

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MR SÖNÜMLEYİCİ İLE YAPILARIN TİTREŞİM
KONTROLÜ**

Mak. Yük. Müh. Şaban ÇETİN

**F.B.E Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Teorisi ve Kontrol Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi	: 08 Temmuz 2010
Tez Danışmanı	: Prof. Dr. İsmail YÜKSEK (YTÜ)
İkinci Tez Danışmanı	: Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU (GYTE)
Jüri Üyeleri	: Prof. Dr. Ünal ALDEMİR (İTÜ) Doç. Dr. Rahmi GÜÇLÜ (YTÜ) Prof. Dr. Nurkan YAĞIZ (İÜ) Prof. Dr. Faruk YİĞİT (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Yapısal Kontrole Genel Bakış	1
1.2 Literatür Özeti	2
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	17
2. MODELLEME ve SİSTEM TANILAMA ÇALIŞMALARI.....	19
2.1 Yarı Aktif Bina Modelinin Hareket Denklemleri	19
2.2 Klasik Model Parametrelerinin Belirlenmesi.....	21
2.3 Sistem Tanılama Metodu	22
2.3.1 Hilbert Dönüşümü.....	22
2.3.2 Bant Geçiren Filtre Yardımıyla Sinyalin Ayrıştırılması	23
2.3.3 Darbe Girişe Sistemin Modal Cevabı ve Ölçülen İvme Sinyalinin Hilbert Dönüşümü	24
2.3.4 Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi.....	26
2.3.4.1 Doğal Frekanslar ve Sönüm Oranlarının Belirlenmesi	26
2.3.4.2 Mod Şekilleri, Kütle Matrisi, Sönüm Matrisi ve Rijitlik Matrisinin Belirlenmesi	27
2.4 MR Sönümleyicinin Modeli	28
2.4.1 MR Akışkanlar	28
2.4.2 MR Sönümleyici	29
2.4.3 MR Sönümleyicinin Histerezis Karakteristiğinin Belirlenmesi	30
2.4.4 MR Sönümleyicinin LuGre Modeli	32
3. H_{∞} DAYANIKLI KONTROL TASARIMI.....	33
3.1 Sistemin Tanımlanması ve Model İndirgeme	33
3.2 Belirsizliklerin Tanımlanması.....	34
3.3 Kontrol Tasarımı	35
3.4 Frekans Şekillendirme Filtrelerinin Seçilmesi.....	37
3.5 Kontrolün Yarı Aktif Sisteme Uygulanması.....	37
4. ADAPTİF KONTROL TASARIMI	38

4.1	Problem Formülasyonu	38
4.1.1	Amaç	40
4.1.2	Hata Dinamiğinin Tanımlanması	40
4.2	Gözlemleyici Tasarımı	42
4.3	Kararlılık Analizi	43
4.4	Nonlineer Adaptif Kontrolörün Yarı Aktif Sisteme Uygulanması	45
5.	DENEYSEL PERFORMANS ANALİZİ ve BULGULAR	47
5.1	Deney Düzenine Tanıtımı	47
5.2	DeneySEL Problemin Formülasyonu	50
5.3	DeneySEL Sistemin Klasik Model Parametrelerinin Belirlenmesi	51
5.4	Sistem Tanılama ile Altı Katlı Bina Modelinin Parametrelerinin DeneySEL Olarak Belirlenmesi	52
5.5	H_{∞} Kontrolörün Uygulanması	57
5.5.1	Klasik Model Kullanılarak H_{∞} Kontrolörün Uygulanması (1. Kat Yer Değiştirme Geri Beslemeli)	58
5.5.1.1	Yer Değiştirme Cevapları	62
5.5.1.2	İvme Cevapları	64
5.5.1.3	Yer Değiştirme Frekans Cevapları	66
5.5.1.4	İvme Frekans Cevapları	68
5.5.2	Sistem Tanılama Modeli Kullanılarak H_{∞} Kontrolörün Uygulanması (1. Kat Yer Değiştirme Geri Beslemeli)	70
5.5.2.1	Yer Değiştirme Cevapları	73
5.5.2.2	İvme Cevapları	75
5.5.2.3	Yer Değiştirme Frekans Cevapları	77
5.5.2.4	İvme Frekans Cevapları	79
5.6	Yarı Aktif Adaptif Kontrolörün Uygulanması	81
5.6.1	Yer Değiştirme Cevapları	83
5.6.2	İvme Cevapları	85
5.6.3	Yer Değiştirme Frekans Cevapları	87
5.6.4	İvme Frekans Cevapları	89
5.6.5	Parametre Tahminleri Açısından Adaptif Kontrolün Değerlendirilmesi	91
5.6.5.1	Yapısal Parametrelerin Tahmini	91
5.6.5.2	MR Sönümleyici Parametrelerinin Tahmini	95
5.7	Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	96
5.7.1	Yapısal Titreşim Performanslarının Değerlendirilmesi	96
5.7.2	Kontrol Kuvveti ve Güç Gereksiniminin Değerlendirilmesi	100
6.	SONUÇLAR	105
	KAYNAKLAR	107
	ÖZGEÇMİŞ	114

SİMGE LİSTESİ

M_s	Yapısal sistemin kütle matrisi
C_s	Yapısal sistemin sönüm matrisi
K_s	Yapısal sistemin rijitlik matrisi
H	Kontrol elemanlarının yerini gösteren vektör
L	Sismik giriş dağılımını gösteren vektör
$\ddot{x}(t)$	İvme vektörü
$\dot{x}(t)$	Hız vektörü
$x(t)$	Konum vektörü
$f(t)$	MR sönümleyici kuvveti
$\ddot{x}_g(t)$	Sismik ivme girişi
E	Young modülü
I	Kesit atalet momenti
l	Kolonun uzunluğu
α_0, β_0	Rayleigh sönüm katsayıları
$\tilde{x}(t)$	$x(t)$ 'nin Hilbert dönüşümü
$A(t)$	Anlık genlik
$\theta(t)$	Anlık faz açısı
$\ddot{x}_p(t)$	Ölçülen sinyal
ω_{jA}	Filtrenin alt frekansı
ω_{jY}	Filtrenin üst frekansı
ω_j	j . modal frekans
ξ_j	j . modal sönüm oranı
m_j	j . modal kütle
Φ_j	Mod vektörü
ϕ_{kj}	Φ_j mod vektörünün k . elemanı
V_{max}	MR sönümleyicide oluşabilecek maksimum gerilim
$H(.)$	Heaviside basamak fonksiyonu
f_c	Sistem için gerekli olan kuvvet
σ_0	$v(t)$ ile değişen $z(t)$ 'nin rijitliği
σ_1	$z(t)$ 'nin sönüm katsayısı
σ_2	Viskoz sönüm katsayısı
σ_a	$z(t)$ 'nin rijitliği
σ_b	$v(t)$ ile değişen viskoz sönüm katsayısı
a_0	Sabit katsayı
z	MR sönümleyicinin iç dinamiği
ρ_1, ρ_2	Bilinen (ölçülebilen) regresyon (ya da sinyal) vektörleri
θ_1, θ_2	Bilinmeyen (belirsiz) parametre vektörleri
e	Hata sinyali
r	Filtrelenmiş hata sinyali
Y	Regresyon sinyal matrisi
ϕ	Bilinmeyen (belirsiz) parametre vektörü
$\in$	Eleman
$\Re^{n \times 3n}$	n satırlı $3n$ sütunlu reel matrisler kümesi

$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$	Yardımcı filtre sinyalleri
K	Pozitif tanımlı kontrol kazanç matrisi
Γ_ϕ, Γ_2	Pozitif tanımlı diyagonal adaptasyon katsayı matrisleri
$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$	Pozitif adaptasyon kazanç katsayıları
ε	Çok küçük sayı
$\text{diag}(\cdot)$	Köşegen matris
W_T, W_S	Filtreler
$J_1, \dots, J_6$	Performans ölçütleri
W	Binanın yer üstündeki sismik kütlesi (yerin altındaki ve yerdeki kütle hariç)
$P(t)$	Kontrol elemanının anlık güç ihtiyacı
$\dot{x}^{\max}$	Yere göre maksimum bağıl hız
$\delta^{\max}$	Kontrolcüsüz durumdaki maksimum katlar arası yerdeğiştirme oranı
h_i	Katlar arası mesafe
d_i	Katlar arası yerdeğiştirme
$\ddot{x}_i^{\max}(t)$	Kontrolcüsüz durumdaki maksimum ivme
$\max(\cdot)$	Maksimum

KISALTMA LİSTESİ

MR	Manyetoreolojik
ER	Elektroreolojik
EMD	Emprical mode decomposition
DOF	Serbestlik derecesi (Degree of freedom)
K1Y	Klasik Model – 1. Kat yerdeğiştirme geri beslemeli
S1Y	Sistem Tanılama Modeli – 1. Kat yerdeğiştirme geri beslemeli
K6Y	Klasik Model – 6. Kat yerdeğiştirme geri beslemeli
S6Y	Sistem Tanılama Modeli – 6. Kat yerdeğiştirme geri beslemeli
K6İ	Klasik Model – 6. Kat ivme geri beslemeli
S6İ	Sistem Tanılama Modeli – 6. Kat ivme geri beslemeli
RMS	Root mean square

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Yarı aktif kontrollü n katlı bina modeli	20
Şekil 2.2 Manyetik alan ile partiküllerin sıralanması	28
Şekil 2.3 MR sönümleyicinin şematik modeli.....	29
Şekil 2.4 MR akışkan çalışma modları.	30
Şekil 2.5 MR sönümleyicinin karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan test düzeneği.....	31
Şekil 2.6 MR sönümleyicinin karakteristiği (a) Kuvvet-yer değiştirme (b) Kuvvet-hız.	32
Şekil 3.1 Genişletilmiş sistem yapısı	36
Şekil 4.1 Adaptif kontrol genel blok diyagramı.	46
Şekil 5.1 Titreşim tablası ve sürücü ünitesi	47
Şekil 5.2 (a) Ölçeklendirilmiş (0.7) El Centro kuzey-güney bileşeni (b) Bina modeli	48
Şekil 5.3 Deney düzeneğinin genel görünüşü.....	49
Şekil 5.4 Deney sisteminin şematik görünüşü	50
Şekil 5.5 (a) Çekiç testi (b) Sistemin darbe girişine cevabı.....	53
Şekil 5.6. Altıncı kattan alınan ivme ölçümünün modlara ayrıştırılması	54
Şekil 5.7 Altıncı kattan alınan ivme ölçümünün 1. mod cevabı	54
Şekil 5.8 Altıncı kattan alınan ivme ölçümünün anlık faz açısı ve anlık genlik cevabı	55
Şekil 5.9 Klasik, sistem tanılama ve deneysel çalışma ile bulunan cevapların karşılaştırılması.....	57
Şekil 5.10 Tam ve indirgenmiş sistem frekans cevapları	59
Şekil 5.11 Modellenmeyen dinamikler ve frekans şekillendirme filtreleri.....	59
Şekil 5.12 H_{∞} kontrolör frekans cevabı	60
Şekil 5.13 Tam dereceli sistem açık ve kapalı çevrim cevapları	60
Şekil 5.14 İndirgenmiş dereceli sistem açık ve kapalı çevrim cevapları	61
Şekil 5.15 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	62
Şekil 5.16 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat ...	63
Şekil 5.17 Bina modelinin ivme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	64
Şekil 5.18 Bina modelinin ivme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat	65
Şekil 5.19 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	66
Şekil 5.20 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat	67
Şekil 5.21 Bina modelinin ivme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	68
Şekil 5.22 Bina modelinin ivme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat	69
Şekil 5.23 Tam ve indirgenmiş sistem frekans cevapları.	70
Şekil 5.24 Modellenmeyen dinamikler ve frekans şekillendirme filtreleri.....	71

Şekil 5.25 H_{∞} kontrol frekans cevabı.....	71
Şekil 5.26 Tam dereceli sistem açık ve kapalı çevrim cevapları.....	72
Şekil 5.27 İndirgenmiş dereceli sistem açık ve kapalı çevrim cevapları.....	72
Şekil 5.28 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	73
Şekil 5.29 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat ...	74
Şekil 5.30 Bina modelinin ivme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	75
Şekil 5.31 Bina modelinin ivme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat	76
Şekil 5.32 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	77
Şekil 5.33 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat	78
Şekil 5.34 Bina modelinin ivme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	79
Şekil 5.35 Bina modelinin ivme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat	80
Şekil 5.36 Giriş hız grafiği.....	81
Şekil 5.37 MR sönümleyicinin kuvvet tahmini	81
Şekil 5.38 MR sönümleyicinin histerezis kuvvet karakteristiği	82
Şekil 5.39 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	83
Şekil 5.40 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat ...	84
Şekil 5.41 Bina modelinin ivme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	85
Şekil 5.42 Bina modelinin ivme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat	86
Şekil 5.43 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	87
Şekil 5.44 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat	88
Şekil 5.45 Bina modelinin ivme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat.....	89
Şekil 5.46 Bina modelinin ivme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat	90
Şekil 5.47 Bina kütle değerlerinin tahmini	92
Şekil 5.48 Bina sönüm değerlerinin tahmini	93
Şekil 5.49 Bina rijitlik değerlerinin tahmini	94
Şekil 5.50 MR sönümleyici parametrelerinin tahmini	95
Şekil 5.51 Katların yer değiştirmelerinin maksimum değerleri.....	98
Şekil 5.52 Katların ivmelerinin maksimum değerleri.....	98
Şekil 5.53 Katların yer değiştirmelerinin RMS cevapları.....	99
Şekil 5.54 Katların ivme RMS cevapları	99
Şekil 5.55 Kontrolörlerin kuvvet zaman cevapları (a) Pasif (b) H_{∞} (K1Y) (c) H_{∞} (S1Y).....	101
Şekil 5.56 Kontrolörlerin kuvvet zaman cevapları (a) H_{∞} (K6Y) (b) H_{∞} (S6Y) (c) H_{∞} (K6İ).....	102

(d) H_{∞} (S6İ) (e) Adaptif	102
Şekil 5.57 Kontrolörlerin gerilim zaman cevapları (a) H_{∞} (K1Y) (b) H_{∞} (S1Y).....	103
Şekil 5.58 Kontrolörlerin gerilim zaman cevapları (a) H_{∞} (K6Y) (b) H_{∞} (S6Y) (c) H_{∞} (K6İ).....	104
(d) H_{∞} (S6İ) (e) Adaptif	104

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 RD 1005-3 MR sönümleyici karakteristik özellikleri (Lord Corporation).....	31
Çizelge 5.1 Frekans ve sönüm oranları.....	55
Çizelge 5.2 Kontrolörler için kısaltma tablosu	58
Çizelge 5.3 MR sönümleyici parametre tahmini	82
Çizelge 5.4 Performans ölçütlerine göre kontrolörlerin değerlendirilmesi	97
Çizelge 5.5 Performans ölçütlerine göre kontrolör kuvvetlerinin değerlendirilmesi	100

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında bilgi ve birikimleri ile bana destek olan, güncel bir konuda teorik ve deneysel bir çalışmayı gerçekleştirebilmem için gerekli bütün imkanları ellerinden geldiğince önüme sunan, akademik gelişimimde büyük katkıları olan değerli danışman hocalarım Prof. Dr. İsmail YÜKSEK ve Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmasının değerlendirilmesinde fikirlerlerinden istifade ettiğim sayın hocalarım Doç. Dr. Rahmi GÜÇLÜ ve Prof. Dr. Ünal ALDEMİR'e verdikleri desteklerden dolayı teşekkür ederim. Bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, laboratuvar imkanlarını ardına kadar açan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU'na ve ilk deney çalışmalarım sırasında yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Ufuk ÖZBAY başta olmak üzere bütün GYTE Kontrol Teknolojileri ve Robotik Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamın özellikle deneysel kısmında tecrübe ve ekipmanlarından faydalandığım, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Cihan DEMİR ve Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER'e teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalışmamda ekipman tedariki konusunda emeği geçen değerli hocalarım başta olmak üzere, Yıldız Teknik Üniversitesi çalışanlarına ve tez süresince benden desteklerini esirgemeyen mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda bana destek olan annem ve babam başta olmak üzere bütün aileme teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan babaannem ve rahmetli dedemi saygıyla anıyorum.

ÖZET

Kontrol mühendisliğinde lineer ve nonlinear sistemlerin yarı aktif elemanlarla kontrolü, hem teorik hem de pratik açıdan oldukça fazla ilgi gören bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bunun nedenlerinden bazıları, yarı aktif sistemlerin pasif sistemlerin güvenilirliğine sahip olması ve aktif sistemlerden daha az enerji gereksinimi duymaları olarak sıralanabilir.

Bu tez çalışmasında deprem etkisi altındaki yapıların titreşimlerini manyetoreolojik (MR) sönümleyici yardımıyla azaltmak amacıyla H_{∞} dayanıklı kontrolör ve nonlinear adaptif kontrolör tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan kontrolörlerin performansı altı katlı bir bina modeli üzerinde, laboratuvar ortamında titreşim tablası yardımıyla deneysel olarak test edilmiştir.

Kontrolörlerin performansı sisteme MR sönümleyicinin bağlı olmadığı ‘Serbest’ durum, MR sönümleyicinin bağlı olduğu ancak herhangi bir gerilim uygulanmadığı ‘Pasif (MR)’ durum ve kontrolörlerin uygulandığı durumlar arasında yapılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen, gerek yerdeğiştirme-zaman ve ivme-zaman grafikleri, gerek performans ölçütleri gerekse her bir katın yerdeğiştirme ve ivmelerinin maksimum değerleri ile bunların RMS değerleri tasarlanan kontrolörlerin etkinliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal kontrol, MR sönümleyici, H_{∞} dayanıklı kontrol, Adaptif kontrol, Titreşim tablası deneyi.

ABSTRACT

VIBRATION CONTROL OF STRUCTURES BY MR DAMPERS

The problem of vibration mitigation of structural system using semiactive devices has been extensively targeted by control researchers from both theoretical and experimental points of view since semiactive systems have reliability of passive systems and have requirement of lower energy source than active systems.

In this study, an H_∞ robust controller and a nonlinear adaptive controller are designed for the vibration mitigation problem of a structural system using a magneto-rheological (MR) damper. The performance of the proposed methods is illustrated on a six degree of freedom (DOF) structure by shaking table tests.

The performance of controllers is evaluated among the cases (i) an uncontrolled (without MR damper) case, (ii) passive damper where an MR damper is connected to the system with zero Volts applied to its terminals and (iii) a damper attached and excited with the proposed controllers. Time histories of displacement and acceleration, performance indices, the maximum values of displacement and acceleration of stories and the corresponding RMS values show the effectiveness of proposed controllers.

Keywords: Structural control, MR damper, H_∞ robust control, Adaptive control, Shaking table test.

1. GİRİŞ

1.1 Yapısal Kontrole Genel Bakış

Kontrol mühendisliğinde lineer ve nonlinear sistemlerin yarı aktif elemanlarla kontrolü son yıllarda, hem teorik hem de pratik açıdan oldukça fazla ilgi gören bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bunun nedenlerinden bazıları, yarı aktif sistemlerin pasif sistemlerin güvenilirliğine sahip olması ve aktif sistemlerden daha az enerji gereksinimi duymaları olarak sıralanabilir.

Dünyada ve yurdumuzda gerçekleşen Northridge-California (1994), Kobe-Japonya (1995), Kocaeli-Türkiye (1999), Düzce-Türkiye (1999), Sumatra-Endonezya (2004, 2005), Maule-Şili (2010) gibi yıkıcı depremler sonucunda binlerce can kayıpları ve maddi zararlar meydana gelmesi, binaların doğal afetlere karşı korunmasının önemini daha da arttırmıştır. Binaların özellikle deprem gibi dış etkenlere karşı korunmasında asıl amaç can güvenliğini ve bununla birlikte binanın servis süresi boyunca ayakta kalabilmesini sağlamak olarak ifade edilebilir.

Son 40 yılda binaların deprem ve rüzgâr gibi dış etkenlere karşı cevaplarını iyileştirme çabalarında, uygulanan yöntemler, kontrol teknikleri ve teknolojinin gelişmesi ile beraber büyük mesafeler kat edilmiştir. Yao'nun 1972 yılında yaptığı, yapısal kontrolün temel taşı olarak nitelendirilebilecek olan çalışmasının ardından bu alanda gerek tasarım gerek icat gerekse performans değerlendirmesi açısından büyük gelişmeler yaşanmıştır. Yapılan teorik ve deneysel çalışmaların yanı sıra, gerçek sistemlere de uygulamalar gerçekleştirilmiştir (Spencer ve Sain, 1997). Yapılan araştırmalar neticesinde pasif sistemler iyice anlaşılmış ve çok değişik uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber pasif sistemlerin değişken yapı ve yükleme koşullarına karşı performansları sınırlıdır. Aktif sistemler bu değişken koşullara karşı cevap verebilirler, ancak yapıya dışarıdan enerji vermeleri sebebiyle yapının kararlılığını bozabilirler (Spencer, vd., 1996). Yarı aktif sistemler, pasif sistemlerin güvenilirliğini ve aktif sistemlerin değişken koşullara karşı cevap verebilme yeteneğini bir arada bulundurmaları sebebiyle yapısal kontrolde önem kazanmaktadırlar.

Yarı aktif elemanlar, titreşimleri enerji absorbe ederek azaltmaktadırlar. Bu özellikleri sayesinde sistemin kararlılığını da bozmamaktadırlar. Çevrimiçi olarak ayarlanabilmeleri ise kontrol tekniklerinin uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, yapılan teorik ve deneysel çalışmalar, yarı aktif sistemlerin pasif sistemlerden daha iyi cevap verdiğini ve düşük güç kullanımına rağmen hemen hemen aktif sistemlerin performanslarına ulaştıklarını göstermektedir (Spencer, vd., 1996). Düşük güç gereksinimine ihtiyaç duymaları, kimi zaman

bir akü ile çalışabilmeleri sebebiyle, deprem gibi enerji kesintilerinin yaşanabileceği uygulamalarda ilgi odağı haline gelmektedirler. Hatta çalışma koşullarında meydana gelen bir sorun sebebiyle enerji kesintisi yaşansa bile, yarı aktif eleman sisteme bağlı olduğu sürece pasif eleman gibi çalışarak sistemin cevaplarını iyileştirmeye devam etmektedir.

Yarı aktif sistemlere değişik örnekler vermek mümkündür. Bunlardan bazıları değişken orifisli sönümleyici, değişken sürtünmeli sönümleyici, ayarlanabilir sıvı kütle sönümleyici, elektroeolojik (ER) sönümleyiciler ve manyetoeolojik (MR) sönümleyiciler olarak sıralanabilir (Housner, vd., 1997). Bunlardan ER ve MR sönümleyiciler dışında kalanlar bir valf ya da mekanizma tarafından kontrol edilmektedirler. ER ve MR sönümleyiciler ise içlerinde kontrol edilebilir akışkan bulunan hidrolik silindirler olarak tarif edilebilir. Kontrol edilebilen akışkan içerisinde mikro tanecikler bulunan taşıyıcı bir sıvıdır ve elektrik ya da manyetik alan uygulanması ile milisaniyeler içerisinde sıvı halden yarı katı ya da katı hale geçebilmektedir. ER ve MR sönümleyiciler birbirleriyle kıyaslandığında, MR sönümleyicilerin ER sönümleyicilere göre daha düşük güç gereksinimine ihtiyaç duymaları daha çok tercih edilmelerine sebep olmaktadır.

1.2 Literatür Özeti

‘Akıllı akışkan’, ‘kontrol edilebilen akışkan’ ya da bunların kullanıldıkları aletleri tanımlamak için kullanılan ‘akıllı eleman’ gibi ifadelerle anılan yarı aktif elemanlar titreşimleri bastırma problemlerinde giderek yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kontrol edilebilen akışkanlı sönümleyiciler üzerine yapılan çalışmalar son 20 yıldır yoğunlaşmış olmasına rağmen, bu elemanların içerisinde kullanılan kontrol edilebilen akışkanlar üzerine yapılan ilk çalışmalar 1940’lı yılların sonuna kadar uzanmaktadır. Winslow W.M. (1947) elektriksel etkiyi mekanik kuvvete dönüştüren metodun patentini almış ve 1949 yılındaki çalışması ile bu metodun fiziksel temelini anlatmıştır. Hemen hemen aynı zamanlarda J. Rabinow da MR akışkanlar üzerinde çalışmaktadır ve 1948 yılında MR akışkanın özelliklerini yayınladığı çalışmasının ardından 1951 yılında manyetik akışkanlı moment ve kuvvet ileten bir aletin patentini almıştır. ER ve MR sıvıların keşfi 60 yıl öncesine kadar dayanmasına rağmen, bu sıvıların ticari anlamda kullanılmaları ise ancak son 20 yılda gerçekleşmiştir.

Kontrol edilebilen akışkanlı yarı aktif elemanların sistemlere uygulanmasında iki önemli husus söz konusudur. Bu hususlardan birisi nonlineer histerezis karaktere sahip yarı aktif elemanın dinamik davranışının hassas bir şekilde modellenmesidir. Çalışmalar ilk olarak ER akışkanlar ve sönümleyiciler üzerine odaklanmıştır. Stangroom (1983), ER akışkanların

özellikleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Stevens vd. (1984) ER sönümleyiciyi farklı frekanslarda test etmişler ve ER sönümleyicilerin geniş bir çalışma aralığının olduğunu ortaya koymuşlardır. 1980'li yılların ortalarında ER sönümleyicilerin modellenmesi üzerine çalışmalar kesme kuvveti sonrası durumu göz önünde bulunduran Bingham modeli üzerine kurulmuştur. Stanway vd. (1985,1987) ER sönümleyiciler için Coulomb sürtünmesi ve viskoz sönüm elemanının birbirine paralel olarak bağlanmasından oluşan Bingham modeli adı verilen basit bir mekanik modeli geliştirmişlerdir. Kontrol edilebilen akışkanlarda besleme (elektrik ya da manyetik) yapılmadığı durumda akışkan klasik Newtonien akışkan davranışı sergilemektedir. Herhangi bir elektrik ya da manyetik alan uygulanması durumunda ise bir kesme kuvveti oluşmakta ve bu kesme kuvveti aşılmadıkça akma gerçekleşmemektedir. İlk modellemeler kesme kuvveti aşıldıktan sonraki durumu göz önünde bulunduran modeller olmuş, kesme kuvveti öncesi durum ihmal edilmiştir. Bingham modeli tasarım ve üretim için idealdir. Ancak, dinamik davranışın modellenmesinde yetersiz kalmaktadır. Gamota ve Filisko (1991), sönümleyici cevabının kesme öncesi, kesme ve kesme sonrası olmak üzere 3 aşamadan oluştuğunu ortaya koymuştur. ER sönümleyicilerin davranışlarını modellemek için Coulomb sürtünmesi ve viskoz sürtünmeyi içeren birbirine seri bağlı 3 eleman kullanmışlardır. Ehr Gott ve Masri (1992) ER sönümleyicilerin kontroldeki uygulamaları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada ER sönümleyici için Chebyshev polinomlarının kullanıldığı, parametrik olmayan, 64 bilinmeyen belirlendiği bir yöntem sunulmuştur. Benzer bir yaklaşımı McClamroch ve Gavin (1995) ER sönümleyicilerin modellenmesi için sunmuştur. Ancak, parametrik olmayan bu modeller Bingham modeline göre oldukça karmaşıktır. Gavin vd. (1996a;1996b) yaptıkları iki aşamalı çalışma ile ER sönümleyicilerin tasarımı, test ve modellenmesi üzerinde Bingham modeline dayalı çalışmalar yapmışlardır. Kamath vd. (1996) Bingham modelini sanki statik yükleme durumu için incelemiştir. ER sönümleyicilerin test ve analizi için sanki statik Bingham modeli geliştirmişlerdir. Kamath ve Wereley (1997) ER sönümleyicinin farklı çalışma bölgelerindeki dinamik davranışını modellemek üzere nonlinear viskoelastik plastik esasına dayalı bir model öne sürmüşlerdir. Bu model farklı çalışma bölgelerindeki davranışı modelleyebilmekte, ancak genlik ve frekans değişimlerinde sönümleyicinin davranışının belirlenememesi hala bir sorun oluşturmaktadır. ER sönümleyicilerinin modellenmesi ile ilgili yukarıda belirtilen çalışmalar MR sönümleyiciler için bir alt yapı niteliği teşkil etmektedir.

MR sönümleyicilerdeki ciddi çalışmalar MR akışkanların özellikleri üzerinde yapılan araştırmalarla başlamaktadır. Carlson ve Weiss (1994) MR akışkanların yüksek kesme kuvvetlerine erişebildiğini ve çalışma sıcaklığı aralıklarının -40 ile +150 °C gibi geniş bir

aralıkta olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca MR akışkanların kirliliğe hassasiyetlerinin olmadığını göstermişlerdir. Bu çalışmalar MR akışkan sönümleyicileri ve MR akışkanlı sönümleyiciler üzerine alınan patentlerle devam etmiştir (Carlson, vd., 1994). MR sönümleyicilerin laboratuvar şartlarında yapısal sistemlere uygulanması yarı aktif elemanlar üzerine yapılan çalışmalarda bir dönüm noktası olarak nitelendirilebilir (Dyke, vd., 1996a, 1998; Spencer, vd., 1997). Spencer vd. (1997) daha önce ER sönümleyiciler için kullanılan modelleri MR sönümleyicilere uygulamışlardır. Bu modellerden Bingham model (Stanway vd., 1985,1987) MR sönümleyicinin kuvvet konum ilişkisini iyi bir şekilde karakterize etmesine rağmen, kuvvet hız karakterini modellemede zayıf kalmıştır. Özellikle düşük hız bölgelerinde kuvvet hız histerezis eğrisini yansıtamamaktadır. Dolayısıyla bu model kontrol uygulamaları için uygun değildir (Spencer vd., 1997). Uyguladıkları diğer bir model ise Gamota ve Filisko (1991)'nin geliştirdiği, Bingham modele paralel bağlı yay ve sönüm elemanı ile bir yayın, 3 elemanlı bir model oluşturacak şekilde seri olarak bağlanması ile elde edilen modeldir. Bu model de kuvvet konum karakterini yansıtmaya rağmen kuvvet hız karakteristiğinde başarısız olmuştur. Kuvvet hız karakteristiğinde histerezis oluşturmaya rağmen düşük hızlarda model ile deney sonuçları birbirini tutmamaktadır. Bu çalışmada kullanılan diğer bir model ise histerezis sistemlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan Bouc-Wen modelidir (Wen, 1976). Bu model de diğerlerinde olduğu gibi kuvvet konum karakteristiğinde başarılı iken kuvvet hız karakteristiğini yansıtmada yetersiz kalmıştır. Bu nedenle Spencer vd. (1997), kuvvet hız ilişkisini düşük hız bölgelerinde de yansıtabilecek bir model oluşturmuşlardır. Geliştirilmiş Bouc-Wen modeli adını verdikleri model Bouc-Wen modeline ilave edilen paralel bağlı bir yay ve seri bağlı bir sönüm elemanını içermektedir. Ayrıca MR sönümleyicinin sargı dinamiği birinci dereceden bir filtre ile modelin içerisine ilave edilmiştir. Çalışmalarında bu dört modeli deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Her bir model için hesaplanan kuvvet ve ölçülen kuvvet arasındaki hatayı, zamanın, konumun ve hızın fonksiyonu şeklinde hesaplamışlardır. Yapılan değerlendirme, geliştirilmiş Bouc-Wen modelin MR sönümleyicinin modellenmesinde diğer üç modelden daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Diğer taraftan, Bouc-Wen model MR sönümleyicinin histerezis karakterini iyi yansıtmakla beraber parametrelerinin belirlenmesi için çok fazla deneysel çalışma yapılmakta ve elde edilen verilerden deneme yanılma ve birtakım optimizasyon teknikleri kullanılarak parametreler belirlenmektedir (Dominguez vd., 2004). Dahası bütün bu uğraşlara rağmen gerçek histerezis karakter eğrisinin tüm durumlar için yakalanabileceğinin garantisi de yoktur. Bu nedenle Dominguez vd. (2004) Bouc-Wen model parametrelerinin belirlenmesi için bir metodoloji geliştirmişlerdir. Ayrıca Bouc-Wen modelini akımın fonksiyonu olacak şekilde

yeniden düzenlemişlerdir. Donminguez vd. (2006) akımın frekansın ve genliğin fonksiyonu olan bir model geliştirmişler ve bu modelin değişken koşullarda rahatlıkla kullanılabileceğini göstermişlerdir. Ancak kontrol tekniği açısından bakıldığında bu tarz modellerin özellikle adaptif kontrol uygulamalarında kullanımında çeşitli zorluklar söz konusudur.

Diğer bir dinamik modelleme yöntemi ise LuGre sürtünme modelini esas alan yöntemdir. Bu konuda ilk çalışma Canudas vd., (1995) tarafından yapılmıştır. Gerilimden bağımsız olan bu model, Alvarez ve Jimenez (2002) tarafından geliştirilmiştir. MR sönümleyicinin kuvvet karakteristiğini ifade eden denkleme uygulanan gerilimi de ilave etmişlerdir. Ayrıca ölçülmesi mümkün olmayan iç dinamiğin değişken olan katsayısını da sabit kabul etmişlerdir. Basit olmasına karşın değişik yükleme koşullarında MR sönümleyicinin oluşturduğu kuvveti başarılı bir şekilde karakterize edebilmiştir. Bu modelin en büyük avantajı gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımının kolay olmasıdır. Ayrıca adaptif kontrol uygulamalarını da kolaylaştırması sebebiyle bu tez çalışmasında LuGre sürtünme modeline dayalı MR sönümleyici modeli kullanılmıştır.

Kontrol edilebilen akışkanlı yarı aktif elemanların kullanıldığı sistemlerde diğer önemli bir husus ise uygun kontrol algoritmasının seçilmesidir. Literatürde ER ve MR sönümleyiciler üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur. MR sönümleyicilerin yapısal kontroldeki kullanımlarında, gerek modelleme gerekse kontrol tekniklerinin kullanımı açısından bakıldığında, Dyke vd. (1996a,1998) ve Spencer (1997) yaptıkları çalışmalar temel taşı niteliğindedir. Dyke vd. (1996a) yaptıkları çalışmada geliştirdikleri mekanik Bouc Wen modelini kullanarak, MR sönümleyiciyi 3 katlı bir binaya nümerik benzetim yardımıyla uygulamışlardır. Titreşimleri ortadan kaldırmak için gerekli olan kuvveti H_2/LQG temeline dayalı yöntem ile belirlemişler ve bu kontrol kuvvetini MR sönümleyicide oluşturmak için gerilim değerini Heaviside fonksiyon ile ayarlamışlardır. Bu kontrol yöntemi literatürde kırpmalı optimal kontrol olarak adlandırılmaktadır. Tasarladıkları kontrolün özellikle konum cevaplarını iyileştirdiğini göstermişlerdir. Benzer sonuçları deneysel çalışma ile de elde etmişlerdir (Dyke vd., 1996b).

Spencer vd. (1996), MR sönümleyici uyguladıkları üç katlı bir test yapısının titreşimlerini iki farklı kırpmalı optimal kontrol algoritması uygulayarak kontrol etmişlerdir. Sistem ölçeklendirilmiş El centro kuzey-güney bileşeni ile test edilmiştir. Kontrolcü A, yüksek ağırlıklı 3. kat yer değiştirmesi, kontrolcü B, yüksek ağırlıklı 3. kat ivmesi dikkate alınarak tasarım yapılmıştır.

Dyke vd. (1998), MR sönümleyicinin performansını test etmek amacıyla üç katlı bir yapının titreşimlerini kontrol etmek için daha önce uyguladıkları kırpmalı optimal kontrol algoritmasını üç farklı şekilde (A,B,C) sisteme uygulamışlardır. Ayrıca MR sönümleyici eklenmiş durum için sistem tanılama yapmışlardır. Sistem 5 farklı giriş için test edilmiştir: %120 El centro, %80 El centro, yüksek genlikli rastgele giriş, orta genlikli rastgele giriş, düşük genlikli rastgele giriş. Kontrolcü A yüksek ağırlıklı 3. kat yer değiştirmesi, kontrolcü B düşük ağırlıklı 3. kat ivmesi, kontrolcü C yüksek ağırlıklı 3. kat ivmesi dikkate alınarak tasarlanmıştır.

Dyke ve Spencer (1997), 4 farklı yarı aktif kontrol sistemini karşılaştırmışlardır. MR sönümleyicinin gerilim değerini ayarlamak için literatürde yer alan yarı aktif elemanların kontrolünde kullanılmış yöntemleri MR sönümleyicilere uygulamışlardır. Bunlar, Lyapunov kararlılık teoremine dayalı kontrol (Leitmann, 1994), merkezi olmayan Bang-Bang kontrol (Decentralized bang-bang control) (McClamroch ve Gavin,1995), ayarlanmış homojen sürtünme (Modulated homogeneous friction) (Inaudi, 1997) ve kendi geliştirdikleri kırpmalı optimal kontrol (Clipped optimal kontrol) (Dyke, vd., 1996a) olarak sıralanabilir.

Jansen ve Dyke (2000), daha önce tasarlanmış olan yarı aktif kontrol algoritmalarının çoklu MR sönümleyici ile kullanılması durumunda nasıl performans sergileyeceğini irdemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan ve daha önceki yarı aktif kontrol çalışmalarında da uygulanmış bazı algoritmalar şunlardır: Lyapunov kararlılık teoremine dayalı kontrol (Leitmann, 1994), merkezi olmayan Bang-Bang kontrol (McClamroch ve Gavin,1995), maksimum enerji yitimi (McClamroch ve Gavin,1995), ayarlanmış homojen sürtünme (Modulated homogeneous friction) kırpmalı optimal kontrolör (Dyke, vd., 1996a). Nümerik simülasyon için ilk iki katına paralel plakalı MR sönümleyici yerleştirilmiş olan 6 serbestlik dereceli bina modeli kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları çok girişli kontrol sistemlerinde MR sönümleyici kullanılması durumunda uygulanan kontrolörlerden üçünün daha uygun olacağını göstermiştir. Lyapunov kontrolör, ayarlanmış homojen sürtünme algoritması ve kırpmalı optimal kontrolör cevaplarda kayda değer azalmalar sağlamışlardır.

Jung Hyung-Jo vd. (2006), 6 farklı kontrol algoritması ile değişik deprem girişlerine sekiz katlı (Phase I base isolated benchmark building) bir bina modelinin davranışlarını 9 değişik performans kriterine göre incelemişlerdir. Kullandıkları kontrol yöntemleri: orijinal kırpmalı optimal kontrol (Dyke vd., 1996a), modifiye edilmiş optimal kontrol 1 ve 2, maksimum enerji yitimi, ayarlanmış homojen sürtünme, yarı aktif bulanık mantık tabanlı kontrol (Choi vd., 2004) 'dür. Nümerik benzetim çalışmalarının sonuçları sadece konum ile ivme cevapları

arasında bir ödünleşmenin olduğunu göstermiştir. İvme göz önünde bulundurulmadan konumun iyileştirilmesi istendiğinde en iyi sonuç klasik kırpmalı optimal kontrol ile elde edilmiştir. Her iki cevapta iyileşmenin olduğu kontrol yöntemi ise geliştirdikleri modifiye edilmiş kırpmalı optimal kontrol yöntemidir.

Villamizar vd. (2005), iki farklı geri adımlamalı (backstepping) kontrol yöntemi kullanarak 6 katlı bir binanın titreşimlerini iki adet kesme mod paralel plakalı MR sönümleyici yardımıyla kontrol etmişlerdir. Deneysel olarak doğruladıkları çalışmalarında geliştirdikleri kontrol algoritmalarını Lyapunov ve kayan kipli kontrolü 5 farklı deprem girişine karşılık 5 performans ölçütüne göre karşılaştırmışlardır.

Jimenez ve Alvarez-Icaza (2002) LuGre dinamik sürtünme modeli ile modelledikleri MR sönümleyicinin iç dinamiğini (internal state) bir nonlinear gözlemleyici ile hesaplamışlardır. Çok serbestlik dereceli bir bina modeli için tekrarlanan en küçük kareler (recursive least-square) algoritmasına dayanan gerçek zamanlı tanılamasını teorik olarak gerçekleştirmişler ve 3 katlı bina modeline (Dyke vd., 1996a) uygulamışlardır.

Alvarez-Icaza ve Jimenez (2003), LuGre dinamik sürtünme modeli ile modelledikleri MR sönümleyicinin iç dinamiğini (internal state) bir nonlinear gözlemleyici ile hesaplamışlardır. Çok serbestlik dereceli bir bina modeli için iki farklı yarı aktif kontrol algoritması tasarlamışlar ve 3 katlı bina modeline (Dyke vd., 1996a) uygulamışlardır.

Jimenez ve Alvarez-Icaza (2004), LuGre dinamik sürtünme modeli ile modelledikleri MR sönümleyicinin parametrelerini hesaplamak ve yapının hız ve yer değiştirme değerlerini belirlemek için ivme ve kuvvet ölçümüne dayalı LMI tabanlı bir adaptif gözlemleyici tasarlamışlardır. Lyapunov tabanlı yarı aktif kontrol algoritması ile 3 katlı bina modeline (Dyke vd. 1996a) uygulamışlardır.

Jimenez ve Alvarez-Icaza (2005), LuGre model üzerinde yaptıkları modifikasyonlarla daha önceki modeller ile aynı doğrulukta ama daha basit bir model geliştirmişler ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Sönümleyicinin parametrelerini belirlemek için parametre tanılama yapmışlardır. Bu parametre tanılaması, iç dinamiği tahmin etmekte kullanılan kapalı çevrim gözlemleyici içermektedir.

Sakai vd. (2003a, 2003b), nümerik benzetimle gerçekleştirdikleri çalışmalarında MR sönümleyicinin LuGre modelini hızı, iç dinamiğe ve voltaja bağlı olmak üzere modifiye etmişlerdir. MR sönümleyicinin iç dinamiğini adaptif tanılama algoritması ile tahmin etmişlerdir. Geliştirdikleri modelin ters dinamik modelini kullanarak sistem için gerekli

kuvveti üretecek voltaj değerini bulmuşlardır. Sistem için gerekli kuvveti ise LQG kontrol vasıtasıyla elde etmişlerdir.

Sakai vd. (2005) yılında yayınlanan deneysel çalışmalarında MR sönümleyicinin LuGre modelini hız, iç dinamiğe ve gerilime bağlı olmak üzere modifiye etmişlerdir. MR sönümleyicinin iç dinamiğini adaptif tanılama algoritması ile tahmin etmişlerdir. Geliştirdikleri modelin ters dinamik modelini kullanarak sistem için gerekli kuvveti üretecek gerilim değerini bulmuşlardır. Sistem için gerekli kuvveti ise bilineer H_∞ kontrol vasıtasıyla elde etmişlerdir.

Terasawa ve Sano (2005) bina titreşimlerini kontrol etmek amacıyla iki adet adaptif kontrolör tasarlamışlardır. LuGre sürtünme teoremine dayalı MR sönümleyici modelinin parametrelerini adaptif gözlemleyici yardımıyla tanılamışlardır. Geliştirdikleri modelin ters dinamik modelini kullanarak sistem için gerekli kuvveti üretecek voltaj değerini bulmuşlardır. Sistem için gerekli kuvveti ise referans adaptif geri beslemeli kontrolör vasıtasıyla elde etmişlerdir.

Sang-Won Cho vd. (2005), sismik olarak tahrik edilmiş bir bina için MR sönümleyici kullanarak modal kontrol tasarlamışlardır. Modal kontrol yardımıyla seçtikleri birkaç titreşim modunu kontrol ederek binanın hareketini yeniden şekillendirebilmişlerdir. Kontrol algoritması sensör ile ölçülen modal durumları tahmin etmek için bir Kalman filtresi içermektedir. Ölçümlerin etkisini ortaya koyabilmek için, Kalman filtresinde sırasıyla yer değiştirme, hız ve ivme olmak üzere üç durum ele alınmıştır. Spillover etkisini ortadan kaldırmak için bir alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Nümerik olarak yapılan çalışmada ilk iki katına MR sönümleyici yerleştirilmiş 6 katlı bir bina modeli ele alınmıştır. Buldukları sonuçları diğer kontrol yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Nümerik çalışmanın sonucu yalnızca düşük birkaç modu kontrol ederek bina hareketinin bastırılabilirliğini ancak elde edilen sonuçların uygun ölçüm ve ağırlıklandırmalar ile oldukça değiştiğini göstermiştir.

Ying vd. (2003), ER/MR kullanılan ve rastgele (random) tahrik edilmiş sistemler için stokastik optimal yarı-aktif kontrol geliştirmişlerdir. Çok serbestlik dereceli sistemler için genelleştirdikleri kontrol algoritmasını iki farklı sistem üzerinde (Duffing osilatör ve düşey ve yatay olarak tahrik edilmiş sistem) LQG kontrolör ile karşılaştırmalı olarak test etmişlerdir. Geliştirilen bu yöntem daha önceden geliştirilmiş olan ve quasi-Hamiltonian sistemler için stokastik ortalama metodu ve stokastik dinamik programlama prensibine dayanan nonlinear

stokastik optimal kontrol yöntemini esas almaktadır. Geliştirilen yöntemin en önemli avantajı ER/MR kullanarak kırpma (clipping) olmaksızın nonlinear stokastik optimal aktif kontrol yönteminin çok serbestlik dereceli nonlinear stokastik sistemlere bile uygulanabilmesinin mümkün olmasıdır.

Zhou vd. (2003) bir adaptasyon kuralı ve bulanık kontrolörden oluşan adaptif bulanık kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Kontrolün amacı, bazı istenen cevapları ve MR sönümleyici tarafından adaptif olarak ayarlanan tüm sistem cevapları arasındaki farkı minimize etmektir. Adaptasyon kuralının kullanılmasıyla tüm sistemin karakteristiklerine duyulan gereksinim ortadan kaldırılmıştır. Bulanık kontrolör ve adaptasyon kuralından oluşan kontrol yöntemi bina-sönümleyici sisteminden herhangi bir başlangıç verisine ihtiyaç duymamaktadır. Bu yaklaşım nonlinear yapıları random girişler nedeniyle oluşan belirsizliklere karşı koruyan bir dayanıklı kontrol yöntemini ortaya koymaktadır. Nümerik çalışmalar yöntemin MR sönümleyici kullanılan lineer ve nonlinear tek ve çok serbestlik dereceli binalarda uygulanabileceğini göstermiştir.

Song vd. (2005) bilinmediği ya da ölçülemediği kabul edilen geniş bant durağan olmayan rastgele titreşimlere (broadband nonstationary random vibration) maruz kalan MR sönümleyicili süspansiyon sistemleri için nonlinear model temeline dayalı (nonlinear model based) adaptif kontrol algoritması geliştirmişlerdir. Sistemde bulunan bilinmezlik veya kütle ya da katılık gibi değişken parametre durumları için adaptif algoritma geri dönüşlü en küçük kareler metodu gibi bir online sistem tanılama içermektedir.

Pin-Qi Xia (2003), bina titreşimlerinin kontrolünde gerekli kuvveti üretmek için gerekli gerilimin belirlenmesini sağlayan bir ters MR sönümleyici modeli geliştirmişlerdir. Ters model, birçok katmanlı algılayıcı optimal yapay sinir ağı ve sistem tanılama kullanılarak oluşturulmuştur. Nümerik simülasyonlar eğitilen optimal yapay sinir ağlarının gerekli voltajı doğrulukla tahmin edebildiğini göstermiştir.

Gu ve Oyadiji (2007) MR sönümleyicili çok serbestlik dereceli bir yapının çevresel etkenlerden kaynaklanan titreşimlerini azaltmak için adaptif neuro-fuzzy çıkarım sistem (ANFIS) kontrolörünü geliştirmişlerdir. ANFIS kontrolör için eğitilen datalar LQG ile bulunmuştur. MR sönümleyicinin istenen kuvveti üretmesi için ise kuvvet ileri beslemeli bir kontrol yöntemi kullanılmıştır.

Aldemir (2003) ayarlı kütle damperine bağlı MR sönümleyicinin tek serbestlik dereceli bir yapının cevaplarını azaltmadaki performansını araştırmıştır. Optimal yarı aktif kontrol

yöntemi, yapının mutlak ivmelerinin karesinin integral normunu kısıtlara bağlı olarak minimize etmektedir. Bu kısıtlar nonlinear hareket denklemlerinden çıkarılır ve Euler-Lagrange denklemlerinin nümerik olarak çözülmesiyle elde edilir. MR sönümleyici için hesaplanan optimal performans, pasif ayarlı kütle damperi ile karşılaştırılmış ve MR sönümleyicinin yapısal titreşimleri bastırmada geniş bir sismik giriş aralığında etkin olduğu belirlenmiştir.

Gavin ve Aldemir (2005) iki serbestlik dereceli taban izolasyonlu bir yapının cevaplarını, pasif lineer ve nonlinear viskoz sönüm, iki pseudo skyhook yarı aktif kontrol metodu ve optimal yarı aktif kontrol durumları için araştırmışlardır. Yapı düşük sönümlü elastik izolasyon sistemi ile paralel bir kontrol edilebilir sönümleyici ile izole edilmiştir. 8 farklı deprem girişi ile yapılan nümerik çalışmalar sonucunda sürekli pseudoskyhook kontrol metotlarıyla bağlantılı olarak kullanılan kontrol edilebilir sönümleyicilerin taban izolasyonlu yapıların ivme ve katlar arası yer değiştirmelerini düşürdüğü gözlenmiştir. Önceden deprem bilgisine ihtiyaç duyan optimal yarı aktif kontrol, bütün yapısal cevapların azalması bakımından, pasif ve pseudoskyhook yarı aktif metotlarla karşılaştırıldığında her zaman için en iyi performansı vermiştir.

Aldemir ve Gavin (2006), yarı aktif kontrol sistemlerinin pasif sistemlere göre avantajlarını araştırmışlardır. Tek serbestlik dereceli sistemin pasif, optimal ve pseudoskyhook kontrol altındaki cevaplarını nümerik benzetim yoluyla karşılaştırmışlardır.

Alhan vd. (2006), üç farklı yarı aktif kontrol yöntemini karşılaştırmışlardır. Bunlar pseudo negatif-katılık kontrol, sürekli pseudoskyhook-sönüm kontrol ve bang bang pseudoskyhook-sönüm kontrolüdür. Kontrol performansları iki serbestlik dereceli bina modeli üzerinde test edilmiştir.

Aldemir (2009), ani optimal kontrol tasarımında depremin önceden bilinmesi gerekliliğini ortadan kaldırmak için nedensel alt optimal kontrol geliştirmiştir. Geliştirilen metod maksimum entropi yardımıyla yer hareketinin ivmesinin tahmin edilmesi esasına dayanmaktadır. Metod kontrol edilebilen akışkanlı bir eleman yardımıyla iki serbestlik dereceli bir yapıya uygulanmıştır. Sonuçlar kontrolsüz ve ani optimal kontrollü durumlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma geliştirilen metodun yapının deprem etkisindeki titreşimlerini bastırmada daha etkin olduğunu göstermiştir.

Park vd. (2004), deprem tahrikli yapıların titreşim kontrolü için bağımsız modal uzay bulanık

mantık kontrolör geliştirmişlerdir. Geliştirilen teknik karma kontrol metodu olup, iki adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar, modal uzayda optimal kontrolör geliştirilmesi ve dizayn edilen bu kontrolörün kazançlarının bulanık olarak ayarlanmasıdır. Geliştirilen kontrolün geçerliliği 6 katlı bir bina üzerinde yapılan simülasyon çalışmaları ile test edilmiştir.

Ying vd. (2007), daha önce geliştirilen bir yöntemden yola çıkarak, MR/ER sönümleyiciler için sınırlı stokastik optimal yarı aktif kontrol geliştirmişlerdir. Kontrol kuvveti iki kısma ayrılmıştır: Yarı aktif kısım ve pasif kısım. Pasif kısım kontrol edilmemiş sistem içine dahil edilmiştir. Sınırlı stokastik optimal yarı aktif kontrol problemi oluşturmak için yarı aktif kontrol kuvvetlerinin sınırı ve dinamik kısıtı ile bir performans indeksi formüle edilmiştir.

Johnson ve Erkus (2007) akıllı sönümleyicili yarı aktif sistemlerin performans ve soğurumunu (dissipativity) LMI (linear matrix inequality) sentezi yardımıyla araştırmışlardır. Bu amaçla, daha iyi bir yarı aktif performans için standart lineer kvadratik regülatörü (LQR) modifiye eden bir soğurum indeksi geliştirmişlerdir. İlk olarak mevcut soğurum indekslerini ve iki yeni soğurum indeksini vermişler, ikinci olarak da lineer amaç fonksiyonu ve LMI kısıtları bakımından yeni bir LQR problemi tanımlamışlardır. Daha sonra her bir soğurum indeksi için bir soğurum eşitsizlik kısıtı tanımlamışlardır. Soğurum kısıtları eklenerek modifiye edilmiş LMI tabanlı LQR kontrolör elde edilmiştir. Soğurum kısıtları ve geliştirilen kontrolör iki nümerik örnek üzerinde test edilmiştir. 2 serbestlik dereceli yapı üzerinde yapılan nümerik simülasyonlar indekslerin kullanışlı ve geliştirilen kontrolün yarı aktif performansı artırdığını göstermiştir. 2 serbestlik dereceli otoyol köprüsü üzerinde yapılan nümerik simülasyonlar sonucunda ise, geliştirilen metodun soğurumu artırdığı ancak tüm sistemin yarı aktif performansında kayda değer bir iyileştirme göstermediği gözlenmiştir.

Iwata vd. (2004) on iki serbestlik dereceli bir yapı için büyük kapasiteli MR sönümleyici kullanarak yarı aktif sismik izolasyona kontrol sistemi tasarlamışlardır. LMI tabanlı gain-scheduled kontrolör dizaynında kullanılmak üzere, yarı aktif sönümleyicinin hayali modelini hesaba katarak bir lineer parametre değişim sistemi formüle etmişlerdir. Gain-scheduling kontrolün değişen katsayısı olan sönümleyici strok hızını bir Kalman filtresi yardımıyla tahmin etmişlerdir. Yapılan nümerik simülasyonlar, LQR, skyhook sönümleme sistemi ve pasif sönümleme sistemi ile kıyaslama yapıldığında tasarlanan kontrol sisteminin iyi bir performans ortaya koyduğunu göstermiştir.

