

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNA TİTREŞİMLERİNİN AKTİF AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ
İLE KONTROLÜ

Bektaş KILINÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Teorisi ve Kontrol Programı

Danışman

Doç. Dr. Muzaffer METİN

Şubat, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNA TİTREŞİMLERİNİN AKTİF AYARLI KÜTLE SÖNÜMLEYİCİ İLE
KONTROLÜ**

Bektaş KILINÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 06.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Kontrol Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Muzaffer METİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Muzaffer METİN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Meral BAYRAKTAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Hüseyin AGGÜMÜŞ, Üye
Şırnak Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Muzaffer METİN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Bina Titreşimlerinin Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici ile Kontrolü başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Bektaş KILINÇ



Aileme

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tezimi bilgi birikimi ve tecrübesiyle yöneten, çalışmamın her alanında bana zaman ayırarak yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Muzaffer Metin'e, yüksek lisans eğitimim boyunca verdiği kaliteli eğitimi ile bu tezi hazırlarken ihtiyaç duyduğum mühendislik becerilerine sahip olmamda büyük rolü olan Yıldız Teknik Üniversitesi öğretim üyelerine ve eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

Bektaş KILINÇ



İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	6
2 SİSTEMİN FİZİKSEL MODELİ	7
2.1 Titreşim Analizi	7
2.1.1 Yapılarda Titreşim Analizi	8
2.1.2 Doğal Frekans, Rezonans ve Modal Analiz	11
2.1.3 Binalarda Titreşim Kontrolü	13
2.1.4 Binalarda Uygulanan Pasif Kontrol Yöntemleri	13
2.1.5 Sismik İzolasyon	17
2.1.6 Aktif Kontrol Sistemleri	19
2.1.7 Yarı Aktif Kontrol Sistemleri	24
2.2.1 Laboratuvar Bina Modelinin Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi	26
2.2 Laboratuvar Bina Modeli	24
2.2.2 Laboratuvar Bina Modelinin Mod Şekilleri	28
2.2.3 Laboratuvar Bina Modeli Titreşimlerinin Azaltılması için AKD Tasarımı	31
2.2.4 Laboratuvar Bina Modeli Titreşimlerinin Azaltılması için PID Kontrolcü Tasarımı	34
2.2.5 Laboratuvar Bina Modeli Titreşimlerinin Azaltılması için Bulanık Mantık Kontrolcüsü Tasarımı	36
2.2.6 Laboratuvar Bina Modeli Titreşimlerinin Azaltılması için Adaptif Bulanık PID Kontrolcüsü Tasarımı	39
2.2.7 Laboratuvar Bina Modelinin Titreşim Analizleri Sonuçları . .	41

2.2.8 Laboratuvar Bina Modelinin 1999 Kocaeli Depremi Etkisinde Titreşim Cevapları	41
2.2.9 Laboratuvar Bina Modelinin 1995 Kobe Depremi Etkisinde Titreşim Cevapları	56
2.2.10 Laboratuvar Bina Modelinin 1994 Northridge Depremi Etkisinde Titreşim Cevapları	70
2.2.11 Laboratuvar Bina Modeli için ISE Sonuçları	85
2.2.12 Laboratuvar Bina Modelinin Frekans Cevapları	86
3 SONUÇ VE ÖNERİLER	95
KAYNAKÇA	97
TEZDEN RETİLMİş YAYINLAR	101



