

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPILARIN YARI-AKTİF MR DAMPERLER İLE
KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Özge ŞAHİN ÇETİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

NİSAN 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPILARIN YARI-AKTİF MR DAMPERLER İLE
KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Özge ŞAHİN ÇETİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Naci ÇAĞLAR

NİSAN 2023

Özge ŞAHİN ÇETİN tarafından hazırlanan “Yapıların Yarı-Aktif MR Damperler ile Kontrolü” adlı tez çalışması 27.04.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı **Yapı** Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof.Dr.Naci ÇAĞLAR**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof.Dr.Erkan ÇELEBİ**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr.Öğr.Üyesi Osman KIRTEL**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç.Dr.Aydın DEMİR**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç.Dr.Yusuf SÜMER**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Yapıların Yarı-Aktif MR Damperler ile Kontrolü” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(27/04/2023)

Özge ŞAHİN ÇETİN





Anne, Babam ve Çağın Asya'ma...



TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli danışman hocam Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR'a desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasına vesile olan kıymetli hocam Prof. Dr. Tahsin ENGİN'e şükranlarımı sunarım.

İçerisinde bulunduğumuz proje kapsamında birlikte yürüdüğümüz değerli hocalarım Doç. Dr. Gürsoy TURAN, Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞAHİN, Doç. Dr. Zekeriya PARLAK, Doç. Dr. Seval GENÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR'a teşekkür ederim. Bu süreci birlikte paylaştığım ve çalışmanın her aşamasında bilgi ve tecrübesinden istifade ettiğim değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Muaz KEMERLİ'ye ayrıca çok teşekkür ederim. Çalışmada emeği geçen SANLAB firmasına ve Sn. Beşir TAYFUR ile Sn. Berkay VOLKANER'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu süreç boyunca çalışmama gösterdikleri katkılarından dolayı Sn. Muhammed Burhan NAVDAR'a, Sn. Berna İSTEGÜN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Esra DOBRUCALI'ya teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, bugünlere gelmeme vesile olan canım annem Muazzez ŞAHİN ve babam Zeki ŞAHİN'e sonsuz teşekkür ederim. Bu süreçte sevgi ve güveniyle beni destekleyen, motive eden ve hayatımı kolaylaştıran sevgili eşim Levent ÇETİN'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına 115M363 no'lu proje kapsamında maddi yönden destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) şükranlarımı ifade etmek isterim.

Özge ŞAHİN ÇETİN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam	3
1.2. Motivasyon	6
1.3. Tez İçerik Planı	7
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
2.1. Kontrol Sistemleri	9
2.2. Yapısal Kontrol	12
2.2.1. Aktif kontrol	13
2.2.2. Pasif kontrol	15
2.2.3. Yarı-aktif kontrol	18
2.2.4. Hibrid (karma) kontrol	20
2.3. Literatür Taraması	22
3. MR TEKNOLOJİSİ VE MR DAMPER MODELLERİ.....	45
3.1. MR Akışkanlar	45
3.2. MR Damper	47
3.2.1. Tek milli MR damper	48
3.2.2. Çift milli MR damper	50
3.2.3. Dönel MR damper	50
3.3. MR Damper Uygulamaları	51
3.4. MR Damperin Dinamik Modelleri	53
3.4.1. Parametrik modeller	53
3.4.2. Parametrik olmayan modeller	57
4. YARI AKTİF KONTROL UYGULANAN YAPISAL SİSTEMLERİN HAREKET DENKLEMLERİ VE KONTROLÖR TASARIMI....	61
4.1. Hareket Denklemi Formülasyonu	61
4.2. Durum-uzay Gösterimi	62
4.3. Yarı-aktif Kontrol Yöntemi	65

4.3.1. Kuvvet kontrolü.....	65
4.3.2. Akım kontrolü	70
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	73
5.1. Bina Modellerinin Tasarım ve Üretim Süreci	73
5.2. Deney Düzenegi	77
5.3. Sarsma Tablası Arayüzü.....	82
5.4. Kontrolcü Arayüzü	85
5.5. Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi.....	89
5.6. Deney Tasarımı	91
5.7. Bina Modellerinin Sarsma Tablası Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	94
5.7.1. Beş katlı bina modelinin deneysel ölçüm sonuçları	95
5.7.2. Altı katlı bina modelinin deneysel ölçüm sonuçları.....	99
5.7.3. Yedi katlı bina modelinin deneysel ölçüm sonuçları	102
5.7.4. Sekiz katlı bina modelinin deneysel ölçüm sonuçları	105
6. SİSTEM TANILAMA VE MODEL GÜNCELLEME.....	111
6.1. Model Parametrelerinin Klasik Yöntemle Belirlenmesi	111
6.2. Sönüm Oranının Belirlenmesi	113
6.3. Doğal Frekans ve Mod Şekillerinin Belirlenmesi	114
6.3.1. Analitik yöntem.....	114
6.3.2. Deneysel yöntem	116
6.4. Bina Modelinin Dinamik Davranışının Değerlendirilmesi	119
6.4.1. Bina modelinin deprem davranışının benzetimi.....	119
6.4.2. Bina modelinin serbest titreşim ölçümlerinin benzetimi.....	120
6.5. Model Güncelleme	121
6.5.1. Serbest titreşim davranışının simulink ortamında modellenmesi	123
6.5.2. Model parametrelerinin güncellenmesi.....	125
6.5.3. Bina modelinin güncellenmiş sistem parametreleri ile dinamik davranışının değerlendirilmesi.....	129
7. MR DAMPER İLE YARI AKTİF KONTROL EDİLEN BİNA MODELİNE AİT SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	131
7.1. Simülasyon Yapısı.....	131
7.2. Simülasyon Blok Diyagramları	132
7.2.1. Yapısal sistem bloğu	133
7.2.2. Kuvvet kontrolü bloğu	134
7.2.3. Akım kontrolü bloğu.....	138
7.2.4. MR damper bloğu.....	139
7.3. Simülasyon Çözüm Kontrolü	139
7.4. Deneysel Çalışmaların Simülasyon Modelleriyle Doğrulanması.....	141
8. OPTİMUM MR DAMPER YERLEŞİMİNİN BELİRLENMESİ	145
8.1. Simülasyon Çalışmaları.....	145
8.2. Simülasyon Sonuçları.....	148
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	151
KAYNAKLAR.....	157
EKLER.....	167
ÖZGEÇMİŞ.....	169

KISALTMALAR

ANFIS	: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
DAFZ	: Doğu Anadolu Fay Zonu
DBB	: Decentralized Bang Bang
EBC	: Enerji tabanlı kontrolör (Energy Based Controller)
ER	: Elektroeolojik
FDD	: Frekans alanı ayırıklaştırma metodu
GA	: Genetik Algoritma
IDRA	: Interstory Displacement Response Based Adaptive
KAFZ	: Kuzey Anadolu Fayı
LQC	: Lineer kuadratik kontrolör (Linear Quadratic Controller)
LQG	: Lineer kuadratik gaussian (Linear Quadratic Gaussian)
LQR	: Lineer kuadratik regülatör (Linear Quadratic Regulator)
MIMO	: Çok giriş-çok çıkışlı (Multiple Input-Multiple Output)
MR	: Manyetoreolojik
NARX	: Nonlinear Autoregressive Exogenous Model
PAC	: Phase Angle Control
PID	: Oransal-integral-türev (Proportional Integral Derivative)
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
PSD	: Güç spektrum yoğunluk (Power Spectral Density)
RE	: Ham hata (Raw Error)
RMS	: Karelerinin ortalamasının karekökü (Root Mean Square)
SAE	: Mutlak hata toplamı (Sum Absolute Error)
SISO	: Tek giriş-tek çıkışlı (Single Input-Single Output)
SMC	: Kayan kipli kontrol (Sliding Mode Control)
SSE	: Hata kareleri toplamı (Sum of Squared Errors)
TLD	: Ayarlı akışkan sönümleyici (Tuned Liquid Damper)
TMD	: Ayarlı kütle sönümleyici (Tuned Mass Damper)
YSA	: Yapay Sinir Ağları
UDT	: Üniform deformasyon teorisi (Uniform Deformation Theory)



SİMGELER

A	: Durum matrisi
$b(t)$	: Geri besleme sinyali
B	: Giriş matrisi
c_0	: MR damper sönüm katsayısı
c_b	: Viskoz sönüm katsayısı
c_1	: Düşük hızdaki damper viskoz sönümü
C	: Çıkış matrisi
C_s	: Sönüm matrisi
$C(x)$	: Kısıtlama fonksiyonu
$d_i(t)$	: i. katın görelî kat ötelemesi
D	: İleri besleme matrisi
$e(t)$	: Hata değeri
E	: Elastisite modülü
E_{top}	: Toplam kinetik enerji
f_0	: Gaz kuvveti
f_{damper}	: Damper kuvveti
f_y	: Akma kuvveti
F	: MR damperin uygulayacağı kuvvet
$F(x)$	: Amaç fonksiyonu
F_b^{max}	: Kontrolsüz durumdaki maksimum taban kesme kuvveti
G	: Kontrolcü katsayıları vektörü
h_i	: i. katın yüksekliği
i	: Mod sayısı
I	: Kesit atalet momenti
I_{damper}	: MR damper akım değeri
j	: Devir sayısı
J_1	: Maksimum görelî kat ötelemesi oranı indeksi
J_2	: Maksimum mutlak ivme indeksi

J_3	: Maksimum taban kesme kuvveti indeksi
J_4	: Normlu maksimum görelî kat ötelemesi oranı indeksi
J_5	: Normlu maksimum mutlak ivme indeksi
J_6	: Normlu maksimum taban kesme kuvveti indeksi
k	: Örnekleme zamanı
k_0	: MR damper yay katsayısı
k_1	: Zemin kat rijitliğı
K	: Enerji tabanlı kontrolör katsayısı
K_d	: Türevsel kazanç
K_i	: İntegral kazanç
K_p	: Orantılı kazanç
K_s	: Rijitlik matrisi
L	: Kolon net uzunluğı
m_i	: i. katın kütlesi
M_s	: Kütle matrisi
N	: Örnekleme sayısı
$r(t)$	: Referans giriş işareti
S	: Kayma fonksiyonu
t	: Zaman değışkeni
t_f	: Normlu veri süresi
$u(t)$	: Kontrol işareti
u_{eq}	: Eşdeğer kontrol kuvveti
u_i	: i. yer değıştirme genlik değeri
$U(t)$	: Kontrol vektörü
v_1	: Damperin bağılı olduğı katın hızı
v_{damper}	: Damperin hızı
v_{ref}	: Damperin bağılı olduğı katın referans hızı
V_i	: i. katın hızı
w_i	: i. modun açısal frekansı
x	: Durum değışkeni
x_0	: Akümülatör etkisi
x_1	: Damperin bağılı olduğı katın yer değıştirmesi
x_{ref}	: Damperin bağılı olduğı katın referans yer değıştirmesi

$\mathbf{x}_{\text{damper}}$	: Damperin konumu
$\mathbf{x}(\mathbf{t})$	: Yapısal yer değiştirme
$\mathbf{x}_1(\mathbf{t})$	: Zemin katın görelî kat yer değiştirmesi
$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t})$	: Yapısal hız
$\ddot{\mathbf{x}}(\mathbf{t})$	: Yapısal ivme
$\ddot{\mathbf{x}}_{ai}(\mathbf{t})$	: i. katın kontrollü durumdaki mutlak ivme değeri
$\ddot{\mathbf{x}}_a^{\text{max}}$	: Kontrolsüz durumdaki mutlak ivme değeri
$\ddot{\mathbf{x}}_g$	: Yer titreşim ivmesi
$\mathbf{X}$	: Durum değişkenleri vektörü
$\dot{\mathbf{X}}(\mathbf{t})$	: Durum değişkenleri vektörünün zamana göre türevi
$\mathbf{y}_{\text{ref}}$	: Ölçülen tepki veya referans sinyali
$\mathbf{y}_{\text{sim}}$	: Simülasyon yanıtı
$\mathbf{y}(\mathbf{t})$	: Sistem çıkışı
$\dot{\mathbf{y}}$	: Damperin yer değiştirmesi
$\alpha \mathbf{z}$	: Bouc-Wen bileşeni
$\mathbf{A}, \mathbf{n}, \alpha, \beta, \gamma$	: Sabit katsayılar
$\mathbf{z}$	: Histerezis değişkeni
λ	: Yer hareketi etki vektörü
λ_n	: Öz değeri
Γ	: Damper konum vektörü
α, β	: Kayma yüzeyi eğimi sabit katsayıları
σ	: Kayma yüzeyi
$\dot{\sigma}$	: Kayma yüzeyindeki değişim
$\varphi(\mathbf{t})$	: Kayma fonksiyonunun zamanla değişen bileşeni
$\Phi(\mathbf{x})$	: Kayma fonksiyonunun durum değişkeni ile değişen bileşeni
$\mathbf{v}$	: Lyapunov fonksiyonu
μ	: Lyapunov kararlılığından gelen pozitif değeri
$\Delta \mathbf{t}$	: Örnekleme zamanı
τ	: Entegrasyon değişkeni
δ^{max}	: Kontrolsüz durumdaki maksimum görelî kat ötelemesi oranı
$\ \cdot\ $	: Norm değeri sembolü
$\ \delta^{\text{max}}\ $	: Kontrolsüz normlu maksimum görelî kat ötelemesi oranı
$\ \ddot{\mathbf{x}}_a^{\text{max}}\ $	: Kontrolsüz durumdaki normlu taban kesme kuvveti

$\ F_b^{\max}\ $	: Kontrolsüz durumdaki normlu taban kesme kuvveti
ξ_i	: i. modun sönümü
ξ_j	: j. modun sönümü
ϕ	: Yapının titreşim modu
ϕ_n	: Öz vektör



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Türkiye’de meydana gelen büyük depremler (KRDAE, 2022).	1
Tablo 2.1. Yapısal kontrol sistemleri.	12
Tablo 5.1. Betonarme binanın analitik ve deneysel frekans değerleri.	75
Tablo 5.2. Bina modeli ve gerçek yapının doğal frekans değerleri.	76
Tablo 5.3. Sarsma tablası hareket sınırları.	77
Tablo 5.4. İvmeölçerlere ait genel özellikler.	79
Tablo 5.5. Deney matrisi.	92
Tablo 5.6. Deprem ivme genliği azaltma katsayıları.	94
Tablo 5.7. Beş katlı bina modeline ait değerlendirme kriterleri.	98
Tablo 5.8. Altı katlı bina modeline ait değerlendirme kriterleri.	101
Tablo 5.9. Yedi katlı bina modeline ait değerlendirme kriterleri.	105
Tablo 5.10. Sekiz katlı bina modeline ait değerlendirme kriterleri.	108
Tablo 6.1. Doğal frekans değerleri karşılaştırma tablosu.	117
Tablo 6.2. Amaç fonksiyonları ve formülasyonları (Mathworks, 2022).	126
Tablo 6.3. Titreşim frekansları karşılaştırma tablosu.	128
Tablo 7.1. Simülasyon içerisinde kullanılan sistem parametreleri.	140
Tablo 8.1. Değerlendirme kriterleri.	148
Tablo 8.2. Damper konumuna göre performans indekslerindeki değişim oranları.	149



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD, 2022).	6
Şekil 2.1. Dinamik sistem davranışı.	9
Şekil 2.2. Açık çevrim blok diyagramı.	10
Şekil 2.3. Kapalı çevrim blok diyagramı.	11
Şekil 2.4. Aktif kontrol sistemlerine ait genel blok diyagramı.	13
Şekil 2.5. Aktif kontrol uygulanan Kyobashi Seiwa Binası, Japonya (Christenson, 2001).	14
Şekil 2.6. Pasif kontrol sistemlerine ait genel blok diyagramı.	15
Şekil 2.7. Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Binası taban izolasyon uygulaması (Kan ve ark, 2017).....	16
Şekil 2.8. Antalya Havaalanı Terminal Binası (Kan ve ark, 2017).	17
Şekil 2.9. Tarabya Oteli (Zelanda, 2015).....	18
Şekil 2.10. Yarı-aktif kontrol sistemlerine ait genel blok diyagramı.....	19
Şekil 2.11. Kajima Teknik Araştırma Enstitüsü binası (Roësset ve Yao, 2003).	19
Şekil 2.12. Hibrid kontrollü Sendagaya INTES binası (Soong ve Spencer, 2000). ..	21
Şekil 2.13. Fourier tepki spektrumları (Soong ve Spencer, 2000).....	21
Şekil 2.14. MR damper uygulaması (Dyke, Sain ve ark, 1996).	23
Şekil 2.15. Test yapısı ve deney düzeneği (Çetin ve ark, 2011a, 2011b).	25
Şekil 2.16. Bitişik iki yapısal sistemde MR damper yerleşim detayı (Bharti ve ark, 2010).	26
Şekil 2.17. Yapısal sisteme ait deney düzeneği (Basili ve ark, 2013)	27
Şekil 2.18. Prototip test yapısı ve test düzeneği (Yi ve ark, 2001)	28
Şekil 2.19. MR damper yerleşim planı (Jansen ve Dyke, 2000).	32
Şekil 2.20. Deneysel sistem (Miah ve ark, 2017).	35
Şekil 2.21. Sarsma tablası testleri (Rashid Wani ve ark, 2021).	37
Şekil 2.22. Tam ölçekli yapısal sistem ve MR damper yerleşim detayı (Lee ve ark, 2010).	38
Şekil 2.23. Bill Emerson köprüsü (Ok ve ark, 2007).....	40
Şekil 2.24. Köprü modeli ve MR damper yerleşimi (Heo ve ark, 2014).....	41
Şekil 3.1. MR akışkanın manyetik alansız (sol) ve manyetik alan etkisinde (sağ) gösterdiği davranış (Parker, 2023).	45
Şekil 3.2. MR akışkan çalışma modları (a) Kayma modu (b) Akış modu (c) Sıkıştırma modu (Cruze ve ark, 2018).....	46
Şekil 3.3. Tek milli doğrusal MR damper (George ve ark, 2012).	47
Şekil 3.4. Tek silindirli MR damper (a) damperin yapısı (b) damperin kesiti ve ark, 2018).	49
Şekil 3.5. Çift silindirli MR damper (a) damperin yapısı (b) damperin kesiti (Cruze ve ark, 2018).	49
Şekil 3.6. Çift milli MR damper (Wang ve Liao, 2011).	50

Şekil 3.7. Dönel MR damper (a) Disk tipi (b) Silindir tipi (Imaduddin ve ark, 2013).	51
Şekil 3.8. Basit Bouc-Wen modeli (Dyke ve ark, 1997).....	54
Şekil 3.9. Düzenlenmiş Bouc-Wen modeli (Dyke ve ark, 1997).....	54
Şekil 3.10. Düzenlenmiş Dahl modeli (Wang ve Liao, 2011).	55
Şekil 3.11. Sinir ağı katmanları (Öztürk ve Şahin, 2018).	58
Şekil 4.1. Yarı aktif kontrol yöntemine ait genel akış şeması.....	65
Şekil 4.2. PID kontrolöre ait genel blok diyagramı.	66
Şekil 4.3. Ters MR damper modeline ait yapay sinir ağı şeması.	70
Şekil 5.1. Deney düzeneğinin genel blok diyagramı.	73
Şekil 5.2. Beş katlı betonarme binanın ölçüm alınan karkas durumu.	74
Şekil 5.3. Yapısal sistemin imalat modeli (sol) üretim modeli (sağ).	75
Şekil 5.4. Bina modelleri perspektif görünüşler (sol) imalat modelleri (sağ).	77
Şekil 5.5. Bina modeli ve deney düzeneği.	78
Şekil 5.6. İpli pozisyon ölçer detayları (a) ipli pozisyon ölçer (b) rijit kuleye bağlantı detayı (c) koruma kutusu.	79
Şekil 5.7. İvme ölçer detayları (a) DAQ şasesi ve DAQ kartları (b) Tek eksenli ivmeölçer (c) Üç eksenli ivmeölçer (d) Veri bağlantı elemanı.	80
Şekil 5.8. Deneysel çalışmada kullanılan MR damper çeşitleri (a) Lord damper (b) damper-1 (c) damper-2 (d) damper-3.	80
Şekil 5.9. MR damper bağlantı detayı.....	81
Şekil 5.10. Sarsma tablası kullanıcı arayüzü ana ekranı.	82
Şekil 5.11. Dosyadan okuma ekranı.....	83
Şekil 5.12. Sinyal oluşturucu ekran.	84
Şekil 5.13. Manuel eksen kontrolü.....	84
Şekil 5.14. Kontrolcüler ve ayarlar bölümü.	85
Şekil 5.15. MR damper akım tipi bölümü.....	86
Şekil 5.16. Grafikler bölümü, Yer Değişimleri alt bölümü.	87
Şekil 5.17. Grafikler bölümü, MR Damper-Yer ivmeölçerleri alt bölümü.....	88
Şekil 5.18. Filtreler bölümü.	88
Şekil 5.19. Değerlendirme kriterleri bölümü.	89
Şekil 5.20. Deneysel çalışmada kullanılan depremlerin ivme-zaman grafikleri, El-Centro (üst), Kocaeli (alt).....	93
Şekil 5.21. El Centro (üst) ve Kocaeli (alt) deprem ivmeleri etkisi altındaki beş katlı bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği.	95
Şekil 5.22. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki beş katlı bina modelinin maksimum görelî kat öteleme grafikleri.	96
Şekil 5.23. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki beş katlı bina modelinin maksimum mutlak ivme grafikleri.	97
Şekil 5.24. El Centro (üst) ve Kocaeli (alt) deprem ivmeleri etkisi altındaki altı katlı bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği.	99
Şekil 5.25. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki altı katlı bina modelinin maksimum görelî kat öteleme grafikleri.	100
Şekil 5.26. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki altı katlı bina modelinin maksimum mutlak ivme grafikleri.	100
Şekil 5.27. El Centro (üst) ve Kocaeli (alt) deprem ivmeleri etkisi altındaki yedi katlı bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği.	102
Şekil 5.28. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki altı katlı bina modelinin maksimum görelî kat öteleme grafikleri.	103

Şekil 5.29. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki yedi katlı bina modelinin maksimum mutlak ivme grafikleri.	103
Şekil 5.30. El Centro (üst) ve Kocaeli (alt) deprem ivmeleri etkisi altındaki sekiz katlı bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği.	106
Şekil 5.31. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki sekiz katlı bina modelinin maksimum göreceli kat öteleme grafikleri.	107
Şekil 5.32. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki sekiz katlı bina modelinin maksimum mutlak ivme grafikleri.	107
Şekil 6.1. Bina modelinin serbest titreşimine ait yer değiştirme zaman cevapları. .	114
Şekil 6.2. Beş katlı kayma çerçevesinin matematik modeli.....	115
Şekil 6.3. Güç spektral yoğunluk matrisinin tekil değerlere ayrıştırılması.....	117
Şekil 6.4. Analitik ve deneysel yöntemle belirlenen mod şekilleri.....	118
Şekil 6.5. Bina modelinin sismik davranışını temsil eden blok diyagram.....	119
Şekil 6.6. El Centro depremi etkisi altındaki bina modelinin 1. katına ait yer değiştirme zaman grafiği.....	120
Şekil 6.7. Bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği.	121
Şekil 6.8. Beş katlı kayma çerçevesinin mekanik modeli.....	123
Şekil 6.9. Bina modelinin serbest titreşimini temsil eden blok diyagram.	124
Şekil 6.10. Model güncelleme çalışmaları ara yüzü.	127
Şekil 6.11. Güncellenmiş parametrelerle hesaplanan analitik ve deneysel mod şekilleri karşılaştırma grafiği	129
Şekil 6.12. Bina modelinin 1.katına ait yer değiştirme zaman grafikleri (üst) El Centro depremi (alt) Serbest titreşim testi	130
Şekil 7.1. Yarı aktif kontrol sisteminin genel blok diyagramı.	133
Şekil 7.2. Yapısal sistem bloğu elemanları.	134
Şekil 7.3. PID kontrolör blok diyagramı.....	135
Şekil 7.4. SMC kontrolör blok diyagramı.....	137
Şekil 7.5. EBC kontrolör blok diyagramı.	137
Şekil 7.6. Yapay sinir ağı blok diyagramı.....	138
Şekil 7.7. MR damper blok diyagramı.....	139
Şekil 7.8. El Centro deprem ivmesi etkisi altındaki yapının 1. katına ait yer değiştirme zaman grafikleri.	142
Şekil 7.9. Kocaeli deprem ivmesi etkisi altındaki yapının 1. katına ait yer değiştirme zaman grafikleri.	143
Şekil 8.1. Yarı aktif kontrollü beş katlı bina modelinin genel blok diyagramı.....	146
Şekil 8.2. Yapısal sisteme ait MR damper yerleşim tipleri.....	147



YAPILARIN YARI-AKTİF MR DAMPERLER İLE KONTROLÜ

ÖZET

Ülkemizde meydana gelen yıkıcı depremlerin oluşturduğu sosyal, ekonomik ve çevresel zararların azaltılması için binaların sismik performansının artırılması önem arz etmektedir. Yapısal kontrol binaları deprem ve rüzgar gibi dinamik etkilerden korumak için geliştirilen efektif yöntemlerden biri olarak kabul edilmiş ve dünyada özellikle son yıllarda çok sayıda gerçek binada uygulama imkanı bulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında, deprem etkisiyle oluşan yapısal titreşimlerin azaltılması ve yapıların sismik performansının artırılmasının incelenmesi amacıyla 5-8 katlı çelik bina modellerine MR sönümleyici ilave etmek suretiyle yarı aktif kontrol uygulanmıştır. Uygulanan yarı aktif kontrol yöntemi MR damperin kuvvet kontrolü ve akım kontrolü olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. MR damperin üreteceği referans kontrol kuvvetinin hesaplanması için literatürde yer alan PID, kayan kipli ve enerji tabanlı kontrolörler mevcut çalışmalardan farklı olarak ilk kez birlikte kullanılmış ve söz konusu algoritmaların işleyişi gerçek zamanlı ölçümlerle test edilmiştir. Bu algoritmalarla belirlenen kuvvete karşılık MR dampere beslenen akım değeri ise yapay sinir ağı modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Bina modellerinin yarı aktif kontrollü sismik tepkileri MR damperin bina modellerine bağlı olduğu ancak herhangi bir akım uygulanmadığı kontrolsüz durumu ile kıyaslanarak pasif kontrol yöntemi de göz önünde bulundurulmuştur. Yarı aktif kontrol yöntemini daha pratik hale getirmek için problemin deneysel çözümünün yanı sıra simülasyon modelleri hazırlanarak sayısal doğrulaması da yapılmıştır. Ayrıca MR damperin bina içerisindeki yerleşimini değiştirmek suretiyle optimum damper yeri sayısal olarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre MR damper ile yarı aktif olarak kontrol edilen yapısal sistemlerin titreşim tepkileri önemli ölçüde azalmıştır. Kontrol kuvvetlerini üretmek için kullanılan algoritmalar yapısal sistemlerin görelî kat yer değiştirme, ivme ve özellikle taban kesme kuvveti değerlerinin azaltılmasında iyi bir performans sergilemiştir. Bununla birlikte kontrolör performansının yapısal sistemin frekansı ile yüksekliğine, sistemi harekete geçiren deprem uyarısına ve uygulanan kontrolörün çalışma prensibine göre değiştiği gösterilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen başarılı sonuçlar MR damper ile yapılarda sismik performansın artırılmasına ülkemiz özelinde katkı sağlayarak gerçek binalarda bu yöntemin uygulanma potansiyelini ortaya çıkarmıştır.



THE CONTROL OF STRUCTURES WITH SEMI-ACTIVE MR DAMPERS

SUMMARY

To reduce the social, economic and environmental damages caused by destructive earthquakes, it is essential to increase the seismic performance of buildings. Structural control has been accepted as one of the most effective methods to protect buildings from dynamic effects such as earthquakes and winds. Among the diverse structural control techniques proposed, the semi-active control with MR damper becomes very promising for the vibration reduction in structures due to its low power requirement, low cost, high reliability and stability. The main purpose of this thesis is to create an effective semi-active control system by using MR dampers in buildings under seismic loads and to increase the seismic performance of buildings by reducing structural vibrations through these dampers. Although studies and real applications are related to passive seismic isolation in our country, research on semi-active structural control with MR dampers is still lacking. The limited number of academic studies contributing to this field shows that it is important to conduct more research considering the seismic history of Turkey.

In this dissertation, the seismic hazard mitigation of structural systems using MR damper was investigated. The study involved the manufactured structural systems, the performance evaluation of various MR damper control algorithms under historical earthquakes, the experimental shaking table tests of the semi-active control scheme and numerical results by performing simulations of the steel building models with MR damper. Chapter one consists of the problem, purpose, scope of this study and significance for civil engineering. In chapter two, a review of the literature and the structural control methods were presented. In chapter three, MR technology and existing MR damper dynamic models based on mechanical components were summarized. Chapter four consists of the details of the semi-active control method with the MR damper applied to the building models were mentioned. In addition, the motion equations of semi-actively controlled structural systems were presented with the state space representation and the theoretical infrastructure of the semi-active controllers was given. Chapter five discusses in detail the methodology and method of the experimental study. The determination of the dynamic properties of the five-story building model by theoretical and experimental methods was presented in chapter six. The measurement results of the semi-actively controlled five-storey building model were compared and verified with the simulation models using the updated system parameters in chapter seven. The damper placement that provides optimum control by changing the location of the MR damper along the structural system was determined numerically in chapter eight. Observations, findings and conclusions of this dissertation were summarized in chapter nine.

This thesis focused on how the semi-active control with MR dampers can work on the seismic behaviour of structures under earthquake effect. The proposed semi-active

control scheme is studied utilizing experimental studies and numerical simulations. The experimental setup used is steel test structures equipped with semi-active MR damper being installed in the Sakarya University Earthquake Engineering Laboratory. Steel building models, which are 5-8 story, were manufactured for the experimental study. Thus, the semi-active control effect in building frames of differing heights was also evaluated. The five-story building model, one of the steel building test models used in the experimental study, was created with reference to the natural frequency values obtained by measuring a real reinforced concrete building with the same floor number selected from the Turkish building stock. The semi-active MR damper is placed horizontally between the ground and first floors of the steel building models to control the dynamic structural responses. The applied semi-active control method consists of two stages: force control and current control of the MR damper. The semi-active controllers studied in this dissertation include: (1) PID controller; (2) sliding mode controller; and (3) energy based controller. The controllers which are selected from the literature were used simultaneously to calculate the reference control forces produced by the MR damper unlike the existing studies. Proposed control algorithms were used in the feedback loop and tuned by trial and error method to command the voltage required by the MR damper. Control forces applied to the steel building models were sensed by means of force sensor placed in series with the MR damper. Structural responses were measured at each floor of the test structures using accelerometers and displacement transducers. The current signal fed to the MR damper against the reference force determined by the controllers was calculated using artificial neural networks. The functioning of the algorithms has been tested under real-time experiments. Ground excitations were obtained using the six degrees of freedom shaking table of the SANLAB SMotion 3000 model, which is 2.5 x 2.5 m in size and has a load capacity of 30 kN. The 1940 El Centro and 1999 Kocaeli Earthquake records were used as input seismic motions. The amplitudes of earthquake accelerations applied to the system as a driving force was scaled to keep the structural system responses in the linear elastic region. One of the MR dampers used in the experiments is a prototype device manufactured by Lord Corporation, and three others are domestic production for testing and evaluation. Real-time shaking table tests using an MR damper were conducted to evaluate the performance of various structural control algorithms to the evaluation criteria selected from the literature. Evaluation criteria used in this study are interstory drift, acceleration, base shear force and mean values of the response of the structural systems. The passive control method is also considered by using the uncontrolled state of the MR damper.

Numerical verification was also done to make the semi-active control method more practical. The dynamic properties of the five-story building model were determined using analytical and experimental methods to verify the measurement results obtained from the experimental studies. In the first stage, the analytical solution of the natural frequency values and mode shapes has been obtained using an eigenvalue solution on MATLAB software. Second, natural frequencies and all modes contributing to the structural vibration at a given frequency have been determined using the frequency domain decomposition method. Finally, the analytical solution has been updated with experimental data using a simulation-based model update technique. The state-space approach has been used in modelling the structural systems, damper and controllers interface in MATLAB and Simulink. The conclusions derived from the numerical simulations are in close agreement with experimental results validating the use of real-

time experiments as a means of investigating the seismic performance of structures with semi-active MR dampers subject to earthquake excitations. From this point of view, the optimum damper placement was determined numerically by changing the position of the MR damper along the building height.

According to the results obtained from shaking table tests under historical earthquakes, applying semi-active control with the MR damper has effectively reduced the structural vibrations by up to 67% at high amplitude levels. However, the performance of MR damper is often of limited effectiveness in uncontrolled structural behaviour at low amplitude vibrations. The algorithms used to generate the control forces performed well in reducing the interstory drift, acceleration and especially base shear forces of the structural systems. The results of different controller and damper types for each building model show that the semi-active control method applied is affected by the natural frequency of the structural system. On the other hand, the performance of a controller significantly depends on various factors including the height of the structural system, excitation type and the working principle of the applied controller. Considering the evaluation criteria used in the study, the locally produced MR damper has achieved successful results for our country by outperforming the commercial damper. The control performance of the MR damper placed between the ground and the first floor has decreased as the number of building floors increases. It was especially determined that the semi-active control method was effective on the lower floors but could not provide a significant reduction on the upper floors from the graphs of the relative interstory drifts of the seven and eight-storey test structures. The successful results obtained from this study are a preliminary study of semi-active control applications in actual buildings by contributing to the increase of seismic performance in buildings with MR damper in our country.



1. GİRİŞ

Doğal afetler yer tabanlı veya iklimsel değişiklikler sebebiyle meydana gelen doğa olaylarıdır. Dünya üzerindeki pek çok yerde ve ülkemizde yaşanan en büyük doğal afetlerden biri ise depremdir. Türkiye, Avrasya ve Afrika olmak üzere iki büyük levha ile Arap levhası arasında yer alan Anadolu tektonik plakası üzerinde bulunmaktadır. Bu levhaların oluşturduğu değişik formasyondaki fay hareketleri ülkemizdeki sismik aktivitelerin temelini oluşturur. Türkiye’de meydana gelen sismik olaylar Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ve Batı Anadolu gerilme yapısı olmak üzere üç ana oluşum tarafından kontrol edilmektedir. Bu fay zonları üzerinde son 100 yılda meydana gelen büyük depremler can ve mal kayıpları ile birlikte Tablo 1.1’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Türkiye’de meydana gelen büyük depremler (KRDAE, 2022).

Tarih	Saat	Yer	Şiddet	Büyüklik	Can kaybı	Hasarlı/Yıkılan Bina
27.12.1939	01:57	Erzincan	X-XI	7.9	32968	116720
20.12.1942	16:03	Erbaa, Tokat	IX	7.0	3000	32000
27.11.1943	00:20	Ladik, Samsun	IX-X	7.2	4000	40000
01.02.1944	05:22	Gerede, Bolu	IX-X	7.2	3959	20865
19.08.1966	14:22	Varto, Muş	IX	6.9	2396	20007
28.03.1970	23:02	Gediz, Kütahya	IX	7.2	1086	19291
24.11.1976	14:22	Muradiye, Van	IX	7.5	3840	9232
17.08.1999	03:01	Gölcük, Kocaeli	X	7.8	17480	73342
12.11.1999	18:57	Düzce	IX	7.5	763	35519
23.10.2011	13:41	Van	VIII	7.2	644	17005

Tarihsel depremlerin olduğu yerler incelendiğinde ülkemizin neredeyse tamamının yüksek sismik riskli bölgede olduğunu söylemek mümkündür. Depremselliği çok yüksek olan ülkemiz için potansiyel olarak en yıkıcı fay hattı ise Anadolu ve Avrasya levhalarının buluştuğu Kuzey Anadolu Fay Zonudur. Bu fay zonu üzerinde yer alan Gölcük’te, 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen 7.8 büyüklüğündeki Marmara Depreminde 17.000’den fazla insan yaşamını yitirmiş, 43.000’den fazla insan yaralanmıştır. 12 Kasım 1999 tarihinde ise Gölcük’ün yaklaşık 120 km kuzey

doğusunda yer alan Düzce’de 7.5 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş, bu depremde ise 763 kişi yaşamını yitirirken 5.000 kişi de yaralanmıştır. Ülkemizde yaşanan bu felaketler ve sebep oldukları trajik sonuçlar incelendiğinde yapıların depremin yıkıcı etkilerine karşı korunması hususu hem beşeri hem de ekonomik faktörler açısından önem teşkil etmektedir.

Tarihsel süreç içerisinde yapıların depreme dayanıklı hale getirilmesi konusunda büyük ilerlemeler kaydedilmiş ve teknolojik gelişmelere paralel olarak kapsamlı mühendislik çalışmaları yapılmıştır. Bununla birlikte depreme dayanıklı yapı tasarımı karmaşık doğası nedeniyle halen tam olarak çözülmüş bir problem değildir. Geleneksel depreme dayanıklı yapı tasarımı anlayışına göre, yapısal sistemin şiddetli depremler etkisi altında dayanımında önemli bir azalma olmaması ve dinamik etkilere maruz kalan yapıda göçmenin önlenerek can kaybının azaltılması amaçlanmaktadır. Ancak ileri teknikler ve teknolojik olarak gelişmiş malzemeler kullanan ülkelerde dahi kuvvetli dinamik etkiler altında yapıların hasar almayacağı ya da göçmeyeceğinin teminatı verilememektedir. Yapılar modelleme aşamasında önceden tahmini mümkün olmayan sismik yüklere göre tasarlanmaktadır. Yapı kullanım ömrü boyunca tasarım yüklerinden daha büyük dinamik kuvvetlerle karşılaştığında ise hasar alması kaçınılmazdır. Yapılarda hasar, deprem kuvveti etkisiyle oluşan sismik enerjinin plastik mafsallarda tüketilmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle plastik mafsallarda oluşumu yapının hasar alarak enerji sönümlemesi anlamına gelmektedir. Geleneksel yaklaşıma göre yapının taşıyıcı sisteminde tasarım aşamasında belirlenen performans seviyesine göre hasar oluşumuna izin verilir. Oysaki tarihsel depremlerde oluşan can ve mal kayıplarının büyük çoğunluğu yüksek ivme etkisindeki yapısal olmayan eleman hasarlarıyla gerçekleşmiştir (Aldemir ve Aydın, 2005). Bu sebeple, sadece taşıyıcı sistemi değil taşıyıcı olmayan elemanları da sismik yüklere karşı korumak gerekmektedir. Yapı kontrolünde hedeflenen yalnızca yapısal hasarı önlemek değil, aynı zamanda şiddetli bir depremde sonra bile kesintisiz kullanıma devam etmektir.

Yapıların hasar alarak enerji tüketmesi yerine ilave sönümleme elemanları kullanılması düşüncesi geleneksel tasarıma ek yeni yaklaşımların ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Aldemir ve Aydın, 2005). Yapıların dinamik tepkilerini dışarıdan bir

sönümleme elemanı ekleyerek kontrol etmek amacıyla yapılan mühendislik çalışmalarına yapısal kontrol denir. Yapısal titreşim kontrolü teknolojisi, yapılarda dayanım ve rijitliği esas alan geleneksel yöntemlerden farklı olarak deprem ve rüzgâr gibi dinamik yüklerin neden olduğu titreşimleri azaltmak için geliştirilmiş bir yöntemdir. İnşaat mühendisliğinde yapısal kontrol, titreşim özelliklerini farklı şekillerde değiştirerek veya dinamik etkiye karşı kuvvet uygulayarak kontrol edilen büyük kütleli cisimleri içeren özel bir titreşim problemi olarak düşünülebilir. Dinamik etkiler altındaki yapılara aktif ve pasif kuvvetler uygulayarak sistemin rijitlik, kütle ve sönüm gibi özelliklerini değiştirmek suretiyle yapısal titreşim kontrolü uygulanmaktadır (Housner ve ark, 1997). Ayrıca yeni yapılara ilave olarak uzun yıllar önce inşa edilmiş mevcut binaların da yürürlükteki yönetmelik şartlarını karşılayabilmesi için güçlendirilmesi gerekmektedir. Mevcut yapılarda kontrol sistemlerinin uygulanması güçlendirme yöntemini daha hızlı ve ekonomik hale getirebilecek bir alternatif olarak düşünülebilir.

Özellikle bu çalışmanın gerçekleştirildiği Sakarya ili ve çevresi nüfus yoğunluğunun ve hızlı kentleşmenin en çok görüldüğü bölgelerden biridir. Gelecekte olması beklenen büyük Marmara Depremi için İstanbul başta olmak üzere pek çok ildeki mevcut yapılar büyük risk taşımaktadır. Bu sebeple yapıların sismik performansını arttıracak çözümlere acilen ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan bu çalışma gerek yeni tasarlanan yapıların gerekse de mevcut yapıların deprem performansını iyileştirmek amacıyla uygulamaya yönelik izlenecek adımlara katkı sağlayacaktır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Yapılarda deprem yüklerinin etkisiyle meydana gelen titreşimleri azaltmak ve sismik performansı arttırmak için MR damperlerin kullanımı dünyada oldukça ilgi gören bir araştırma konusudur. MR damperlerin yapısal titreşimleri çok geniş bir yelpazede sönümleyebilme kabiliyetinin mevcut olması bu cihazları diğer yarı aktif sönümleyicilerden bir adım öne çıkarmıştır. Ülkemizde pasif sismik yalıtım ile ilgili çalışmalar ve gerçek uygulamalar mevcut olmakla birlikte MR damperler ile yarı aktif yapısal kontrol araştırmaları halen oldukça eksiktir. Akademik olarak gerçekleştirilen az sayıdaki çalışma bu alana katkı sunarken ülkemizin sismik geçmişi ve depremselliği

göz önünde bulundurulduğunda daha fazla araştırma yapılması hususu önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, sismik yükler etkisi altındaki binalarda MR damper kullanarak etkin bir yarı aktif kontrol sistemi oluşturmak ve yapısal titreşimleri bu sönümleyiciler vasıtasıyla azaltarak yapıların sismik performansı arttırmaktır. Çalışma özelinde ise aşağıda sıralanan hedeflerin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

- MR damper ile yarı aktif kontrol edilen bina modelleri tasarlamak ve deprem kuvvetleri etkisi altındaki bu yapısal sistemleri gerçek zamanlı ölçümlerle deneysel olarak test etmek.
- MR sönümleyicinin yapısal sistemlerde gösterdiği titreşim kontrolü performansını deneysel olarak araştırmak.
- Deneysel araştırmalarda kullanılan ticari MR damper ve üretilen yerli MR damperlerin performanslarını değerlendirmek.
- MR sönümleyicinin yapısal sistemlere uygulayacağı referans kontrol kuvvetini hesaplayan üç farklı kontrolörün performanslarını kıyaslamak.
- Yükseklikleri ve frekansları farklı binalarda MR sönümleyicinin etkisini gözlemlemek.
- Yapısal sistemlerde pasif kontrol yöntemini uygulayarak önerilen yarı aktif kontrolün etkinliğini göstermek.
- Deneysel çalışmaları sayısal olarak doğrulayarak simülasyon tabanlı modelleme yöntemine katkı sunmak.
- MR damperin bina modeli içerisindeki konumunu değiştirmek suretiyle optimum bina kontrolü sağlayacak damper yerini tespit etmek.

Bu tez kapsamında MR damperlerin kullanılan bina modellerinin sismik performansı üzerindeki etkileri detaylıca araştırılmıştır. Çalışmada bina modellerinin yer değiştirme, görelî kat ötelemesi ve taban kesme kuvveti değerlerindeki değişimler ana parametreler olarak gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalar yürütülerek gerçek zamanlı MR damper ile yarı aktif yapısal kontrol çalışmalarına bir katkı sağlanması hedeflenmiştir. MR damperli yarı aktif kontrol sistemi literatürde daha önce bir arada kullanılmamış üç farklı kontrolör ile tasarlanmıştır. Farklı frekanstaki bina modelleri ve sismik olaylar etkisi altında MR damperin etkin kullanımı araştırılmıştır. Ayrıca

yarı-aktif kontrol sistemlerinin performansını karşılaştırmak amacıyla pasif damper sistemleri de dikkate alınmıştır. Deneysel çalışma sonuçları benzetim modelleriyle sayısal olarak doğrulanarak gerçek yapılarda simülasyon tabanlı yarı aktif kontrol uygulamalarının yürütülmesine katkıda bulunulmuştur. Çalışma sırasında yapısal sisteme monte edilen MR damperin yerini değiştirmek suretiyle optimum performansı sağlayan damper konumu belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın kapsamı ise şu şekilde özetlenebilir;

Bina modelleri;

- 5-8 katlı çelik bina deney modelleri kullanılmıştır.
- Deneysel çalışmada kullanılan çelik bina deney modellerinden beş katlı olan bina modeli Türkiye yapı stoğundan seçilen aynı kat sayısına sahip gerçek betonarme bir binanın ölçümle elde edilmiş doğal frekans değerleri referans alınarak oluşturulmuştur.
- Deneysel çalışmada kullanılan diğer bina modellerinin doğal frekansları belirlenirken ise beş katlı bina modelinin geometri ve malzeme özellikleri korunarak sadece kat sayısı artırılmıştır.

Sönümleme mekanizmaları;

- Bina modellerine sönümleyici olarak MR damper sistemi uygulanmıştır.
- MR damperin yarı-aktif ve pasif kontrollü durumları karşılaştırılarak farklı sönümleme mekanizmalarının etkisi gözlemlenmiştir.

Damper yerleşimleri;

- Deney bina modelleri içerisinde MR damper zemin ile birinci kat arasına yatay olarak yerleştirilmiş ve tek damper kullanılmıştır.
- Beş katlı bina modeli içerisindeki optimum damper yerinin tespiti için ise simülasyon tabanlı sayısal bir çalışma yapılmıştır.

Deprem kayıtları;

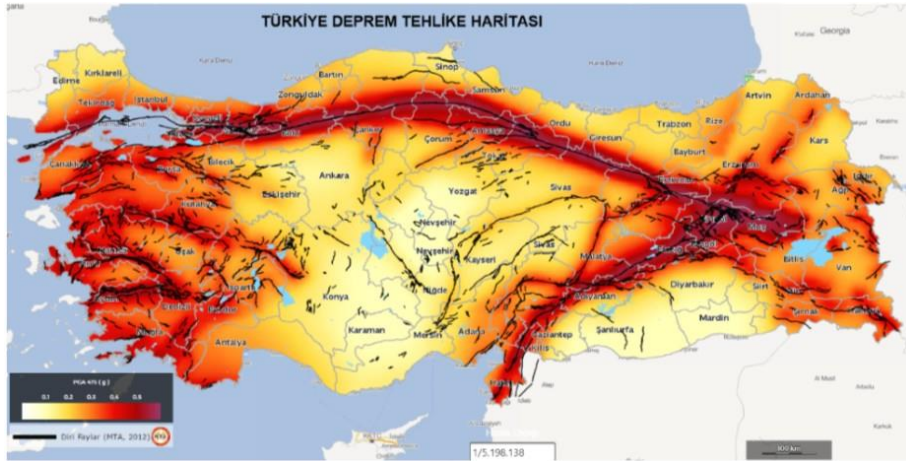
- Literatürdeki yapısal kontrol çalışmalarının genelinde yer alan El Centro-1940 ve ülkemizde trajik sonuçlara sebebiyet veren Kocaeli-1999 depremleri bu

çalışmada kullanılan bina modellerine etkiyen dinamik kuvvetler olarak seçilmiştir.

Yukarıda belirtilen tüm parametreleri dikkate alarak yapılan bu çalışma sonucunda elde edilen araştırma verileri sonuçlar bölümünde detaylı bir şekilde sunulmuştur.

1.2. Motivasyon

Türkiye tektonik konumu itibariyle büyük magnitüdlü depremler üretebilme potansiyeline sahip olan aktif bir fay kuşağı üzerinde yer almaktadır. Ülkemiz topraklarının % 96'sı, nüfusun % 99'u ve sanayinin % 98'i her an yıkıcı etkilere sahip depremlerle karşı karşıya kalma riski taşımaktadır. Şekil 1.1'deki Türkiye deprem tehlike haritası incelendiğinde ülkemizin tamamına yakınının özellikle Marmara Bölgesi'nde bulunan Sakarya, Bursa, Balıkesir, Kocaeli ve İstanbul gibi nüfus yoğunluğunun en fazla olduğu illerin deprem tehlikesi altında olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu sebeple, yapıların deprem sırasında ve sonrasında gösterdikleri dinamik tepkiler titizlikle üzerinde durulması gereken bir konudur. Yapılan bu tez çalışmasından elde edilen bulgular sismik yükler etkisi altındaki binalarda MR damperlerin etkin kullanımına yönelik bilgilere gerek akademik gerekse de uygulamaya yönelik önemli katkılarda bulunacaktır.



Şekil 1.1. Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD, 2022).

Dünyanın çeşitli yerlerinde az sayıda da olsa gerçek yapılarda titreşim kontrolü uygulamalarına rastlanırken ülkemizde MR damper ile yarı aktif kontrol edilen bir

bina örneği mevcut değildir. Bu durum yapılan bu çalışmayı ölkemiz özelinde önemli kılan bir başka husustur. Ayrıca sadece tasarım aşamasındaki yeni yapıların değil risk altındaki mevcut yapı stoğunun da acilen rehabilite edilmesi gerekmektedir. Mevcut binaların güçlendirilmesi hususunda da MR damperlerin kullanımı ölkemiz için umut vaad edici bir alternatif olarak görölebilir. Çalışmanın İnşaat mühendisliği açısından önemi dikkate alındığında ise mevcut yapısal tasarım yazılımlarında MR damperi modellemek ve sisteme entegre etmek için herhangi bir hüküm bulunmadığı bilinmektedir. Bu durum, tasarımcıların damperleri yapısal analizlere dahil etmelerinde büyük bir engel oluşturmaktadır. Bu çalışmanın MR damper ile yarı aktif kontrollü bina analizlerine performans ve işlevsellik açısından katkı sağlama potansiyeli mevcuttur.

1.3. Tez İçerik Planı

Bu tez çalışması sekiz bölümden oluşmaktadır. Her bölüme ait içerik aşağıda özetlenmiştir.

Bölüm 1’de; bu tez çalışmasının amacı, önemi ve kapsamı anlatılmıştır.

Bölüm 2’de; kontrol sistemlerinin bileşenleri ve yapısal kontrol yöntemleri ile ilgili kısa bilgiler paylaşılmıştır. Ayrıca bu bölümde konu ile ilgili kapsamlı bir literatür özetine de yer verilmiştir.

Bölüm 3’de; MR akışkan, MR etki ve MR damper çeşitlerinden bahsedilmiş, ayrıca MR damperin literatürde kullanılan dinamik modellerine ait genel formölasyonlar sunulmuştur.

Bölüm 4’de; bina modellerine deneysel olarak uygulanan MR damper ile yarı aktif kontrol yönteminin detaylarından bahsedilmiştir. Bunun yanı sıra yarı aktif kontrollü yapısal sistemlere ait hareket denklemleri durum uzay gösterimi ile birlikte sunulmuş ve çalışmada kullanılan kontrol algoritmalarının teorik alt yapıları ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Bölüm 5’de; tezin deneysel aşamasında kullanılan materyal ve yöntem detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Bölüm 6’da; beş katlı bina modelinin dinamik özelliklerinin teorik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi anlatılmıştır. Simülasyon esaslı bir model güncelleme tekniği kullanarak sistem parametrelerinin elde edilmesi ve bina modelinin dinamik davranışını en iyi temsil eden katsayıların hesaplanması ile ilgili analizler sunulmuştur.

Bölüm 7’de; beş katlı bina modelinin MR damper ile yarı aktif kontrollü ölçüm sonuçları güncellenmiş sistem parametrelerinin kullanıldığı simülasyon modelleriyle karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

Bölüm 8’de MR damperin yapısal sistem içerisindeki yerini değiştirmek suretiyle optimum kontrolü sağlayan damper yeri sayısal olarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

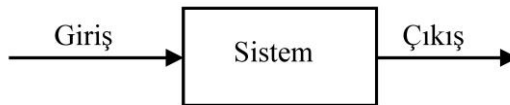
Bölüm 9’da yer alan Sonuçlar ve Öneriler kısmında bu tez çalışmasının deneysel ve nümerik sonuçları ile gelecekte yapılması muhtemel çalışmalara ait öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölüm kontrol sistemleri, yapısal kontrol, sönümleme sistemleri ve yapısal kontrol yöntemleri hakkında güncel bilgilere genel bir bakış sağlayacaktır. Öncelikle yapısal kontrol sistemleri ile ilgili kısa bilgiler verilecek, daha sonra inşaat mühendisliği alanında MR damperin kullanımı ile ilgili kapsamlı bir literatür araştırmasına yer verilecektir.

2.1. Kontrol Sistemleri

Belirli bir amacı gerçekleştirmek için birlikte hareket eden bileşenler topluluğuna sistem adı verilmektedir. Literatürde ‘sistem’ kavramı yerine plant veya işlem (process) ifadeleri de kullanılmaktadır. Zamana bağlı olarak değişen sistemlere ise dinamik sistemler denir. Belirli bir hızla yol üzerinde seyreden bir araç dinamik bir sistem örneği olarak kabul edilebilir. Her sistem çevresiyle iki değişken grubu aracılığıyla etkileşime girer. Birinci gruptaki değişkenler sisteme dışarıdan etki eder ve bu değişkenlere uyarı (excitation) denir. Diğer grupta ise yanıt (response) olarak isimlendirilen ve sistemin çevresiyle etkileşime girdikten sonra elde ettiği değişkenler yer alır. Literatürde uyarı ifadesi için giriş, kumanda işareti veya kontrol işareti, yanıt ifadesi için ise çıkış, sonuç, çıkış işareti gibi ifadeler kullanılmaktadır. Sistemin kendisi tanımlanırken durum değişkenleri adı verilen bir değişkenler setine ihtiyaç duyulur. Herhangi bir zamanda sistemin durumunu tam olarak tanımlamak için gerekli olan durum değişkenleri dinamik sistemlerin modellenmesi ve analizinde önemli bir rol oynamaktadır. Yukarıda özetlenen dinamik sistem davranışını basit olarak temsil eden blok diyagram Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

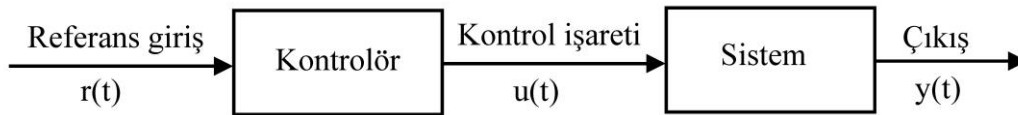


Şekil 2.1. Dinamik sistem davranışı.

Örneğin hareket eden bir aracın giriş değişkenleri gaz pedalının konumu, direksiyon simidinin konumu, eğim ve pürüzlülük gibi yol koşullarını içermektedir. Sistem modelinde durum değişkenleri ise düz bir yol boyunca hareket eden aracın konumu ve hızı olacaktır. Çıkış değişkenlerinin seçimi tasarımcının analizden hedeflediği değerlere göre belirlenir. Aracın konumu, hızı veya ivmesi ya da ortalama yakıt akış hızı ile motor sıcaklığı çıkış değişkenleri olarak seçilebilir. Aracın kütlesi ve motorun boyutu sistem parametrelerine örnek olarak verilebilir. Sistem parametresi olarak belirlenen arabanın kütlesi deposundaki yakıt miktarı arttıkça veya azaldıkça değişecektir. Aracın performans değerlendirmesinde kütledeki değişimler ihmal edilebilir ancak bir balistik füzenin dinamiklerinin analizinde sistem parametrelerinin değişimi kritik bir öneme sahiptir.

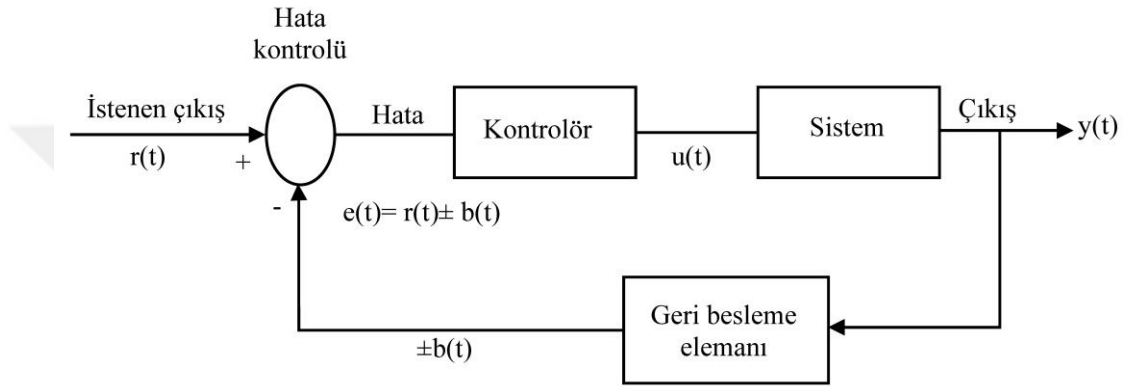
Dinamik sistemler mevcut giriş çıkışların sayısına göre tek giriş-tek çıkışlı (SISO) ve çok giriş-çok çıkışlı (MIMO) olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 2.1’de gösterilen dinamik sistemde giriş-çıkış ilişkisi üzerinde herhangi bir dış tesir bulunmamaktadır. Bu tip sistemlere kontrolsüz sistemler denir. Sistem çıkışını istenen sabit bir değerde tutmak veya çıkışların belirli bir değişim formunu takip etmesini sağlayarak davranışın değiştirilmesine yönelik çalışmalara kontrol, bu tip sistemlere ise kontrollü sistemler denir. Kontrol sistemi, önceden belirlenmiş olan koşullara bir niceliğin veya nicelikler kümesinin uygunluğunun denetlenmesi şeklinde ifade edilmektedir.

Kontrol işlemlerinin doğrudan insan denetimi olmaksızın gerçekleştirilebilmesi otomatik kontrol olarak tanımlanmaktadır. Otomatik kontrol mühendislik açısından ilgilendiğimiz kontrol türüdür. Otomatik kontrol sistemleri geri besleme döngüsüne göre açık çevrim ve kapalı çevrim olarak sınıflandırılmaktadır. Açık çevrim kontrol sistemlerinde çıkış girişe geri beslenmez. Bu nedenle, kontrol eylemi istenen çıkıştan bağımsızdır. Açık çevrim kontrol sistemine ait blok şeması Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Açık çevrim blok diyagramı.

Burada kontrolör ve kontrol edilen sistem olmak üzere iki kısım mevcuttur. $u(t)$ ile gösterilen kontrol işaret çıkışlı kontrolöre $r(t)$ ile ifade edilen referans giriş işareti uygulanır. Kontrol işareti, sistemin $y(t)$ ile gösterilen çıkışını amaçlanan hedefler doğrultusunda davranacak şekilde etkiler. Trafik sinyalizasyonu, otomatik merdivenler ve çamaşır makineleri açık çevrim kontrol sistemlerine örnek olarak gösterilebilir. Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ise çıkış girişe geri beslenir. Bu nedenle kontrol eylemi istenen çıkışa bağlıdır. Kapalı çevrim kontrol sisteminin blok şeması Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Kapalı çevrim blok diyagramı.

Kapalı çevrim blok diyagramında sistem çıkışı geri besleme elemanı vasıtasıyla $b(t)$ ile ifade edilen işarete çevrilir. Bu işaret, sistem giriş değeri ile karşılaştırılarak kontrolöre gönderilir. $e(t)$ ile gösterilen kontrolör hata değeri, giriş ve geri besleme sinyali arasındaki farkı gösterir. Doğrudan giriş yerine hata sinyali kontrolöre giriş olarak uygulanır ve düzeltme yaparak kontrol işareti olan $u(t)$ 'yi ayarlar. Böylece, sistem kontrol edilen bir çıkış üretir. Kapalı çevrim kontrol sistemlerine örnek olarak buzdolabı ve ev termostatları gösterilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında ele alınan sistem deprem kuvveti etkisi altındaki bina modelidir. Bina modeline uygulanan deprem ve MR damper kuvveti sistemin giriş değişkenlerini, yapısal tepkiler ise sistemin çıkış değişkenlerini oluşturmaktadır. Sistemin durum değişkenleri bina modellerinin yer değiştirme ve hız tepkileri olurken sistem parametreleri bina modellerine ait kütle, rijitlik ve sönüm matrisleridir. Çalışmada dinamik sistem olarak incelenen bina modelleri birden fazla giriş ve çıkış

değişkenleri içerdiği için çok giriş-çok çıkışlı ayrıca MR damper kontrol kuvveti farklı kontrolörler tarafından denetlendiği ve sisteme geri beslendiği için de kapalı çevrim kontrol sistemi sınıfında yer almaktadır.