Sahasrabudhe ve Nagarajaiah (2005), deprem etkisi altındaki izolasyonlu binaların cevaplarını azaltmak için kullanılan, MR sönümleyici yardımıyla oluşturulan, değişken sönümün

etkinliğini araştırmışlardır. İki serbestlik dereceli 1:5 ölçekli bir bina modeli kullanmışlardır. MR sönümleyici ve yatak sürtünmesinden kaynaklanan nonlinearlikler hesaba katılarak nonlinear klasik model çıkarılmıştır. MR sönümleyici ve binanın kontrolü için Lyapunov temeline dayana kontrol kullanılmıştır. Deneyler için titreşim tablası kullanılmış ve sonuçlar pasif düşük/yüksek sönüm ve yarı aktif kontrol durumları için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak değişken sönümün taban yer değiştirmelerini pasif düşük/yüksek sönüm durumuna göre daha çok düşürdüğü görülmüştür.

Dong vd. (2004) Gaussian beyaz gürültü (white noise) ile uyarılmış, MR sönümleyicili nonlinear osilatör için stokastik optimal yarı aktif kontrol geliştirmişlerdir. Histerezis sistem ve MR sönümleyici Bouc-Wen model kullanılarak tanımlanmıştır. Sönümleyicinin oluşturduğu kuvvet pasif ve yarı aktif olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Pasif kısım kontrol edilmemiş sistem içine dahil edilmiştir. Daha sonra sistem, eşdeğer nonlinear non-hysteretic stokastik sisteme dönüştürülmüştür. Kontrol problemi için, stokastik dinamik programlama denklemine dayanan bir dinamik programlama denklemi kurulmuş ve optimal kontrol kuralı için çözülmüştür. Geliştirilen kontrolün performansı iki örnek için yapılan nümerik simülasyonlar ile gösterilmiştir.

Cheng vd. (2006), stokastik olarak uyarılmış, MR sönümleyicili histerezis sistemler için stokastik optimal yarı aktif kontrol geliştirmişlerdir. Histerezis sistem ve MR sönümleyici Bouc-Wen modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Sönümleyicinin oluşturduğu kuvvet pasif ve yarı aktif olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Pasif kısım kontrol edilmemiş sistem içine dahil edilmiştir. Daha sonra sistem, eşdeğer nonlinear non-hysteretic stokastik sisteme dönüştürülmüştür. Kontrol problemi için, stokastik dinamik programlama denklemine dayanan bir dinamik programlama denklemi kurulmuş ve optimal kontrol kuralı için çözülmüştür. Geliştirilen kontrolün performansı LQG kontrol ile nümerik simülasyonlar vasıtasıyla karşılaştırılmıştır.

Cornejo ve Alvarez-Icaza (2006), bir yapının sismik tahrike bağlı kat yer değiştirmelerini azaltmak için PBC-IDA (passitivity based control law with interconnection and damping assignment) tasarımı üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Yer ile birinci kat arasına yerleştirdikleri bir MR sönümleyiciyi aktüatör olarak kullandıkları çalışmalarında, bina-MR modelini PCHE (port controlled Hamiltonian equations) içine dahil etmişlerdir. Benzetim sonuçları kat yer değiştirmelerinde büyük azalmalara olduğunu göstermiştir.

Yuen vd. (2007) yılında yayınlanan çalışmalarında, yapısal sistemlerin MR sönümleyici ile

kontrolü için, yapısal modelleme belirsizliklerine yönelik yarı aktif kontrol metodolojisi geliştirmişlerdir. Ana fikri kırpmalı optimal kontrol teorisi ile aynıdır. Geliştirilen yarı aktif kontrol kuralı, MR sönümleyicinin üretmesi gereken kuvvetin bulunmasında, güvenilirlik tabanlı histerezis (robust realibility-based) aktif lineer kontrol metodunu kullanır. Bu referans kontrol kuvveti, herhangi bir durum tahmini olmaksızın, o anki ve/veya önceki tamamlanmamış cevap ölçümleri kullanılarak hesaplanabilir. Geliştirilen yaklaşımın en önemli amacı, belirsiz uyarılardan kaynaklanan belirsizlikleri olan yapısal sistemler için daha robust bir performans elde etmektir. Geliştirilen kontrolün performansı 10 katlı MR sönümleyicili bir bina modeli üzerinde simülasyon çalışmaları ile test edilmiştir.

Neelakantan ve Washington (2008) yılında yayınlanan çalışmalarında, titreşim problemlerinde MR sönümleyici uygulamaları için modifiye edilmiş nonlinear kayan kipli kontrol (modified sliding mode control) geliştirmişlerdir. Bu metodu tek ve iki serbestlik dereceli sistemlere uygulamışlardır. Tek ölçüm sensörünün kullanıldığı çeyrek taşıt modeli için ayrıca gözetleyici (observer) tasarlamışlardır. Simülasyon ve deney sonuçları metodun etkinliğini göstermiştir.

Li vd. (2006), MR sönümleyicili yarı aktif kontrol sisteminin iç nonlinearitesi ve belirsizliği için geliştirilmiş geri yayılım (back-propagation) algoritması gerçekleştirmiştir. Bu algoritma MR sönümleyicinin sönüm kuvvetini tahmin etmede kullanılmakta ve zaman gecikmesi etkisini ortadan kaldırmaktadır.

Yan ve Zhou (2006), MR sönümleyicili yapıların deprem etkisinden korunması için genetik algoritmalara dayanan yarı aktif bulanık mantık kontrol yöntemi geliştirmişlerdir.

Bani-Hani ve Sheban (2006), MR sönümleyicili taban izolasyonlu bir bina için yapay sinir ağı esasına dayanan yarı aktif kontrolör geliştirmişlerdir. Öncelikle MR sönümleyicinin dinamik davranışının benzetimini yapabilmek için bir ters yapay sinir ağı modeli (INV-MR) oluşturmuşlardır. Optimal kontrol kuvvetini LQG kontrol ile belirlemişlerdir. LQG kontrol ve INV-MR sistemden oluşan bu yarı aktif neuro kontrolör (SA-NC) ile MR sönümleyici için gerekli kontrol gerilimini oluşturmuşlardır. Geliştirilen metodun performansını pasif lead rubber bearing (LRBS) ile karşılaştırmışlardır. Son olarak SA-NC sistemin etkinliğini 6 serbestlik dereceli taban izolasyonlu bir bina üzerinde nümerik simülasyonlar ile test etmişlerdir.

Kontrol uygulamalarında tasarlanan kontrolörün etkinliğinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bu konuda Ohtori vd. (2004) 3 katlı (5 kolon), 9 katlı (6 kolon), 20 katlı (6 kolon) nonlinear

bina modelleri için bir benchmark problemi yayınlamışlardır. Uygulanacak kontrol yöntemlerinin kıyaslanmasında kullanılmak üzere çeşitli performans kriterleri tanımlamışlardır.

MR sönümleyicilerin pratikteki uygulamaları için dikkate alınması gereken bazı hususlar söz konusudur. Aşağıda bu hususlardan bazıları hakkında yapılan bazı çalışmalar ve sonuçları verilmektedir. Bunlardan cevap süresi kontrolün performansını da etkileyen önemli bir faktördür. Yang vd. (2002), sanki-statik asimetrik MR sönümleyici modelini ortaya koymuşlar ve hem sanki-statik paralel plaka modeli hem de deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bu modelin MR sönümleyicinin dinamik davranışını modellemek için uygun olmadığını tespit etmişlerdir. Bunun üzerine Bouc-Wen histerezis modeli geliştirmişler ve dinamik performansını irdilemişlerdir. Ayrıca bir akım sürücü kullanmanın cevap zamanını düşürmede oldukça etkili olduğunu göstermişlerdir. MR sönümleyici sargılarının paralel bağlanması durumunda seri bağlantıya göre daha hızlı cevap elde edildiği gözlenmiştir. Deneysel çalışmalardan yola çıkarak sönümleyicinin cevap zamanının yapısal uygulamalarda geniş bir aralıkta kullanım için uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Yang vd. (2004) güç kaynağının ve MR sönümleyicinin dinamik modelini çıkarmışlar ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. MR sönümleyiciyi akım ile sürmenin MR sönümleyicinin cevap zamanını oldukça azalttığını göstermişlerdir.

Koo vd. (2006a), MR sönümleyicinin cevap zamanı üzerinde karşılaştırmalı bir değerlendirme çalışması yapmışlardır. Sonuçlar, belirli bir hız değeri için, uygulanan akım değeri arttıkça cevap zamanının azaldığını göstermiştir. Sürücü devrelerde ise bunun tersine, akım arttıkça cevap zamanı da artmaktadır. Cevap zamanı üzerinde hızın etkisini araştırmak için, 0.1-4 in/s aralığı test edilmiştir. Sonuç olarak, hız arttıkça cevap zamanının eksponansiyel olarak final değerlerine yakınsadığı gözlenmiştir.

Pratik uygulamalarda diğer bir konu da MR sönümleyicinin sisteme ilave edilmesi ile sistemin katılığında bir miktar değişimin gerçekleşmesidir. Guo ve Hu (2005), MR sönümleyiciler için histerezis fenomen ve eşdeğer lineer katılık ile sönüm anlamında ilave nonlinear katılık üzerinde araştırma yapmışlardır. Daha sonra titreşim kontrolünde nonlinear katılığın etkisini MR sönümleyici eklenmiş çeyrek taşıt modeli üzerinde deneysel ve simülasyon çalışmaları ile incelemişlerdir. Hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar titreşim kontrol dizaynında MR sönümleyicinin içerisindeki nonlinear katılığın hesaba katılması gerektiğini ortaya koymuştur. Örneğin, ilave nonlinear katılık yarı aktif

süspansiyonun temel rezonans frekansını arttırmakta böylece dinamik performans bu yüksek frekansta beklendiğinden düşük olabilmektedir.

Pratik açıdan başka bir husus MR sönümleyiciye gerilim uygulanması sonucu meydana gelen ısı değişiminin etkileridir. Gordaninejad ve Breese (1999), MR şok sönümleyicinin ısı üretimi ve dağıtımı üzerinde deneysel ve teorik araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında Nevada Üniversitesi'nde belirli uygulamalar için tasarlanıp imal edilmiş ve test edilmiş MR akışkanlı sönümleyiciler kullanmışlardır. Her bir MR sönümleyici için değişik sinüzoidal girişler altındaki sıcaklık değişimi incelenmiştir. Ayrıca, MR sönümleyicinin sıcaklık artışı veren bir teorik model geliştirilmiştir. Bu model nümerik olarak çözümlenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Fiziksel parametrelerin MR sönümleyicideki ısı üretimi ve dağılımı üzerindeki etkisini belirleyebilmek için çıkarılan denklemlerin boyutsuz formu geliştirilmiştir. Son olarak sismik bir kuvvet etkisi altında MR sönümleyicinin ısı artışı teorik olarak belirlenmiştir. Tüm durumlarda ısı değişiminin sönüm kuvveti üzerindeki etkisinin önemli olduğu görülmüştür.

MR sönümleyici ve monte edildiği sistemin de birbirine uygun olması özellikle ivme cevapları açısından bakıldığında önem taşımaktadır. Hiemenz vd. (2003), deprem hasarlarının hafifletilmesinde MR desteklerin etkinlik ve uygulanabilirliğini araştırdıkları çalışmalarında, kilitlenme durumunu engellemek için, MR sönümleyicinin tasarımında β gibi bir boyutsuz değişken tanımlamıştır. β , MR sönümleyici tarafından oluşturulan kuvvetin giriş kuvvetine (binanın karakteristik kütlelerinin sismik ivme ile çarpımı) oranıdır. MR sönümleyicinin kilitlenme durumu binanın sismik cevabı için en kötü durumdur. Bu teorik analize göre MR sönümleyicinin çalışma aralığı önem kazanmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada mevcut bir MR sönümleyici modifiye edilmiş ve 3 katlı bir bina modeline uygulanmıştır. 3 farklı kontrol algoritması nümerik ve deneysel olarak uygulanmış ve yarı aktif kontrollü MR desteklerin çok etkin olduğu gözlenmiştir.

Pratik açıdan MR sönümleyicilerin sisteme en verimli olacak montajının gerçekleştirilebilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmış ve bazı sistemler geliştirilmiştir. Lin vd. (2007), yüksek sönümlü kauçuk yatak (HDRB) ve 300 kN kapasiteli MR sönümleyici eklenmiş bina modeli üzerinde büyük ölçekli testler gerçekleştirmişlerdir. Toplam kütlesi 21.772 kg olan sisteme büyük bir titreşim tablası ile çeşitli deprem girişleri verilmiştir. Geliştirilen 3 bulanık mantık kontrolör kullanılarak sistem yarı aktif olarak kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma ile düşük güç gereksinimi, direk geri besleme, yüksek güvenilirlik, enerjinin dağılımı ve kusursuz (fail-safe) çalışma gerçekleştirilmiştir.

Koo vd. (2006b), yarı aktif ayarlı kütle absorberlerinin (TVA) deneysel robustluk analizini önermişlerdir. Klasik TVA'lerde kritik problemlerden biri yanlış ayarlamadır(off- tuning yada miss-tuning). Bu durumda TVA'ler temel yapının titreşimini kuvvetlendirebilir. Bu çalışma TVA'lerin yapısal kütle değişimlerine nasıl adapte edilebileceğini göstermektedir. Bunun için TVA eklenmiş iki serbestlik dereceli bir test yapısı inşa edilmiştir. Ayrıca MR sönümleyici ilave edilmiş bir TVA de ele alınmıştır. Test düzenekleri kullanılarak TVA için optimum ayar parametreleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar yarı aktif MR TVA'in pasif TVA'e göre maksimum titreşimleri düşürmede daha üstün olduğunu göstermiştir. Ayrıca yarı aktif MR TVA, esas kütle (mass off-tuning) değişimlerine karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

Nagarajaiah ve Sahasrabudhe (2006), yeni bir yarı aktif bağımsız değişken katılık (semiactive independently variable stiffness-SAIVS) elemanı geliştirmişlerdir. Taban izolasyonlu bir bina üzerinde klasik ve deneysel olarak test etmişlerdir. Yapılan klasik ve deneysel çalışmalar SAIVS elemanın minimum ve maksimum değerler arasında rijitliğinin sürekli ve düzgün olarak değiştirdiği gözlenmiştir.

Setareh vd. (2007), bina zeminlerinin titreşimlerini kontrol etmek için ayarlı sarkaç kütle sönümleyiciyi (pendulum tuned mass damper - PTMD) geliştirmişlerdir. Bu sisteme yarı aktif ayarlı sarkaç kütle damperi (SAPTMD) adını vermişlerdir. SAPTMD sistemin performansını benzerleriyle klasik ve deneysel olarak karşılaştırmışlardır.

Lin vd. (2005), klasik ayarlı kütle damperine yarı aktif damper ekleyerek, yarı aktif ayarlı kütle damperi (STMD) denilen yeni bir yarı aktif kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında yarı aktif eleman olarak değişken sönümlü damper ve MR sönümleyici kullanmışlardır. Yaptıkları karşılaştırmalar, yarı aktif ayarlı kütle damperinin, ayarlı kütle damperinin kontrol performansını artırdığını göstermiştir.

Yarı aktif elemanların enerji gereksinimleri az olduğundan, gerekli enerjinin bazı mekanizmalar yardımıyla sistem üzerinden elde edilebileceği düşüncesi ile bazı çalışmalar yapılmıştır. Scruggs vd. (2006), yarı aktif ve rejeneratif (regenerative) sistemler için genel bir kontrol sentezi yapmışlardır. Rejeneratif sistemler enerji depolayabilmekte ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilmektedirler. İki aşamadan oluşan çalışmalarında durum geri beslemeli ve çıkış geri beslemeli kontrol kullanmışlardır.

Cho vd. (2005), MR sönümleyici ve elektromanyetik indüksiyon (EMI) sisteminden oluşan bir akıllı pasif sistem geliştirmişlerdir. MR sönümleyiciye bağlanan EMI ile MR sönümleyicinin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi üretilmektedir. Üretilen enerji, MR

sönümleyiciye etkiyen giriş, örneğin deprem ile orantılı olarak etkidüğinden herhangi bir kontrolör ya da sensöre de ihtiyaç duyulmamaktadır. Geliştirilen akıllı sistemin etkinliğinin belirlenebilmesi için normal MR sönümleyicili kontrol ile karşılaştırma yapılmıştır. Nümerik simülasyonlar, iki sistemin benzer performans sergilediğini göstermiştir.

Son olarak ölçüm sistemlerindeki gelişmelere bakacak olursak, buradaki arayışların kablo vs. gibi bağlantı elemanlarını mümkün olduğunca aza indiren sistemlerin geliştirilip kullanılmasını hedeflediği söylenebilir. Lynch vd. (2008), gerçek zamanlı bina kontrolü için, prototip kablosuz (wireless) sensörün veri işleme kabiliyeti, hesap analizi ve faaliyete geçirilmesi üzerinde araştırmalar yapmışlardır. LQR kontrolün kullanıldığı çalışmada kablosuz sensörün performansı MR sönümleyicili bir bina modeli üzerinde test edilmiştir.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı, yapıların deprem etkisi altındaki titreşimlerinin azaltılmasında, MR sönümleyicilerin ve uygulanan kontrol yöntemlerinin etkisinin, titreşim tablası deneyleri yardımıyla araştırılmasıdır. Bu amaçla karışım hassaslık problemine dayalı lineer H_∞ dayanıklı kontrolör ve Lyapunov esasına dayalı nonlinear adaptif kontrolör tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrolörlerin performansları zemin katına MR sönümleyici bağlanmış altı katlı bir bina modeli üzerinde laboratuvar ortamında titreşim tablası ile test edilmiştir. Bu tez çalışması MATLAB ortamında tasarımı ve analizi gerçekleştirilen kontrolörlerin performanslarının deneysel olarak test edilmesini kapsamaktadır.

H_∞ dayanıklı kontrolör tasarımı için sistemin karakteristiklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle sistem parametrelerini belirlemek amacıyla iki farklı metod kullanılmıştır. Ayrıca kontrolör mertebesini azaltmak amacıyla model indirgeme yapılmıştır. Elde edilen modeller üzerinden kontrolör tasarımı MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolör deneysel olarak sisteme uygulanmıştır.

H_∞ dayanıklı kontrolörün tasarımında parametrelerin belirlenmesi için kullanılan yöntemler, klasik yöntem ve sistem tanılama yöntemleridir. Bu yöntemler kullanılarak elde edilen modeller esas alınarak üç farklı geri besleme üzerinden H_∞ dayanıklı kontrolör tasarımları yapılmıştır. H_∞ dayanıklı kontrolör, model indirgeme yöntemiyle elde edilen indirgenmiş sistem üzerinden tasarlanarak, tam sistem modeline uygulanmaktadır. Model indirgeme yöntemiyle elde edilen sistem üzerinden tasarlanan kontrolörler önce MATLAB ortamında doğrulanmıştır. MR sönümleyicinin geriliminin ara bir algoritma yardımıyla ayarlanması

sonucu, deneysel olarak yapısal sisteme uygulanmıştır. Elde edilen deneysel bulgular tasarlanan kontrolörlerin titreşimleri bastırmada etkin olduğunu göstermiştir. Klasik model üzerinden tasarlanan kontrolörler ve sistem tanılama metodu ile elde edilen kontrolörler karşılaştırıldığında sonuçlarda belirgin bir farkın olmadığı gözlenmiştir. Klasik model ve sistem tanılama modelleri üzerinden tasarlanan kontrolörler arasında yapılan bu karşılaştırma literatüre yapılan bir katkıdır.

Lyapunov esasına dayalı nonlinear adaptif kontrolör yapısında MR sönümleyicinin ölçülemeyen iç dinamiğinin tahmini için bir gözlemleyici tasarlanmıştır. Histerezis karakteri sebebiyle kesin model parametrelerinin belirlenmesi için uzun ve zahmetli deneylerin yapılması gereken MR sönümleyici için de adaptasyon kuralları tanımlanmıştır. Ayrıca, tasarımda çalışma koşullarındaki değişimler sonucu farklılaşan yapı parametrelerinin adaptasyonu gerçekleştirilmiştir. MR sönümleyiciye gönderilen gerilim doğrudan belirlenmektedir. Bu tezde geliştirilen nonlinear adaptif kontrolörün yapısal sistemlere uygulanması, bu tez çalışmasında ortaya konan diğer bir yeniliktir.

Tez çalışmasının diğer kısımları aşağıdaki gibi özetlenebilir. Bölüm 2’de yapısal sistemin ve MR sönümleyicinin genel olarak modellenmesi ve sistem tanılama hakkında genel teorik bilgiler verilmiştir. Bölüm 3 teorik olarak karışım hassaslık (mixed sensitivity) problemine dayalı H_∞ dayanıklı kontrolörlerin nasıl tasarlanacağını anlatmaktadır. Nonlinear adaptif kontrolör tasarımı, Bölüm 4’te verilmektedir. Bölüm 5’te teorik olarak verilen yöntemlerin deney modeline uygulanması gerçekleştirilmiştir. Klasik model ve sistem tanılama yöntemlerinin uygulanarak yapısal modelin parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolörlerin 6 katlı bina modeline deneysel olarak uygulanması ve elde edilen sonuçlar yine bu bölümde yer almaktadır. Ayrıca, kontrolörler arasında bir karşılaştırma da bölümün sonunda verilmektedir. Bölüm 6’da ise çalışmanın sonuçları irdelenmekte ve ileride yapılabilecek muhtemel çalışmalar hakkında kısa bilgi verilmektedir.

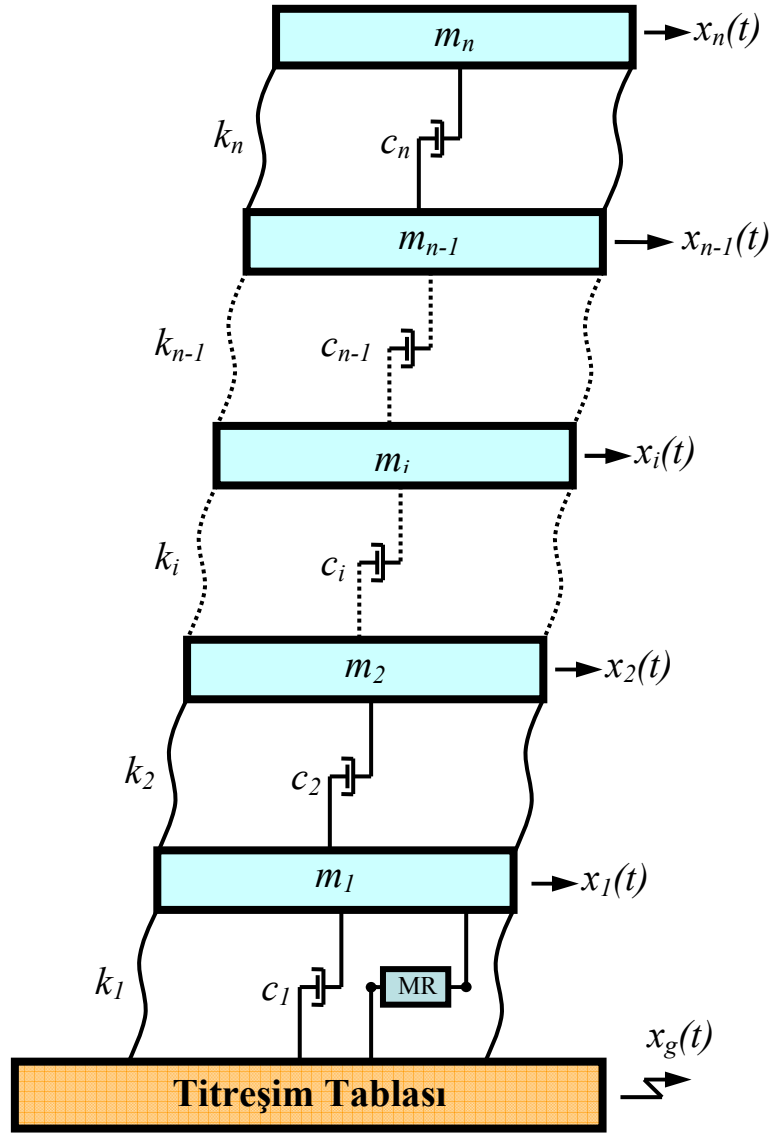
2. MODELLEME ve SİSTEM TANILAMA ÇALIŞMALARI

Yapıların dinamik modellerinin çıkarılması için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Clough ve Penzien, 1975; Chopra, 2001). Laboratuar şartlarında temsili modellerin oluşturulması da bu çalışmaların doğrulanması açısından önemlidir. Yapıların titreşimlerinin kontrolü ile ilgili laboratuar ortamında yapılan çalışmalarda genelde çelik kafes tipi yapı modellerinin kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu tür yapı modellerinin karakteristik parametrelerinin belirlenmesi kimi zaman problem teşkil etmektedir. Klasik yöntem ile belirlenen yapı parametreleriyle oluşturulan model ile laboratuar ortamındaki deneysel model arasında dinamik açıdan farklılıklar olabilmektedir. Sistem tanılama vs. gibi yöntemlerle yapısal sistemin parametreleri belirlendiğinde klasik model ile temsili deneysel modelin dinamikleri arasındaki farklılıklar ortadan kaldırılabilmektedir. Ne var ki sistem tanılama yöntemleri bazen zahmetli olabilmekte ve gerçek binalardaki kullanım sebebiyle ortaya çıkan parametre değişimleri başka çözüm arayışlarını da beraberinde getirmektedir. Laboratuar şartlarında tasarlanan kontrolörlerin gerçek yapılara uygulanmasında bu bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle yapının karakteristiğine göre tasarlanan kontrolörlerde yapının parametrelerinin tam olarak bilinmemesi, kontrol performansını da etkilemektedir. Çünkü yapı hâlihazırda kullanılmakta olduğundan, özellikle kütle parametreleri değişkenlik göstermekte dolayısıyla sistemin doğal frekansları ve dinamiği de değişmektedir. Bu noktadaki çözüm arayışları şartların değişimine göre kararlılığı bozulmayan dayanıklı kontrol ve değişen şartlara kendini uyarlayabilen adaptif kontrol gibi yöntemlerin önemini artırmıştır.

Yapılarda doğal frekanslar yapının dış etkenlere karşı verdiği tepkiyi etkilemektedir. Özellikle deprem açısından değerlendirildiğinde, yapılar için düşük frekans bölgeleri tehlikenin en fazla olduğu bölgelerdir. Deprem dalgaları yapılara üç boyutlu olarak etki etmelerine rağmen en yıkıcı etkiyi yanal titreşimler oluşturmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada yapının sadece yanal titreşimleri dikkate alınmış düşey ve burulma titreşimleri ihmal edilmiştir. Ayrıca laboratuar ortamındaki modelin oluşturulmasında, yapısal sistemin modlarının tehlikenin en fazla olduğu düşük frekans bölgesinde yer alması gerekliliği göz önünde bulundurularak sistemin parametreleri seçilmiştir.

2.1 Yarı Aktif Bina Modelinin Hareket Denklemleri

Şekil 2.1’de gösterilen n katlı yarı aktif bina modelini ele alalım. MR sönümleyici binanın 1. katı ile yer arasına monte edilmiştir. Yapının sadece yanal titreşimleri göz önünde bulundurulmaktadır.



Şekil 2.1 Yarı aktif kontrollü n katlı bina modeli

Bina modelinin hareket denklemi,

$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = -Hf(t) - M_s L \ddot{x}_g(t) \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada $f(t)$, MR sönümleyicinin sönümleme kuvvetini ifade etmektedir. M_s , C_s , $K_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir ve $(i = 1, 2, \dots, n)$ olmak üzere,

$$M_s = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & m_2 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_i & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$C_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & -c_i & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & -c_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_n & c_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & -k_i & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & -k_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$ ve $x(t) \in \mathcal{R}^{nx1}$ sırasıyla ivme, hız ve yer değiştirme vektörleridir. Bağlı yer değiştirme vektörü, $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_i(t) \ \dots \ x_n(t)]^T$ şeklindedir. Bu modelde yalnızca tek yöndeki yatay hareket göz önüne alınmıştır. $H = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ \dots \ 0]^T \in \mathcal{R}^{nx1}$ vektörü sisteme yerleştirilen kontrol elemanlarının yerini göstermektedir. $L = [1 \ 1 \ \dots \ 1 \ \dots \ 1]^T \in \mathcal{R}^{nx1}$ vektörü sismik giriş dağılımını ve $\ddot{x}_g(t)$ ise sismik yer hareketinin ivmesini temsil etmektedir.

2.2 Klasik Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Klasik modelde sistem kütle, sönüm ve rijitlik matrislerinden oluşmaktadır. Kütle matrisi sistemin fiziksel kütlelerinden belirlenmektedir. Rijitlik katsayıları, her bir kolon için basit olarak aşağıdaki formül yardımıyla bulunabilir;

$$k_i = \frac{12EI}{l^3} \quad (2.5)$$

Burada E Young modülünü, I kesit atalet momentini ve l ise kolonun uzunluğunu göstermektedir. Sönüm matrisi ise Rayleigh sönüm prensibine göre,

$$[C] = \alpha_0 [M_s] + \beta_0 [K_s] \quad (2.6)$$

ifadesinden bulunabilir (Clough ve Penzien, 1975). Burada $\alpha_0 = (2\xi_1\omega_1\omega_2)/(\omega_1 + \omega_2)$ ve $\beta_0 = 2\xi_2/(\omega_1 + \omega_2)$ şeklinde belirlenen sabitlerdir.

2.3 Sistem Tanılama Metodu

Bu bölümde deneysel modelin sistem parametrelerinin belirlenmesi için kullanılacak olan sistem tanılama metodunun teorisi anlatılmaktadır. Bu bölümde anlatılan metod kullanılarak Bölüm 5’te sistemin parametreleri deneysel olarak belirlenmektedir.

Deneysel çalışma, pratikte karşılaşılan birçok titreşim problemini anlama ve kontrol etme çabalarında büyük katkılar sağlamaktadır (Ewins, 2000). Mühendislikte, simülasyon çalışmalarında kullanılan klasik modeller ile deneysel çalışmalardaki modeller arasında bir takım farklılıklar söz konusu olabilmektedir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan klasik model ile deneysel model arasındaki bu farklılıkları ortadan kaldırmak amacıyla çeşitli yaklaşımlar ortaya atılmıştır. Bu yaklaşımlardan biri de sistem tanılama yöntemleri ile deneysel olarak model parametreleri belirlenebilmektedir. Bu amaçla araştırmacılar tarafından çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Ewins, 2000; Yang vd., 2003; Huang vd., 2005; Wang ve Cheng, 2008; Tipireddy, 2009; Huang ve Shen, 2000).

Pratikte sistemlerden elde edilen sinyaller çeşitli yöntemlerle işlenebilmektedir. Fourier dönüşümü basitliği nedeniyle durağan sinyallerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Bendat ve Piersol, 2000). Fast Fourier Dönüşümü ile lineer sistemlerin frekansları kolayca belirlenebilir. Diğer bir yaklaşım olan Wavelet dönüşümü ile sinyaller zaman alanında frekans bileşenlerine ayrılabilir. Wavelet dönüşümünü esas alan yöntemlerle sistemlerin modal parametrelerini bulmak mümkündür (Yang vd., 2003; Huang vd., 2005). Alternatif olarak Hilbert dönüşümü ile de zaman alanında sinyaller işlenebilmekte ve sistem tanılama yapılabilir (Yang vd., 2003; Feldman, 1997, 2008). Literatürde EMD (Empirical Mode Decomposition) ve Hilbert dönüşümünün birlikte kullanılması Hilbert-Huang dönüşümü olarak adlandırılmaktadır.

Bu çalışmada bina modelinin parametreleri (frekans, sönüm oranı, mod şekilleri, kütle, sönüm ve rijitlik) Hilbert dönüşümüne dayanan, Yang vd. (2003) tarafından geliştirilen bir metod esas alınarak belirlenmiştir. Orijinal çalışmadan farklı olarak, sadece bant geçiren filtre ile ivme cevapları modal cevaplarına ayrıştırılmış ve modelin fiziksel kütlelerinin bilinmesinden yola çıkılarak sistem parametreleri belirlenmiştir.

2.3.1 Hilbert Dönüşümü

Hilbert dönüşümü yardımıyla sinyaller yeni bir fonksiyona dönüştürülerek anlık faz ve bir zarfın (anlık genlik) kombinasyonu şeklinde ifade edilebilirler. Zamana bağlı herhangi bir $x(t)$

sinyalinin Hilbert dönüşümü, $\tilde{x}(t)$ ile gösterilir ve

$$\tilde{x}(t) = HT[x(t)] = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{(t-\tau)} d\tau \quad (2.7)$$

olarak tanımlanır (Yang vd., 2003; Kerschen vd., 2008). Burada PV integralin Cauchy prensip değerini göstermektedir. $x(t)$ 'nin analitik sinyali $X(t)$,

$$X(t) = x(t) + i\tilde{x}(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad (2.8)$$

şeklindedir. Burada $i = \sqrt{-1}$ imajiner sabittir. $A(t)$ anlık genlik, $\theta(t)$ anlık faz açısı olup,

$$A(t) = \sqrt{x(t)^2 + \tilde{x}(t)^2} \quad \text{ve} \quad \theta(t) = \arctg \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)}$$

şeklindedir. Sinyalin anlık frekansı $\omega(t)$ ise anlık faz açısının zamana göre türevi şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\omega(t) = d\theta(t)/dt \quad (2.9)$$

Hilbert dönüşümünün kısıtlayıcı noktası sadece tek bileşenli sinyaller için uygun olmasıdır (Yang vd., 2003; Kerschen vd., 2008). Şöyle ki, herhangi bir $x(t)$ sinyali, Hilbert dönüşümüne tabi tutulursa herhangi bir t anında tek bir ω sinyali elde edilecektir. Denklemler (2.7)-(2.9)'daki ifadelerden bu görülebilmektedir. Ancak, herhangi bir t zamanında $x(t)$ sinyali, tek bir ω frekansından ziyade değişik frekansların kombinasyonundan oluşmaktadır. Bu durumda, sinyalin Hilbert dönüşümüne tabi tutulmadan önce bileşenlerine ayrıştırılması gerekmektedir. Ayrıştırılan sinyal Hilbert dönüşümüne tabi tutulur.

2.3.2 Bant Geçiren Filtre Yardımıyla Sinyalin Ayrıştırılması

Ölçülen sinyal, $\ddot{x}_p(t)$ ($p=1,2,\dots,n$), wavelet analizi, EMD (emprical mode decomposition) gibi çeşitli yöntemlerle modal cevaplarına ayrıştırılabilir (Huang vd., 2005; Feldman, 2008). Bu yöntemlerin kullanımında zaman zaman zorluklar söz konusudur. Örneğin, modal frekanslar yüksek ve sinyal yüksek oranda gürültü içermekte ise EMD için gereken eleme sayısı artmaktadır. Wavelet analizinde ise modlar birbirine yakın olduğu durumlarda tahmin hataları oluşabilmektedir. Alternatif olarak ölçülen sinyal bant geçiren filtre yardımıyla da ayrıştırılabilir. Bunun için Fourier analizi yardımıyla her bir doğal frekans için yaklaşık bir aralık belirlenir. Ölçülen sinyal, $\ddot{x}_p(t)$, $\omega_{jA} < \omega_j < \omega_{jY}$ ($j=1,2,\dots,n$) şeklindeki alçak ve

yüksek frekans bantlarında, bant geçiren filtreden geçirilir (Yang vd., 2003). Bu işlem sonucunda ölçülen sinyal n adet modal cevaba ayrıştırılmış olur. Sonuç olarak ölçülen sinyaldeki gürültü sinyalden süzölmüş olur ve ayrıca her bir modal cevap, $\ddot{x}_{pj}(t)$, elde edilmiş olur. Buradaki en önemli nokta, kullanılan bant geçiren filtrenin faz gecikmesi mümkün olduğunca küçük olmalıdır.

2.3.3 Darbe Giriş Sistemi Modal Cevabı ve Ölçülen İvme Sinyalinin Hilbert Dönüşümü

Normal modlarının mevcut olduğunu kabul ettiğimiz n serbestlik dereceli binaya herhangi bir kattan darbe girişi uygulansın. Modların süperpozisyonu prensibine göre modal denklemler modal cevap bileşenlerine göre çözülerek toplam cevap elde edilebilir. Denklem (2.1) modal koordinatlarda aşağıdaki gibi yazılabilir (Clough ve Penzien, 1975; Yang vd., 2003):

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j\omega_j\dot{q}_j + \omega_j^2q_j = \Phi_j^T F(t) / m_j \quad (2.10)$$

Burada, ω_j j. modal frekans, ξ_j j. modal sönüm oranı, m_j j. modal küttedir. k . serbestlik derecesinden sisteme bir darbe girişi uyguladığımızı düşünelim. $f_j(t)$, $F(t)$ 'nin j. elemanı olmak üzere, darbe girişi aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$f_j(t) = \begin{cases} f_j(t) = F_0\delta(t) & j = k \\ f_j(t) = 0 & j \neq k \end{cases} \quad (2.11)$$

Bu durumda, j. genelleştirilmiş modal koordinatın ivmesi,

$$\ddot{q}_j(t) = \frac{F_0\phi_{kj}\omega_j}{m_j\sqrt{1-\xi_j^2}} e^{-\xi_j\omega_j t} \cos\left(\omega_{dj}t + \varphi_j + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.12)$$

şeklindedir. Burada ϕ_{kj} , Φ_j mod vektörünün k . elemanıdır. Sönümlü modal doğal frekans, $\omega_{dj} = \omega_j\sqrt{1-\xi_j^2}$ şeklindedir. $\varphi_j = \arctg[2\xi_j\sqrt{1-\xi_j^2}/(1-2\xi_j^2)]$ ise j. modun faz gecikmesidir. Son olarak p. ($p=1,2,\dots,n$) serbestlik derecesindeki darbe ivme cevabı aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\ddot{x}_p(t) = \sum_{j=1}^n \phi_{pj}\ddot{q}_j(t) = \sum_{j=1}^n \ddot{x}_{pj}(t) \quad (2.13)$$

Burada;

$$\ddot{x}_{pj}(t) = \phi_{pj} \ddot{q}_j(t) = B_{pj,k} e^{-\xi_j \omega_j t} \cos\left(\omega_{dj} t + \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}\right) \quad (2.14)$$

$$B_{pj,k} = \frac{F_0 |\phi_{pj}| |\phi_{kj}| \omega_j}{m_j \sqrt{1 - \xi_j^2}} \quad (2.15)$$

şeklindedir. Denklem (2.14)'teki $\varphi_{pj,k}$, j. mod şeklindeki p. ve k. elemanların arasındaki faz farkını göstermektedir. Normal modların var olduğu göz önüne alınırsa, mod şekilleri gerçeldir ve m bir tam sayı olmak üzere, $\varphi_{pj,k}$ ya $\pm 2m\pi$ ya da $\pm (2m+1)\pi$ 'dir. Dolayısıyla,

$$\begin{aligned} \varphi_{pj,k} &= \pm 2m\pi & \text{ise } \phi_{pj} / \phi_{kj} > 0 \\ \varphi_{pj,k} &= \pm (2m+1)\pi & \text{ise } \phi_{pj} / \phi_{kj} < 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

olarak ifade edilebilir. Ölçülen ivme sinyali, $\ddot{x}_p(t)$, bant geçiren filtreden geçirildikten sonra elde edilen modal cevaplar ($\ddot{x}_{pj}(t)$) Hilbert dönüşümüne tabi tutulur. Bedrosian teoremi (Hahn 1996) kullanılarak, modal cevap $\ddot{x}_{pj}(t)$ 'nin Hilbert dönüşümü, $\tilde{\ddot{x}}_{pj}(t)$,

$$\tilde{\ddot{x}}_{pj}(t) = B_{pj,k} \left[a_{AG,j}(t) \sin\left(\omega_{dj} t + \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}\right) + a_{YG,j}(t) \cos\left(\omega_{dj} t + \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}\right) \right] \quad (2.17)$$

olarak ifade edilebilir (Yang vd., 2003; Hahn, 1996). Analitik sinyal,

$$\ddot{X}_{pj}(t) = \ddot{x}_{pj}(t) + i\tilde{\ddot{x}}_{pj}(t) = A_{pj}(t) e^{i\theta(t)} \quad (2.18)$$

şeklindedir. ξ_j 'nin küçük ve ω_j 'nin büyük olması halinde,

$$\begin{aligned} a_{AG,j}(t) &\approx e^{-\xi_j \omega_j t} \\ a_{YG,j}(t) &\approx 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

olur ve denklem (2.17),

$$\ddot{x}_{pj}(t) = B_{pj,k} e^{-\xi_j \omega_j t} \sin\left(\omega_{dj} t + \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k}\right) \quad (2.20)$$

halini alır. Genlik $A_{pj}(t)$ ve faz açısı $\theta_{pj}(t)$ ise,

$$A_{pj}(t) = B_{pj,k} e^{-\xi_j \omega_j t}, \quad \theta_{pj}(t) = \omega_{dj} t + \varphi_j + \frac{\pi}{2} + \varphi_{pj,k} \quad (2.21)$$

olur. Buradan genlik ve frekans,

$$\ln A_{pj}(t) = -\xi_j \omega_j t + \ln B_{pj,k} \quad (2.22)$$

$$\omega_j(t) = \frac{d\theta_{pj}(t)}{dt} = \omega_{dj}(t) \quad (2.23)$$

olarak elde edilir.

2.3.4 Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi

Ölçülen darbe cevabı, $\ddot{X}(t) = [\ddot{x}_1(t), \ddot{x}_2(t), \dots, \ddot{x}_n(t)]^T$ 'deki her bir $\ddot{x}_p(t)$ ölçümü n adet modal cevaba ayrıştırılır. Dolayısıyla n adet modal cevap, $\ddot{x}_{pj}(t)$ ($j=1,2,\dots,n$), elde edilmiş olur. Daha sonra bu cevapların her birine Hilbert dönüşümü uygulanarak $A(t)$ anlık genlik ve $\theta(t)$ anlık faz açısı belirlenir. Son olarak sistem tanılama yapılarak doğal frekanslar, sönüm oranları, kütle matrisi, sönüm matrisi ve rijitlik matrisi elde edilir.

2.3.4.1 Doğal Frekanslar ve Sönüm Oranlarının Belirlenmesi

Doğal frekanslar ve sönüm oranlarının belirlenebilmesi için sistemden alınacak tek bir ölçüm yeterlidir. Dikkat edilmesi gereken husus şudur: Bu ölçüm sinyali bütün mod bileşenlerini içermelidir. Bunun için darbe girişinin uygulandığı yer ve ölçümün alındığı yer iyi seçilmelidir. Sönümlü doğal frekansların, ω_{dj} , belirlenmesi için $\theta_{pj}(t)$ faz açısı zaman grafiğinden faydalanılır. Ardından $\ln A_{pj}(t)$ zaman grafiğinden $-\xi_j \omega_j$ ifadesi elde edilir ve buradan sönüm oranları, ξ_j , belirlenir. Bu işlem esnasında ortalama değerin belirlenebilmesi için en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır. Doğal frekans ve sönüm oranlarının bulunması için yapılması gereken işlem adımları aşağıdaki gibidir (Yang, vd., 2003):

1- $\theta_{pj}(t)$ faz açısı zaman grafiği en küçük kareler yöntemi yardımıyla doğrusal hale getirilir.

Bu doğrunun eğimi sönümlü doğal frekansı, ω_{dj} , vermektedir.

2- Azalan genlik $\ln A_{pj}(t)$ zaman grafiği en küçük kareler yöntemi yardımıyla doğrusal hale getirilir. Bu doğrunun eğiminden, $-\xi_j \omega_j$ ifadesi elde edilir.

3- Yukarıda elde edilen ω_{dj} ve $-\xi_j \omega_j$ değerlerinden ω_j ve ξ_j , $\omega_{dj} = \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2}$ ifadesi kullanılarak elde edilir.

2.3.4.2 Mod Şekilleri, Kütle Matrisi, Sönüm Matrisi ve Rijitlik Matrisinin Belirlenmesi

Daha önce de belirtildiği gibi bütün doğal frekanslar ve sönüm oranlarının belirlenebilmesi için tek bir ölçüm sinyali yeterlidir. Ancak, mod şekilleri, kütle, sönüm ve rijitlik matrislerinin belirlenebilmesi için bütün modal elemanlardan ölçüm alınması gerekmektedir. Denklem (2.8) ve (2.20) göz önüne alınırsa modal elemanlar, ϕ_{pj} ve ϕ_{qj} 'nin oranı aşağıdaki gibi ifade edilebilir ($p, q=1, 2, \dots, 6$):

$$\frac{|\phi_{pj}|}{|\phi_{qj}|} = \exp[A'_{pj}(t_0) - A'_{qj}(t_0)] \quad (2.24)$$

Burada $A'_{pj}(t_0)$ ve $A'_{qj}(t_0)$ sırasıyla, azalan genlikler $\ln A'_{pj}(t)$ ve $\ln A'_{qj}(t)$ 'nin en küçük kareler yöntemi ile elde edilen doğrularının, $t=t_0$ anındaki değerleridir.

Modal elemanlar, ϕ_{pj} ve ϕ_{qj} arasındaki faz farkı ise,

$$\varphi_{pj,q} = \theta'_{pj}(t_0) - \theta'_{qj}(t_0) \quad (2.25)$$

şeklindedir. Burada $\theta'_{pj}(t_0)$ ve $\theta'_{qj}(t_0)$ sırasıyla, azalan genlikler $\theta'_{pj}(t)$ ve $\theta'_{qj}(t)$ 'nin en küçük kareler yöntemi ile elde edilen doğrularından $t=t_0$ anı için elde edilir. Ayrıca denklem (2.16)'da verildiği üzere $\varphi_{pj,q}$ 'nin değeri ya $\pm 2m\pi$ ya da $\pm (2m+1)\pi$ 'dir. Böylece, ϕ_{pj} ve ϕ_{qj} arasındaki işaret farklılığı olup olmadığı belirlenebilir. Sonuç olarak Φ_j mod vektörünün elemanlarının mutlak değerleri ve işaretleri belirlenmiş olur.

Mod şekil vektörleri, doğal frekanslar ve sönüm oranlarından sonra aşağıdaki işlemler uygulanarak kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri belirlenebilir. Bu aşamada esas alınan çalışmadan farklı olarak sistemin fiziksel kütlelerinden faydalanılmıştır. Sistemde fiziksel kütleler (M_f) belirli olduğundan genelleştirilmiş modal kütleler aşağıdaki ifadeden elde edilebilir;

$$m_j = \text{diag}[\Phi^T M_f \Phi] \quad (2.26)$$

Burada Φ , nxn boyutlu modal matristir ve Φ_j mod vektörlerinden oluşmaktadır. Bu ifade yardımıyla genelleştirilmiş modal rijitlik, k_j , ve modal sönüm, c_j , aşağıdaki gibi elde edilir,

$$k_j = m_j \omega_j^2 \quad (2.27)$$

$$c_j = 2\xi_j m_j \omega_j \quad (2.28)$$

Normal modların var olduğu göz önüne alındığında, ortogonalite prensibinden,

$$\text{diag}[m_j] = \Phi^T M \Phi \quad \text{diag}[c_j] = \Phi^T C \Phi \quad \text{diag}[k_j] = \Phi^T K \Phi \quad (2.29)$$

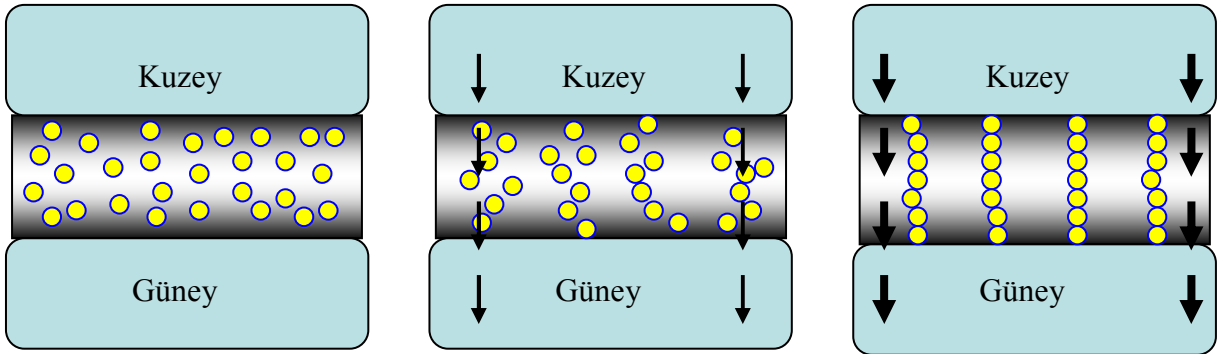
olarak ifade edilebilir. Sonuç olarak kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir,

$$M = \Phi^{-T} \text{diag}[m_j] \Phi^{-1} \quad C = \Phi^{-T} \text{diag}[c_j] \Phi^{-1} \quad K = \Phi^{-T} \text{diag}[k_j] \Phi^{-1} \quad (2.30)$$

2.4 MR Sönümleyicinin Modeli

2.4.1 MR Akışkanlar

MR akışkanların keşfi J. Rabinow tarafından 1940'lı yılların sonlarında gerçekleştirilmiştir. MR akışkan kısaca, kontrol edilebilen bir sıvı çeşidi, yani özellikleri uygulanan manyetik alanın yoğunluğu ile değişen akıllı malzeme ya da akışkan olarak tarif edilebilir. Taşıyıcı bir sıvı içerisine magnetize edilebilen mikron ölçekli taneciklerin koyulması ile elde edilir. Tipik bir MR akışkan hacimsel olarak %20-40 saf demir partikülü içerir. Taşıyıcı sıvı olarak ise mineral yağ, sentetik yağ, su ya da glikol kullanılır (Carlson, 2000). MR akışkanlar manyetik alan etkisi altında sıvı halden yarı katı ya da katı hale milisaniyeler içerisinde geçebilirler. Manyetik alan ortadan kalktığında ise klasik Newtonien akışkan özelliği gösterirler. Bu durum Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilmektedir. Manyetik alan taşıyıcı sıvı içerisinde bulunan demir taneciklerinin bir zincir halinde dizilmesini sağlar. Bu zincir dizilimini bir eleğe benzetecek olursak, daha önce serbest olarak hareket edebilen taşıyıcı sıvı manyetik alanın uygulanmasıyla bu eleğin içerisinden geçmek zorunda kalacaktır. Manyetik alan arttıkça zincir dizilimindeki tanecik sayısı artacak dolayısıyla sıvı geçişi daha da zorlaşacaktır.

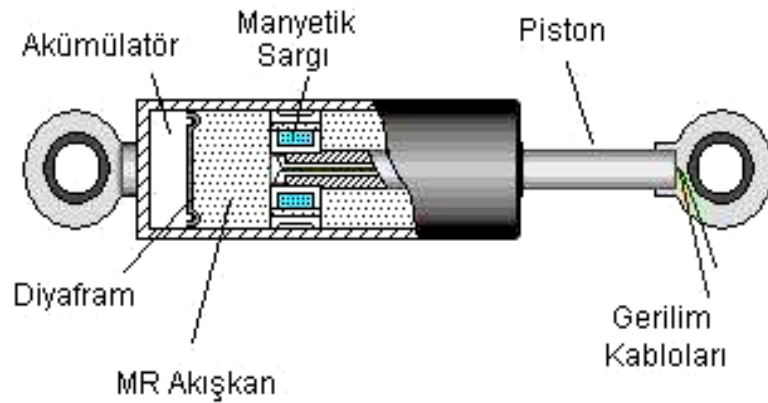


Şekil 2.2 Manyetik alan ile partiküllerin sıralanması

MR akışkanının kalitesini kullanılan taşıyıcı sıvı, çalışma şartları ve yükleme süresi belirler. Carlson ve Weiss (1994) çalışma sıcaklığının -40 ile $+150$ °C olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca MR akışkanlar kirlenmelerden olumsuz olarak etkilenmezler. Çok düşük gerilim ($12\sim 24$ VDC) ve akım ($1\sim 2$ A) ile kutuplanabilirler.

2.4.2 MR Sönümleyici

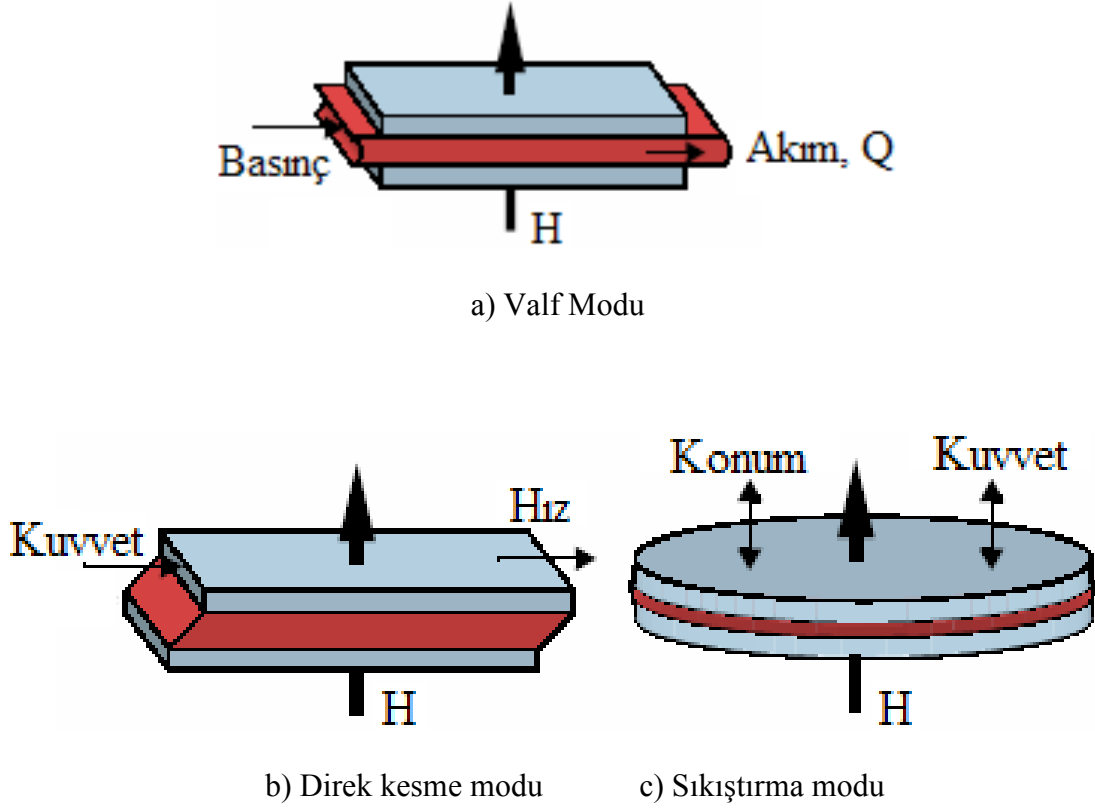
MR sönümleyici, içerisinde piston, manyetik sargı, akümülatör ve MR akışkanı bulunduran bir hidrolik silindirden oluşmaktadır. Şekil 2.3'te MR sönümleyicinin şematik modeli görülmektedir.