SİMGE LİSTESİ

f_{opt}	AKD doğal frekansının ana yapının doğal frekansına oranı
w_{AKD}	AKD doğal frekansı
$\bar{m}$	AKD kütlelerinin ana yapının kütlelerine oranı
m_{AKD}	AKD kütle değeri
$\xi_{d opt}$	AKD'nin sönüm oranı
k_{AKD}	AKD rijitlik değeri
c_{AKD}	AKD sönüm değeri
I_{atalet}	Atalet momenti
$\dot{x}(t)$	Bina katlarının hız matrisi
$\ddot{x}(t)$	Bina katlarının ivme matrisi
$x(t)$	Bina katlarının yer değiştirme matrisi
$\ddot{x}$	Binalara uygulanan sismik ivme girişi
m_T	Binaların kütlelerinin toplamı
M	Binaların kütle matrisi
K	Binaların rijitlik matrisi
C	Binaların sönüm matrisi
w_1	Bina modelinin birinci doğal frekansı
i	Bobin sargısının akımı
R_i	Bobin sargısının direnç değeri
K_f	Bobin sargısının itme sabiti
u	Bobin sargısının voltajı ve kontrol voltajı
E	Elastisite modülü
$\dot{q}_i$	Genelleştirilmiş hız
q_i	Genelleştirilmiş koordinatlar
Q_i	Genelleştirilmiş kuvvetler
$e(t)$	Hata sinyali
K_i	İntegral kontrol katsayısı
$\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_i$	Katların yatay hızları
$\ddot{x}_1, \dots, \ddot{x}_i$	Katların yatay ivmeleri
$x_1, \dots, x_i$	Katların yatay yer değiştirmeleri
$m_1, \dots, m_i$	Kat kütle değerleri

$k_1, \dots, k_i$	Kat rijitlik değerleri
$c_1, \dots, c_i$	Kat sönüm değerleri
kg	Kilogram
b	Kolon genişliği
L	Kolon uzunluğu
h	Kolon yüksekliği
F_u	Kontrolcü kuvveti
$F(t)$	Kontrolcü kuvveti ve yerini gösteren matris
$u(t)$	Kontrol sinyali
m	Kütle değeri
N	Newton
E_p	Orantı kontrol katsayısı
I	PID denetleyicinin integral sabiti
P	PID denetleyicinin orantı sabiti
D	PID denetleyicinin türev sabiti
$X_{ref6}(t)$	Referans sinyali
k	Rijitlik değeri
s	Saniye
c	Sönüm değerleri
ξ	Sönüm oranı
E_K	Toplam kinetik enerji
E_P	Toplam potansiyel enerji
E_D	Toplam sönüm enerjisi
K_D	Türev kontrol katsayısı
K_i	Voltaj sabiti

KISALTMA LİSTESİ

AKD	Ayarlı Kütle Damperi
BMD	Bulanık Mantık Denetleyicisi
ISE	Integral Square Error
RMS	Root Mean Square



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Tek serbestlik dereceli bina modeli	10
Şekil 2.2	Hareket edebilen ve tabana ankastre bağlı eşdeğer sistem	10
Şekil 2.3	Salınım hareketi yapan Tacoma köprüsü.....	12
Şekil 2.4	Rezonans etkisiyle çöken Tacoma köprüsü.....	12
Şekil 2.5	X şekilli metalik sönümleyici	13
Şekil 2.6	Sürtünme tipi sönümleyicinin yapısı	14
Şekil 2.7	Dünya Ticaret Merkezi ve kullanılan visko elastik sönümleyiciler	14
Şekil 2.8	Viskoz akışkanlı sönümleyici	15
Şekil 2.9	Taipei 101’de kullanılan AKD’nin konumu	16
Şekil 2.10	Taipei 101’de kullanılan AKD	16
Şekil 2.11	Burj Al Arab Oteli 5 tonluk AKD	16
Şekil 2.12	Düşük sönümlü kauçuk izolatör	17
Şekil 2.13	Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör	18
Şekil 2.14	Yüksek sönümlü kauçuk izolatör	18
Şekil 2.15	Kayma tipi izolatörler.....	19
Şekil 2.16	Örnek bir PID kontrolcünün blok diyagram gösterimi	20
Şekil 2.17	Bulanık mantık kontrolcü yapısı.....	21
Şekil 2.18	Bulanık mantık kontrolcüsünün blok diyagramı.....	22
Şekil 2.19	BPID kontrolcü yapısı.....	22
Şekil 2.20	AFPID kontrolcü yapısı.....	23
Şekil 2.21	Laboratuvar bina modelinin fiziksel modeli.....	25
Şekil 2.22	Laboratuvar bina modelinin 1. mod şekli	28
Şekil 2.23	Laboratuvar bina modelinin 2. mod şekli	28
Şekil 2.24	Laboratuvar bina modelinin 3. mod şekli	29
Şekil 2.25	Laboratuvar bina modelinin 4. mod şekli	29
Şekil 2.26	Laboratuvar bina modelinin 5. mod şekli	30
Şekil 2.27	Laboratuvar bina modelinin 6. mod şekli	30
Şekil 2.28	AKD optimum frekans oranı.....	33
Şekil 2.29	AKD optimum sönüm oranı.....	33
Şekil 2.30	AKD kullanılan laboratuvar bina modelinin fiziksel modeli.....	34