2.2. Yapısal Kontrol

Yapıları dinamik etkilere karşı dışarıdan bir sönümleme elemanı ekleyerek kontrol etmek amacıyla yapılan mühendislik çalışmalarına yapısal kontrol denir. İnşaat mühendisliği alanındaki yapısal kontrol çalışmaları son 30 yılda çok sayıda araştırmacının ilgisini çekmiştir. Esas olarak kökleri havacılık ve uzay sektörüne uzanan kontrol teknolojisi daha sonra bina ve köprülerin dinamik kuvvetlere karşı korunması için kullanılmaya başlanmıştır. Yapılarda kontrol sistemlerinin uygulanması kavramının Yao (1972) tarafından ilk kez ortaya atılmasından sonra bu alan olgunlaşmaya devam etmiş ve 1994'te Los Angeles'ta düzenlenen Birinci Dünya Yapısal Kontrol Konferansında büyük bir yankı uyandırmıştır.

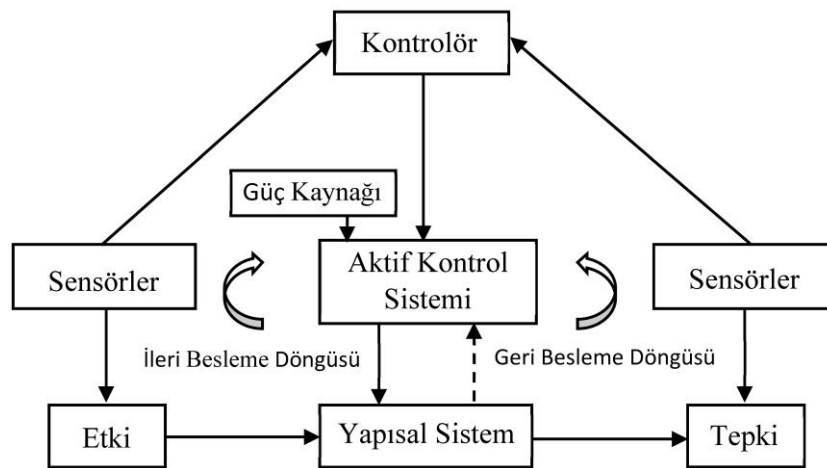
Tablo 2.1. Yapısal kontrol sistemleri.

Yapısal Kontrol Yöntemi	Sönümleyici Tipi
Pasif kontrol sistemleri	Sürtünmeli sarkaç tipi sönümleyici
	Kurşun çekirdekli kauçuk tipi sönümleyici
	Yüksek sönümlü kauçuk tipi sönümleyici
	Metalik sönümleyiciler
	Sürtünme tipi sönümleyiciler
	Visko-elastik sönümleyiciler
	Viskoz akışkanlı sönümleyiciler
	Ayarlı kütle sönümleyicileri (TMD)
	Ayarlı akışkan sönümleyicileri (TLD)
	Aktif kütle sönümleyiciler
Aktif kontrol sistemleri	Değişken rijitlik veren sönümleyiciler
	Aktif kuvvet veren sönümleyiciler
	Değişken ağızlı sönümleyiciler
	Rijitlik değiştiren sönümleyiciler
	Akıllı aktif kütle sönümleyiciler
Yarı-aktif kontrol sistemleri	Değişken sürtünmeli sönümleyiciler
	Kontrol edilebilen akışkanlı sönümleyiciler
	* Elektoreolojik damperler (ER damper)
	* Manyetoreolojik damperler (MR damper)

Literatürde yapısal kontrol sistemleri aktif, pasif, yarı-aktif ve hibrid olmak üzere dört ana kategoriye ayrılmıştır (Aldemir ve Aydın, 2005; Housner ve ark, 1997; Symans ve Constantinou, 1999). Yapısal kontrol yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanılan sönümleyiciler Tablo 2.1’de özetlenmiştir. Geleneksel yapısal tasarım anlayışına göre sismik tehlikenin azaltılması için yapıların yeterli dayanım kapasitesine ve sünek bir şekilde deforme olabilme kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Yapısal kontrol sistemleri mevcut tasarım anlayışını değiştirerek yapıların elastik ötesi deformasyonlar yapmadan dinamik etkilere karşı koyabileceğini göstermiştir.

2.2.1. Aktif kontrol

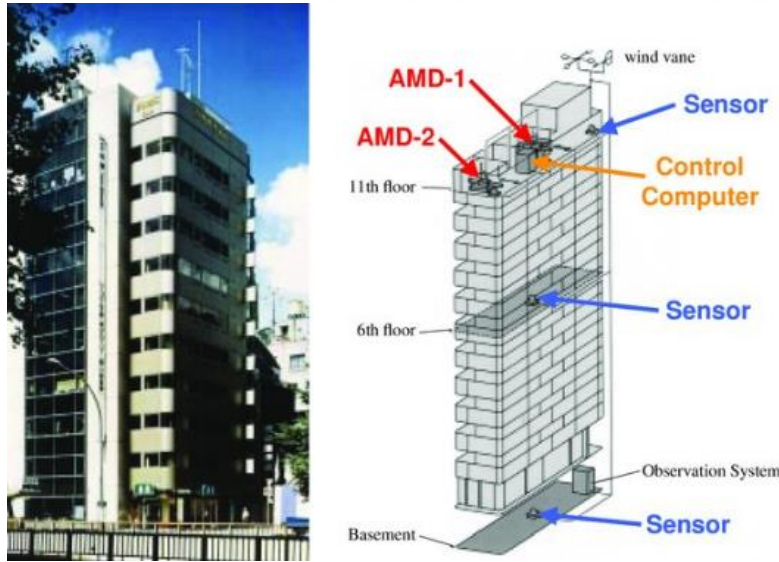
Aktif kontrol sistemleri, yapıya kuvvet uygulayan kontrol aktüatörlerine harici bir kaynağın güç verdiği sistemlerdir. Aktif kontrol kuvvetleri, yapıdaki enerji girdisini azaltmak veya enerjiyi yapı içerisinde dağıtmak için kullanılmaktadır. Aktif geri beslemeli bir kontrol sisteminde, kontrol aktüatörlerine gönderilen sinyaller, sensörler vasıtasıyla ölçülen yapısal sistem tepkilerinin bir fonksiyonudur. Kontrol kuvvetleri hidrolik, pnömatik, elektromanyetik veya motor tahrikli aktüatörler ile üretilir. Sensörler ile ölçülen yapısal tepkiler kontrolöre geri beslenir ve önceden belirlenen bir kontrol algoritması bu sinyali amaçlanan çıkış sinyaliyle karşılaştırarak hatayı minimize etmeye çalışır. Kontrol sinyali daha sonra aktüatöre gönderilir. İleri beslemeli kontrolde bozucu giriş ölçülür ve bu değer kontrol sinyallerini üretmek için kullanılır (Marazzi ve ark, 2000).



Şekil 2.4. Aktif kontrol sistemlerine ait genel blok diyagramı.

Aktif kontrol sistemlerine ait genel blok diyagramı Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Bu yöntemde hem geri hem ileri besleme döngüsü aynı anda kullanılmaktadır. Bu tür sistemler, bina sakinlerinin güvenlik ve konfor düzeylerinin önemli olduğu durumlarda yapıların iç ve dış dinamik yüklere karşı tepkisini kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Aktif kontrol yönteminde hidrolik, pnömatik, elektromanyetik veya motor tahrikli aktif kütle sönümleyiciler, hibrit kütle sönümleyiciler, tendonlar gibi çeşitli sönümleyici tipleri görülmektedir. Aktif kontrol sistemlerinin temel özelliği kontrol eylemini başlatmak için büyük bir harici güce ihtiyaç duyulmasıdır. Kuvvetli bir yer hareketi esnasında güç kesintisi olasılığı mevcut olduğundan bu tür sistemlerin kullanım sırasında savunmasız hale gelebilme riski mevcuttur. Bu durum aktif sistemlerin yapısal kontrol uygulamalarındaki zayıf yanı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dünyada aktif kontrol ilk kez 1989’da Japonya’daki gerçek bir binaya uygulanmıştır (Şekil 2.5). Japonya’nın Tokyo kentindeki 11 katlı Kyobashi Seiwa binasının çatısına yapıyı rüzgar ve deprem etkisinden korumak amacıyla iki adet aktif kütle sönümleyici yerleştirilmiştir. Sensörler bodrum kat, altıncı kat ve çatı katında bulunmaktadır. Kontrol bilgisayarı Şekil 2.5’de görüldüğü gibi çatı katına konumlandırılmıştır (Christenson, 2001).



Şekil 2.5. Aktif kontrollü Kyobashi Seiwa Binası, Japonya (Christenson, 2001).

büyük deplasmanlar yaparak üst yapıya gelen deprem enerjisinin azaltılmasını sağlar. Kauçuklardan tabakalı olarak yapılmış ve aralarında çelik plakalar bulunan elastik mesnetler yaygın olarak benimsenen taban izolasyon tekniklerindendir. Elastik mesnet düşey yüke maruz kaldığında çelik plakalar her bir kauçuk katmanının yanıl basıncını sınırlarken yatay kesme deformasyonunu engellemez. Bu durum mesnetlerin düşey yönde çok rijit ve yatay yönde ise çok esnek bir davranış sergilemesine sebep olur. Bu elemanların tasarımı yapının doğal frekanslarına bağlıdır. Tabanda esneklik sağlayan izolatörler yapı taban periyodunu artırarak yapıya gelen sismik enerjinin azaltılmasını sağlar. Metalik sönümleyiciler, sürtünme tipi sönümleyiciler ve viskoelastik sönümleyiciler de pasif kontrol elemanlarına örnek olarak gösterilebilir. Türkiye’de taban izolasyonlu yapısal sistemlere örnek olarak Tarsus-Adana-Gaziantep otoyolu Atatürk Viyadüğü, Kocaeli Devlet Hastanesi, Erzurum Devlet Hastanesi, Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminali, Antalya Havaalanı Terminal Binası, Ankara Kongre ve Ticaret Merkezi, Bolu Viyadükleri, Sabiha Gökçen Havaalanı, Aliğa sıvı doğalgaz depoları gösterilebilir.



Şekil 2.7. Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Binası taban izolasyon uygulaması (Kan ve ark, 2017).

Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi binası ülkemizdeki taban izolatörlü yapısal sistemlerin ilk örneklerinden biridir (Şekil 2.7). 1999 Marmara depreminden sonra tamamen yıkılan Kocaeli Üniversitesi Arslanbey Kampüsü yerine 2000 yılında Umuttepe Kampüsü inşa edilmeye başlanmıştır. Üniversite bünyesinde yer alan ve 2004 yılında tamamlanan Tıp Fakültesi binasında bodrum kat kolonların üstüne sürtünme esaslı sarkaç tipi izolatörler yerleştirilmiştir. Hastane binasında deplasman kapasitesi 30 cm olan bu izolatörlerden toplam 256 adet kullanılmıştır.

2004-2005 yılları arasında Antalya Havaalanı Terminal Binasının güçlendirilmesi için de sismik izolasyon yöntemi kullanılmıştır (Şekil 2.8). Toplamda 411 adet kolona kurşun çekirdekli kauçuk mesnet uygulanmıştır (Kan ve ark, 2017).



Şekil 2.8. Antalya Havaalanı Terminal Binası (Kan ve ark, 2017).

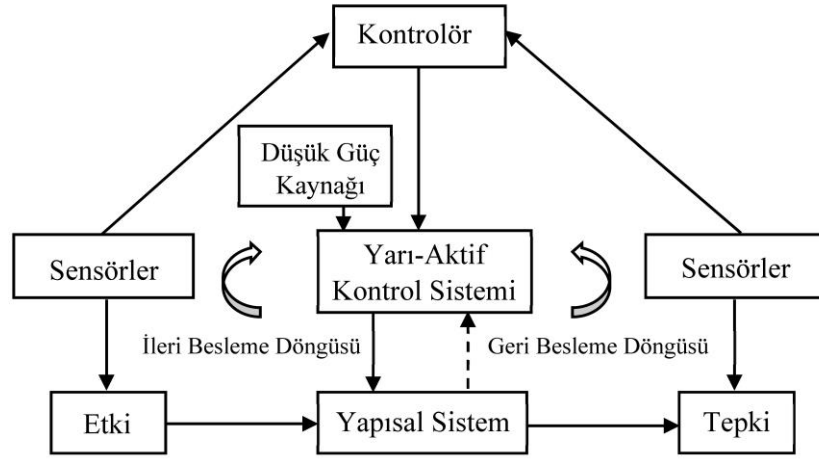
Ülkemizde 1999 Marmara depreminde hasar gören bir başka bina Tarabya Oteli'dir. Otelde yapılan çalışmalarda yapısal sistemi güçlendirmek amacıyla uygulanacak yöntemlerin (perde duvar ilavesi, yapısal elemanların mantolanması vb.) binanın mimari özelliklerini bozmak suretiyle otel işlevini yitirmesine sebep olacağı tespit edilmiştir. Bu sebeple en uygun çözümün sismik izolasyon olduğu sonucuna varılmış ve sismik performansın arttırılması için binaya 139 adet sürtünmeli sarkaç tipinde izolatör yerleştirilmiştir (Zelanda, 2015). Örneklerde görüldüğü gibi ülkemizde pasif kontrol yöntemleri yeni yapıların tasarımında ve mevcut yapıların güçlendirilmesinde pratikte uygulama imkânı bulmuştur.



Şekil 2.9. Tarabya Otel (Zelanda, 2015).

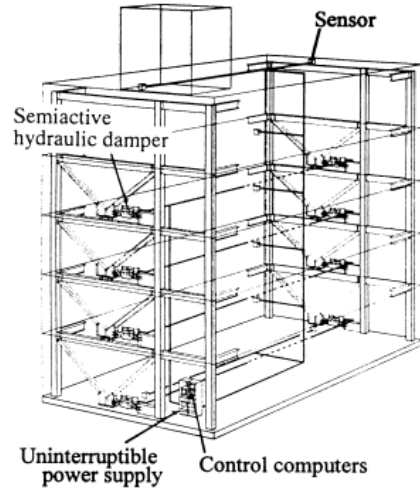
2.2.3. Yarı-aktif kontrol

Yarı-aktif kontrol sistemleri harici güç gereksinimleri aktif kontrol sistemlerine göre çok daha düşük olan kontrol yöntemleridir. Bu yöntem, cihazların mekanik özelliklerini değiştirmek suretiyle yapının hareketine zıt kontrol kuvvetleri üreten bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Housner ve ark, 1997). Yarı aktif kontrol cihazları yapısal sisteme mekanik enerji yüklemediği için yapısal sistemin kararlılığını bozmazlar. Yarı aktif sönümleyiciler genellikle büyük güç kaynakları gerektirmeyen kontrol edilebilir aktif cihazlar olarak görülmektedir. Pek çoğu pil gücüyle çalışabildiği için sismik olaylar sırasında ana güç kaynağının arızalanması gibi durumlardan etkilenmez. Literatürde yapılan ön çalışmalar, yarı aktif kontrollü sistemlerin pasif kontrollü sistemlere göre önemli ölçüde daha iyi performans sergilediğini ve aktif kontrollü sistemlerin performansından daha iyi sonuçlar elde etme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir (Dyke ve ark, 1996). Yarı aktif kontrol sistemlerinin en önemli özelliklerinden biri, sistemin çalışması için gereken dış güç ihtiyacının genellikle aktif sistemlere göre çok daha düşük olmasıdır (Owji ve ark, 2011). Bu özellik yarı aktif cihazları araştırmacılar için oldukça ilgi çekici hale getirmiştir. Yarı-aktif kontrollü sistem davranışını gösteren blok şeması Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Yarı-aktif kontrol sistemlerine ait genel blok diyagramı.

Dünyada yarı aktif kontrol yönteminin ilk uygulandığı tam ölçekli yapısal sistem Kajima Araştırma Enstitüsü'dür. Japonya'nın Shizuoka kentindeki bu binada aktif rijitlik değiştiren sönümleyiciler kullanılmıştır. Sönümleyiciler binanın her iki tarafındaki duvarların içerisine monte edilmiştir (Şekil 2.11). Damperlerin her biri akış kontrol valfi, çek valfi ve akümülatörden oluşmaktadır. Damperin üretebileceği maksimum sönümleme kuvveti 1000 kN'dur. Her kata konumlandırılmış sensörlerden alınan bilgiler kontrol yönteminin uygulandığı bilgisayara iletilir.



Şekil 2.11. Kajima Teknik Araştırma Enstitüsü binası (Roësset ve Yao, 2003).

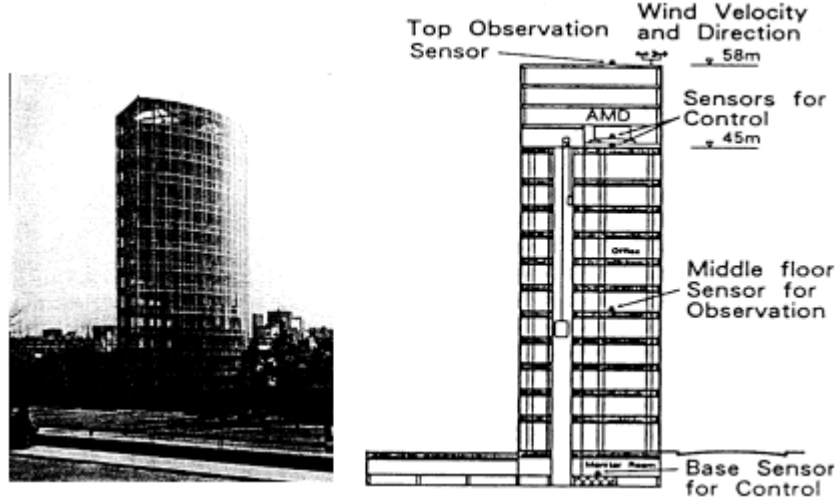
Yapı kullanım ömrü boyunca yarı aktif kontrol sistemi uygulamasının başarısını ölçebileceği üç depreme maruz kalmıştır. Bu depremlerden elde edilen kayıtlar binanın

yarı aktif sistemli tepkilerinin kontrolsüz duruma göre daha iyi bir davranış sergilediğini göstermiştir (Roësset ve Yao, 2003). Ülkemizde ise henüz yarı aktif olarak kontrol edilen bir yapısal sistem örneği mevcut değildir.

2.2.4. Hibrid (karma) kontrol

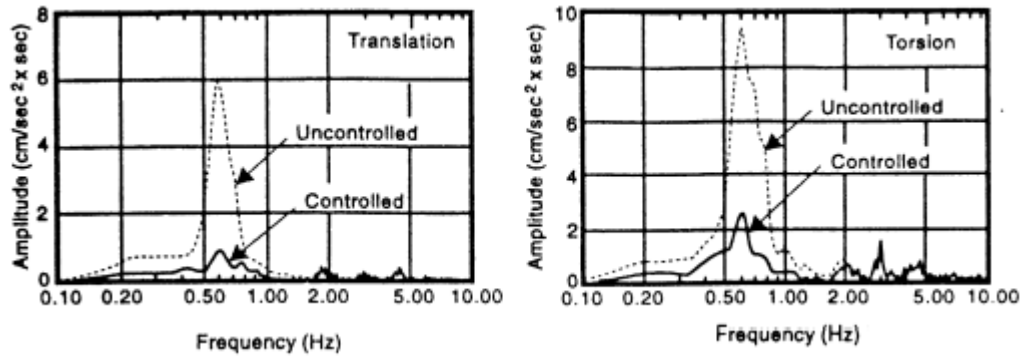
Aktif ve pasif kontrol sistemlerinin bir arada kullanıldığı kontrol yöntemine hibrid kontrol denir. Yapısal performansı arttırmak için aktif olarak kontrol edilen aktüatörlere sahip taban izolasyonlu bir yapı hibrid kontrol sistemine örnek olarak gösterilebilir. Hibrid kontrol, pasif kontrol yönteminin performansını geliştirmek için aktif kontrolü kullanabilir. Alternatif olarak, aktif kontrol uygulanan bir sistemdeki enerji ihtiyacını azaltmak için sisteme pasif kontrol eklenebilir. Aktif ve hibrid kontrol yöntemleri arasındaki temel fark, kontrol kuvvetini uygulamak için gerekli olan harici enerji miktarıdır. Hibrid kontrol yöntemleri, aktif veya pasif kontrol uygulanan sistemlerdeki eksiklikleri ortadan kaldırarak daha iyi bir çözüm sunmaktadır. Bu kontrol yöntemi aktif kontrol sisteminin aksine enerji kesintisi durumunda pasif bileşeni ile sistemi korumaya devam eder.

Hibrid kütle sönümleyiciler tam ölçekli hibrid yapısal kontrol uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan cihazlardır. Hibrid kütle sönümleyici, pasif ayarlı kütle sönümleyici ve aktif kontrol aktüatöründen oluşur. Diğer bir deyişle pasif ve aktif iki bileşeni bulunmaktadır. Bu cihazın yapısal tepkileri sönümleme yeteneği esas olarak pasif kütle sönümleyicinin doğal hareketinden gelmektedir. Kontrol aktüatörlerinden gelen aktif kuvvetler ise hibrid kütle sönümleyicinin performansını arttırmak ve yapının dinamik özelliklerindeki değişikliklere karşı sağlamlığını korumak amacıyla kullanılır. Hibrid kütle sönümleyicilerin çalışması için gereken kuvvet tamamen aktif kütle sönümleyicilerle donatılmış yapısal sistemlere göre çok daha azdır. Tokyo'daki Sendagaya INTES binası hibrid kontrol yöntemi uygulama örneklerinden biridir. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi hibrid kütle sönümleyiciler binanın 11.katına yerleştirilmiştir. Yapının öteleme ve burulma modlarını kontrol etmek üzere iki adet kütle sönümleyici kullanılmıştır. Buz depolama tankları kütle bloklarını oluşturmuş dolayısıyla sisteme ilave kütle eklenmesine gerek kalmamıştır. Bu kütleler hibrid kütle sönümleyicide tüketilen kontrol enerjisini azaltmaya ve uygun kütle hareketlerini sağlamaya yönelik olarak çok tabakalı kauçuk yataklarla desteklenmiştir.



Şekil 2.12. Hibrid kontrollü Sendagaya INTES binası (Soong ve Spencer, 2000).

Hibrid kütle sönümleyicinin performansının değerlendirilmesi için gerekli olan veri 29 Mart 1993'te meydana gelen kuvvetli rüzgar etkisi altında elde edilmiştir. 30 saniyelik verilerin öteleme ve burulma modları için elde edilen Fourier spektrumları Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Fourier tepki spektrumları (Soong ve Spencer, 2000).

Fourier spektrum grafikleri incelendiğinde hibrid kütle sönümleyicinin düşük frekans bölgelerinde başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Yapının öteleme ve burulma modundaki genlikler sırasıyla % 18 ve % 28 oranında azalmıştır. Mayıs 1992 ve Şubat 1993 arasında gerçekleşen depremlerde de yapısal sistemin benzer dinamik performans seviyelerine ulaştığı tespit edilmiştir (Soong ve Spencer, 2000).

2.3. Literatür Taraması

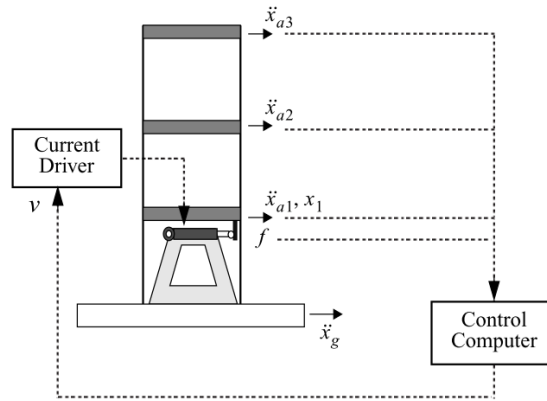
Yapı mühendisliğinde, deprem ve kuvvetli rüzgar gibi şiddetli dinamik yüklerin neden olduğu yapısal hasarın azaltılması önem taşımaktadır. Yapıları bu kuvvetlere karşı korumak günümüzde mühendislerinin karşılaştığı en büyük zorluklardan biridir. Son yıllarda araştırmacılar yarı aktif kontrol cihazlarının araştırılması ve geliştirilmesine yoğunlaşmıştır. Kontrol kabiliyeti sağlayan MR sıvılı damperler bu kontrol cihazlarının en popüler olanıdır. MR sönümleyiciler düşük bir maliyetle yapısal tepkileri azaltma kabiliyeti taşıırken kontrol sırasında herhangi bir arıza durumu meydana geldiğinde pasif hale geldiği için emniyetlidir. Bu açıdan bakıldığında inşaat mühendisliğinde MR damper ile yapısal titreşim kontrolünün umut verici bir gelişme olduğu söylenebilir.

MR damperlerin yapısal performansını değerlendirmek amacıyla literatürde çok sayıda teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Spencer, Dyke, Sain ve Carlson'ın araştırmaları bu alandaki pilot çalışmalar olarak görülmektedir (Spencer, 1997; Dyke ve ark, 1997, 1998; Dyke, Sain ve ark, 1996; Dyke, Spencer ve ark, 1996). Genel olarak MR damper ile yapısal kontrol sisteminin uygulanmasında iki farklı kontrol stratejisi mevcuttur. İlk yöntemde kontrol algoritmasının geliştirilmesi için kontrol edilecek sistem dinamiklerinin kesin bir matematik modeline ihtiyaç duyulur. Bu yöntemler, Bani-Hani ve Ghaboussi (1998) tarafından model tabanlı yöntemler olarak adlandırılmış olup, örnekleri arasında H_2 , H_∞ , lineer kuadratik regülatör (LQR), lineer kuadratik gaussian (LQG), kayan kipli kontrol (SMC) vb. kontrol algoritmaları yer almaktadır. Bu algoritmalarla MR damper kontrol kuvvetleri hesaplanırken yapıya ilişkin matematiksel bilgiler kullanılır. Bu yöntemde hedeflenen kontrol kuvvetinin üretilmesi için komut sinyallerinin hesaplanması ve aktüatöre gönderilmesi gerekmektedir. Diğer kontrol stratejisinde ise model tabanlı olmayan (akıllı kontrolörler) sinir ağ tabanlı (neural) ve bulanık mantık (fuzzy) gibi kontrol algoritmaları yer almaktadır (Gu ve Oyadiji, 2008). Bu kontrolörler, kontrol edilecek sistem hakkında kesin bir matematik modele ihtiyaç duymayan, sınırlı bilgi ile kendi kendini organize etme ve uyarlanabilme kabiliyetine sahip olan algoritmalarlardır. İnşaat mühendisliği yapıları doğaları gereği belirsizliklerle doludur ve benzer şekilde MR sönümleyiciler de doğrusal olmayan dinamiklere sahip yarı aktif kontrol cihazlarıdır.

Bu nedenle, belirsizliklere karşı dayanıklı, pratikte uygulanabilir ve damperlerin kabiliyetlerini tam olarak kullanabilen etkin kontrol algoritmaları geliştirmek oldukça zahmetli bir süreçtir (Kim ve Roschke, 2006).

Literatürde MR damper ile yapısal kontrol araştırmalarının pek çoğunda birden fazla damper ve kontrol algoritmasının performans kıyaslaması benchmark problemi olarak ele alınmıştır. Performans ölçümü için kullanılan çeşitli fonksiyon türlerinden oluşan standart optimizasyon problemlerine benchmark problemi denir. Yapısal kontrolde benchmark bir algoritmanın performansının diğer algoritmalarla kıyaslanması için en uygun test setinin belirlenmesidir. Diğer bir deyişle sayısal simülasyonlardan oluşan ve çeşitli kontrol algoritmalarını doğrudan karşılaştırma şansı veren yöntemlerdir. Benchmark problemlerinde kontrol algoritmalarının performans kıyaslaması çeşitli değerlendirme kriterlerine (performans indeksleri) göre yapılmaktadır.

İnşaat mühendisliği alanında MR damperlerin ilk uygulaması Spencer (Dyke ve ark, 1997) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı, damperin Bouc-Wen modelini esas alarak fenomenolojik bir model geliştirmiştir. Bu modelin geliştirilmesinden sonra Dyke ile birlikte (Dyke, Sain ve ark, 1996) sismik yükler altındaki yapısal bir sistemin dinamik tepkilerini azaltmak için MR damper kullanmışlardır. Bu çalışmada, üç katlı yapısal bir model sayısal olarak incelenmiş ve MR damper birinci kat seviyesine yatay olarak yerleştirilmiştir (Şekil 2.14).

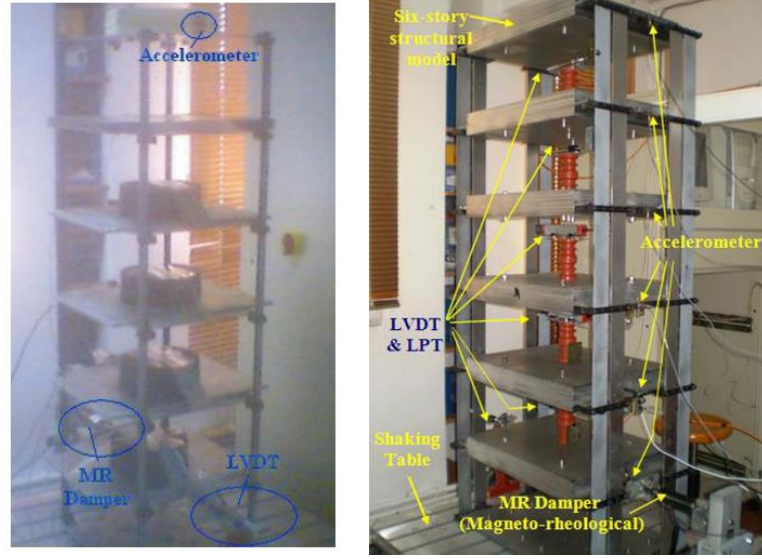


Şekil 2.14. MR damper uygulaması (Dyke, Sain ve ark, 1996).

MR sönümleyicinin komut sinyali ivme geri beslemeli clipped optimal kontrolör ile ayarlanmıştır. Bu makalede kullanılan bina modeli literatürdeki MR damperle yarı

aktif kontrol çalışmalarının pek çoğunda yapısal sistem olarak yer almıştır (Spencer, 1997). Kullanılan yapısal sistemde aktif, pasif ve yarı aktif kontrol durumları incelenmiş ve pasif kontrol yönteminin çatı deplasmanı ile görelî kat ötelemelerini % 50 oranında azalttığı belirlenmiştir. Öte yandan yarı aktif kontrolör sonuçları pasif kontrol sonuçlarıyla kıyaslandığında çatı görelî deplasmanında % 30.7, maksimum görelî kat ötelemelerinde ise % 27.8 oranında ek azalma oranı sağlamıştır. Yapısal sisteme uygulanan aktif kontrol yöntemi de titreşim tepkilerini önemli ölçüde azaltmakla birlikte yarı aktif kontrolöre kıyasla % 10-15 oranında daha kötü performans göstermiştir. Üstelik MR damper ile yarı aktif kontrolör en iyi yapısal performans değerlerine çok daha az kontrol kuvveti harcayarak ulaşmıştır. Bu çalışmada tahrik kuvveti olarak sadece El-Centro deprem ivmesi kullanılmış, farklı frekanstaki deprem kuvvetlerinin yapısal performans üzerindeki etkilerinden bahsedilmemiştir. Ancak, tek deprem verisiyle elde edilen sonuçlar güvenilir bir kontrol performansı değerlendirmesi yapmak için yeterli değildir. Bununla birlikte MR damper komut sinyali hedeflenen kontrol kuvvetini üretmek için sıfıra (passive-off) veya maksimum (passive-on) seviyeye ayarlanmıştır. Bu durum zaman içerisinde değişen yapısal tepkilere göre komut sinyalinin değiştirilmesi anlamına gelmektedir. Ancak, damperin doğrusal olmayan özellikleri komut sinyalinin doğrudan elde edilebilmesini zorlaştırmaktadır. Simülasyon tabanlı bu çalışma daha sonra deneysel olarak incelenmiştir (Dyke ve ark, 1998). Sayısal analizlerden farklı olarak burada tahrik kuvveti düşük ve yüksek genlik seviyelerinde yapıya uygulanmış, böylece MR damperin farklı genlikteki sismik etkilere göre performansı dikkate alınmıştır. Yarı-aktif kontrolörlerin pasif kontrol yöntemlerine göre kat yer değiştirmelerini ve ivmeleri azaltmada daha başarılı olduğu deneysel olarak da gösterilmiştir.

Çetin ve ark. (2011a, 2011b) altı serbestlik dereceli yapısal bir sistemde deneysel olarak iki farklı yapısal kontrol çalışması gerçekleştirmiştir. Her iki çalışmada da kontrolörlerin performansı Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Teorisi Sistem Dinamiği ve Kontrol Laboratuvarındaki sarsma tablası testleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan sarsma tablası tek eksenli olup elektromekanik tahriklidir. Dinamik sistemde MR damper test yapısının zemin kat seviyesine dışarıdan rijit bir eleman yardımıyla monte edilmiştir (Şekil 2.15).

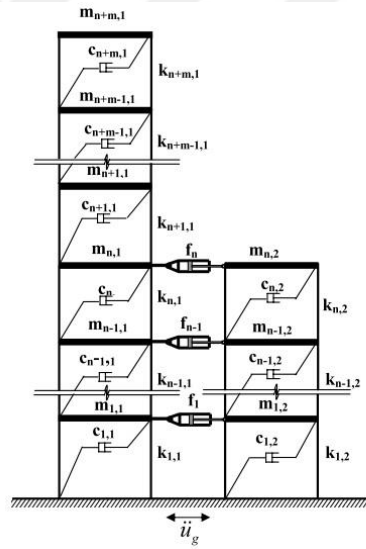


Şekil 2.15. Test yapısı ve deney düzeneği (Çetin ve ark, 2011a, 2011b).

Araştırmacılar ilk çalışmalarında H_∞ kontrolör kullanarak MR damper ile titreşim kontrolü uygulaması gerçekleştirmişlerdir (Çetin ve ark, 2011a). El Centro depremi etkisi altındaki kontrollü yapının birinci kat deplasmanı ve altıncı kat ivmesi deneysel olarak ölçülmüştür. Sonuçlar önerilen kontrolörün yapısal tepkileri azaltmada kontrolsüz duruma göre daha etkili olduğunu göstermiştir. İkinci çalışmalarında ise bu kez Lyapunov tabanlı tasarım tekniklerini kullanarak hem yapısal sistem hem de MR damper ile ilgili parametrik belirsizlikleri ortadan kaldırabilen doğrusal olmayan adaptif bir kontrolör önermişlerdir ve MR damperin ölçülemeyen iç dinamiklerinin kontrolör üzerindeki etkilerini en aza indirmek için filtre esaslı bir tasarım kullanmışlardır (Cetin ve ark, 2011b). Deneysel sonuçlar değerlendirme kriterlerine göre literatürden seçilen doğrusal olmayan diğer kontrolörle kıyaslanmış, önerilen kontrolörün yer değiştirme ve ivmeyi temsil eden tüm performans indekslerinde en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Ancak her iki deneysel çalışmada da tek bir deprem verisinin kullanılması kontrol performansını değerlendirmek açısından yeterli değildir.

Ha ve ark. (2008) deprem kaynaklı yapısal titreşimleri MR damper kullanarak indirgemek amacıyla Lyapunov esaslı bir kontrolör önermişlerdir. Bu kontrolör nonlineer özellikte olduğu için dampere beslenen akım sinyalini doğrudan kontrol etmektedir. Bu çalışmada kullanılan üç katlı yapısal sistemin zemin ve birinci katlarına ikişer adet MR damper yerleştirilmiş ve sistem dört farklı tarihsel deprem kaydı etkisi

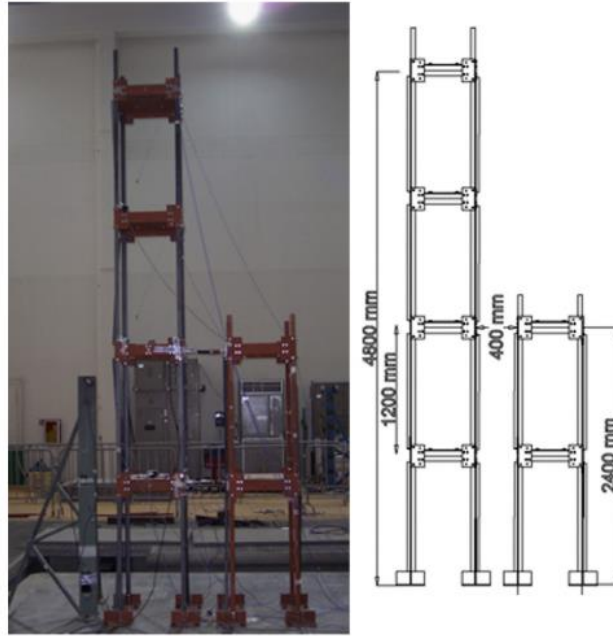
altında incelenmiştir. Performans kıyaslaması için yapısal sistemde altı farklı değerlendirme kriteri kullanılmış ve yarı aktif kontrolör MR damperin pasif sönümleme durumlarıyla kıyaslanmıştır. Sayısal olarak gerçekleştirilen analizler neticesinde önerilen kontrolörün kat mutlak yer değiştirmelerini temsil eden değerlendirme indeksinde yaklaşık %50 oranında azalma sağladığı belirlenmiştir. Yer değiştirme oranlarındaki başarılı sonuçlara rağmen mutlak ivmeyi temsil eden performans indeksinde aynı başarı sağlanamamıştır. Bununla birlikte, Lyapunov tabanlı kontrolör pasif kontrole göre çok daha düşük akım değerleri ile çalışmıştır. Yapısal titreşim kontrolünde Lyapunov tabanlı kontrolörün kullanıldığı bir başka çalışma Bharti ve ark. (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar bu çalışmada, yaşanan tarihsel depremlerde yan yana duran binaların birbirleriyle etkileşimleri sonucu ortaya çıkan önemli hasarların azaltılmasına odaklanmışlardır. Bu sebeple, iki yüksek yapı (10 ve 20 katlı) arasına MR damper konulmak suretiyle sismik tepkilerin azaltılması hedeflenmiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Bitişik iki yapısal sistemde MR damper yerleşim detayı (Bharti ve ark, 2010).

Çalışmada kullanılan yarı aktif kontrolörün performansı MR damperin sıfır ve maksimum akım uyguladığı pasif kontrol durumlarıyla kıyaslanmıştır. Ayrıca çalışma içerisinde damper konumu ve maksimum komut voltajının kontrol performansı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Şekil 2.16’da görüldüğü üzere kayma binası

şeklinde modellenen bitişik iki yapı farklı deprem ivmeleri (El Centro, Kobe, Northridge, Loma Prieta) etkisi altında sayısal olarak incelenmiştir. Önerilen yarı aktif kontrolörün her iki bina için maksimum kat yer değiştirmesi, ivme ve kat kesme kuvvetlerini pasif duruma göre daha çok azalttığı görülmüştür. Ancak yarı aktif kontrolör üst katlarda ivme tepkilerini azaltmayı başaramamıştır. Kontrolör az katlı binada çok katlı binaya göre daha iyi bir performans göstermiştir. MR damper her iki binanın sadece alt katlarına yerleştirildiğinde daha az sayıda sönümleyici ile daha yüksek performanslı tepki kontrolü sağlanırken, uygulamada oluşacak maliyette %50 oranında azalmıştır. Sayısal olarak gerçekleştirilen bu çalışmada kullanılan yöntemler Basili ve ark. (2013) tarafından deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada incelenen fiziksel model bitişik iki çelik yapıdan (2 ve 4 katlı) oluşmaktadır (Şekil 2.17).

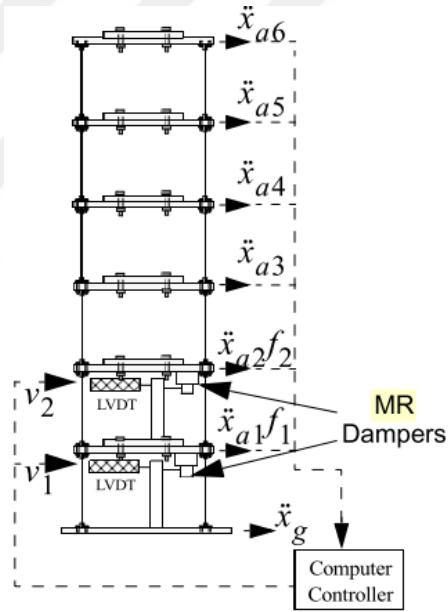


Şekil 2.17. Yapısal sisteme ait deney düzeneği (Basili ve ark, 2013)

Araştırmacıların hedefi ikinci kat seviyesinde MR damper ile birbirine bağlanan sistemde sismik uyarılardan kaynaklanan yapısal titreşimleri azaltmaktır. Testlerde sönümleyici olarak Lord firmasına ait RD-1005-3 tipi MR damper kullanılmıştır. MR damperin yarı aktif kontrolünde Lyapunov stabilite teorisiyle türetilen On-Off algoritması kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları pasif kontrolün yapısal tepkileri azaltma

oranı açısından çok iyi performans değerlerine ulaştığını gösterirken yarı aktif kontrolörün pasif yöntemden daha iyi sonuçlar üretmediği sadece bazı durumlarda sisteme ek iyileştirmeler sağladığı tespit edilmiştir.

Literatürde yer alan ve bitişik yapılarda gerçekleştirilen gerek sayısal gerek deneysel çalışma sonuçları yarı aktif kontrollü MR damper performansının pasif kontrole göre daha iyi bir performans seviyelerine ulaşamadığını göstermektedir. MR damper ile yapısal kontrol uygulamalarında Lyapunov tabanlı kontrolörün kullanıldığı bir başka çalışma Yi ve ark. (2001) tarafından deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılmak üzere Washington Üniversitesi Yapısal Kontrol ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında altı katlı bir test yapısı oluşturulmuş ve sistemi kontrol etmek için zemin ile birinci katlara ikişer adet MR damper yerleştirilmiştir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Prototip test yapısı ve test düzeneği (Yi ve ark, 2001)

Sistem kontrolünde Lyapunov ve clipped optimal yaklaşımı esaslı kontrolörler kullanılmıştır. El Centro depremi üç tip genlik seviyesinde yapısal sisteme uygulanarak MR damperin farklı uyarılardaki performansı değerlendirilmiştir. Performans değerlendirmesi kat ivmeleri, taban kesme kuvveti ve kontrol kuvvetinin maksimumları ile kat ivmesi ve taban kesme kuvvetinin normlu değerleri esas alınarak

yapılmıştır. Belirtilen bu değerlendirme indekslerine göre Lyapunov kontrolör yapısal sisteme uygulanan yer hareketinin tüm genlik seviyelerinde pasif durumdan daha yüksek performans göstermiştir. Kontrolörün performansı kontrolsüz durumla kıyaslandığında ise maksimum ivmede % 30, normlu ivme değerinde ise % 50'lik azalma oranı sağlamıştır. Lyapunov kontrolör aynı zamanda maksimum ve normlu taban kesme kuvveti değerlerini de sırasıyla % 45 ve % 49 oranında azaltmıştır. Clipped optimal kontrol algoritması yapısal sistemin maksimum ivme değerlerindeki azalma oranında daha başarılı olmasına rağmen genel olarak normlu yapısal tepkilerde Lyapunov kontrolörle benzer performans seviyelerine ulaşmıştır. Bu çalışmada kullanılan her iki yarı aktif kontrolöründe MR damper ile yapısal titreşim kontrolünde pasif yöntemle göre çok daha üstün sonuçlar ürettiği vurgulanmıştır.

Genellikle endüstriyel kontrol sistemlerinde kullanılan, dinamik sistemin optimum kontrolünü ve kontrol stabilitesini garanti etmeyen PID kontrolör, MR damper ile yapısal kontrol çalışmalarında az sayıda da olsa uygulama imkanı bulmuştur. Aguirre ve ark. (2011) çalışmalarında MR damper referans kontrol kuvvetini üretmek için daha basit bir yapıya sahip olan PI kontrolörü önermişlerdir. Üç katlı yapısal bir sistemin zemin katına yatay olarak yerleştirilen MR damper sayısal olarak incelenmiş ve sonuçlar sönümleyicinin passive on/off kontrol durumu ile farklı yarı aktif kontrolörlerle karşılaştırılmıştır. Önerilen PI kontrolör, MR damperin dinamik bir modeline ihtiyaç duymadığı ve yalnızca ivme ile kuvvet ölçümlerini kullandığı için oldukça basittir. Bu çalışmadan elde edilen sayısal sonuçlar bu basit kontrol yönteminin daha karmaşık yapıdaki kontrol algoritmalarıyla kıyaslanabilir performans seviyelerine ulaştığını göstermiştir. Kavyashreel ve ark. (2020) ise üç serbestlik dereceli yapısal bir sistemin sismik tepkilerini MR damper ile kontrol etmek için PID kontrol algoritmasını kullanmışlardır. Sayısal olarak uygulanan bu kontrolörün katsayıları Nichols-Ziegler yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Yapısal sistemin zemin katına yerleştirilen ve PID kontrolörle denetlenen MR damper birinci katın yer değiştirme tepkilerini % 89.6, ivme tepkisini ise % 77.9 oranında azaltmıştır. PID kontrolörün performansı clipped optimal kontrolörle kıyaslanmış ve elde edilen sonuçlar her iki kontrolörün yakın performans seviyelerine ulaştığını göstermiştir. Bu çalışmada kullanılan yöntemin sadece sayısal olarak değerlendirilmesi ve analizlerin

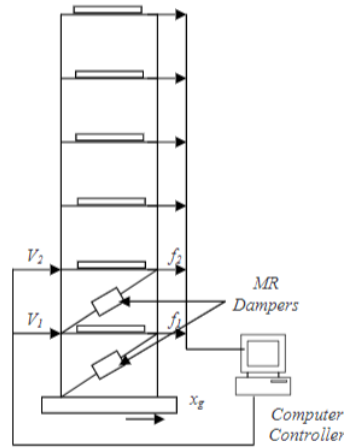
sadece El Centro deprem ivmesi etkisi altında yapılması kontrol performansının değerlendirilmesi için yeterli değildir. Araştırmacı başka bir çalışmada ise PID kontrolörü daha da geliştirerek deprem ve sensör titreşimleri gibi belirsizlikleri de göz önünde bulunduran emniyetli PID kontrolörü aynı yapısal sisteme sayısal olarak uygulamıştır (Kavyashree ve ark, 2021). Bu kez El Centro ve Northridge deprem ivmeleri dikkate alınmış ve kontrol performansı ölçülmüştür. Yapılan analiz sonuçları emniyetli PID kontrol algoritmasının yapısal sistemin birinci katına ait maksimum yer değiştirme tepkilerinde % 14, ivme tepkilerinde ise % 18 oranında ek azalma sağlayarak klasik PID kontrol performansının üstünde değerlere ulaştığını göstermiştir.

Yapılarda MR damper ile yarı-aktif kontrol uygulanırken kullanılan bir başka yöntemde bulanık kontrolörlerdir. Bulanık kontrolörler yer hareketi giriş sinyali ve yapısal titreşim ölçerlerden gelen çıkış sinyallerindeki belirsizlikleri ortadan kaldırma ve yapının doğrusal olmayan davranışını dikkate alma gibi yeteneklere sahiptir. MR damper ile yapısal kontrol alanında kullanılan optimal kontrolörlerde (clipped optimal vb.) damperin komut voltajı sıfır ya da maksimum değere ayarlanırken bulanık kontrol algoritması damper için gerekli voltajı hedeflenen düzeyde üretme potansiyeline sahiptir. Üstelik bu kontrolörler yapısal sistemle ilgili kesin bir matematik modele ve komut sinyali için referans bir değer üretmeye ihtiyaç duymadan doğrudan dampere uygulanabilir. Choi ve ark. (2004) çalışmalarında zamanla değişen yapısal tepkilere uyum sağlayabilen bulanık kontrollü bir MR damper kullanmışlar ve düşük kontrol kuvvetleriyle iyi bir kontrol performansı sağlamışlardır. Bu çalışmada yapısal sistem olarak literatürden seçilen üç serbestlik dereceli bir bina modeli referans alınmış (Dyke, Sain ve ark, 1996) ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Bulanık kontrolörün performansı clipped optimal kontrolör ve pasif kontrol durumları ile kıyaslanmıştır. El Centro depremi düşük, normal ve yüksek genlik seviyelerinde sisteme uygulanmıştır. Bulanık kontrol algoritmasıyla denetlenen MR damper yapısal sistemin maksimum yer değiştirme, maksimum görel kat ötelemesi ve maksimum ivme değerlerini sırasıyla %71, %50 ve % 50 oranında azaltmıştır. Sayısal sonuçlar bulanık kontrolörün yapısal tepkileri azaltma oranı açısından pasif kontrole göre daha başarılı olduğunu ancak clipped optimal kontrol algoritmasına göre daha düşük bir performans sergilediğini

göstermiştir. Bununla birlikte bulanık kontrollü yarı aktif sistem çok daha düşük kontrol kuvvetleriyle sismik tepkileri azaltmıştır. Yan ve Zou (2006) ise kuvvetli dinamik yüklerden kaynaklanan hasarı önlemek için MR damper kontrolünde genetik algoritma (GA) tabanlı bulanık bir kontrol yöntemi önermişlerdir. Bu çalışmanın temel amacı önerilen kontrolörle birlikte yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirme ve maksimum ivme tepkilerini en aza indirmektir. Sayısal olarak gerçekleştirilen bu çalışmada literatürden seçilen üç serbestlik dereceli tek MR damperli bina modeli (Dyke, Sain ve ark, 1996) ile altı katlı çift MR damperli bina modeli (Jansen ve Dyke, 2000) olmak üzere iki tip yapısal sistem kullanılmıştır. Her iki yapısal sistemde de kullanılan GA tabanlı bulanık kontrolör literatür çalışmalarında kullanılan diğer doğrusal olmayan kontrolörlerden farklı olarak yer değiştirme ve ivme tepkilerini eş zamanlı olarak azaltmayı başarmıştır. Ancak simülasyon tabanlı yapılan bu çalışma deneysel olarak doğrulanmamıştır. Gu ve Oyadiji (2008b) çok serbestlik dereceli bir yapısal sistemde oluşan titreşimlerin MR damper kullanarak azaltılması amacıyla uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yöntemini önermişlerdir. Bu yaklaşım, yapısal tepkilerin bir Kalman filtresi ile tanımlanması ve yanıtların tam durum geri beslemeli kuvvet kontrolünü içermektedir. ANFIS kontrolörün eğitim verilerini elde etmek LQG kontrol yöntemi kullanılmıştır. MR damperin komut sinyalini üretmek için ise kuvvet geri beslemeli bir yöntem önerilmiştir. El Centro ve Hachinohe deprem ivmeleri etkisi altındaki üç katlı yapısal sistemin titreşim tepkisi sayısal olarak incelenmiştir. Önerilen kontrolör yapısal sistemin ilk üç katına ait yer değiştirme genliklerini El Centro depremi için sırasıyla %78, %47 ve %39, Hachinohe depremi için ise %85, %52 ve %42 oranında azaltmıştır. Sonuçlar önerilen kontrolörün deprem yüklerinin sebep olduğu yapısal titreşimleri etkili bir şekilde azaltabildiğini göstermiştir. Önerilen bu kontrolör daha sonra Askari ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada kullanılmıştır. Sismik yükler etkisi altındaki yirmi katlı tam ölçekli bir binada MR damper kontrolü için yeni bir yarı aktif kontrolör önerilmiştir. Yapısal sistemin ilk üç katında sekiz ve diğer katlarda birer olmak üzere toplam 25 adet MR damper kullanılmıştır. Bu yöntemde referans kontrol kuvveti LQG kontrolör ile tasarlanırken, MR damperlerin belirlenen referans kuvvete göre üretmesi gereken voltaj değerleri ise Takagi-Sogeno ters bulanık modeli ile hesaplanmıştır. MR damper için önerilen bu ters modelde GA ve ANFIS yöntemleri kullanılmıştır. El

Centro depreminin farklı genlik seviyeleri etkisi altında yapılan sayısal çalışmalarda önerilen kontrolörün performansı aktif kontrol ve clipped optimal kontrolörle kıyaslanmıştır. Değerlendirme kriterlerine göre elde edilen sonuçlar önerilen MR damper ters modelinin optimal yöntemlerle belirlenen referans kontrol kuvvetini iyi bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Ayrıca, önerilen kontrolör clipped optimal kontrolöre göre tüm değerlendirme indekslerinde daha iyi performans göstermiştir. Bu çalışmada kullanılan MR damper ters modelinin farklı kontrol algoritmaları ile performansı araştırılarak daha iyi sonuçlar elde edebilme potansiyeli mevcuttur.

MR damper kontrol kuvvetini hesaplamak için kullanılan akıllı kontrolörden bir diğeri ise yapay sinir ağı (YSA) temelli yöntemlerdir. Yapay sinir ağları MR damperin ters modelini oluşturmak için geliştirilmiştir, ancak yapay sinir ağ parametrelerini ayarlamak oldukça zahmetli ve zaman alıcı bir süreçtir (Chang ve ark, 2002). Vadtala ve ark. (2013) MR damperlerle yapısal sistem kontrolünde yapay sinir ağ tabanlı bir kontrolör önermişlerdir.



Şekil 2.19. MR damper yerleşim planı (Jansen ve Dyke, 2000).

Şekil 2.19’da görüldüğü gibi literatürden seçilen (Jansen ve Dyke, 2000) altı katlı test yapısının zemin ve birinci katlarına ikişer adet MR damper düşey çapraz eleman olarak yerleştirilmiştir. Yapısal tepkilere göre elde edilen optimal kontrol kuvvetleri LQR kontrol algoritması kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu çalışmada MR damper kuvveti akım ile kontrol edilmektedir. Böyle bir durumda kuvvete karşılık gelen akım değeri ancak MR damperin ters dinamiklerinin modellenmesi ile elde edilebilir. MR

damperin doğrusal olmayan doğası sebebiyle ters dinamiklerinin matematiksel olarak modellenmesi oldukça zordur. Bu sebeple damperin ters dinamiklerini hesaplamak için yapay sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Yapısal sistem El Centro, Kobe ve Northridge depremleri etkisi altında pasif ve yarı aktif kontrol yöntemleriyle sayısal olarak analiz edilmiştir. Önerilen yöntemle elde edilen sonuçlara göre yapısal sistemin çatı deplasmanı ve mutlak ivme tepkileri sırasıyla % 59 ve % 27 oranında azalmıştır. Bu değerler çalışmadan elde edilen en yüksek veriler olmakla birlikte farklı deprem kuvvetleri etkisinde elde edilen sonuçların değiştiği görülmektedir. Bu çalışmaya göre önerilen kontrolörün performansının uygulanan deprem ivmesine bağlı olduğunu söylemek mümkündür. Uygulanan bu yarı aktif kontrol stratejisine benzer bir çalışma Karamodin ve Kazemi (2010) tarafından sunulmuştur. Üç katlı tam ölçekli bir bina benchmark problemi olarak ele alınmış ve MR damper yapısal sistemin tüm katlarına yerleştirilmiştir. Optimal kontrol kuvveti LQG algoritmasıyla hesaplanmış ve MR dampere gönderilecek voltaj sinyali ise yapay sinir ağı yöntemiyle belirlenmiştir. Tarihsel depremler (El Centro, Hachinohe, Kobe ve Northridge) farklı genlik seviyelerinde tam ölçekli yapıya uygulanmış ve kontrolörlerin performansı görece kat öteleme, ivme ve taban kesme kuvvetini ifade eden değerlendirme kriterlerine göre hesaplanmıştır. Önerilen kontrolör farklı deprem etkileri altında yapısal sistemin görece kat ötelemelerini ve mutlak ivme değerlerini başarılı bir şekilde azaltmıştır. Kontrolör performansı literatürde kullanılan diğer kontrol algoritmalarıyla değerlendirme kriterleri vasıtasıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kontrolörün maksimum ve normlu kat öteleme oranını clipped optimal ve aktif kontrolöre göre daha çok azalttığını göstermiştir. Ancak önerilen kontrolör ivme ve taban kesme kuvveti değerlerinde aynı performansı sergileyememiştir. Zizouni ve ark. (2019) ise Tohoku 2011 ve Boumerdes 2003 depremlerine maruz kalan üç katlı ölçekli bir yapının titreşimlerini kontrol etmek için yapay sinir ağı tabanlı bir kontrolör sunmuşlardır. Bu çalışmada, yapısal sistemin birinci katına yerleştirilen MR damperi kontrol etmek için lineer kuadratik kontrolör (LQC) tasarlanmıştır. Yapay sinir ağı temelli bu kontrolör MR damperin üretmesi gereken akım değerini hesaplayan clipped optimal kontrolörle birlikte uygulanmıştır. Sayısal simülasyon sonuçlarına göre kontrolör yapısal sistemin birinci katına ait yer değiştirme tepkilerini kontrolsüz duruma göre yaklaşık % 70 oranında azaltmayı başarmıştır. Lara ve ark. (2017) iki serbestlik dereceli basit bir çelik yapıda MR

damper ile kontrol çalışmaları yapmışlardır. Yapısal sistemde titreşimleri kontrol etmek için doğrusal olmayan otoregresif eksojen tipi (NARX) yapay sinir ağı temelli ve bulanık mantık esaslı olmak üzere iki tip kontrol algoritması kullanmışlardır. Sayısal simülasyon sonuçlarına göre her iki akıllı kontrolör birinci kat yer değiştirme ve hız tepkilerini benzer oranda azaltmakla birlikte bu oran kontrolsüz duruma göre % 55'dir. Yer değiştirme tepkilerinin karelerinin ortalamasının karekökü (RMS) değerlendirildiğinde ise azalma oranı birinci ve ikinci kat için sırasıyla % 86 ve % 84'tür. Her iki katın mutlak ivme tepkilerinin RMS değerleri % 83 oranında azalmıştır. Bununla birlikte YSA temelli kontrolör katların maksimum tepkilerini bulanık mantıklı kontrolöre göre daha fazla azaltmıştır. Yapay sinir ağı yönteminin daha başarılı olması damperin sürekli yüksek kontrol kuvvetleri üretme kabiliyeti gösterip daha fazla enerji sönümleyebilmesi şeklinde yorumlanabilir.

Yukarıda özetlenen ve literatürde sıkça kullanılan kontrolörlerin yanı sıra araştırmacılar yapısal sistemlerde MR sönümleyicinin etkisini gözlemlemek amacıyla farklı çalışmalar da yapmışlardır. Miah ve ark. (2017) MR damper ile titreşim kontrolünde LQR ve kalman filtresinden oluşan bir kontrolör önermişlerdir. Bu kontrolörle hedeflenen yapısal sistemdeki modelleme hataları, bilinmeyen sistem özellikleri ve değişen çevre koşulları gibi belirsizliklerden etkilenmeyen bir algoritma ile titreşim kontrolü sağlamaktır. Bu çalışmada kullanılan yapısal sisteme ait rijitlik matrisinin bilinmediği varsayılmış ve belirsizlik olarak ele alınan bu parametre tahmin edilmeye çalışılmıştır. Önerilen kontrolörün performansı ölçekli beş katlı bir kayma çerçevesinin zemin katına yerleştirilen dönel tip MR damper ile sarsma tablasında deneysel olarak test edilmiştir (Şekil 2.20). Bu çalışmadan elde edilen deneysel veriler simülasyon modelleriyle de karşılaştırılarak kontrolörlerle ilgili sonuçlar kıyaslanmış ve kontrolörün yapısal tepkileri başarılı bir şekilde azalttığı görülmüştür. Ancak, yapısal sistem sadece harmonik kuvvetler etkisi altında test edilmiş olup herhangi bir deprem senaryosu bu çalışmaya dahil edilmemiştir.



Şekil 2.20. Deneysel sistem (Miah ve ark, 2017).