Şekil 2.3 MR sönümleyicinin şematik modeli.

MR sönümleyici ucuna uygulanan harekete bir reaksiyon kuvveti oluşturur. Ayrıca uygulanan manyetik alan ile bu kuvvetin büyüklüğü değiştirilebilir. MR sönümleyicinin sargılarında manyetik alan oluşturmak için gerekli olan güç sınırlıdır. Gerekli güç bir akü ile bile sağlanabilir. Bu özellik MR sönümleyicilerin en önemli özelliklerindendir. Özellikle deprem gibi enerji kesintilerinin yaşanabileceği uygulamalarda büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca herhangi bir aksilik sonucu enerji kesintisi yaşansa bile MR sönümleyici sisteme bağlı olduğu müddetçe, pasif sönümleyici gibi davranarak enerji sönümlemeye devam edecektir. Diğer bir avantajı sisteme doğrudan bir enerji ilave etmemeleridir. MR sönümleyici ucundaki harekete göre titreşim enerjisini sönümler. Bu da sistemdeki oluşabilecek kararsızlıkların en başta ortadan kaldırması anlamına gelmektedir.

MR sönümleyicilerin pistondan başka herhangi bir hareketli parçaları yoktur. Bu özellik meydana gelebilecek mekanik sorunları en aza indirmektedir. MR sönümleyiciler çeşitli modlarda enerji sönümleyebilmektedirler. Bunlar valf modu, direk kesme modu, sıkıştırma modu olarak sıralanabilir (Şekil 2.4). En çok kullanılan valf modudur.

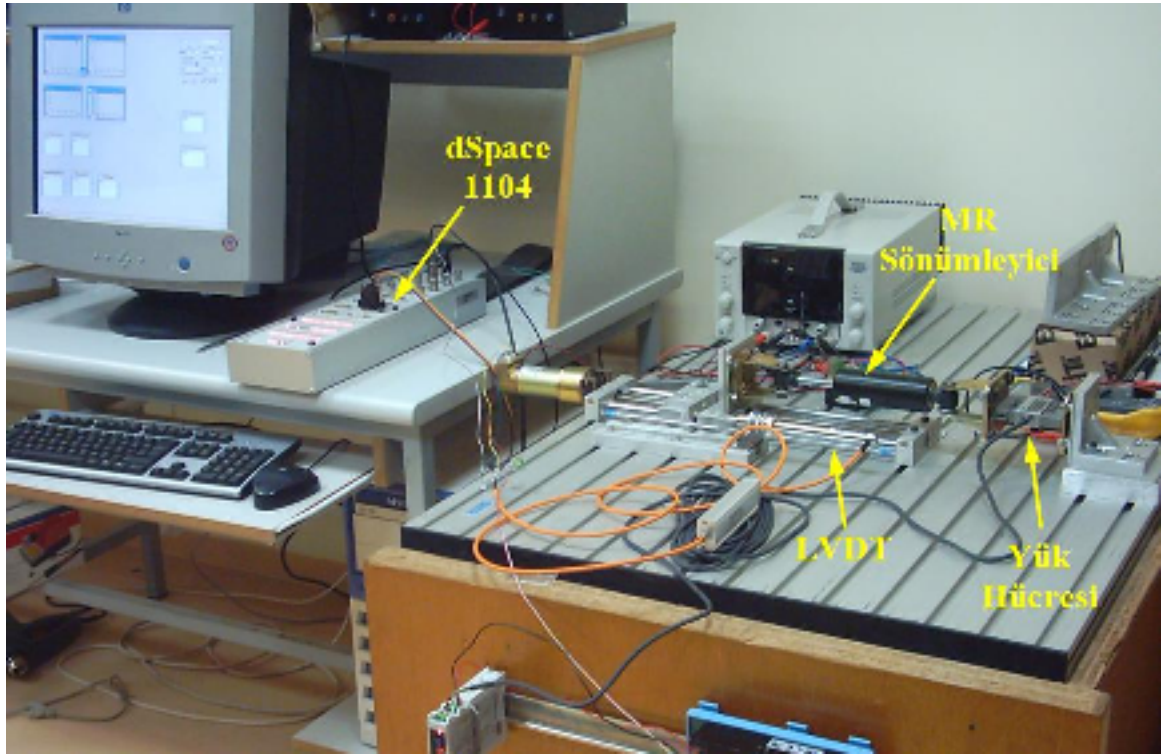


Şekil 2.4 MR akışkan çalışma modları.

2.4.3 MR Sönümleyicinin Histerezis Karakteristiğinin Belirlenmesi

MR akışkanın içerisindeki manyetik olarak kutuplanabilen mikron ölçekli demir parçacıkları manyetik alan uygulandığında aynı eksen boyunca dizilerek sıvının akış karakteristiğini değiştirmektedirler. MR sönümleyicinin içerisindeki MR akışkanın karakteri parçacıklar arası etkileşim, sıcaklık, viskozite vs. etkenler ile değişebilmektedir. Bu ve benzeri etkenler MR sönümleyicilerin nonlineer histerezis karaktere sahip olmalarına sebep olmaktadır. MR sönümleyicinin yük altındaki karakteristiğini belirlemek amacıyla Gebze Yüksek Enstitüsü Robotik Laboratuvarı'nda bir dizi deneyler yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan Lord RD 1005-3 tipi MR sönümleyicinin özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

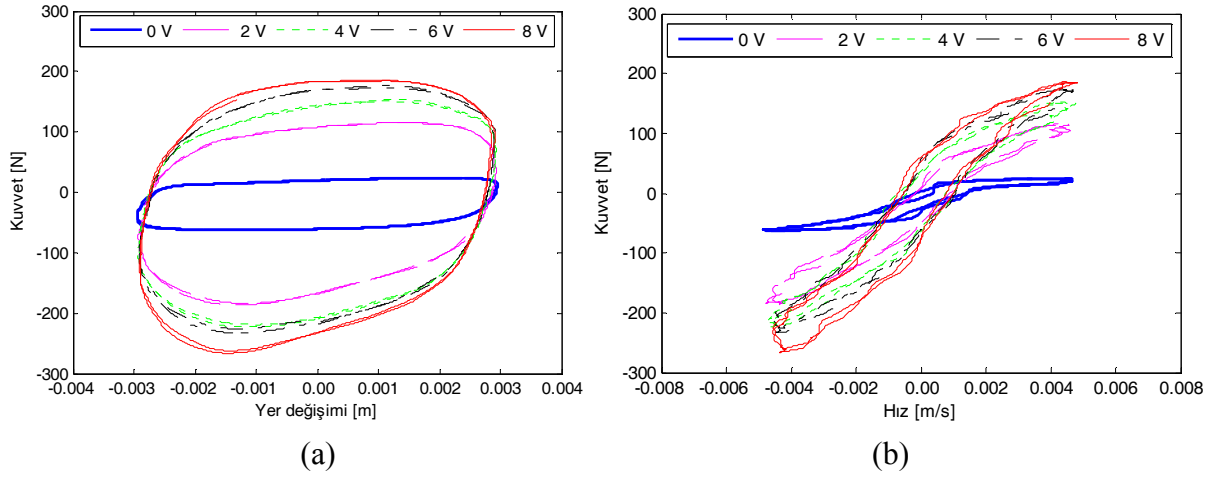
MR sönümleyicinin karakteristiğini belirlemek amacıyla değişik frekans ve genliklerde sinüzoidal giriş uygulanmıştır. 0.25 Hz ve 3 mm'lik sinüzoidal girişe karşılık sistemin kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-hız grafikleri Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.5 MR sönümleyicinin karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan test düzeneği.

Çizelge 2.1 RD 1005-3 MR sönümleyici karakteristik özellikleri (Lord Corporation)

Tanımlama	Değer
Kapalı durumdaki uzunluk	0.155 m
Açık durumdaki uzunluk	0.208 m
Gövde çapı	0.0414 m
Mil çapı	0.010 m
Ağırlık	0.800 kg
Bağlantı pin çapı	0.0122 m
Elektriksel Özellikler	
Giriş akımı	2 Amper (maksimum)
Giriş voltajı	12 V DC
Direnç	5 Ohm (oda sıcaklığı) - 7 Ohm (70 °C)
Sönümleyici Kuvvetleri (peak to peak)	
51 mm/s – 1 Amp	> 2224 N
204 mm/s - 0 Amp	< 667 N
Mekanik özellikler	
Minimum kesme gerilmesi	4448 N
Maksimum çalışma sıcaklığı	70 °C
Depolama sıcaklığı	100 °C ile -40 °C arası
Güvenirlilik	2 milyon çevrim (± 0.013 m, 2 Hz, giriş akımı 0 ile 0.8 arası değişken olduğu durum)
Cevap Zamanı (Amplifier ve güç kaynağına bağlı olarak)	< 25 ms – 0.051 m/s’de 0 ve 1 Amper basamak girişin %90 seviyesine ulaşma zamanı



Şekil 2.6 MR sönümleyicinin karakteristiği (a) Kuvvet-yer değiştirme (b) Kuvvet-hız.

2.4.4 MR Sönümleyicinin LuGre Modeli

MR sönümleyicinin nonlinear histerezis karakterini ifade etmek için çeşitli modelleme teknikleri kullanılmıştır. Sanki statik, Bingham temeline dayalı, Bouc-Wen sürtünme temeline dayalı, bulanık mantık ve genetik algoritma temelli modeller MR sönümleyicinin modellenmesinde kullanılmıştır. Bouc-Wen temeline dayalı bazı modeller MR sönümleyicinin dinamiğini iyi modellemekle birlikte karmaşık yapıda olmaları ve parametrelerinin belirlenmesindeki zorluklar söz konusu olabilmektedir. Alternatif olarak geliştirilen LuGre sürtünme modeline dayalı MR sönümleyici modeli basittir ve oldukça hassas bir şekilde MR sönümleyicinin dinamiğini tahmin edebilmektedir. Bu modelin diğer avantajları nonlinear kontrol uygulamalarını kolaylaştırması ve parametre tahminine olanak sağlamasıdır (Alvarez ve Jimenez, 2002; Jimenez ve Alvarez-Icaza, 2002, 2005; Sakai vd., 2003; Terasawa, vd., 2004). LuGre sürtünme modeline göre MR sönümleyici tarafından üretilen kuvvetin denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Terasawa, vd., 2004).

$$f = \sigma_a z + \sigma_0 z v + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{x}_1 + \sigma_b \dot{x}_1 v \quad (2.31)$$

$$\dot{z} = \dot{x}_1 - a_0 |\dot{x}_1| z \quad (2.32)$$

Burada, z değişkeni MR akışkandaki değişimi temsil eden iç dinamik değişkenini, v ise aynı zamanda kontrol girişi de olan, gerilimi ifade etmektedir. MR akışkan silindirin içinde bulunduğu iç dinamik değişkenini direk olarak ölçmek mümkün olamamaktadır. σ_0 , $v(t)$ ile değişen $z(t)$ 'nin rijitliği [N/(m.V)], σ_1 , $z(t)$ 'nin sönüm katsayısı [N.s/m], σ_2 , viskoz sönüm katsayısı [N.s/m], σ_a , $z(t)$ 'nin rijitliği [N/m], σ_b , $v(t)$ ile değişen viskoz sönüm katsayısı [N.s/(m.V)] ve a_0 ise sabit katsayı [V/N] olarak ifade edilmektedir (Sakai vd., 2003).

3. H_∞ DAYANIKLI KONTROL TASARIMI

3.1 Sistemin Tanımlanması ve Model İndirgeme

Kontrol tasarımı tüm sistem modları için yapılabilir. Elastik rotorlar, çubuklar ve yüksek katlı bina gibi elastik yapısal sistemlerin titreşim hareketine olan düşük frekans modlarının katkısı yüksek frekans modlarına göre çok fazladır. Dolayısı ile düşük frekans modlarının kontrolü titreşim genliklerinin büyük oranda azaltılmasını sağlayacaktır.

Tam dereceli sistem modellemesi yapılarak kontrol tasarımı için indirgenmiş sistem modeli elde edilir. İndirgemedede ihmal edilen sistem dinamikleri belirsizlik olarak ele alınabilir. Ayrıca, kontrol tasarımında kontrolörün derecesinin yüksek olmasının uygulama açısından çeşitli zorlukları da söz konusudur. Bu nedenlerle, sistemde modal transformasyon yapılarak indirgeme yapılmıştır. Tam sistem modeli,

$$P_f = \begin{bmatrix} A_f & B_f \\ C_f & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

şeklindedir. Burada sistem matrisleri,

$$\begin{aligned} A_f &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix} & B_f &= \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}H \end{bmatrix} \\ C_f &= [C_y \quad 0] & C_y &= [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad 0]^{1 \times n} \end{aligned} \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir. İndirgenmiş model elde etmek için önce tam dereceli sistemi modal koordinatlara dönüştürelim. Bu amaçla,

$$\eta = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \dots \quad \eta_i \quad \dots \quad \eta_n]^T \quad (3.3)$$

tanımlayalım. Modal dönüşüm $x = \phi\eta$, $\phi^T M_s \phi = I$ ve $\ddot{x}_g = 0$ olmak üzere,

$$\ddot{\eta} + C_f \dot{\eta} + K_f \eta = H_f f \quad (3.4)$$

olarak ifade edilebilir. Burada,

$$\begin{aligned} C_f &= \phi^T C_s \phi = \text{diag}[c_{11}, c_{22}, \dots, c_{ii}, \dots, c_{nn}] \\ K_f &= \phi^T K_s \phi = \text{diag}[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n] \\ (\omega_1 &< \omega_2 < \dots < \omega_i < \dots < \omega_n) \\ H_f &= \phi^T H = [H_{11}, H_{21}, \dots, H_{i1}, \dots, H_{n1}]^T \end{aligned} \quad (3.5)$$

şeklindedir. Modal koordinatlara taşınan sistemde ilk iki mod, indirgenmiş sistem modelini oluşturur. İndirgenmiş modal formda sistem;

$$\eta_r = [\eta_1 \quad \eta_2]^T \quad (3.6)$$

olmak üzere,

$$\ddot{\eta}_r + C_r \dot{\eta}_r + K_r \eta_r = -H_r f \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,

$$\begin{aligned} C_r &= \text{diag}[c_{11}, c_{22}] \\ K_r &= \text{diag}[\omega_1^2, \omega_2^2] \\ H_r &= [H_{11}, H_{21}]^T \end{aligned} \quad (3.8)$$

şeklindedir. Son durumda indirgenmiş sistem fiziksel koordinatlarda aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$P_r = \begin{bmatrix} A_r & B_r \\ C_r & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_r & -C_r \end{bmatrix} \quad B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ H_r \end{bmatrix} \quad C_r = [\phi_y \quad 0] \quad \phi_y = C_y \phi_{12} \quad (3.10)$$

3.2 Belirsizliklerin Tanımlanması

Gerçek kontrol sistemlerinde belirsizliklerden kaçınmak mümkün değildir. Var olan belirsizlikler iki kategoride incelenebilir; gürültü sinyalleri ve dinamik bozucu etkiler. Gürültü sinyalleri giriş ve çıkış gürültüleri, sensör gürültüsü, aktüatör gürültüsü vb. şeklindedir. Dinamik bozucu etkiler ise matematik modelle çalışan sistemin dinamiği ile gerçek sistemin dinamiği arasındaki farklılıklardır. Matematik model her zaman gerçek sistemin sistem dinamiğinin bir yaklaşımıdır. Bu tip bozucu etkilerin kaynağı modellenemeyen dinamikler (genellikle yüksek frekans dinamikleri), ihmal edilen nonlinearlikler ve çevresel değişikliklerden dolayı sistemin parametrelerindeki değişimlerdir. Bu modelleme hataları kontrol sisteminin kararlılığını ve performansını etkiler. Bir sistemin değişik kısımlarında oluşan modellenemeyen yüksek frekans dinamikleri gibi birçok dinamik bozucu etkiler “ Δ ” gibi bir blok içinde toplanabilir. Bu şekilde temsil edilen belirsizliklere "yapısal olmayan belirsizlikler" adı verilir. Model indirgeme nedeniyle gerçek sistem ile dinamik model

arasında oluşan farklılıklar toplam belirsizliği olarak modellenmekte ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta_t(s) = P_f(s) - P_r(s) \quad (3.11)$$

3.3 Kontrol Tasarımı

Bu tez çalışmasındaki kontrol sistemi regülatör tipi sistemdir. Dolayısıyla kontrol esnasında herhangi bir referans girişin takip edilmesi söz konusu değildir. H_∞ kontrol teorisinde regülatör problemi, kapalı çevrim sistemi kararlı hale getiren ve kapalı çevrim sistem transfer fonksiyonunun H_∞ normunu minimize eden kontrolörün tasarlanmasıdır (Sampei vd., 1990). H_∞ kontrol tasarımında birinci amaç, bilinmeyen toplam belirsizliklerine karşı geri beslemeli kontrol sisteminin dayanıklı kararlılığı olacaktır. Şekil 3.1'deki kontrol sisteminin blok diyagramını ele alalım. Bu kontrol yapısındaki iki temel transfer fonksiyonu,

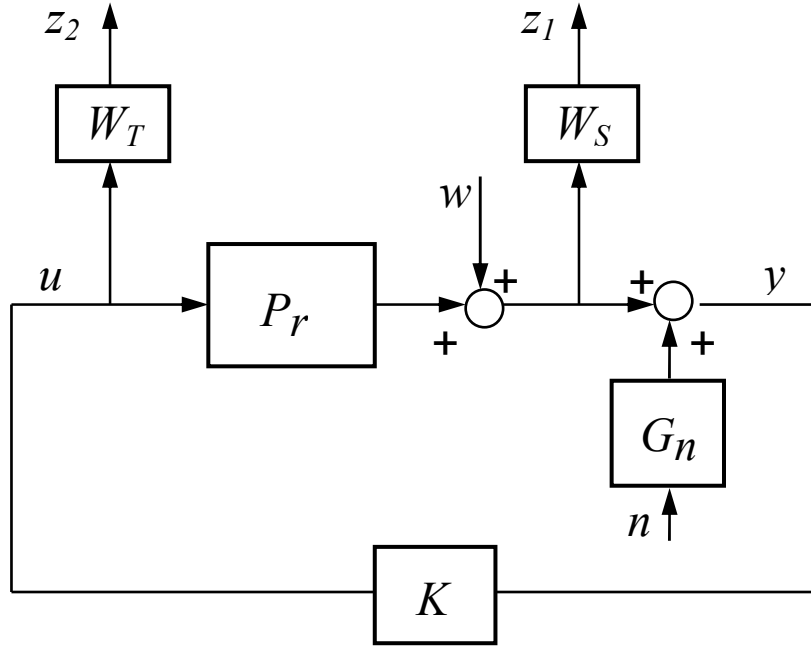
$$S(s) = \frac{1}{I - P_r(s)K(s)} \quad T(s) = \frac{K(s)}{I - P_r(s)K(s)} \quad (3.12)$$

şeklindedir. $S(s)$ hassaslık transfer fonksiyonu, $T(s)$ ise tamamlayıcı hassaslık transfer fonksiyonudur. Genel olarak, $T(s)$ kapalı çevrim sistemin dayanıklı kararlılığının hesabındaki esas transfer fonksiyonudur. $T(s)$ ve $\Delta_t(s)$ 'in kararlı olduğu kabulüyle, bütün belirsizliklere karşı geri beslemeli sistemin dayanıklı kararlı olabilmesi için yeter şart çarpım belirsizlik için,

$$|\Delta_t(j\omega)| \leq |W_T(j\omega)| \quad \forall \omega \quad (3.13)$$

şartını sağlayan W_T filtresi kullanılarak w dan z_2 'ye norm şartı aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

$$\|W_T T(s)\|_\infty < 1 \quad (3.14)$$



Şekil 3.1 Genişletilmiş sistem yapısı

H_∞ kontrol tasarımında ikinci amaç, geri beslemeli sistemin performansını iyileştirmektir. Cevap performansının iyileştirilmesi w bozucu etkisinin y çıkışı üzerindeki etkisinin azaltılması problemi şeklinde ifade edilebilir. Bu problem kapalı çevrim sistemin kararlılık şartına bağlı olarak

$$\|S(s)\|_\infty = \sup \bar{\sigma}[S(s)] \quad (3.15)$$

ifadesinin minimize edilmesidir. W_S filtresi kullanılarak, w dan y 'ye norm şartı

$$\|W_S S(s)\|_\infty < 1 \quad (3.16)$$

olarak ifade edilebilir. Pratikte kontrol sisteminin hassasiyeti yüksek frekans bölgesinde daha büyüktür. Dolayısı ile dayanıklı kararlılık açısından yüksek frekans bölgesinde kontrol kazancının düşük olması amaçlanır. Her iki şartı aynı anda yerine getirme problemi karışım hassaslık problemi olarak ifade edilmektedir.

$$\left\| \begin{bmatrix} W_S S \\ W_T T \end{bmatrix} \right\|_\infty < \gamma \quad (3.17)$$

Burada γ pozitif bir sayı olmak üzere dizayn parametresidir.

3.4 Frekans Şekillendirme Filtrelerinin Seçilmesi

H_∞ kontrol tasarımında önemli bir adım da frekans şekillendirme filtrelerinin seçilmesidir. W_T 'nin seçilmesinde genel kural olarak sistemdeki toplam belirsizliğinden faydalanılır. Genel olarak sistemdeki belirsizlikler filtre tarafından kaplanmalıdır. Buna göre filtreler,

$$W_T = k_t \left(\frac{s^2 + 2\xi_{wn}\omega_{wn}s + \omega_{wn}^2}{s^2 + 2\xi_{wd}\omega_{wd}s + \omega_{wd}^2} \right) \quad (3.18)$$

$$W_S = k_s \left(\frac{\omega_{wn}}{s + \omega_{wd}} \right) \quad (3.19)$$

şeklinde seçilmiştir.

3.5 Kontrolün Yarı Aktif Sisteme Uygulanması

Sistemde gereken kuvvetin üretilebilmesi için MR sönümleyicinin geriliminin değiştirilmesi gerekmektedir. Bunun için Heaviside basamak fonksiyondan faydalanılmıştır. MR sönümleyicinin gerilimi,

$$V_{MR} = V_{\max} H\{(f_c - f)f\} \quad (3.20)$$

şeklinde elde edilmektedir (Dyke vd., 1996a). Burada $V_{\max}$ MR sönümleyicide oluşabilecek maksimum gerilim, $H(.)$ Heaviside basamak fonksiyon, f_c sistem için gerekli olan kuvvet ve f MR sönümleyici tarafından oluşturulan kuvvettir.

Yukarıda tasarlanan kontrolörün altı serbestlik dereceli yapısal bir sisteme deneysel olarak uygulanması Cetin vd. (2009b, 2010a) tarafından gerçekleştirilmiştir.

4. ADAPTİF KONTROL TASARIMI

Yapıların dinamik modellerinin karakteristik parametrelerini belirlemek kimi zaman problem teşkil etmektedir. Sistem tanılama vs. gibi yöntemlerle yapısal sistemin parametreleri belirlenebilmektedir. Ancak hizmet süresi içerisinde binaların karakteristik parametrelerinde kullanım, yorulma, vs. sebebiyle değişiklikler meydana gelmektedir. Kullanım şartlarındaki belirsizlikler nedeniyle kütleleri artıp azalabilmekte, binanın elemanlarının zamanla yorulması, değişik ortam şartlarına maruz kalmaları, tadilat vs gibi nedenlerle rijitliklerinde değişimler meydana gelebilmektedir. Benzetim çalışmalarıyla tasarlanıp laboratuvar şartlarında doğruluğu test edilen kontrolörlerin gerçek yapılara uygulanmasında, bu durumlar bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle yapının karakteristiğine göre tasarlanan kontrolörlerde yapının parametrelerinin tam olarak bilinmemesi, kontrol performansını da etkilemektedir. Tasarlanan kontrolörün sisteme uygulanması açısından bakıldığında eyleyicideki belirsizlikler de problem teşkil edebilmektedir. Özellikle eyleyici olarak kullanılan MR sönümleyici gibi nonlineer histerezis karaktere sahip yarı aktif elemanların modellenmesindeki parametre belirsizlikleri kontrolör performansını da direk olarak etkilemektedir. Bu tip sorunlar çözüm arayışlarını da beraberinde getirmektedir. Bu noktadaki çözüm arayışları şartların değişimine göre kararlılığı bozulmayan ve değişen şartlara kendini uyarlayabilen adaptif kontrol gibi yöntemlerin önemini artırmıştır.

Bu bölümde hem MR sönümleyici parametreleri hem de yapı parametrelerindeki belirsizliklere rağmen MR sönümleyicinin gerilimini ayarlamak suretiyle titreşim enerjisini absorbe ederek yapının titreşimlerini azaltan Lyapunov esasına dayalı nonlineer adaptif kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Lyapunov esasına dayalı nonlineer adaptif kontrolör yapısında, MR sönümleyicinin ölçülemeyen iç dinamiğinin tahmini için gözlemleyici tasarlanmıştır. Histerezis karakteri sebebiyle kesin model parametrelerinin belirlenmesi için uzun ve zahmetli deneylerin yapılması gereken MR sönümleyici parametreleri için de adaptasyon kuralları tanımlanmıştır. Ayrıca tasarımda çalışma koşullarındaki belirsizlikler sonucu farklılaşan yapı parametrelerinin adaptasyonu da gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolör yapısında MR sönümleyiciye gönderilen gerilim direk olarak belirlenmektedir.

4.1 Problem Formülasyonu

İç dinamiği ifade eden (2.32) denklemi, (2.31) denkleminde yerine yazıldığında, MR sönümleyicinin dinamik kuvvet denklemi

$$f = \sigma_a z + \sigma_0 z v - \sigma_1 a_0 |\dot{x}_1| z + (\sigma_1 + \sigma_2) \dot{x}_1 + \sigma_b \dot{x}_1 v \quad (4.1)$$

olarak elde edilir. Parametrelerle durumları lineer olarak birbirinden ayırmak için denklem (4.1) vektörlerin çarpımı ve toplam şeklinde aşağıdaki formda ifade edilebilir.

$$f = \begin{bmatrix} z & vz & -|\dot{x}_1|z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_a \\ \sigma_0 \\ \sigma_1 a_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & \dot{x}_1 v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 + \sigma_2 \\ \sigma_b \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Yukarıdaki ifade daha derli toplu olarak

$$f = \rho_1 \theta_1 + \rho_2 \theta_2 \quad (4.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, ρ_1, ρ_2 bilinen (ölçülebilen) regresyon (ya da sinyal) vektörleri, θ_1, θ_2 ise bilinmeyen parametre vektörleridir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\rho_1 = \begin{bmatrix} z & vz & -|\dot{x}_1|z \end{bmatrix} \quad \rho_2 = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & \dot{x}_1 v \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\theta_1 = [\sigma_a \quad \sigma_0 \quad \sigma_1 a_0]^T \quad \theta_2 = [\sigma_1 + \sigma_2 \quad \sigma_b]^T$$

Denklem (4.4)'ten görüldüğü üzere θ_1 ve θ_2 içerisindeki parametreler tam olarak bilinmemektedir. ρ_2 ölçülebilmekte ancak ρ_1 ifadesinin içerisinde yer alan MR sönümleyicinin iç dinamiği ölçülememektedir. Bu sebeplerle MR sönümleyici kuvvetini tahmin etmek gerekmektedir. Dolayısıyla MR sönümleyici için tahmin ifadesi

$$\hat{f} = \hat{\rho}_1 \hat{\theta}_1 + \rho_2 \hat{\theta}_2 \quad (4.5)$$

olarak yazılabilir ve (4.2)'deki gibi vektörel formda da aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\hat{f} = \begin{bmatrix} \hat{z} & v\hat{z} & -|\dot{x}_1|\hat{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_a \\ \hat{\sigma}_0 \\ \widehat{\sigma_1 a_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & \dot{x}_1 v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{\sigma_1 + \sigma_2} \\ \hat{\sigma}_b \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Kuvvet tahmin ifadesi açık olarak,

$$\hat{f} = \hat{\theta}_{11} \hat{z} - \hat{\theta}_{13} |\dot{x}_1| \hat{z} + \hat{\theta}_{21} \dot{x}_1 + (\hat{\theta}_{12} \hat{z} + \hat{\theta}_{22} \dot{x}_1) v \quad (4.7)$$

şeklinde yazılır. Tasarım sırasında kullanacağımız bu üç farklı (4.3, 4.5 ve 4.7) gösterimde $\hat{\theta}$, bilinmeyen parametre vektörlerinin tahminini, $\hat{z}$ değişkeni ise MR sönümleyicinin kuvvet

denklemindeki iç dinamik değerinin tahminini ifade etmektedir.

4.1.1 Amaç

Yapısal sistemlerin titreşimlerinin bastırılmasında ilk hedef, hasarın belirleyici unsuru olan yapısal yer değiştirmeleri azaltmaktır. Buradan yola çıkarak, hata izleme sinyalinin $e \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ olmak üzere,

$$e = x - x_d \quad (4.8)$$

şeklinde tanımlayalım. Yapısal sistemler için istenen giriş değeri, $x_d = 0$ olacaktır. Hata sinyalinin ikinci mertebeden sistemimize uygulamak için, $r \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ olmak üzere (Slotine ve Li, 1991),

$$r = \dot{e} + \alpha.e \quad (4.9)$$

şeklinde yeni bir filtrelenmiş hata sinyali tanımlayalım. Burada $\alpha \in \mathbb{R}^{n \times n}$ şeklinde pozitif tanımlı diyagonal kazanç matrisidir. Kontroldeki amacımız $r(t)$ 'yi sıfıra sürerek hata sinyali $e(t)$ 'yi ve dolayısıyla sistemin konumunu ve hızını sıfıra götürmektir. Bu durumda kontrolün amacı

$$\left. \begin{array}{l} e = x \\ r = \dot{x} + \alpha x \end{array} \right\} r \rightarrow 0 \Rightarrow \begin{array}{l} e, \dot{e} \rightarrow 0 \\ x, \dot{x} \rightarrow 0 \end{array} \quad (4.10)$$

şeklinde özetlenebilir. Sistemimizde belirsizlikler bulunduğu için ikincil bir amacımızda, bu belirsizlikleri tahmin edebilmektir. Bu nedenle gerçek değerler θ , ile bilinmeyen parametre vektörlerinin tahmini $\hat{\theta}$, arasında bir fark oluşacaktır. Oluşan bu tahmin hatası $\tilde{\theta}$ ile gösterilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta} \quad (4.11)$$

4.1.2 Hata Dinamiğinin Tanımlanması

Hata dinamiğini aşağıdaki gibi tanımlayalım,

$$\begin{aligned} M_s \dot{r} &= M_s (\ddot{x} + \alpha \dot{x}) \\ &= \underbrace{M_s \alpha \dot{x} - B_s \dot{x} - K_s x - M_s L \ddot{x}_g - H \cdot f}_{Y \cdot \phi} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Burada $Y \in \mathbb{R}^{n \times 3n}$ regresyon sinyal matrisi ve $\phi \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$ bilinmeyen (belirsiz) parametre vektörü

olarak ifade edilmektedir. Bu ayırımdaki amacımız ivme, hız ve konum gibi ölçülebilen parametreler ile yapının belirsiz parametrelerini birbirinden ayırmaktır. Belirsiz parametreler kütle, sönüm ve rijitlik katsayılarıdır. Dolayısıyla $Y \in \mathbb{R}^{n \times 3n}$ regresyon sinyal matrisi

$$\begin{aligned}
 Y_M &= \begin{bmatrix} \alpha_1 \dot{x}_1 - \ddot{x}_g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \dot{x}_2 - \ddot{x}_g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \dot{x}_3 - \ddot{x}_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_4 \dot{x}_4 - \ddot{x}_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_5 \dot{x}_5 - \ddot{x}_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_6 \dot{x}_6 - \ddot{x}_g \end{bmatrix} \\
 Y_C &= \begin{bmatrix} -\dot{x}_1 & \dot{x}_2 - \dot{x}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{x}_1 - \dot{x}_2 & \dot{x}_3 - \dot{x}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{x}_2 - \dot{x}_3 & \dot{x}_4 - \dot{x}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{x}_3 - \dot{x}_4 & \dot{x}_5 - \dot{x}_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{x}_4 - \dot{x}_5 & \dot{x}_6 - \dot{x}_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{x}_6 \end{bmatrix} \\
 Y_K &= \begin{bmatrix} -x_1 & x_2 - x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 - x_2 & x_3 - x_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 - x_3 & x_4 - x_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 - x_4 & x_5 - x_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_4 - x_5 & x_6 - x_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_6 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.13a}$$

olmak üzere $Y = [Y_M \quad Y_C \quad Y_K]$ şeklindedir. $\phi \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$ bilinmeyen parametre vektörü ise

$$\begin{aligned}
 \phi_M &= [m_1 \quad m_2 \quad m_3 \quad m_4 \quad m_5 \quad m_6] \\
 \phi_C &= [c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4 \quad c_5 \quad c_6] \\
 \phi_K &= [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad k_6]
 \end{aligned} \tag{4.13b}$$

olmak üzere $\phi = [\phi_M \quad \phi_C \quad \phi_K]^T$ olarak ifade edilmektedir. (4.3), (4.5) ve (4.7) denklemleri (4.12)'de yerine yazılır ve $H\hat{f}$ eklenip çıkartılırsa hata dinamiği

$$\begin{aligned}
 M\dot{r} &= Y\phi + H\chi - Hu_{x_1} - H(\rho_1\theta_1 + \rho_2\theta_2 - \hat{\rho}_1\hat{\theta}_1 - \rho_2\hat{\theta}_2) \\
 &= Y\phi + H\chi - Hu_{x_1} - H\rho_2\tilde{\theta}_2 - H(\theta_{11}z - \hat{\theta}_{11}\hat{z} + \theta_{12}vz - \hat{\theta}_{12}v\hat{z} - \theta_{13}|\dot{x}_1|z + \hat{\theta}_{13}|\dot{x}_1|\hat{z})
 \end{aligned} \tag{4.14a}$$

şeklinde elde edilir. Burada tasarım adımlarındaki işlemleri kolaylaştırmak için,

$$\begin{aligned}\chi &= -\hat{\theta}_{11}\hat{z} + \hat{\theta}_{13}|\dot{x}_1|\hat{z} - \hat{\theta}_{21}\dot{x}_1 \\ u_{x_1} &= (\hat{\theta}_{12}\hat{z} + \hat{\theta}_{22}\dot{x}_1)v\end{aligned}\quad (4.14b)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Bu aşamada kontrol girişini tanımlayabiliriz. Daha ileriki aşamada yapılacak olan kararlılık analizi göz önüne alınarak kontrol girişi, u_{x_1} , aşağıdaki formda yazılabilir;

$$Hu_{x_1} = Kr + H\chi + Y\hat{\phi} + H(-\hat{\theta}_{11}\zeta_1 - \hat{\theta}_{12}\zeta_2 v + \hat{\theta}_{13}|\dot{x}_1|\zeta_3) \quad (4.15)$$

Buradan, MR Sönümleyicinin giriş gerilimi;

$$Hv = \frac{Kr + H\chi + Y\hat{\phi} + H(-\hat{\theta}_{11}\zeta_1 + \hat{\theta}_{13}|\dot{x}_1|\zeta_3)}{\underbrace{\hat{\theta}_{12}\hat{z} + \hat{\theta}_{22}\dot{x}_1 + \hat{\theta}_{12}\zeta_2}_{\beta}} \quad (4.16)$$

şeklinde elde edilir. Burada $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ ileride tanımlanacak olan yardımcı filtre sinyalleridir ve $\beta \neq 0$ olmalıdır. $\beta \neq 0$ şartının nasıl sağlanacağı kontrolörün uygulanması aşamasında açıklanacaktır. $K \in \Re^{n \times n}$ ise pozitif tanımlı kontrol kazanç matrisidir. Kapalı çevrim hata dinamiği,

$$\begin{aligned}M\dot{r} &= -Kr + Y\tilde{\phi} - H\rho_2\tilde{\theta}_2 - H[\theta_{11}z - \hat{\theta}_{11}(\hat{z} + \zeta_1)] - H[\theta_{12}vz - \hat{\theta}_{12}v(\hat{z} + \zeta_2)] \\ &\quad + H[\theta_{13}|\dot{x}|z - \hat{\theta}_{13}|\dot{x}_1|(\hat{z} + \zeta_3)]\end{aligned}\quad (4.17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\tilde{\phi} = \phi - \hat{\phi}$ olmak üzere parametre tahmin hatasıdır. Cetin (2010b) çalışmasında ifade edilen işlem adımları uygulanarak (4.17) denklemi, aşağıdaki gibi yeniden formülize edilebilir.

$$\begin{aligned}M\dot{r} &= -Kr + Y\tilde{\phi} - H\rho_2\tilde{\theta}_2 + H\{-\tilde{\theta}_{11}(\hat{z} + \zeta_1) - \theta_{11}(\tilde{z} - \zeta_1)\} \\ &\quad + H\{-\tilde{\theta}_{12}v(\hat{z} + \zeta_2) - \theta_{12}v(\tilde{z} - \zeta_2) + \tilde{\theta}_{13}|\dot{x}|(\hat{z} + \zeta_3) + \theta_{13}|\dot{x}|(\tilde{z} - \zeta_3)\}\end{aligned}\quad (4.18)$$

4.2 Gözlemleyici Tasarımı

Denklem (4.7)'den kuvvet tahminini belirleyebilmek için MR sönümleyicinin iç dinamiğinin tahminine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Pozitif değere sahip olan a_0 'ın bilindiği kabulü ile iç dinamiğin tahmini $\hat{z}$,

$$\dot{\tilde{z}} = \dot{x}_1 - a_0 |\dot{x}_1| \tilde{z} \quad (4.19)$$

şeklinde yazılabilir. Tahmin hatası ise (2.32) ve (4.19) denklemleri kullanılarak

$$\dot{\tilde{z}} = \dot{z} - \dot{\hat{z}} \rightarrow \dot{\tilde{z}} = -a_0 |\dot{x}_1| \tilde{z} \quad (4.20)$$

olarak elde edilir.

Kontrol girişi, kapalı çevrim hata dinamiği ve gözlemleyici tasarımından sonra kararlılık analizine geçebiliriz.

4.3 Kararlılık Analizi

Bu tip analizlerde işlemlere bir Lyapunov fonksiyonu tanımlanarak başlanır. Kararlılık analizi için aday Lyapunov fonksiyonunu;

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} r^T M_s r + \frac{1}{2} \tilde{z}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\phi}^T \Gamma_{\phi}^{-1} \tilde{\phi} + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_2^T \Gamma_2^{-1} \tilde{\theta}_2 \\ & + \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\theta}_{11}^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\theta}_{12}^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma_3} \tilde{\theta}_{13}^2 + \frac{1}{2} \theta_{11} (\tilde{z} - \zeta_1)^2 + \frac{1}{2} \theta_{12} (\tilde{z} - \zeta_2)^2 + \frac{1}{2} \theta_{13} (\tilde{z} - \zeta_3)^2 \end{aligned} \quad (4.21)$$

şeklinde tanımlayalım. Burada $\Gamma_{\phi} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve $\Gamma_2 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ pozitif tanımlı diyagonal adaptasyon katsayı matrisleridir. γ_1, γ_2 ve γ_3 pozitif adaptasyon kazanç katsayılarıdır. Denklem (4.21)'deki ifadenin zamana göre türevini alırsak, Lyapunov fonksiyonunun türevi,

$$\begin{aligned} \dot{V} = & r^T M_s \dot{r} + \tilde{z} \dot{\tilde{z}} + \tilde{\phi}^T \Gamma_{\phi}^{-1} \dot{\tilde{\phi}} + \tilde{\theta}_2^T \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_2 + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\theta}_{11} \dot{\tilde{\theta}}_{11} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\theta}_{12} \dot{\tilde{\theta}}_{12} + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{\theta}_{13} \dot{\tilde{\theta}}_{13} \\ & + \underbrace{\theta_{11} (\tilde{z} - \zeta_1) (\dot{\tilde{z}} - \dot{\zeta}_1) + \theta_{12} (\tilde{z} - \zeta_2) (\dot{\tilde{z}} - \dot{\zeta}_2) + \theta_{13} (\tilde{z} - \zeta_3) (\dot{\tilde{z}} - \dot{\zeta}_3)}_P \end{aligned} \quad (4.22)$$

olarak elde edilir. Kapalı çevrim hata dinamiği (4.18) ve (4.20)'de tanımlanan gözlemleyici ifadeleri (4.22) denkleminde yerine yazılırsa, Lyapunov fonksiyonun türevi;

$$\begin{aligned} \dot{V} = & r^T \{ -Kr + Y\tilde{\phi} - H\rho_2 \tilde{\theta}_2 - H\tilde{\theta}_{11} (\hat{z} + \zeta_1) - H\theta_{11} (\tilde{z} - \zeta_1) - H\tilde{\theta}_{12} v (\hat{z} + \zeta_2) - H\theta_{12} v (\tilde{z} - \zeta_2) \\ & + H\tilde{\theta}_{13} |\dot{x}_1| (\hat{z} + \zeta_3) + H\theta_{13} |\dot{x}_1| (\tilde{z} - \zeta_3) \} + \tilde{z} \cdot \{ -a_0 |\dot{x}_1| \tilde{z} \} + \tilde{\phi}^T \Gamma_{\phi}^{-1} \dot{\tilde{\phi}} + \tilde{\theta}_2^T \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_2 \\ & + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\theta}_{11} \dot{\tilde{\theta}}_{11} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\theta}_{12} \dot{\tilde{\theta}}_{12} + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{\theta}_{13} \dot{\tilde{\theta}}_{13} + P \end{aligned} \quad (4.23)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Hata sinyalinin sıfıra yakınsamasını sağlamak üzere, adaptasyon terimlerini aşağıdaki gibi seçelim.

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{\phi}} &= -\dot{\hat{\phi}} = -\Gamma_{\phi} Y^T r \\
\dot{\hat{\theta}}_2 &= -\dot{\hat{\theta}}_2 = \Gamma_2 \rho_2^T H^T r \\
\dot{\hat{\theta}}_{11} &= -\dot{\hat{\theta}}_{11} = \gamma_1 (\hat{z} + \zeta_1) H^T r \\
\dot{\hat{\theta}}_{12} &= -\dot{\hat{\theta}}_{12} = \gamma_2 v (\hat{z} + \zeta_2) H^T r \\
\dot{\hat{\theta}}_{13} &= -\dot{\hat{\theta}}_{13} = -\gamma_3 |\dot{x}_1| (\hat{z} + \zeta_3) H^T r
\end{aligned} \tag{4.24}$$

Daha sonra bu adaptasyon terimlerini (4.23) denkleminde yerine yazarsak, Lyapunov fonksiyonunun türevi;

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= -r^T K r - a_0 |\dot{x}_1| \tilde{z}^2 - r^T H \theta_{11} (\tilde{z} - \zeta_1) - r^T H \theta_{12} v (\tilde{z} - \zeta_2) + r^T H \theta_{13} |\dot{x}_1| (\tilde{z} - \zeta_3) \\
&\quad + \theta_{11} (\tilde{z} - \zeta_1) (\dot{\tilde{z}} - \dot{\zeta}_1) + \theta_{12} (\tilde{z} - \zeta_2) (\dot{\tilde{z}} - \dot{\zeta}_2) + \theta_{13} (\tilde{z} - \zeta_3) (\dot{\tilde{z}} - \dot{\zeta}_3)
\end{aligned} \tag{4.25}$$

olacaktır. Son olarak yardımcı filtreleri,

$$\begin{aligned}
\dot{\zeta}_1 &= -a_0 |\dot{x}_1| \zeta_1 - H^T r \\
\dot{\zeta}_2 &= -a_0 |\dot{x}_1| \zeta_2 - v H^T r \\
\dot{\zeta}_3 &= -a_0 |\dot{x}_1| \zeta_3 + |\dot{x}_1| H^T r
\end{aligned} \tag{4.26}$$

şeklinde tasarlayalım ve (4.25) ifadesinde yerine yazalım;

$$\dot{V} = -r^T K r - a_0 |\dot{x}_1| \tilde{z}^2 - \theta_{11} a_0 |\dot{x}_1| (\tilde{z} - \zeta_1)^2 - \theta_{12} a_0 |\dot{x}_1| (\tilde{z} - \zeta_2)^2 - \theta_{13} a_0 |\dot{x}_1| (\tilde{z} - \zeta_3)^2 \tag{4.27}$$

Yukarıdaki ifadede son dört parametrenin her zaman sıfırdan küçük olacağı göz önüne alındığında, Lyapunov fonksiyonun türevinin son hali;

$$\dot{V} \leq -r^T K r \tag{4.28}$$

şeklinde sınırlandırılabilir.

Teorem: Denklem (2.1)'de verilen n serbestlik dereceli yarı aktif kontrollü yapısal sistem için (4.16) ve (4.19) denklemleri ile verilen gözlemleyici-kontrolör çifti, (4.24) ile verilen adaptasyon kuralları ve (4.26) ile verilen filtreler ile birlikte,

$$\beta = \hat{\theta}_{12} \hat{z} + \hat{\theta}_{22} \dot{x}_1 + \hat{\theta}_{12} \zeta_2 \neq 0 \tag{4.29}$$

olmak üzere

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x, \dot{x}) = 0 \tag{4.30}$$

anlamında, yapısal sistemin asimptotik kararlılığını garanti eder.

İspat: K kontrol kazanç matrisi pozitif tanımlı olarak seçilirse bu ifade her zaman sıfırdan küçük olacaktır. Denklem (4.21) Lyapunov fonksiyonu ve denklem (4.28) türevi ifadeleri göz önüne alındığında; $V \in L_\infty$ şeklinde sınırlandırılabilir bir fonksiyon olduğundan, bu fonksiyondaki $r(t), \tilde{z}, \tilde{\phi}$ ve $\tilde{\theta} \in L_\infty$ ifadeleri de sınırlandırılabilir olacaktır. Denklem (4.28)'den $r(t) \in L_2$ olduğu görülmektedir. Standart sinyal ispat işlemlerini kullanarak kapalı çevrim sistemdeki bütün sinyallerin sınırlandırılabilir olduğu gösterilebilir. Ayrıca kapalı çevrim hata dinamiği ve bütün sinyallerin sınırlılığını kullanarak, denklemler (4.18) ve (4.19)'dan $\dot{r}(t)$ ve $\dot{\tilde{z}}$ 'nin sınırlı olduğu gösterilebilir. $\dot{r}(t)$ sınırlı olduğu için, düzgün sürekli bir fonksiyon için Barbalat lemma* (Krstic, 1995) kullanılarak denklem (4.30) ile verilen sonuç elde edilebilir.

4.4 Nonlineer Adaptif Kontrolörün Yarı Aktif Sisteme Uygulanması

Yarı aktif adaptif kontrol için blok diyagramı Şekil 4.1'de görülmektedir. Denklem (4.16) ile elde edilen gerilim değeri sisteme,

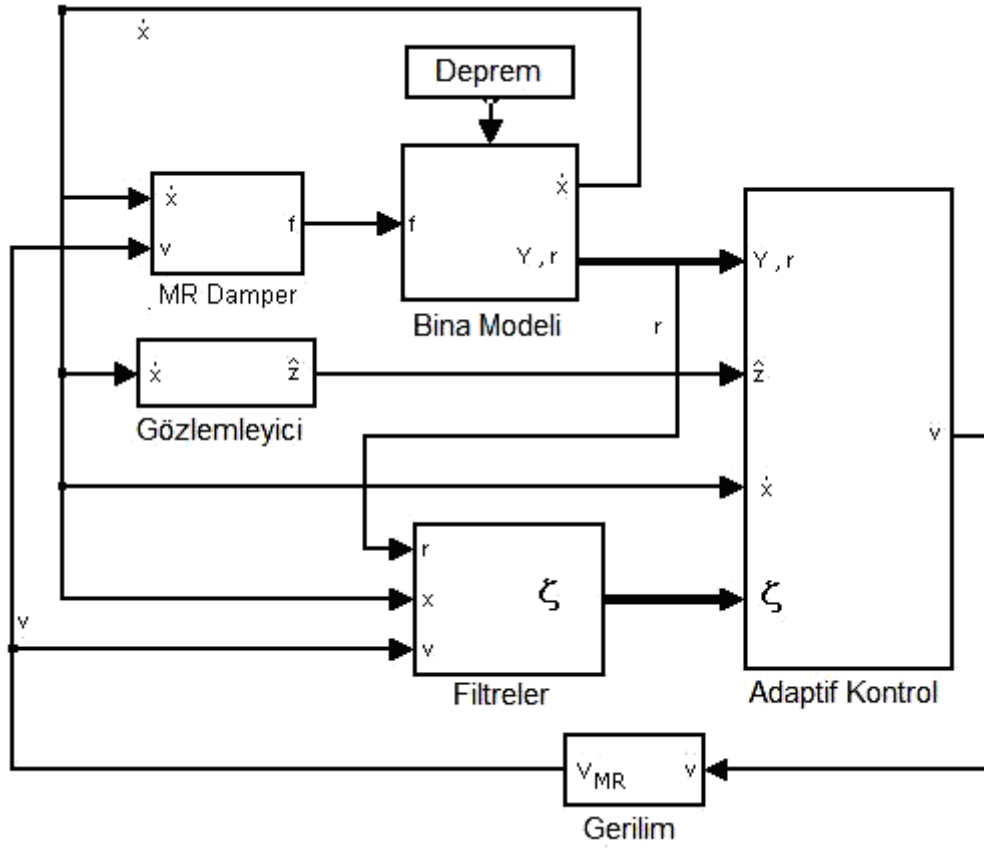
$$\beta = \begin{cases} \varepsilon & -\varepsilon \leq \beta \leq \varepsilon \\ \beta & \beta < -\varepsilon \text{ ve } \varepsilon < \beta \end{cases} \quad (4.31)$$

olmak üzere

$$V_{MR} = \begin{cases} 0 & v \leq 0 \\ v & 0 < v < V_{\max} \\ V_{\max} & v \geq V_{\max} \end{cases} \quad (4.32)$$

şeklinde uygulanmaktadır.

* İntegrallenebilen düzgün sınırlı bir fonksiyonel sıfıra yakınsar.



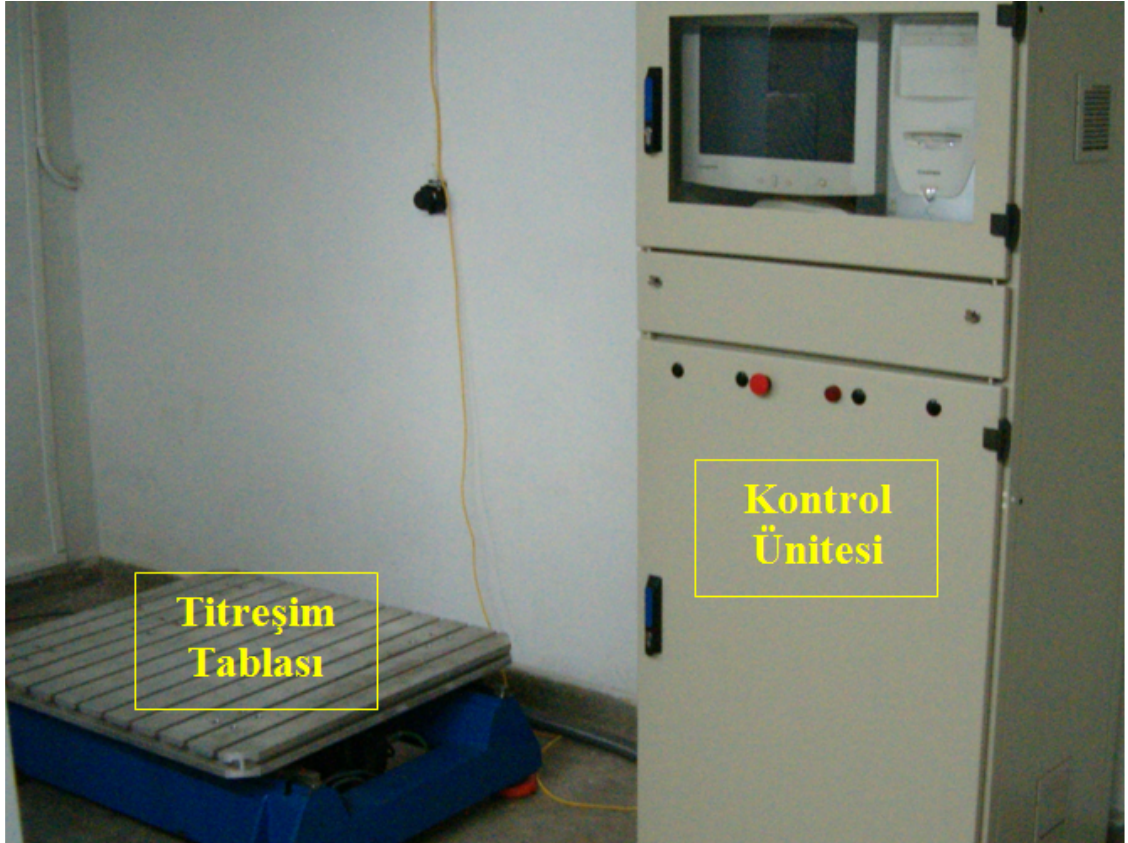
Şekil 4.1 Adaptif kontrol genel blok diyagramı.

Yukarıda tasarlanan kontrolörün tek serbestlik dereceli ve altı serbestlik dereceli yapısal sistemlere benzetim yoluyla uygulanması Cetin vd. (2009a, 2010b) tarafından gerçekleştirilmiştir.