Şekil 2.31	PID kullanılan laboratuvar bina modelinin fiziksel modeli	35
Şekil 2.32	FUZZY kural tabanının ayarlanması	37
Şekil 2.33	FUZZY kural tablosunun oluşturulması	37
Şekil 2.34	Hata değeri bulanıklaştırma üyelik fonksiyonları	38
Şekil 2.35	Hata hız değeri bulanıklaştırma üyelik fonksiyonları.....	38
Şekil 2.36	Çıkış sinyali netleştirme üyelik fonksiyonları.....	39
Şekil 2.37	FUZZY kural tablosu üç boyutlu yüzeyi.....	39
Şekil 2.38	AFPID kontrolcü yapısı.....	40
Şekil 2.39	1999 Kocaeli depremi yer hareketi.....	42
Şekil 2.40	Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki yer değiştirme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	45
Şekil 2.41	Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki hız cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	50
Şekil 2.42	Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki ivme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	53
Şekil 2.43	Kocaeli depremi (1999) etkisindeki laboratuvar bina modelinin denetim kuvvetindeki değişim	55
Şekil 2.44	1995 Kobe depremi yer hareketi	56
Şekil 2.45	Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki yer değiştirme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	59
Şekil 2.46	Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki hız cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	64
Şekil 2.47	Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki ivme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	67
Şekil 2.48	Kobe depremi (1995) etkisindeki laboratuvar bina modelinin denetim kuvvetindeki değişim	70
Şekil 2.49	1994 Northridge depremi yer hareketi	71
Şekil 2.50	Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki yer değiştirme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	74
Şekil 2.51	Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki hız cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	79

Şekil 2.52	Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki ivme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	82
Şekil 2.53	Northridge depremi (1994) etkisindeki laboratuvar bina modelinin denetim kuvvetindeki değişim	84
Şekil 2.54	Laboratuvar bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat	88
Şekil 2.55	Laboratuvar bina modelinin hız frekans cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat.....	91
Şekil 2.56	Laboratuvar bina modelinin ivme frekans cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat.....	94



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Laboratuvar bina modeline ait bilgiler	25
Tablo 2.2	Laboratuvar bina modelinin doğal frekansları.....	31
Tablo 2.3	Laboratuvar bina modeli AKD parametreleri.....	34
Tablo 2.4	Lineer motor parametreleri	35
Tablo 2.5	Laboratuvar bina modeli için PID parametreleri.....	36
Tablo 2.6	Üçgen üyelik fonksiyonları için başlangıç, tepe ve son değerleri	38
Tablo 2.7	Laboratuvar bina modeli için AFPID parametreleri	40
Tablo 2.8	Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri.....	45
Tablo 2.9	Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları.....	46
Tablo 2.10	Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki ivme RMS değerleri	53
Tablo 2.11	Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki maksimum ivme cevapları.....	54
Tablo 2.12	Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri.....	60
Tablo 2.13	Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları.....	61
Tablo 2.14	Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki ivme RMS değerleri	68
Tablo 2.15	Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki maksimum ivme cevapları.....	69
Tablo 2.16	Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri.....	74
Tablo 2.17	Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları.....	75
Tablo 2.18	Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki ivme RMS değerleri	82
Tablo 2.19	Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki maksimum ivme cevapları.....	83
Tablo 2.20	Laboratuvar bina modeli için ISE sonuçları	85

Bina Titreşimlerinin Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici ile Kontrolü