Winter ve ark. (2017) küçük ölçekli üç serbestlik dereceli bir yapısal sistemin zemin katına düşük kuvvet kapasiteli MR damper yerleştirerek titreşim kontrolü yapmıştır. Yapısal sistemin ivme ve yer değiştirme tepkilerini minimum değerlere indirmek için LQG kontrolör kullanılmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışma sonuçlarına göre LQG kontrolör birinci kat yer değiştirmesini % 74, ivmeyi ise % 51 oranında azaltmıştır. Genel olarak LQG kontrolör MR damperin pasif durumuyla kıyaslandığında biraz daha iyi performans göstermiştir. Hiemenz ve Wereley (1999) yapılarda titreşim kontrolünü sağlarken MR/ER damperlerin akma kuvvetinin tahrik kuvvetine oranı olan boyutsuz bir parametre önermişlerdir. Belirlenen bu boyutsuz parametrenin çalışmada kullanılan yapıların titreşimlerini azaltma oranı üzerinde doğrusal bir etki gösterdiği sonucuna varılmıştır. Xu ve ark. (2000) ise yapısal sistem titreşimlerini sönümleyebilmek için yer değiştirme esaslı iki optimal kontrol algoritması önermişler ve bu kontrolörleri optimal kuvvet kontrolü yöntemi (LQR) ile karşılaştırmışlardır. Çalışma içerisinde yer alan yapısal sistemlere MR/ER damperlerle birlikte payanda sistemi de uygulamışlardır. Yer değiştirme esaslı optimal kontrolörlerle kontrol edilen MR damperli sistem örnek yapıların sismik performansını azaltmada en iyi performansı göstermiştir. Ayrıca, damperlerin kontrollü performansının uygulanan deprem büyüklüğüne ve payanda sisteminin rijitliğine bağlı olduğu da gösterilmiştir. Araştırmacılar, yirmi katlı yüksek bir yapıya bitişik beş katlı

yapı arasına akıllı sönümleyiciler yerleştirmek suretiyle farklı bir çalışma daha yapmışlardır (Qu ve Xu, 2001). Bu çalışmada, yüksek katlı yapılarda oluşan zımbalama etkisinin ortadan kaldırılması ve her iki yapıda da eş zamanlı olarak sismik performansın arttırılması hedeflenmiştir. Kontrol yönteminde anlık alt optimal yer değiştirme kontrolörü önerilmiştir. Sayısal olarak incelenen sistemden elde edilen sonuçlar çalışma MR damperin yüksek yapıyı zımbalama etkisinden koruyabildiğini ve her iki yapının da sismik tepkilerini azaltabildiğini göstermiştir. Kumar ve ark. (2018) sismik olaylar sırasında yapıların hasar görmesini engelleme hedefiyle kullanılacak olan yarı aktif sönümleyicinin uygulaması gereken karşı kuvvetleri üretmek üzere parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile optimize edilen değiştirilmiş quasi bang-bang kontrolörü önermişlerdir. Bu kontrolörde kullanılan ağırlık çıkışları PSO algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. MR damperin zemin kata yerleştirildiği üç katlı yapısal sistem literatürden seçilmiştir (Dyke, Sain ve ark, 1996). Analizler El Centro ve Hachinohe depremleri etkisi altında gerçekleştirilmiş, Hachinohe depreminin farklı zemin koşullarındaki kayıtları kullanılarak MR damperin farklı zemin koşullarındaki performansı da ölçülmüştür. Sayısal olarak elde edilen sonuçlar quasi bang bang, değiştirilmiş quasi bang bang ve clipped optimal kontrolörlerle kıyaslanmıştır. Bina modelinden elde edilen sonuçlara göre önerilen kontrolör genel olarak görel kat ötelemesi, mutlak ivme ve kat yer değiştirme tepkilerini incelenen diğer kontrolörlerden daha çok azaltmayı başarmıştır. Ancak bu çalışmada MR damperin sürekli yüksek voltajlarda uygulandığı görülmüştür. Bu durum zemin katın çok rijit davranıp kilitlenmesine sebep olabilir. Bununla birlikte simülasyon esaslı gerçekleştirilen bu çalışma da yüksek performans değerleri elde edilmiş olsa da laboratuvar çalışmaları yapılması şiddetle tavsiye edilmektedir. Karami Mohammadi ve Najarzade (2018) MR damperlerle yarı aktif kontrol edilen binalar için üniform deformasyon teorisine (UDT) dayalı yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde optimum kontrol voltajını belirlemek için polinom kontrolör kullanılmıştır. Polinom kontrolör katsayıları PSO algoritması kullanılarak görel kat ötelemelerindeki standart sapmanın minimize edilmesi esasına dayanmaktadır. Önerilen kontrolör yaklaşımı, çeşitli depremler etkisi altındaki üç ve altı katlı doğrusal olmayan kesme binalarında maksimum görel kat ötelemelerinin üniform dağılımı ve yapısal tepkilerin azaltılması açısından sayısal olarak

değerlendirilmiştir. Sonuçlar önerilen kontrolörün kontrolsüz duruma göre özellikle maksimum görelî kat ötelemelerini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Üstelik önerilen kontrolör çok daha az kontrol kuvveti harcayarak daha iyi bir performans göstermiştir. Yanık (2020) MR sönümleyicili yapılarda yeni bir performans indeksi tanımlamıştır. Analitik olarak elde edilen bu performans indeksinde mutlak hız ve ivme geri besleme büyüklüğü olarak seçilmiştir. MR damperin sönümleme kuvvetini elde etmek için değiştirilmiş Bouc-Wen modeli kullanılmıştır. Üç katlı yapısal bir sistemin dinamik simülasyonları yakın faylı depremler etkisi altında farklı zemin özellikleri etkisini de göz önünde bulundurarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları önerilen performans indeksinin kontrolsüz yapının sismik tepkilerini azaltma performansının LQR algoritması kadar etkili olduğunu göstermiştir. Ancak yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı sismik enerji tabanlı analizlerde sistemin yer değiştirme ve ivme değerleri artmıştır. Bu çalışmada farklı zemin parametrelerini dikkate alan dinamik analizler yapılması elzemdir. Rashid Wani ve ark. (2021) görelî deplasman tepkisi esaslı yeni bir adaptif kontrolör (IDRA) önermişlerdir. Bu kontrolörde katlar arası yer değiştirme tepkilerinin minimuma indirilmesi amaçlanmaktadır. Deneysel ve sayısal çalışmalar beş katlı çelik bir kayma çerçevesi ile tarihsel depremler etkisi altında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Sarsma tablası testleri (Rashid Wani ve ark, 2021).

Sarsma tablası test sonuçları incelendiğinde önerilen kontrolörün kontrolsüz duruma göre maksimum kat yer değiştirmelerini % 43 ila % 69 oranında, ivmeleri ise % 20 ila % 35 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Azalma yüzdesinin sabit bir değerde olmaması farklı giriş uyarıları sebebiyle MR damperin ürettiği kontrol kuvveti miktarındaki değişikliktir. Deneysel çalışmadan sonra sayısal bir analizde yapılmış ve önerilen kontrolörün clipped optimal algoritmasıyla performansı kıyaslanmıştır. Sayısal sonuçlara göre ise IDRA kontrolör clipped optimal kontrol algoritmasına göre daha iyi performans göstermiştir. MR damper ile yarı aktif kontrol algoritmalarının tam ölçekli bir yapısal sistemde deneysel olarak ölçüldüğü çalışma Lee ve ark. (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada tam ölçekli beş katlı bir çelik yapı kullanılmıştır (Şekil 2.22).



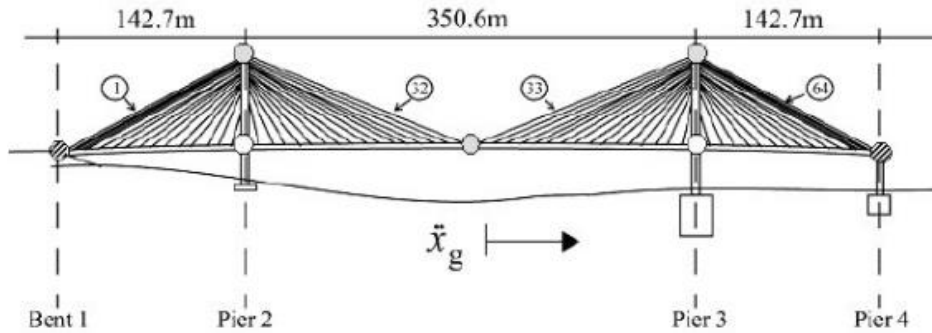
Şekil 2.22. Tam ölçekli yapısal sistem ve MR damper detayı (Lee ve ark, 2010).

Yapısal sistemin zemin katına iki adet MR damper yerleştirilmiş ve sönümleyicilerin kontrolü clipped optimal, maksimum enerji dağılımı, Lyapunov ve bulanık kontrolörle gerçekleştirilmiştir. Tüm yarı aktif kontrolörler dört farklı tarihsel deprem (El Centro, Hachinohe, Kobe ve Northridge) ve bir filtrelenmiş yapay deprem verisi etkisi altında değerlendirilmiştir. Bu deprem verilerini simüle etmek üzere yapısal sistemin dördüncü katına aktif kütle sürücü yerleştirilmiştir. Aktif kütle sürücünün güvenlik sınırları içerisinde hareket etmesi için yer hareketleri küçültülmüştür. Kontrolörlerin

performansı kendi aralarında ve MR damperin sabit akım verdiği pasif durumla kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlar Lyapunov ve bulanık kontrolörlerin yapısal sistem ivme tepkilerini, pasif durum ve maksimum enerji dağılımı kontrolörlerin ise birinci kat yer değiştirme tepkilerini başarılı bir şekilde azalttığını göstermiştir. Chae ve ark. (2014) ise üç katlı büyük ölçekli çelik bir yapıda gerçek zamanlı testler yaparak MR damperin performans değerlendirmesini yapmışlardır. Deneysel çalışmada pasif ve yarı aktif (LQR, SMC, DBB, PAC) olmak üzere beş farklı kontrolör kullanılmıştır. Bu çalışmada kat ötelemelerinin % 1.5 sınırının altında olması hedeflenmiştir. Ölçeklenmiş farklı deprem ivmeleri (Superstition Hills, Düzce, Landers, Imperial Valley, Northridge) etkisi altında yapılan gerçek zamanlı hibrid simülasyon sonuçlarına göre MR damper test yapısının maksimum kat öteleme tepkilerini hedeflenen değerin altında tutmayı başarmıştır. Ayrıca yapısal sisteme eklenen MR damperler kat hızlarını ve ivmelerini önemli ölçüde azaltmıştır. Belirli bir yer hareketi için bazı kontrolörler daha iyi performans gösterse de genel olarak yarı aktif kontrol algoritmalarının kat öteleme, hız ve ivme değerlerini azaltma performansının pasif kontrolle benzer seviyelerde kaldığı istatistiksel sonuçlarla tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar OpenSees programıyla sayısal olarak doğrulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan yarı aktif kontrol algoritmalarının performansı kullanıcı tanımlı bazı parametrelere bağlıdır (Q ve R ağırlık matrisleri gibi). Kullanıcının tanımladığı bu değişkenlerin yarı aktif kontrol algoritması üzerindeki etkisinin araştırılması gerekmektedir.

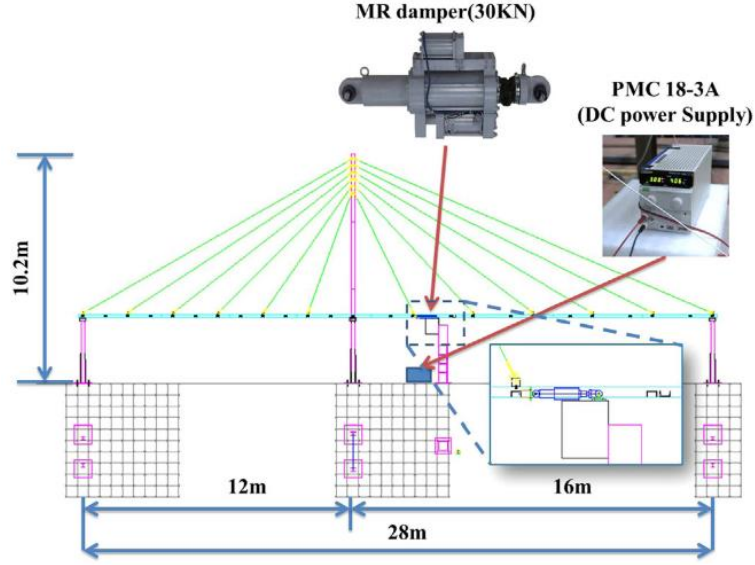
MR damperler sadece binalarda değil köprülerin titreşim kontrolünde de başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Asma köprülerde kritik yapısal bileşenler kablolardır. Bu yapısal bileşenler esnek olmaları, nispeten kütlelerinin hafif olması ve düşük sönümlenme özellikleri sebebiyle rüzgar gibi büyük genlikli titreşimlere karşı oldukça hassastır. Buradan hareketle Ni ve ark. (2002) ölçekli bir köprü modelinde kabloların MR damperlerle titreşim kontrolü için yapay sinir ağ tabanlı bir kontrol yöntemi önermişler ve köprülerin titreşim kontrolünde başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Ok ve ark. (2007) ise çalışmalarında MR damperlerle asma köprülerin titreşim kontrolü için yarı aktif bulanık kontrol yöntemi sunmuşlardır. Geleneksel yarı aktif kontrol teknikleri hedeflenen kontrol kuvvetini belirleyen referans bir birincil kontrolör ile istenen kontrol kuvvetiyle gerçek sönümlenme kuvvetini karşılaştırarak MR damperin

giriş sinyalini hesaplayan ikincil kontrolörden oluşmaktadır. Bu çalışmada önerilen bulanık mantık yöntemi ise birincil ve ikincil kontrolörlere ihtiyaç duymadan MR damper giriş sinyalini doğrudan damper tepkisine göre hesaplamaktadır. Sayısal sonuçlara göre El Centro depremi için bulanık kontrollü MR damper taban kesme kuvveti ve eğilme momentini sırasıyla % 70.1 ve % 77 oranında azaltmıştır. Mexico City ve Gebze depremleri için de aynı azalma trendi görülmüştür. Bu tekniğin diğer kontrolörlerle performansını kıyaslamak amacıyla köprü modeli benchmark problemi olarak ele alınmıştır (Şekil 2.23). Literatürden seçilen on yedi farklı değerlendirme kriterine göre elde edilen sonuçlar MR damperin bulanık kontrolörle asma köprülerin sismik performansını arttırdığını göstermiştir.



Şekil 2.23. Bill Emerson köprüsü (Ok ve ark, 2007).

Jung et ve ark. (2008) asma köprü kablolarında rüzgar yükleriyle oluşan titreşimin MR damperlerle sönümlenmesi için Lyapunov, maksimum enerji dağılımı ve clipped optimal kontrol algoritmalarını kullanarak sayısal bir çalışma yapmıştır. Sayısal benzetim sonuçlarına göre MR damperin pasif olarak çalıştırılan durumları da dahil olmak üzere tüm kontrol algoritmaları kablo titreşimlerini kontrolsüz duruma kıyasla yaklaşık %20 ila %60 oranında azaltmıştır. Ayrıca, clipped optimal kontrolörün pasif kontrolün yanı sıra diğer iki yarı aktif kontrolörden daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu çalışma için clipped optimal kontrolör kablo titreşimlerini azaltmak için en uygun algoritma olarak gösterilmiştir. Bununla birlikte çalışma içerisindeki sayısal simülasyonlar bunu doğrulamak için yeterli olmadığından deneysel araştırmalar yapılması hususu da vurgulanmıştır. Heo ve ark. (2014) gerçek boyutlu bir asma köprüünün MR damper ile titreşim kontrolünü deneysel olarak gerçekleştirmiştir.



Şekil 2.24. Köprü modeli ve MR damper yerleşimi (Heo ve ark, 2014)

Bu çalışmada kullanılan köprü modelinin boyutları ve MR damperin kuvvet kapasitesi Şekil 2.24’de gösterilmiştir. Deneysel çalışmada imal edilen köprüye model boyutuna uygun 30 kN’luk bir MR damper yerleştirilmiştir. MR damper kontrolünde clipped optimal ve Lyapunov kontrolörler kullanılmış ve testler El Centro deprem ivmesinin ölçekli verileri etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlara göre, Lyapunov ve clipped optimal kontrolörler köprü yer değiştirme değerlerini kontrolsüz duruma göre sırasıyla % 22 ve % 70 oranında azaltmıştır. Pasif duruma göre bu oran % 80 civarındadır. İki yarı aktif kontrolörden clipped optimal ivmeyi % 13 ve yer değiştirmeyi % 62 azaltarak Lyapunov kontrolöre göre daha iyi performans göstermiştir. Deneysel çalışma sonuçları simülasyon modelleriyle de doğrulanarak MR damperlerin asma köprülerin titreşim kontrolünde etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Ulaştırma alanında da MR damperlerin kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur. Erkus ve ark. (2002) MR damper ile yarı aktif kontrolü, pasif ve aktif kontrol yöntemleriyle kıyaslayarak otoyol köprülerinde sismik tepkilerin azaltılması için kullanmışlardır. Köprü ayağı, mesnet ve üst tabliyeden oluşan bir köprü iki serbestlik dereceli sistem olarak modellenmiş ve üç farklı tasarım hedefi üzerinde sayısal olarak çalışılmıştır. Bu tasarım hedefleri köprü ayağının titreşiminin azaltılması, mesnet tepkisinin azaltılması ve her iki yapısal tepkinin birlikte azaltılması şeklinde

belirlenmiştir. Çalışmada MR damperin kontrolü LQR tabanlı clipped optimal kontrolör ile yapılmıştır. Sayısal simülasyonlarda tasarım amacı mesnet tepkisini azaltmak olması durumunda yarı aktif kontrolörün aktif kontrol performansına ulaşabildiğini göstermiştir. Tasarım hedefinin köprü ayağındaki titreşimleri azaltmak olması durumunda ise yarı aktif kontrolörün pasif kontrolle benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Her iki köprü elemanının yanıtlarının aynı anda azaltılması hedeflendiğinde herhangi bir kontrol yönteminin öne çıkmadığı ve her ikisinin de benzer performans seviyeleri sergilediği görülmüştür. Bu çalışma, otoyol köprülerinde MR damperle yarı aktif kontrolün aktif ve pasif kontrol yöntemlerinin performansını tek başına sağladığını göstermiştir. Deprem kuvveti etkisi altındaki köprülerde kullanılan taban izolatörleri köprü ayaklarındaki deplasmanları azaltırken mesnetlerde büyük yer değiştirmelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Artan mesnet tepkilerini önlemek için izolasyon sistemine ek pasif sönümleyiciler yerleştirmek uygulamada yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak bu uygulamada da mesnet tepkileri azalırken izolasyon seviyesindeki kuvvetler dolayısıyla köprü ayaklarındaki deplasmanlar artmaktadır. Bu sebeple, Engng ve ark. (2005) yarı aktif kontrol uygulayarak izolasyon seviyesindeki kuvvetleri ve köprü ayağındaki deplasmanları arttırmadan mesnet tepkilerini de azaltan bir yöntem önermişlerdir. Bu çalışmada 1:20 ölçekli köprü modeli taban izolasyonu-MR damper sistemi ile yakın alan kaynaklı depremler etkisi altında analitik ve deneysel olarak incelenmiştir. MR damperin kontrolü için Lyapunov kontrolör geliştirilmiş ve sarsma tablası testlerinde uygulanmıştır. Analitik ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar MR damper ile yarı aktif kontrollü köprünün izolasyon seviyesindeki kuvvetleri ve mesnet yer değiştirmelerini pasif sönümleyiciye göre daha fazla azalttığını göstermiştir.

Literatürdeki yapısal titreşimlerin MR damperlerle kontrolü ile ilgili çalışmalarda genel olarak çelik bina modellerinin kullanıldığı görülmektedir. Bazı makalelerde bu yapısal sistemler sayısal olarak incelenirken, bazılarının da ise deneysel testlerde yapılmıştır. Deneysel araştırmaların pek çoğu küçük ölçekli test yapılarından oluşmakla birlikte az sayıda da olsa tam ölçekli bina modellerindeki uygulamalara da rastlamak mümkündür. Yapılan çalışmalar genellikle 3-6 kat arası ve zemin kata yerleştirilen tek MR damperli yapıları incelemiştir. MR damperin yapısal sisteme

uygulayacağı referans kontrol kuvveti belirlenirken uygulanan kontrolörlerden clipped optimal, LQR, LQG ve Lyapunov algoritmaları öne çıkmaktadır. MR damperin giriş sinyalini hesaplarken ise bulanık kontrolör ve yapay sinir ağı modellerinin ön planda olduğu görülmüştür. Yapıya uygulanacak nihai kontrol kuvvetinin hesaplandığı MR damper dinamik modelinde ise genellikle Bouc-Wen ve değiştirilmiş Bouc-Wen modelleri tercih edilmiştir. Literatürün araştırmalarının genelinde yapısal sistemin tahrik kuvveti olarak El Centro deprem ivmesi kullanılmıştır. Çalışmalarda bu deprem verisinin tek başına ya da başka deprem sinyalleri ile birlikte sisteme uygulandığı görülmüştür. Literatür çalışmalarında genel olarak hedeflenen yapısal sistem tepkilerini (yer değiştirme, hız ve ivme) azaltmaktır. Bazı çalışmalarda değişik özelliklere sahip yapısal sistemlerin, farklı kontrol algoritmalarının ve MR damperlerin kullanılması yapısal kontrol alanında spesifik sonuçlar elde etmeyi zorlaştırdığı için kontrolörlerin ve MR damperin performans değerlendirmesi tanımlanan performans indekslerine göre yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonuçları bu değerlendirme kriterleriyle birbirleriyle karşılaştırılabilir bir hale dönüşmüştür. Sayısal ve deneysel çalışmalarda kullanılan yarı aktif kontrolörler genellikle MR damperin akım uygulamadığı veya sabit akım uyguladığı pasif durumlarla kıyaslanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında ise MR damper ile titreşim kontrolü yöntemini uygulamak üzere dört farklı çelik bina modeli (5-8 katlı) kullanılmıştır. Böylece Türkiye yapı stoğuna uygun ve literatür çalışmalarıyla kıyaslanabilir yapısal sistemler imal edilmiştir. Bununla birlikte farklı yükseklikteki yapısal sistemlerdeki yarı aktif kontrol etkisi de değerlendirilmiştir. MR damper, literatür çalışmalarına paralel olarak yapısal sistemlerin zemin ve birinci katı arasına yerleştirilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen testlerden elde edilen ölçüm sonuçları sayısal simülasyonlarla doğrulanarak her iki yöntemle de analizler yapılmıştır. MR damperin yapısal sistem tepkileriyle hesaplanan referans kontrol kuvvetini belirlemek amacıyla literatürde daha önce birlikte değerlendirilmemiş üç kontrolör (PID, SMC, EBC) kullanılmıştır. Bu kontrolörlerle hesaplanan referans sönümleme kuvvetine karşılık gelen akım değerinin hesaplanması için ise MR damperin ters dinamikleri kullanılmıştır. MR damperin doğrusal olmayan doğası nedeniyle ters dinamiklerinin modellenmesinde

literatür çalışmalarında önerilen ve yüksek performans gösteren yapay sinir ağı modeli tercih edilmiştir. Deneysel çalışma yapısal kontrol alanında neredeyse tüm araştırmalarda kullanılan El Centro depremi ve ülkemizde büyük trajik sonuçlara sebep olan Kocaeli depremi etkisi altında yapılmıştır. Böylece önerilen yarı aktif kontrol yönteminin farklı deprem kuvvetleri etkisi altındaki performansı da göz önünde bulundurulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan yapısal sistemler benchmark problemi olarak ele alınmış, kontrolörlerin ve kullanılan farklı tipteki MR damperlerin performansı literatürden seçilen altı farklı değerlendirme kriterine göre incelenmiştir. Uygulanan yarı aktif kontrol yöntemi MR damperin yapısal sisteme bağlı olduğu ancak akım uygulamadığı pasif durumla da kıyaslanmıştır. Ayrıca yapısal sistem içerisinde optimum damper yerinin tespit edilmesi için sayısal bir çalışma da yapılmıştır.

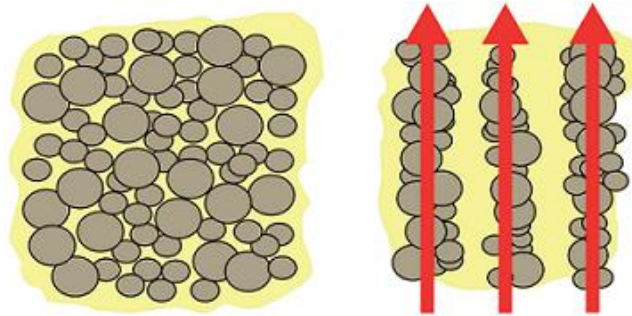
3. MR TEKNOLOJİSİ VE MR DAMPER MODELLERİ

Bu bölümde MR akışkanların davranışı ve MR damperlerin tasarımı hakkında bilgiler sunulacaktır. MR damperin doğrusal olmayan histerezis dinamik davranışını tanımlamak için kullanılan modelleme teknikleri anlatılacak ve MR damperle yarı aktif titreşim kontrolü ile ilgili literatür araştırmalarına genel bir bakış sağlanacaktır.

3.1. MR Akışkanlar

MR akışkanlar ilk olarak 1947 yılında Amerikalı mucit Willis Winslow tarafından keşfedilmiştir (Winslow, 1947). MR akışkanlar, başta otomotiv endüstrisindeki titreşim sönümleyiciler olmak üzere uzay ve havacılık alanlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Araştırmacılar son yıllarda bu akıllı akışkanların bina ve köprülerde de kullanımı ile ilgili çalışmalara yoğunlaşmıştır.

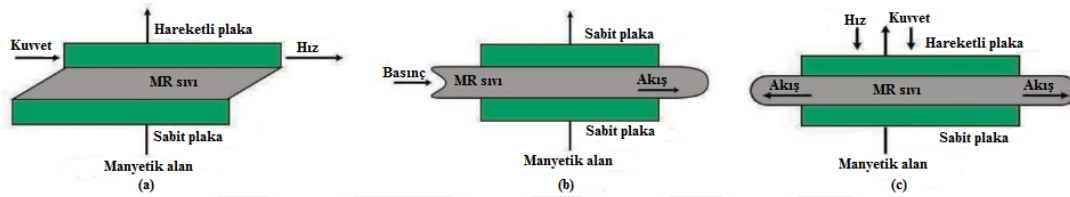
MR akışkanlar mineral yağ, sentetik yağ, su veya glikol gibi taşıyıcı bir sıvı içerisine katılan mikro boyutlu demir tozlarından meydana gelmektedir. Tipik bir MR sıvısı hacimce % 20-40 demir tozu içermektedir. Akışkan içerisine yerçekimi ile çökmesini engellemek, partikül süspansiyonunu desteklemek, kayganlığı arttırmak, viskoziteyi değiştirmek ve aşınmayı engellemek amacıyla çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir. MR sıvılar manyetik alan etkisiyle viskozitelerinde meydana gelen yüksek artışla birlikte mekanik titreşimleri sönümleme özelliğine sahiptirler. Akışkan içerisinde asılı duran demir tozları uygulanan manyetik alana paralel doğrusal zincirler oluşturur (Şekil 3.1). MR etki adı verilen bu geçiş milisaniyeler içerisinde gerçekleşir.



Şekil 3.1. MR akışkanın manyetik alansız (sol) ve manyetik alan etkisinde (sağ) gösterdiği davranış (Parker, 2023).

MR etki gösteren akışkan katı gibi davranarak uygulanan manyetik alana dik yönde akmaya karşı direnç gösterir. Bu akışkanların akma gerilimi sürekli değişen bir sönümleme kuvveti elde etmek için alan yoğunluğu değiştirilerek kontrol edilebilir. Manyetik alan kaldırıldığında ise akışkan eski haline geri döner. MR sıvılar, bu eşsiz özellikleri sebebiyle akıllı akışkanlar olarak da adlandırılmaktadır (Goncalves ve ark, 2006).

MR akışkanın çalışma prensibine bağlı olarak akış modu (flow mode), sıkıştırma modu (squeeze mode) ve kayma modu (shear mod) olmak üzere üç farklı kullanım şekli vardır (Jr ve Sain, 1997). Bu çalışma modları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

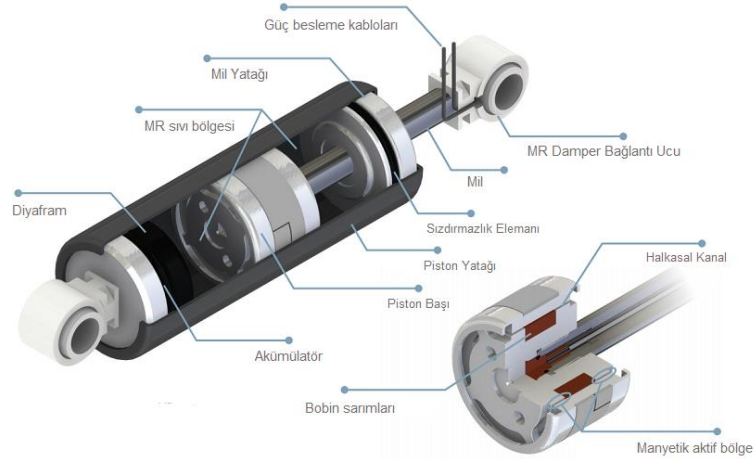


Şekil 3.2. MR akışkan çalışma modları (a) Kayma modu (b) Akış modu (c) Sıkıştırma modu (Cruze ve ark, 2018).

Kayma modunda, MR akışkan hareket eden iki paralel plaka arasında bulunur. Debriyajlarda, frenlerde ve damperlerde MR sıvının kayma modu kullanılmaktadır. MR sıvı akış modunda iki hareketsiz plaka arasında ortaya çıkan basınç gradyanı ile akar. Aktüatörler, amortisörler, damperler ve servo valfler MR sıvının akış modundaki uygulama alanlarındandır. Sıkıştırma modunda ise MR akışkan birbirine dik ve hareketli durumdaki iki plaka arasında bulunur. MR sıvının sıkıştırma modu genellikle darbe sönümleyicilerde ve düşük genlikli titreşimlerde kullanılmaktadır. Bu çalışma modları farklı kombinasyonlarla kullanılarak karma mod (mixed mode) şeklinde de uygulanabilmektedir (Cruze ve ark, 2018). MR akışkanlar titreşim kontrolü uygulamalarında pek çok çalışmada yer almış ve bu çalışmalardan başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sebeple, tez kapsamında titreşim sönümleyici olarak MR akışkanlı damper kullanılmıştır.

3.2. MR Damper

MR damper, içerisinde MR akışkanı bulunan ve bu akıllı akışkan ile titreşim kontrolü sağlayabilen yarı aktif bir sönümleme cihazıdır. Kontrol edilebilen akışkanlı damperler genel olarak elektoreolojik (ER) ve manyetoreolojik (MR) olmak üzere ikiye ayrılır. Bu damperlerin viskozite özellikleri bir elektrik alan (ER) veya bir manyetik alan (MR) uygulanarak değiştirilebilmektedir. 2000'li yıllara kadar çalışmalarda ER akışkanlı damperler kullanılırken daha sonra MR akışkanlı damperler ilgi çekici bir alternatif olarak görülmeye başlanmıştır (Carlson ve ark, 1996). Bunun sebebi MR sıvıların ER sıvılara göre 20 ila 50 kat daha güçlü olmasıdır. Ayrıca manyetik polarizasyon mekanizması sıcaklıktan etkilenmediği için MR akışkanlı sönümleyiciler geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilirler (Lita ve ark, 2004). MR akışkanlı cihazlar düşük voltajlı güç kaynakları ile kolayca çalıştırılabilir. MR teknolojisi tasarımlarda ER teknolojisine göre daha az karmaşık ve daha güvenilir bir kontrol sağlamaktadır. Bu üstün özellikler, MR akışkanlı sönümleyicileri pratik uygulamalarda çok daha cazip bir seçenek haline getirmektedir. MR damperler tipik olarak bir piston, manyetik bobinler, akümülatör, yatak, conta ve MR sıvı ile dolu damper haznesinden oluşmaktadır (George ve ark, 2012). Tek milli doğrusal bir damperin yapısı Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Tek milli doğrusal MR damper (George ve ark, 2012).

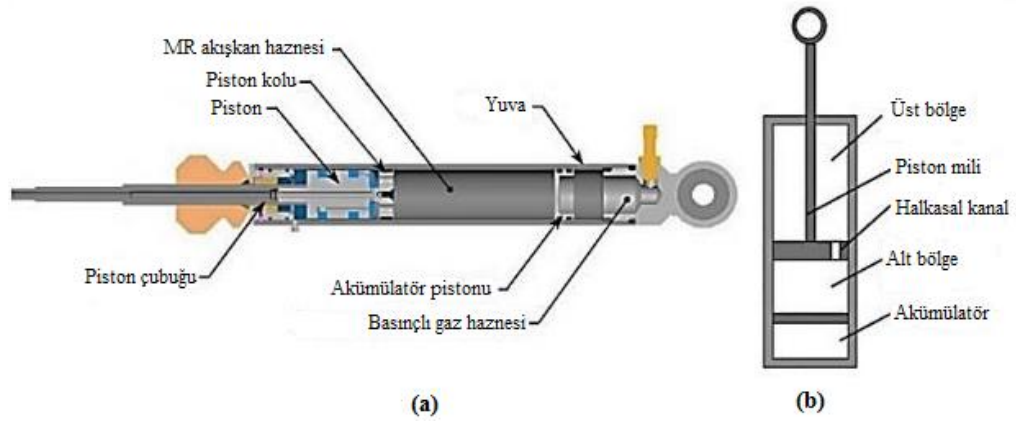
Bu damperde piston kolu yuvasına yerleşirken MR sıvı, piston başındaki delikler vasıtasıyla yüksek basınç bölgesinden düşük basınç bölgesine doğru akar. Akümülatör

içerisinde sıkıştırılmış bir gaz (genellikle nitrojen) bulunmaktadır. Piston MR sıvı ve gaz arasında bir bariyer görevi görür. Akümülatör damper içerisinde üç amaca hizmet etmektedir; (i) piston kolu yuvaya girdiğinde meydana gelen hacim değişikliklerini kompanse etmek (ii) akışkanın ısı genleşmesini sağlamak (iii) piston hareketleri sırasında MR akışkanın kavitasyonunu önlemek. Aktivasyon bölgelerinde bobinler tarafından oluşturulan manyetik alan MR sıvının özelliklerini değiştirir. Sonuç olarak giriş akımının büyüklüğü MR damperin fiziksel özelliklerini belirler. MR damperin üretebileceği maksimum kuvvet, MR akışkanın özelliklerine, akış düzenine ve damperin boyutuna bağlıdır (George ve ark, 2012).

MR damper yapısı gereği doğrusal olmayan davranış gösteren histerezis bir cihazdır. Damper sisteminin çıkış değerleri, giriş değerlerinin nonlineer bir fonksiyonudur ve bu durum MR damperin doğrusal olmayan davranışıyla ifade edilmiştir. İleri (veya doğrudan) dinamikler söz konusu olduğunda elektriksel (voltaj veya akım) ve mekanik (damperin bir ucunun diğer uca göre yer değiştirmesi, hızı veya ivmesi) giriş değerlerine karşılık çıkış değeri kuvvet olmaktadır. Ters dinamikler söz konusu olduğunda ise uygulanan mekanik girişe karşılık çıkış değeri istenen kuvveti oluşturmak için gerekli olan voltaj ya da akım olacaktır. Çıkış değerlerinin sadece anlık giriş değerlerine değil aynı zamanda çıkış değerlerinin tüm geçmişine bağlı olması MR damperin histerezis özelliğini ifade etmektedir (Smyth ve ark, 2002).

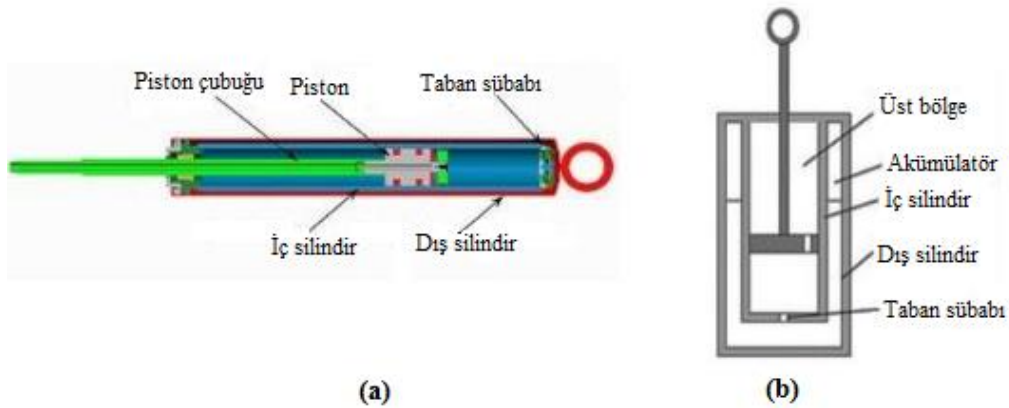
3.2.1. Tek milli MR damper

Tek milli damperler imalat açısından basit bir mekanik yapıya sahiptirler. Bu damperde piston başı mil ile tek taraftan bağlıdır. Tek milli damper, genişleme ve sıkıştırma odası olmak üzere iki hazneye bölünmüştür. Pistondaki bu hareket sırasında odalar arasında oluşan basınç farkıyla MR akışkan kontrol valfine doğru akar. Akümülatör piston hareketini kullanarak MR akışkanın hacmini değiştirir. Gaz bölmesi damperin ürettiği kuvveti veren yay benzeri bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak kontrol edilebilir manyetik alanla orantılı bir sönümleme kuvveti oluşur. MR sıvının sızmasının önlenmesi için halka, bilyalı yataklar ve contalar kullanılmaktadır (Sahin ve ark, 2007). Tipik tek silindirli MR damper modeli Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Tek silindirli MR damper (a) damperin yapısı (b) damperin kesiti ve ark, 2018).

Tek milli MR damperler çift silindirli olarak da imal edilebilir. Bu damper çeşidinde iç ve dış silindir bulunmaktadır. İç silindir MR akışkan ile doldurulur ve tıpkı tek silindirli damperde olduğu gibi piston ve piston kolu tertibatını yönlendirir. Kısmen MR akışkan ile dolu olan dış silindir, tek silindirli damperlerdeki akümülatör mekanizması ile aynı şekilde çalışır. Ayrıca, dış silindirin damperin içerisindeki parçaları koruma gibi ek işlevleri de vardır. Genişleme ve sıkıştırma hareketi sırasında iki silindir arasındaki akışı düzenlemek için iç silindirin altına bir taban sübabı yerleştirilmiştir. Piston çubuğu damper içine doğru hareket ederken MR akışkan iç silindirden dış silindire taban sübabındaki sıkıştırma valfi ile akar. Piston çubuğunun iç silindire girerken değiştirdiği hacim akan sıvının miktarına eşittir (Zhu ve ark, 2012). Çift silindirli MR damperin temel yapısı ve kesiti Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

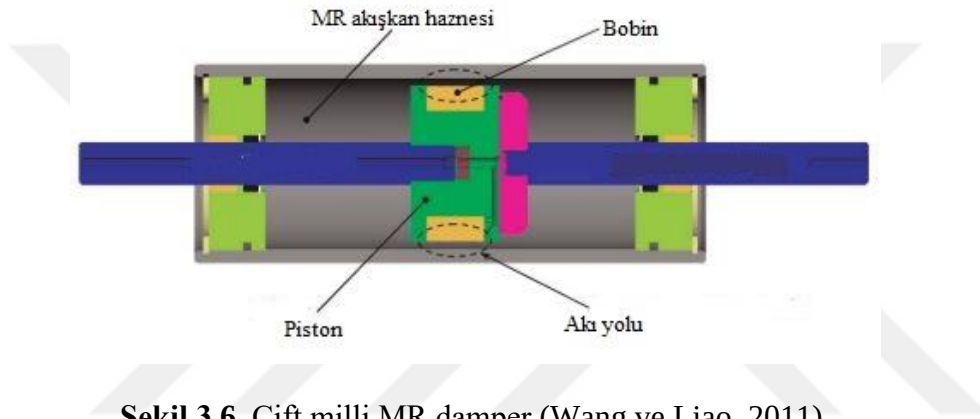


Şekil 3.5. Çift silindirli MR damper (a) damperin yapısı (b) damperin kesiti (Cruze ve ark, 2018).

Genel olarak çift silindirli damperlerin daha düşük gaz basıncıyla çalışmaları büyük bir avantaj sağlarken MR akışkanın ısıyı çevreye dağıtması en büyük dezavantajlarından biridir (Cruze ve ark, 2018).

3.2.2. Çift milli MR damper

Çift milli damperlerde piston iki ucundan mil ile bağlıdır (Şekil 3.6). Bu tasarımda MR akışkanın genleşmesini sağlamak için herhangi bir gaz bölmesi, yay ve akümülatöre ihtiyaç duyulmaz. Çift milli MR damperler darbe ve şok yükleme gibi ani etkilerin olduğu durumlarda, depreme dayanıklı yapı tasarımı uygulamalarında ve ateşli silahlarda geri tepmenin önlenmesinde kullanılmaktadır (Cruze ve ark, 2018).

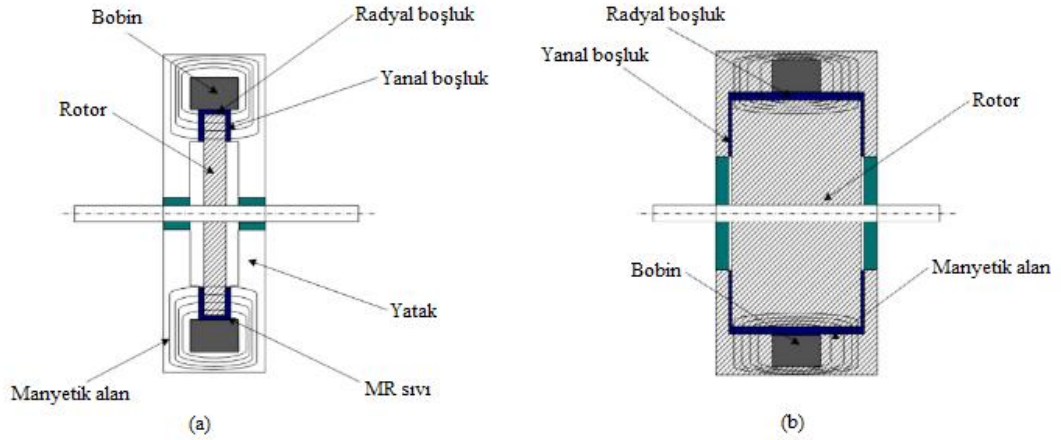


Şekil 3.6. Çift milli MR damper (Wang ve Liao, 2011).

3.2.3. Dönel MR damper

Dönel MR damperler genel olarak açısal hıza göre çalışan ve birden fazla MR akışkan çalışma modunu içeren damperler olarak tanımlanmaktadır. Yapısal tasarımlarına göre sürekli açılı ve kısıtlı açılı dönel damperler olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadırlar. Sürekli açılı MR damperler sonsuz açıda dönme kabiliyetine sahip damperlerdir. Bu tip damperler genellikle MR fren, MR kavrama ve rotor titreşim uygulamalarında kullanılmaktadır. Sürekli açılı MR damperler kendi içlerinde tambur (drum) tipi ve disk tipi olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 3.7). Disk tipi dönel MR damperde kesme modu rotorun eksenel boşluğunda meydana gelirken tambur tipinde ise kesme modu rotorun radyal boşluğunda gerçekleşir. Öte yandan kısıtlı açılı dönel damperler sürekli açılı damperler gibi sonsuz açıda dönme kabiliyeti sergileyemez. Ancak sürekli açılı damperlere kıyasla daha büyük sönümleme torku üretirler. Bu nedenle, kısıtlı açılı damperler yüksek rotor hızı gerektiren uygulamalar için elverişli

olmasa da sınırlı açısal hareket ile yüksek sönümleme torkunun gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır (Zhu, 2005).



Şekil 3.7. Dönel MR damper (a) Disk tipi (b) Silindir tipi (Imaduddin ve ark, 2013).

3.3. MR Damper Uygulamaları

Dinamik etkilerden kaynaklanan titreşimleri azaltmak için kullanılan MR sönümleyiciler endüstriyel makinelerden yapılara kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmuştur. Otomotiv endüstrisi MR damperlerin yaygın olarak kullanıldığı alanların başında gelmektedir. Araçlarda sürüş konforunu iyileştirmek için süspansiyon sistemlerinde titreşim kontrolü uygulanmaktadır (El-Kafafy ve ark, 2012). Carrera, NASCAR yarış arabalarının süspansiyon sistemlerinde MR akışkanlı amortisör kullanmaktadır. Delphi firması, Lord şirketiyle birlikte MR akışkanlı ‘Delphi Magneride’ adını verdikleri bir süspansiyon sistemi geliştirmişlerdir (Ahamed ve ark, 2018; Shutto ve Toscano, 2005). Audi ve Ferrari gibi bazı otomobil üreticileri de kendi araçlarında kullanmak üzere çeşitli Magneride modelleri geliştirmişlerdir. 2010 yılında Porsche firması Porsche GT2 ve GT3 modellerinin motor aktarma organlarında MR damper kullanmıştır. 2007 yılında Honda firması MR teknolojisinin kullanıldığı binek araç modelinin vurgulandığı bir reklam filmi yayınlamıştır. Honda MDX, Audi TT, BMW, Buick Lucerne, Cadillac DTS, Cadillac XLR, Cadillac SRX, Cadillac STS, Chevrolet Corvette ve Ferrari 599GTB gibi lüks araçlarda titreşim kontrolünü sağlamak amacıyla MR damper kullanılmıştır. Ağır hizmetlerde kullanılan damperli kamyon ve traktörlerde de sürüş kalitesi operatörler için sadece bir konfor

problemi değil aynı zamanda sağlık ve güvenlik sorunudur. Bu tip araçlarda MR amortisörlü koltuk süspansiyon sistemleri konforu sağlarken sağlık ve güvenlik problemlerine de azaltmaktadır (Ahamed ve ark, 2018). Ek olarak helikopter mürettebat koltuklarında ve ambulanslardaki hastane koltuklarında da MR sönümleyici kullanılmaktadır.

MR teknolojisi motosiklet süspansiyon sistemlerinde de tercih edilmektedir. Bir motosiklet süspansiyonunu ayarlamanın en uygun yöntemlerinden biri akışkanın viskozitesini değiştirmektir. Viskozite manyetik alan yoğunluğunun ayarlanmasıyla değiştirilir. Ayarlanabilir aralık neredeyse sonsuz olduğu için motosiklet ön süspansiyon sistemleri için MR amortisör kullanımı mükemmel bir seçenektir. MR damperler otomobil süspansiyonlarında yaygın olarak kullanılırken motosiklet süspansiyonlardaki uygulamalar daha az sayıdadır.

MR damperlerin etkili bir şekilde kullanıldığı bir başka alan ise medikaldır. Protez bacaklarda hastanın hareketiyle meydana gelen şokları azaltmak için MR damper kullanımıyla ilgili çalışmalar mevcuttur (Kim ve Oh, 2001; Xie ve ark, 2010). MR damper kullanılan protez bacaklarda hastanın hareketliliği ve çevikliği artmaktadır. Titreşim kontrolü gerektiren Parkinson hastalığında da MR damperler önerilmektedir (Yang ve ark, 2012).

Savunma sanayi MR damperlerin bir başka uygulama alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. MR akışkanlar ABD ordusu tarafından savaş zırhı geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu savaş zırhı tamamen kurşungeçirmezdir. Ordunun askeri araçlarının süspansiyon sistemlerinde MR damper veya MR teknolojisine dayalı ürünler de kullanılmaktadır. Ayrıca, ABD ordusu herhangi bir çarpışma durumunda güvenliği sağlamak için helikopter kokpit koltuklarında da MR damper kullanılmaktadır. Koltuklarda kullanılan MR damper çarpışma sırasında yolcunun omurgasına verilen şoku ve kalıcı yaralanma yüzdesini azaltmaktadır (Wereley ve ark, 1999).

Bunların dışında MR damper kullanımının en standart örneği çamaşır makineleridir. Bazı çamaşır makinası üreticileri makine titreşimlerini kontrol etmek amacıyla MR damper kullanmıştır. Çamaşır makinasının içine monte edilen MR damper geleneksel

hidrolik damperlere göre gürültü ve titreşimi daha etkin bir şekilde azaltırken aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamıştır (Ahamed ve ark, 2018; Spelta ve ark, 2009).

3.4. MR Damperin Dinamik Modelleri

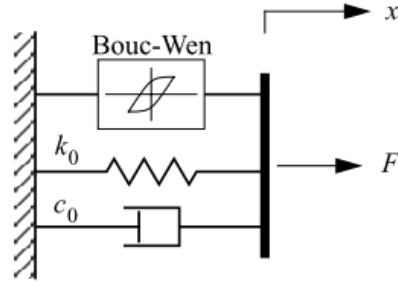
MR damperlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için bugüne kadar pek çok model geliştirilmiş ve literatürde sunulmuştur. Bu modeller doğruluk ve basitlik bakımından farklılıklar göstermektedir. Uygulamada en uygun modeli seçmek araştırmacının hedeflediği çıktıya göre belirlenmektedir. Mevcut modeller yarı-statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılır. Dinamik modellerde kendi içerisinde parametrik ve parametrik olmayan modeller olarak sınıflandırılmaktadır (Wang ve Liao, 2011). MR akışkanlarda yarı statik Bingham plastik modeli kullanılmaktadır, ancak bu modelde dinamik yükleme etkisi altındaki MR damperin doğrusal olmayan histerezis davranışı dikkate alınmamıştır. Bu temel sorun parametrik ve parametrik olmayan dinamik modellerle çözülmüştür. Parametrik modeller genellikle yay, viskoz eleman, sürtünme elemanı vb. gibi fiziksel bileşenlerle tanımlanır. Parametrik olmayan modellerde ise yapay sinir ağları ve bulanık mantık gibi deneysel verilere dayalı hesaplama teknikleri kullanılmaktadır.

3.4.1. Parametrik modeller

Bu bölümde Bouc-Wen, Lugre ve Dahl gibi çalışmalarda sıklıkla tercih edilen ve fiziksel parametreler aracılığıyla tanımlanan parametrik modellerin temel özelliklerinden bahsedilecektir.

3.4.1.1. Bouc-Wen modeli

MR damperin histerezis dinamiklerini analitik biçimde temsil etmek için oluşturulan ilk model Bouc-Wen modelidir. Bu model ilk olarak Bouc tarafından önerilmiş ve Wen tarafından geliştirilmiştir (Şahin ve ark, 2010). Bouc-Wen modelinin basit şematik gösterimi şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.8. Basit Bouc-Wen modeli (Dyke ve ark, 1997).

Şekil 3.8’de MR damperin mekanik olarak idealize edilmiş biçimi görülmektedir. Burada, c_0 sönüm katsayısını ve k_0 yay katsayısını ifade etmektedir. Bouc-Wen modeline göre MR damperin uygulayacağı kuvvet aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmaktadır (Dyke ve ark, 1997).

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad (3.1)$$

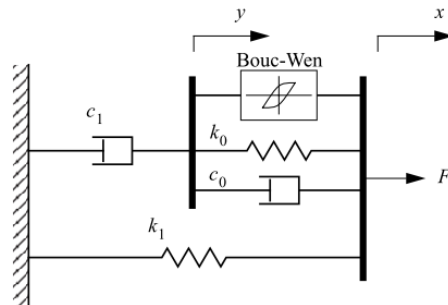
Burada, αz Bouc-Wen bileşenini temsil eder ve z histerezis değişkeni,

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. A , n , α , β ve γ ise sabit katsayılardır.

3.4.1.2. Düzenlenmiş Bouc-Wen modeli

Basit Bouc-Wen modelinin MR damper için özelleştirilmiş biçimine düzenlenmiş Bouc-Wen modeli denir. Bu model ilk kez Spencer tarafından önerilmiş ve bu alandaki araştırmacılar için önemli bir referans olmuştur (Dyke ve ark, 1997). Düzenlenmiş Bouc-Wen modeline ait şematik gösterim Şekil 3.9’de sunulmuştur.



Şekil 3.9. Düzenlenmiş Bouc-Wen modeli (Dyke ve ark, 1997).

Bu şekilde, k_1 akümülatör rijitliğini, c_0 ve c_1 sırasıyla yüksek ve düşük hızlardaki viskoz sönümü, k_0 yüksek hızlardaki rijitliği ve x_0 akümülatör etkisini göstermektedir. Düzenlenmiş Bouc-Wen modeline göre MR damperin üreteceği kuvvet ise şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$F(t) = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (3.1)$$

Burada, y damperin yer değiştirmesini gösterir ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (3.2)$$

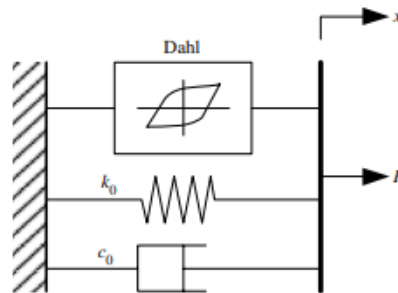
Bu bağıntıdaki z histerezis değişkeni ise,

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Histerezis döngüsünün ölçeği ve şekli γ , β , A ve n katsayılarıyla ayarlanmaktadır. Düzenlenmiş Bouc-Wen modelini kullanarak MR damperin davranışını doğru bir şekilde karakterize etmek için karakteristik şekil parametrelerini akım ile ilişkilendiren on adet sabit parametre tanımlanmalı ve bir set oluşturulmalıdır. Bu sabit parametreler $c_0, c_1, k_0, k_1, \alpha, x_0, \gamma, \beta, A$ ve n 'dir.

3.4.1.3. Düzenlenmiş Dahl modeli

Dahl modeli sürtünmeli kontrol sistemlerini simüle etmek amacıyla geliştirilmiştir. Zhou (2002) bu modeli geliştirerek MR damperler için daha basit ve etkili olan düzenlenmiş Dahl modelini önermişlerdir. Modelin şematik gösterimi şekil 3.10'da sunulmuştur.



Şekil 3.10. Düzenlenmiş Dahl modeli (Wang ve Liao, 2011).

Bu modele göre MR damperin üreteceği sönüm kuvveti aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$F(t) = k_0 x + c_0 \dot{x} + \alpha z - f_0 \quad (3.4)$$

Boyutsuz histerezis değişken z ,

$$\dot{z} = \frac{\sigma}{f_c} (\dot{x} - |\dot{x}|z) \quad (3.5)$$

şeklinde hesaplanır. Düzenlenmiş Dahl modelini kullanarak MR damperin davranışını modellemek için sekiz adet sabit parametre tanımlanmalı ve bir set oluşturulmalıdır. Bu sabit parametreler $c_{0a}, c_{0b}, \alpha_a, \alpha_b, k_0, \sigma, f_0$ ve η katsayılarıdır.

3.4.1.4. LuGre modeli

Kontrol problemlerinin tasarım ve modellenmesinde matematiksel basitliği ve yüksek doğruluk oranı ile LuGre modeli sıklıkla tercih edilmektedir. Jimenez ve ark. (Wang ve Liao, 2011) tarafından MR damperin dinamik davranışını tanımlamak için yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Bu modele göre MR damper dinamikleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$F(t) = \beta z + \gamma \dot{x} + \delta x + \varepsilon \dot{z} + f_0 \quad (3.6)$$

$$\dot{z} = \dot{x} - \alpha |\dot{x}|z \quad (3.7)$$

Burada, α, β, γ ve ε akımla değişebilen genelleştirilmiş rijitlik ve sönüm parametreleridir. $F(t)$ damperin uygulayacağı kuvvet, x damperin yer değiştirmesidir.

3.4.1.5. Cebirsel modeller

MR damperin dinamiklerini modelleyen bir başka yöntem cebirsel modellerdir. Bu modeller karmaşık diferansiyel denklem çözümleri yerine daha basit formda tek bir denklem çözümü sunmaktadır. Guo ve Hu (BalaMurugan ve Jancirani, 2013; Guo ve Hu, 2005; Ho, 2014) tarafından önerilen cebirsel model bu modelleme tekniği içerisinde en yaygın olarak kullanılan modeldir. Cebirsel modelden elde edilen sönümleme kuvveti şu şekilde ifade edilmektedir.

$$F(t) = f_0 + c_b \dot{x} + \frac{2}{\pi} f_y \tan^{-1}\{k[\dot{x} - \dot{x}_0 \operatorname{sgn}(\ddot{x})]\} + m\ddot{x} \quad (3.10)$$

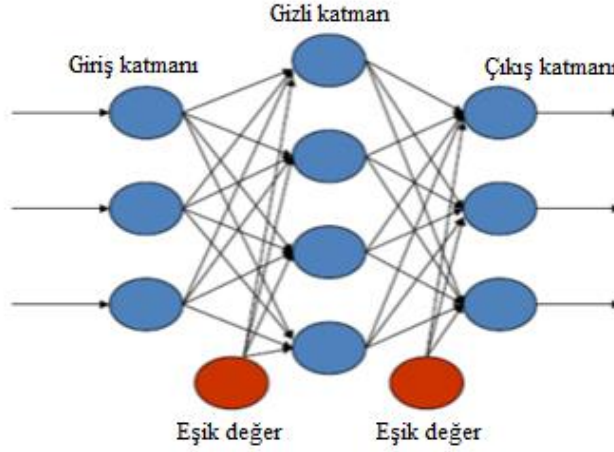
Bu denklemde F damperin sönümleme kuvvetini, f_0 gaz kuvvetini, c_b viskoz sönüm katsayısını, f_y akma kuvvetini, k şekil katsayısını ve m kütleyi ifade etmektedir.

3.4.2. Parametrik olmayan modeller

Bir önceki bölümde özetlenen parametrik modeller MR damperleri etkili bir şekilde karakterize etmekle birlikte bu modelleri sayısal olarak çözümlemek oldukça zordur. Bu nedenle MR damperlerin özelliklerini daha hızlı bir şekilde temsil eden alternatif modellere ihtiyaç duyulmuştur. Parametrik olmayan modeller sistemin giriş/çıkış ilişkisi ile ilgili herhangi bir bilgiye ihtiyaç duymadığı için MR damperlerin doğrusal olmayan davranışını incelemek ve modellemek için oldukça kullanışlı yöntemlerdir. Bu modeller MR damperlerin deneysel verilerinin eğitimleri ile elde edilir. Yapay sinir ağı ve bulanık mantık modeli yaygın olarak kullanılan parametrik olmayan modellerdendir.

3.4.2.1. Yapay sinir ağı tabanlı modeller

Sinir ağları yöntemi beyindeki nöronların çalışma prensibinden esinlenmiştir. Bu yöntem ilk kez 1943 yılında nörofizyolog Warren McCulloch ve matematikçi Walter Pitts tarafından basit bir elektrik devresi ile tasvir edilmiştir. 1949 yılında ise Donald Hebb bu fikri daha da ileri götürerek beyindeki nöronlar arasındaki sinirsel yolların birbirini izleyen her kullanımda güçlendiğini ve böylece beyin karmaşık süreçleri nicelleştirdiğini öne sürmüştür (Lara ve ark, 2017). Sinir ağı birbirleriyle paralel şekilde iletişim halindeki katmanlara sahip olan ve her bir katmanda belirli sayıda nöron bulunduran bir sistemdir. Yapay sinir ağı bir giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıkış katmanından meydana gelmektedir (Şekil 3.11). Giriş katmanında dış dünyadan gelen sinyaller bulunur. Çıkış katmanından sistem sonunda işlemlerden geçen çıkış verisi elde edilir. Gizli katman ise giriş ve çıkış katmanları arasında yer alan ve sistem dışından gözlemlenemeyen birimdir.



Şekil 3.11. Sinir ağı katmanları (Öztürk ve Şahin, 2018).

Sinir ağı birbirine bağlı çok sayıda düğüm (veya nöron) ile oluşturulan hesaplamalı bir modeldir. Her düğüm aktivasyon fonksiyonu adı verilen bir çıkış fonksiyonunu temsil eder. Her nöron ağırlıklandırılmış şekilde diğerine bağlanır. Herhangi bir düğümün çıktısı belirtilen eşik değerinin üzerindeyse o düğüm etkinleştirilir ve veri ağı bir sonraki katmanına gönderilir. En iyi bilinen sinir ağlarından biri Google'ın arama algoritmasıdır. Eğitim yoluyla doğrusal olmayan herhangi bir durumu eşleştirmek için kullanılan sinir ağları yöntemi MR damper modeli için alternatif bir yöntemdir.