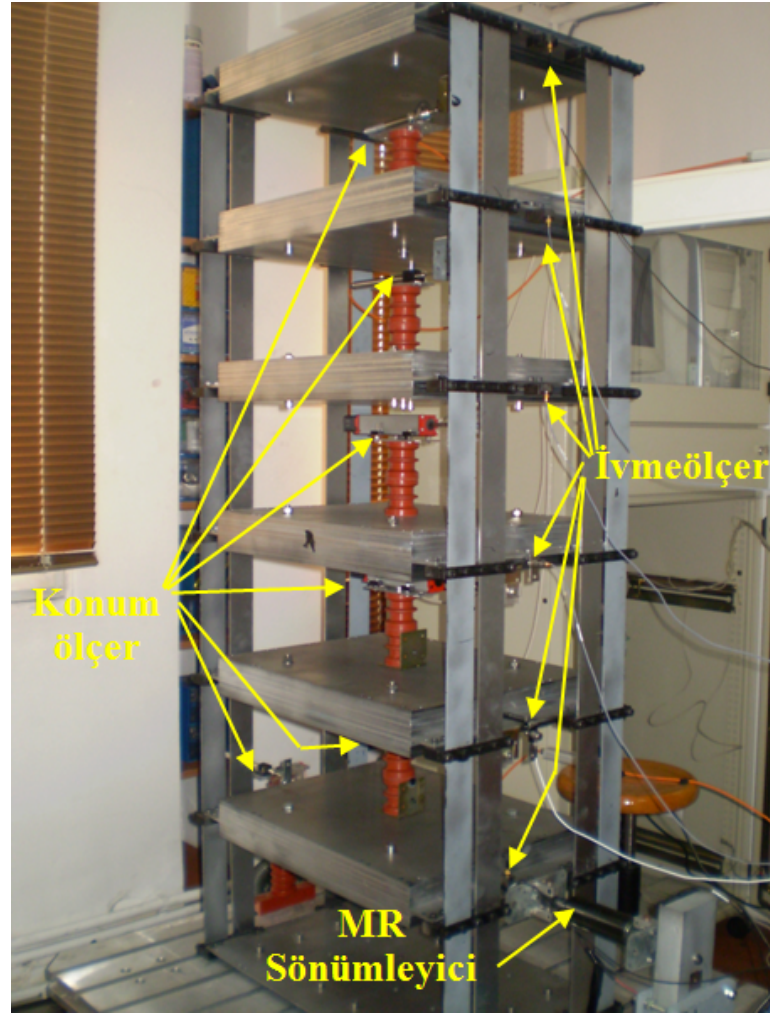
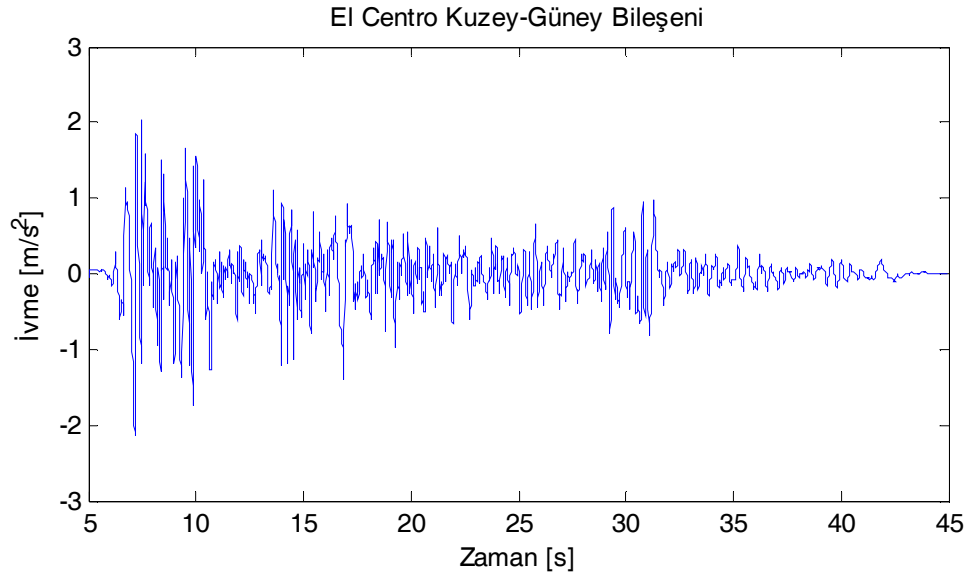
5. DENEYSEL PERFORMANS ANALİZİ ve BULGULAR

5.1 Deney Düzenekinin Tanıtımı

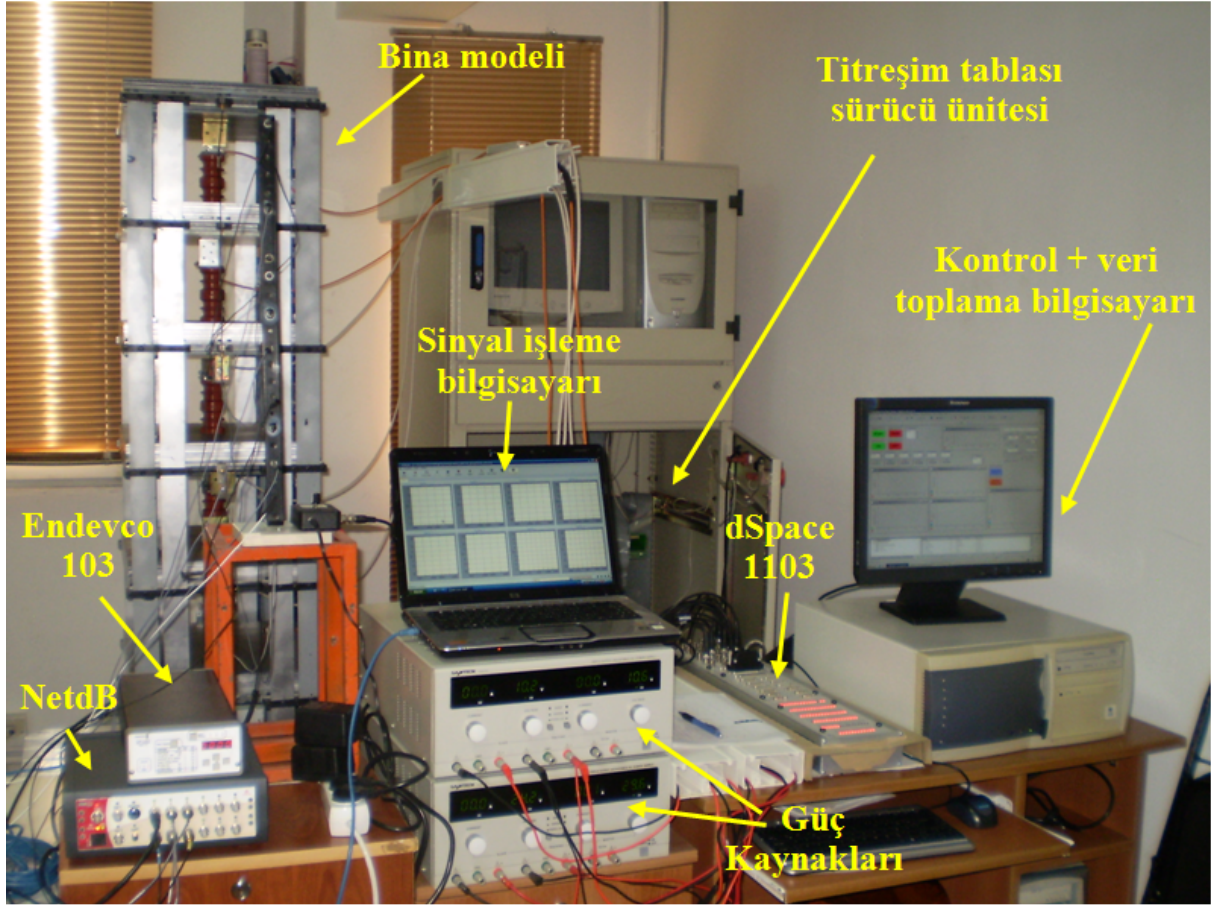
Tasarlanan kontrol algoritmalarının etkinliğini test etmek için Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Teorisi Sistem Dinamiği ve Kontrol laboratuvarında titreşim tablası deneyleri yapılmıştır. Titreşim tablası tek eksenli ve elektromekanik tahriklidir. Şekil 5.1’de titreşim tablası ve sürücü ünitesinin resmi görülmektedir. Titreşim tablası deneylerinde deprem girişi olarak ölçeklendirilmiş (0.7) El Centro Kuzey Güney bileşeni kullanılmaktadır. Şekil 5.2 a’da deprem girişinin ivme zaman grafiği gösterilmektedir. Deneysel doğrulama Şekil 5.2 b’de gösterilen 6 katlı çelik kafes bina modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Literatürde deneysel çalışmalarda genelde bu tip çelik kafes tipi modeller kullanılmaktadır. Bina modelinin her bir katı sac levhaların cıvata ile birbirine bağlanması ile oluşturulmuştur. Her bir katın kütlesi yaklaşık olarak 107 kg’dır. Katlar arasında kolonları temsil eden 8 adet çubuk yay çeliğinden imal edilmiştir. Bu çubukların her biri 3 mm kalınlık ve 50 mm genişliktedir. Katlar arası mesafe 250 mm’dir. Katlar ile çubuklar arasındaki bağlantı da yine bir ara bağlantı parçası yardımıyla cıvata ile yapılmıştır. Bina modeli, veri alış verişi sistemleri, sensörler ve bilgisayarlardan oluşan deney sisteminin genel görünüşü Şekil 5.3’teki fotoğraftan görülebilir.



Şekil 5.1 Titreşim tablası ve sürücü ünitesi



Şekil 5.2 (a) Ölçeklendirilmiş (0.7) El Centro kuzey-güney bileşeni (b) Bina modeli



Şekil 5.3 Deney düzeneğinin genel görünüşü

Ölçüm elemanı olarak değişik marka ve tip sensörler kullanılmıştır. Deney sisteminin şematik görünümü Şekil 5.4’te verilmiştir. Titreşim tablasının sürülmesi ve tasarlanan kontrolörlerin sisteme uygulanması da dSpace ACE Kit 1103 ile gerçekleştirilmiştir. İvme sinyallerinin işlenmesi için 8 kanallı NetdB sinyal analizörü kullanılmıştır. Deneyde her bir katın katlar arası yer değiştirmesi ve ivmesi ölçülmektedir. Yer değiştirme ölçümlerinde 3 adet Waycon marka LVDT (Lineer Değişken Pozisyon Sensörü) ve 3 adet Opkon marka LPT (Rezistif Lineer Pozisyon Sensörü) kullanılmıştır. İvme ölçümleri 4 adet Brüel&Kjaer ivmeölçer ve 2 adet Dytran ivmeölçer ile gerçekleştirilmiştir. Lord RD 1005-3 tipi MR sönümleyici sisteme monte edilmiştir. MR sönümleyicinin oluşturduğu kuvvet Brüel&Kjaer kuvvet sensörü ile ölçülmektedir. dSpace 1103 ile kuvvet sensörü arasında Endevco 103 sinyal şartlandırıcı yer almaktadır. Yer değiştirme ve kuvvet verilerinin işlenmesi dSpace ACE Kit 1103 ile gerçekleştirilmektedir. Yer değiştirme sensörlerinin beslenmesi için 2 adet ayarlanabilir güç kaynağı kullanılmıştır. Bir tanesi ivme verilerinin işlenmesinde diğeri de dSpace ile haberleşerek hem veri işleme ve kontrol hem de titreşim tablasının sürülmesinde kullanılan iki adet bilgisayar mevcuttur.

5.2 Deneysel Problemin Formülasyonu

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = -Hf - M_s L \ddot{x}_g \quad (5.1)$$

şeklindedir. Burada sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri:

$$M_s = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_6 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$C_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_5 & -c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 + c_6 & -c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_6 & c_6 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 + k_6 & -k_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_6 & k_6 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

şeklindedir. Bağlı yer değiştirme vektörü, $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$ şeklindedir.

$H = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ vektörü olacaktır. Sismik giriş vektörü ise $L = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ olarak ifade edilebilir.

5.3 Deneysel Sistemin Klasik Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Klasik modelde parametreleri yapı dinamiğinde kullanılan ampirik ifadeler yardımıyla belirlenmektedir. Sistemin fiziksel kütle değerleri her bir kat için $M_f = \text{diag}[107.5, 107.5, 106.8, 106.8, 106.8, 106.8]$ şeklindedir. Klasik modelde fiziksel kütleler modelin kütle değerlerini oluşturmaktadır ($M_s = M_f$). Rijitlik katsayıları, 8 adet yay çeliğinden imal edilmiş çubuk ile bağlantı yapıldığı dikkate alınarak, basit olarak aşağıdaki formül yardımıyla,

$$k_{1,2,3,4,5,6} = 8 \frac{12EI}{l^3} = 145152 \text{ N/m} \quad (5.5)$$

şeklinde elde edilmiştir. Rayleigh sönüm prensibine göre, $\alpha_0 = 0.0265$ ve $\beta_0 = 0.00011431$ olmak üzere,

$$[C_s] = \alpha_0[M_s] + \beta_0[K_s] \quad (5.6)$$

ifadesinden her bir sönüm katsayısı $c_{1,2,3,4,5,6} = 16.59 \text{ N.s/m}$ şeklinde elde edilmiştir.

5.4 Sistem Tanılama ile Altı Katlı Bina Modelinin Parametrelerinin DeneySEL Olarak Belirlenmesi

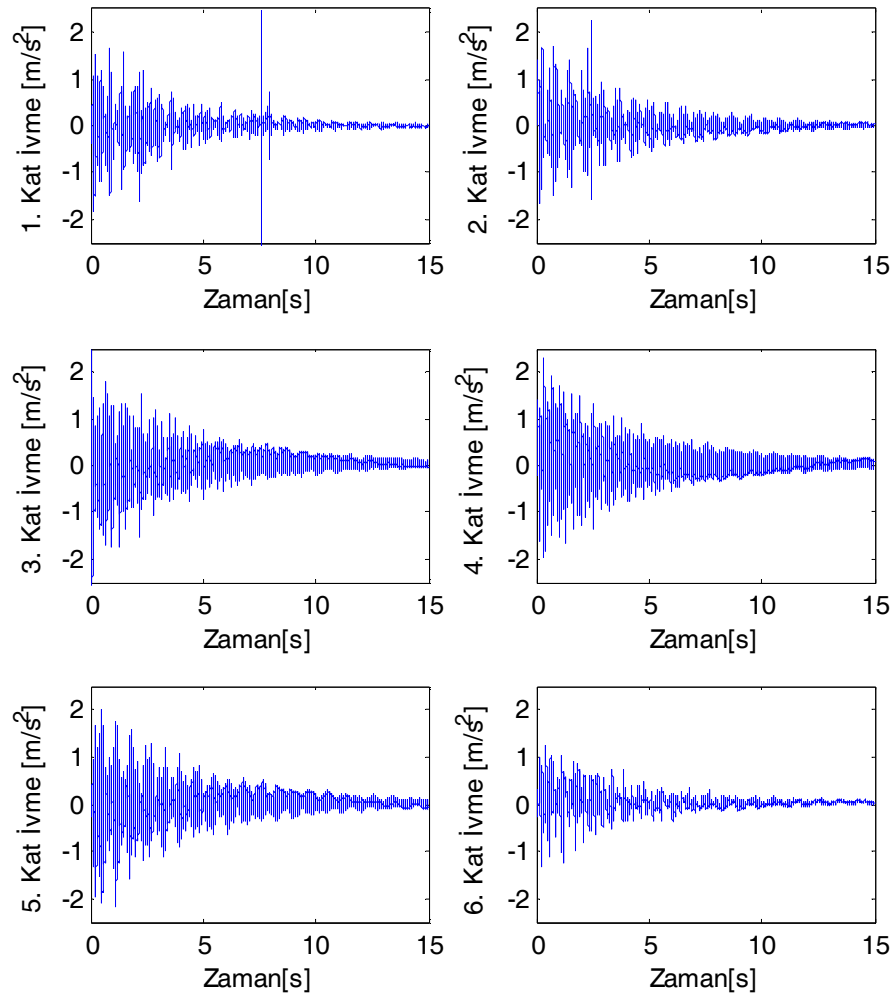
Altı katlı bina modelinin parametrelerinin belirlenmesi için sisteme Bölüm 2’de özetlenen işlem adımları uygulanmıştır. Sisteme MR sönümleyici bağlı değildir. Model parametrelerinin belirlenmesi için çekiç-darbe testi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde B&K 8210 darbe çekici kullanılmıştır (Şekil 5.5 a). Parametrelerin belirlenmesi iki aşamalıdır. Birincisi doğal frekans ve sönüm oranlarının belirlenmesi, ikinci aşama ise mod şekilleri matrisinin belirlenerek sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerinin belirlenmesidir. Sistemin parametrelerinin belirlenmesi için öncelikle sisteme 4. kattan darbe girişi uygulanmıştır. 4. kattan darbe uygulanmasının nedeni, bütün mod bileşenlerinin etkilerinin en iyi olarak bu kattan darbe vurulduğunda ortaya çıkmasıdır. Darbe girişi sonucunda 6 katın ivmeleri ölçülmüştür. Alınan ölçümler Şekil 5.5 b’de gösterilmektedir. Daha sonra ölçümler 4. dereceden bant geçiren filtreden geçirilmiştir. Bant geçiren filtre için aşağıdaki frekanslar kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} 0.7 \text{ Hz} &= \omega_{1A} < \omega_1 < \omega_{1Y} = 1.4 \text{ Hz} & 3.1 \text{ Hz} &= \omega_{2A} < \omega_2 < \omega_{2Y} = 3.8 \text{ Hz} \\ 5.5 \text{ Hz} &= \omega_{3A} < \omega_3 < \omega_{3Y} = 6.2 \text{ Hz} & 7.85 \text{ Hz} &= \omega_{4A} < \omega_4 < \omega_{4Y} = 8.55 \text{ Hz} \\ 9.6 \text{ Hz} &= \omega_{5A} < \omega_5 < \omega_{5Y} = 10.3 \text{ Hz} & 10.9 \text{ Hz} &= \omega_{6A} < \omega_6 < \omega_{6Y} = 11.7 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Böylece sistemden alınan ölçümler modal cevaplarına ayrıştırılmış olmaktadır. Bant geçiren filtreden geçirilmiş 6. katın ivme cevabı Şekil 5.6’da görülmektedir.

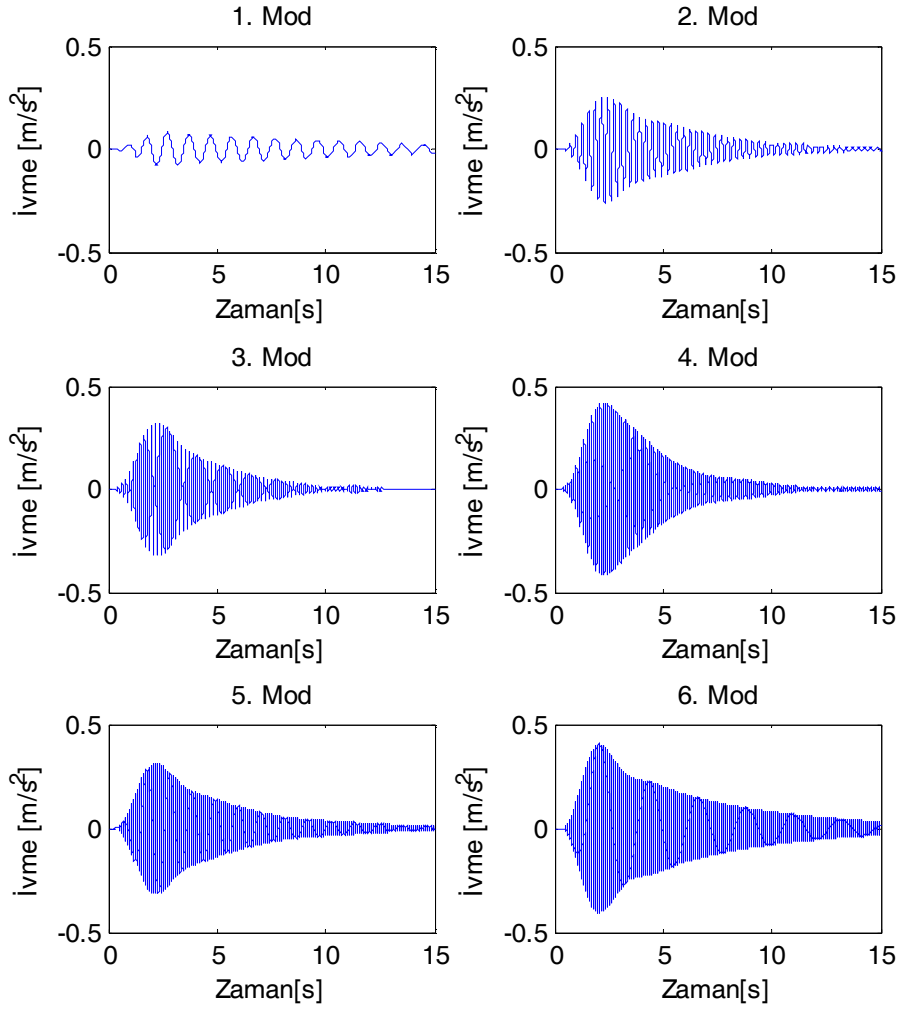


(a)



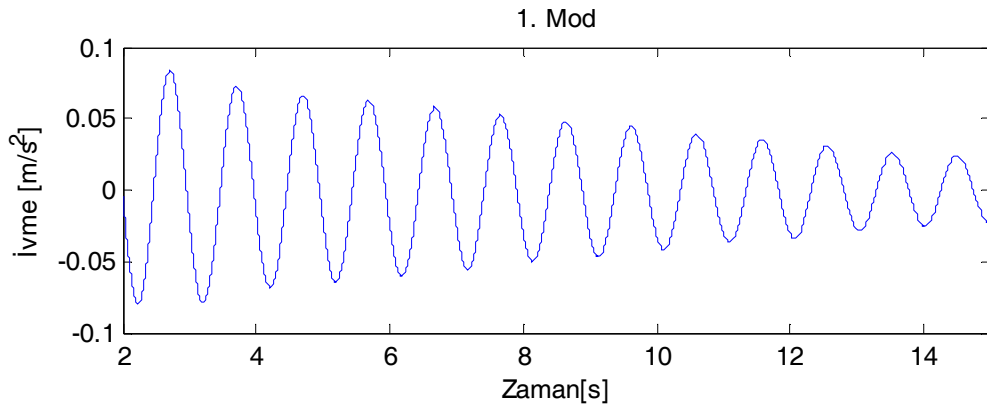
(b)

Şekil 5.5 (a) Çekiç testi (b) Sistemin darbe girişine cevabı

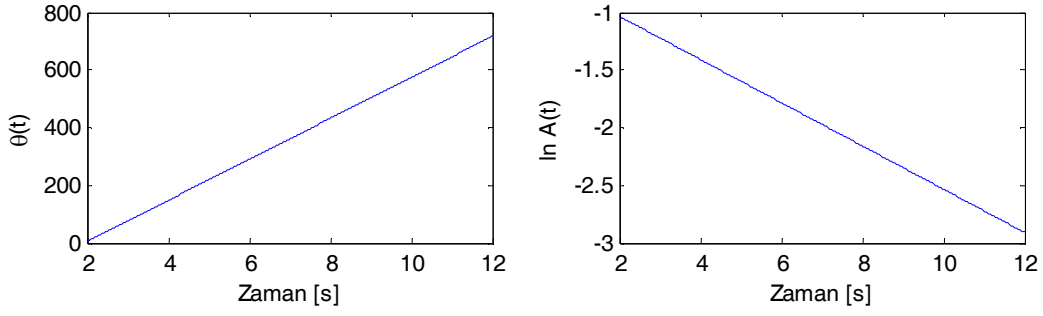


Şekil 5.6. Altıncı kattan alınan ivme ölçümünün modlara ayrıştırılması

Elde edilen modal cevaplar Hilbert dönüşümüne tabi tutularak anlık genlik ve anlık faz açıları bulunmuştur. Bant geçiren filtre sebebiyle sıfıra yakın bölgede genlikler azalan karakterde değildir. Bunun etkisini ortadan kaldırmak için sıfıra yakın değerler hesaplamalara dahil edilmemiştir (Yang vd. 2003) (Şekil 5.7). Anlık genlik ve faz açıları en küçük kareler yöntemi kullanılarak doğrusal hale getirilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.7 Altıncı kattan alınan ivme ölçümünün 1. mod cevabı



Şekil 5.8 Altıncı kattan alınan ivme ölçümünün anlık faz açısı ve anlık genlik cevabı

Her bir moda ait anlık faz açısı doğrusunun eğiminden sönümlü doğal frekanslar elde edilmiştir. Anlık genlik grafiğinin eğiminden ise $-\xi_j \omega_j$ değerleri elde edilmiştir. Belirlenen $-\xi_j \omega_j$ değerleri, sönümlü doğal frekanslar ve $\omega_{dj} = \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2}$ ifadesi kullanılarak ω_j ve ξ_j elde edilmiştir. Çizelge 5.1’de ω_j ve ξ_j değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 Frekans ve sönüm oranları

	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (ξ)
1. Mod	1.0150	0.0129
2. Mod	3.4506	0.0119
3. Mod	5.8285	0.0101
4. Mod	8.0974	0.0073
5. Mod	9.9207	0.0042
6. Mod	11.3196	0.0026

Sistem parametrelerinin elde edilebilmesi için bütün katlardan alınan ölçümler üzerinde aynı işlem adımları uygulanmıştır. Daha sonra, $\left| \phi_{pj} \right| / \left| \phi_{qj} \right| = \exp[A'_{pj}(t_0) - A'_{qj}(t_0)]$ ve $\varphi_{pj,q} = \theta'_{pj}(t_0) - \theta'_{qj}(t_0)$ ifadelerinden mod şekilleri matrisinin değerleri ve işaretleri belirlenmiştir. Elde edilen mod şekilleri matrisi aşağıdaki gibidir:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1.000 & -1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 2.1193 & -1.5809 & 0.6603 & -0.3189 & -1.1620 & -1.7986 \\ 3.1639 & -1.1342 & -0.7202 & -0.7603 & 0.6754 & 2.7107 \\ 3.6550 & -0.1479 & -1.1220 & 0.5848 & 0.4278 & -3.1406 \\ 4.1825 & 0.8330 & -0.1271 & 0.6514 & -1.2059 & 2.7790 \\ 4.0374 & 1.3076 & 0.9314 & -0.6053 & 0.5930 & -0.9823 \end{bmatrix}$$

Yapısal sistemin mod şekilleri matrisi, doğal frekansları ve sönüm oranlarından yararlanılarak kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri elde edilir. Sistemde fiziksel kütleler ($M_f = \text{diag}[107.5, 107.5, 106.8, 106.8, 106.8, 106.8]$) belirli olduğundan genelleştirilmiş modal kütleler aşağıdaki ifadeden elde edilebilir;

$$m_j = \text{diag}[\Phi^T M_f \Phi] = [6695.4 \quad 772.6 \quad 438.6 \quad 301.1 \quad 513.8 \quad 3221.3]^T$$

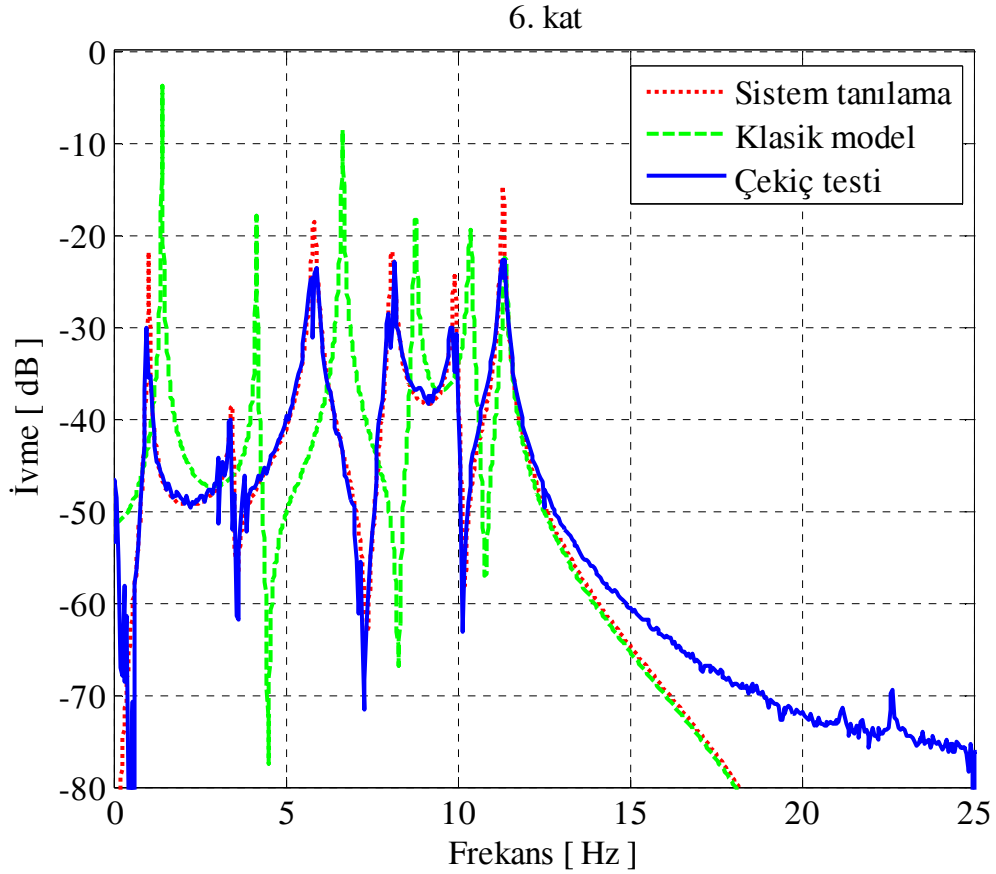
Buradan genelleştirilmiş modal rijitlik k_j ve modal sönüm c_j ifadeleri elde edilerek kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$M = \Phi^{-T} \text{diag}[m_j] \Phi^{-1} = \begin{bmatrix} 107.5453 & 0.1642 & 0.7990 & 0.2483 & 0.6605 & 1.5463 \\ 0.1642 & 112.7889 & -0.0377 & 0.7826 & 0.9332 & 1.8834 \\ 0.7990 & -0.0377 & 106.1094 & -2.5682 & -0.7424 & 0.6969 \\ 0.2483 & 0.7826 & -2.5682 & 105.9440 & 0.0015 & 1.8356 \\ 0.6605 & 0.9332 & -0.7424 & 0.0015 & 98.2188 & -1.2420 \\ 1.5463 & 1.8834 & 0.6969 & 1.8356 & -1.2420 & 113.4045 \end{bmatrix}$$

$$C = \Phi^{-T} \text{diag}[c_j] \Phi^{-1} = \begin{bmatrix} 68.8822 & 0.5713 & -3.5626 & -1.8432 & 0.8584 & -1.0492 \\ 0.5713 & 57.0520 & -2.3306 & -14.1316 & -4.4011 & -0.5814 \\ -13.5626 & -2.3306 & 53.0531 & -3.0549 & -14.7262 & -5.6547 \\ -1.8432 & -14.1316 & -3.0549 & 51.1126 & -0.3451 & -19.8159 \\ 0.8584 & -4.4011 & -14.7262 & -0.3451 & 42.2210 & -13.2390 \\ -1.0492 & -0.5814 & -5.6547 & -19.8159 & -13.2390 & 55.6869 \end{bmatrix}$$

$$K = \Phi^{-T} \text{diag}[k_j] \Phi^{-1} = 10^5 * \begin{bmatrix} 2.4730 & -1.3815 & 0.1860 & -0.0197 & -0.0041 & 0.0011 \\ -1.3815 & 2.4219 & -1.4409 & 0.2267 & 0.0079 & 0.0122 \\ 0.1860 & -1.4409 & 2.5907 & -1.5143 & 0.1025 & -0.0222 \\ -0.0197 & 0.2267 & -1.5143 & 2.7404 & -1.4589 & 0.1422 \\ -0.0041 & 0.0079 & 0.1025 & -1.4589 & 2.6680 & -1.4857 \\ 0.0011 & 0.0122 & -0.0222 & 0.1422 & -1.4857 & 1.4681 \end{bmatrix}$$

Sonuç olarak sistem tanılama ile elde edilen model, klasik model ile deneysel olarak belirlenen cevapların karşılaştırılması Şekil 5.9'da verilmektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü üzere klasik model ile çekiç testinden elde edilen gerçek modelin frekans cevapları arasında farklılıklar mevcuttur. Bu sorun sistem tanılama ile model parametreleri belirlenerek çözülmüştür. Böylece benzetim ve deneysel çalışma arasında bir farklılık olmayacaktır.



Şekil 5.9 Klasik, sistem tanılama ve deneysel çalışma ile bulunan cevapların karşılaştırılması

5.5 H_∞ Kontrolörün Uygulanması

Bölüm 3'te n serbestlik dereceli yarı aktif yapısal sistem için tasarlanan H_∞ kontrolör, Şekil 5.2'de gösterilen 6 serbestlik dereceli yapısal modele uygulanacaktır. H_∞ kontrolör için iki farklı tasarım modeli ve üç farklı geri besleme sinyali kullanılmıştır. H_∞ kontrolör klasik model ve sistem tanılama ile belirlenen model üzerinden 1. kat konum, 6. kat konum ve 6. kat ivme geri beslemeli olarak 6 farklı senaryo üzerinden tasarlanmıştır. Bu senaryolar için Çizelge 5.2'de verilen kısaltmalar kullanılmıştır. 1. kat konum geri besleme için denklem (3.2)'deki çıkış vektörü $C_y = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ şeklindedir. 6. kat konum geri besleme için ise çıkış vektörü $C_y = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$ şeklindedir. İvme geri besleme için Dyke vd. (1996) kullandıkları ivme geri besleme matrisleri kullanılmıştır. Bu matrisler $C_f = [-M_s^{-1}K_s \ -M_s^{-1}C_s]$ ve $D_f = [-M_s^{-1}H]$ şeklindedir.

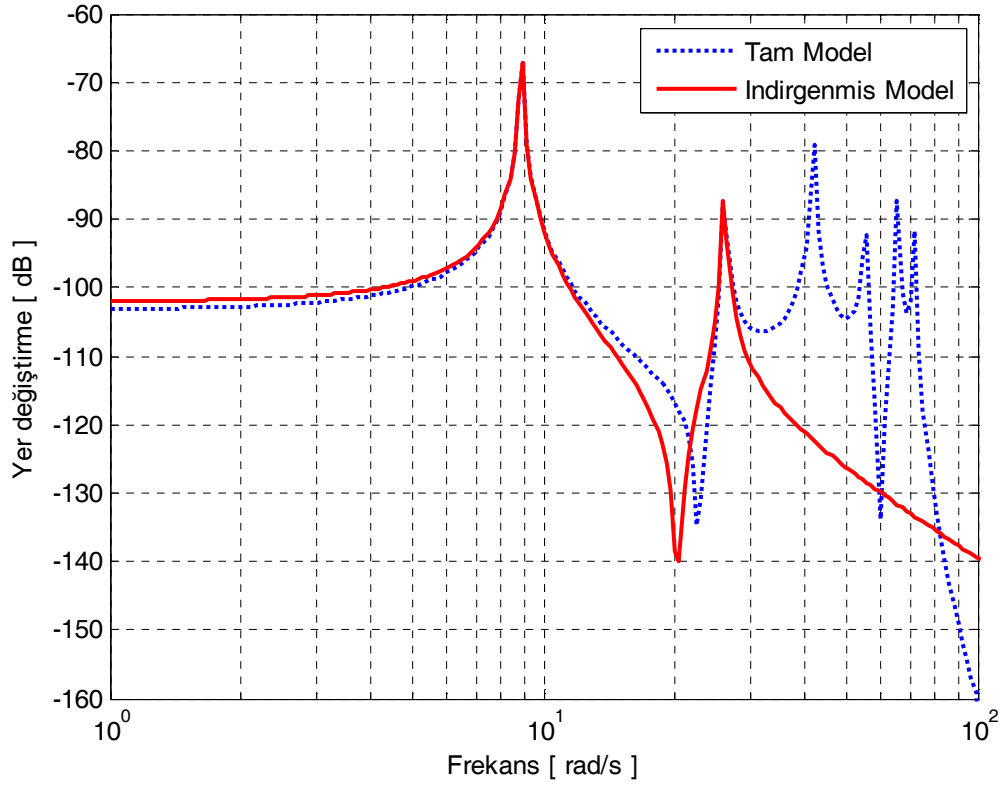
Çizelge 5.2 Kontrolörler için kısaltma tablosu

Senaryo	Kısaltma
Klasik Model – 1. Kat yer değiştirme geri beslemeli	K1Y
Sistem Tanılama Modeli – 1. Kat yer değiştirme geri beslemeli	S1Y
Klasik Model – 6. Kat yer değiştirme geri beslemeli	K6Y
Sistem Tanılama Modeli – 6. Kat yer değiştirme geri beslemeli	S6Y
Klasik Model – 6. Kat ivme geri beslemeli	K6İ
Sistem Tanılama Modeli – 6. Kat ivme geri beslemeli	S6İ

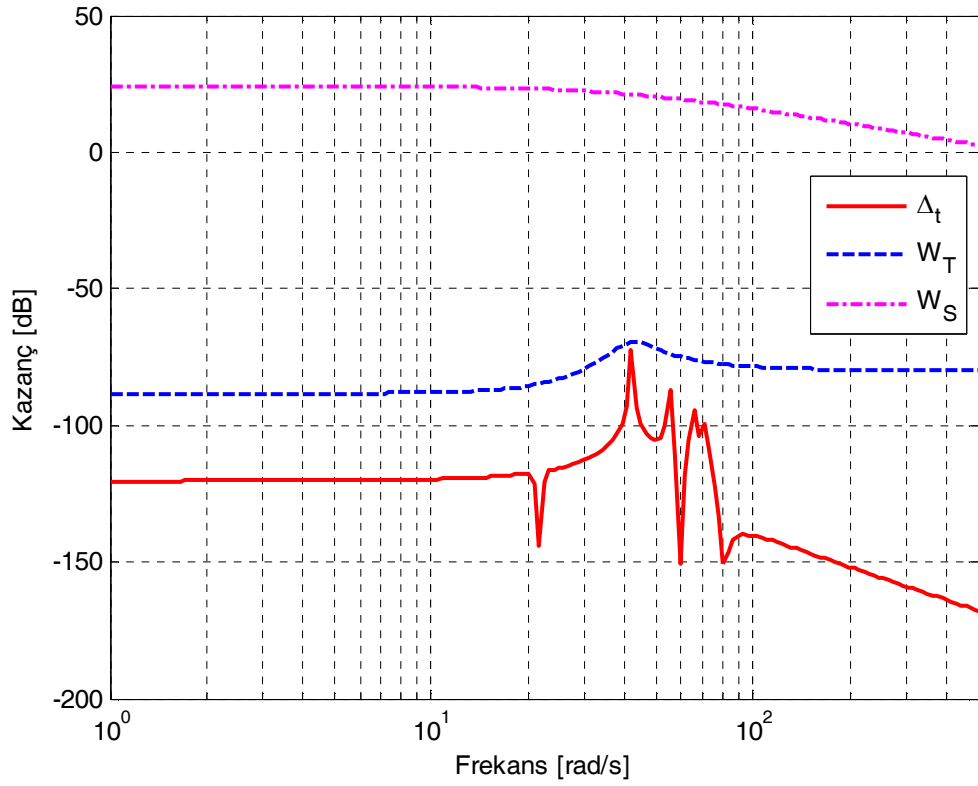
Denklem (3.18) ile verilen W_T filtresinin frekanslarının ayarlanmasında kontrol edilecek son frekans ve kontrol edilmeyen ilk frekans değerleri kullanılmaktadır. Pay kısmındaki frekans kontrol edilecek son mod frekansını payda kısmındaki frekans kontrol edilmeyen bir sonraki mod frekansı olarak alınmıştır. Amaç dayanıklı kararlılığı sağlayacak şekilde ilk iki modu kontrol edip diğer kontrol edilmeyen modları uyarlamayacak şekilde kontrol kazancının frekans alanında oluşturulmasıdır. H_∞ kontrol tasarımında MATLAB® Robust Control Toolbox (2009) kullanılmıştır. Yer değiştirme geri beslemeli kontrolörler için katsayılar $k_t = 0.0001$, $\xi_{wn} = 0.65$, $\xi_{wd} = 0.15$, $\omega_{wn} = 26$, $\omega_{wd} = 42$ ve $k_s = 26$ şeklindedir. İvme geri beslemeli kontrolör için $k_t = 0.37$ ve $\xi_{wn} = 0.25$ alınarak tasarım yapılmıştır.

5.5.1 Klasik Model Kullanılarak H_∞ Kontrolörün Uygulanması (1. Kat Yer Değiştirme Geri Beslemeli)

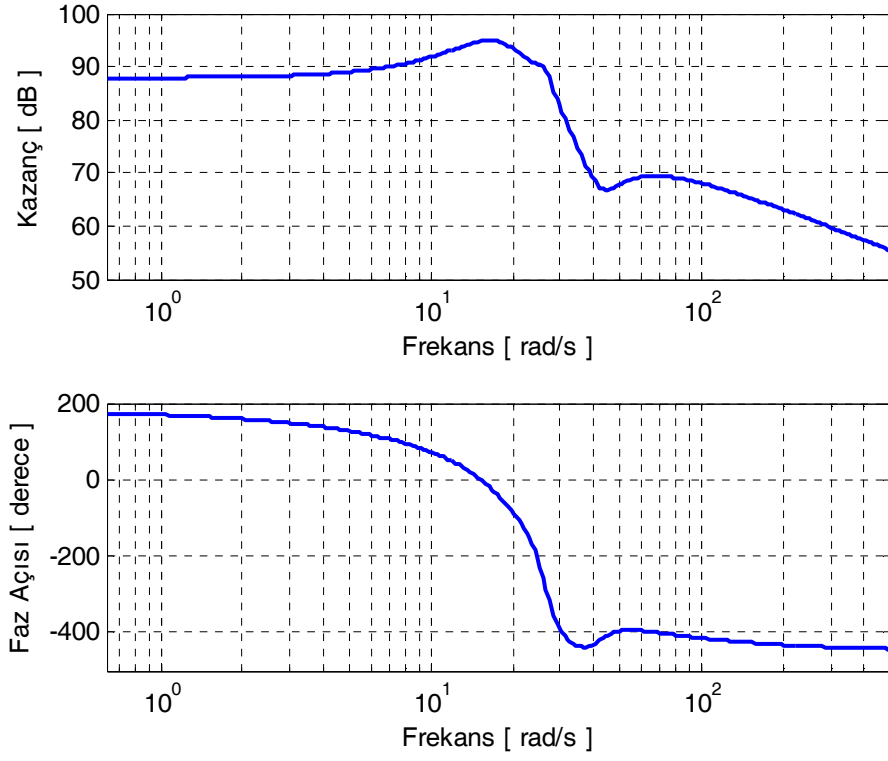
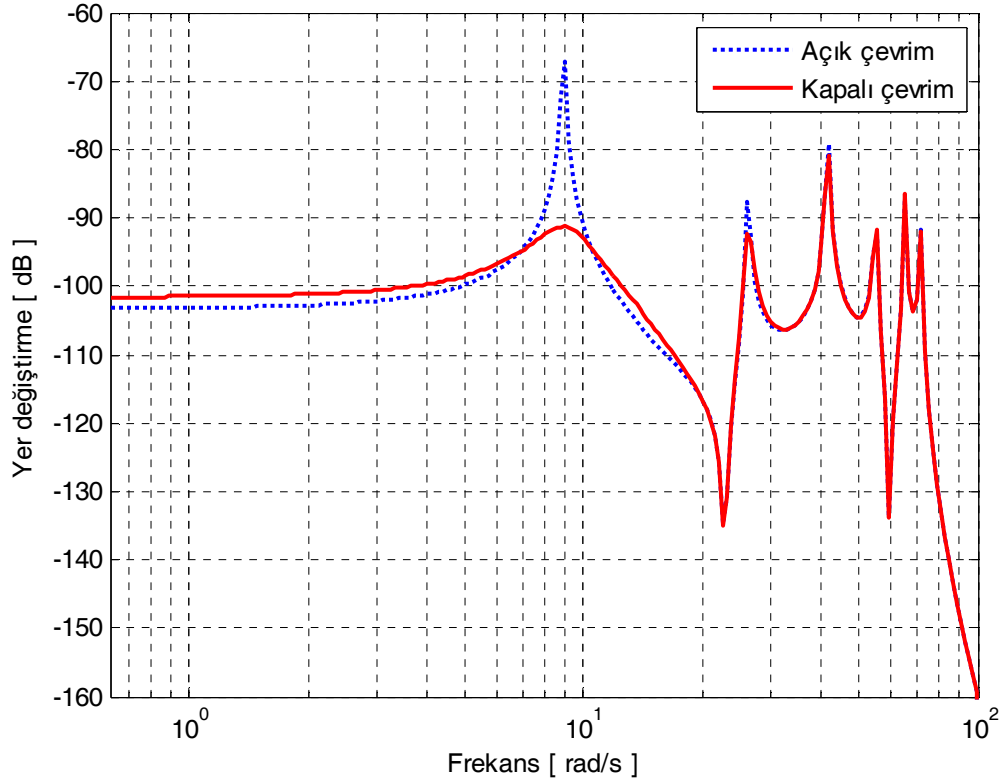
Klasik model kullanılarak H_∞ kontrolör 1. kat geri beslemeli olarak tasarlanmıştır. Bölüm 3'te ifade edildiği gibi kontrolör indirgenmiş model üzerinden tasarlanarak tam dereceli modele uygulanmaktadır. Tam ve indirgenmiş dereceli sistemin frekans cevapları Şekil 5.10'da verilmiştir. W_T filtresi ve modellenmeyen sistem dinamikleri Şekil 5.11'de görülmektedir. Kontrolörün frekans cevabı Şekil 5.12'de, açık ve kapalı çevrim sistem cevapları Şekil 5.13'te gösterilmektedir. İndirgenmiş sistemin açık ve kapalı çevrim cevabı ise Şekil 5.14'te verilmiştir.



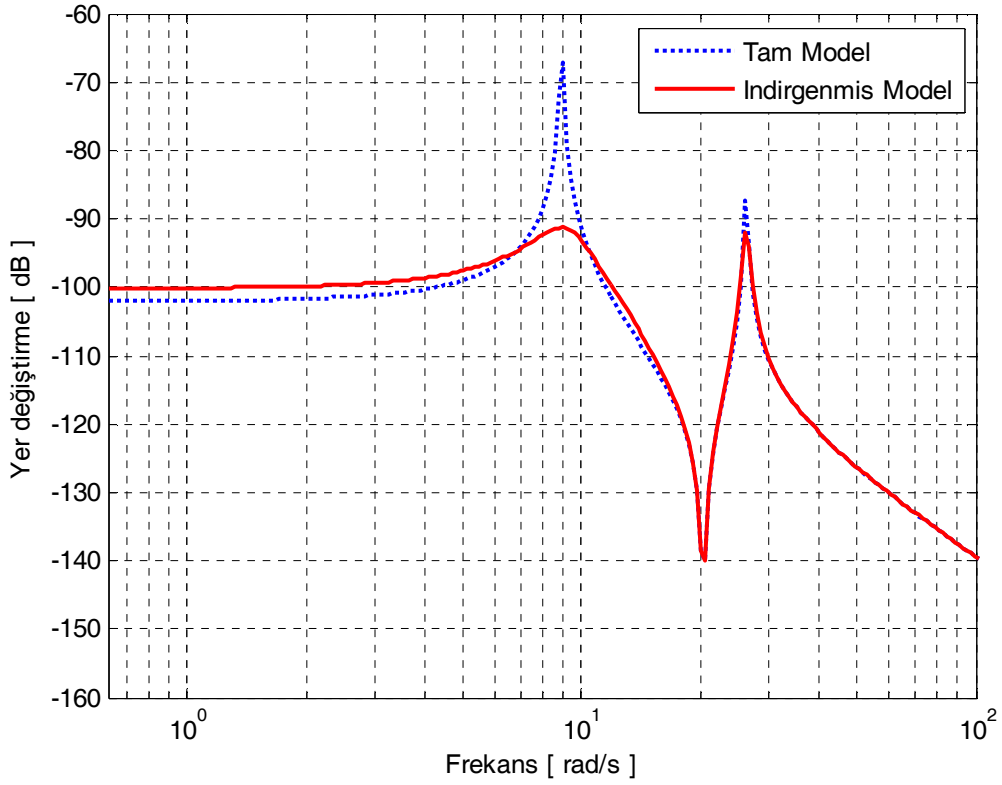
Şekil 5.10 Tam ve indirgenmiş sistem frekans cevapları



Şekil 5.11 Modellenmeyen dinamikler ve frekans şekillendirme filtreleri

Şekil 5.12 H_∞ kontrolör frekans cevabı

Şekil 5.13 Tam dereceli sistem açık ve kapalı çevrim cevapları

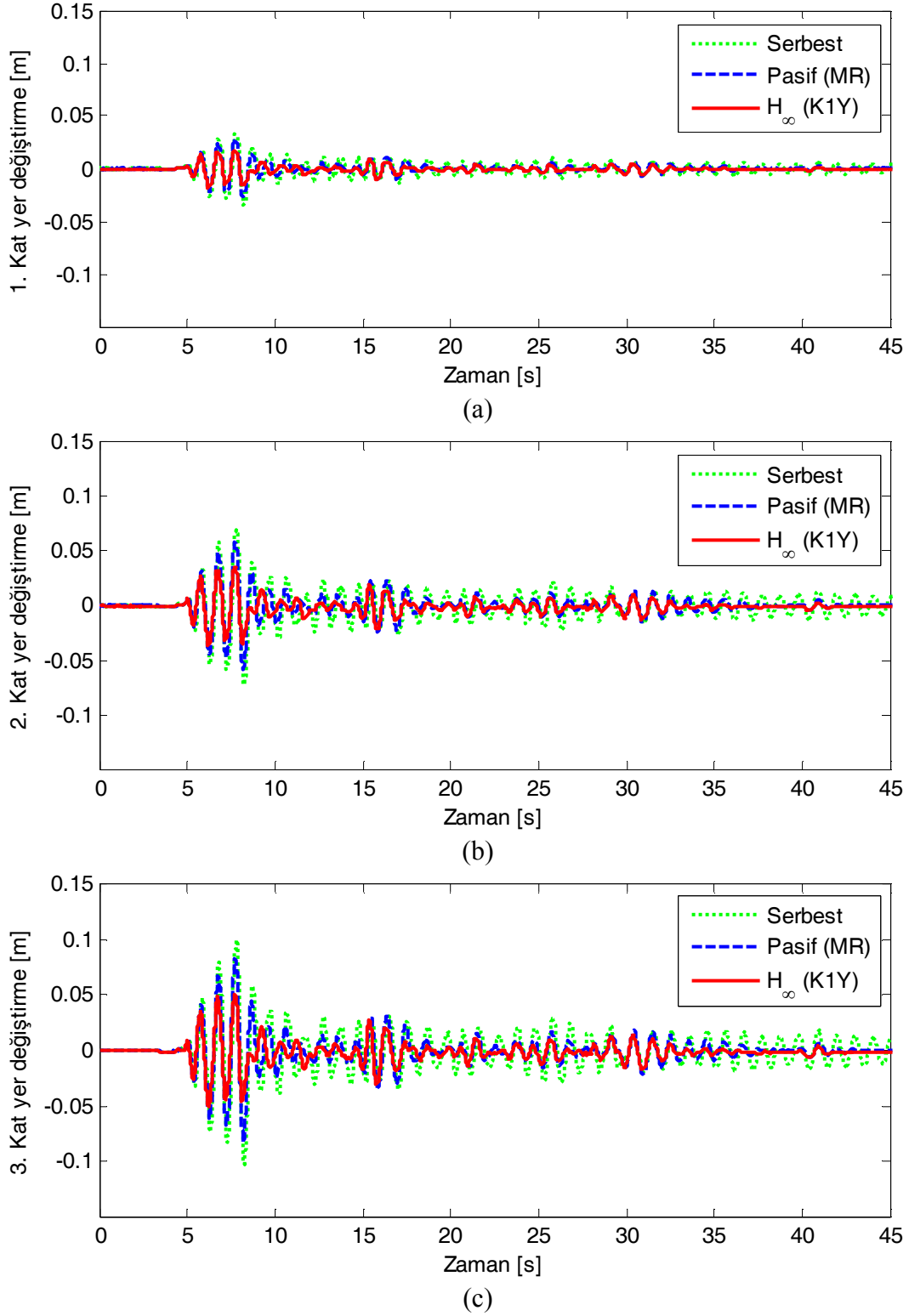


şekil 5.14 İndirgenmiş dereceli sistem açık ve kapalı çevrim cevapları

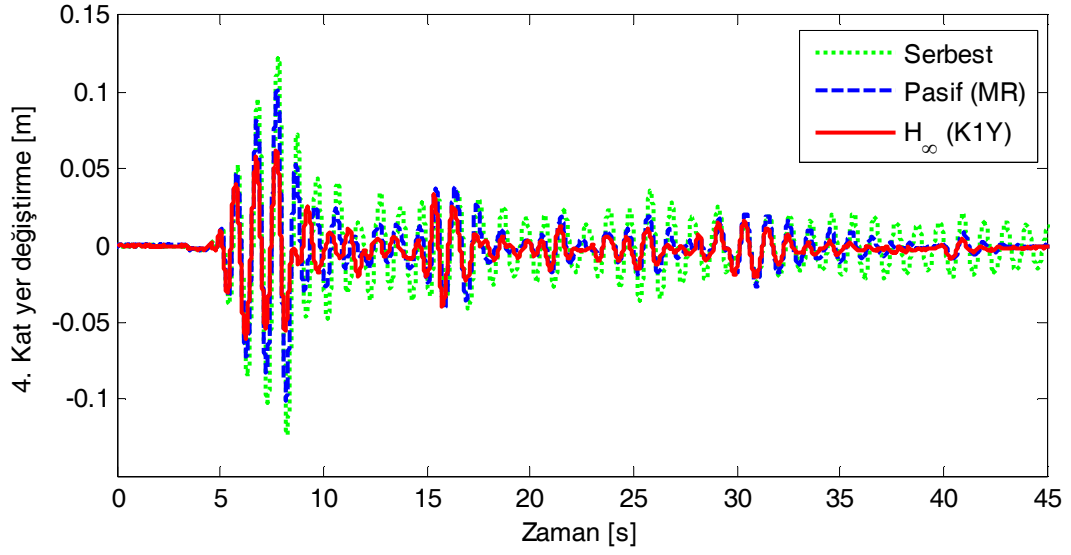
1. kat geri beslemeli olarak tasarlanan H_∞ kontrolör deneysel bina modeline MR sönümleyici yardımıyla uygulanmıştır. Kontrolörün performansını belirlemek için serbest, pasif ve H_∞ kontrolör durumları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar her bir katın yer değiştirme ve ivmesi esas alınarak yapılmıştır. şekil 5.15 ve 5.16'da zamana bağlı yer değiştirme cevapları görölmektedir. İvme cevapları ise şekil 5.17 ve 5.18'de verilmektedir. Frekans alanındaki yer değiştirme cevapları şekil 5.19 ve 5.20'de, ivme cevapları ise şekil 5.21 ve 5.22'de verilmiştir. Klasik model esas alınarak tasarlanan H_∞ kontrolörün deneysel modele uygulanması sonucu elde edilen zaman ve frekans alanındaki grafikler tasarlanan kontrolörün deprem etkisi altındaki yapı modelinin titreşimlerinin bastırılmasında etkin olduğunu göstermektedir. Kontrolörün tasarlanması ve uygulanması farklı modeller üzerinden gerçekleştirilmesine rağmen cevaplarda kayda değer iyileşmeler olmuştur. Özellikle yer değiştirmedeki iyileşmeler belirgin olarak görölmektedir. Kontrolörün performansı ile ilgili ayrıntılı inceleme değişik performans kriterleri ve grafiksel gösterimler kullanılarak bu bölümün sonunda detaylı olarak verilecektir.

