MSUP}=43.01\text{kN}$ ve $V_{MSUP}=43.76\text{kN}$ değerlerini alarak çok az değiştiği görülmektedir. Sonuç değişmemekle birlikte, hesapta yer alan modal maksimum kuvvetler, sonucu değiştirmeyecek şekilde değişmişlerdir. %2.5 dış merkezlik değerine sahip yapıda $\phi_{13} = -0.089$, $q_y=0.467$, $V_X^1=20.35\text{kN}$ ve $\phi_{33} = 1.263$, $q_\theta=0.033$, $V_X^3=1.35\text{kN}$ değerindedirler (Çizelge 3.1). %10 dış merkezlik değerine sahip yapıda ise $\phi_{13} = -0.196$ değerine yükselirken $q_y=0.373$, $V_X^1=17.83\text{kN}$ değerlerine düşmekte ve $\phi_{33} = 0.564$ değerine düşerken $q_\theta=0.127$, $V_3=5.34\text{kN}$ değerlerine yükselmektedirler (Çizelge 3.1). Böylelikle; daha önce bahsedildiği gibi, kesin çözüm olan değerler bu yapılar için sırasıyla $V_{MSUP}=43.01\text{kN}$ ve $V_{MSUP}=43.76\text{kN}$ değerlerini alarak az miktarda değişmektedirler.

Buna karşın CQC yöntemi ile birleştirme yapıldığında, bu büyüklük $V_{CQC}=42.16\text{kN}$ değerinden $V_{CQC}=36.21\text{kN}$ değerine düşmektedir. Bunun nedeni; CQC yönteminin, daha uzak frekans değerlerine sahip %10 dış merkezliği bulunan yapı için ürettiği katsayıların, daha yakın frekans değerlerine sahip %2.5 dış merkezliği bulunan yapı için ürettiği katsayılardan daha küçük olmasıdır. Bu katsayılar, burada tekrarlanırsa, %10 dış merkezlik değerine sahip

yapı için $\rho_{11} = 0.5782$, $\rho_{12} = 0.1157$ ve $\rho_{23} = 0.2174$ iken, %2.5 dış merkezlik değerine sahip yapı için $\rho_{11} = 0.9920$, $\rho_{12} = 0.4025$ ve $\rho_{23} = 0.4400$ olmaktadır. Bu durum, (3.60) eşitliğinden anlaşılacağı üzere; doğal frekansların birbirlerinden uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Doğal frekanslar uzaklaştıkça bu katsayılar da küçülmekte, fakat oluşan kuvvetler böylelikle, bir modda artarken diğer modda azalmakta ve kesin çözüm değişmemesine karşın CQC yöntemi daha küçük katsayılarla daha küçük sonuçlar elde etmektedir.

Çerçeve sistemlerden daha farklı olarak ortaya çıkan bu hatâ, tepkisi hesaplanan büyüklüğün yapısından kaynaklanmaktadır. Hesabı yapılan yapı bir çerçeve olsa idi; benzer frekanslar benzer mod şekilleri (Şekil 3.1) ve benzer mod şekilleri de benzer kuvvetler oluşturacak ve frekansların yakınlaşıp uzaklaşması, aynı türden olan modal kuvvetlerin etkilerinin de yakınlaşıp uzaklaşmasına karşılık gelecekti. Üç boyutlu olarak ele alınan bir yapıda ise, bir kolondaki kesme kuvveti hem öteleme hem de dönmenin etkisiyle oluşmaktadır. Böyle bir hesapta farklı düzlemlerdeki modlar aynı hesapta yer almaktadır. Yukarıda verilen çerçeve örneğinde, n-ci serbestliğe ait atalet kuvvetinin (tepkisi hesaplanan büyüklük) modal maksimumlarının hesabında kullanılan (3.64) eşitliğinin yapısı,

$$(q_j \phi_{jn} A_j + q_{j+1} \phi_{(j+1)n} A_{j+1}) + \dots \quad (3.67a)$$

şeklindedir. Üç boyutlu olarak ele alınan bir sistemde ise aynı büyüklüğün yapısı

$$(q_x \phi_{xn} A_j + q_\theta e \phi_{\theta n} A_{j+1}) + \dots \quad (3.67b)$$

şeklindedir. Burada e, dış merkezlik anlamındadır. Dış merkezliğin büyümesi ile çerçeve ve üç boyutlu sistemlerde tepkisi hesaplanan büyüklüklere ait olan (3.67a) ve (3.67b) ifadelerinin yapısı da birbirlerine göre farklılaşacaktır. Gerçekte CQC yönteminin oluşturulmasında mod şekilleri dikkate alınır. Fakat daha sonra, (3.57)'den (3.58)'e geçerken yapılan $r_x^2 / (r_j r_h) \approx 1$ yaklaşımı, tepkisi hesaplanan büyüklüğe ait olan r_x tepe (pik) çarpanı ile ilgilidir. Bilindiği gibi bu yaklaşım yapıldıktan sonra, CQC yöntemi ile her türlü modal maksimum büyüklük, (3.60) eşitliği ile hesaplanan ve yalnızca frekans oranı ve modal sönüm oranına bağlı olan ρ katsayıları ile birleştirilebilir olmaktadır. Bu da, yukarıda bahsedildiği gibi, depremden başka, tepkisi hesaplanan büyüklüğün tipine de bağlı olan hatâlara yol açmaktadır.

Hatânın mertebesi, dış merkezlik veya katın dönme ataleti ile belirlenememektedir. Bölüm 4'te verilen hatâ grafiklerinin karakterleri aynıdır. Bu karakter çok katlı yapılar için de geçerlidir (Bölüm 5). Bu grafiklerden anlaşıldığı gibi; dış merkezliğe bağlı olan göreceli

hatânın dış merkezliğin artması ile arttığı görülmüştür. Fakat dış merkezlik değerine bakılıp bu hatânın mertebesi tahmin edilememektedir. Örnek olarak %10 dış merkezlik değeri ve Erzincan depremi Doğu-Batı bileşeni için, T11 yapı tipinde, CQC yöntemi için hatâ -%2 mertebesinde iken (Şekil 4.1), yine aynı dış merkezlik değeri için T13 tipindeki yapıda bu hatâ mutlak değerce %20 nin üzerindedir (Şekil 4.2). Aynı dış merkezlik ve kolon boyutlarına sahip bu yapılar arasındaki tek fark, katların kütleli dönme ataleti değerleridir. T11 sisteminde $M_0=50\text{kNs}^2\text{m}$, T13 sisteminde ise $M_0=1000\text{kNs}^2\text{m}$ değerindedir; atalet terimi arttıkça hatâ da atmıştır. T15 sisteminde ise dönme ataleti $M_0=2400\text{kNs}^2\text{m}$ olarak daha da artırılmış fakat bu durumda hatâ -%3 veya en büyük hatâ -%6 mertebesine gerilemiştir (Şekil 4.3).

Gerçekte ise hatâ, harekete katılım ile ilgilidir. Bir mod için konuşulursa, bu modda “X” yönünde harekete katılım çok az ise “X” doğrultusundaki kesme kuvvetlerinin hesabında ortaya çıkan hatâda, bu modun etkisi de çok az olur. Tersi durumda ise bu etki artabilir.

Bu aşamada modların isimlendirildiği düşünölsün. Bu durumda, diğer bir ifade ile, “X” modunda “X” doğrultusunda harekete katılım, “0” modunda “X” doğrultusunda harekete katılıma göre ne kadar yüksek ise, o yapı çerçeve davranışına benzer bir davranış gösterecek ve ortaya çıkan hatâ da, bir çerçeve sistemde ortaya çıkan hatâya uygun düşecektir. Bundan başka, bir mod diğer modların bileşenlerini o kadar az içerecektir.

Yukarıda bahsedilen ve göreceli hatânın bağlı olduğu söylenen büyüklük, Bölüm 3.6’da

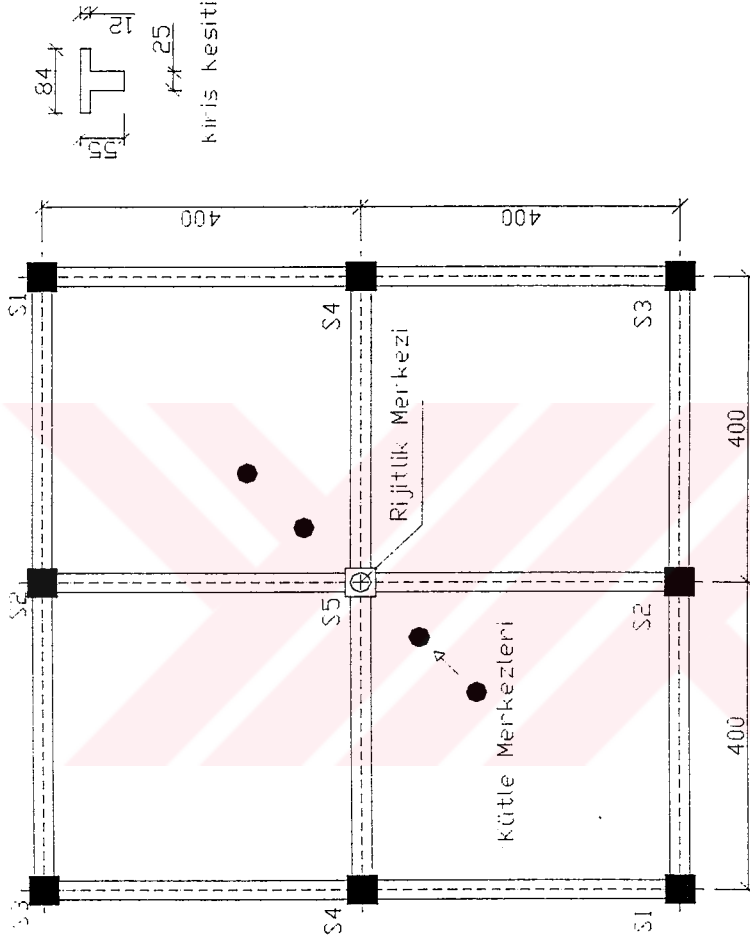
tanımlanan $Q_x = \frac{M_{xx}^{(x)}}{M_{xx}^{(0)}}$ oranıdır. Yukarıda geçen T11, T13 ve T15 sistemlerine ait Q_x oranları

sırasıyla 345, 2.2 ve 16 dır (Çizelge 3.3). Bunlara karşılık gelen hatâlar ise; daha önce de bahsedildiği gibi, sırasıyla -%2, -%20 ve -%3 tür. Q_x değeri belirli bir değerin üzerine çıktığında hatâ azalmakta, azaldığında ise artmaktadır. Bu durum sırasıyla modların ayrıklaşmasına ve birbirlerinin bileşenlerini içermelerine karşılık gelmektedir. Bu ilişkiye, çözülen 6720 adet örneğin tümünde rastlanmıştır. Q_x ile göreceli hatâ arasındaki ilişki doğrusal değildir. Bu ilişki Bölüm 4’teki grafikler ve Çizelge 3.3 yardımı ile görölebilir. Aynı ilişki katılım çarpanı(q) ile de kurulabilir. Fakat katılım çarpanı, modların normalize edilme şekline bağlı bir oran olduğu için bu yola gidilmemiştir.

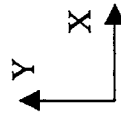
Q oranının tanımında kullanılan mod isimleri, yapının davranışının çerçeve davranışına yakın ya da çeşitli şekillerde uzak olması dikkate alınmadan verilmektedir. Parametrik olarak yapılacak bir çalışmada ise, bu durumun etkisini dikkate almak için farklı tiplerde sistemler

seçilmeli ve hesaplar her bir tip için tekrarlanmalıdır. Bu nedenle, bunun için her iki yatay doğrultudaki rijitlikleri eşit olan ve çeşitli mertebelerde farklı olan sistemler (Çizelge 3.2) üzerinde ayrı ayrı hatâ incelemeleri yapılmıştır. Bu durumda, bir yapıda, geometrik büyüklük değişimi yanında kütleli büyüklüklerin değişimi de ayrı bir yapı tipi sayılmak kaydı ile, bir tipte ortaya çıkan hatâların, bu tipe ait Q oranları ile ilişkisi aranmıştır. Bu tipler T1, T2x, T2y, T3x, T3y, T4x, ve T4y (Çizelge 3.2) şeklinde gruplandırılmıştır. Burada, örneğin T2x, (T21x, T22x, ..., T25x) sistemleri grubunu gösterir.





Şekil 3.4 Parametrik çalışmada kullanılan örnek yapı tipleri (Bir yapının geometrisinin değişmesi yanında kütle merkezinin değişmesi de yapı tipinin değişmesi anlamında kullanılmıştır.)



Çizelge 3.2 Örnek yapılara ait kolon boyutları, ve kat kütle ve ataletleri

Yapı tipi	S1 (cm)	S2 (cm)	S3 (cm)	S4 (cm)	S5 (cm)	M (kNs ² /m)	M _θ (kNs ² m)
T11	30x30	30x30	30x30	30x30	30x30	45	50
T12						45	400
T13						45	1000
T14						45	1500
T15						45	2400
T21x	30x30	60x30	30x30	60x30	30x30	45	50
T22x						45	400
T23x						45	1000
T24x						45	1500
T25x						45	2400
T21y	30x30	30x60	30x30	30x60	30x30	45	50
T22y						45	400
T23y						45	1000
T24y						45	1500
T25y						45	2400
T31x	30x30	90x30	30x30	90x30	30x30	45	50
T32x						45	400
T33x						45	1000
T34x						45	1500
T35x						45	2400
T31y	30x30	30x90	30x30	30x90	30x30	45	50
T32y						45	400
T33y						45	1000
T34y						45	1500
T35y						45	2400
T41x	30x30	110x30	30x30	110x30	30x30	45	50
T42x						45	400
T43x						45	1000
T44x						45	1500
T45x						45	2400
T41y	30x30	30x110	30x30	30x110	30x30	45	50
T42y						45	400
T43y						45	1000
T44y						45	1500
T45y						45	2400

Çizelge 3.2’de görülen 35 farklı sistem dokuz farklı dış merkezlik değeri ile dikkate alınarak 315 farklı tip sistem elde edilmiştir. Bu sistemlerin her biri farklı depremler altında çözülerek sonuçlar elde edilecektir.

Çizelge 3.2’de verilen dönme kütlesi değerlerinin yüksek veya düşük değerler aldığı görülmektedir. Bunun nedeni, hatânın limit durumlardaki değerini incelemektir. Bundan başka, aynı kütle değerine sahip bir konut yapısına kıyasla, ortası boş ve kütlesi kenarlarında toplanmış bir alışveriş merkezinin dönme kütlesi çok daha yüksek olabilir. Diğer taraftan kütlesi ortasında toplanmış bir fabrika yapısında bunun tersi bir durum olabilir.

3.8 Parametrik Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve CQC İçin Yeni Bir Kullanım Biçimi Önerisi

Parametrik çözümlerde; orta kolon için, CQC yöntemine ait göreceli hatâ eğrisinin eksi bölgede yer aldığı gözlenmiştir (Bölüm 5). Çözülen tüm sistemlerde bu durumla karşılaşılmıştır. Orta kolon, değişen kütle merkezlerinin simetri merkezi ile rijitlik merkezinin çakıştığı noktada bulunduğu için (Şekil 3.4), burulmadan kaynaklanan kesme kuvvetleri de simetrik veya antisimetrik olmuş ve bu kolona ait hatâ grafikleri simetrik olarak ortaya çıkmıştır. Köşe kolonlar için ise, göreceli hatâ eğrisinin simetrisi bulunmamakta; artı ve eksi bölgelerde yer alabilmektedir. Bu durum, köşe kolonlarının değişen kütle merkezine göre simetrik olmayışı ve rijitlik merkezinde bulunmayışı ile açıklanabilir (Şekil 3.4). Eksi veya artı bölgede yer alışı ise, burulmadan kaynaklanan kuvvetlerin, yani mod şekillerinin işaretlerine bağlıdır. Örneğin T21x ve T22x için ϕ_{x0} eksi, ϕ_{00} artı işaretli iken; T23x, T24x ve T25x için ise ϕ_{x0} artı, ϕ_{00} eksi işaretli olmaktadır (Çizelge 3.3). Bu sistemlere ait olan ortalama hatâ grafikleri incelendiğinde, işaretlerin değişimi ile grafiklerin bulunduğu bölgelerin de değiştiği görülmektedir (Şekil 4.148). Bu davranış tüm örnekler için geçerlidir.

İşaretler arasındaki bu ilişki ve bağılılığı daha basit bir şekilde ifade etmek mümkündür. %10 dış merkezlik için ϕ_{00} artı işaretli ise, -%10 dış merkezlik değerinde hatâ eğrisi eksi bölgede kalmakta, eksi olduğunda ise, artı bölgede yer almaktadır.

Diğer taraftan; hatânın depreme de bağlı olduğu bilinmektedir. Her deprem için ayrı ayrı çizilen grafikler incelendiğinde; yine ortalama hatâ grafiklerinde rastlanan duruma benzer hallere rastlanır. Bununla birlikte, az da olsa, depreme bağlı olarak, yukarıda bahsedilen duruma uymayan istisnalar; bazı depremler için diğer bölgeye geçişler olabilmektedir. Bahsedilen geçişlerin mertebesi Şekil 4.94 ve sonraki şekillerden izlenebilmektedir.

Bu göreceli hatâlar, dış merkezlik değeri arttıkça, değişken hızlarda olmak üzere artmaktadırlar. Ancak, artış sürekli olmamaktadır. Dış merkezlik değeri çok büyüdüğünde, deprem hangi doğrultuda etkirse etkisin, yapı daha çok burulma titreşimi yapar görünmektedir. Bu durumdaki yapının rijitlik matrisi, üst üste konulmuş burulma yaylarının oluşturduğu rijitlik matrisi gibidir. Bu hali ile; üst üste bağlanmış kayma yaylarına veya kayma çerçevesine ait olan rijitlik matrisinin yapısından bir farkı yoktur. Kütle matrisi de köşegen olduğuna göre, dış merkezlik arttıkça, bahsedilen hatânın çerçevelerde karşılaşılan maksimum hatâyâ yaklaşması beklenir. Chopra 1995'de, bu tür hatâların kesme kuvvetinin spektral hesabında, %30 mertebesinde kaldığı ifade edilmiştir.

Deprem “X” doğrultusunda iken “Y” doğrultusunda da, V_x 'e göre küçük olmakla birlikte, V_y kesme kuvvetleri, daha çok “ θ ” modunun etkisi ile oluşacaktır. V_x kuvvetlerinde ise, “X” ve “ θ ” modlarının katkısı vardır. V_y kuvvetleri daha çok “ θ ” modları ile ortaya çıktığı için, “X” ve “ θ ” modları arasındaki paylaşımı dikkate alan Q oranına bağlı hatâ aramak anlamlı olmayacaktır. Ayrıca, V_y için ortaya çıkan hatânın depreme çok fazla duyarlı olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, yöntemleri karşılaştırabilmek ve önerilerde bulunmak amacıyla, Bölüm 4'te, V_y kuvvetlerine ait hatâ grafikleri de verilmiştir.

Fransız Deprem Yönetmeliği (Earthquake Resistant Regulations—A World List, 1992); hesaplanan tepki, cebirsel işaretleri birbirinden bağımsız olmayan yüklerin tesiri ile oluşması halinde, CQC yöntemi yerine çok daha uygun olduğunu ifade ettiği bir başka yöntem önermektedir. Bahsedilen yöntemin kullanılacağı duruma örnek olarak, bir kolonda oluşan artı momentin bir modda basınç gerilmesi diğer bir modda ise çekme gerilmesiyle ilişkili olması verilmektedir. Bu yöntem, modal maksimum büyüklüklerin, işaretleri ile birlikte doğrudan toplanması olarak tanımlanmaktadır. Üç boyutlu olarak hesaplanan yapılarda, kolonlarda oluşan kesme kuvvetleri, bu duruma uyar. Bu nedenle bu yöntemde ait hatâ grafikleri de Bölüm 4'de verilmiştir. Yöntem, ABSS yönteminde, işaretlerin dikkate alınmış hali olduğu için, ilgili çözümler ABS' ile gösterilmiştir.

Ayrıca, bu bölümde; üç boyutlu olarak hesaplanan yapılarda CQC yöntemi için tarafımızdan önerilen yeni bir kullanım şekline ait hatâ grafikleri de verilmiştir. Üç boyutlu yapılarda artan dış merkezlik ile oluşan kesme kuvvetinin kesin değerinde önemli bir değişiklik olmamasına rağmen, birbirlerinden uzaklaşan doğal frekanslar nedeni ile CQC yönteminin daha küçük sonuçlar ürettiği gözlenmişti (Çizelge 3.1). CQC yönteminin, bu çalışmada CQC0 ile isimlendirilen kullanım biçiminde; yapı sifıra yakın dış merkezlik değerine sahip gibi ρ çapraz ilişki katsayıları hesaplanmış, ve dış merkezlik değeri ne olursa olsun, CQC yönteminde bu duruma ait katsayılar kullanılmıştır. Bu kullanım şekline ait hatâ grafikleri, yine Bölüm 4'de verilmiştir. Grafiklerde, bu kullanım biçimine ait kısaltma CQC0 olarak işaretlenmiştir. Bahsedilen şekilde hesaplanan katsayılardan ise, ρ_0 olarak söz edilmiştir.

Bu grafiklerden anlaşılacağı gibi; ABS' (Fransız Yönetmeliği) yöntemi, hatâyı genellikle, CQC yönteminin yaptığı hatânın işaretinin tersi yönünde arttırmaktadır. Bu durumda, bir depreme bağlı hatâ küçülürken bir diğerine göre büyümektedir. Bahsedilenlerin tümü, Bölüm 4'de verilen grafikler üzerinden örneklenebilir.

$\xi = 0.05$ için orta kolonda V_x kuvvetinde oluşan maksimum hatâ, örneğin T34y sistemi için CQC de eksi bölgede(-%11,%0), ABS' de artı bölgede(%0,%11) ve CQC0 da ise, bunlardan daha küçük olmak üzere hem artı hem de eksi bölgede yer alabilmektedir(-%8,%1) (Şekil 4.12). Bununla birlikte örneğin T34x sisteminde olduğu gibi; CQC0 ile yapılan birleştirme CQC ye benzer sonuçlar verebilmektedir (Şekil 4.10). CQC0, genellikle, CQC yönteminden daha az maksimum hatâ üretmektedir.

$\xi = 0.05$ için köşe kolonda V_x kuvvetinde oluşan maksimum hatâ, örneğin T25x sistemi için CQC0 ve CQC de benzer mertebelerde kalmış (-%20,%40), ABS' de ise daha büyük bir hatâyâ neden olmuştur (-%85,%25) (Şekil 4.23). Şekil 4.22 de ise, mertebesi az olmakla birlikte, ABS' yönteminin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

$\xi = 0.05$ için orta kolonda V_y kuvvetinde oluşan maksimum hatâ, örneğin T12 sistemi için CQC, CQC0 ve ABS' yöntemlerinde, sırasıyla, (%0,%240), (-%90,%0) ve (-%100,%0) mertebesindedir (Şekil 4.37). T14 sisteminde ise bu hatâ aralıkları, yine aynı sırada olmak üzere, (%0,%160), (-%60,%30) ve (-%100,%0) mertebesindedir (Şekil 4.38). Bir başka örnek olarak, T42y için bu hatâlar, yine aynı sırayla, (%0,%500), (%0,%500) ve (-%100,%0) mertebesindedir (Şekil 4.52). Görüldüğü üzere; bu tür sistemlerde CQC, deprem doğrultusuna dik yönde ve daha küçük olan V_y kuvvetleri için fazla hatâ yapmıştır. Fakat bu, genel bir durum değildir. Burada dikkat çekilmek istenen; CQC yöntemindeki hatânın çok değişken olduğudur. CQC0 ise, frekanslar yapıdaki rijitlik farkı nedeni ile ayrıklaştığı için, ρ katsayıları sıfıra yakın bir dış merkezlik değeri ile hesaplanırsa bile, CQC ile benzer sonuçlar vermektedir. ABS' de ise maksimum hatâ, bu tür sistemlerde, sistemden bağımsız olarak (-%100,%0) aralığında neredeyse sabitlenmiş gibidir.

$\xi = 0.05$ için köşe kolon V_y kuvvetinde, CQC0 için CQC'den daha az ya da benzer hatâlar oluşmuştur. Ayrıca ABS' için hatâ, mutlak değerce %100 ün üstüne çıkmamıştır. Bu durum Şekil 4.55 ve bu duruma ait sonraki şekillerden izlenebilmektedir.

Yukarıda verilen değerlendirmedeki örnekler $\xi = 0.05$ sönüm oranı içindir. Bu sönüm oranı için elde edilenlerin, aynı şekilde, $\xi = 0.02$ sönüm oranı için de geçerli olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; V_x kuvvetlerinin hesabında CQC0'ın kullanımı; ya CQC ile benzer sonuçlar vermiş, ya da hatânın ortalamasının alınması anlamında, daha iyi sonuçlar vermiştir. Bununla beraber, bu sonuçlar bir katlı yapılar içindir. Sıfır dış merkezlik için hatâ da sıfırdır. Çok katlı yapılarda ise sıfır dış merkezlik için hatâ sıfır olmamakta ve grafik ötelenmektedir. Bu ötelenmeye bağlı olarak da hatânın ortalamasının alınması veya CQC0'ın kullanımı daha iyi sonuçlar vermeyebilir. Buna ait örnekler Bölüm 5'de verilmiştir.

V_y kuvvetleri için ise, bir ya da çok katlı yapılarda sıfır dış merkezlik için kuvvet ve dolayısı ile hatâ da sıfırdır. Bu kuvvete ait hatâ grafiği çok katlı yapılar için ötelenmemektedir. Dolayısı ile V_y kuvvetlerinin hesabında, CQC kullanılacaksa, bunun yerine CQC0'ın kullanımı önerilir.

CQC ve CQC0 ile birleştirmede hatâ %300 mertebelerine ulaşsa bile ABS' ile birleştirmede %100'ün üstüne çıkmadığı yukarıda söylenmişti. Bununla birlikte; CQC ve CQC0 için hata %100'ün oldukça altında iken, ABS' ile birleştirmede %100'e yakın kalabildiği de gözlenmiştir. Bunun pratik anlamı, ABS' yönteminde hatânın daha az değişken kaldığıdır. Bu nedenle, V_y kuvvetlerinin hesabında ABS' kullanılarak birleştirme yapılması ikinci bir seçenek olarak alınmaya değer görülmektedir.

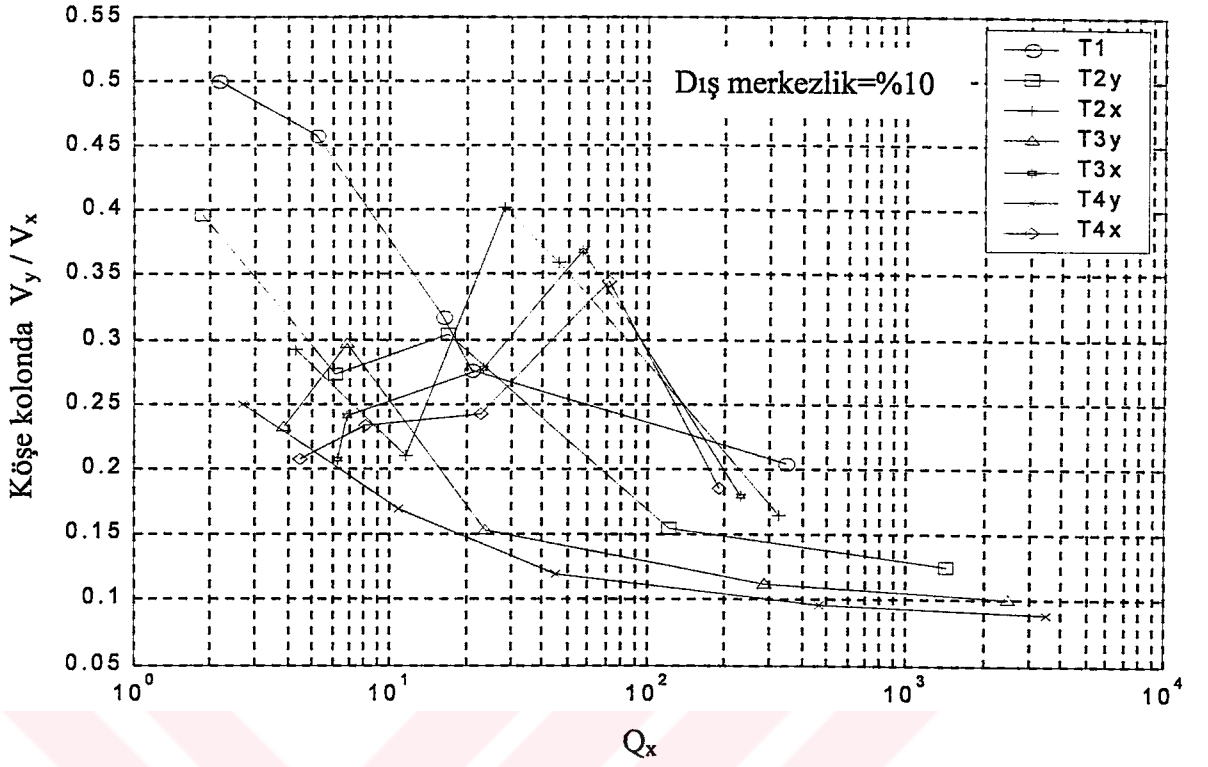
3.9 Burulmanın Yapı Cevabına Olan Katkısının, Yatay Bir Doğrultudaki Deprem Etkisi İçin Araştırılması

Bir yapıya ait cevapta burulmanın etkili olup olmayacağı, bu yapının analiz veya tasarımındaki hesap şeklini değiştirir. Burulmalı davranış hesaplarda doğrudan dikkate alınmadığı durumlarda ise, burulma etkisini sonradan dikkate alan tedbirler gerekir.

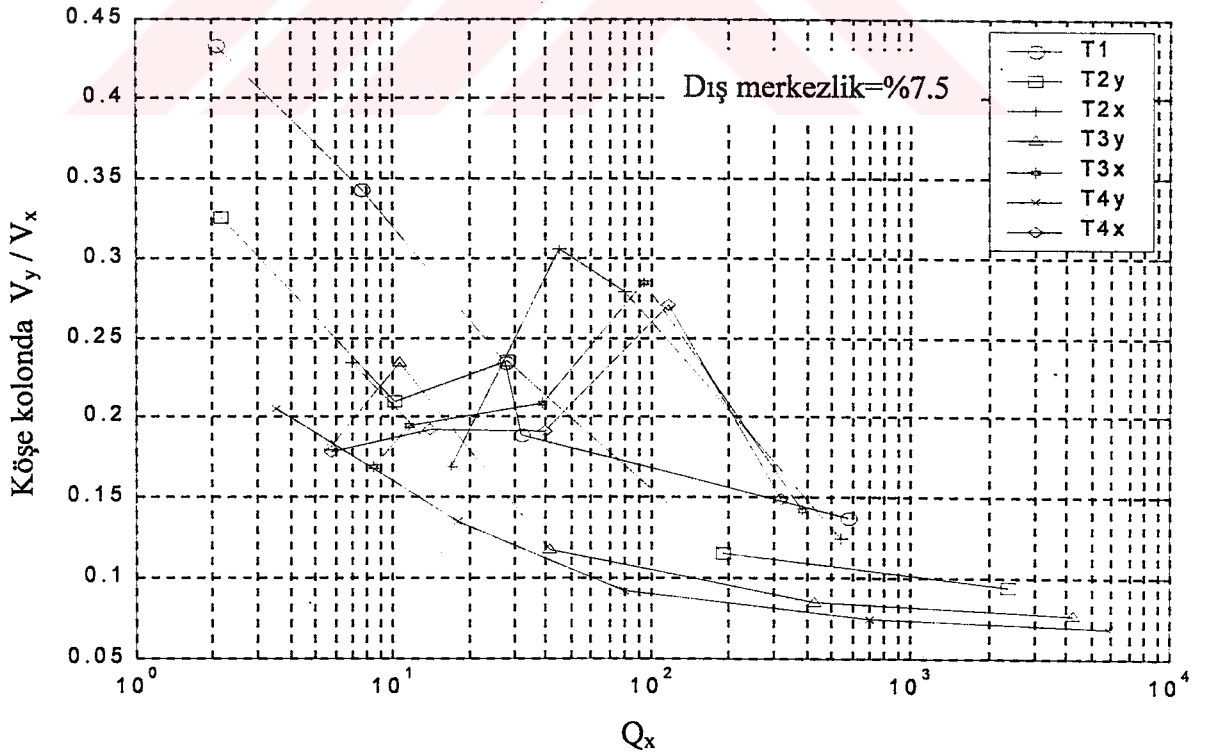
Yatay bir doğrultudaki deprem etkisi için, üç boyutlu olarak ele alınan bir yapının cevabında burulmanın etkisi, V_y/V_x oranı ile incelenmiştir. Burada V_x , köşe kolonda deprem doğrultusunda, V_y ise depreme dik doğrultuda oluşan kesme kuvvetidir. Bu orandaki artışın, bu yapıda burulma etkisinin artması anlamına geldiği düşünülmüştür. Bu etkiyi araştırmak amacıyla, belirli bir dış merkezlik değeri için $V_y/V_x - Q_x$ grafikleri çizilmiştir (Şekil 3.6-Şekil 3.9). Bu şekiller yardımı ile, belirli bir dış merkezlik ve sistem tipi için Q_x 'e bağlı olarak burulma etkisi (V_y/V_x) üzerinden incelenebilir.

Yatay bir yük niteliği taşıyan rüzgar yükleri için de benzer çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan Liang 1997'de, anılan türdeki yükler altında, bir yapıdaki burulma davranışının %5 dış merkezlik değeri üstünde dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Halbuki, %10 dış merkezlik için T1 tipi sistemde $Q_x=350$ iken $V_y/V_x=0.2$ olmakta (Şekil 3.6), %2.5 dış merkezlik değeri için $Q_x=11$ iken $V_y/V_x=0.18$ değerini alarak aynı mertebede kalmaktadır (Şekil 3.9).

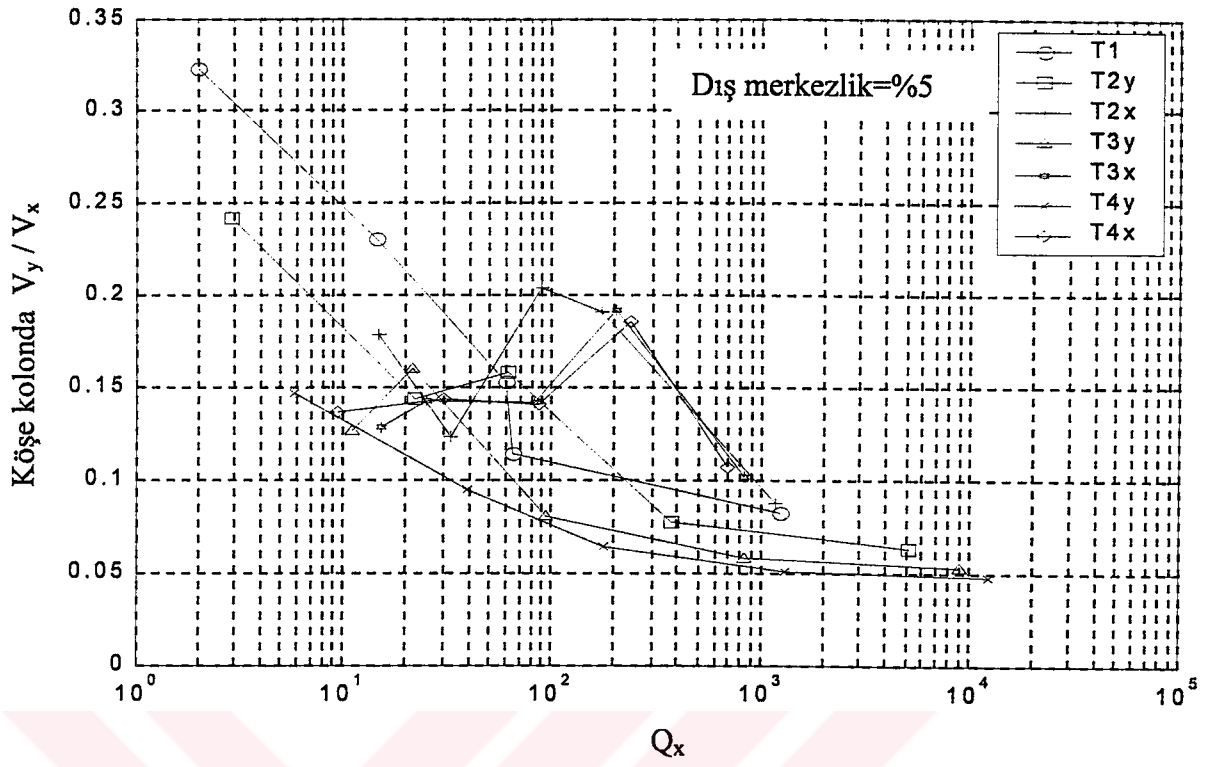
Böylelikle, burulma etkisinin yalnızca dış merkezlik yardımıyla belirlenemeyeceği, bunun için Q oranının da bilinmesi gerektiği söylenebilir. Örnek olarak; aynı dış merkezlik değerine sahip, kütlesi dışta toplanmış ve ortası boş olan bir alışveriş merkezi ile kütlesi ortasında toplanmış bir fabrika yapısında, burulmanın aynı mertebede etkili olacağı söylenemez.



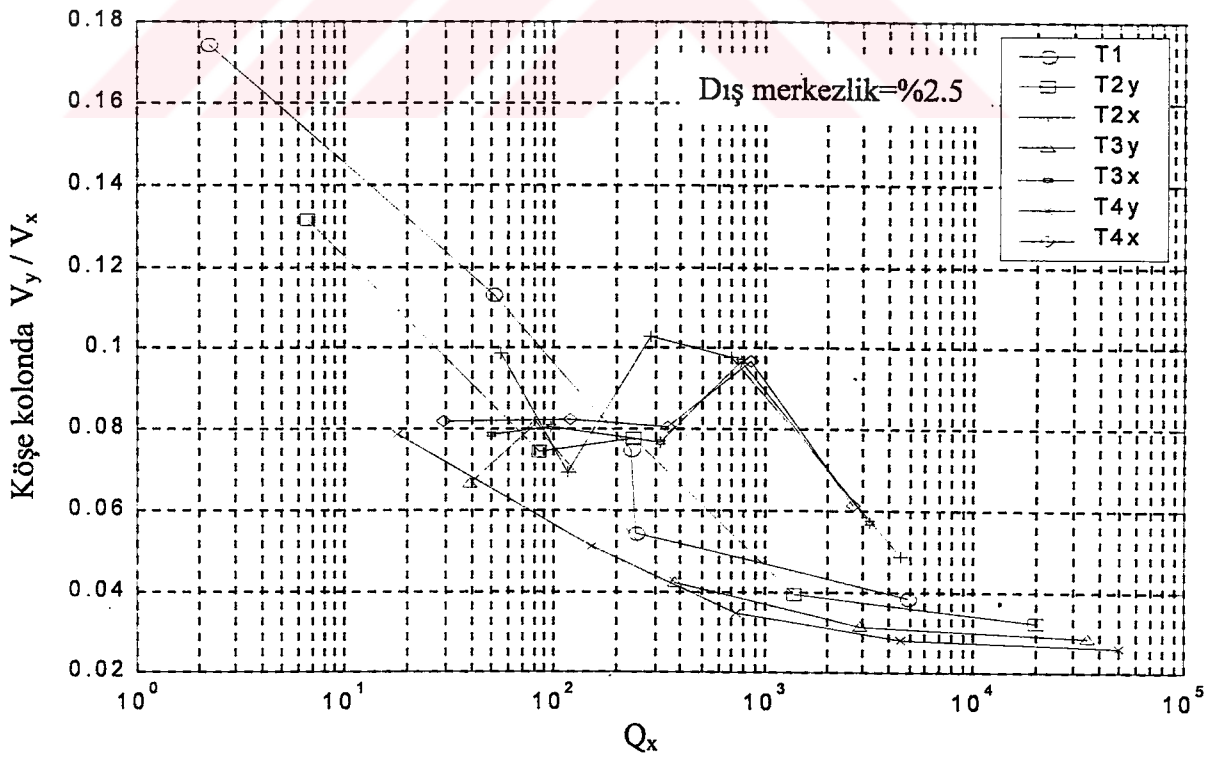
Şekil 3.6 $\xi = 0.05$, köşe kolonda, 12 deprem için ortalama V_y/V_x



Şekil 3.7 $\xi = 0.05$, köşe kolonda, 12 deprem için ortalama V_y/V_x



Şekil 3.8 $\xi = 0.05$, köşe kolonda, 12 deprem için ortalama V_y/V_x



Şekil 3.9 $\xi = 0.05$, köşe kolonda, 12 deprem için ortalama V_y/V_x

Çizelge 3.3 Kullanılan yapı tiplerine ait özellikler

Yapı tipi	Dış merkezlik=%10						Dış merkezlik=%5						Q _x (%10)	Q _x (%7.5)	Q _x (%5)	Q _x (%2.5)			
	Mod ismi	{φ ₁ }	Mod ismi	{φ ₂ }	Mod ismi	{φ ₃ }	ω ₁ /ω ₂	ω ₂ /ω ₃	Mod ismi	{φ ₁ }	Mod ismi	{φ ₂ }					Mod ismi	{φ ₃ }	ω ₁ /ω ₂
T11	Y 0.50	1.00 -1.00 -0.07	X 0.50	1.00 1.00 0.00	θ 0.00	1.00 -1.00 24.87	0.971 0.219	0.956	Y 0.50	1.00 -1.00 -0.04	X 0.50	1.00 1.00 0.00	θ 0.00	1.00 -1.00 47.47	0.992 0.224	344.5	579.7	1253	4889
T12	Y 0.48	1.00 -1.00 -0.11	X 0.50	1.00 1.00 0.00	θ 0.02	1.00 -1.00 2.11	0.956	0.610	Y 0.49	1.00 -1.00 -0.06	X 0.50	1.00 1.00 0.00	θ 0.01	1.00 -1.00 3.80	0.988 0.630	20.8	32.3	65.2	242.9
T13	Y 0.27	1.00 -1.00 -0.28	X 0.50	1.00 1.00 0.00	θ 0.23	1.00 -1.00 0.33	0.883	0.890	θ 0.25	1.00 -1.00 -0.30	X 0.50	1.00 1.00 0.00	Y 0.25	1.00 -1.00 0.30	0.938 0.945	2.2	2.1	2.0	2.2
T14	θ 0.10	1.00 -1.00 -0.50	X 0.50	1.00 1.00 0.00	Y 0.40	1.00 -1.00 0.12	0.774	0.955	θ 0.03	1.00 -1.00 -0.90	X 0.50	1.00 1.00 0.00	Y 0.47	1.00 -1.00 0.07	0.799 0.987	5.2	7.7	14.6	51.6
T15	θ 0.03	1.00 -1.00 -0.76	X 0.50	1.00 1.00 0.00	Y 0.47	1.00 -1.00 0.05	0.628	0.981	θ 0.01	1.00 -1.00 -1.49	X 0.50	1.00 1.00 0.00	Y 0.49	1.00 -1.00 0.03	0.637 0.995	16.3	27.6	59.8	233.8
T21x	Y 0.00	1.00 -23.55 -0.65	X 1.00	1.00 0.04 -0.05	θ 0.00	1.00 -0.48 17.03	0.710	0.256	Y 0.00	1.00 -94.00 -1.27	X 1.00	1.00 0.01 -0.03	θ 0.00	1.00 -0.48 32.35	0.705 0.266	322	540	1163	4529
T22x	Y 0.00	1.00 -17.61 -0.65	X 0.92	1.00 0.09 -0.10	θ 0.08	1.00 -0.32 1.14	0.721	0.695	Y 0.00	1.00 -69.60 -1.27	X 0.97	1.00 0.02 -0.06	θ 0.03	1.00 -0.30 1.92	0.709 0.743	12	17	33	118
T23x	Y 0.01	1.00 -8.10 -0.67	θ 0.19	1.00 0.87 -0.40	X 0.80	1.00 -0.07 0.10	0.825	0.791	Y 0.00	1.00 -28.52 -1.29	θ 0.06	1.00 0.83 -0.79	X 0.93	1.00 -0.02 0.06	0.843 0.817	4	7	15	56

Çizelge 3.3 Kullanılan yapı tiplerine ait özellikler (devamı)

Yapı tipi	Dış merkezlik=%10						Dış merkezlik=%5						Q _x (%10)	Q _x (%7.5)	Q _x (%5)	Q _x (%2.5)	
	Mod ismi	{φ ₁ }	Mod ismi	{φ ₂ }	Mod ismi	{φ ₃ }	ω ₁ /ω ₂	ω ₂ /ω ₃	Mod ismi	{φ ₁ }	Mod ismi	{φ ₂ }					Mod ismi
T24x	θ 0.03	1.00 -3.22 -0.75	Y 0.03	1.00 4.74 -0.57	X 0.94	1.00 -0.03 0.04	0.862 0.723	1.00 -0.03 0.04	θ 0.01	1.00 -4.77 -1.41	Y 0.01	1.00 12.19 -1.22	X 0.98	1.00 -0.01 0.02	0.921 0.714	0.921 0.714	28 45 89 290
T25x	θ 0.02	1.00 -1.63 -0.91	Y 0.00	1.00 18.94 -0.62	X 0.98	1.00 -0.02 0.02	0.735 0.706	1.00 -0.02 0.02	θ 0.01	1.00 -1.68 -1.79	Y 0.00	1.00 72.33 -1.26	X 0.99	1.00 0.00 0.01	0.753 0.704	0.753 0.704	47 80 174 685
T21y	X 1.00	1.00 -0.04 -0.03	Y 0.00	1.00 22.71 1.18	θ 0.00	1.00 -2.10 35.75	0.710 0.256	1.00 -0.01 -0.01	X 1.00	1.00 -0.01 -0.01	Y 0.00	1.00 90.46 2.50	θ 0.00	1.00 -2.10 68.03	0.705 0.266	0.705 0.266	1421 2387 5146 20051
T22y	X 0.98	1.00 -0.06 -0.04	Y 0.01	1.00 11.33 1.09	θ 0.01	1.00 -3.15 3.59	0.721 0.695	1.00 -0.01 -0.02	X 1.00	1.00 -0.01 -0.02	Y 0.00	1.00 41.95 2.44	θ 0.00	1.00 -3.36 6.44	0.709 0.743	0.709 0.743	124 191 380 1397
T23y	X 0.86	1.00 -0.12 -0.08	θ 0.14	1.00 1.15 0.46	Y 0.00	1.00 -14.23 1.49	0.825 0.791	1.00 -0.04 -0.05	X 0.96	1.00 -0.04 -0.05	θ 0.04	1.00 1.21 0.96	Y 0.00	1.00 -47.91 2.67	0.843 0.817	0.843 0.817	6 10 22 84
T24y	θ 0.35	1.00 -0.31 -0.23	X 0.65	1.00 0.21 0.12	Y 0.00	1.00 -30.88 1.37	0.862 0.723	1.00 -0.21 -0.30	θ 0.25	1.00 -0.21 -0.30	X 0.75	1.00 0.08 0.10	Y 0.00	1.00 -117.7 2.60	0.921 0.714	0.921 0.714	1.9 2.2 3.0 6.7
T25y	θ 0.06	1.00 -0.61 -0.56	X 0.94	1.00 0.05 0.03	Y 0.00	1.00 -62.41 1.32	0.735 0.706	1.00 -0.60 -1.07	θ 0.02	1.00 -0.60 -1.07	X 0.98	1.00 0.01 0.02	Y 0.00	1.00 -245.2 2.58	0.753 0.704	0.753 0.704	17 29 62 240
T31x	Y 0.00	1.00 -41.78 -0.86	X 1.00	1.00 0.03 -0.06	θ 0.00	1.00 -0.30 14.37	0.576 0.276	1.00 -167.0 -1.70	Y 0.00	1.00 -167.0 -1.70	X 1.00	1.00 0.01 -0.03	θ 0.00	1.00 -0.30 27.20	0.569 0.288	0.569 0.288	229 383 822 3197

Çizelge 3.3 Kullanılan yapı tiplerine ait özellikler (devamı)

Yapı tipi	Dış merkezlik=%10					Dış merkezlik=%5					Q _x (%10)	Q _x (%7.5)	Q _x (%5)	Q _x (%2.5)					
	Mod ismi	{φ ₁ }	Mod ismi	{φ ₂ }	Mod ismi	{φ ₃ }	ω ₁ /ω ₂	ω ₂ /ω ₃	Mod ismi	{φ ₁ }					Mod ismi	{φ ₂ }	Mod ismi	{φ ₃ }	ω ₁ /ω ₂
T35y	θ	1.00	X	1.00	Y	1.00	0.830	0.859	θ	1.00	X	1.00	Y	1.00	0.859	0.569	11	22	80
	0.13	-0.37	0.87	0.06	0.00	-136.3	0.573	0.569	0.04	-0.63	0.96	0.02	0.00	-536.9	0.569				
T41x	Y	1.00	X	1.00	θ	1.00	0.512	0.504	Y	1.00	X	1.00	θ	1.00	0.504	0.300	193	688	2673
	0.00	-54.32	0.99	0.02	0.01	13.17	0.286	0.300	0.00	-1.87	1.00	0.00	0.00	-0.23	0.300				
T42x	Y	1.00	X	1.00	θ	1.00	0.532	0.512	Y	1.00	X	1.00	θ	1.00	0.512	0.823	4.5	5.7	29
	0.00	-45.38	0.82	0.05	0.18	-0.11	0.747	0.823	0.00	-1.87	0.90	0.02	0.10	-0.09	0.823				
T43x	Y	1.00	θ	1.00	X	1.00	0.686	0.685	Y	1.00	θ	1.00	X	1.00	0.685	0.725	8.2	14	119
	0.00	-30.28	0.11	0.45	0.89	-0.02	0.701	0.725	0.00	-1.88	0.03	0.42	0.97	-0.01	0.725				
T44x	Y	1.00	θ	1.00	X	1.00	0.815	0.831	Y	1.00	θ	1.00	X	1.00	0.831	0.598	23	40	345
	0.00	-18.28	0.04	1.43	0.96	-0.01	0.594	0.598	0.00	-68.14	0.01	1.48	0.99	0.00	0.598				
T45x	θ	1.00	Y	1.00	X	1.00	0.878	0.921	θ	1.00	Y	1.00	X	1.00	0.921	0.506	72	118	851
	0.01	-4.48	0.01	11.02	0.98	-0.01	0.514	0.506	0.00	-1.95	0.00	32.83	1.00	0.00	0.506				
T41y	X	1.00	Y	1.00	θ	1.00	0.512	0.504	X	1.00	Y	1.00	θ	1.00	0.504	0.300	3513	5864	48950
	1.00	-0.02	0.00	50.72	0.00	-4.26	0.286	0.300	1.00	-0.01	0.00	202.0	0.00	-4.27	0.300				
T42y	X	1.00	Y	1.00	θ	1.00	0.532	0.512	X	1.00	Y	1.00	θ	1.00	0.512	0.823	463	693	4489
	1.00	-0.02	0.00	19.54	0.00	-9.23	0.747	0.823	1.00	-0.01	0.00	64.26	0.00	-11.19	0.823				

Çizelge 3.3 Kullanılan yapı tiplerine ait özellikler (devamı)

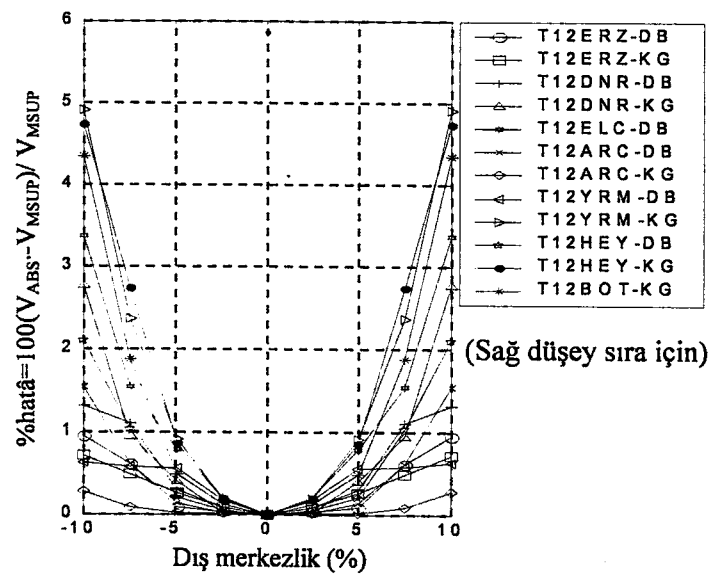
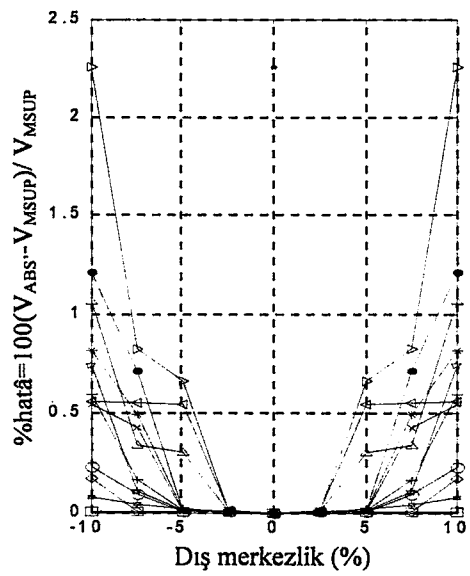
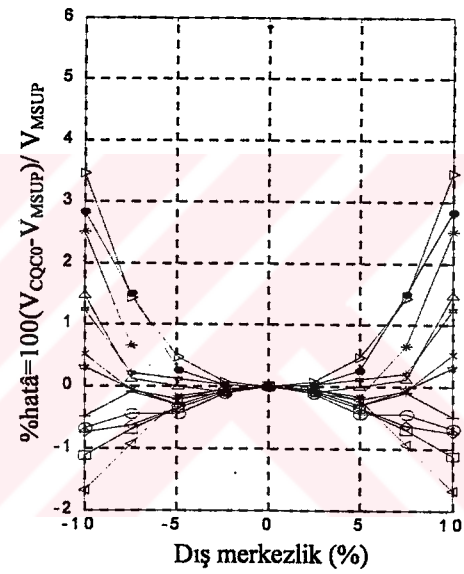
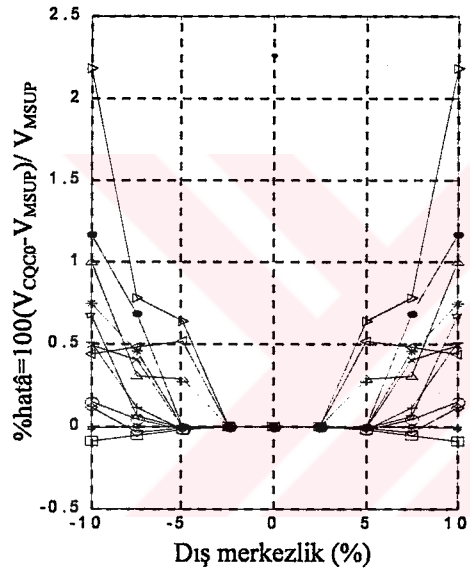
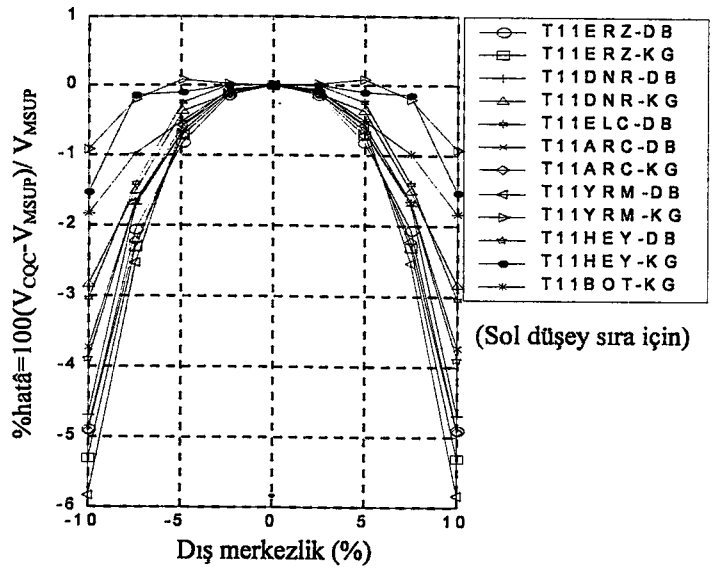
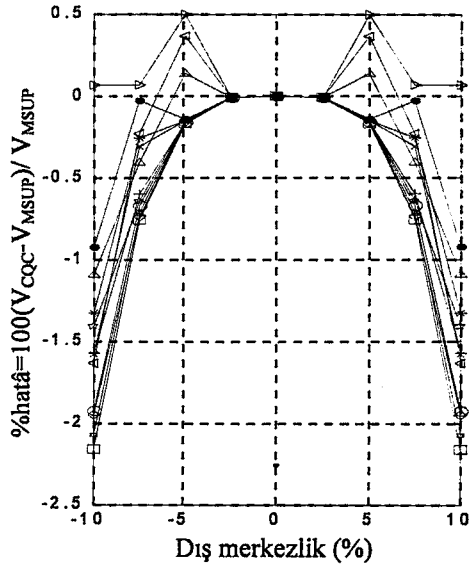
Yapı tipi	Dış merkezlik=%10					Dış merkezlik=%5					Q _x (%10)	Q _x (%7.5)	Q _x (%5)	Q _x (%2.5)	
	Mod ismi	{φ ₁ }	Mod ismi	{φ ₂ }	Mod ismi	ω ₁ /ω ₂	{φ ₃ }	Mod ismi	{φ ₁ }	Mod ismi					{φ ₂ }
T43y	q	1.00	θ	1.00	q	1.00	1.00	q	1.00	θ	1.00	0.685	1.00	Y	0.685
	X	-0.03	0.02	2.23	Y	-53.91	-0.01	0.01	-0.01	2.40	-197.3	0.725	7.59	0.00	0.725
T44y	q	1.00	θ	1.00	Y	1.00	0.815	θ	1.00	θ	1.00	0.831	1.00	Y	0.831
	X	-0.05	0.08	0.70	0.00	-104.0	-0.01	0.02	-0.01	0.67	-402.2	0.598	7.51	0.00	0.598
T45y	q	1.00	X	1.00	Y	1.00	0.878	θ	1.00	X	1.00	0.921	1.00	Y	0.921
	θ	-0.22	0.73	0.09	0.00	-196.2	-0.17	0.85	-0.17	0.03	-773.3	0.506	7.48	0.00	0.506
	0.27	-0.22	0.08	3.80	0.00	3.80	0.514	0.15	-0.33	0.06	0.506	0.506	0.00	0.506	

4. PARAMETRİK ÇÖZÜM GRAFİKLERİ

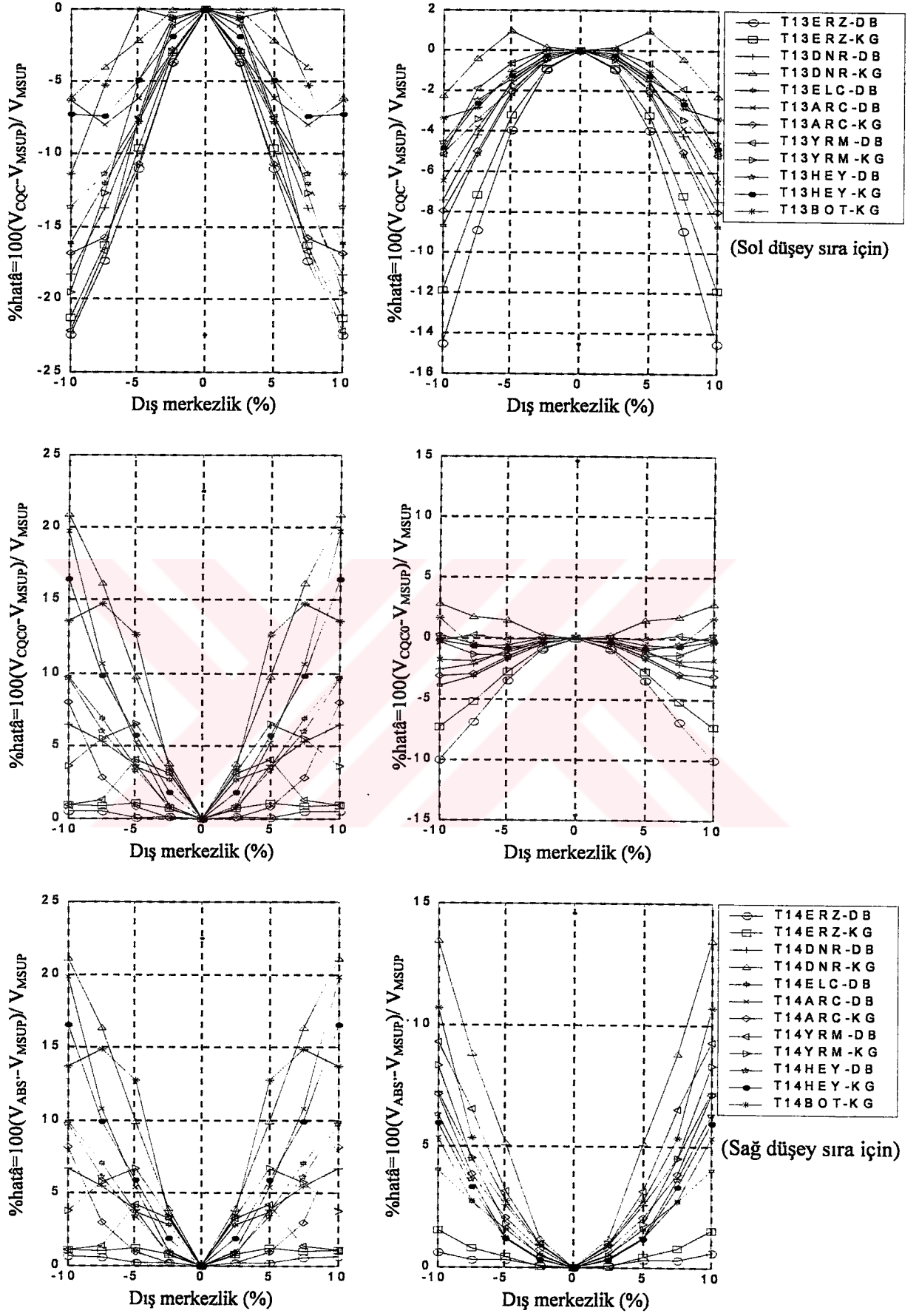
Bu bölümde; Bölüm 3'te özellikleri verilen tip örnekler yardımı ile yapılan parametrik çalışmanın sonuçları grafik olarak özetlenmiştir. Her sayfa, tasarruf amacıyla düşeyde ikiye ayrılarak iki farklı sistem özetlemek için kullanılmıştır. Grafikler, her zaman simetrik olmadığından, çizimlerde simetri kullanılmamıştır. Çizimler, $\xi = 0.05$ sönüm oranı ve, örneklerdeki orta ve köşe kolonlar için yapılmıştır. Çözümlerde Çizelge 3.2'de görülen 315 adet tip sistem kullanılmıştır. Her sistem 12 adet deprem için çözülmüştür. Sonuçları burada verilmemekle birlikte, farklı sönüm değerleri için tüm hesaplar tekrarlanmıştır.

Burada V_{MSUP} , kolonlardaki kesme kuvvetinin zaman tanım alanında yapılan çözümle elde edilen ve kesin çözüm olarak kabul edilen değeridir. CQC tam karesel birleştirme, SRSS karelerinin karekökü ve CQC0 ise Bölüm 3.8'de bahsedilen birleştirme tekniğidir.

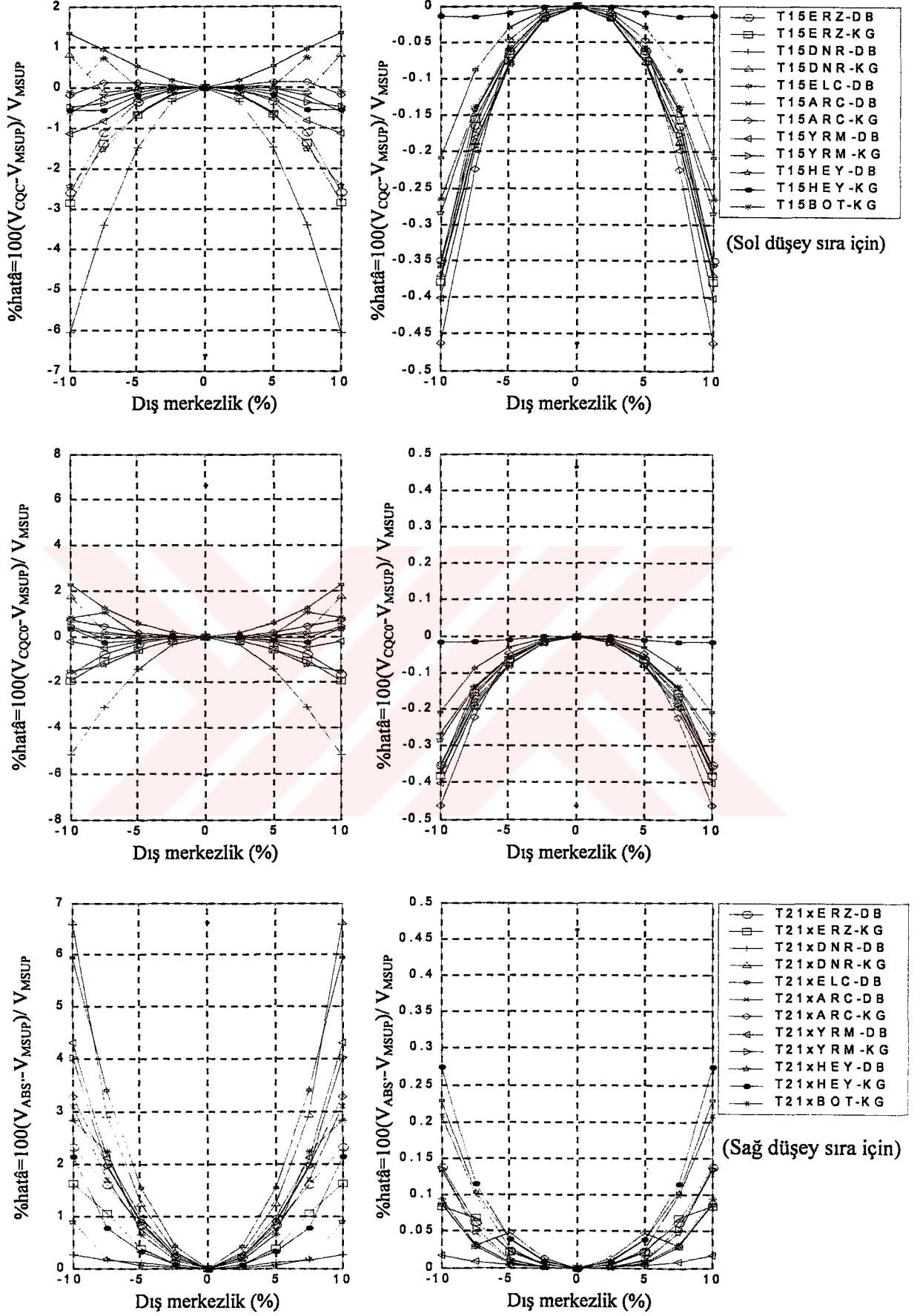




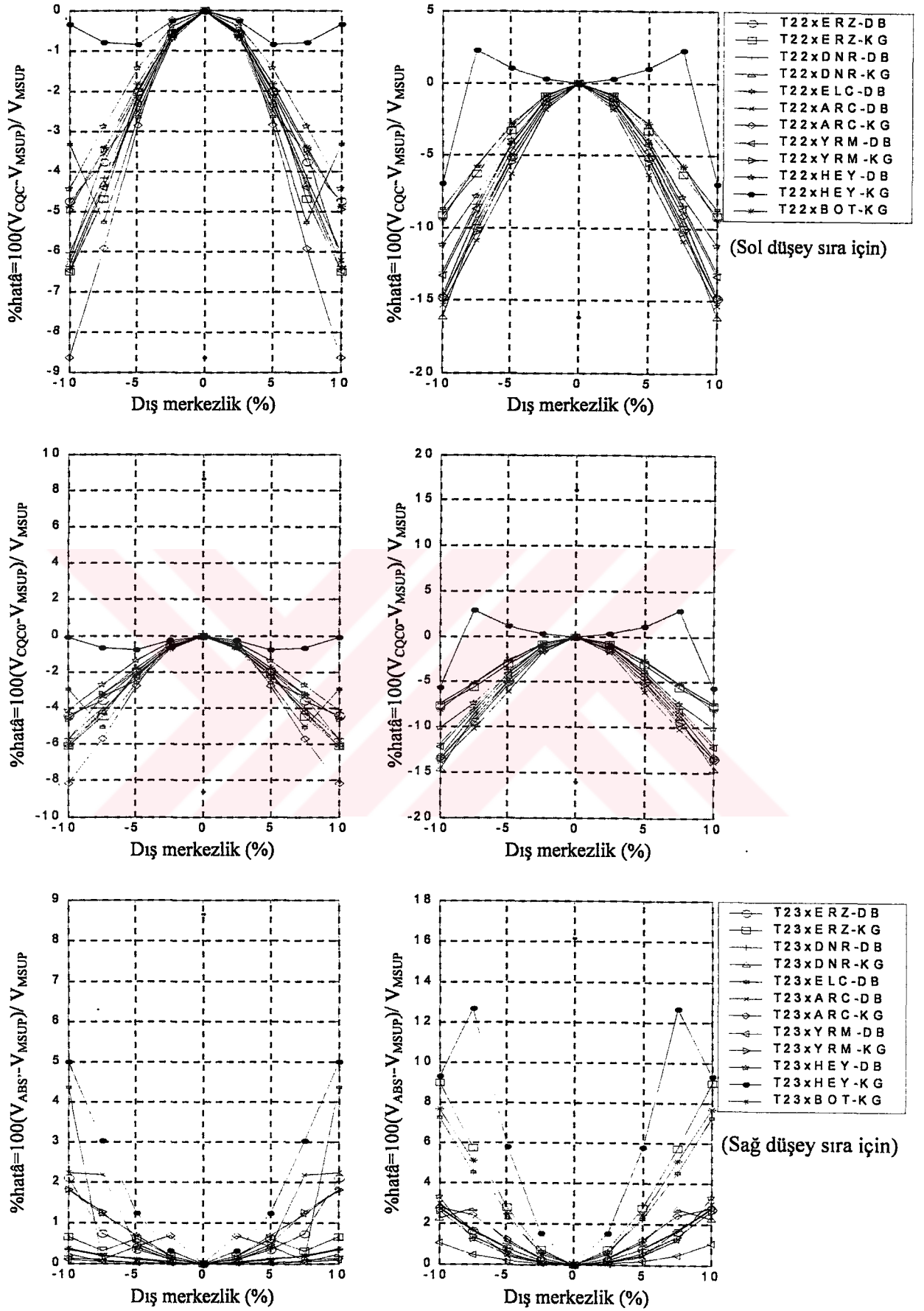
Şekil 4.1- Bina tipi 11 ve 12, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



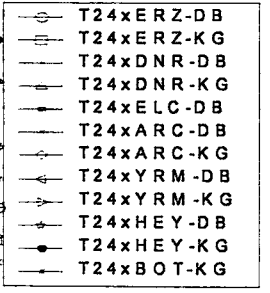
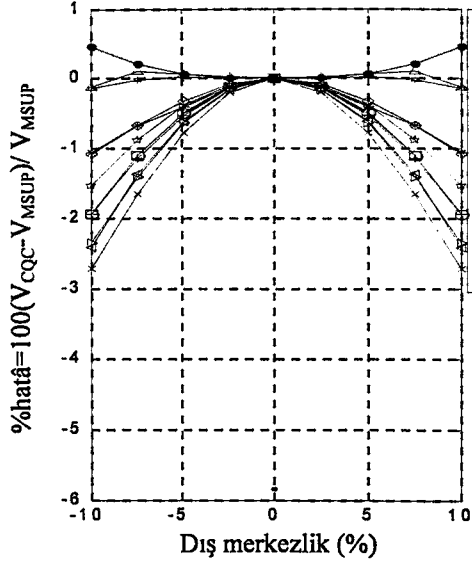
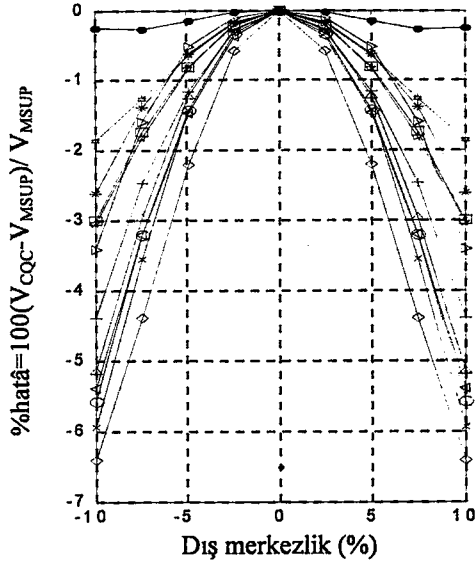
Şekil 4.2- Bina tipi 13 ve 14, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



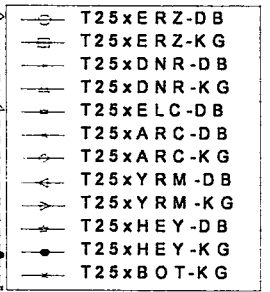
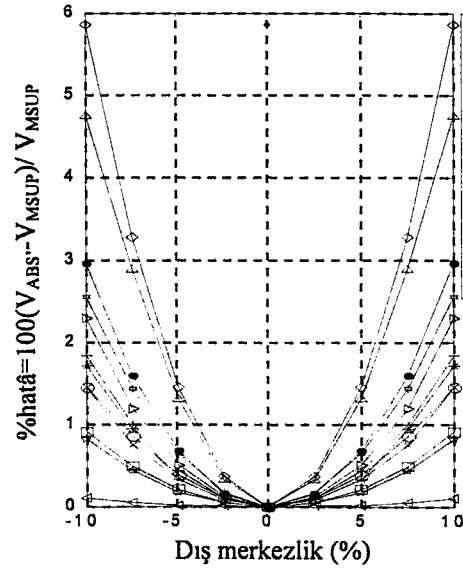
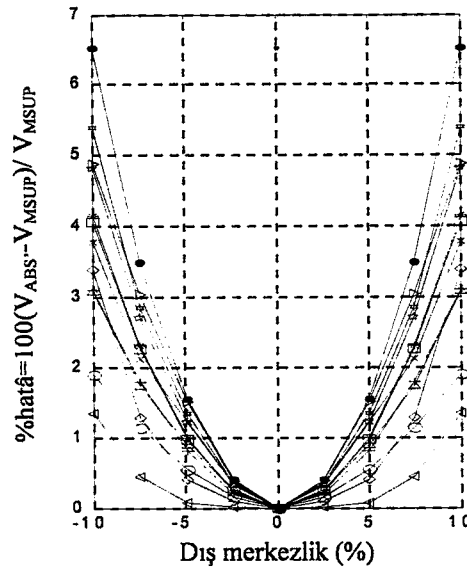
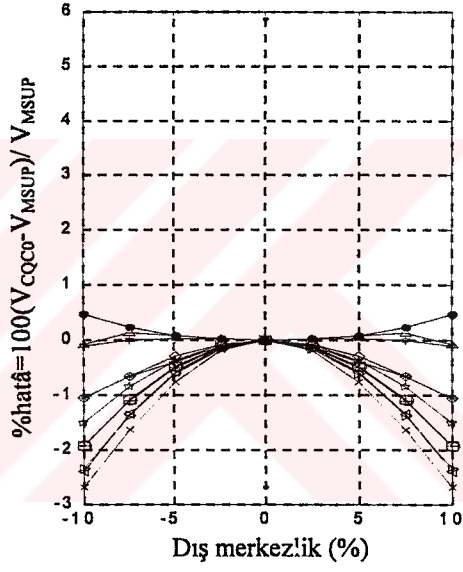
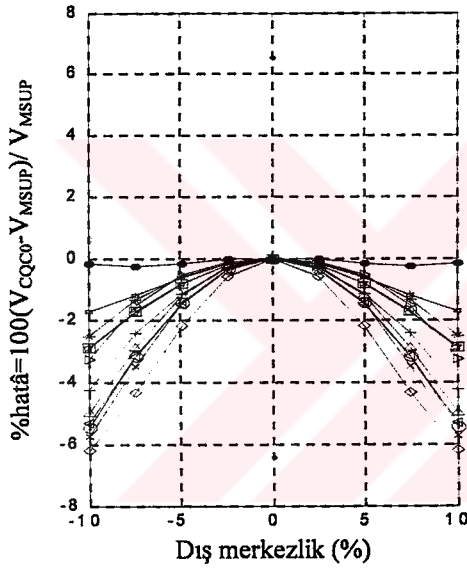
Şekil 4.3- Bina tipi 15 ve 21x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



Şekil 4.4- Bina tipi 22x ve 23x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği

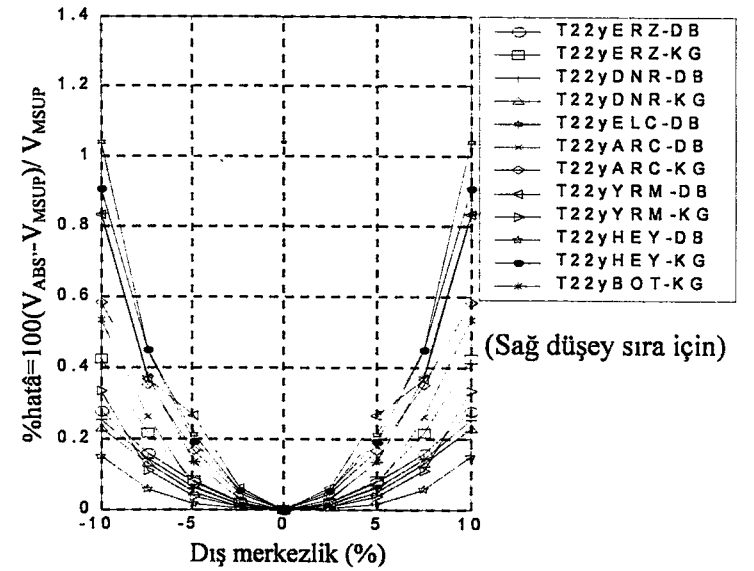
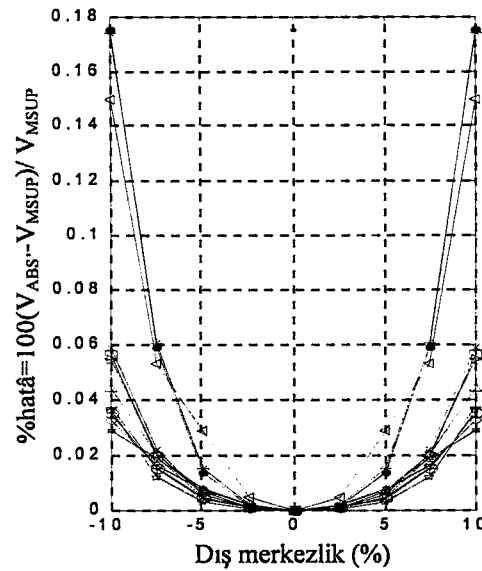
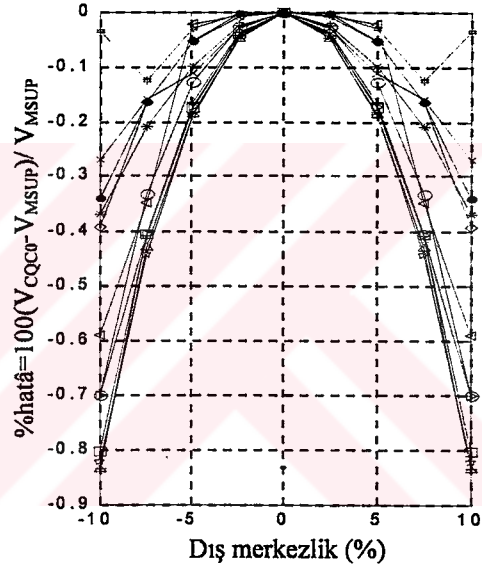
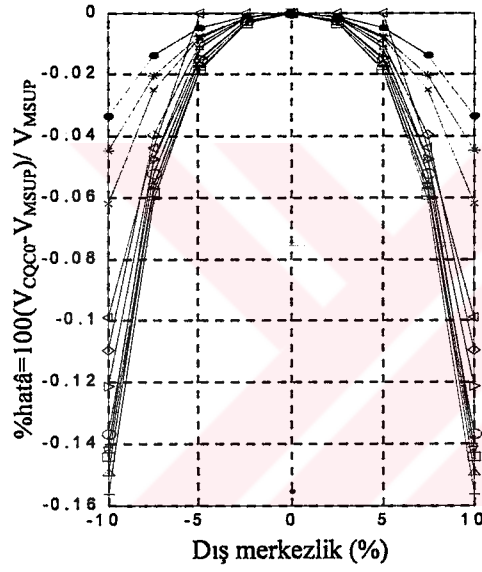
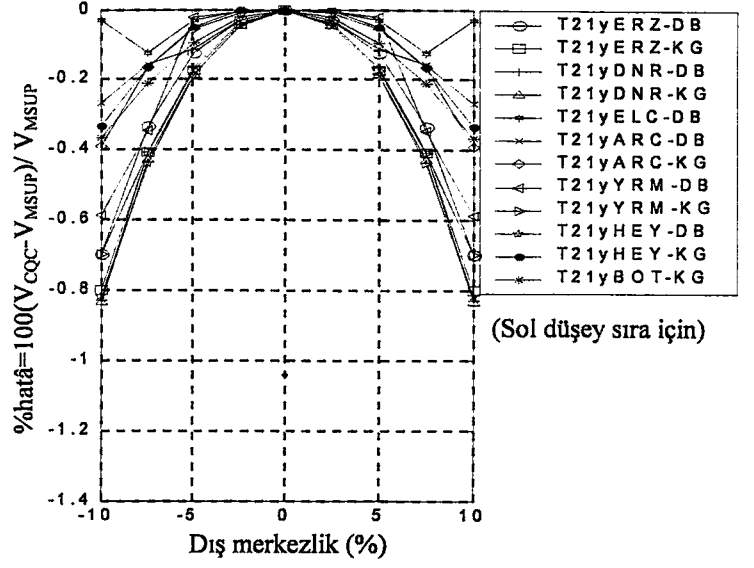
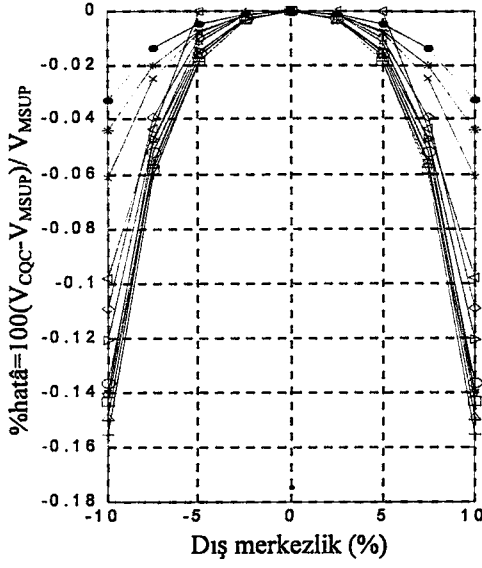