3.4.2.2. Bulanık mantık tabanlı modeller

Modern anlamda bulanık mantık kavramı ilk kez 1965'te Lotfi Zadeh tarafından insanlara ait verilerin işlenerek makinelere aktarılması düşüncesi ile ortaya atılmış bir kuramdır (Keskenler ve Keskenler, 2017). Bu modelde sistem girişlerini istenen çıkışlarla ilişkilendiren eğer-o halde kuralları uygulanır. Bulanık mantık esas olarak bulanıklaştırma, karar verme ve durulaştırma olmak üzere üç temel adımdan oluşmaktadır (Aldawod ve ark, 2001). Bulanıklaştırma aşamasında kontrolör sistem girişlerini uygunluk fonksiyonlarını kullanarak dilsel değerlere dönüştürür, yani sayısal değerler sözel değerlere dönüşür. Sistem bulanıklaştırıldıktan sonra kontrolör belirlenen kontrol kurallarına göre en uygun çıkış değerine karar verir. Durulaştırma olarak bilinen son adımda ise en uygun çıkış değeri MR damperi harekete geçirecek komut sinyali karşılık gelen sayısal bir veriye dönüşür. Kısaca, bulanık değerlerden uygulamada kullanılacak gerçek değerlere geri dönülür (Lara ve ark, 2017).

Bulanık mantık tabanlı modeller diğerk parametrik modellere göre sönümleyici davranışını tahmin etmek için kullanılan hesaplama yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır (Jung ve ark, 2004). Sistemlerin kesin matematik modellerinin bilinmediğı durumlarda bulanık mantık güçlü çözümler üretmektedir. Bu modeller yapısal titreşim kontrolü uygulamalarında ortaya çıkan belirsizlikleri ve doğrusal olmayan etkileri de dikkate aldığı için çalışmalarda çoğunlukla tercih edilmektedir.





4. YARI AKTİF KONTROL UYGULANAN YAPISAL SİSTEMLERİN HAREKET DENKLEMLERİ VE KONTROLÖR TASARIMI

Bu bölümde öncelikle yarı-aktif kontrol uygulanan yapısal sistemlerin hareket denklemleri sunulacak, daha sonra bu çalışma kapsamında kullanılan kontrolörlerin çalışma prensipleri ayrıntılı olarak tanıtılacaktır.

4.1. Hareket Denklemi Formülasyonu

Yer hareketi etkisi altındaki çok serbestlik dereceli yapısal sistemlerin genel hareket denklemi,

$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = -M_s \lambda \ddot{x}_g(t) \quad (4.1)$$

şeklindedir. Burada, $M_s, C_s, K_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sırasıyla yapısal kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. $i = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere,

$$M_s = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & m_2 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_i & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$C_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & -c_i & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & -c_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_n & c_n \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \vdots & 0 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & -k_i & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & -k_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilir. $x(t), \dot{x}(t)$ ve $\ddot{x}(t) \in \mathbb{R}^{nx1}$ sırasıyla yapısal sisteme ait yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini, $\lambda = [1 \ 1 \ \dots \ 1 \ \dots \ 1]^T \in \mathbb{R}^{nx1}$ yer hareketi etki vektörünü ve $\ddot{x}_g(t)$ yer titreşim ivmesini göstermektedir.

MR damper kuvvetinin yapıyı lineer elastik bölgede tutacak şekilde uygulandığı varsayılp, denklem 4.1 damper kuvvetini de içerecek şekilde düzenlenerek tekrar yazılırsa;

$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = -M_s \lambda \ddot{x}_g(t) - \Gamma f_{damper} \quad (4.5)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklemde, $\Gamma = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ \dots \ 1]^T \in \mathbb{R}^{nx1}$ vektörü yapısal sisteme ilave edilen damperlerin yerini, f_{damper} ise sisteme etki eden damper kuvvetini göstermektedir.

4.2. Durum-uzay Gösterimi

Klasik kontrol teorisinde frekans tanım alanı analizlerini esas alan transfer fonksiyonu yöntemleri kullanılırken modern kontrol teorisinde ise birinci dereceden diferansiyel denklemlerle ifade edilen zaman tanım alanı teknikleri kullanılmaktadır. 1960'lı yıllardan sonra uzay araştırmaları ile birlikte zaman tanım alanı analiz teknikleri hız kazanmıştır. Dinamik sistemlerin hareketlerini ifade eden diferansiyel denklemlerin başlangıç koşullarına bağlı olarak giriş ve çıkış ilişkisi içerisinde matris-vektör şeklinde gösterimine durum-uzay gösterimi denir. Karmaşık sistemleri diferansiyel denklemlerle temsil etmek oldukça zordur. İncelenen sistemde birden fazla giriş ve çıkış değeri mevcutsa durum-uzay denklemlerini kullanmak çok daha doğru bir seçenek olacaktır. Bu çalışma içerisinde kullanılan yapısal sisteme ait hareket denklemi durum-uzay gösterimi kullanılarak çözülmüştür. Bir sistemin durum uzay

gösterimi n.dereceden bir diferansiyel denklemin birinci dereceden diferansiyel denkleme dönüşmüş halidir. Durum uzayı gösteriminin genel ifadesi aşağıdaki iki denklem ile tanımlanmıştır.

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \quad (4.6)$$

$$Y(t) = CX(t) + DU(t) \quad (4.7)$$

Denklem 4.6’da verilen eşitliğe durum denklemi, denklem 4.7’de verilen eşitliğe ise çıkış denklemi denir. Bu denklemlerde $X(t)$ durum değişkenleri vektörünü, $\dot{X}(t)$ durum değişkenleri vektörünün zamana göre türevini, $U(t)$ kontrol vektörünü ve A, B, C, D ise durum uzay matrislerini ifade etmektedir.

Denklem 4.5’de verilen MR damperli yapısal sistemin genel hareket denklemi kütle matrisine bölünerek yeniden yazıldığında,

$$\{\ddot{x}(t)\} = -[M_s]^{-1}[K_s]\{x(t)\} - [M_s]^{-1}[C]_s\{\dot{x}(t)\} - [M_s]^{-1}\Gamma f_d - \lambda\ddot{x}_g(t) \quad (4.8)$$

elde edilir. Durum değişkenleri vektöründeki temel değişkeni $x(t)$ olarak kabul edip bu değişkenin türevlerini gerekli değişken sayısı (diferansiyel denklemin mertebesine eşittir) elde edilinceye kadar seçmek sistemin durum-uzay gösterimi için yeterli olmaktadır. Yapısal sistemin hareket denklemi ikinci mertebeden bir diferansiyel denklem olduğu için iki durum değişkenine ihtiyaç vardır. Buna göre yer değiştirme $x(t)$ ve hız $\dot{x}(t)$ değerleri durum değişkenleri olarak tanımlandığında $x_1 = x(t)$, $x_2 = \dot{x}(t)$ ve $\dot{x}_2 = \ddot{x}(t)$ olmaktadır. Durum değişkenleri ile ikinci dereceden diferansiyel denklem birinci dereceden iki denklem takımıyla aşağıda şekilde yazılabilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.9)$$

$$\dot{x}_2 = -[M_s]^{-1}[K_s]\{x_1\} - [M_s]^{-1}[C]_s\{x_2\} - [M_s]^{-1}\Gamma f_d - \lambda\ddot{x}_g(t) \quad (4.10)$$

Denklem 4.9 ve denklem 4.10 matris-vektör biçiminde düzenlenip tekrar yazıldığında elde edilen bağıntı şu şekildedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -M_s^{-1}\Gamma \end{bmatrix} f_d + \begin{bmatrix} 0 \\ -\lambda \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (4.11)$$

Denklem 4.11'deki sistem matrisleri durum uzayında denklem 4.6 ile ifade edilen durum denklemi biçiminde yazıldığında,

$$A = \begin{bmatrix} 0_{nxn} & I_{nxn} \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{nx1} & 0_{nx1} \\ -M_s^{-1}\Gamma & -\lambda \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

ifadeleri elde edilir. Burada, A durum matrisini ve B giriş matrisini göstermektedir. Sisteme ait çıkış denklemi hedeflenen değerler doğrultusunda değişmektedir. Yapısal sistemden yer değiştirme, hız ve ivme tepkileri elde edilmek istendiğinde denklem 4.11 şu şekilde değişmektedir.

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -M_s^{-1}\Gamma \end{bmatrix} f_d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\lambda \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (4.14)$$

Denklem 4.14'den elde edilen sistem matrisleri durum uzayında denklem 4.7 ile ifade edilen çıkış denklemi biçiminde yazıldığında aşağıdaki ifadeler elde edilir.

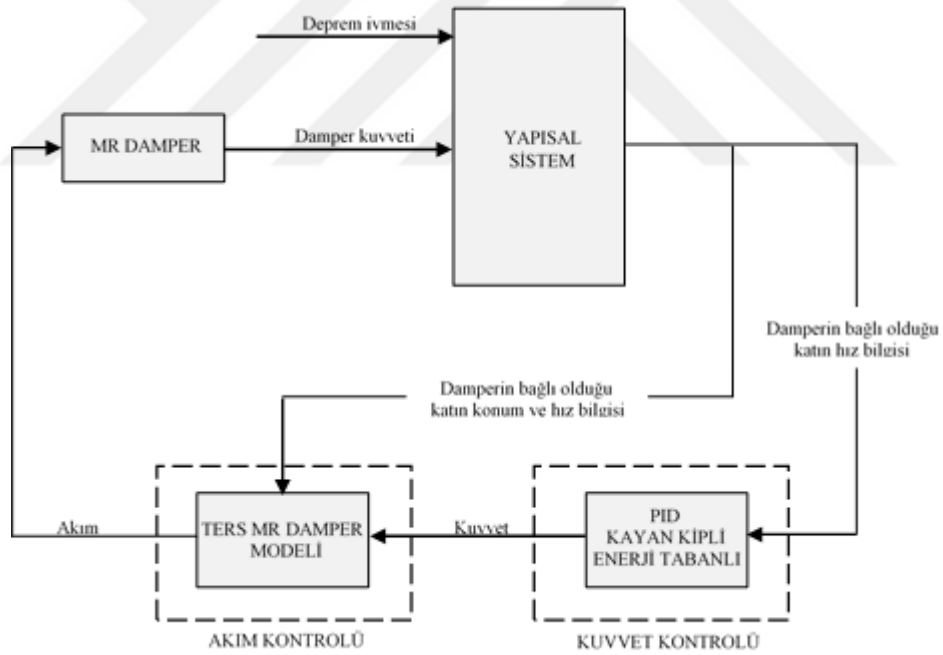
$$C = \begin{bmatrix} I_{nxn} & 0_{nxn} \\ 0_{nxn} & I_{nxn} \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -M_s^{-1}\Gamma & -\lambda \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Burada, C çıkış matrisini, D ileri besleme matrisini ve n kat sayısını ifade etmektedir.

4.3. Yarı-aktif Kontrol Yöntemi

Bu çalışma kapsamında yapısal sistemlere MR damper ile uygulanan yarı aktif kontrol yönteminin genel akış şeması Şekil 4.1’de sunulmuştur. Önerilen yarı aktif kontrol yöntemi kuvvet ve akım kontrolü olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Kuvvet kontrolü bölümünde deprem ivmesi etkisi altındaki bina modellerinden elde edilen yapısal tepkiler anlık olarak sensörler vasıtasıyla ölçülmekte ve bu veriler ilgili kontrolörün çalışma prensibine göre MR damperin uygulayacağı referans sönümleme kuvveti olarak hesaplanmaktadır. Bina modellerinde damperin bağlı olduğu katın hız ve yer değiştirme verileri ile kontrolörlerin hesapladığı referans sönümleme kuvveti akım kontrolü aşamasının giriş verilerini oluşturmaktadır. Yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak elde edilen ters MR damper modeli, hesaplanan sönümleme kuvvetine karşılık gelen akım değerlerini hesaplar ve MR damperin bina modellerine uygulayacağı nihai kuvveti belirler. Böylece, bina modellerinin MR damper ile yarı aktif titreşim kontrolü tamamlanmış olur.



Şekil 4.1. Yarı aktif kontrol yöntemine ait genel akış şeması.

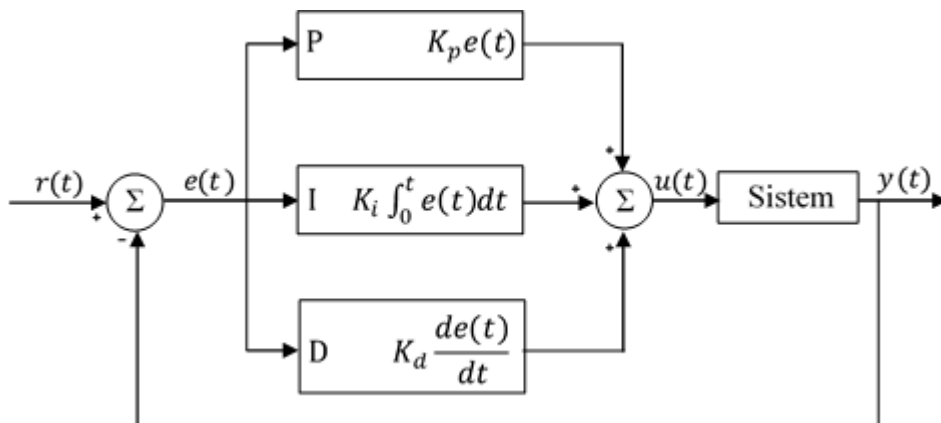
4.3.1. Kuvvet kontrolü

Kontrol algoritması tasarımı yapısal sistemlerde etkin bir titreşim kontrolü sağlayabilmek için temel unsurdur. Kontrol algoritmaları kontrol teorisi çerçevesinde

formüle edilecek matematiksel ifadeler olarak düşünülebilir. Yarı-aktif ve aktif kontrol cihazlarının uygulayacağı kuvvet dinamik sistemden ölçülen titreşim durumuna veya uyarı kuvvetlerine göre belirlenir. Titreşim kontrolünün ilk aşamasını oluşturan kuvvet kontrolünün amacı yapısal tepkileri kullanarak MR damperin uygulayacağı referans sönümleme kuvvetini hesaplamaktır. Bu çalışmada kuvvet kontrolü için üç farklı kontrolör uygulanmış ve bu kontrolörlerin teorik alt yapısı bundan sonraki alt bölümlerde özetlenmiştir.

4.3.1.1. PID kontrolör

PID kontrolör basit yapısı nedeniyle endüstriyel kontrol sistemlerinde en çok kullanılan kontrol algoritmalarından biridir. Bu kontrolör, hedeflenen sistem durumu ile mevcut sistem durumu arasındaki farkı (hata) hesaplar. Kontrolör, kontrol girişi için üç ayrı sabit parametreyi ayarlayarak hesaplanan bu hata değerini en aza indirmeye çalışır. Kontrol sistemlerinde uygun bir kontrol sağlamak için bu sabit parametreler birlikte kullanılabileceği gibi sadece bir veya ikisi de kullanılabilir. Bu durumda PID kontrolör, uygulanan parametrelerin varlığına göre P, I, PI ve PD olarak tanımlanmaktadır (Kavyashree ve ark, 2020). PID lineer bir kontrolör olduğu için doğrusal sistemlerde oldukça başarılı bir performans göstermektedir. Kontrolörün performansını etkileyen en önemli faktör dinamik sisteme ait matematik modelin belirlenmesidir. Sisteme ait matematik model ne kadar doğruysa klasik PID kontrolörün performansı da o kadar yüksek olmaktadır. PID kontrolörün genel blok diyagramı Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. PID kontrolöre ait genel blok diyagramı.

PID kontrolör genel blok şemasında gösterilen $r(t)$ (reference), ayar noktası veya istenen konum, $y(t)$ (output) ise süre değişkeni veya ölçülen konum gibi isimler almaktadır. Standart PID kontrolörünün genel matematiksel ifadesi,

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.17)$$

şeklindedir. Bu denklemde, K_p orantılı kazanç, K_i integral kazanç ve K_d türevsel kazançtır. $e(t)$ şu andaki hatayı, t entegrasyon değişkenini ve $u(t)$ kontrol büyüklüğünü ifade etmektedir. Bu kontrolörde K_p , K_i ve K_d ayarlanabilir sabit parametrelerdir.

4.3.1.2. Kayan kipli kontrolör (SMC)

Kayan kipli kontrolör doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerde kullanılan nonlinear bir kontrolördür. Herhangi bir kontrol probleminin formülasyonunda gerçek sistem ile kontrolör tasarımı için kullanılan matematiksel model arasında her zaman bir miktar tutarsızlık vardır. Gerçek sistemde modellenemeyen dinamik parametreler, sıcaklık, basınç ve titreşim gibi bozucu girişler ile belirsizlikler mevcuttur. Bir kontrol mühendisinin bu belirsizlikler içerisinde kontrol sistemine hedeflenen performansı sağlayan kontrolörler tasarlaması oldukça zahmetli bir süreçtir. Bütün bunlar, dayanıklı kontrol yöntemlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. PID gibi klasik doğrusal kontrolörler bozucu girişlere ve belirsizliklere karşı tatminkâr sonuçlar veremeyebilir. Bu sebeple, sistem cevabı üzerinde bozucu etkilere karşı dayanıklı bir kontrolcü olan kayan kipli kontrol tekniği tercih edilmektedir (Köse ve Abacı, 2010).

Kayan kipli kontrolör tasarımında iki temel aşama vardır. Bunlar kayma ve erişme evreleridir. Bu kontrolör, sistem çıkışını kayma yüzeyi olarak adlandırılan bir yüzey boyunca istenen referans sinyale getirip, bu sinyal üzerinde anahtarlama yaparak sistem çıkışının istenen değerde tutulmasını sağlar. Kayan kipli kontrolör tasarımında öncelikle kayma fonksiyonu seçilir (Özbulur, 2017). Kayma fonksiyonu,

$$S = \{x: \sigma(x, t) = 0\} \quad (4.18)$$

şeklinde ifade edilsin. Burada x durum değişkeni ve t zamandır. Sistemin kararlı bir çözümünün elde edilmesi yani $\sigma(x, t) = 0$ olması durum değişkenlerinin bu kayma yüzeyi üzerinde kalmasına bağlıdır. Yapısal sisteme ait kayma yüzeyi denklemi şu şekilde seçilebilir.

$$\sigma = \alpha e(t) + \beta \dot{e}(t) \quad (4.19)$$

Bu denklemde $e(t)$ sistem hatasını α ve β ise kayma yüzeyinin eğimini gösteren sabit katsayıları değerleri temsil etmektedir. Kayma yüzeyi denklem 4.20’de gösterilen şekilde de seçilebilir.

$$\sigma = \varphi(t) - \phi(x) \quad (4.20)$$

Bu denklemde $\varphi(t)$ ve $\phi(x)$ sırasıyla kayma fonksiyonunun zamanla ve durum değişkeni ile değişen bileşenlerini göstermektedir. Kontrol edilen sistemin kararlılığını sağlamak için öncelikle bir aday Lyapunov fonksiyonu (v) seçilir. Seçilen pozitif değerli aday Lyapunov fonksiyonu,

$$v = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma > 0 \quad (4.21)$$

şeklinde ise sistem kararlılığı için Lyapunov fonksiyonunun türevinin negatif değerli olması gerekir (Soysal, 2014). Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi aşağıdaki şekilde ifade edilirse sistemin kararlılığı sağlanmış olur.

$$\dot{v} = -\sigma^T \mu \text{sign}(\sigma) < 0 \quad (4.22)$$

Burada, μ Lyapunov kararlılığından gelen pozitif değeri ifade etmektedir. Denklem 4.21’in türevi alınıp denklem 4.22’ye eşitlenirse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$-\sigma^T \mu \text{sign}(\sigma) = \sigma^T \dot{\sigma} \quad (4.23)$$

Sistem denklemini kullanarak kayma fonksiyonunun türevi şu şekilde ifade edilir.

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} - \frac{d\phi}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} - G(Ax(t) + Bu(t)) \quad (4.24)$$

Denklem 4.24 alınıp, denklem 4.23’de yerine konulursa, sistemin kontrol girişi elde edilir.

$$u(t) = u_{eq}(t) + (GB)^{-1}\mu sign(\sigma) \quad (4.25)$$

Kontrolör katsayılarını içeren vektör $G = [\alpha \ \beta]$ şeklinde gösterilmektedir. Denklem 4.25’deki $u_{eq}(t)$ ifadesi kontrol kuvvetinin bir önceki zaman adımındaki değerini göstermektedir ve denklem 4.26 ile ifade edilmiştir.

$$u_{eq}(t) = (GB)^{-1} \left(\frac{d\varphi}{dt} - GAx(t) \right) \quad (4.26)$$

Denklem 4.26 alınıp, denklem 4.24’de yerine yazılırsa kayma fonksiyonunun türevi şu şekilde elde edilir.

$$\frac{d\sigma}{dt} = GB(u_{eq} - u) \quad (4.27)$$

Eşdeğer kontrol kuvveti, denklem 4.27 kullanılarak denklem 4.28’deki gibi ifade edilebilir.

$$u_{eq}(t) = u(t) + (GB)^{-1} \frac{d\sigma}{dt} \quad (4.28)$$

Denklem 4.28’de verilen $u(t)$ kısa sürede çok fazla değişmez. Bu nedenle $u(t)$ yerine $u(t - \Delta t)$ kullanılabilir. Δt örnekleme zamanıdır. Böylece eşdeğer kontrol kuvveti denklemi şu şekilde yeniden yazılabilir.

$$u_{eq}(t) = u(t - \Delta t) + (GB)^{-1} \frac{d\sigma}{dt} \quad (4.29)$$

Denklem 4.29 alınıp, denklem 4.25’de yerine koyulup tekrar düzenlenirse kontrolörün son hali elde edilir.

$$u(t) = u(t - \Delta t) + (GB)^{-1} \left(\mu sign(\sigma) + \frac{d\sigma}{dt} \right) \quad (4.30)$$

Bu kontrolörde ayarlanabilir parametreler α, β, λ ve μ katsayılarıdır.

4.3.1.3. Enerji tabanlı kontrolör (EBC)

Enerji tabanlı kontrolör, dinamik sistemlerin hareket halinde sahip oldukları kinetik enerjileri esas alınarak enerji optimizasyonuna bağlı olarak tasarlanan kontrolcüdür. Dinamik sisteme ait toplam kinetik enerji,

$$E_{top} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} m_i V_i(t)^2 \right) \quad (4.31)$$

denklemleriyle hesaplanmaktadır. Bu denklemde, E_{top} toplam kinetik enerjiyi, m_i ilgili katın kütlesini, V_i ilgili katın hızını ve t zamanı ifade etmektedir. Bu kontrolörde hedef $E_{top} = 0$ denklemini sağlamak yani sistemin toplam hareket enerjisini sıfıra çekmektir. Buradan hareketle istenen kontrol kuvveti aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$u(t) = K E_{top} \quad (4.32)$$

Burada, $u(t)$ kontrol kuvvetini ve K kontrolcü katsayısını ifade etmektedir. Bu kontrolörde ayarlanabilir parametre K olmaktadır.

4.3.2. Akım kontrolü

Yarı aktif titreşim kontrolünün ikinci aşamasını oluşturan akım kontrolünün amacı kontrolörden gelen kuvvet verisine göre MR dampere beslenen akım değerini hesaplamaktır. Bu değeri hesaplamak için ters MR damperin yapay sinir ağı modeli kullanılmıştır. Yapay sinir ağı modelinde MR damperin hızı ve yer değiştirmesi kuvvete karşılık gelen akımın belirlenmesi için kullanılan parametrelerdir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Ters MR damperin yapay sinir ağ gösterimi.

Şekil 4.3’de gösterildiği gibi MR damperin ters modelini temsil eden yapay sinir ağının giriş verileri üç farklı kontrolörle elde edilen referans kontrol kuvveti, damper pistonunun yer değiştirmesi ve hızıdır. Sistem çıkışı ise dampere geri beslenen akım

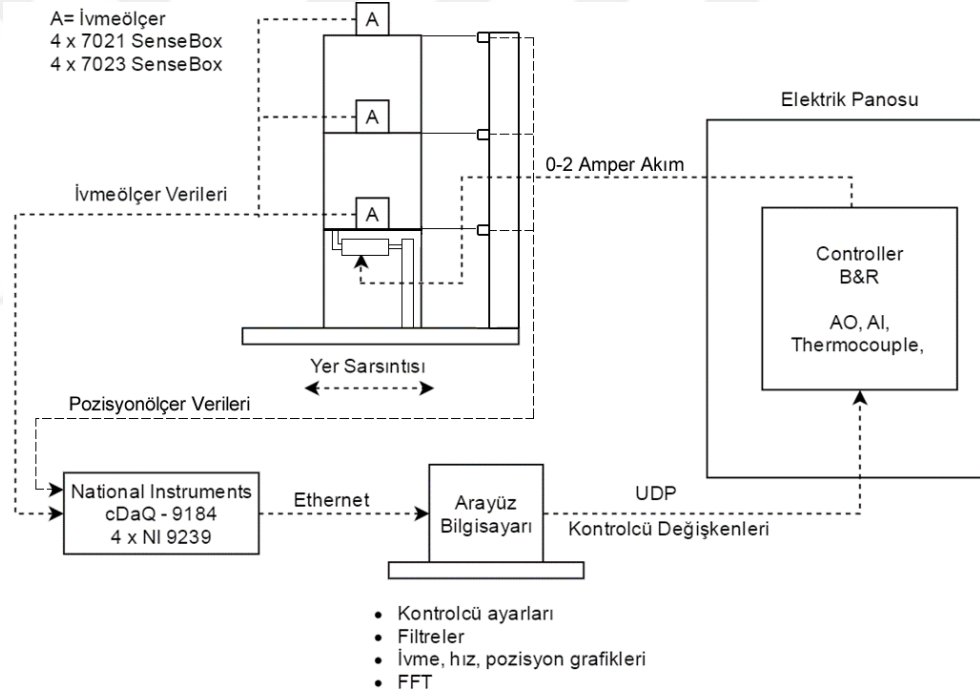
değeridir. Bu akım değerinin belirlenmesi için kullanılan yapay sinir ağı modelinde 3 adet gizli katman, 10 adet giriş nöronu ve 10'ar adet gizli katman nöronu kullanılmıştır. Önerilen modelde nöronlar arasındaki sinaptik bağlantıların ağırlıklarını ayarlamak için Levenberg-Marquardt eğitim algoritması kullanılmıştır.





5. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tasarlanan bina modelleri üzerinde gerçekleştirilen MR damper ile yarı aktif kontrol uygulamalarının deneysel kısmı anlatılacaktır. Deneysel çalışma için kullanılan bina modelleri seçilen deprem ivmeleri etkisi altında sarsma tablası kullanılarak test edilmiştir. MR damperin uygulayacağı sönümleme kuvveti üç farklı kontrol algoritmasıyla hesaplanmış ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmayı oluşturan tüm donanım ve çevrel elemanlar blok diyagram halinde Şekil 5.1’de sunulmuştur. Deneysel çalışmanın detayları alt bölümlerde anlatılacaktır.



Şekil 5.1. Deney düzeneğinin genel blok diyagramı.

5.1. Bina Modellerinin Tasarım ve Üretim Süreci

Bu çalışma kapsamında testlerde kullanılmak üzere 5-8 katlı dört adet çelik bina modeli üretilmiştir. Literatür çalışmaları genellikle bu tip küçük ölçekli test modelleri üzerine yoğunlaşmıştır. Deneysel çalışmada öncelikle beş katlı bina modelinin tasarımı yapılmış ve tasarımda şu hususlara dikkat edilmiştir.

- Bina modelinin doğal frekanslarının Türkiye yapı stoğunu temsil eden gerçek yapı doğal frekanslarına yakın bir değerde olması.
- Bina modelinin ağırlığı ve boyutlarının sarsma tablası boyut ve taşıma kapasitesine uygun olarak seçilmesi.
- Bina modeline uygulanacak deprem ivmesi yönü dikkate alınarak diğer yönlerdeki yapısal hareketlerin kısıtlanması.
- Bina modelini oluşturan kolonların döşemelere göre çok daha esnek seçilerek rijit diyafram davranışının temsil edilmesi.
- Bina modelinin uygulanan deprem ivmesi etkisi altında lineer davranış göstermesi.
- Bina modelinde MR damperin tasarım sınırlamalarının da dikkate alınması.

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan beş katlı bina modeli tasarlanırken gerçek bir betonarme yapının dinamik özellikleri referans alınmıştır (Bayraktar ve ark, 2009). İnşa aşamasındaki referans alınan betonarme bina zemin ve dört normal kattan oluşmaktadır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Beş katlı betonarme binanın ölçüm alınan karkas durumu.

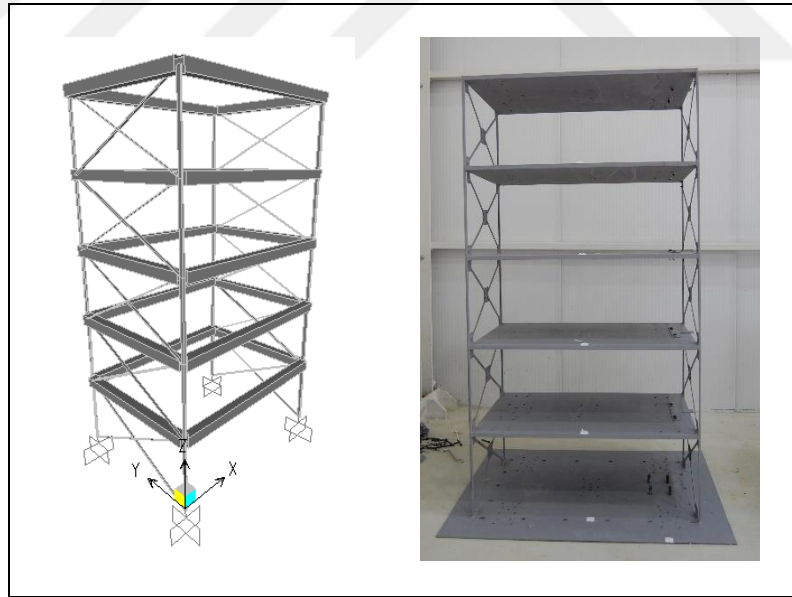
Araştırmacılar bu binadan deneysel olarak ölçümler almış ve yapıya ait doğal frekansları operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlemiştir. Yapının başlangıçta oluşturulan analitik modeli deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve analitik modelin yapı davranışını tam olarak yansıtamadığı belirlenmiştir. Bu sebeple analitik

model sonlu eleman güncelleme yöntemi kullanılarak revize edilmiş ve sonuçların deneysel yöntemle elde edilen değerlere yakınsaması sağlanmıştır. Bahsi geçen bu betonarme binanın analitik, deneysel ve güncellenmiş doğal frekans değerleri Tablo 5.1’de özetlenmiştir.

Tablo 5.1. Betonarme binanın analitik ve deneysel frekans değerleri.

Frekans Değerleri (Hz)			
Mod No	Analitik	Deneysel	Güncellenmiş
1	1.80	1.71	1.69
2	2.56	1.95	2.04
3	3.39	3.18	2.83
4	5.28	5.64	5.24

Bu tez çalışmasında kullanılan beş katlı çelik binanın analitik modeli Tablo 5.1’de verilen güncellenmiş doğal frekans değerleri referans alınarak oluşturulmuştur. Yukarıda belirtilen tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak oluşturulan analitik model ve imal edilen bina modeli Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Yapısal sistemin imalat modeli (sol) üretim modeli (sağ).

Bina modelinin boyutları x-yönünde 800 mm, y-yönünde 600 mm ve kat yüksekliği 300 mm olarak belirlenmiştir. Bina modelinin her bir katı 15 mm kalınlığındaki çelik

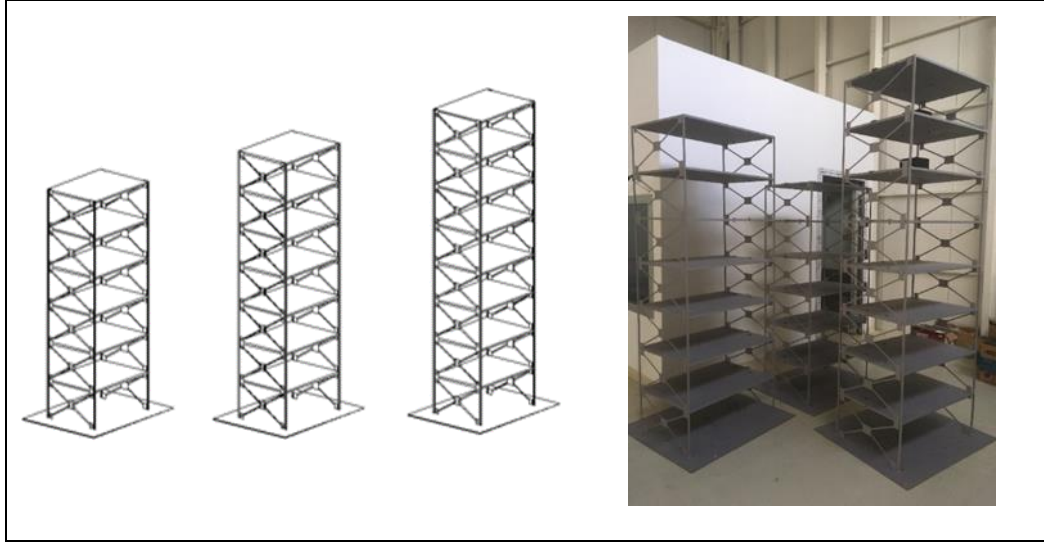
levhaların kolonlara kaynaklanması ile oluşturulmuştur. Kat döşeme levhaları St37 çeliği ve kolonları temsil eden levhalar ise 750 MPa akma dayanımına sahip yüksek mukavemetli çelikten imal edilmiştir. Bu kolonların her biri 6 mm kalınlık ve 15 mm genişliktedir. Yapısal sistemde yanal rijitlik dört adet kolon tarafından sağlanmış olup kolon kesitleri yükseklik boyunca sabit tutulmuştur. Her katta döşeme ağırlık merkezine 13.2 kg ağırlık ilave ağırlık yerleştirilmiştir. Deprem ivmeleri bina modeline tek yönlü (x-yönü) etki ettirileceği için diğer yöndeki hareket düşey çapraz elemanlarla engellenmiştir. Bina modelinin zemine bağlantısı bulonlar ile sağlanmıştır. Tasarımı yapılan beş katlı bina modelinin analitik olarak elde edilen doğal frekans değerleri ile gerçek betonarme yapının frekans değerleri Tablo 5.2’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.2. Bina modeli ve gerçek yapının doğal frekans değerleri.

Mod No	Mod şekli	Frekans Değerleri (Hz)	
		Çelik bina modeli	Betonarme yapı
1	x yönü	1.67	1.69
2	burulma	3.66	2.04
3	y yönü	4.14	2.83
4	x yönü	4.88	5.24

Deneyssel çalışmada uygulanacak olan deprem kuvvetleri bina modellerine tek yönlü (x yönü) olarak etki ettirileceği için betonarme yapı ile çelik bina modelinin 1 ve 4. modlarının uyumu dikkate alınmıştır. Beş katlı çelik bina modelinin doğal frekansları ile mod şekillerinin analitik ve deneyssel yöntemler kullanılarak belirlenmesi ayrıca elde edilen dinamik parametrelerin de güncellenmesi Bölüm 6’da detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

Deneyssel çalışmalarda kullanılan diğer bina modelleri (6,7 ve 8 katlı) oluşturulurken tasarımı yapılan beş katlı çelik modelin geometri ve malzeme özellikleri esas alınmış olup sadece kat sayısı arttırılmıştır. Deneyssel çalışmalarda kullanılan diğer çelik binaların imalat ve üretim modelleri Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



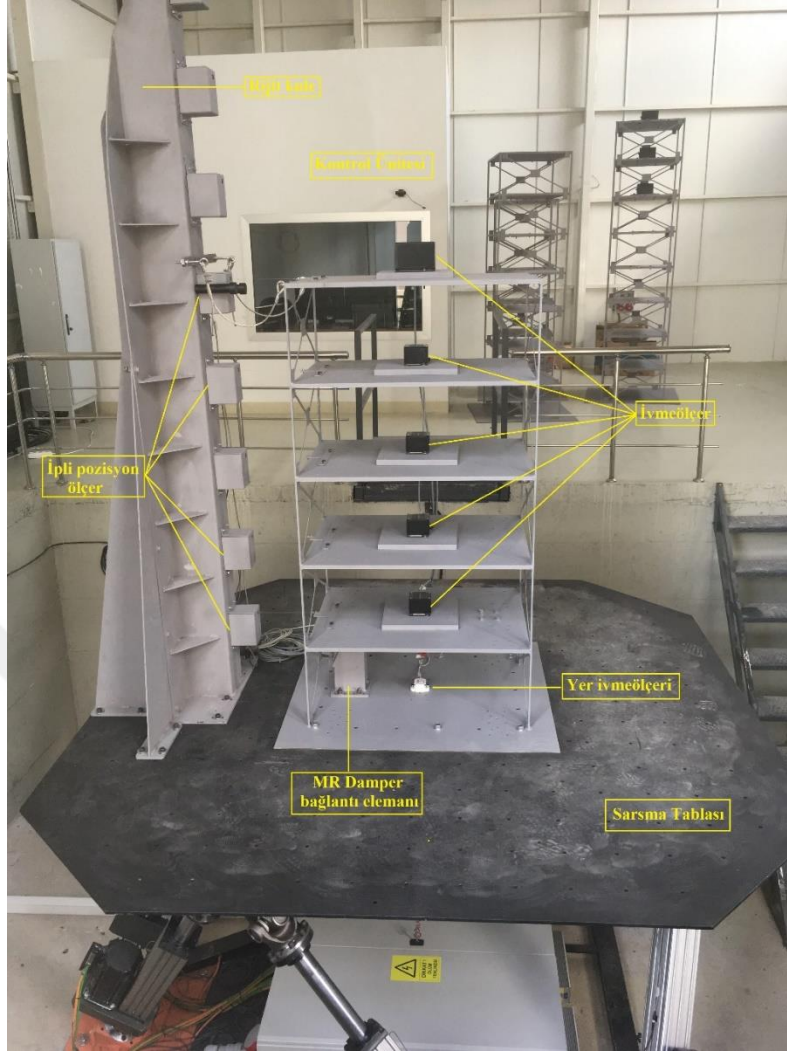
Şekil 5.4. Bina modelleri perspektif görüşler (sol) imalat modelleri (sağ).

5.2. Deney Düzeneği

Fiziksel donanım ve gerçek zamanlı kontrol gereksinimlerini karşılayan yarı-aktif bir kontrol sisteminin yapısal performans üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla Sakarya Üniversitesi Deprem Laboratuvarında sarsma tablası deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen testlerde kullanılan deney düzeneği çelik bina modeli, sarsma tablası, sensörler ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır (Şekil 5.5). Deneyisel çalışmalarda bina modellerini harekete geçirecek olan kuvvet SANLAB SMotion 3000 modelindeki sarsma tablası ile üretilmiştir. Kullanılan sarsma tablası 2.5 x 2.5 m ebatlarında, 30 kN yük taşıma kapasiteli ve 6 eksenle hareket etme kabiliyetine sahiptir (Tablo 5.3).

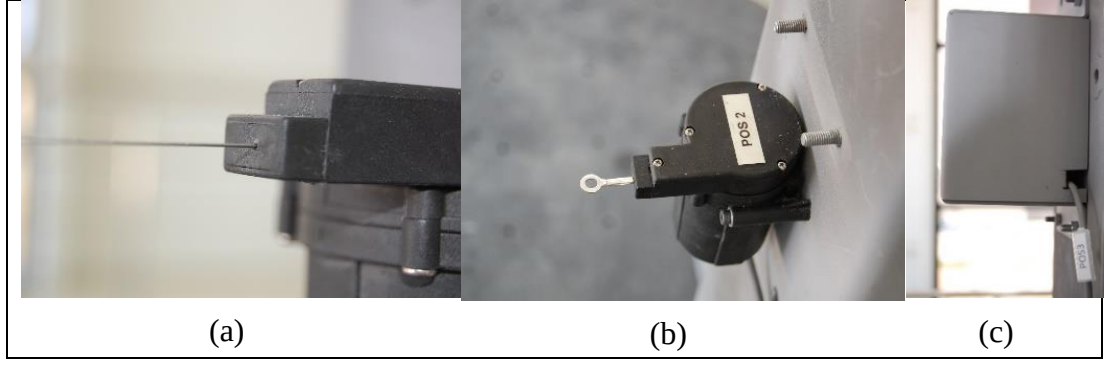
Tablo 5.3. Sarsma tablası hareket sınırları.

	Pozisyon / Dönme	Hız / Açısal Hız	İvme / Açısal İvme
İleri / Geri (Surge)	$\pm 0,34$ m	$\pm 0,7$ m/s	± 6 m/s ²
Yukarı / Aşağı (Sway)	$\pm 0,33$ m	$\pm 0,7$ m/s	± 6 m/s ²
Sağ / Sol (Heave)	$\pm 0,34$ m	$\pm 0,55$ m/s	± 8 m/s ²
Yatma (Roll)	$\pm 18^\circ$	$\pm 33^\circ/\text{s}$	$\pm 220^\circ/\text{s}^2$
Yunuslama (Pitch)	$\pm 18^\circ$	$\pm 34^\circ/\text{s}$	$\pm 220^\circ/\text{s}^2$
Dönme (Yaw)	$\pm 24^\circ$	$\pm 33^\circ/\text{s}$	$\pm 300^\circ/\text{s}^2$



Şekil 5.5. Bina modeli ve deney düzeneği.

Deney düzeneğinde görüldüğü gibi fiziksel model sarsma tablasına tavan vinci yardımıyla yerleştirilmiş ve sarsma tablası üzerinde yer alan taban plakasına bulonlar vasıtasıyla sabitlenmiştir. Çalışmada kat yer değiştirme verilerini ölçmek için 4 adet UniMeasure marka ipli pozisyon ölçer kullanılmıştır. Pozisyon ölçerlerin sabit ölçüm alabilmesi için sarsma tablası üzerine rijit bir kule tasarlanmıştır. İpli pozisyon ölçerin bir ucu rijit kule üzerindeki koruma kutusu içerisine kenetlenirken diğer ucu bina modeli kat seviyelerine yerleştirilen demir halkalara bağlanmıştır. Pozisyon ölçerler bina modellerine simetrik olarak yerleştirilmiş, sensör bulunmayan katlardaki yer değiştirmeler diğer katlardan alınan ölçümlerin interpolasyonu ile sayısal olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan ipli pozisyon ölçer ve detayları Şekil 5.6’da gösterilmiştir.

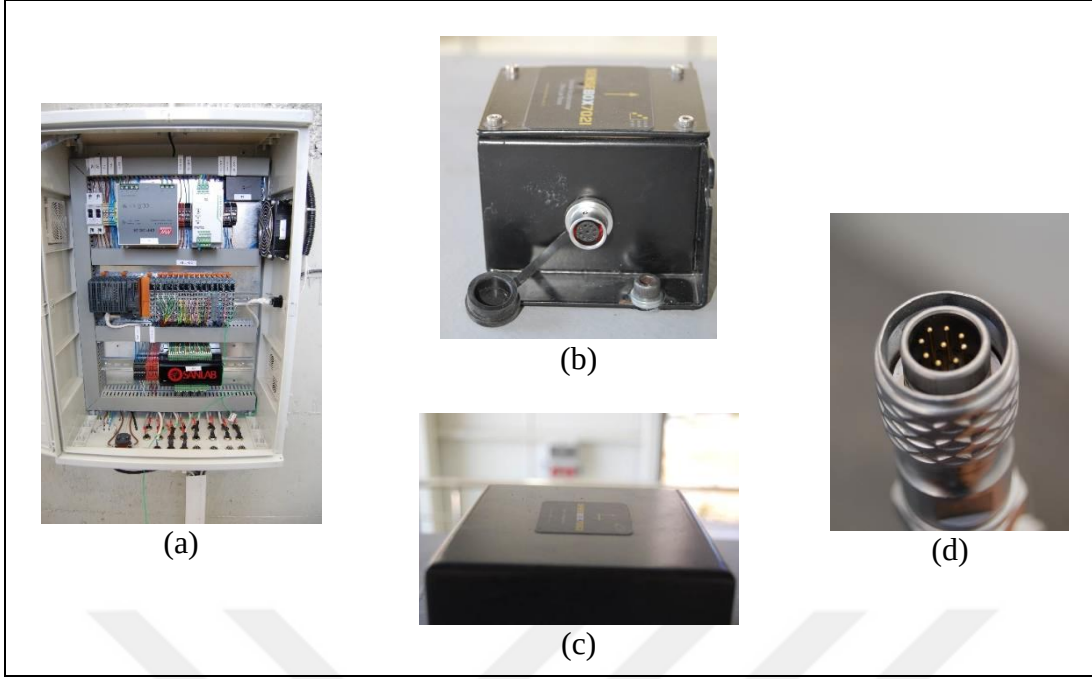


Şekil 5.6. İpli pozisyon ölçer detayları (a) ipli pozisyon ölçer (b) rijit kuleye bağlantı detayı (c) koruma kutusu.

Kat ivme verilerinin ölçülebilmesi için 4 adet SenseBox 7021 tek eksenli ve 4 adet SenseBox 7023 üç eksenli olmak üzere iki çeşit ivmeölçer kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler her kat döşemesinin orta noktasına hareket eksenini doğrultusunda bağlanmıştır. Tek eksenli ivmeölçerler bina modellerinin ilk dört katına üç eksenli ivmeölçerler ise diğer katlara yerleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ivmeölçerlere ait genel özellikler Tablo 5.4’de gösterilmiştir. İvmeölçerlerden veri almak için NI marka cDAQ-9184 şase ve 9239 voltaj giriş modülü kullanılmıştır (Şekil 5.7).

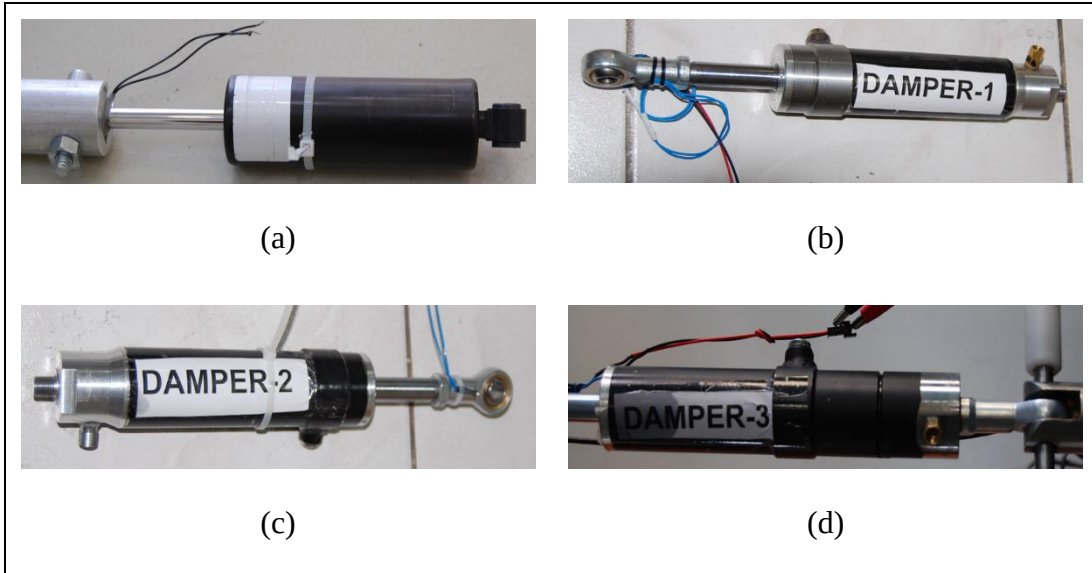
Tablo 5.4. İvmeölçerlere ait genel özellikler.

	SenseBox 7021	SenseBox 7023
Eksen Sayısı	1	3
İvme Ölçüm Aralığı	$\pm 2g$	
Çıkış Gürültüsü	130 ng/vHz	
Çıkış Oranı	2400 mV/g	
Besleme Voltajı	12 V DC	
Çalışma Sıcaklığı	$-40^{\circ}\text{C} / +65^{\circ}\text{C}$	
Frekans Bandı	0,1-120 Hz	



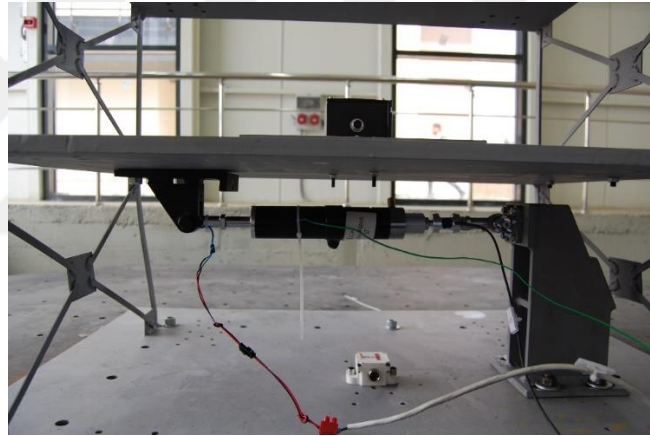
Şekil 5.7. İvme ölçer detayları (a) DAQ şasesi ve DAQ kartları (b) Tek eksenli ivmeölçer (c) Üç eksenli ivmeölçer (d) Veri bağlantı elemanı.

Bina modellerinin deneysel olarak yarı aktif kontrolü için biri ticari ve üç tanesi yerli olmak üzere toplam dört adet MR damper kullanılmıştır (Şekil 5.8). Lord firmasına ait olan ticari MR damper yerli üretilen MR damperlerin performansını kıyaslamak amacıyla bu çalışmada kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Deneysel çalışmada kullanılan MR damper çeşitleri (a) Lord damper (b) damper-1 (c) damper-2 (d) damper-3.

Yerli olarak üretilen MR damperler çift milli ve tek milli olmak üzere iki çeşittir (Kemerli, 2020). Şekil 5.8’de deneysel çalışmada kullanılan MR damper tipleri görülmektedir. Ticari MR damper Lord firmasının RD-8041-1 kodlu damperidir ve çalışma içerisinde Lord damper olarak isimlendirilecektir. Yerli olarak üretilen damperlerden SAU-MRD-TM-Pr1 kodlu olan damper 1 ve SAU-MRD-TM-Pr2 kodlu olan ise damper 2 olarak ifade edilecektir. Bu iki MR damper tek milli olmakla birlikte içlerinde kullanılan MR sıvı değişiklik göstermektedir. Çift milli olarak üretilen SAU-MRD-CM-Pr3 kodlu damper 3 içerisinde ise damper 2’de kullanılan MR sıvı bulunmaktadır. Bina modellerinin sismik performansını arttırmak için kullanılan MR damper zemin ile birinci kat arasına yatay olarak yerleştirilmiştir. Yerleşim esnasında zemin ve birinci kat seviyesine iki adet bağlantı elemanı konulmuştur (Şekil 5.9). MR dampere bağlanan MeSysteme marka KM30z modeli sensör vasıtasıyla üretilen kuvvet ölçülmüştür.



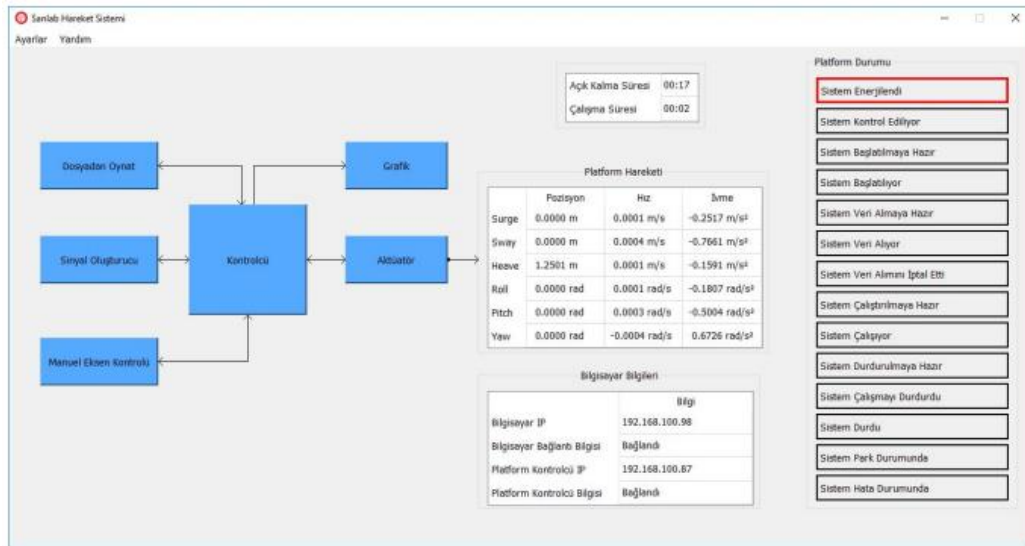
Şekil 5.9. MR damper bağlantı detayı.

Deneysel çalışma seçilen deprem ivme verisinin sarsma tablası kontrolcü ara yüzüne gönderilmesiyle başlamaktadır. Harekete geçen platform üzerindeki bina modelinden ölçülen yapısal tepkiler sensörler vasıtasıyla kaydedilmektedir. Kat yerdeğiştirme verileri ipli pozisyon ölçerlerle, kat ivme verileri ise ivmeölçerler vasıtasıyla kontrolöre gönderilir. Kontrolörün teorik çalışma prensibine göre ilgili veri kullanılarak damperin üretmesi gereken referans kuvvet hesaplanır. Hesaplanan referans kuvvet kontrolcü ara yüzündeki ters MR damper modelinde akıma dönüşerek MR damperi besler. Son olarak MR damper akıma karşılık gelen sönüm kuvvetini bina

modeline uygular. Böylece, bina modelinin istenen kontrol kuvveti doğrultusunda MR damper ile anlık yarı aktif kontrolü gerçek zamanlı olarak milisaniyeler içerisinde gerçekleştirilir.

5.3. Sarsma Tablası Arayüzü

Sarsma tablası arayüzü kontrol ünitesinde yer alan ve hareketli platformun çalıştırılması için oluşturulmuş bir programdır. Bu arayüz SANLAB firması tarafından kontrol ünitesine entegre edilmiştir. Arayüz ana ekranında sistem bilgi tablosu, sistemin kontrolü ve sistemi harekete geçirecek sinyallerin belirlenmesi gibi işlevler görüntülenmektedir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Sarsma tablası kullanıcı arayüzü ana ekranı.

Sarsma tablası kullanıcı arayüzünü oluşturan bölümler aşağıda sıralanmıştır.

- Dosyadan oynatma ekranı
- Sinyal oluşturucu ekran
- Manuel eksen kontrol ekranı
- Kontrolcü ekranı
- Aktüatör ekranı
- Grafik ekranı

Şekil 5.11’de gösterilen dosyadan oynatma ekranı önceden oluşturulmuş ve formatı programa uygun olarak ayarlanmış verilerin sisteme yüklendiği bölümdür. Bu bölümde yüklenen veriler ‘.txt’ uzantılı olarak kaydedilmiş olmalıdır. Veri tipi pozisyon veya ivme olabilir. Pozisyon için ‘pos’, ivme için ‘acc’ terimleri kullanılmalıdır. Veri frekansı [1,2000) aralığında olmalıdır. Dosyanın ilk satırına veri tipi ve frekans, ikinci satırına ise eksen bilgisi yazılmalıdır. Ayrıca bu ekranda bütün eksenler için sistemin pozisyon, hız ve ivme limit değerleri gösterilmektedir. Yüklenen veriler bu limit değerler arasında değilse sistem veriyi limit değerlere ölçeklendirmektedir. Dosya okuma ekranında sistemden gelen bilgilerin gösterildiği bilgi mesajı ve hata mesajı bölümleri de bulunmaktadır. Sistemde oluşacak hata bu ekranda görüntülenerek kontrol bölümündeki buton ile sıfırlanır.

Dosya Ayarları

Referans Tipi: ☐ Poz. [m, deg] ☒ İvme [m/s², deg/s²]

Referans Frekansı: [1, 2000) Hz

Seçili Eksen: Surge ☐ Sway ☐ Heave ☐ Roll ☐ Pitch ☐ Yaw ☐

Limitler

	Poz. [m, deg]	Hız [m/s, deg/s]	İvme [m/s², deg/s²]
Surge	-0.34 / 0.34	± 0.7	± 6
Sway	-0.33 / 0.33	± 0.7	± 6
Heave	-0.3 / 0.28	± 0.55	± 8
Roll	-17.2 / 17.2	± 33	± 220
Pitch	-17.2 / 17.2	± 34	± 220
Yaw	-17.2 / 17.2	± 33	± 300

Platform Durumu

Sistem Bağlılmaya Hazır

Oynatma Zamanı [s]: 7.1

Fren Durumu: Pasif

Güvenlik Durumu: Hata Yok

Bilgi Mesajı

Mesaj: Açılış kontrolleri tamamlandı. Sistem bağlanmaya hazır.

Hata Mesajı

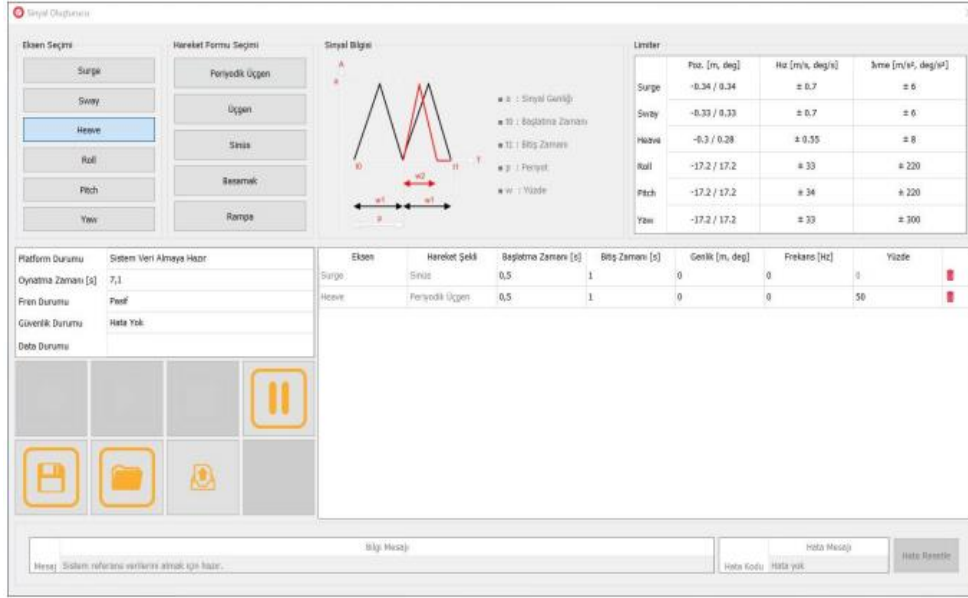
Hata Kodu: Hata yok

Hata Resetle

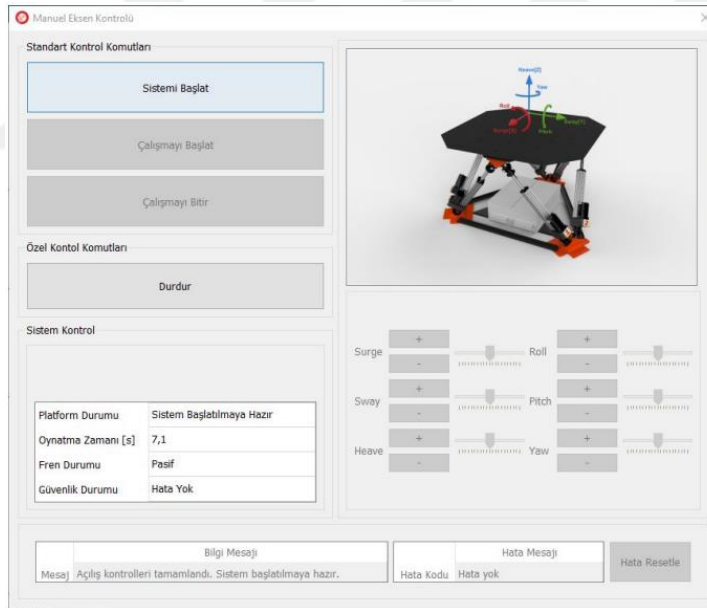
Şekil 5.11. Dosyadan okuma ekranı.