5.5.1.1 Yer Değiştirme Cevapları

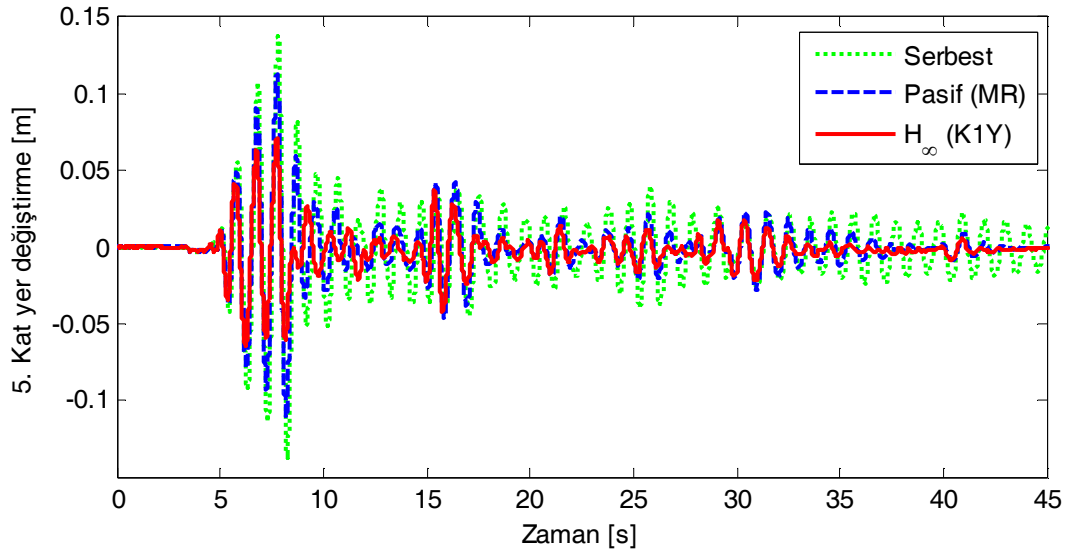
Şekil 5.15 ve 5.16’da zamana bağlı yer değiştirme cevapları görülmektedir. Zaman alanındaki grafikler incelendiğinde tasarlanan kontrolörün deprem etkisi altındaki yapı modelinin titreşimlerinin bastırılmasında etkin olduğu görülmektedir.



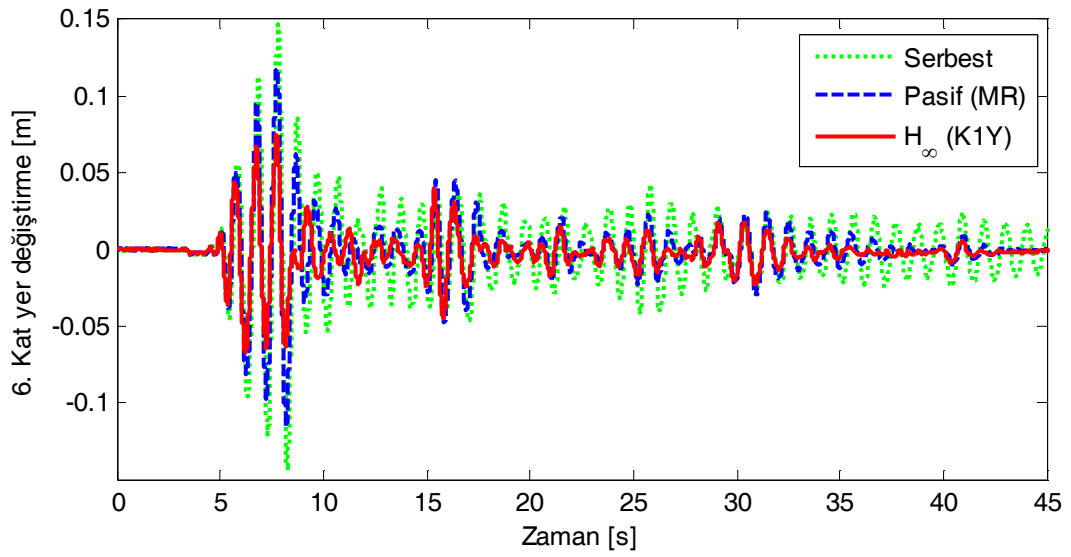
Şekil 5.15 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

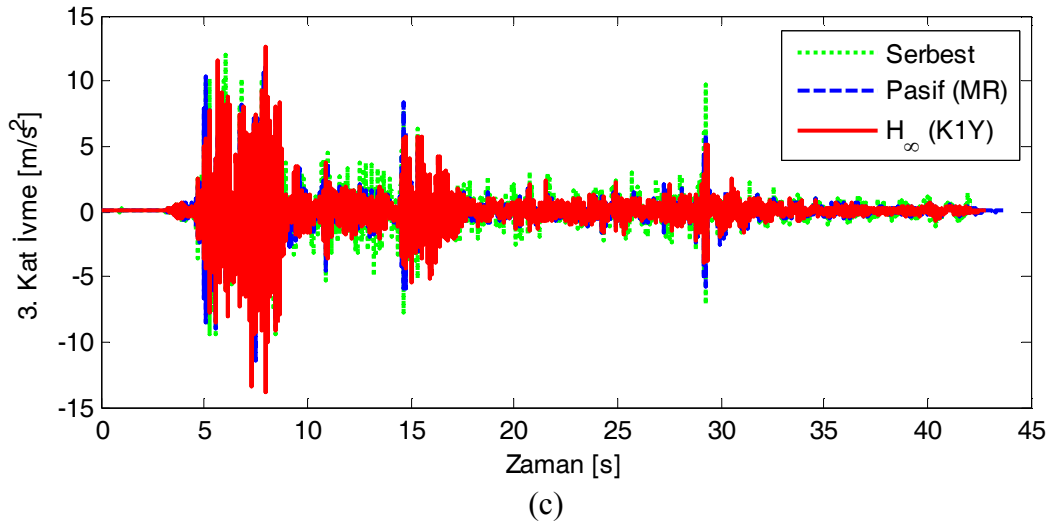
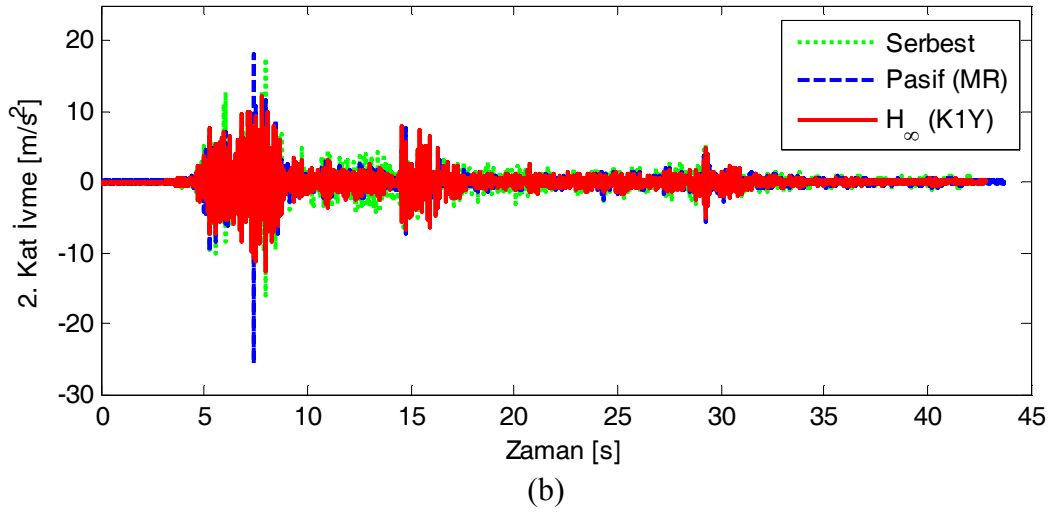
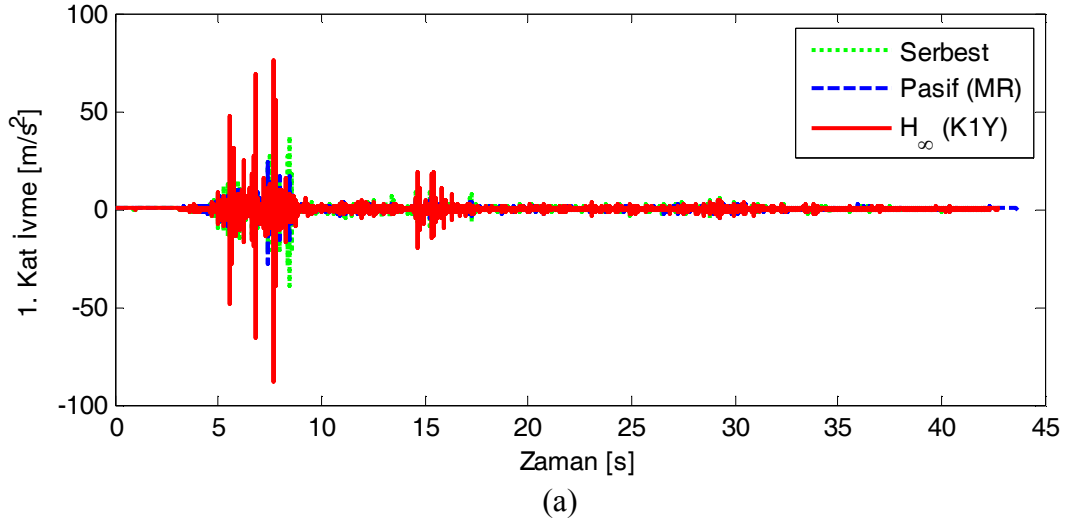


(c)

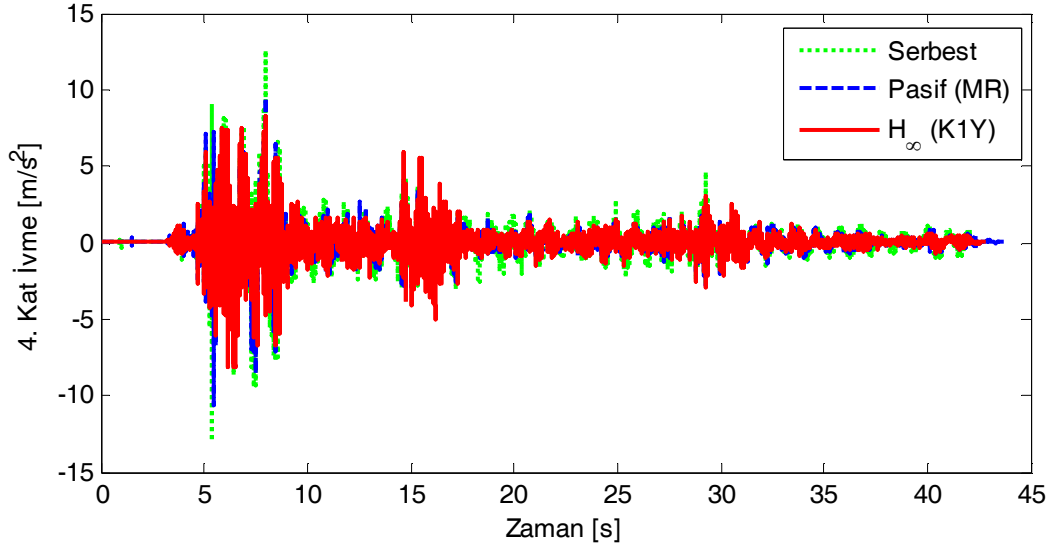
şekil 5.16 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.5.1.2 İvme Cevapları

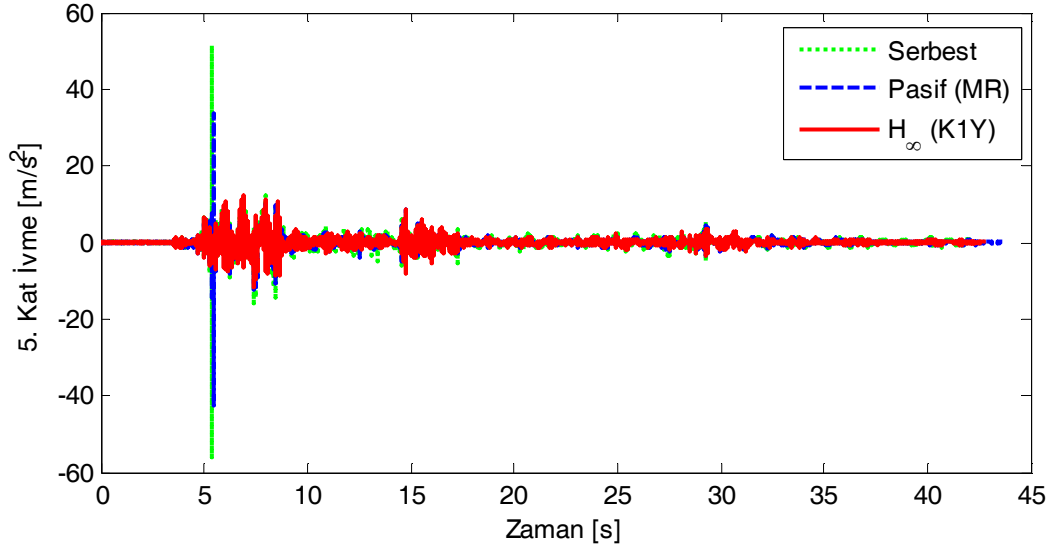
İvme cevapları ise Şekil 5.17 ve 5.18’de verilmektedir. İvme grafikleri incelendiğinde MR sönümleyicinin bağlı olduğu 1. kat haricinde tasarlanan kontrolörün genelde etkin olduğu görülmektedir.



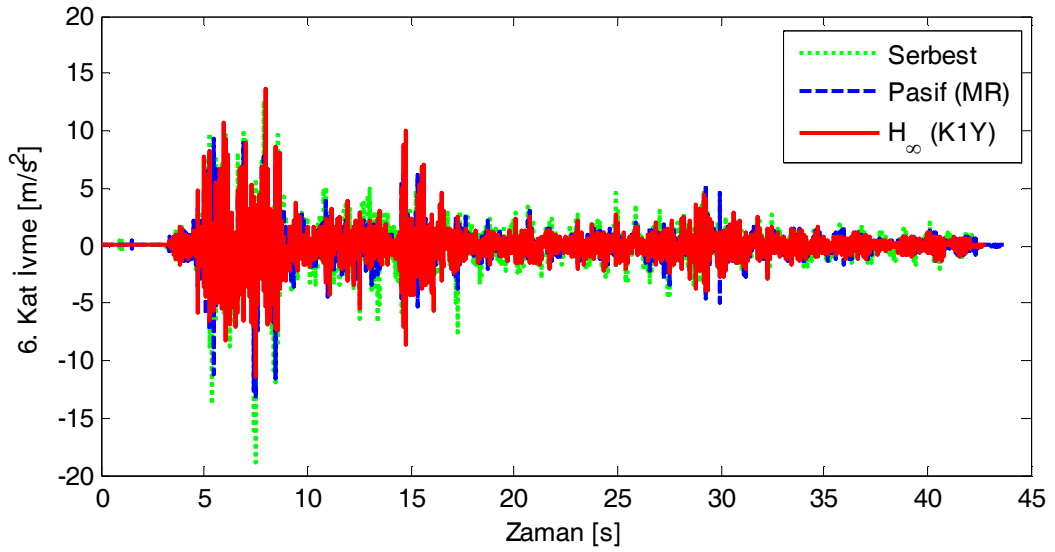
Şekil 5.17 Bina modelinin ivme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

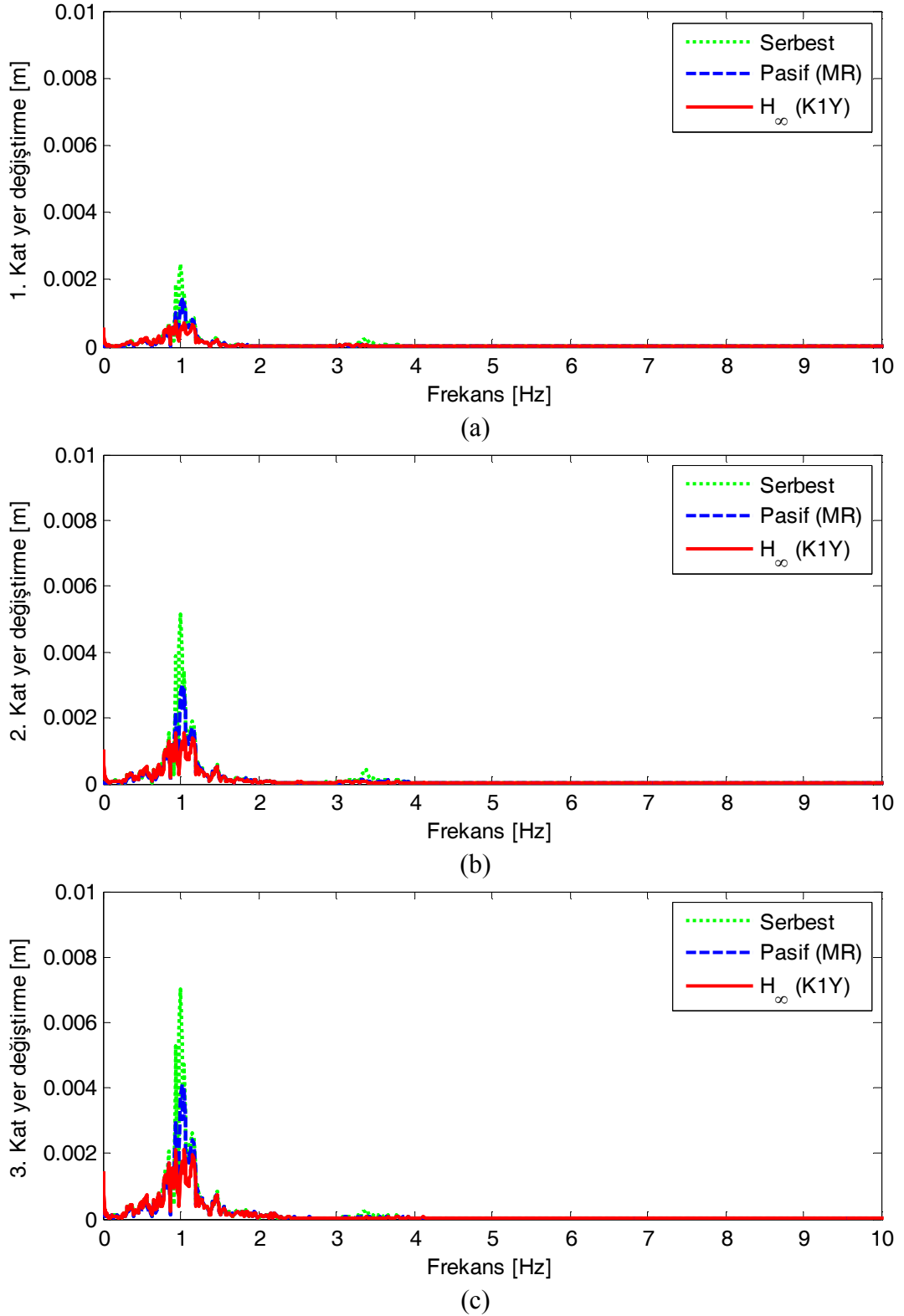


(c)

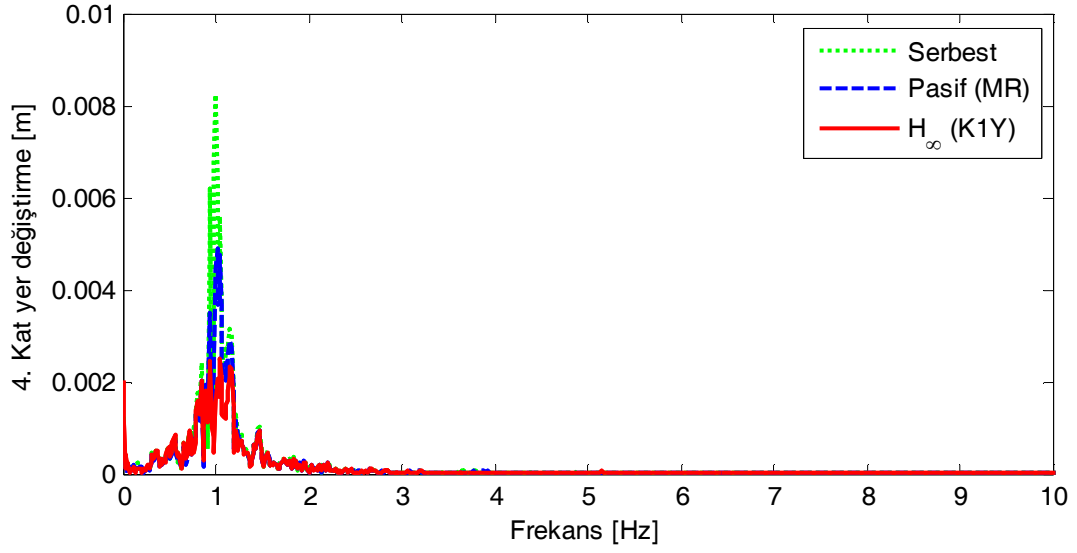
Şekil 5.18 Bina modelinin ivme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.5.1.3 Yer Değiştirme Frekans Cevapları

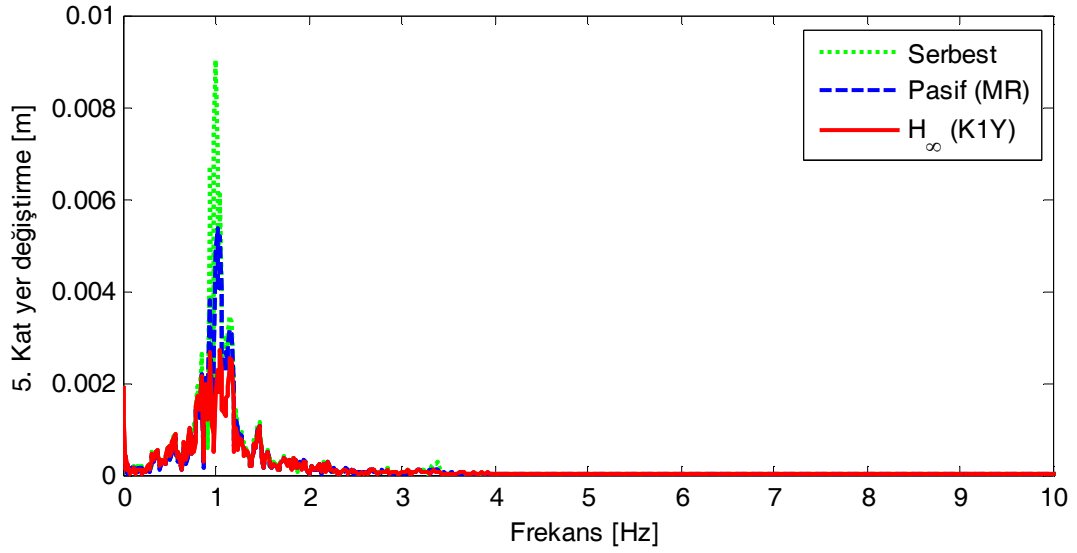
Frekans alanındaki yer değiştirme cevapları Şekil 5.19 ve 5.20’de verilmiştir. Frekans alanındaki grafikler tasarlanan kontrolörün deprem etkisi altındaki yapı modelinin titreşimlerinin bastırılmasında etkin olduğunu göstermektedir.



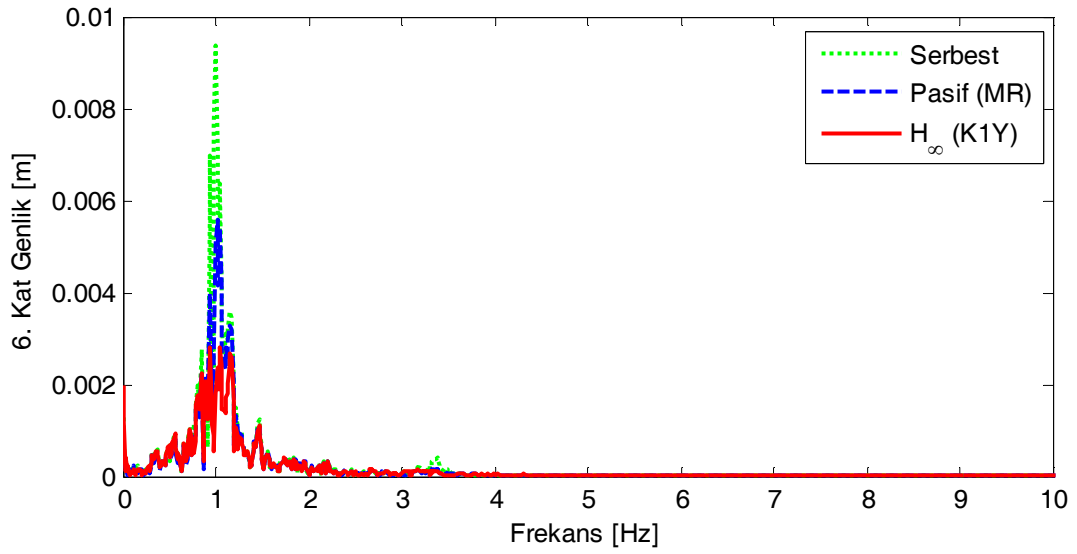
Şekil 5.19 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

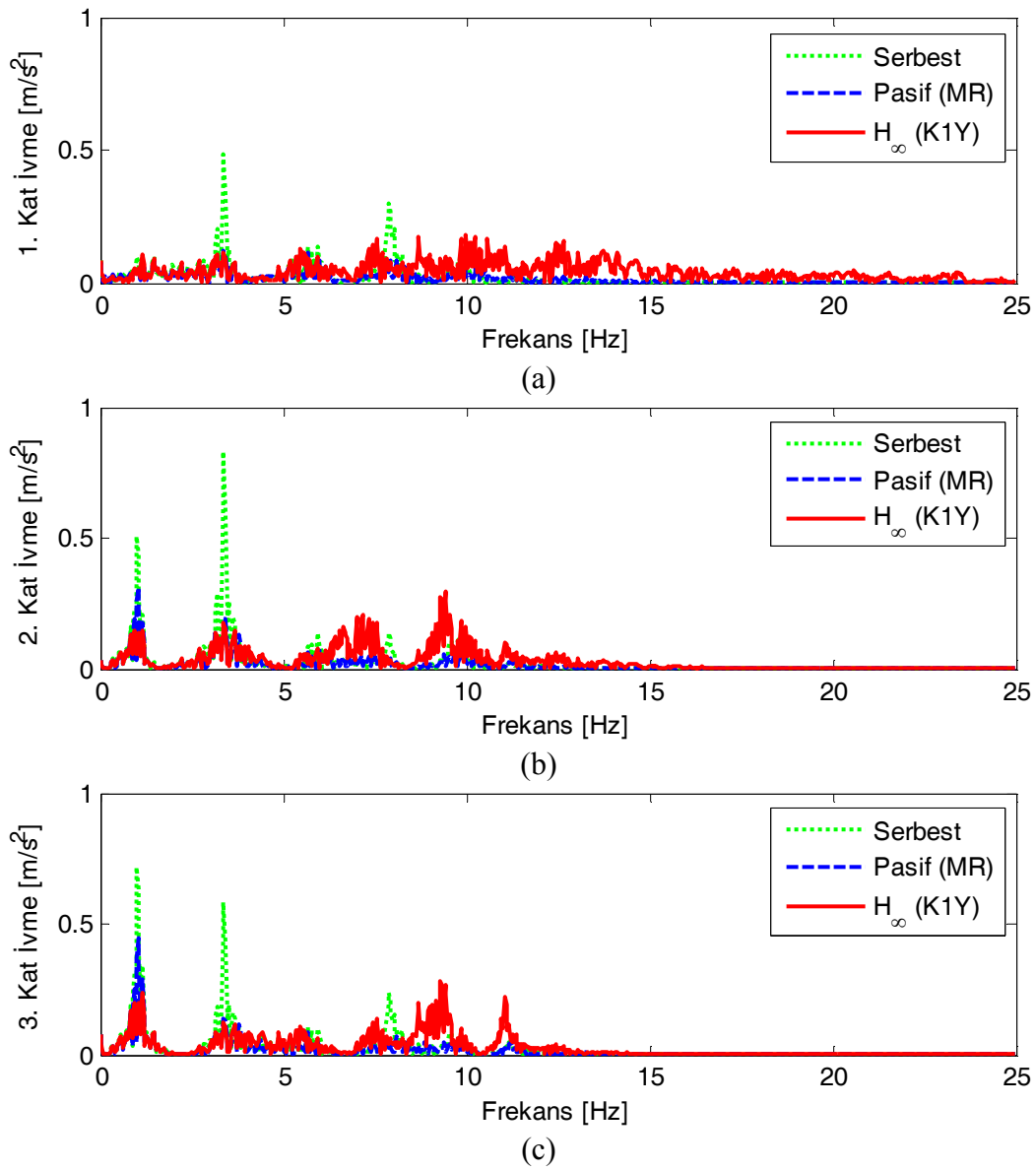


(c)

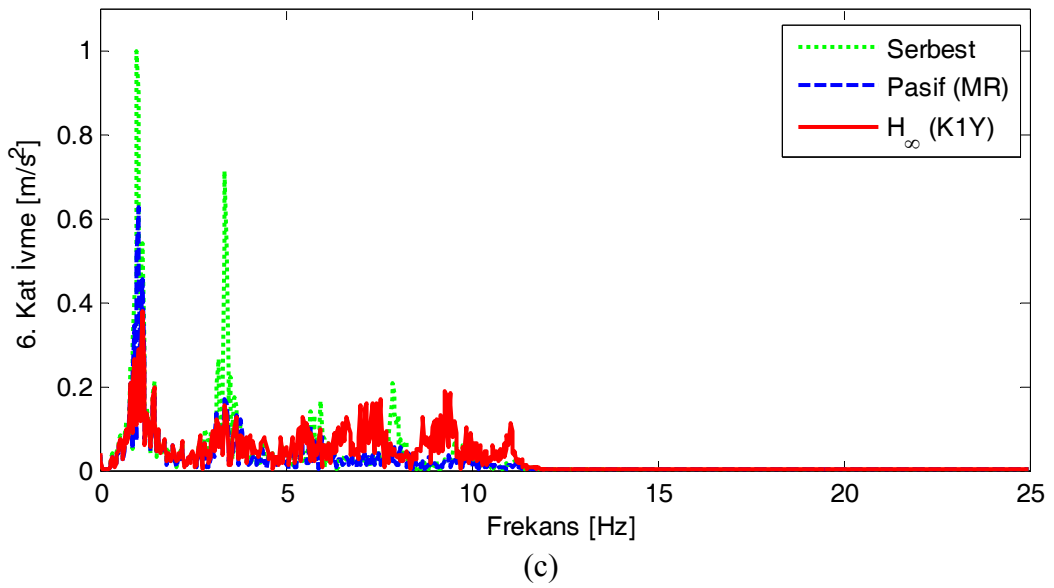
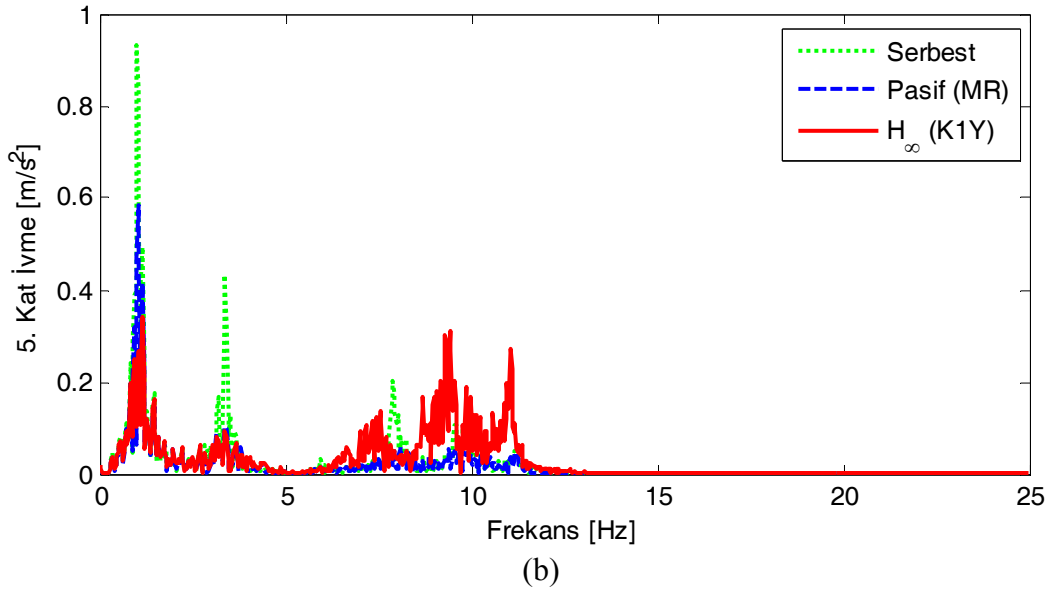
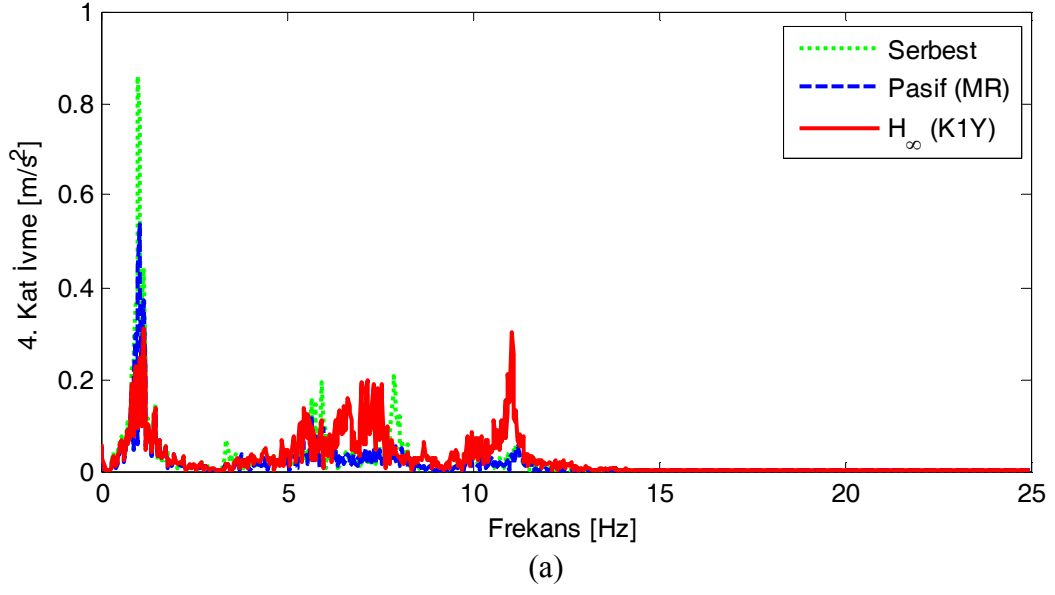
şekil 5.20 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.5.1.4 İvme Frekans Cevapları

Frekans alanındaki ivme cevapları Şekil 5.21 ve 5.22’de verilmiştir. Frekans alanındaki grafikler incelendiğinde özellikle MR sönümleyicinin bağlı olduğu 1. katta yüksek frekans bölgesinde genliklerde bir artmanın olduğu gözlenmektedir. Bu artış diğer katların frekans cevaplarında da söz konusudur. Bu artışın nedeni MR sönümleyiciye uygulanan gerilimin irdelenmesi ile ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.57’de verilen kontrolörün gerilim zaman eğrisi dikkate alındığında, gerilimin ani olarak maksimum ve minimum değerler arasında değiştiği açıkça görülmektedir. Bu ani değişim sonucunda yapısal sistemin ivmelerinde bozulmalar meydana gelmektedir.



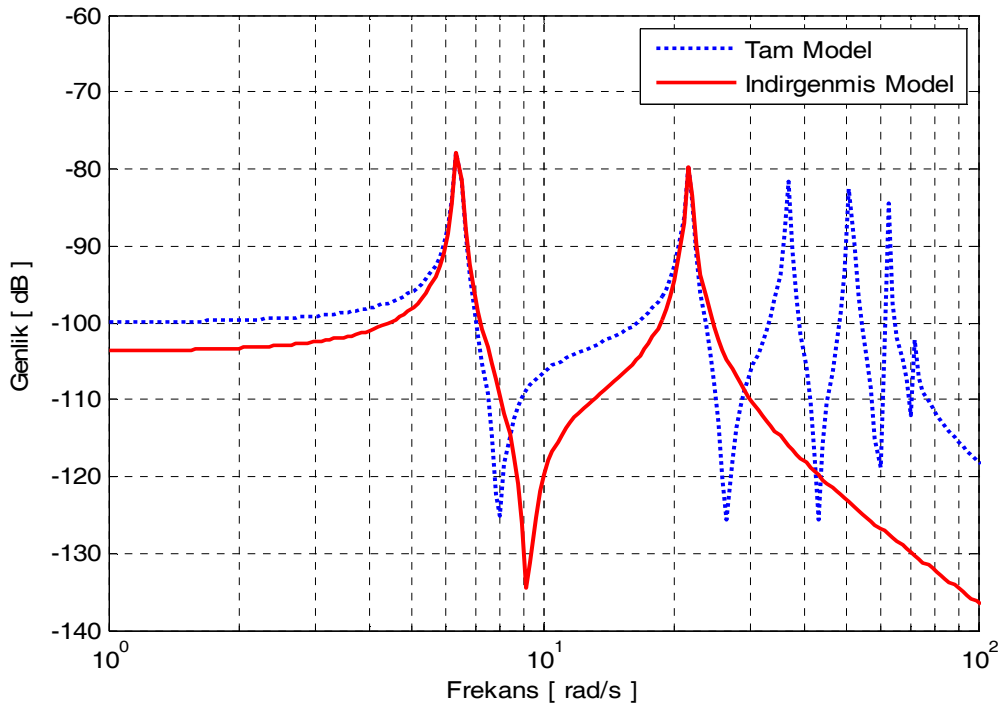
Şekil 5.21 Bina modelinin ivme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



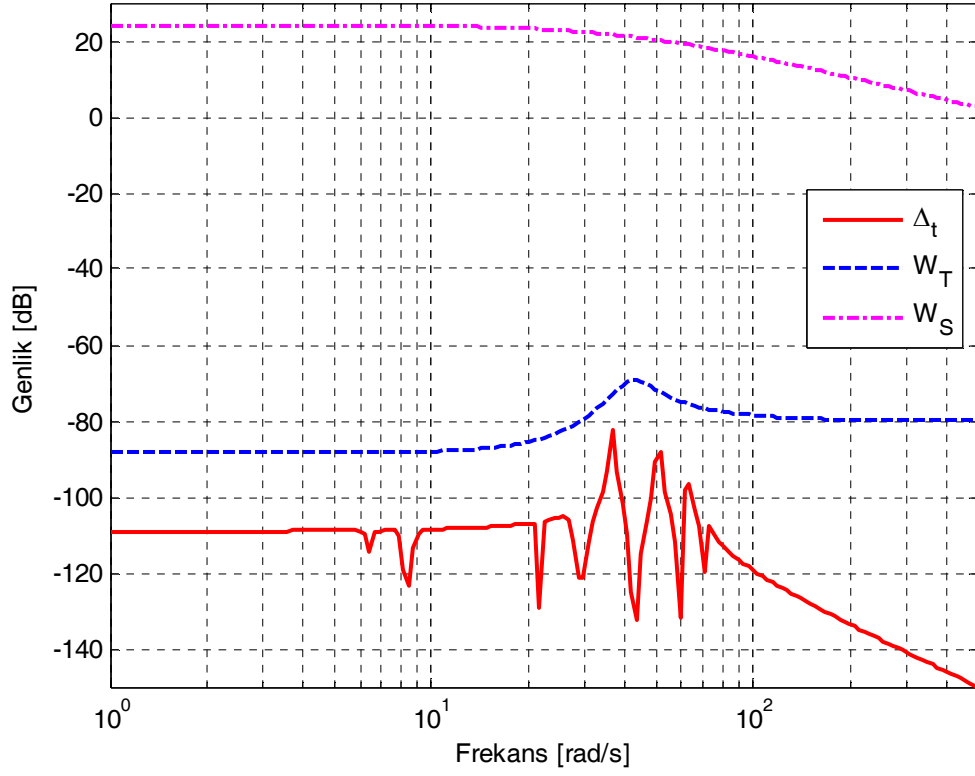
Şekil 5.22 Bina modelinin ivme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.5.2 Sistem Tanılama Modeli Kullanılarak H_∞ Kontrolörün Uygulanması (1. Kat Yer Değiştirme Geri Beslemeli)

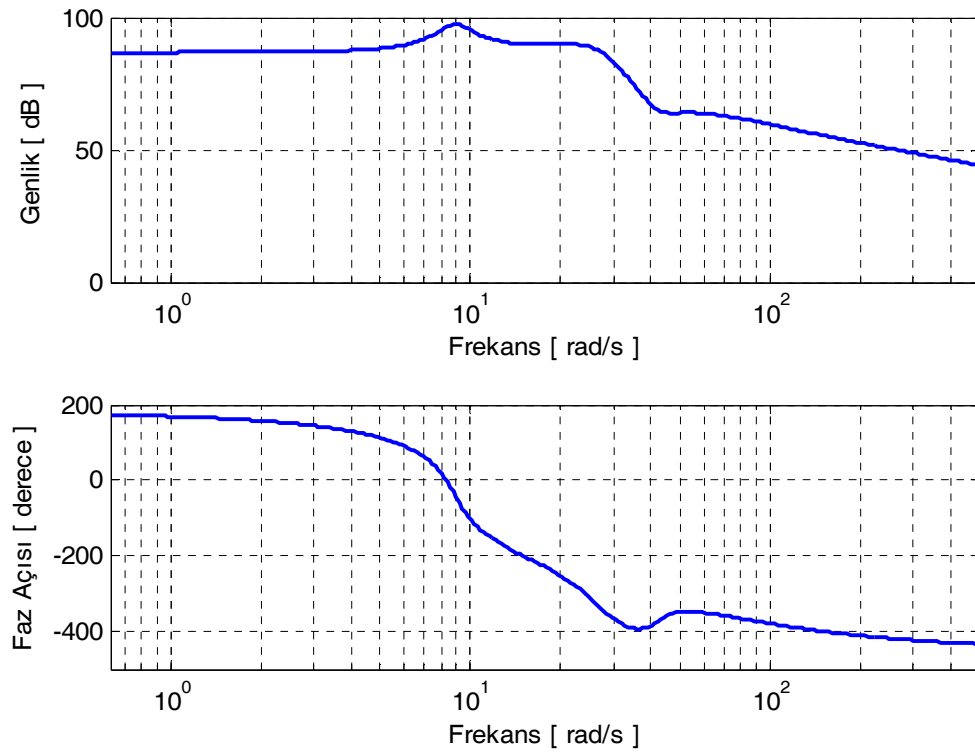
Tezin bu kısmında sistem tanılama ile elde edilmiş model üzerinden tasarlanan H_∞ kontrolör deneysel bina modeline MR sönümleyici yardımıyla uygulanmıştır. Geri besleme sinyali olarak 1. kat yer değiştirmesi alınmıştır. Kontrol tasarımı MATLAB yardımıyla gerçekleştirilmiş, elde edilen kontrol matrisleri yapısal sisteme deneysel olarak uygulanmıştır. MATLAB ortamında tasarım adımları sırasında ve kontrolün uygulanması sonucunda elde edilen grafikler Şekil 5.23-5.27 arasında verilmektedir. Tam ve indirgenmiş dereceli sistemin frekans cevapları Şekil 5.23'te verilmiştir. W_T filtresi ve modellenmeyen sistem dinamikleri Şekil 5.24'te görülmektedir. Kontrolörün frekans cevabı Şekil 5.25'te, açık ve kapalı çevrim sistem cevapları Şekil 5.26'da gösterilmektedir. İndirgenmiş sistemin açık ve kapalı çevrim cevabı ise Şekil 5.27'de verilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü üzere kontrolör 1. ve 2. modları bastırmakta ve diğer modları etkilememektedir.



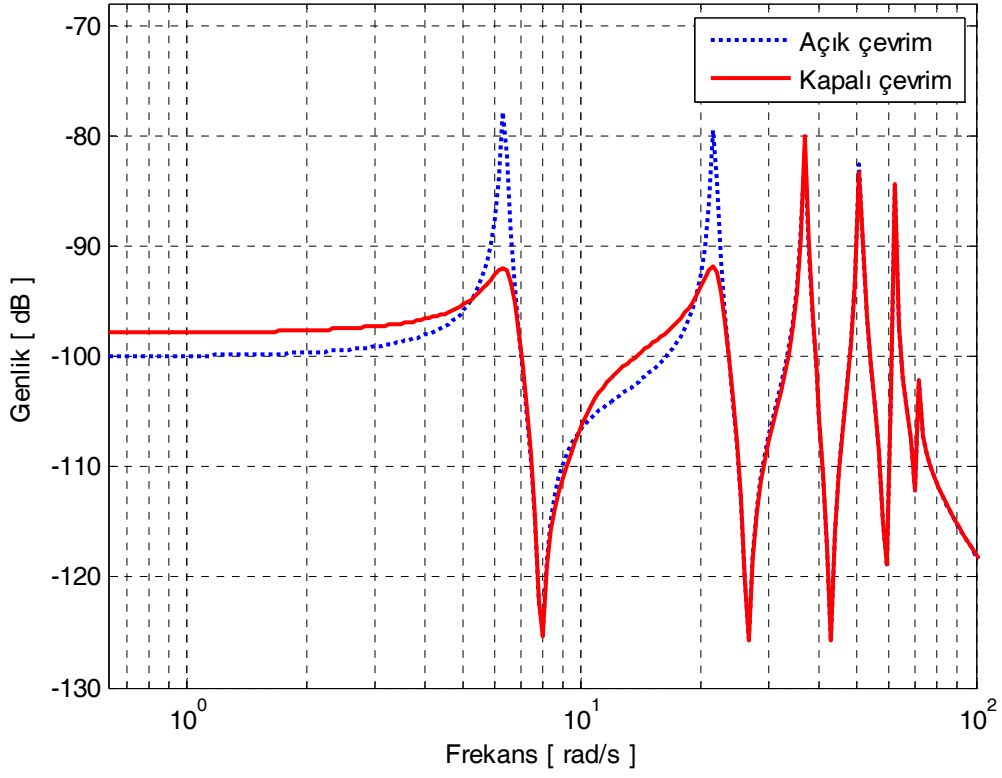
Şekil 5.23 Tam ve indirgenmiş sistem frekans cevapları.



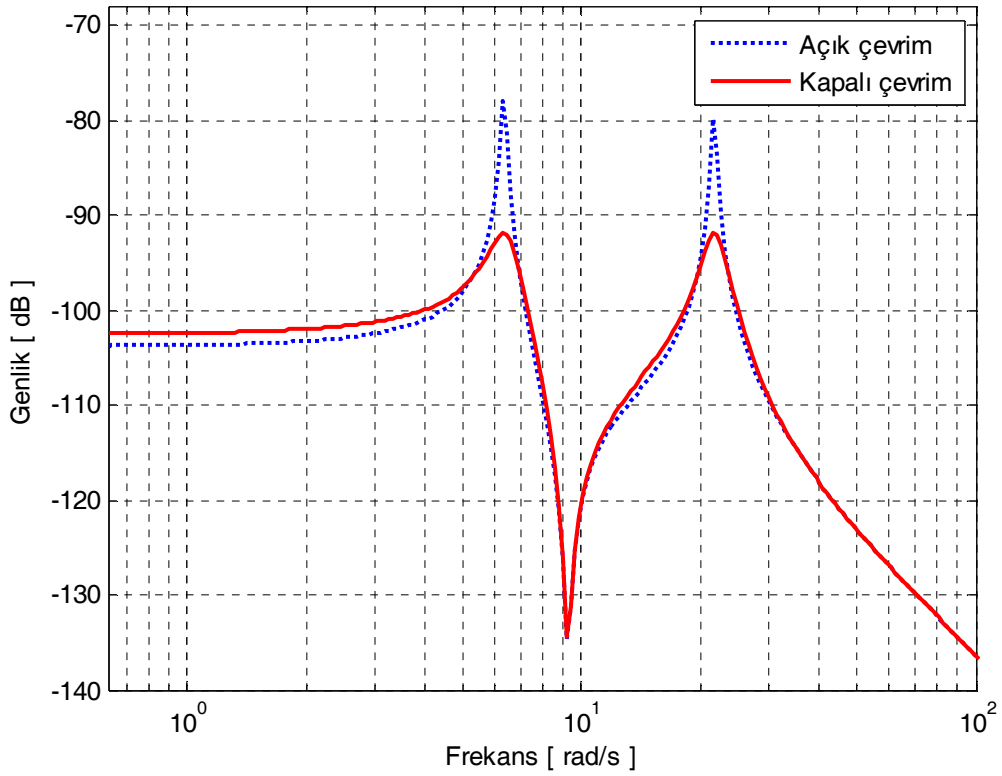
Şekil 5.24 Modellenmeyen dinamikler ve frekans şekillendirme filtreleri.



Şekil 5.25 H_∞ kontrol frekans cevabı.



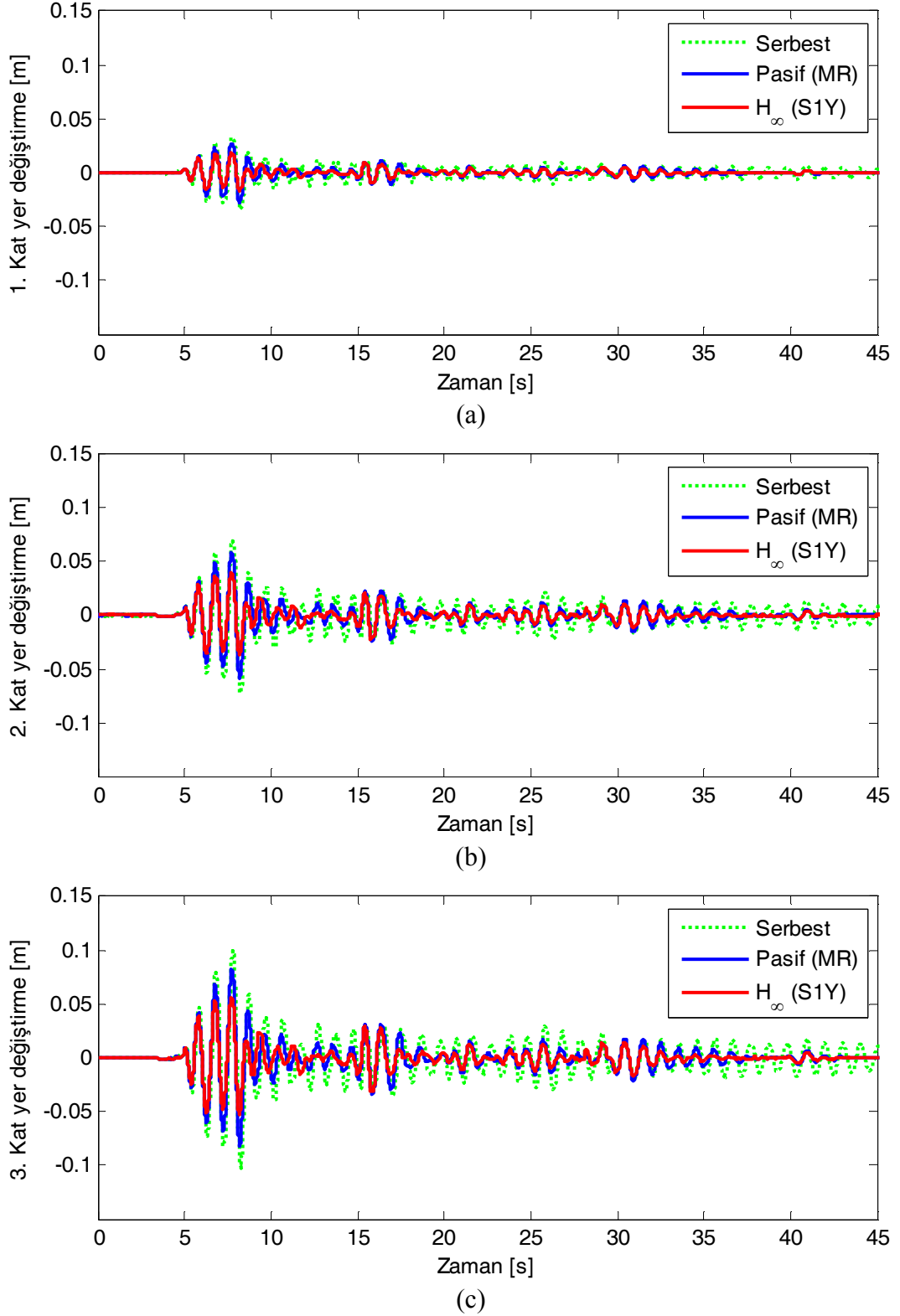
Şekil 5.26 Tam dereceli sistem açık ve kapalı çevrim cevapları.