(Sol düşey sıra için)

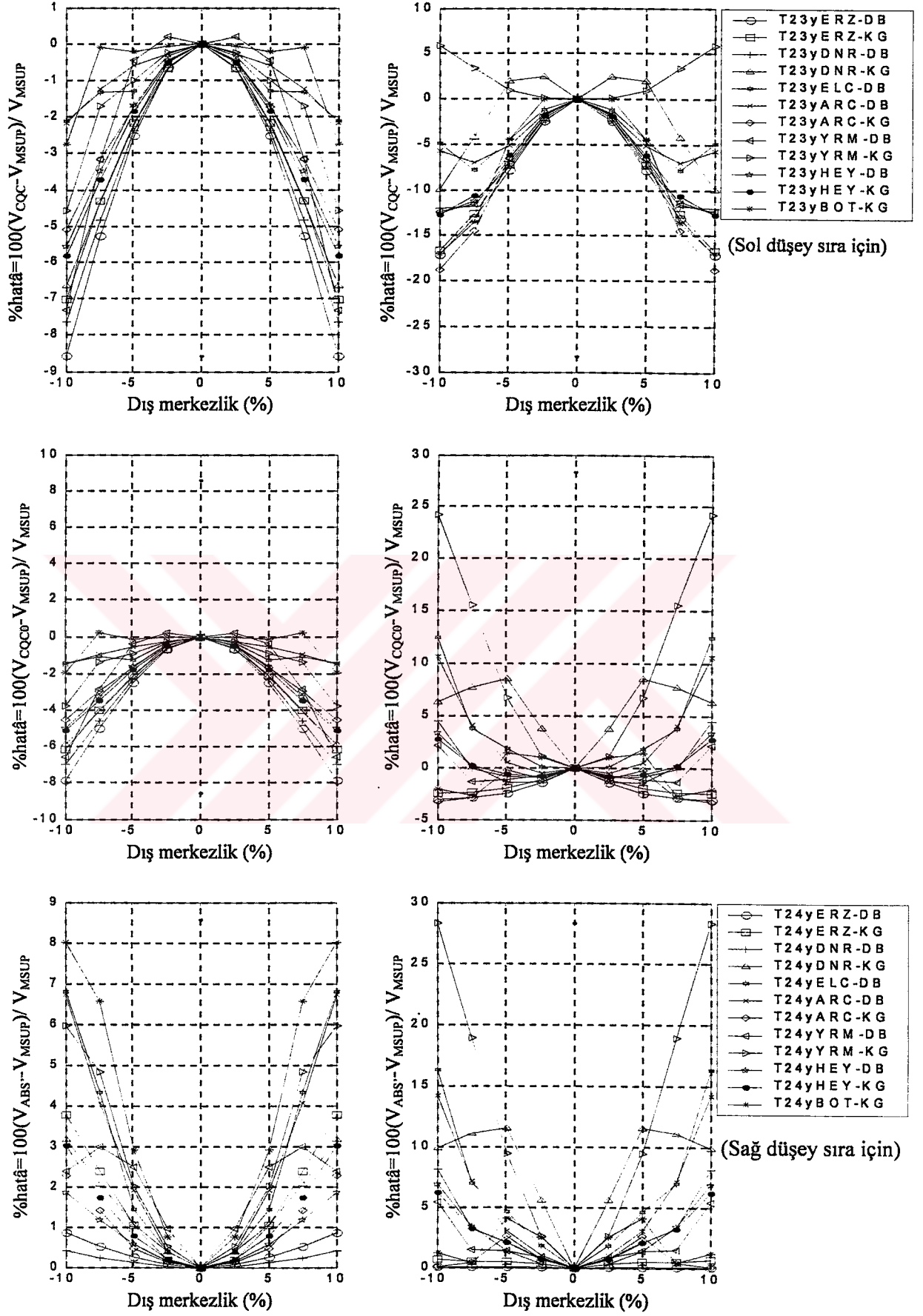


(Sağ düşey sıra için)

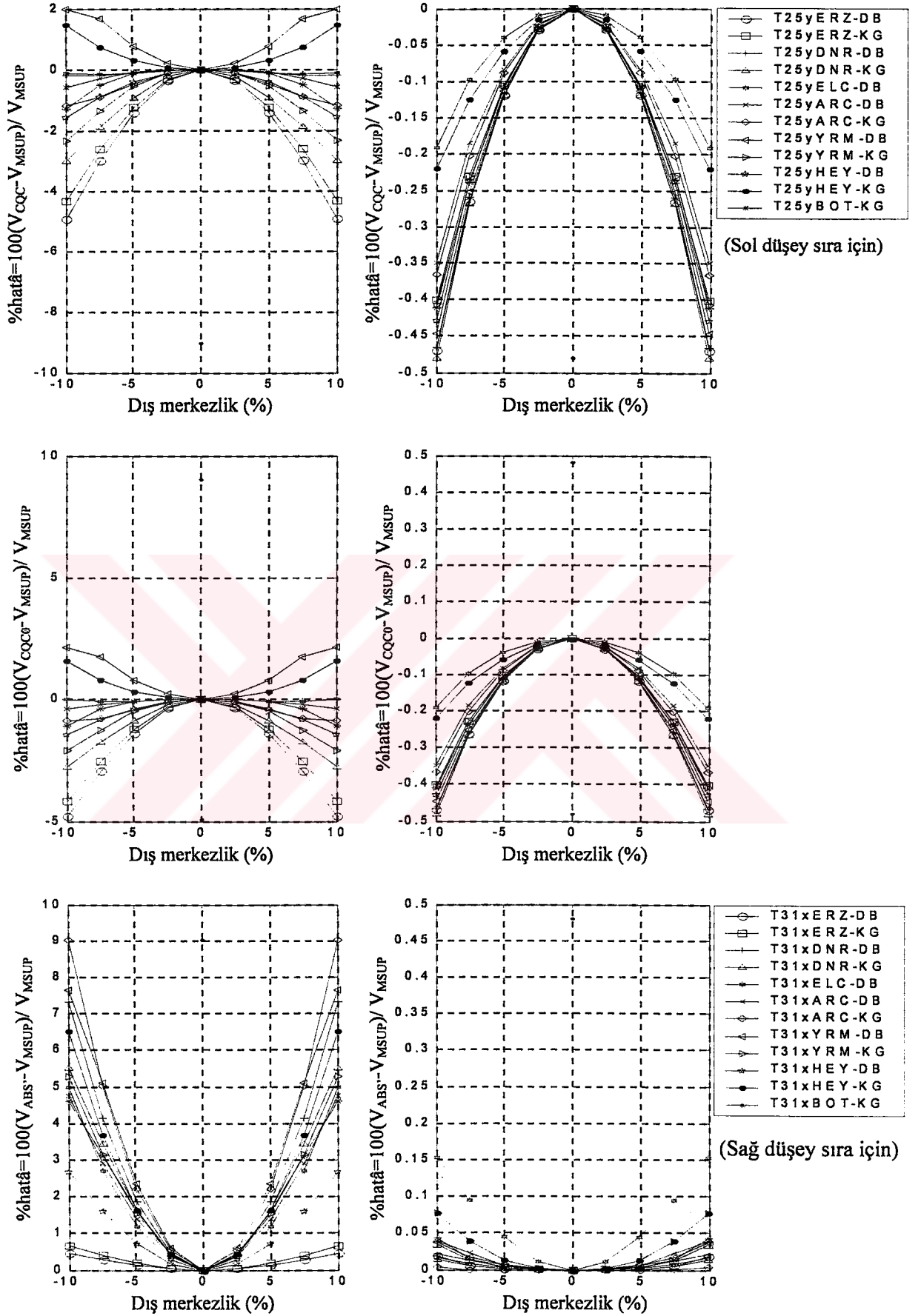
Şekil 4.5- Bina tipi 24x ve 25x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



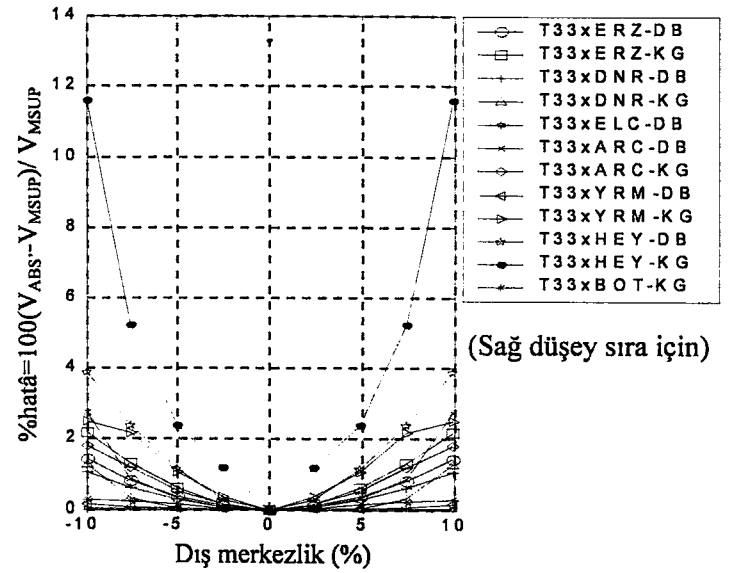
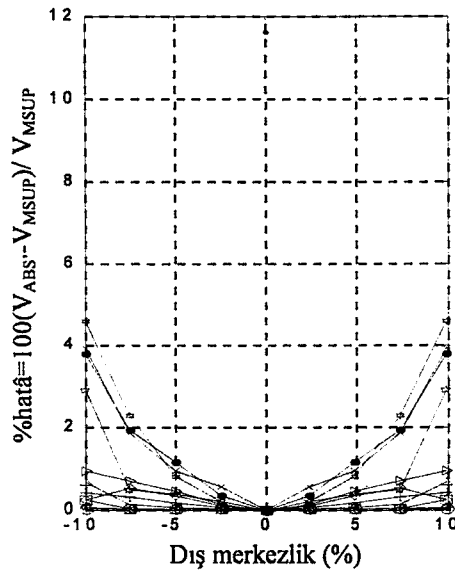
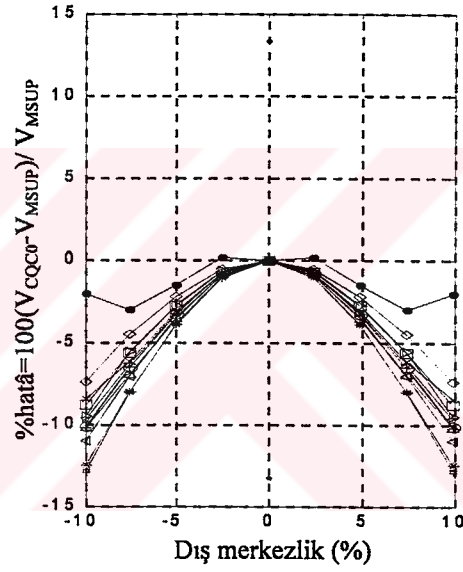
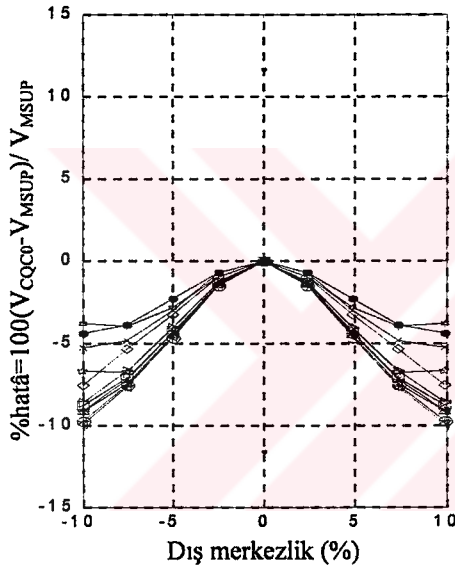
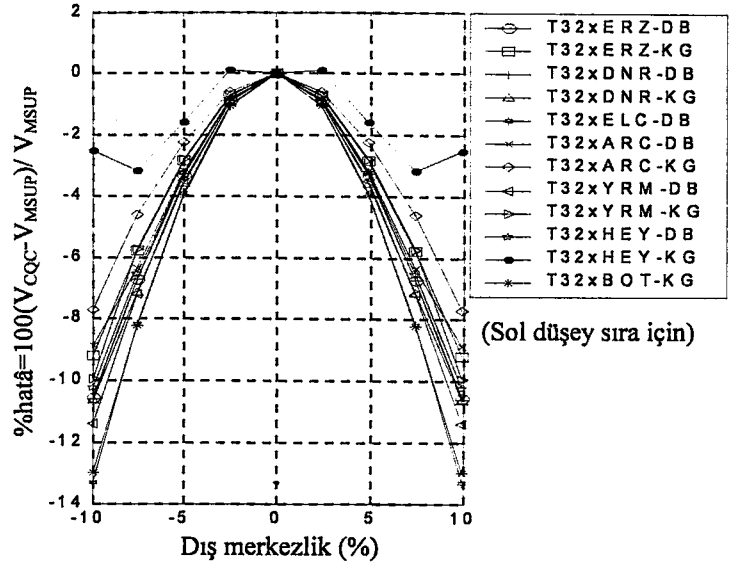
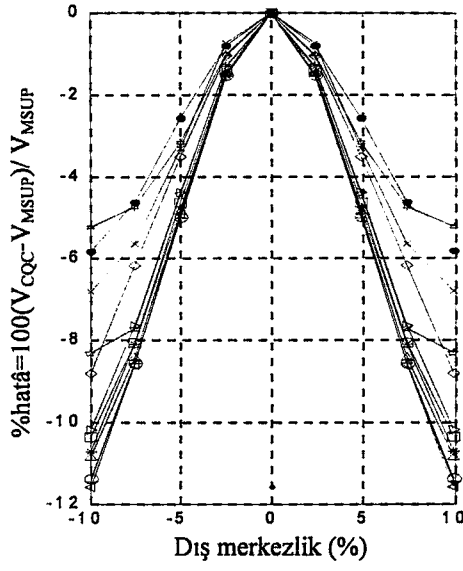
Şekil 4.6- Bina tipi 21y ve 22y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



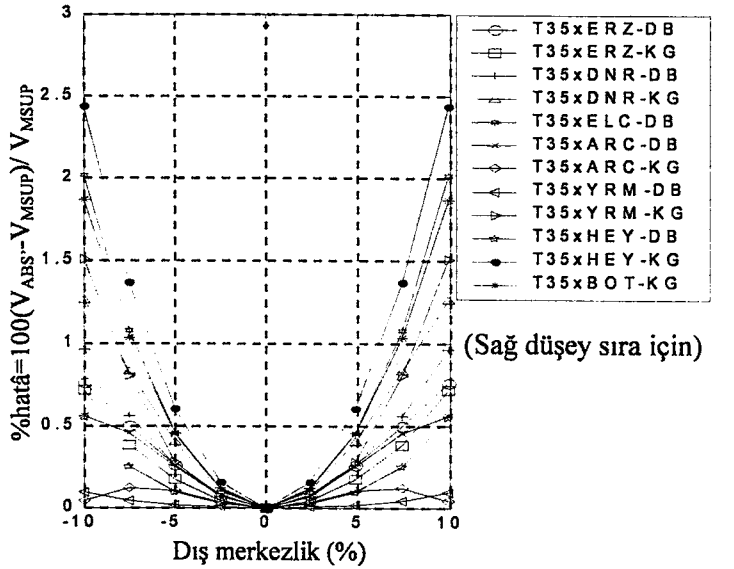
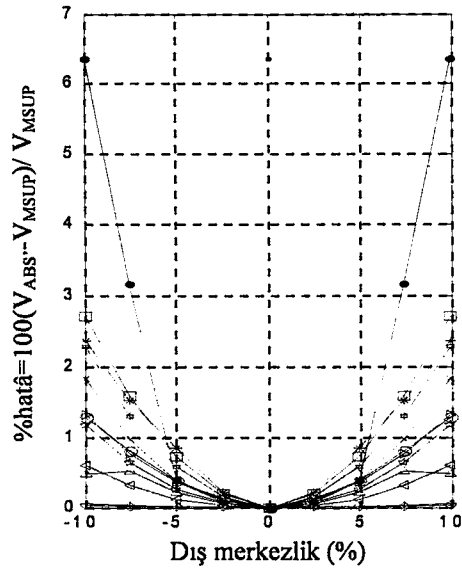
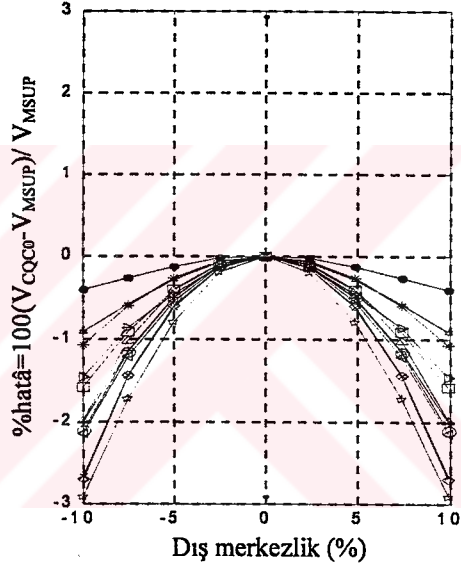
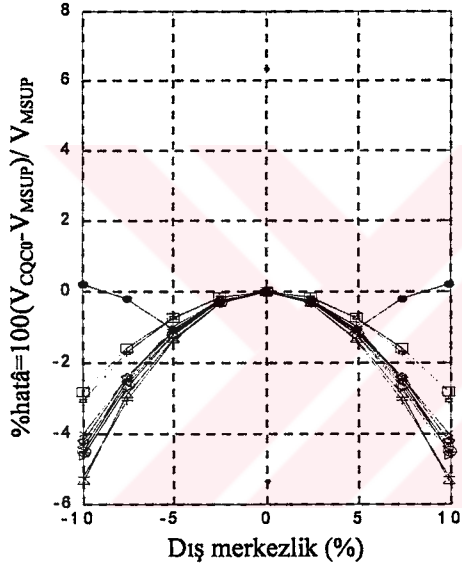
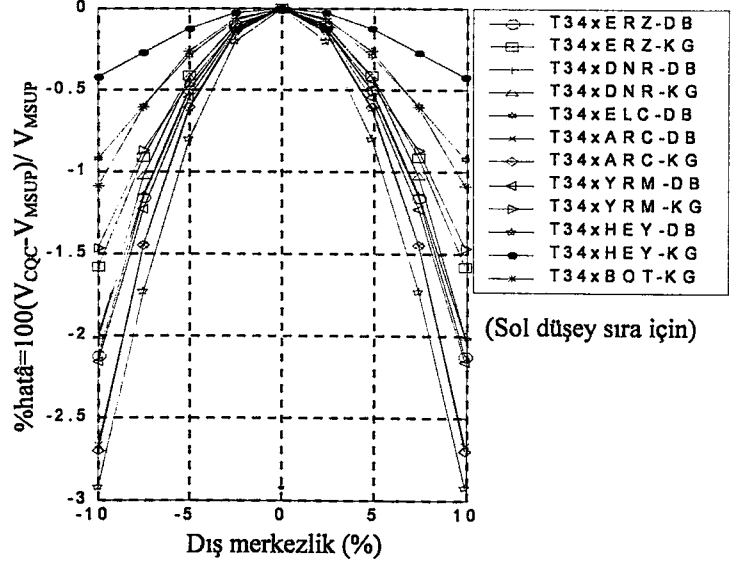
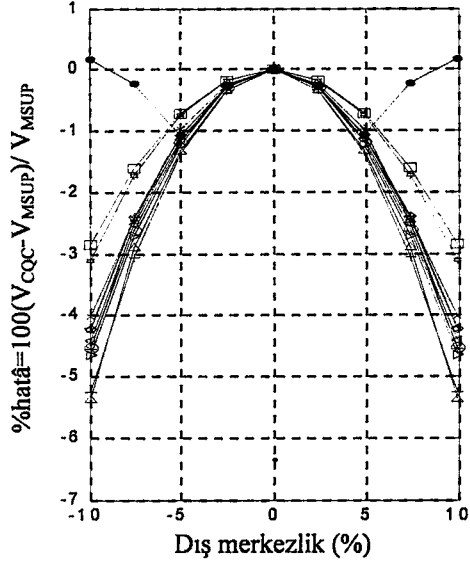
Şekil 4.7- Bina tipi 23y ve 24y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



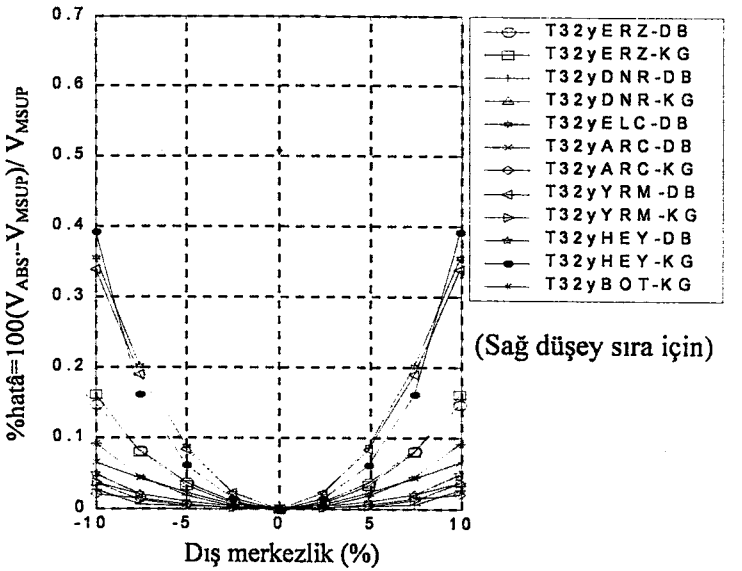
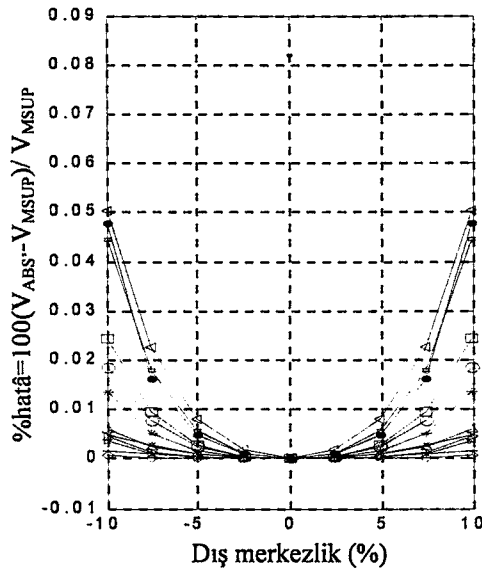
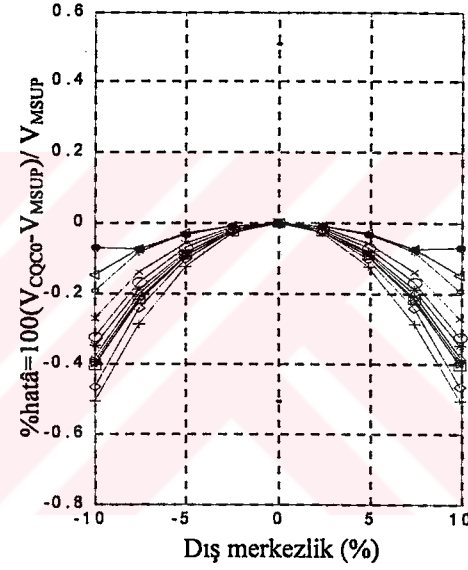
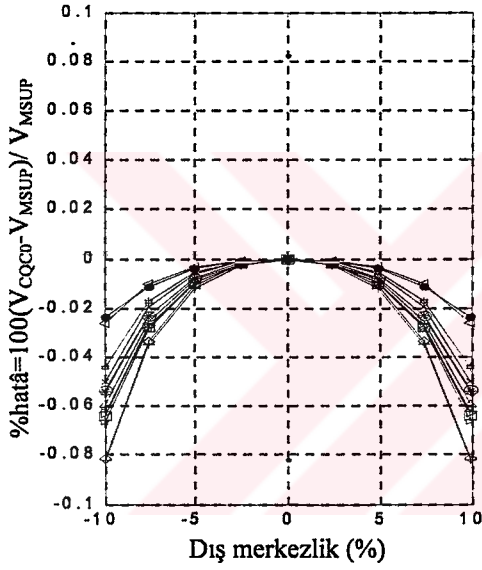
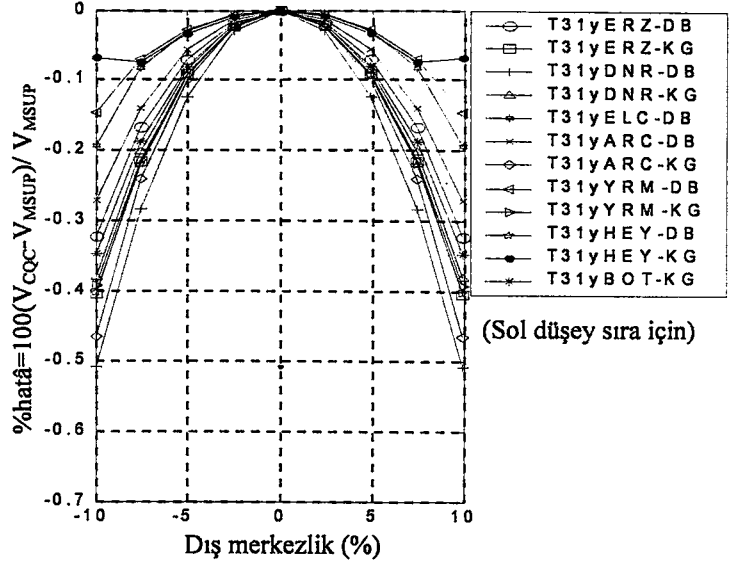
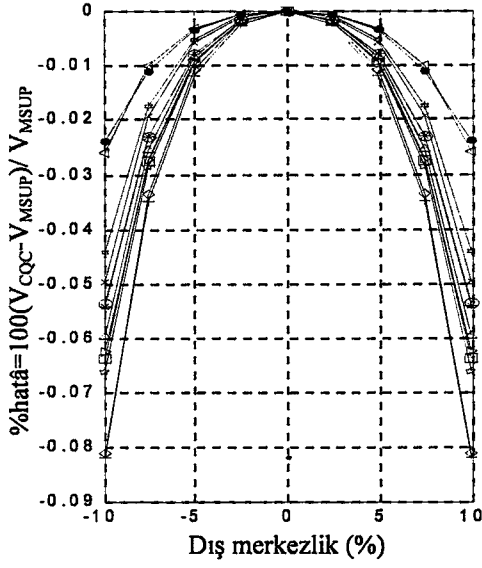
Şekil 4.8- Bina tipi 25y ve 31x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



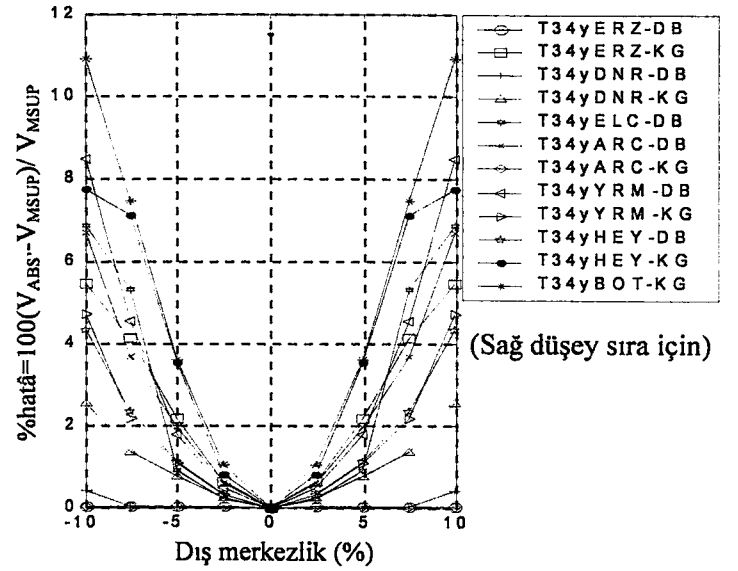
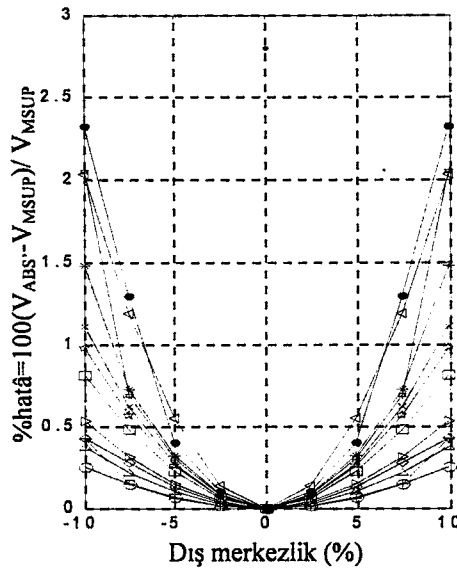
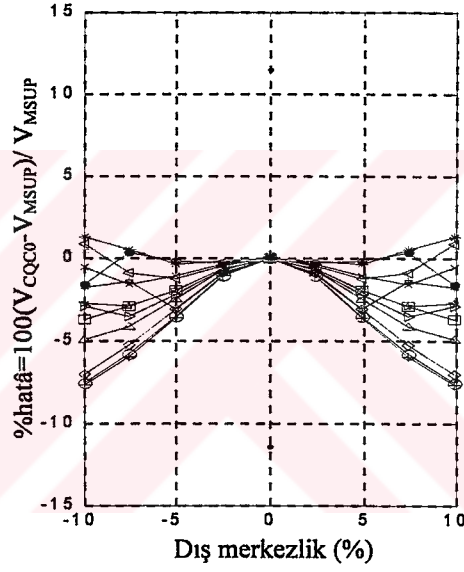
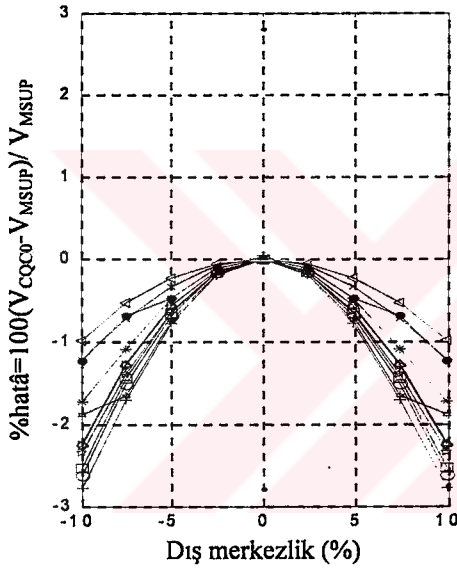
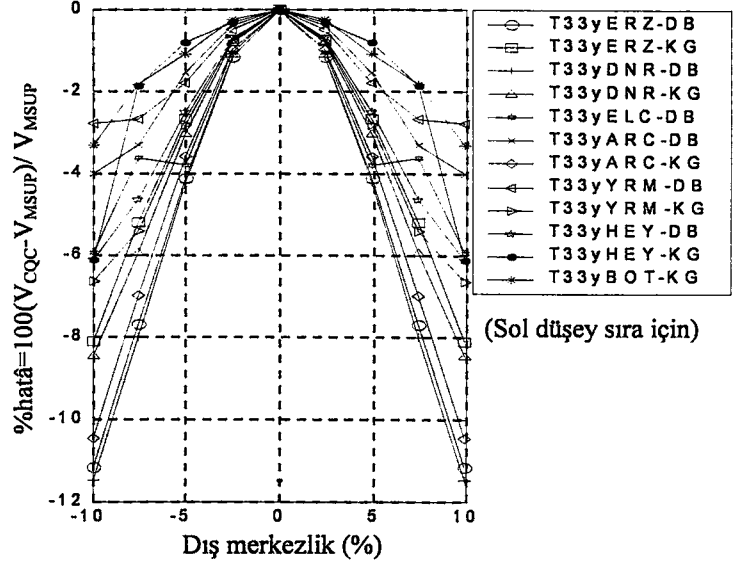
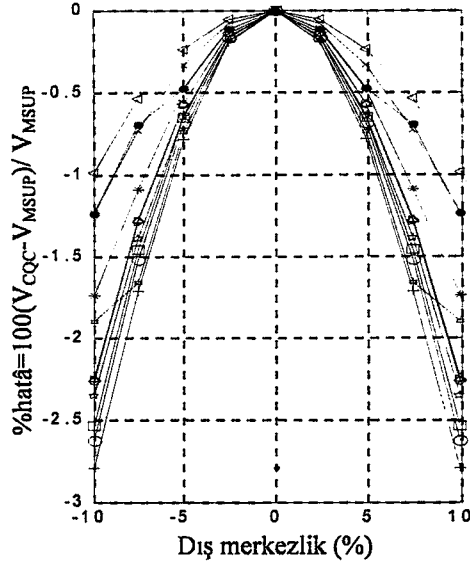
Şekil 4.9- Bina tipi 32x ve 33x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



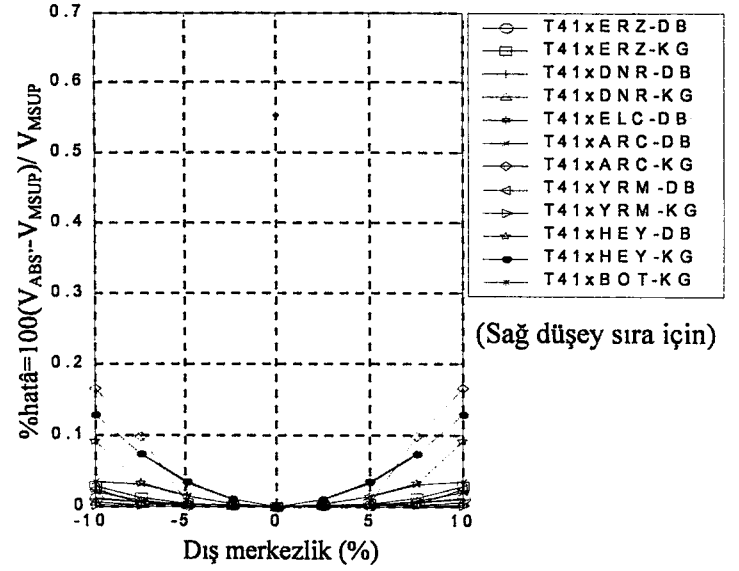
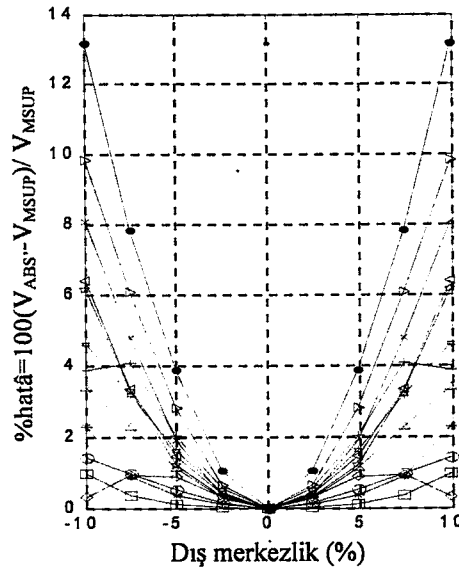
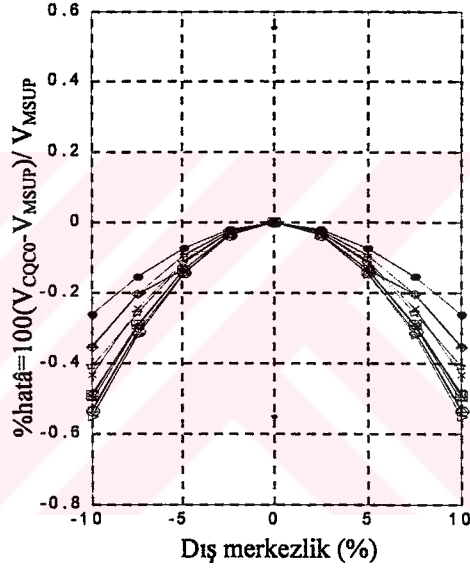
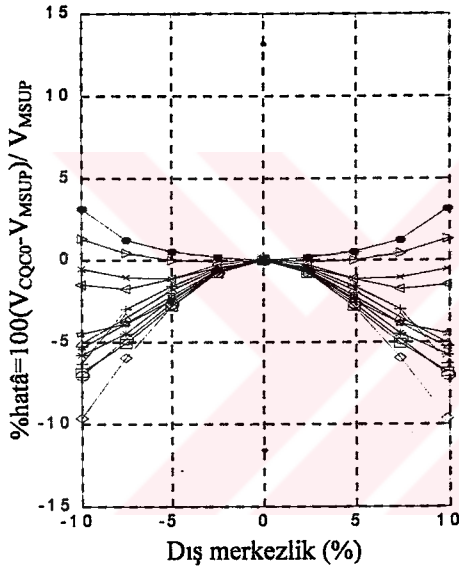
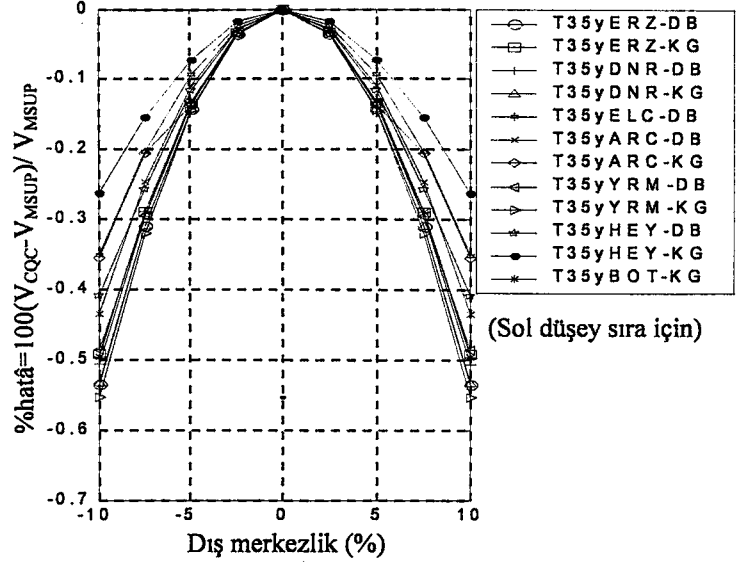
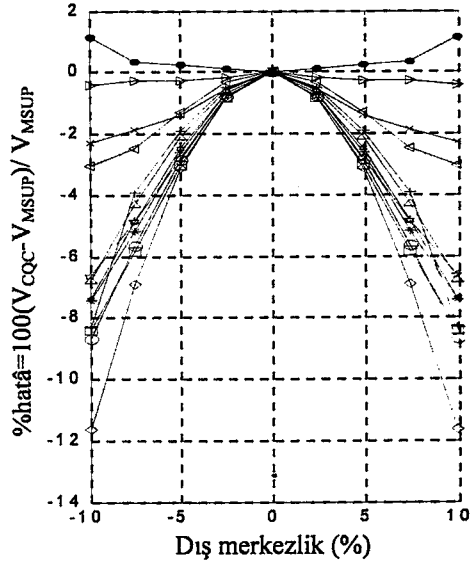
Şekil 4.10- Bina tipi 34x ve 35x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



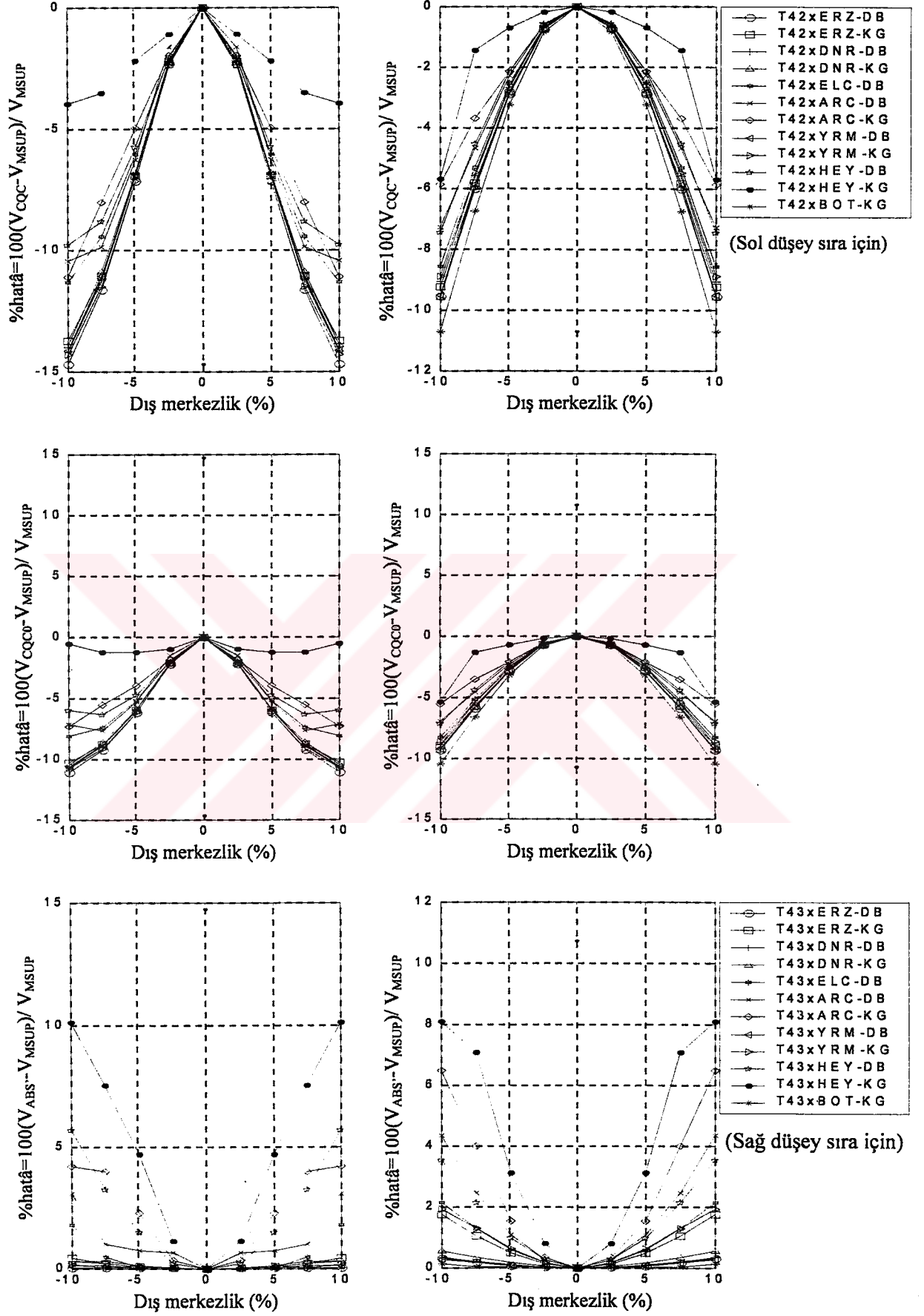
Şekil 4.11- Bina tipi 31y ve 32y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği

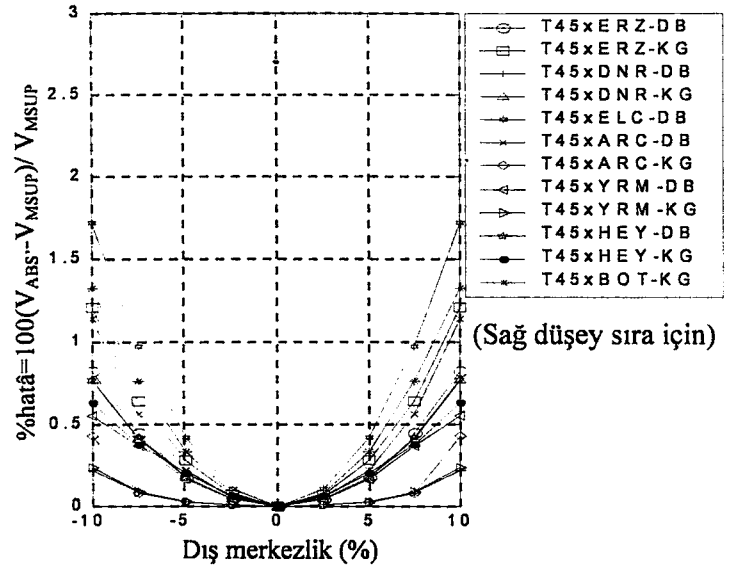
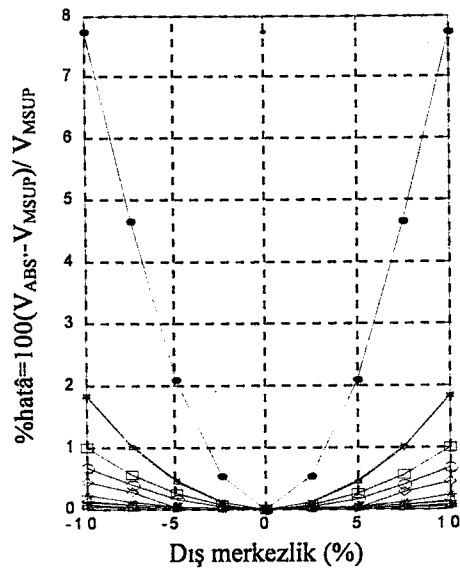
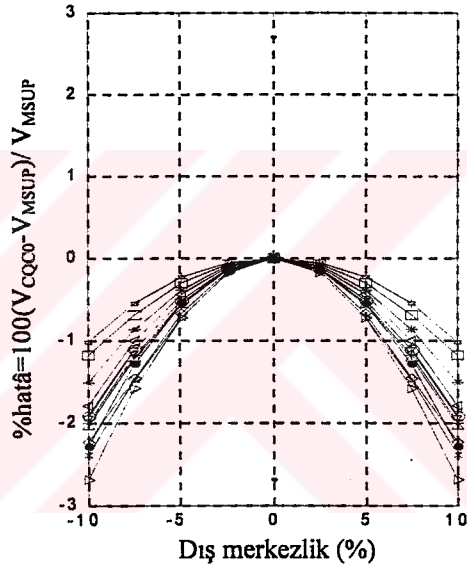
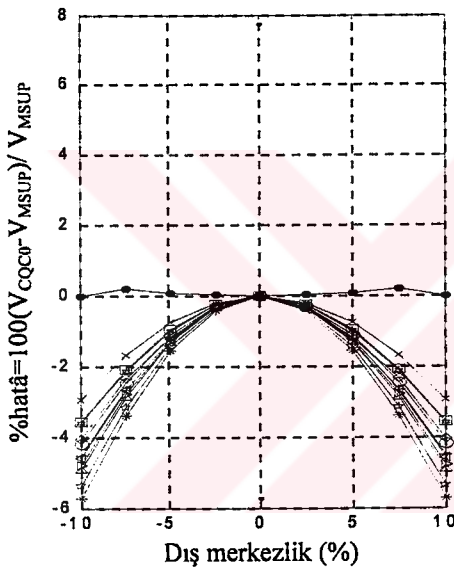
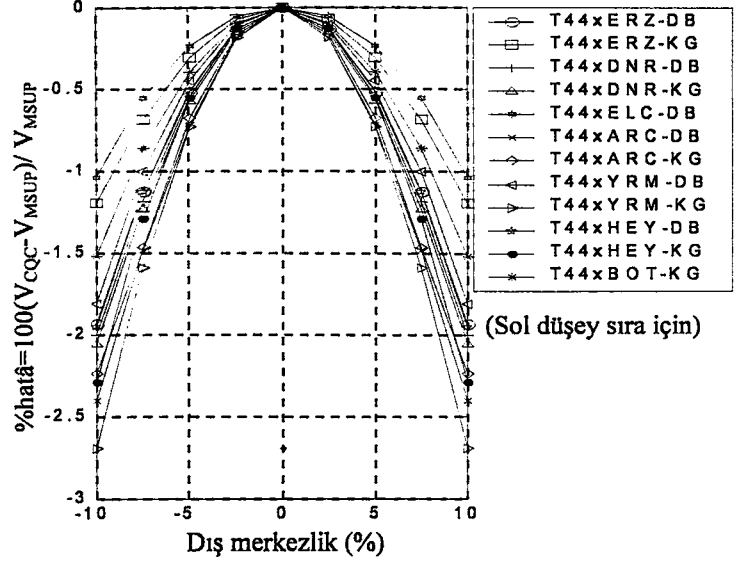
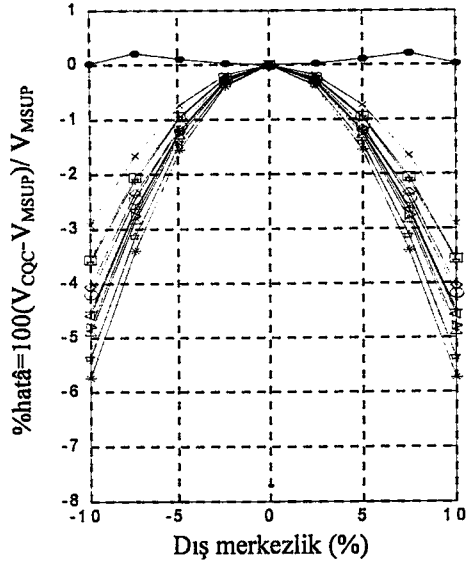


Şekil 4.12- Bina tipi 33y ve 34y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği

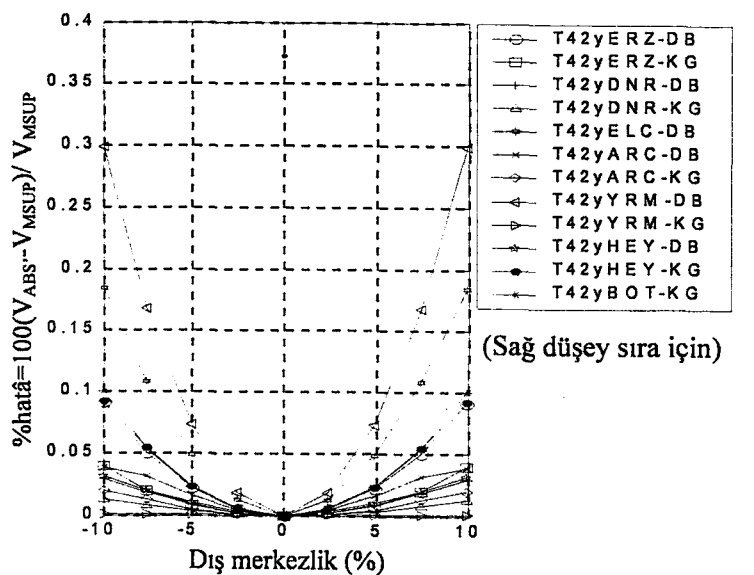
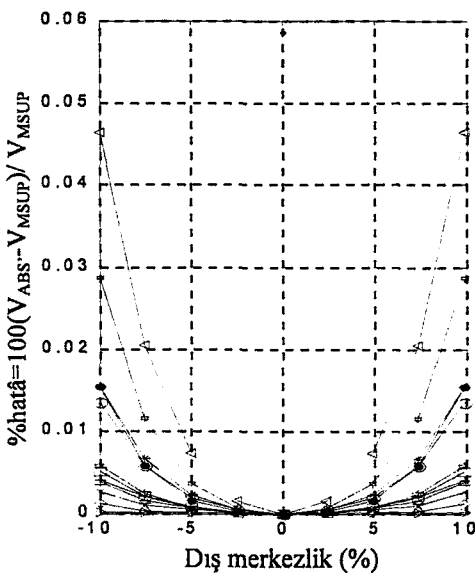
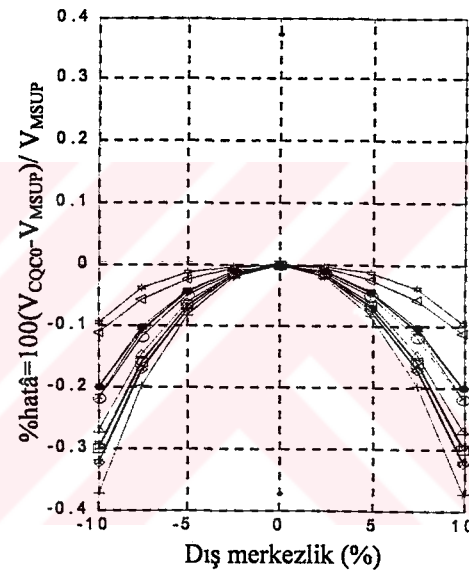
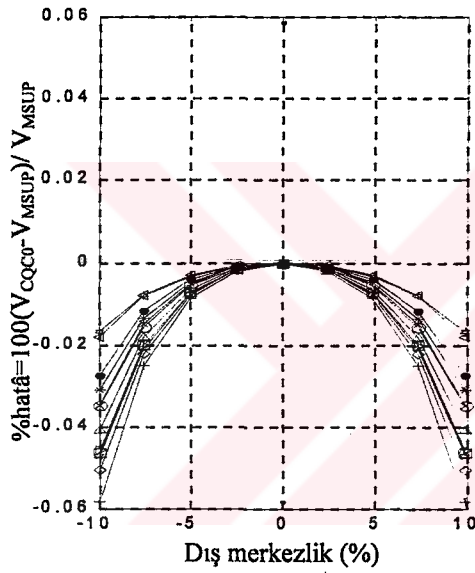
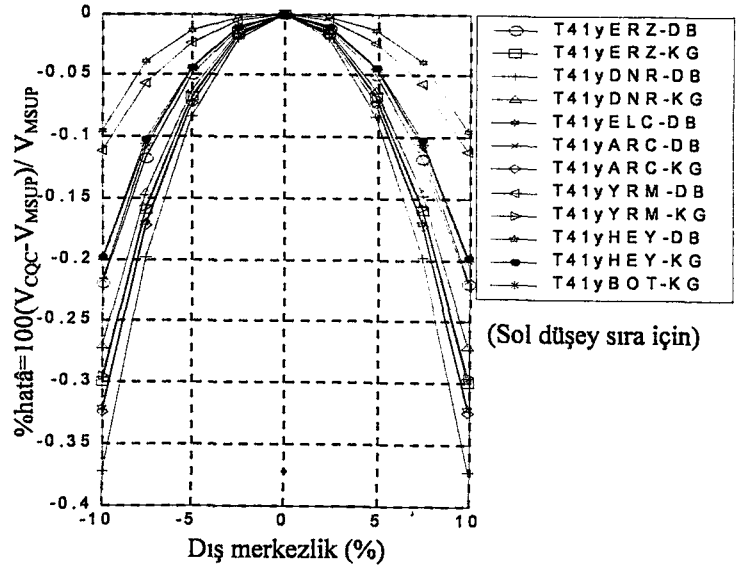
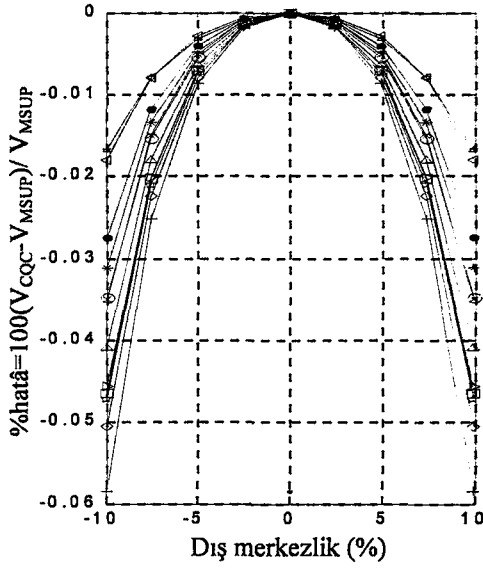


Şekil 4.13- Bina tipi 35y ve 41x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği

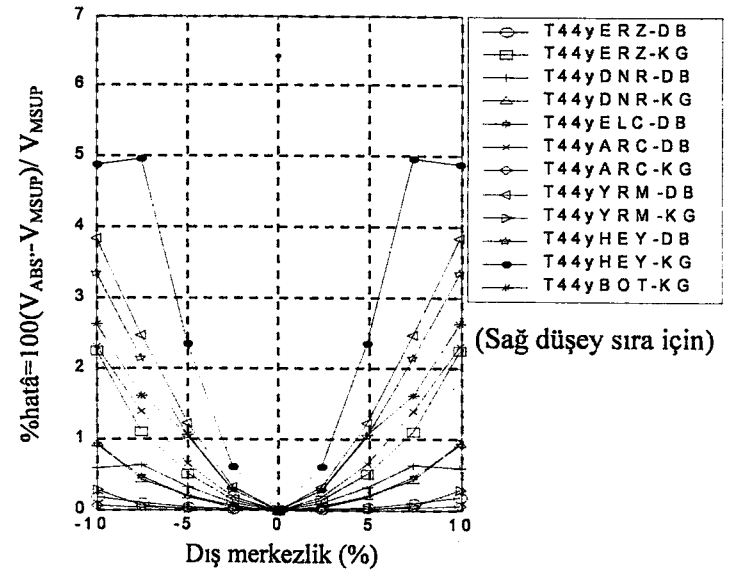
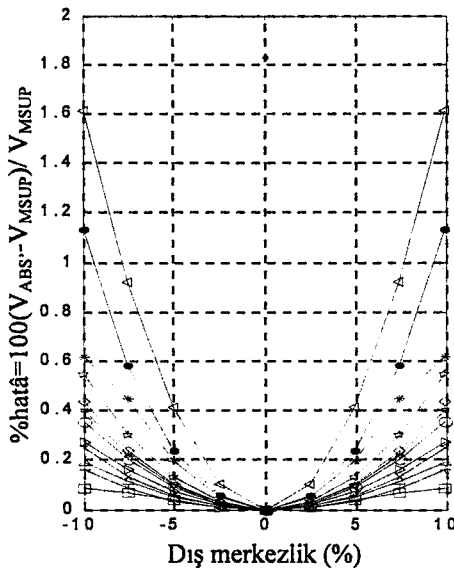
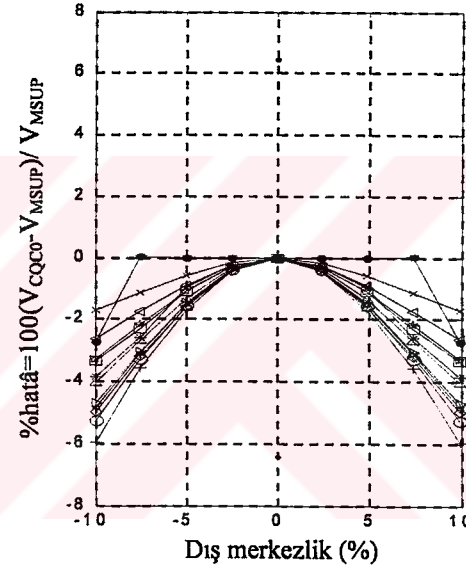
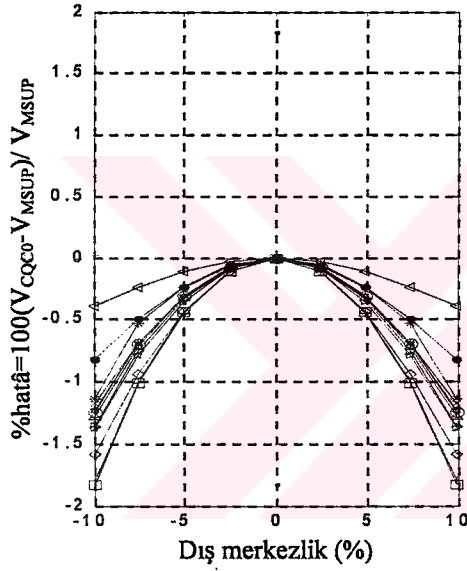
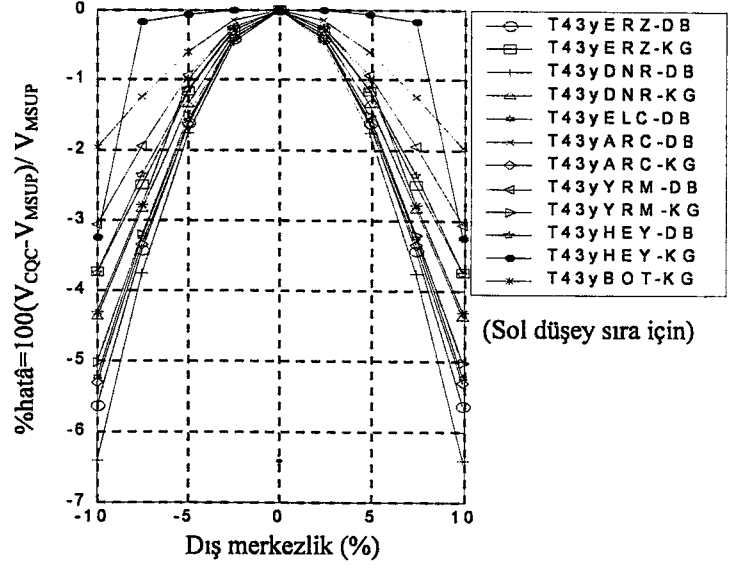
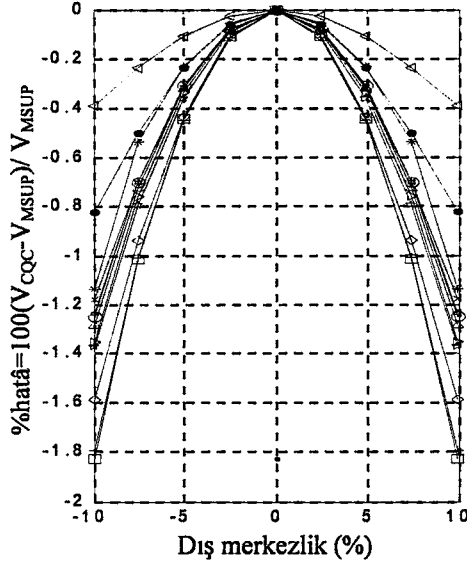




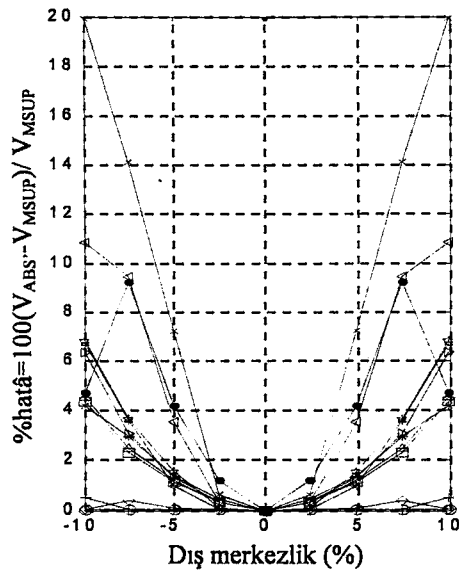
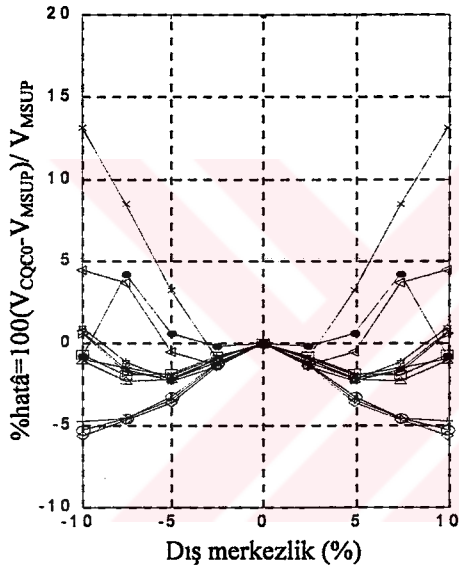
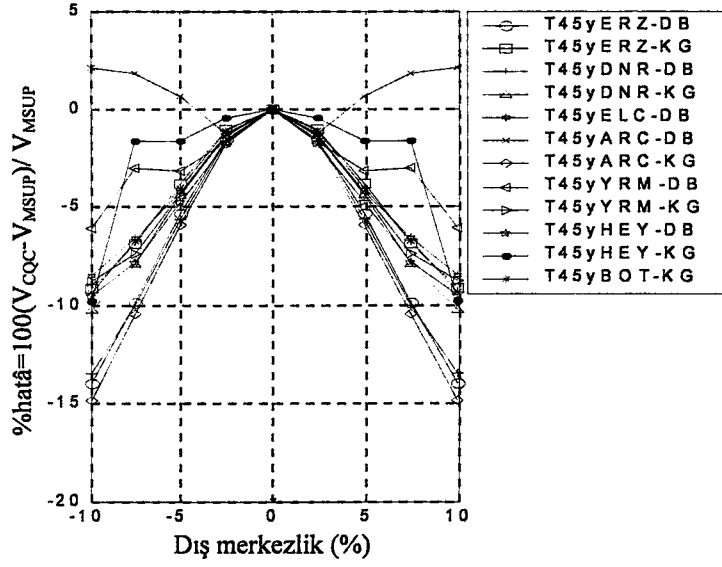
Şekil 4.15- Bina tipi 44x ve 45x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



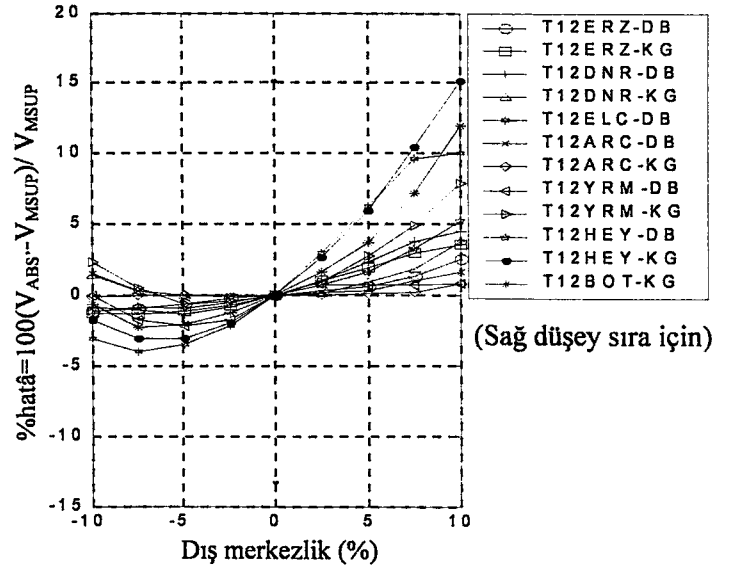
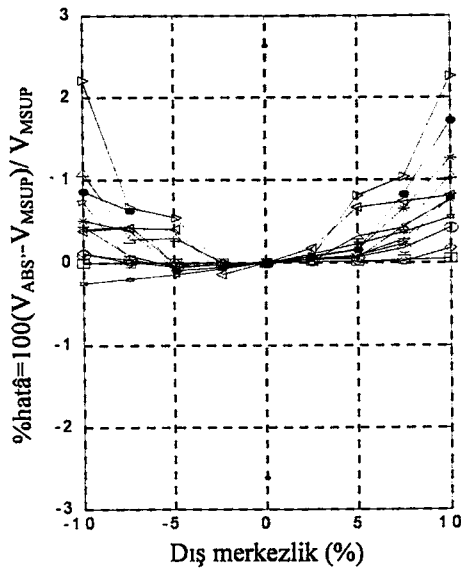
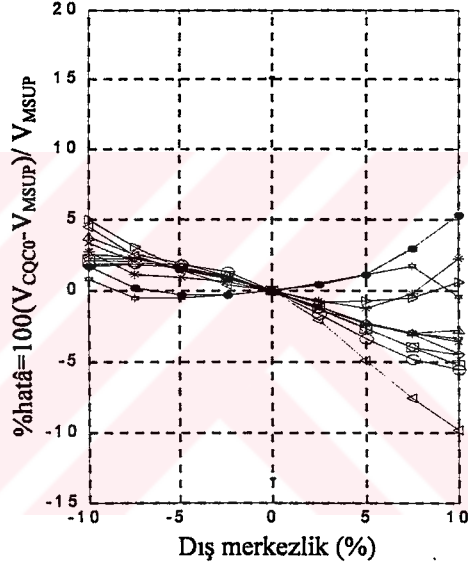
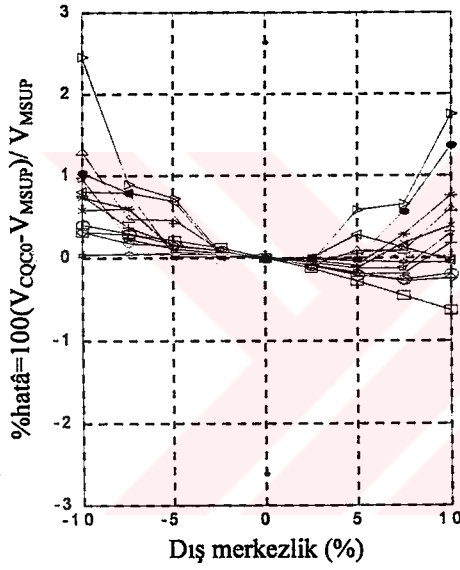
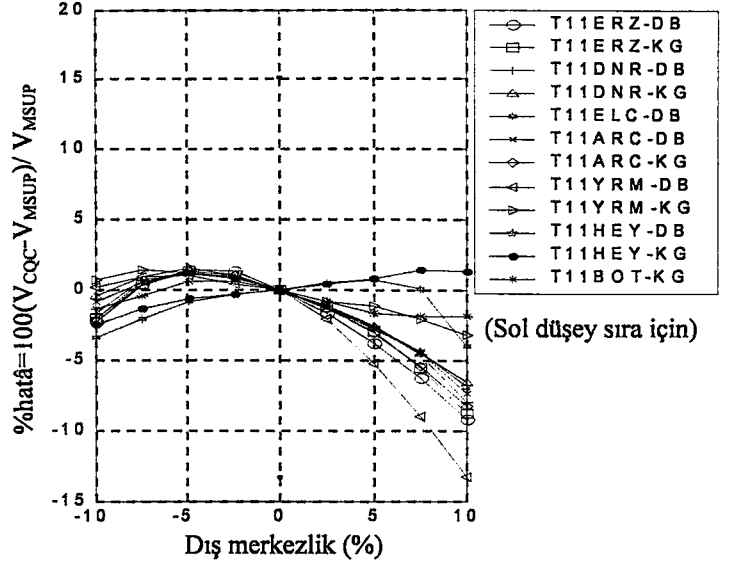
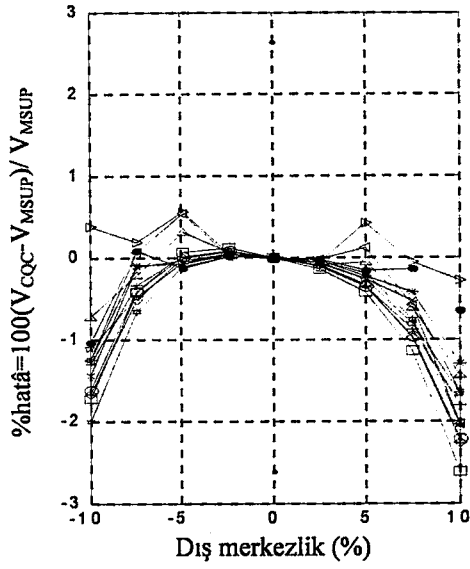
Şekil 4.16- Bina tipi 41y ve 42y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



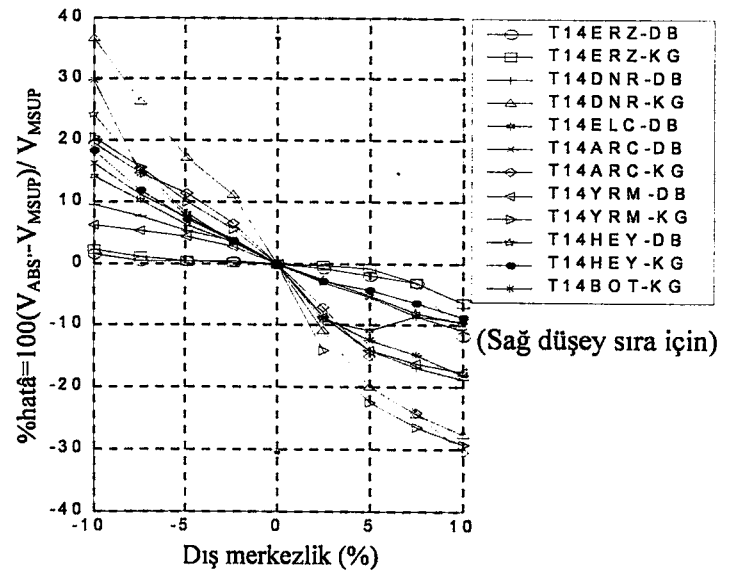
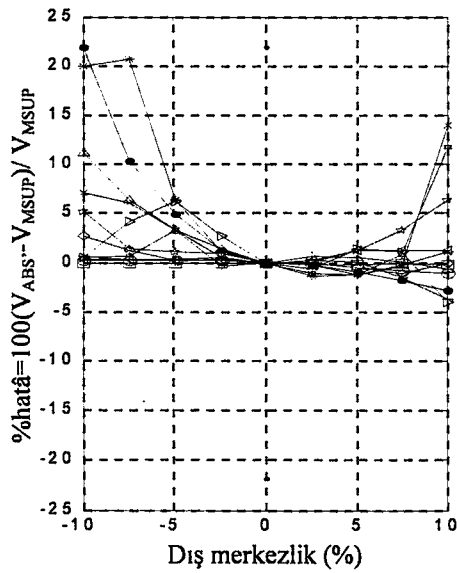
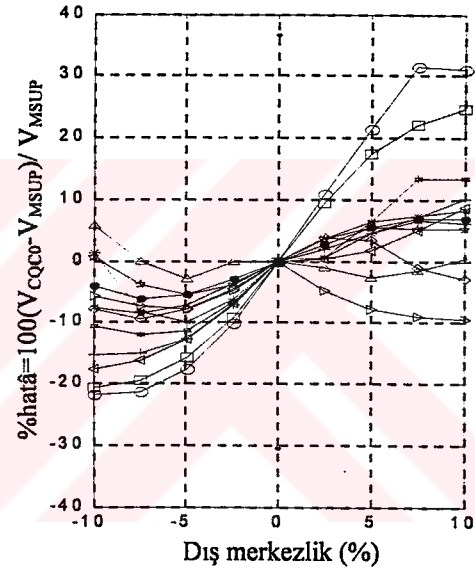
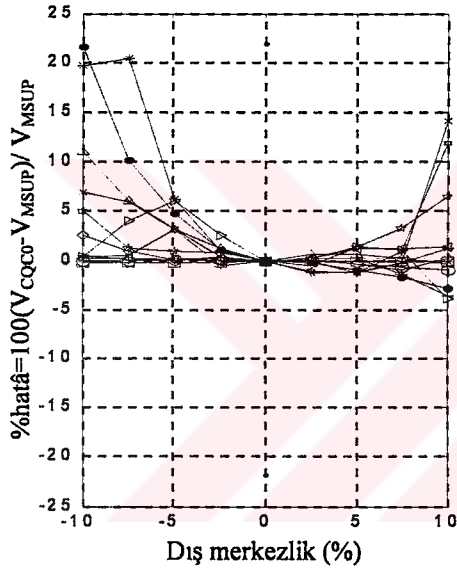
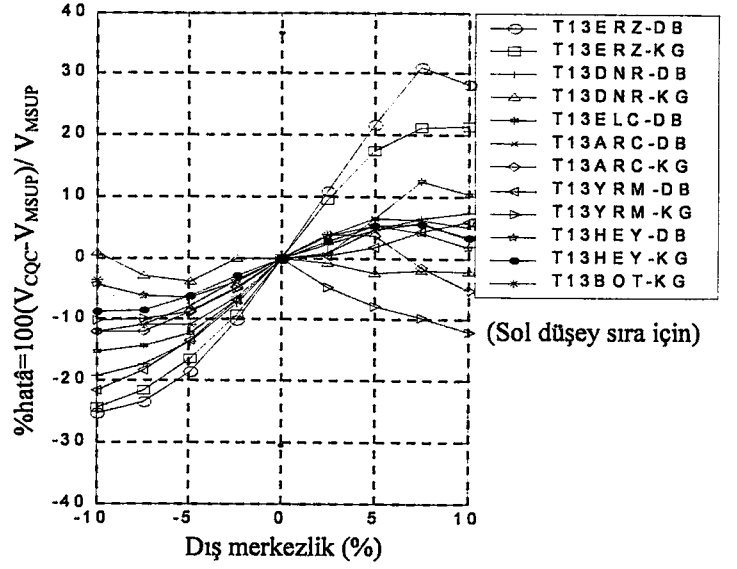
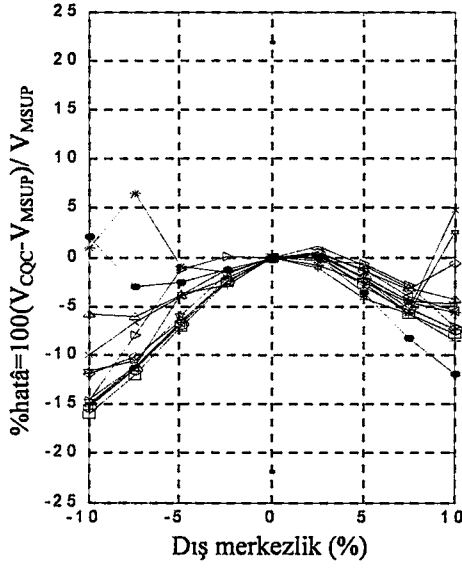
Şekil 4.17- Bina tipi 43y ve 44y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