Sinyal oluşturucu ekran bölümünde istenen herhangi bir eksenle önceden tanımlanmış olan sinyal tipleri kullanılarak sistem giriş verisi oluşturulabilir (Şekil 5.12). Eksen seçimi bölümünden sinyalin oluşturulacağı eksen seçimi yapılır. Hareket formu seçimi sekmesinden oluşturulacak sinyalin tipine karar verilir. Eksen ve hareket formu seçimi yapıldıktan sonra oluşturulan sinyal veri tablosuna eklenir. Eklenen veri üzerinde başlangıç ve bitiş zamanı, genlik, frekans ve hareket formunun periyot değerinin yüzdesel oranlandığı kısımlar bulunmaktadır.

Manuel eksen kontrolü ekranında, her eksen için ayrı olarak tanımlanmış butonlarla sarsma tablasını çift yönlü hareket ettirme işlemi gerçekleştirilmektedir (Şekil 5.13).



Şekil 5.12. Sinyal oluşturucu ekran.



Şekil 5.13. Manuel eksen kontrolü.

Kontrolcü, aktüatör ve grafik ekranları bölümleri sistemle ilgili ekranlardır. Kontrolcü ekranında sistemin donanım bilgileri kontrol edilir. Aktüatör ekranında sarsma tablasında bulunan altı adet aktüatörün bilgileri yer almaktadır. Grafik ekranı ise

sarsma tablasının hareket ettiği altı eksene ait verilerin grafik formatında görüntülendiği bölümdür.

5.4. Kontrolcü Arayüzü

Kontrol ünitesinde yer alan kontrolcü arayüzü MR damperin yarı aktif kontrolü için gerekli verilen toplanması ve işlenmesi amacıyla oluşturulmuştur. Kontrolcü arayüzü SANLAB firmasının geliştirmiş olduğu bir yazılımdır. Bu arayüzde MR damperin üreteceği kuvveti belirlemeye yarayan kontrolör katsayıları, ters MR damper modeline ait yapay sinir ağı modeli, deneyler sırasında bina modellerinden elde edilen yer değiştirme, hız ve ivme verileri kaydedilmekte ve değerlendirilmektedir. Kontrolcü arayüzü aşağıdaki beş bölümden oluşmaktadır.

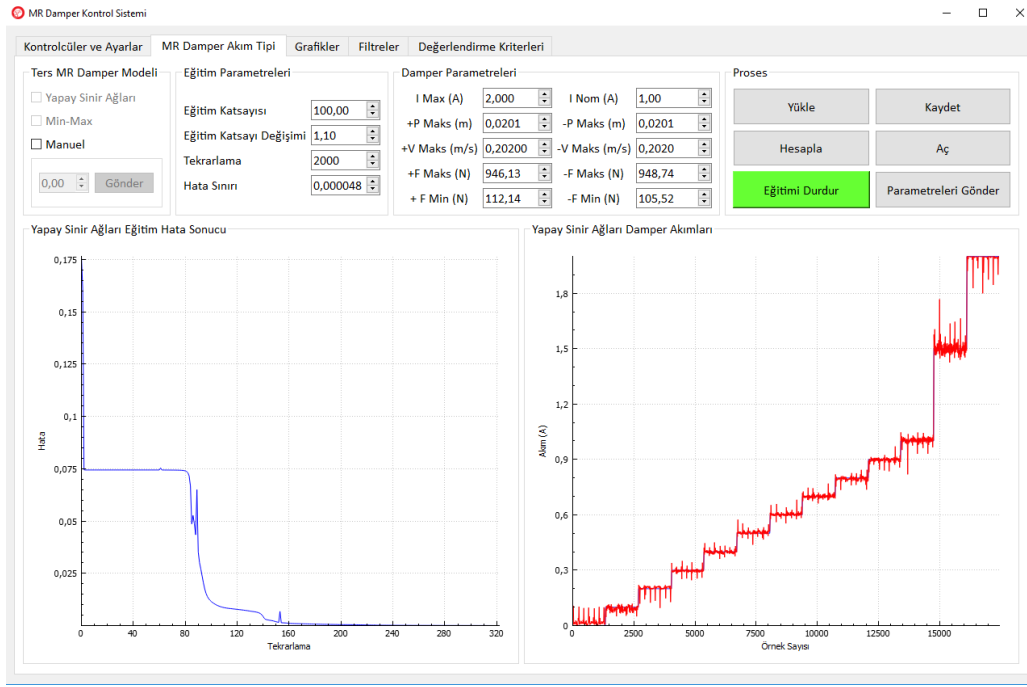
- Kontrolcüler ve ayarlar
- MR damper akım tipi
- Grafikler
- Filtreler
- Değerlendirme kriterleri

The screenshot displays the 'MR Damper Kontrol Sistemi' interface. The top navigation bar includes tabs for 'Kontrolcüler ve Ayarlar', 'MR Damper Akım Tipi', 'Grafikler', 'Filtreler', and 'Değerlendirme Kriterleri'. The 'Kontrolcüler ve Ayarlar' tab is active, showing four main control sections: PID, Kayma Kipli, Enerji Tabanlı, and Model Tabanlı. Each section contains specific control parameters and their values. Below these, there are sections for 'Bina Özellikleri' (Building Characteristics), 'İvme Sensörleri Yerleşimi' (Acceleration Sensor Placement), and 'Grafik Çizimleri' (Graphical Representations). The 'Bina Özellikleri' section includes a table for building data. The 'İvme Sensörleri Yerleşimi' section shows a floor plan with sensor locations. The 'Grafik Çizimleri' section includes checkboxes for data selection and frequency. At the bottom, there are buttons for 'Sistem Ayarları' and 'Parametreleri Gönder'.

Kat	Kütle (kg)	Sönümlerme (N.s/m)	Katlık (N/m)
1. Kat	70	0	0
2. Kat	70	0	0
3. Kat	70	0	0
4. Kat	70	0	0
5. Kat	70	0	0
6. Kat	70	0	0
7. Kat	70	0	0
8. Kat	70	0	0

Şekil 5.14. Kontrolcüler ve ayarlar bölümü.

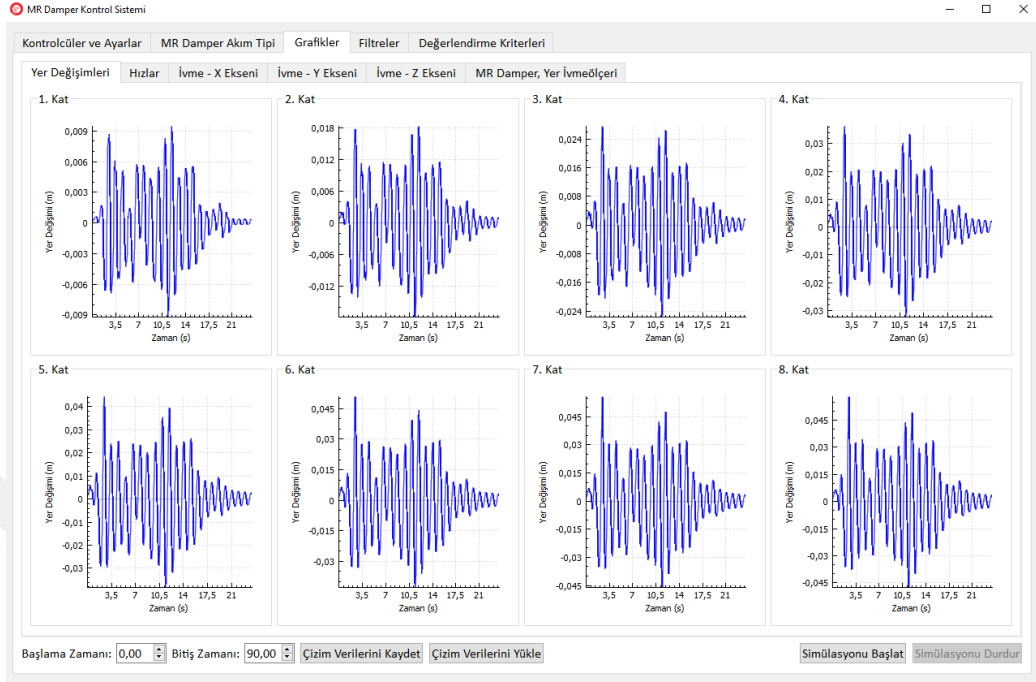
Şekil 5.14’de gösterilen kontrolcüler ve ayarlar bölümünde çalışma kapsamında kullanılan kontrol algoritmaları yer almaktadır. İlgili kontrolöre ait katsayılar bu sekme yardımıyla belirlenmekte ve sisteme gönderilmektedir. MR damperin akım üretmediği (passive-off) durumda kontrolörlere ait hiçbir veri girişi yapılmamaktadır. Bu bölümde yer ivmeölçerlerinin ve kuvvet sensörünün sıfırlanma ayarı bulunmaktadır ve yapısal tepkilerden hangi verilerin kayıt edileceği belirlenebilmektedir. Bu tez kapsamında arayüzde tanımlanan Model tabanlı kontrolcü hariç diğer üç kontrolör kullanılmıştır.



Şekil 5.15. MR damper akım tipi bölümü.

Şekil 5.15’de gösterilen MR damper akım tipi bölümü, ters MR damper yapay sinir ağı modelinin eğitimi için kullanılmaktadır. Soldaki grafik eğitim verisindeki hassasiyeti, sağdaki grafik ise referans akım (mavi renk) ve eğitim sonucunu (kırmızı renk) göstermektedir. Damper eğitim parametreleri bu bölümden ayarlanmaktadır. MR damperin eğitim verilerinde iterasyon sayısının az olması çözümün hassasiyetini azaltırken iterasyon sayısının fazla olması da ciddi hatalara sebep olmaktadır. Bu nedenle eğitimde deneme-yanılma yöntemiyle optimum ayarların yapılması önem teşkil etmektedir. Bu çalışma kapsamında yapay sinir ağının eğitimi için kullanılan

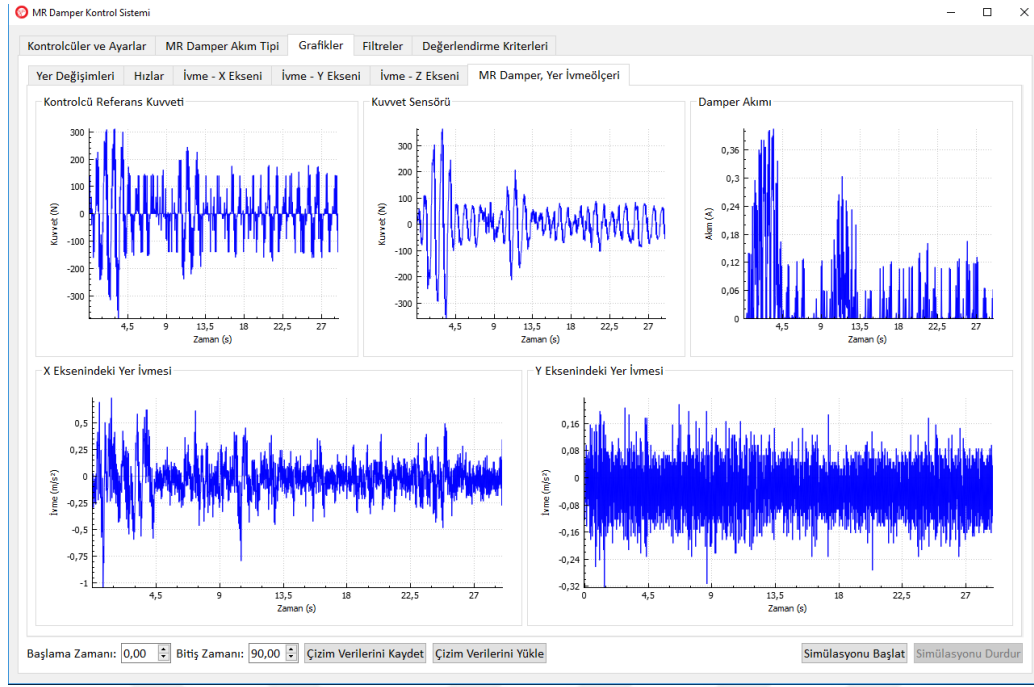
veriler Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği'nde yapılan performans testleriyle elde edilmiş ve arayüze yüklenmiştir (Kemerli, 2020).



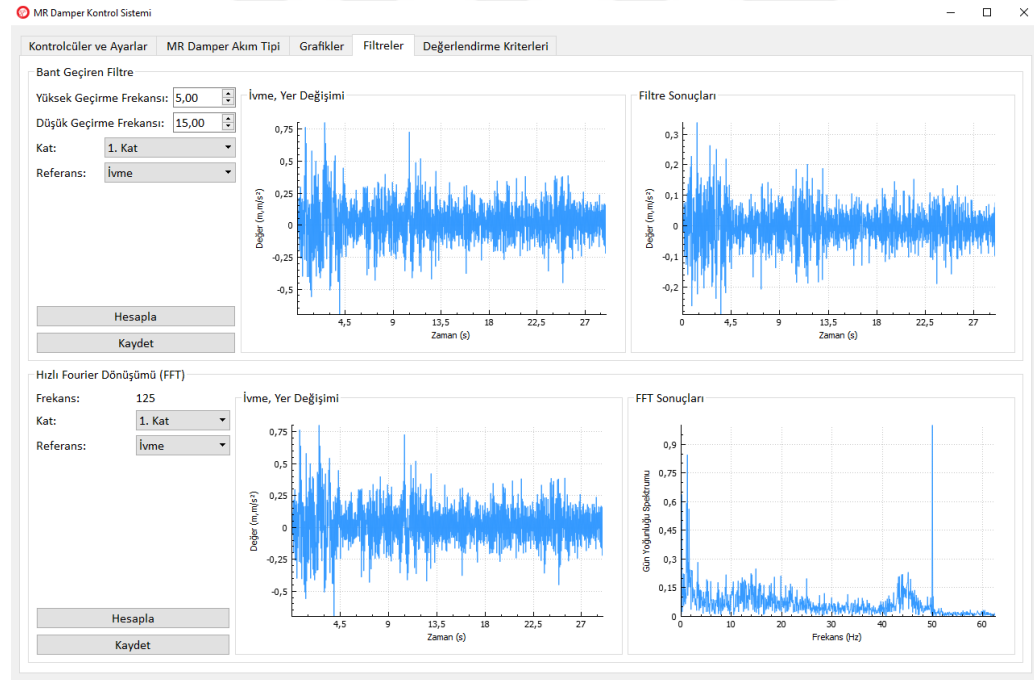
Şekil 5.16. Grafikler bölümü, Yer Değişimleri alt bölümü.

Şekil 5.16'da verilen grafikler bölümünün alt sekmelerinde sensörlerden ölçülen yapısal yer değiştirme ve ivme verileri kaydedilmektedir. Hız verileri pozisyon ölçerden elde edilen değerler kullanılarak anlık olarak işlenmektedir. Pozisyon ölçerlerin bulunmadığı katlarda ölçümler arayüz içerisine eklenen interpolasyon algoritmasıyla hesaplanmaktadır. Başlangıç ve bitiş zamanları ayarlanarak istenen yapısal tepki kaydedilmektedir. Kaydedilen veriler tekrar arayüze eklenebilmekte ve görüntülenebilmektedir.

Şekil 5.17'de gösterilen bölümde kontrolörün hesapladığı referans kuvvet, MR damper üzerine yerleştirilen kuvvet sensöründen alınan veriler ve ters MR damper modeliyle elde edilen akım değerleri grafikler halinde görülmektedir. Ayrıca, yer ivmeölçerlerinin topladığı verilerde bu bölümde gösterilmektedir.



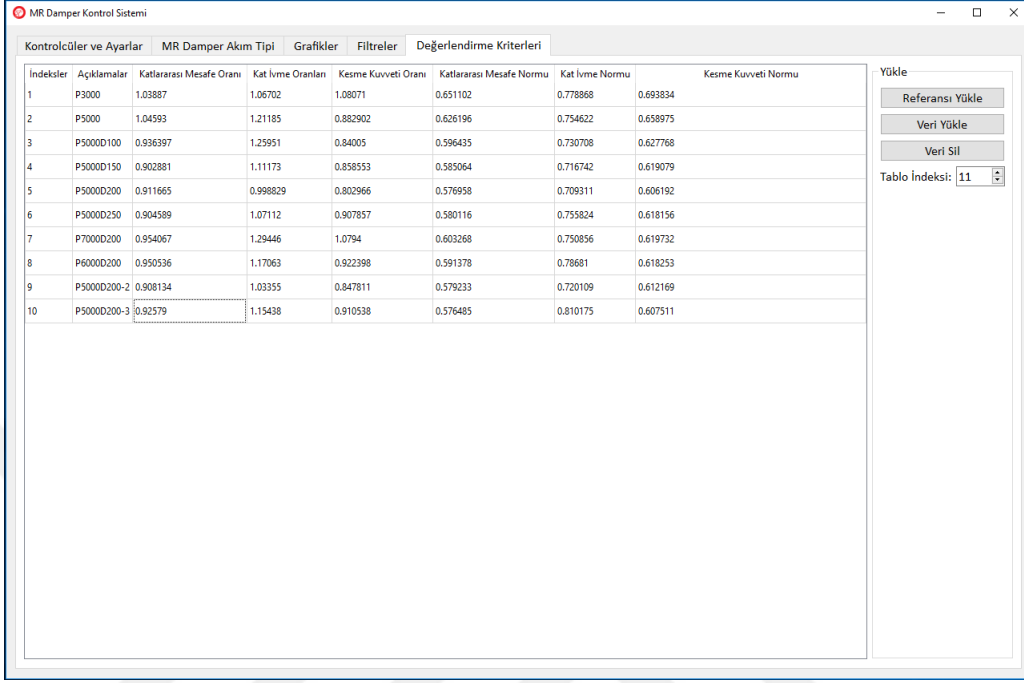
Şekil 5.17. Grafikler bölümü, MR Damper-Yer ivmeölçerleri alt bölümü.



Şekil 5.18. Filtreler bölümü.

Arayüzdeki filtreler bölümü Şekil 5.18’de görülmektedir. Bu bölümde seçilen yer değiştirme, hız ve ivme verileri istenen frekans aralığında filtrelenebilmekte ve verilerin Hızlı Fourier Dönüşümü yapılabilmektedir. Filtreleme için Bant Geçiren

Filtre modülü, yüksek geçiren (High Pass), düşük geçiren (Low Pass) ve bant geçiren (Band Pass) filtre seçeneklerini sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında anlık gerçek zamanlı kontrol yapıldığı için filtreleme modülü kullanılmamıştır.



İndeksler	Açıklamalar	Katlararası Mesafe Oranı	Kat İvmesi Oranları	Kesme Kuvveti Oranı	Katlararası Mesafe Normu	Kat İvmesi Normu	Kesme Kuvveti Normu
1	P3000	1.03887	1.06702	1.08071	0.651102	0.778868	0.693834
2	P5000	1.04593	1.21185	0.882902	0.626196	0.754622	0.658975
3	P5000D100	0.936397	1.25951	0.84005	0.596435	0.730708	0.627768
4	P5000D150	0.902881	1.11173	0.858553	0.585064	0.716742	0.619079
5	P5000D200	0.911665	0.99829	0.802966	0.576958	0.709311	0.606192
6	P5000D250	0.904589	1.07112	0.907857	0.580116	0.755824	0.618156
7	P7000D200	0.954067	1.29446	1.0794	0.603268	0.750856	0.619732
8	P6000D200	0.950536	1.17063	0.922398	0.591378	0.78681	0.618253
9	P5000D200-2	0.908134	1.03355	0.847811	0.579233	0.720109	0.612169
10	P5000D200-3	0.92579	1.15438	0.910538	0.576485	0.810175	0.607511

Şekil 5.19. Değerlendirme kriterleri bölümü.

Şekil 5.19’da sunulan değerlendirme kriterleri bölümü detaylı olarak alt bölüm 5.5’de anlatılacaktır. Kısaca bu bölümde, referans alınan kontrolsüz durumdaki yapısal tepkiler kontrollü durumla kıyaslanmakta ve literatürden seçilen altı performans kriterine göre değerlendirilmektedir.

5.5. Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi

Yapıların yarı aktif, aktif ve pasif kontrolü ile ilgili literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda araştırmacılar kullandıkları yöntemlerin performansını değerlendirmek amacıyla çeşitli sönümleyici tipleri, farklı yapı türleri ve karşılaştırma indeksleri kullanmışlardır. Yapısal kontrol bir bütün olarak değerlendirildiğinde çok sayıda spesifik çalışma olduğu görülmektedir. Bugün halen yapılan bu çalışmalarda kullanılan kontrol algoritmaları ve sönümleyicilerin yapısal performans üzerindeki etkilerini karşılaştırmak için ortak bir zemin mevcut değildir. Bu sebeple yapısal

kontrol alanında yapılan çalışmaları birbirleriyle kıyaslamak amacıyla literatürde çeşitli karşılaştırma indeksleri tanımlanmıştır.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kontrol algoritmalarının ve MR damperin performans ölçütü literatürde kabul gören değerlendirme kriterlerine göre yapılmıştır (Ohtori ve ark, 2004). İlgili referanstaki ilk altı değerlendirme indeksi bu tez çalışması kapsamında kullanılmıştır. Bu değerlendirme ölçütlerinden ilk üçü (J_1 , J_2 , J_3) sırasıyla maksimum görel kat ötelemesi oranını, maksimum ivmeyi ve maksimum taban kesme kuvvetini ifade etmektedir. $i = 1, 2, \dots, n$ bina modellerindeki kat sayısını göstermek üzere, maksimum görel kat ötelemesi oranını ifade eden performans indeksi (J_1) aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$J_1 = \max \left[\frac{\max_{t,i} \frac{|d_i(t)|}{h_i}}{\delta^{max}} \right] \quad (5.1)$$

Burada, $d_i(t)$ i. katın görel kat ötelemesini, h_i i. katın yüksekliğini ve $\delta^{max} \equiv \max_{t,i} |d_i(t)/h_i|$ ise kontrolsüz durumdaki maksimum görel kat ötelemesi oranını göstermektedir.

$$J_2 = \max \left[\frac{\max_{t,i} |\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_a^{max}} \right] \quad (5.2)$$

Denklem 5.2’de maksimum ivme değerini gösteren performans indeksi (J_2) tanımlanmıştır. Bu denklemde, $\ddot{x}_{ai}(t)$ ve $\ddot{x}_a^{max}$ sırasıyla i. katın kontrollü ve kontrolsüz durumdaki mutlak ivme değerlerini göstermektedir. Maksimum taban kesme kuvvetine karşılık gelen performans indeksi (J_3) ise denklem 5.3’de ifade edilmiştir.

$$J_3 = \left[\frac{\max |k_1 \cdot x_1(t)|}{|F_b^{max}|} \right] \quad (5.3)$$

Burada, k_1 zemin kat rijitliğini, $x_1(t)$ zemin katın görel kat yer değiştirmesini, F_b^{max} ise kontrolsüz durumdaki maksimum taban kesme kuvvetini göstermektedir. Diğer üç

performans kriteri (J_4, J_5, J_6) yapısal tepkilerin normlu değerlerini esas almaktadır. Göreli kat ötelemesi oranı (J_4), ivme (J_5) ve taban kesme kuvvetinin (J_6) normlu değerleri aşağıdaki eşitliklerde ifade edilmiştir.

$$J_4 = \max \left[\frac{\max_i \frac{\|d_i(t)\|}{h_i}}{\|\delta^{max}\|} \right] \quad (5.4)$$

$$J_5 = \max \left[\frac{\max_i \|\ddot{x}_{ai}(t)\|}{\|\ddot{x}_a^{max}\|} \right] \quad (5.5)$$

$$J_6 = \left[\frac{\|max |k_1 \cdot x_1(t)|\|}{\|F_b^{max}\|} \right] \quad (5.6)$$

Norm değeri, ilgili yapısal büyüklüğün belirlenen bir zaman aralığı içerisinde kayıt edilen değerlerinin kareleri toplamının karekökünü ifade etmektedir. $\|\cdot\|$ sembolüyle gösterilmekte ve denklem 5.7 ile hesaplanmaktadır.

$$\|\cdot\| \equiv \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [\cdot]^2 dt} \quad (5.7)$$

Burada, t_f yapısal tepkinin sönümlenmesi için yeterli zaman miktarını göstermektedir. Bu çalışmada t_f kullanılan deprem ivmelerinin etki süresi kadar alınmıştır. Normlu yapısal tepkiler, $\|\delta^{max}\| \equiv \max_i \|d_i(t)/h_i\|$, $\|\ddot{x}_a^{max}\|$ ve $\|F_b^{max}\|$ sırasıyla kontrolsüz durumdaki maksimum göreli kat ötelemesi oranını, ivmeyi ve taban kesme kuvvetini göstermektedir. Deneysel çalışmalar esnasında bina modellerinden ölçülen kontrolsüz ve kontrollü tepkiler birbiriyle kıyaslanmış ve performans değerlendirmesi yukarıda anlatılan değerlendirme kriterlerine göre yapılmıştır.

5.6. Deney Tasarımı

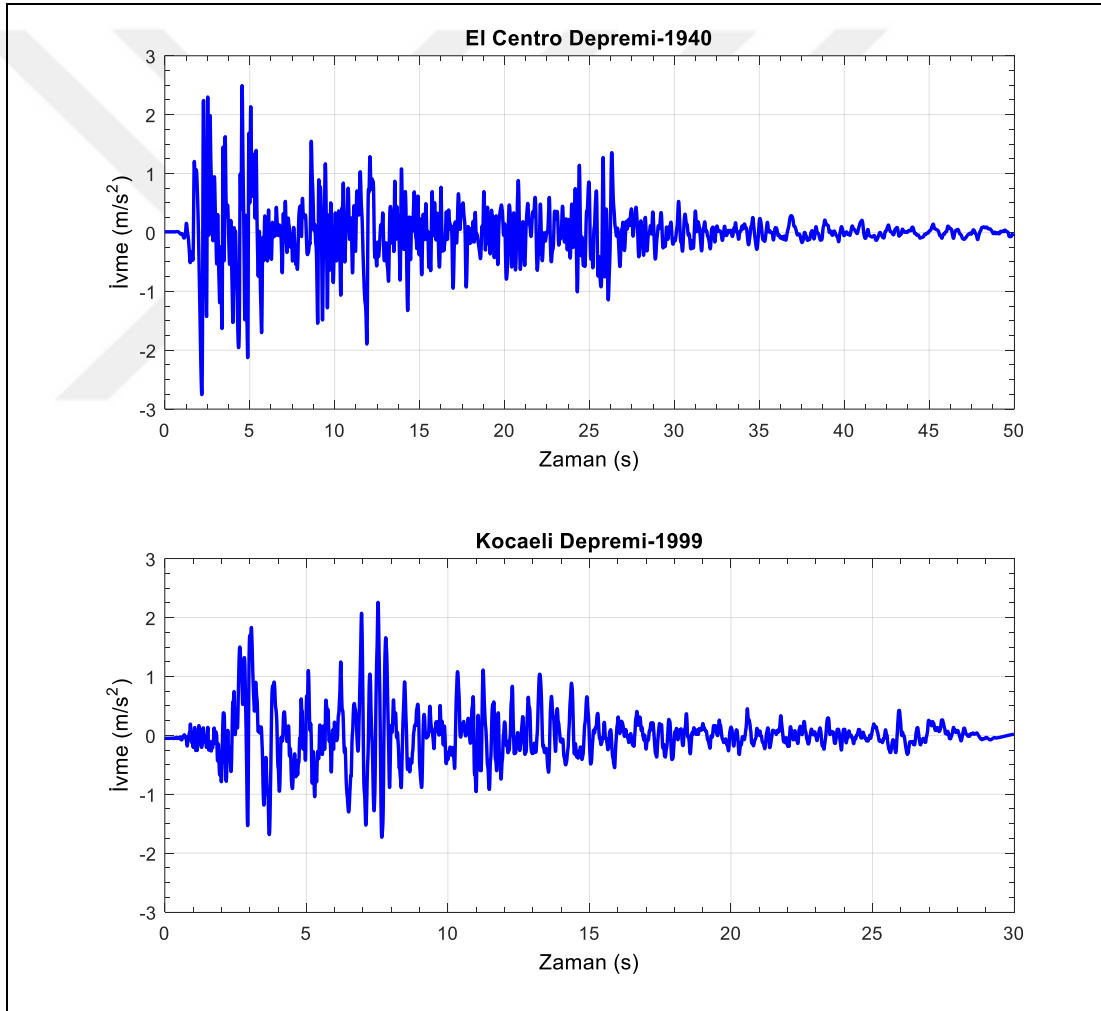
Deneysel çalışmalar her bina modeli için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve yapılan testler Tablo 5.3'de verilen deney matrisi ile özetlenmiştir.

Tablo 5.5. Deney matrisi.

Deprem Kaydı	Kontrolör	MR Damper Tipi
El-Centro	Kontrolsüz	-
		Lord-Damper
		Damper-1
		Damper-2
	PID	Damper-3
		Lord-Damper
		Damper-1
		Damper-2
	SMC	Damper-3
		Lord-Damper
		Damper-1
		Damper-2
Kocaeli	EBC	Damper-3
		Lord-Damper
		Damper-1
		Damper-2
	Kontrolsüz	-
		Lord-Damper
		Damper-1
		Damper-2
	PID	Damper-3
		Lord-Damper
		Damper-1
		Damper-2
	SMC	Damper-3
		Lord-Damper
		Damper-1
		Damper-2
	EBC	Damper-3
		Lord-Damper
		Damper-1
		Damper-2

Bu çalışma kapsamında tasarlanan yarı aktif yapısal kontrol sisteminde kat yükseklikleri farklı, malzeme ve geometri özellikleri aynı olan dört farklı bina modeli kullanılmıştır. Bina modellerinin kontrolü zemin ile birinci kat arasına yatay olarak yerleştirilen MR damper ile sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda bina modellerinin kontrolü için bir ticari MR damper ve tasarımı farklı üç yerli MR damper olmak üzere dört farklı tipte MR sönümleyici kullanılmıştır. MR damperin yapısal tepkilere göre

retmesi gereken sönümleme kuvveti üç farklı kontrolör kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, MR damperin bina modellerine herhangi bir akım uygulamadığı pasif durum (kontROLSüz) da deneylerde bir kıyaslama parametresi olarak göz önünde bulundurulmuştur. Dinamik deneyler her bina modeli için iki farklı deprem ivmesi etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Deprem ivmeleri yapılara üç doğrultuda etki ederken bu çalışmada sadece yıkıcı etkiyi oluşturan yanal titreşimler dikkate alınmıştır. Deney matrisinde görüldüğü üzere toplamda 64 adet ana test gerçekleştirilmiştir. Kontrolör katsayılarını belirlemek için yapılan her ana test defalarca tekrarlanan ara testlerle belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda uygulanan deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri şekil 5.20’de gösterilmiştir.



şekil 5.20. Deneysel çalışmada kullanılan depremlerin ivme-zaman grafikleri, El-Centro (st), Kocaeli (alt).

Testler sırasında kullanılan ilk deprem ivme verisi 18 Mayıs 1940 tarihli El-Centro istasyonuna ait ivme kaydının kuzey-güney bileşenidir. Bu deprem kaydı yapısal kontrol çalışmalarında gerek tek başına gerekse de diğer depremlerle kıyaslanmak üzere literatürde en fazla kullanılan deprem verisi olma özelliğini taşımaktadır. Kullanılan ikinci depremi ivme verisi ise ülkemizde 17 Ağustos 1999 tarihinde gerçekleşen ve trajik sonuçlara sebep olan Kocaeli depremidir. Bu depremin Yarımca-Petkim istasyonunda kaydedilen doğu-batı bileşeni ivme verisi olarak kullanılmıştır. Bina modellerinin yapısal davranışını elastik sınırlar içerisinde kalmasını sağlamak için uygulanan deprem ivme genlikleri belirli katsayılarla azaltılmıştır (Tablo 5.6).

Tablo 5.6. Deprem ivme genliği azaltma katsayıları.

Bina kat sayısı	Deprem Kayıtları	
	El Centro/1940	Kocaeli/1999
5	1.0	0.5
6	0.7	0.4
7	0.4	0.4
8	0.3	0.4

Bu tabloda, 1.0 ile gösterilen katsayı uygulanan deprem ivmesi genliğinde herhangi bir azalma olmadığını diğer bir deyişle gerçek deprem kaydının tam ölçekli olarak bina modeline uygulandığını ifade etmektedir. Bu değerin dışında verilen tüm katsayılar kullanılan deprem ivmesine göre genliklerindeki küçülme miktarını göstermektedir.

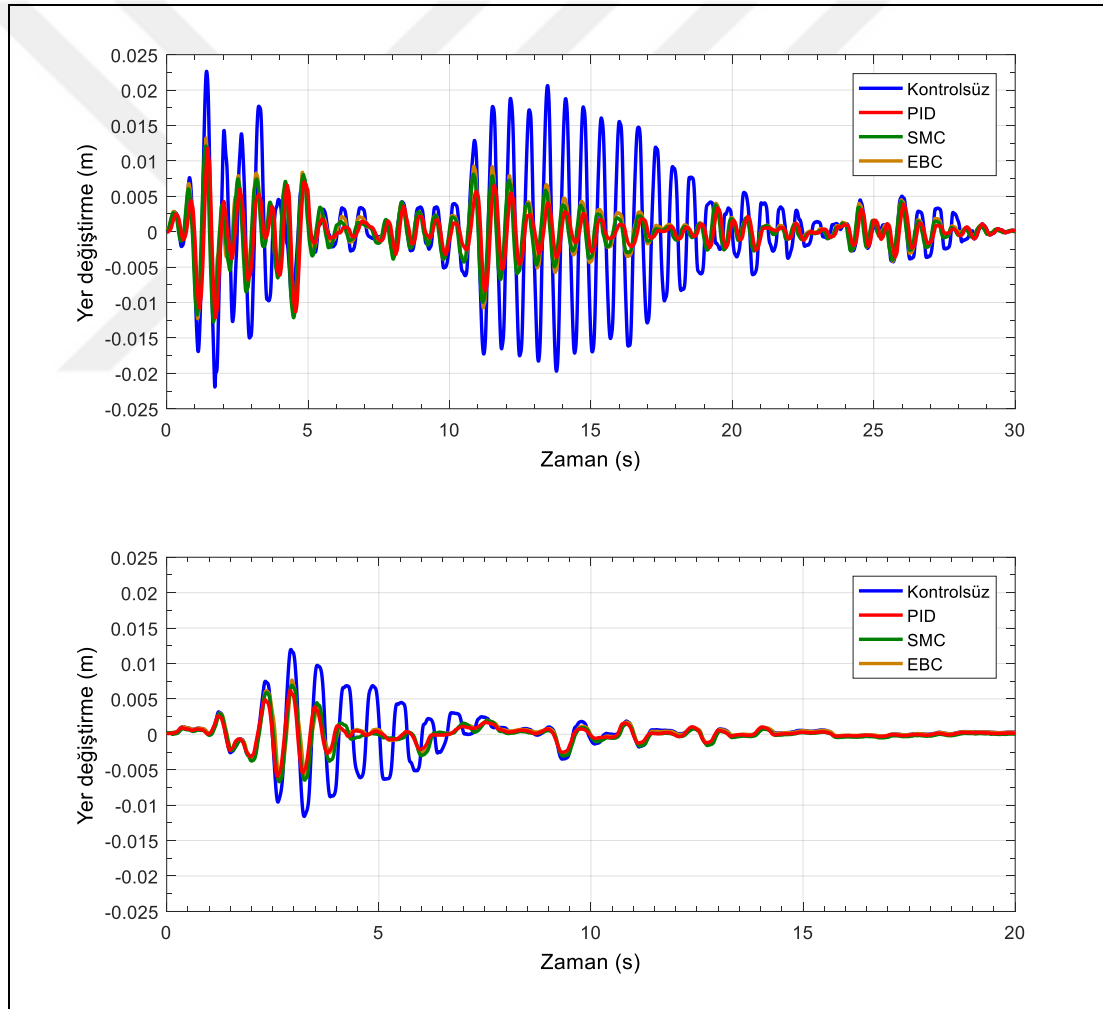
5.7. Bina Modellerinin Sarsma Tablası Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı kat yüksekliklerine ve doğal frekansa sahip dört adet çelik bina modeli sarsma tablasında deneysel olarak test edilmiştir. İki farklı deprem etkisi altında yapılan testlerde MR damper kontrol kuvvetini hesaplamak üzere üç farklı kontrolör kullanılmıştır. Bina modellerine MR damperin bağlı olduğu ancak herhangi bir akım uygulanmadığı durum (kontROLSÜZ) referans kabul edilerek kontrolörlerin başarısı kıyaslanmıştır. Ayrıca testlerde bir adet ticari MR damper ve 115M363 no'lu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında imal edilen üç farklı MR damper kullanılmıştır.

Böylece, farklı MR damper tiplerinin de başarısı ölçülmüştür. Bina modelleri üzerinde yapılan deneysel ölçüm sonuçlarına göre en başarılı performansı gösteren ve tez kapsamında damper-1 olarak isimlendirilen yerli MR damper için ölçüm sonuçları grafikler halinde sunulmuştur.

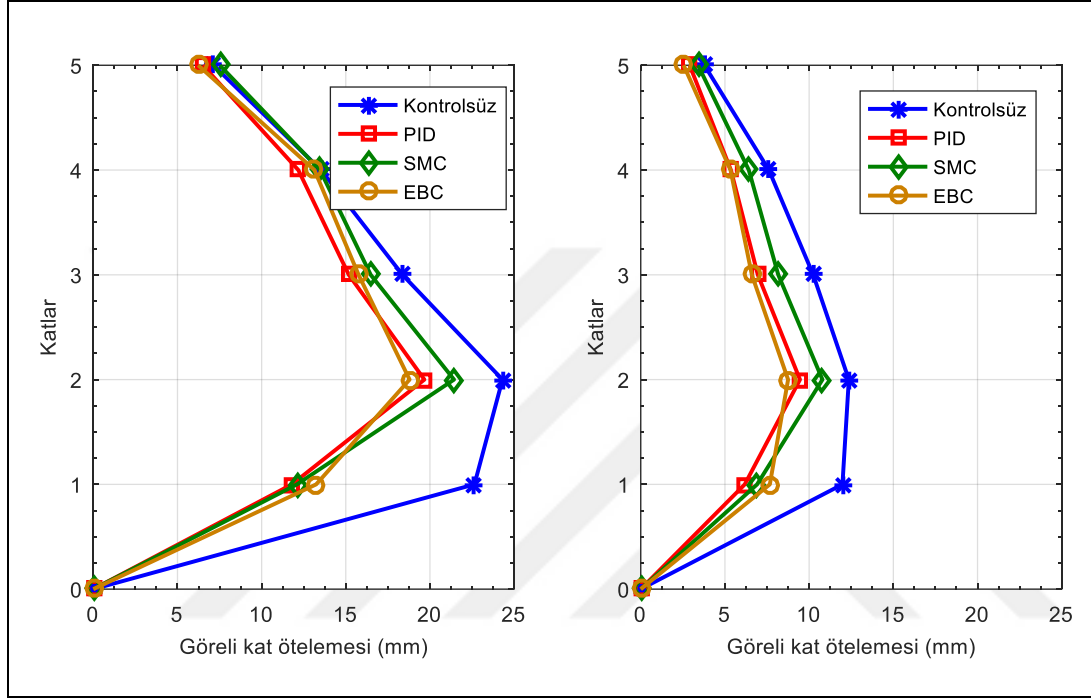
5.7.1. Beş katlı bina modelinin deneysel ölçüm sonuçları

El Centro ve Kocaeli depremleri etkisi altındaki beş katlı bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafikleri kullanılan üç kontrolör için karşılaştırmalı olarak Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Şekilde PID kontrolörün her iki deprem ivmesi etkisi altında diğer kontrol algoritmalarına göre yapısal titreşimleri azaltmada daha etkili olduğu görülmektedir.



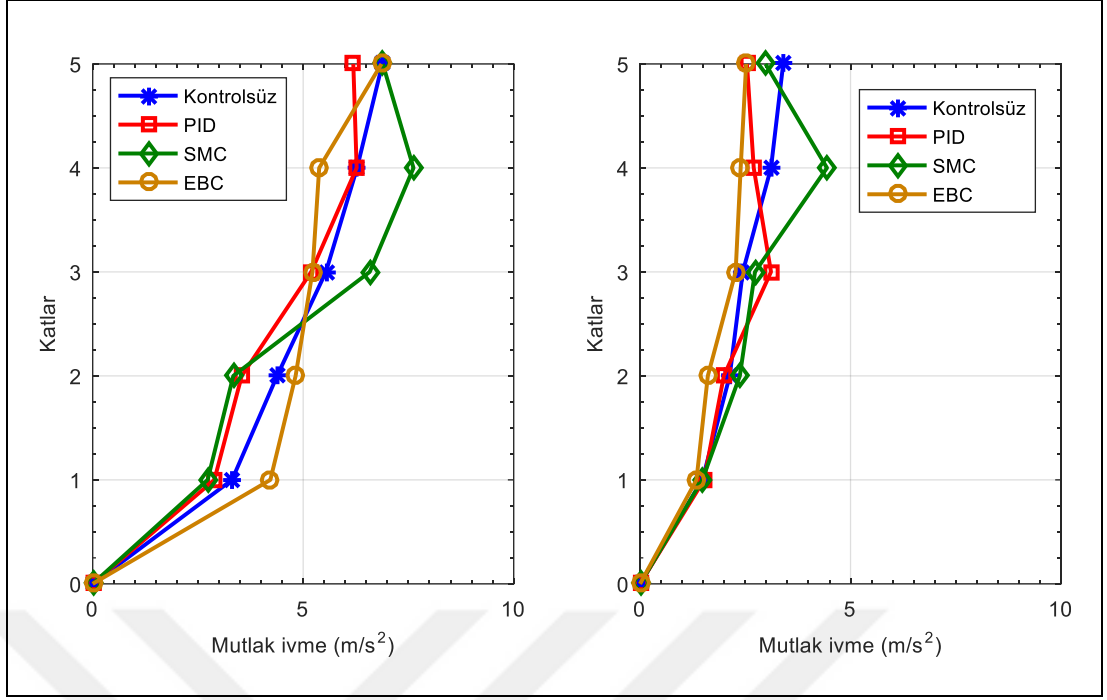
Şekil 5.21. El Centro (üst) ve Kocaeli (alt) deprem ivmeleri etkisi altındaki beş katlı bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği.

Maksimum görel kat ötelemesi grafikleri incelendiğinde ise her kat için farklı bir kontrolörün etkinliğinden bahsetmek mümkündür (Şekil 5.22). El Centro deprem ivmesi etkisi altındaki bina modelinde PID ve EBC kontrolörlerin en başarılı sonuçları verdiği görülürken Kocaeli depreminde de benzer şekilde bu iki kontrolör öne çıkmaktadır. SMC kontrolör ise her iki deprem etkisinde en az etkiyi gösteren algoritmadır.



Şekil 5.22. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki beş katlı bina modelinin maksimum görel kat öteleme grafikleri.

Yapısal sistemin tüm kontrol durumlarındaki maksimum mutlak ivme tepkileri uygulanan deprem ivmeleri etkisi altında zamana bağlı olarak gösterilmiştir (Şekil 5.23). El centro depreminde yapısal sistemin alt katlarında maksimum görel kat ötelemelerini etkili şekilde azaltan EBC kontrolörün mutlak ivme değerlerini arttırdığı görülmektedir. Bu kontrolör alt katların yer değiştirme tepkilerini önemli ölçüde azaltırken uygulanan yüksek kontrol kuvvetleri mutlak ivme değerlerinin ise artmasına sebep olmuştur. Yapısal sistemin alt katlarında PID ve SMC kontrolörler mutlak ivme tepkilerini en çok azaltan algoritmalar olarak öne çıkmıştır. Üst katlarda ise alt katların aksine en düşük mutlak ivme tepkisi EBC kontrolör ile sağlanırken en başarısız algoritma SMC kontrolör olmuştur.



Şekil 5.23. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki beş katlı bina modelinin maksimum mutlak ivme grafikleri.

Kocaeli depremi etkisi altındaki kontrollü yapısal sistemde ise uygulanan kontrolörler yapı yüksekliği boyunca benzer performans seviyeleri göstermiştir. EBC kontrolör kontrolsüz duruma göre yapısal sistemin maksimum mutlak ivme değerlerini az da olsa azaltmayı başarırken SMC kontrolör özellikle üst katlarda ivme artışına sebep olarak en düşük performansı sergilemiştir.

Bina modelinin sismik performans değerlendirmesi literatürde belirtilen değerlendirme kriterlerine göre de yapılmıştır. Tablo 5.7 incelendiğinde deneysel çalışmada kullanılan tüm damper çeşitlerinin kat ötelemesi, ivme ve taban kesme kuvvetini temsil eden performans indekslerinde genel olarak başarılı olduğu söylenebilir. Damper-1 ise bu bina modeli için tüm damper tipleri arasındaki en başarılı sönümleyicidir. Proje kapsamında üretilen bu damperin ticari MR dampere göre de daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Özellikle yapıya giren deprem enerjisini temsil eden J_3 indeksinde ticari MR damper % 25 ile % 40 arasında azalma sağlarken üretilen damper-1 ise % 36 ile % 48 arasında bir azalma oranı yakalamıştır. Tablo 5.5 kontrolörlerin başarısı dikkate alınarak incelendiğinde ise yer değiştirme-

zaman ve maksimum görelî kat öteleme grafiklerinde olduğu gibi PID kontrolör en başarılı algoritma olarak öne çıkmaktadır.

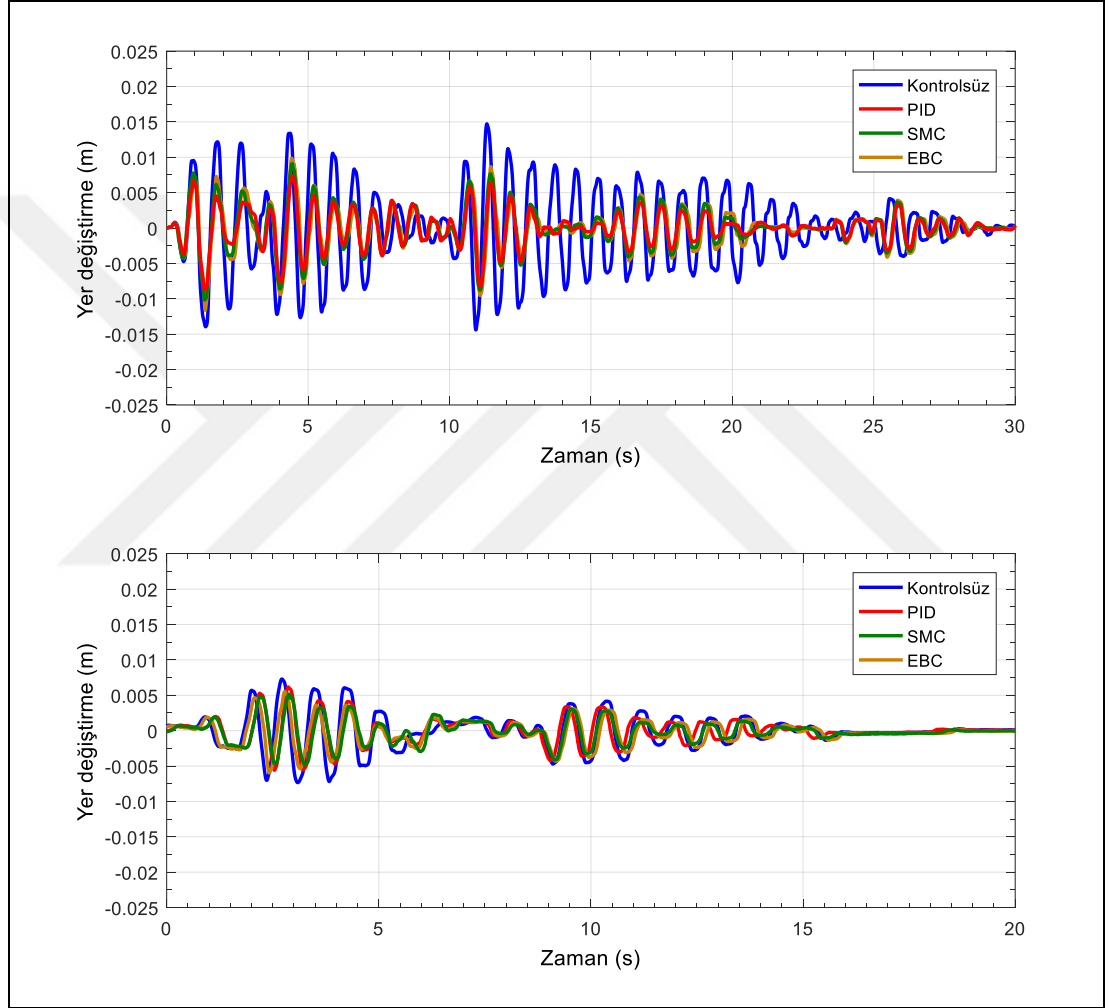
Tablo 5.7. Beş katlı bina modeline ait değerlendirme kriterleri.

Lord Damper		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.92	1.34	0.65	0.75	0.79	0.51	0.84	0.93	0.68	0.83	0.87	0.64
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.97	1.01	0.59	0.79	0.87	0.49	0.88	0.94	0.63	0.87	0.89	0.60
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		1.02	1.54	0.75	0.77	0.91	0.68	0.78	1.17	0.75	0.77	0.89	0.67
Damper 1		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.91	1.06	0.52	0.57	0.74	0.36	0.76	0.99	0.51	0.67	0.73	0.44
SMC (Kayan kipli kontrol)		1.03	1.15	0.53	0.63	0.83	0.43	0.87	1.60	0.57	0.72	1.15	0.52
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		1.01	1.06	0.58	0.57	0.69	0.43	0.71	0.92	0.64	0.63	0.78	0.49
Damper 2		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.86	0.96	0.55	0.65	0.74	0.35	0.81	0.95	0.48	0.80	0.79	0.38
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.76	0.90	0.58	0.70	0.75	0.40	0.85	0.98	0.71	0.77	0.79	0.60
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.99	1.27	0.54	0.61	0.70	0.42	0.76	0.90	0.61	0.70	0.75	0.51
Damper 3		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.91	1.02	0.56	0.67	0.73	0.37	0.84	1.48	0.54	0.80	1.17	0.46
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.95	1.09	0.53	0.72	0.80	0.33	0.90	1.49	0.66	0.83	1.24	0.59
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.87	1.22	0.60	0.61	0.68	0.45	0.74	0.93	0.55	0.71	0.74	0.54

MR damper ile kontrol edilen beş katlı bina modelinin yer değiştirme-zaman, maksimum görelî kat ötelemesi ve maksimum mutlak ivme tepki grafikleri birlikte değerlendirildiğinde genel olarak en başarılı algoritmanın PID kontrolör olduğunu söylemek mümkündür. Çalışmada kullanılan enerji esaslı kontrolör (EBC) ile doğrusal olmayan diğer kontrolör (SMC) belirsizliklere karşı daha dayanıklı olmasına rağmen çalışmalarda çok fazla tercih edilmeyen ve basit bir yapıya sahip olan PID kontrolörün yüksek performans göstermesi uygulamada araştırmacılar için daha pratik ve kolay çözüm sunması açısından önemlidir.

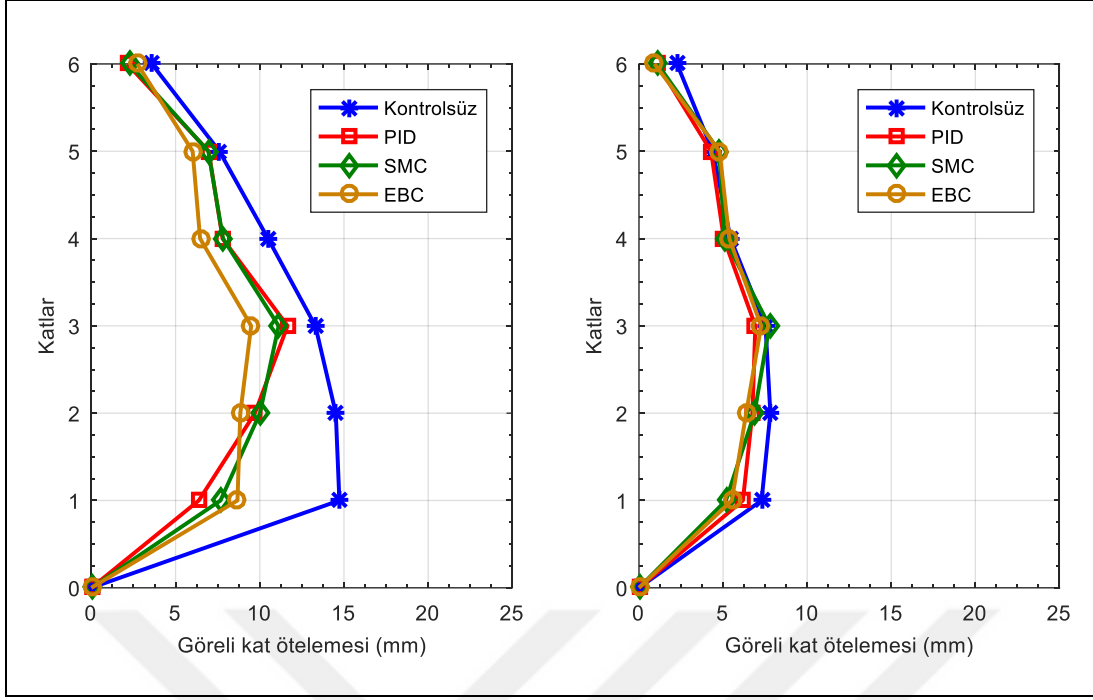
5.7.2. Altı katlı bina modelinin deneysel ölçüm sonuçları

Deneysel çalışma için imal edilen altı katlı bina modeline ait sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Şekil 5.24’de El Centro ve Kocaeli depremleri etkisi altındaki bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafikleri görülmektedir. El Centro depremi etkisi altındaki bina modelinin birinci katındaki yer değiştirme tepkilerini PID kontrolör en iyi şekilde azaltırken Kocaeli depreminde ise SMC kontrolörün başarılı olduğu görülmektedir.

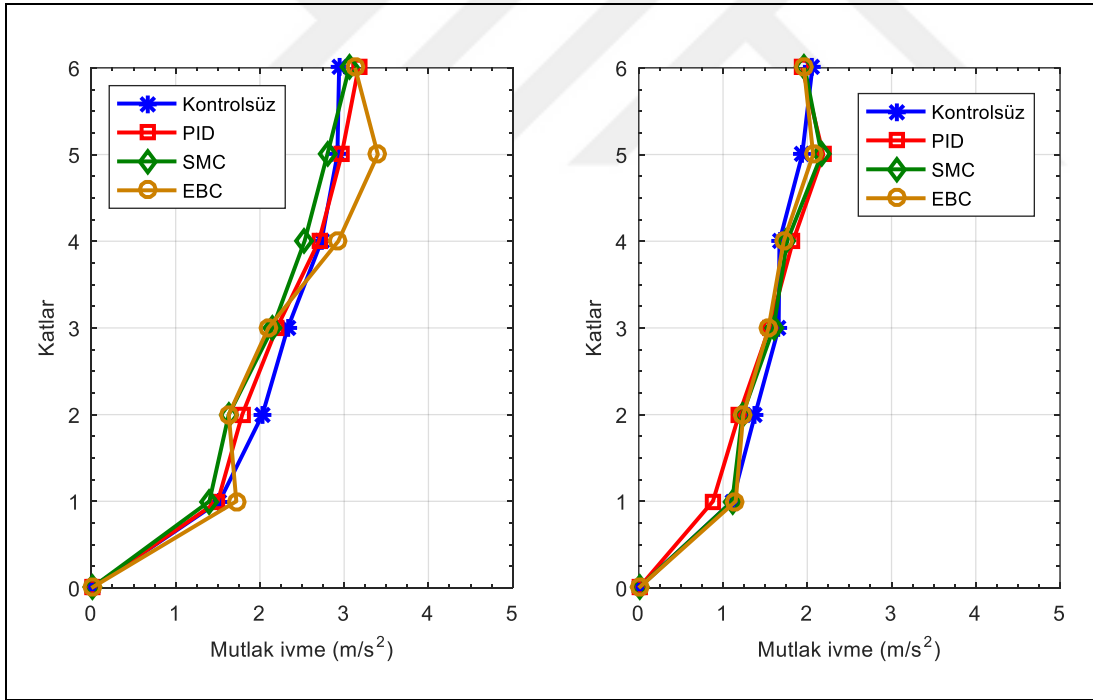


Şekil 5.24. El Centro (üst) ve Kocaeli (alt) deprem ivmeleri etkisi altındaki altı katlı bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği.

Maksimum görelî kat ötelemesi grafikleri El Centro deprem verisi için incelendiğinde ise EBC kontrolörün genel olarak yapısal titreşimleri daha başarılı bir şekilde azalttığı gözle çarpılmaktadır (Şekil 5.25). Kocaeli deprem verilerinde ise tüm kontrolörlerin görelî kat ötelemelerini benzer performans seviyelerinde azalttığı görülmektedir.



Şekil 5.25. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki altı katlı bina modelinin maksimum görelî kat öteleme grafikleri.



Şekil 5.26. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki altı katlı bina modelinin maksimum mutlak ivme grafikleri.

Şekil 5.26’da yapısal sistemin tüm kontrol durumlarındaki maksimum mutlak ivme tepkileri uygulanan deprem ivmeleri etkisi altında zamana bağlı olarak gösterilmiştir.

El centro ve Kocaeli depremleri etkisindeki yapısal sistemin maksimum mutlak ivme değerleri kontrolsüz duruma göre çok az oranda azalmıştır. Kontrolörlerin bu bina modeli için maksimum ivme değerlerini azaltmada etkin oldukları söylenememektedir. PID ve EBC kontrolör alt katlarda az da olsa etkili olmuş olsa da üst katlardaki mutlak ivme değerleri pasif duruma göre artmıştır. Ek olarak bu bina modelinin sismik performansı değerlendirme kriterlerine göre de belirlenmiştir.

Tablo 5.8. Altı katlı bina modeline ait değerlendirme kriterleri.