Bektaş KILINÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Muzaffer METİN

Bu yüksek lisans tezinde, sismik etkiler altındaki laboratuvar ortamında tasarlanan bina modelinin titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar bina modeli olarak Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Laboratuvarında bulunan altı katlı bina modeli kullanılmıştır. Kullanılan binanın fiziksel modeli, depremlerin en fazla yatay yönde yıkıcılığının olması sebebiyle sadece yatayda hareket edebilen ve zemine ankastre olarak mesnetli bir şekilde oluşturulmuştur. Bina modelinde her kat için yer değiştirme-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri çizdirilmiştir. Ayrıca binanın frekans cevapları da bu blok diyagramlar kullanılarak elde edilmiştir. Bina titreşimlerinin azaltılabilmesi için pasif kontrol yöntemi olan ayarlı kütle damperi (AKD) ve AKD kullanılan bina modellerine aktif kontrol yöntemi olan PID (Oransal-İntegral-Türevsel), FUZZY (Bulanık Mantık) ve AFPID (Adaptif Bulanık Mantık PID) kontrolcüler tasarlanmıştır. Kontrolcü kullanılmayan, sadece AKD kullanılan, AKD ile PID'nin birlikte kullanıldığı, AKD ile FUZZY'nin birlikte kullanıldığı ve AKD ile AFPID'nin birlikte kullanıldığı beş durum için bina modellerinin zaman ve frekans alanlarında titreşim cevaplarının grafikleri karşılaştırmalı olarak MATLAB programı ile çizdirilmiştir. Titreşim analizi sonuçları incelendiğinde AKD ile AFPID

kontrolcünün birlikte kullanıldığı bina modelinin titreşimlerini azaltmada ve birinci doğal frekansın genliğini baskılamada en iyi performansı sergilediği görülmüştür. Ayrıca bu durum bina modelinin en üst katının ISE hataları (Integral Square Error) ve her kat için oluşturulan yer değiştirme RMS (Root Mean Square) ve ivme RMS değerleri karşılaştırılarak da görülebilir.

Anahtar Kelimeler: Titreşim analizi, ayarlı kütle damperi (AKD), PID denetleyici, FUZZY denetleyici, AFPID denetleyici.



Control of Building Vibrations Using Active Tuned Mass Damper

Bektaş KILINÇ

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Muzaffer METİN

In this Master of Science thesis, vibration analyzes of the building model designed in a laboratory environment under seismic effects were carried out. As the laboratory building model, the six-storey building model in Yıldız Technical University Machine Theory, System Dynamics and Control Laboratory was used. The physical model of the building used was created in a way that can move only horizontally and is fixed to the ground, as earthquakes have the most destructiveness in the horizontal direction. In the building model, displacement-time, velocity-time and acceleration-time graphs are drawn for each floor. In addition, the frequency responses of the building were obtained using these block diagrams. To reduce building vibrations, the passive control method tuned mass damper (AKD) and the active control method PID (Proportional-Integral-Derivative), FUZZY (Fuzzy Logic) and AFPID (Adaptive Fuzzy Logic PID) controllers are designed for building models using AKD. The graphs of the vibration responses of the building models in the time and frequency domains for the five cases where the controller is not used, only AKD is used, AKD and PID are used together, AKD and FUZZY are used together, and AKD and AFPID are used together were drawn with the MATLAB program. When the vibration analysis results are examined, it is seen that the building model in which AKD and AFPID

controller are used together exhibits the best performance in reducing vibrations and suppressing the amplitude of the first natural frequency. In addition, this situation can be seen by comparing the ISE errors (Integral Square Error) of the top floor of the building model and the displacement RMS (Root Mean Square) and acceleration RMS values generated for each floor.

Keywords: Vibration analysis, tuned mass damper (TMD), PID controller, FUZZY controller, AFPID controller.