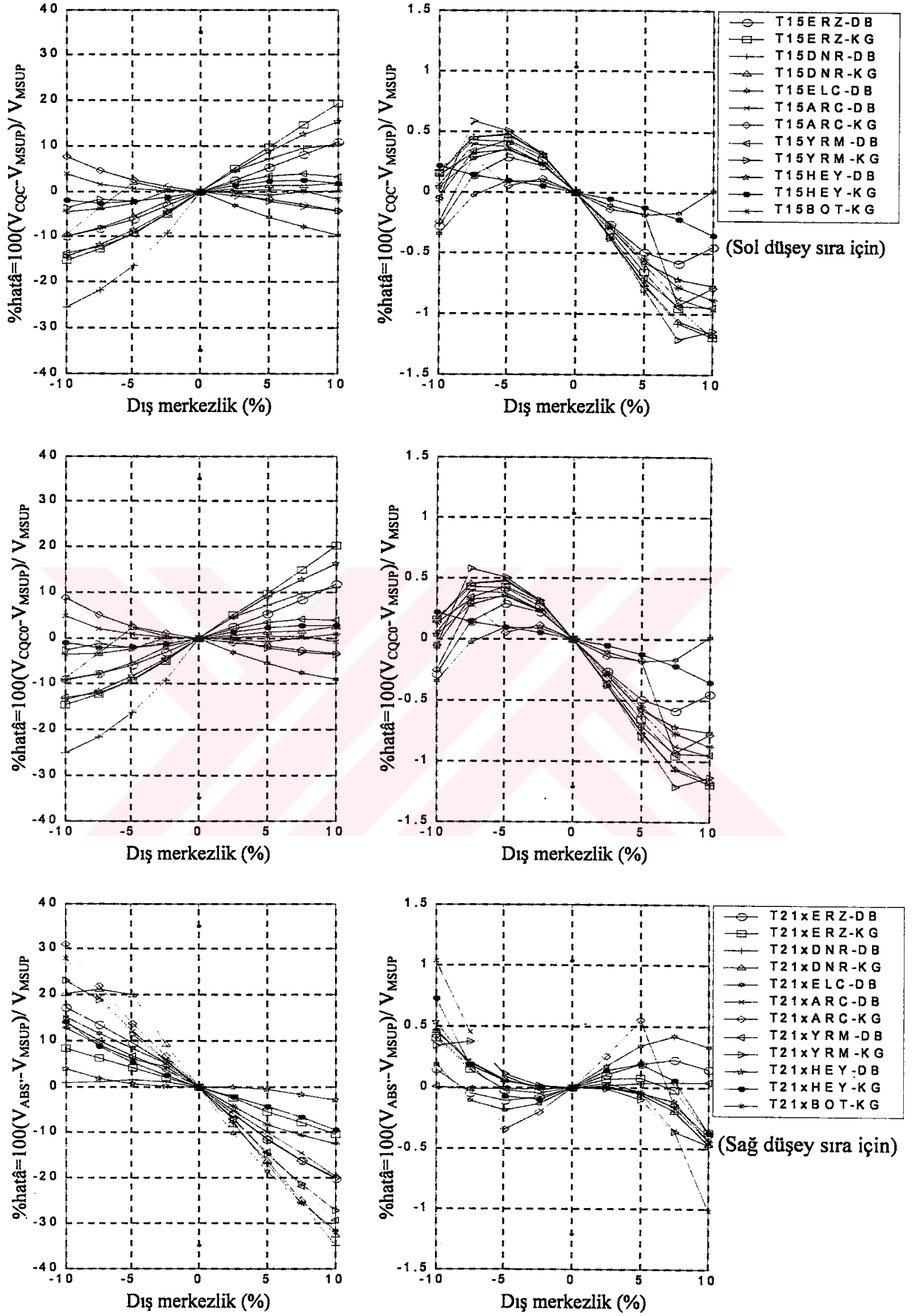
Şekil 4.18- Bina tipi 45y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x hatâ grafiği



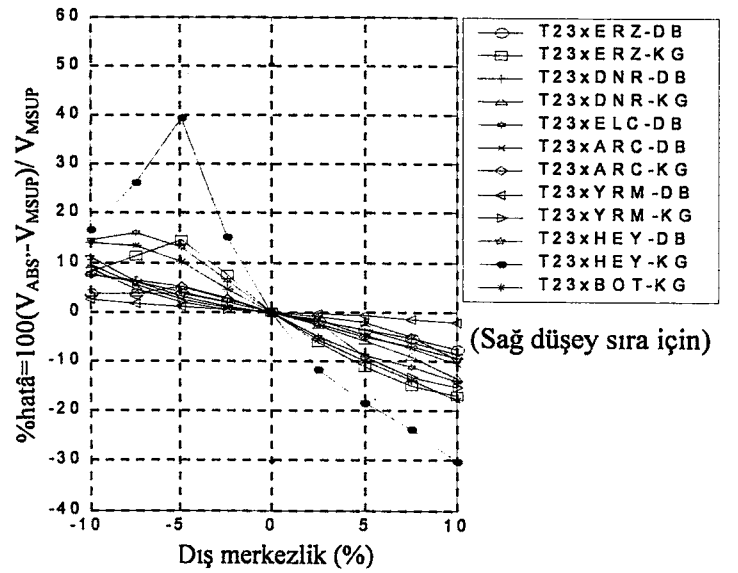
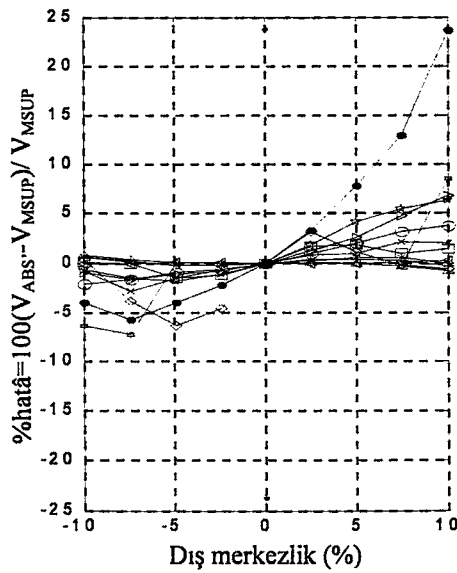
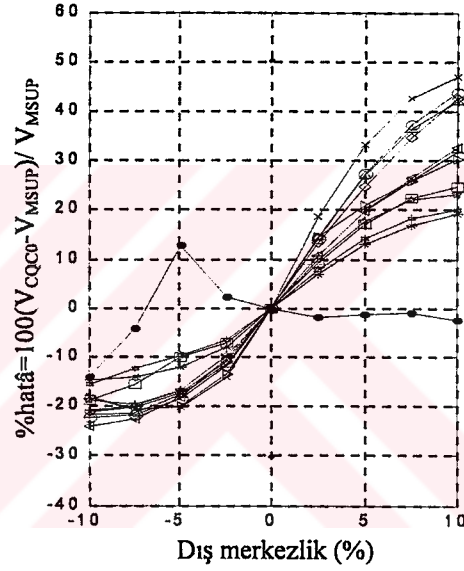
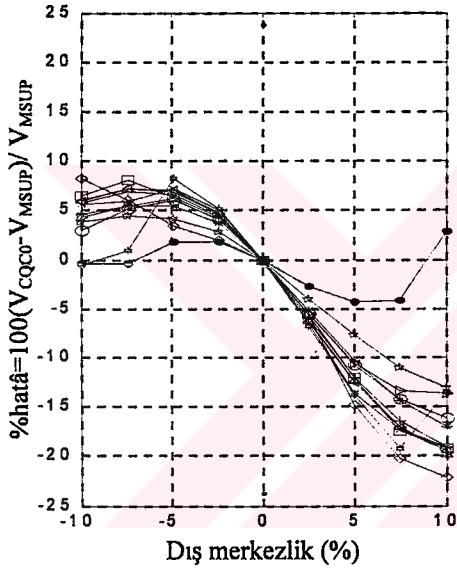
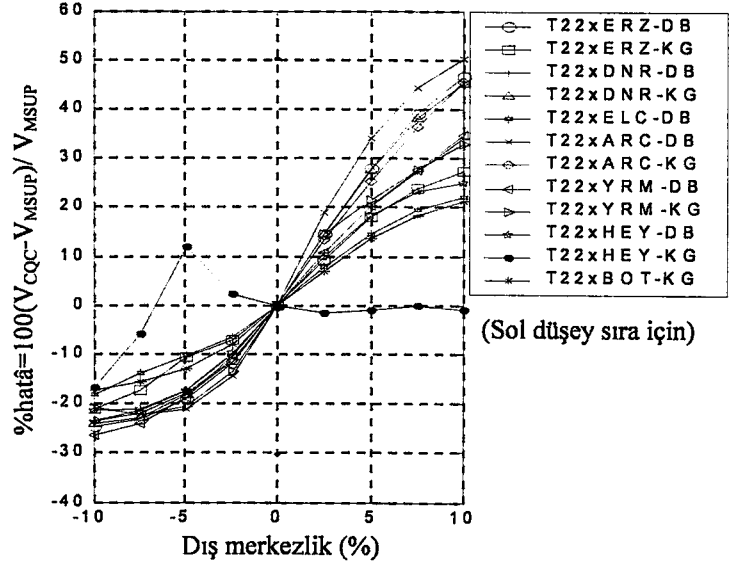
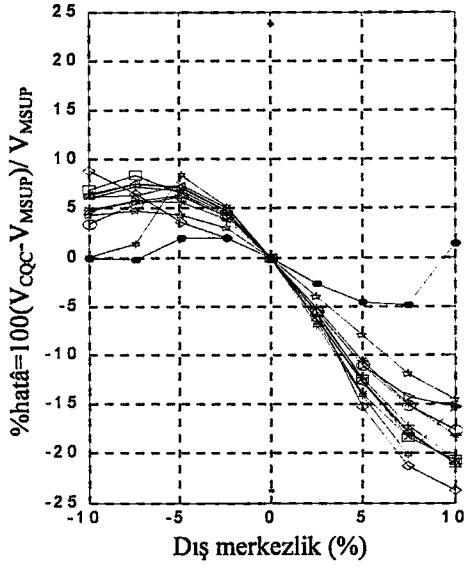
Şekil 4.19- Bina tipi 11 ve 12, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



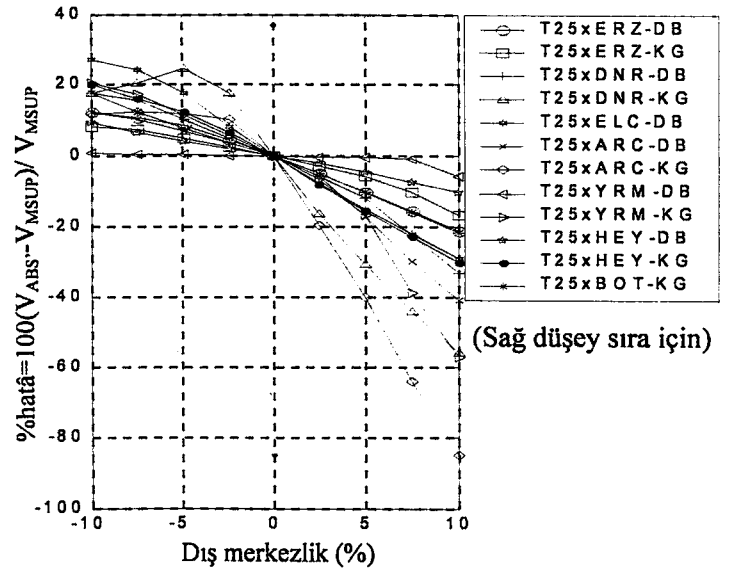
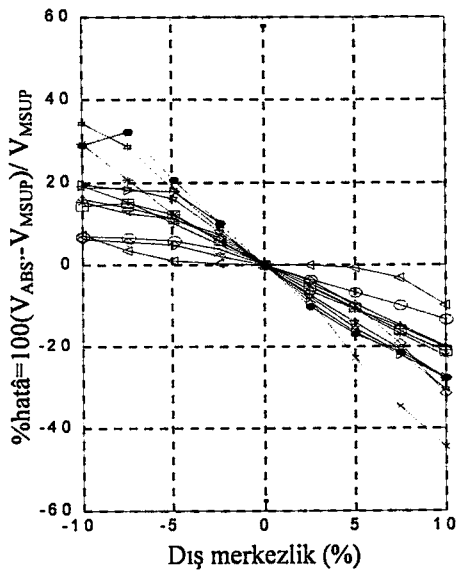
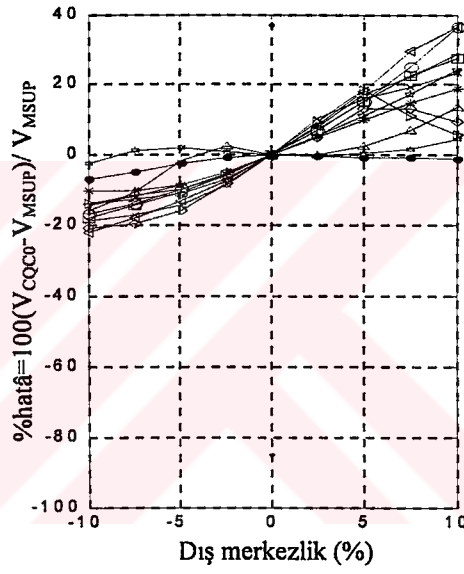
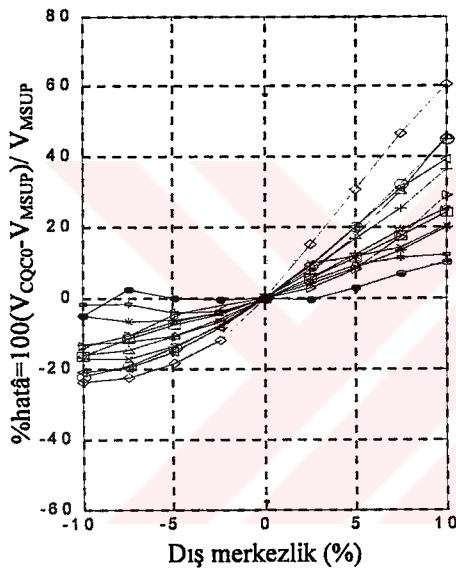
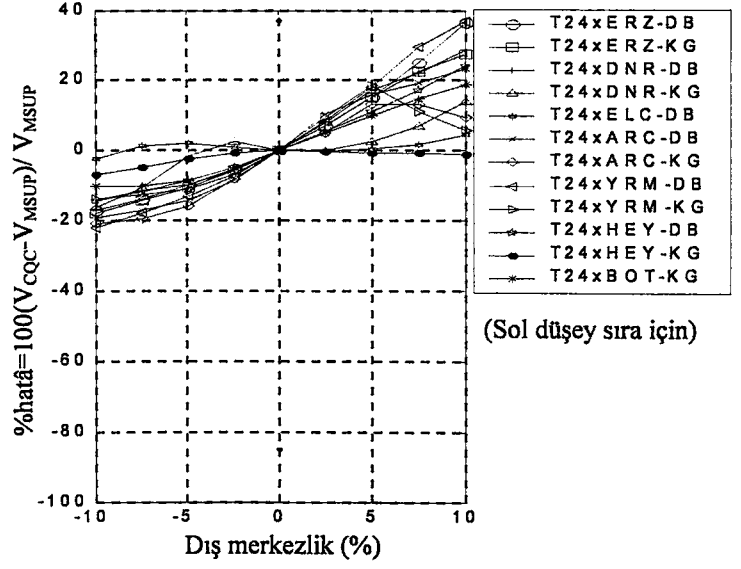
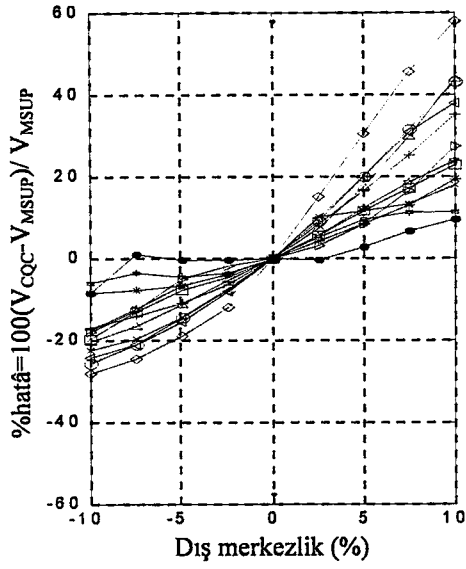
Şekil 4.20- Bina tipi 13 ve 14, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



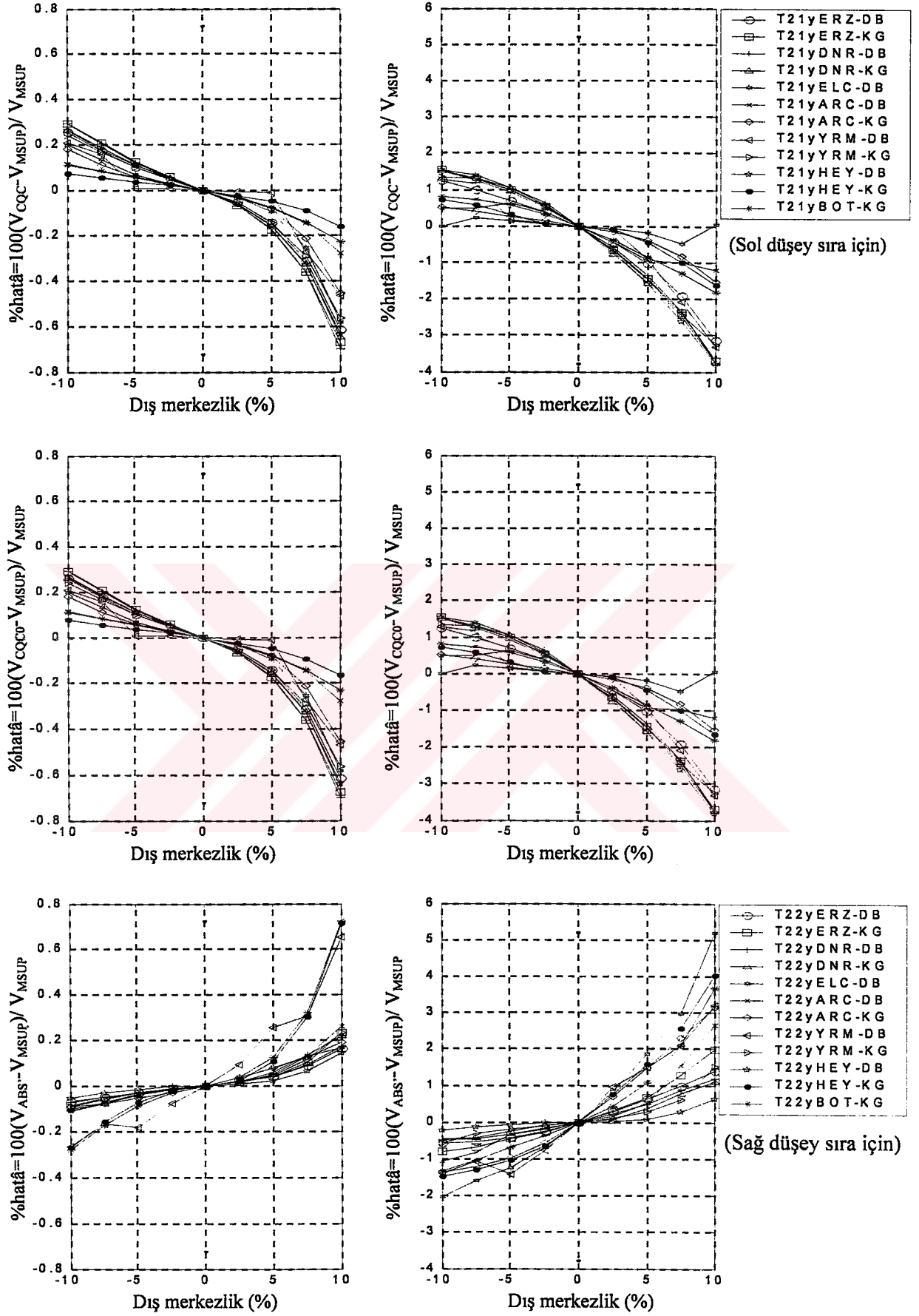
Şekil 4.21- Bina tipi 15 ve 21x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



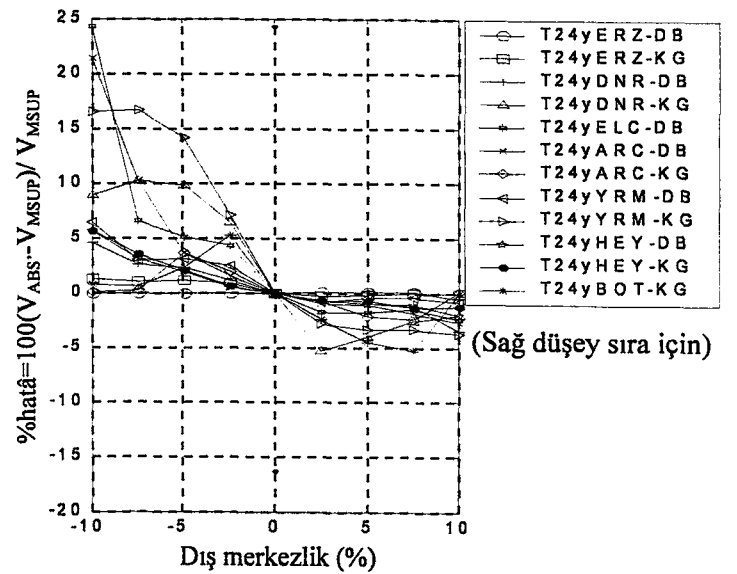
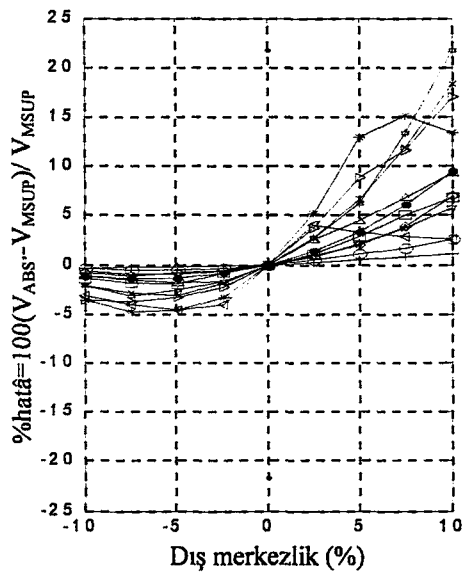
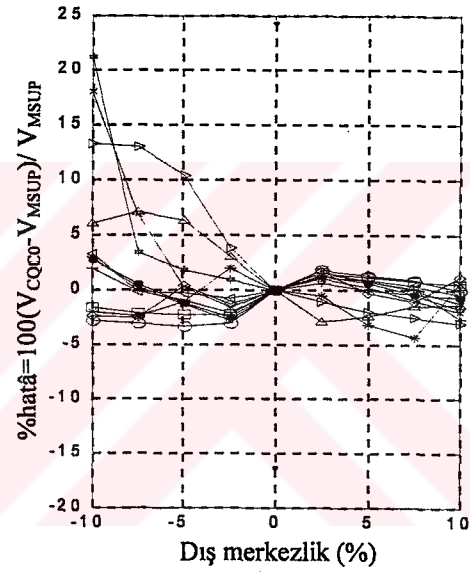
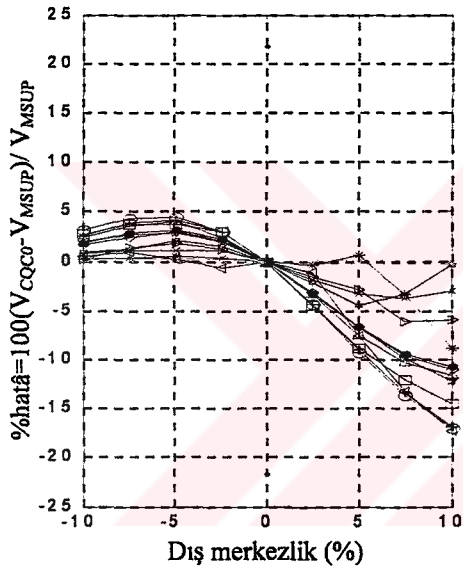
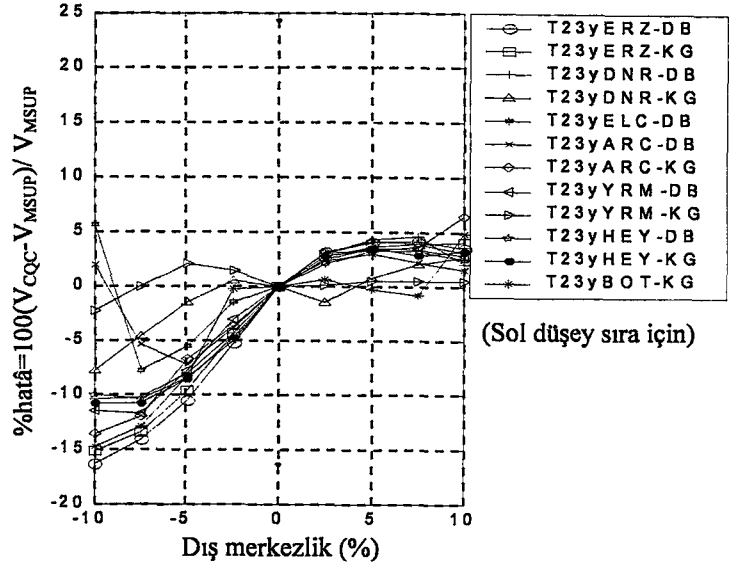
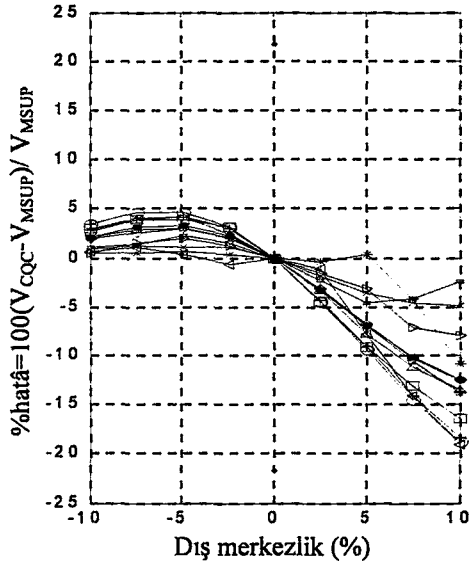
Şekil 4.22- Bina tipi 22x ve 23x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



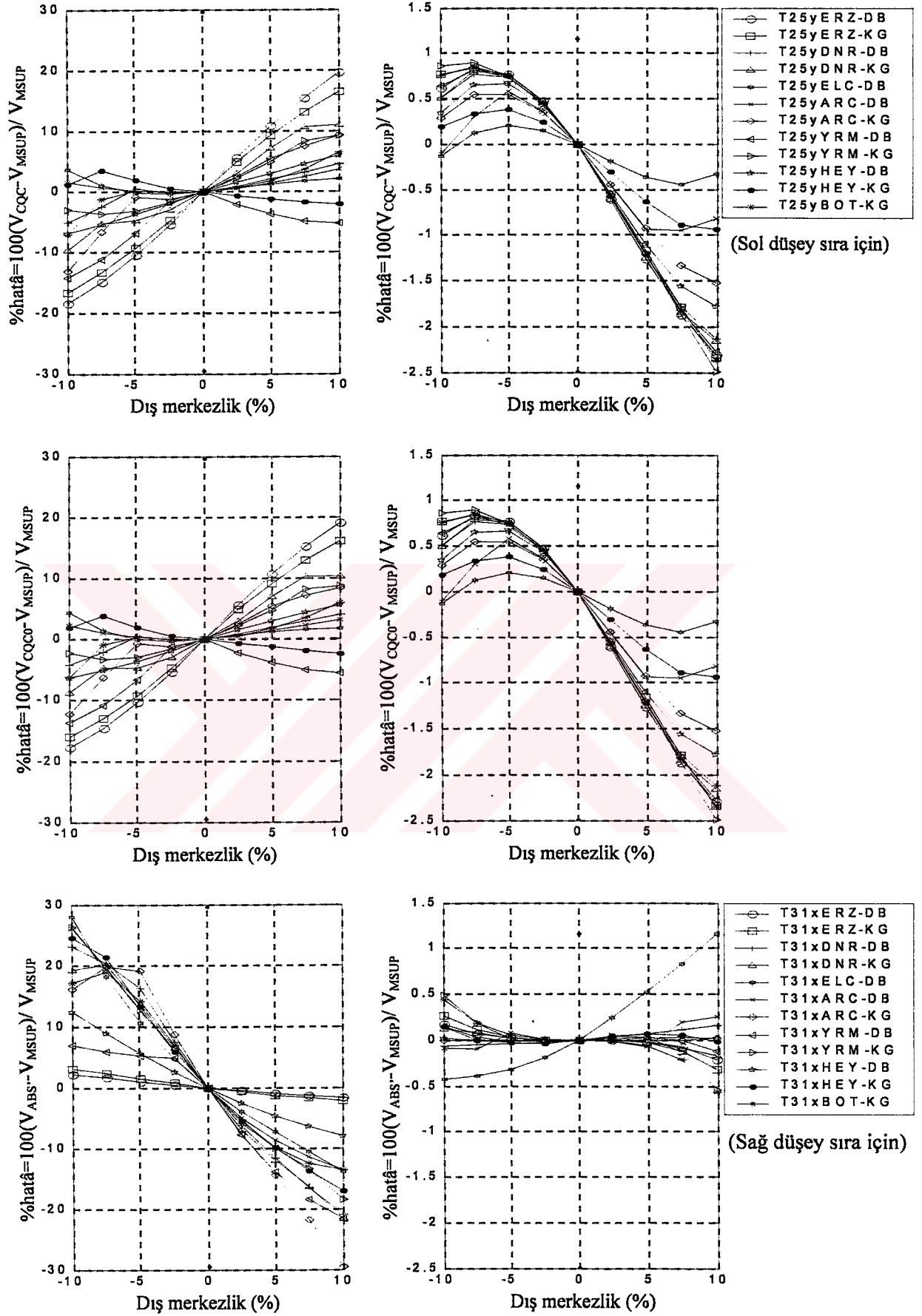
Şekil 4.23- Bina tipi 24x ve 25x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



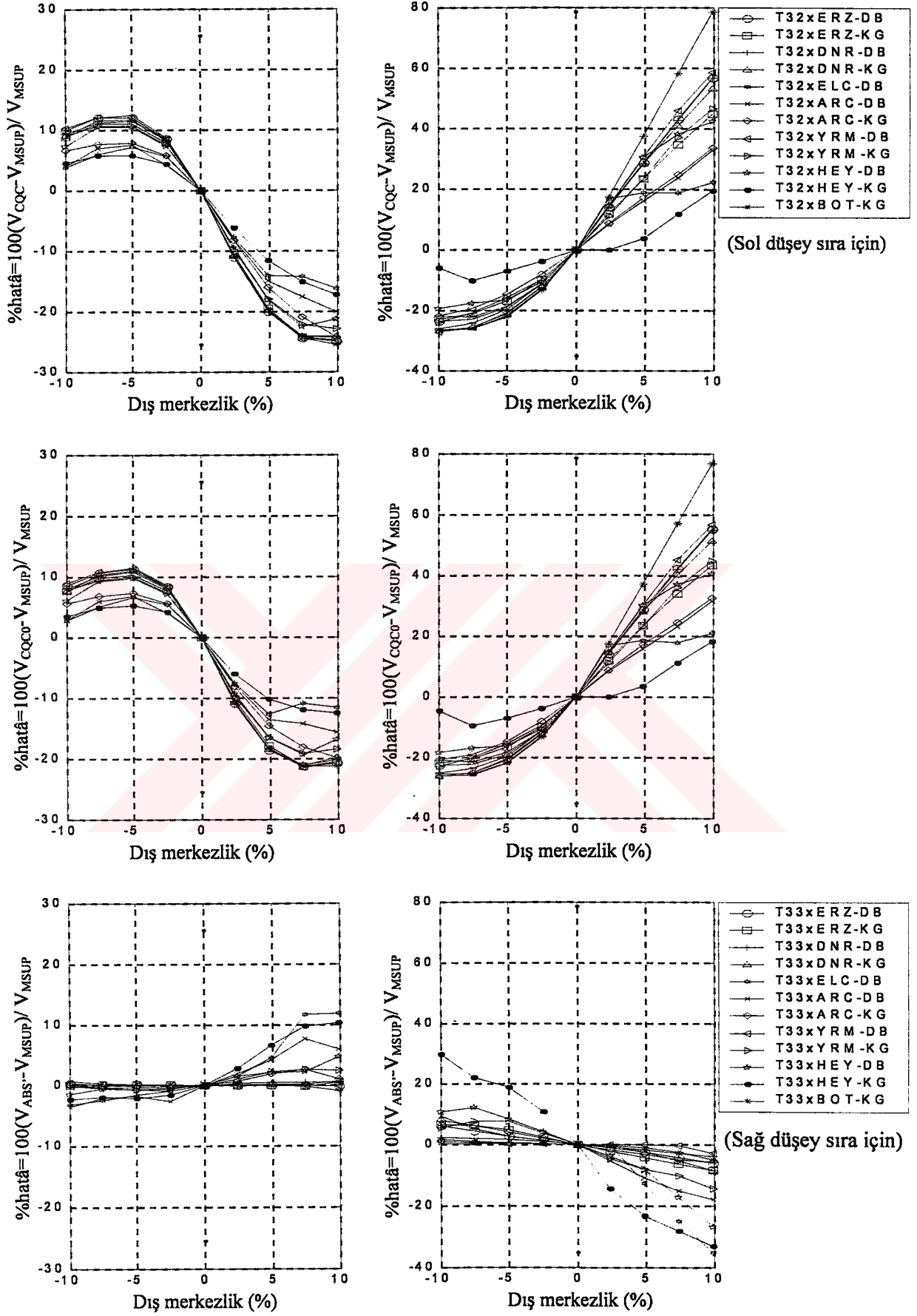
Şekil 4.24- Bina tipi 21y ve 22y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



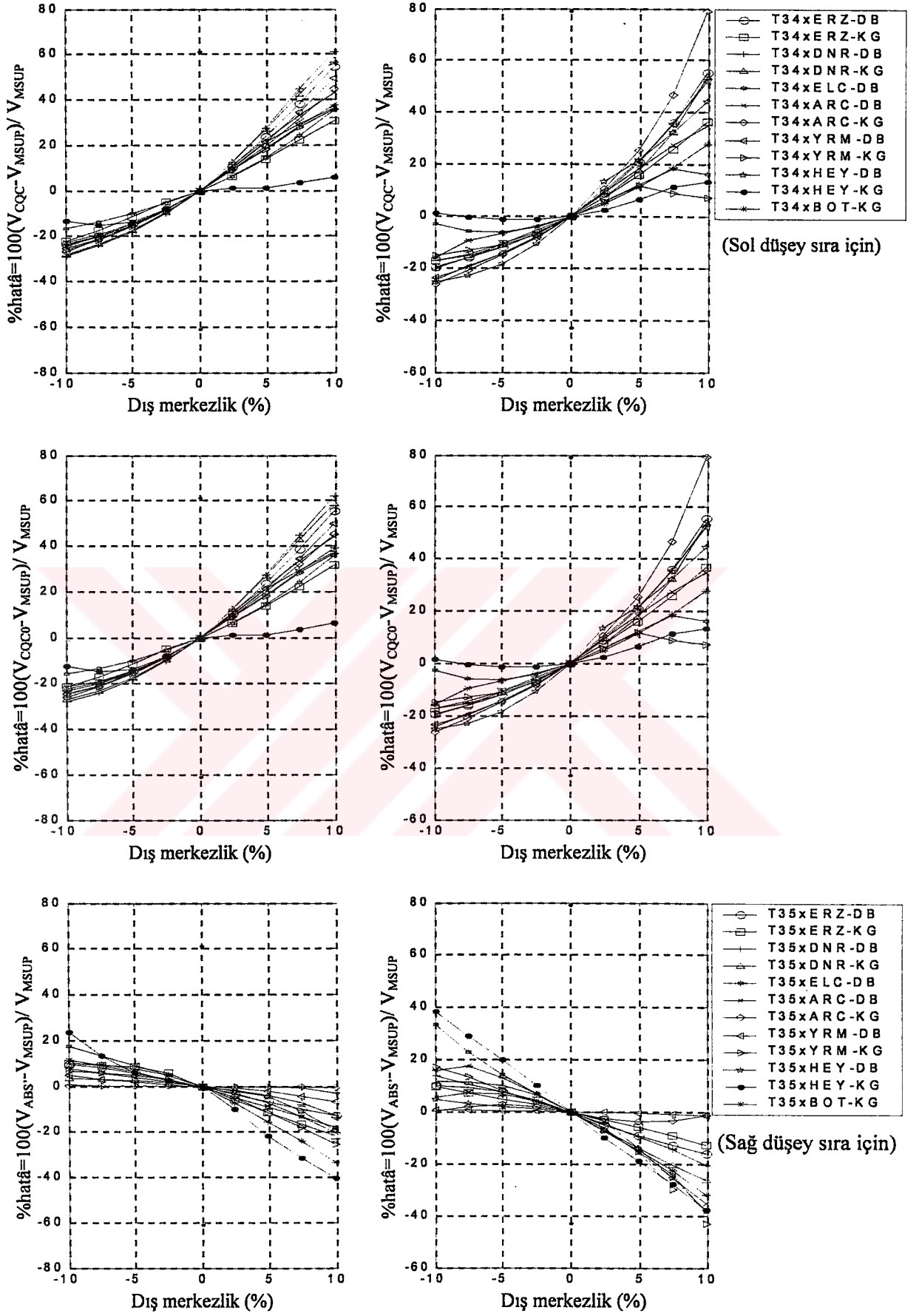
Şekil 4.25- Bina tipi 23y ve 24y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



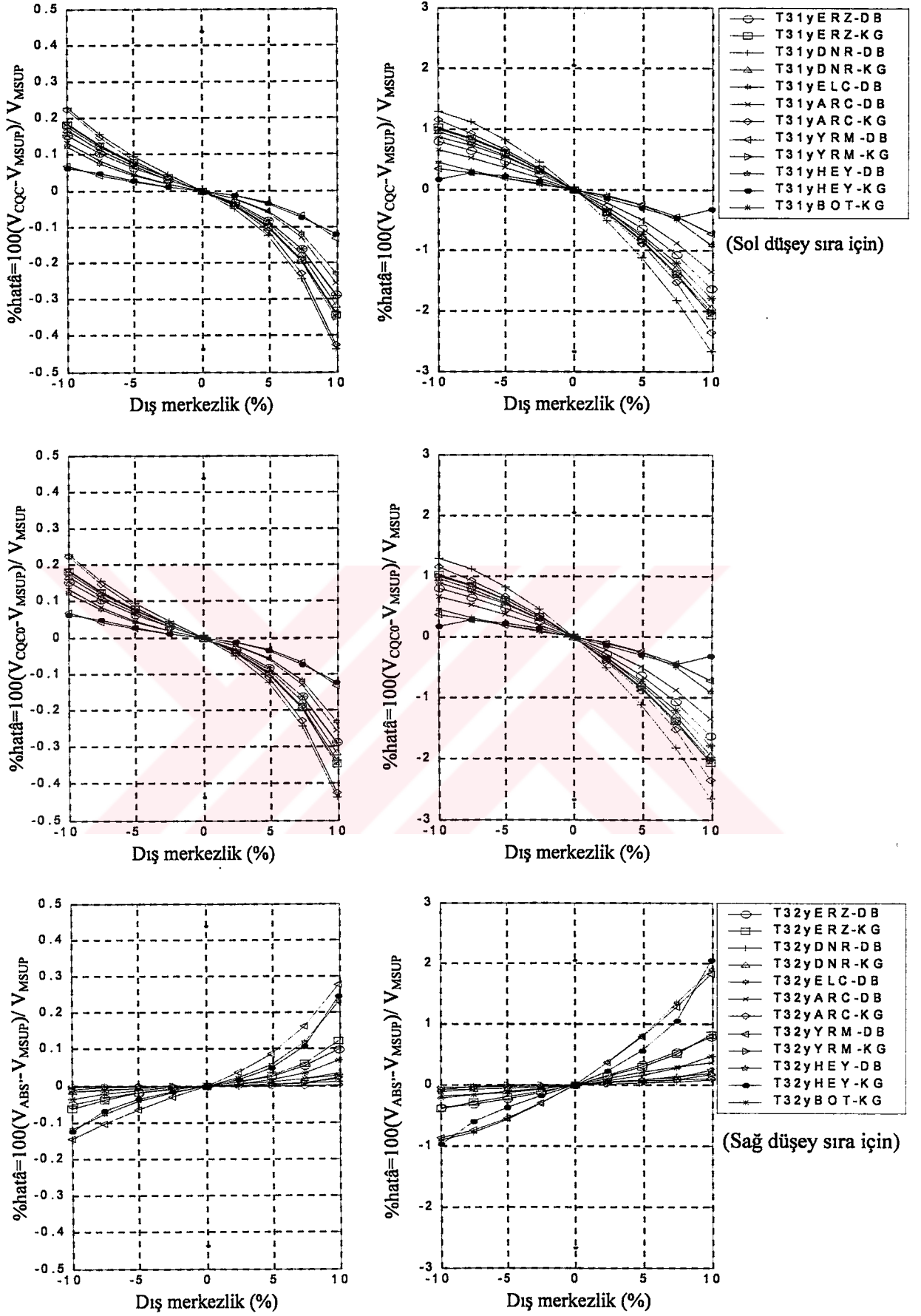
Şekil 4.26- Bina tipi 25y ve 31x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



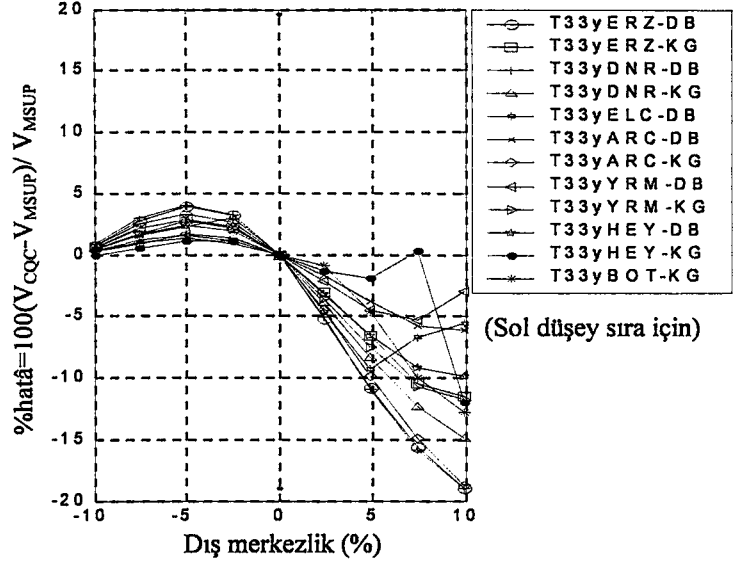
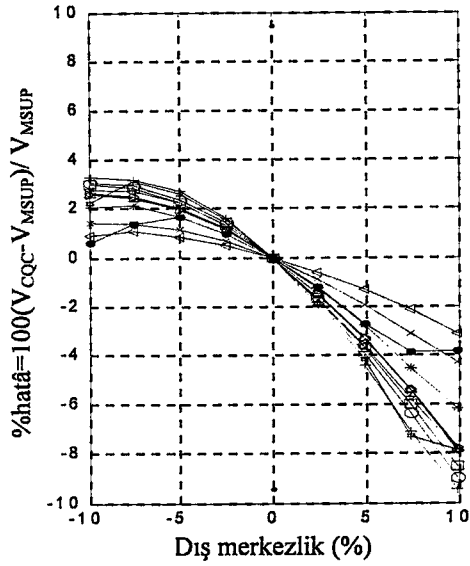
Şekil 4.27- Bina tipi 32x ve 33x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



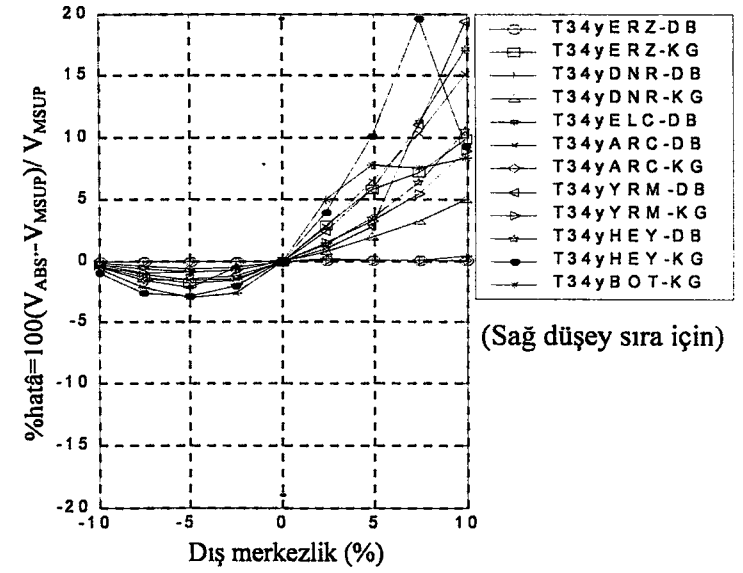
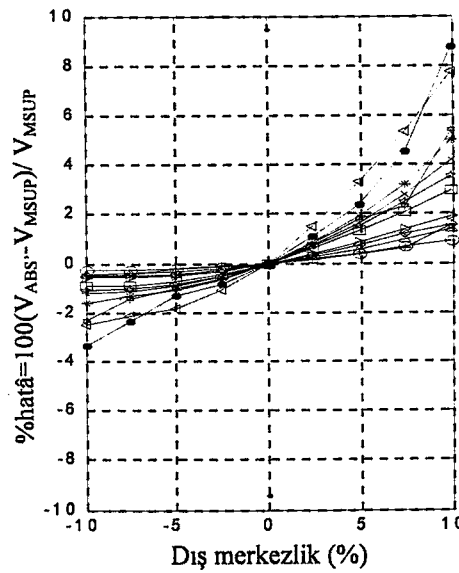
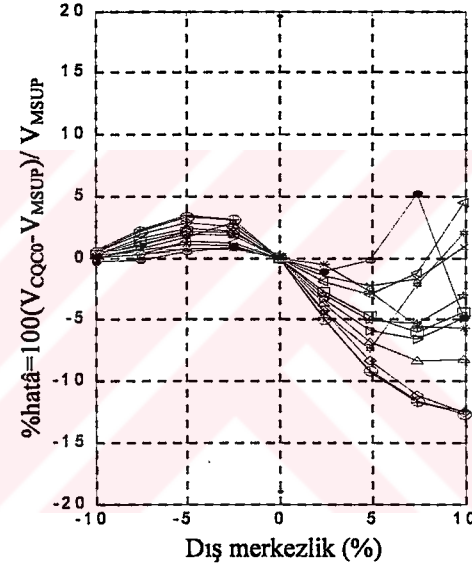
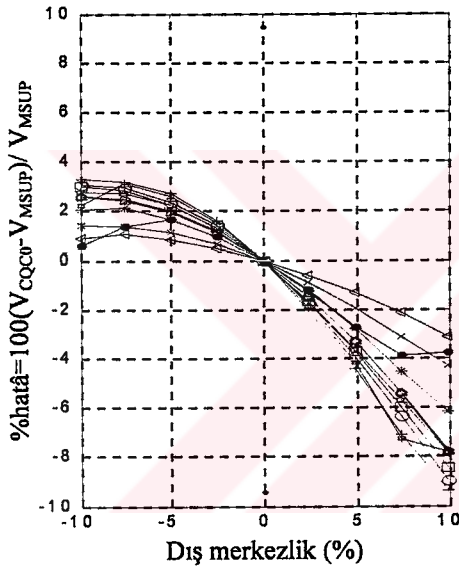
Şekil 4.28- Bina tipi 34x ve 35x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



Şekil 4.29- Bina tipi 31y ve 32y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği

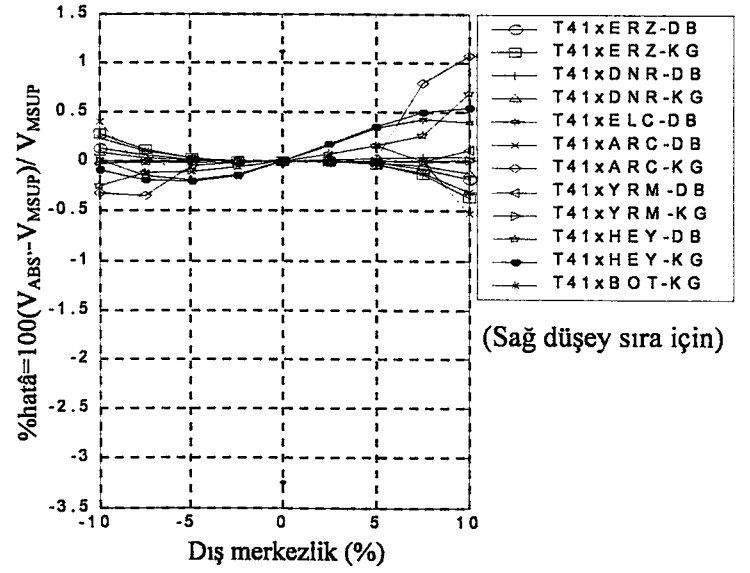
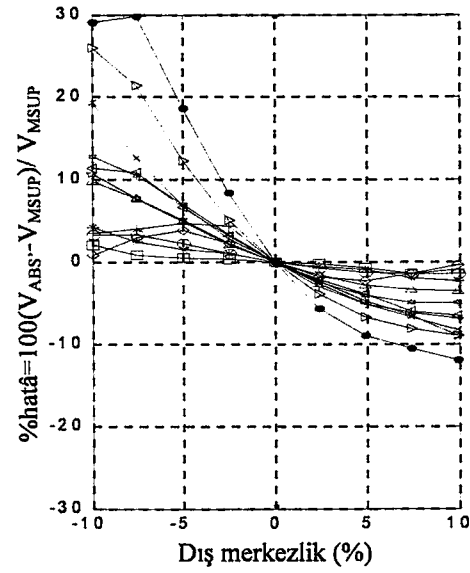
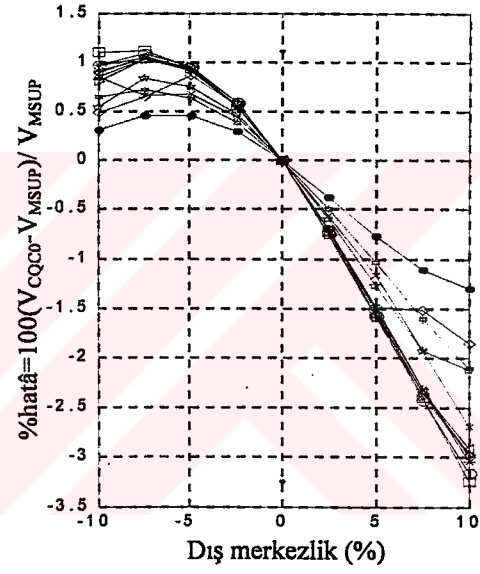
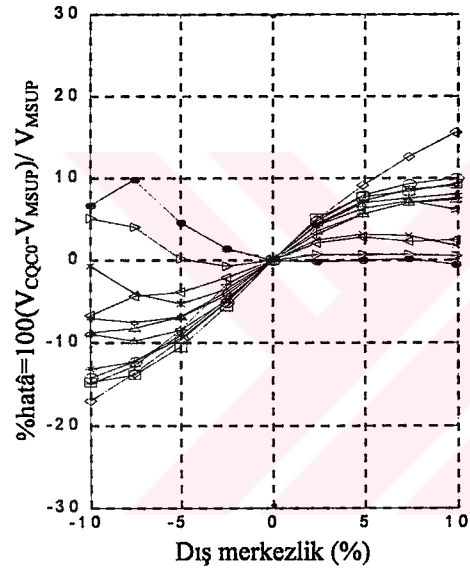
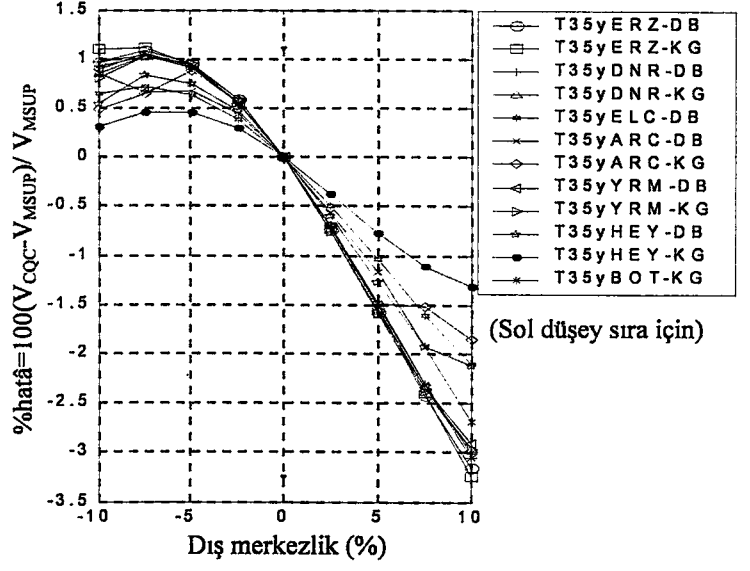
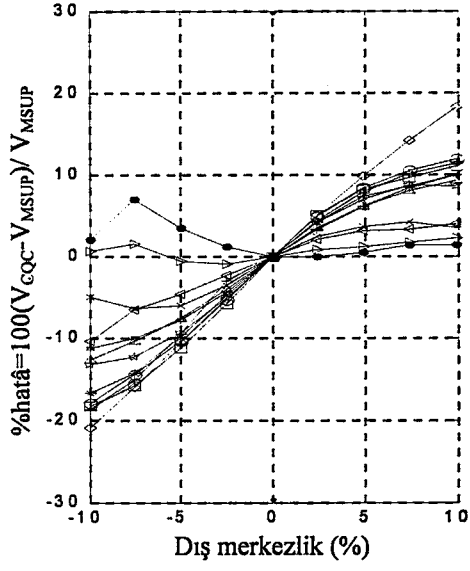


(Sol düşey sıra için)

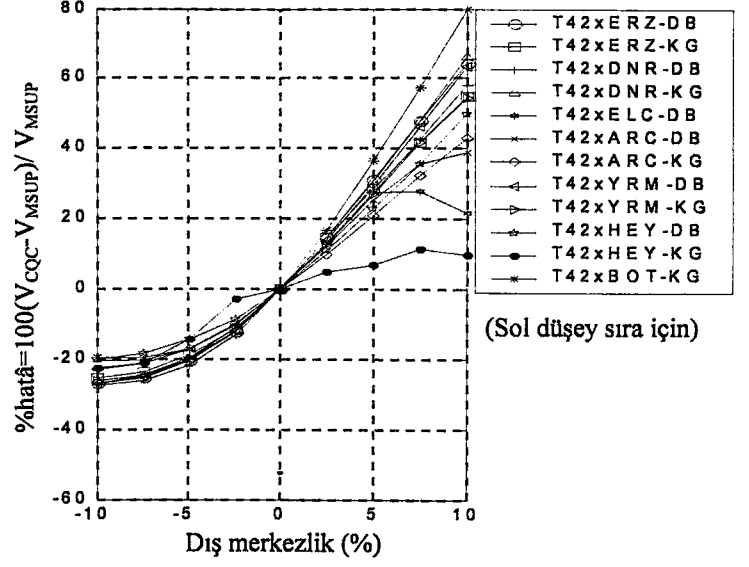
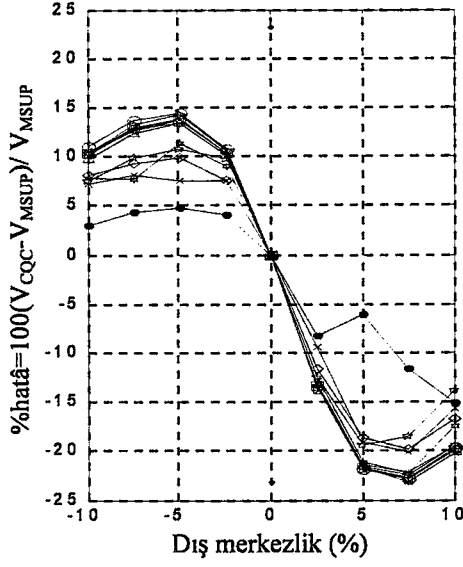


(Sağ düşey sıra için)

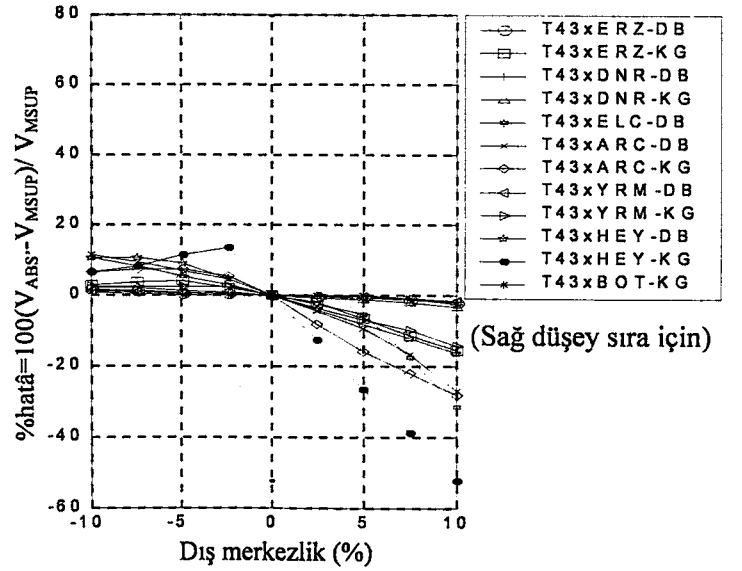
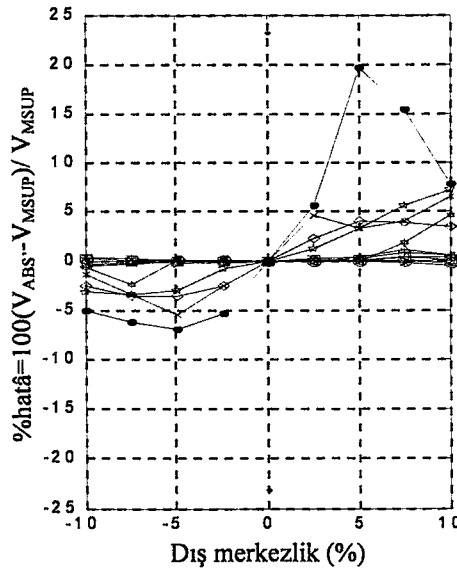
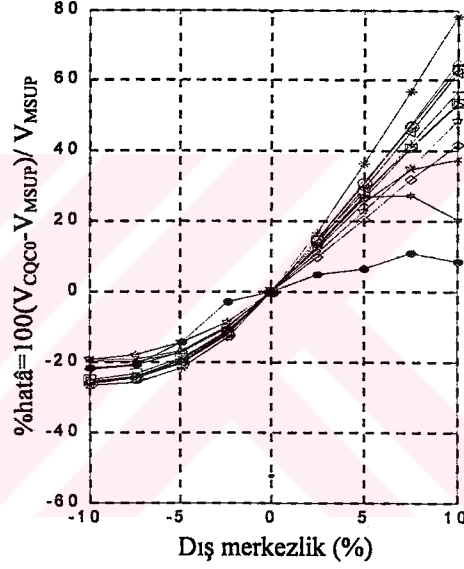
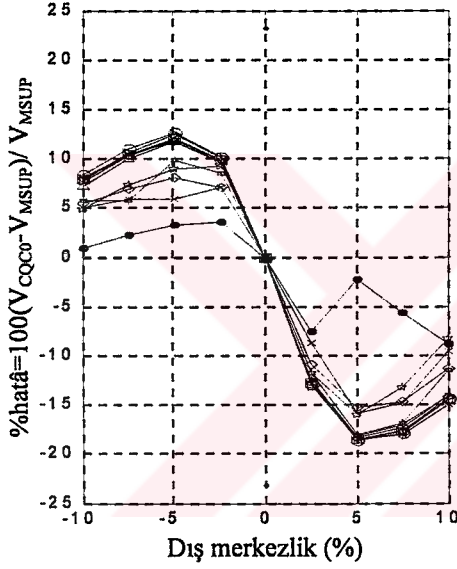
Şekil 4.30- Bina tipi 33y ve 34y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



Şekil 4.31- Bina tipi 35y ve 41x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği

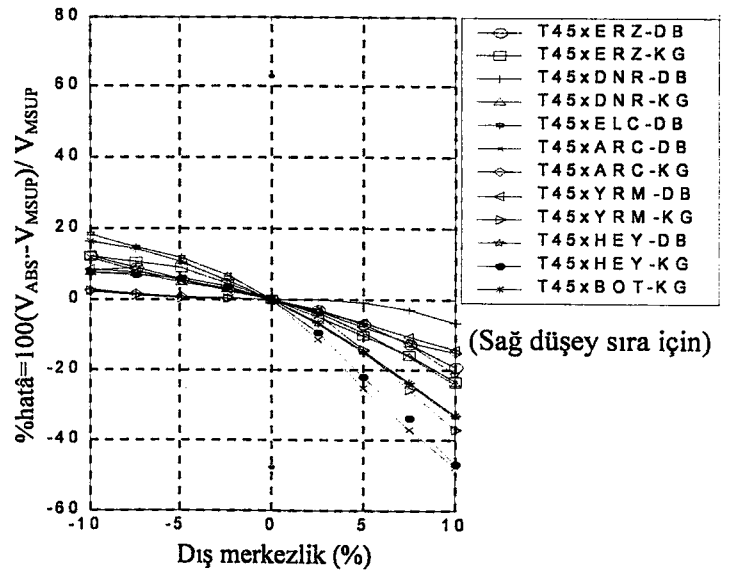
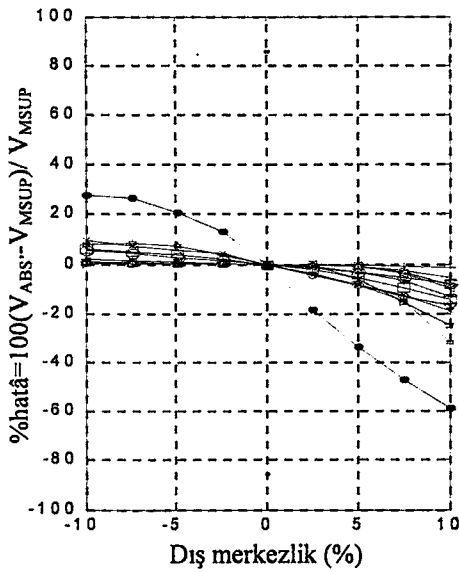
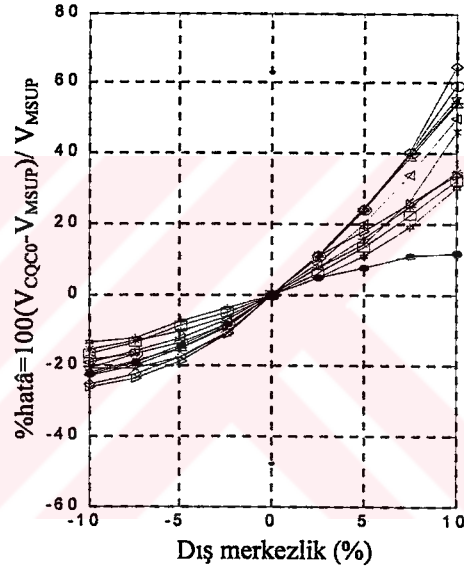
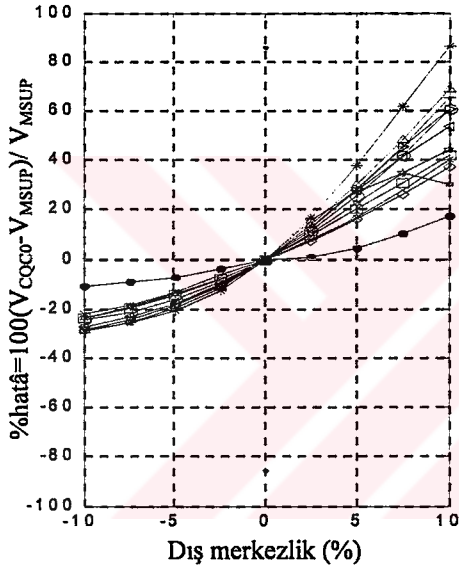
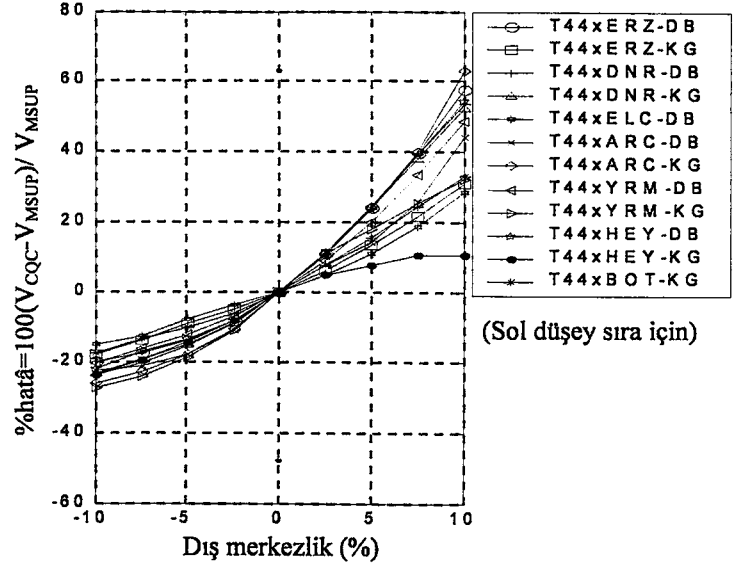
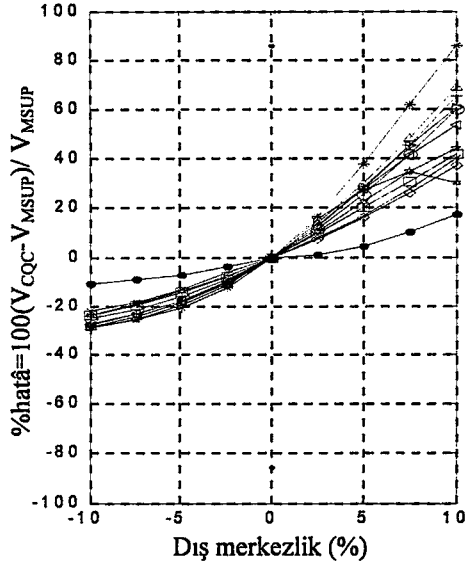


(Sol düşey sıra için)

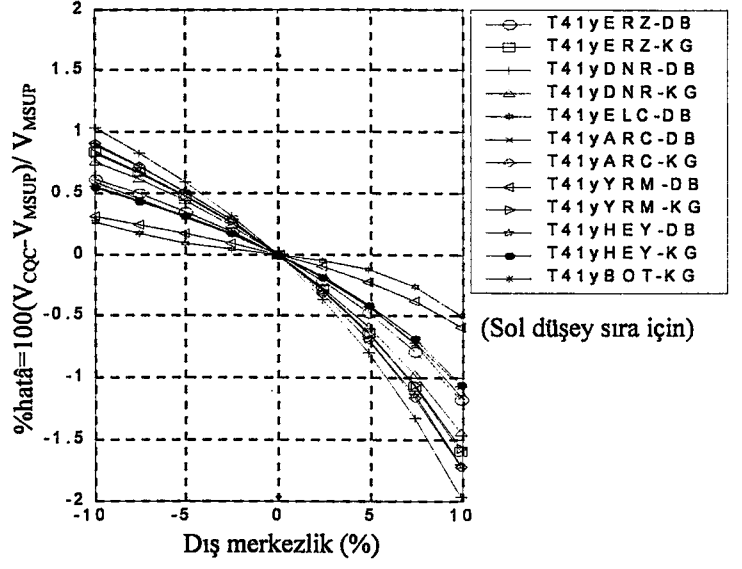
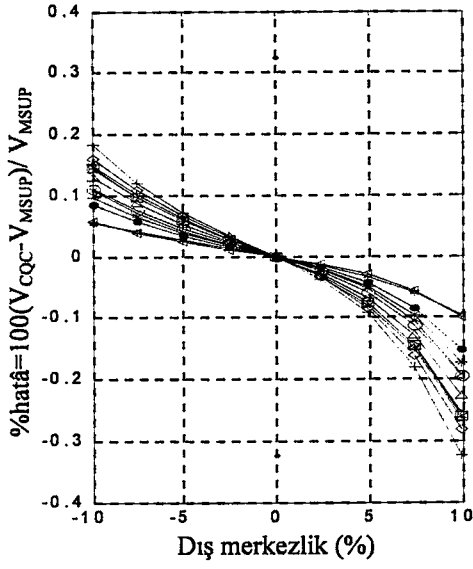


(Sağ düşey sıra için)

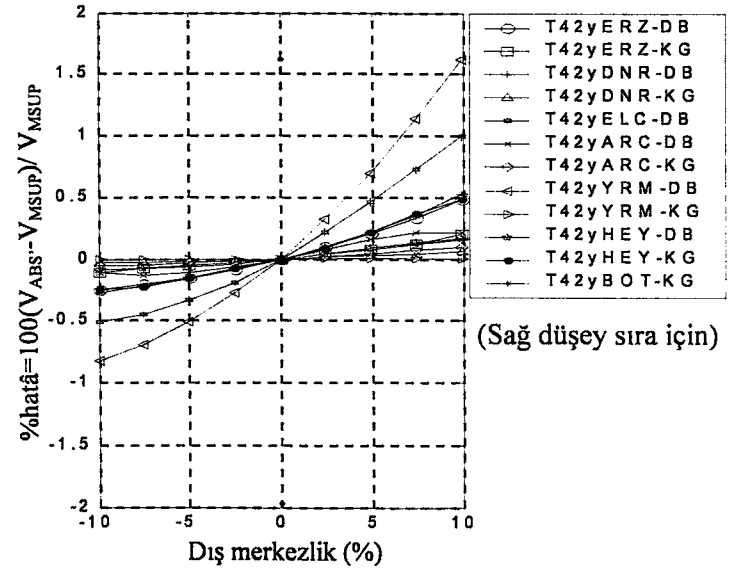
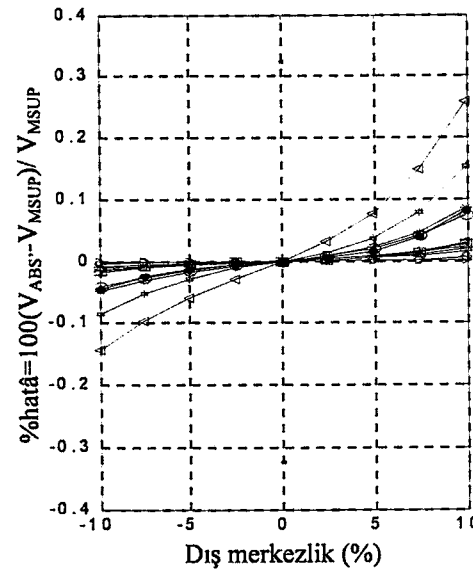
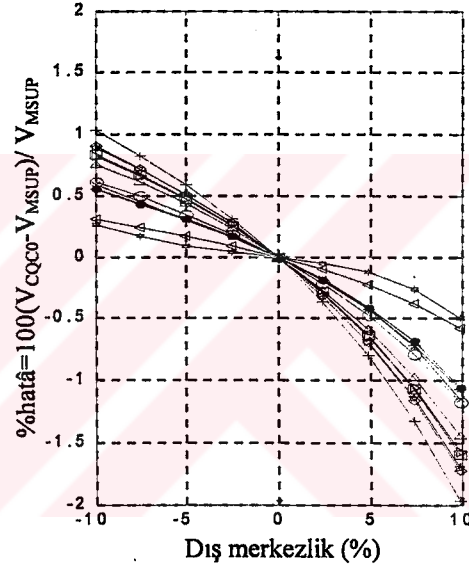
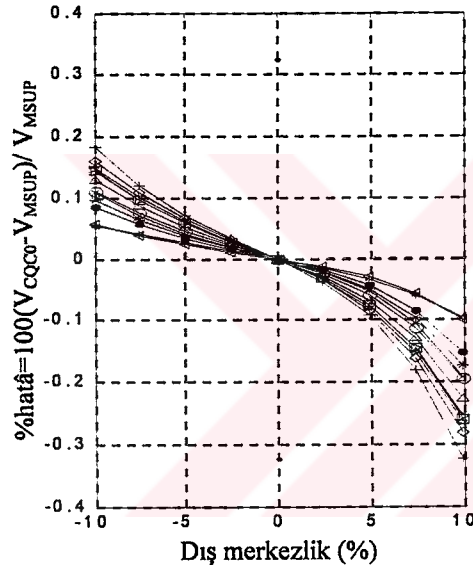
Şekil 4.32- Bina tipi 42x ve 43x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği



Şekil 4.33- Bina tipi 44x ve 45x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği

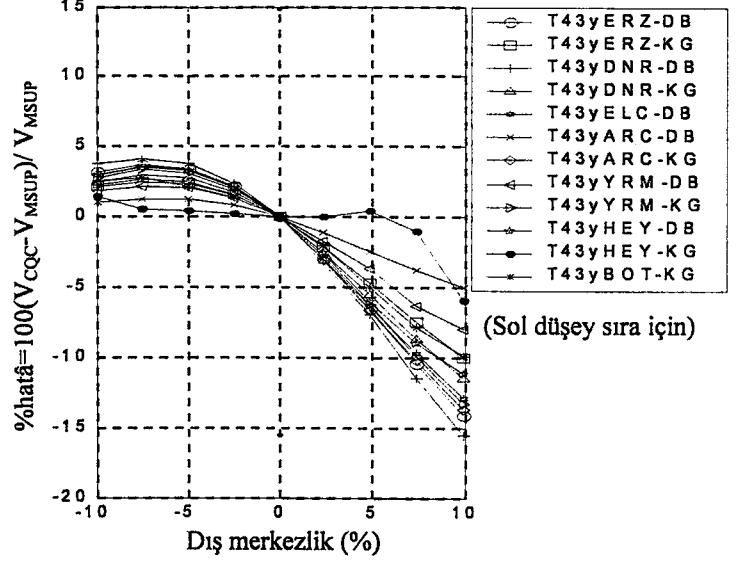
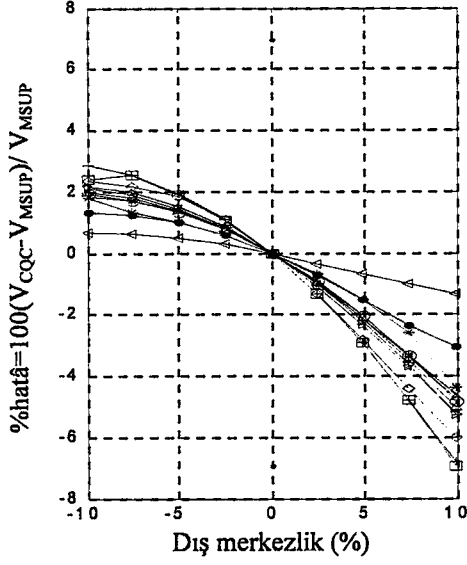


(Sol düşey sıra için)

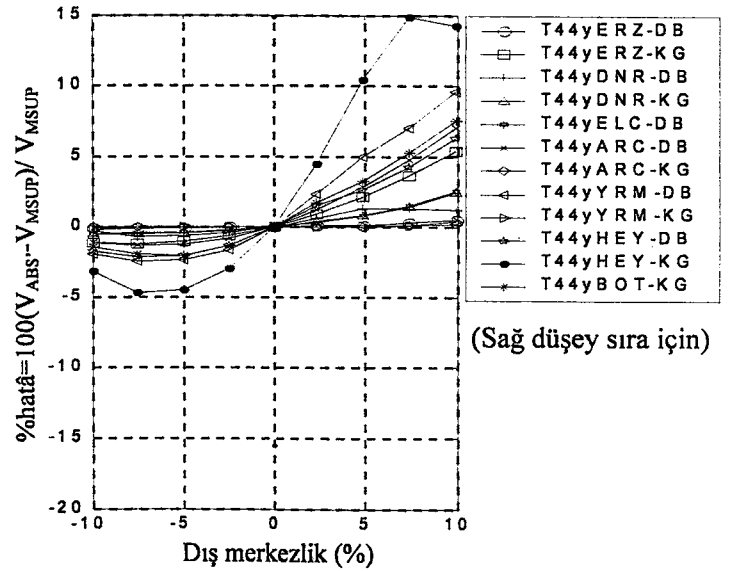
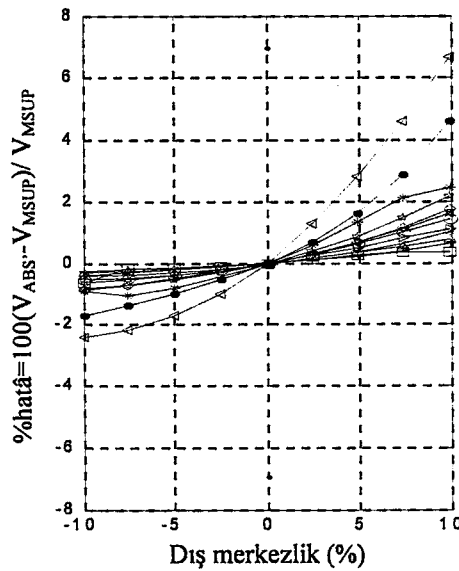
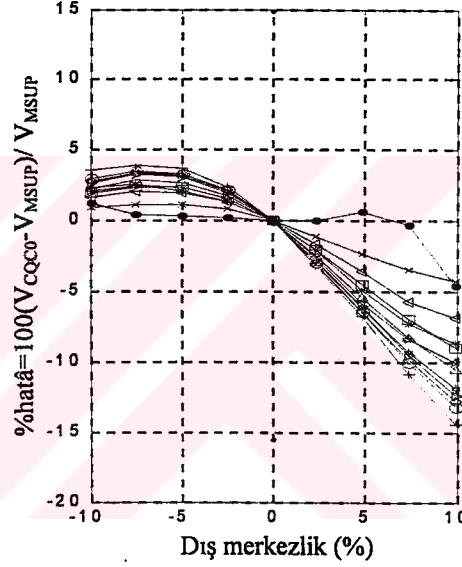
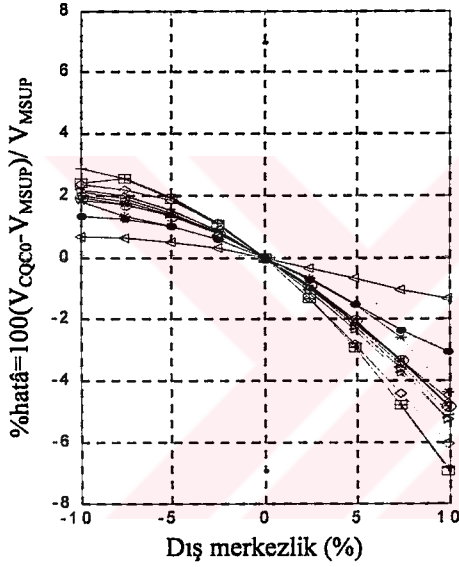


(Sağ düşey sıra için)

Şekil 4.34- Bina tipi 41y ve 42y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği

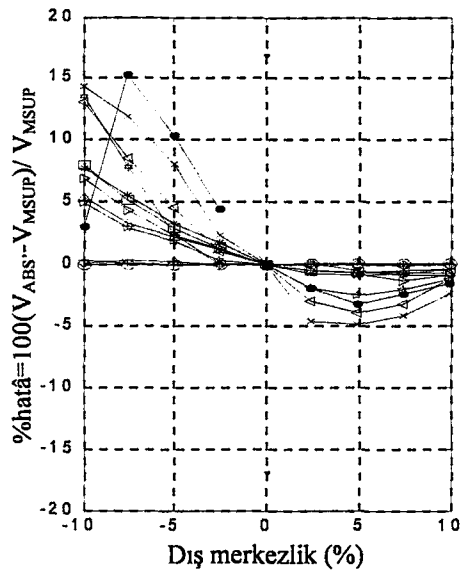
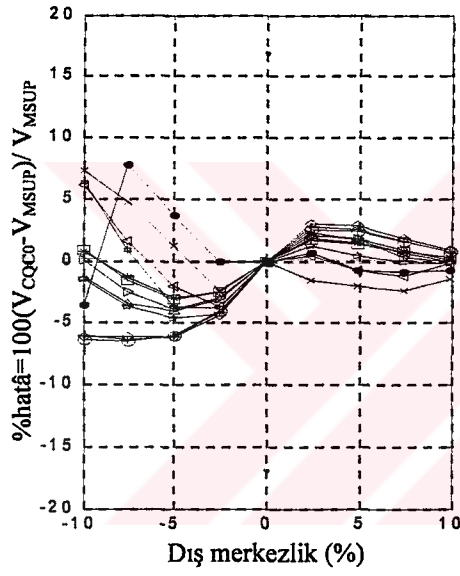
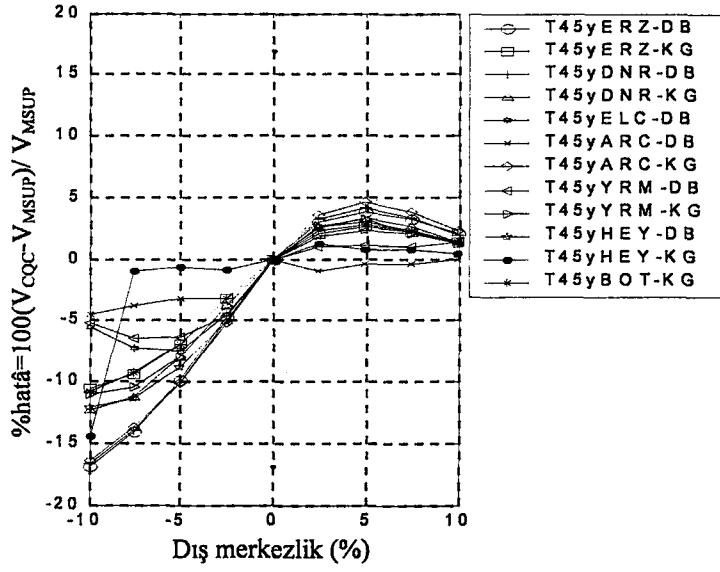