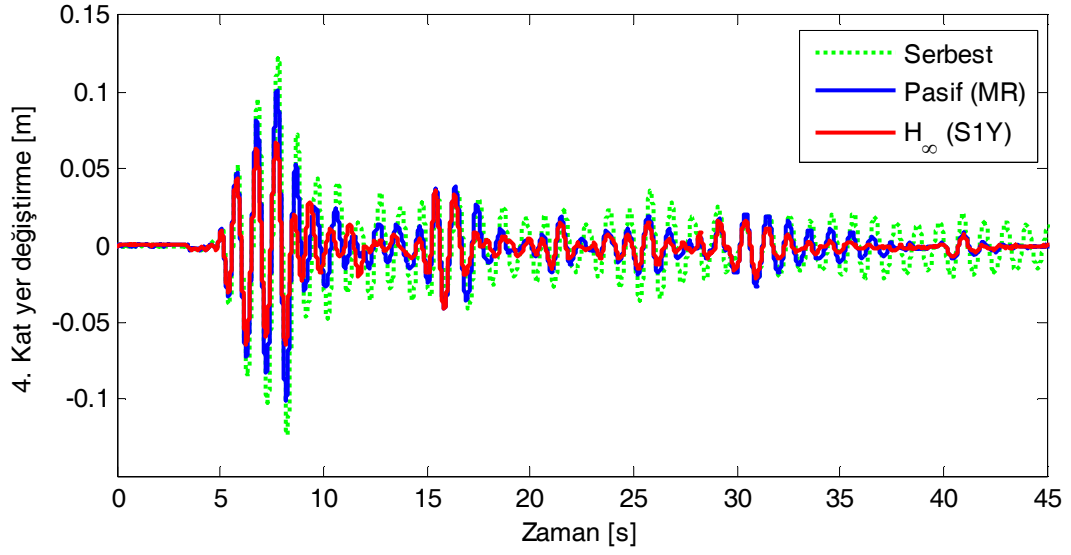
Şekil 5.27 İndirgenmiş dereceli sistem açık ve kapalı çevrim cevapları.

5.5.2.1 Yer Değiştirme Cevapları

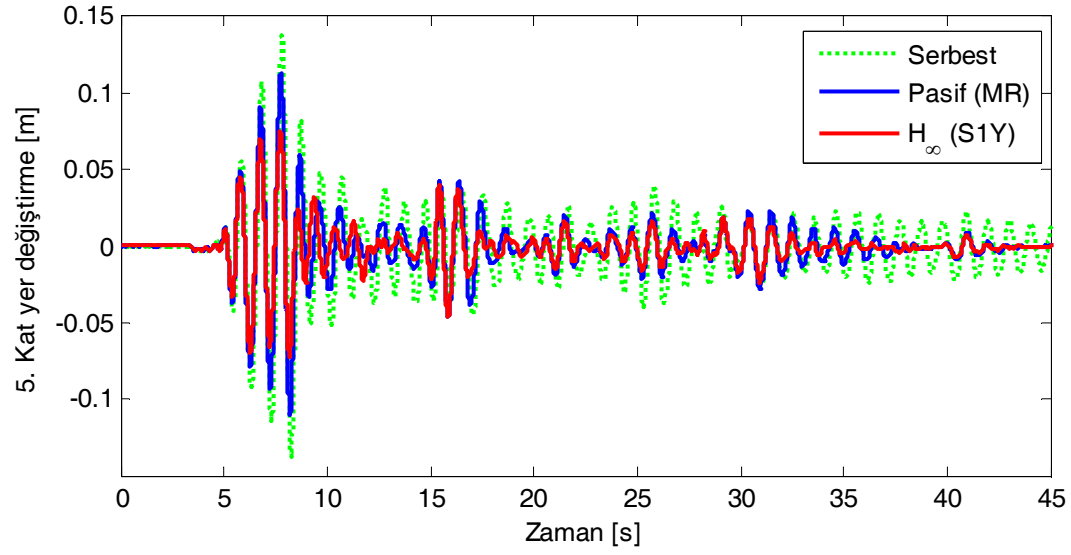
Şekil 5.28 ve 5.29’da zamana bağlı yer değiştirme cevapları görülmektedir. Zaman alanındaki grafikler incelendiğinde tasarlanan kontrolörün deprem etkisi altındaki yapı modelinin titreşimlerinin bastırılmasında etkin olduğu görülmektedir.



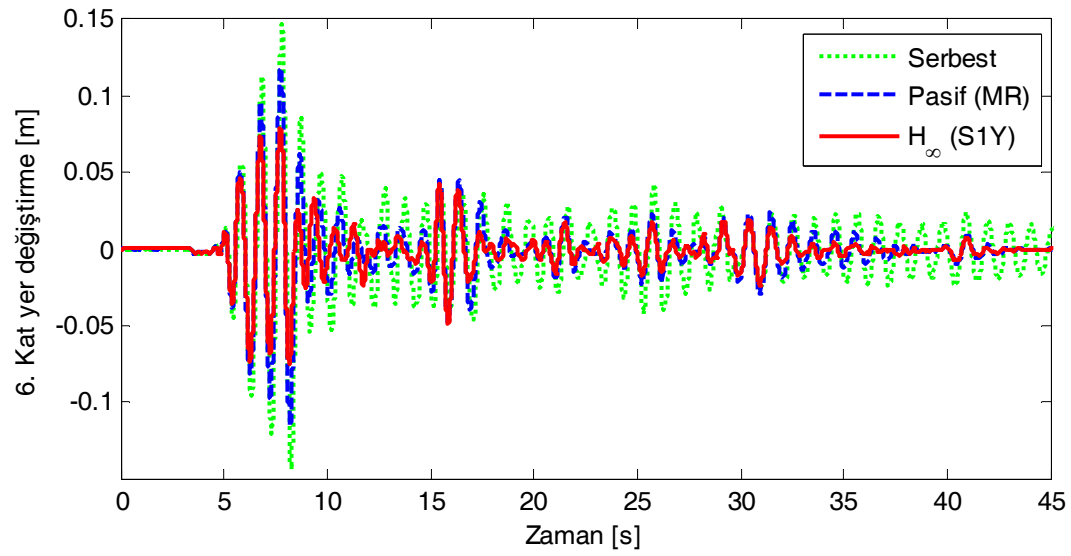
Şekil 5.28 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

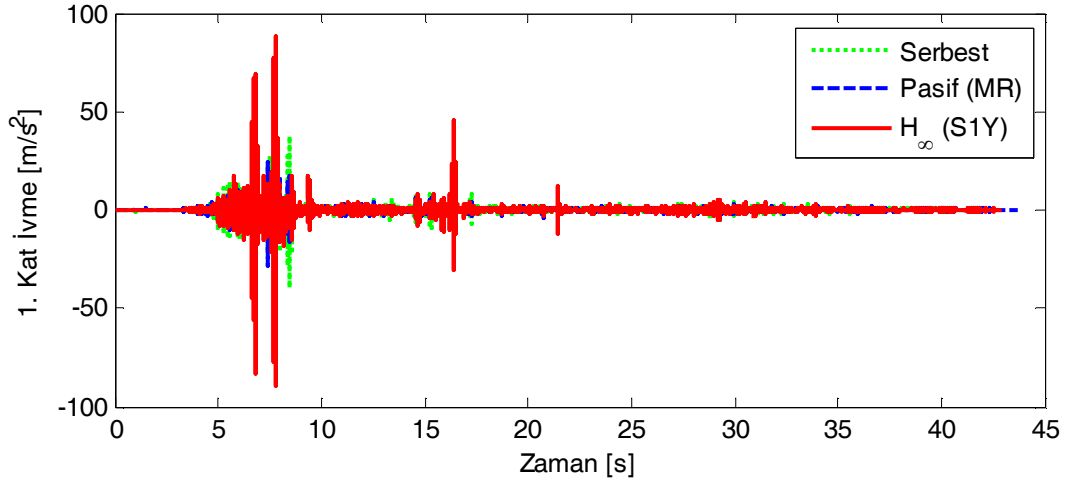


(c)

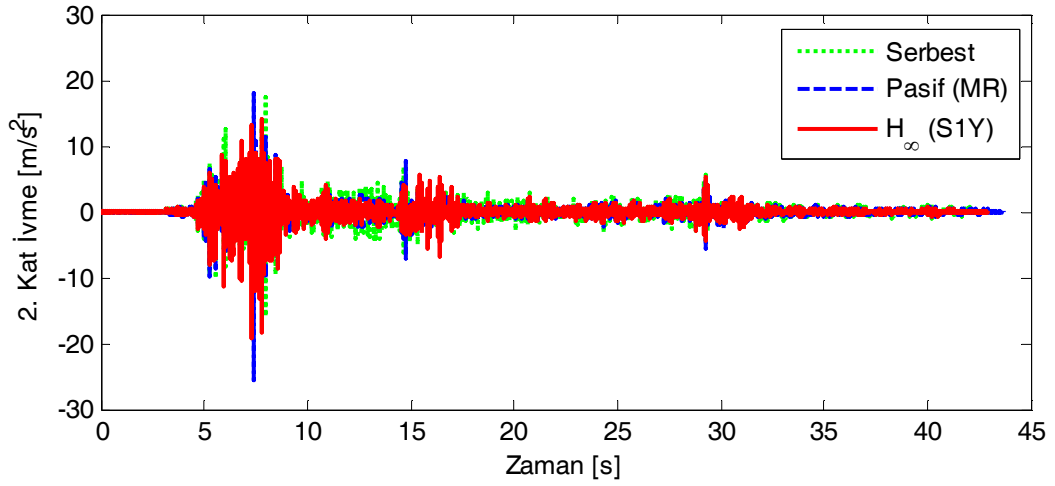
şekil 5.29 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.5.2.2 İvme Cevapları

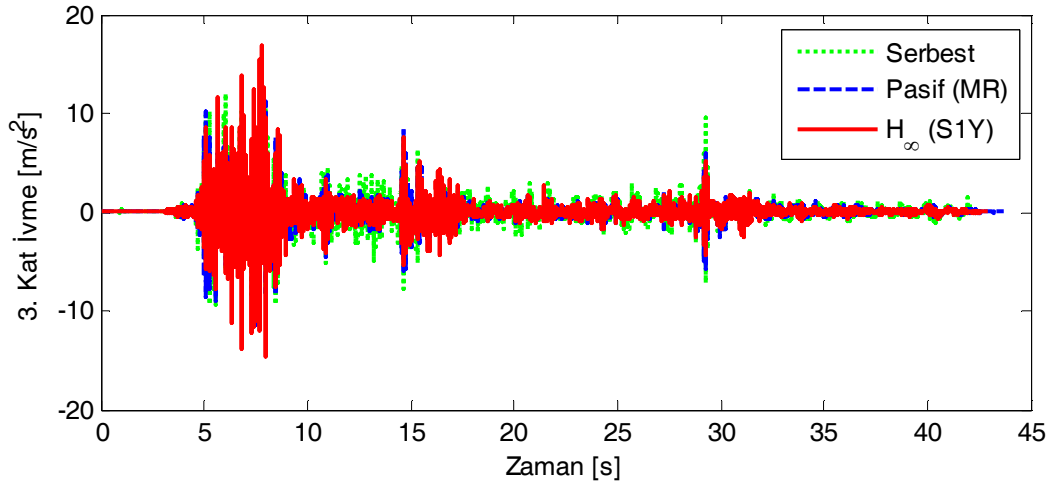
İvme cevapları ise Şekil 5.30 ve 5.31’de verilmektedir. İvme grafikleri incelendiğinde MR sönümleyicinin bağlı olduğu 1. kat haricinde tasarlanan kontrolörün genel olarak etkin olduğu görülmektedir.



(a)

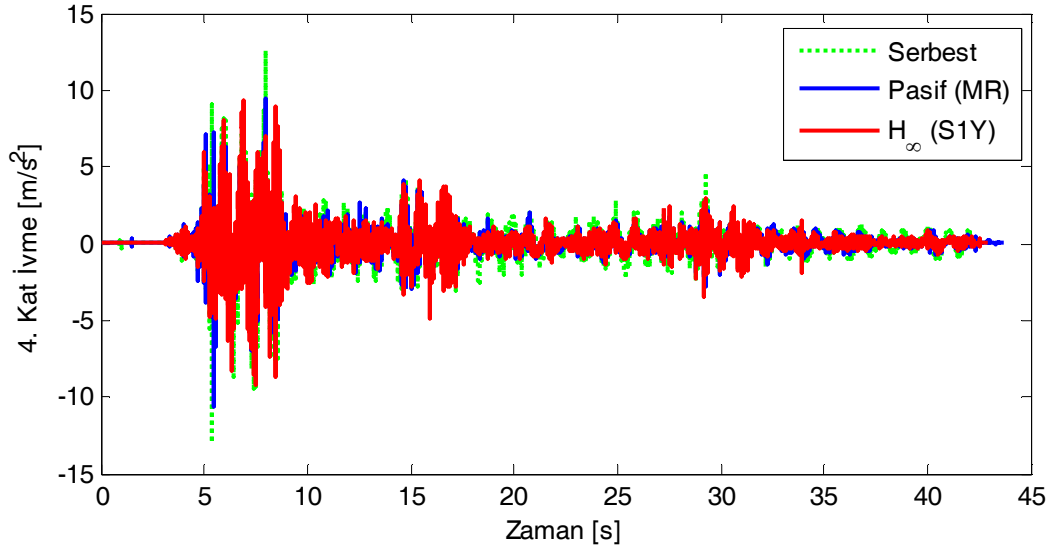


(b)

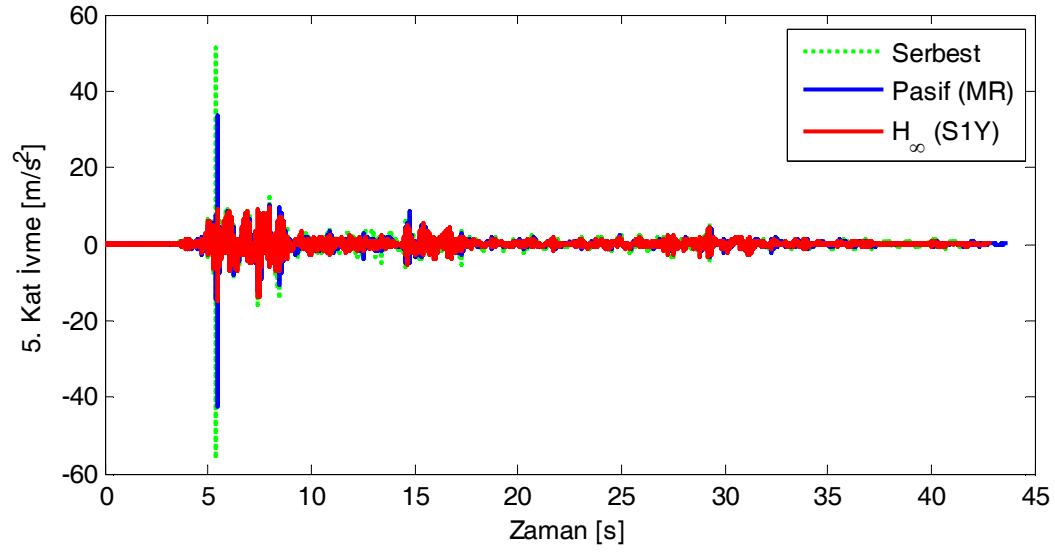


(c)

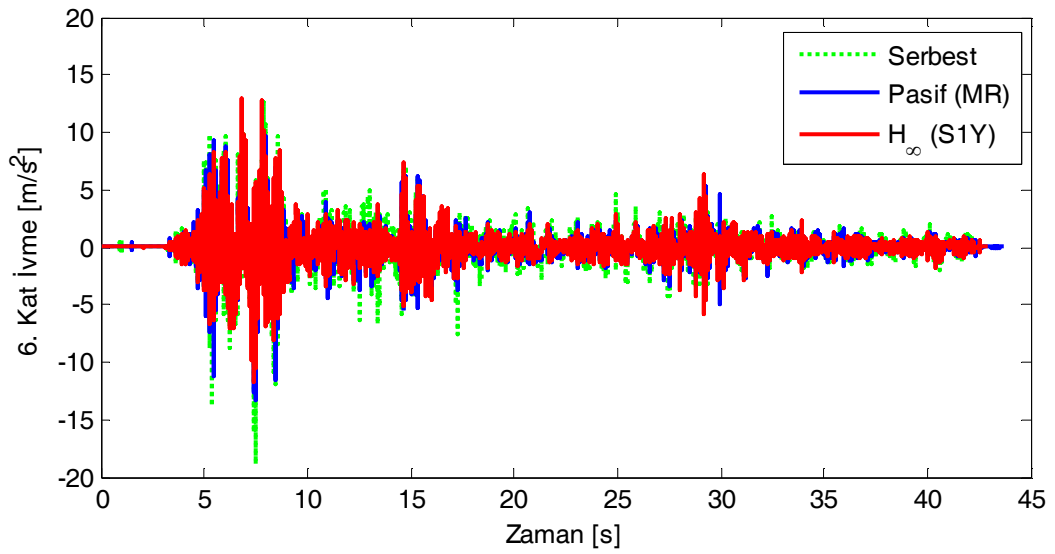
Şekil 5.30 Bina modelinin ivme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

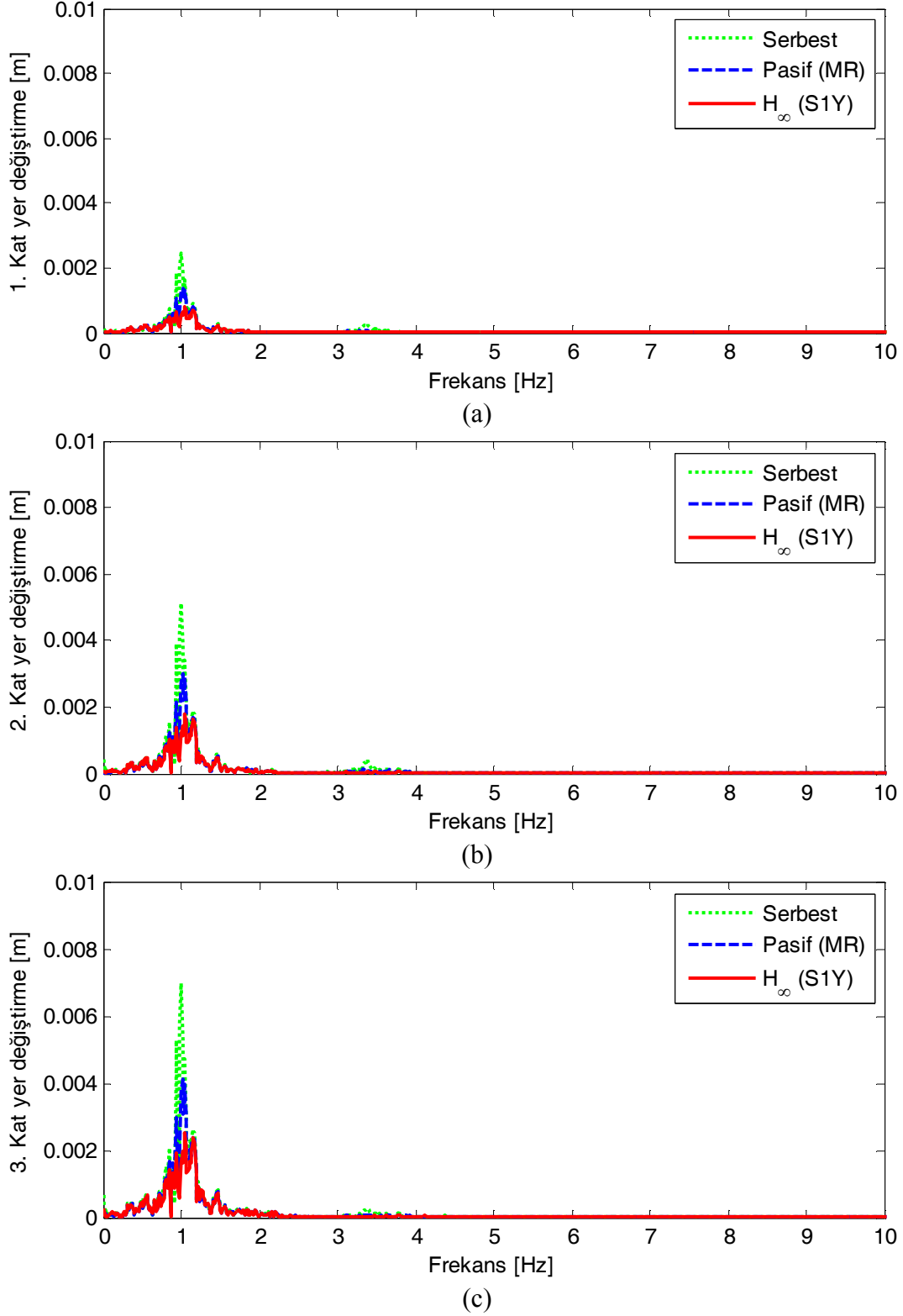


(c)

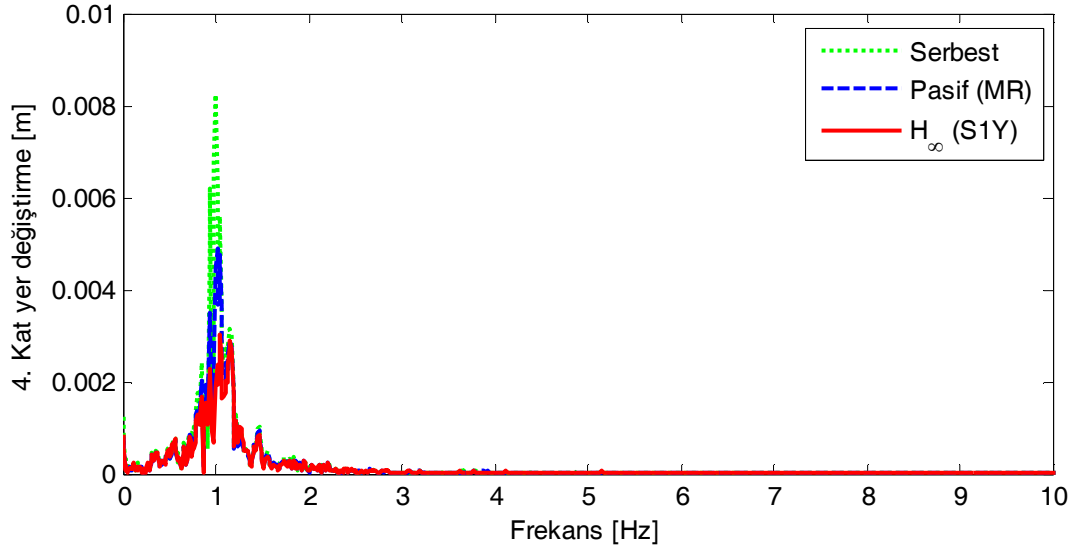
Şekil 5.31 Bina modelinin ivme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.5.2.3 Yer Değiştirme Frekans Cevapları

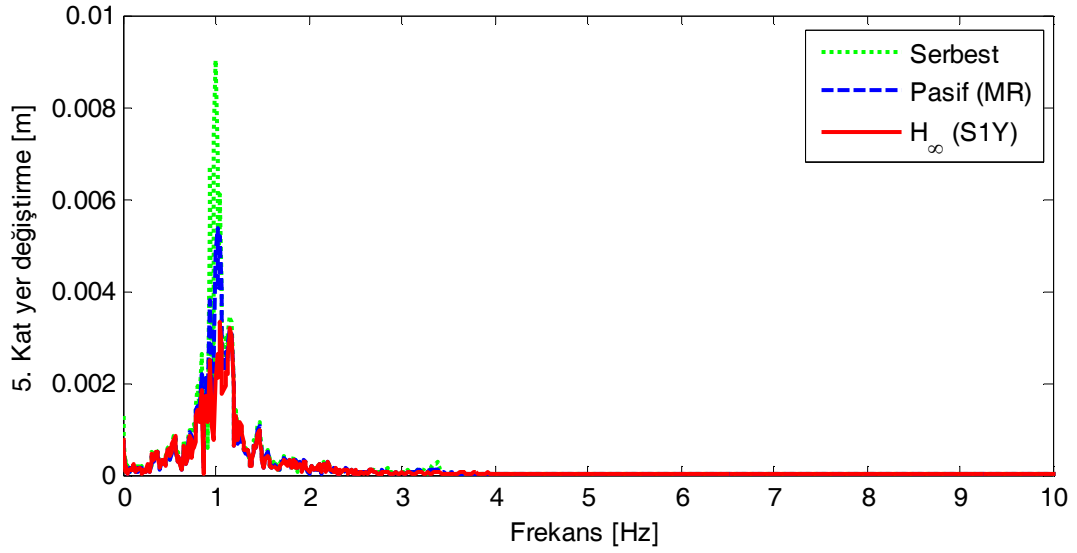
Frekans alanındaki yer değiştirme cevapları Şekil 5.32 ve 5.33'te verilmiştir. Frekans alanındaki grafikler incelendiğinde, tasarlanan kontrolörün deprem etkisi altındaki yapı modelinin titreşimlerinin bastırılmasında etkin olduğu görülmektedir.



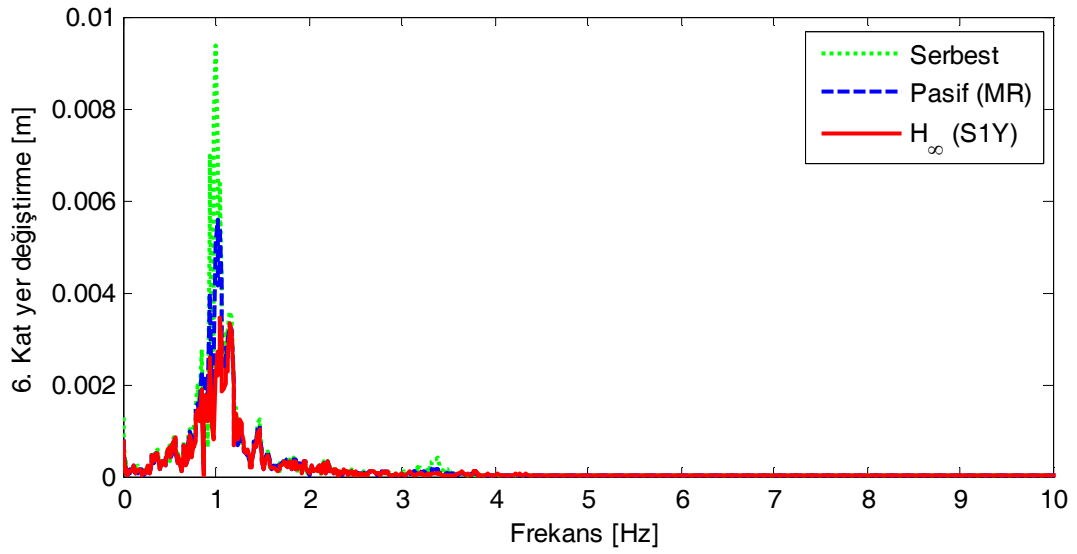
Şekil 5.32 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

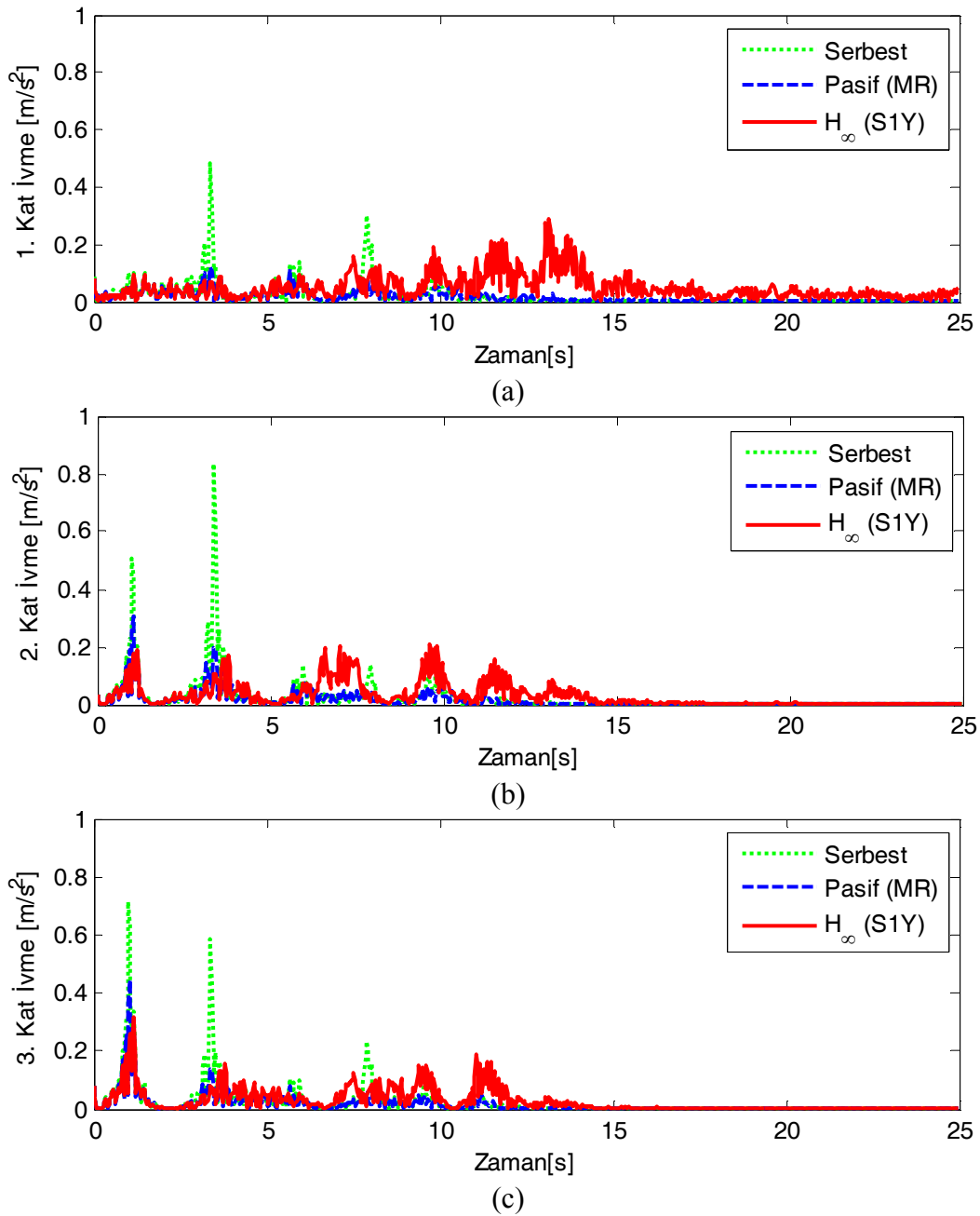


(c)

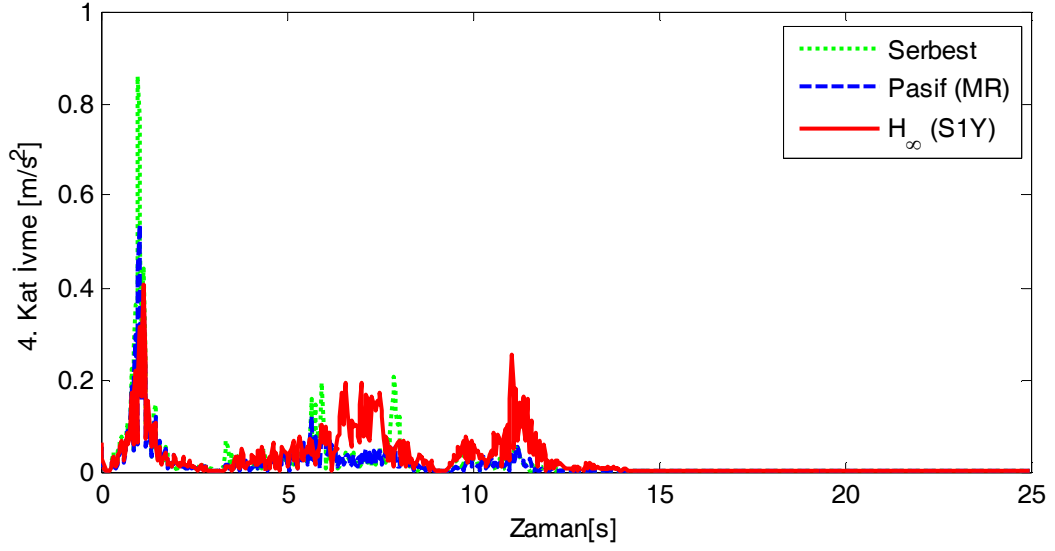
şekil 5.33 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.5.2.4 İvme Frekans Cevapları

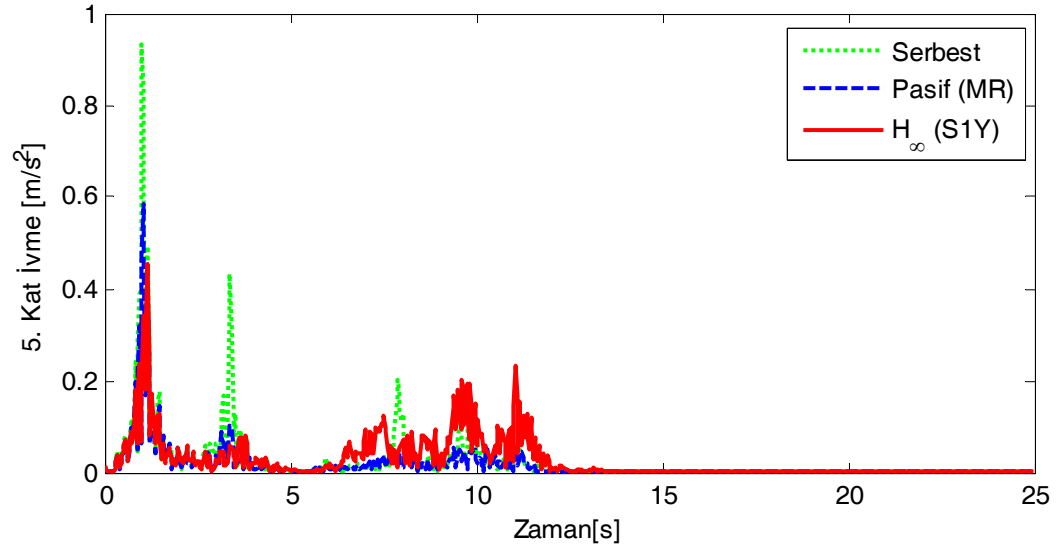
Frekans alanındaki ivme cevapları Şekil 5.34 ve 5.35'te verilmiştir. Frekans alanındaki grafikler incelendiğinde özellikle MR sönümleyicinin bağlı olduğu 1. katta yüksek frekans bölgesinde genliklerde bir artmanın olduğu gözlenmektedir. Bu artış diğer katların frekans cevaplarında da söz konusudur. Bu artışın nedeni MR sönümleyiciye uygulanan gerilimin irdelenmesi ile ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.57'de verilen kontrolörün gerilim zaman eğrisi dikkate alındığında, gerilimin ani olarak maksimum ve minimum değerler arasında değiştiği açıkça görülmektedir. Bu ani değişim sonucunda yapısal sistemin ivmelerinde bozulmalar meydana gelmektedir.



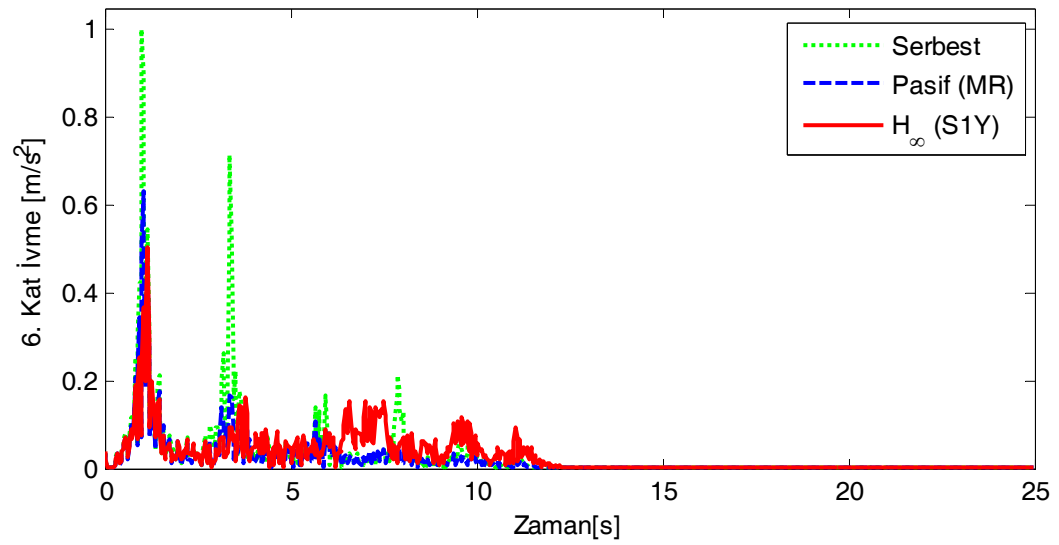
Şekil 5.34 Bina modelinin ivme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

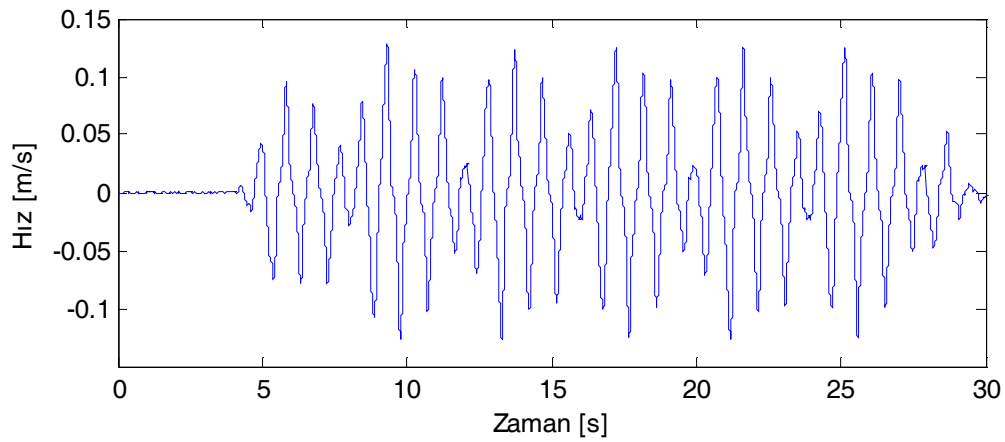


(c)

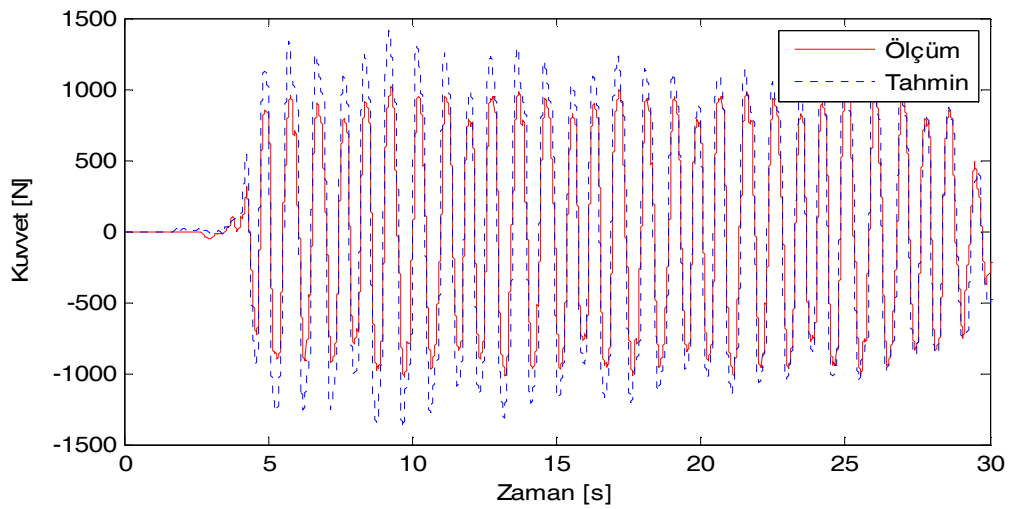
Şekil 5.35 Bina modelinin ivme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.6 Yarı Aktif Adaptif Kontrolörün Uygulanması

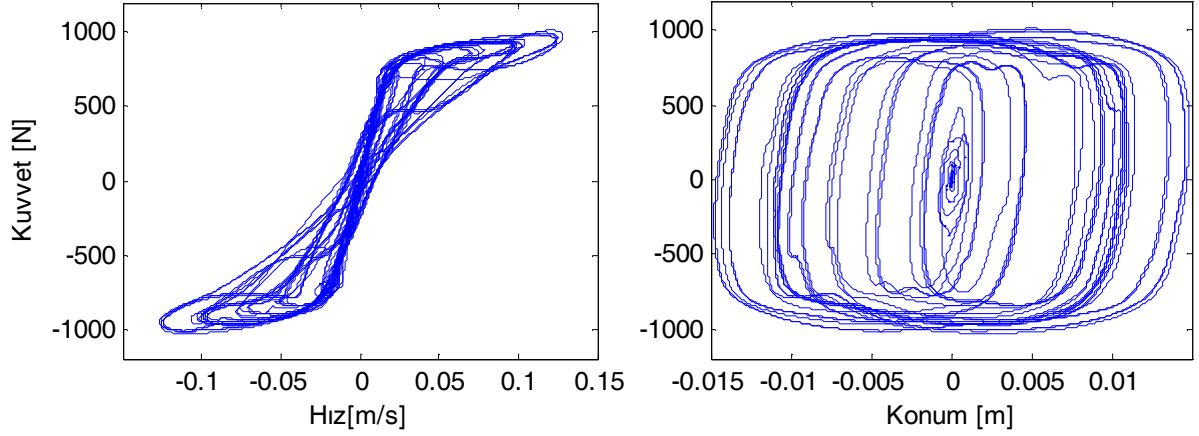
Bu bölümde yarı aktif adaptif kontrolörün altı katlı bina modeline uygulanması ve elde edilen sonuçlar verilecektir. MR sönümleyicinin parametre tahminlerini belirlemek için bir ön deney çalışması yapılmıştır. Bu deneyde MR sönümleyiciye Şekil 5.36'da gösterilen hız girişi uygulanmıştır. MR sönümleyicinin giriş gerilimi ise, 2 Volt olarak ayarlanmıştır. MR sönümleyicinin tahmin edilen ve ölçülen kuvvet eğrileri, Şekil 5.37'te gösterilmektedir. Ayrıca, histerezis karakter eğrileri Şekil 5.38'de verilmiştir. Parametre tahminleri ise Çizelge 5.3'te verilmektedir. Bina parametrelerinin tahminlerinin doğruluğunun belirlenmesinde ise sistem tanılama ile elde edilen parametreler referans alınacaktır.



Şekil 5.36 Giriş hız grafiği



Şekil 5.37 MR sönümleyicinin kuvvet tahmini



Şekil 5.38 MR sönümleyicinin histerezis kuvvet karakteristiği

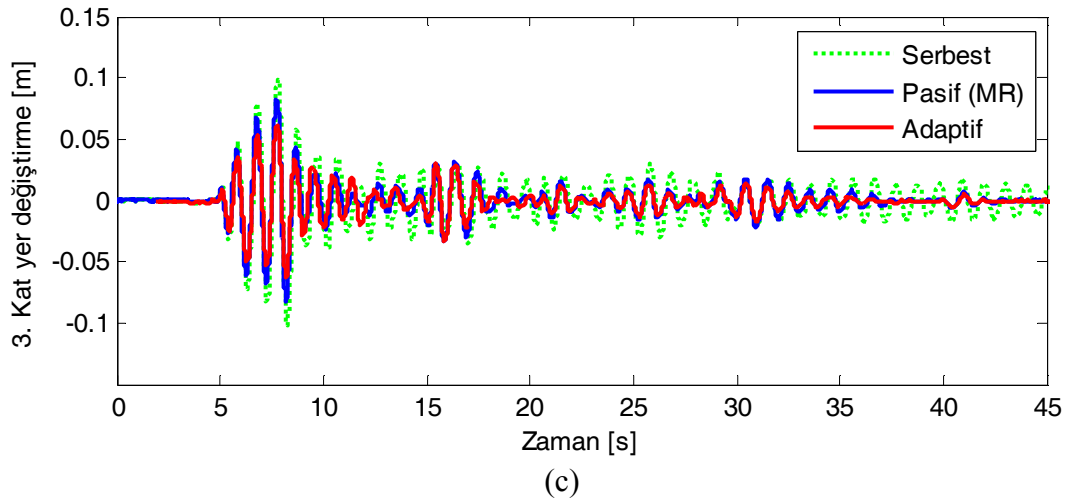
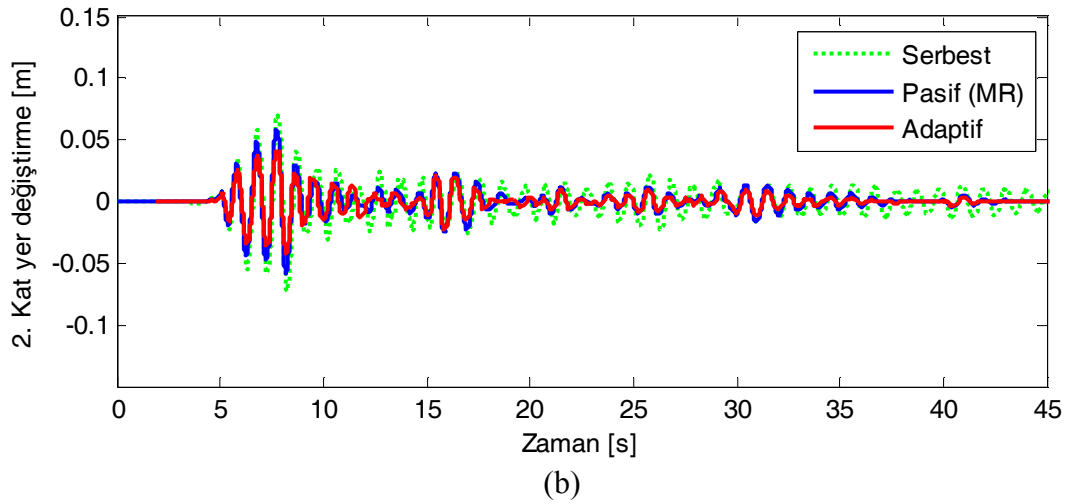
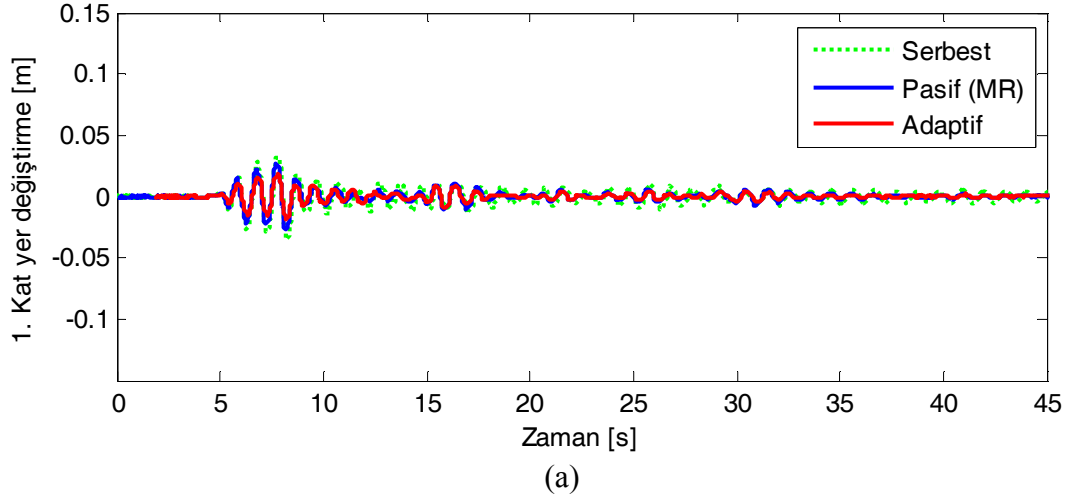
Çizelge 5.3 MR sönümleyici parametre tahmini

$\hat{\theta}_{11}$	$\hat{\theta}_{12}$	$\hat{\theta}_{13}$	$\hat{\theta}_{21}$	$\hat{\theta}_{22}$
76000	320000	4500	1156.5	315

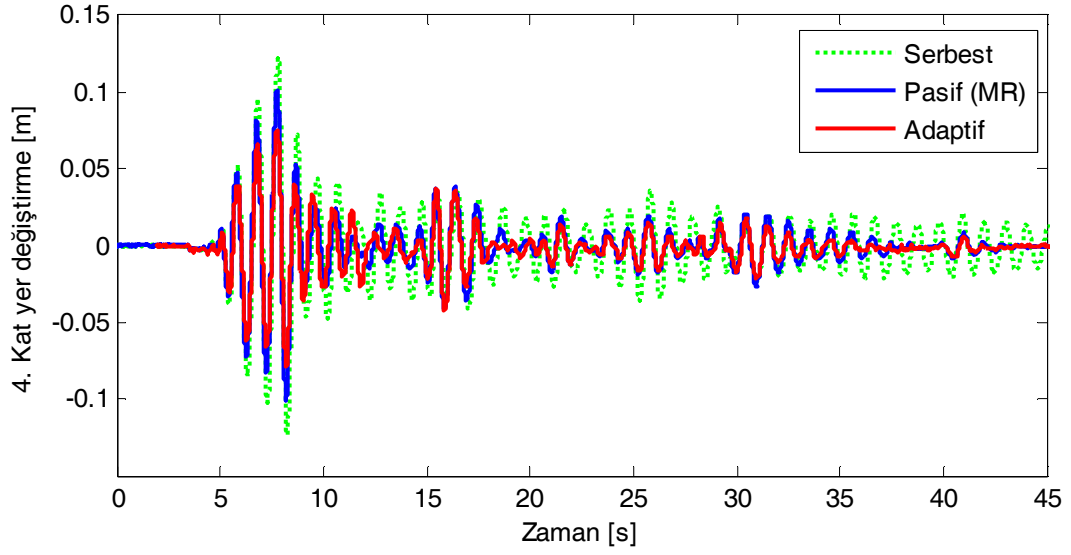
Tasarlanan adaptif kontrol MR sönümleyicinin gerilimini direk olarak belirlemektedir. Giriş geriliminin paydasının sıfıra gitmesini engellemek için kullanılan çok küçük sayı, $\varepsilon = 0.001$ olarak seçilmiştir. Sistemde kullanılan başlangıç koşulları kütle parametrelerinin tahmini için $\phi_i(0) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) şeklindedir. Sönüm parametrelerinin tahmini için başlangıç koşulları $\phi_j(0) = 50$ ($j = 7, 8, \dots, 12$) olarak alınmıştır. Rijitlik katsayıları için ise başlangıç koşulları $\phi_k(0) = 175000$ ($k = 13, \dots, 18$) şeklindedir. MR sönümleyici için başlangıç koşulları $\theta_{ij} = [10^5 \quad 4 \times 10^5 \quad 3.5 \times 10^3 \quad 2 \times 10^3 \quad 10^3]$ şeklindedir. Tasarım için kullanılan filtre katsayı matrisi $\alpha = \text{diag}(1 \quad 100 \quad 100 \quad 100 \quad 100 \quad 100)$ şeklindedir. Kontrol kazanç matrisi $K = \text{diag}(10^5 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1)$ şeklindedir. Yapısal sistemin parametrelerinin adaptasyonu için kullanılan katsayı matrisi, $\Gamma_\phi = \text{diag}(15000 \quad 1.5 \quad 0.7 \quad 0.475 \quad 0.3650 \quad 0.3785 \quad 594 \quad 75 \quad 150 \quad 232 \quad 468 \quad 7 \quad 365 \times 10^5 \quad 1.65 \times 10^5 \quad 3.876 \times 10^5 \quad 5.55 \times 10^5 \quad 2 \times 10^5 \quad 0.16575 \times 10^5)$ şeklindedir. MR sönümleyicinin parametrelerinin adaptasyonu için kullanılan katsayı matrisi $\Gamma_2 = \text{diag}(26500 \quad 18000)$, adaptasyon katsayıları ise $\gamma_1 = 235 \times 10^5$, $\gamma_2 = 665 \times 10^5$ ve $\gamma_3 = 350 \times 10^5$ şeklindedir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen zaman ve frekans cevapları aşağıda verilmektedir.

5.6.1 Yer Değiştirme Cevapları

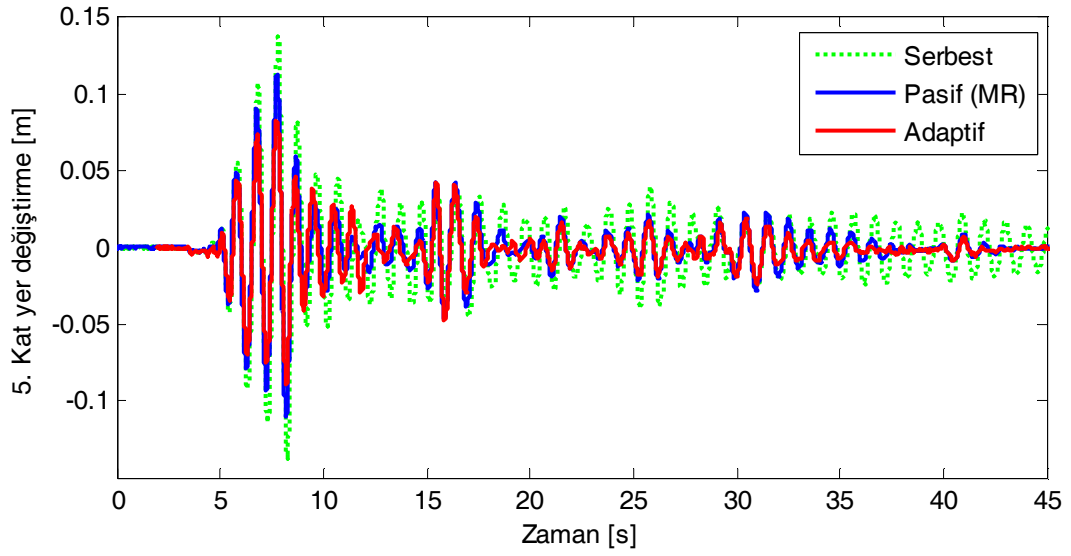
Şekil 5.39 ve 5.40’ta zamana bağlı yer değiştirme cevapları görülmektedir. Zaman alanındaki grafikler tasarlanan kontrolörün deprem etkisi altındaki yapı modelinin titreşimlerinin bastırılmasında etkin olduğunu göstermektedir.