1.1 Literatür Özeti

Günümüze kadar ülkemizde ve dünyada can ve mal kaybına neden olan yıkıcılığı yüksek çok sayıda deprem meydana gelmiştir. Can güvenliğini sağlamak ve servis süresince yapının yıkılmasını engellemek depreme dayanıklı yapı tasarımında asıl amaçtır. Deprem sonrasında faaliyetine devam etmesi gereken yapıların titreşim analizlerinin yapılarak titreşimlerinin kontrol altına alınması gerekmektedir. Pasif ve aktif kontrol sistemleri kullanılarak yapıda oluşabilecek muhtemel titreşimlerin kontrol altına alınması gerekmektedir. Pasif kontrol sistemleri, yapılara yerleştirilen özel elemanlar sayesinde deprem ve rüzgâr gibi yapısal sisteme dışarıdan giren enerjiyi sönümleyerek absorbe eder. Aktif kontrol sistemleri ise, bir dış enerji kaynağı tarafından oluşturulan kontrolcü kuvvetinin zorlayıcı etkiye maruz kalan yapısal sisteme uygulanarak titreşimlerinin azaltılmasını sağlar. Kontrolcü kuvvetinin büyüklüğü PID, FUZZY gibi denetleyiciler kullanılarak düzenlenir. Bu sistem ilk olarak Japonya’da uygulanmaya başlanmıştır. Yapılan teorik ve deneysel çalışmalar aktif kontrol sistemlerinin pasif kontrol sistemlerine göre daha iyi performans sergilediğini göstermiştir.

Literatürde, pasif ve aktif AKD ile ilgili birçok çalışma vardır. Bunlar:

Yağız vd. (2001) çalışmalarında, aktif ayarlı kütle damperine sahip dört katlı gerçek bir bina modelinin deprem ve rüzgâr kaynaklı titreşimlerini önlemek için ikinci dereceden doğrusal düzenleyici (LQR) tasarlamışlardır. Elde ettikleri zaman ve frekans cevaplarını yorumlayarak LQR kontrolcünün bina sismik izolasyonunu iyileştirdiği sonucuna ulaşmışlardır [1].

Güçlü (2001) çalışmasında, beş katlı gerçek bir bina modeline Kocaeli depremi (1999) verilerini bozucu etki olarak uygulamış ve titreşim cevaplarının azaltılması için bulanık mantıklı ve PD denetleyiciler tasarlayarak titreşim analizi sonuçlarını

karşılaştırmıştır. Bulanık mantıklı denetleyicilerin katların yer değiştirme-zaman, ivme-zaman ve frekans cevaplarında daha iyi olduğunu gözlemlemiştir [2].

Connor (2003) kitabında, zorlayıcı kuvvet etkisinde bulunan yapısal sistemlerin titreşimlerinin azaltılması amacıyla pasif ve aktif kontrol yöntemlerinin sistemlere uygulanma yöntemlerini örneklerle açıklamıştır [3].

Yazıcı (2006) çalışmasında, Kocaeli depremi etkisindeki gerçek kütle, sönüm ve rijitlik değerleri bilinen 15 katlı bir bina modelinin titreşim cevaplarını incelemiştir. Aktif kontrol sistemlerinden BMD ve PID denetleyiciler tasarlayarak titreşimlerin kontrolünü sağlamıştır. BMD kullanılan binalarda deprem etkisiyle titreşimlerin önemli bir ölçüde azaltıldığı sonucuna ulaşmıştır [4].

Aldemir (2007) çalışmasında, depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılan pasif, aktif ve yarı aktif sistemlerin çalışma prensipleri ve dünyadaki bazı örnekleri hakkında bilgiler vermektedir [5].

Özer (2008) çalışmasında, bir bina modelinin titreşimlerini azaltabilmek için dinamik sönümleyici tasarlayarak deneysel ve bilgisayar ortamında titreşim analizini yapmıştır. Dinamik sönümleyicinin deprem gibi dış etkenlere karşı direnç gösterdiği sonucuna ulaşmıştır [6].

Güçlü ve Yazıcı (2008) çalışmalarında, deprem etkisindeki 15 katlı aktif ayarlı kütle damperine sahip bir bina modelinin titreşim cevaplarının iyileştirilmesi için BMD tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bina modelinin 1. ve 15. katlarına yerleştirilen birbirinden bağımsız çalışan iki denetleyici sayesinde deprem etkisinde denetleyici kuvvetinin azaltılmasını sağlamışlardır. Zaman ve frekans alanlarında elde edilen sonuçlar oldukça başarılıdır [7].