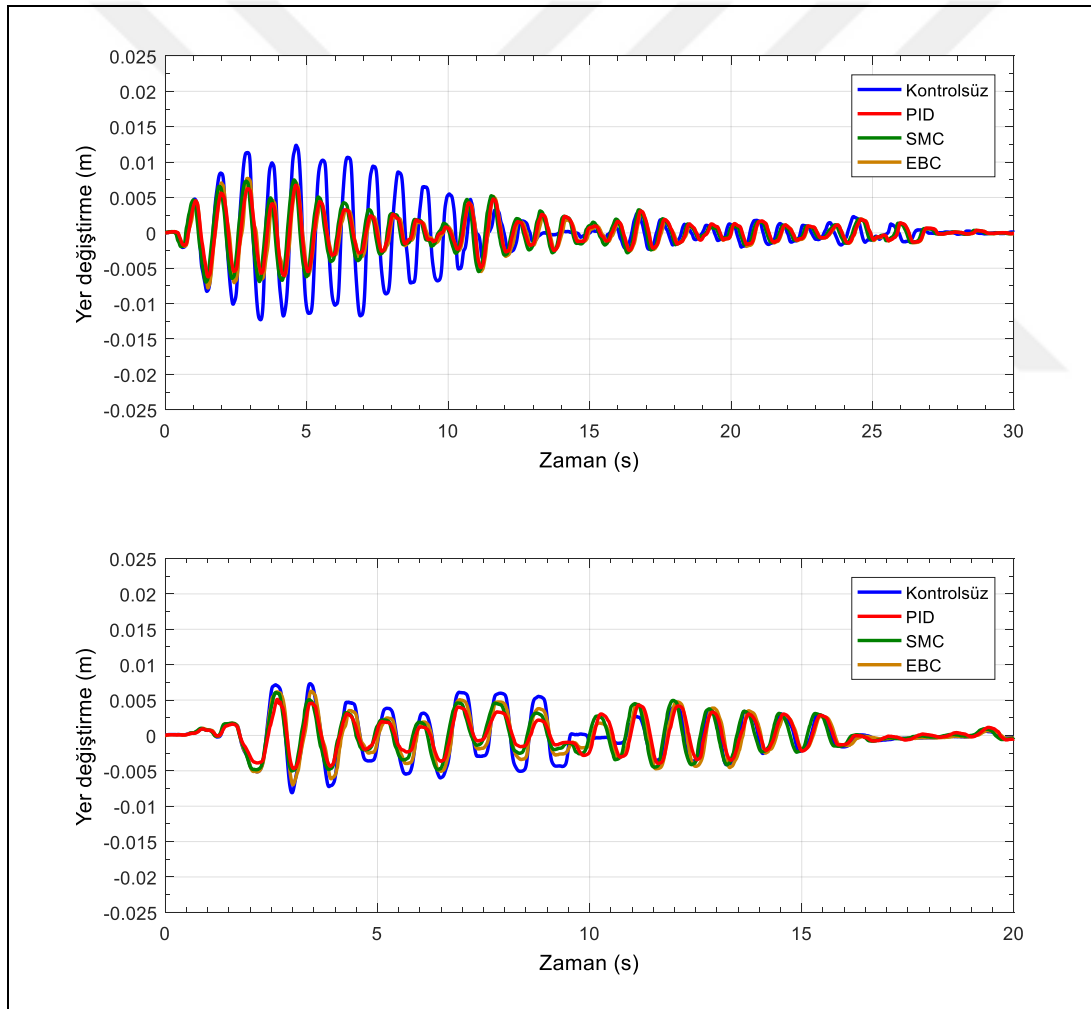
Lord Damper		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.94	1.13	0.77	0.91	0.95	0.70	1.05	1.44	0.81	0.97	0.97	0.82
SMC (Kayan kipli kontrol)		1.04	1.28	0.62	1.00	0.97	0.59	1.04	1.12	0.91	0.97	0.98	0.92
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		1.02	1.23	0.76	0.87	0.98	0.67	0.98	1.13	0.82	0.93	0.95	0.81
Damper 1		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.93	1.10	0.50	0.79	0.75	0.43	0.97	1.10	0.84	0.87	0.88	0.73
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.93	1.05	0.61	0.76	0.75	0.51	1.08	1.11	0.70	0.91	0.91	0.65
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.95	1.17	0.66	0.69	0.79	0.52	1.09	1.12	0.75	0.86	0.92	0.71
Damper 2		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.93	1.06	0.65	0.81	0.81	0.54	0.96	0.99	0.82	1.00	0.92	0.70
SMC (Kayan kipli kontrol)		1.00	1.06	0.72	0.88	0.86	0.64	1.02	1.08	0.91	0.99	0.96	0.79
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		1.05	1.22	0.67	0.80	0.82	0.57	1.08	0.96	0.79	0.94	0.91	0.79
Damper 3		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.92	1.04	0.52	0.88	0.81	0.44	0.99	1.08	0.84	0.96	0.91	0.76
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.96	0.99	0.69	0.87	0.85	0.64	1.05	1.10	0.77	0.98	0.96	0.73
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.92	1.07	0.67	0.77	0.78	0.55	1.07	1.14	0.78	0.93	0.93	0.80

Tablo 5.8 incelendiğinde beş katlı bina modelinde olduğu gibi genel olarak en başarılı sönümleyicinin damper-1 olduğu görülmektedir. Kontrolörlerin performansı dikkate alındığında ise PID kontrolörün El Centro depremi etkisi altında en başarılı sonuçları verdiği görülmektedir. Bu kontrolör, özellikle depremin sisteme giriş enerjisini temsil

eden J_3 indeksinde %50 oranında bir azalma sağlamıştır. Bu oran tüm deneysel çalışmalarda elde edilen en iyi sonuçtur. Buna rağmen aynı kontrolör Kocaeli depremi etkisindeki bina modelinde ise en kötü performansı sergilemiştir. Bu durum kontrolör performanslarının sistemi tahrik eden farklı deprem kuvvetlerine göre ciddi oranda değiştiğinin bir göstergesidir.

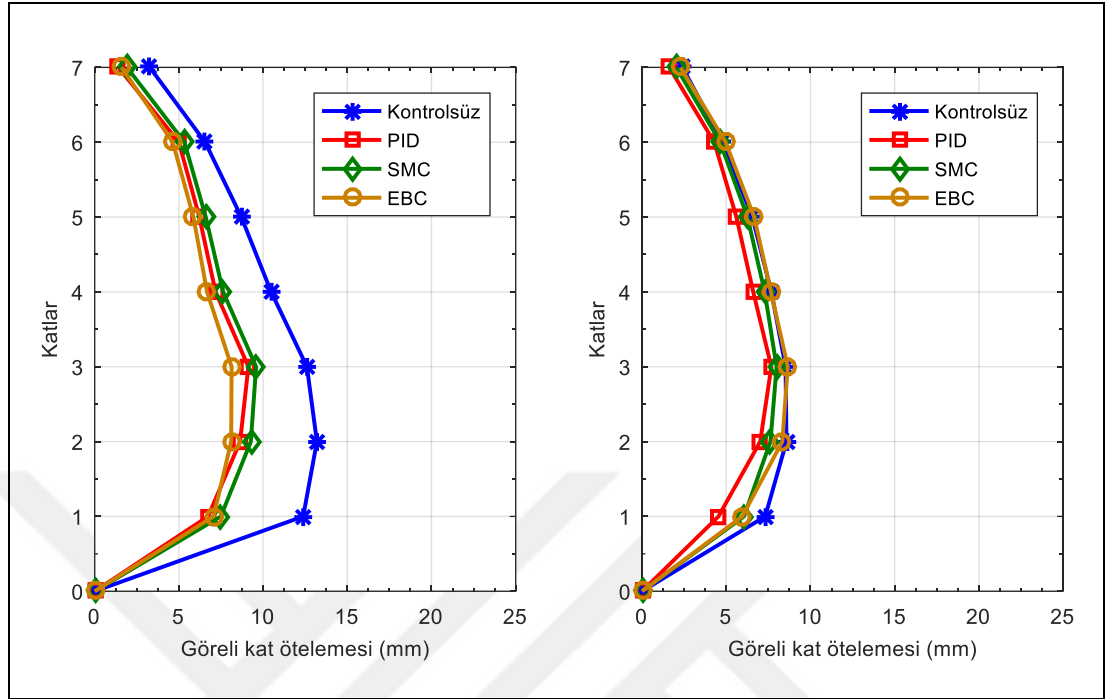
5.7.3. Yedi katlı bina modelinin deneysel ölçüm sonuçları

Yedi katlı bina modeli MR dmaper ile yarı aktif kontrol edilen bir diğer deneysel yapısal sistemdir. Bu bina modelinin birinci katının farklı deprem etkilerinde kontrolsüz ve kontrollü yer değiştirme zaman grafikleri Şekil 5.27’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

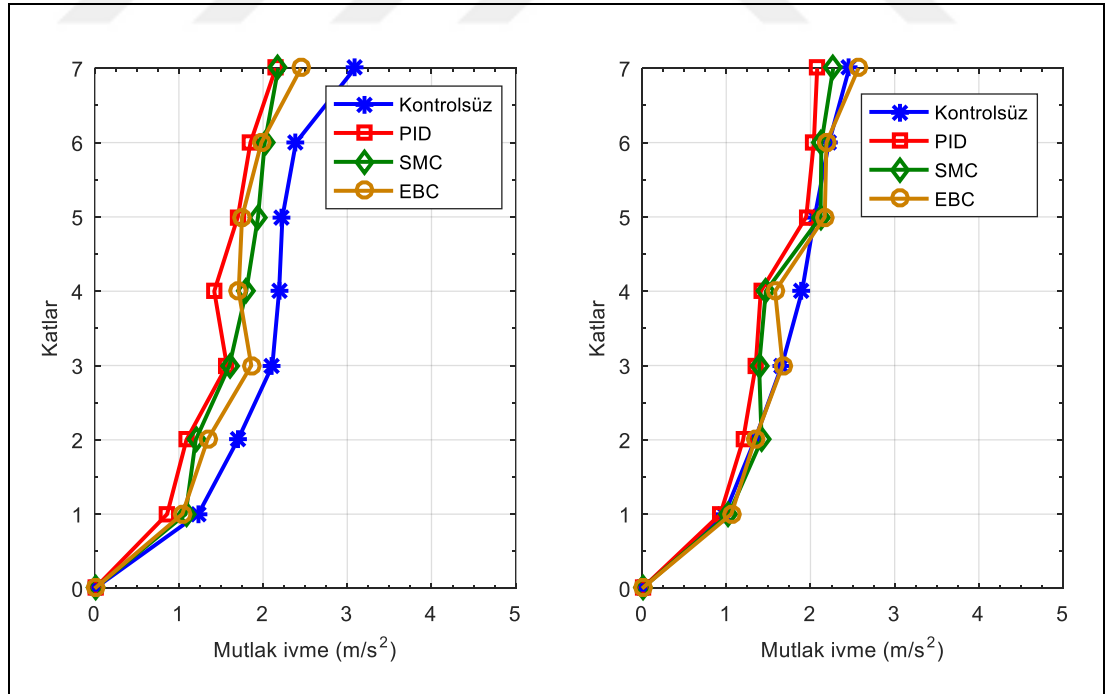


Şekil 5.27. El Centro (üst) ve Kocaeli (alt) deprem ivmeleri etkisi altındaki yedi katlı bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği.

PID kontrolörün her iki deprem kuvveti etkisi altında bina modelinin birinci katındaki yer değiştirme tepkilerini en çok azaltan kontrolör olduğu görülmektedir.



Şekil 5.28. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki altı katlı bina modelinin maksimum görel kat öteleme grafikleri.



Şekil 5.29. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki yedi katlı bina modelinin maksimum mutlak ivme grafikleri.

Maksimum görelî kat ötelemesi grafikleri incelendiğinde ise kontrolörlerin El Centro depremi için benzer performans seviyeleri göstermekle birlikte EBC kontrolörün küçük bir farkla en başarılı algoritma olduğu görülmektedir (Şekil 5.28). Buna rağmen EBC kontrolör Kocaeli depreminde diğer kontrolörlere göre en kötü performansı sergilemiştir. Altı katlı bina modelinde de karşılaşılan bu durum kontrolör performanslarının sistemi tahrik eden farklı deprem kuvvetlerine göre ciddi oranda değiştiğini bir kez daha desteklemektedir.

Şekil 5.29’da yapısal sistemin tüm kontrol durumlarındaki maksimum mutlak ivme tepkileri uygulanan deprem kuvvetleri etkisi altında zamana bağılı olarak gösterilmiştir. Yapısal sistemin her iki deprem etkisi altında ölçülen davranışı incelendiğinde PID kontrolör yapı boyunca mutlak ivme değerlerini en çok azaltan algoritma olarak öne çıkmaktadır. El Centro depreminde yapısal titreşimler kontrolsüz duruma göre daha çok azalmıştır. Kocaeli depreminde ise tüm kontrolörler yapısal sistemin alt katlarında benzer performans seviyeleri gösterirken üst katlara doğru PID kontrolörün yine en başarılı algoritma olduğu görülmektedir.

Yapısal sistemin sismik performans değerlendirmesi maksimum görelî kat ötelemeleri ve maksimum mutlak ivmelerin yanı sıra literatürde belirtilen değerlendirme kriterlerine göre de yapılmıştır. Tablo 5.9’da yedi katlı bina modelinin değerlendirme kriterlerine göre performans indekslerindeki değişim gösterilmiştir. El Centro ve Kocaeli depremleri etkisi altındaki yedi katlı bina modelinin titreşim özellikleri değerlendirme kriterlerine göre incelendiğinde genel olarak PID kontrolörün başarısı öne çıkmaktadır. Değerlendirme kriterleri arasındaki görelî kat ötelemeleri (J_1 ve J_4) ve taban kesme kuvvetindeki (J_3 ve J_6) azalmayı temsil eden performans indeksleri deneysel çalışmada kullanılan tüm MR damper tipleri için belirli bir azalma oranı sağlarken maksimum mutlak ivmeyi temsil eden performans indeksinde (J_2) kontrolsüz duruma göre artışlar olduğu görülmektedir. Gerçek zamanlı anlık kontrol uygulaması gerçekleştirildiği için sensör gürültüleri herhangi bir filtre uygulamasından geçirilememiştir. Bu durum özellikle maksimum mutlak ivme sonuçlarını etkilemiştir. Tüm süre göz önünde bulundurularak ölçülen normlu ivme değerlerinde (J_5) ise kontrolörlerin sistem tepkilerini azalttığı daha net bir şekilde anlaşılmaktadır. Sonuçlar sönümleyici performansı açısından değerlendirildiğinde ise

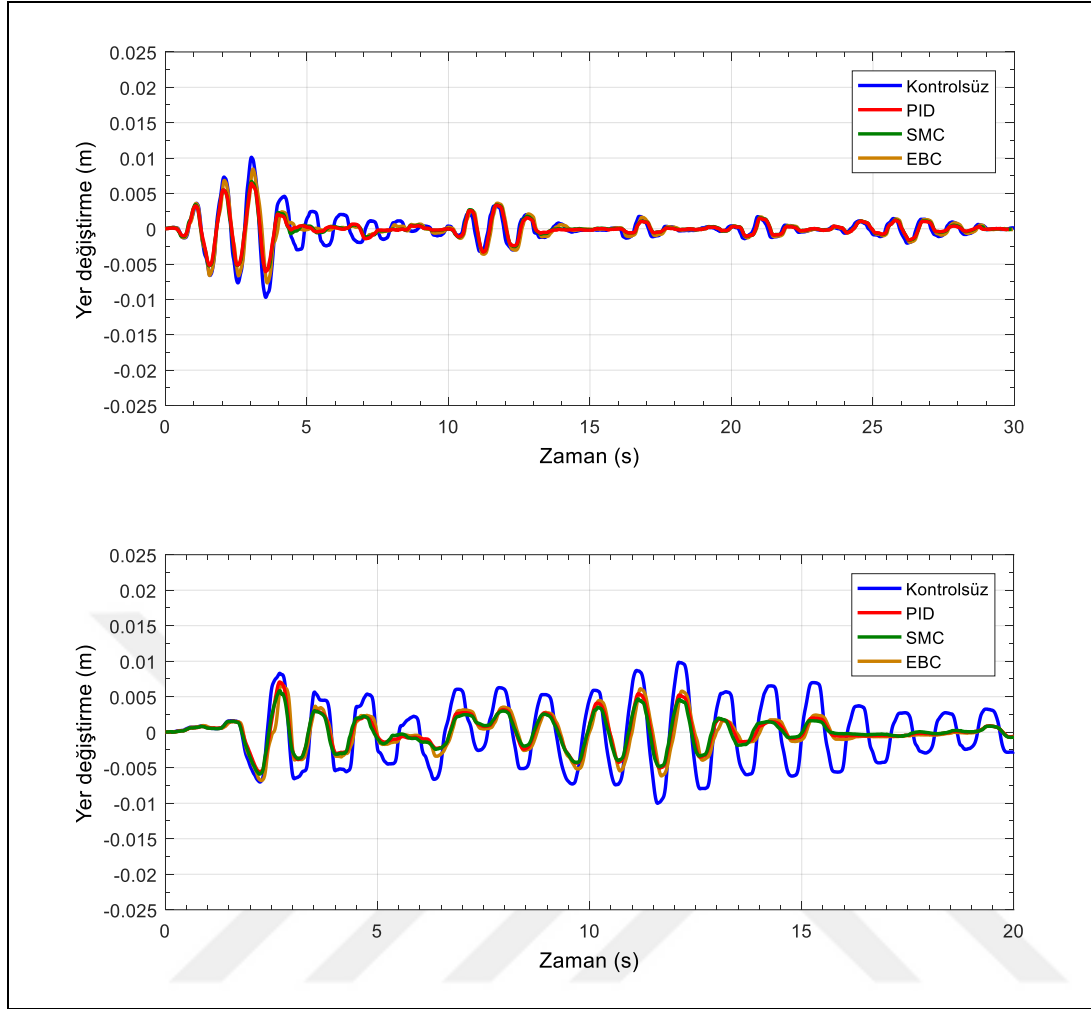
öne çıkan bir damper tipi bulunmamakla birlikte yerli üretilen damper 1'in ticari bir ürün olan Lord dampere göre daha yüksek performans gösterdiği görülmektedir.

Tablo 5.9. Yedi katlı bina modeline ait değerlendirme kriterleri.

Lord Damper		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.78	1.14	0.76	0.85	0.90	0.72	0.94	0.95	0.93	0.99	0.98	0.87
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.82	0.98	0.72	0.88	0.91	0.68	0.97	1.04	0.86	0.99	1.00	0.83
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.85	1.21	0.71	0.79	0.89	0.65	1.00	1.14	0.86	0.94	1.00	0.83
Damper 1		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.76	0.78	0.54	0.71	0.72	0.48	0.94	2.00	0.69	0.97	0.90	0.67
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.81	2.05	0.60	0.75	1.40	0.56	0.96	1.06	0.83	0.99	0.94	0.80
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.70	0.89	0.62	0.67	0.79	0.52	1.03	1.12	0.85	0.94	0.96	0.88
Damper 2		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.79	0.74	0.83	0.77	0.67	0.67	0.85	0.96	0.56	1.03	0.88	0.57
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.87	0.74	0.69	0.84	0.71	0.61	0.92	0.98	0.46	1.22	0.94	0.51
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.68	0.86	1.19	0.68	0.69	1.21	1.02	1.11	0.72	0.93	0.91	0.78
Damper 3		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.78	0.89	0.44	0.77	0.74	0.35	0.89	0.96	0.64	1.00	0.96	0.61
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.81	0.92	0.48	0.81	0.74	0.41	0.94	1.04	0.79	1.03	0.98	0.81
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.69	0.93	0.66	0.71	0.79	0.56	1.01	1.05	0.73	0.94	0.94	0.77

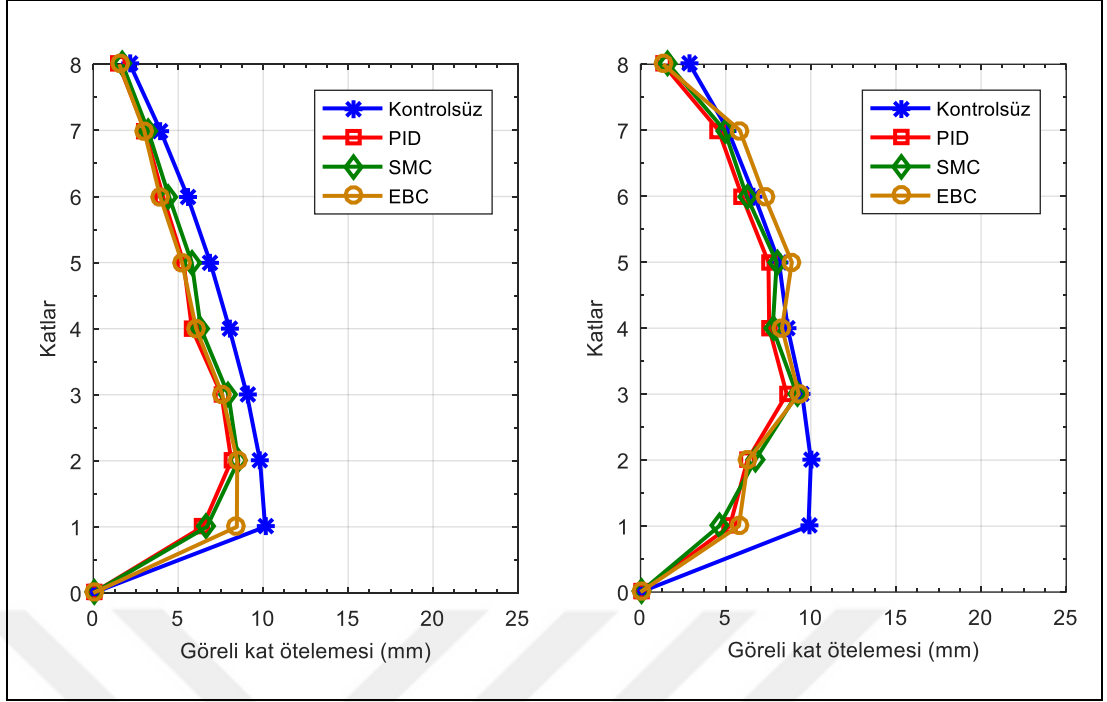
5.7.4. Sekiz katlı bina modelinin deneysel ölçüm sonuçları

El Centro ve Kocaeli depremleri ile test edilen sekiz katlı bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafikleri kullanılan üç kontrolör için Şekil 5.30'da sunulmuştur. Bina modelinin yer değiştirme zaman grafikleri incelendiğinde tüm kontrolörlerin yakın sonuçlar ürettiği ancak El Centro depremi için PID kontrolörün, Kocaeli depremi için ise SMC kontrolörün yapısal titreşimleri diğer algoritmalarından daha fazla azalttığı görülmektedir.

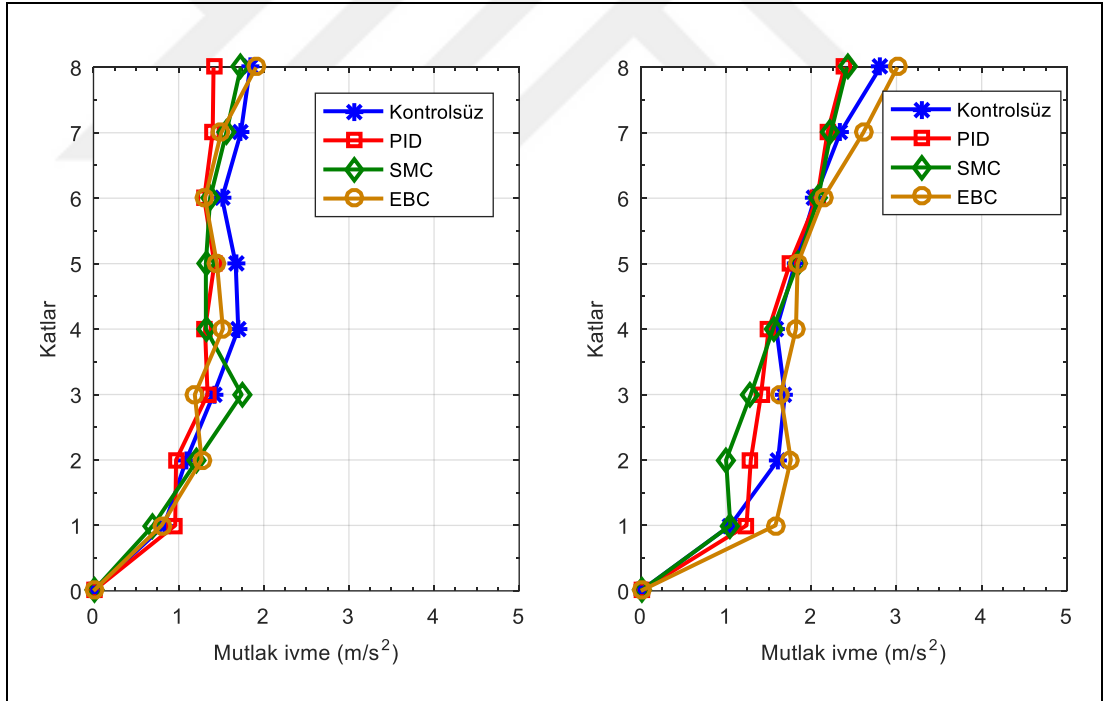


şekil 5.30. El Centro (üst) ve Kocaeli (alt) deprem ivmeleri etkisi altındaki sekiz katlı bina modelinin birinci katına ait yer değişirme zaman grafiği.

şekil 5.31’de ise bina modeline ait maksimum görel kat öteleme grafikleri her iki deprem kuvveti için ayrı ayrı sunulmuştur. Bu grafikler deneysel çalışmada kullanılan kontrolörlerin başarısı açısından değerlendirildiğinde tüm algoritmaların yaklaşık olarak benzer performans gösterdikleri görölmektedir. Bina modelinin alt katlarındaki maksimum görel kat ötelemelerinin kontrolsüz duruma göre daha çok azaldığı bununla birlikte kontrolörlerin performansının üst katlara doğru önemli ölçüde düştüğü görölmektedir. Buradan bina modellerindeki kat sayısının diğer bir deyişle yapı yüksekliğinin artmasının zemin katta konumlandırılan MR damperin etkisini azalttığını söylemek mümkündür.



Şekil 5.31. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki sekiz katlı bina modelinin maksimum görelî kat öteleme grafikleri.



Şekil 5.32. El Centro (sol) ve Kocaeli (sağ) deprem ivmeleri etkisi altındaki sekiz katlı bina modelinin maksimum mutlak ivme grafikleri.

Yapısal sistemin tüm kontrol durumlarındaki maksimum mutlak ivme tepkileri uygulanan deprem ivmeleri etkisi altında zamana bağlı olarak Şekil 5.32’de

sunulmuştur. Yapısal sistemin her iki deprem kuvveti etkisi altındaki davranışı incelendiğinde özellikle alt katlarda mutlak ivme değerlerinin kontrolsüz duruma kıyasla arttığı görülmektedir. Kontrolörlerin alt katlarda uyguladığı yüksek kontrol kuvvetleri bu bina modeli için ivmelerin artmasına sebep olmuştur. Genel olarak alt katlarda uygulanan yüksek sönüm kuvvetleri yer değiştirme değerlerini azaltırken bu katların kilitlenmesine diğer bir deyişle rijit davranmasına sebebiyet vererek üst katlarda ivme artışına neden olmaktadır. Bu bina modeli için ise genel kanının aksine üst katlarda ivme değerleri azalırken zeminde yer alan MR damper kontrolsüz duruma göre ivme davranışını belirsiz bir şekilde değiştirmiştir. Bina modeli üzerinde gerçekleştirilen tüm testlere ait değerlendirme kriterleri Tablo 5.10'da verilmiştir.

Tablo 5.10. Sekiz katlı bina modeline ait değerlendirme kriterleri.

Lord Damper		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.89	1.03	0.72	0.96	1.01	0.73	1.01	1.23	0.88	0.86	0.89	0.69
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.87	0.97	0.77	0.99	0.99	0.77	1.03	1.08	0.90	0.89	0.92	0.76
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.91	0.99	0.79	0.93	1.04	0.76	1.07	1.06	1.00	0.97	0.98	0.97
Damper 1		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.83	1.13	0.63	0.91	0.94	0.66	0.92	1.51	0.71	0.63	0.83	0.47
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.87	1.17	0.66	0.96	0.97	0.68	0.98	1.06	0.59	0.69	0.74	0.44
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.86	1.16	0.83	0.91	0.97	0.80	1.13	1.44	0.71	0.65	0.81	0.52
Damper 2		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.82	0.93	0.74	0.90	0.92	0.69	0.91	0.99	0.79	0.70	0.75	0.49
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.83	0.94	0.61	0.97	0.92	0.60	0.94	1.03	0.72	0.75	0.77	0.49
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.88	1.01	0.84	0.90	1.25	0.80	1.06	1.11	0.87	0.78	0.83	0.70
Damper 3		El-Centro Depremi						Kocaeli Depremi					
Kontrol Algoritması		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Kontrolsüz (Passive-off)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PID		0.88	1.33	0.69	0.93	2.02	0.74	0.91	1.13	0.80	0.73	0.61	0.50
SMC (Kayan kipli kontrol)		0.90	1.24	0.54	1.07	0.99	0.55	0.97	1.19	0.68	0.78	0.63	0.48
EBC (Enerji tabanlı kontrol)		0.87	1.88	0.77	0.95	1.64	0.75	1.16	1.27	0.89	0.87	0.81	0.82

Yapısal sistem için değerlendirme kriterleri tablosu incelendiğinde yerli olarak üretilen MR damperin (damper 1) ticari damperden daha iyi performans sergilediği açıkça görölmektedir. Değerlendirme kriterleri arasındaki görelî kat ötelemelerindeki (J_1 ve J_4) azalmayı temsil eden performans indeksleri deneysel çalışmada kullanılan tüm MR damper tipleri için az da olsa bir azalma oranı sağlarken mutlak ivmeyi temsil eden performans indekslerinde (J_2 ve J_5) kontrolsüz duruma göre artışlar olduğu görölmektedir. Yapısal sisteme giren sismik enerjinin azaltılması esas kriter (J_3 ve J_6) olarak ele alındığında ise kontrolörlerin daha düşük katlı bina modelleriyle kıyaslanacak kadar başarılı sonuçlar verdiği göze çarpmaktadır.





6. SİSTEM TANILAMA VE MODEL GÜNCELLEME

Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan beş katlı bina modelinin dinamik karakteristiklerini belirlemek suretiyle sayısal benzetim çalışmalarında kullanılacak olan yapısal sistem özelliklerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Literatürde yapıların dinamik modellerinin elde edilebilmesi için çeşitli analitik yöntemler geliştirilmiştir. Bu analitik yöntemlerle elde edilen sayısal model ile deneysel çalışmada kullanılan bina modellerinin dinamikleri arasında her zaman bir takım farklılıklar söz konusu olmaktadır. Bu farklılıkları ortadan kaldırmak için sistem tanılama ve model güncelleme gibi yöntemler geliştirilmiştir. Buradan hareketle MR damper ile yarı aktif olarak kontrol edilen beş katlı bina modelinin dinamik özellikleri analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiş ve simülasyon tabanlı bir model güncelleme tekniği ile benzetim çalışmalarına esas sistem parametreleri elde edilmiştir.

6.1. Model Parametrelerinin Klasik Yöntemle Belirlenmesi

Bina modelinin sistem parametreleri kütle, sönüm ve rijitlik matrislerinden oluşmaktadır. Deneysel bina modelinin malzeme ve geometri özellikleri alt bölüm 5.1’de özetlenmiştir. Kütle matrisi oluşturulurken döşeme ağırlıkları, kolon ağırlıkları ve ilave ağırlıklar hesaba katılmıştır. Buna göre beş katlı bina modelinin kütle matrisi şu şekilde yazılmıştır.

$$M_s = \begin{bmatrix} 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 70.14 \end{bmatrix} kg \quad (6.1)$$

Basit olarak her bir kolona ait eğilme rijitliği aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$k_i = \frac{12EI}{L^3} \quad (6.2)$$

Bu denklemde, E elastisite modülünü ($E = 2 \times 10^{11} N/m^2$), I kesit atalet momentini

($I = 2.7 \times 10^{-10} m^4$) ve L kolon net uzunluğunu ($L = 0.30 m$) göstermektedir. Bu denkleme göre beş katlı bina modelinin rijitlik matrisi şu şekilde oluşturulmuştur.

$$K_s = \begin{bmatrix} 192000 & -96000 & 0 & 0 & 0 \\ -96000 & 192000 & -96000 & 0 & 0 \\ 0 & -96000 & 192000 & -96000 & 0 \\ 0 & 0 & -96000 & 192000 & -96000 \\ 0 & 0 & 0 & -96000 & 96000 \end{bmatrix} N/m \quad (6.3)$$

Klasik bir sönümlenme matrisi oluşturulmasına yönelik ilk adım Rayleigh sönümünün kullanılmasıdır. Yapısal dinamik analizlerde en yaygın olan sönüm modeli doğrusal viskoz sönümü modelleyen Rayleigh sönüm modelidir. Yapısal sistemin kütle ve rijitlik matrislerinin orantılı toplamı olan bu sönüm modeli hesaplamalarda sağladığı kolaylık sebebiyle tercih edilmektedir. Rayleigh sönüm prensibine göre sönüm matrisi,

$$C_s = \alpha M_s + \beta K_s \quad (6.4)$$

ifadesiyle bulunabilir (Clough ve Penzien, 1975). Bu denklemde M_s yapısal sistemin kütle matrisi, K_s ise rijitlik matrisidir. Buna göre yapısal sistemin i . modunun sönümü,

$$\xi_i = \frac{1}{2w_i} \alpha + \frac{w_i}{2} \beta \quad (6.5)$$

denklemleriyle belirlenebilir. Burada, w_i sistemin i . modunun açısal frekansıdır. α ve β katsayıları, yapısal sistemin i . ve j . modları için ξ_1 ve ξ_2 olarak belirtilen sönüm oranlarından hesaplanabilir. Seçilen iki mod için denklem matris formunda tekrar yazılırsa,

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/w_i & w_i \\ 1/w_j & w_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (6.6)$$

eşitliği elde edilir. Denklem 6.6'da verilen eşitlik yardımıyla α ve β katsayılarının bulunabileceği görülmektedir. Eğer her iki modun sönüm oranının aynı ve ξ kadar olduğu varsayılırsa (aynı olmaları makul bir varsayımdır) katsayılar şu şekilde hesaplanabilir (Chopra, 2015).

$$\alpha = \xi \frac{2w_i w_j}{w_i + w_j} \quad \beta = \xi \frac{2}{w_i + w_j} \quad (6.7)$$

Eşitlik 6.7’de, $\xi = 0.00374$, $w_i = 9.973 \text{ rad/s}$ ve $w_j = 20.466 \text{ rad/s}$ olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin hesabı alt bölüm 6.2’de anlatılacaktır. Yapısal sistemin Rayleigh sönüm matrisi denklem 6.4 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

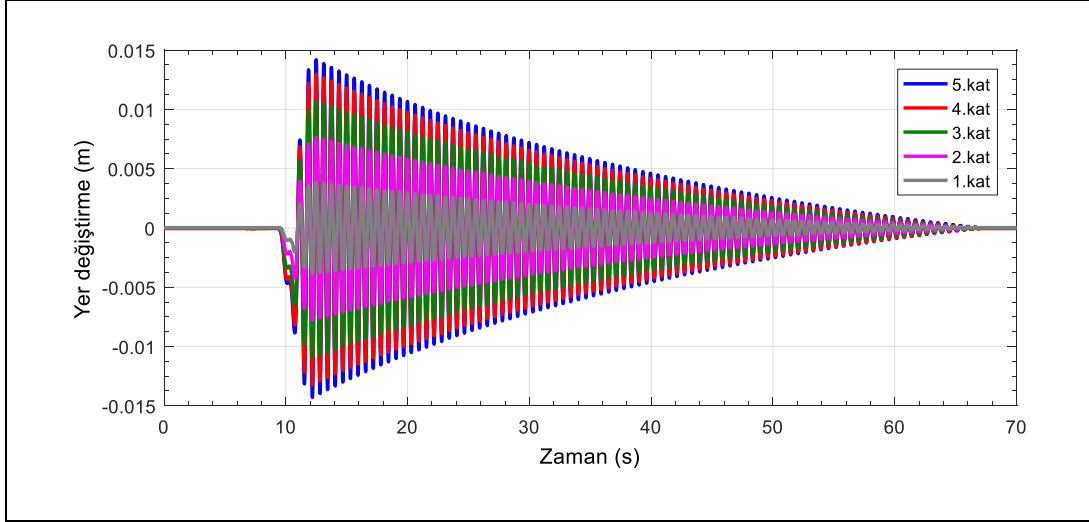
$$C_s = \begin{bmatrix} 50.72 & -23.59 & 0 & 0 & 0 \\ -23.59 & 50.72 & -23.59 & 0 & 0 \\ 0 & -23.59 & 50.72 & -23.59 & 0 \\ 0 & 0 & -23.59 & 50.72 & -23.59 \\ 0 & 0 & 0 & -23.59 & 27.11 \end{bmatrix} \text{Ns/m} \quad (6.8)$$

6.2. Sönüm Oranının Belirlenmesi

Yapısal sistemlerin sönüm oranını teorik olarak belirlemek mümkün olmadığı için deneysel yöntemlerden faydalanılır. Serbest titreşim testleri sönümü belirlemek için kullanılan deneysel yöntemlerden biridir (Chopra, 2015). Serbest titreşim kayıtlarından elde edilen veriler logaritmik azalım yöntemiyle hesaplanarak sönüm oranı elde edilmektedir. Hafif sönümlü sistemler için sönüm oranı,

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (6.9)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu bağıntıda u_i ve u_{i+j} sırasıyla i . ve $i + j$. yer değiştirme genlik değerlerini, j dikkate alınan devir sayısını göstermektedir. Teorisi anlatılan bu yöntem deneysel çalışmada kullanılan bina modeline uygulanmıştır. Bina modeli sarsma tablası üzerine sabitlendikten sonra sisteme bir başlangıç yer değiştirmesi ve hızı verilerek denge konumundan uzaklaştırılmıştır. Bina modelinin serbest salınımına izin verilmiş ve yapısal tepkiler ölçülmüştür. Serbest titreşim ölçüm sonuçlarına göre elde edilen yer değiştirme zaman grafiği Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



şekil 6.1. Bina modelinin serbest titreşimine ait yer değiştirme zaman cevapları.

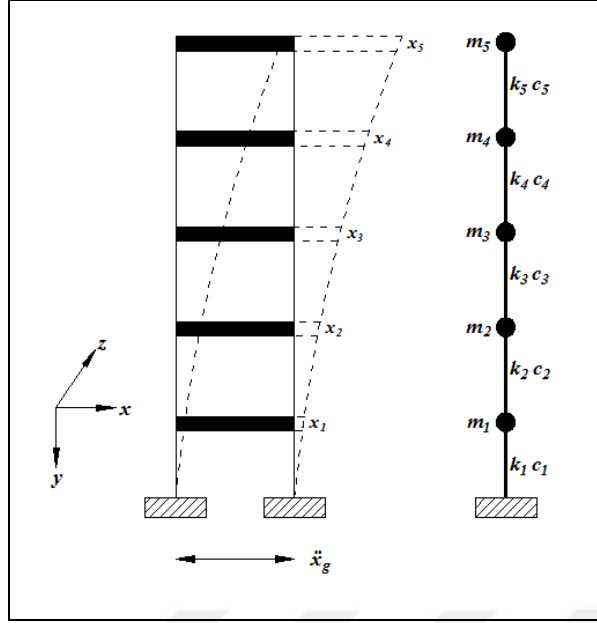
Birbiri ardına gelen pik yer değiştirme noktalarına ait değerler deneysel olarak ölçüldükten sonra yapının birinci doğal periyoduna karşılık gelen sönüm oranı denklem 6.9 ile hesaplanmıştır. Buna göre Rayleigh sönüm matrisinde kullanılan sönüm oranı, $\xi = 0.0038$ olarak hesaplanmıştır (bkznz. alt bölüm 6.1).

6.3. Doğal Frekans ve Mod şekillerinin Belirlenmesi

Bina modelinin doğal frekansları ve mod şekillerinin belirlenmesi için analitik ve deneysel olmak üzere iki farklı yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemler ve elde edilen sonuçlar bir sonraki alt bölümlerde anlatılacaktır.

6.3.1. Analitik yöntem

Yapısal sistemlerin serbest titreşim frekansları ve mod şekillerinin analitik olarak belirlenmesi için modellemede bir takım kabuller yapılır. Bu çalışma kapsamında kullanılan bina modeli döşemelerin sonsuz rijit kabul edildiği idealize edilmiş bir sistemdir. Sisteme ait kütlelerin her kat seviyesinde toplandığı kabul edilmektedir. Ek olarak, viskoz sönümleyicilerin yapıdaki enerji yayılım mekanizmasını temsil ettiği varsayılmaktadır. Yanal yer değiştirmeler, her bir toplu kütle için başlangıç konumuna göre yatay yer değiştirmesini temsil etmektedir. Bu nedenle, serbestlik derecesi sayısı beştir. Kayma binası olarak idealize edilen yapının matematik modeli şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Beş katlı kayma çerçevesinin matematik modeli.

Yapıların serbest titreşim frekans denklemi analitik olarak,

$$K_s \phi - \omega^2 M_s \phi = 0 \quad (6.10)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu denklemde M_s yapısal sistemin kütle matrisi, K_s rijitlik matrisi, ω yapının açısal titreşim frekansı, ϕ yapının ilgili açısal frekansına karşılık gelen titreşim modunu ifade etmektedir. Yapısal sistemin kütle ve rijitlik matrisleri biliniyorsa sistemin açısal frekansları ve titreşim modları belirlenebilmektedir. $\lambda = \omega^2$ kabul edilerek Denklem 6.10 yeniden düzenlendiğinde,

$$(K_s - \lambda M_s) \phi = 0 \quad (6.11)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu denkleme genel özdeğer problemi denir. Bu problemin çözümüyle elde edilen $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ özdeğerleri yapısal sistemin açısal frekanslarını, her özdeğere karşılık gelen $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ özvektörleri ise titreşim modlarını göstermektedir. Bina modelinin analitik olarak hesaplanan kütle ve rijitlik matrisleri Denklem 6.1 ve Denklem 6.3'de verilmiştir. Buna göre sistemin serbest titreşim frekansları,

$$\begin{bmatrix} 192000 & -96000 & 0 & 0 & 0 \\ -96000 & 192000 & -96000 & 0 & 0 \\ 0 & -96000 & 192000 & -96000 & 0 \\ 0 & 0 & -96000 & 192000 & -96000 \\ 0 & 0 & 0 & -96000 & 96000 \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} 70.57 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 70.57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 70.57 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70.57 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 70.14 \end{bmatrix} \phi = 0 \quad (6.12)$$

denkleminin çözüm kümesidir. $\lambda_i = \omega_i^2$ yazıldığında açısal frekans denklemi,

$$\omega_i = \sqrt{\lambda_i} \quad (6.13)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada, i ilgili mod sayısını göstermektedir. Açısal frekans ve periyot arasındaki ilişkiden bina modelinin titreşim periyotları,

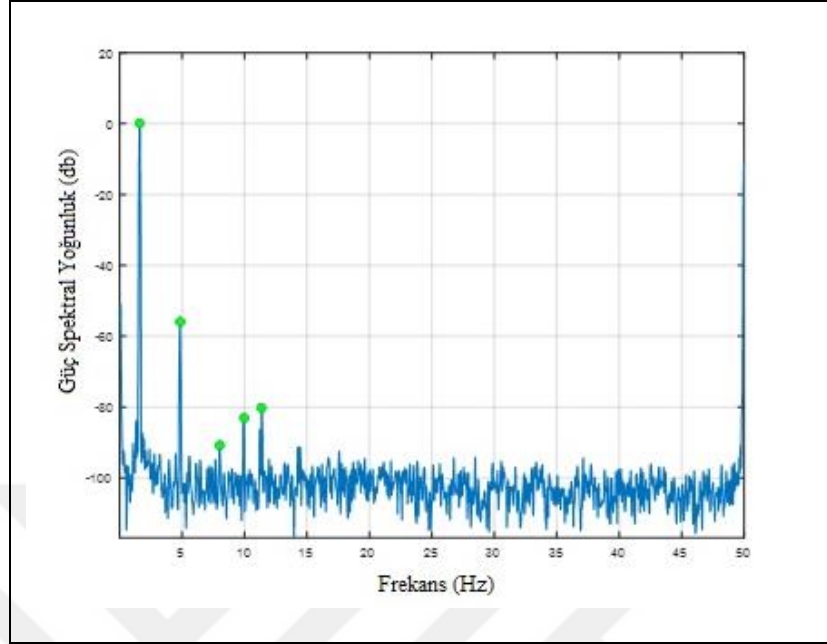
$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (6.14)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bina modelinin doğal frekans değerlerinin analitik çözümü için MATLAB yazılımından faydalanılmış ve hesaplanan değerler Tablo 6.1’de sunulmuştur.

6.3.2. Deneysel yöntem

Yapısal sistemlerin dinamik özelliklerini tayin etmek için kullanılan deneysel yöntemlerden biri çalışma şartlarında titreşim ölçümleridir. Giriş uyarı sinyalinin bilinmediği bu yöntemde sadece çıkış sinyalleri değerlendirilir. Yapının dinamik özellikleri bu çalışmada kullanılan Frekans Alanı Ayırıklaştırma (FDD) metodu gibi çeşitli yöntemler kullanılarak tahmin edilmektedir. FDD yöntemi genel frekans alanı yöntemlerinin bir uzantısı olarak düşünülebilir. Bu yöntem ile yapısal sistem tepkisi her bir mod için bir dizi bağımsız tek serbestlik dereceli sisteme ayırıklaştırılır. Ham verilerden güç spektrum yoğunluk matrisleri (PSD) tahmin edilir. Bu yöntemde tüm doğal modların hafif sönmüldüğü varsayılmaktadır. Ayrık frekanslarda elde edilen PSD matrisleri için tekil değerlere ayırıştırma yapılır. Her tekil değer maksimum noktası yapısal sisteme ait mod frekanslarını gösterir. Böylece belirli bir frekansta yapının titreşim yapmasına katkıda bulunan tüm modlar belirlenir (Lamarche et al., 2008). Bu çalışmada FDD yöntemi bina modelinin sarsma tablası üzerinde gerçekleştirilen serbest titreşim testi sonucu elde edilen ivme verilerine uygulanmıştır.

PSD matrisinin tekil değere ayrıştırılması sonucu elde edilen grafik Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



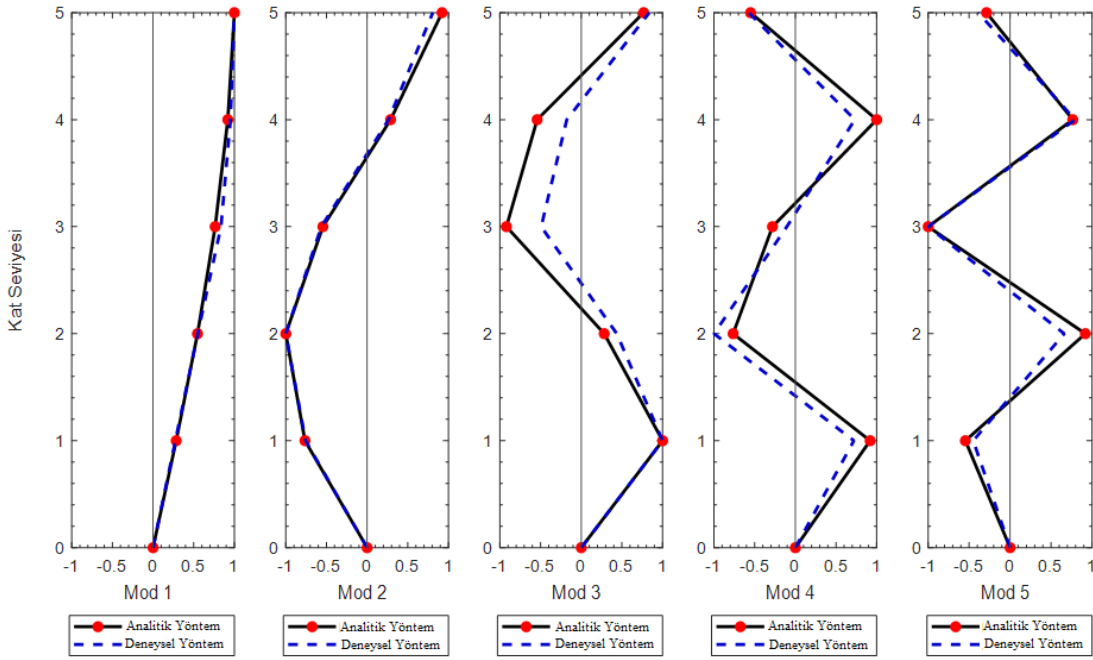
Şekil 6.3. Güç spektral yoğunluk matrisinin tekil değere ayrıştırılması.

Grafikte frekansa karşılık gelen güç spektral yoğunlukları görülmektedir. Her güç spektral yoğunluk matrisinden deneysel çalışmada kullanılan ivmeölçer sayısı kadar tekil değer elde edilir. Bu tekil değerlerden genliği en yüksek olan yapısal sistemin ilk mod frekansını ve geri kalan dört genlik ise diğer mod frekanslarını göstermektedir. Basitçe teorisi anlatılan bu yöntem bina modelinin serbest titreşim ivme verilerine uygulanmıştır. MATLAB ortamında yapılan hesaplar sonucunda bina modelinin deneysel doğal frekans değerleri ve mod şekilleri elde edilmiştir (Cheynet ve ark, 2017).

Tablo 6.1. Doğal frekans değerleri karşılaştırma tablosu.

Mod (x yönü)	Frekans Değerleri (Hz)		Hata (%)
	Analitik	Deneysel	
1	1.67	1.61	3.6
2	4.88	4.83	1.0
3	7.69	8.00	4.0
4	9.87	9.95	0.8
5	11.27	11.38	0.9

Bina modelinin ilk beş modunun deneysel ve analitik yöntemlerle hesaplanan doğal frekans değerleri Tablo 6.1’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Deneysel çalışmada sadece yatay yönde hareket (x yönü) dikkate alındığı için bu yöndeki ilk beş mod değeri tabloda verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde her iki yöntemle hesaplanan doğal frekans değerlerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bina modelinin analitik ve deneysel yöntemlerle elde edilen mod şekillerinin normalize edilmiş biçimleri Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Analitik ve deneysel yöntemle belirlenen mod şekilleri.

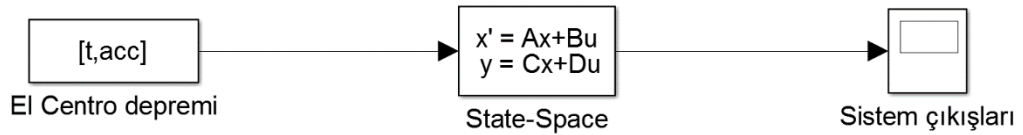
Mod şekillerinin kıyaslandığında grafik incelendiğinde binanın ilk iki modunda her iki yöntemin mükemmel bir uyum sağladığı görülürken yüksek frekanslı titreşim modlarında benzerliğin az da olsa düştüğünü söylemek mümkündür. Bununla birlikte bina modelinin doğal frekans değerlerinde olduğu gibi deneysel ve analitik çözümlerle hesaplanan mod şekilleri arasında da kabul edilebilir bir yakınlık olduğu gözlemlenmektedir.

6.4. Bina Modelinin Dinamik Davranışının Değerlendirilmesi

Bir önceki bölümde bina modelinin klasik yöntemle hesaplanan sistem parametreleri ile doğal frekans ve mod şekilleri deneysel yöntemle hesaplanan değerlerle kıyaslanmıştır. Yapısal sistemin dinamik özelliklerinin yanı sıra dinamik davranışının da sayısal olarak modellenerek deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması yoluna gidilmiştir. Bina modelinin yapısal davranış benzetimi deprem etkisi altındaki dinamik davranış ve serbest titreşim davranışı olmak üzere iki farklı ölçüm sonucuyla değerlendirilmiştir.

6.4.1. Bina modelinin deprem davranışının benzetimi

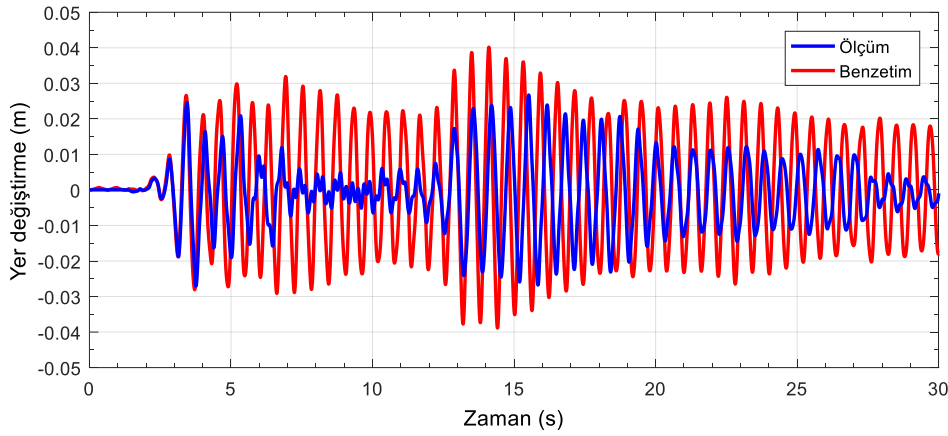
Bina modelinin El Centro depremi etkisi altındaki dinamik davranışı MR damperin sisteme bağlı olmadığı durum için incelenmiştir. Öncelikle yapısal sistemin sismik davranışı sarsma tablası testleriyle ölçülmüş ve her kata ait yer değiştirme tepkileri belirlenmiştir. Daha sonra deneysel olarak elde edilen verileri doğrulamak üzere bir simülasyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 6.5). Bu dinamik modelde El Centro deprem ivmesi sistem giriş sinyalini, yapısal tepkiler ise sistem çıkış sinyallerini oluşturmaktadır. Bina modelini temsil eden durum-uzay bloğunun teorisi önceki bölümlerde anlatılmıştır (bkz.alt bölüm 4.2).



Şekil 6.5. Bina modelinin sismik davranışını temsil eden blok diyagram.

Simülasyon çalışmasında ele alınan bina modelinin matematiksel alt yapısı klasik yöntemle hesaplanan kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri kullanılarak oluşturulmuştur. Sayısal olarak hesaplanan sistem parametreleri durum-uzay bloğundaki durum denklemi katsayılarını ile çıkış denklemi katsayılarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Simülasyon çalışması neticesinde beş katlı bina modelinin yer değiştirme tepkileri sayısal olarak elde edilmiştir. Yapısal sistemin birinci katının sarsma tablası testleriyle ölçülen deneysel sonuçları ile simülasyon modelleriyle hesaplanan sayısal sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 6.6’da sunulmuştur. Yer değiştirme zaman grafiği incelendiğinde deprem etki süresi boyunca benzetim sonuçlarının ölçüm

sonuçlarından daha fazla genliğe sahip olduğu görülmektedir. Simülasyon verilerinde genliklerin yüksek çıkması sayısal olarak hesaplanan sönüm matrisi ile ilgilidir.



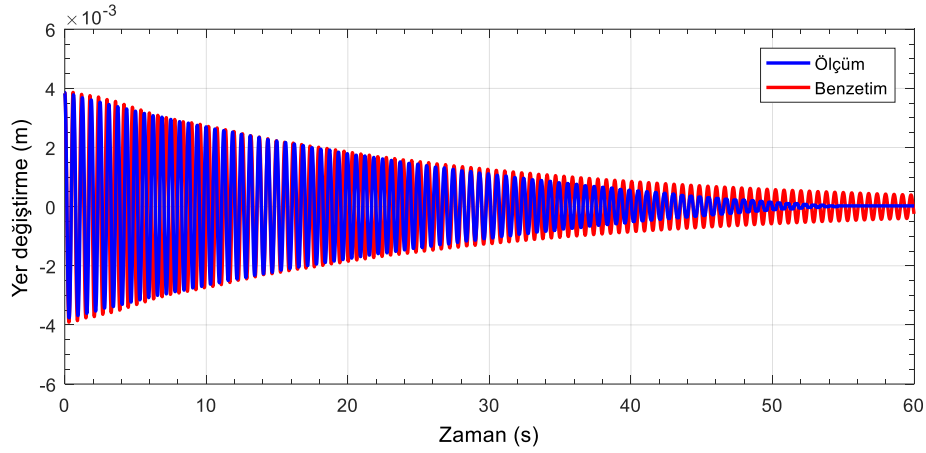
Şekil 6.6. El Centro depremi etkisi altındaki bina modelinin 1. katına ait yer değiştirme zaman grafiği.

Sönüm, dinamik bir sistemin mekanik enerjisini dağıtırken salınımların genliğini azaltmaktadır. Bu çalışmada kullanılan beş katlı bina modelinin sönüm oranı serbest titreşim testi ile elde edilen yer değiştirme tepkilerine göre logaritmik azalım yöntemiyle hesaplanmıştır (bkz. alt bölüm 6.2). Kütle ve rijitlik özelliklerinin aksine, çoğu durumda sönümlemeyi tam olarak modellemek imkansızdır.

6.4.2. Bina modelinin serbest titreşim ölçümlerinin benzetimi

Bina modelinin deneysel olarak ölçülen serbest titreşim verilerini doğrulamak amacıyla bir benzetim modeli hazırlanmıştır. Serbest titreşimin simülasyon blok diyagramları alt bölüm 6.5.1 'de detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Yapısal sistemin deprem davranış değerlendirmesinde olduğu gibi serbest titreşim ölçümleri de hem deneysel hem de sayısal olarak belirlenmiş ve bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği Şekil 6.7'de sunulmuştur. Serbest titreşim verilerinin kıyaslandığı bu grafik incelendiğinde bina modelinin deprem davranışına göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte grafiğin ilk 30 saniyesinde her iki yöntemle elde edilen sonuçlar mükemmel bir uyum göstermesine rağmen düşük genlik seviyelerinde aradaki fark açılmaktadır. Bina modelinin serbest titreşim davranışının deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçları

arasındaki faz farkı yer değiştirme zaman grafiğinden gözlemlenen bir başka sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 6.7. Bina modelinin birinci katına ait yer değiştirme zaman grafiği.

Simölasyonlar farklı sönüm ve rijitlik katsayıları ile defalarca tekrar edilmiş ve faz farkını etkileyen parametrenin rijitlik katsayıları olduğu sonucuna varılmıştır. Yer değiştirme zaman grafiğinin son 7-8 saniyelik zaman diliminde test sonuçlarının aniden sıfıra düştüğü simölasyon verilerinin ise hesaplanmaya devam ettiği görölmektedir. Belirtilen sürelerde ölçölen düşük genlikli titreşimlerin muhtemelen çalışmada kullanılan sensörlerin ölçüm hassasiyetinin altına düştüğü düşünölmektedir. Simölasyonlarda bir ölçüm cihazı bulunmadığı için titreşimler devam etmektedir.

Bina modeli için geręekleřtirilen dinamik davranış değerlendirmeleri neticesinde simölasyon modeli ve deneysel model arasındaki farkın giderilmesi diğer bir deyişle matematik modelin geręek sistem davranışına daha yakın sonuçlar verebilmesi için sistem parametrelerinin güncellenmesine karar verilmiştir.

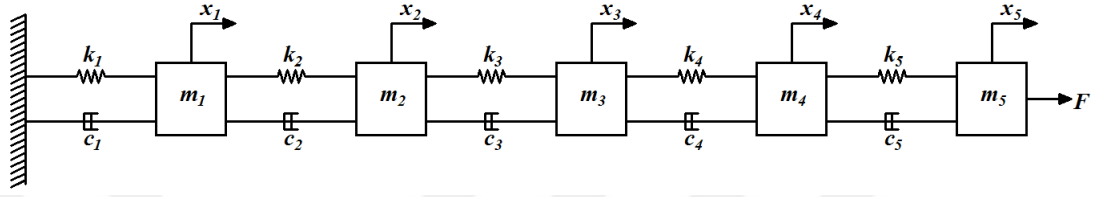
6.5. Model Güncelleme

Yapısal tasarım ve analiz için sistemlerin dinamik özelliklerini temsil eden doğru matematiksel modeller kurmak mühendislik uygulamalarında oldukça önemli bir süreçtir. Model güncelleme yapıların analitik modelleri ile ölçölen veriler arasındaki korelasyonu sağlamak için geliştirilen bir yöntemdir. Bu yöntemle güncellenmiş matrisler ölçölen yapısal tepkileri sağlarken ilk oluşturulan analitik matrislere de en

yakın sonuçları vermektedir. Literatürde çok sayıda model güncelleme yöntemi geliştirilmiştir (Mottershead ve Friswell, 1993). Baruch (1982) model güncellemede Lagrange çarpanı yöntemini önermiştir. Bu yöntemde genellikle kütle matrisinin ya da rijitlik matrisinin kesin olduğu varsayılmaktadır. Güncellenmiş sistem matrislerini elde etmek için belirlenen amaç fonksiyonu Lagrange çarpanları ile en aza indirilmeye çalışılır. Matris karıştırma yöntemi (matrix mixing method) model güncellemede kullanılan bir diğer metod olarak literatürde yer almıştır (Caesar, 1987; Jeffery, 1987). Bu yöntem kütle ve rijitlik matrislerinin tersini almak suretiyle deneysel modal datalarla analitik verileri birleştirmeyi amaçlamaktadır. Hata matrisleri yöntemi ise kütle ve rijitlik matrislerindeki hataların tahminine dayanmaktadır (Sidhu ve Ewins, 1984). Bu yöntemler hesaplama açısından verimli olmakla birlikte güncellenen sistem matrislerinin geçerliliği konusunda soru işaretleri oluşturmaktadır. 1990'lı yıllarda model güncelleme çalışmalarında özdeğer çözümleri ve frekans tepki fonksiyonları gibi iteratif yöntemler öne çıkmaya başlamıştır (Fritzen ve Zhu, 1991; Natke, 1988). Lin ve Ewins (1994) ölçülen ve analitik veriler arasındaki farkın güncellenecek parametrelerin doğrusal bir fonksiyonu olarak yazıldığı iteratif bir frekans tepki fonksiyonu yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemlerin yanı sıra son yıllarda model güncelleme çalışmalarında sinir ağları ve genetik algoritma gibi yeni yöntemlerde uygulanmıştır (Lu ve Tu, 2004; Standoli ve ark, 2021). Bu yöntemlerin avantajları olmakla birlikte karmaşık çözümlere ihtiyaç duyulması ve hesap yoğunluğu oluşturması açısından uygulanması oldukça zahmetlidir. Yapısal sistemlerde özellikle sönümlemenin karmaşık mekanizması sebebiyle sönüm matrisinin parametreleştirilmesi kütle ve rijitlik matrislerine göre daha zordur (Lin ve Zhu, 2006). Bu tez çalışmasında uygulamada hesap yükünü azaltan ve kompleks süreçlere ihtiyaç duymayan simülasyon tabanlı bir model güncelleme yöntemi önerilmiştir (Daowd ve ark, 2010). Bu yöntem deney verilerinin MATLAB ortamına aktarılması ve burada oluşturulan sisteme ait simülasyon modelindeki sönüm ve rijitlik matrislerinin güncellenmesi esasına dayanmaktadır. Güncellenecek parametreler seçilirken bina modelinin deprem etkisi altındaki davranışı ve serbest titreşim testi sonuçları dikkate alınmıştır.