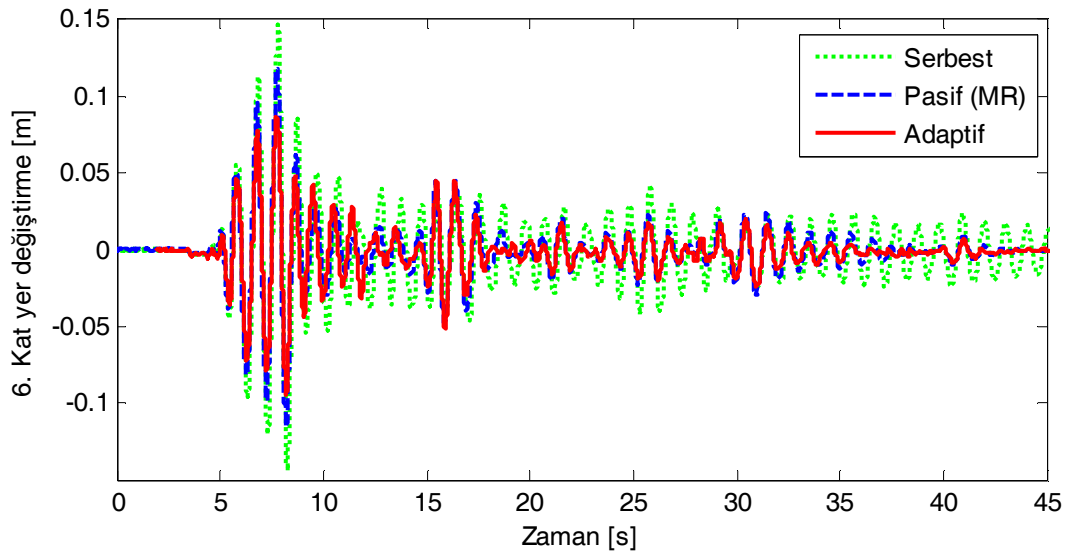
Şekil 5.39 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

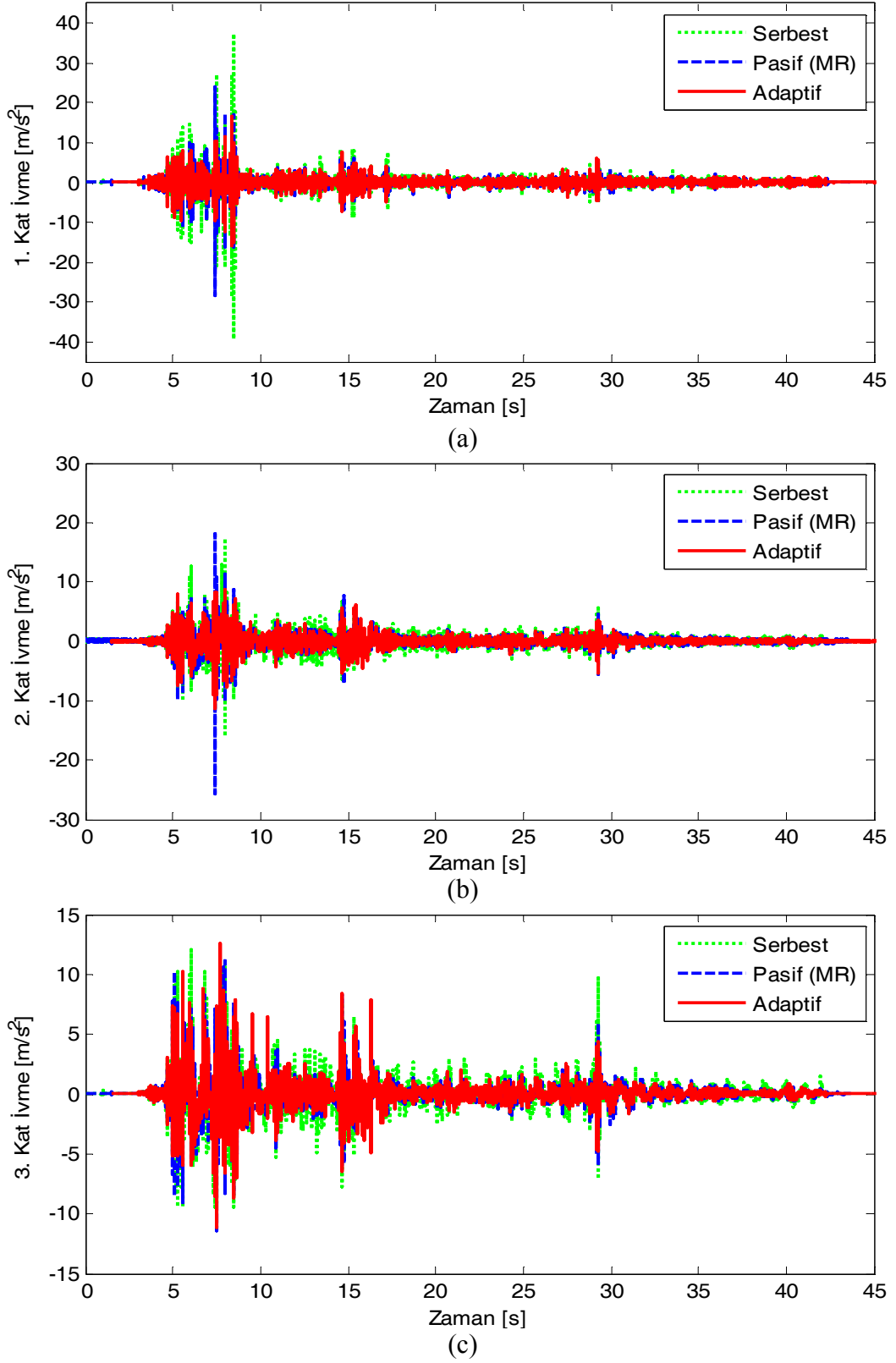


(c)

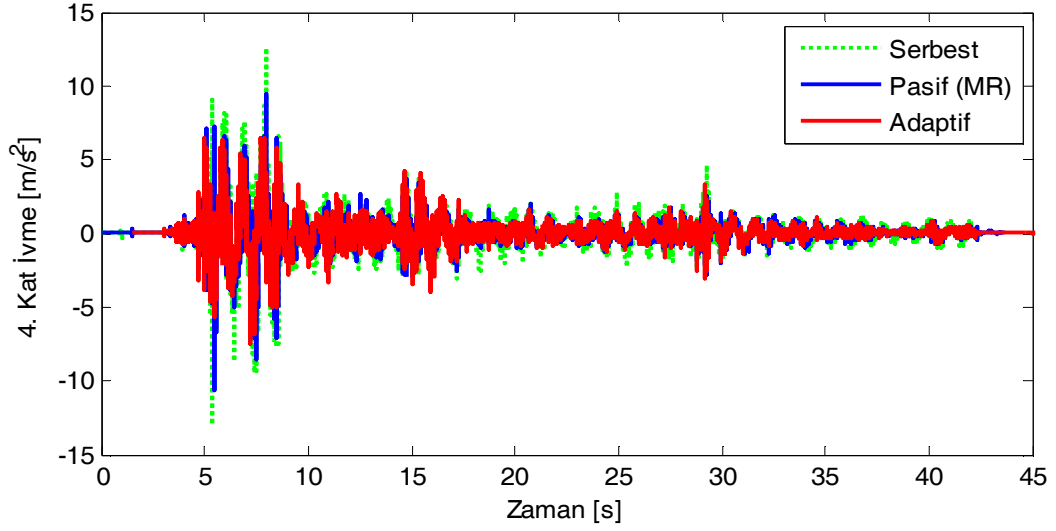
şekil 5.40 Bina modelinin yer değiştirme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.6.2 İvme Cevapları

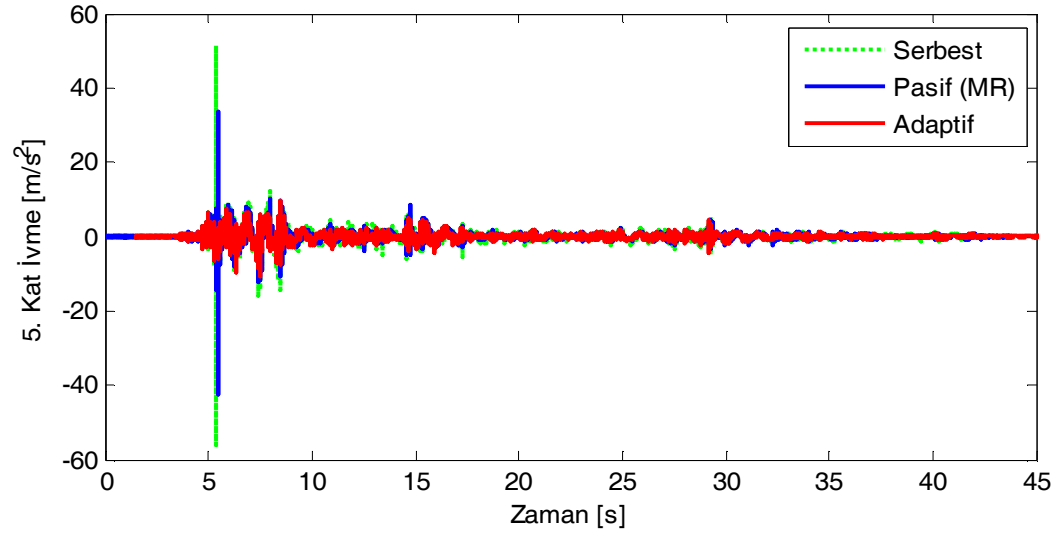
İvme cevapları ise Şekil 5.41 ve 5.42’de verilmektedir. İvme grafikleri incelendiğinde tasarlanan kontrolörün etkin olduğu görülmektedir.



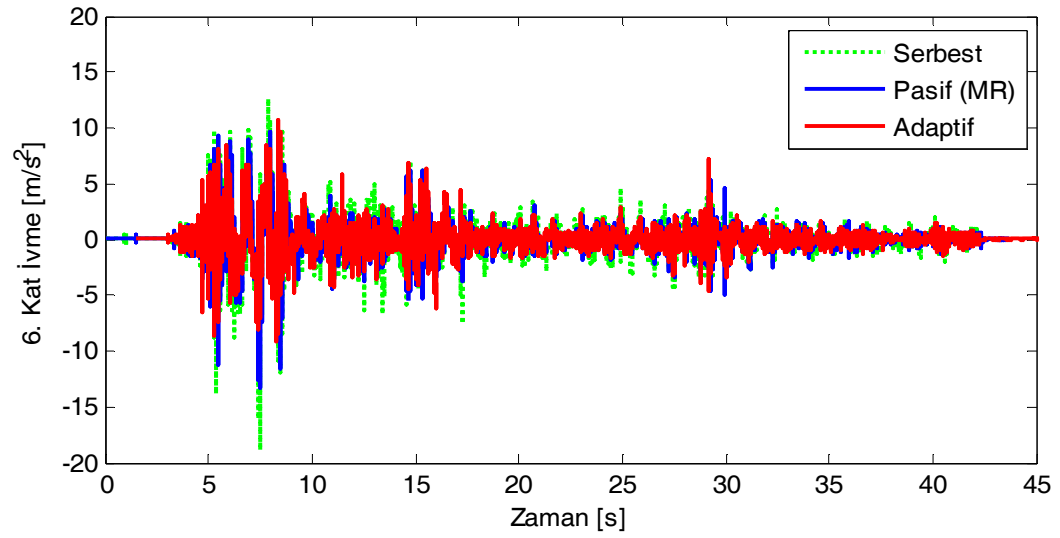
Şekil 5.41 Bina modelinin ivme cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

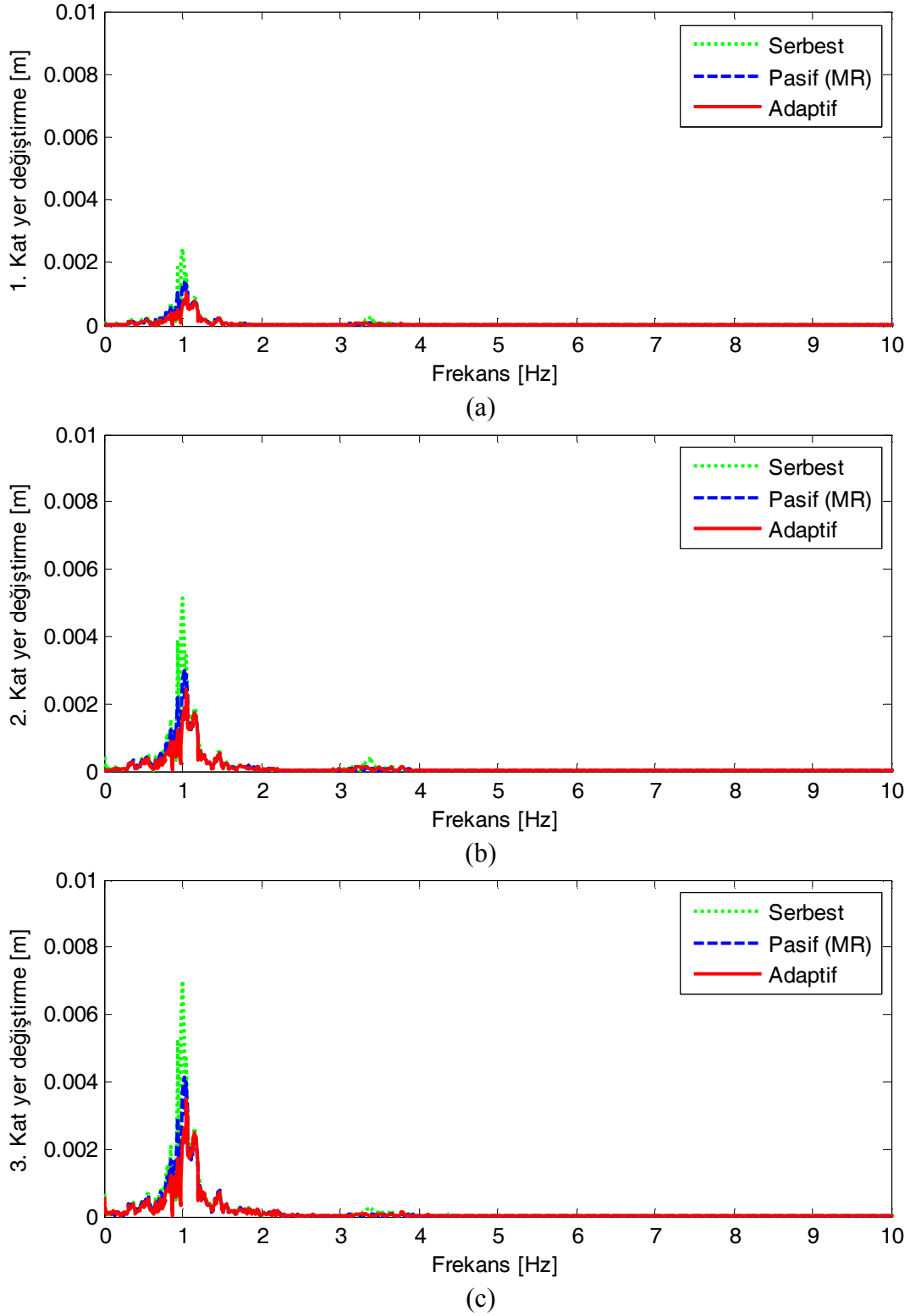


(c)

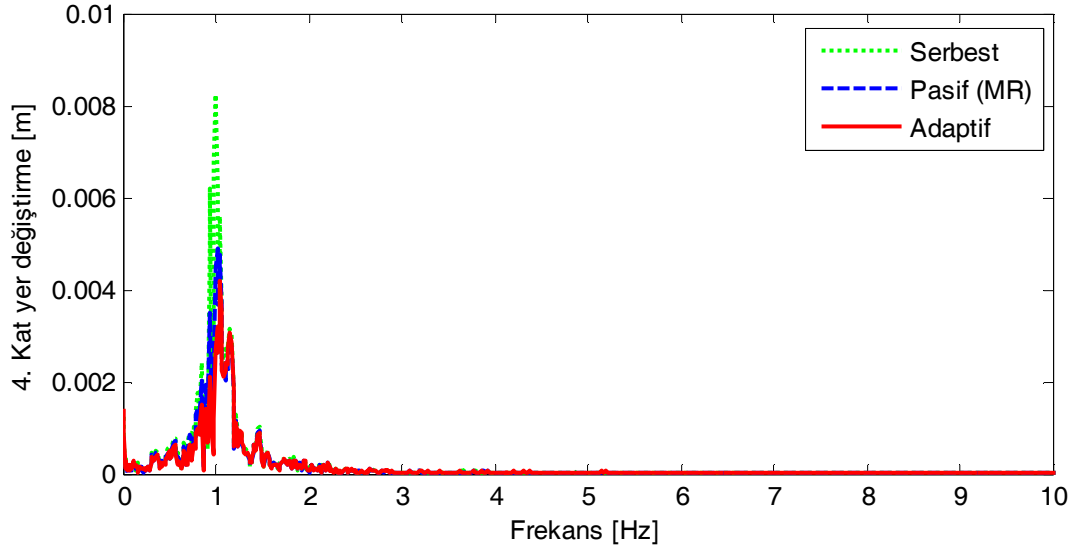
Şekil 5.42 Bina modelinin ivme cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.6.3 Yer Değiştirme Frekans Cevapları

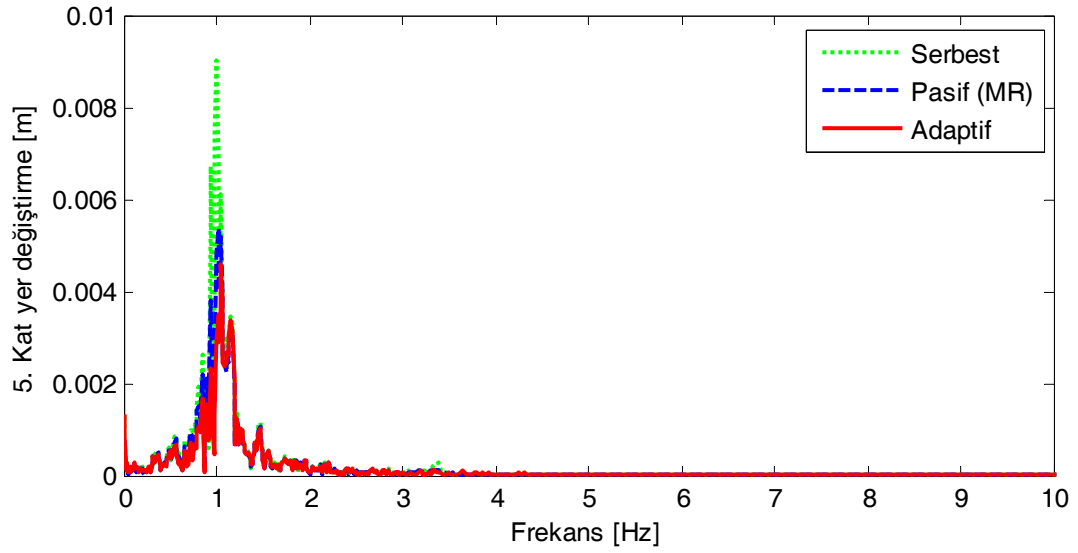
Frekans alanındaki yer değiştirme cevapları Şekil 5.43 ve 5.44'te verilmiştir. Frekans alanındaki grafikler yardımı ile tasarlanan kontrolörün deprem etkisi altındaki yapı modelinin titreşimlerinin bastırılmasında etkin olduğu görülmektedir.



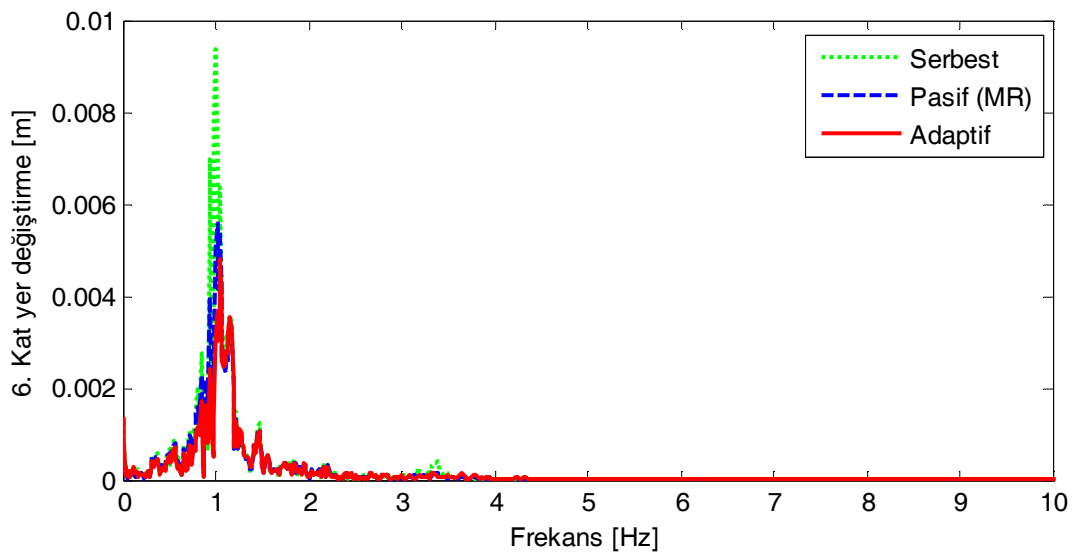
Şekil 5.43 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)

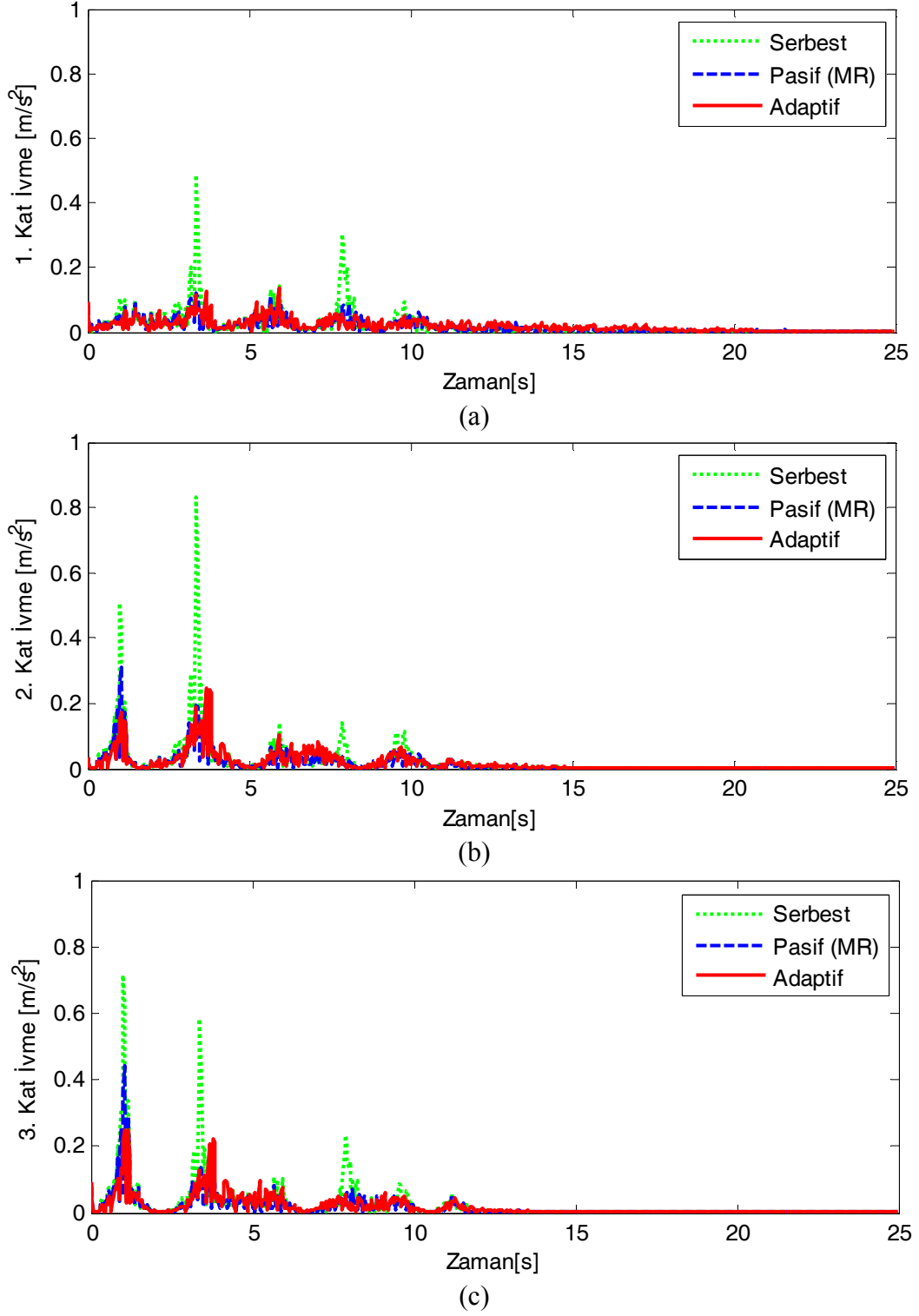


(c)

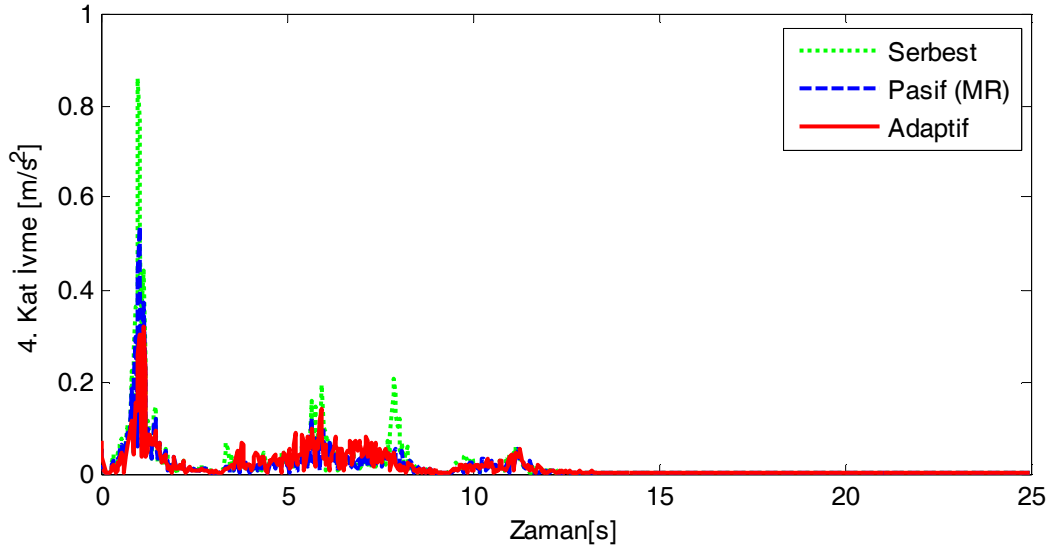
şekil 5.44 Bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.6.4 İvme Frekans Cevapları

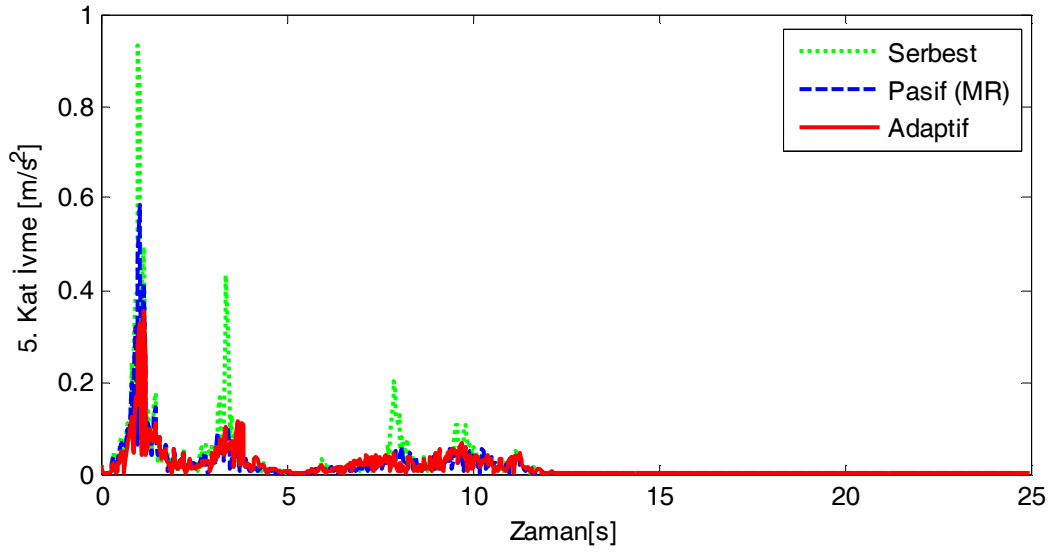
Frekans alanındaki ivme cevapları Şekil 5.45 ve 5.46’da verilmiştir. Frekans alanındaki grafikler incelendiğinde tasarlanan nonlinear adaptif kontrolörün bütün frekansları bastırmada etkin olduğu açıkça görülmektedir.



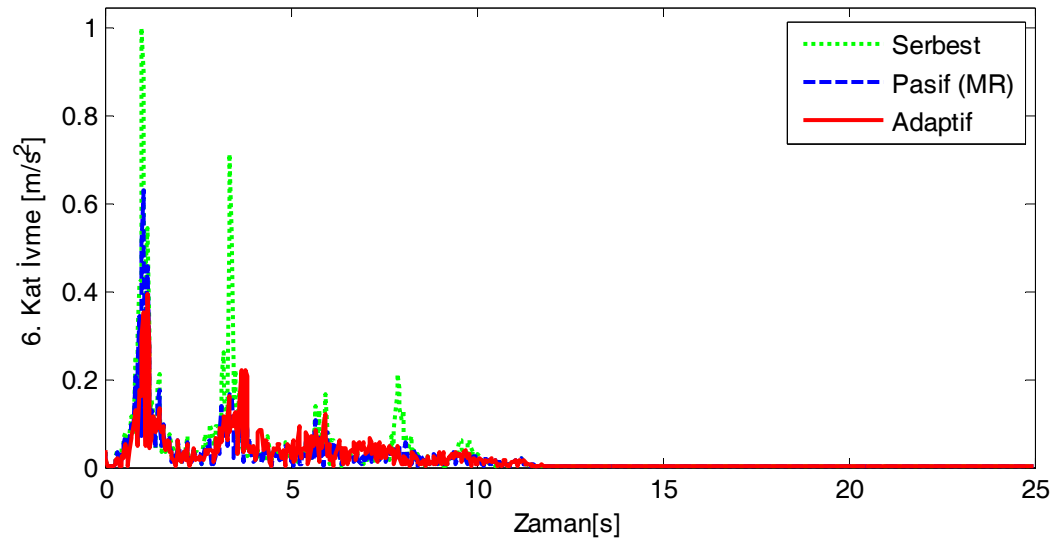
Şekil 5.45 Bina modelinin ivme frekans cevapları (a) 1. kat (b) 2. kat (c) 3. kat



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.46 Bina modelinin ivme frekans cevapları (devamı) (a) 4. kat (b) 5. kat (c) 6. kat

5.6.5 Parametre Tahminleri Açısından Adaptif Kontrolün Değerlendirilmesi

Adaptif kontrolün performansını parametre yakınsamaları bakımından irdelemek için Şekil 5.47 – 5.50 arasında yapısal sistemin parametrelerinin ve MR sönümleyicinin parametrelerinin zamanla değişimini gösteren grafikler verilmiştir. Yapısal sistemin parametre tahminleri, Bölüm 2.4’te metodolojisi anlatılan ve Bölüm 5.4’te deneysel olarak uygulanan sistem tanılama yöntemi ile elde edilen yapısal sistemin parametreleri ile karşılaştırılmaktadır. MR sönümleyicinin parametreleri ise Bölüm 5.6’da verilen ön deney çalışması ile elde edilen MR sönümleyici parametreleri referans alınarak karşılaştırılmaktadır.

5.6.5.1 Yapısal Parametrelerin Tahmini

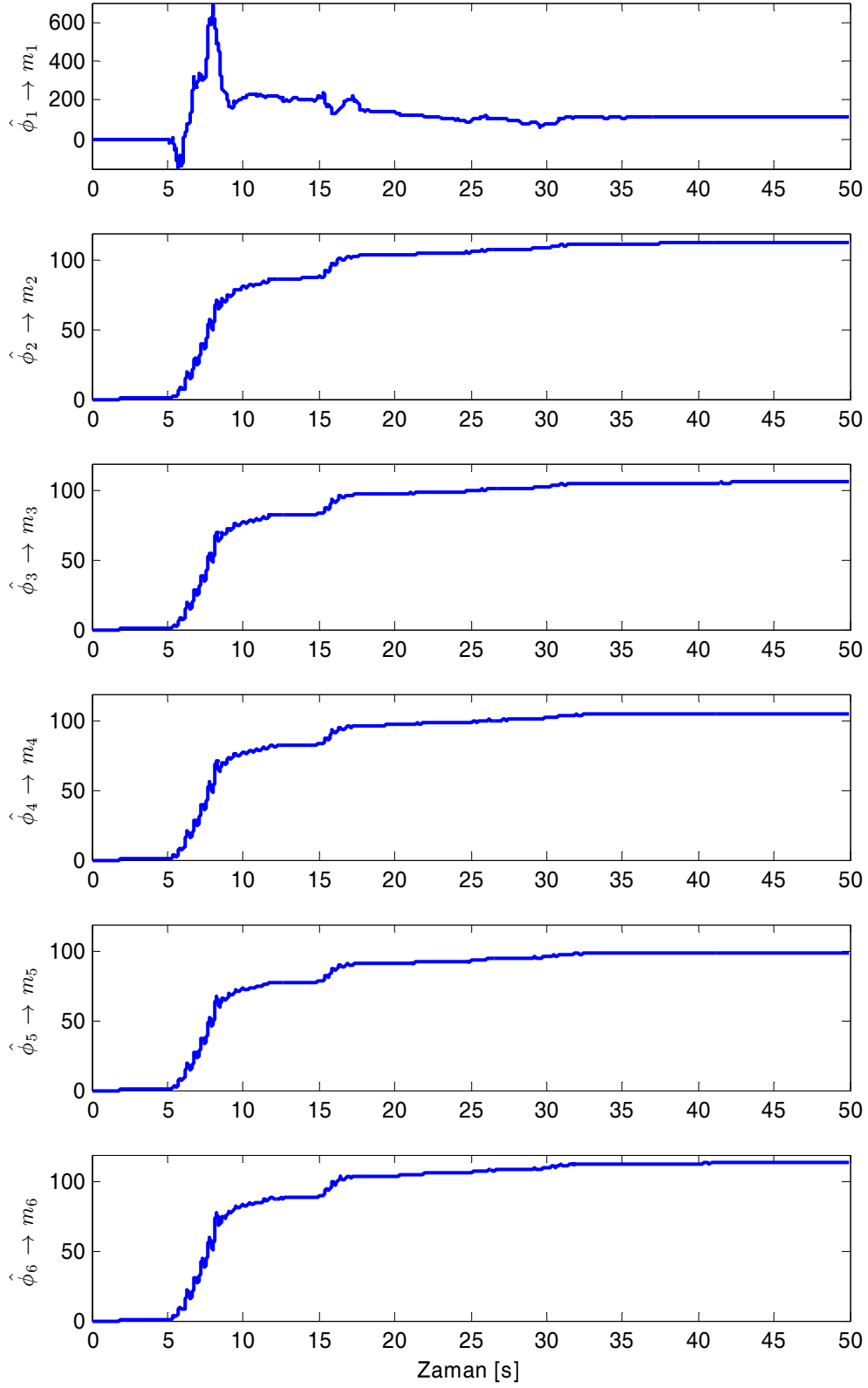
Adaptif kontrolün performansını parametre yakınsamaları bakımından irdelemek için Şekil 5.47 – 5.49 arasında yapısal sistemin parametrelerinin, kütle, sönüm ve rijitlik bakımından zamanla değişimini gösteren grafikler verilmiştir.

Şekil 5.47’de ϕ_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) yani kütle parametrelerinin yakınsamaları görülmektedir. Belirli bir başlangıç koşulundan sistem tanılama ile elde edilen değerlere doğru yapısal sistemin kütle parametrelerinin yakınsadığı açıkça görülmektedir.

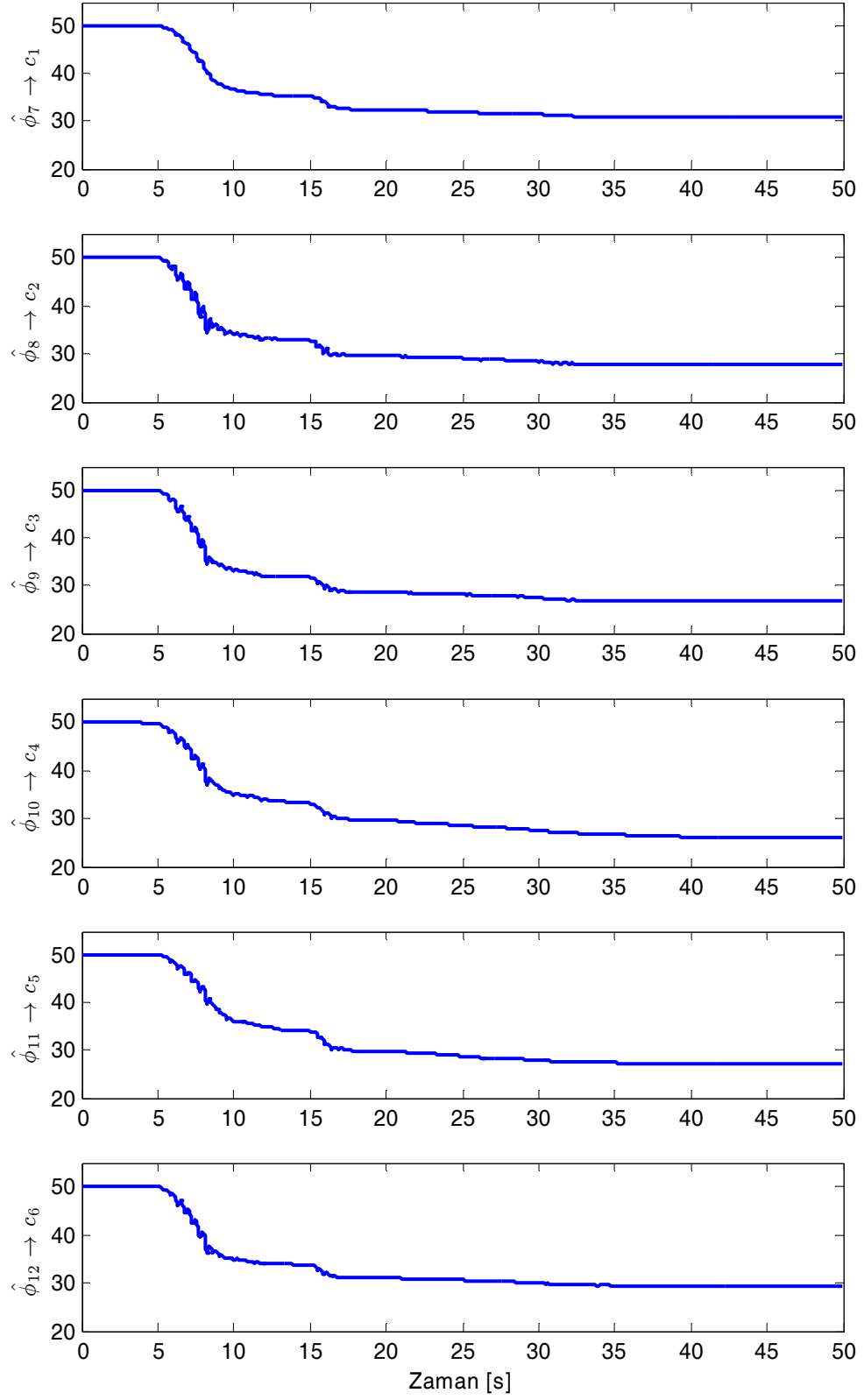
Şekil 5.48’de sistemin sönüm katsayılarına karşılık gelen ϕ_j ($j = 7, 8, \dots, 12$) parametrelerinin tahminleri görülmektedir. Sönüm parametreleri kullanılan sistem tanılama yöntemi ile net olarak elde edilememesine rağmen, parametrelerin belirli değerlere doğru yakınsadıkları görülmektedir.

Son olarak Şekil 5.49’da verilen rijitlik katsayılarının tahminlerine bakacak olursak, ϕ_k ($k = 13, \dots, 18$) parametrelerinin de sistem tanılama ile elde edilen değerlere doğru yakınsadığı görülmektedir.

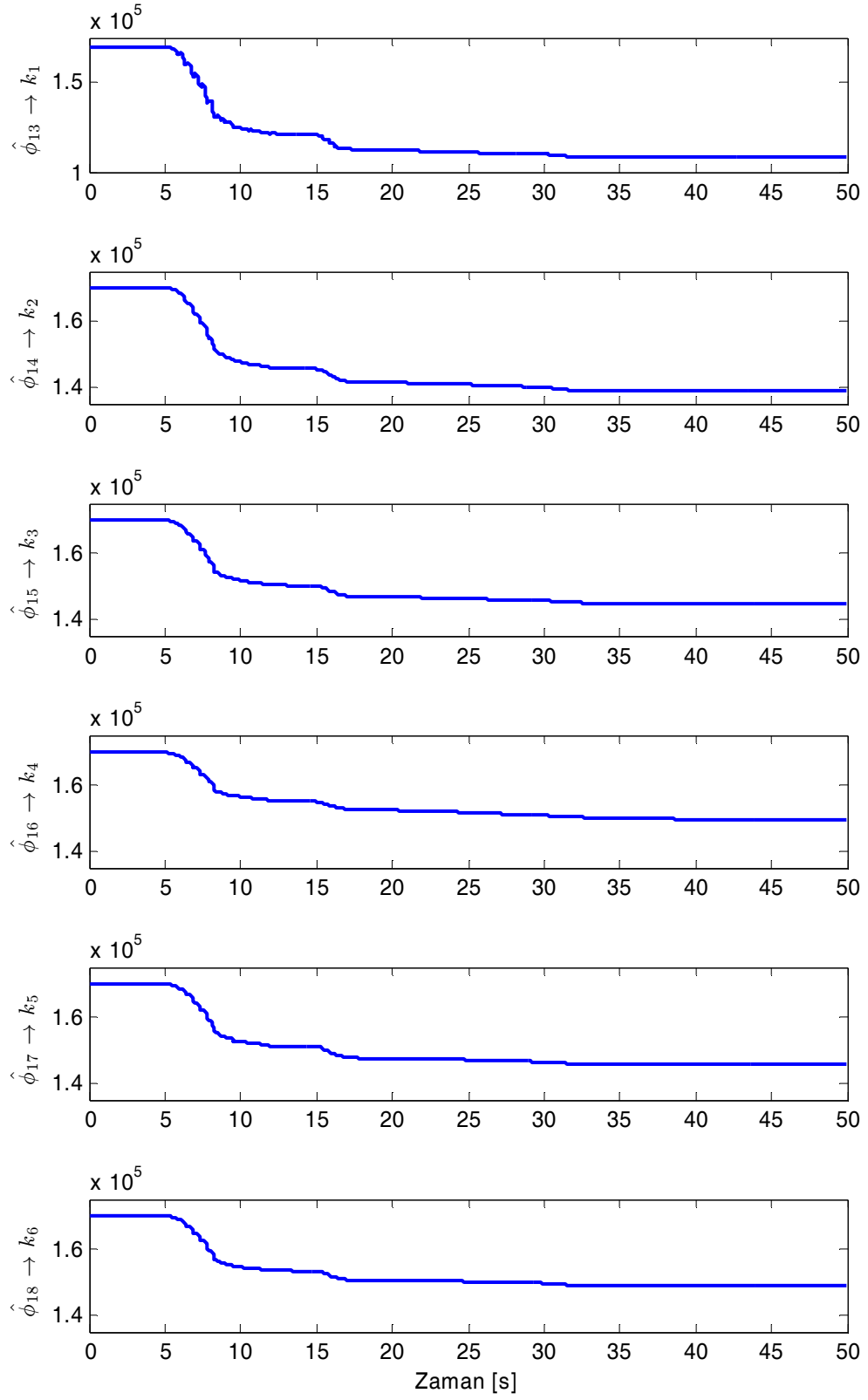
Şekil 5.47-49 arasındaki yapısal sistemin parametre tahminleri ile Bölüm 5.4’te sistem tanılama metodu ile elde edilen değerler karşılaştırıldığında tasarlanan nonlinear adaptif kontrolörün yapısal sistemin parametre tahmini bakımından oldukça başarılı olduğu söylenebilir.



Şekil 5.47 Bina kütle değerlerinin tahmini



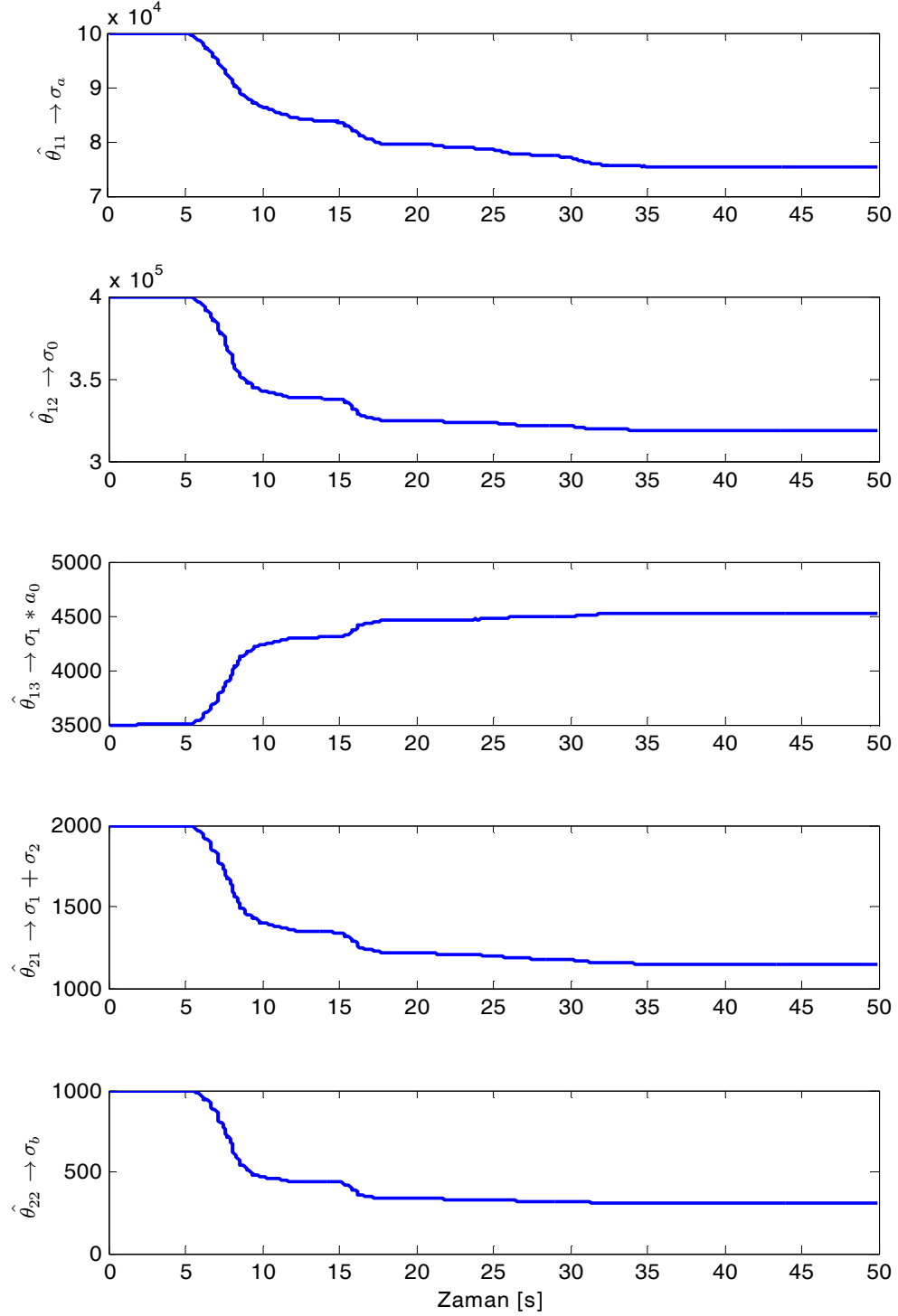
Şekil 5.48 Bina sönüm değerlerinin tahmini



Şekil 5.49 Bina rijitlik değerlerinin tahmini

5.6.5.2 MR Sönümleyici Parametrelerinin Tahmini

Şekil 5.50’de θ_{ij} ($i=1,2$ ve $j=1,2,3$) yani MR sönümleyici parametrelerinin tahminleri görülmektedir. Belirli bir başlangıç koşulundan Bölüm 5.6’da gerçekleştirilen ön deney ile elde edilen değerlere doğru MR sönümleyici parametrelerin yakınsadığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5.50 MR sönümleyici parametrelerinin tahmini

5.7 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

5.7.1 Yapısal Titreşim Performanslarının Değerlendirilmesi

Deney sonuçlarının ayrıntılı olarak değerlendirilmesi için Ohtori (2004) vd. tarafından tanımlanan performans ölçütlerinden 4 tanesi kullanılarak bir tablo oluşturulmuştur. Bu ölçütler

$$J_1 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \frac{|d_i(t)|}{h_i}}{\delta^{\max}} \right\} \quad J_2 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} |\ddot{x}_i(t)|}{\ddot{x}_i^{\max}(t)} \right\}$$

$$J_3 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \frac{\|d_i(t)\|}{h_i}}{\|\delta^{\max}\|} \right\} \quad J_4 = \max \left\{ \frac{\max_{t,i} \|\ddot{x}_i(t)\|}{\|\ddot{x}_i^{\max}(t)\|} \right\}$$

şeklindedir. Burada,

$$\delta^{\max} = \max_{t,i} \frac{|d_i(t)|}{h_i} : \text{Kontrolcüsüz durumdaki maksimum katlar arası yer değiştirme oranı}$$

h_i : katlar arası mesafe

d_i : Katlar arası yer değiştirme

$\ddot{x}_i^{\max}(t)$: Kontrolcüsüz durumdaki maksimum ivme

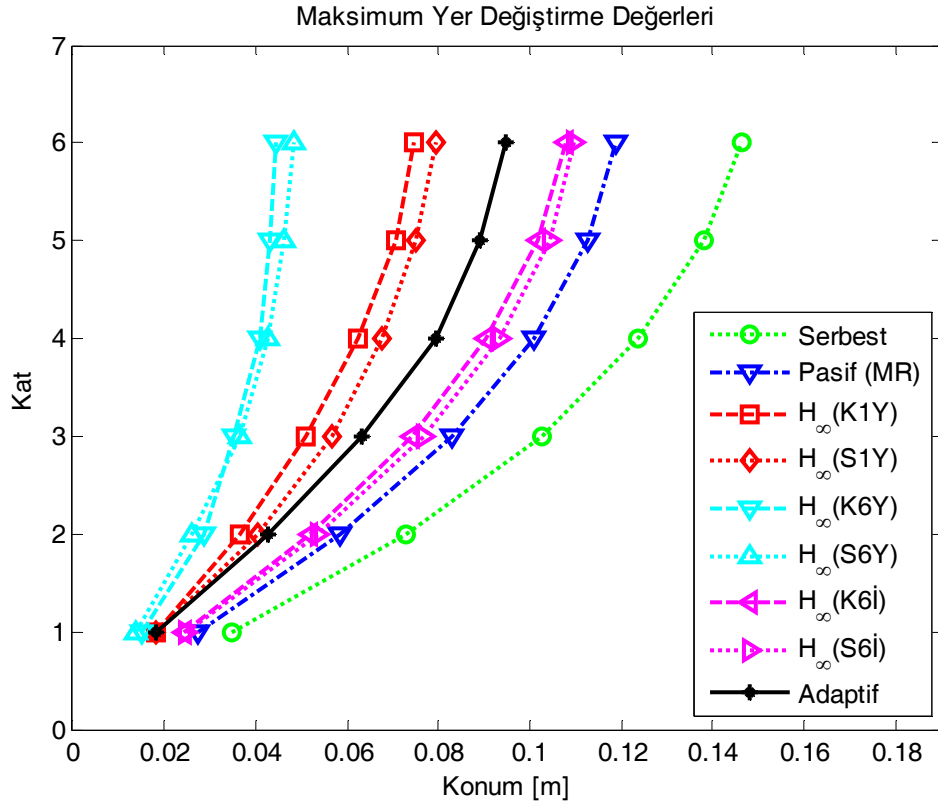
olarak ifade edilmektedir. Çizelge 5.4'te deneysel verilerden elde edilen performans ölçütü değerleri gösterilmektedir. Birinci performans ölçütüne göre katlar arasındaki maksimum genliklerde en fazla azalmayı H_{∞} (K6Y) ve H_{∞} (S6Y) kontrolörler ile gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolörde altıncı katın yer değiştirmesinden geri besleme alınmıştır. Genliğin en fazla olduğu kat olması ve geri beslemenin de yer değiştirme olması nedeniyle kontrolörün yer değiştirmenin maksimum değerlerindeki performansı oldukça iyi olmuştur. İkinci performans ölçütü ise ivmenin maksimum değerini esas almaktadır. Bu performans ölçütüne göre en iyi performansı adaptif kontrolör sergilemektedir. Burada yer değiştirme geri beslemeli olarak tasarlanan H_{∞} kontrolörlerin performansında bir kötüleşme söz konusudur. Yer değiştirme geri beslemeli H_{∞} kontrolörler maksimum yer değiştirme açısından titreşimleri çok iyi bastırmalarına rağmen maksimum ivmelerde kötüleşmeye sebep olmaktadır. Bölüm 5.4'te verilen yer değiştirme ve ivme grafikleri değerlendirildiğinde, bunun nedeninin MR

sönümleyicinin bağlandığı kattaki ivme değerleri olduğu görülmektedir. Bu sebeple değerlendirme için her bir katın yer değiştirmesi ve ivmesinin maksimum değerinin yanı sıra RMS değerleri de grafiksel olarak Şekil 5.51-54 arasında gösterilmiştir. Üçüncü performans ölçütü, yer değiştirmesinin normunun maksimum değerini esas almaktadır. Bu performans ölçütüne göre de H_{∞} (K6Y) ve H_{∞} (S6Y) kontrolörler en iyi performansı sergilemektedir. Dördüncü ve son performans ölçütü ise ivmenin normunun maksimum değerine göre hesap edilmektedir. Bu performans ölçütünde ise ivme geri beslemeli H_{∞} (K6İ) ve H_{∞} (S6İ) kontrolörler en fazla azalmayı gerçekleştirmiştir.