Güçlü ve Yazıcı (2009) çalışmalarında, 15 katlı aktif ayarlı kütle damperi kullanılan Northridge depremi etkisindeki doğrusal olmayan bir bina için bulanık PI ve bulanık PD kontrol sistemleri birleştirilerek bulanık PID kontrolcüsü tasarlamışlardır. Bulanık PID kontrolcüsü sayesinde katların titreşimleri azaltılmış ve doğal frekanslarının genlikleri bastırılmıştır [8].

Çetin (2010) çalışmasında, laboratuvar şartlarında 6 katlı bina modelinin titreşim analizini deneysel yolla gerçekleştirmiştir. Bozucu olarak El Centro depremi

verilerini kullanmıştır. Bina modelinin titreşimlerini MR pasif kontrolcüsü ve tasarladığı aktif kontrolcüyle azaltmıştır. Her 4 katın yer değiştirme-zaman, ivme-zaman ve frekans cevaplarını grafiklerle göstermiştir. H_{∞} kontrolcüsünü klasik ve sistem tanılama üzerinden tasarlayarak aralarında performans bakımından çok büyük bir farklılığın olmadığı sonucuna ulaşmıştır [9].

Sağırlı vd. (2011) çalışmalarında, Kocaeli depremi etkisindeki beş serbestlik dereceli bir vincin titreşimlerini bulanık mantıklı kontrolcü ve PD kontrolcü tasarlayarak titreşimleri azaltmaya çalışmışlardır. Zaman ve frekans alanlarında titreşim cevapları incelenmiş ve bulanık mantıklı kontrolcü ile titreşim cevapları en iyi performansla iyileştirildiği sonucuna ulaşmışlardır [10].

Güçlü vd. (2012) çalışmalarında, laboratuvar ortamında bulunan 6 katlı bina modelini kullanarak deneysel ve analitik modal analizini yapmışlardır. Modal analiz sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin birbirine çok yakın çıkmıştır. Buradan hareketle, iki farklı gerçekte inşa edilen yapıyı bu şekilde modellemişlerdir. Bu iki yapı MATLAB-Simulink programında modellenerek çeşitli depremlerin etkisindeki titreşim cevapları elde edilmiştir. Yapıların titreşimlerinin azaltılması için pasif ve aktif kontrol sistemlerini uygulamışlardır. Aktif kontrol sistemi kullanılan yapıların en iyi şekilde titreşimlerinin azaltılabileceğini tespit etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucu yeni bir gecikmeye bağlı dayanıklı H_{∞} denetleyici metodu geliştirmişlerdir [11].

Pekgökgöz (2017) çalışmasında, betonarme yüksek bir minarenin ayarlı kütle sönümleyicisi yerleştirilmiş ve yerleştirilmemiş hallerinin Rita kasırgası etkisindeki titreşim cevaplarını incelemiştir. Ayrıca minare modelinin doğal frekanslarından oluşan kosinüs fonksiyonu zorlayıcı etki olarak uygulanarak rezonans durumundaki minare davranışları incelenmiştir. Minarenin fiziksel modelini oluşturmak için minareyi noktasal kütlelerden ve kirişlerden oluşacak şekilde modellemiştir [12].

Kayabekir vd. (2020) çalışmalarında, aktif ayarlı kütle damperi kullanılan bina modelinin deprem etkisindeki titreşim cevaplarını incelemiştir. Kontrolcü olmayan, sadece ayarlı kütle damperi bulunan ve ayarlı kütle damperinin PID denetleyicisiyle birlikte bulunduğu deprem etkisindeki bina modelleri için titreşim

analizleri yapmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Ayarlı kütle damperinin PID denetleyicisiyle birlikte kullanımının en iyi performansı verdiği sonucuna ulaşmışlardır [13].