(Sol düşey sıra için)

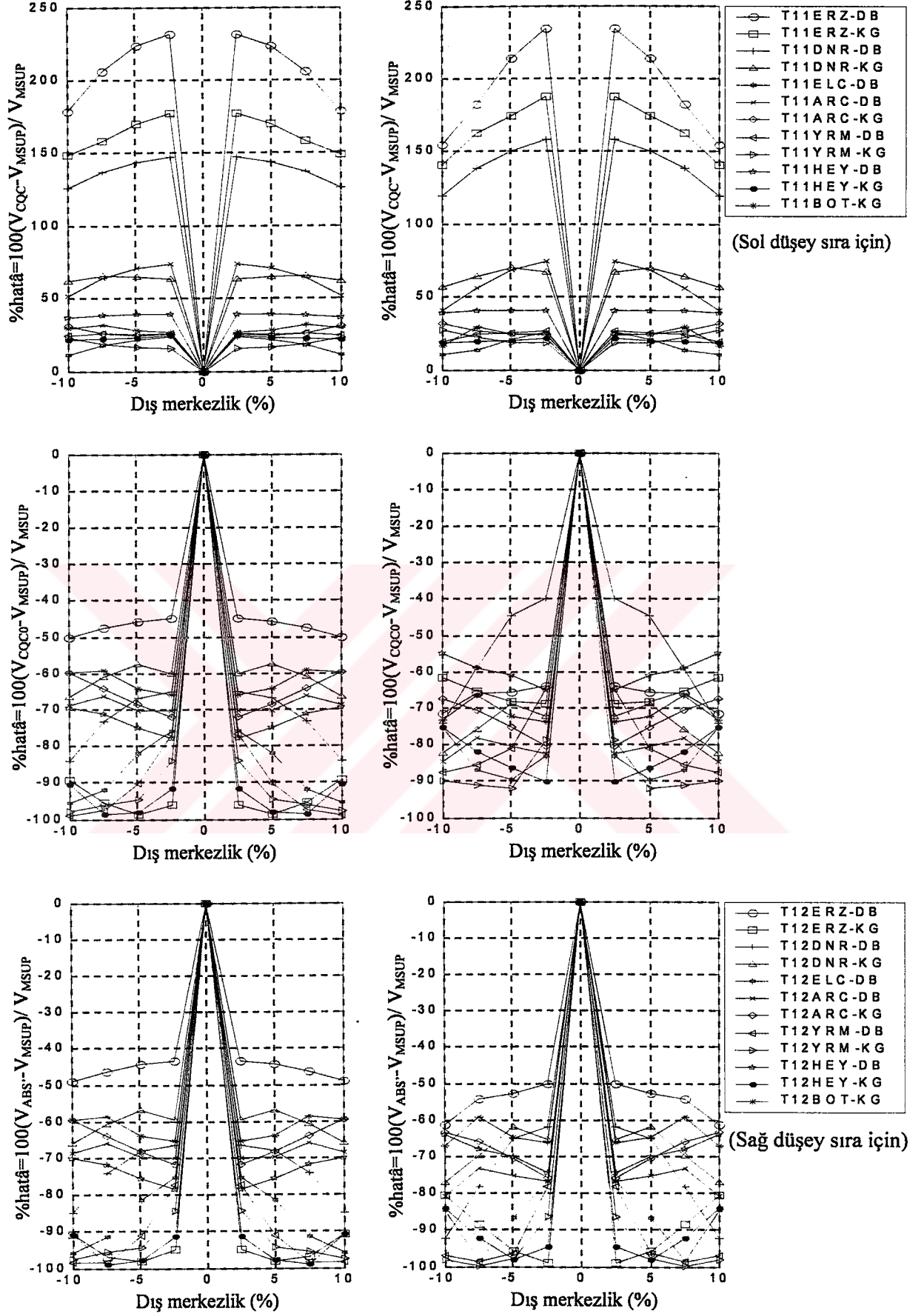


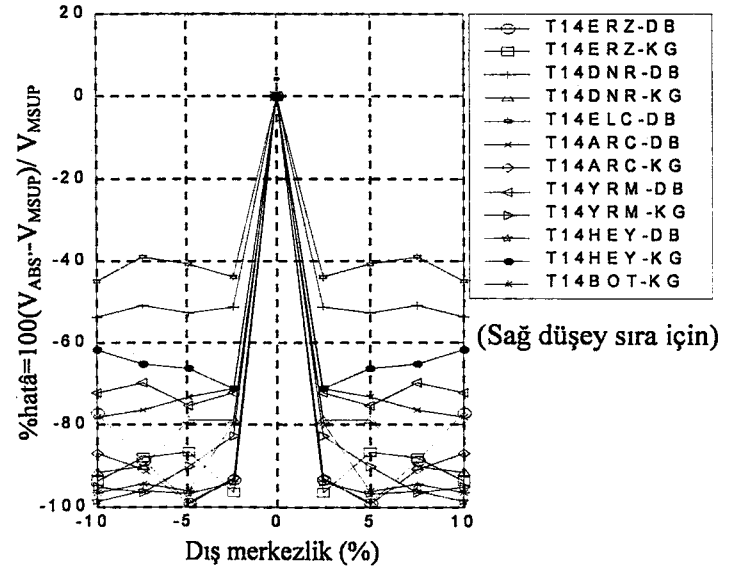
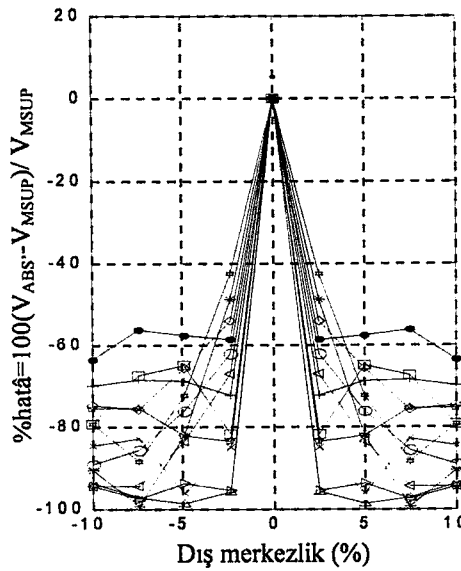
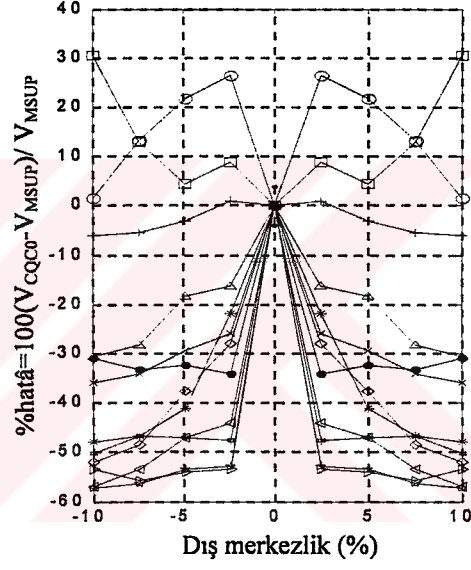
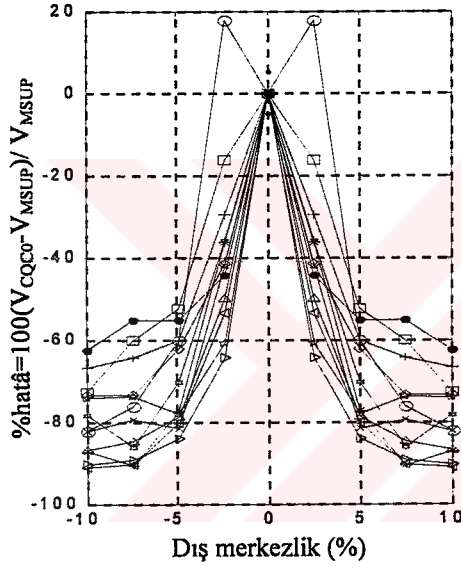
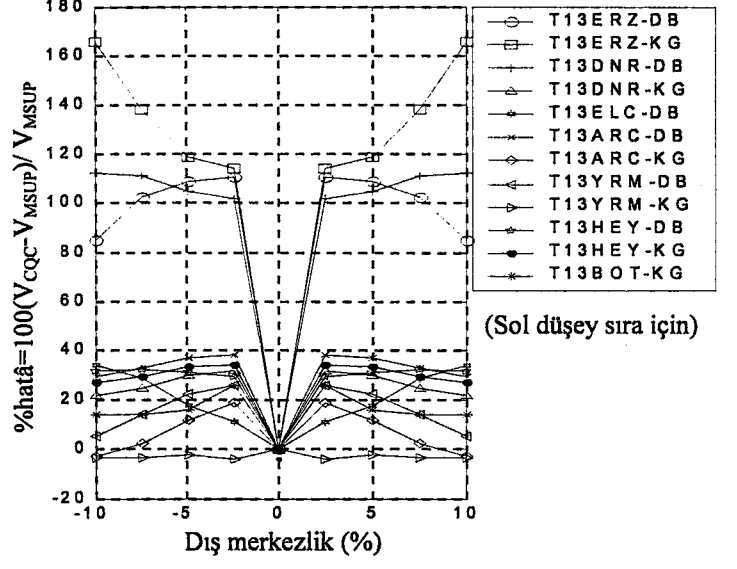
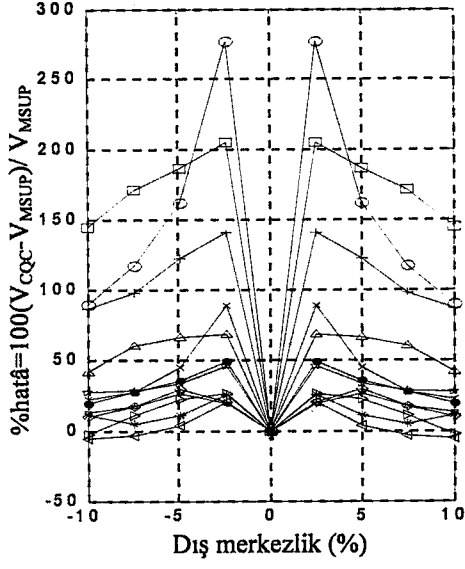
(Sağ düşey sıra için)

Şekil 4.35- Bina tipi 43y ve 44y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği

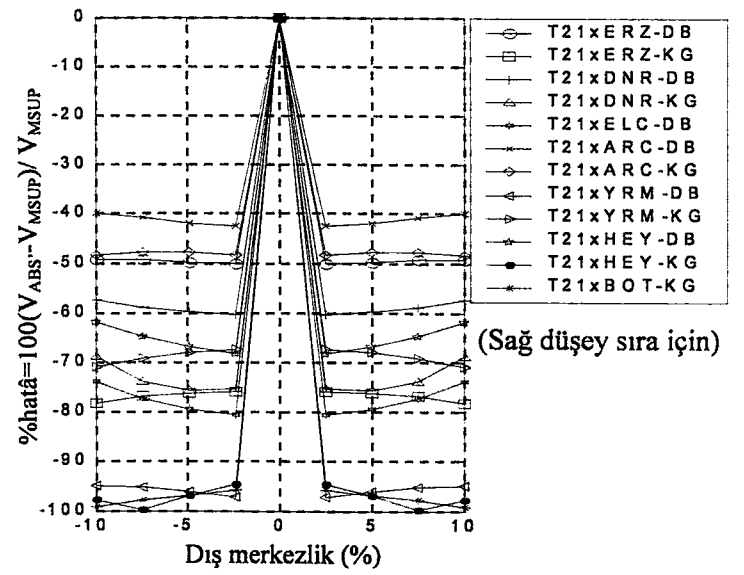
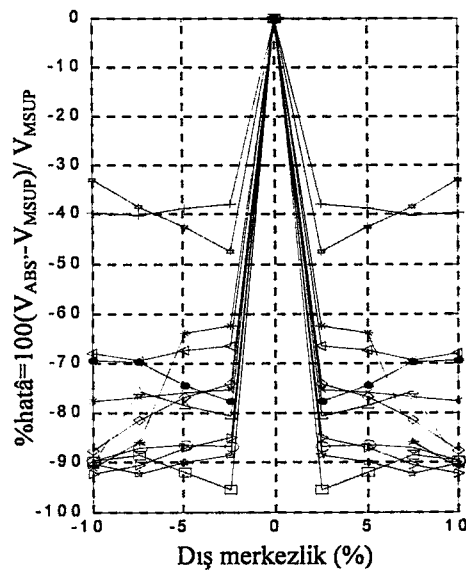
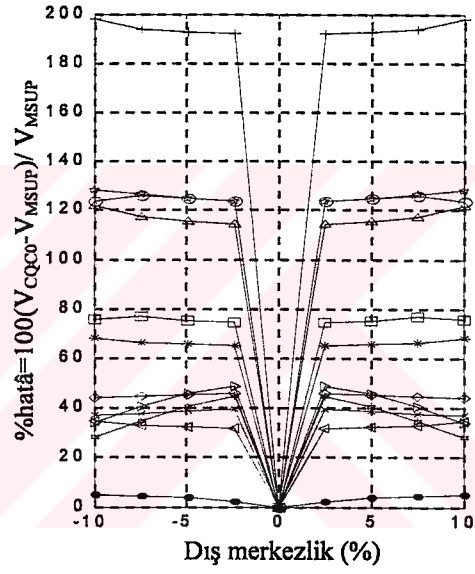
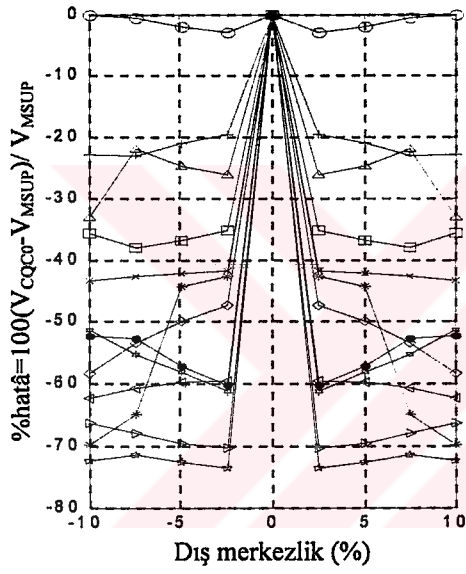
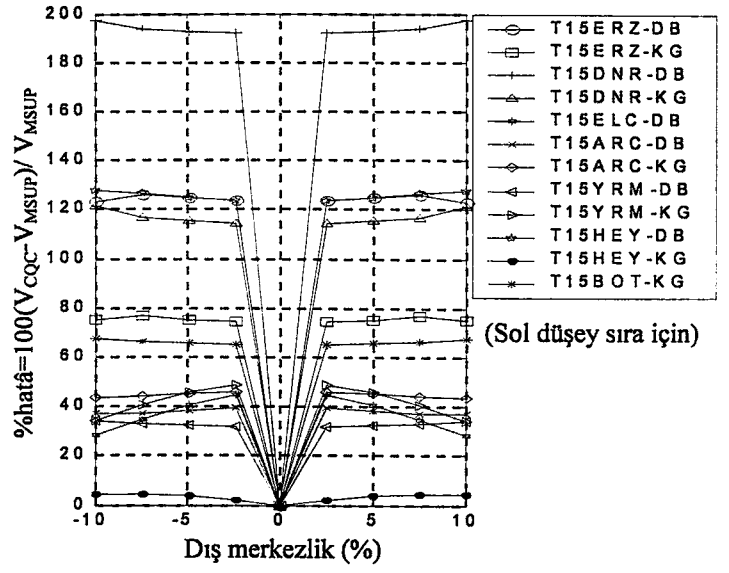
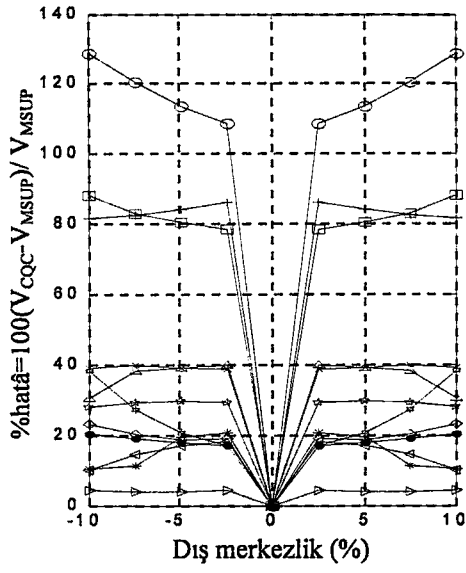


Şekil 4.36- Bina tipi 45y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x hatâ grafiği

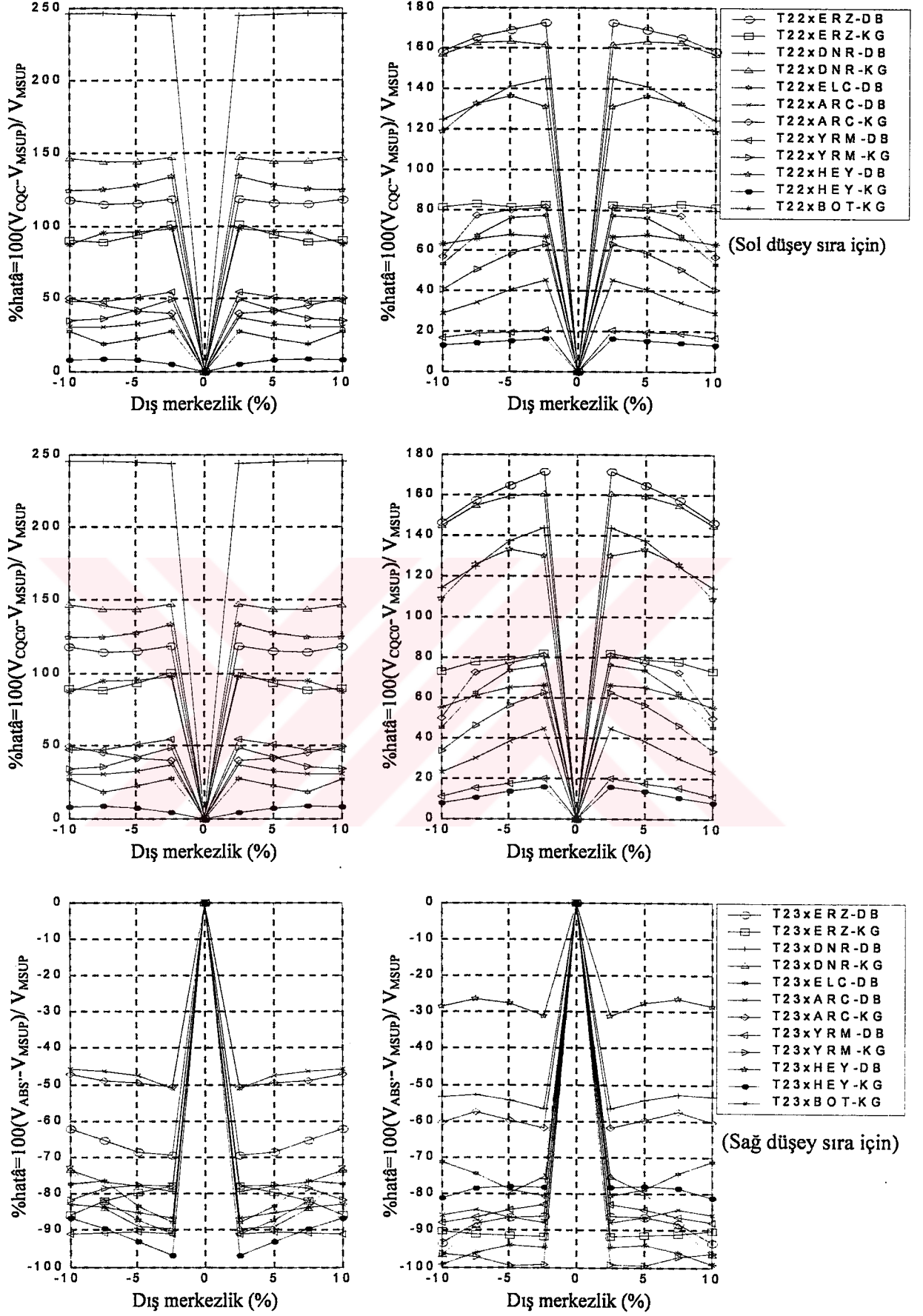


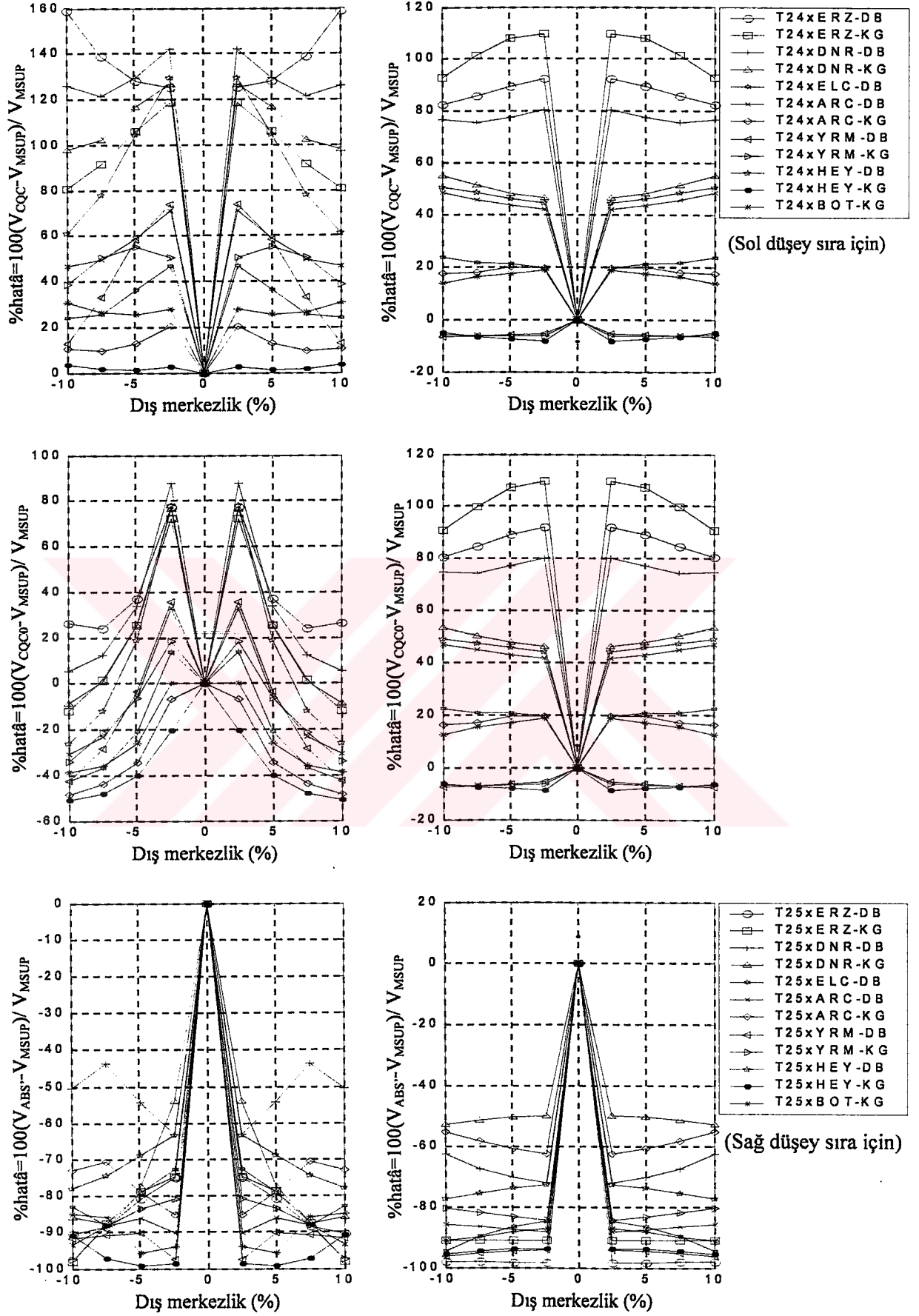


Şekil 4.38- Bina tipi 13 ve 14, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği

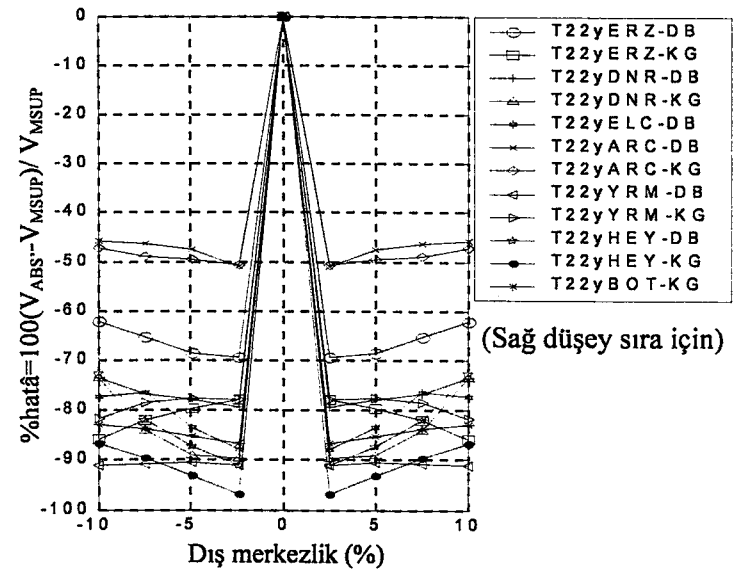
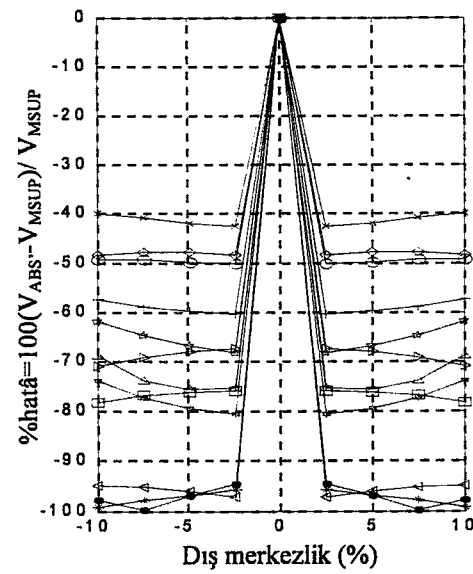
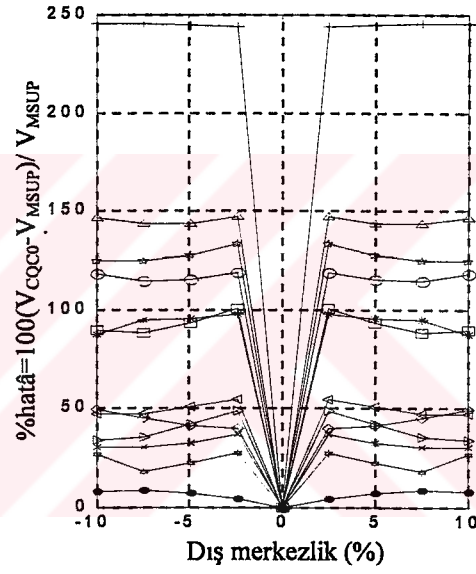
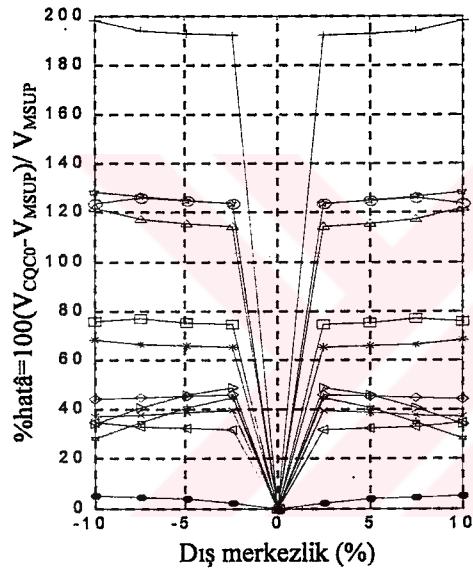
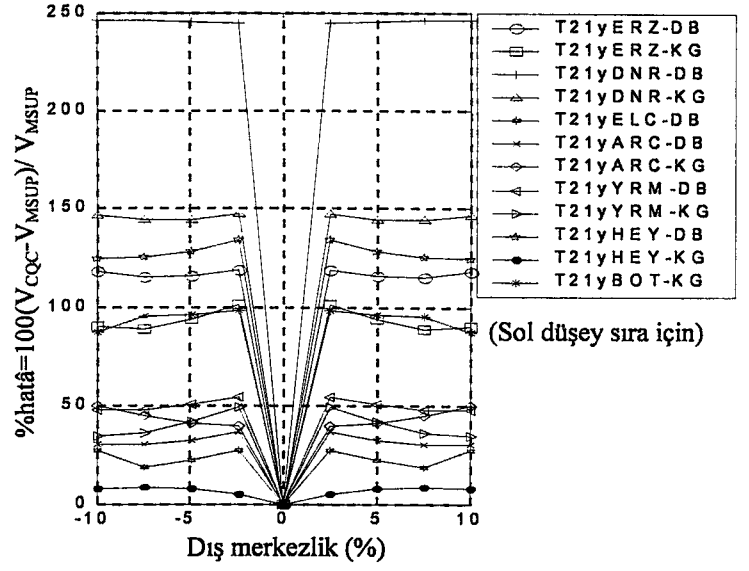
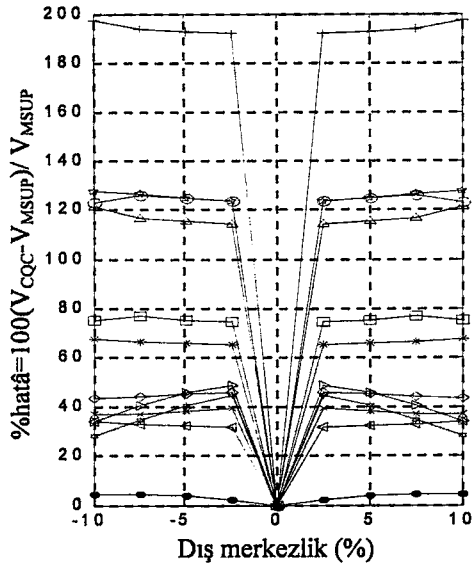


Şekil 4.39- Bina tipi 15 ve 21x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği

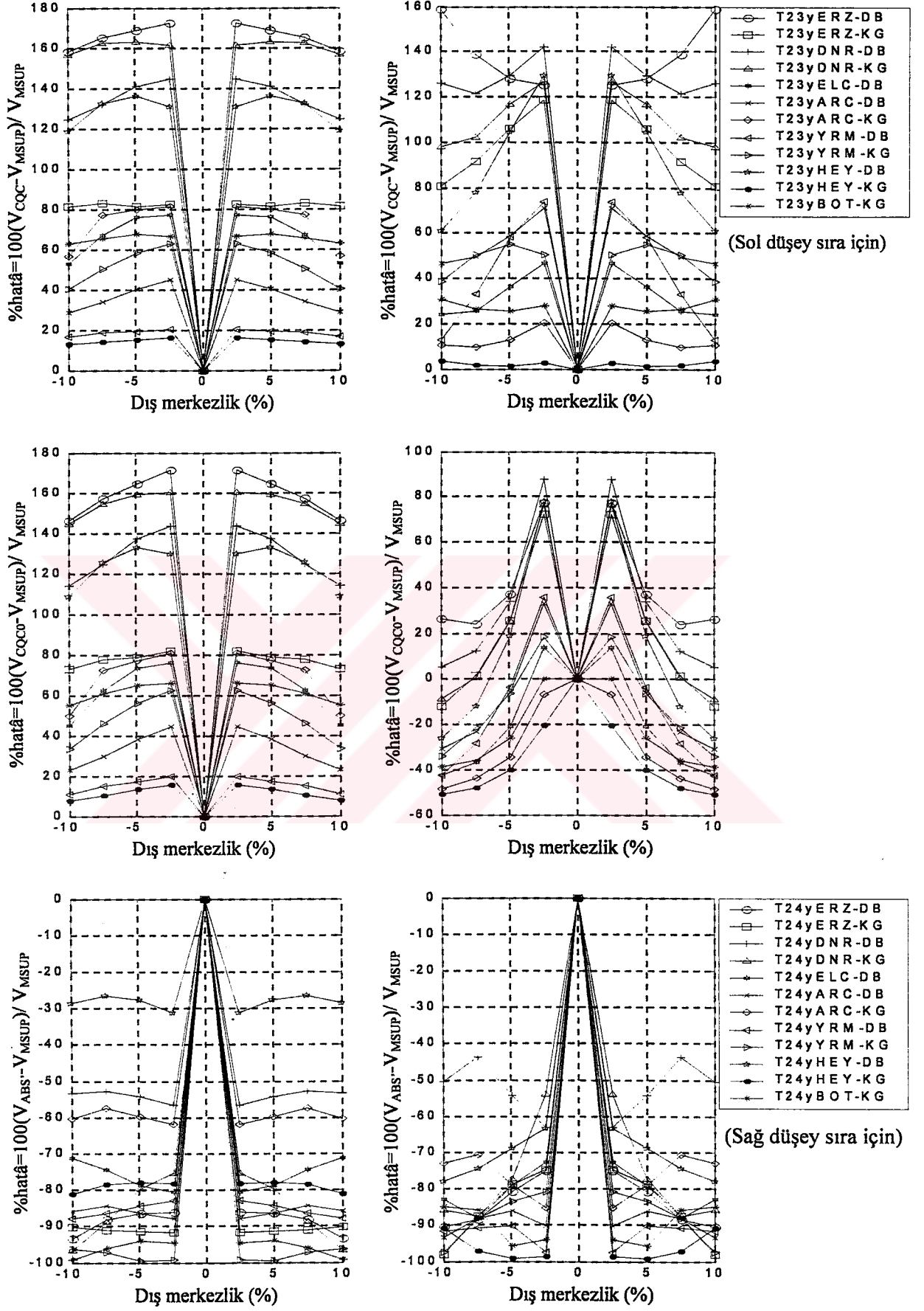




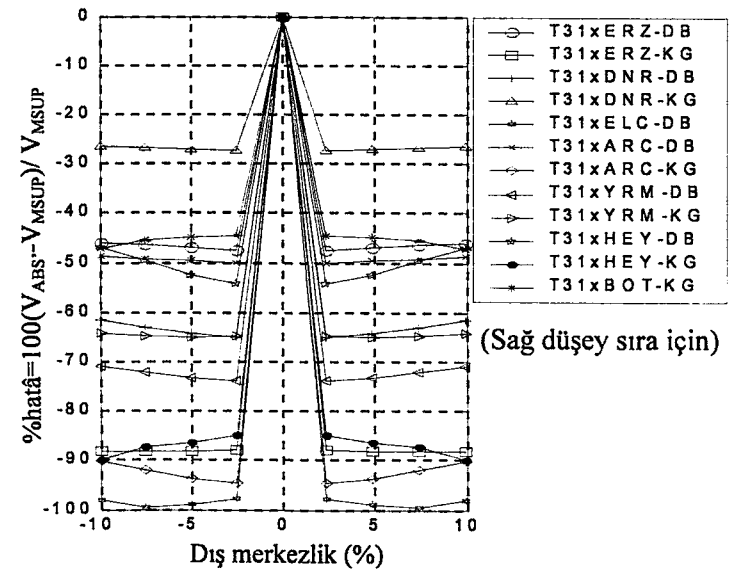
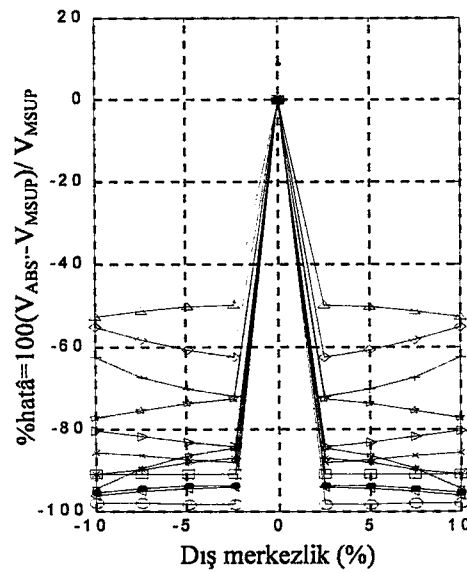
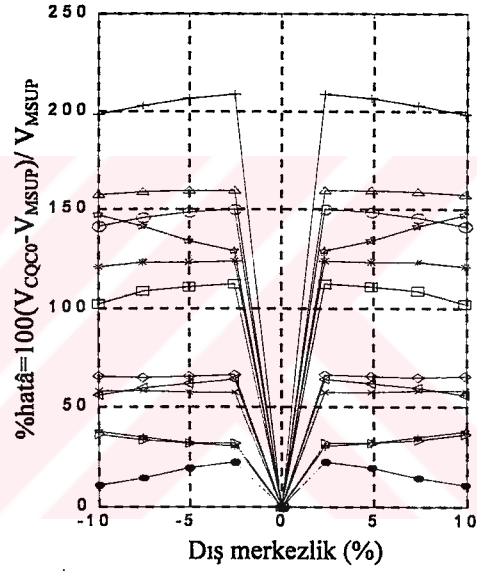
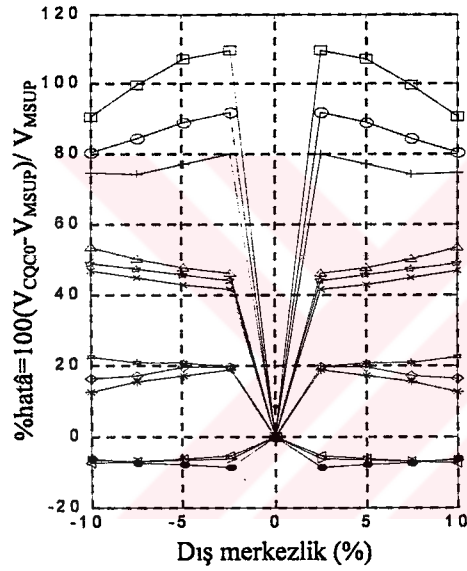
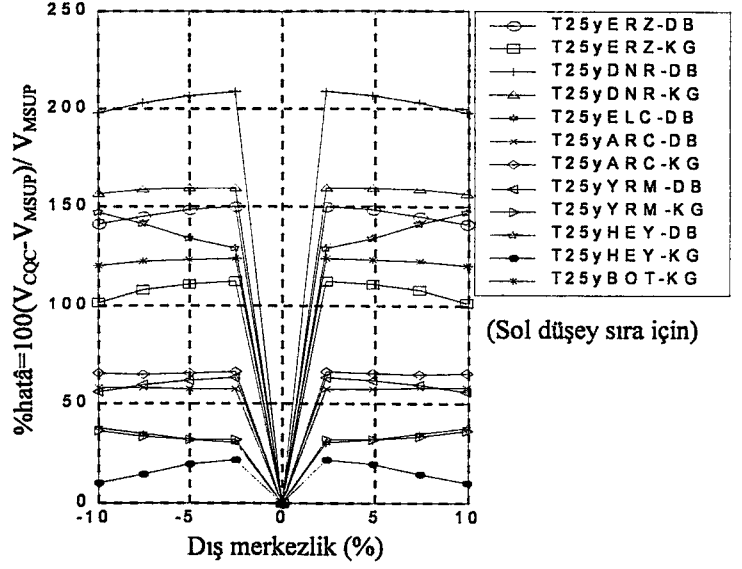
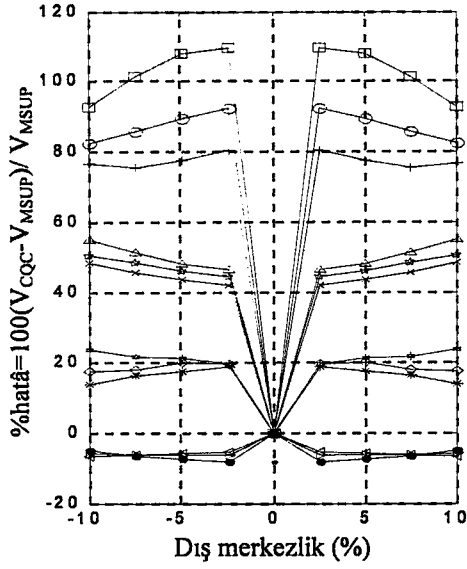
Şekil 4.41- Bina tipi 24x ve 25x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



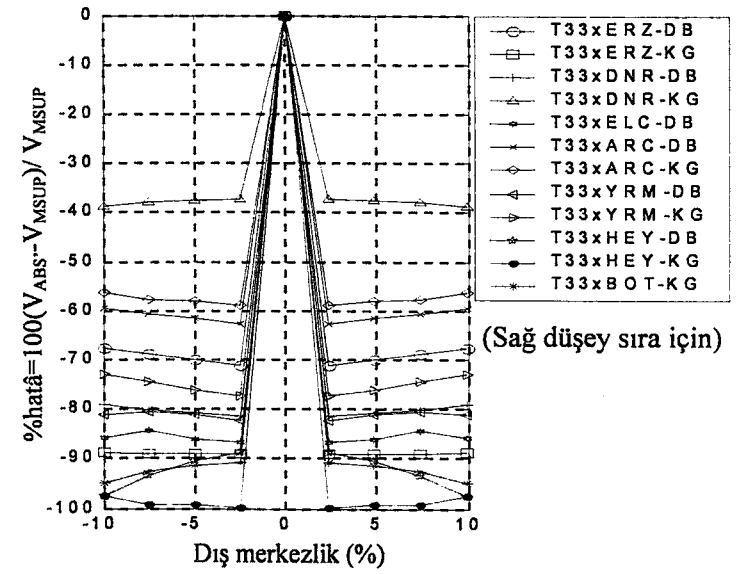
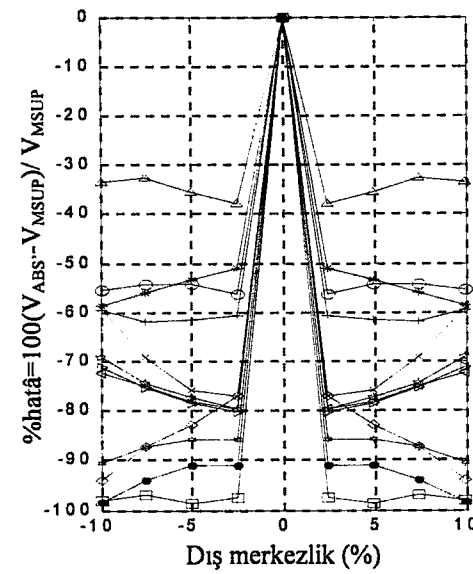
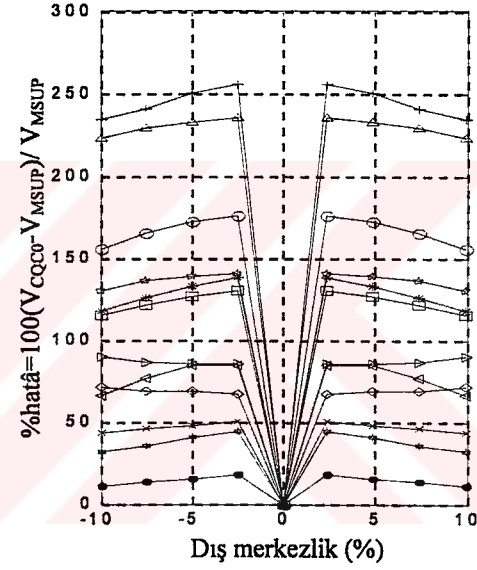
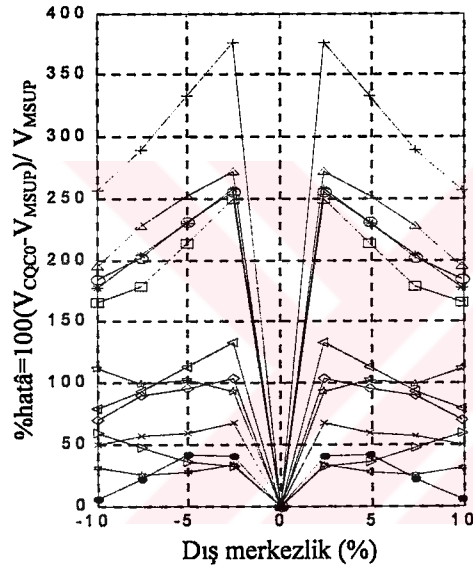
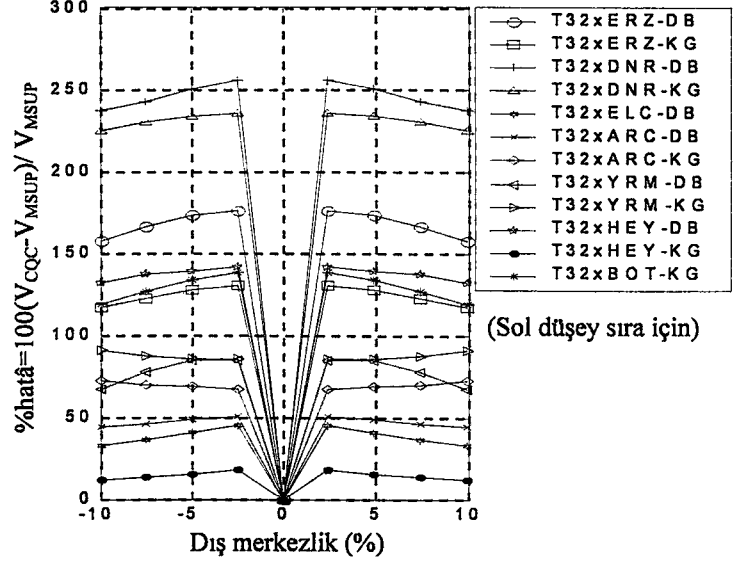
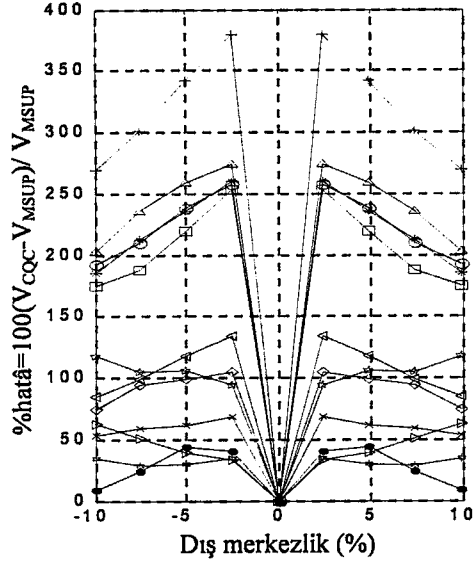
Şekil 4.42- Bina tipi 21y ve 22y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



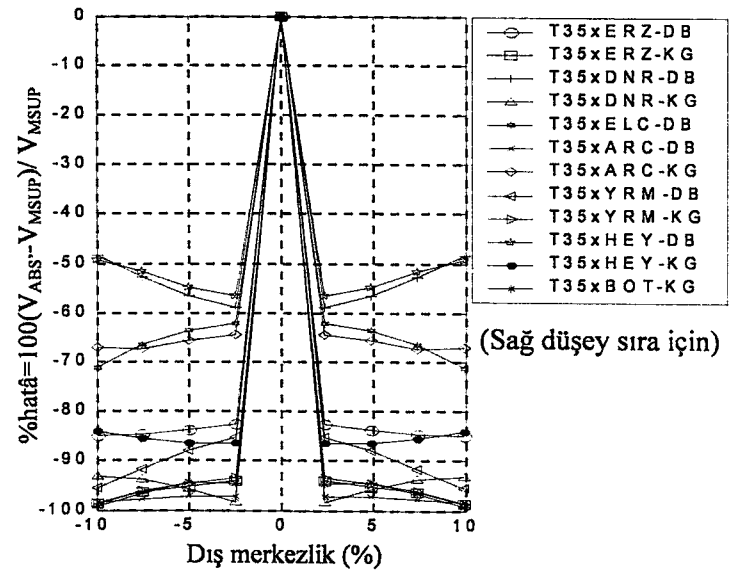
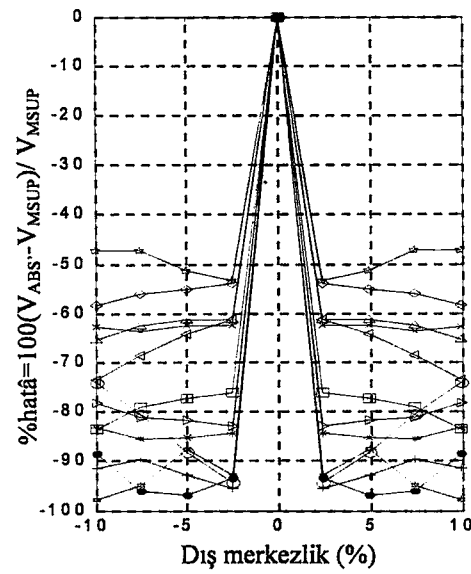
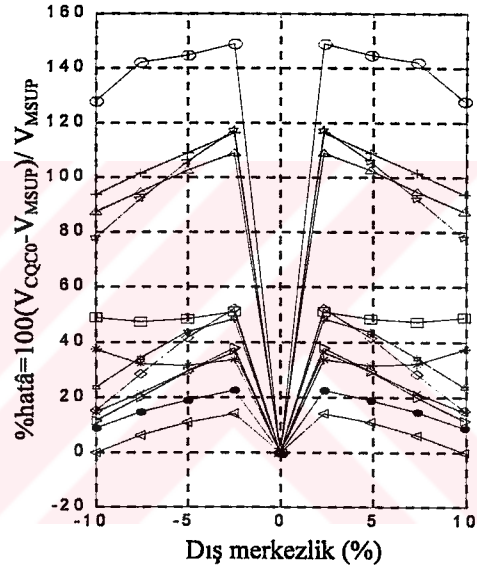
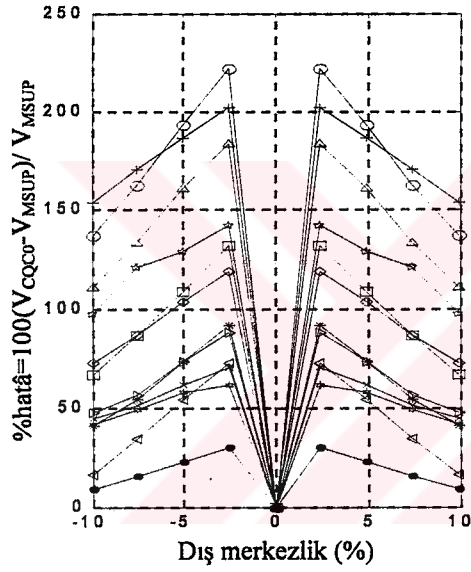
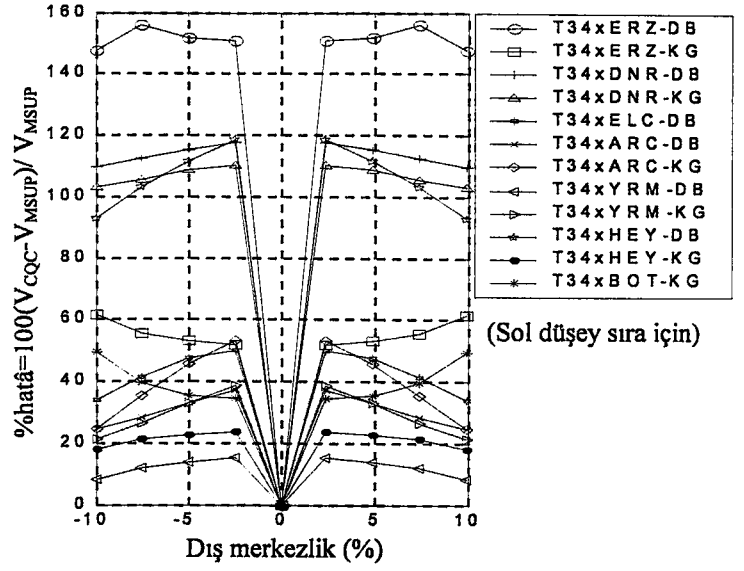
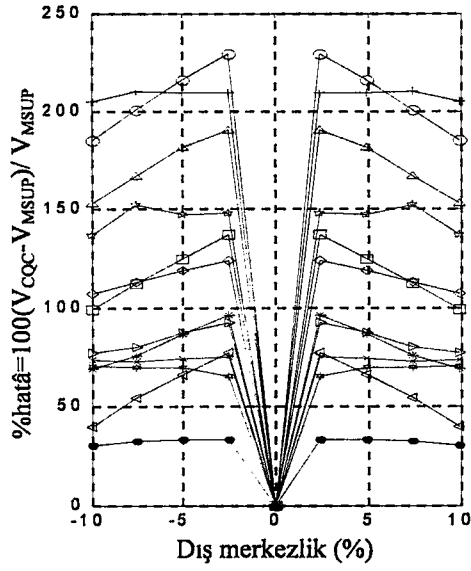
Şekil 4.43- Bina tipi 23y ve 24y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



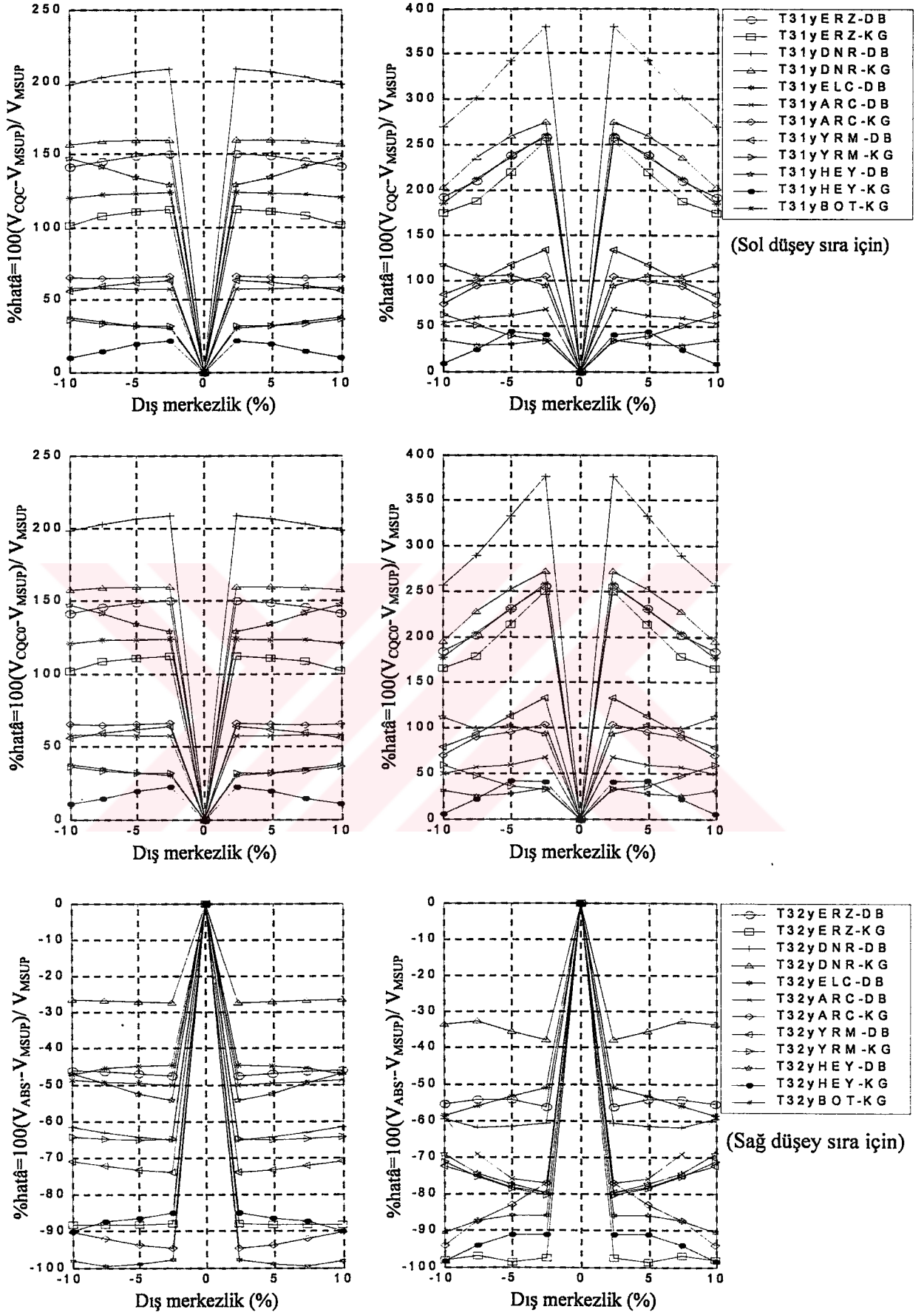
Şekil 4.44- Bina tipi 25y ve 31x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



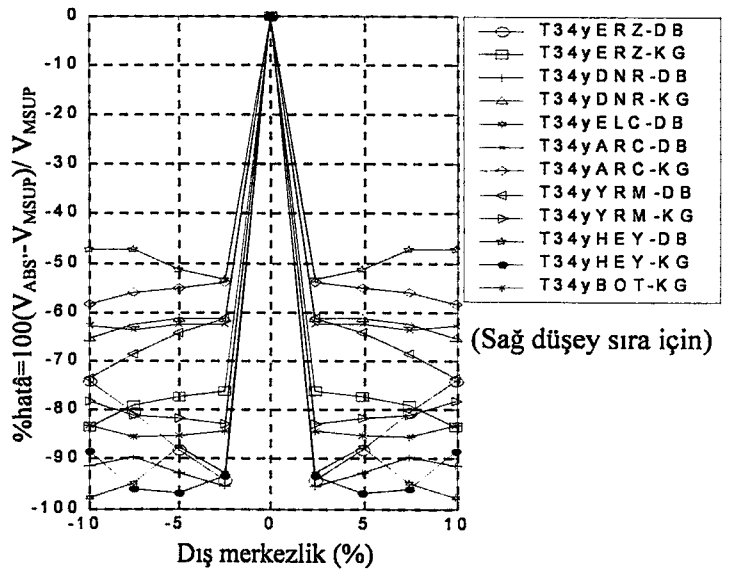
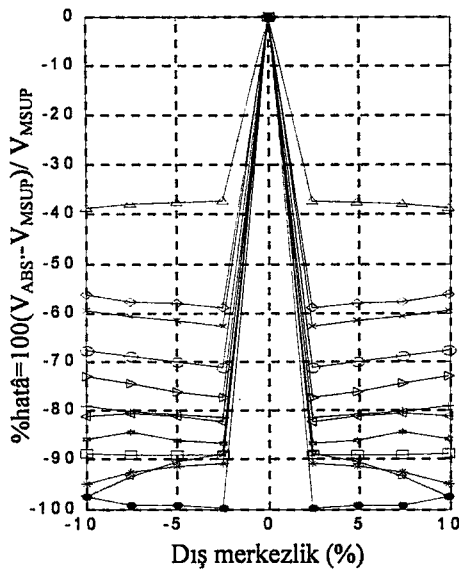
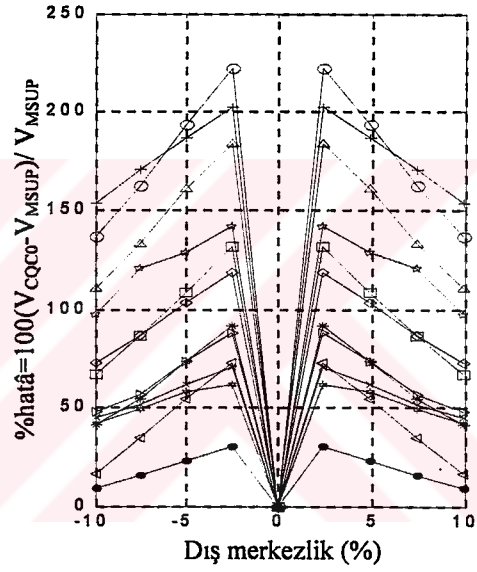
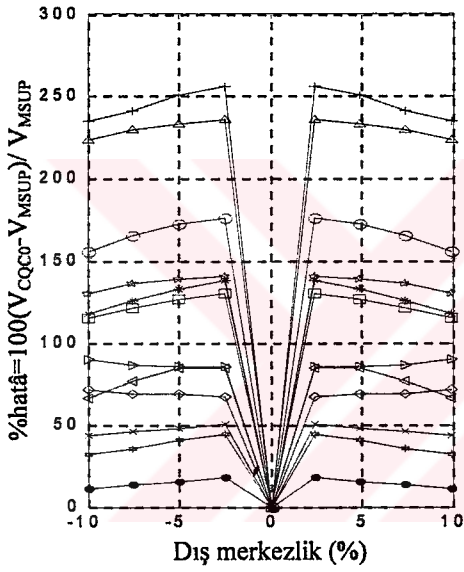
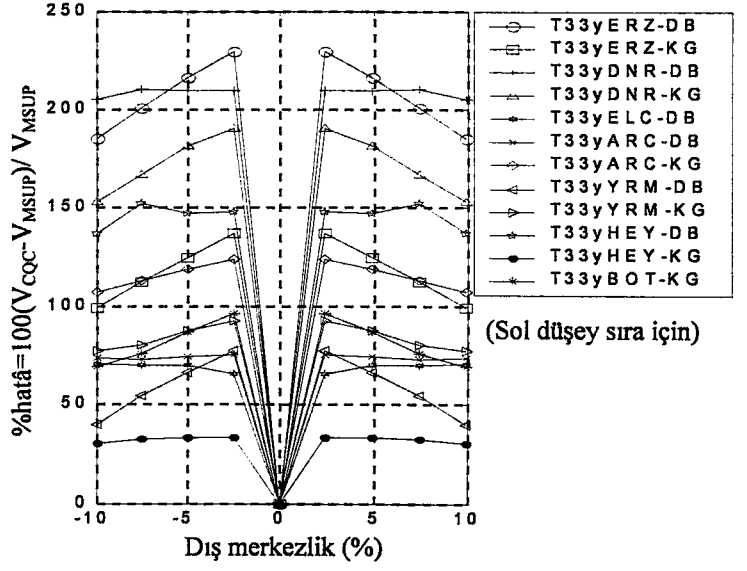
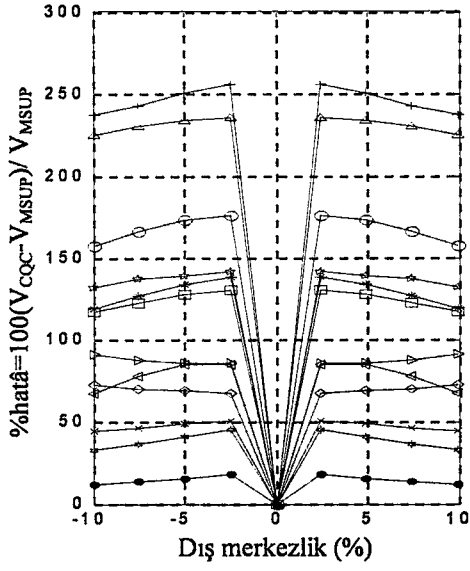
Şekil 4.45- Bina tipi 32x ve 33x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



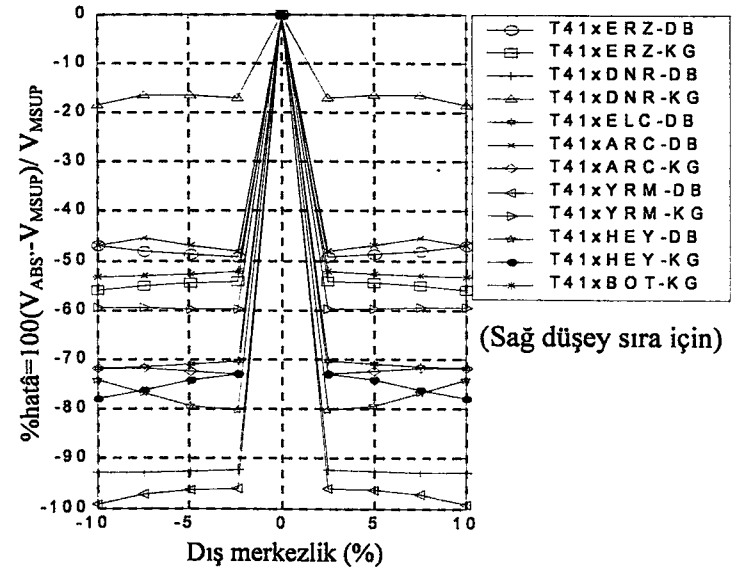
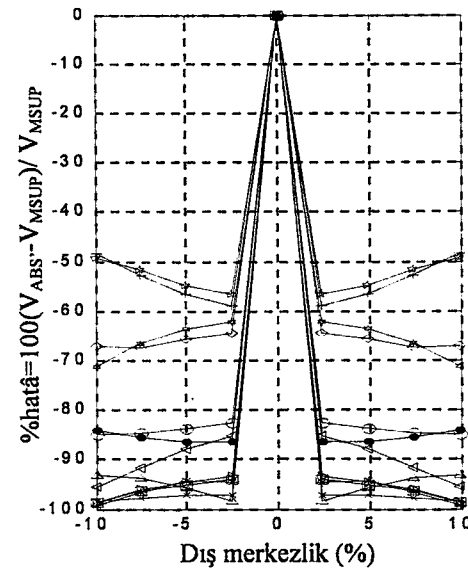
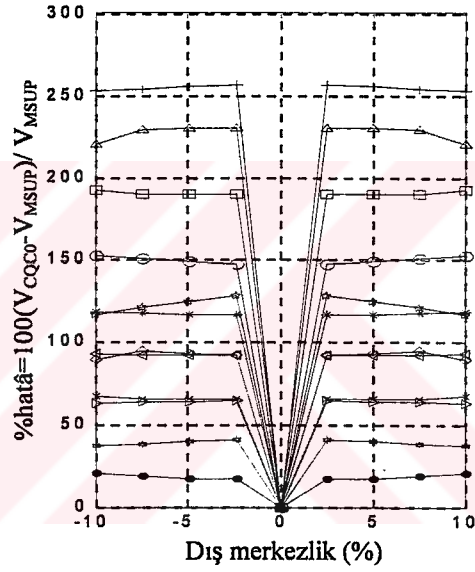
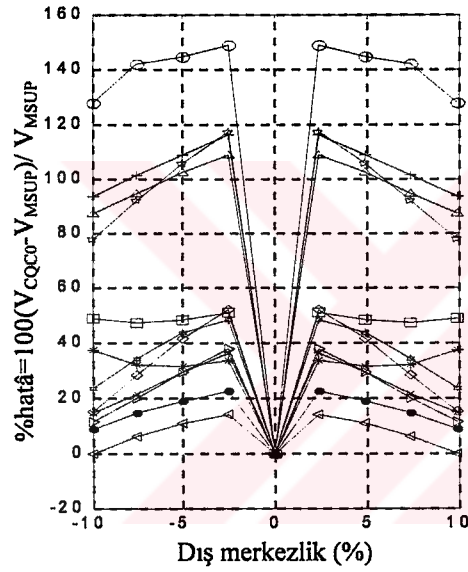
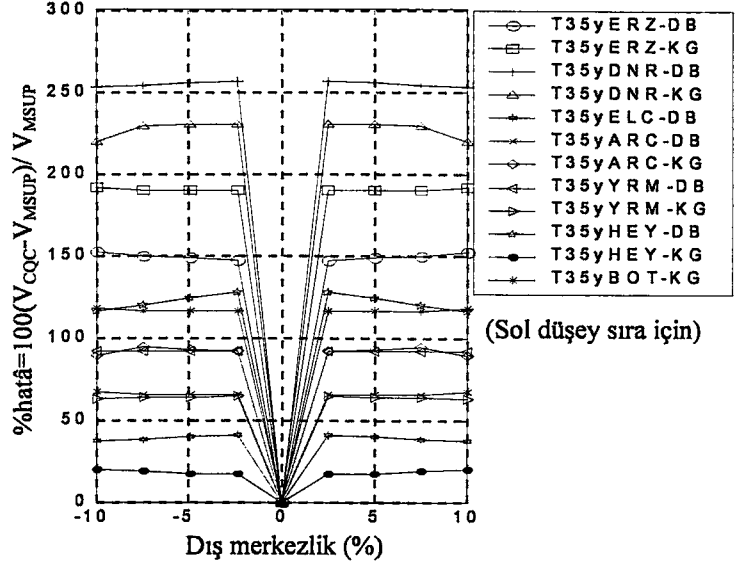
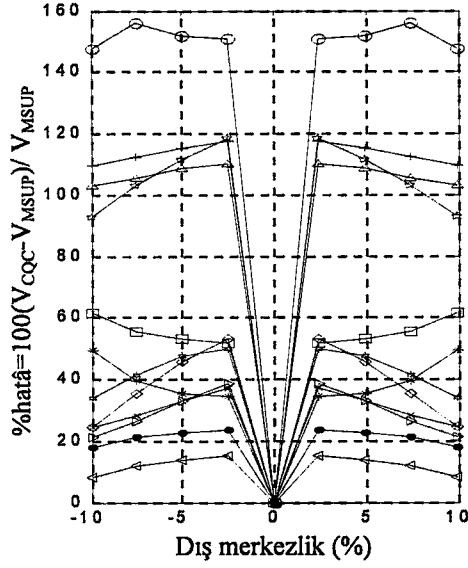
Şekil 4.46- Bina tipi 34x ve 35x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



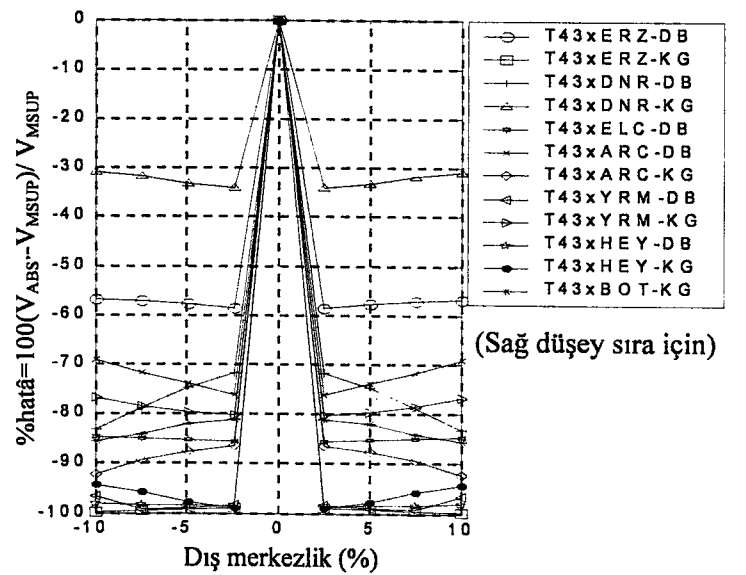
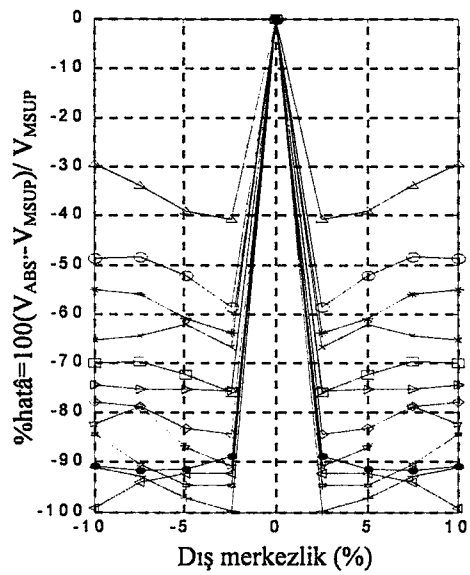
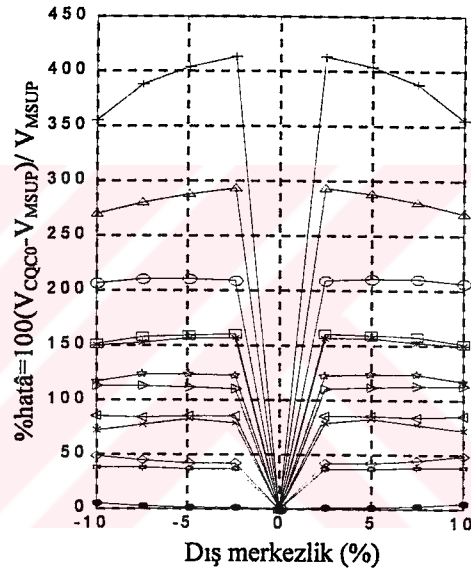
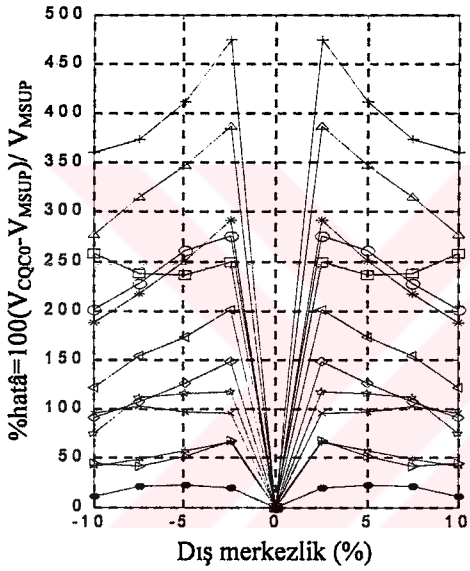
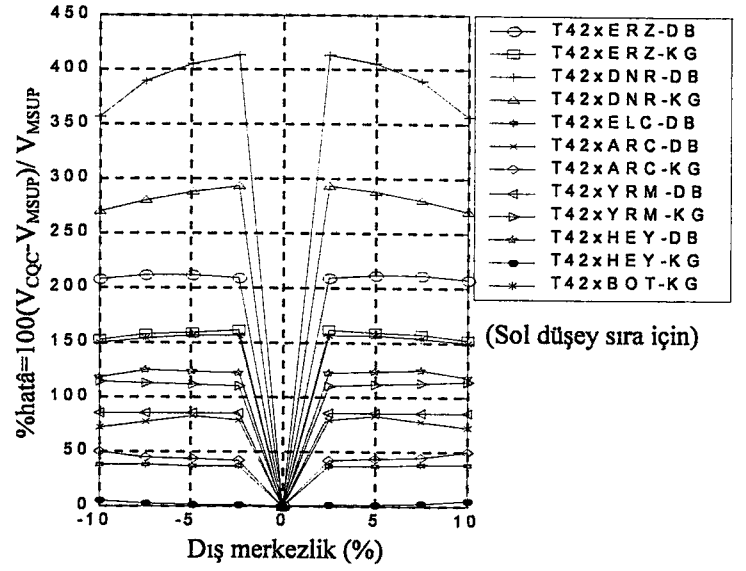
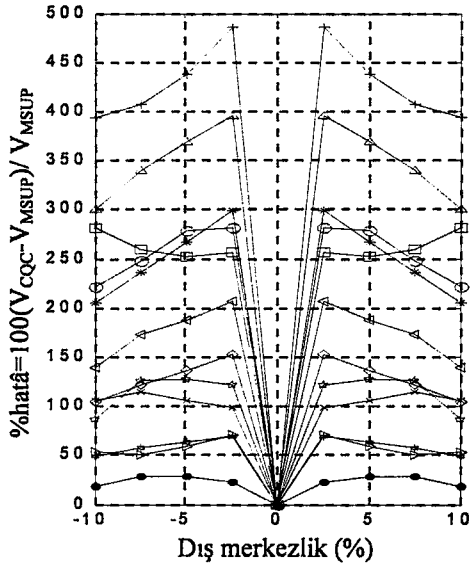
Şekil 4.47- Bina tipi 31y ve 32y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



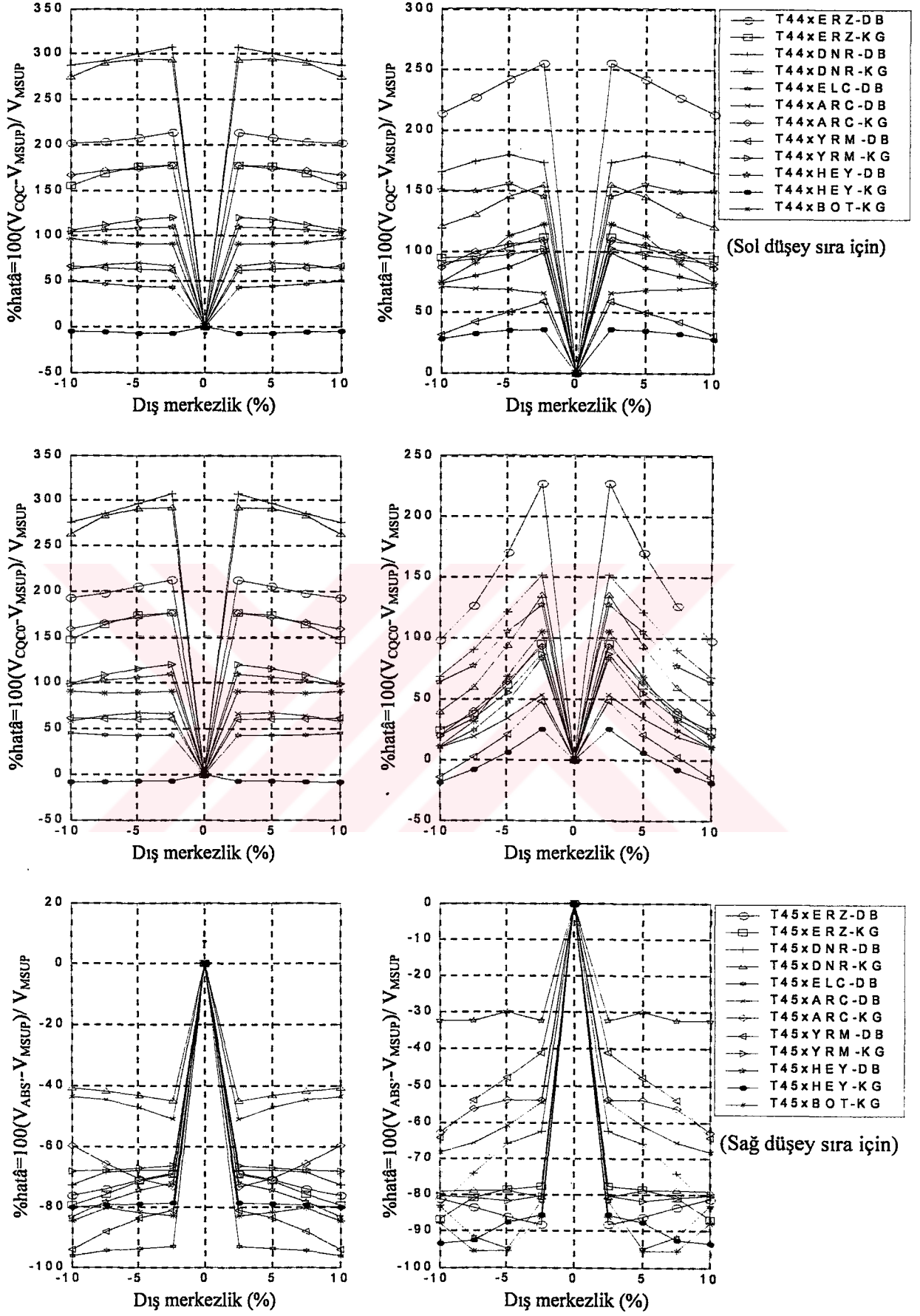
Şekil 4.48- Bina tipi 33y ve 34y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