6.5.1. Serbest titreşim davranışının simulink ortamında modellenmesi

Bina modelinin dinamik parametrelerini güncelleyerek gerçek yapısal davranışa yakın sonuçlar elde etmek amacıyla simülasyon temelli bir model güncelleme tekniği uygulanmıştır. Bu tekniğin uygulanması için öncelikle yapısal sistemin serbest titreşimini temsili eden bir simülasyon modeli hazırlanmıştır. Simülasyon çalışmasında beş katlı kayma çerçevesini temsil eden mekanik model Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Beş katlı kayma çerçevesinin mekanik modeli.

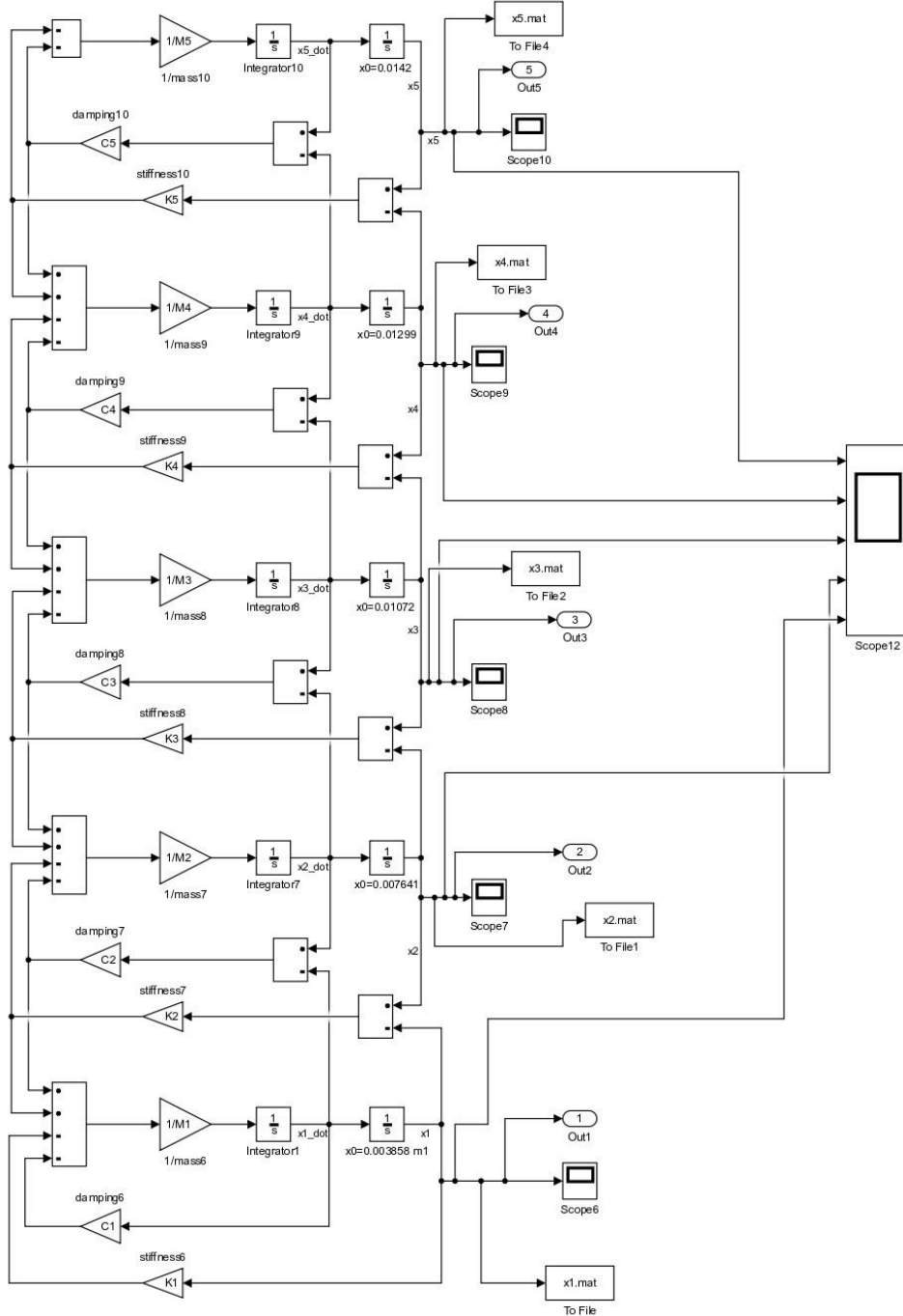
Çok serbestlik dereceli bina modelinin sönümlü serbest titreşimini ifade eden hareket denklemi,

$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = 0 \quad (6.15)$$

bağıntısıyla gösterilmektedir. Bu denklemde $M_s, C_s, K_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sırasıyla yapısal kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $x(t), \dot{x}(t)$ ve $\ddot{x}(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ ise yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini ifade etmektedir. Serbest titreşim testi sisteme bir başlangıç yer değiştirmesi verilerek bina modeline uygulandığı için hareket denkleminde $F = 0$ olarak alınmıştır. Şekil 6.8’de sunulan mekanik modele göre her kütle için Newton’un ikinci hareket yasası yazılacak olursa,

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -k_1 \cdot x_1 - c_1 \cdot \dot{x}_1 + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_3(x_3 - x_2) + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \\ m_3 \ddot{x}_3 &= -k_3(x_3 - x_2) - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_4(x_4 - x_3) + c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) \\ m_4 \ddot{x}_4 &= -k_4(x_4 - x_3) - c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + k_5(x_5 - x_4) + c_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) \\ m_5 \ddot{x}_5 &= -k_5(x_5 - x_4) - c_5(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) \end{aligned} \quad (6.16)$$

elde edilir. Bu denklem takımı bina simülasyon modelinin matematiksel alt yapısını oluşturmaktadır. Teorik alt yapısı belirlenen bina modelinin serbest titreşim hareketi benzetimi Simulink ortamında blok diyagramlar kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Bina modelinin serbest titreşimini temsil eden blok diyagram.

Şekil 6.9'daki blok diyagram şemasında görüldüğü gibi her katın kütle, rijitlik ve sönüm katsayıları ayrı bloklar halinde modellenmiştir. Klasik yöntemle hesaplanan kütle matrisindeki elemanlar simülasyon modeli içerisinde aynen uygulanmıştır. Bina modeli basit bir yapıya sahip olduğundan kütle matrisinin kesin olduğu kabul edilmiştir. Burada güncellenecek olan yapısal parametreler sönüm ve rijitlik matrisleridir. Deneysel ölçümlerden elde edilen başlangıç yer değiştirmeleri simülasyon içerisinde her kata başlangıç koşulu olarak atanmıştır. Bu başlangıç koşulları altında sistem çalıştırıldığında elde edilen yapısal tepkilerin deneysel ölçümlerle tutarlı sonuçlar vermesi için uygulanan model güncelleme çalışması bir sonraki alt bölümde detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

6.5.2. Model parametrelerinin güncellenmesi

Bina modelinin dinamik parametrelerini güncellemek için Matlab/Simulink yazılımı ile simülasyon tabanlı bir yöntem uygulanmıştır. Benzetim modelini analiz etmek ve ayarlamak için yazılımın Simulink Design Optimization araç çubuğu kullanılmaktadır (Mathworks, 2022). Bu modül içerisinde Monte Carlo Yöntemi ve Deney Tasarımı gibi teknikler ile simülasyon modelindeki parametrelerin etkisi hesaplanabilmektedir. Monte Carlo simülasyonu belirsiz bir olayın olası sonuçlarını tahmin etmek için kullanılan matematiksel bir tekniktir. Deney tasarımı ise sistemdeki girdi değişkenleri ile çıktı değişkenleri arasındaki ilişkiyi incelemeyi sağlayan sistematik bir yöntemdir. Bu araç çubuğunun bir modülü olan Parameter Estimation ile test verileri modele yüklenir ve simülasyon modeli içerisinde seçilen yapısal parametreler otomatik olarak tahmin edilir. Ölçüm verileri kullanılarak aynı anda birden fazla parametre tahmini yapılabilir. Yazılım, parametre tahminini bir optimizasyon problemi olarak formüle eder ve bu problemin çözümü tahmin edilen tasarım değişkenleridir. Kullanılan optimizasyon probleminin elemanları şu şekilde sıralanabilir (Mathworks, 2022).

- Tasarım değişkenleri, (x) : Tahmin edilen model parametrelerini ifade etmektedir.

- Amaç fonksiyonu, $F(x)$: Benzetimi yapılan ve ölçülen yanıtlar arasındaki farkı hesaplar. Bu ifade, maliyet fonksiyonu veya tahmin hatası olarak da isimlendirilmektedir.
- Sınırlar, $(\underline{x} \leq x \leq \bar{x})$: Tahmin edilen parametrelerin limitlerini belirlemektedir. Opsiyonel bir işlemdir.
- Kısıtlama fonksiyonu, $C(x)$: Tasarım değişkenleri üzerindeki kısıtlamaları ifade etmektedir. Opsiyonel bir işlemdir.

Optimizasyon çözücüsü, belirtilen amaçları ve kısıtları karşılamak için tasarım değişkenlerinin değerlerini ayarlar. Optimizasyonun tam formülasyonu kullanılan yöntemle bağlıdır. Yazılım, ölçülen tepki veya referans sinyali (y_{ref}) izleyen bir simülasyon yanıtı (y_{sim}) elde etmek için model parametrelerini ayarlar. Çözücü bu parametreleri ayarlamak için benzetilen ve ölçülen yanıtlar arasındaki farkı ifade eden tahmin hatasını en aza indirmeye çalışır. Tahmin hatasının formülasyonu aşağıdaki bağtıda gösterilmiştir.

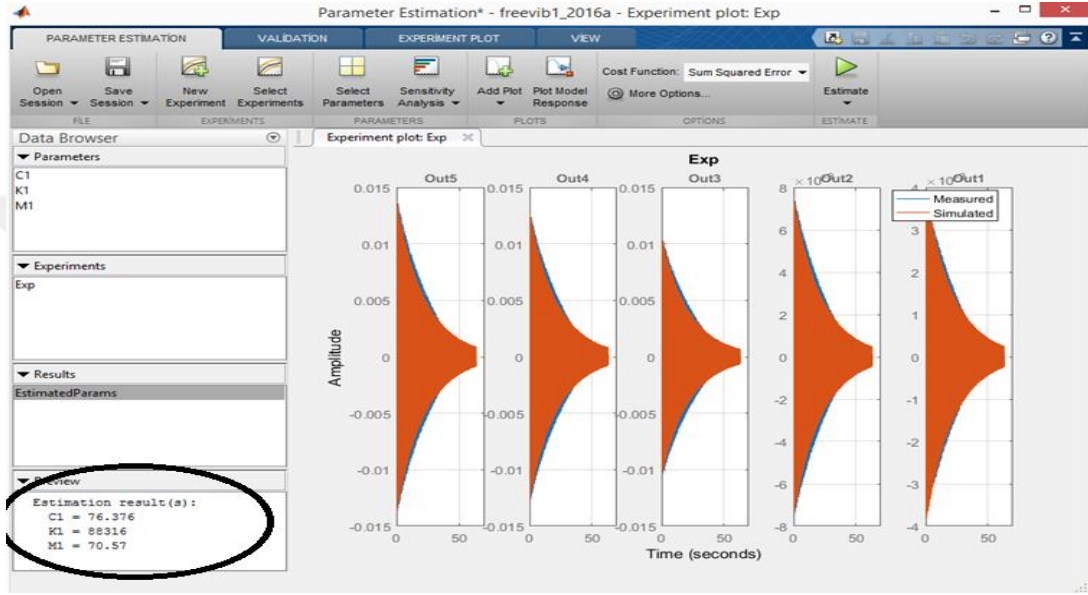
$$e(t) = y_{ref}(t) - y_{sim}(t) \quad (6.17)$$

Yazılım kullanıcıya tahmin hatasını işlemek amacıyla çeşitli maliyet fonksiyonları da sunmuştur. Bu maliyet fonksiyonları ve formülasyonları Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

Tablo 6.2. Amaç fonksiyonları ve formülasyonları (Mathworks, 2022).

Maliyet Fonksiyonu	Formülasyon
Hata kareleri toplamı (SSE)	$F(x) = \sum_{t=0}^{t_N} e(t) \times e(t)$
Mutlak hata toplamı (SAE)	$F(x) = \sum_{t=0}^{t_N} e(t) $
Ham hata (RE)	$F(x) = \begin{bmatrix} e(0) \\ \vdots \\ e(N) \end{bmatrix}$
N = Örnekleme sayısını göstermektedir.	

Bu tez kapsamında kullanılan simülasyon esaslı model güncelleme yönteminde Matlab/Simulink yazılımı içerisindeki Parameter Estimation modülü kullanılmıştır (Şekil 6.10). Bina modelinin rijitlik ve sönüm matrisi elemanları optimizasyon problemindeki tasarım değişkenleri olarak seçilmiştir. Sistemin amaç fonksiyonu yazılımda default olarak çalışan SSE yöntemidir. Tasarım değişkenleri klasik yöntemle elde edilen değerlere yakın bir aralıkta sınırlandırılmıştır. Böylece optimizasyonun teorik değerlerden uzaklaşmaması amaçlanmıştır.



Şekil 6.10. Model güncelleme çalışmaları ara yüzü.

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi bina modelinin serbest titreşim ölçümüyle elde edilen tüm katlarına ait yer değiştirme değerleri simülasyon modelinin deneysel verilerini oluşturmaktadır. Tahmin edilecek parametreler rijitlik ve sönüm katsayıları olarak seçilmiştir. Program, ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında minimum hata ile en uygun katsayıları belirlemeye çalışarak sayısal model ile deneysel sonuçlar arasındaki farkı azaltmaya çalışmaktadır. Deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlara en yakın simülasyon modeli tahmin edilen tasarım değişkenleri ile elde edilmiştir. Buna göre bina modelinin simülasyon tabanlı model güncelleme tekniği ile hesaplanan güncellenmiş rijitlik ve sönüm matrisleri aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir. Klasik yöntemle hesaplanan kütle matrisi kesin kabul edildiği için simülasyon modeli içerisinde herhangi bir değişikliğe uğramamıştır.

$$K_s = \begin{bmatrix} 176632 & -88316 & 0 & 0 & 0 \\ -88316 & 176632 & -88316 & 0 & 0 \\ 0 & -88316 & 176632 & -88316 & 0 \\ 0 & 0 & -88316 & 176632 & -88316 \\ 0 & 0 & 0 & -88316 & 88316 \end{bmatrix} N/m \quad (6.18)$$

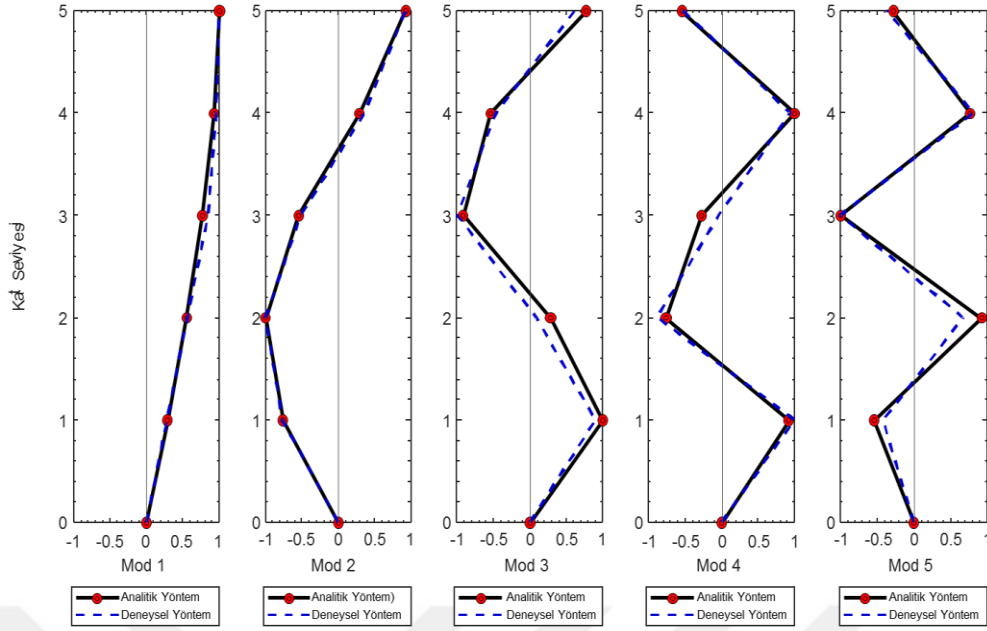
$$C_s = \begin{bmatrix} 152.752 & -76.376 & 0 & 0 & 0 \\ -76.376 & 152.752 & -76.376 & 0 & 0 \\ 0 & -76.376 & 152.752 & -76.376 & 0 \\ 0 & 0 & -76.376 & 152.752 & -76.376 \\ 0 & 0 & 0 & -76.376 & 76.376 \end{bmatrix} Ns/m \quad (6.19)$$

Güncellenen model parametreleri ile yapısal sistemin ilk beş moduna ait titreşim frekansları karşılaştırmalı olarak Tablo 6.3’de sunulmuştur.

Tablo 6.3. Titreşim frekansları karşılaştırma tablosu.

Mod No	Frekans Değerleri (Hz)		
	Analitik	Deneysel	Güncellenmiş
1	1.67	1.61	1.60
2	4.88	4.83	4.68
3	7.69	8.00	7.38
4	9.87	9.95	9.48
5	11.27	11.38	10.81

Deneysel çalışmada kullanılan bina modeli karmaşık bir yapıya sahip olmayan küçük ölçekli bir sistemdir. Tablo 6.3’de görüldüğü üzere sistemin hesaplanan analitik, deneysel ve güncellenmiş doğal frekansları birbirleriyle uyumludur. Buradan kullanılan sistem tanılama tekniklerinin doğal frekansları doğru bir şekilde tahmin ettiğini söylemek mümkündür (Kudu ve ark, 2015). Bina modelinin güncellenmiş sistem parametreleriyle analitik ve deneysel olarak hesaplanan mod şekilleri Şekil 6.11’de gösterilmiştir.

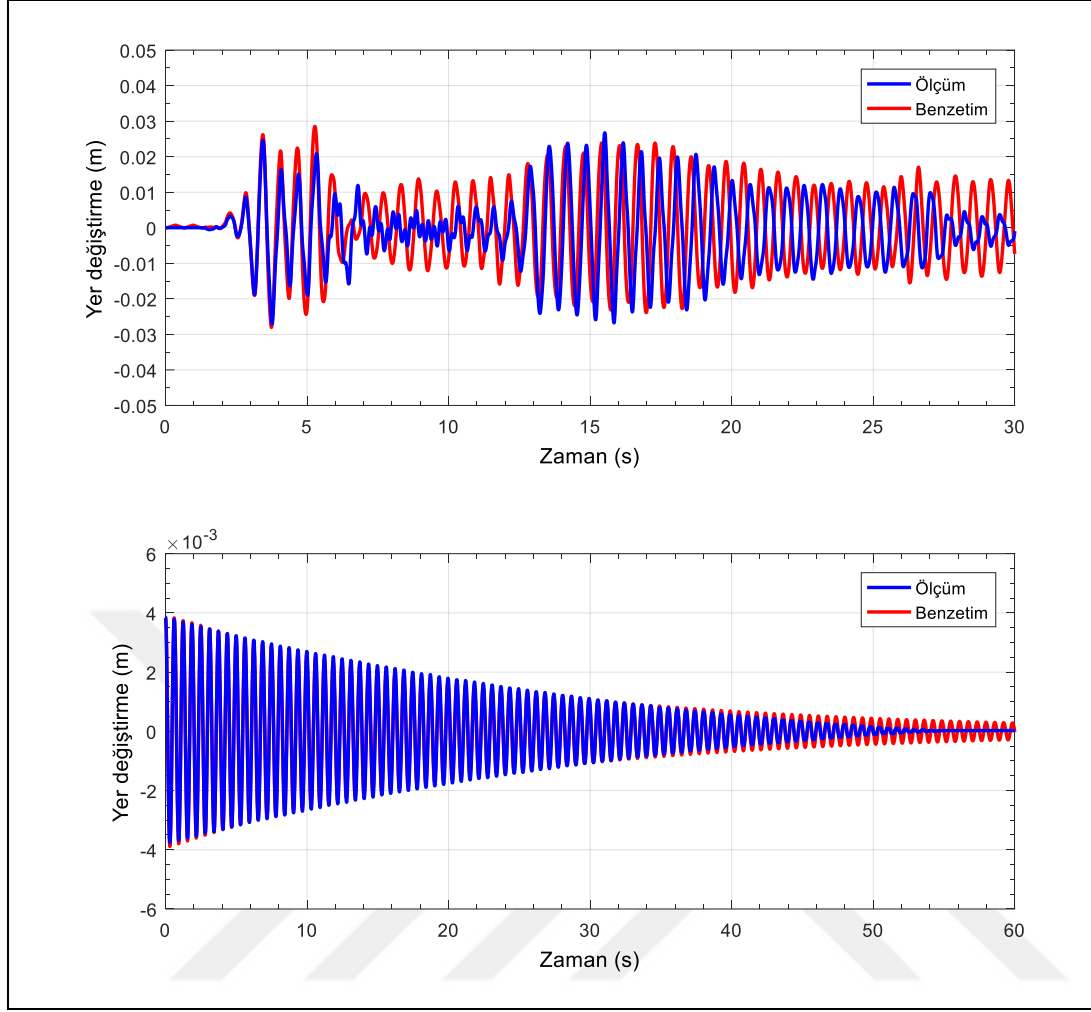


Şekil 6.11. Güncellenmiş parametrelerle hesaplanan analitik ve deneysel mod şekilleri karşılaştırma grafiği

Şekil 6.11’de güncellenmiş sistem matrislerinin kullanıldığı analitik yöntem ve deneysel olarak elde edilen mod şekilleri karşılaştırılmıştır. Klasik yöntemle hesaplanan mod şekillerine göre model güncelleme yöntemi ile tüm modlarda deneysel yöntem sonuçlarına daha yakın değerler elde edilmiştir. Özellikle yüksek frekanslarda güncellenmiş sistem parametreleri ile hesaplanan mod şekillerinin deneysel sonuçlarla daha fazla uyum sağladığı dikkat çekmektedir.

6.5.3. Bina modelinin güncellenmiş sistem parametreleri ile dinamik davranışının değerlendirilmesi

Bina modelinin analitik olarak hesaplanan sistem matrisleri gerçek dinamik davranışa yakın sonuçlar elde etmek amacıyla simülasyon tabanlı bir güncelleme tekniği ile revize edilmiştir. Model binanın serbest titreşim ve deprem davranışı güncellenmiş sistem parametreleriyle de araştırılmıştır. Yapısal sistemin dinamik davranışının ölçüm ve benzetim sonuçları Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Bu grafik incelendiğinde deprem etkisi altındaki bina modelinin benzetim ve ölçüm genlik değerlerinin birbirine yaklaştığı görülmektedir. Yapısal sistemin sönüm matrisinin güncellenmesi gerçek dinamik davranışa yakınsayan sonuçlar üretmiştir.



Şekil 6.12. Bina modelinin 1.katına ait yer değiştirme zaman grafikleri (üst) El Centro depremi (alt) Serbest titreşim testi

Grafiğin ilk 40 saniyesindeki serbest titreşim verileri incelendiğinde ise ölçüm ve benzetim sonuçlarının uyumlu bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Ayrıca model güncelleme çalışmalarından sonra ölçüm ve benzetim sonuçları arasındaki faz farkının da ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. Yapısal sistemin rijitlik katsayılarının güncellenmesi serbest titreşim verilerindeki faz farkını ortadan kaldırırken genliklerin de birbiriyle daha uyumlu ilerlemesini sağlamıştır. Sonuçlar, simülasyon modelinin binanın gerçek serbest titreşim ve deprem davranışını iyi bir şekilde yansıttığını göstermektedir. Bundan sonraki bölümde anlatılacak olan MR damper ile yarı aktif kontrollü bina modelinin simülasyon yöntemi ile doğrulanması kısmındaki yapısal sistemin teorik alt yapısında güncellenmiş sistem parametreleri kullanılacaktır.

7. MR DAMPER İLE YARI AKTİF KONTROL EDİLEN BİNA MODELİNE AİT SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu bölümde MR damper ile yarı aktif olarak kontrol edilen beş katlı bina modeline ait deneysel sonuçların simülasyon modelleriyle doğrulanması aşaması anlatılacaktır. Yapısal kontrol çalışmalarında ideal olan uygulama, önerilen her kontrol yönteminin uygun koşullar altında deneysel olarak incelenmesidir (Ohtori ve ark, 2004). Ancak araştırmacılar için yapısal kontrol, küçük ölçekli testler de bile hem finansal hem de lojistik açıdan zorlu bir süreçtir. Kontrol tasarımını daha pratik ve uygulanabilir bir hale getirmek için simülasyon çalışmalarından faydalanılmaktadır. Böylece deneysel çalışmaların verimliliğinin değerlendirilmesi ve tam ölçekli yapısal kontrol çalışmalarının da önünün açılması hedeflenmiştir.

7.1. Simülasyon Yapısı

Sistem simülasyonu modern toplumlarda en yaygın kullanılan araçlardan biridir. Simülasyon hava tahmininden ekonomik analize, robotikten bilgisayar animasyonuna kadar sadece mühendisler için değil aynı zamanda her branştan analist ve tasarımcı için ortak bir araç haline gelmiştir. Bilgisayar simülasyonu belirli bir sistemin zaman içinde nasıl geliştiğini modelleyen diferansiyel denklemlerin sayısal bir çözümüdür (Kulakowski ve ark, 2007). Genel olarak simülasyon çalışmasının bileşenleri şu şekilde sıralanabilir;

- Matematiksel modelin yapısı: Dinamik sistemin davranışını temsil eden temel fiziksel yasaların belirlenmesi ve diferansiyel denklemlerin çözümüdür.
- Model parametre değerleri: Model parametreleri genellikle simülasyon boyunca değişmeyen sabit sayısal ifadeleri temsil eder. Mekanik sistemler için bu parametreler kütle, sönüm ve rijitlik katsayılarıdır.
- Başlangıç koşulları: Diferansiyel denklemlerin çözümü için başlangıç koşullarının belirlenmesi son derece kritiktir.
- Girişler: Tipik olarak bir sistem bir veya daha fazla girişe yanıt verir. Simülasyonlar girdi değerlerini de içermelidir.

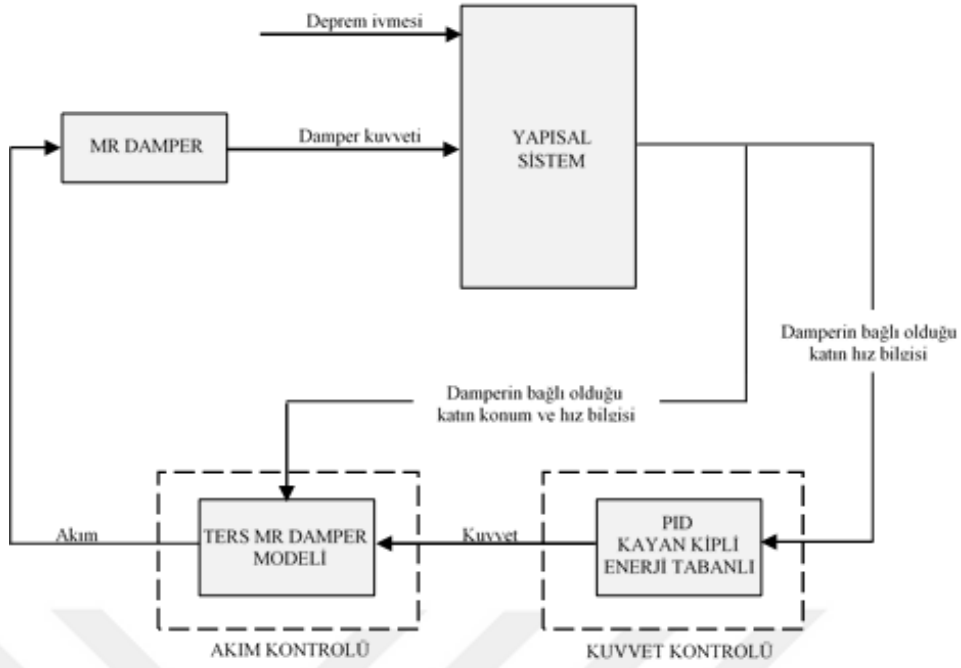
- Çıkışlar: Simülasyonda kullanıcı çıktıları açıkça tanımlamasa bile dinamik bir sistemde belirli fiziksel değişkenlerin bir zaman geçmişi vardır. İstenen çıkış değerlerinin zaman geçmişi daha sonra analiz için saklanabilir veya ekranda grafik olarak görüntülenebilir.
- Simülasyon kontrol parametreleri: Simülasyonun arka planında çalışan sayısal yöntemlerde tasarımcının seçtiği zaman adım sayısı, hata toleransı ve algoritma gibi parametrelerdir.

Bilgisayar simülasyonunun temelinde integrasyon süreci vardır. Alt bölüm 4.2’de dinamik sistem için durum uzay teorisi anlatılmıştır. Bu teori çalışma içerisinde uygulanan simülasyon yönteminin temelini oluşturmaktadır.

7.2. Simülasyon Blok Diyagramları

Sistem elemanları arasındaki dinamik etkileşimler geliştirilen matematiksel yasalarla (Newton’un ikinci prensibi vb.) tanımlanmaktadır. Blok diyagramlar ise bu dinamik etkileşimlerin nasıl meydana geldiğini görselleştirmede tasarımcılara yardımcı olur. Yarı aktif kontrollü bina modelinin genel blok diyagramında yer alan her blok bir matematiksel işlemi temsil etmektedir. Blok diyagramlar ilk olarak dinamik sistemlerin performansını simüle etmek için analog bilgisayarlarda kullanılmıştır. Bugüne gelindiğinde ise sistem simülasyonu için tasarlanan tüm paket programlar blok diyagramlar kullanmaktadır (Kulakowski ve ark, 2007). Bu bölümde anlatılan simülasyon çalışması için Matlab/Simulink paket programı kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında uygulanan yarı aktif kontrol yöntemlerini simülasyon çalışmalarıyla doğrulamak amacıyla Sakarya Üniversitesi Deprem Laboratuvarı’nda deneysel olarak test edilen beş katlı ve tek MR damperli bina modeli kullanılmıştır. Bina modelinin deneysel olarak ölçülen dinamik tepkileri üç farklı kontrolör için sayısal olarak doğrulanmıştır. MR damper ile yarı aktif kontrol edilen yapısal sisteme ait genel blok diyagramı Şekil 7.1’de sunulmuştur.

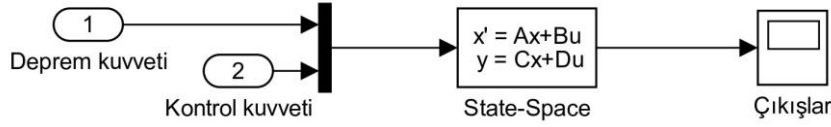


Şekil 7.1. Yarı aktif kontrol sisteminin genel blok diyagramı.

Şekil 7.1’de gösterilen yarı aktif kontrol şemasında yer alan alt bloklar şu şekilde oluşturulmuştur.

7.2.1. Yapısal sistem bloğu

Yarı aktif kontrollü sistemde yer alan yapısal sistem bloğu bina modelinin dinamik davranışını temsil etmektedir. Bu blok için giriş sinyalleri uygulanan deprem kuvveti ve damperin uygulayacağı kontrol kuvvetinden oluşmaktadır (Şekil 7.2). Yapısal sistem bloğunun çıkış değişkenleri ise beş katlı bina modelinin birinci katına ait hız ve deplasman değerleridir. Yapısal sistem bloğunda yer alan alt bloklardan state-space (durum-uzay gösterimi) bloğu deneysel çalışmada kullanılan model binanın matematiksel ifadelerini içermektedir. Durum-uzay gösteriminin detayları alt bölüm 4.2’de anlatılmıştır. Bu blok A,B,C ve D parametrelerinden oluşan yapısal sistem matrislerini içermektedir. Simulink programı kullanıcıya diferansiyel denklemleri tek bir blok halinde uygulama olanağı sunmaktadır. Durum-uzay bloğu içerisinde kullanılan kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri model parametrelerinin güncellenmesi sonucu elde edilen değerlerdir (bkz.alt bölüm 6.5.2). Bu değerler bina modeline ait parametreler olduğu için simülasyon boyunca sabit kalmaktadır.



Şekil 7.2. Yapısal sistem bloğu elemanları.

Bu bölümde sadece beş katlı bina modelinin benzetim çalışmaları yapıldığı için yapısal sistem bloğu tüm kontrolörlerde aynı kalmıştır.

7.2.2. Kuvvet kontrolü bloğu

Kuvvet kontrolü bloğu MR damperin uygulayacağı referans kuvveti hesaplayan bloktur. Yapısal sistem bloğunun çıkış sinyallerini oluşturan değerler kuvvet kontrolü bloğunun giriş sinyalini oluşturmaktadır yani yapısal sistemden elde edilen dinamik tepkiler bir kontrolör vasıtasıyla damperin üretmesi gereken kuvveti hesaplar. Bu çalışmada kuvvet kontrolü için üç ayrı kontrolör tasarlanmış ve simülasyon içerisinde kullanılmıştır. Kuvvet kontrol bloğu kullanılan üç farklı kontrolör için şu şekilde oluşturulmuştur.

7.2.2.1. PID kontrolör

MR damperin üreteceği referans kontrol kuvveti ilk olarak PID kontrolör ile hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında PID kontrolörün geri besleme büyüklüğü olarak damperin bağlı olduğu katın hız değeri seçilmiştir. Deprem ivmesi etkisi altında yapı hızının sıfır olması amaçlanmaktadır. Bu durum (referans değer=0) regülatör kontrol tasarımı uygulanması demektir. Kontrolör için gerekli olan hata değeri aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$e(t) = v_{ref} - v_1 \quad (7.1)$$

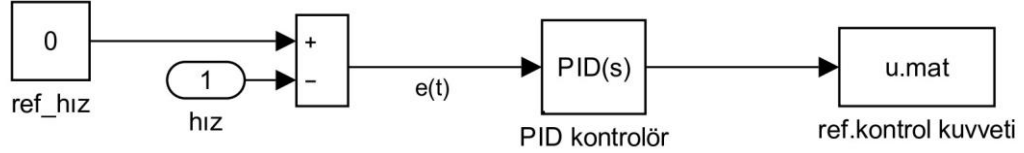
Burada v_{ref} damperin bağlı olduğu kattaki referans hızı ve v_1 damperin bağlı olduğu katın hızını temsil etmektedir. $v_{ref} = 0$ alındığında hata değeri;

$$e(t) = -v_1 \quad (7.2)$$

elde edilir. Sisteme uygulanması gereken damper kuvvetinin belirlenmesi için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$f_d = - \left[K_p v_1 + K_i \int_0^t v_1 dt + K_d \frac{dv_1}{dt} \right] \quad (7.3)$$

Yukarıda verilen bağıntılar kuvvet kontrolü bloğunda matematiksel ifadelere dönüştürülmüştür.



Şekil 7.3. PID kontrolör blok diyagramı.

Şekil 7.3’de görüldüğü gibi PID kontrolör bloğu Simulink ortamında hazır olarak bulunmaktadır. Deneysel çalışmada deneme yanılma yöntemiyle belirlenen kontrolör katsayıları PID kontrolör bloğu içerisinde aynen kullanılarak referans damper kuvveti hesaplanmıştır.

7.2.2.2. SMC kontrolör

Referans damper kuvvetinin hesaplandığı bir diğer algoritma SMC kontrolördür. Bu kontrolörde geri besleme verisi olarak damperin bulunduğu katın yer değiştirme ve hız sinyali kullanılmıştır. Algoritma içerisinde kayma yüzeyi aşağıdaki bağıntıya göre seçilmiştir.

$$\sigma = \alpha e(t) + \beta \dot{e}(t) \quad (7.4)$$

Burada $e(t)$ kontrolör için gerekli olan hata değerini göstermekte olup aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir.

$$e(t) = x_{ref} - x_1 \quad (7.5)$$

x_{ref} damperin bağlı olduğu katın referans yer değiştirmesini, x_1 ise birinci katın o anki ölçülen yer değiştirmesini göstermektedir. Referans kat yer değiştirmesinin sıfır olması amaçlandığından $e(t) = -x_1$ olmaktadır. Buna göre elde edilen genel denklem,

$$\dot{\sigma} + \lambda\sigma + \mu\text{sign}(\sigma) = 0 \quad (7.6)$$

şeklindedir. Burada $\dot{\sigma}$ kayma yüzeyindeki değişimi, μ signum fonksiyonunu ve λ , Lyapunov kararlılığından gelen pozitif değeri ifade etmektedir. Kayma yüzeyindeki değişim ise şu şekilde hesaplanmıştır.

$$\dot{\sigma} = GB(u^{eq} - u) \quad (7.7)$$

Bu denklemde $G = [\alpha \ \beta]$ olmak üzere yer değiştirme ve hız kontrolör katsayılarını göstermektedir. B model dinamiklerini içeren vektörü ve u^{eq} ise damper kuvvetinin bir önceki örnekleme zamanındaki değerini temsil etmektedir. Denklem 7.7, denklem 7.6'da yerine konulup tekrar düzenlendiğinde,

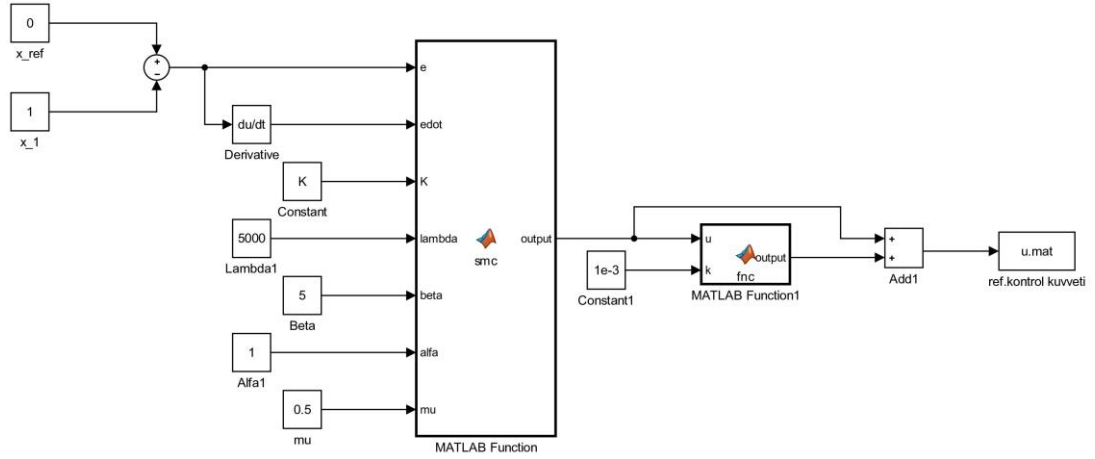
$$GB(u^{eq} - u) + (\lambda\sigma + \mu\text{sign}(\sigma)) = 0 \quad (7.8)$$

elde edilir. Bu denklemden kontrol kuvveti u ifadesi çekilip ayrık zaman için yeniden düzenlendiğinde aşağıdaki ifade elde edilir.

$$u[k] = u[k - 1] + GB^{-1}(\lambda\sigma + \mu\text{sign}(\sigma)) \quad (7.9)$$

Bu denklemde u referans damper kuvvetini ($u = f_{damper}$), k ise örnekleme zamanını göstermektedir. Kayan kipli kontrolörde deneme yanılma yöntemiyle ayarlanabilen parametreler α, β, λ ve μ 'dür. Deneysel çalışmada elde edilen kontrolör katsayıları blok diyagram içerisinde kullanılarak referans damper kuvveti hesaplanmıştır.

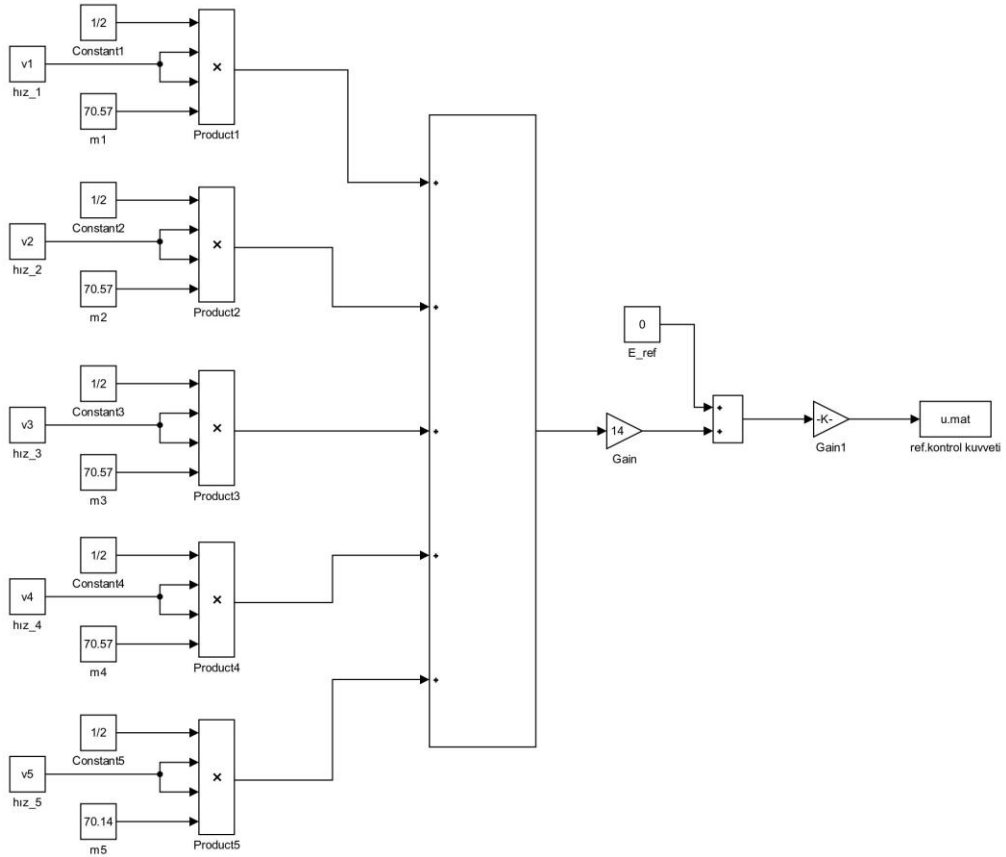
Denklem 7.9'da verilen kontrol kuvveti ifadesi kayan kipli kontrolör blok diyagramında matematiksel ifadelere dönüştürülmüştür. Bu diyagram içerisinde yer alan MATLAB Function alt bloğu kullanıcıya MATLAB arayüzünü kullanarak oluşturulan bir m-file işlemini blok içerisine uygulayabilme imkanı sunmaktadır. . Bu kontrolöre ait blok diyagram Şekil 7.4'de gösterilmiştir.



Şekil 7.4. SMC kontrolör blok diyagramı.

7.2.2.3. EBC kontrolör

EBC kontrolör, MR damperin yapısal sisteme uygulaması gereken damper kuvvetini hesaplamak üzere kullanılan üçüncü kontrol algoritmasıdır. Bu kontrolöre ait blok diyagram Şekil 7.5’de sunulmuştur.



Şekil 7.5. EBC kontrolör blok diyagramı.

Enerji optimizasyonuna bağı olarak tasarlanan bu algoritmada sisteme ait toplam kinetik enerji aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$E_{top} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} m_i v_i(t)^2 \right) \quad (7.10)$$

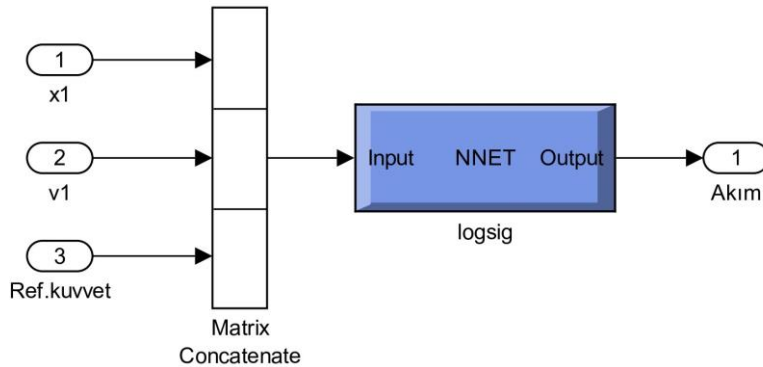
Bu denklemde, E_{top} toplam kinetik enerjiyi, m_i ilgili katın kütlesini, v_i ilgili katın hızını ve t zamanı ifade etmektedir. Bu kontrolörün amacı toplam hareket enerjisini sıfıra çekmektir. Kontrolörün hesaplayacağı damper kuvvetinin ifadesi,

$$u(t) = K E_{top} \quad (7.11)$$

şeklindedir. Bu denklemde, $u(t)$ kontrol kuvvetini ve K kontrolör katsayısını göstermektedir. EBC kontrolörde deneme yanılma yöntemiyle ayarlanabilen parametre K olmaktadır. Diğer kontrolörlerde olduğu gibi deneysel çalışmada elde edilen kontrolör katsayıları blok diyagram içerisinde kullanılarak referans damper kuvveti hesaplanmıştır.

7.2.3. Akım kontrolü bloğu

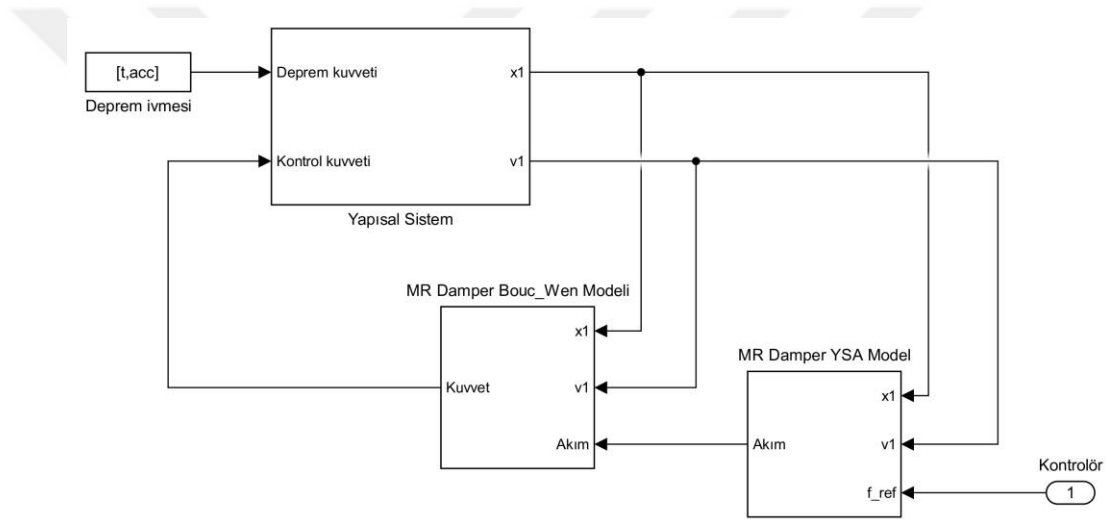
Akım kontrolü bloğunda damperin üretmesi gereken referans kontrol kuvvetine karşılık gelen akım değerleri hesaplanmaktadır. Kuvvet kontrolü bloğunda üç farklı kontrolör ile hesaplanan referans damper kuvveti ile damperin bulunduğu katın hız ve deplasman değerleri akım kontrolü bloğunun giriş verilerini oluşturmaktadır. MR damperin nonlinear yapısından dolayı akım değerleri hesaplanırken yapay sinir ağı modeli kullanılmıştır (Şekil 7.6).



Şekil 7.6. Yapay sinir ağı blok diyagramı.

7.2.4. MR damper bloğu

MR damper bloğu, yapay sinir ağı yöntemiyle hesaplanan akım değerlerine karşılık yapısal sisteme uygulanması gereken nihai damper kuvvetinin hesaplandığı bloktur. Burada MR damperin histerezis dinamik davranışını analitik olarak temsil eden Bouc-Wen modeli kullanılmıştır. Bu modele ait teorik bilgiler alt bölüm 3.4.1.2’de anlatılmıştır. MR damper Bouc-Wen modeli bloğunun giriş verileri damperin bulunduğu katın hız ve deplasman değerleri ile yapay sinir ağı yöntemiyle hesaplanan akım değeridir. Blok çıkışında elde edilen kontrol kuvveti yapısal sistem bloğuna uygulanarak yarı aktif kontrol yöntemi tamamlanmaktadır. MR damper sisteminin genel akış şeması Şekil 7.7’de, Bouc-Wen modeline ait simülasyon blok diyagramı ise EK-A’da sunulmuştur.



Şekil 7.7. MR damper blok diyagramı.

7.3. Simülasyon Çözüm Kontrolü

Dinamik sistemin özelliklerini temsil eden simülasyon bileşenlerinden bir önceki alt bölümde bahsedilmiştir. Bu bileşenlerin yanı sıra simülasyon programının diferansiyel denklemleri çözme şeklini yöneten bir dizi parametre de önem taşımaktadır. Simülasyon programlarının çoğu kullanıcıya zaman adım aralığını etkileyen integrasyon algoritmaları sunmaktadır. Genellikle standart yaklaşım olarak kabul edilen değişken zaman adımlı algoritmalar oldukça güçlüdür. Kullanıcı simülasyon sırasında maksimum ve minimum zaman adım aralığı ile hata toleransını belirlemektedir. Hata toleransı ne kadar küçükse adım boyutu da o kadar küçük

olmalıdır. Uygulamalarda genellikle simülasyon çalışma zamanı kontrolü aşağıdaki beş parametre ile tanımlanmaktadır (Kulakowski ve ark, 2007).

- İntegrasyon algoritması: Bu algoritmaların büyük çoğunluğu çözüm kontrol parametrelerinin çalıştığı kısıtlar dahilinde integrasyon zaman adımını sürekli ayarlayan uyarlanabilir zaman adım aralığı yaklaşımını kullanmaktadır.
- Başlangıç ve bitiş zamanı: Simülasyonların başlangıç zamanı genellikle $t = 0$ olarak ayarlanır. Bitiş zamanı kullanıcının belirlediği ve simülasyonun durdurulduğu zamanı temsil eder.
- Minimum adım aralığı: Bu parametre simülasyon için kullanılan zaman adımının alt sınırını temsil eder.
- Maksimum adım aralığı: Bu parametre uyarlanabilir zaman adım aralığındaki üst sınırı belirler.
- Hata toleransı: Algoritma iki integrasyon aralığı değerleri arasındaki farkı bir hata toleransı ile karşılaştırarak integrasyon adım aralığını yukarı veya aşağıya doğru ayarlar.

Bu çalışmada kullanılan simülasyon kontrol parametreleri Tablo 7.1’de özetlenmiştir.

Tablo 7.1. Simülasyon içerisinde kullanılan sistem parametreleri.

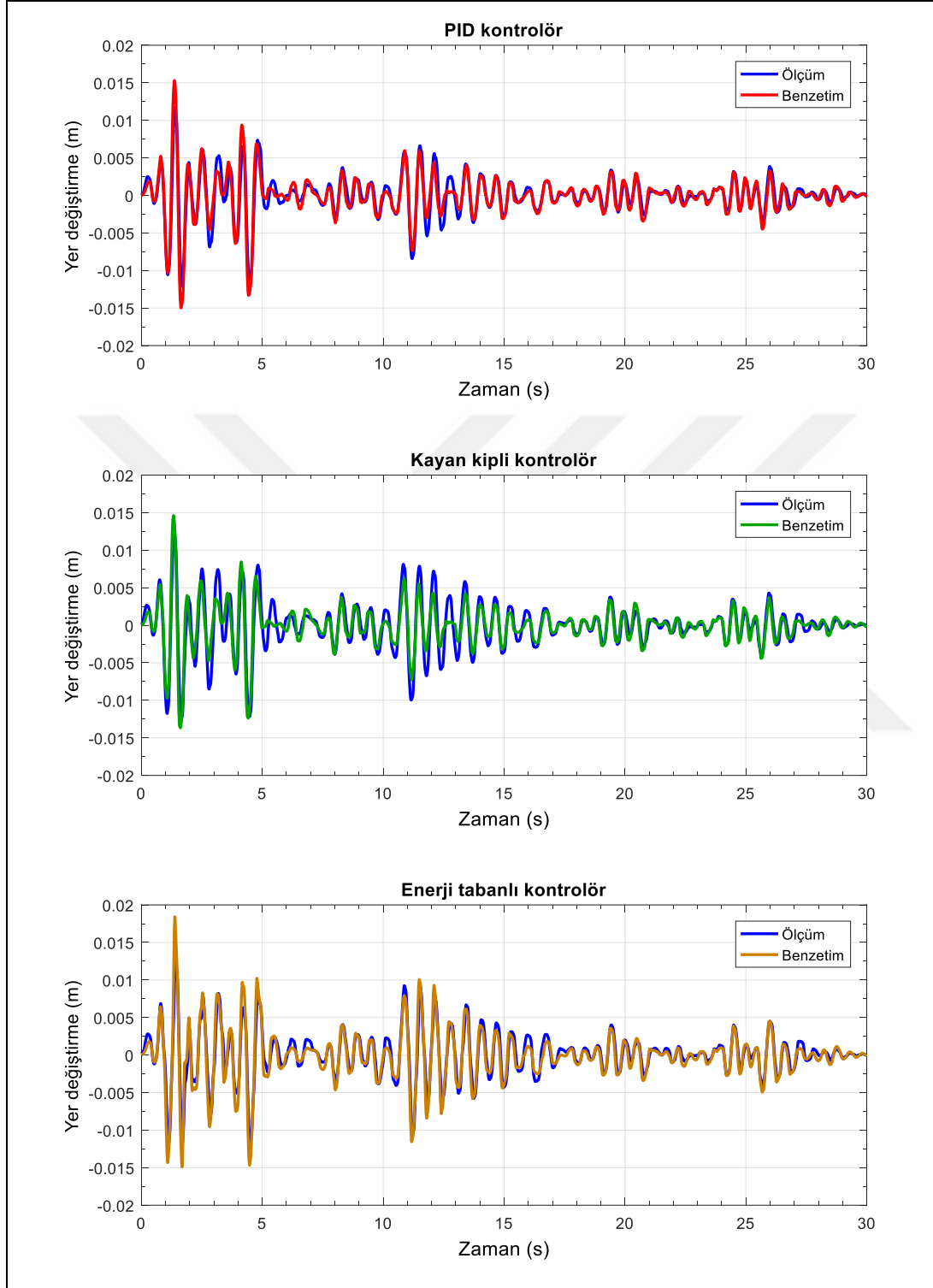
	Sembol	Değer
Model parametreleri	m	70.57 kg
	k	88316 N/m
	c	76.376 Ns/m
Başlangıç koşulları	$x(0)$	0
	$v(0)$	0
Simülasyon parametreleri	İntegrasyon metodu	ODE 45 (Dormand-Price)
	Minimum adım aralığı	Auto
	Maksimum adım aralığı	0.001 s
	Rölatif hata toleransı	0.001
	Başlangıç zamanı	0
	Bitiş zamanı	20-30 s

Simülasyon çalışmasında kullanılan diferansiyel denklemlerin çözümünde 4. Dereceden Runge-Kutto metodu tabanlı ODE45 (Dorman-Prince) çözücüsü kullanılmıştır. MATLAB yazılımı içerisinde hazır olarak bulunan bu fonksiyon sayısal integrasyonlarda adım boyutunu belirlemek ve hatayı tahmin etmek için kullanılmaktadır. ODE45, varsayılan davranışı interpolasyon kullanarak ara noktalarda hesaplayan çok hassas bir çözücüdür. Bu çalışmada yapılan tüm simülasyonların başlangıç zamanı sıfır olarak belirlenmiştir. Bitiş zamanları ise El Centro ve Kocaeli depremleri için sırasıyla 30 ve 20 s olarak belirlenmiştir. Yapısal sistemin serbest titreşim ölçümlerinin simülasyonları hazırlanırken başlangıç koşulları olarak deneysel ölçümlerdeki değerler bloklara atanmıştır. Bunun dışında, MR damper ile kontrol edilen yapısal sistemin benzetim modellerinde başlangıç koşulları sıfır olarak belirlenmiştir. Simülasyonlar maksimum 0.001 s'lik zaman adım aralığı ile gerçekleştirilmiştir. İntegrasyon algoritmasının minimum rölatif hata toleransı 0.001'dir. Yapısal sistem özellikleri simülasyon içerisinde kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri olarak atanmıştır. Burada model güncelleme çalışması sonrası elde edilen sistem parametreleri kullanılmıştır. Genel olarak simülasyon çalışmalarında yukarıda özetlenen parametrelerin en uygun değerlerinin belirlenmesi ile ilgili herhangi bir genelleme yapmak imkansızdır.