Aggümuş (2014) çalışmasında, yapıların deprem etkisi altındaki titreşimlerini azaltmak amacıyla MR sönümleyiciyi farklı katlara yerleştirilerek H_{∞} dayanıklı kontrolör tasarımı yapmıştır. Tasarladığı kontrolörü 6 katlı bir bina modeli üzerinde, laboratuvar ortamında titreşim tablası kullanarak deneysel olarak test etmiştir [14].

Aggümuş (2020) çalışmasında, YAKS'nin on katlı bir binaya ait titreşimleri bastırma performansını, MR damperin deneysel olarak incelenmesine olanak tanıyan SÇD yöntemiyle incelemiştir. Bu yöntemde çalışmaları, gerçek sistem elemanları ile bilgisayar simülasyonunun eş zamanlı olarak çalıştırılmasıyla yürütmüştür. Böylece, saf simülasyon çalışmalarından daha gerçekçi, deneysel çalışmalara daha yakın sonuçlar elde etmiştir [15].

Shum (2015) çalışmasında, non lineer viskoz sönüme sahip sistemin rastgele yük altında titreşimlerin azaltılması için DTS tasarım formülleri geliştirmiştir. Ana kütle sönümü arttıkça, titreşim yutucu ile eklenecek sönüm gereksiniminin azaldığını göstermiştir [16].

Zuo ve Nayfeh (2003) çalışmalarında, çok serbestlik dereceli dinamik titreşim sönümleyiciler için bir optimizasyon geliştirmişlerdir. H_{∞} ve H_2 optimizasyonlarının performanslarını karşılaştırmışlar ve optimizasyonun tek serbestlik dereceli DTS'lerde olduğu kadar çok serbestlik dereceli DTS'lerde de etkin sonuçlar verdiğini göstermişlerdir [17].

Krenk ve Hogsberg (2007) çalışmalarında, sönümlü ana sisteme eklenmiş DTS ile çalışmışlardır. Optimum DTS'nin rastgele yük altında ana sistemin sönümünden bağımsız olacağı sonucuna ulaşmışlardır [18].

Bu tez çalışmasında yapılacak araştırmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Altı katlı laboratuvar ortamında tasarlanan bina modelinin Kocaeli, Kobe ve Northridge depremleri etkisindeki titreşim analizleri bilgisayar simülasyonu ile gerçekleştirilecektir.

- Laboratuvar bina modelinin titreşimlerinin azaltılması için AKD, PID kontrolcü, bulanık mantık kontrolcüsü ve adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsü tasarlanarak titreşim analizleri tekrarlanacaktır.
- Bu tezde ilk defa bina titreşimleri adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsü ile kontrol edilecektir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı; deprem etkisindeki bina modelleri için titreşim analizlerini gerçekleştirmek ve oluşan titreşimlerin azaltılması için pasif ve aktif kontrol sistemleri tasarlamaktır. Pasif kontrol yöntemi olarak ayarlı kütle damperi (AKD) ve aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID denetleyiciler tasarlanmıştır. Bu çalışmada, laboratuvar şartlarında inşa edilen bina modelinin zemin kaynaklı bozucu etkiler altında titreşim analizleri yapılarak pasif ve aktif kontrol yöntemleri ile binanın titreşimleri azaltılmaya çalışılmıştır. Laboratuvar bina modeli olarak Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Laboratuvarında bulunan çelik konstrüksiyon halinde inşa edilen altı katlı model kullanılmıştır. Bu bina modeline ait kütle, sönüm ve rijitlik değerleri incelenen literatür çalışmalarından alınmıştır. İncelenen bina, MATLAB-Simulink programında modellenerek titreşim analizleri yapılmıştır. Zorlayıcı etki olarak sisteme Kocaeli depremi (1999), Kobe depremi (1995) ve Northridge depremi (1994) girilmiştir. Bu sayede farklı depremlerin etkilerinde titreşim cevapları elde edilmiştir. Ayrıca bina modelinin frekans cevapları da çizdirilmiştir. Bina titreşimlerinin azaltılması için pasif kontrol yöntemi olarak ayarlı kütle damperi (AKD) ve aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID denetleyiciler tasarlanmıştır. Bu kontrol sistemlerinin uygulanması sonucu titreşim analizleri tekrar yapılarak performansları karşılaştırılmıştır. Bunun için Hataların Karelerinin Toplamı (Integral Square Error-ISE) yöntemi kullanılmıştır.