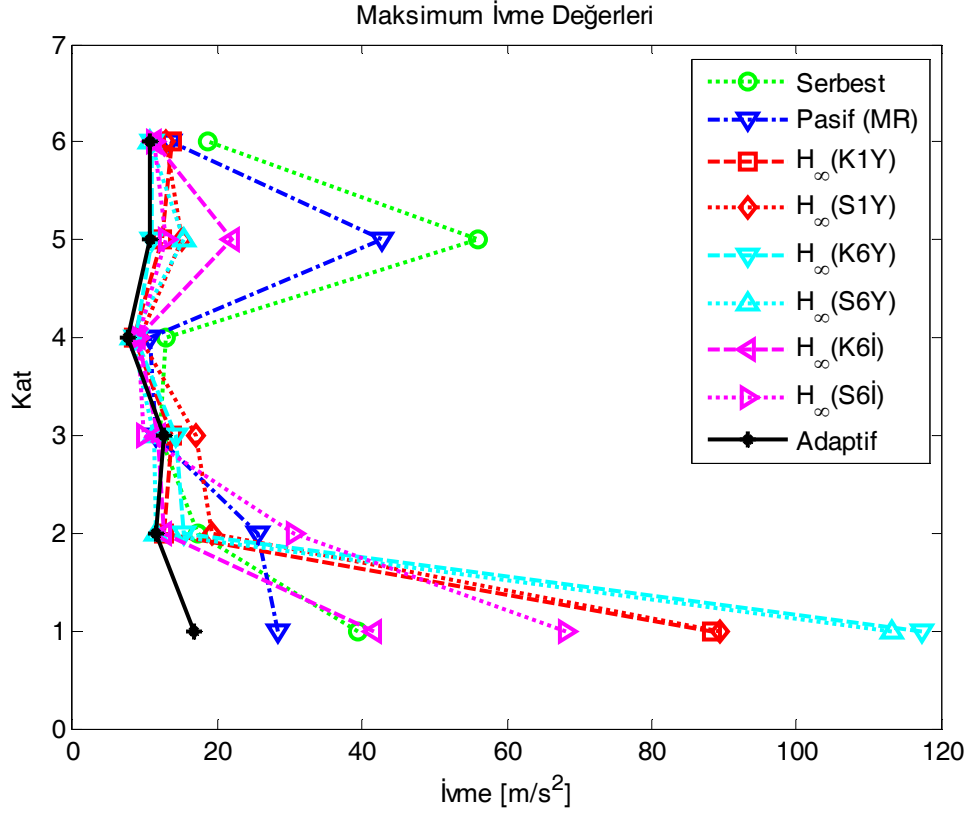
Çizelge 5.4 Performans ölçütlerine göre kontrolörlerin değerlendirilmesi

	J_1	J_2	J_3	J_4
Pasif (MR)	0.8195	0.7623	0.7409	0.7369
H_{∞} (A1K)	0.5031	1.5728	0.5051	0.8076
H_{∞} (S1K)	0.5844	1.5970	0.5554	0.9641
H_{∞} (A6K)	0.3894	2.0902	0.3619	0.8772
H_{∞} (S6K)	0.4291	2.0188	0.3847	1.0415
H_{∞} (A6İ)	0.7362	0.7426	0.6526	0.6285
H_{∞} (S6İ)	0.7618	1.2169	0.6560	0.5968
Adaptif	0.6406	0.2981	0.6333	0.7112

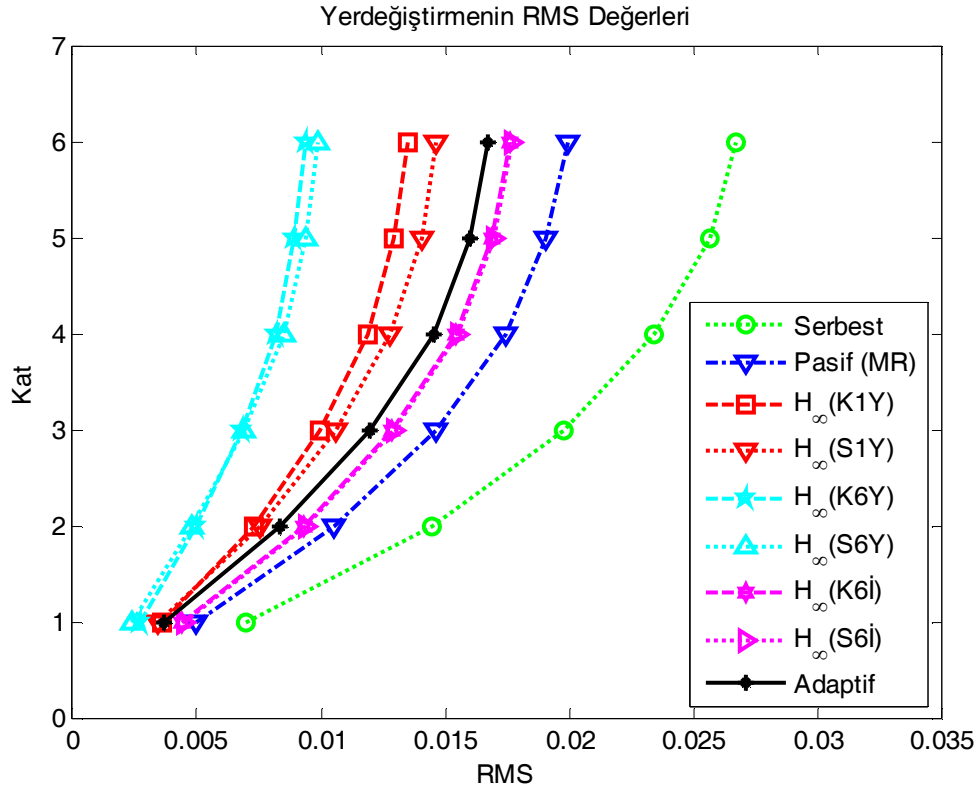
Şekil 5.51'deki yer değiştirmesinin maksimum değerlerini gösteren grafik incelendiğinde bütün katların yer değiştirme cevaplarında da iyileştirilmesinde yer değiştirme geri beslemeli H_{∞} kontrolörlerin en iyi performansı sergilediği, özellikle 6. kat geri beslemeli kontrolörün en çok azalmayı sağladığı açıkça görülmektedir. Bu iki kontrolörden sonra en iyi cevap adaptif kontrolör ile sağlanmıştır. Şekil 52'deki ivmenin her kattaki maksimum değerlerini gösteren grafikler incelendiğinde ise adaptif kontrolörün en iyi performansı sergilediği özellikle diğer kontrolörlerde 1. katın ivmesinde yaşanan sorunun adaptif kontrolör ile ortadan kalktığı görülmektedir. 1. katın ivme cevaplarında meydana gelen artış, MR sönümleyicinin geriliminin ayarlanmasında kullanılan Heaviside fonksiyon tabanlı kırpma algoritmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.53 ve 5.54'teki RMS değerleri de yukarıda özetlenen performans analizini doğrulamaktadır.



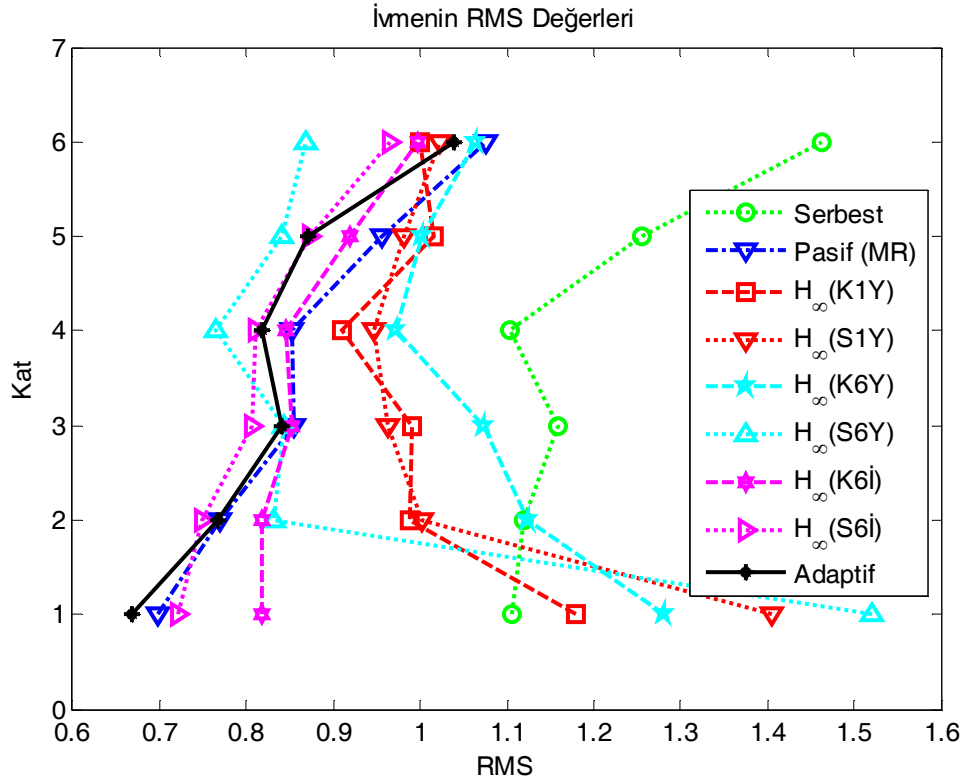
Şekil 5.51 Katların yer değiştirmelerinin maksimum değerleri



Şekil 5.52 Katların ivmelerinin maksimum değerleri



şekil 5.53 Katların yer değiştirmelerinin RMS cevapları



şekil 5.54 Katların ivme RMS cevapları

5.7.2 Kontrol Kuvveti ve Güç Gereksiniminin Değerlendirilmesi

MR sönümleyicilerin güç gereksinimleri sınırlıdır. Kimi zaman bir akü ile bile çalışabilmektedirler. Ancak tasarlanan kontrol algoritmalarının performanslarının irdelenmesi amacıyla bu bölümde kuvvet ve güç gereksinimi açısından da bir değerlendirme sunulmaktadır. Bu amaçla aşağıda tanımlanan (Ohtori, 2004) performans ölçütlerini kullanacağız.

$$J_5 = \frac{\max_t |f(t)|}{W} \quad J_6 = \frac{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} P(t) dt}{\dot{x}^{\max} W}$$

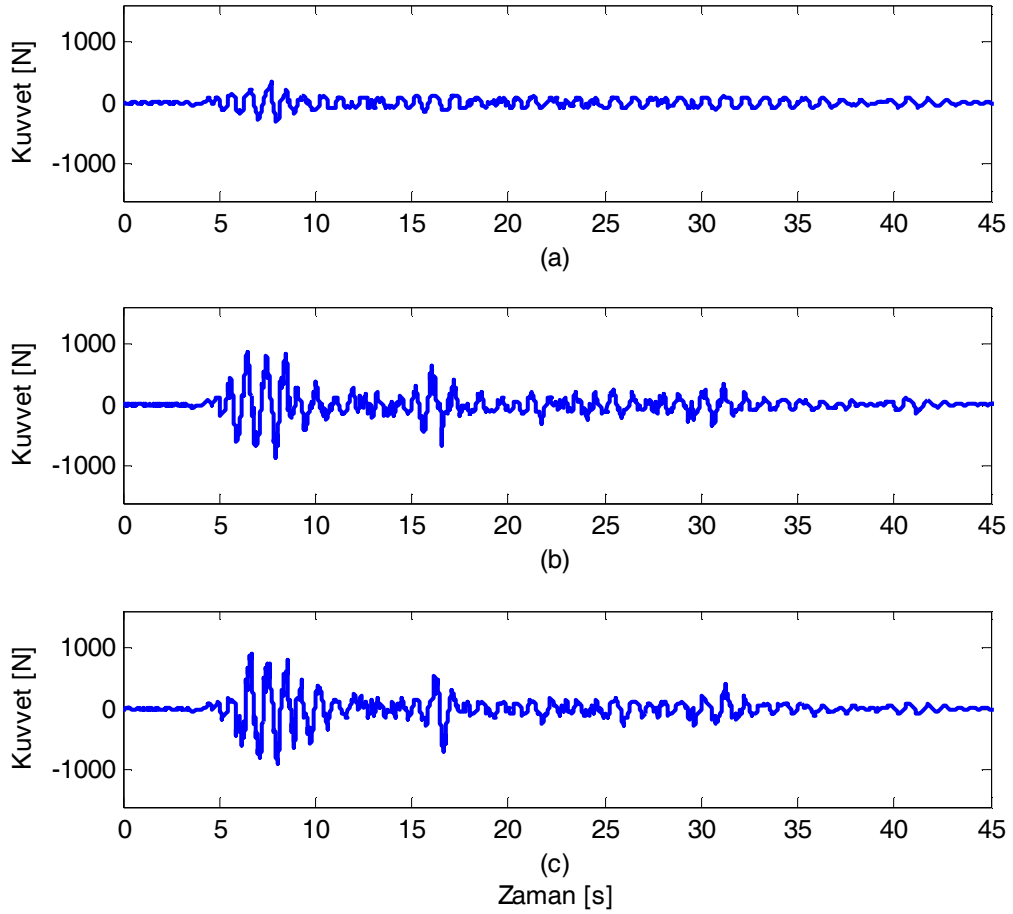
Burada, $f(t)$ kontrol elemanı tarafından (MR sönümleyici) üretilen kuvvet, W binanın yer üstündeki sismik kütlesi (yerin altındaki ve yerdeki kütle hariç), $P(t)$ kontrol elemanının anlık güç ihtiyacı, $\dot{x}^{\max}$ yere göre maksimum bağıl hız olarak ifade edilmektedir. J_5 , MR sönümleyicide oluşan ve sistemden çekilen maksimum kuvvet oranını göstermektedir. J_6 , yapının titreşimlerini azaltmak için MR sönümleyicide gerekli olan güç oranını ifade etmektedir. Çizelge 5.5'te bu performans ölçütlerinin değerleri verilmektedir.

Çizelge 5.5'ten de görüldüğü üzere H_∞ (K6İ) ve H_∞ (S6İ) kontrolörde oluşan maksimum kuvvetler en düşüktür. Bir önceki bölümdeki titreşim performansı ölçütleri dikkate alındığında bu kontrolörlerin sadece ivmenin RMS değerlerini esas alan ölçütlerde iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Çizelge 5.5 Performans ölçütlerine göre kontrolör kuvvetlerinin değerlendirilmesi

	J₅	J₆
Pasif (MR)	0.0564	-
H_∞ (A1K)	0.1371	0.0280
H_∞ (S1K)	0.1408	0.0169
H_∞ (A6K)	0.2338	0.0414
H_∞ (S6K)	0.2210	0.0419
H_∞ (A6İ)	0.0773	0.0084
H_∞ (S6İ)	0.0567	0.0100
Adaptif	0.1317	0.0078

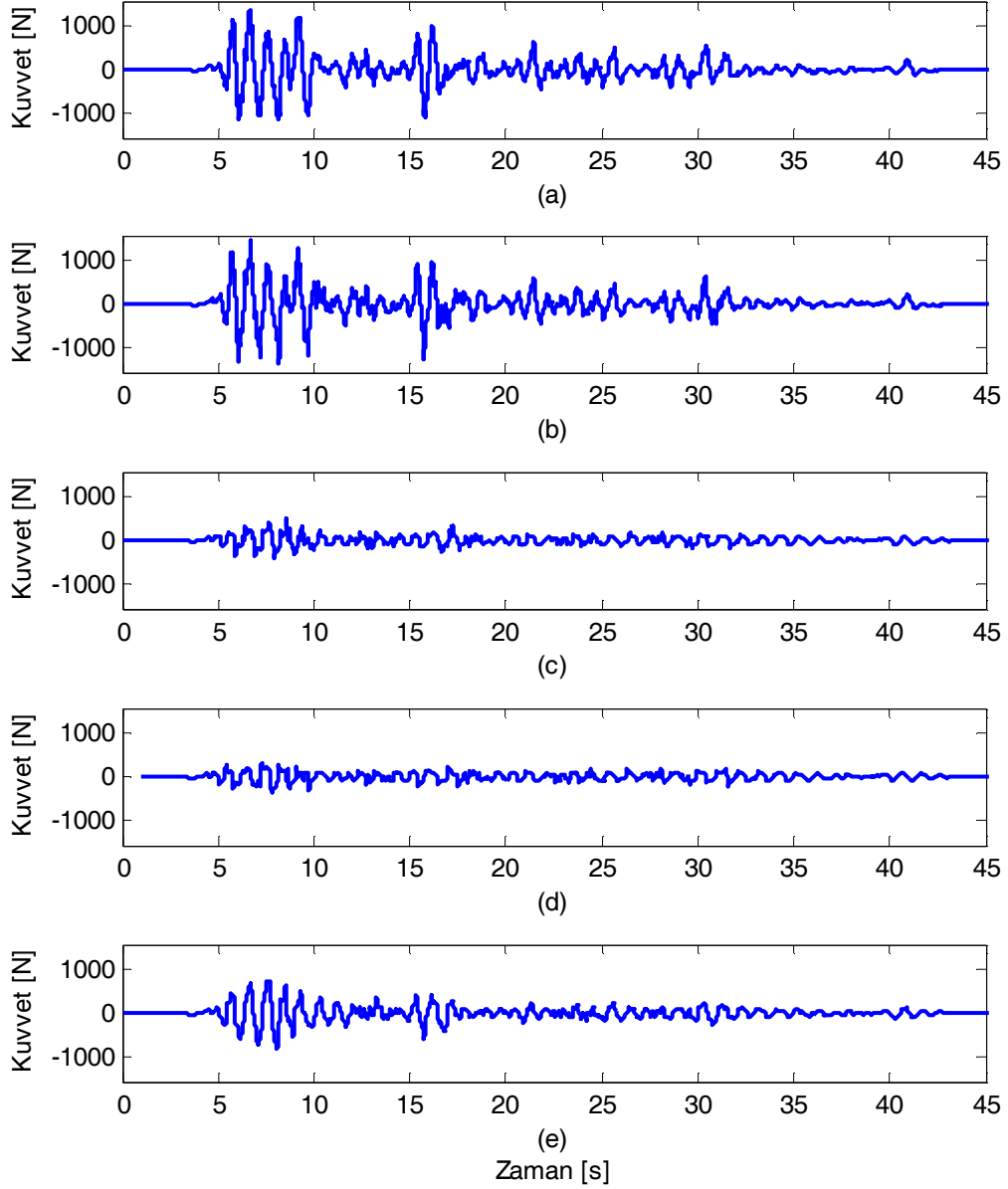
Şekil 5.55 ve 5.56'daki kuvvet zaman grafiklerinden maksimum kuvvetin yanı sıra kuvvet karakteristiği de görülebilir. Şekil 5.55a'da MR sönümleyicinin sisteme bağlı olduğu ancak herhangi bir gerilimin MR sönümleyiciye uygulanmadığı durumdaki kuvvet zaman eğrisi görülmektedir. MR sönümleyicinin herhangi bir gerilim uygulanmasa da kayda değer bir kuvvet ürettiği dolayısıyla sistemde herhangi bir enerji kesintisi yaşanması halinde bile MR sönümleyici sisteme bağlı olduğu müddetçe sistemin titreşimlerini azaltmaya devam edeceği açıkça görülmektedir. Şekil 5.55 b ve c'deki grafiklerde 1. kat yer değiştirme geri beslemeli H_∞ kontrolörlü sisteme ait kuvvet zaman eğrileri görülmektedir. Bu eğriler MR sönümleyiciye gerilim uygulanması ile sistemden çekilen enerjinin artacağını göstermektedir.



Şekil 5.55 Kontrolörlerin kuvvet zaman cevapları (a) Pasif (b) H_∞ (K1Y) (c) H_∞ (S1Y)

Şekil 5.56 a ve b'de 6. kat yer değiştirme geri beslemeli H_∞ kontrolörlü sisteme ait kuvvet zaman eğrileri görülmektedir. Bu eğriler performans ölçütleri ile beraber değerlendirildiğinde, sistemin yer değiştirme performansındaki iyileşmenin sistemden çekilen enerji miktarının artışı ile orantılı olduğu görülmektedir. Şekil 5.56 c ve d'de 6. kat ivme geri beslemeli H_∞

kontrolörlü sisteme ait kuvvet zaman eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerden görüldüğü üzere ivme geri beslemeli kontrolörde sistemden çekilen enerji pasif duruma yakındır. Bu durum performans açısından ivme cevaplarının iyileşmesini sağlamaktadır. Şekil 5.56 e’de nonlineer adaptif kontrolörün kuvvet zaman karakteri, sistemden çekilen enerji miktarının iyi belirlenmesi ile sistemin titreşim performansının hem yer değiştirme hem de ivme açısından iyileştirilebileceğini göstermektedir.

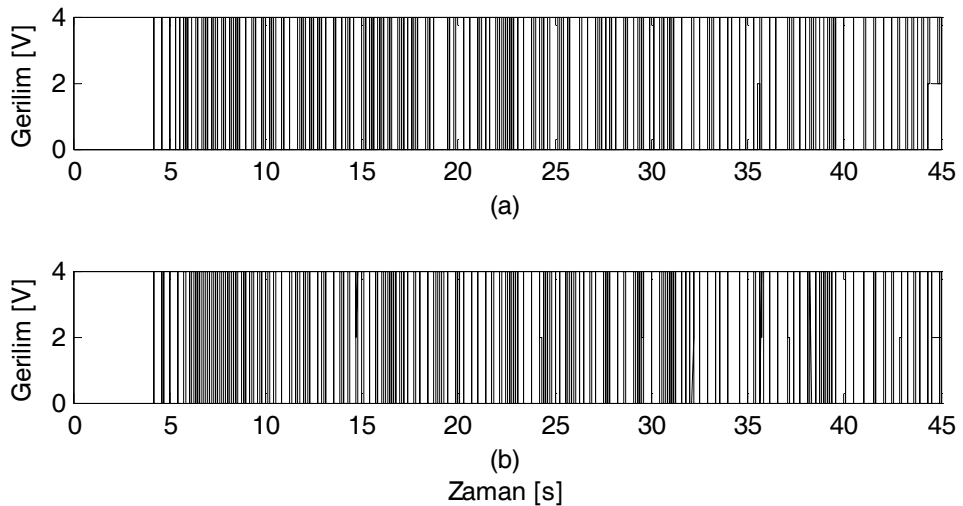


Şekil 5.56 Kontrolörlerin kuvvet zaman cevapları (a) H_∞ (K6Y) (b) H_∞ (S6Y) (c) H_∞ (K6İ) (d) H_∞ (S6İ) (e) Adaptif

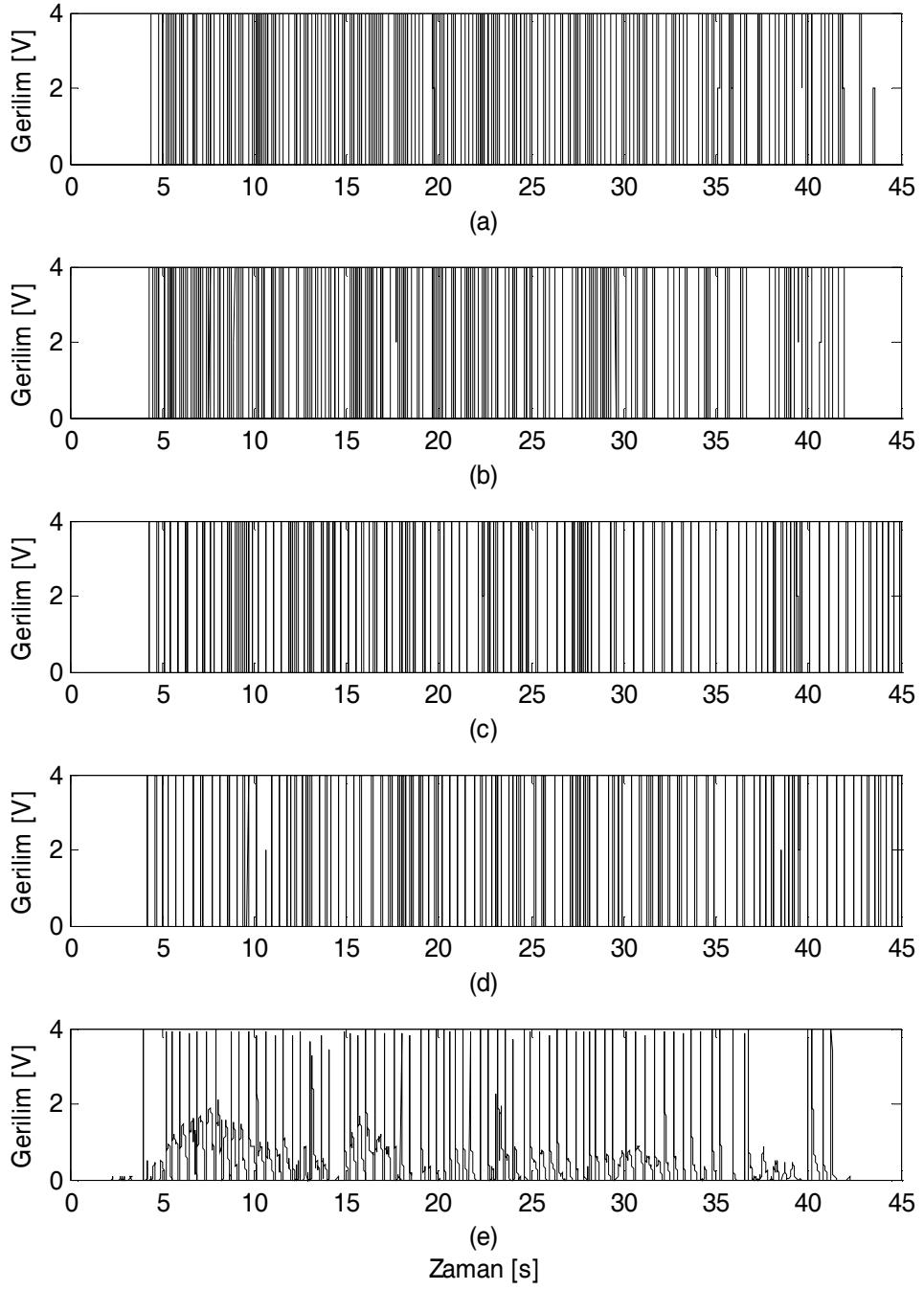
Güç gereksinimlerini esas alan J_6 , performans ölçütüne göre ise en az güç gereksinimi olan kontrolör adaptif kontroldür. Güç gereksiniminin H_∞ kontrolörlerde fazla olmasının nedeni basamak fonksiyon tabanlı kırpma algoritmasıdır. Bunu daha iyi görmek için Şekil 5.57 ve

5.58'deki gerilim-zaman grafiklerini incelemek gerekmektedir.

Şekil 5.57 a ve b'de 1. kat yer değiştirme geri beslemeli H_∞ kontrolörlü sisteme ait gerilim zaman eğrileri görülmektedir. Bu grafikler kontrolörden belirlenen kuvvetin sistemden çekilebilmesi için MR sönümleyiciye gönderilen gerilimin aç kapa şeklinde oluşturulduğunu göstermektedir. Aynı durum Şekil 5.58 a ve b'de gösterilen 6. kat yer değiştirme geri beslemeli H_∞ kontrolörlü sisteme ait gerilim zaman eğrilerinde de görülmektedir. Şekil 5.58 c ve d'deki 6. kat ivme geri beslemeli H_∞ kontrolörlü sisteme ait gerilim zaman eğrileri de seyrek olmak kaydıyla aynı aç kapa etkiyi sergilemektedir. Bütün bu grafiklerden de görüldüğü gibi basamak fonksiyon tabanlı kırpmalı algoritma ile MR sönümleyicinin gerilimin ayarlandığı H_∞ kontrolörlerde, sistemin ihtiyaç duyduğu kuvvete göre, gerilim ya maksimum ya da minimum olmaktadır. Dolayısıyla bazı bölgelerde ihtiyaç duyulandan fazla anlık gerilim gönderilmekte, ara değerlerde gerilim gönderilememektedir. Bu da MR sönümleyicide oluşan kuvvetin, kontrolör tarafından belirlenen kuvvetten yüksek olması sonucunu doğurmaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak ve kontrolörlerin güç performansını artırmak için gerilimin ara değerlerini de sisteme gönderecek bir algoritma geliştirilmesi gerekmektedir. Adaptif kontrolörün üstünlüğü bu noktada ortaya çıkmaktadır. Çünkü tasarlanan nonlinear adaptif kontrolde sistemin ihtiyacına göre gerilim, direk olarak belirlenerek uygulanmakta, herhangi bir ara algoritmaya ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu durum Şekil 5.58 e'de adaptif kontrolöre ait gerilim-zaman grafiğinden açıkça görülebilmektedir.



Şekil 5.57 Kontrolörlerin gerilim zaman cevapları (a) H_∞ (K1Y) (b) H_∞ (S1Y)



Şekil 5.58 Kontrolörlerin gerilim zaman cevapları (a) H_∞ (K6Y) (b) H_∞ (S6Y) (c) H_∞ (K6İ) (d) H_∞ (S6İ) (e) Adaptif

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında deprem etkisi altındaki yapıların titreşimlerini azaltmak amacıyla H_{∞} dayanıklı kontrolör ve nonlinear adaptif kontrolör tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan kontrolörlerin performansı altı katlı bir bina modeli üzerinde, laboratuvar ortamında titreşim tablası yardımıyla deneysel olarak test edilmiştir.

Tasarlanan kontrolörlerin performansı sisteme MR sönümleyicinin bağlı olmadığı ‘Serbest’ durum ve MR sönümleyicinin bağlı olduğu ancak herhangi bir gerilim uygulanmadığı ‘Pasif (MR)’ durum ile kontrolörlerin uygulandığı durumlar arasında yapılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen, gerek yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman grafikleri, gerek performans ölçütleri gerekse her bir katın maksimum yer değiştirme ve ivmeleri ile bunların RMS değerleri tasarlanan kontrolörlerin etkinliğini göstermektedir.

Yer değiştirmeyi esas alan değerlendirmelerde hem katlar arası yer değiştirmelerin hem de maksimum yer değiştirme cevaplarının iyileştirilmesinde yer değiştirme geri beslemeli H_{∞} kontrolörler en iyi performansı sergilemiş, özellikle 6. kat yer değiştirme geri beslemeli H_{∞} (K6Y) ve H_{∞} (S6Y) kontrolörler en fazla azalmayı gerçekleştirmiştir. İvmeyi esas alan değerlendirmelere genel olarak bakıldığında ise en iyi performansı nonlinear adaptif kontrolörün sergilediği söylenebilir. İvme cevaplarında H_{∞} kontrolörlerin performansındaki düşüşün sebebi MR sönümleyiciye gerilimin uygulanmasında kullanılan Heaviside fonksiyon tabanlı kırpma algoritmasıdır. Özellikle MR sönümleyicinin bağlandığı 1. katın ivme cevaplarında kötüleşme görülmektedir. Bu durum gerilimin uygulanmasında farklı bir algoritmanın kullanılması ile ortadan kaldırılabilir. Heaviside fonksiyon tabanlı algoritmanın seçilmesindeki esas, algoritmanın basitliği sebebiyle uygulama açısından kolay olması ve kuvvet ölçümü dışında herhangi bir ölçüme ihtiyaç duyulmamasıdır.

Klasik ve sistem tanılama üzerinden tasarlanan kontrolörlerin performansları karşılaştırıldığında çok fazla bir farklılığın olmaması H_{∞} kontrolörlerin dayanıklılığını göstermesi açısından önem taşımaktadır. Daha da önemlisi, klasik model üzerinden tasarlanan H_{∞} dayanıklı kontrolörler yardımıyla sistem tanılama metotlarının kullanılmasına gerek olmadan yapısal sistemlerin titreşimlerinin azaltılabileceği görülmektedir. Bu durum, pratik açıdan zahmetli olan sistem tanılama metotlarının kullanılmasına gerek duyulmadan, klasik yapı dinamiği metodları ile elde edilen sistem üzerinden H_{∞} dayanıklı kontrolör tasarımının yapılarak yarı aktif sisteme uygulanabileceğini göstermektedir. Bu durumun sağlanmasında MR sönümleyicinin bağlanmasıyla sisteme ilave edilen bir miktar rijitliğin de etkisi söz

konusudur.

Tasarlanan kontrolörlerde kullanılan sensör adedi açısından değerlendirme yapılacak olursa 1. kat yer değiştirme geri beslemeli H_∞ kontrolörler (H_∞ (K1Y) ve H_∞ (S1Y)) ve 6. kat ivme geri beslemeli H_∞ kontrolörler (H_∞ (K6İ) ve H_∞ (S6İ)) en az sensöre ihtiyaç duyan kontrolörlerdir.

İleriki çalışmalarda, Heaviside fonksiyon tabanlı kırpma algoritması yerine alternatif bir algoritma geliştirilmesi ve nonlinear adaptif kontrolörün tasarımında indirgeme metodları yardımıyla tasarım yaparak, ihtiyaç duyulan sensör adedinin azaltılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Aldemir, U., (2003), "Optimal Control of Structures with Semiactive-tune Mass Dampers", *Journal of Sound and Vibration*, 266, 847-874.
- Aldemir, U., (2009), "Causal semiactive control of seismic response" *Journal of Sound and Vibration*, 322 (4-5): 665-673
- Aldemir, U. ve Gavin HP, (2006), "Optimal semiactive control of structures with isolated base", *International Applied Mechanics*, 42(2):235-240.
- Alhan, C., Gavin, H.P. ve Aldemir, U., (2006) "Optimal control: Basis for performance comparison of passive and semiactive isolation systems", *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 132 (7) : 705-713.
- Alvarez, L. ve Jimenez, R., (2002), "Real time identification of magneto-rheological dampers", 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain.
- Alvarez, L. ve Jimenez, R., (2003), "Semi-active control of civil structures using magnetorheological dampers", *Proceedings of the American Control conference*, Denver, Colorado.
- Bani-Hani, K.A. ve Sheban, M.A., (2006), "Semi-active Neuro-control for Base-isolation System using Magnetorheological (MR) Dampers", *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 35:1119-1144.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., (2000), *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Third Edition, John Wiley & Sons/Wiley.
- Canudas, C., Olsson, H., Astrom, K.J. ve Lischinsky, P., (1995), "A new model for control of systems with friction", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(3):419-425.
- Carlson, J.D. ve Weiss, K.D. (1994), "A growing attraction to magnetic fluids", *Machine Design*, s. 61-64.
- Cetin, S., Zergeroglu, E., Sivrioglu, S., ve Yuksek, İ., (2009a) "Adaptive Control of Structures with MR Damper", 3rd IEEE Multi-Conference on Systems and Control, s. 60-65, Saint Petersburg, Russia, July 8-10, 2009.
- Cetin, S., Sivrioglu, S., Zergeroglu, E., ve Yuksek, İ., (2009b) "Altı Katlı Bina Modelinin MR Damper Yardımıyla Yarı-Aktif H_{∞} Dayanıklı Kontrolü", TOK 2009:Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 13-16 Ekim 2009, İstanbul.
- Cetin, S., Sivrioglu, S., Zergeroglu, E., ve Yuksek, İ., (2010a), "Semi-active H_{∞} Robust Control of Six Degree of Freedom Structural System using MR Damper", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, (doi:10.3906/elk-1007-587).
- Cetin, S., Zergeroglu, E., Sivrioglu, S., ve Yuksek, İ., (2010b) "Altı Katlı Bina Modelinin MR Sönümleyici Yardımıyla Adaptif Kontrolü", TOK 2010:Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 21-23 Eylül 2010, Kocaeli. (Kabul edildi.)
- Cheng, H., Zhu, W.Q. ve Ying, Z.G., (2006), "Stochastic Optimal Semi-active Control of Hysteretic Systems by using a Magneto-rheological Damper", *Smart Mat. Struct.* 15:711-718.
- Cho, S.W., Jung, H.-J. ve Lee, I.-W., (2005), "Smart Passive system Based on Magnetorheological Damper", *Smart Mater. Struct.*, 14, 707-714.

- Choi, K.M., Cho, S.W., Jung, H.J. ve Lee I.-W., (2004), "Semiactive fuzzy control for seismic response reduction using MR dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(6):723–736.
- Chopra, A.K., (2001), "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", Second edition, Prentice Hall, New Jersey.
- Clough, R.W. ve Penzien, J., (1975), "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, Singapore.
- Cornejo, C. ve Alvarez-Icaza, L., (2006), "Vibration Control of a Building with Magnet-rheological-dampers Based on Interconnection and Damping Assignment", *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control* Manchester Grand Hyatt Hotel, San Diego, USA.
- Dominguez, A., Sedaghati, R. ve Stiharu, I., (2004), "Modelling the hysteresis phenomenon of magnetorheological dampers", *Smart Mater. Struct.* 13:1351-1361.
- Dominguez, A., Sedaghati, R. ve Stiharu, I., (2006), "A New Dynamic Hysteresis Model for Magnetorheological Dampers", *Smart Mater. Struct.* 15:1179-1189.
- Dominguez, A., Sedaghati, R. ve Stiharu, I., (2007), "Modelling and Application of MR Dampers in Semi-Adaptive Structures", *Computers and Structures*, 86:407-415.
- Dong, L., Ying, Z.G. ve Zhu, W.Q., (2004), "Stochastic Optimal Semi-active Control of Nonlinear Systems by using MR Damper", *Advances in structural Engineering* Vol.7, No.6.
- Dyke, S.J., Spencer, Jr. B.F., Sain, M.K. ve Carlson, J.D., (1996a) "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction", *Smart Mater. Struct.* 5, 565-575.
- Dyke, S.J., Spencer, Jr. B.F., Sain, M.K. ve Carlson, J.D. (1996b), "Experimental Verification of semi-active Structural Control Strategies using Acceleration Feedback", *Proceedings 3rd Int. Conf. On Motion and Vibration Control*, Chiba, Japan.
- Dyke, S.J. ve Spencer, Jr. B.F., (1997) "A Comparison of Semiactive Control Strategies for the MR Damper", *IEEE Intelligent Information Systems*, Bahamas, 580-584.
- Dyke, S.J., Spencer, Jr. B.F., Sain, M.K. ve Carlson, J.D., (1998), "An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection", *Smart Mater. Struct.* 7:693-703.
- Ehrgott, R., ve Masri, S.F. (1992), "Modeling the Oscillatory Dynamic Behaviour of Electrorheological Materials in Shear", *Smart Mater. And Struct.*, 1:275-285.
- Ewins, D.J., (2000), *Modal Testing: Theory, procedures and applications*, Research Studies Press Ltd. Second Edition, Philadelphia.
- Feldman, M., (1997), "Nonlinear free vibration identification via the Hilbert Transform", *Journal of Sound and Vibration*, 208(3):475-489.
- Feldman, M., (2008), "Theoretical Analysis and Comparison of the Hilbert Transform Decomposition Methods", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(3):509-519.
- Gamota, D.R. ve Filisko, F.E., (1991). "Dynamic Mechanical Studies of Electrorheological Materials: Moderate Frequencies." *Journal of Rheology*, 35:399–425.
- Gavin, H.P. ve Aldemir, U., (2005), "Optimal Control of Earthquake Response Semiactive Isolation", *Journal of Engineering Mechanics*, 131(8):769-776.

- Gavin, H.P., Hanson, R.D., Filisko, F.E., (1996a), "Electrorheological dampers .1. Analysis and design", *Journal of Applied Mechanics-Transactions Of The ASME*, 63(3):669-675.
- Gavin, H.P., Hanson, R.D., Filisko, F.E., (1996b), "Electrorheological dampers 2. Testing and modeling", *Journal of Applied Mechanics-Transactions Of The ASME*, 63(3):676-682.
- Gordaninejad, F. ve Breese, D.G., (1999), "Heating of Magnetorheological Fluid Dampers", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10(8):634-645.
- Gu, Z.Q. ve Oyadiji, S.O., (2008), "Application of MR Damper in Structural Control using ANFIS Method", *Comput. Struct*, 86:427-436.
- Guo, D., ve Hu, H., (2005), "Nonlinear Stiffness of a Magneto-Reological Damper", *Nonlinear Dynamics*, 40:241-249.
- Hahn, S.J., (1996), "The Hilbert Transform of the Product $a(t)\cos(\omega_0 t + \phi_0)$ ", *Bulletin of the Polish Academy of Science* 44:1,75-80.
- Hiemenz, G.J., Choi, Y.T. ve Wereley, N.M., (2003), "Seismic Control of Civil Structures Utilizing Semi-Active MR Braces", *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering* 18, 31-44.
- Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F. ve Yao, J.T.P., (1997), "Structural control: Past, present, and future", *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 123(9): 897-971
- Huang, C.S., Hung, S.L., Lin, C.I. ve Su, W.C., (2005), "A Wavelet-Based Approach to Identifying Structural Modal Parameters from Seismic Response and Free Vibration Data", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20:408-423, 2005.
- Huang, N. ve Shen, S., (2005), *Hilbert-Huang transform and its applications*, World scientific, Singapore.
- Inaudi, J.A. (1997). "Modulated homogeneous friction: a semi-active damping strategy." *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.*, 26:361–376.
- Iwata, N., Nishimura, H. ve Miyahara, Y., (2004), "Semi-Active Seismic Isolation Control using MR Damper for Multi-Degree-of-Freedom Structures", 7th International Conference on Motion and Vibration Control, MOVIC 04.
- Jansen, L.M., ve Dyke, S.J. (2000). "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study." *J. Engrg. Mech., ASCE*, 126(8):795–803.
- Jimenez, R. ve Alvarez-Icaza, L., (2002), "Real time identification of structures with magnetorheological dampers", *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control Las Vegas, Nevada USA*.
- Jimenez, R. ve Alvarez-Icaza, L., (2004), "Civil structures semi-active control with limited measurements", *Proceedings of the American Control conference, Boston, Massachusetts*.
- Jimenez, R. ve Alvarez-Icaza, L., (2005), "LuGre friction model for a magnetorheological damper", *Structural Control and Health Monitoring*, 12:91-116.
- Johnson, E.A. ve Erkus, B., (2007), "Dissipativity and Performance Analysis of Smart Dampers via LMI Synthesis", *Struct. Control Health Monit.*, 14:471-496.
- Jung, Hyung-Jo, Choi, Kang-Min, Spencer, Jr. Billie F., ve Lee, In-Won, (2006) "Applicatin

of some semiactive control algorithms to a smart base-isolated building employing MR dampers”, *Structural Control and Health Monitoring*, 13:693-704.

Kamath, G.M., Hurt, M.K., Wereley, N.M., (1996), “Analysis and testing of Bingham plastic behavior in semi-active electrorheological fluid dampers”, *Smart Materials & Structures*, 5(5): 576-590.

Kamath, G.M. ve Wereley, N.M., (1997), “A nonlinear viscoelasticplastic model for electrorheological fluids”, *Smart Mater Struc.* 6(3):351-359.

Kerschen, G., Vakakis, A.F., Lee, Y.S., McFarland, D.M. ve Bergman L.A., (2008), “Toward a Fundamental Understanding of the Hilbert-Huang Transform in Nonlinear Structural Dynamics”, *Journal of Vibration and Control*, 14(1-2): 77-105.

Koo, J.-H., Goncalves F.D. ve Ahmadian M., (2006a), “A Comprehensive Analysis of the Response Time of MR Dampers”, *Smart Mater. Struct.* 15:351-358.

Koo, J.-H., Ahmadian, M. ve Setarah, M., (2006b), “Experimental Robustness Analysis of Magneto-rheological Tuned Vibration Absorbers Subject to Mass Off-Tuning”, *Journal of Vibration and Acoustics*, 128:126-131.

Krstic, M., Kanellakopoulos, I. ve Kokotovic, P., (1995) *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Wiley and Sons, New York.

Leitmann, G. (1994). “Semiactive control for vibration attenuation.” *J. Intelligent Material Systems and Structures*, 5:841–846.

Li, Z., Liu, J. ve He, Y., (2006), “Intelligent Control and Tracking Identification of Magnetorheological Damper Based on Improved BP Neural Networks”, *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China.

Lin, P.Y., Chung, L.L. ve Loh, C.H., (2005), “Semiactive Control of Buildings Semiactive Tuned Mass Damper”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20:35-51.

Lin, P.-Y., Roschke, P. ve Loh, C.H., (2007), “Hybrid Base-Isolation with Magnetorheological Damper and Fuzzy Control”, *Struct. Control Health Monit.* 14:384-405.

Lynch, J.P., Wang, Y., Swartz, R.A., Lu, K.C. ve Loh, C.H., (2008), “Implementation of a Closed-Loop Structural Control System using Wireless Sensor Networks”, *Struct. Control Health Monit.*, 15(4):518-539.

MATLAB® Robust Control Toolbox (2009), The Mathworks.

McClamroch, N.H., ve Gavin, H.P. (1995). “Closed loop structural control using electrorheological dampers.” *Proc. American Control Conf.*, Seattle, Washington, pp. 4173–4177.

Nagarajaiah, S., ve Sahasrabudhe, S., (2006), “Seismic Response Control of Smart Sliding Isolated Buildings using Variable Stiffness Systems: An Experimental and Numerical Study”, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 35:177-197.

Neelakantan, V.J. ve Washington, G.N., (2008), “Vibration Control of Structural Systems using MR Dampers and a ‘Modified’ Sliding Mode Control Technique”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19:211-224.

Ohtori, Y., Christenson, R.E., Spencer, Jr. B.F., ve Dyke, S.J., (2004) “Benchmark Control

- Problem for Sesimically Excited Nonlinear Buildings”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 130:366-385.
- Park, K.-W., Koh, H.-M. ve Seo, C.-W., (2004), “Independent Modal Space Fuzzy Control of Earthquake-Excited Structures”, *Engineering Structures*, 26:279-289.
- Pin-Qi, Xia, (2005), “An Inverse Model of MR Damper using Optimal Neural Network and System Identification”, *Journal of Sound and Vibration*, 266:1009-1023.
- Rabinow, J. (1948), “The Magnetic Fluid Clutch”, *AIEE Transactions*, 67:1308-1315.
- Rabinow, J. (1951), “Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device” U.S. Patent Number 2,575,360.
- Sahasrabudhe, S. ve Nagarajaiah, S., (2005), “Experimental Study of Sliding Base-Isolated Buildings with Magneto-rheological Dampers in Near-Fault Earthquake”, *Journal of Structural Engineering*, 131:1025-1034.
- Sakai, C., Ohmori, H. ve Sano, A., (2003a), “Modeling of MR Damper with Hysteresis and Application to Vibration Control”, *SICE Annual Conference in Fukui*.
- Sakai, C., Ohmori, H. ve Sano, A., (2003b), “Modeling of MR Damper with Hysteresis for Adaptive Vibration Control”, *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control Maui, Hawaii USA*.
- Sakai, C., Terasawa, T. ve Sano, A., (2005), “Integration of Bilinear H_∞ Control and Adaptive Inverse Control for Semi-Active Vibration Isolation of Structures”, *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and the European Control Conference 2005 Seville, Spain*.
- Sampei, M., Mita, T. ve Nakamichi, M., (1990), “An Algebraic Approach to H_∞ Output Feedback Control Problems”, *Systems and Control Letters* 14, 13-24.
- Sang-Won, Cho, Byoung-Wan, Kim, Hyung-Jo, Jung ve In-Won, Lee, (2005), “Implementation of Modal Control for Seismically Excited Structures using Magnetorheological Dampers”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 131:177-184.
- Setareh, M., Ritchey, J.K., Murray, T.M., Koo, J.-H. ve Ahmadian, M., (2007), “Semiactive Tuned Mass Damper for Floor Vibration”, *Journal of Structural Engineering*, 133:242-250.
- Scruggs, J.T. ve Iwan, W.D., (2005) “Structural control with regenerative force actuation networks”, *Structural Control & Health Monitoring*, 12(1): 25-45
- Slotine, J.J. ve Li, W., (1991), *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliff, Prentice Hall, New Jersey.
- Song, X., Ahmadian, M., Southward, S. ve Miller, L.R., (2005), “An Adaptive Semiactive Control Algorithm for Magnetorheological Suspension Systems”, *Journal of Vibration and Acoustics*, 127: 493-502.
- Spencer, Jr. B.F., Dyke, S.J. ve Sain, M.K., (1996) “Magnetorheological Dampers: A new Approach to seismic Protection of Structures”, *Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control Kobe, Japan*.
- Spencer, B.F. ve Sain, K. (1997a), “Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback”, *IEEE Control System Magazine*, 12(6):693-703.
- Spencer, Jr. B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. ve Carlson, J.D., (1997), “Phenomenological model

of a Magnetorheological Damper”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 123(3):230-238.

Stevens, N.G, Sproston, J.L. ve Stanway, R., (1984), “Experimental evaluation of a simple electroviscous damper” *J. Electrostatics* 15:275–83

Stanway, R. Sproston, J.L. ve Stevens, N.G. (1985). “Non-linear Identification of an Electrorheological Vibration Damper.” *IFAC Identification and System Parameter Estimation*, s. 195–200.

Stanway, R., Sproston, J.L. ve Stevens, N.G. (1987). “Non-linear Modelling of an Electrorheological Vibration Damper.” *J. Electrostatics*, Vol. 20 s. 167–184.

Strangroom, J.E. (1983), “Electro-Rheological Fluids”, *Physics in Technology*, Vol. 14, s. 290-296.

Terasawa, T. ve Sano, A., (2005), “Fully Adaptive Vibration Control for Uncertain Structure Installed with MR Damper”, *American Control Conference*, Portland, OR, USA.

Terasawa, T., Sakai, C., Ohmori, H. ve Sano, A., (2004), “Adaptive identification of MR damper for vibration control”, *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, Paradise Isl, BAHAMAS, 2297-2303.

Tipireddy, R., Nasrellah, H.A., Manohar, C.S., (2009), “A Kalman Filtler Based Strategy for Linear Structural System Identification Based on Multiple Static and Dynamic Test Data”, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 24:60-74.

Villamizar, R., Luo, N., Dyke, S.J., ve Vehi, J., (2005), “Experimental verification of backstepping controllers for magnetorheological MR dampers in structural control”, *IEEE International Symposium on Intelligent Control & 13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Limassol, CYPRUS, 316-321.

Wang, B.-T., Cheng, D.-K., (2008), “Modal Analysis of MDOF System by Using Free Vibration Response Data Only”, *Journal of Sound and Vibration* 311:737-755.

Wen, Y.K., (1976), “Method for random vibration of hysteretic systems”, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 102(EM2):249–263.

Winslow, W.M. (1947), “Method and Means for Translating Electrical Impulses into Mechanical Force”, *U.S. Patent Number* 2,417,850.

Winslow, W.M. (1949), “Induced Fibration of Suspension”, *Journal of Applied Physics*, Vol.20. s.1137-1140.

Yan, G., ve Zhou, L.L., (2006), “Integrated Fuzzy Logic and Genetic Algorithms for Multi-Objective Control of Structures using MR Dampers”, *Journal of Sound and Vibration*, 296, 368-382.

Yang, G., Spencer, Jr. B.F., Carlson, J.D. ve Sain, M.K., (2002), “Large-scale MR Fluid Dampers: Modeling and Dynamic Performance Considerations”, *Engineering Structures*, 24: 309-323.

Yang, G., Spencer, Jr. Billie F., Jung, Hyung-Ju, Carlson, J. David, (2004) “Dynamic Modeling of Large-Scale Magnetorheological Damper Systems for Civil Engineering Applications”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 130:1107-1114.

Yang, J.N., Lei, Y., Pan, S., Huang, N., (2003), “System Identificaiton of Linear Structures

Based on Hilbert-Huang Spectral Analysis. Part I: Normal Modes”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32:1443-1467.

Yao, J.T.P (1972), “Concept of Structural Control”, *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol.98, s.567-1574.

Ying, Z.G., Zhu, W.Q. ve Soong, T.T., (2003), “A Stochastic Optimal Semi-Active Control Strategy for ER/MR Dampers”, *Journal of Sound and Vibration*, 259(1), 45-62.

Ying, Z.G., Ni, Y.Q. ve Ko, J.M., (2007), “A Bounded Stochastic Optimal Semi-active Control”, *Journal of Sound and Vibration*, 304:948-956.

Yuen, K.-V., Shi, Y., Beck, J.L. ve Lam, H.-F., (2007), “Structural Protection using MR Dampers with Clipped Robust Reliability-based Control”, *Struct. Multidisc. Optim*, 34:431-443.

Zhou, L., Chang, C.-C. vVe Wang, L.-X., (2003), “Adaptive Fuzzy Control for Nonlinear Building-Magnetorheological Damper System”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 129(7):905-913.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	22.01.1980	
Doğum Yeri	Yerköy/ YOZGAT	
Lise	1993-1997	Sincan Süper Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fak. Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı
Doktora	2003-2004	Hazırlık (Yabancı Dil)
	2004-...	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Programı

Çalıştığı Kurumlar

2001- ...	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fak. Makina Mühendisliği Bölümü Makina Teorisi Sistem Dinamiği ve Kontrol A.B.D Araştırma Görevlisi
-----------	--