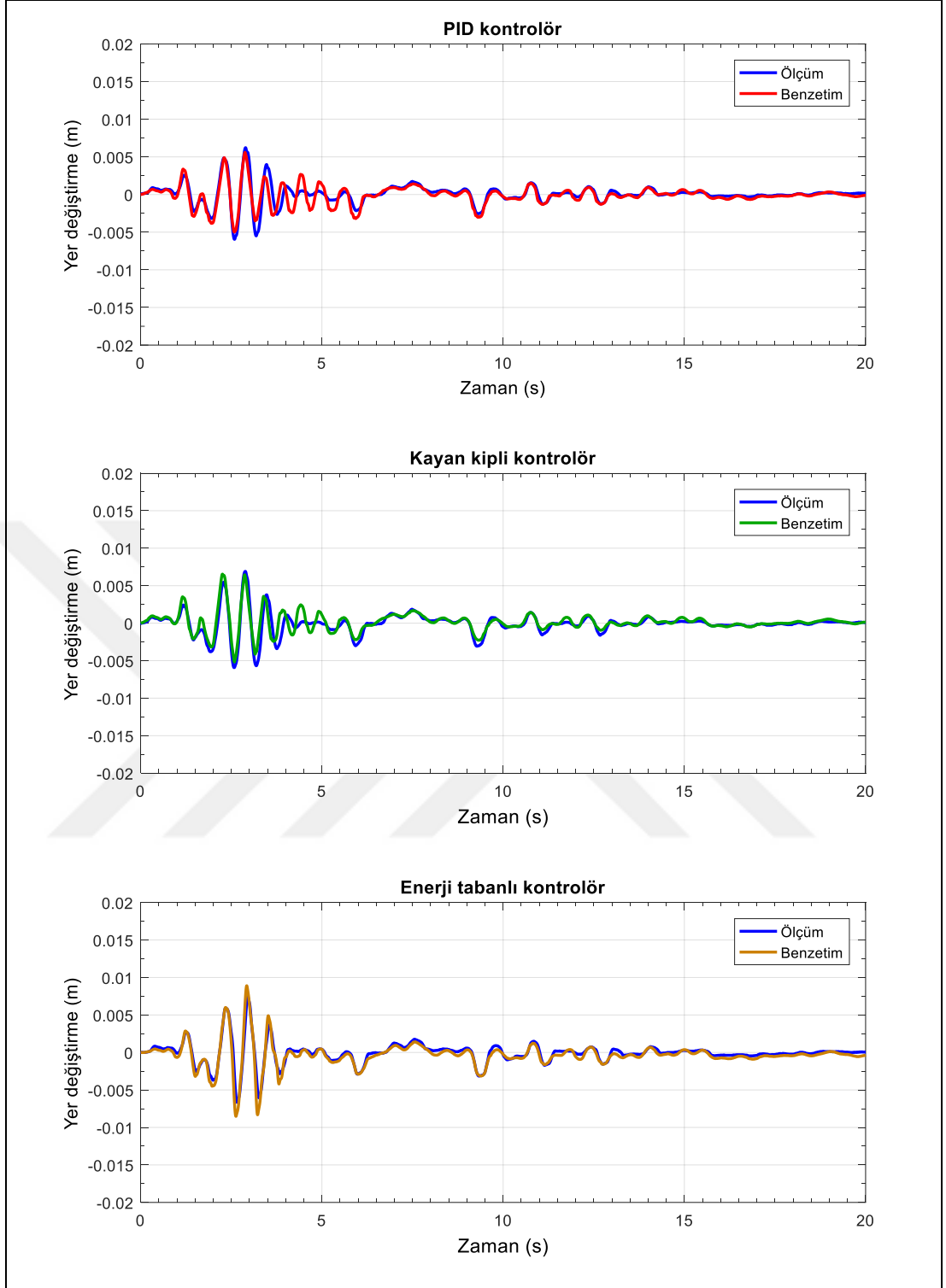
7.4. Deneysel Çalışmaların Simülasyon Modelleriyle Doğrulanması

Bu çalışmada kullanılan simülasyon modellerinin geçerliliğini ispatlamak için Sakarya Üniversitesi deprem laboratuvarında test edilen beş katlı bina modeli kullanılmıştır. Bina modelinin benzetimi önceki bölümlerde anlatılan simülasyon blok diyagramları ve simülasyon sistem parametreleriyle gerçekleştirilmiştir. Farklı deprem kuvvetleri etkisi altındaki yarı aktif kontrollü bina modelinin her kontrolör için simülasyon blok diyagramları hazırlanmış ve elde edilen benzetim sonuçları ölçüm verileriyle karşılaştırılmıştır. Yarı aktif kontrollü binanın benzetim modellerinin deneysel ölçüm sonuçlarına göre doğrulanma performansını gösteren birinci kat yer değiştirme zaman grafikleri her kontrolör için ayrı ayrı olmak üzere Şekil 7.8 ve 7.9'da sunulmuştur. Grafikler bir bütün olarak incelendiğinde; üç farklı kontrol algoritması ile edilen

benzetim sonuçlarının deneysel ölçüm sonuçları ile başarılı bir şekilde örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 7.8. El Centro deprem ivmesi etkisi altındaki yapının 1. katına ait yer değişirme zaman grafikleri.



şekil 7.9. Kocaeli deprem ivmesi etkisi altındaki yapının 1. katına ait yer değiştirme zaman grafikleri.

Bu grafikler deneysel çalışmalarda en yüksek performansı gösteren damper 1 için oluşturulmuştur. Sonuç olarak, simülasyon modellerinin deneysel çalışma sonuçlarıyla

başarılı bir şekilde doğrulandığı ve bu araştırmada kullanılan modelleme tekniklerinin MR damper ile yarı aktif kontrollü yapısal sistem davranışını yeterli oranda temsil ettiği gösterilmiştir.

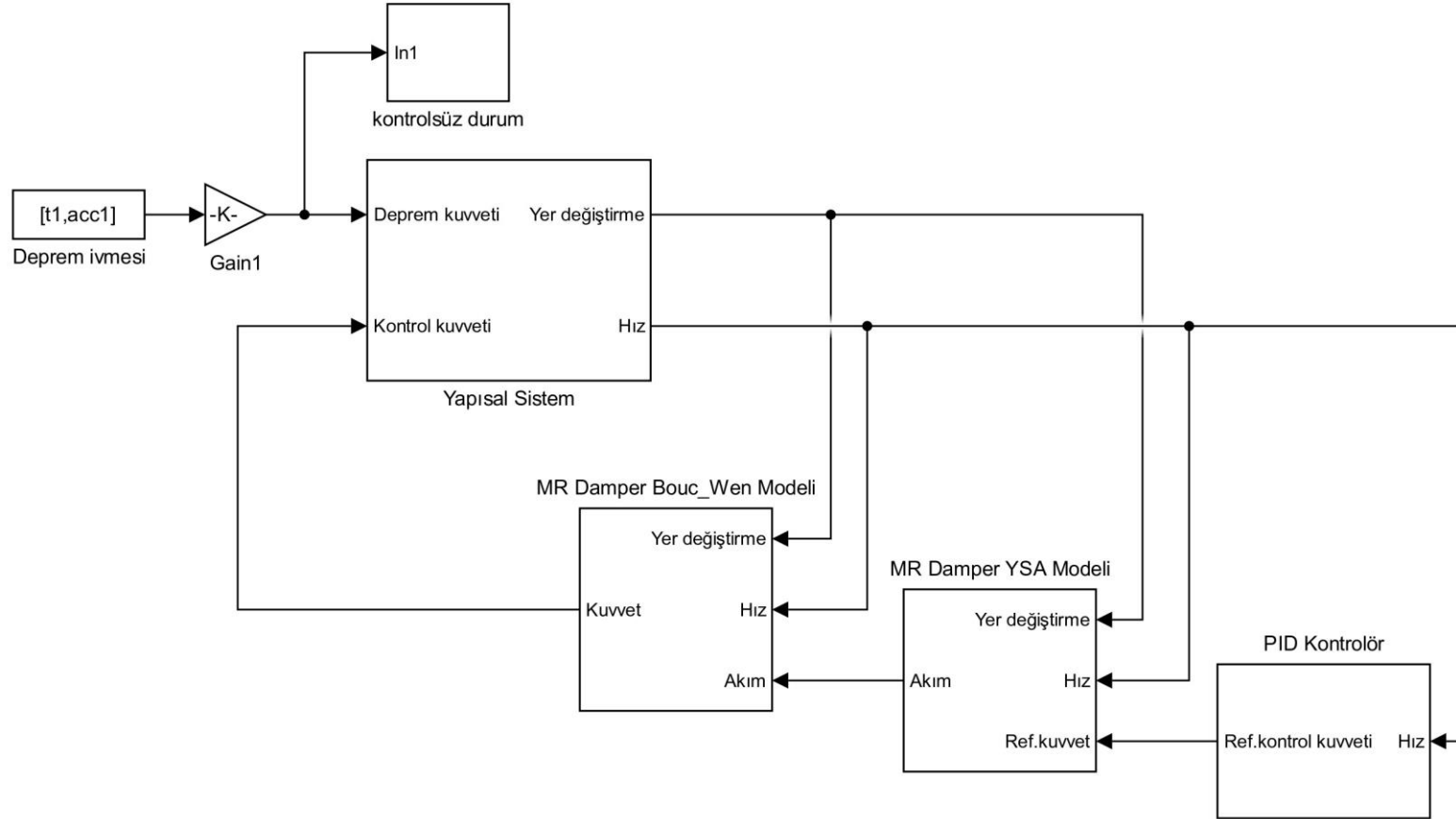


8. OPTİMUM MR DAMPER YERLEŞİMİNİN BELİRLENMESİ

Yapılarda dinamik performansın iyileştirilmesi ve titreşimlerin azaltılabilmesi amacıyla damperlerin binadaki kritik konumlara yerleştirilmesi önem arz etmektedir. Yapılarda sınırlı sayıda MR damper ile optimum yarı aktif kontrol yönteminin uygulanması için belirli gereksinimler vardır. Bunlardan en önemlisi yapılara uygulanan MR damper kontrol kuvvetinin doğru bir şekilde tahmin edilmesidir. Diğer bir deyişle, MR damperin sisteme uygulaması gereken referans kontrol kuvvetini belirleyen kontrol algoritmalarının doğru bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Ayrıca, yapısal kontrolün etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi sadece MR damper ve kontrol algoritmasının kapasitesine değil aynı zamanda damperin optimal yerleşimini de bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan üç farklı kontrolörün deneysel sonuçları simülasyon modelleriyle başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Simülasyon modellerinde kullanılan tekniklerin deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde örtüşmesi bundan sonra yapılacak olan çalışmaların simülasyon esaslı olarak gerçekleştirilmesine zemin hazırlamıştır. Buradan hareketle bu bölümde beş katlı bina modelinin katları arasında MR damperin yerini değiştirmek suretiyle yapısal tepkilerin optimum azalmasını sağlayacak yerleşim planı sayısal olarak belirlenmiştir.

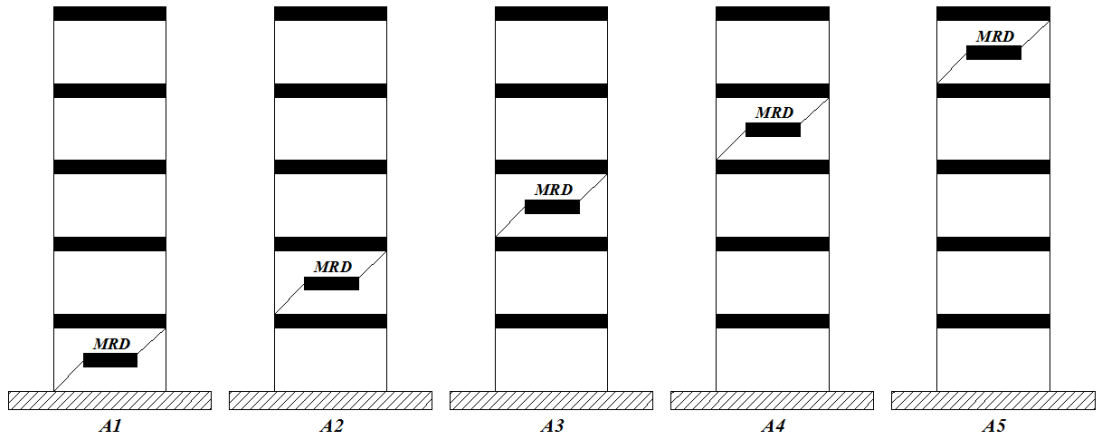
8.1. Simülasyon Çalışmaları

Simülasyon çalışmasında yapısal sisteme etki edecek kontrol kuvvetinin belirlenmesi için deneysel performansı en yüksek olan PID kontrolör uygulanmış ve bu kontrolörün katsayıları deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Benzetim modelleri Simulink yazılımı ile oluşturulmuş ve Bölüm 7’de detaylı bir şekilde anlatılan blok şemaları sayısal çözümde uygulanmıştır. Optimum MR damper yerleşiminin belirlenmesi için kullanılan yarı aktif kontrollü beş katlı bina modelinin genel simülasyon şeması Şekil 8.1’de gösterilmiştir.



Şekil 8.1. Yarı aktif kontrollü beş katlı bina modelinin genel blok diyagramı.

Simülasyon şemasında yapısal sistem bloğu, PID kontrolör bloğu, MR damper YSA modeli bloğu ve MR damperin dinamik modelini temsil eden Bouc-Wen modeli bloğu görülmektedir. Genel blok diyagramında yer alan alt bloklar Bölüm 7’de anlatılan hesaplama tekniklerine göre oluşturulmuştur. Burada değişkenlik gösteren sadece yapısal sistem bloğu içerisindeki MR damperin yerini belirten vektördür. Bu vektör $\Gamma = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ \dots \ 1]^T$ şeklinde ifade edilmekte ve damper hangi kata yerleştirildiyse vektörün ilgili kat satır elemanı 1, diğer satır elemanları 0 şeklinde değişmektedir. Yapısal sistemin sismik tepkisini gözlemleyebilmek için her simülasyonda farklı bir kata tek tip MR damper yerleştirilmiş ve sönümleyicinin farklı konumları için analizler yapılmıştır. Damper sisteminin etkinliği El-Centro ve Kocaeli deprem ivmeleri etkisi altındaki yapısal sistemde MR damperin bağlı olmadığı kontrolsüz durum ve PID kontrollü durum için incelenmiştir. Bina modelinin katları zeminden başlamak üzere 1, 2, 3 vb. şekilde numaralandırılmıştır. Farklı MR damper yerleşim modelleri A1, A2, A3...vb. olarak isimlendirilmiş ve MR damper yerleşim tipleri Şekil 8.2’de gösterilmiştir.



Şekil 8.2. Yapısal sisteme ait MR damper yerleşim tipleri.

Yapısal sistemin sismik tepkisini değerlendirmek amacıyla deplasman, ivme ve göreceli kat ötelemesi gibi çeşitli yapısal ölçümler kullanılmaktadır. Bu simülasyon çalışmasında anlamlı sonuçlar elde etmek için ise bina modellerinin dinamik davranış performansını gözlemlemek için kullanılan değerlendirme kriterleri göz önünde bulundurulmuştur (bkz. alt bölüm 5.5). Bu değerlendirme kriterleri kontrollü göreceli kat ötelemesi, ivme ve taban kesme kuvvetlerinin kontrolsüz duruma göre maksimumları ile normalize edilmiş oranlarını ifade etmektedir (Tablo 8.1).

Tablo 8.1. Değerlendirme kriterleri.

Maksimum Görelî Kat Ötelemesi Oranı	Normalize Edilmiş Görelî Kat Ötelemesi Oranı
$J_1 = \max \left[\frac{\max_{t,i} \frac{ d_i(t) }{h_i}}{\delta^{max}} \right]$	$J_4 = \max \left[\frac{\max_i \frac{\ d_i(t)\ }{h_i}}{\ \delta^{max}\ } \right]$
Maksimum İvme Değeri	Normalize Edilmiş İvme Değeri
$J_2 = \max \left[\frac{\max_{t,i} \ddot{x}_{ai}(t) }{\ddot{x}_a^{max}} \right]$	$J_5 = \max \left[\frac{\max_i \ \ddot{x}_{ai}(t)\ }{\ \ddot{x}_a^{max}\ } \right]$
Maksimum Taban Kesme Kuvveti	Normalize Edilmiş Taban Kesme Kuvveti
$J_3 = \left[\frac{\max k_1 \cdot x_1(t) }{ F_b^{max} } \right]$	$J_6 = \left[\frac{\ \max k_1 \cdot x_1(t) \ }{\ F_b^{max}\ } \right]$

8.2. Simülasyon Sonuçları

Beş katlı bina modelinin zemin katından başlamak üzere her katına tek MR damper yerleştirmek suretiyle beş farklı simülasyon modeli hazırlanmıştır. Simülasyonlar El Centro ve Kocaeli depremleri etkisi altında gerçekleştirilmiş olup yapısal tepkileri en fazla azaltan damper yeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Literatürden seçilen altı farklı değerlendirme kriteri göz önünde bulundurularak yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen veriler Tablo 8.2’de özetlenmiştir. Sonuçlar genel olarak incelendiğinde tek MR damperin farklı yerleşim tipleri için bina modelinin sismik tepkilerinde önemli ölçüde azalmalar meydana getirdiği görülmektedir. Bununla birlikte MR damper bina modelinin birinci katına konumlandırıldığında maksimum görelî kat ötelemesi değerlerinde % 40-50 civarında azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma oranı damper üst katlara doğru yerleştirildiğinde ise % 85 civarına ulaşmıştır. MR damper bina modelinin birinci katına bağliken görelî kat ötelemelerinin normalize edilmiş değeri % 64 azalmışken, üst katlara doğru bu oranının % 84’e çıktığı görülmektedir. Maksimum ivme değerini ifade eden J_2 indeksi, MR damper yapısal sistemin birinci katındayken El Centro ve Kocaeli depremleri için sırasıyla % 17 ve % 21 oranında artmıştır. MR damper bina modelinin üst katlarına yerleştirildiğinde ise maksimum ivme tepkileri kontrolsüz duruma göre daha iyi bir performans göstermiş hatta Kocaeli depremi için bu oran % 42 oranında azalmıştır.

Tablo 8.2. Damper konumuna göre performans indekslerindeki değişim oranları

Deprem ivmesi	Damper Yerleşimi	Değerlendirme Kriterleri					
		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
El Centro	A1	0.59	1.17	0.92	0.36	0.51	0.49
	A2	0.27	0.91	0.69	0.17	0.59	0.36
	A3	0.25	0.90	0.65	0.15	0.85	0.40
	A4	0.24	0.92	0.66	0.16	0.67	0.40
	A5	0.29	0.96	0.69	0.19	0.55	0.38
Kocaeli	A1	0.48	1.21	0.75	0.39	0.51	0.49
	A2	0.29	1.05	0.71	0.23	0.56	0.38
	A3	0.27	1.14	0.63	0.17	0.64	0.32
	A4	0.16	0.58	0.42	0.17	0.52	0.27
	A5	0.26	1.15	0.54	0.21	0.59	0.33

Kontrolör, J_5 ile ifade edilen normalize edilmiş ivme değerindeki en iyi performansı % 49'luk bir azalma oranıyla MR damperin birinci katta bulunduğu durumda göstermiştir. MR damperin üst katlara yerleştirilmesi durumunda El Centro depremi için kontrolörün performansı düşmekle birlikte Kocaeli depreminde benzer performans seviyeleri öne çıkmaktadır. Maksimum taban kesme kuvvetini temsil eden ve bu tez çalışmasında en çok dikkate alınan J_3 değerlendirme kriteri, MR damperin zemin katta bulunduğu durumda El Centro ve Kocaeli depremleri için sırasıyla % 8 ve % 25 oranında azalmıştır. Normalize edilmiş taban kesme kuvvetleri her iki deprem ivmesi etkisi altında MR damper birinci katta konumlandırılığında kontrolsüz duruma göre % 51 oranında bir azalma sağlamıştır. Bu oran damperin üst katlara yerleştirilmesi sonucunda El Centro depremi için % 60'a ve Kocaeli depremi için ise % 73'e çıkmıştır. Tüm sonuçlar incelendiğinde performans indekslerinde en yüksek azalma oranlarının MR damperin bina modelinin dördüncü katına yerleştirildiğinde elde edildiği tespit edilmiştir. Bu örnek çalışma sadece PID kontrolörün deneme yanılma ile belirlenen katsayılarına ve küçük ölçekli yapısal sistem özelliklerine göre yapılmıştır. MR damperin her iki deprem kuvveti etkisi altında en iyi performansı dördüncü katta göstermesi bu çalışma özelinde MR sönümleyicinin optimum konumunun kontrol edilen yapısal tepki miktarlarından ve farklı depremlerden

etkilenmediğini düşündürmektedir. Literatür çalışmaları çoğunlukla tek MR damper ile kontrol edilen binalarda optimum konumun zemin ile birinci kat arasında olduğunu ifade etmektedir (Elmeligy ve Hassan, 2016). Ancak bu araştırmalar genellikle üç serbestlik dereceli sistemlerde, farklı kontrolör ve performans hedefleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların nihai sonuç değerlendirmelerinde optimum damper sayısı ve konumu ile ilgili genel bir değerlendirme yapmak için daha fazla araştırma yapılması hususu vurgulanmıştır.

Samani ve ark. (2017) yakın zamanda MR damperlerin yapısal sistem içerisindeki optimum sayısı ve konumunu belirlemek üzere bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada MR damperin kontrolü yeni bir adaptif bulanık mantık kontrolör (FLC) ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sönümleyicilerin yerleşimini ve sayısını optimize etmek üzere parçacık sürü optimizasyonu algoritması (PSO) kullanılmıştır. Önerilen PSO-FLC kontrolör El Centro depremi etkisi altındaki 3,4 ve 8 katlı üç yapısal sisteme sayısal olarak uygulanmıştır. Değerlendirme kriterleri olarak yapısal sistemlerde meydana gelen yer değiştirme, ivme ve göreceli kat ötelemeleri referans alınmıştır. Üç ve dört katlı yapısal sistemlerden elde edilen sonuçlar, MR damperin üst katlara yerleştirildiğinde yapısal tepkileri daha iyi azalttığını göstermiştir. Sekiz katlı yapısal sistemde ise MR damperin her kata yerleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Genelleştirilecek olursa MR damperin az katlı binalarda üst katlara, çok katlı binalarda ise sistemin her katına yerleştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Bu çalışma literatürden farklı sonuçlar elde etmiş olsa da bu tez kapsamında yapılan optimizasyon çalışması ile ilgili sonuçları desteklemektedir.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, deprem etkisi altındaki yapıların davranışlarının iyileştirilmesinde MR damper ile yarı aktif kontrol uygulamasının etkinliği deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Bu amaçla, sarsma tablası testleriyle deneysel olarak incelenmek üzere 5-8 katlı çelik yapılar imal edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan çelik bina deney modellerinden beş katlı olan bina modeli Türkiye yapı stoğundan seçilen aynı kat sayısına sahip gerçek betonarme bir binanın ölçümle elde edilmiş doğal frekans değerleri referans alınarak oluşturulmuştur. Titreşim kontrolünü gerçekleştirmek üzere yarı aktif sönümleyici olan MR damper çelik bina modellerinin zemin ile birinci katları arasına yatay olarak yerleştirilmiştir. Sisteme tahrik kuvveti olarak uygulanan El Centro ve Kocaeli deprem ivmelerinin genlikleri yapısal sistemleri lineer sınırlar içerisinde tutacak şekilde küçültülmüştür. Önerilen yarı aktif kontrol yöntemi kuvvet kontrolü ve akım kontrolü olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Kuvvet kontrolü bölümünde ivme ve deplasman sensörleri vasıtasıyla ölçülen yapısal tepkiler MR damperin üretmesi gereken referans kontrol kuvvetini belirlemek üzere kullanılmıştır. Bu çalışmada referans kontrol kuvvetini hesaplamak için PID, SMC ve EBC kontrolör olmak üzere üç farklı kontrol algoritması literatürde ilk kez birlikte uygulanmıştır. Hesaplanan referans kontrol kuvveti doğrudan MR damper giriş verisini oluşturamayacağı için yarı aktif kontrol yönteminin ikinci aşaması olan akım kontrolü gerçekleştirilmiştir. Akım kontrolü bölümünde kontrolörlerin hesapladığı referans sönümleme kuvvetine karşılık gelen akım değerleri yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bir ticari ve üç yerli üretim olmak üzere toplam dört farklı MR damper deneysel çalışmalarda yarı aktif kontrol cihazı olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen ölçüm sonuçlarını doğrulamak üzere beş katlı bina modelinin dinamik özellikleri analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiş ve simülasyon çalışmalarına esas sistem parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra önerilen yarı aktif kontrol sistemi yapısal sistemin özellikleri ile birlikte sayısal olarak modellenmiş ve deneysel çalışmaların simülasyon şemaları belirlenmeye çalışılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır;

- Bu çalışmada kullanılan bina modellerinin malzeme ve geometrik özellikleri aynı olmasına rağmen kat yükseklikleri dolayısıyla kütleleri ve doğal frekansları birbirinden farklıdır. Bu sebeple bina modelleri uygulanan deprem ivmesinden farklı şekilde etkilenecektir. Diğer bir deyişle bina modellerinin davranışını birlikte değerlendirmek yerine her birinin sismik performansını kendi içerisinde analiz etmek daha anlamlı bulunmaktadır.
- Deneysel çalışmada kullanılan bina modellerinin görelî kat ötelemesi grafiklerinden bina kat yüksekliği arttıkça görelî kat deplasmanının azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum yapısal davranışa en büyük katkının ağırlıklı olarak birinci modda gerçekleştiğini göstermektedir.
- İki farklı deprem ivmesi etkisi altında bina modellerinin sarsma tablası ile test edilmesi neticesinde elde edilen sonuçlara göre MR damper ile yarı aktif kontrol uygulaması yapısal titreşimleri yüksek genlik seviyelerinde % 67'ye varan bir oranla etkili bir şekilde azaltmayı başarmıştır. Bununla birlikte önerilen yöntemin düşük genlikli titreşimlerde kontrolsüz yapısal davranışta sınırlı düzeyde iyileşmeler sağladığı belirlenmiştir. Alt bölüm 6.5.3'de bina modelinin dinamik özellikleri belirlenirken kullanılan model güncelleme tekniği sonrası sunulan sistem davranış grafiklerinde sistem parametreleri her ne kadar gerçeğe yakın sonuçlar üretmiş olsa da düşük genlikteki titreşimlerde yapısal davranış uyumu yüksek genliklere göre daha azdır. Bu durumun, kontrollü yapısal davranış sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir.
- Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları altı farklı değerlendirme kriterine göre analiz edilmiştir. Bu değerlendirme kriterleri arasında taban kesme kuvvetindeki azalmayı temsil eden J_3 ve J_6 indeksleri en önemli parametreler olarak kabul edilmektedir. Taban kesme kuvvetinin azaltılması yapısal sisteme aktarılan sismik enerjinin dolayısıyla yapıdaki hareketin azalması anlamına gelmektedir. J_3 kriterinin küçültülmesi yapısal malzemelerdeki bozulma ve akma davranışının önüne geçilmesi için kritik öneme sahipken J_6 kriterinin azaltılması ise yapısal elemanlardaki yorulma problemini azaltabilir. Deneysel sonuçlara göre El Centro depremi etkisi altındaki beş katlı bina modelinde damper-1 ve PID kontrolör, altı katlı bina modelinde damper-1 ve PID kontrolör, yedi katlı bina modelinde damper-1 ve EBC kontrolör, sekiz katlı bina modelinde ise damper-3 ve SMC kontrolör J_3 kriterini en yüksek performansla azaltan damper tipi ve kontrol algoritması

olmuştur. Kocaeli depremiyle elde edilen sonuçlarda ise beş katlı bina modelinde damper-2 ve PID kontrolör, altı katlı bina modelinde damper-1 ve SMC kontrolör, yedi katlı bina modelinde damper-2 ve SMC kontrolör, sekiz katlı bina modelinde ise damper-1 ve SMC kontrolör en verimli sonuçları üretmiştir. Benzer şekilde J_6 kriteri incelendiğinde El Centro depremi etkisi altındaki beş, altı ve yedi katlı bina modellerinde PID kontrolör, sekiz katlı bina modelinde ise SMC kontrolör öne çıkmıştır. Kocaeli depremi ivmesi etkisi altındaki beş ve sekiz katlı bina modelinde PID kontrolör daha etkiliyken, altı ve yedi katlı bina modelinde ise SMC kontrolör daha başarılı sonuçlar üretmiştir. Damper-1 ve damper-3 El Centro depreminde daha yüksek performans gösterirken Kocaeli depreminde damper-1 ile damper-2 en iyi sonuçları vermiştir. Genel olarak PID ve SMC kontrolörlerin taban kesme kuvvetini azaltma oranı açısından öne çıkan algoritmalar olduğu görülmektedir. PID kontrolör doğrusal olması ve belirsizliklere karşı dayanıklı bir yapıya sahip olmamasına rağmen SMC kontrolörle benzer performans seviyeleri yakalamış hatta daha başarılı olmuştur. Bu durum basit yapısı ve uygulama kolaylığı sebebiyle MR damper ile yapısal kontrol sistemlerinde PID kontrolörün kullanılması avantajını beraberinde getirecektir. Damper tiplerine göre genel bir değerlendirme yapıldığında ise yerli üretim damper-1 yüksek performansıyla öne çıkmaktadır. Tüm çalışma sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, J_3 ve J_6 indekslerinde % 50 oranında üzerinde bir azalma kaydedilmiştir.

- Her bina modeli için farklı kontrolör ve damper tipinin başarılı sonuçlar üretmesi, uygulanan yarı aktif kontrol yönteminin yapısal sistemin doğal frekansından etkilendiğini göstermektedir. Öte yandan uygulanan deprem ivmesinden kaynaklanan farklı dinamikler de kontrolör performansını önemli ölçüde değiştirmektedir.
- Değerlendirme kriterlerinde referans karşılaştırma yöntemi olarak kullanılan kontrolsüz durum MR damperin bina modellerine bağlı olduğu ancak herhangi bir akım uygulanmadığı pasif sönümlemeyi temsil etmektedir. Yapısal sistemlerde MR damperin bulunmadığı koşuldaki doğal sismik tepkilerin yarı aktif kontrollü yapısal davranışla kıyaslanması durumunda çok daha yüksek performans değerleri elde edileceği açıktır.

- Yerli olarak üretilen MR damper çalışmada kullanılan değerlendirme kriterleri göz önünde bulundurulduğunda ticari damperden daha yüksek performans sergileyerek ülkemiz için önemli bir başarı sağlamıştır.
- Çalışmada MR damper, bina modellerinin zemin ile birinci katları arasına yerleştirilmiştir. Zemin katta konumlandırılan MR damperin kontrol performansı bina kat sayısı arttıkça düşmüştür. Özellikle yedi ve sekiz katlı test yapılarının görelî kat ötelemeleri grafiklerinden yarı aktif kontrol yönteminin alt katlarda etkin olmakla birlikte üst katlarda kayda değer bir azalma sağlayamadığı tespit edilmiştir.
- Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar simülasyon modelleriyle sayısal olarak başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Gerçekte yapısal kontrol çalışmalarını tam ölçekli yapısal sistemler imal ederek test etmek finansal ve lojistik açıdan zorlu bir süreç olduğu için deneysel verilerin simülasyon modelleriyle etkili bir şekilde elde edilmesi bundan sonraki çalışmalar için oldukça önemlidir.
- Sayısal olarak beş katlı bina modeli içerisinde damper konumunu katlar arasında değiştirmek suretiyle elde edilen sonuçlar orta yükseklikteki yapılarda MR damperin üst katlara yerleştirilmesinin kontrol performansını büyük ölçüde arttırdığını ortaya koymuştur.
- MR damper ile kontrol edilen bina modellerinde yapısal titreşimlerin azaltılması için uygulanan yarı aktif kontrol yöntemi literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça iyi performans göstermiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen bu başarılı sonuçların arka planında deney düzeneğinde yer alan kontrol ünitesindeki sarsma tablası ve kontrolcü ara yüzünün verimliliği bulunmaktadır. Ayrıca MR damperin ters dinamiklerinin modellenmesinde kullanılan yapay sinir ağı yöntemi de hassas sonuçlar elde edilebilmesine olanak sağlamıştır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonuçları dikkate alınarak gelecekte yapılması muhtemel çalışmalarda önerilen hususlar aşağıda belirtilmiştir.

- MR damperin kat sayısı fazla olan bina modellerinde özellikle üst katlarda kontrol performansının azalması tek MR damperle yarı aktif kontrolün bu yapısal sistemler için yeterli olmadığını göstermektedir. Bu sebeple kat

yükseklikleri farklı yapısal sistemlerde MR damper sayısını ve konumu değiştirerek optimum çözüme yönelik çalışmalar yapılması elzemdir.

- Çalışmada kullanılan her bina modelinde uygulanan deprem hareketine göre farklı bir kontrolör ve damper tipinin etkili olduğu görülmüştür. Buradan uygulanan kontrolörlerin deprem yer hareketinden etkilenmeyen bir yapıya getirilmesi hususunda çalışmaların sürdürülmesi önerilmektedir.
- Deneysel çalışmalarda optimum kontrolör katsayılarının deneme yanılma yöntemiyle elde edilmesi zaman ve işlevsellik açısından araştırmacıları zorlamaktadır. Bundan sonraki çalışmalarda bu katsayıların belirlenmesi için kontrolörlerle birlikte kullanılmak üzere çeşitli optimizasyon algoritmaları incelenebilir.
- Ülkemizdeki yapısal tasarım şartnamelerinde yapısal kontrol çalışmaları hükümlerinin yer alması için bu çalışma konseptinde daha fazla araştırma yapılması ve gelecekte olması muhtemel deprem tehlikesine karşı mevcut ve yeni yapılarda MR damper uygulamaları hususunda ilerleme kaydedilmesi önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2022, 3 Eylül). Türkiye Deprem Tehlike Haritası. <https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi> adresinden 3 Eylül 2022 tarihinde alınmıştır
- Aguirre, N., Ikhoulane, F., & Rodellar, J. (2011). Proportional-plus-integral semiactive control using magnetorheological dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 330(10), 2185–2200. <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2010.11.027>
- Ahamed, R., Choi, S. B., & Ferdaus, M. M. (2018). A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(10), 2051–2095. <https://doi.org/10.1177/1045389X18754350>
- Aldawod, M., Samali, B., Naghdy, F., & Kwok, K. C. S. (2001). Active control of along wind response of tall building using a fuzzy controller. *Engineering Structures*, 23(11), 1512–1522. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00037-2)
- Aldemir, Ü., & Aydın, E. (2005). Depreme dayanıklı yapı tasarımıda yeni yaklaşımlar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 435, 81–89.
- Askari, M., Li, J., & Samali, B. (2011). Semi-Active LQG Control of Seismically Excited Nonlinear Buildings using Optimal Takagi-Sugeno Inverse Model of MR Dampers. *Procedia Engineering*, 14, 2765–2772. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.07.348>
- BalaMurugan, L., & Jancirani, J. (2013). Algebraic Modeling of a field-controllable Magnetorheological fluid damper. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 1(2), 135–137. <https://doi.org/10.7753/ijsea0102.1009>
- Bani-Hani, K., & Ghaboussi, J. (1998). Nonlinear Structural Control Using Neural Networks. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(3), 319–327. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1998\)124:3\(319\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:3(319))
- Baruch, M. (1982). Optimal correction of mass and stiffness matrices using measured modes. *AIAA journal*, 20(11), 1623–1626.
- Basili, M., De Angelis, M., & Fraraccio, G. (2013). Shaking table experimentation on adjacent structures controlled by passive and semi-active MR dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 332(13), 3113–3133. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.12.040>
- Bayraktar, A., Türker, T., Özcan, M., Akköse, M., Adanur, S., & Ateş, Ş. (2009). Yapısal hasarların deneysel ve operasyonel modal analiz yöntemleriyle belirlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, 106m038’olu Tübitak Projesi
- Bharti, S. D., Dumne, S. M., & Shrimali, M. K. (2010). Seismic response analysis of adjacent buildings connected with MR dampers. *Engineering Structures*, 32(8), 2122–2133. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2010.03.015>

- Caesar, B. (1987). Updating system matrices. In *International Modal Analysis Conference, 5 th, London, England* (pp. 453-459).
- Carlson, J. D., Catanzarite, D. M., & Clair, K. A. S. (1996). Commercial magneto-rheological fluid devices. *International Journal of Modern Physics B*, 10(23–24), 2857–2865. <https://doi.org/10.1142/s0217979296001306>
- Cetin, S., Zergeroglu, E., Sivrioglu, S., & Yuksek, I. (2011b). A new semiactive nonlinear adaptive controller for structures using MR damper: Design and experimental validation. *Nonlinear Dynamics*, 66(4), 731–743. <https://doi.org/10.1007/s11071-011-9946-0>
- Chae, Y., Ricles, J. M., & Sause, R. (2014). Large-scale real-time hybrid simulation of a three-story steel frame building with magneto-rheological dampers. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 43(13), 1915-1933. <https://doi.org/10.1002/eqe.2429>
- Chang, C. C., & L. Z. (2002). Neural Network Emulation of Inverse Dynamics for a Magnetorheological Damper. *Journal of Structural Engineering*, 128(2), 231–239.
- Cheyne, E., Jakobsena, J. B., & Snæbjörnsson, J. (2017). Damping estimation of large wind-sensitive structures. *Procedia Engineering*, 199, 2047–2053. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.471>
- Choi, K. M., Cho, S. W., Jung, H. J., & Lee, I. W. (2004). Semi-active fuzzy control for seismic response reduction using magnetorheological dampers. *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, 33(6), 723-736. <https://doi.org/10.1002/eqe.372>
- Chopra, A. K. (2015). Yapı dinamiği: teori ve deprem mühendisliği uygulamaları. Palme Yayıncılık
- Christenson, R. E. (2001). Semiactive Control of Civil Structures for Natural Hazard Mitigation: Analytical and Experimental Studies. Department of Civil Engineering and Geological Sciences Notre Dame, Indiana, December, 11.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (1975). Of structures. NY, USA: McGraw-Hill
- Cruze, D., G, H., Jebadurai, S. V. S., L, S., D, T., & Christy, S. S. J. E. (2018). A Review on the Magnetorheological Fluid, Damper and Its Applications for Seismic Mitigation. *Civil Engineering Journal*, 4(12), 3058. <https://doi.org/10.28991/cej-03091220>
- Çetin, Ş., Sivrioğlu, S., Zergeroğlu, E., & Yüksek, I. (2011a). Semi-active H_{∞} robust control of six degree of freedom structural system using MR damper. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 19(5), 797–805. <https://doi.org/10.3906/elk-1007-587>
- Daowd, M., Omar, N., Verbrugge, B., Van Den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2010). Battery models parameter estimation based on MATLAB/Simulink. In *Proceedings of the 25th Electric Vehicle Symposium (EVS-25), Shenzhen, China* (Vol. 2, pp. 1-6).
- Dyke, S. J., Sain, M. K., Carlson, J. D., & Spencer, B. F. (1996). Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction. *Smart Mater. Struct.*, 5, 565–575.

- Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K., & Carlson, J. D. (1996). Seismic Response Reduction Using Magnetorheological Dampers. *IFAC Proceedings Volumes*, 29(1), 5530–5535. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)58562-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)58562-6)
- Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K., & Carlson, J. D. (1997). Phenomenological model of a magnetorheological damper. *ASCE J Eng Mech*, 123(3), 230–238. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123)
- Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K., & Carlson, J. D. (1998). An experimental study of MR dampers for seismic protection. *Smart Materials and Structures*, 7(5), 693–703. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/7/5/012>
- El-Kafafy, M., El-Demerdash, S. M., & Rabeih, A.-A. M. (2012). Automotive Ride Comfort Control Using MR Fluid Damper. *Engineering*, 04(04), 179–187. <https://doi.org/10.4236/eng.2012.44024>
- Elmeligy, O. M., & Hassan, M. H. M. (2016). Optimum Allocation of MR Dampers within Semi-Active Control Strategies of Three-Degree-of-Freedom Systems. *International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (IJES)*, 4(4), 45. <https://doi.org/10.3991/ijes.v4i4.6546>
- Erkus, B., Abé, M., & Fujino, Y. (2002). Investigation of semi-active control for seismic protection of elevated highway bridges. *Engineering Structures*, 24(3), 281–293. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00095-5)
- Fritzen, C. P., & Zhu, S. (1991). Updating of finite element models by means of measured information. *Computers & Structures*, 40(2), 475–486. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(91\)90373-T](https://doi.org/10.1016/0045-7949(91)90373-T)
- George, V. I., Kurian, C. P., D’Souza, J., & Thirunavukkarasu, I. (2012). A simulink model for an aircraft landing system using energy functions. In *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (pp. 355–360). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2012.6360752>
- Goncalves, F. D., Ahmadian, M., & Carlson, J. D. (2006). Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart Materials and Structures*, 15(1), 75–85. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/1/036>
- Gu, Z. Q., & Oyadiji, S. O. (2008). Application of MR damper in structural control using ANFIS method. *Computers and Structures*, 86(3–5), 427–436. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.02.024>
- Guo, D., & Hu, H. (2005). Nonlinear stiffness of a magneto-rheological damper. *Nonlinear Dynamics*, 40(3), 241–249. <https://doi.org/10.1007/s11071-005-6464-y>
- Ha, Q. P., Kwok, N. M., Nguyen, M. T., Li, J., & Samali, B. (2008). Mitigation of seismic responses on building structures using MR dampers with Lyapunov-based control. *Control Health Monit*, 15, 604–621. <https://doi.org/10.1002/stc.218>
- Heo, G., Kim, C., & Lee, C. (2014). Experimental test of asymmetrical cable-stayed bridges using MR-damper for vibration control. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 57, 78–85. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2013.10.007>

- Hiemenz, G. J., & Wereley, N. M. (1999). Seismic response of civil structures utilizing semi-active MR and ER bracing systems. In *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (Vol. 10, Issue 8, pp. 646–651). <https://doi.org/10.1106/TTXP-20DM-G861-HU0M>
- 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., & Yao, J. T. P. (1997). Structural Control: Past, Present, and Future. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9), 897–971. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1997\)123:9\(897\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1997)123:9(897))
- https://www.formula1-dictionary.net/damper_magnetorheological.html adresinden 5 Eylül 2022 tarihinde alınmıştır.
- Imaduddin, F., Mazlan, S. A., & Zamzuri, H. (2013). A design and modelling review of rotary magnetorheological damper. *Materials and Design*, 51, 575–591. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.042>
- Jansen, L. M., & Dyke, S. J. (2000). Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study. *Journal of engineering mechanics*, 126(8), 795–803. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:8\(795\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:8(795))
- Jeffery, T. (1987). Palladium-Catalyzed Vinylation of Acetylenic Iodides under Solid-Liquid Phase-Transfer Conditions. *Synthesis*, 1987(01), 70–71.
- Jung, H. J., Jang, D. D., Lee, S. W., Lee, H. J., & Kim, I. H. (2008). Semiactive Control System based on MR Damper for Suppressing Vibration of Stay Cable under Wind Load. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 15756–15761. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02664>
- Jung, H. J., Spencer, B. F., Ni, Y. Q., & Lee, I. W. (2004). State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications. *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3–4), 493–526. https://doi.org/10.12989/sem.2004.17.3_4.493
- K-Karamodin, A., & H-Kazemi, H. (2010). Semi-active control of structures using neuro-predictive algorithm for MR dampers. *Control Health Monit*, 17, 237–253. <https://doi.org/10.1002/stc.278>
- Kan, Ö., Kaymaz, K., Zengin, B., & Özcan, M. (2017). Türkiye’deki Depreme Dayanıklı Yapıların Sismik İzolasyon Tiplerinin İncelenmesi. *Bilim ve Gençlik Dergisi*, 5(1), 1–19. <https://www.humbarahane.com/temeller-ve-temel-cesitleri/>
- Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (2022, 2 Eylül). Büyük Depremler. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/buyuk-depremler/> adresinden 2 Eylül 2022 tarihinde alınmıştır.
- Karami Mohammadi, R., & Najarzade, S. (2018). Semi-Active Control of Structures Equipped With MR Dampers Based on Uniform Deformation Theory. *International Journal of Civil Engineering*, 16(8), 871–885. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0213-8>
- Kavyashree, B. G., Patil, S., & Rao, V. S. (2021). Comparison of classical and reliable controller performances for seismic response mitigation. *Earthquake and Structures*, 20(3), 353–364. <https://doi.org/10.12989/eas.2021.20.3.353>

- Kavyashree, Jagadisha, H. M., Rao, V. S., & Bhagyashree. (2020). *Classical PID Controller for Semi-active Vibration Control of Seismically Excited Structure Using Magneto-Rheological Damper*. February 2020, 201–210. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9213-9_19
- Kemerli, M. (2020). *Depreme Yönelik Olarak Yarı-Aktif Kontrollü Manyetik Damper Tasarımı ve Uygulaması*.
- Keskenler, M. F., & Keskenler, E. F. (2017). Bulanık mantığın tarihi gelişimi. *Takvim-i Vekayi*, 5 (1), 1-10. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/takvim/issue/33455/371973>
- Kim, H. S., & Roschke, P. N. (2006). Design of fuzzy logic controller for smart base isolation system using genetic algorithm. *Engineering Structures*, 28(1), 84–96. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2005.07.006>
- Kim, J. H., & Oh, J. H. (2001). Development of an above knee prosthesis using MR damper and leg simulator. In *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164) (Vol. 4, pp. 3686-3691)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933191>
- Köse E., Abacı K., A. S. (2010). Mekanik sistemlerin pid ve kayma kipli kontrol ile modellenmesi ve analizi. In *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (Vol. 2, No. 5, pp. 179-183)*.
- Krashen, S. (1982). Principles and practice in second language acquisition.
- Kudu, F. N., Uçak, Ş., Osmancikli, G., Türker, T., & Bayraktar, A. (2015). Estimation of damping ratios of steel structures by operational modal analysis method. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.04.019>
- Kulakowski, B. T., Gardner, J. F., & Shearer, J. L. (2007). *Dynamic modeling and control of engineering systems*. Cambridge University Press.
- Kumar, G., Kumar, A., & Jakka, R. S. (2018). The particle swarm modified quasi bang-bang controller for seismic vibration control. *Ocean Engineering*, 166, 105–116. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2018.08.002>
- Lamarche, C. P., Paultre, P., Proulx, J., & Mousseau, S. (2008). Assessment of the frequency domain decomposition technique by forced-vibration tests of a full-scale structure. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37(3), 487–494. <https://doi.org/10.1002/EQE.766>
- Lara, L., Brito, J., & Gallego, C. A. (2017). Structural control strategies based on magnetorheological dampers managed using artificial neural networks and fuzzy logic. *Revista UIS Ingenierías*, 16(2), 227–242. <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017021>
- Lee, H. J., Jung, H. J., Moon, S. J., Lee, S. K., Park, E. C., & Min, K. W. (2010). Experimental investigation of MR damper-based semiactive control algorithms for full-scale five-story steel frame building. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(10), 1025-1037. <https://doi.org/10.1177/1045389X10374162>
- Lin, R. M., & Ewins, D. J. (1994). Analytical model improvement using frequency response functions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 8(4), 437–458. <https://doi.org/10.1006/MSSP.1994.1032>

- Lin, R. M., & Zhu, J. (2006). Model updating of damped structures using FRF data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(8), 2200–2218. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.05.008>
- Lita, M., Popa, N. C., Velescu, C., & Vekas, L. N. (2004). Investigations of a magnetorheological fluid damper. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(2 I), 469–472. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.824140>
- Lu, Y., & Tu, Z. (2004). A two-level neural network approach for dynamic FE model updating including damping. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3–5), 931–952. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00796-X](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00796-X)
- Marazzi, F., Magonette, G., & Chartered, S. (2000). Active Control of Cable-Stayed Bridge : Large Scale Mock-Up Experimental Results. In *Second European Conference on Structural Control (2ECSC)*, Champs-sur-Marne, France. ENPC.
- Mathworks (2022, 5 Eylül). Simulink Design Optimization. <https://www.mathworks.com/help/sldo/index.html> adresinden 5 Eylül 2022 tarihinde alınmıştır
- Mathworks (2022, 5 Eylül). Optimization Problem Formulation for Parameter Estimation. <https://it.mathworks.com/help/sldo/ug/optimization-problem-formulation-for-parameter-estimation.html>, n.d adresinden 5 Eylül 2022 tarihinde alınmıştır
- Miah, M. S., Chatzi, E. N., Dertimanis, V. K., & Weber, F. (2017). Real-time experimental validation of a novel semi-active control scheme for vibration mitigation. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(3), e1878. <https://doi.org/10.1002/stc.1878>
- Mottershead, J. E., & Friswell, M. I. (1993). Model updating in structural dynamics: A survey. *Journal of Sound and Vibration*, 167(2), 347–375. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1993.1340>
- Natke, H. G. (1988). Updating computational models in the frequency domain based on measured data: a survey. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 3(1), 28–35. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(88\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0266-8920(88)90005-7)
- Ni, Y. Q., Chen, Y., Ko, J. M., & Cao, D. Q. (2002). Neuro-control of cable vibration using semi-active magneto-rheological dampers. *Engineering Structures*, 24(3), 295–307. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00096-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00096-7)
- Ohtori, Y., Christenson, R. E., Spencer, B. F., & Dyke, S. J. (2004). Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4), 366–385. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2004\)130:4\(366\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2004)130:4(366))
- Ok, S. Y., Kim, D. S., Park, K. S., & Koh, H. M. (2007). Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers. *Engineering structures*, 29(5), 776–788. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2006.06.020>
- Owji, H. R., Shirazi, A. H. N., & Sarvestani, H. H. (2011). A comparison between a new semi-active tuned mass damper and an active tuned mass damper. *Procedia Engineering*, 14, 2779–2787. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.07.350>
- Özbülür, V. (2017). Speed Control of Direct Current Motor with PID and Fractional Order Sliding Mode Control Methods. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 17(2), 537–545. <https://doi.org/10.5578/fmbd.58653>

- Öztürk, K., & Şahin, M. E. (2018). Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ'ya Genel Bir Bakış. *Takvim-i Vekayi*, 6(2), 25–36. <http://www.sloi.org/sloi-name-of-this-article>
- Özdemir, N. B., Akçaer, G., & Soyluk, A. (2015). Günümüz mimarisinde sismik izolasyon teknolojisi. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İzmir, 14-16.
- Parker (2023, 30 Ocak). Semi Active Suspensions. <https://www.parker.com/us/en/divisions/noise-vibration-and-harshness-division/solutions/semi-active-suspensions.html> adresinden 30 Ocak 2023 tarihinde alınmıştır
- Qu, W. L., & Xu, Y. L. (2001). Semi-active control of seismic response of tall buildings with podium structure using ER/MR dampers. *Structural Design of Tall Buildings*, 10(3), 179–192. <https://doi.org/10.1002/tal.177>
- Roësset, J. M., & Yao, J. T. P. (2003). State of the Art of Structural Engineering. *Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers*, 9445(July), 131–141. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2002\)128:8\(965\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:8(965))
- Sahasrabudhe, S. S., & Nagarajaiah, S. (2005). Semi-active control of sliding isolated bridges using MR dampers: an experimental and numerical study. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(8), 965-983. <https://doi.org/10.1002/eqe.464>
- Sahin, H., Liu, Y., Wang, X., Gordaninejad, F., Evrensel, C., & Fuchs, A. (2007). Full-scale magnetorheological fluid dampers for heavy vehicle rollover. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(12), 1161–1167. <https://doi.org/10.1177/1045389X07083137>
- Samani, M. Z., & Ghanooni-bagha, M. (2017). 2435 . A fuzzy logic controller for optimal structural control using MR dampers and particle swarm optimization. *Journal of Vibroengineering*, 19(3), 1901-1914.
- Shutto, S., & Toscano, J. R. (2005). Magnetorheological (Mr) Fluid and Its Applications. *Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power*, 2005(6), 590–594. <https://doi.org/10.5739/isfp.2005.590>
- Sidhu, J., & Ewins, D. J. (1984). Correlation of finite element and modal test studies of a practical structure. In *Proceedings of the 2nd international Modal Analysis Conference (Vol. 2, pp. 756-762)*. Union College Schenectady, NY. (1984). 2, 1984.
- Smyth, A. W., Masri, S. F., Kosmatopoulos, E. B., Chassiakos, A. G., & Caughey, T. K. (2002). Development of adaptive modeling techniques for non-linear hysteretic systems. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 37(8), 1435–1451. [https://doi.org/10.1016/S0020-7462\(02\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7462(02)00031-8)
- Soong, T. T., & Spencer, B. F. (2000). Active, semi-active and hybrid control of structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(3), 387-402.
- Soong, T. T., & Spencer Jr, B. F. (2002). Supplemental energy dissipation : state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24, 243–259. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00092-X)

- Soysal, B. (2014). Real-time control of an automated guided vehicle using a continuous mode of sliding mode control. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 22(5), 1298–1306. <https://doi.org/10.3906/elk-1211-130>
- Spelta, C., Previdi, F., Savaresi, S. M., Fraternali, G., & Gaudiano, N. (2009). Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine. *Mechatronics*, 19(3), 410–421. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2008.09.006>
- Spencer, B. F., Carlson, J. D., Sain, M. K., & Yang, G. (1997). On the current status of magnetorheological dampers: seismic protection of full-scale structures. In *Proceedings of the 1997 American Control Conference* (Cat. No. 97CH36041) (Vol. 1, pp. 458–462). IEEE.
- Spencer, B. F., & Sain, M. K. (1997). Controlling buildings: a new frontier in feedback. *IEEE Control Systems Magazine*, 17(6), 19–35. <https://doi.org/10.1109/37.642972>
- Standoli, G., Salachoris, G. P., Masciotta, M. G., & Clementi, F. (2021). Modal-based FE model updating via genetic algorithms: Exploiting artificial intelligence to build realistic numerical models of historical structures. *Construction and Building Materials*, 303, 124393. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124393>
- Symans, M. D., & Constantinou, M. C. (1999). Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 21(6), 469–487. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00225-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00225-3)
- Şahin, I., Engin, T., & Çemeci, Ş. (2010). Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers. *Smart Materials and Structures*, 19(3). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/3/035012>
- Vadtala, I. H., Soni, D. P., & Panchal, D. G. (2013). Semi-active control of a benchmark building using neuro-inverse dynamics of MR damper. *Procedia Engineering*, 51, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.010>
- Wang, D. H., & Liao, W. H. (2011). Magnetorheological fluid dampers: A review of parametric modelling. *Smart Materials and Structures*, 20(2). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/2/023001>
- Wani, Z. R., Tantray, M., & Farsangi, E. N. (2021). Shaking table tests and numerical investigations of a novel response-based adaptive control strategy for multi-story structures with magnetorheological dampers. *Journal of Building Engineering*, 44, 102685. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102685>
- Wereley, N. M., Kamath, G. M., & Madhavan, V. (1999). Hysteresis modeling of semi-active magnetorheological helicopter dampers. *Journal of intelligent material systems and structures*, 10(8), 624–633.
- Winslow, W. (1947). Method and means for translating electrical impulses into mechanical force. *Patent No. 2,417,850*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. <http://www.freepatentsonline.com/2417850.html>
- Winter, B. D., & Swartz, R. A. (2017). Low-force magneto-rheological damper design for small-scale structural control. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(11), e1990. <https://doi.org/10.1002/stc.1990>

- Xie, H. L., Liang, Z. Z., Li, F., & Guo, L. X. (2010). The Knee Joint Design and Control of Above-knee Intelligent Bionic Leg Based on Magneto-rheological Damper. *International Journal of Automation and Computing*, 7(3), 277–282. <https://doi.org/10.1007/s11633-010-0503-y>
- Xu, Y. L., Qu, W. L., & Ko, J. M. (2000). Seismic response control of frame structures using magnetorheological/electrorheological dampers. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29(5), 557–575. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(200005\)29:5<557::AID-EQE922>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(200005)29:5<557::AID-EQE922>3.0.CO;2-X)
- Yan, G., & 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(1–2), 368–382. <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2006.03.011>
- Yang, T., Gao, Y., Zhao, J., Wang, S., & Zhu, Y. (2012). A rotary magnetorheological fluid damper for pathological tremor suppression. *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2012*, 1, 575–580. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2012.6283171>
- Yanik, A. (2020). Semi-Active Control Performance Index for magneto-rheological dampers considering s-structure interaction. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 737, No. 1, p. 012018). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012018>
- Yao, J. T. (1972). Concept of Structural Control. *Journal of the Structural Division*, 98.7, 1567–1574.
- Yi, F., Dyke, S. J., Caicedo, J. M., & Carlson, J. D. (2001). Experimental verification of multiinput seismic control strategies for smart dampers. *Journal of engineering Mechanics*, 127(11), 1152–1164. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2001\)127:11\(1152\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2001)127:11(1152))
- Zhou, Q. (2002). Two mechanic models for magneto-rheological damper and corresponding test verification. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 22(4), 144–150
- Zhu, C. (2005). Dynamic performance of a disk-type magnetorheological fluid damper under AC excitation. *Smart Structures, Devices, and Systems II*, 5649 (May 2005), 553. <https://doi.org/10.1117/12.582172>
- Zhu, X., Jing, X., & Cheng, L. (2012). Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(8), 839–873. <https://doi.org/10.1177/1045389X12436735>
- Zizouni, K., Fali, L., Sadek, Y., & Bousserhane, I. K. (2019). Neural network control for earthquake structural vibration reduction using MRD. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(5), 1171–1182. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0544-4>

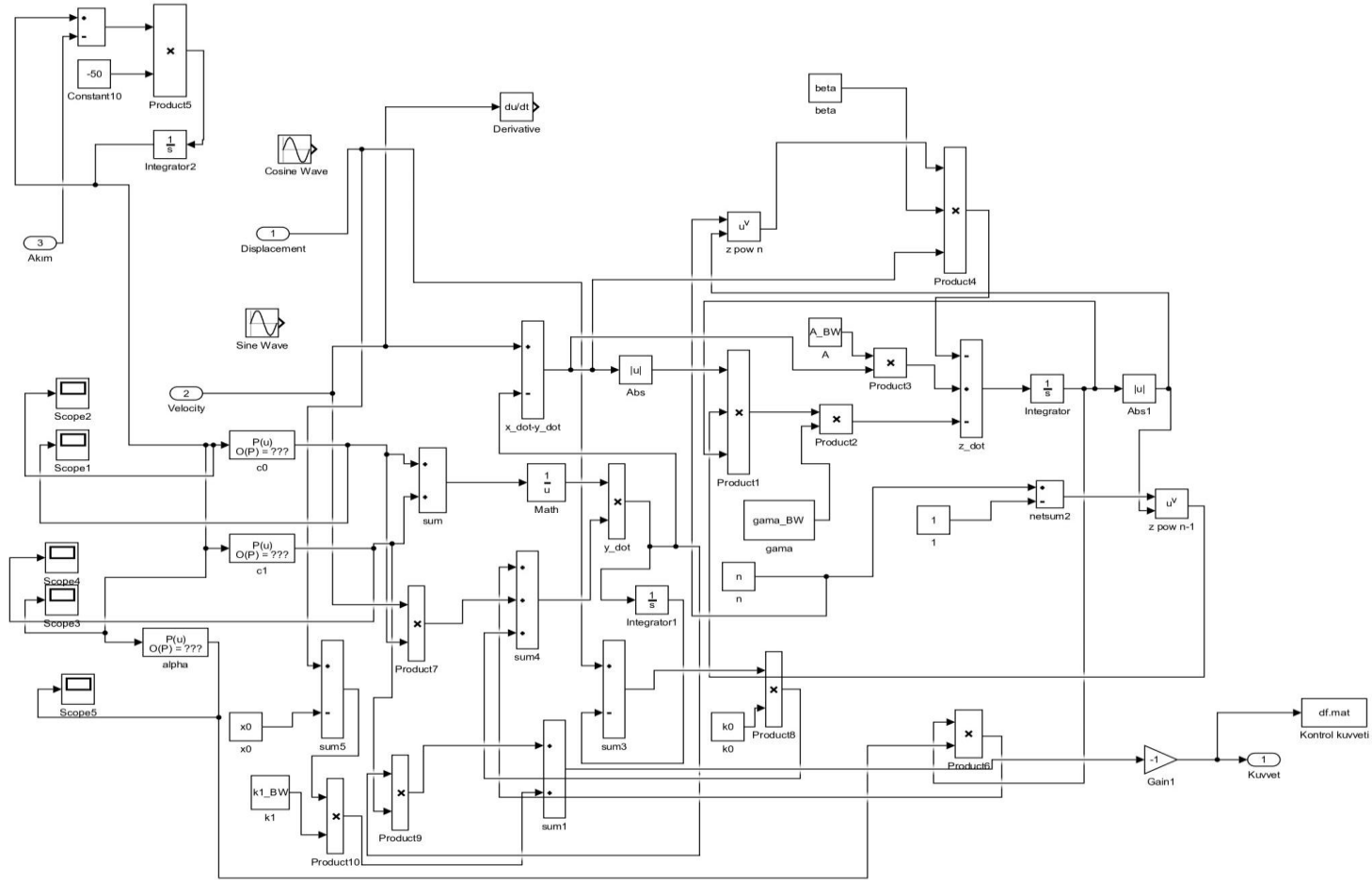


EKLER

EK A. MR Damper Bouc-Wen Modeli



EK A



Şekil A.1. MR damperin simülasyon blok diyagramı (Kemerli, 2020)

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Özge ŞAHİN ÇETİN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2009, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM

- 2007-2009 yılları arasında kontrol mühendisi olarak çalıştı.
- 2009-2012 yılları arasında proje mühendisi olarak çalıştı.
- 2012-2015 yılları arasında mesleki yeterlilik belgesi düzenleyen kurumlarda kalite yönetim sistemi sorumlusu olarak çalıştı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Şahin, Ö., Adar, N. G., Kemerli, M., Çağlar, N., Şahin, İ., Parlak, Z., ... & Engin, T. (2021). A comparative evaluation of semi-active control algorithms for real-time seismic protection of buildings via magnetorheological fluid dampers. *Journal of Building Engineering*, 42, 102795.
- Kemerli, M., Şahin, Ö., Yazıcı, İ., Çağlar, N., & Engin, T. (2022). Comparison of discrete-time sliding mode control algorithms for seismic control of buildings with magnetorheological fluid dampers. *Journal of Vibration and Control*, 10775463211070062.