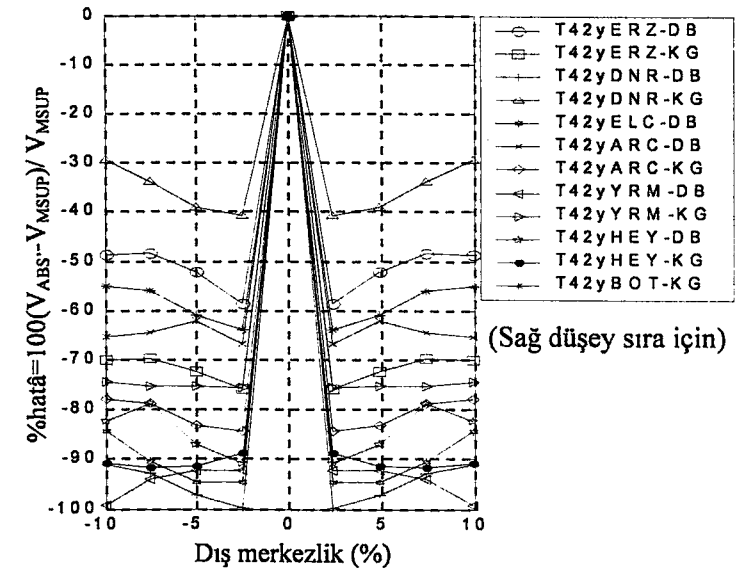
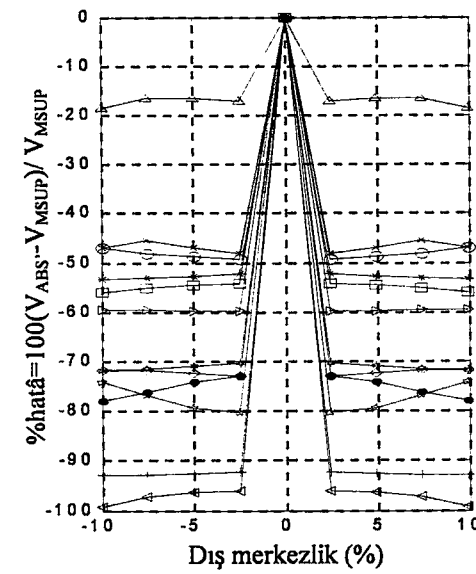
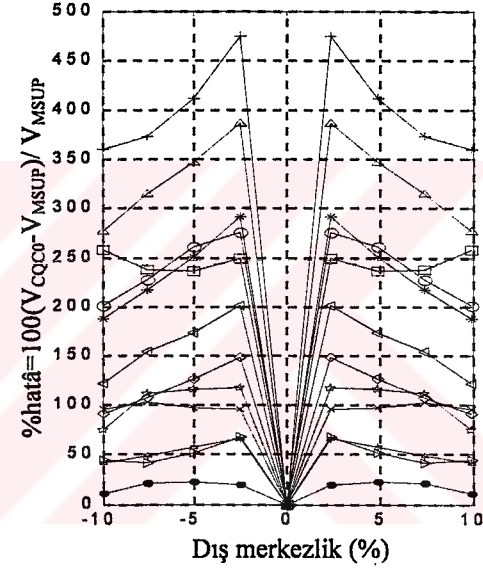
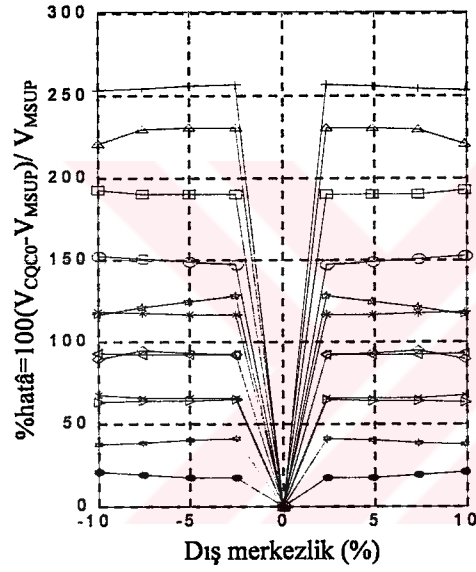
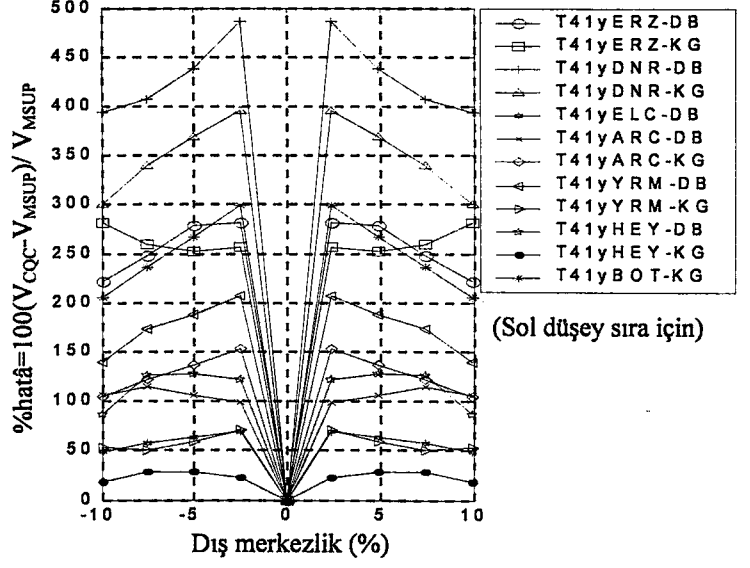
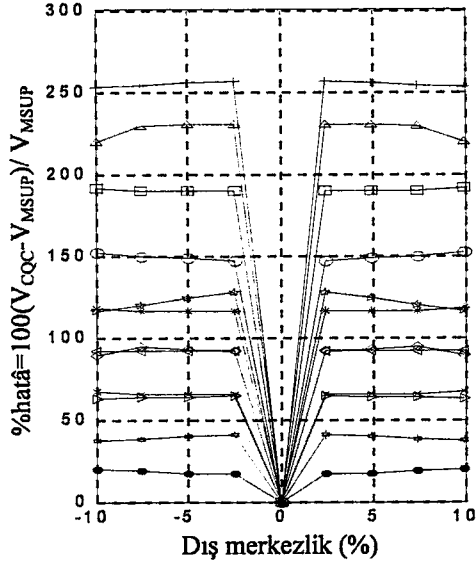
Şekil 4.49- Bina tipi 35y ve 41x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



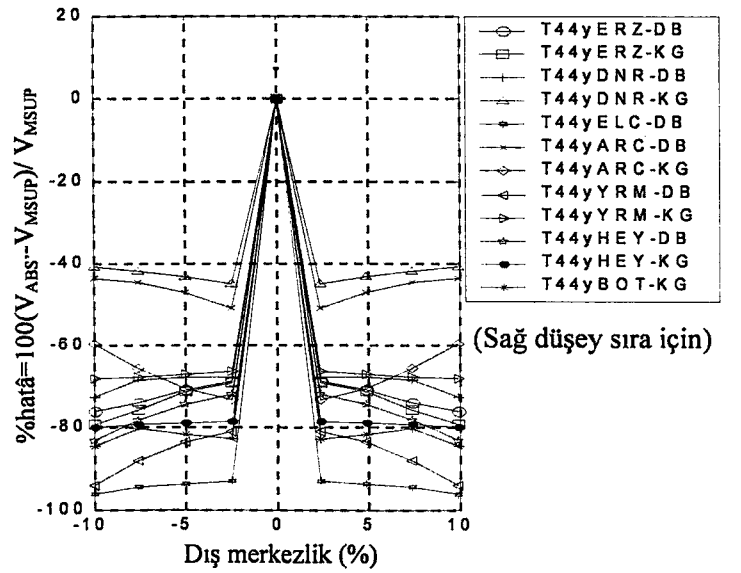
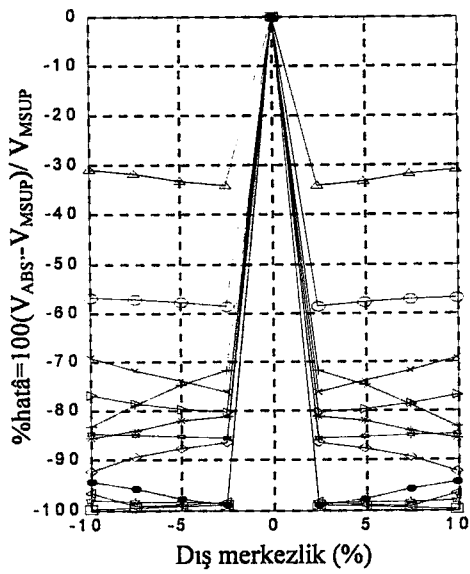
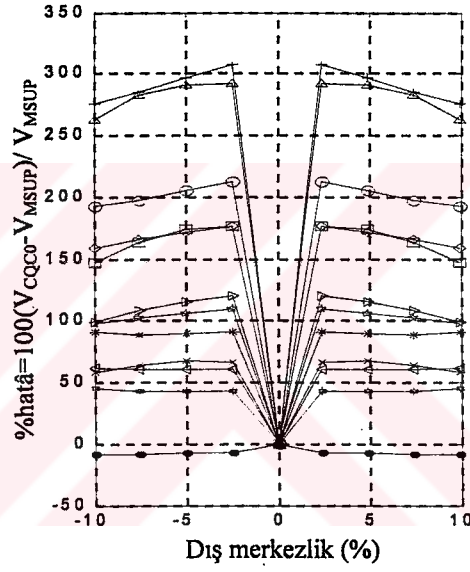
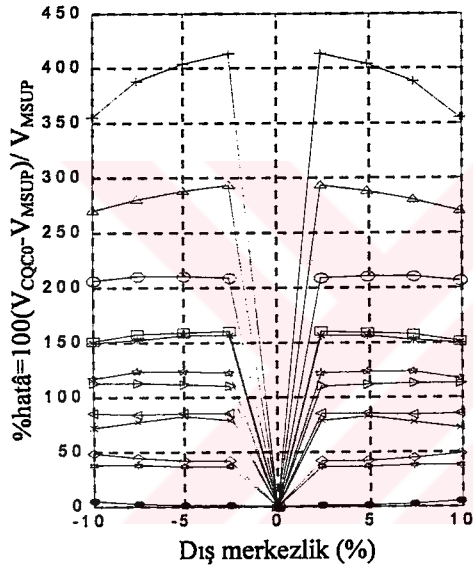
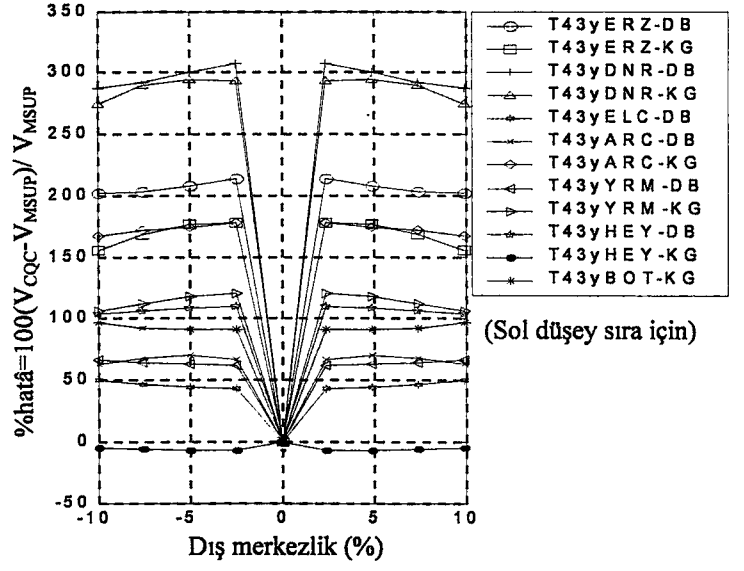
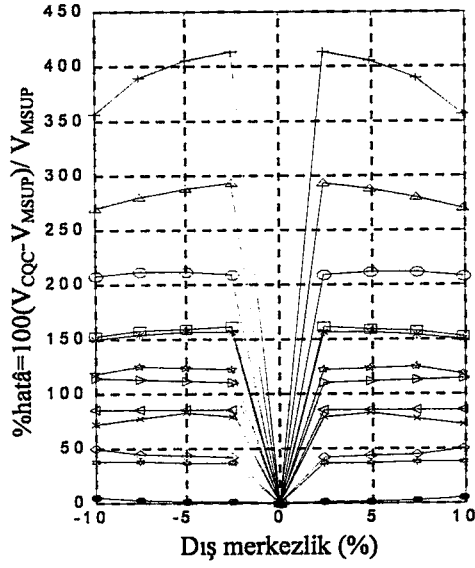
Şekil 4.50- Bina tipi 42x ve 43x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



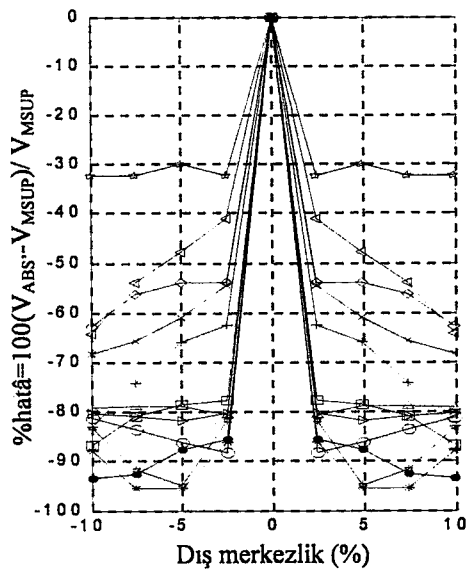
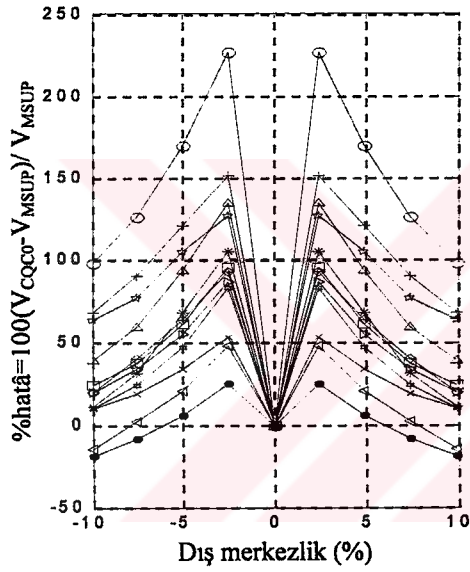
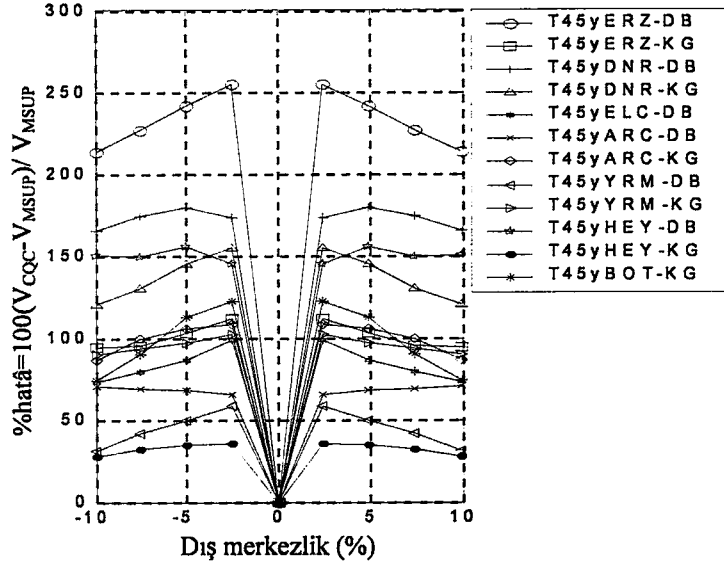
Şekil 4.51- Bina tipi 44x ve 45x, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



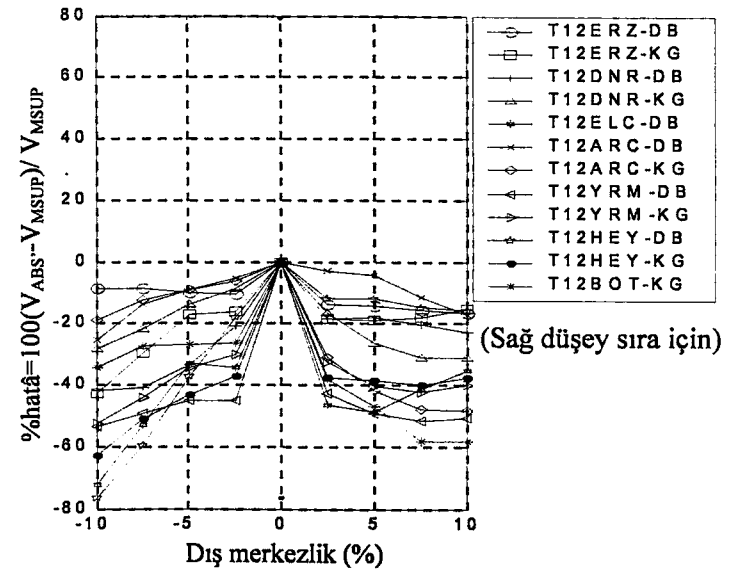
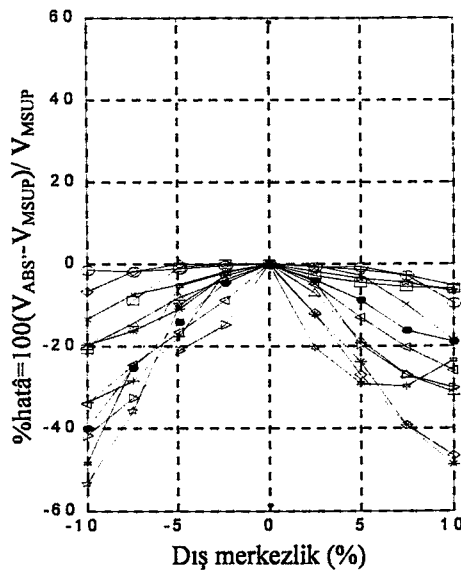
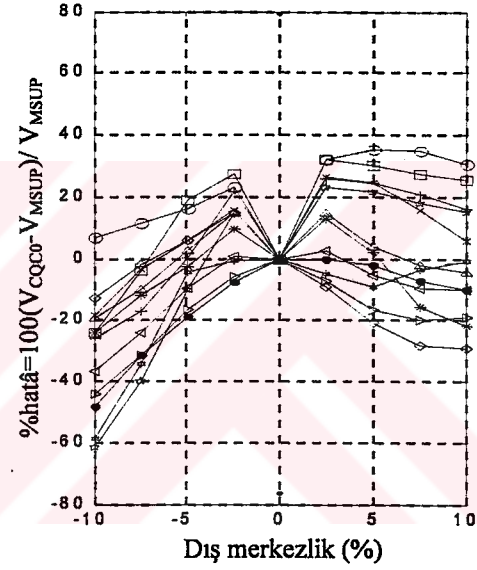
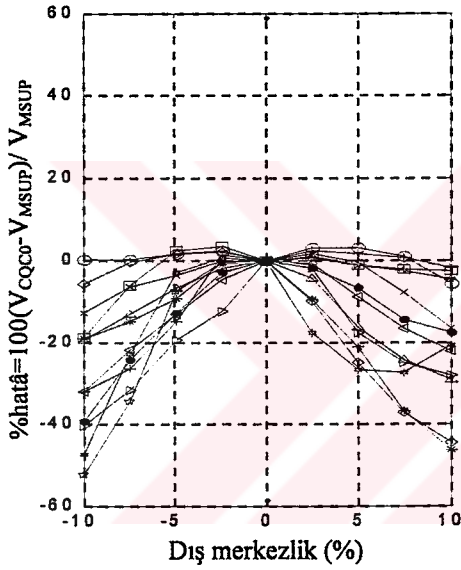
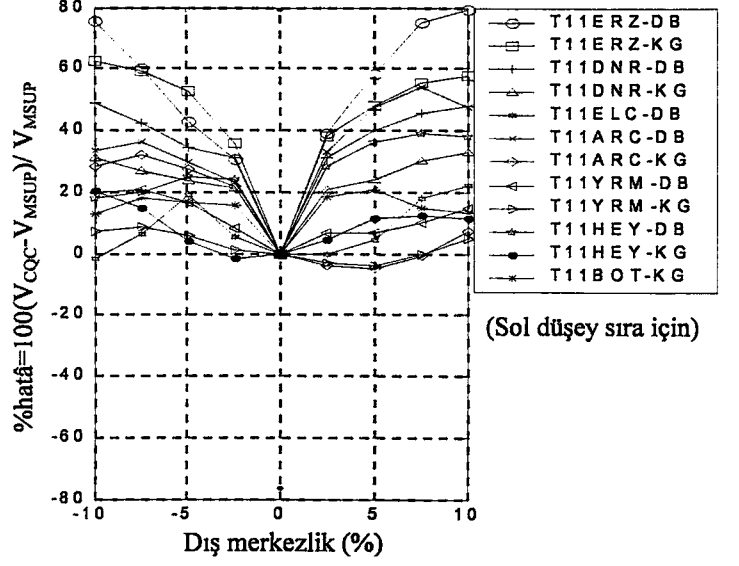
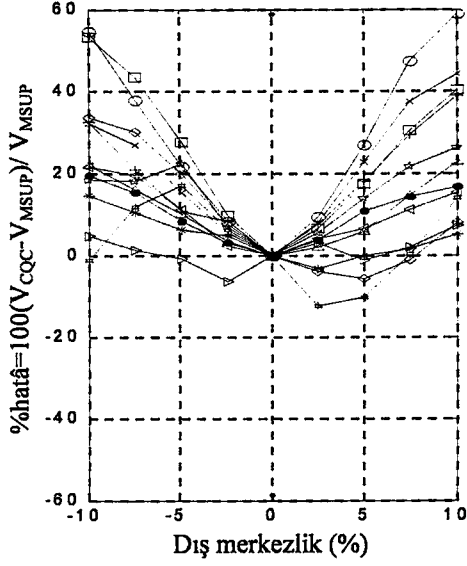
Şekil 4.52- Bina tipi 41y ve 42y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



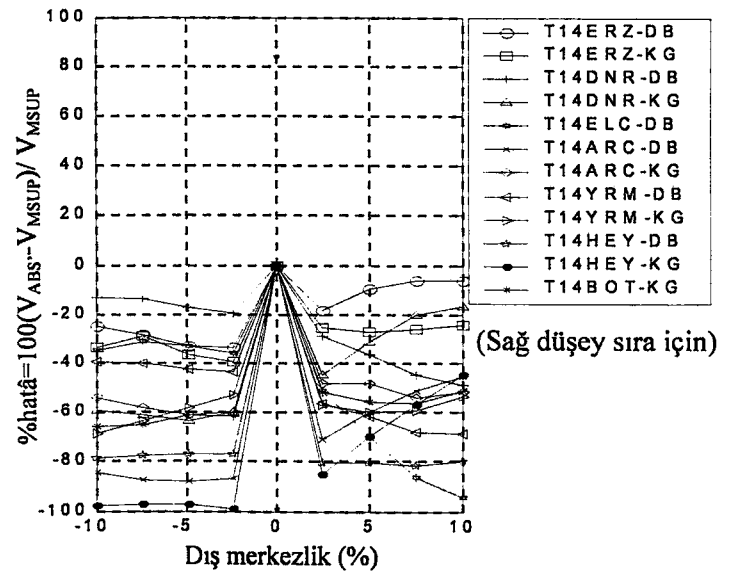
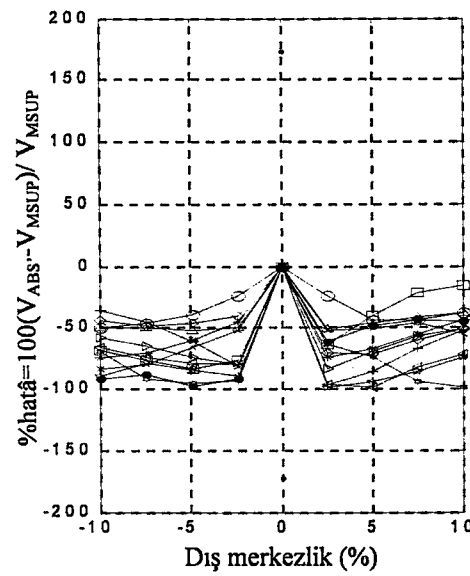
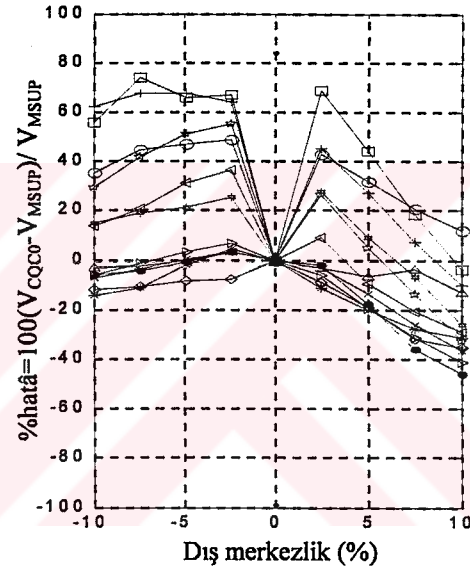
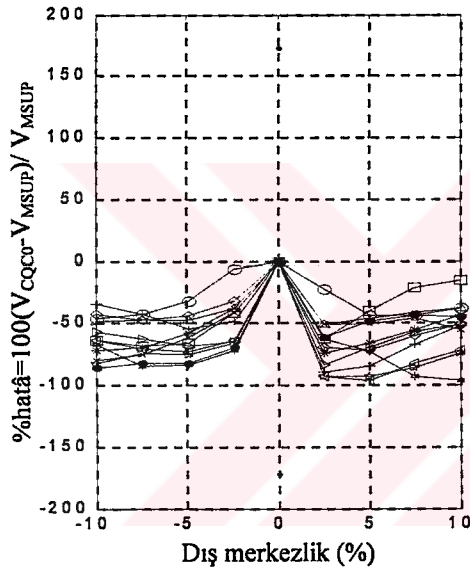
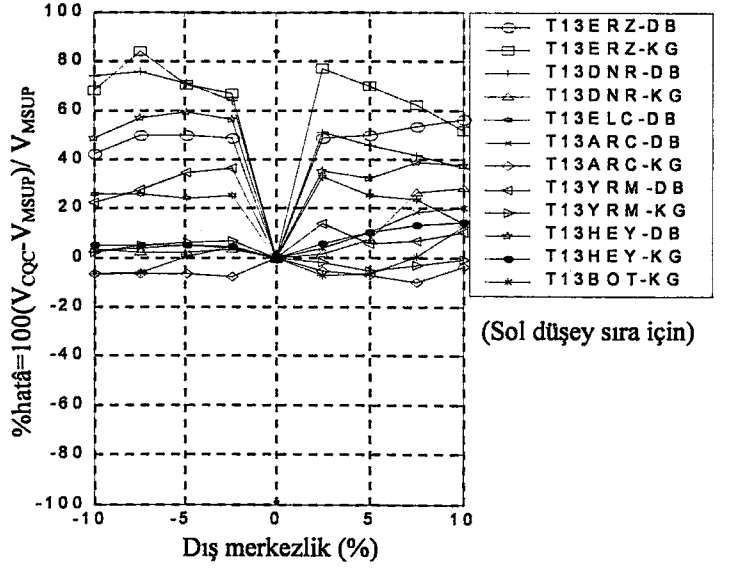
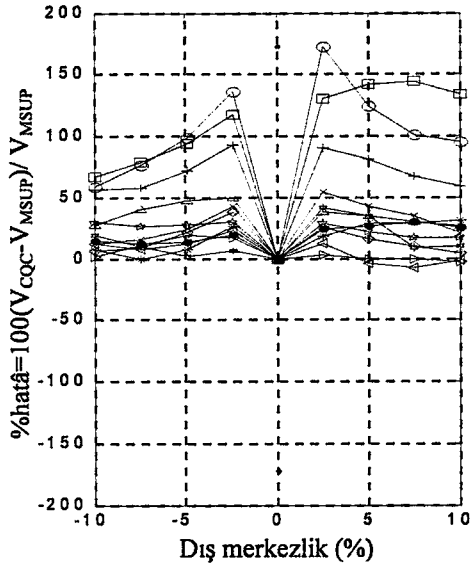
Şekil 4.53- Bina tipi 43y ve 44y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



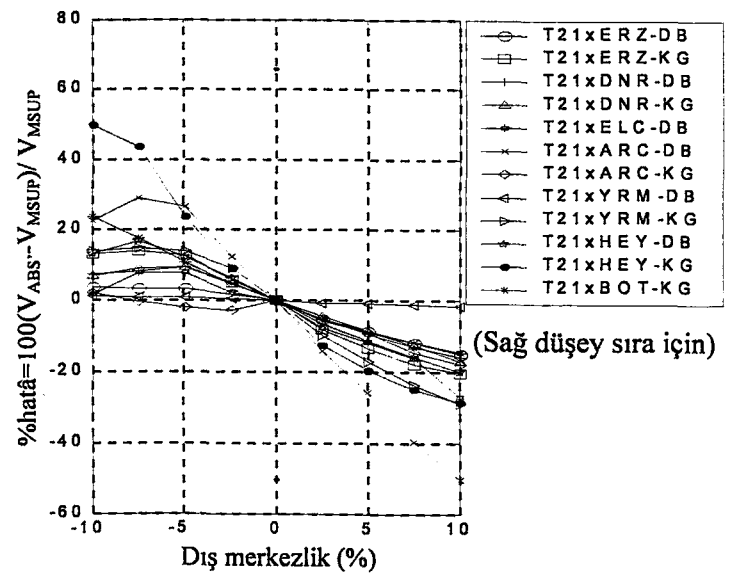
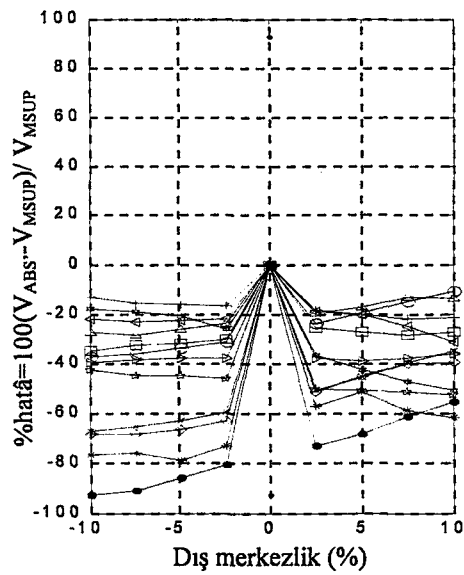
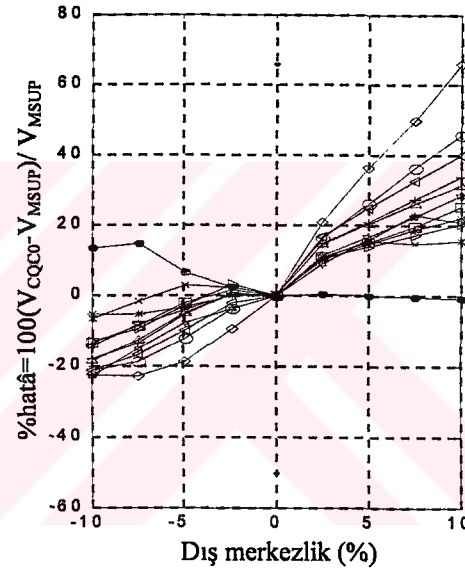
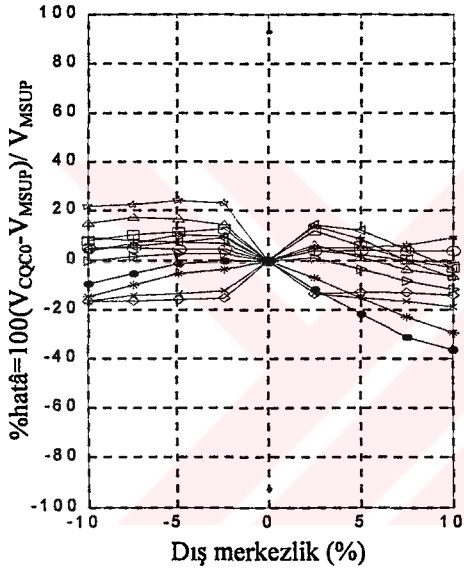
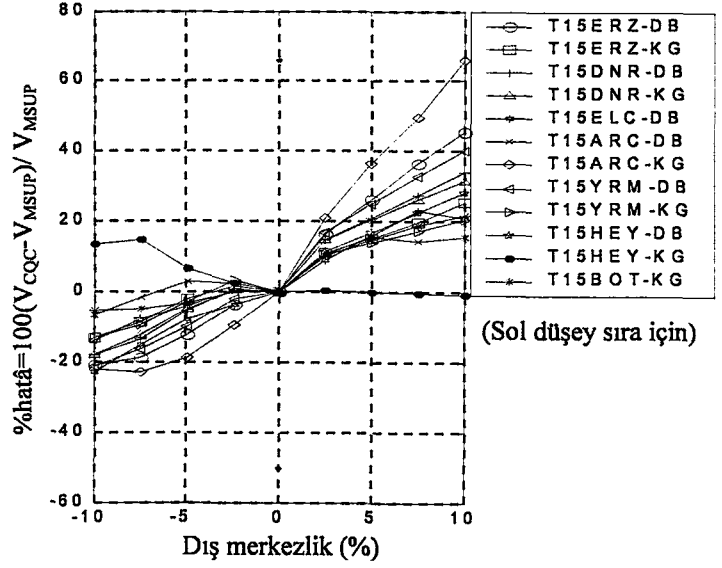
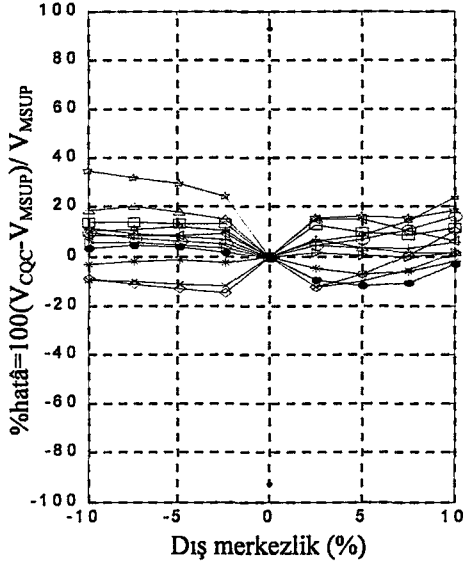
Şekil 4.54- Bina tipi 45y, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y hatâ grafiği



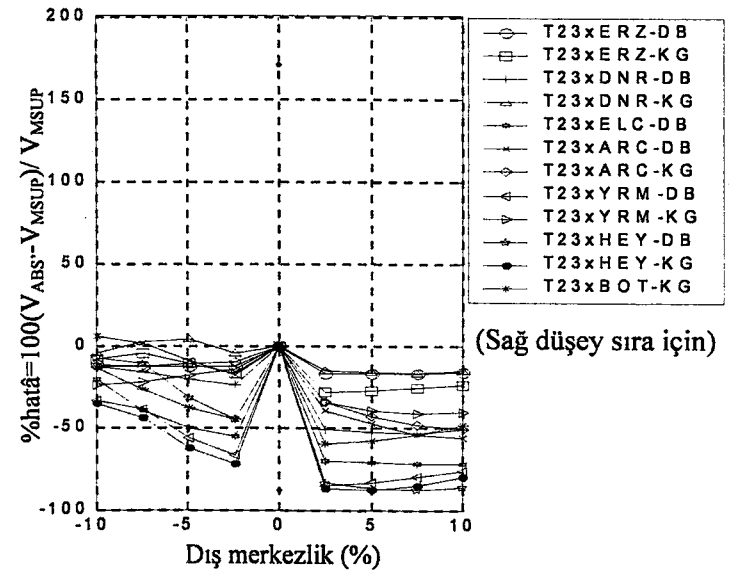
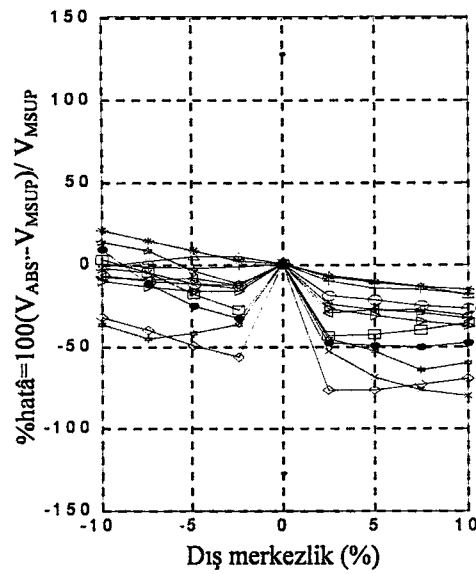
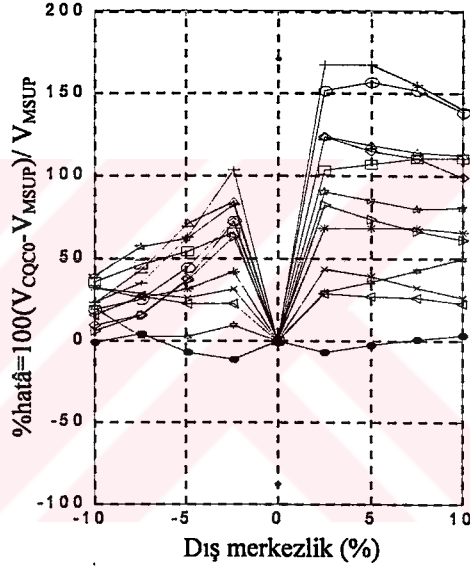
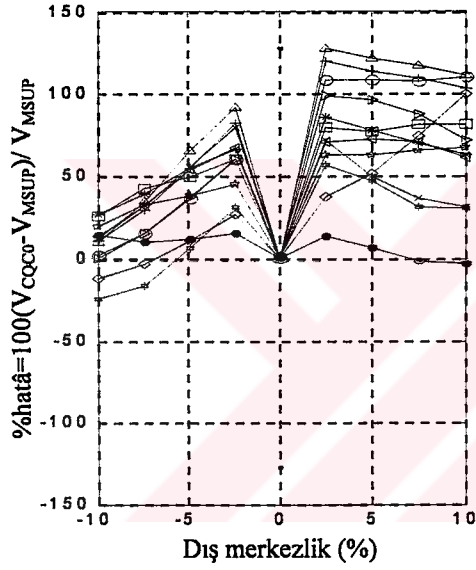
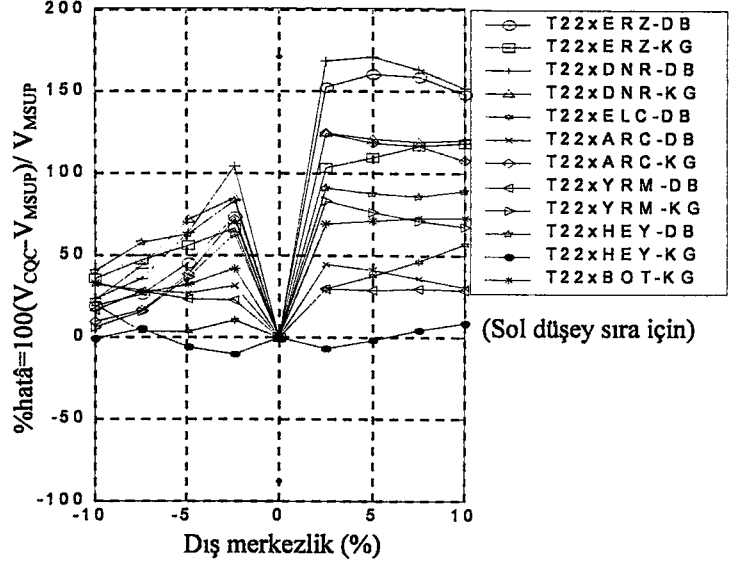
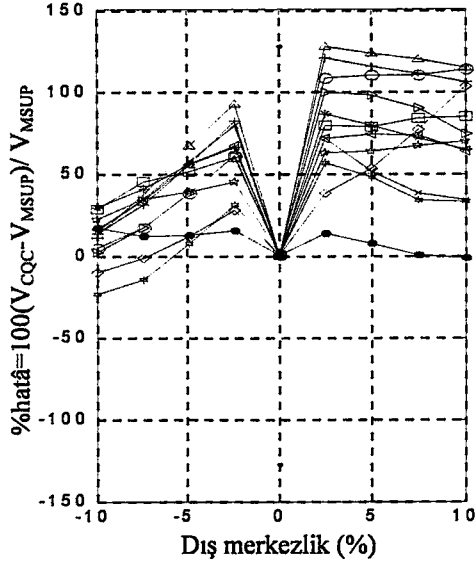
Şekil 4.55- Bina tipi 11 ve 12, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



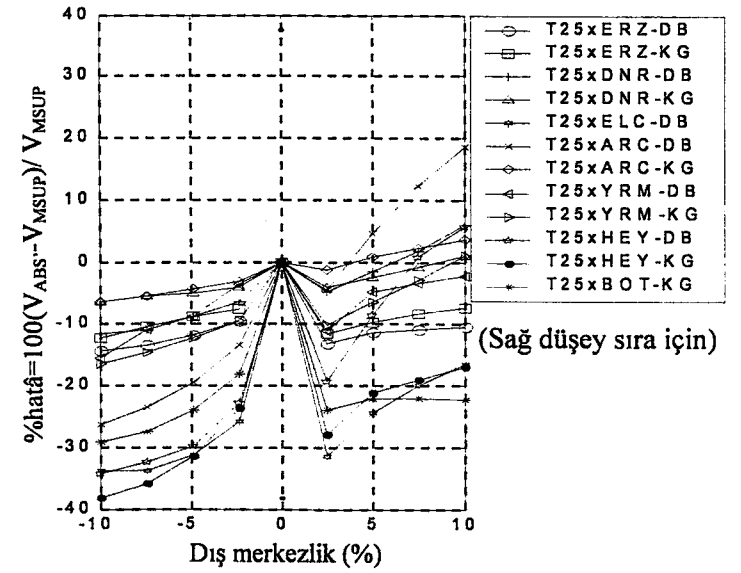
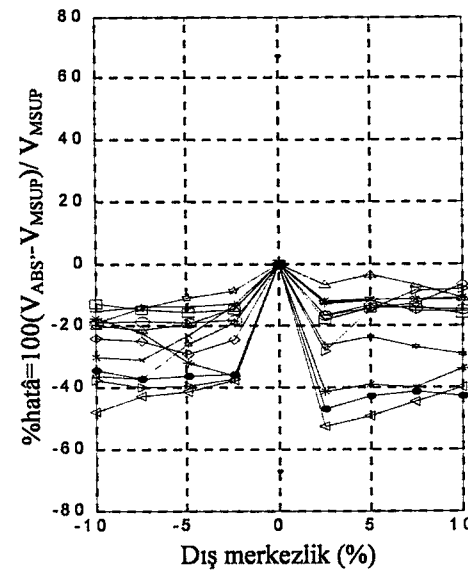
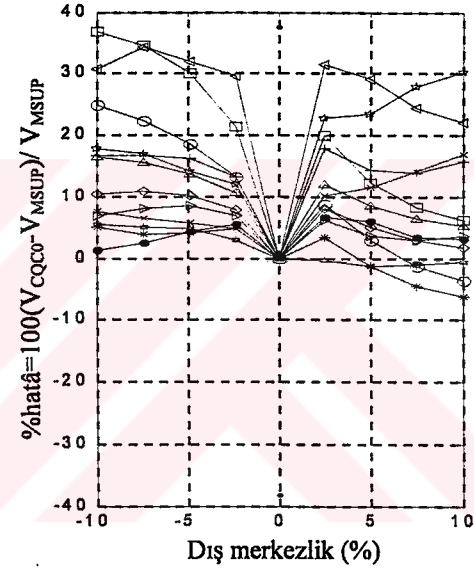
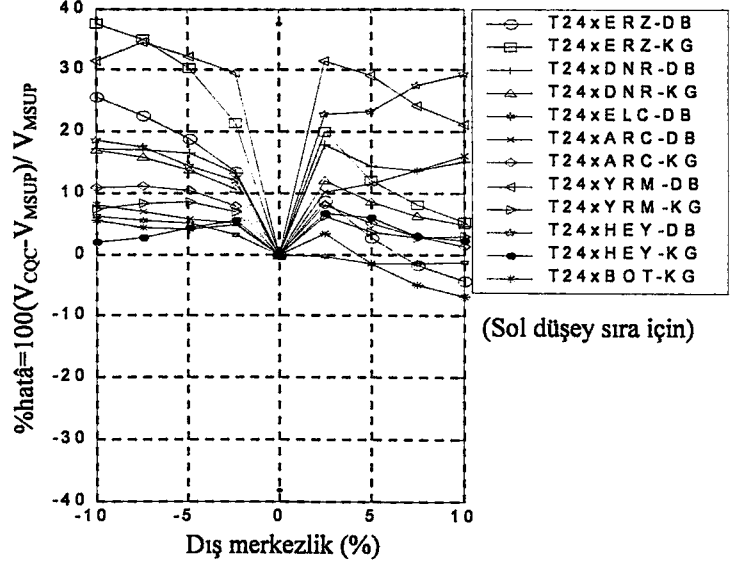
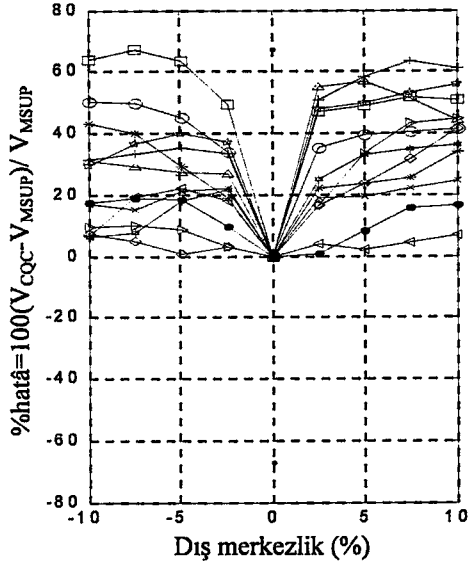
Şekil 4.56- Bina tipi 13 ve 14, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



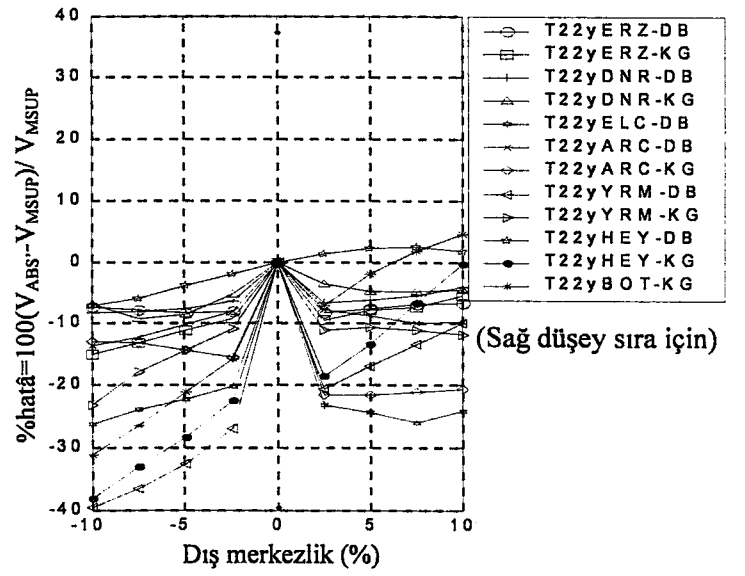
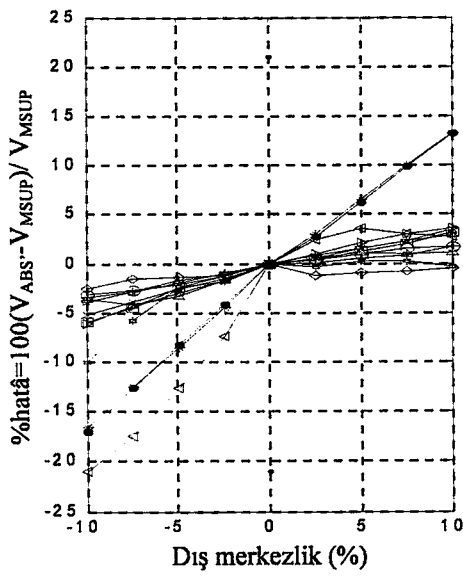
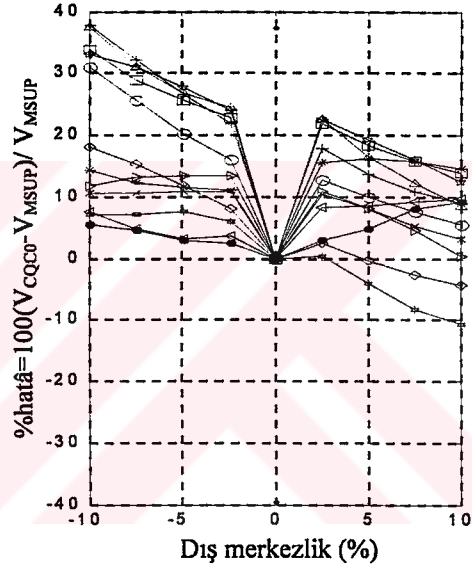
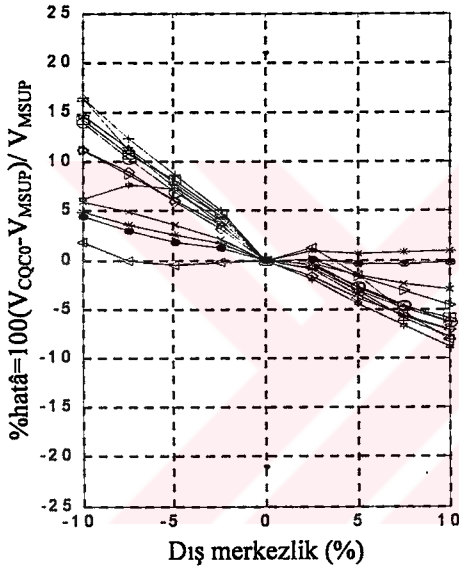
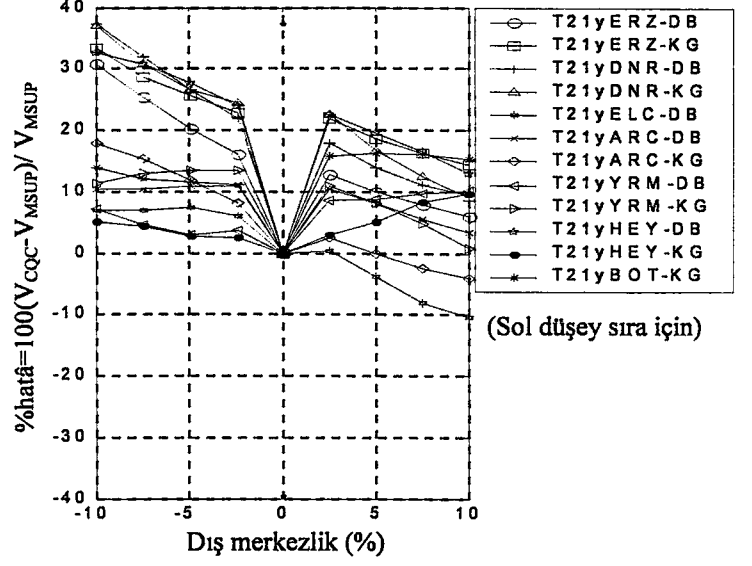
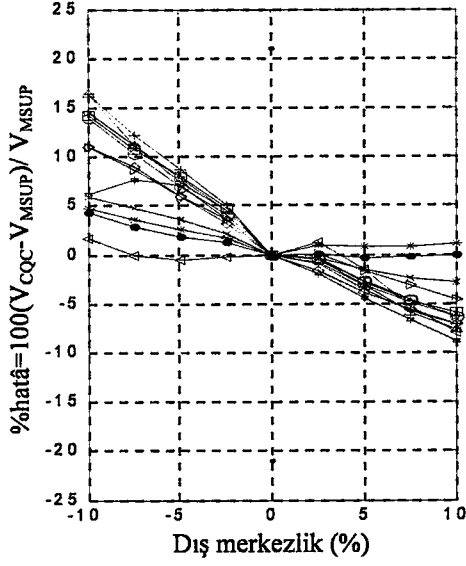
Şekil 4.17- Bina tipi 15 ve 21x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



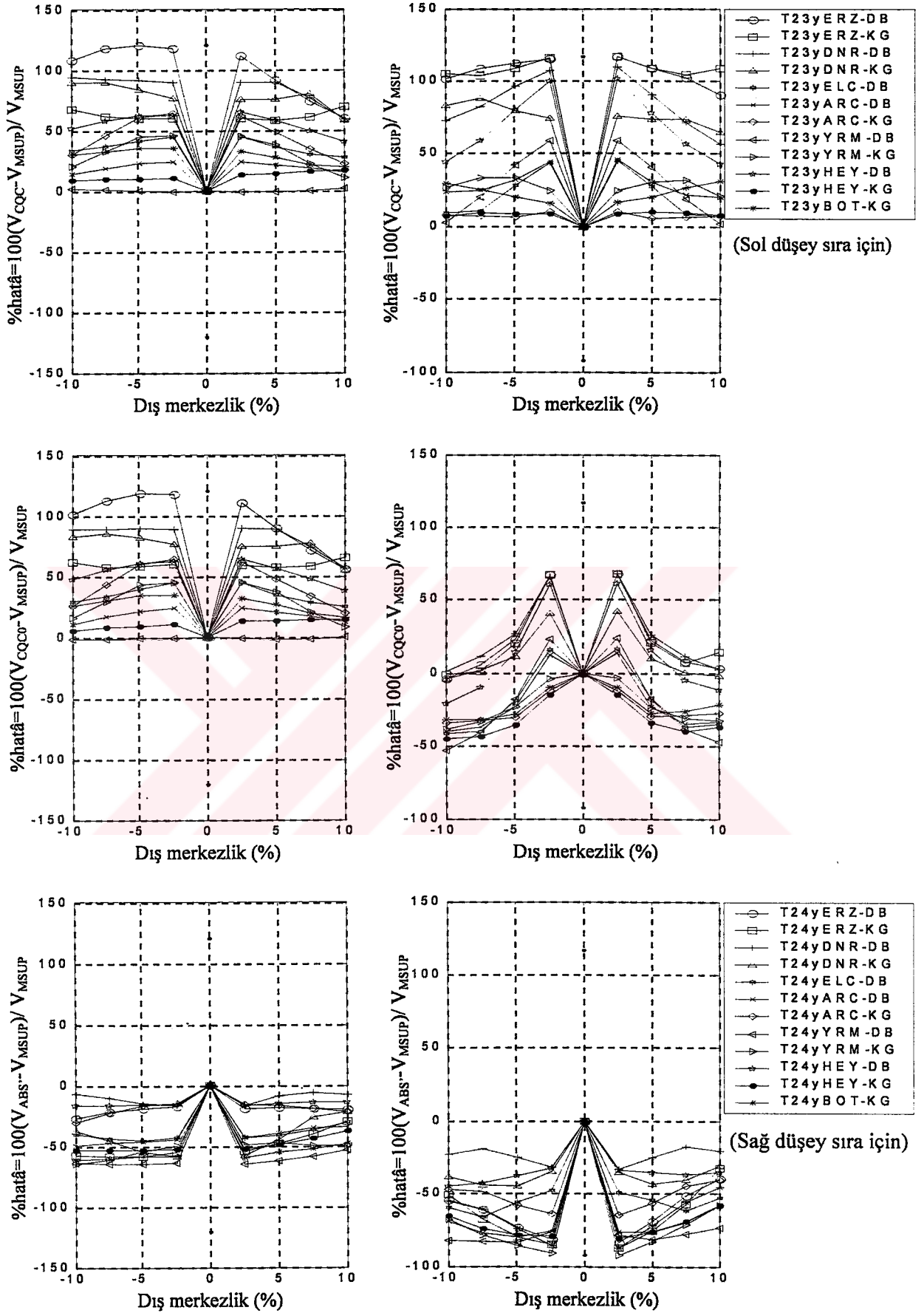
Şekil 4.58- Bina tipi 22x ve 23x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği

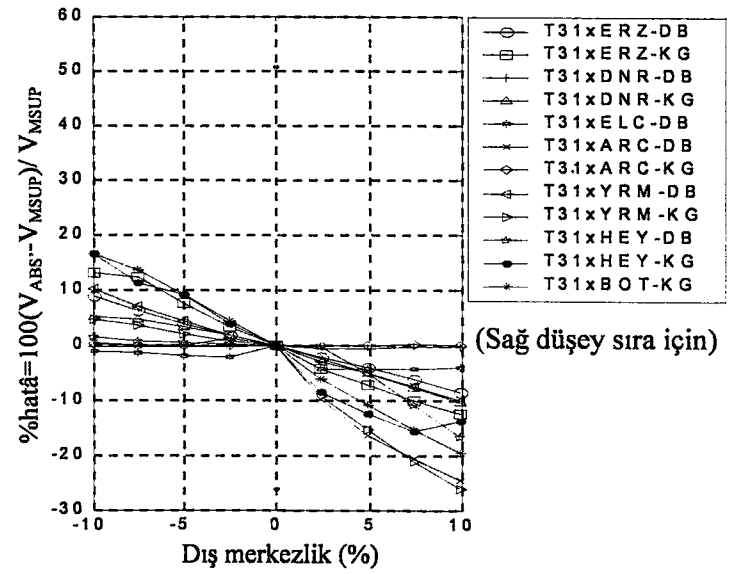
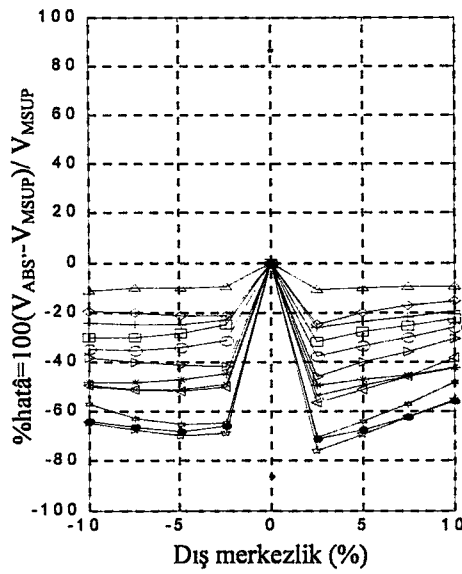
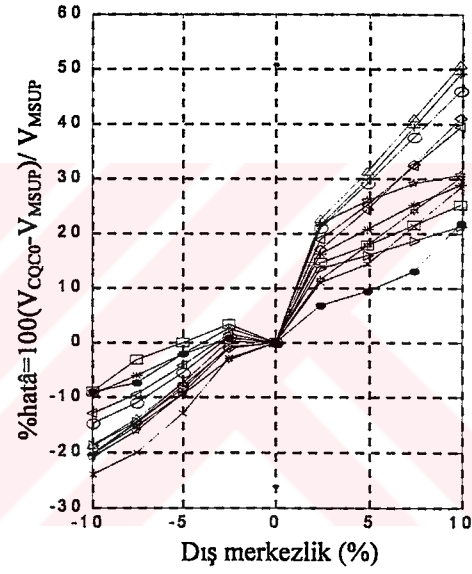
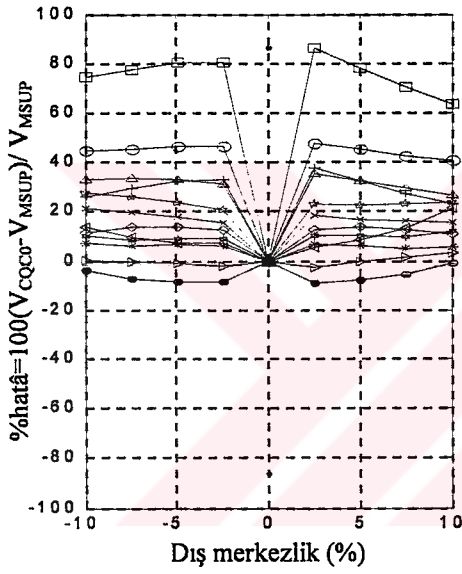
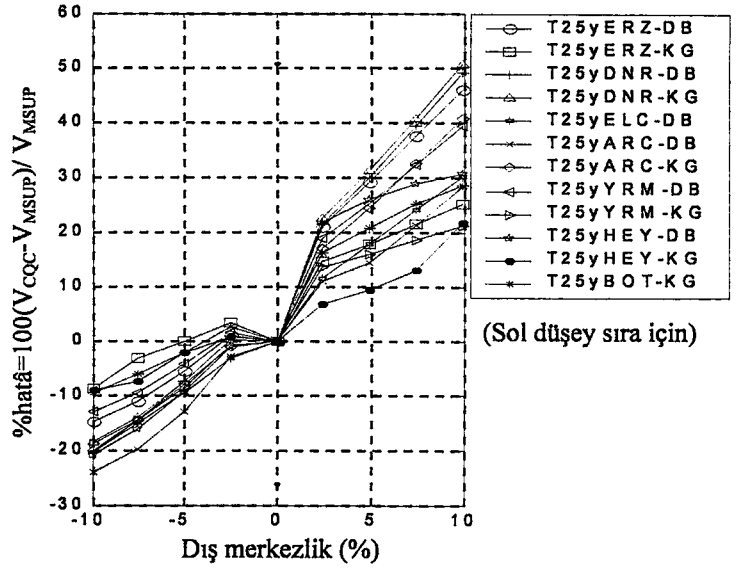
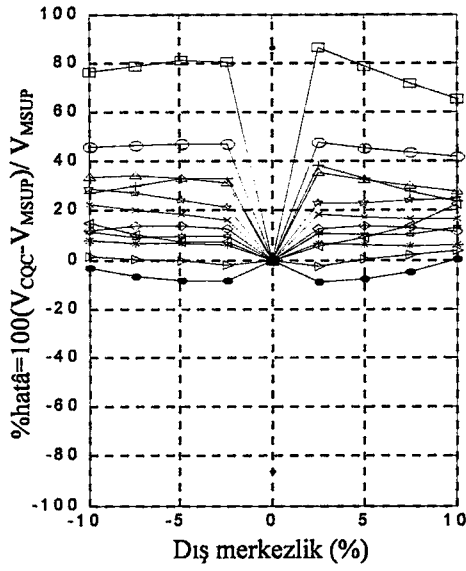


Şekil 4.59- Bina tipi 24x ve 25x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği

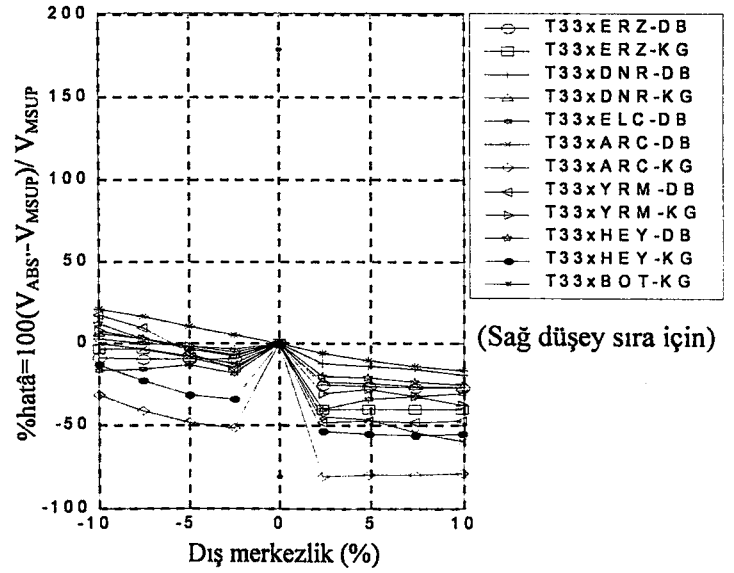
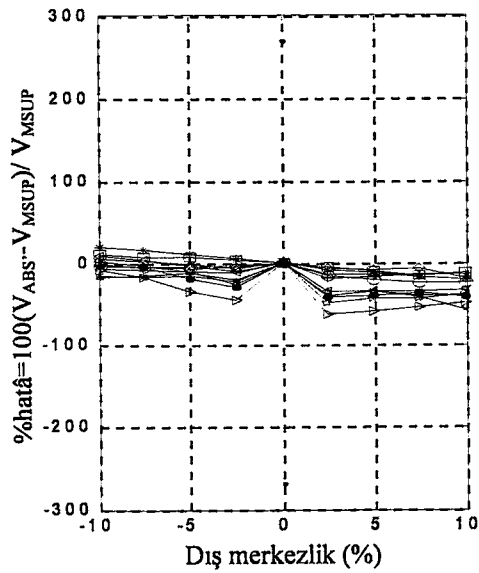
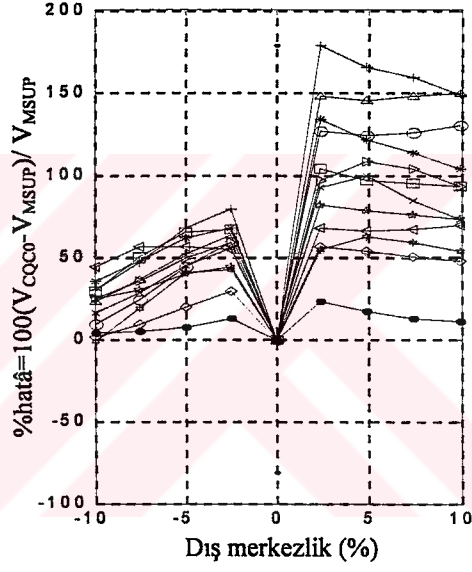
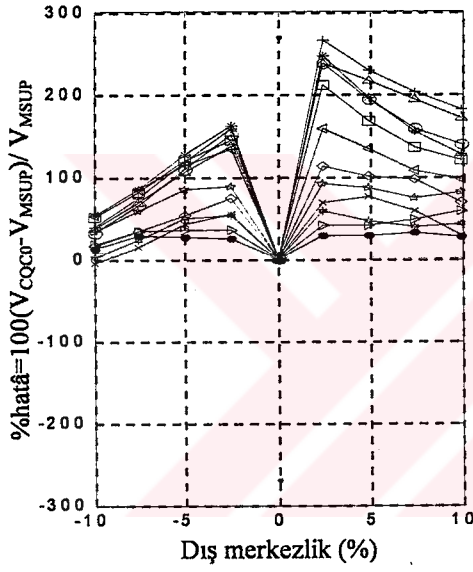
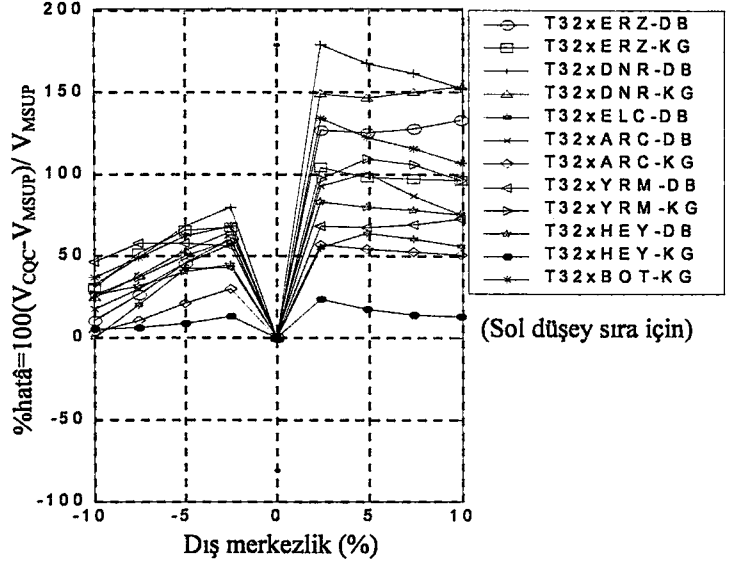
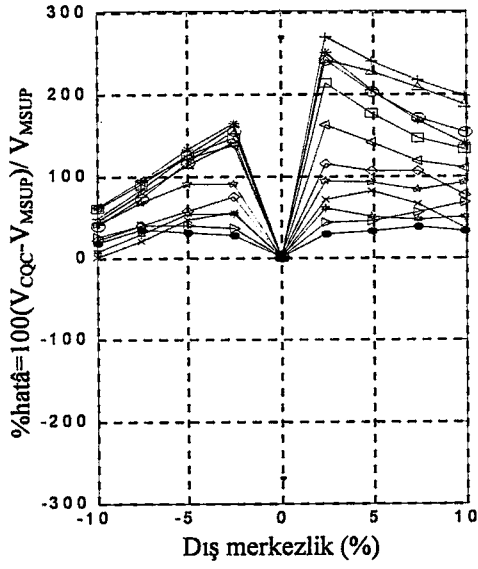


Şekil 4.60- Bina tipi 21y ve 22y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği

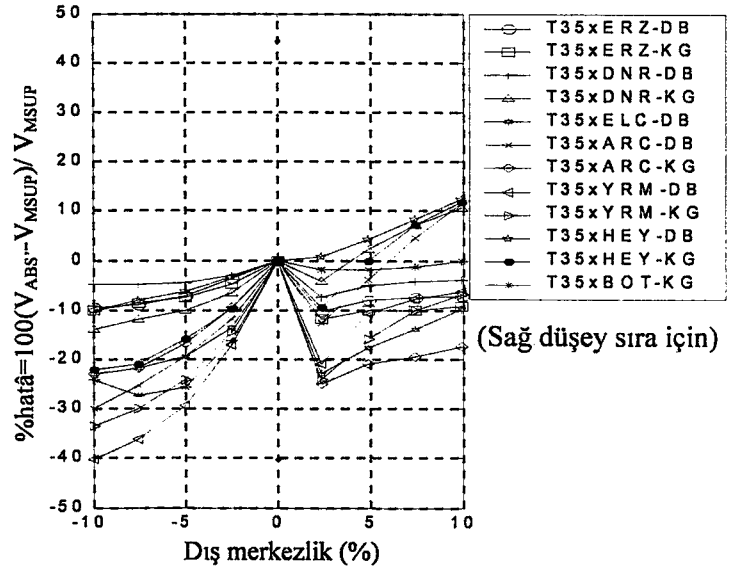
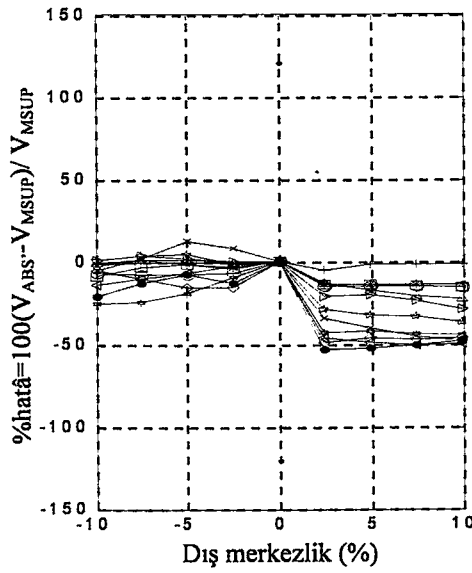
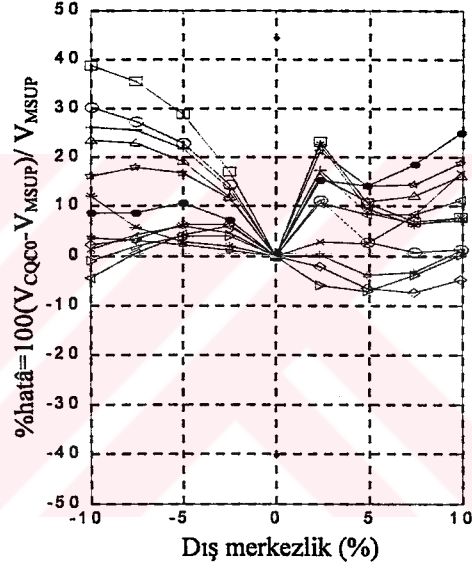
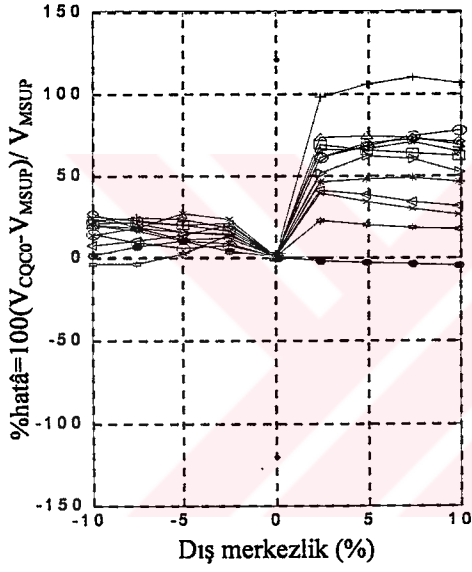
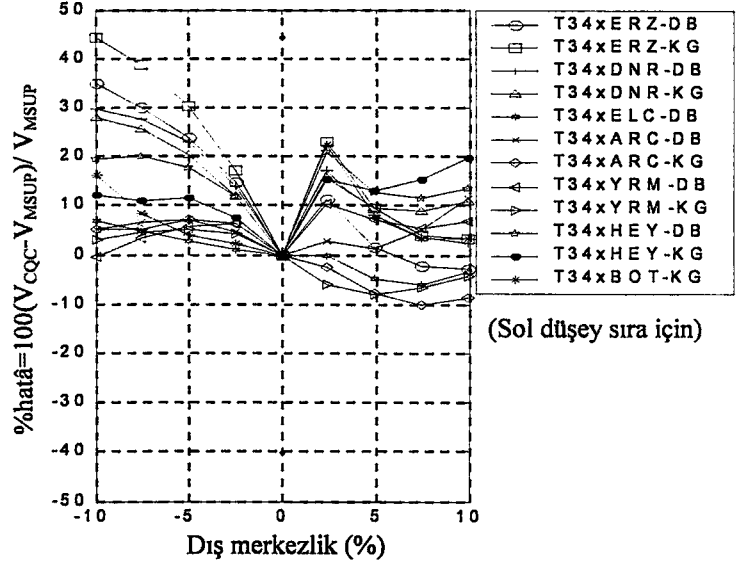
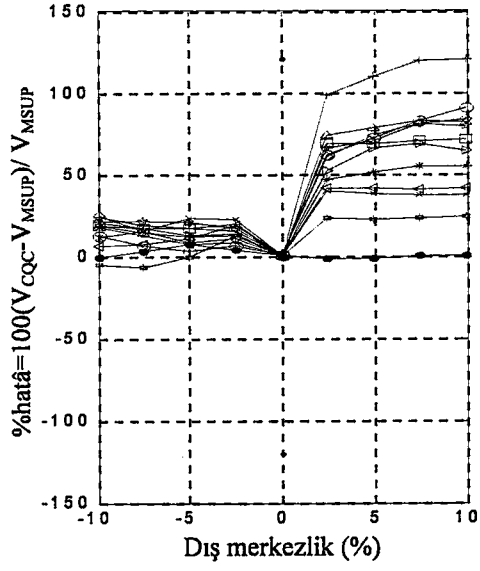




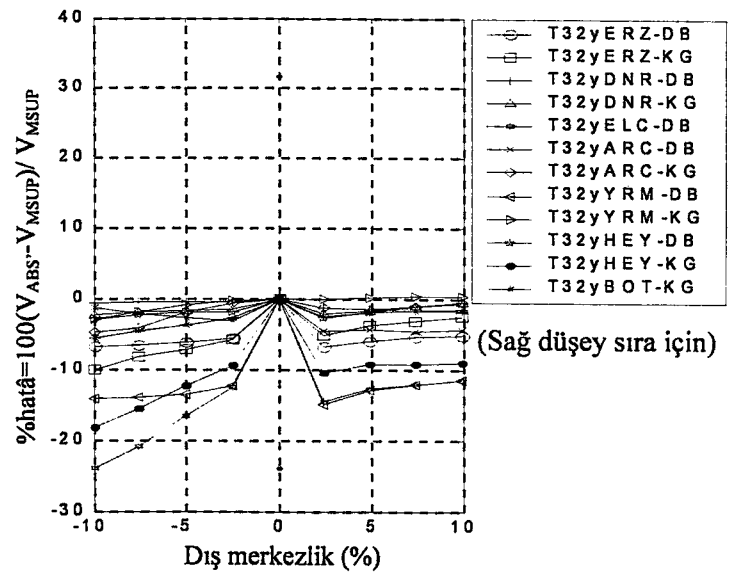
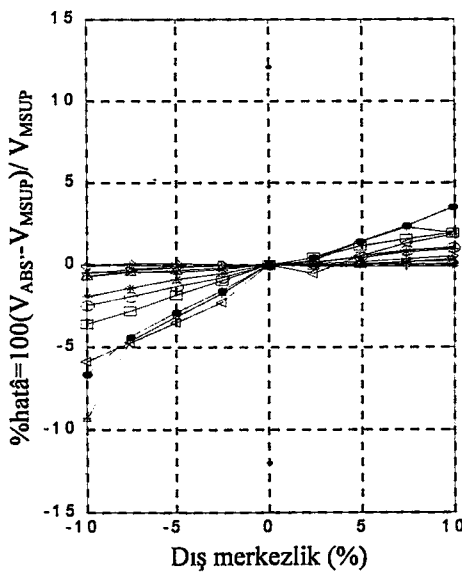
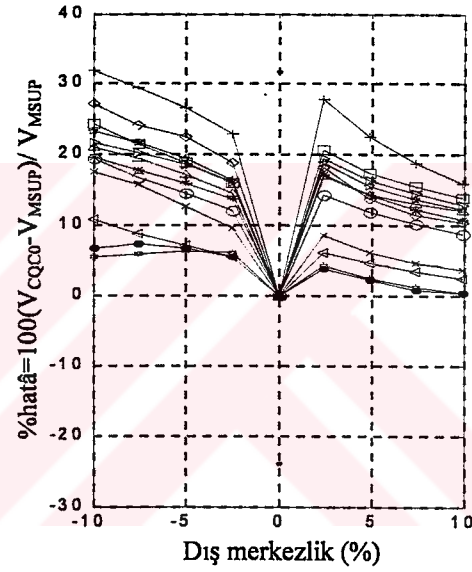
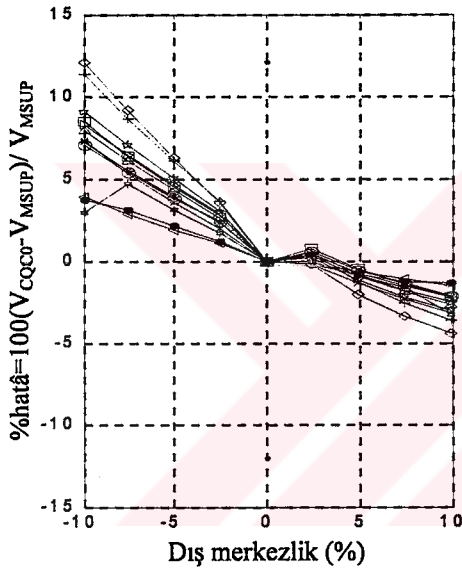
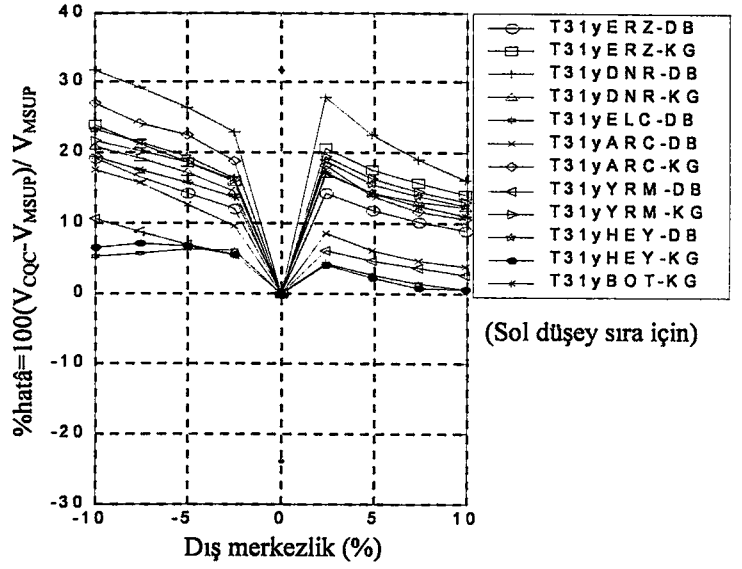
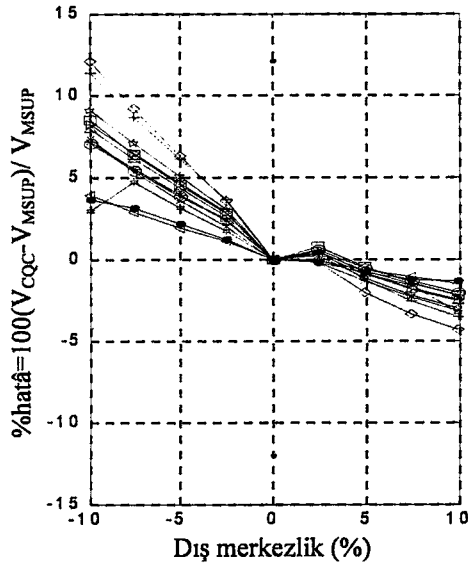
Şekil 4.62- Bina tipi 25y ve 31x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



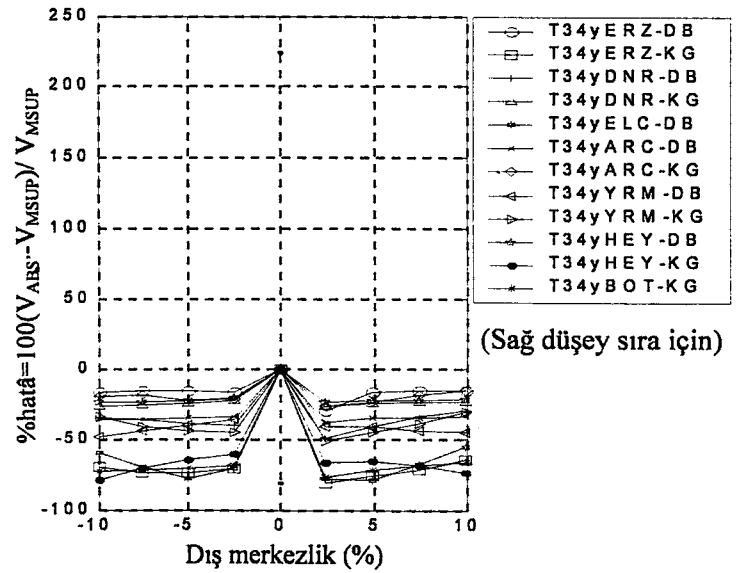
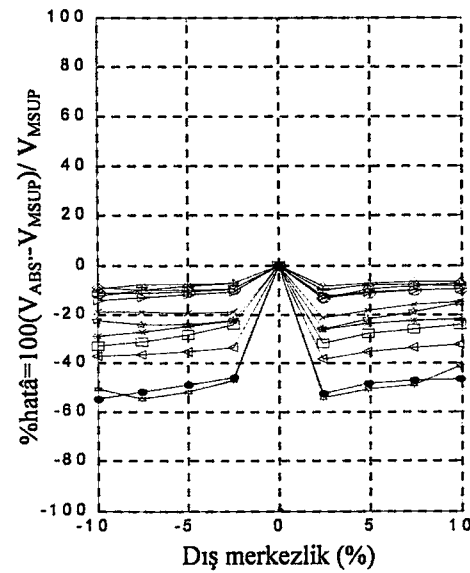
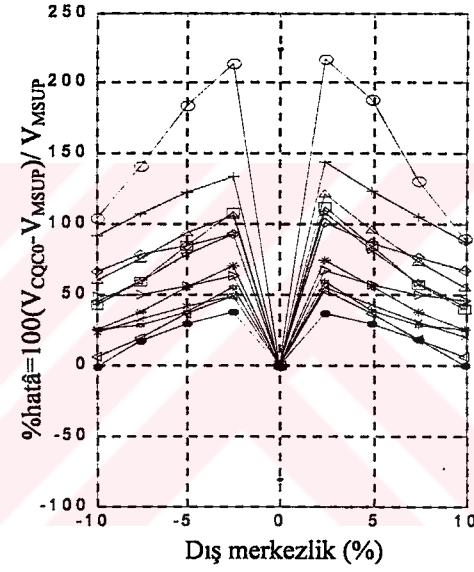
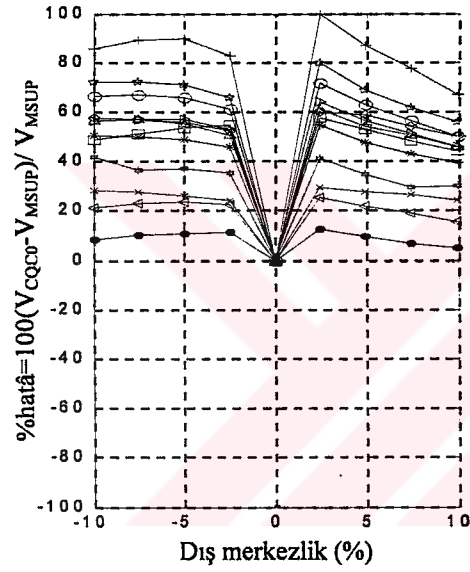
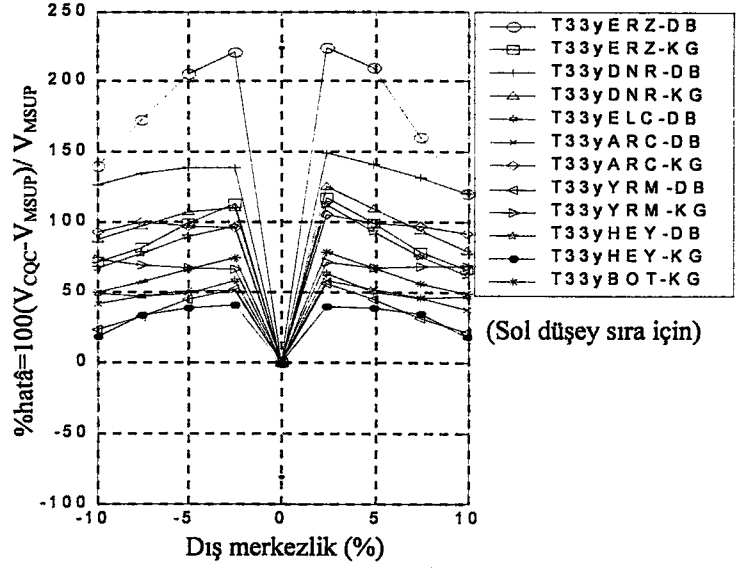
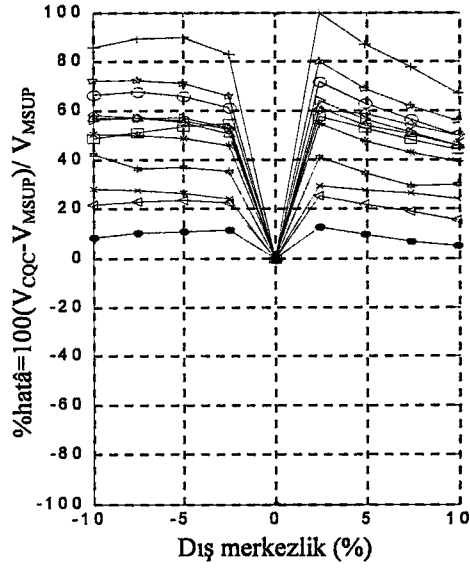
Şekil 4.63- Bina tipi 32x ve 33x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



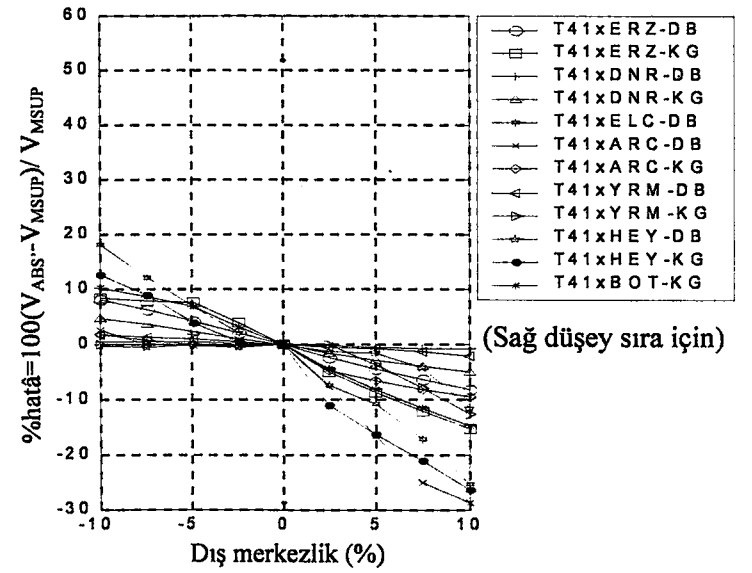
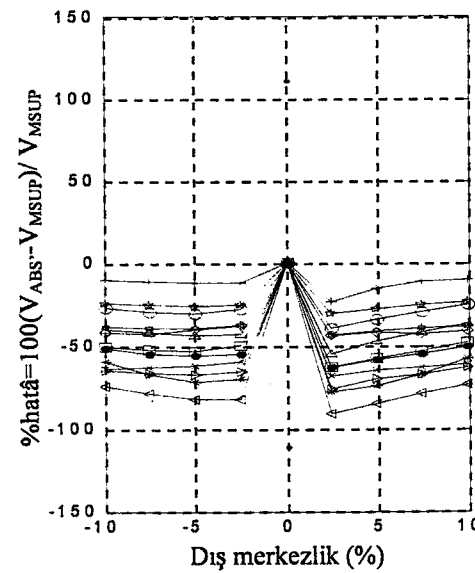
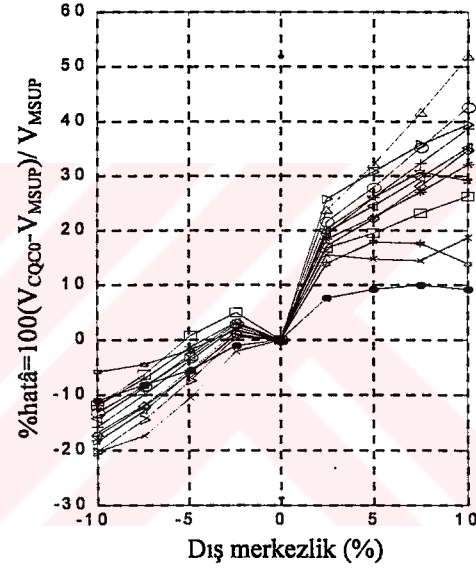
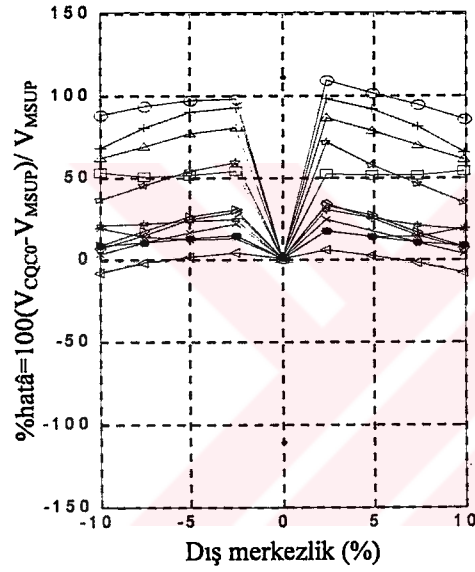
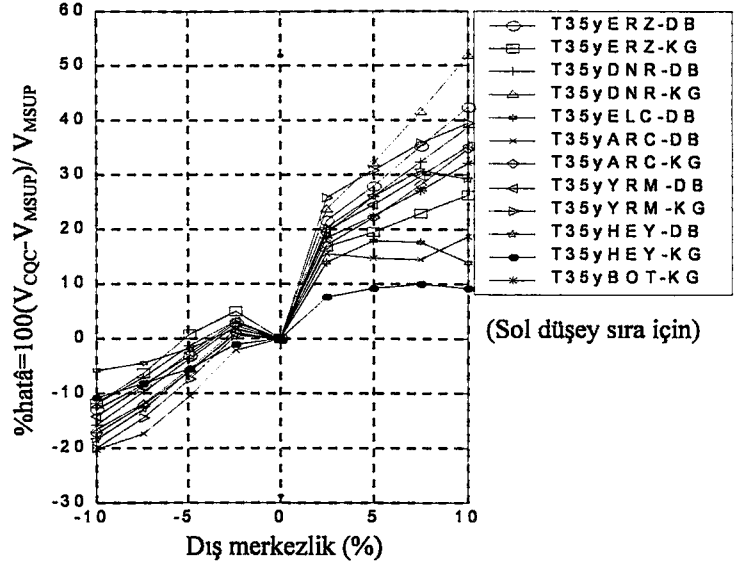
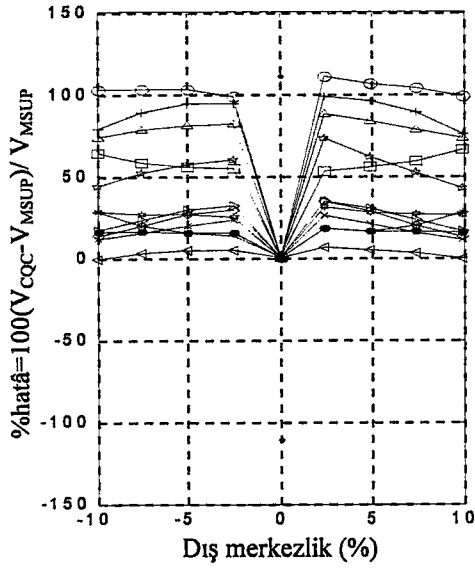
Şekil 4.64- Bina tipi 34x ve 35x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



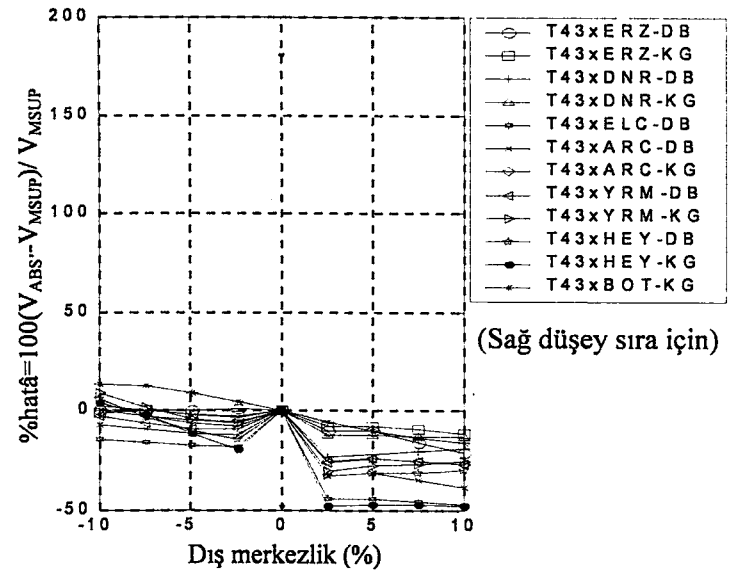
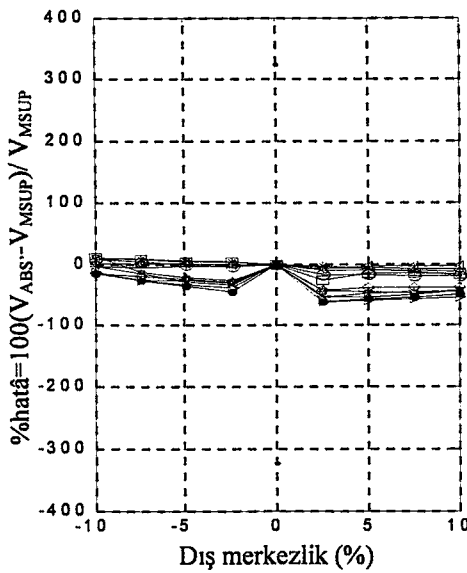
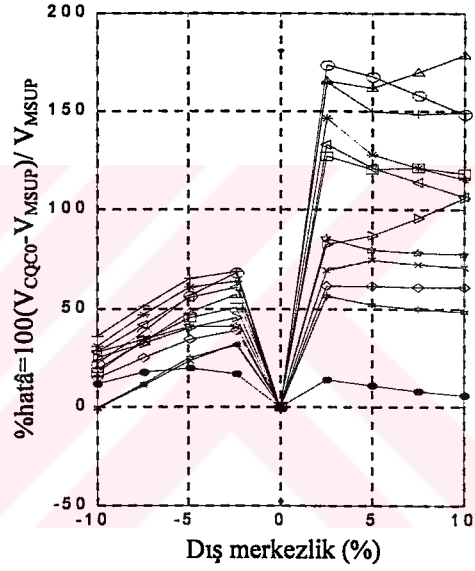
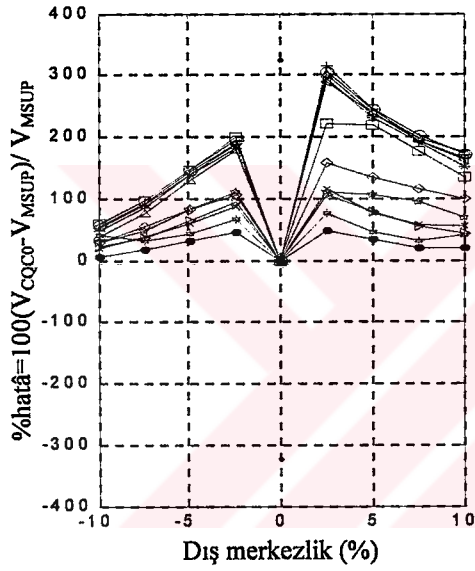
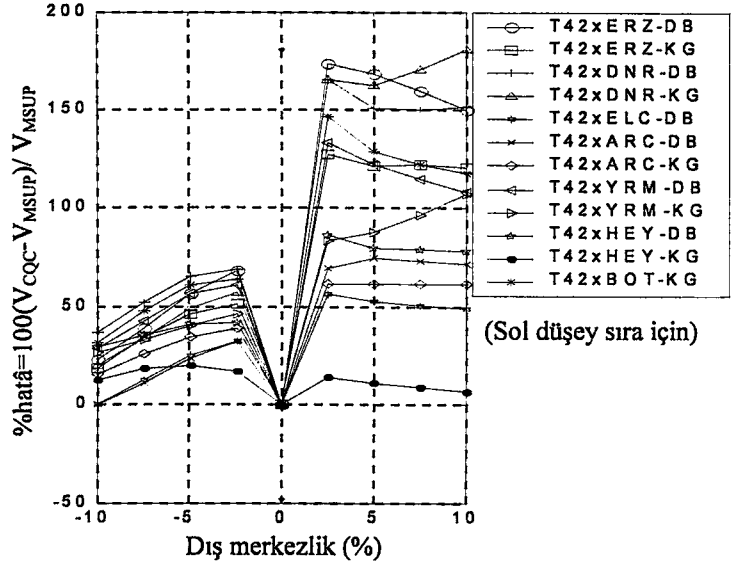
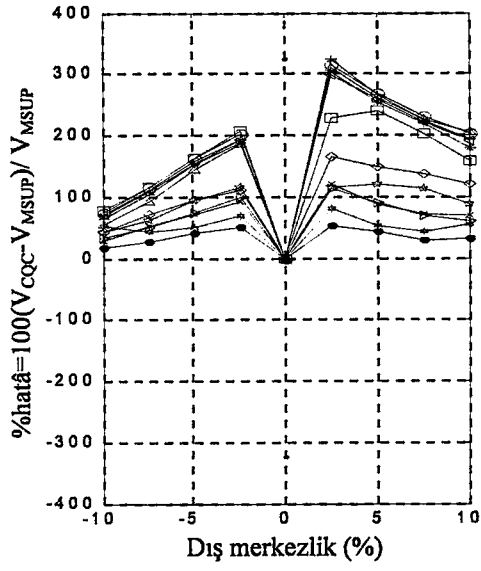
Şekil 4.65- Bina tipi 31y ve 32y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



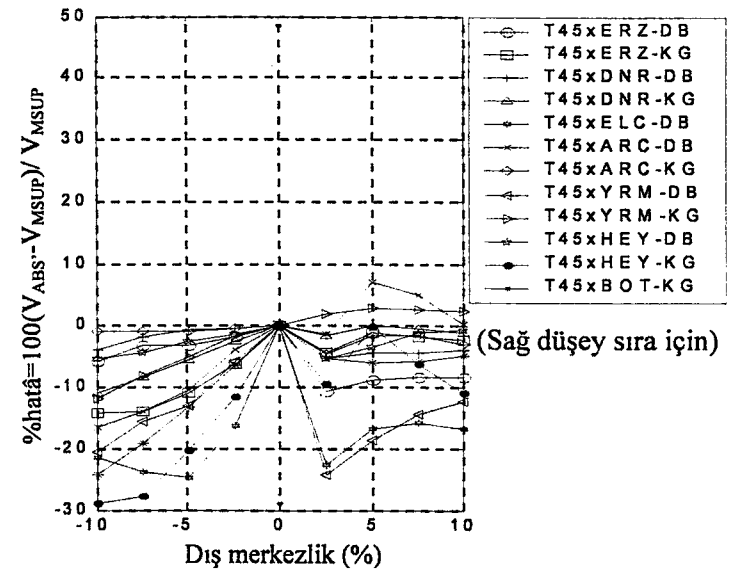
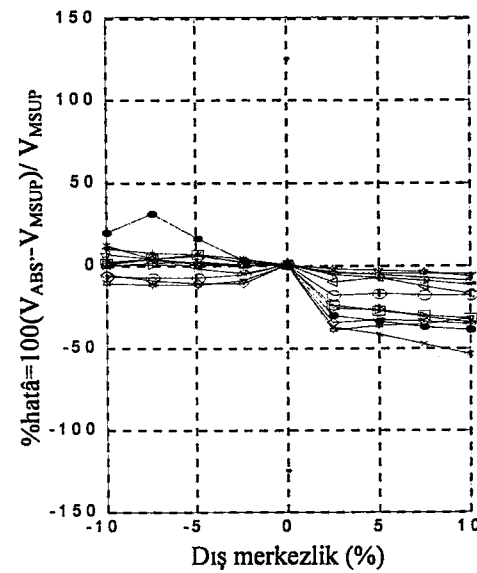
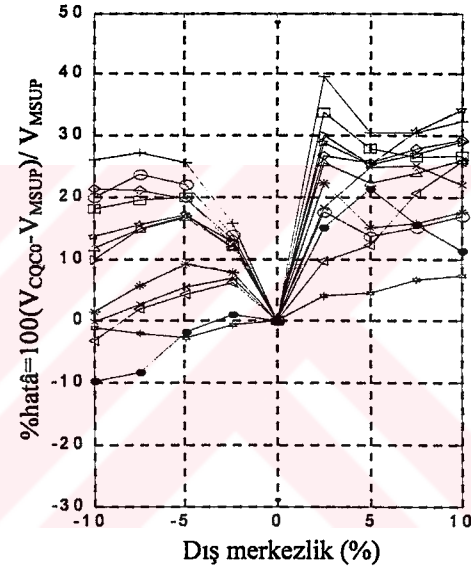
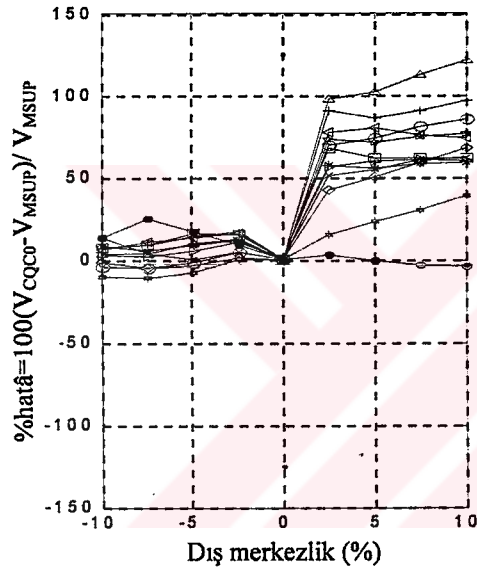
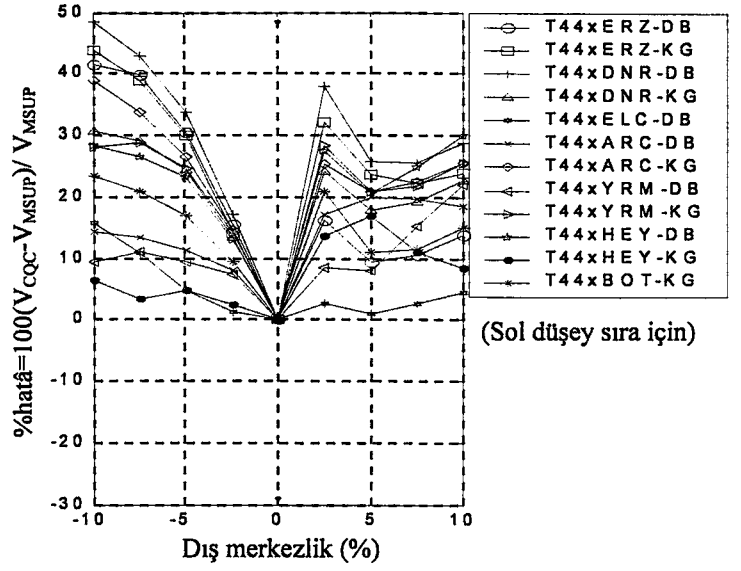
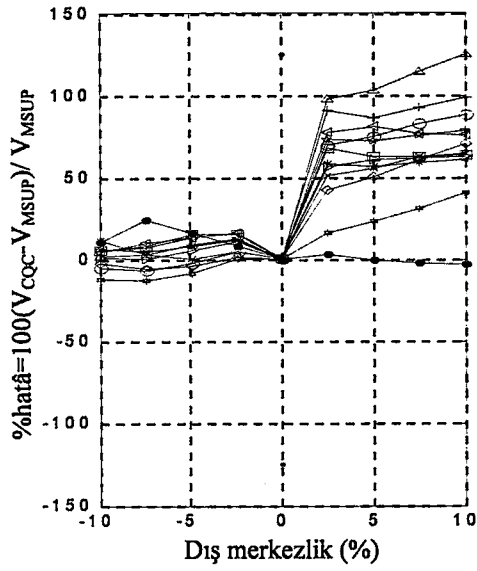
Şekil 4.66 - Bina tipi 33y ve 34y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



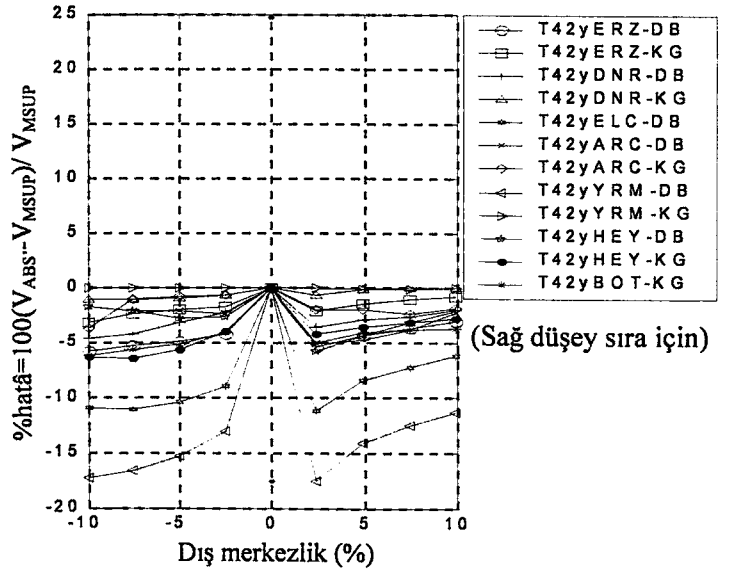
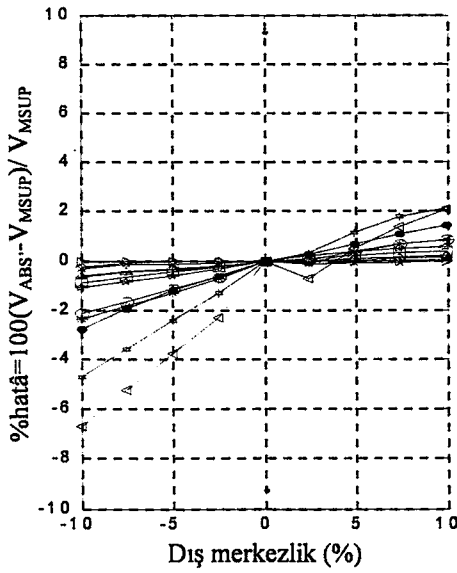
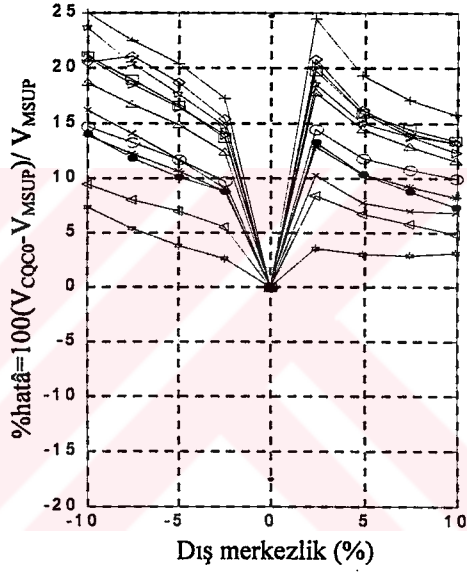
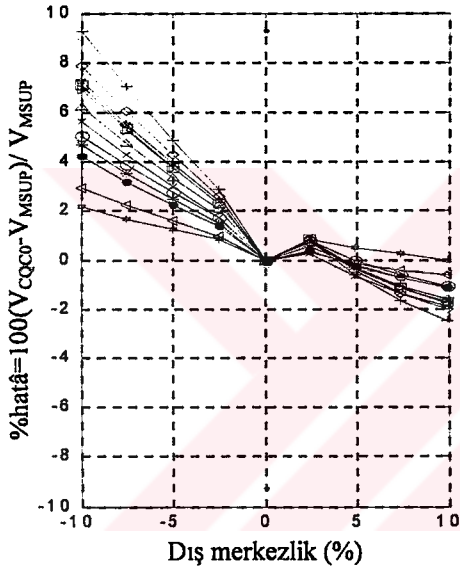
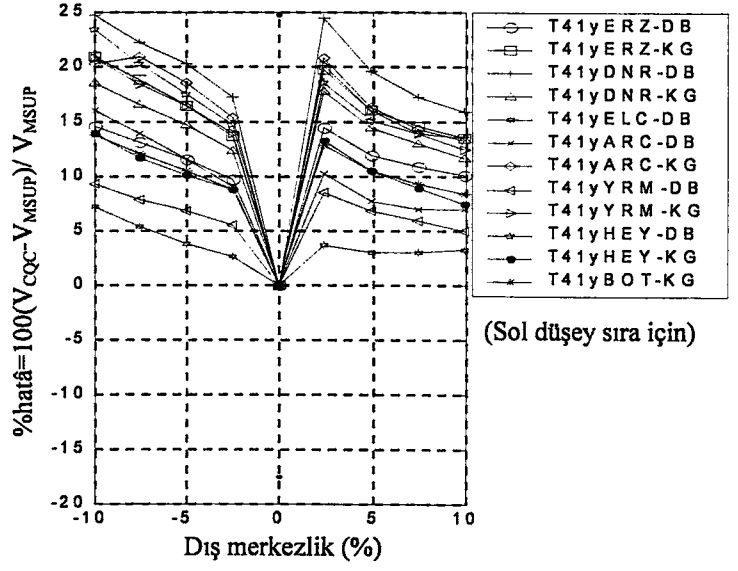
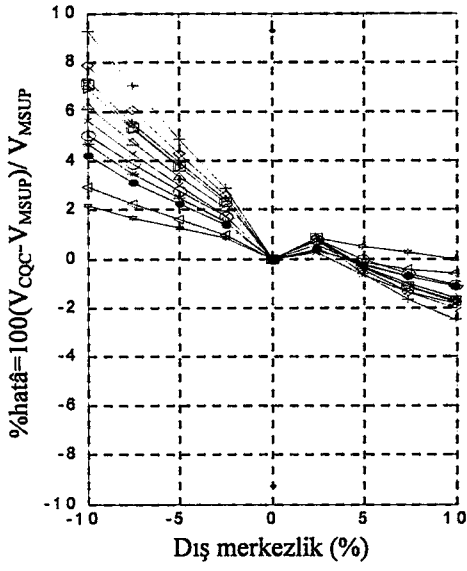
Şekil 4.67- Bina tipi 35y ve 41x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



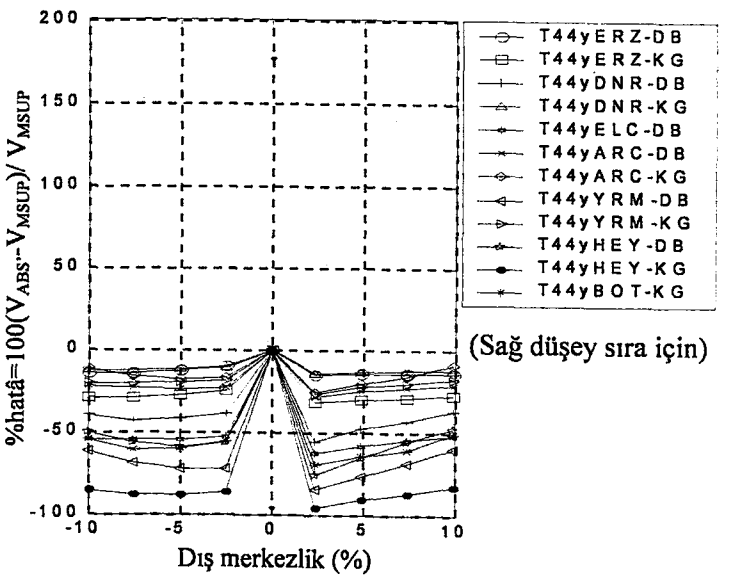
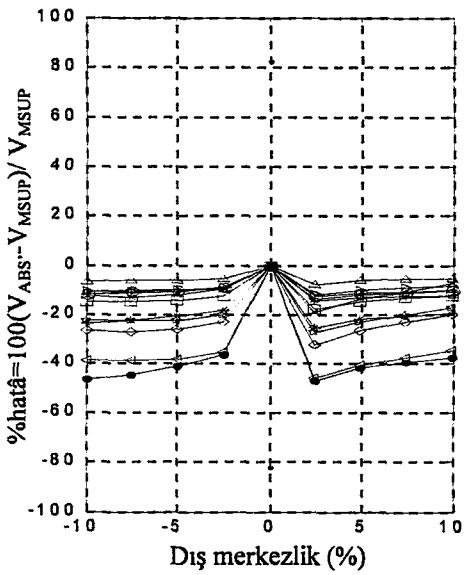
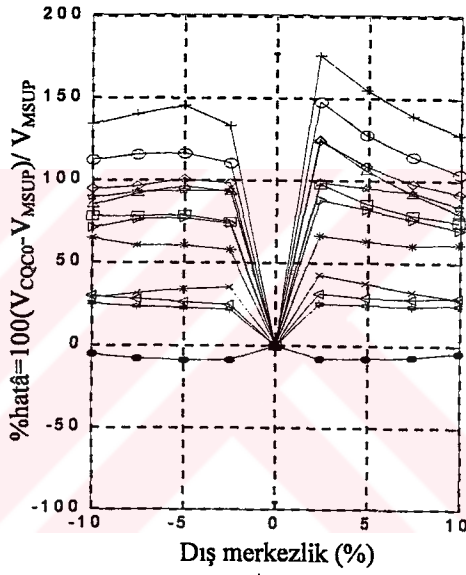
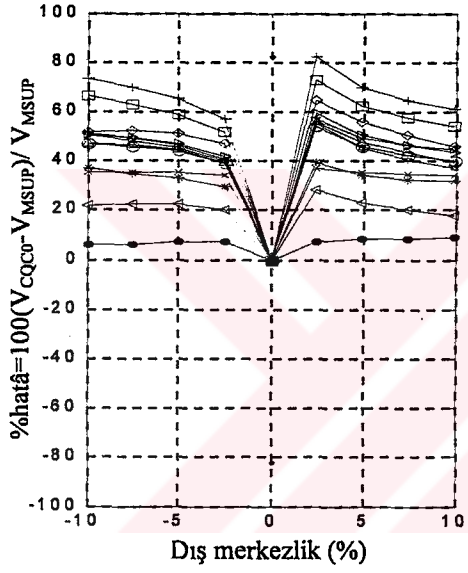
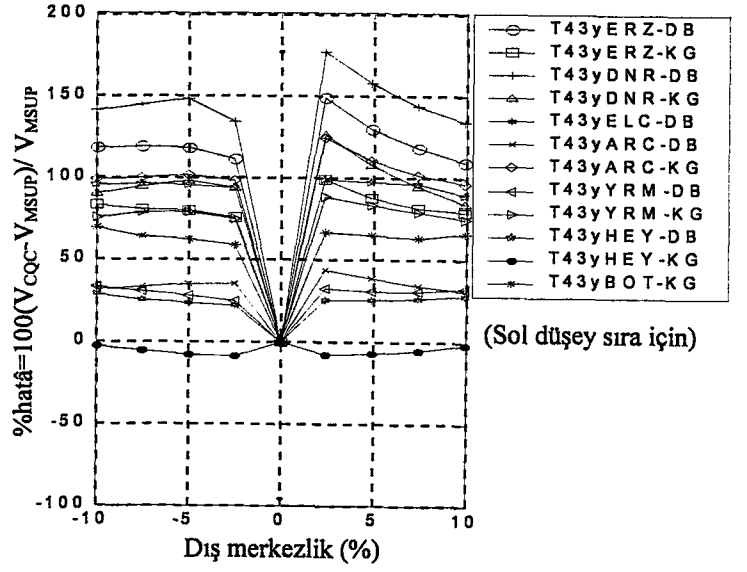
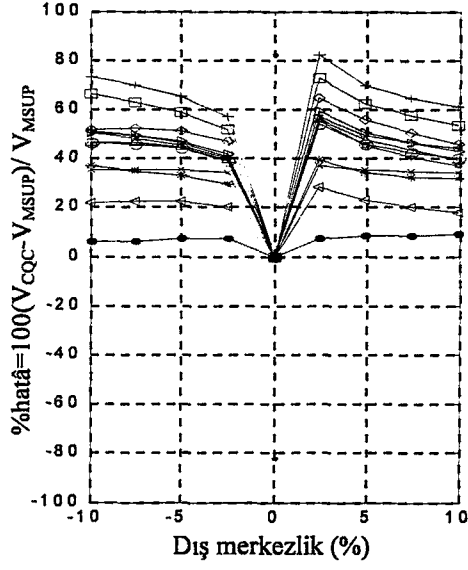
Şekil 4.68- Bina tipi 42x ve 43x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



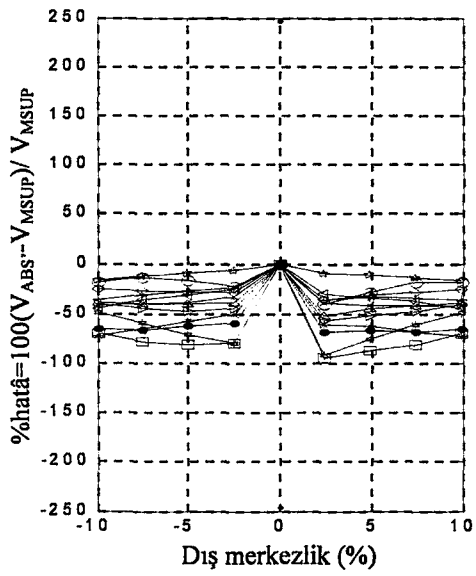
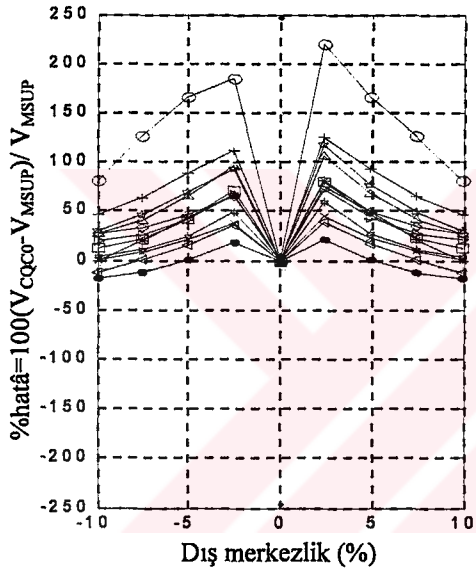
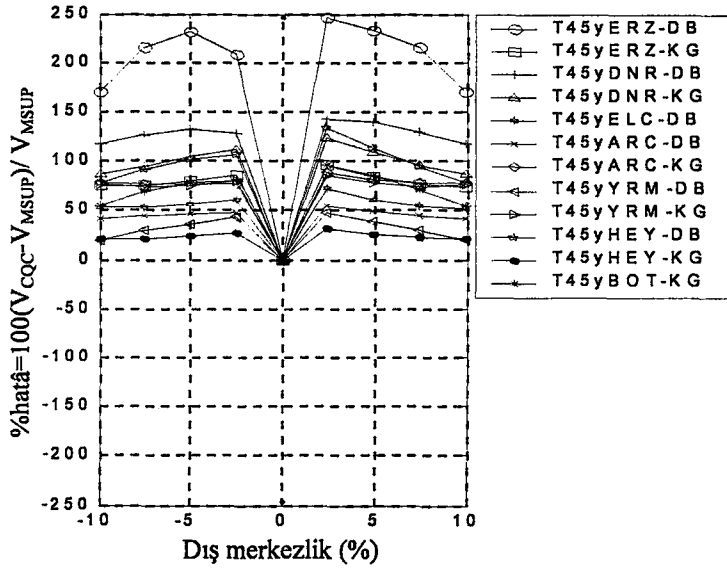
Şekil 4.69- Bina tipi 44x ve 45x, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



Şekil 4.70- Bina tipi 41y ve 42y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



Şekil 4.71- Bina tipi 43y ve 44y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği



Şekil 4.72- Bina tipi 45y, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y hatâ grafiği

5. HATÂ GRAFİKLERİNİN ÇOK KATLI YAPILAR İÇİN DEĞERLENDİRİLMESİ

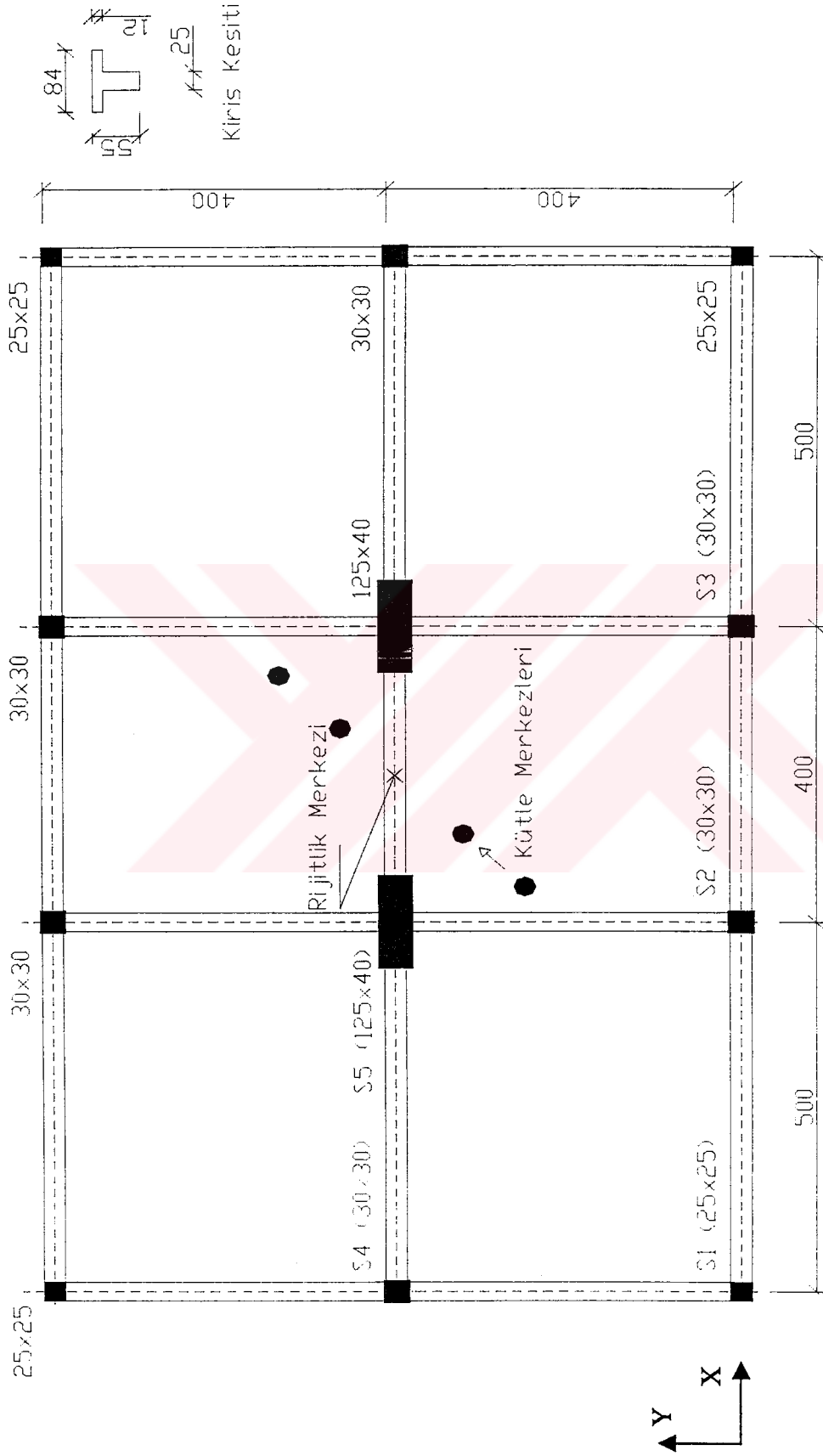
Bu bölümde, Bölüm 4’te verilen hatâ grafikleri, çok katlı yapılar için örneklenmiştir. Çok katlı yapılarda da tek katlı yapılarda olduğu gibi, Q oranı ile CQC ve SRSS yöntemlerindeki göreceli hatâ arasındaki ilişkiye rastlanmıştır. Bu hatâlar, göreceli hatâlar olarak adlandırılmış olup toplam hatâdan, sıfır dış merkezlik değerinde ortaya çıkan hatâ çıkartılarak bulunmuştur. Yani belirli bir dış merkezlik halindeki toplam hatâ; sıfır dış merkezli sistemde yapılan hatâ ile, bahsedilen dış merkezlikteki göreceli hatânın toplamına eşittir. Toplam(mutlak) hatâlara ait grafikler de ayrıca verilmiştir.

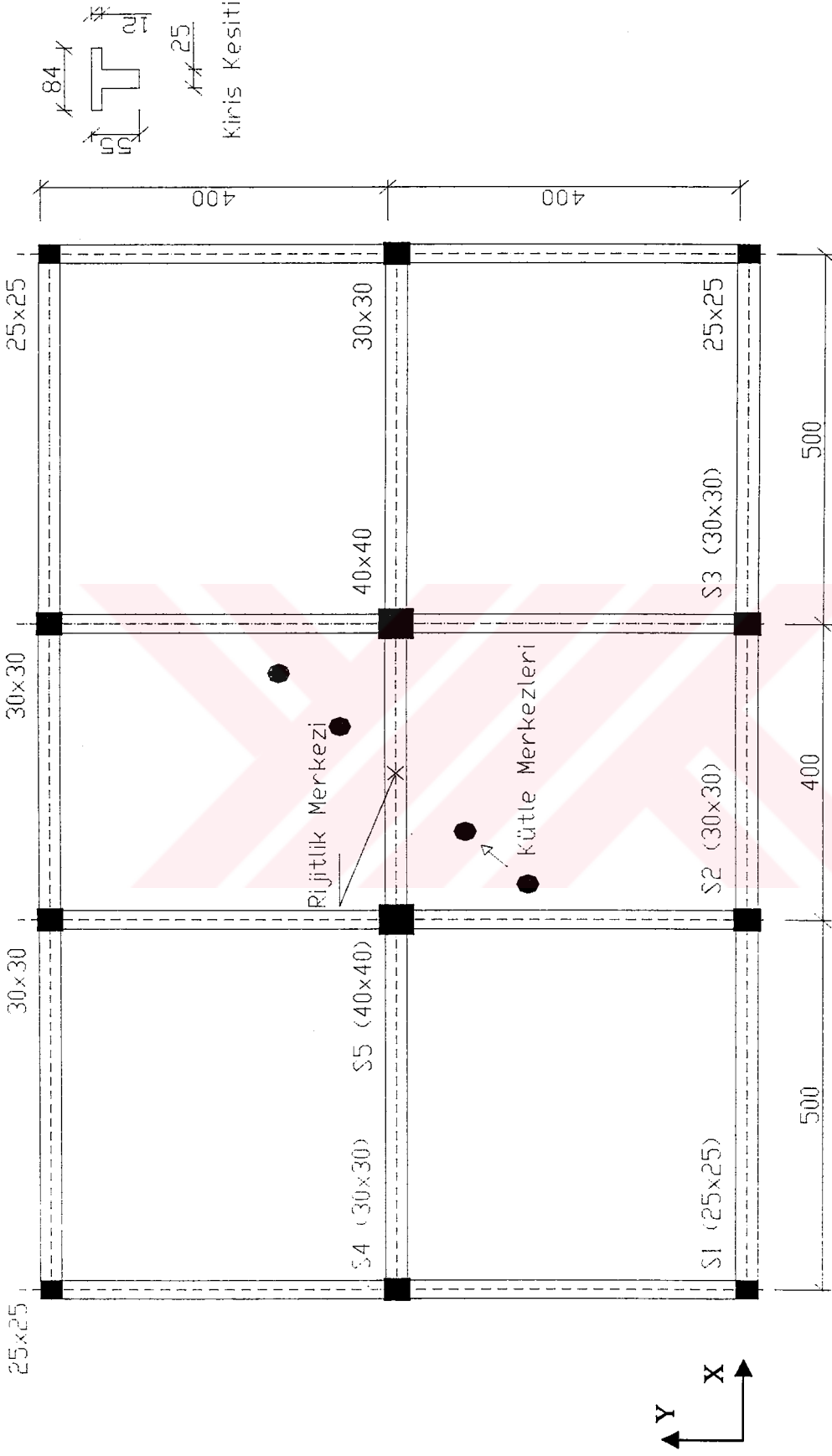
Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de, 5 katlı olan Örnek 1 ve Örnek 2’ye ait kat planları görülmektedir. Şekil 5.2 ise 10 katlı olan 3-cü örneğe ait kat planıdır. Bölüm 4’te kullanılan “T12”, “T13”, “T15” ve “T42y” sistemlerinin 5 katlı halleri, burada örnek olarak incelenmiştir.

Ayrıca, CQC0 ve ABS’ için de hatâ grafikleri verilmiş ve Bölüm 4’te yapılan değerlendirme ve öneriler, örneklerle desteklenmiştir. Bu amaçla; değişik dış merkezlikli ve kat planlı çok katlı yapıların mutlak ve göreceli hatâ grafikleri verilmiştir.

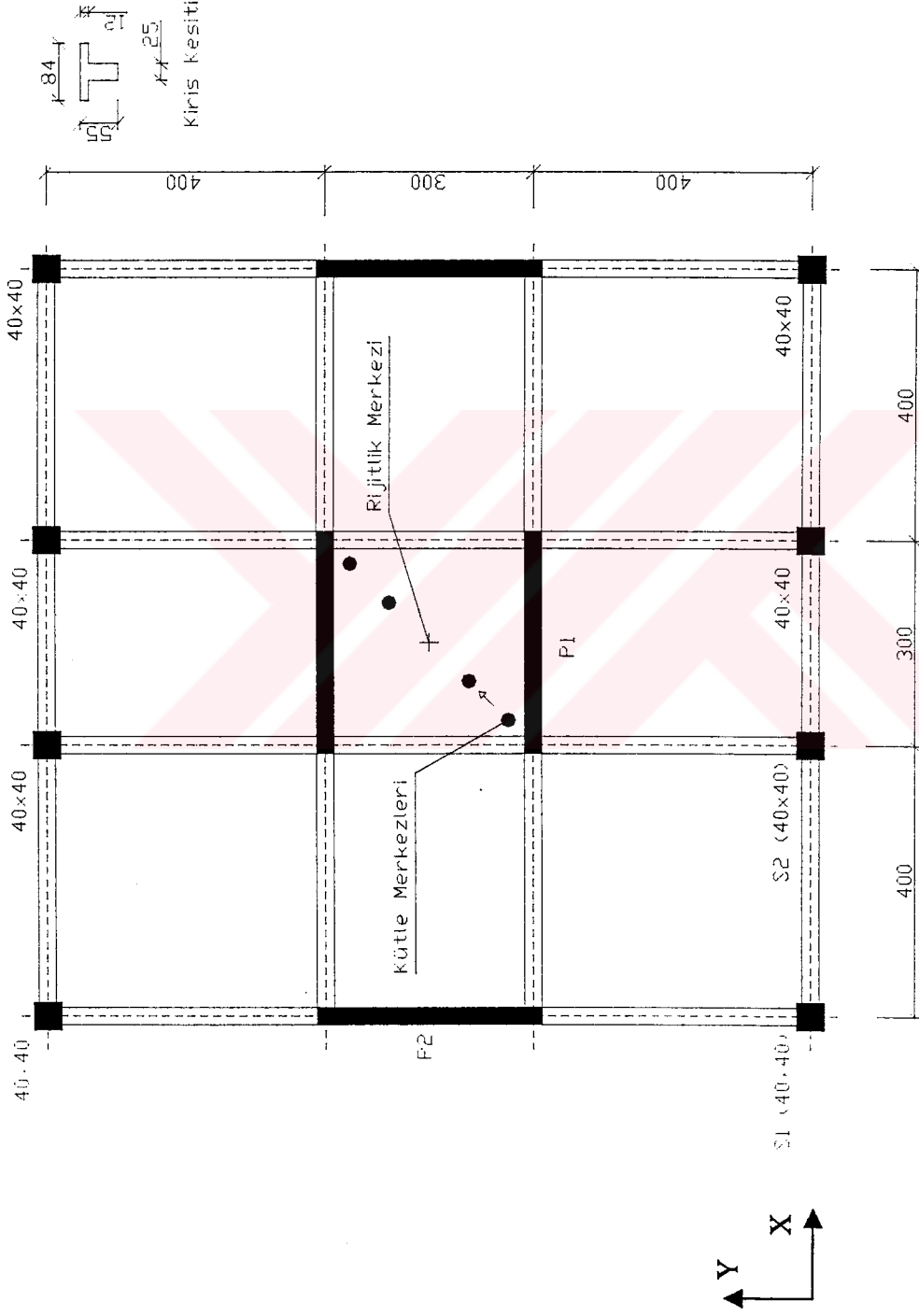
Bölüm 4’te değerlendirilen ve örneklenen CQC, CQC0 ve ABS’ birleştirme yöntemlerinin hassasiyetlerine gelince; daha önce de belirtildiği gibi; V_x kuvvetlerinin hesabında CQC0 ile birleştirme, bir katlı yapılarda ortalama bir toplam hatâ elde etmeyi sağlamakla birlikte, çok katlı yapılarda hatâ grafiği öteleneceği için, daha elverişsiz sonuçlar verebilmektedir (Şekil 5.6).

V_y kuvvetlerinin hesabında ise, hatâ grafiği, kat adedinden bağımsız olarak sıfır dış merkezlik için sıfır değerini almakta, yani toplam hatâ grafiği ötelenmemektedir. Bu nedenle V_y kuvvetlerinin hesabında, CQC0 ile yapılan birleştirme, ortalama veya daha simetrik bir toplam hatâ grafiği elde etme anlamında, daha iyi sonuçlar vermiştir (Şekil 5.20-5.23). ABS’ ile yapılan birleştirmede ise bu maksimum hatâ, Bölüm 4’te de bahsedildiği gibi, %100 mertebelerinde kalmıştır. Bu yöntemdeki maksimum toplam hatânın, CQC veya CQC0 ile birleştirmedeki toplam hatâ çok yüksek olsa bile, yine %100 mertebesinde kaldığını ve bu yöntemlere göre daha az değişkenlik gösterdiğini (Bölüm 4) hatırlatmakta fayda vardır.





Şekil 5.2 Örnek 2 (5 katlı) kat planı (Kütle merkezi değiştirilerek örnek çözümler üretilmiştir.)



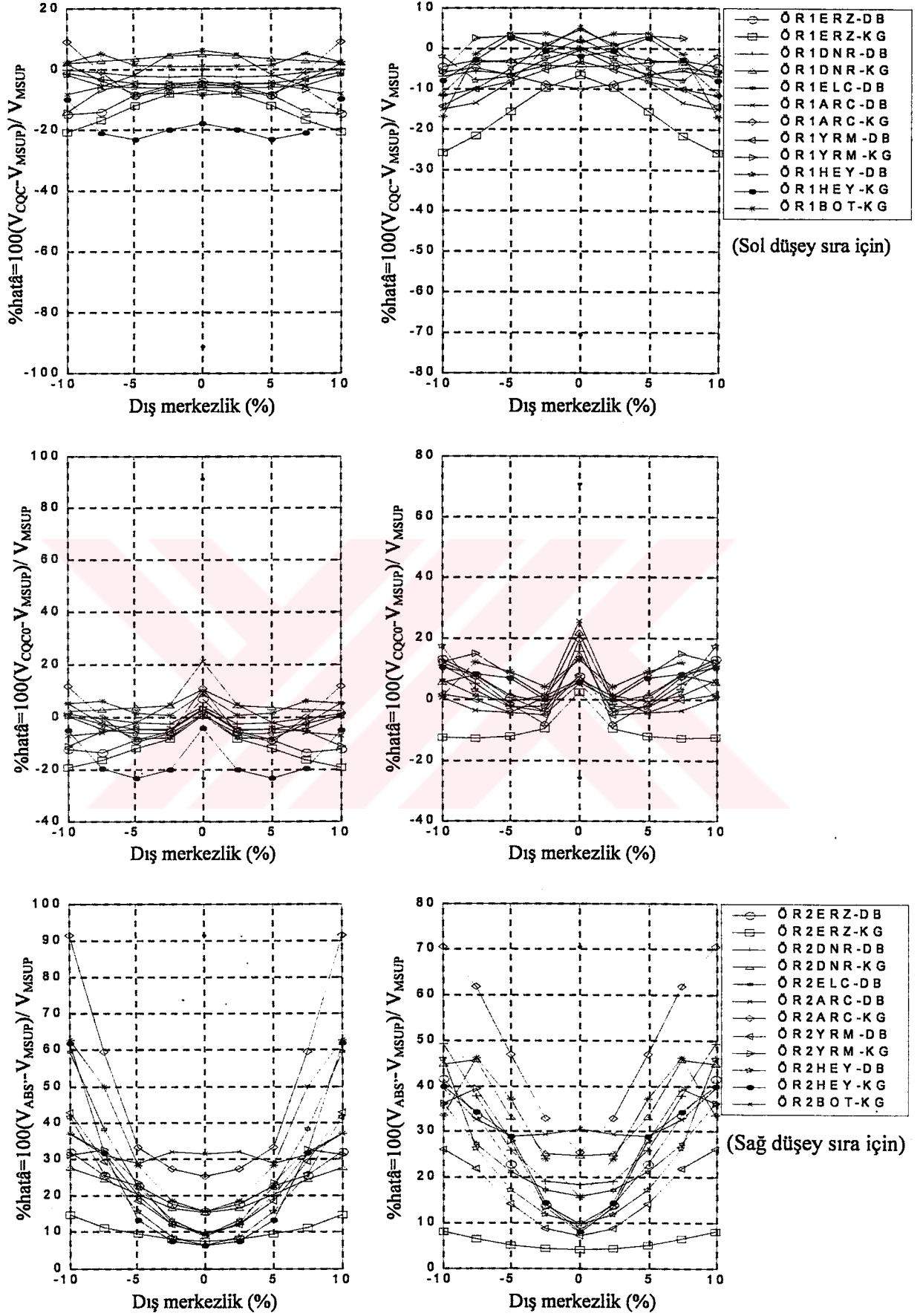
Şekil 5.3 Örnek 3 (10 katlı) kat planı (Kütle merkezi değiştirilerek örnek çözümler üretilmiştir.)

Çizelge 5.3 Örneklere ait özellikler

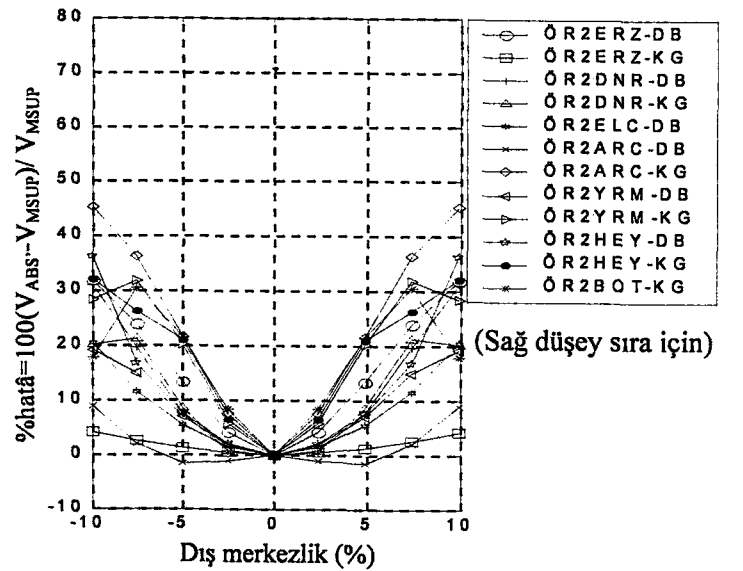
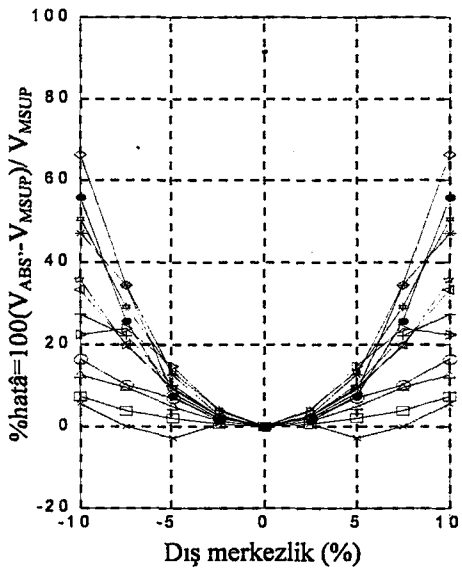
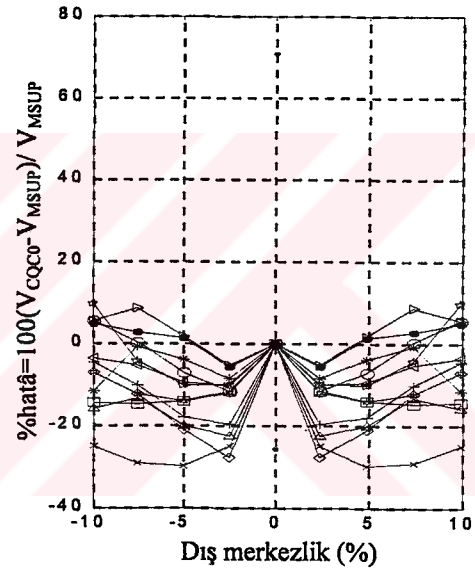
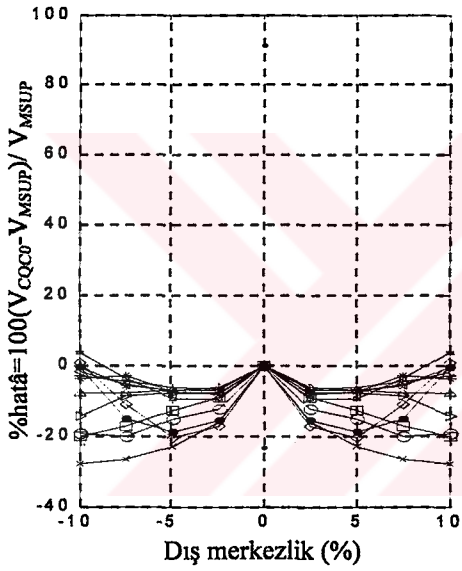
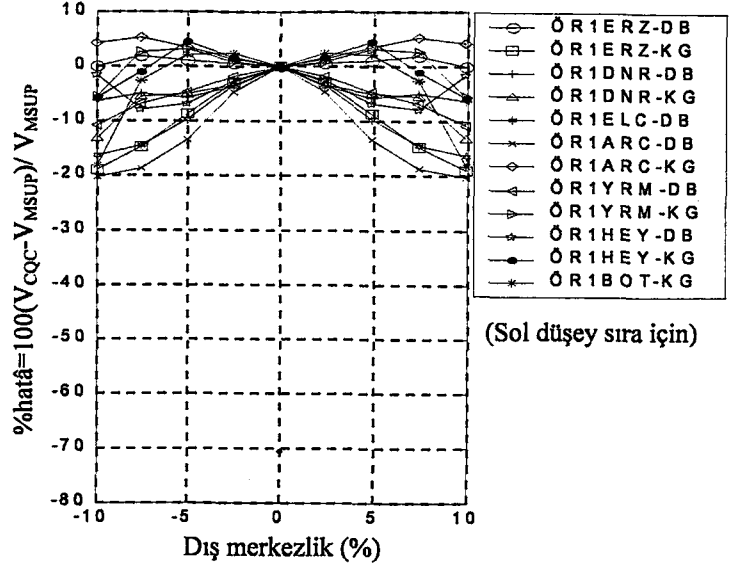
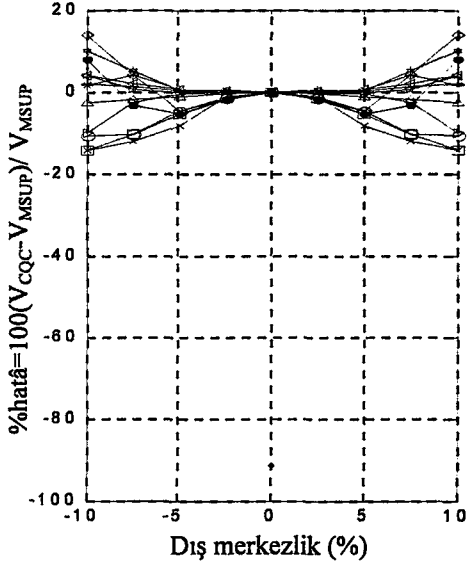
Sistem	Örnek1	Örnek2	Örnek3
$Q_x(\%10)$	6.2	2.7	14
$\{\phi\}$	$\{\phi_\theta\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -2.09 \\ -0.50 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_x\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -0.64 \\ -0.16 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_y\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.89 \\ -0.16 \\ \vdots \end{Bmatrix}$
	$\{\phi_y\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1.87 \\ -0.41 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_y\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1.57 \\ -0.02 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_x\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.49 \\ -0.03 \\ \vdots \end{Bmatrix}$
	$\{\phi_x\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -0.05 \\ 0.27 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_\theta\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -0.49 \\ 0.47 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_\theta\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -0.66 \\ 1.02 \\ \vdots \end{Bmatrix}$
	\vdots	\vdots	\vdots

Çizelge 5.3 Örneklere ait özellikler (devamı)

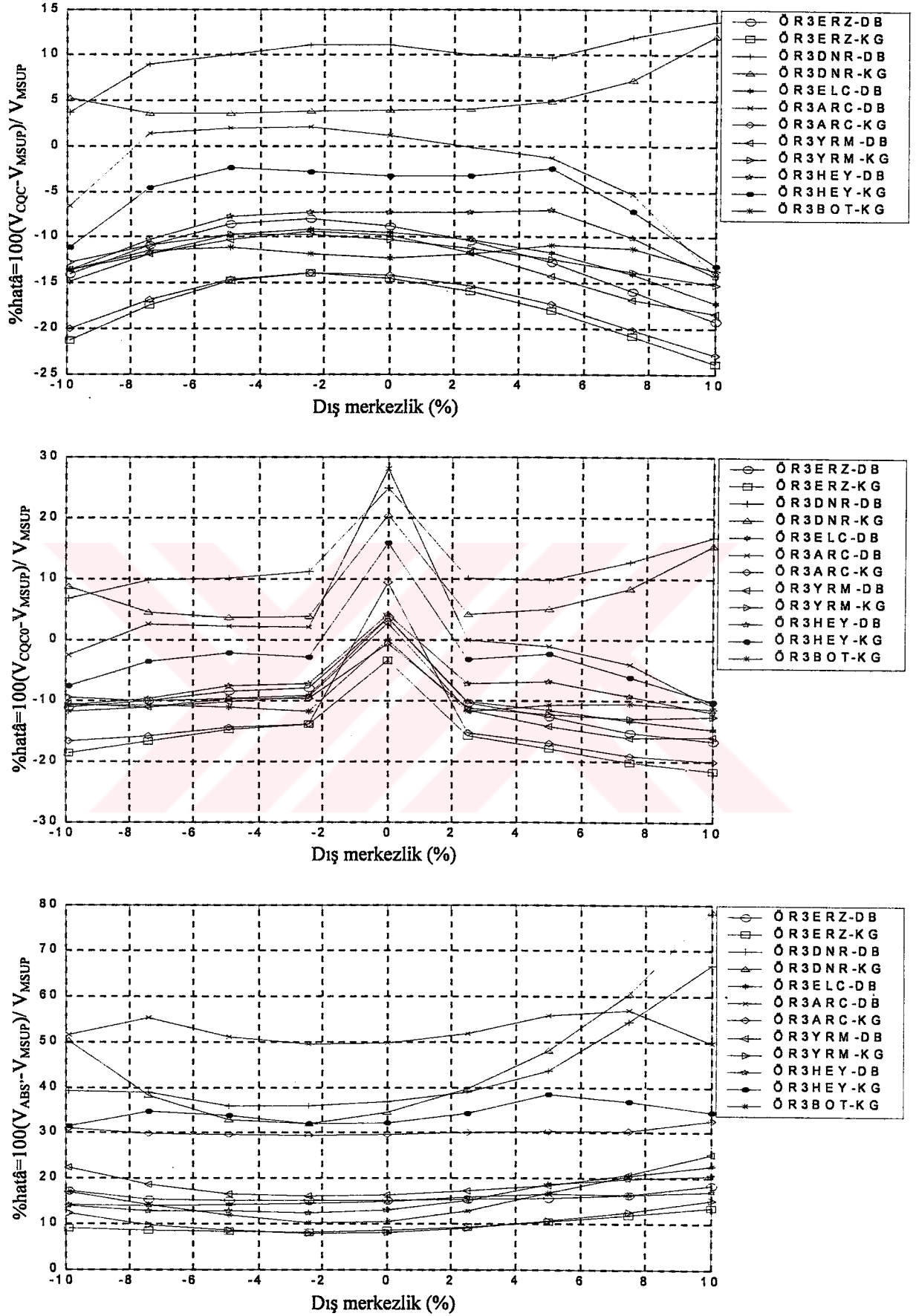
Sistem	T12 (5 katlı)	T13 (5 katlı)	T15 (5 katlı)	T42y (5 katlı)
Q_x	25	2.5	15	157
$\{\phi\}$	$\{\phi_y\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ -0.10 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_y\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ -0.25 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_\theta\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ -0.74 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_x\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -0.03 \\ -0.02 \\ \vdots \end{Bmatrix}$
	$\{\phi_x\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0.0 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_x\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0.0 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_x\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0.0 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_y\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 8.77 \\ 0.81 \\ \vdots \end{Bmatrix}$
	$\{\phi_\theta\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ 2.70 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_\theta\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0.39 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_y\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0.05 \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\{\phi_\theta\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -0.61 \\ 1.81 \\ \vdots \end{Bmatrix}$
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots



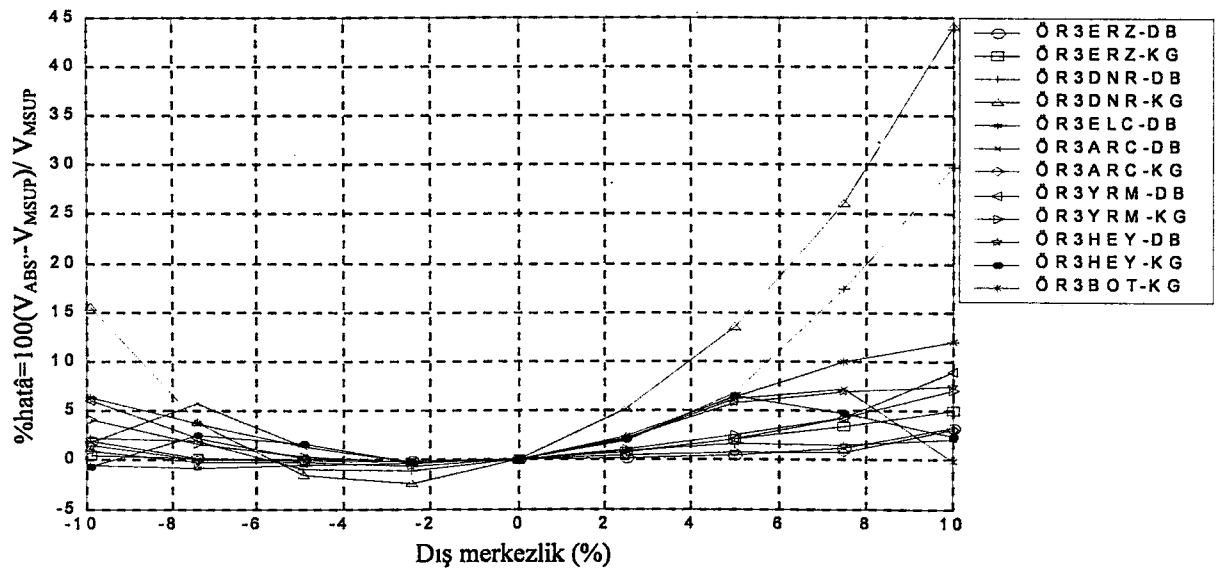
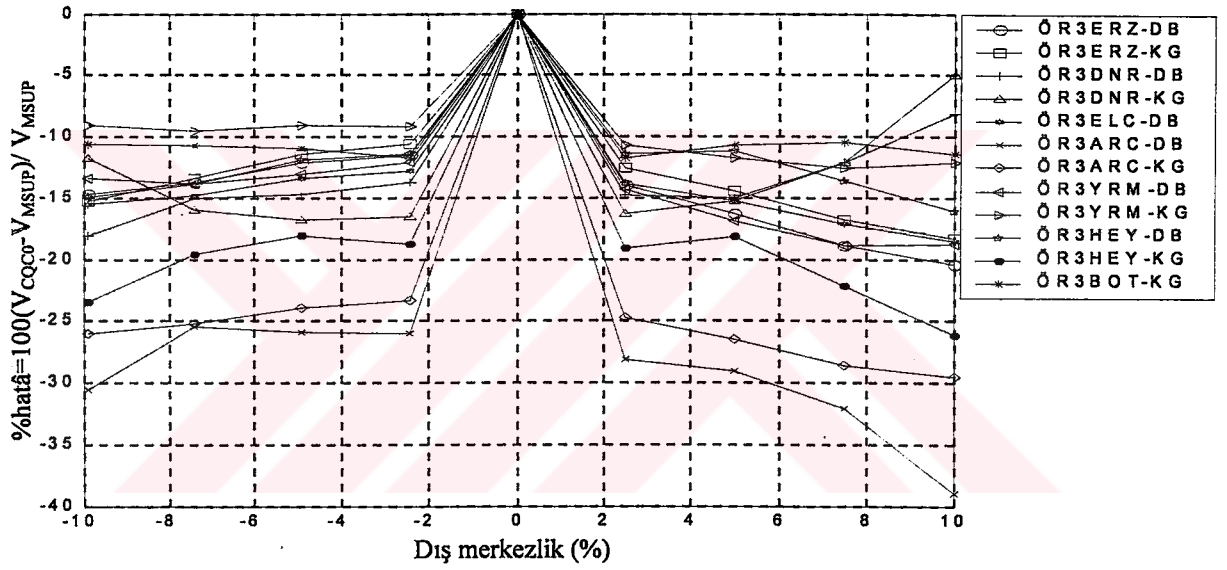
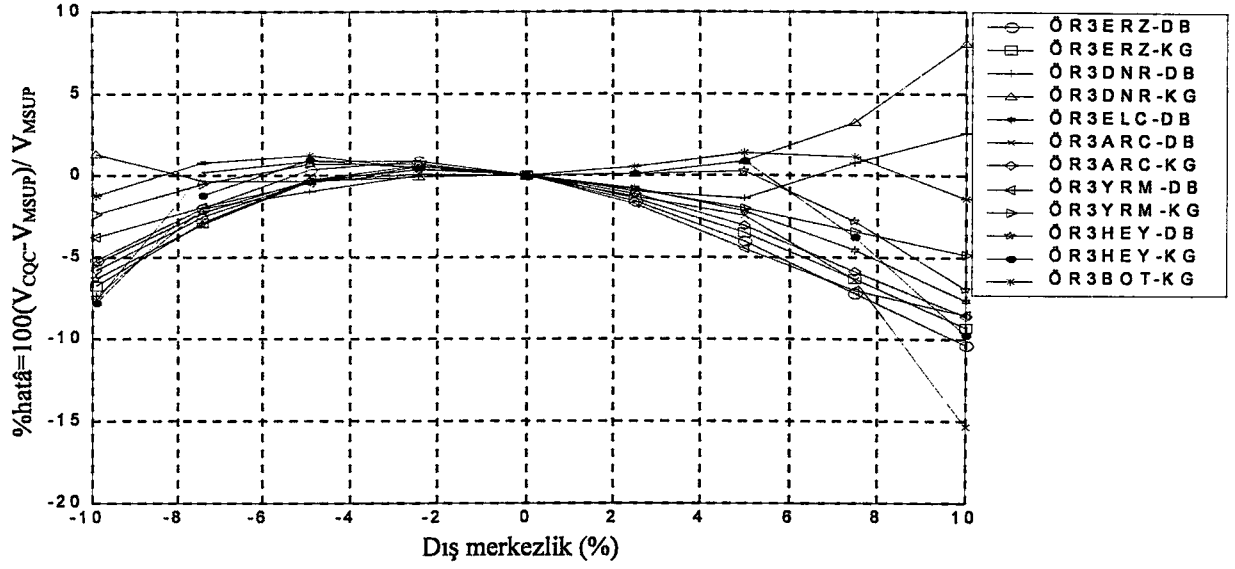
Şekil 5.4 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x mutlak hatâ grafiği



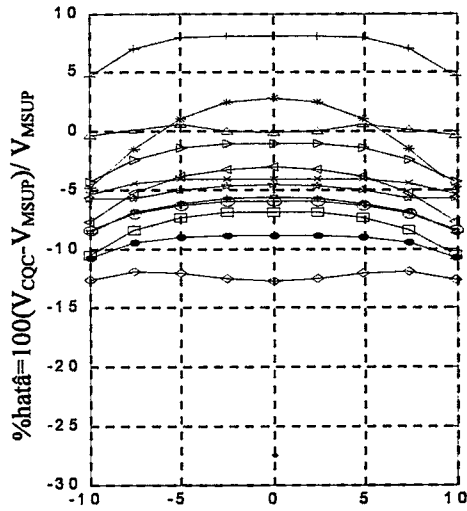
Şekil 5.5 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği



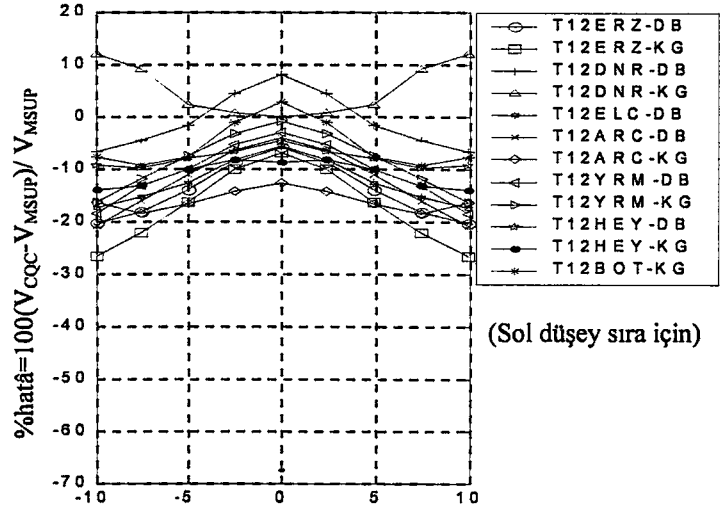
Şekil 5.6 Örnek3, $\xi = 0.05$ için P1'de V_x mutlak hatâ grafiği



Şekil 5.7 Örnek3, $\xi = 0.05$ için P1'de V_x göreceli hatâ grafiği

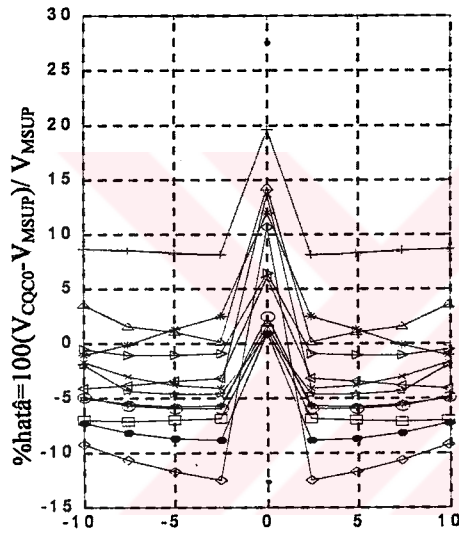


Dış merkezlik (%)

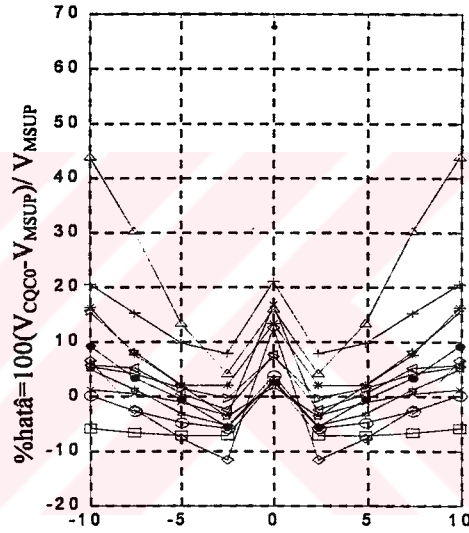


(Sol düşey sıra için)

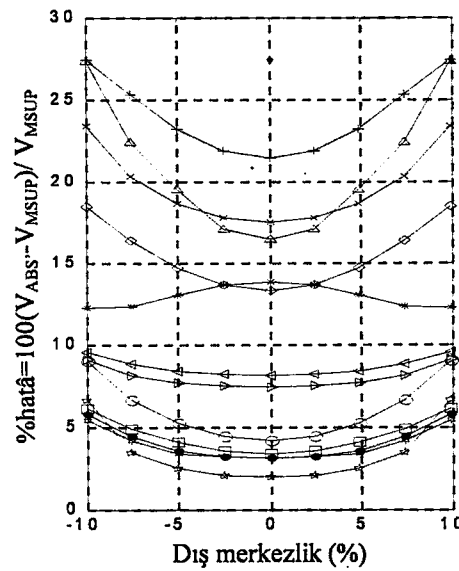
Dış merkezlik (%)



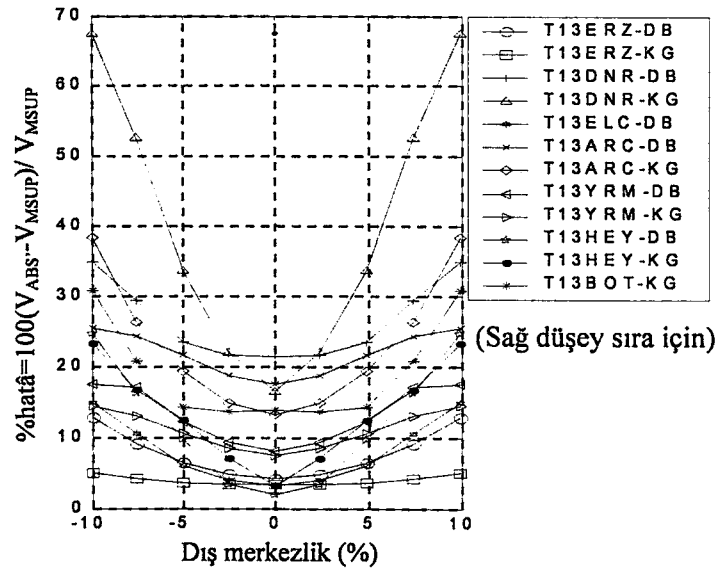
Dış merkezlik (%)



Dış merkezlik (%)



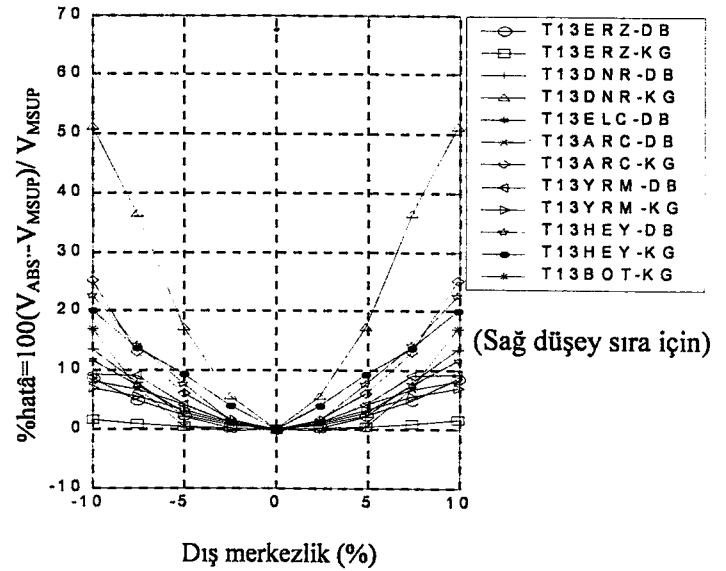
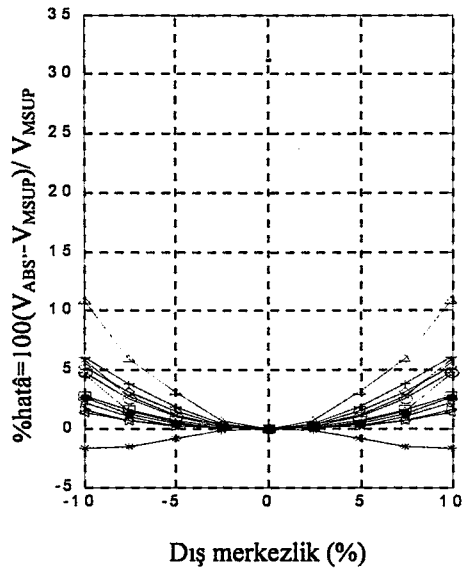
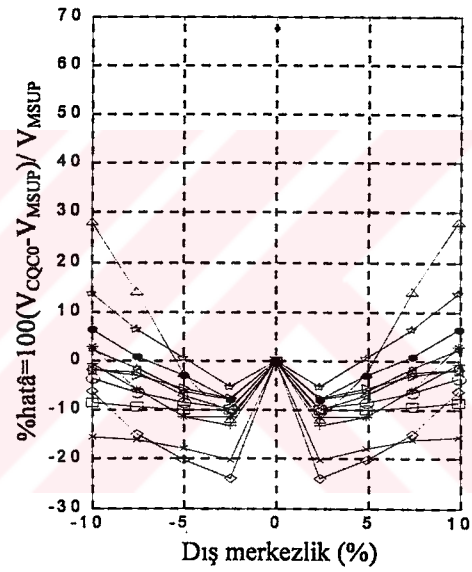
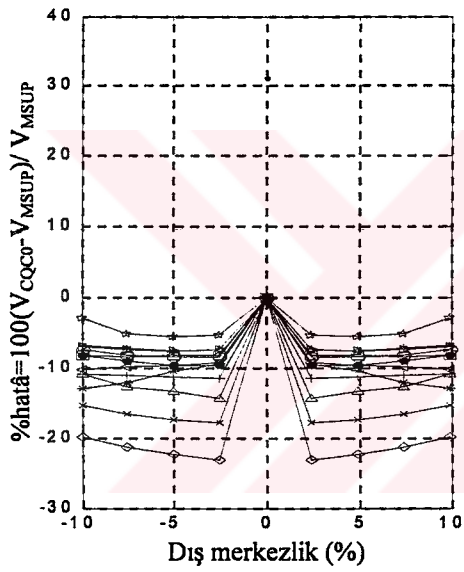
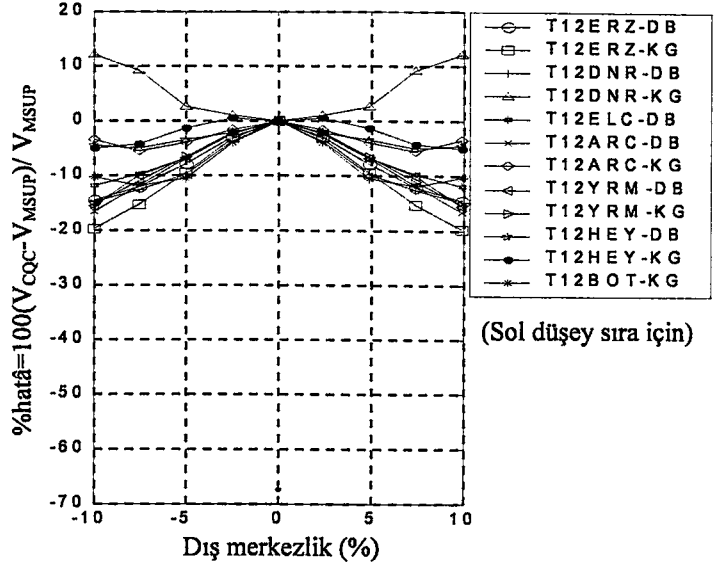
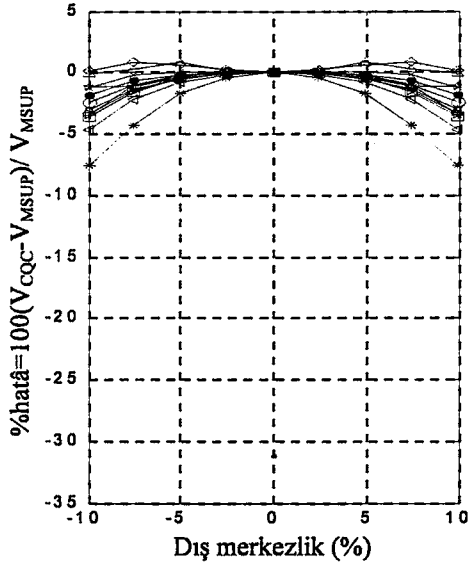
Dış merkezlik (%)



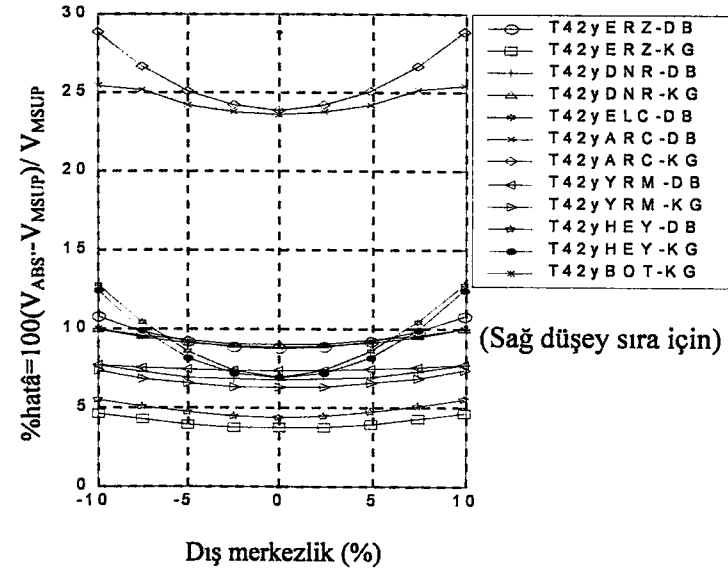
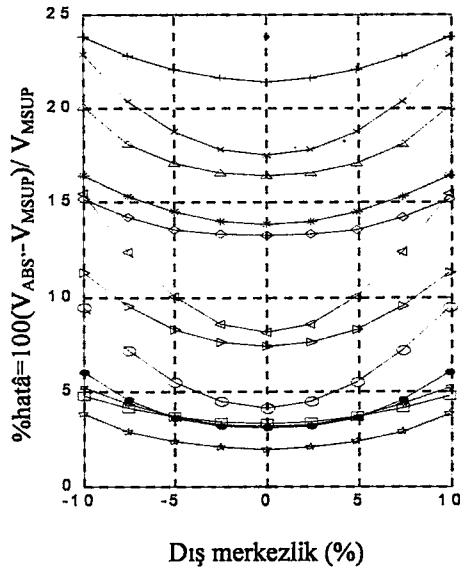
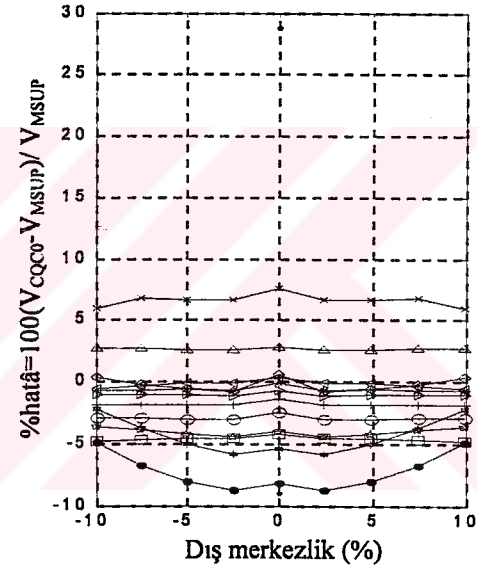
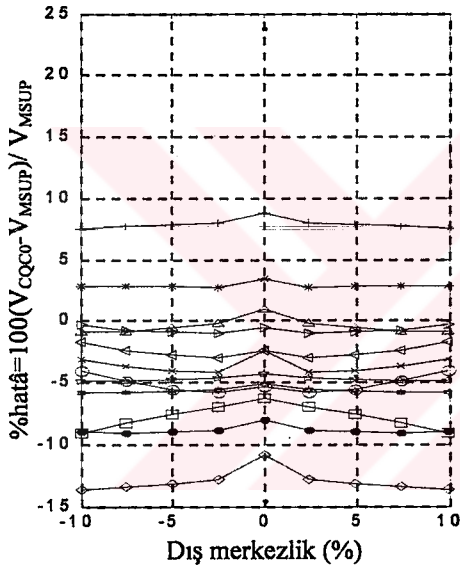
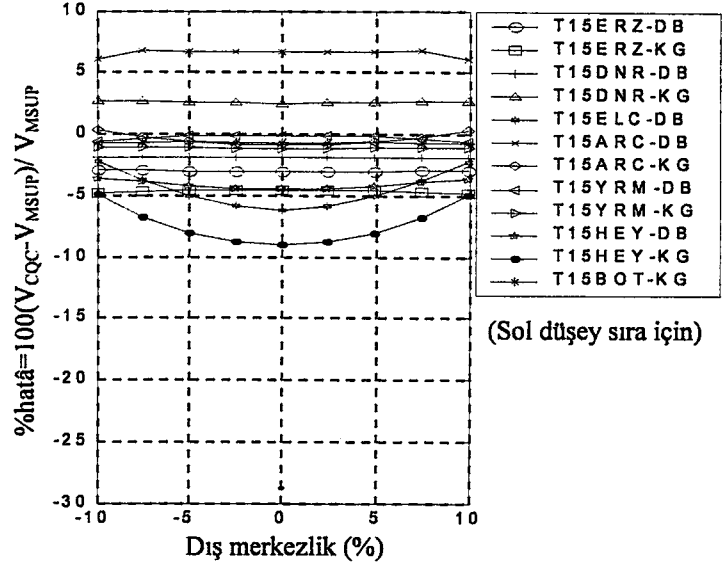
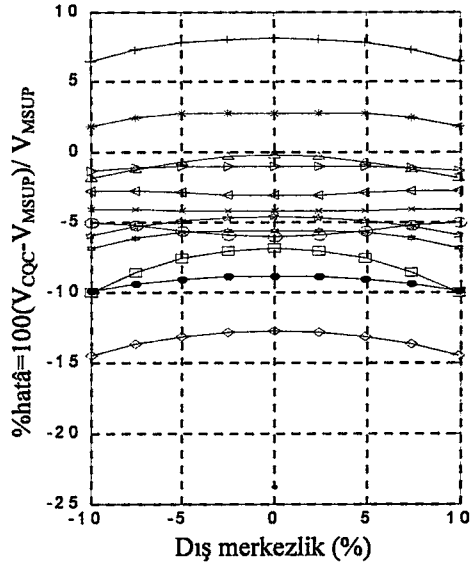
(Sağ düşey sıra için)

Dış merkezlik (%)

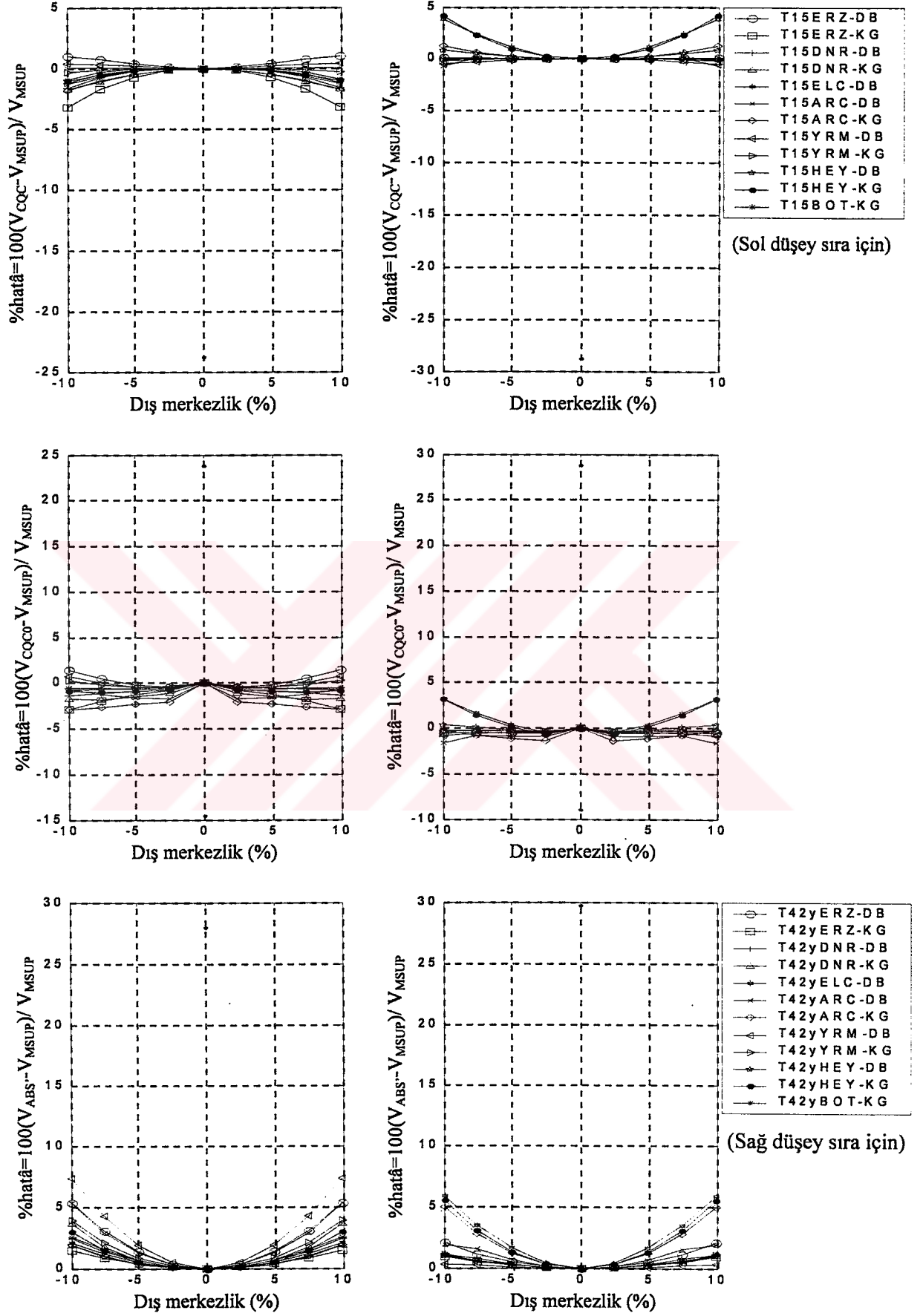
Şekil 5.8 Bina tipi 12 ve 13 (5 katlı), $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x mutlak hatâ grafiği



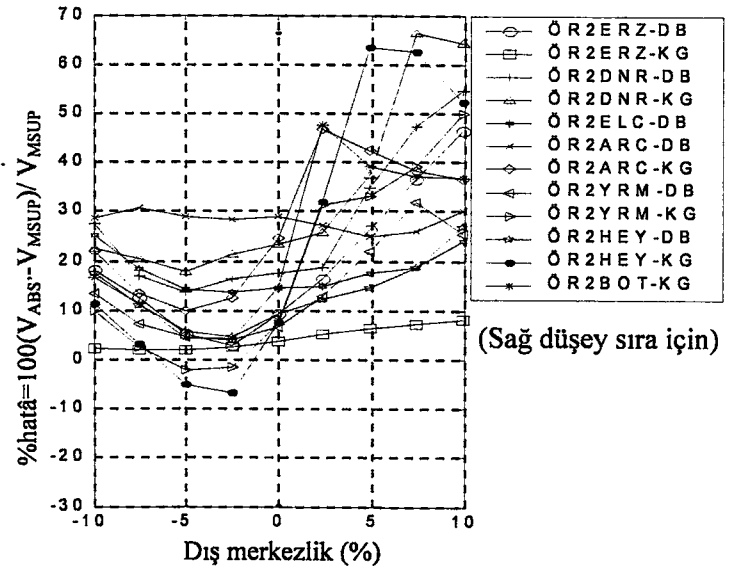
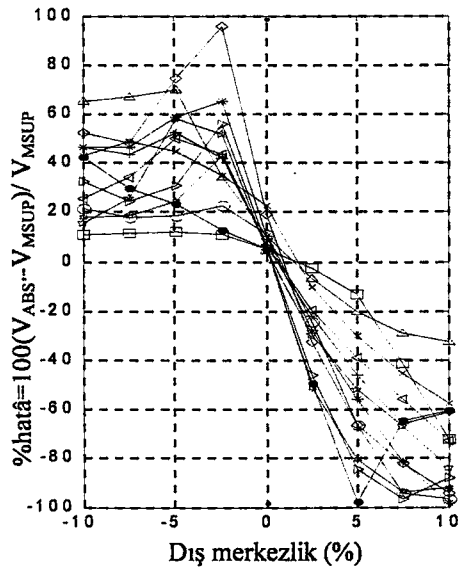
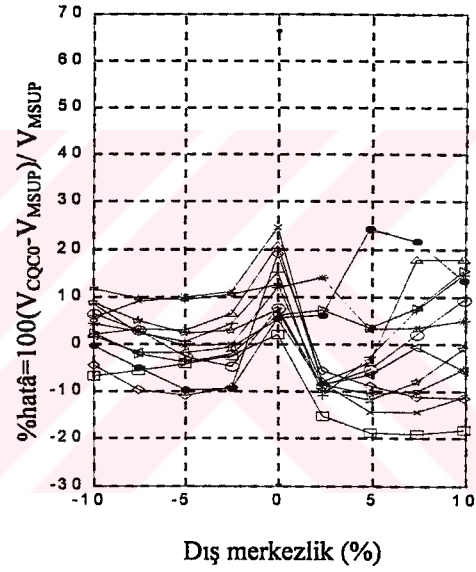
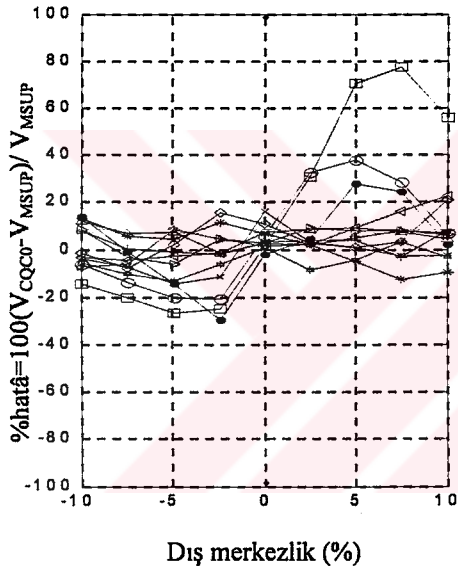
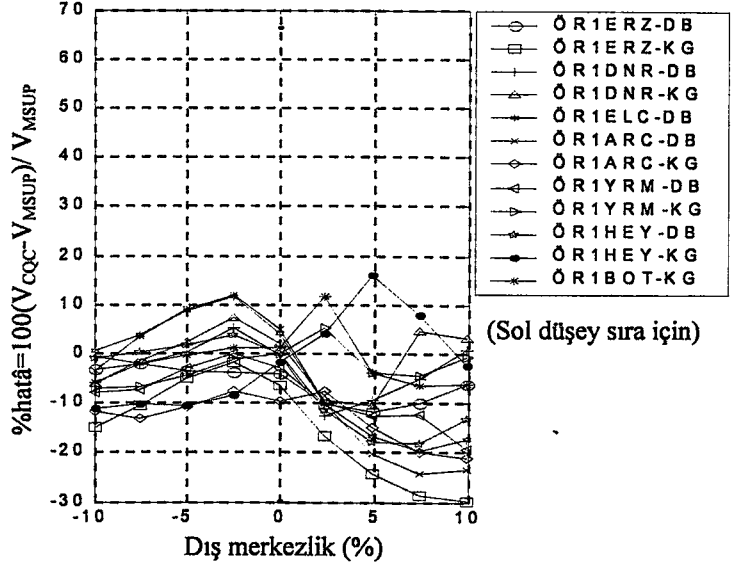
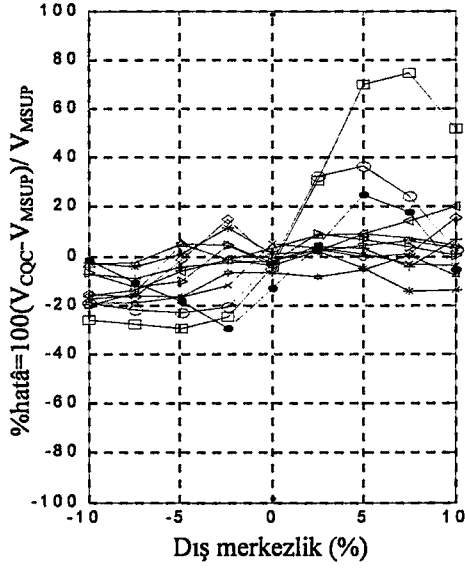
Şekil 5.9 Bina tipi 12 ve 13 (5 katlı), $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x göreceli hatâ grafiği



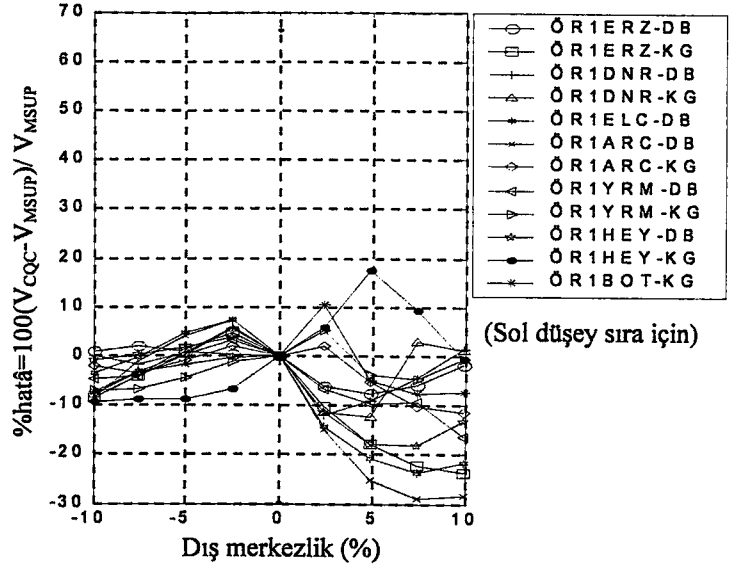
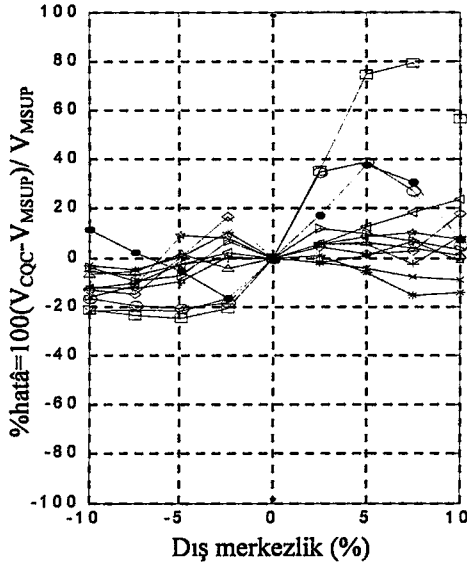
Şekil 5.10 Bina tipi 15 ve 42y (5 katlı), $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x mutlak hatâ grafiği



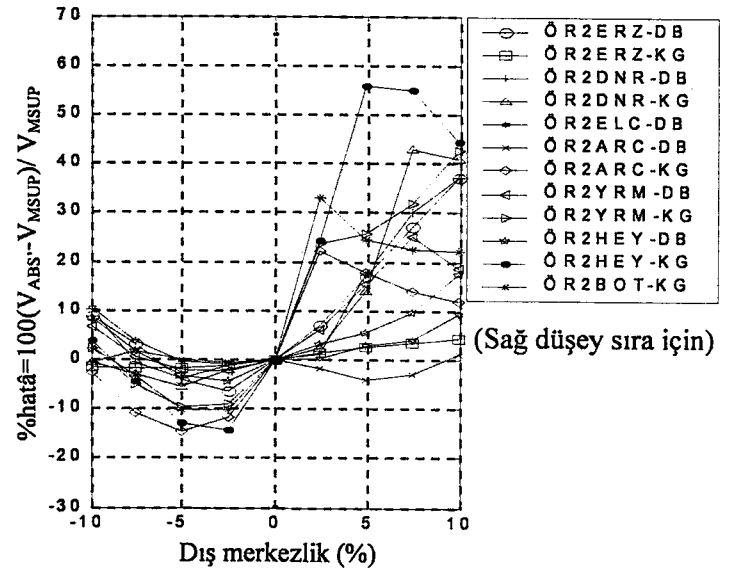
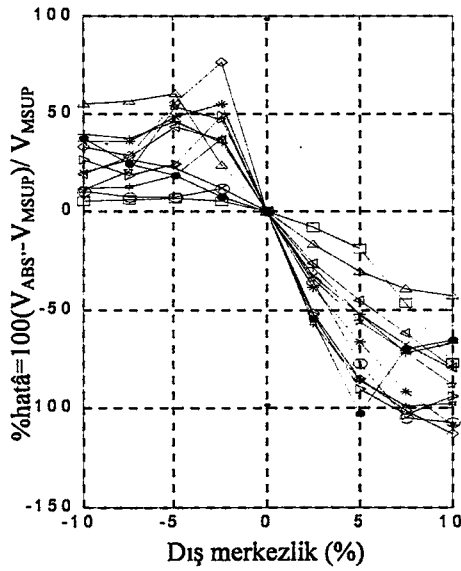
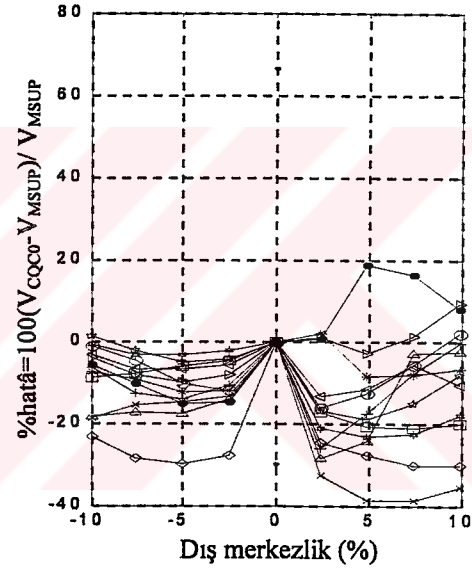
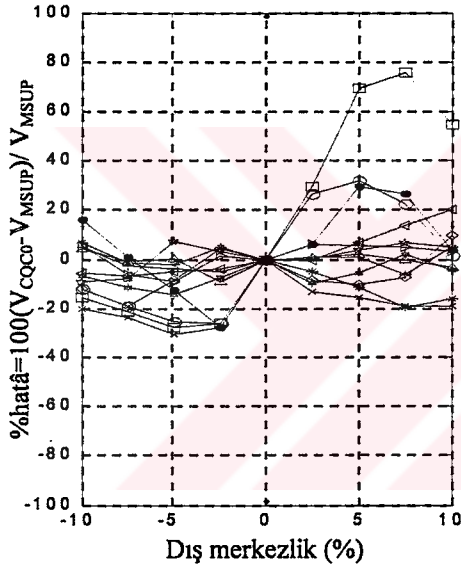
Şekil 5.11 Bina tipi 15 ve 42y (5 katlı), $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_x göreceli hatâ grafiği



Şekil 5.12 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x mutlak hatâ grafiği

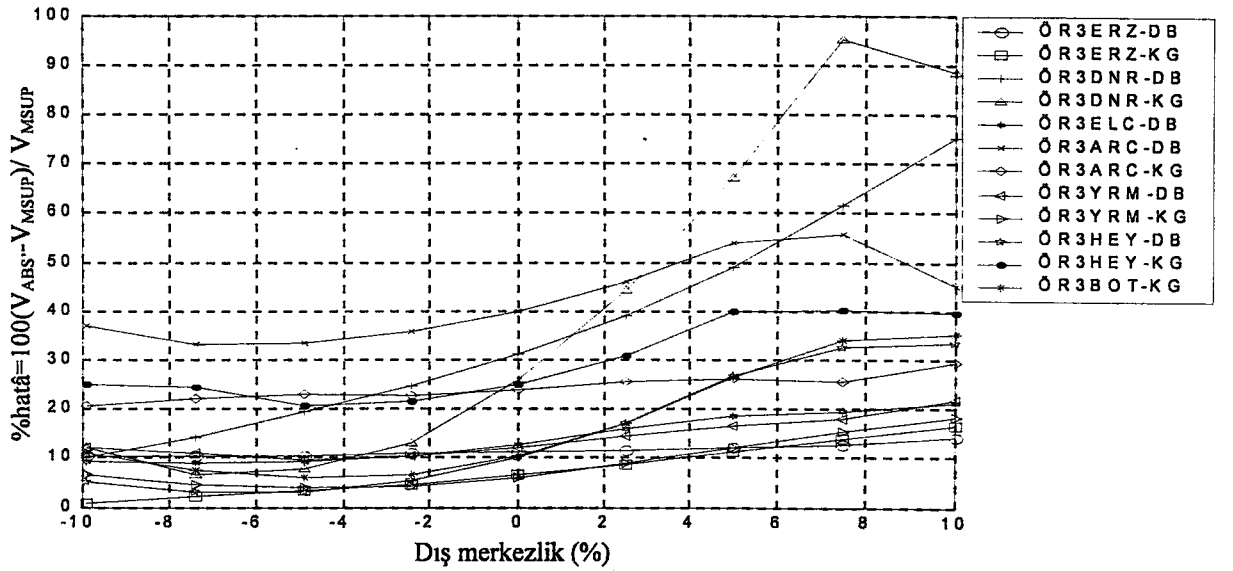
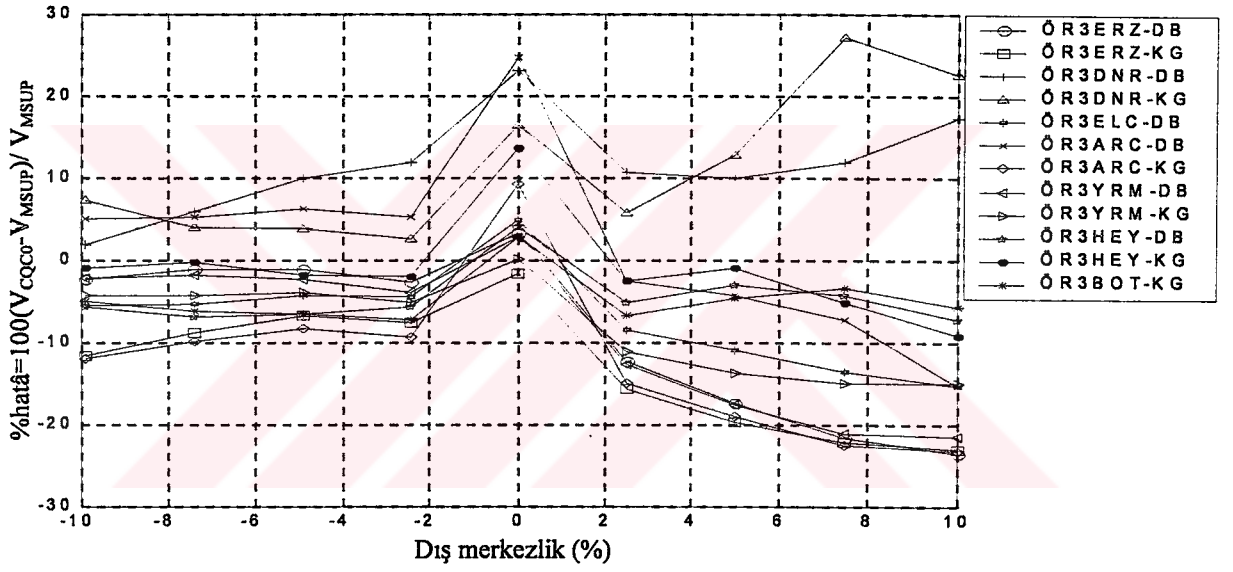
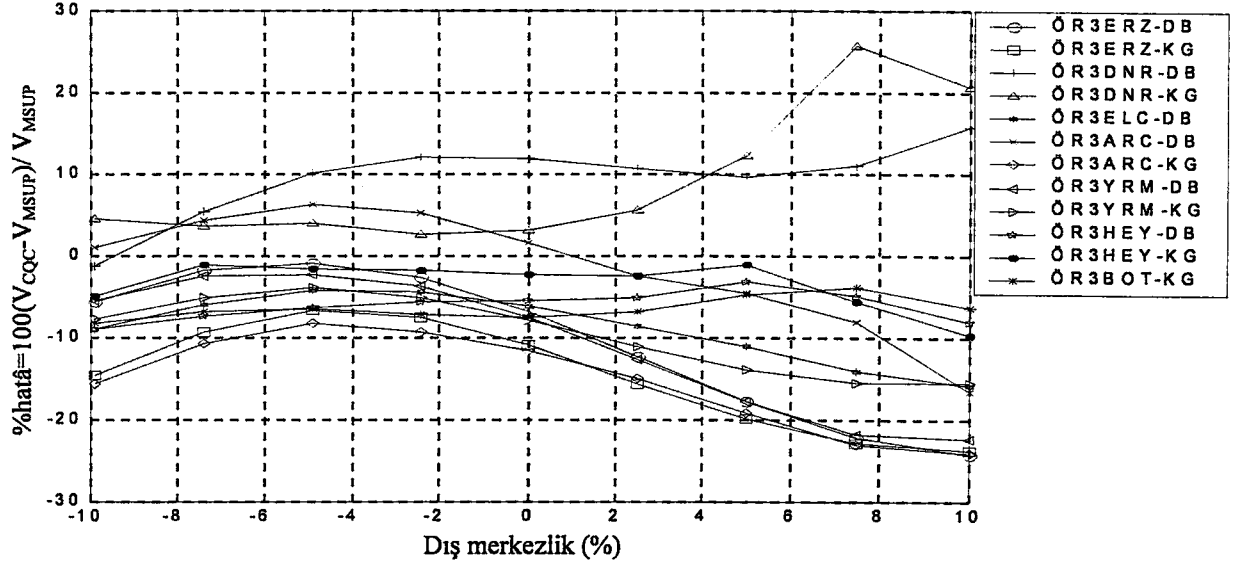


(Sol düşey sıra için)

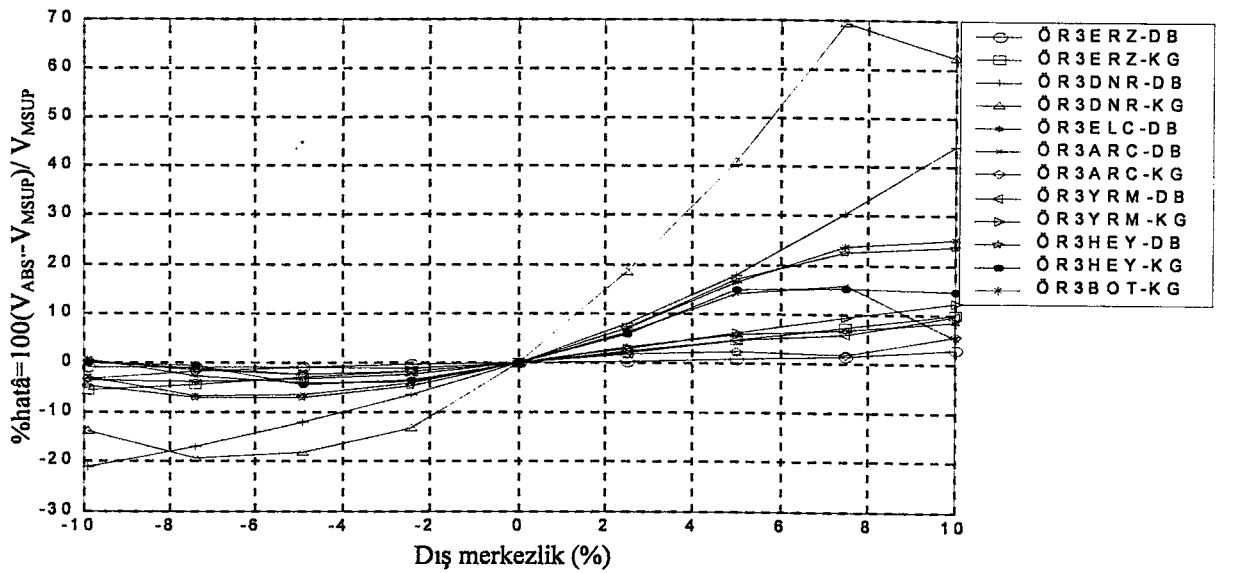
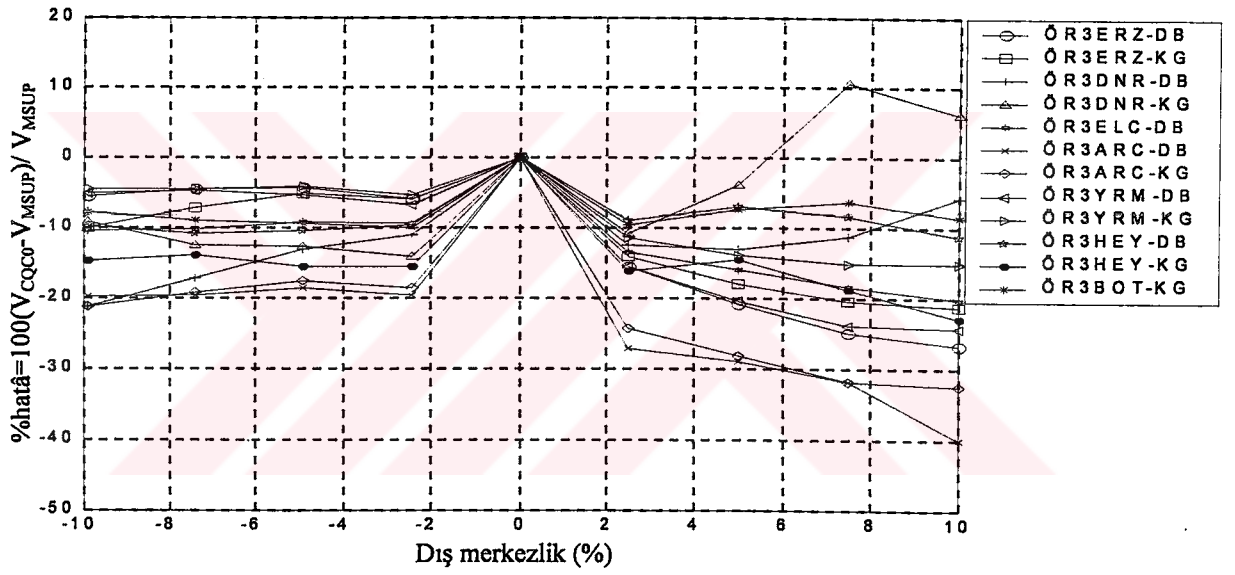
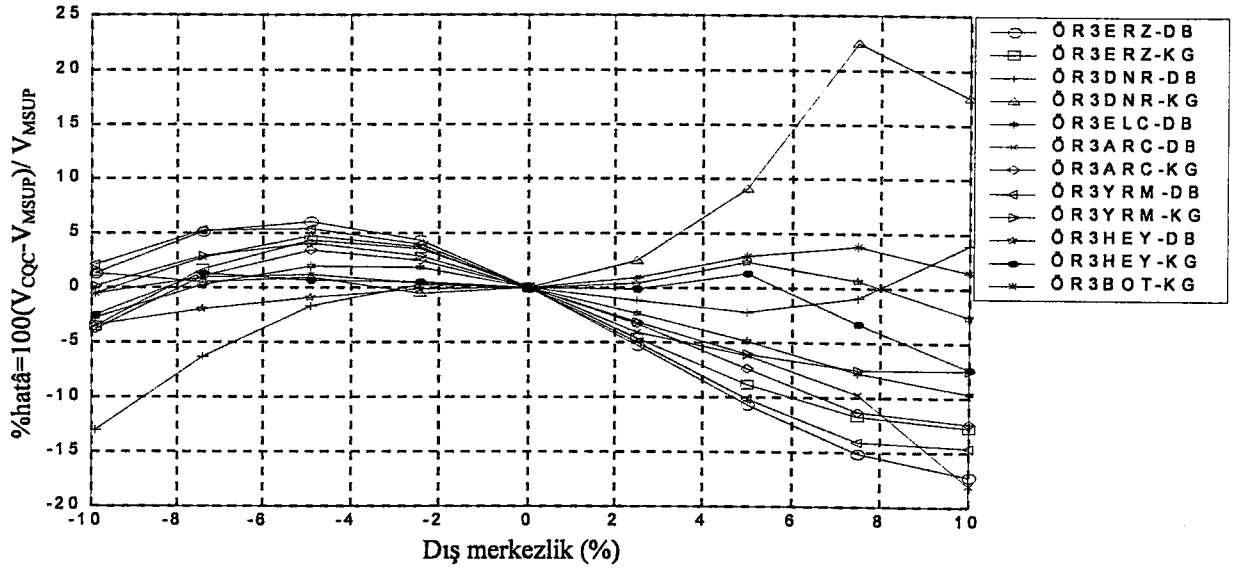


(Sağ düşey sıra için)

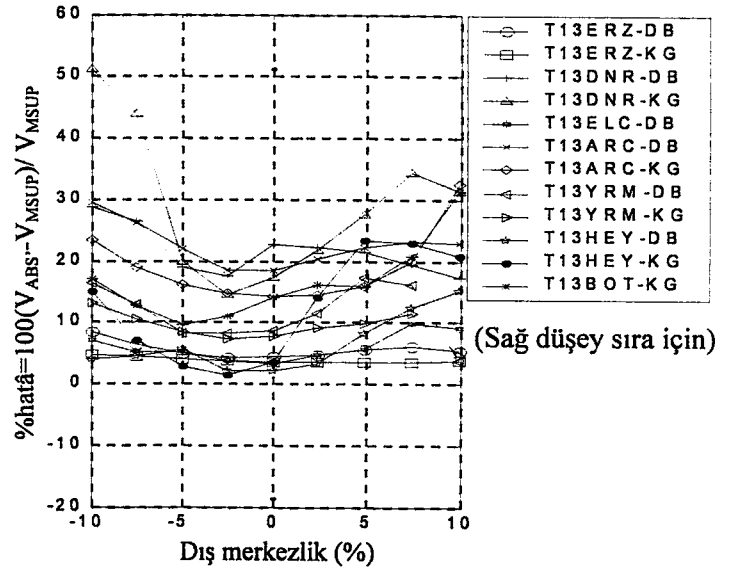
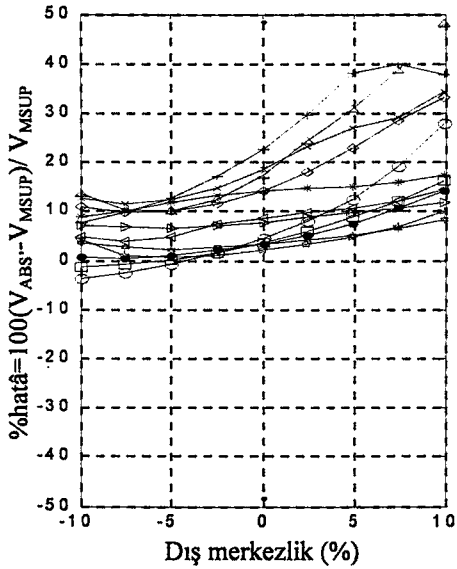
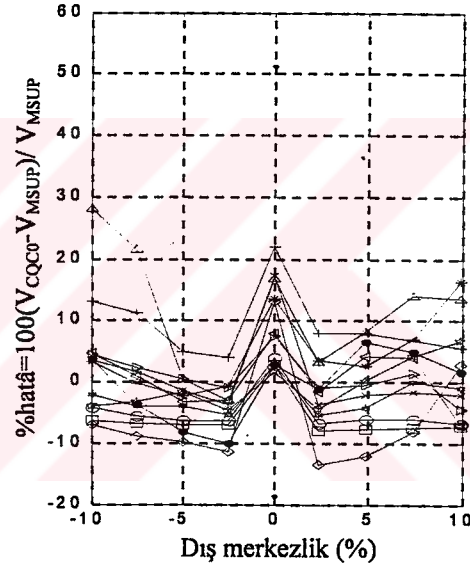
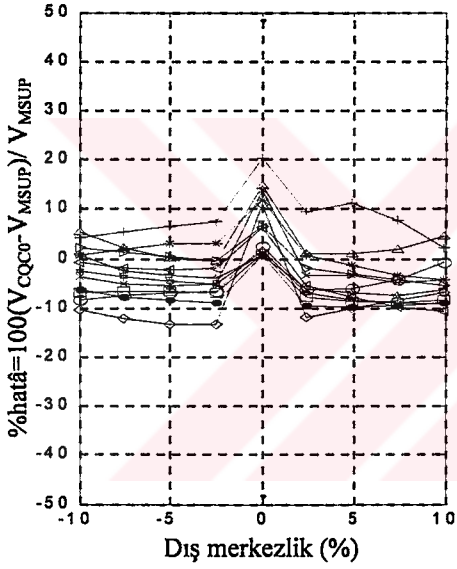
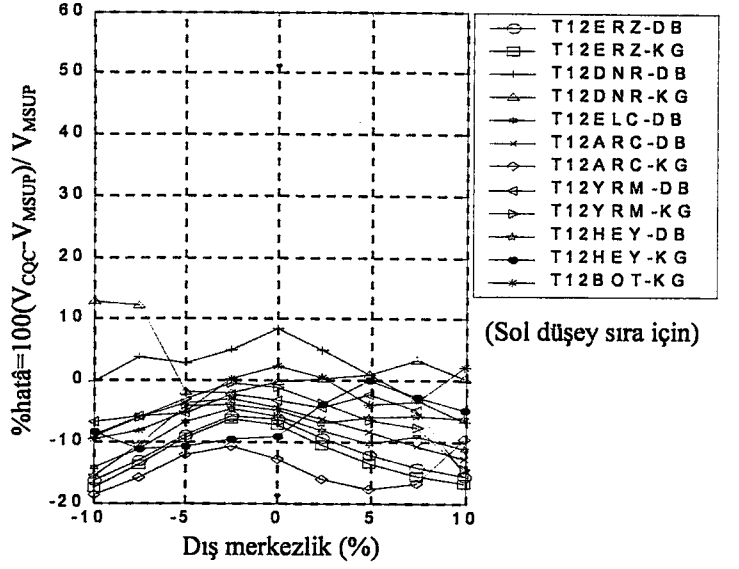
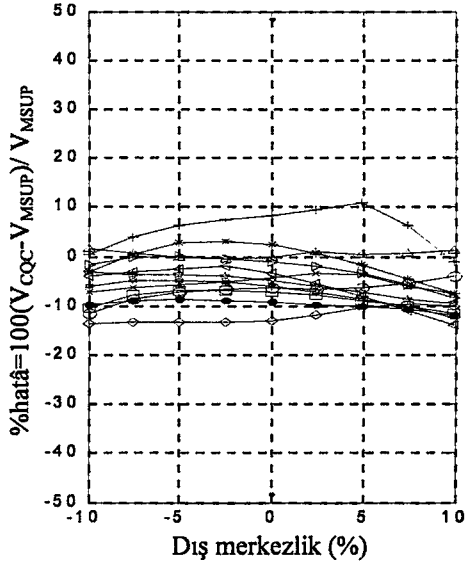
Şekil 5.13 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği



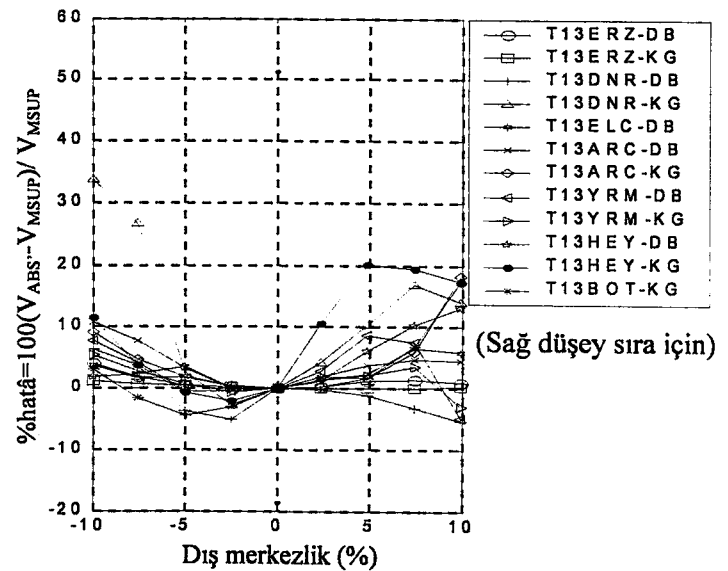
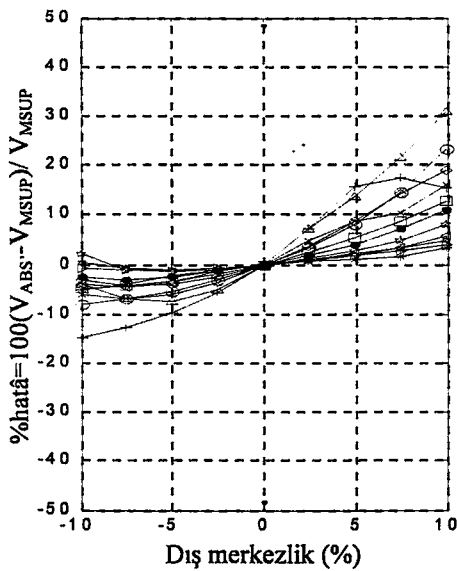
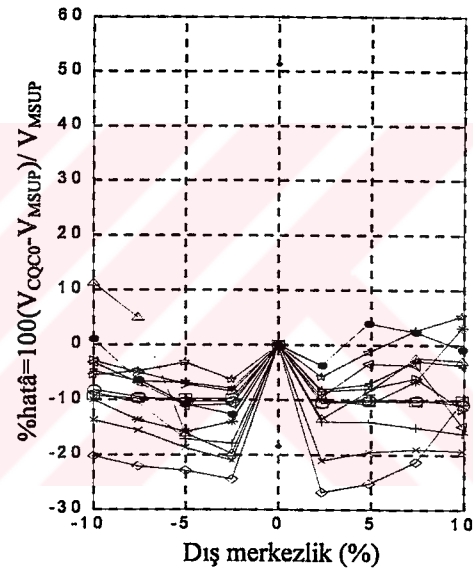
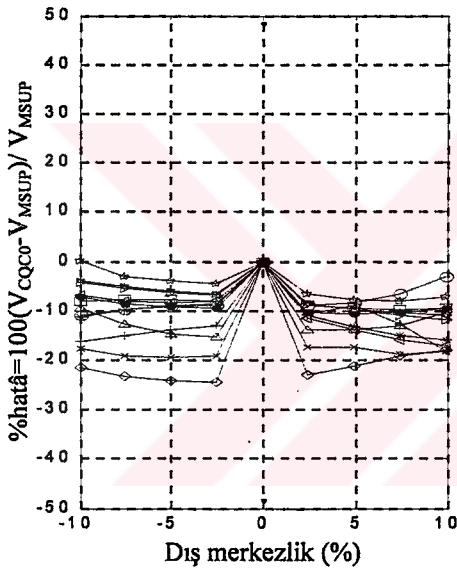
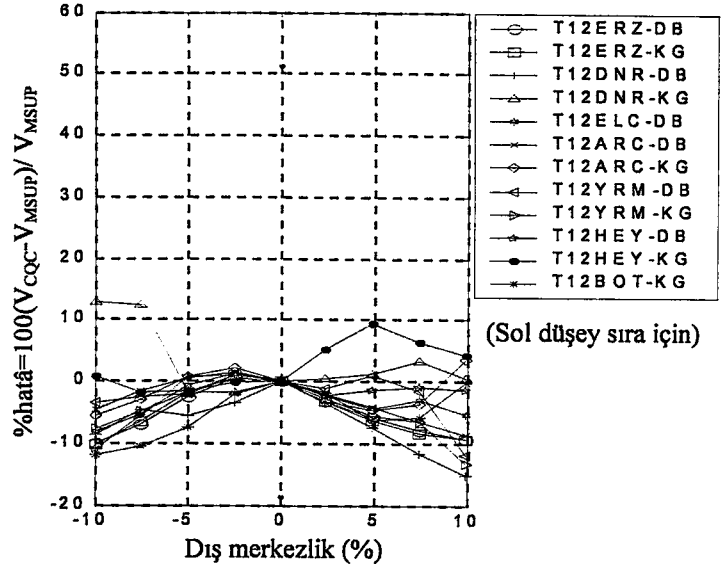
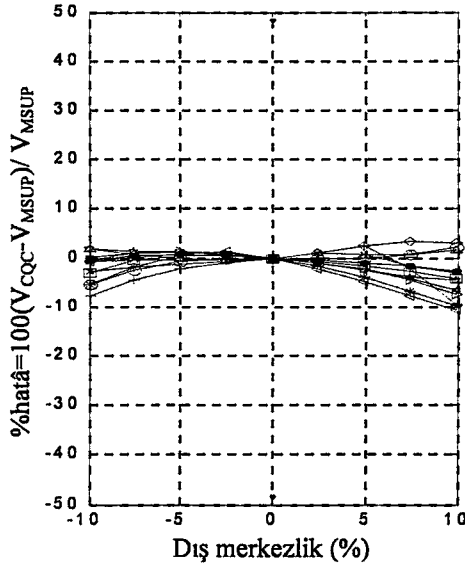
Şekil 5.14 Örnek3, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x mutlak hatâ grafiği



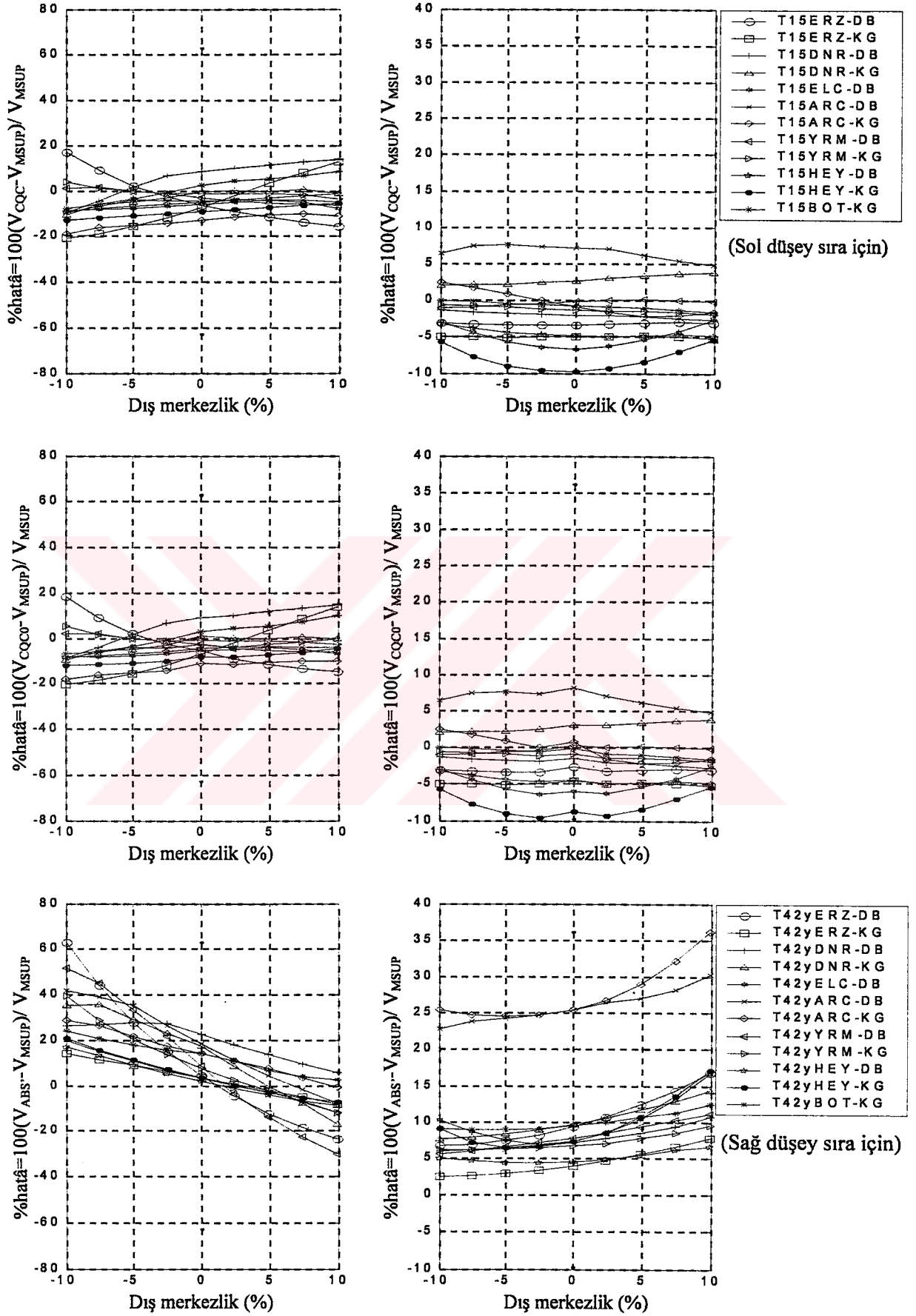
Şekil 5.15 Örnek3, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği



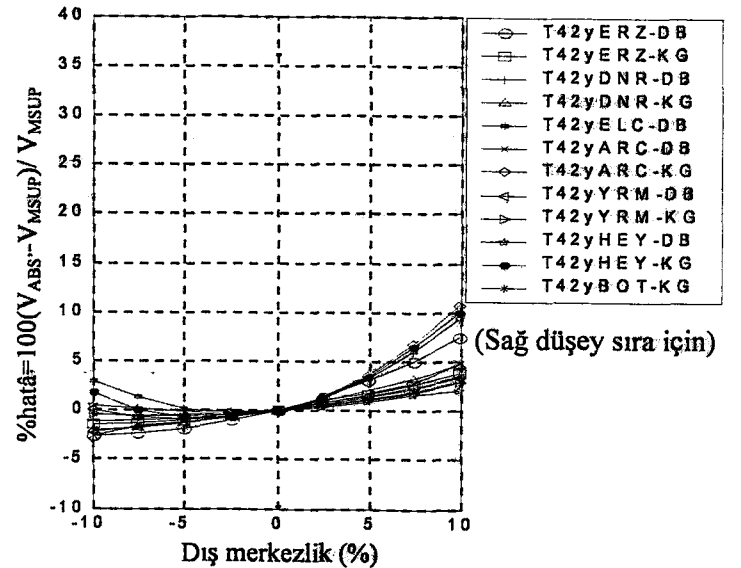
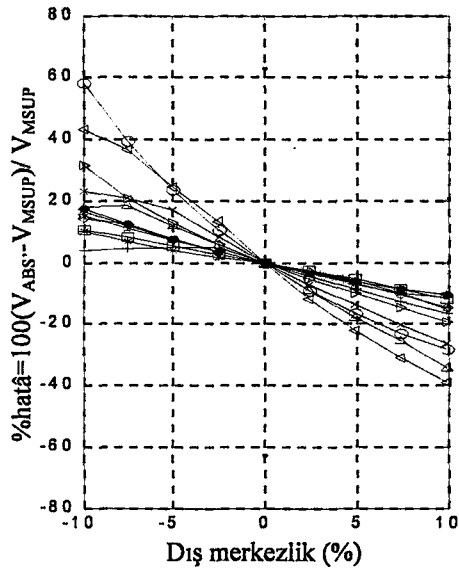
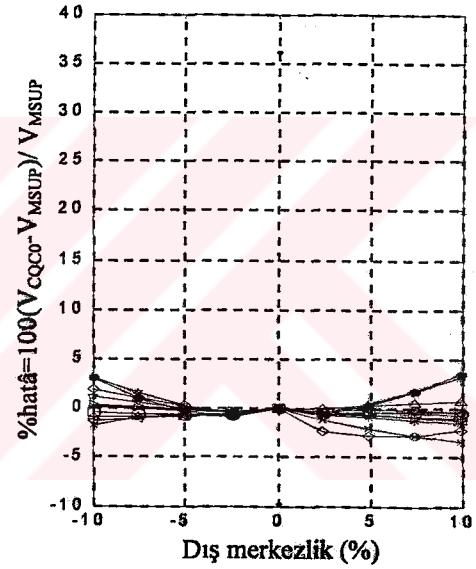
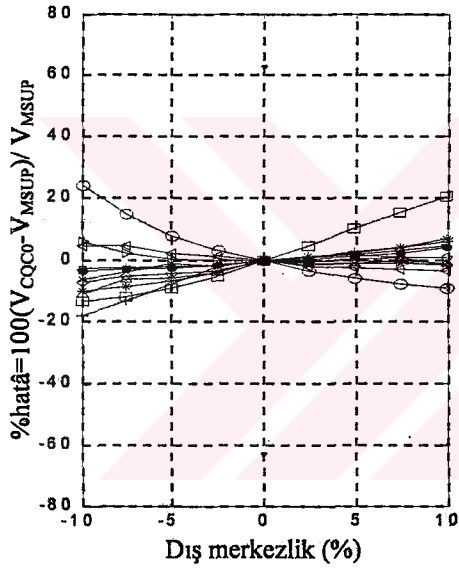
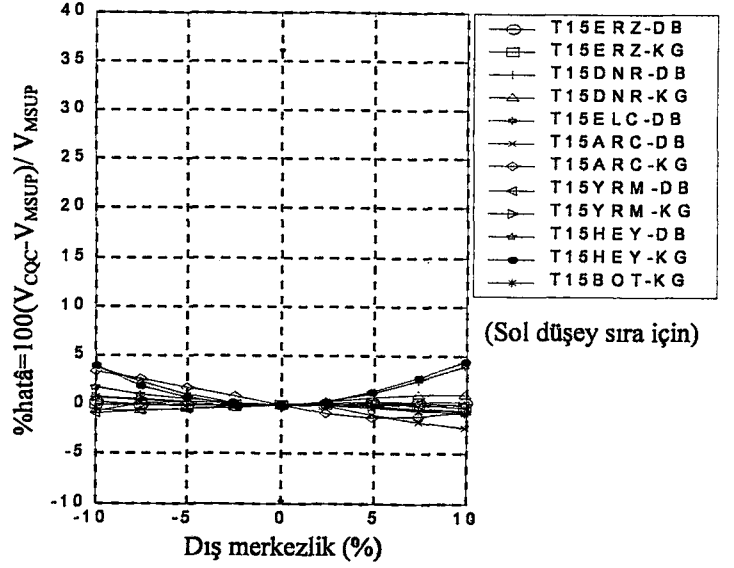
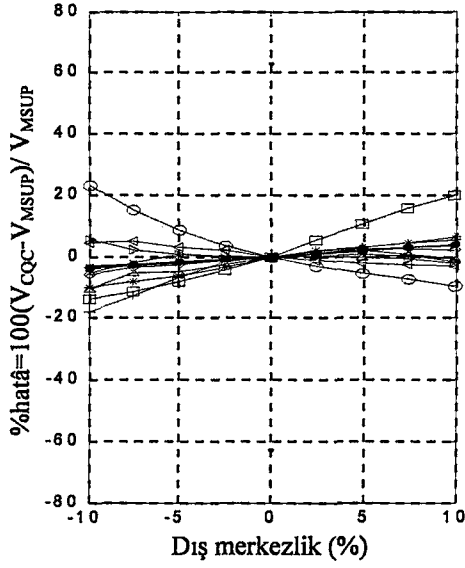
Şekil 5.16 Bina tipi 12 ve 13 (5 katlı), $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x mutlak hatâ grafiği



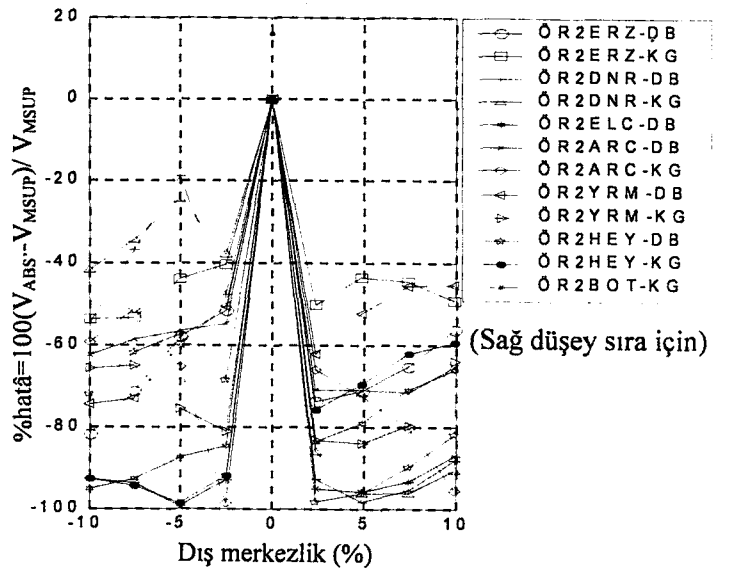
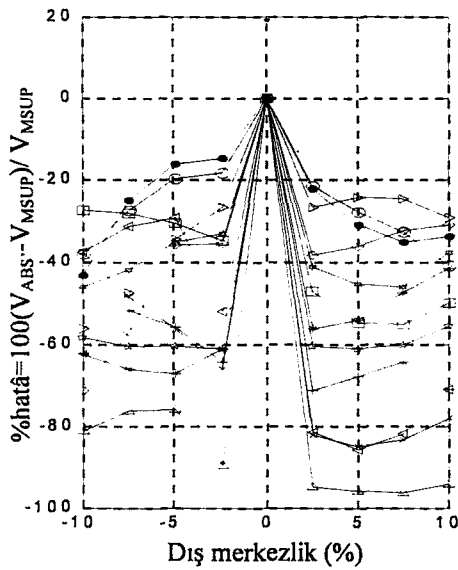
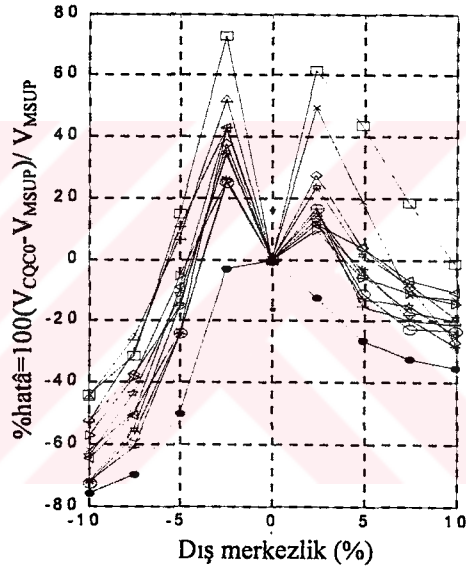
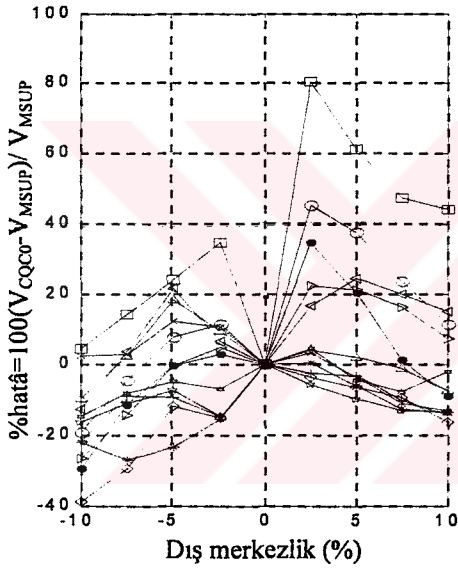
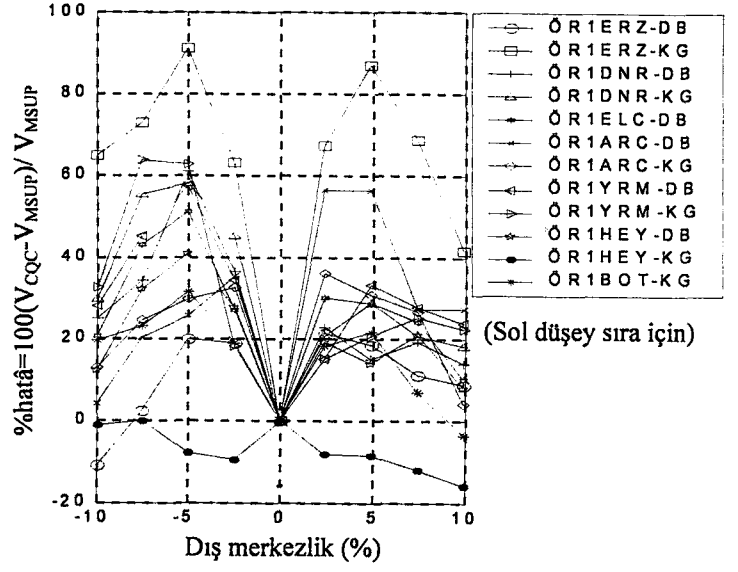
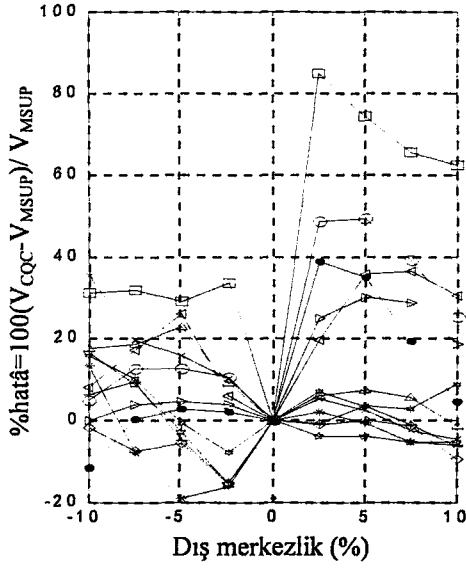
Şekil 5.17 Bina tipi 12 ve 13 (5 katlı), $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği



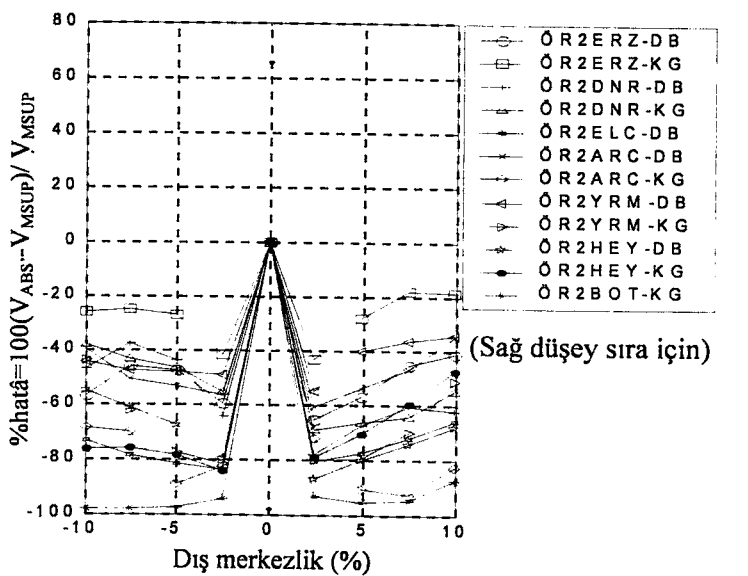
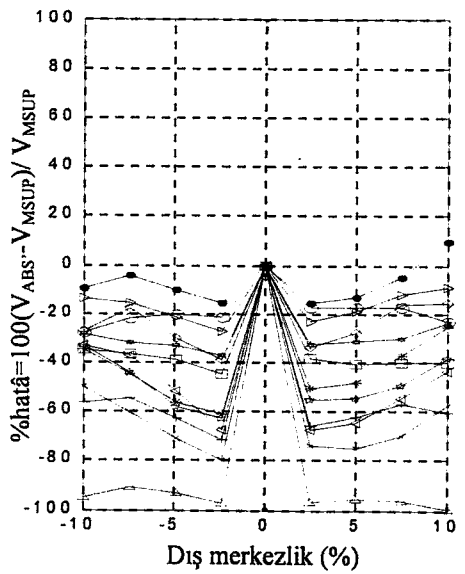
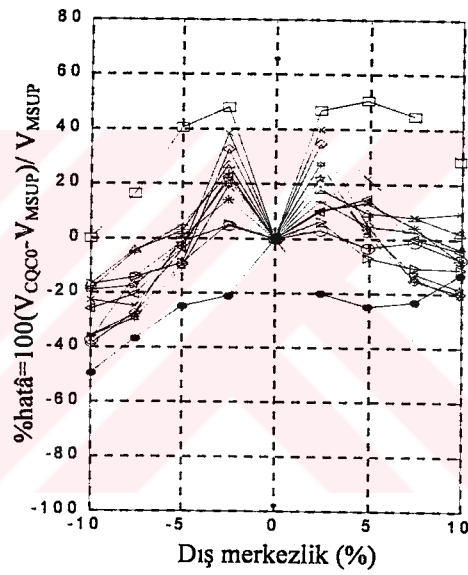
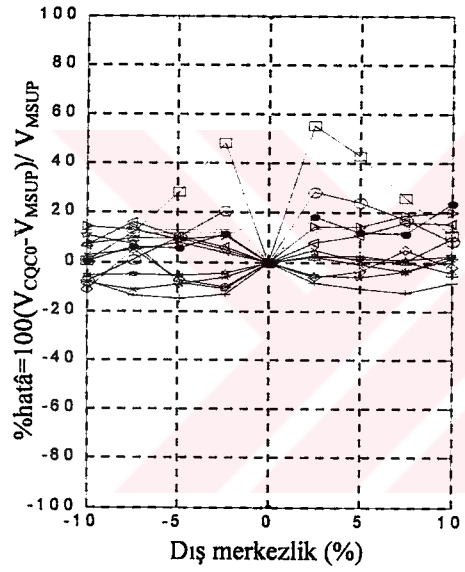
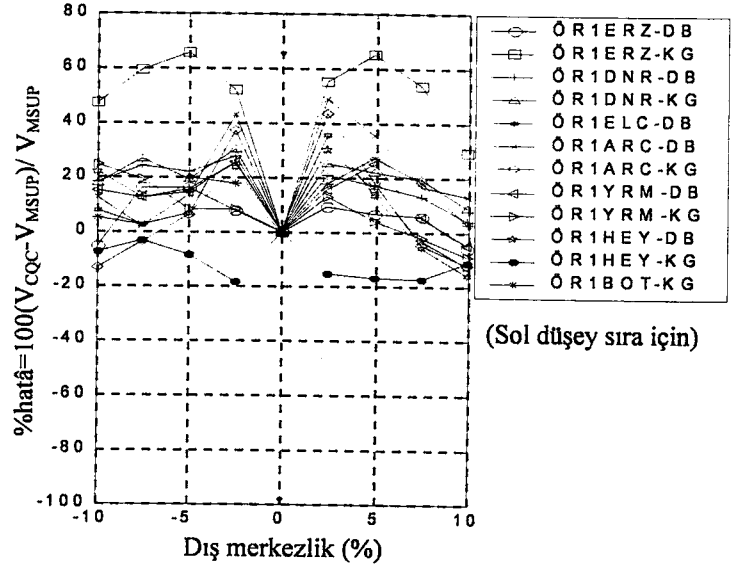
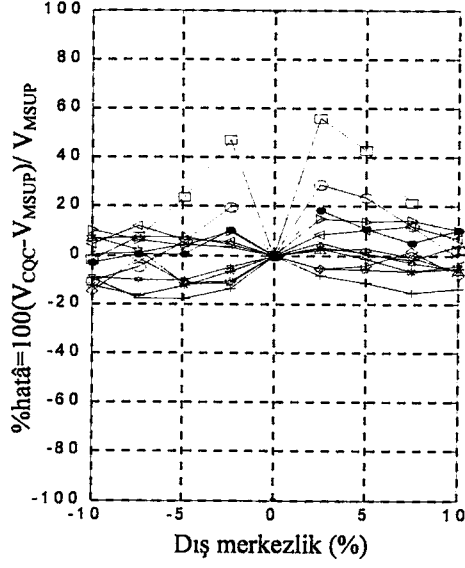
Şekil 5.18 Bina tipi 15 ve 42y (5 katlı), $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x mutlak hatâ grafiği



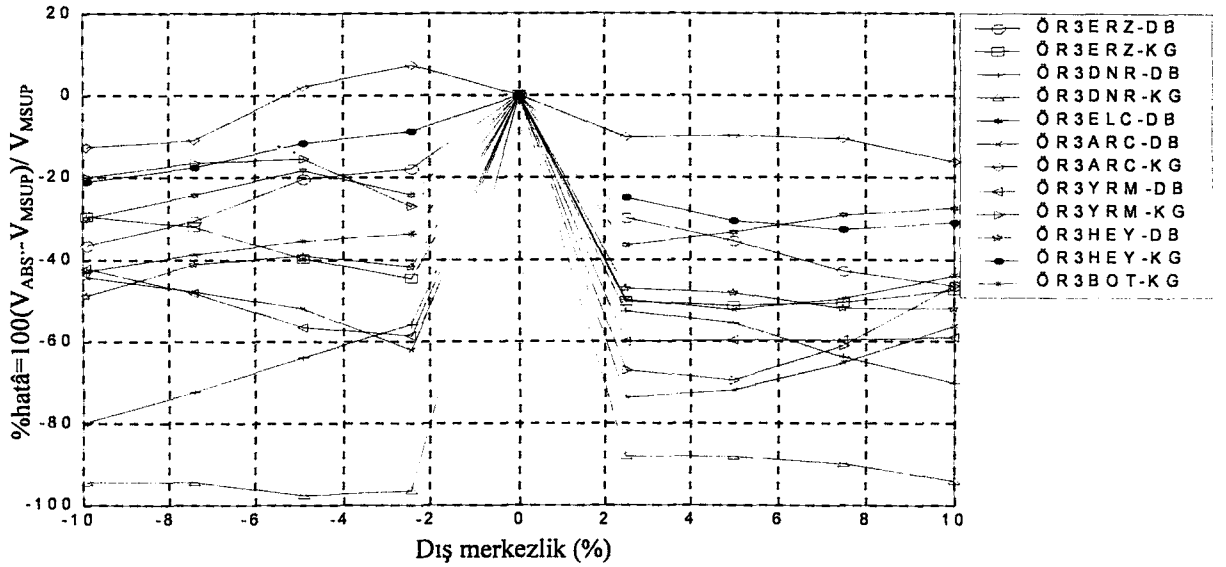
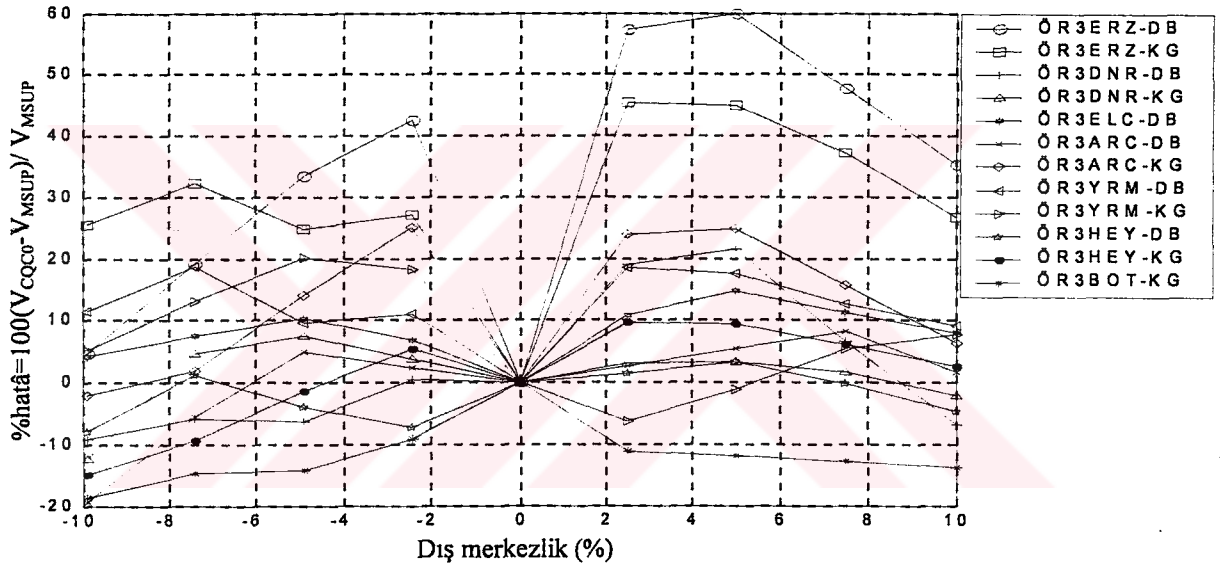
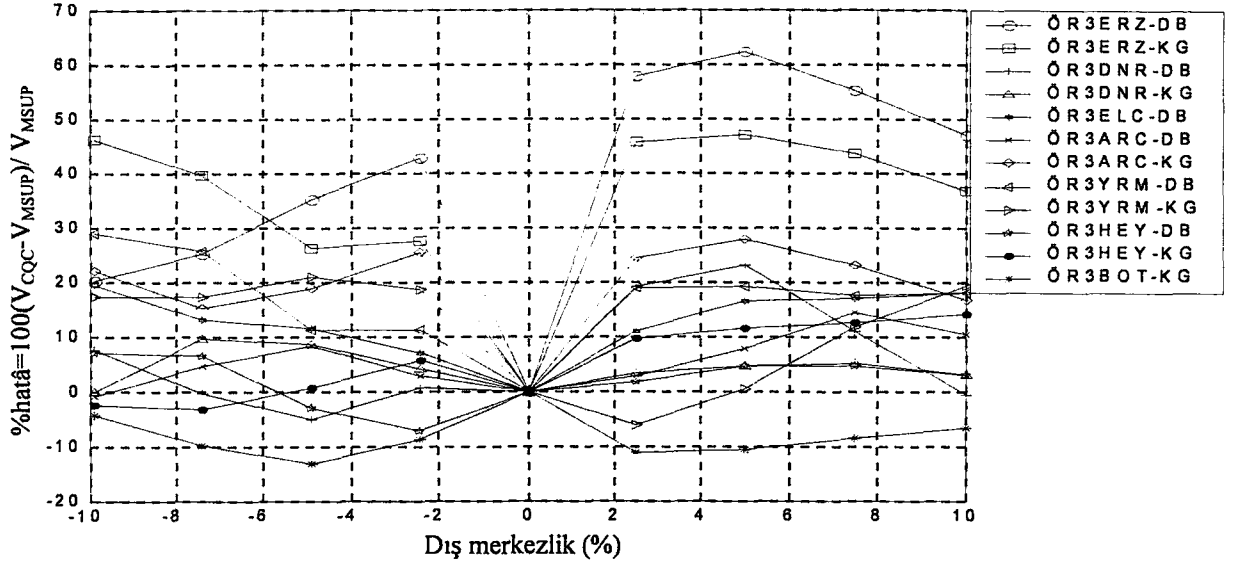
Şekil 5.19 Bina tipi 15 ve 42y (5 katlı), $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_x göreceli hatâ grafiği



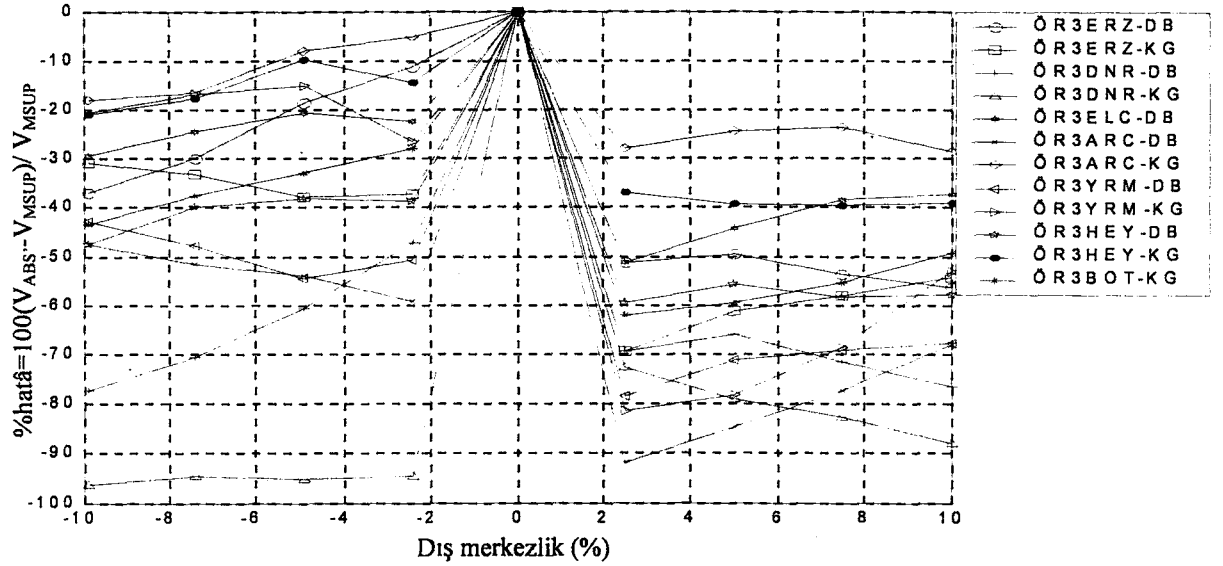
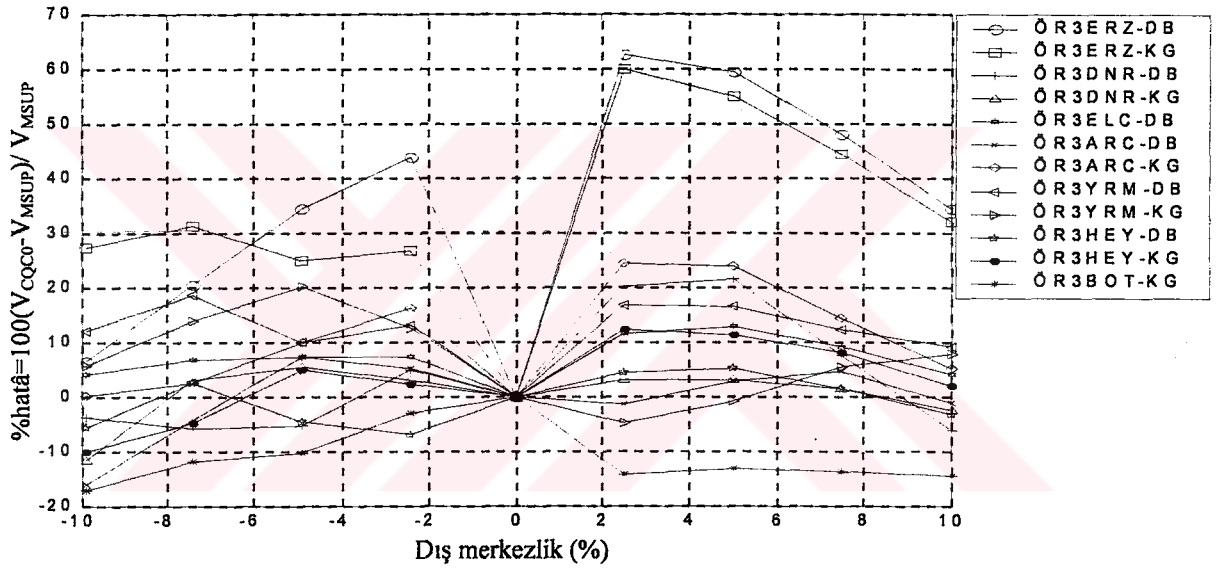
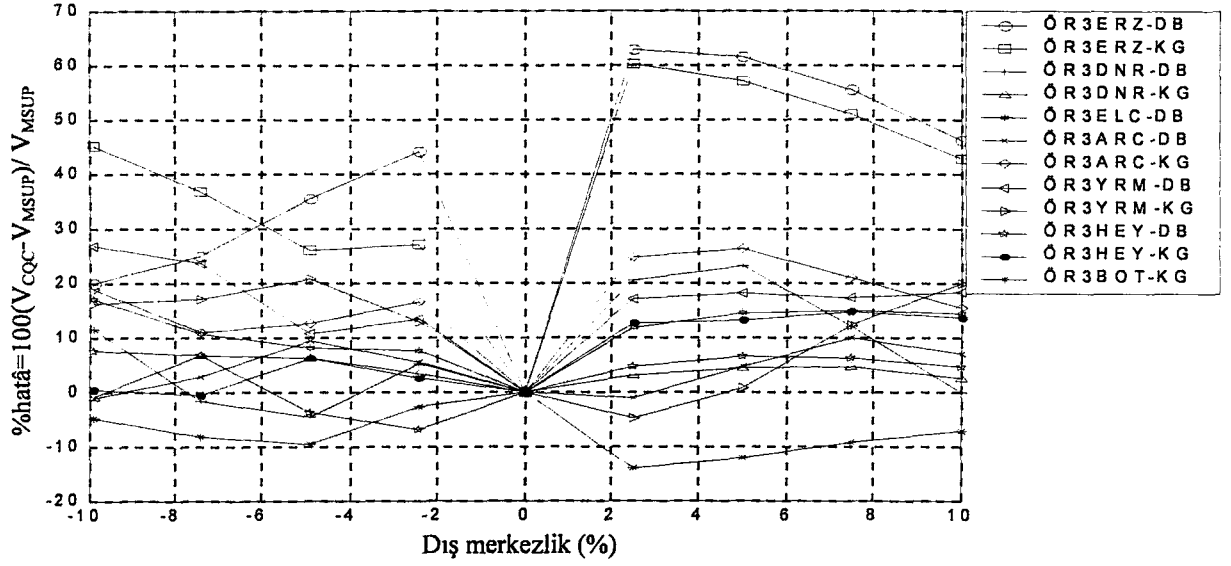
Şekil 5.20 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için orta kolonda(S5) V_y (mutlak) hatâ grafiği



Şekil 5.21 Örnek1 ve Örnek2, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y (mutlak) hatâ grafiği



Şekil 5.22 Örnek3, $\xi = 0.05$ için P2'de V_y (mutlak) hatâ grafiği



Şekil 5.23 Örnek3, $\xi = 0.05$ için köşe kolonda(S1) V_y (mutlak) hatâ grafiği

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmayla ulaşılabilen sonuçlar ve yapılabilecek öneriler, aşağıda özetlenmiştir.

- (1) CQC yöntemi, çapraz ilişki katsayıları yardımı ile doğal frekansların birbirlerine yakınlığını dikkate almaktadır. Bir yapıda, yalnızca sönüm oranı ve doğal frekansların oranına bağlı olarak hesaplanan bu katsayılar, bu yapıya ait her türlü modal büyüklüğün birleştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu katsayıların anılan bağılıklarla hesaplanabilmesi için, CQC Yönteminin oluşturulmasında, sadeleştirme niyetiyle yapılan $r_x^2 / (r_j r_h) \approx 1$ yaklaşımının, hesaplarda dikkate alınan tepki cinsinin oluşumunda öteleme ve dönme modlarının etkisinin farklılığını ihmale sevkederek, bizzat hatâ kaynağı haline gelebildiği görülmüştür. Üç boyutlu analiz edilen bir yapıda, örneğin bir kesitteki kesme kuvveti, hem öteleme hem dönme modundan ileri gelebilir. Böylelikle CQC yöntemi ile yapılan birleştirilmelerde ortaya çıkan hatâ, hesaplanan tepkinin türüne de bağlı olmaktadır. Bu çalışmada yapılan parametrik incelemeler, üç boyutlu olarak ele alınan yapılarda, kolonlarda deprem doğrultusunda oluşan kesme kuvveti için CQC yönteminde ortaya çıkan göreceli hatânın, doğal frekansların yakınlığından çok, kütlelerin harekete katılımı ile ilgili olduğunu göstermektedir.
- (2) Bir doğrultuda harekete katılan etkin kütlelerin, burulma modunda yine bu doğrultuda harekete katılan etkin kütleyle oranını dikkate alan $Q_x = \frac{M_{xx}^{(x)}}{M_{xx}^{(\theta)}}$ oranı ve dış merkezlik (e) ile, CQC yönteminde ortaya çıkan göreceli hatâ arasında bir ilişki bulunduğu görülmüştür. Q_x ile göreceli hatâ arasındaki ilişki doğrusal değildir; Q_x değeri arttığında hatâ azalmakta, azaldığında ise artmaktadır (Bu eğilime, burada yer alan 3360, burada verilmeyen fakat çalışmanın oluşumu sırasında çözülmüş olan yaklaşık 50000 adet örneğin tümünde rastlanmıştır).
- (3) 1-ci ve 2-ci maddelerdeki sonuçlar, SRSS yöntemi için de geçerlidir. Ayrıca; SRSS yönteminin yakın frekanslara sahip yapılarda büyük hatâlara neden olacağı yargısının, üç boyutlu olarak hesaplanan yapılarda her zaman doğru olmadığı; artan dış merkezlik veya ayrılaşan doğal frekanslar ile birlikte toplam hatânın da artabildiği görülmüştür. Bu durum, SRSS yönteminde hatânın doğal frekansların yakın olmasıyla arttığına dair söylemin tersi bir durumdur. Bu gibi durumlarda bu hatânın, frekansların yakınlığından çok Q_x oranı ile ilgili olduğu görülmektedir.

- (4) SRSS yöntemi için sözü edilen “ayrıklaşan doğal frekanslar ile birlikte toplam hatânın artması” ile sonuçlanan durumlara, CQC yöntemi için de rastlanmıştır. Yine aynı şekilde, toplam hatânın bu gibi durumlarda frekansların yakınlığından çok Q_x oranı ile ilgili olduğu anlaşılmıştır.
- (5) Bir (örneğin “X”) doğrultusunda bir deprem altında, buna dik olan “Y” doğrultusunda, kolonlarda oluşan kesme kuvvetlerinin hesabında; CQC yöntemine ait çapraz ilişki katsayılarının, analizi yapılan yapının dış merkezliğinin sıfıra çok yakın alınarak hesaplanması (ρ_0) ve analize bu katsayılar ile devam edilmesinin daha hassas sonuçlar verdiği görülmüştür (bu kullanım biçimi, bu çalışmada CQC0 olarak isimlendirilmiştir). Bir başka anlatımla; bu şekilde bir kullanım ile, bahsedilen türdeki kuvvetler için dış merkezliğe bağlı olarak çizilen toplam hatâ grafiğinin daha ortalama ve daha simetrik bir hal alarak; toplam hatâyı, klasik kullanıma göre azalttığı gözlenmiştir. Böyle bir yaklaşım, olumlu katkısı olmadığı durumlarda bile, genellikle CQC ile benzer sonuçlar üretmektedir.
- (6) Depreme dik doğrultudaki kesme kuvvetlerinin spektral hesabında, modal büyüklüklerin işaretleri ile birlikte doğrudan toplanması (Fransız Yönetmeliği yaklaşımı) ise, genellikle mutlak değerce %100 mertebesi civarında bir maksimum toplam hatâyı neden olmaktadır. Maksimum hatânın %100 seviyesinde kalışı, CQC yönteminin yukarıda bahsedilen her iki kullanımına (CQC ve CQC0) göre daha az değişkenlik göstermesi açısından, kayda değer görülmüştür (CQC yönteminde, depreme dik doğrultudaki tepki hesaplarında hatâların %300'lere tırmandığı hallere rastlanmıştır).
- (7) Yatay yük niteliği taşıyan rüzgar yükleri altında, bir yapının hesaplarda burulmalı olarak dikkate alınmasının kriteri Liang 1997'de, dış merkezlik değerinin %5'den büyük olması olarak verilmektedir. Deprem etkisi için yapılan çalışmalarda, bunun eksik bir tanımlama olduğu sonucuna varılmıştır. Bu kriterin, her iki yatay ortogonal doğrultudaki rijitlikler oranını dikkate alan yapı tipi, dış merkezlik ve Q oranına bağlı olarak belirlenmesi gerektiği görülmüştür.
- (8) Burulma kat kütleli atalet momenti düşük bir yapıda, bu kütle değeri arttırıldıkça, kolonlarda deprem doğrultusundaki kesme kuvvetinin CQC yöntemi ile hesabında oluşan göreceli hatâ da artmaktadır. Bunun nedeni, kütleli atalet momentinin artışı ile, yapı titreşiminde burulma deplasmanlarından ileri gelen katkının artmasıdır. Bu artışla birlikte, Q oranı beklendiği gibi azalarak, burulmalı davranışı ve göreceli hatâ artışını işaret eder. Kütleli atalet momenti daha da arttırıldığında ise, yapı ötelemeden çok burulma titreşimi

yapar hale gelir. Göreceli hatâ ise çerçeve davranışlı sistemlerde olduğu gibi azalır. Q oranı artarak, çerçeve davranışlı sistemlerde aldığı değerleri alır. Böyle bir sonuç, birbirine bağlanmış burulma yaylarına ait rijitlik matrisinin, üst üste konulmuş öteleme yaylarına (kayma çerçevesi) ait rijitlik matrisi ile benzerlik göstermesi; her iki sistemdeki kütle matrislerinin de köşegen olması ve böylelikle, dinamik sistemlerin birbirlerine eşdeğerliği ile açıklanabilir. Burada ilginç olan, Q oranının artışı ile yapının çerçeve benzeri (burulma veya kayma çerçevesi) bir davranış göstermesi, azalışıyla ise bu davranışın öteleme ve burulma bileşenli bir hal almasıdır.



KAYNAKLAR

- Biggs J. M., (1964), "Structural Dynamics", McGraw-Hill, USA, 341.
- Celep Z., Kumbasar N., (1992), "Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş", İstanbul, 422.
- Chopra A. K., (1995), "Dynamics of Structures", Prentice Hall, New Jersey, USA, 755.
- Circular, (1999), "Implications For Earthquake Risk Reduction in The United States From The Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999", USGS circular, 64, USA Government Printing Office.
- Clough W., Penzien J., (1975), "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, 634, USA.
- Coutinho L. G. A., Landau L., Lima C. P., Ebecken F. F., (1987), "The Application of The Lanczos Mode Superposition Method In Dynamic Analysis of Offshore Structures", Computers and Structures, 25:615-625.
- Erdik M., Yüzügülü Ö., (1980), "Deprem Mühendisliği Açısından Yapı Dinamiğine Giriş", ODTÜ, Ankara.
- Fertis D. G., (1973), "Dynamics and Vibration of Structures", John Wiley&Sons inc., USA, 485.
- Goodman L. E., Rosenblueth E., Newmark N. M., (1953), "Aseismic Design of Elastic Structures Founded on Firm Ground", ASCE, 349-375.
- Gupta A. K., (1990), "Response Spectrum Method In Seismic Analysis and Design of Structures", CRC Press, Florida.
- Gupta A. K., Cordero K., (1981), "Combination of Modal Responses", Sixth International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology", Paris, K7/15.
- Hu., Liu., Dong., (1996), "Earthquake Engineering", E&FN.
- International Association of Earthquake Engineering, (1992), "Earthquake Resistant Regulations – A World List 1992", Meguroku Toukyo, 2 Cilt.
- Karadeniz A., (1992), "Yüksek Matematik", Çağlayan Basımevi, İstanbul, 439.
- Kiureghian A., (1981) "A Response Spectrum Method For Random Vibration Analysis of MDF Systems", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 9:419-435.
- Liang B., Tamura Y., Suganuma S., (1995), "Simulation Of Wind-Induced Lateral-Torsional Motion Of Tall Buildings", Computers & Structures, 42:601-606.
- Ogata K., (1990), "Modern Control Engineering", Prentice-Hall, USA, 963.
- Polat Z., (1995), "Influence of Earthquake Direction On Response of Structures", Mangalia, Romania.
- Reddy. J., (1993), "An Introduction To Finite Element Method",
- Rice S. O., (1954), "Mathematical Analysis of Random Noise", Slected Papers on Noise and Stochastic Processes-editor N. Wax, Dover, 133-249.

Rosenblueth E., Elorduy J., (1969), "Response of Linear Systems in Certain Transient Disturbances", Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, A-1:185-196.

Seismology Committee Structural Engineers Association of California, (1990), "Recommended Lateral Force Requirements And Commentary", Sacramento, California, 263.

Timoshenko S., Goodier J. N., (1969), "Elastisite Teorisi" (Çev. İ. Kayan, E. Şuhubi), Arı Kitabevi, İstanbul, 512.

Tsai H. C., (1998) "Modal Superposition Method For Dynamic Analysis of Structures Excited By Prescribed Support Displacements", Computers and Structures, 66:675-683.

Vanmarcke E. H., (1972), "Properties of Spectral Moments With Applications To Random Vibration", Journal of The Engineering Mechanics Division ASCE, 98(EM2):425,446.

Vanmarcke E. H., (1975), "On The Distribution of The First-Passage Time For Normal Stationary Random Processes, Journal of The Applied Mechanics ASME, 42:215-220.

Vanmarcke E. H., (1977), "Structural Response To Earthquakes", Seismic Risk and Engineering Decisions, Elsevier, 287-337.

Villaverde R., (1988), "Rosenblueth's Modal Combination Rule For Systems With Non-Classical Damping", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 16:315-328.

Wilson E. L., (1998), "Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures", Computers and Structures Inc., Berkeley, USA, 342.

Wilson E. L., Kiureghian A., Bayo E. P., (1981) "A Replacement For The SRSS Method In Seismic Analysis", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, 9:187-194.

Yönetmelik, (1997), "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik", İnşaat Mühendisleri Odası, 85, İzmir.

Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., (1989), "The Finite Element Method", McGraw-Hill, UK, Vol. 1, 648.

EKLER

- Ek 1 Rijitlik hesaplamalarında kullanılan yöntemler ve kabuller
- Ek 2 Kullanılan programın işleyiş adımları
- Ek 3 Kullanılan depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtları ve tepki spektrumları



Ek1.1 Çubuk Elemanlar

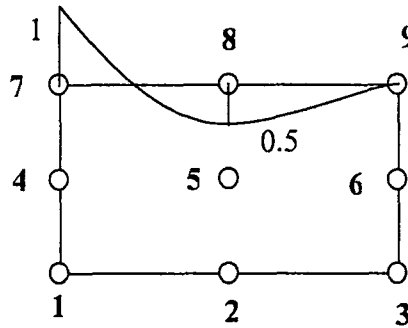
Bu çalışmada kodlanan analiz programında, yapıların çubuk elemanları, uzaysal çerçeve elemanlar olarak dikkate alınmıştır. Elemanların uç serbestlikleri 6 dır. Sistem hesabında matris deplasman metodu kullanılmıştır. Elemanların birim deplasman sabitlerinin hesabında kayma ve burulma şekil değiştirme işleri de dikkate alınmıştır. Kirişlerin kolonlara saplandığı kolon aksına kadar olan mesafeler sonsuz rijit, aynı şekilde kolonların kirişlere saplandığı bölgeler, kiriş ağırlık merkezine kadar sonsuz rijit olarak kabul edilmiştir. Boyuna şekil değiştirme rijitliği ve burulma rijitliklerinin hesabı açısından bu bölgelerin çubuk kesitleri ile devam ettikleri kabul edilmiştir.

Bu çalışmada; perde elemanlar, düzlem gerilme durumu olarak sonlu elemanlarla modellenmişlerdir. Zayıf doğrultudaki rijitlikleri ise çubuk elemanlar yardımı ile dikkate alınmıştır. Bu modellemede; perde elemanın burulma rijitliği çubuk teorisi kabulleriyle hesaplanmış ve ankastre uçta kesit çarpılmasına engel olunması bu rijitlikte dikkate alınmamıştır. Bu rijitlik, perdenin her iki ucunda tanımlanan fiktif iki kolona verilmiştir.

Ek1.2 Perde Elemanlar

Ek1.2.1 Kullanılan Sonlu Eleman Özellikleri

Perde elemanların rijitlik matrisleri, yapının çerçeve modelinden ayrı olarak hesaplanmış, daha sonra sistem rijitlik matrisine katkıları ayrıca dikkate alınmıştır. Bu elemanlar, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir.



Şekil Ek1.1 Perde elemanlarını modellemede kullanılan sonlu eleman

Sonlu eleman olarak 9 nodlu dikdörtgen düzlem gerilme elemanı kullanılmıştır. Elemanın şekli ve nod özellikleri aşağıda gösterilmiştir. Nodların her biri şekil düzleminde olmak üzere yatay ve düşey deplasman serbestliklerine sahiptir. Sol alt noddan sağa doğru olmak üzere her nod numaralanmış ve bu işlem yukarı sıralara doğru aynı şekilde devam ettirilmiştir. Bu numaralandırmaya bağlı olarak şekil fonksiyonları (Ek1.1)'de verilmiştir (Reddy, 1993).

$$\Psi_1 = \frac{1}{4}(\xi^2 - \xi)(\eta^2 - \eta)$$

$$\Psi_2 = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(\eta^2 - \eta)$$

$$\Psi_3 = \frac{1}{4}(\xi^2 + \xi)(\eta^2 - \eta)$$

$$\Psi_4 = \frac{1}{2}(\xi^2 - \xi)(1 - \eta^2)$$

$$\Psi_5 = (1 - \xi^2)(\eta^2 - \eta)$$

(E1.1)

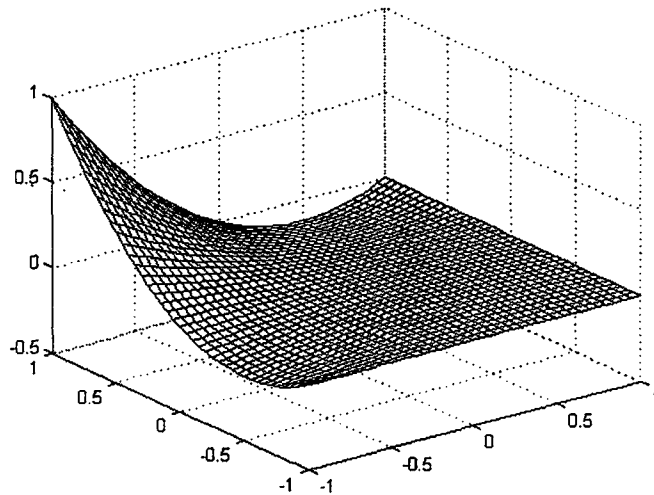
$$\Psi_6 = \frac{1}{2}(\xi^2 + \xi)(1 - \eta^2)$$

$$\Psi_7 = \frac{1}{4}(\xi^2 - \xi)(\eta^2 + \eta)$$

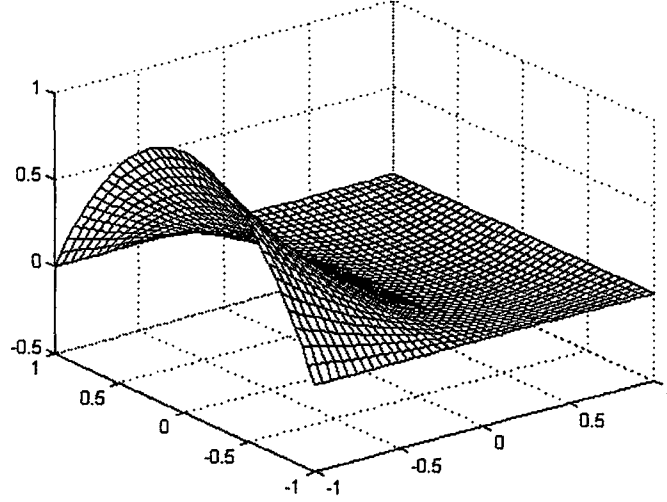
$$\Psi_8 = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(\eta^2 + \eta)$$

$$\Psi_9 = \frac{1}{4}(\xi^2 + \xi)(\eta^2 + \eta)$$

Şekil fonksiyonlarının 7 ve 4-cüsüne ait grafikler sırasıyla aşağıda verilmiştir.



Şekil Ek1.2 Sonlu elemanın 7 numaralı nodunda 1 değerini alan şekil fonksiyonu

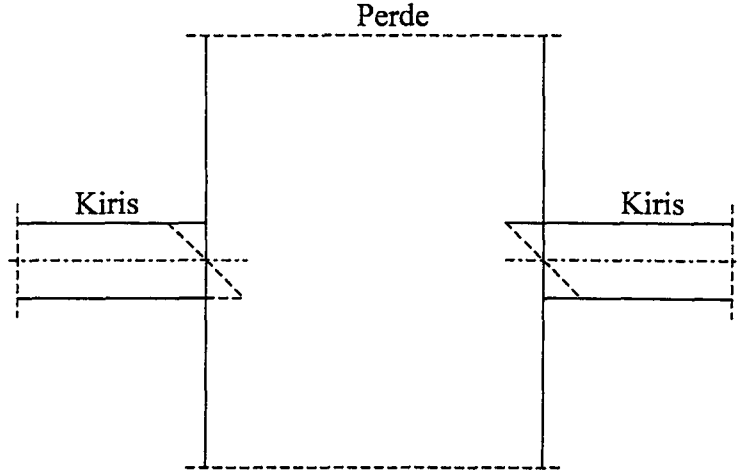


Şekil Ek1.3 Sonlu elemanın 4 numaralı nodunda 1 değerini alan şekil fonksiyonu

Sonlu eleman, perdenin kalınlığı yeterince ince kabul edilerek düzlem gerilme elemanı olarak düşünülmüştür; bu durumda, $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = \sigma_z = 0$ olacaktır (perdenin kalınlığı doğrultusundaki eleman eksenini z-eksenidir).

Perde elemanı, bir düzlem gerilme hali olduğu için, düzlemi içinde iki dik doğrultuda serbestliğe sahiptir. Çubuk elemanı ise aynı düzlem içinde ek olarak bir nokta etrafında dönme serbestliğine sahiptir. İki farklı kabülle modellenen bu elemanlar, çözülen sistemlerde birlikte çalışmaktadırlar. Bu nedenle birleşim noktasında ara eleman kullanılması veya bağıllık şartı yazılması gerekmektedir (Reddy, 1993) (Şekil Ek1.4).

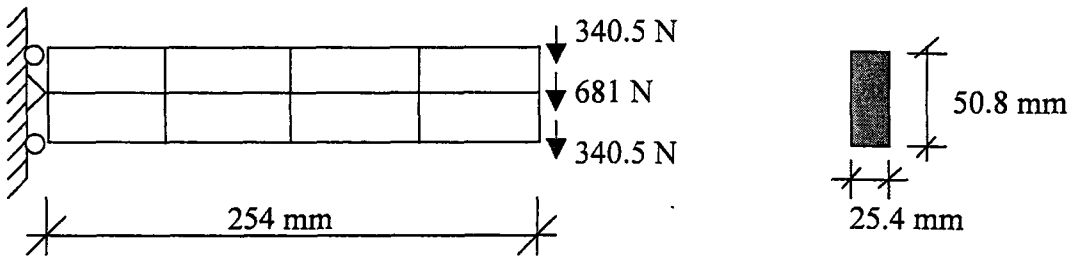
Perdenin, kat döşemesi ile olan ilişkisi ihmal edilirse, çözülen yapının rijitliğine katkısı yalnızca kirişler yoluyla olmaktadır. Bu anlamda perde bir makro eleman gibi düşünülebilir. Çubuk elemanın kesit dönmesi Bernoulli-Navier hipotezine uyar. Bir bağıllık şartı anlamında, perdeye kirişlerin saplandıkları noktada birim dönme verilip diğer bağlantı noktalarındaki tepkiler kiriş ağırlık merkezine göre moment alınarak hesaplanır. Bu işlem her iki doğrultudaki öteleme için de tekrarlanırsa, perde makro elemanına ait rijitlik matrisi elde edilmiş olur. Bu eleman, bir katlı bir yapı için, her kiriş bağlantı noktasında 3 adet olmak üzere 6 adet serbestliğe, örneğin beş katlı bir yapıda 30 adet serbestliğe sahip olacaktır.



Şekil Ek1.4 Perde-kiriş birleşimi

Ek1.2.2 Kullanılan Sonlu Elemanın Hassasiyeti

Kesin çözümü bilinen bir örnek için farklı ağlarla yapılan çözümler ve hata miktarları verilebilir. Şekil Ek1.4 te görülen ve bir düzlem gerilme problemi olarak ele alınan; yüklemesi, boyutları ve malzeme özellikleri belirli konsol kirişin uç orta noktasındaki çökmeye ait kesin çözümü 0.13176 mm dir (Reddy, 1993).



Şekil Ek1.5 Kesin çözümü belirli bir örnek için 4X2 sonlu eleman modeli

Elastisite modülü $E=211110$ MPa , Poisson oranı $\nu=0.25$

4X2 olarak ağ ile konsol uç orta noktasının çökmesi 0.13076 mm, 8X2 ağ ile 0.13104 mm, 16X2 ağ ile 0.13110 mm bulunmuştur. Bu değerler kesin çözümle karşılaştırıldığında hata miktarları sırasıyla %0.76, % 0.55 ve % 0.51 olmaktadır.

Çözümlerde, boyutları birbirlerinden farklı olan sonlu elemanlar yanyana kullanılmıştır.

Örneğin kirişin perdeye saplandığı kenarda, tabla kısmı ve kiriş gövdesi hizalarında farklı boyutlarda sonlu elemanlar kullanılmıştır. 9 nodlu bu sonlu elemanın bu tür etkiler açısından oldukça kullanışlı olduğu bilinmektedir (Zienkiewicz, 1989). Yukarıdaki örnekte yapılan denemede, yatayda yapılan bölme iki eşit parça yerine 1/4 ve 4/5 oranlarında yapıldığında çözümdeki farkın %0.001 den daha az olduğu görülmüştür.

Ek1.3 Kat Döşemelerinin Tanımı

Yapının kat döşemelerinin uzayıp kısılmadığı, iki yatay doğrultuda öteleme ve düşey eksen etrafında dönme serbestliğine sahip bir rijit cisim hareketi yaptığı (rijit diyafram) kabul edilmiştir. Kat döşemelerinde uçları bulunan elemanların bu uçları, döşemeyle birlikte rijit cisim hareketine katılacak şekilde tanımlanmıştır. Bu noktaların diğer eksenlerdeki serbestlikleri ile ilgili herhangi bir bağıllık şartı yazılmamıştır.

Ek1.4 Yazılan “Doğrudan Çözüm Yöntemi”nin Tahkiki

Kodlanan programın geçerliliğinin tahkiki amacıyla; bilinen yöntemler ve kodlanan programla yapılan karşılaştırmalı çözümler üretilmiştir. Programın yazılma aşamalarının her birinde, kendi içinde kontroller yapılmıştır. Örneğin tamamiyle simetrik olan ve paragraf Ek1.3'e göre diyafram hareketi tanımlanmış bir yapı için, programın bulduğu rijitlik merkezi, beklendiği gibi simetri eksenlerinin kesiştiği noktada çıkmıştır. Her aşamada bu tür kontroller yapılmış ve programın yazım zamanının çoğunu bu tür işlemler almıştır. Bundan başka aynı örnekler SAP2000 programı ile de çözümlenmiş sonuçlar kıyaslanmıştır. Burada ilk olarak paragraf Ek1.2'deki örnek için elde edilen sonuçlar verilecektir.

Çizelge Ek1.1 Hatâ karşılaştırmaları

Ağ (mesh)	4X2	8X2	16X2
Yazılan programda hatâ	%0.76	%0.55	%0.51
SAP2000'de hatâ	-%2.5	-%1.4	-%1.6

Bu parçalama ile devam edildiği takdirde yazılan program kesin çözüme yakınsarken, SAP2000 programının %1 hatâ oluşturacak şekilde farklı bir değere yakınsadığı görülmüştür.

Başka bir örnek olarak; Şekil 3.4'de planı görülen ve kolon boyutları 30X30 olarak seçilen 5 katlı yapı, kütle merkezi +%5 dış merkezlik değerinde iken, Erzincan Depremi Doğu-Batı bileşeni altında, yazılan program ve SAP2000 programı yardımı ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge Ek1.2'de görülmektedir.

Çizelge Ek1.2 Sonuçların kıyaslanması

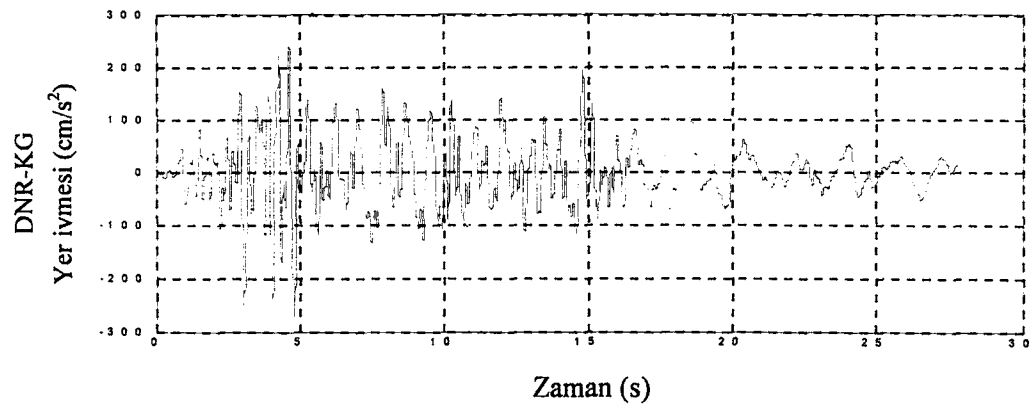
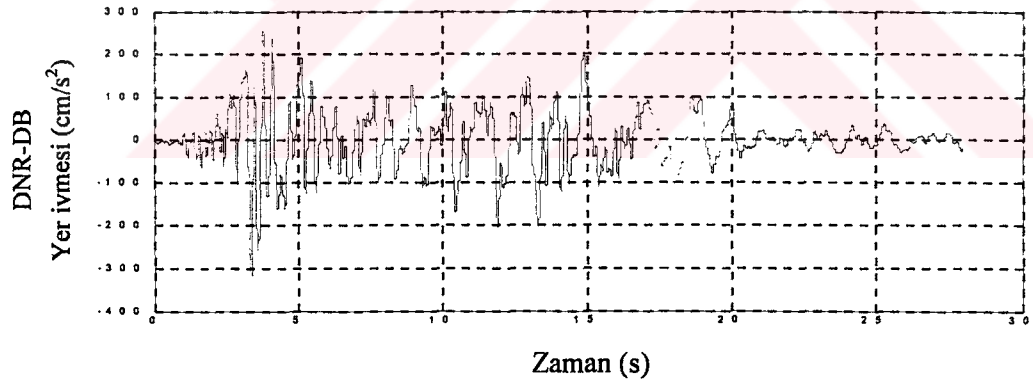
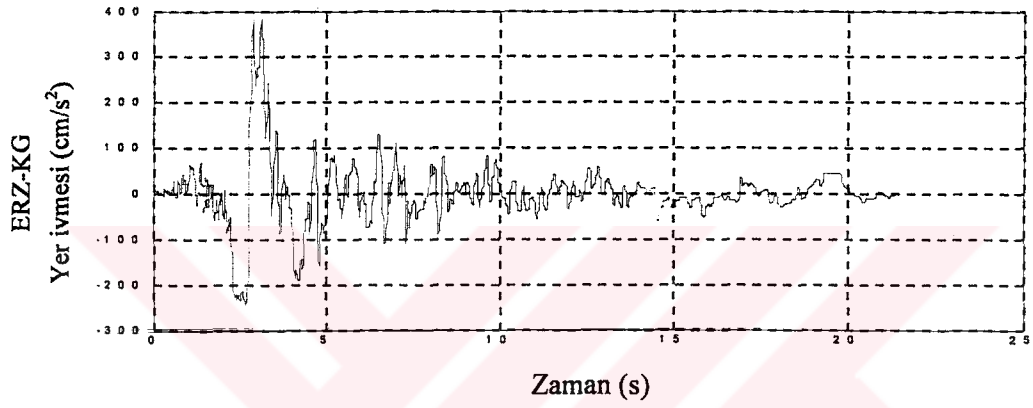
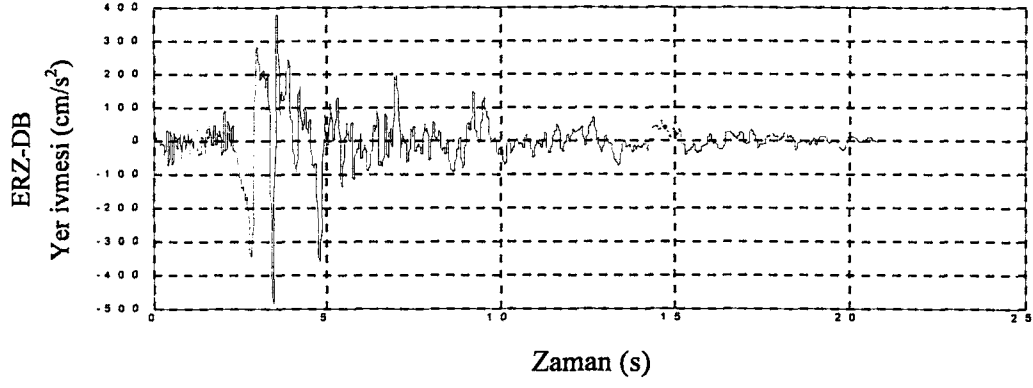
Hesaplanan büyüklükler (s,kN)	Yazılan program	SAP2000
T ₁ (birinci periyot)	0.5309	0.5303
T ₂	0.5177	0.5171
T ₃	0.4429	0.4425
T ₄	0.1765	0.1764
T ₅	0.1721	0.1719
T ₆	0.1476	0.1475
T ₇	0.1050	0.1049
T ₈	0.1019	0.1019
T ₉	0.0889	0.0889
T ₁₀	0.0771	0.0771
T ₁₁	0.0748	0.0748
T ₁₂	0.0655	0.0655
T ₁₃	0.0645	0.0645
T ₁₄	0.0625	0.0625
T ₁₅	0.0549	0.0549
S ₁ 'de V _{x-MSUP} (kesit kuvveti)	179.5	179.4
S ₅ 'de V _{x-MSUP}	246.9	246.8
S ₁ 'de V _{y-MSUP}	38.2	38.2
S ₅ 'de V _{y-MSUP}	21.1	21.1
S ₁ 'de V _{x-CQC}	152.0	152.3
S ₅ 'de V _{x-CQC}	223.7	224.6
S ₁ 'de V _{y-CQC}	62.6	62.9
S ₅ 'de V _{y-CQC}	39.4	39.7

Çizelge Ek1.2 incelendiğinde, yazılan programın Sap2000 programı ile çok yakın sonuçlar ürettiği görülebilir.

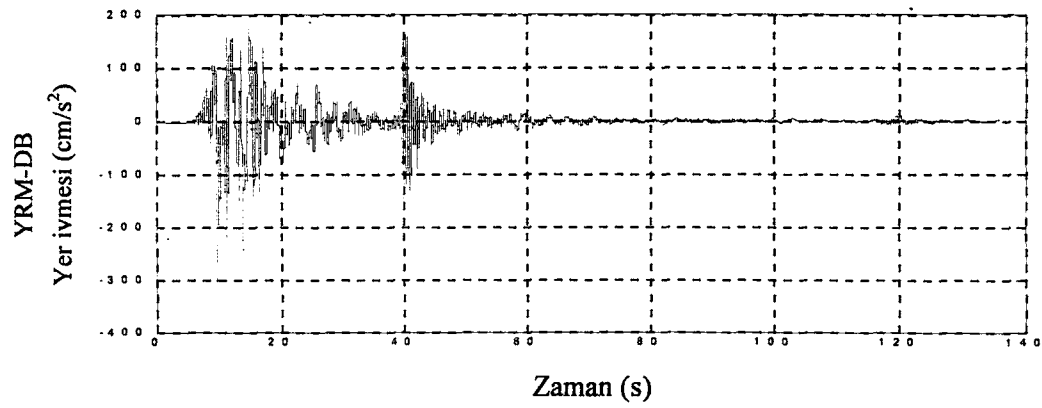
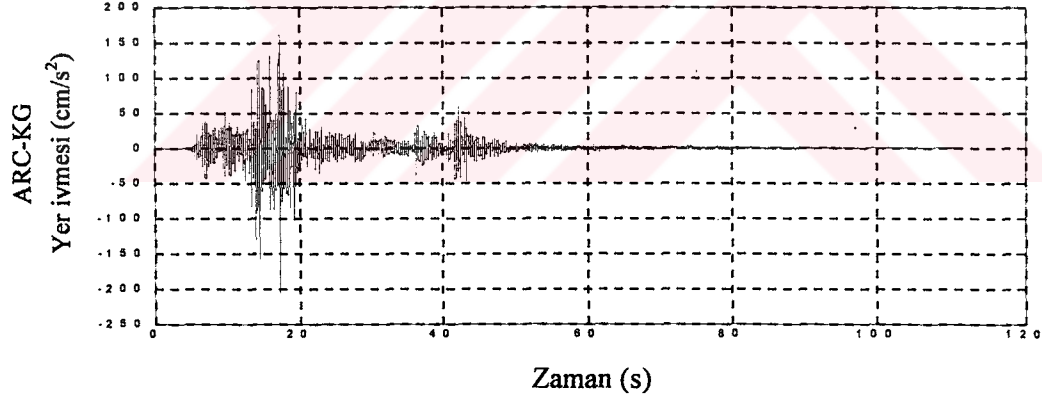
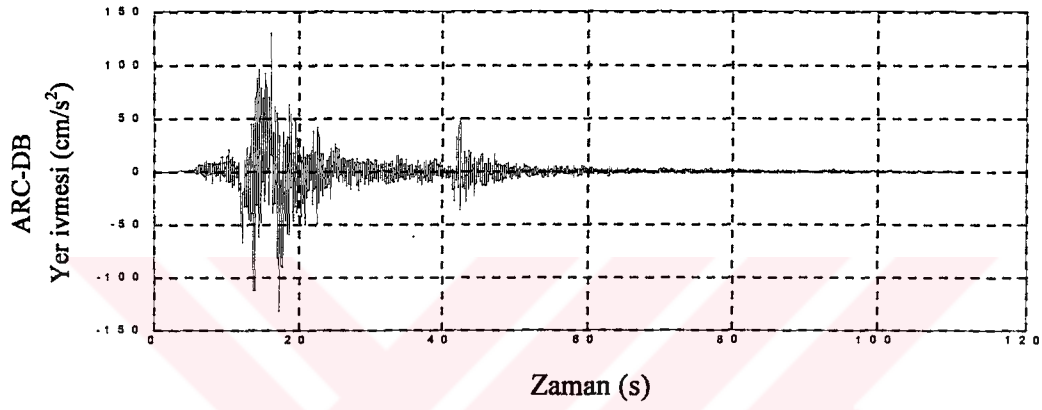
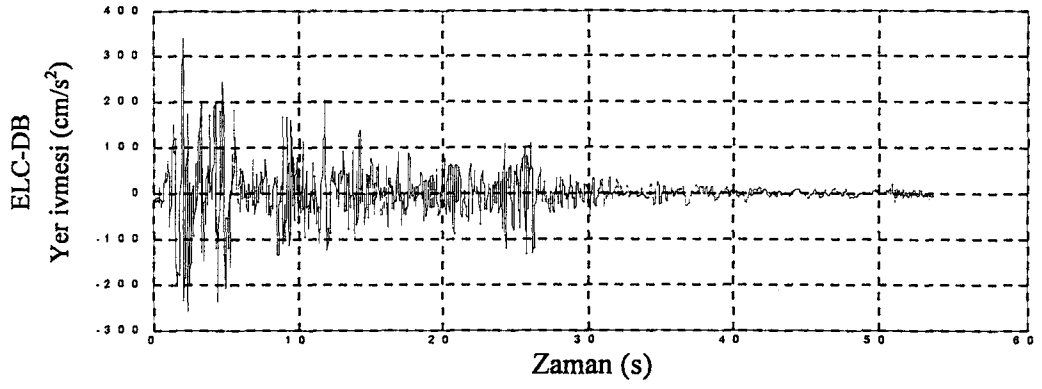
E2. Kullanılan programın işleyiş adımları

- 1.0 Yapıya ait, önceden oluşturulmuş rijitlik matrisinin okunması.
- 2.0 Deprem bilgisinin okunması.
- 3.0 Yapıya ait dış merkezliğin hesaplanması.
- 4.0 Kütle merkezinin, -%10 ile %10 dış merkezlik oluşturacak şekilde planda 9 ayrı noktaya yerleştirilmesi
 - 4.1 Yeni dış merkezlik ile öz değerlerin hesabı.
 - 4.2 Q oranlarının hesabı.
 - 4.3 Yapının i-ci doğal frekansı için tekrar edilecek hesaplamalar,
 - 4.3.1 Denklem 2.10, Denklem 2.11 ve Denklem 2.36 yardımı ile, i-ci modun doğal frekans ve sönüm oranını kullanarak bir serbestlik dereceli sistemin zaman eksenindeki tepkisinin hesaplanması.
 - 4.3.2 Denklem 2.29 yardımı ile, adım 4.3.1'de hesaplanan zaman eksenindeki tepkinin toplanması (süperpoze edilmesi).
 - 4.3.3 Adım 4.3.1'de hesaplanan tepkinin mutlak maksimumunu kullanarak Denklem 2.29 yardımı ile tepkinin i-ci modal maksimumunun hesaplanıp saklanması.
 - 4.4 Yapının her i-ci doğal frekansı için adım 4.3'ün tekrarı.
 - 4.5 Tepkinin, adım 4.3'de hesaplanan modal maksimumlarının CQC yöntemi ile birleştirilmesi ve saklanması.
 - 4.6 Tepkinin, adım 4.3'de hesaplanan modal maksimumlarının CQC0 kullanımı ile birleştirilmesi ve saklanması.
 - 4.7 Tepkinin, adım 4.3'de hesaplanan modal maksimumlarının SRSS yöntemi ile birleştirilmesi ve saklanması.
 - 4.8 Tepkinin, adım 4.3'de hesaplanan modal maksimumlarının ABS' yöntemi ile birleştirilmesi ve saklanması.
 - 4.9 Adım 4.5 ile adım 4.8 arasında yapılan birleştirmelerde ortaya çıkan hatânın, adım 4.3.2 kullanılarak bulunan kesin çözüm yardımı ile hesaplanıp saklanması.
- 5.0 Hesaplanan değerlerin bu yapı için uygun bir isimle daha sonra işlenmek üzere kaydedilmesi.

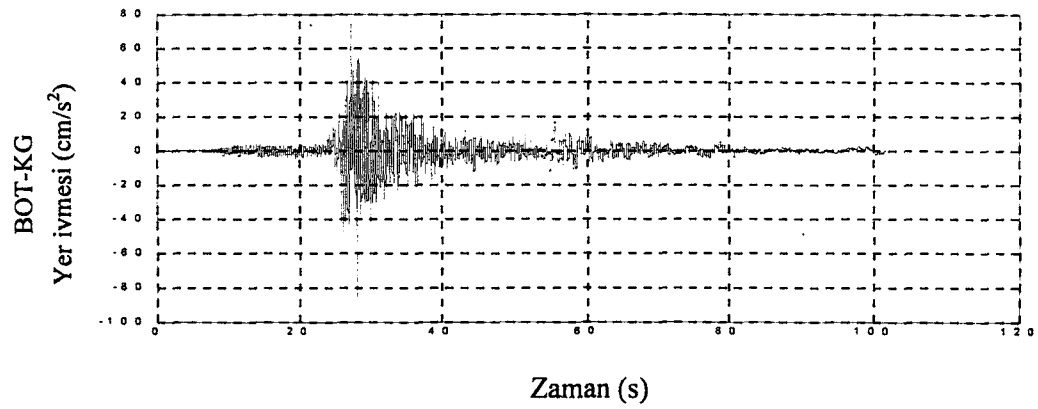
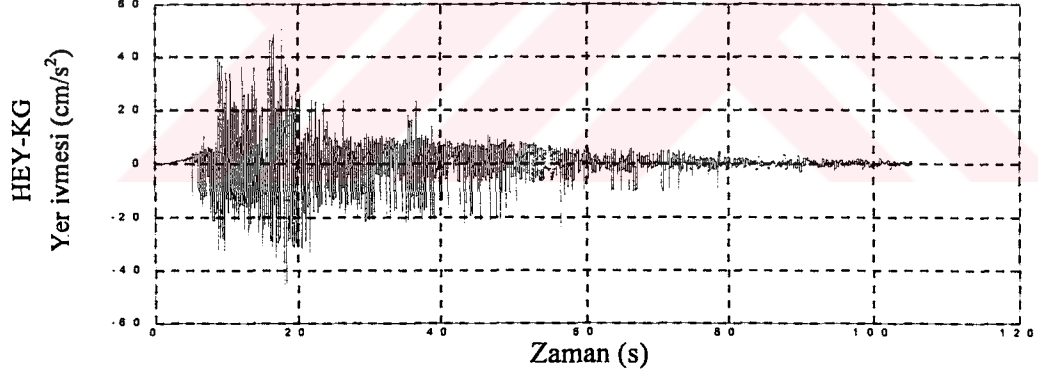
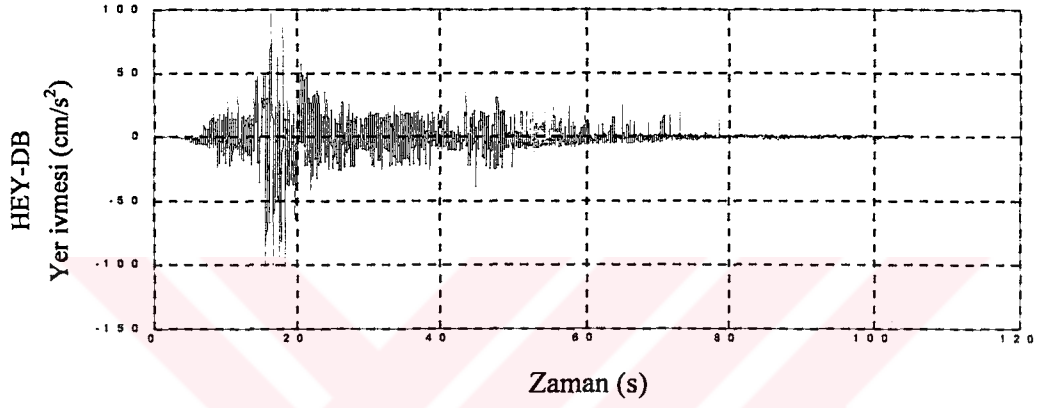
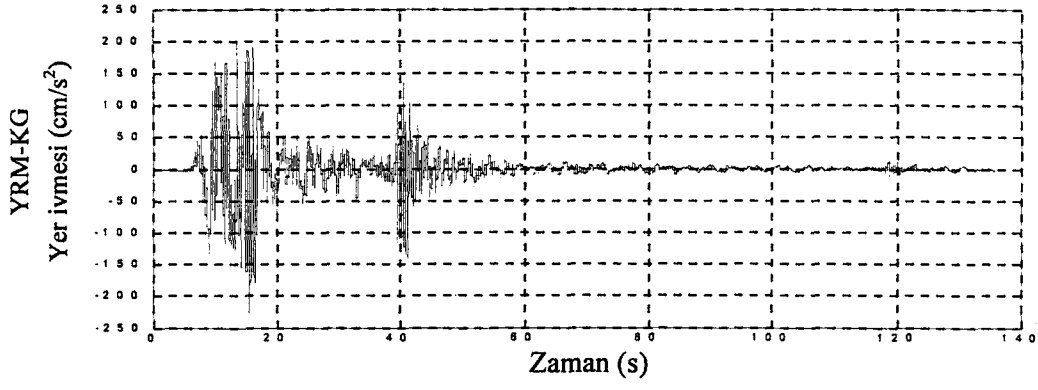
E3. Kullanılan depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtları ve tepki spektrumları



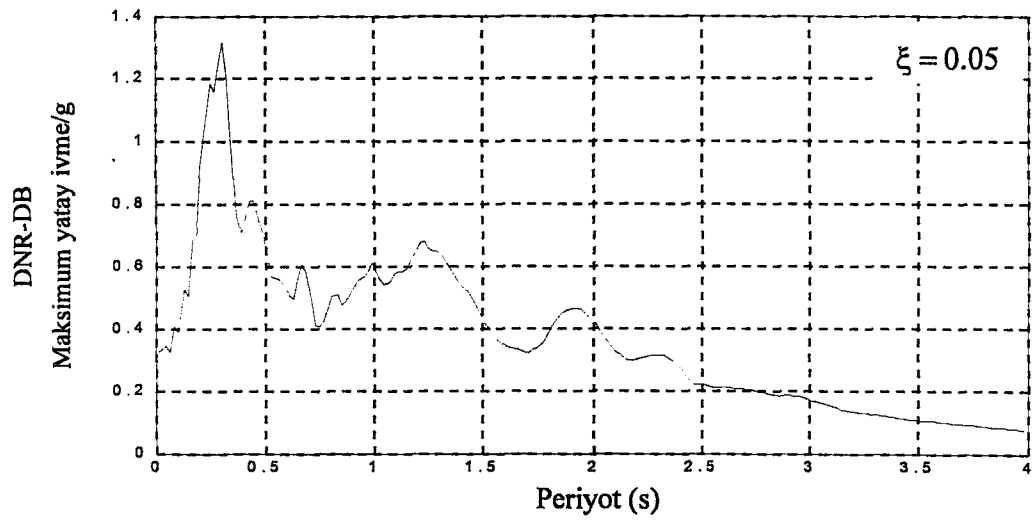
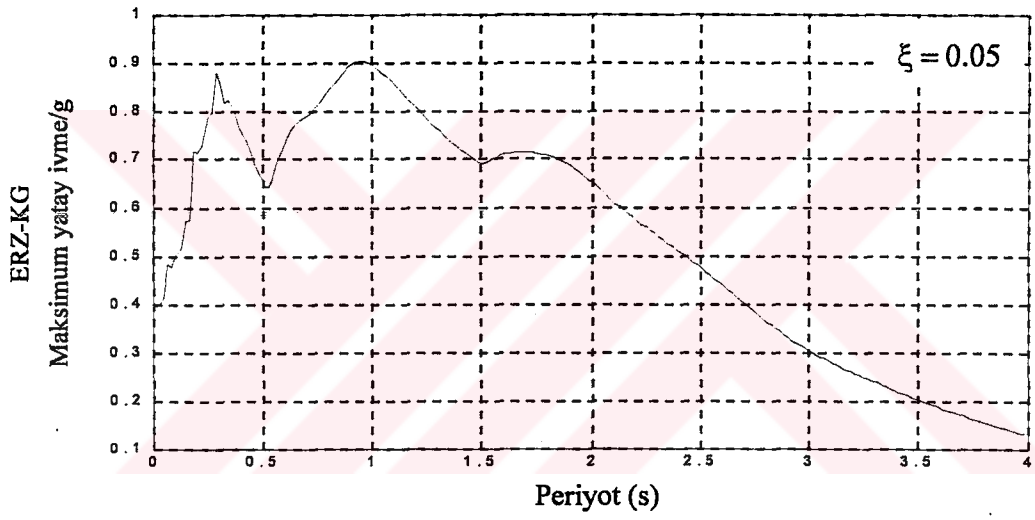
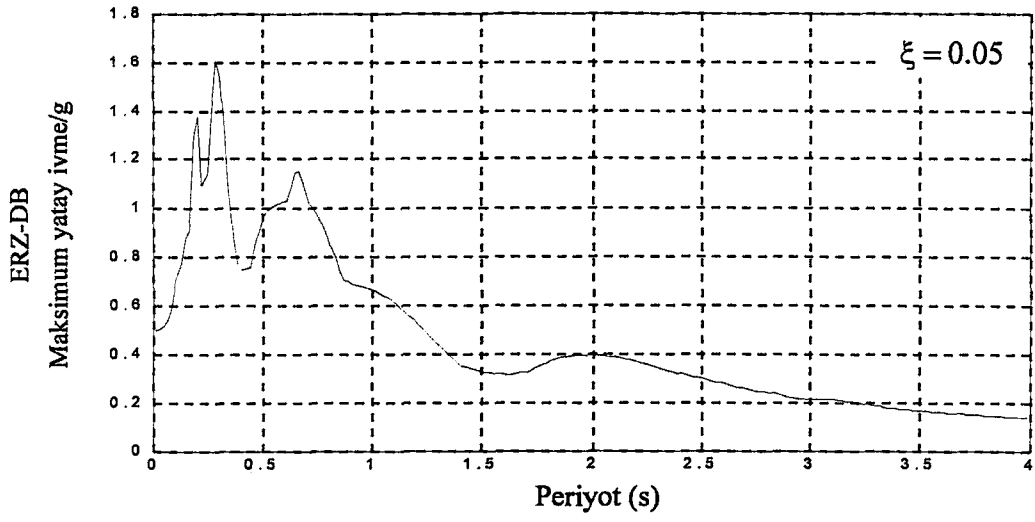
Şekil E3.1 Kullanılan depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtları



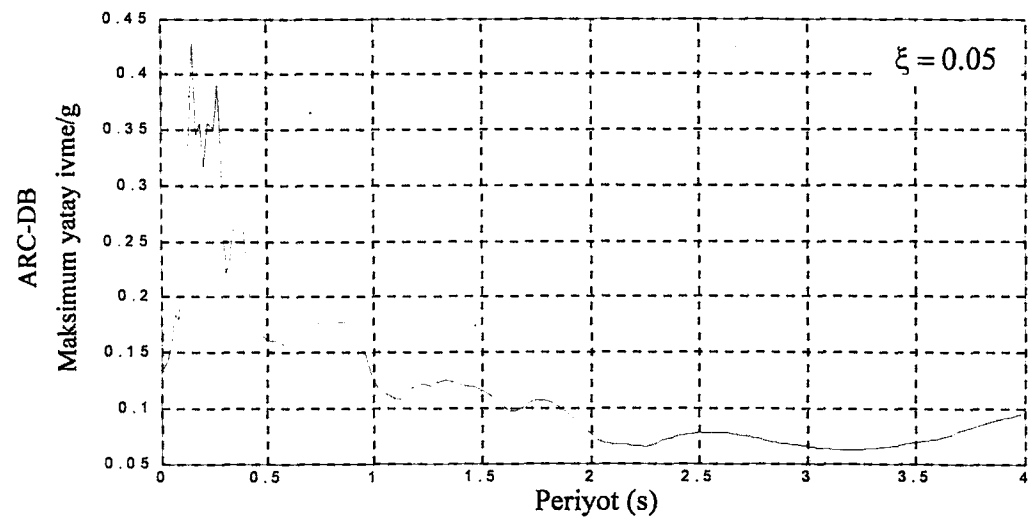
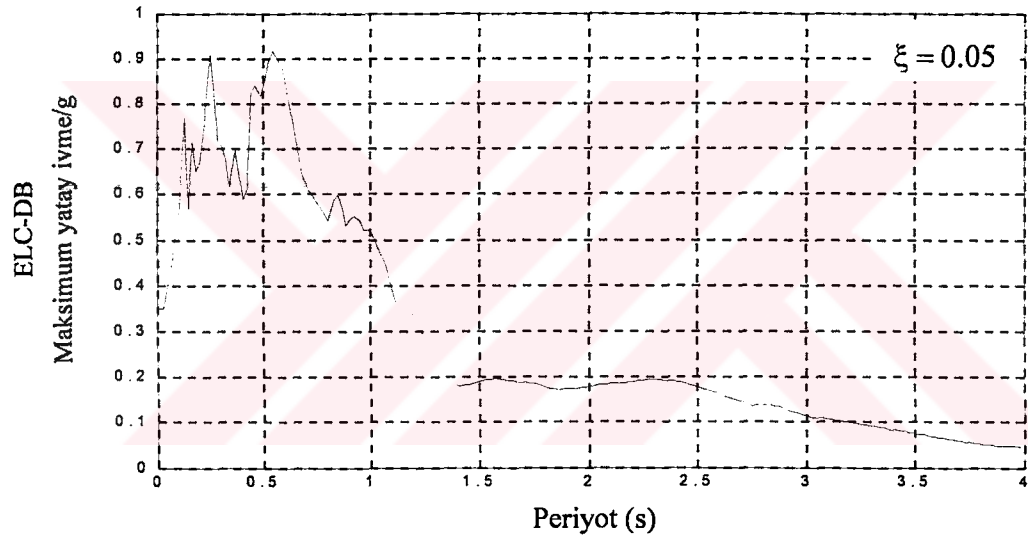
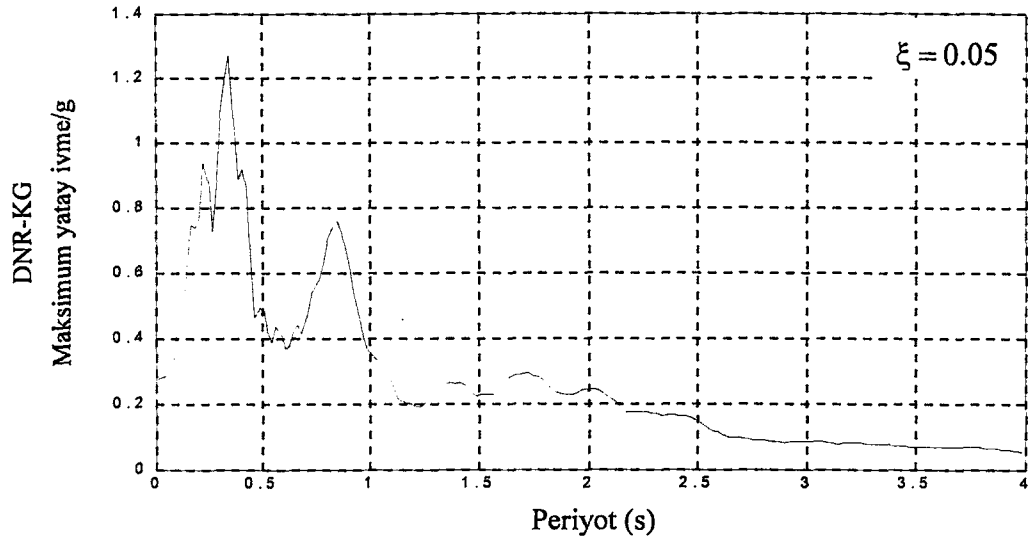
Şekil E3.2 Kullanılan depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtları



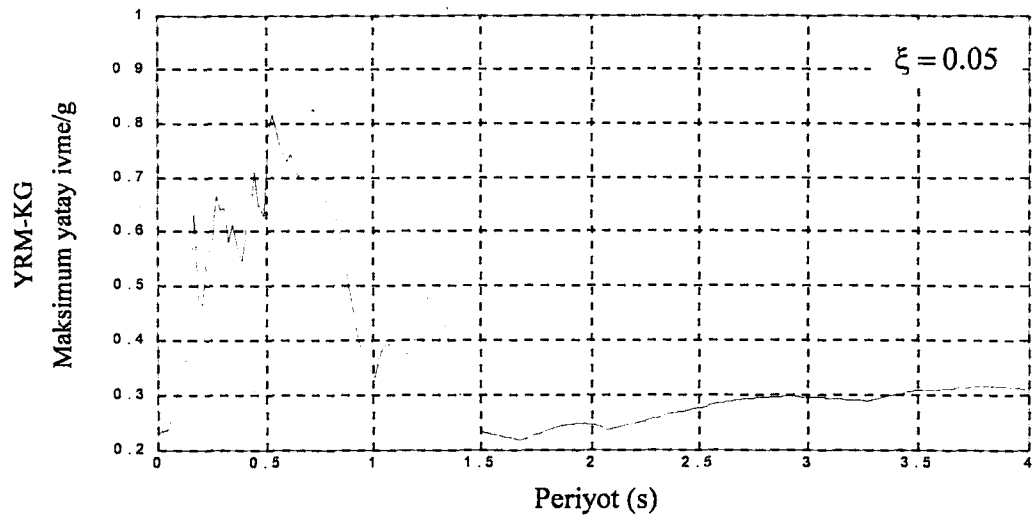
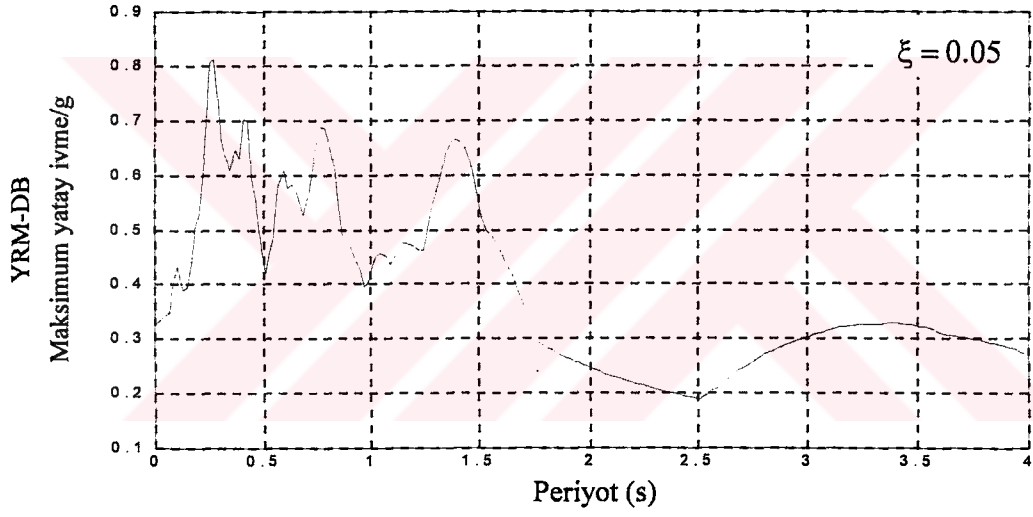
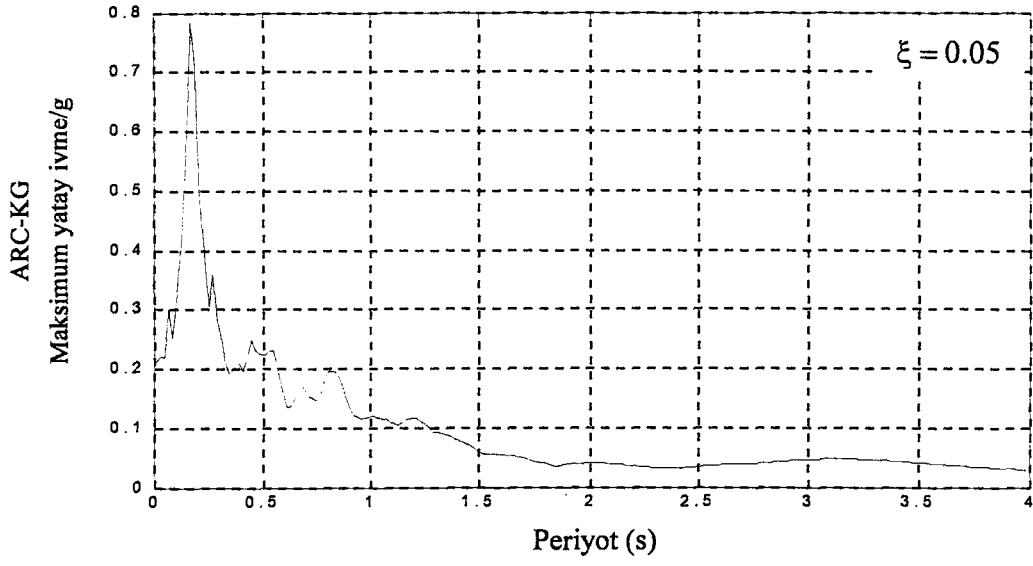
Şekil E3.3 Kullanılan depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtları



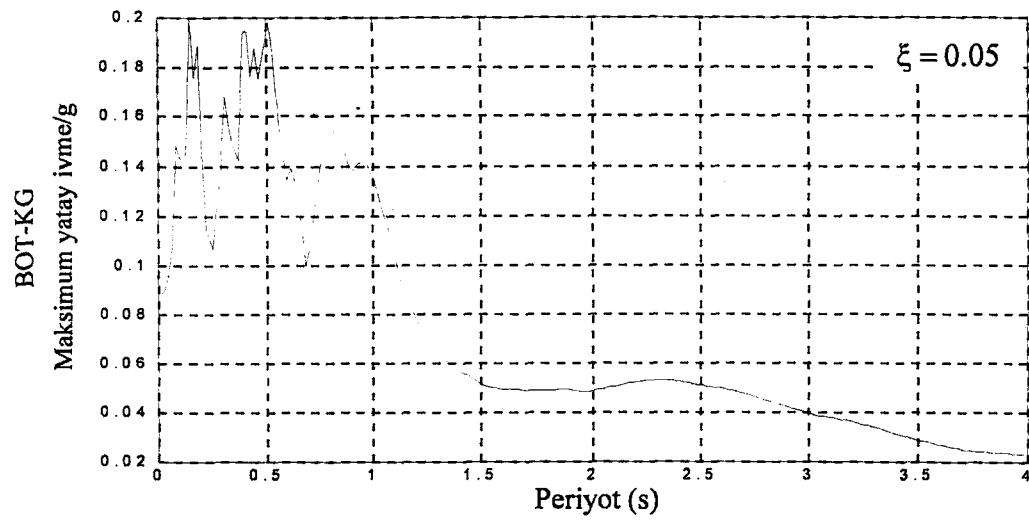
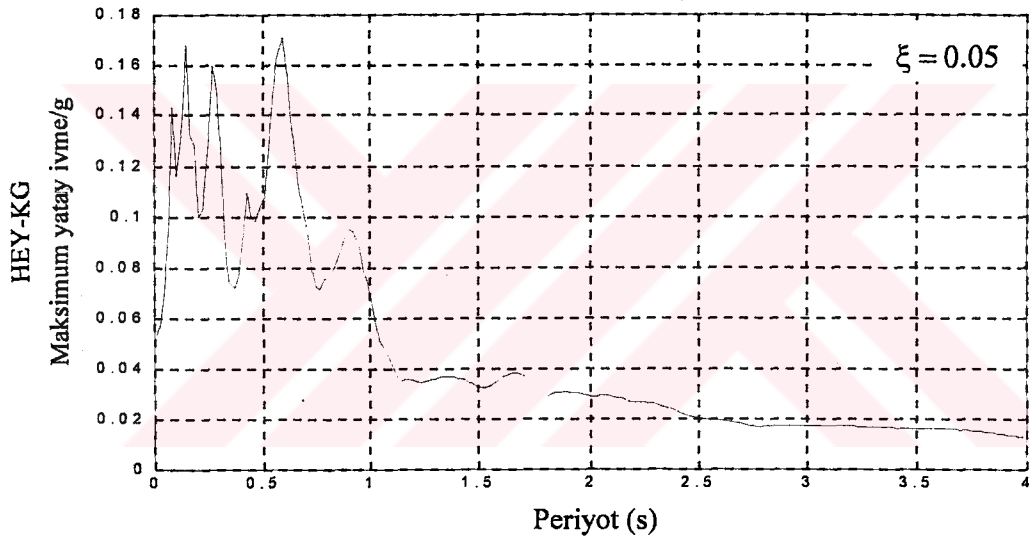
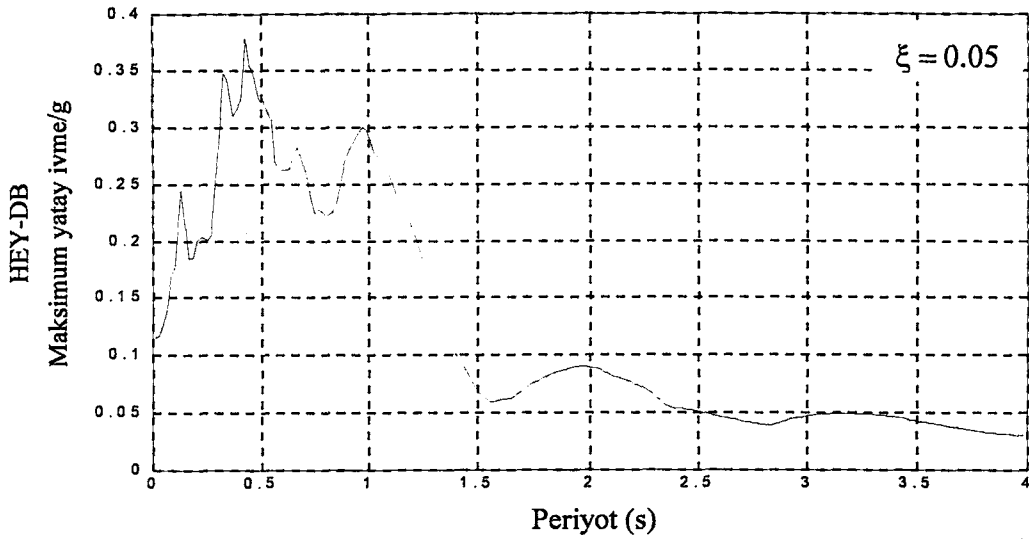
Şekil E3.4 Kullanılan depremlerin tepki spektrumları



Şekil E3.5 Kullanılan depremlerin tepki spektrumları



Şekil E3.6 Kullanılan depremlerin tepki spektrumları



Şekil E3.7 Kullanılan depremlerin tepki spektrumları

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi ve yeri	: 13.10.1970, İSTANBUL.	
Lisans	: 1988,1993	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	: 1993,1996	Yıldız Teknik Üniversitesi FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı
Doktora	: 1996-	Yıldız Teknik Üniversitesi FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı
Çalıştığı kurumlar	1994- Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Araştırma Görevlisi