1.3 Hipotez

Titreşim problemlerinin kaynağında çözülmesi mühendislik çözümlerinde ilk adımdır. Deprem kaynaklı bina titreşimlerini kontrol edebilmek için yapısal elemanlar ile çalışılmalıdır. Bunun yanı sıra bina titreşimlerinin kontrol altına alabilmek için AKD tasarımı yapılabilir ve AKD için aktif kontrolcü tasarlanabilir. Bu tez çalışmasında laboratuvar şartlarında inşa edilen bina modelinin zemin kaynaklı bozucu etkiler altında titreşim analizleri yapılarak pasif ve aktif kontrol yöntemleri ile binanın titreşimleri simülasyon ortamında azaltılmaya çalışılacaktır. Bina titreşimlerinin azaltılması için pasif kontrol yöntemi olarak ayarlı kütle damperi (AKD) ve aktif kontrol yöntemi olarak, ayarlı kütle damperinin hareketi tasarlanan PID, FUZZY ve AFPID denetleyici ile kontrol edilecektir. Bu kontrol sistemlerinin uygulanması sonucu titreşim analizleri tekrar yapılarak karşılaştırılacaktır. Öncelikle bina modelinin hareket denklemleri elde edilecektir. Bina modelinin doğal frekansları ve mod şekilleri MATLAB programında yazılan bir algoritma ile bulunacaktır. Bina MATLAB-Simulink programında blok diyagramlar ile modellenerek titreşim analizleri yapılacaktır. Titreşim analizleri için zorlayıcı etki olarak sisteme Kocaeli depremi (1999), Kobe depremi (1995) ve Northridge depremi (1994) girilecektir. Bu sayede farklı depremlerin etkilerinde titreşim cevapları elde edilebilecektir. Bina modelinin bozucu etkiler altında her katın yer değiştirme, hız, ivme ve frekans cevapları elde edilecektir. Elde edilen zaman ve frekans cevaplarından tasarlanan kontrol yöntemlerinin üstün ve zayıf özellikleri incelenecektir. Bu sayede, yapılan bu çalışma bir tasarımcı ya da uygulamacı için örnek teşkil edecektir. Sonuç olarak doğruluğu kanıtlanmış, hassas ve daha güvenilir çözümler üretilecektir.

2 SİSTEMİN FİZİKSEL MODELİ

2.1 Titreşim Analizi

Titreşim, mekanik sistemlerin belli bir referans eksen (denge konumu) etrafındaki salınımıdır. Bu salınım belirli zaman aralıklarında tekrarlanıyorsa periyodik titreşim, tekrarlanmıyorsa gelişigüzel (rastgele) titreşim adını almaktadır. Titreşim olayı ısıtma ve konuşma olayları, müzik enstrümanlarından ses çıkması olaylarında istenen bir durumdur. Ancak mekanik sistemlerin çalışmasında yorulmaya neden olabilmekte ve yıkıcı bir etki olarak açığa çıkabilmektedir. Bu yüzden mekanik sistemlerde titreşimin oluşması istenmez. Titreşim olayı, mekanik sistemlerde bulunan yay elemanları üzerinde depolanan potansiyel enerjinin, kütle elemanları üzerinde kinetik enerji olarak açığa çıkmasıyla gerçekleşir. Sönüm elemanları ise bu enerji dönüşümünde her defasında bir miktar enerjiyi kendi içinde absorbe ederek mekanik sistem üzerindeki titreşime neden olan enerjiyi azaltmaya çalışır. Ancak bu titreşimler her sistemde istenen seviyeye sisteme ait sönüm elemanları ile getirilemez. Mekanik sistemlerin sönüm elemanlarına ek olarak pasif ve aktif kontrol sistemleri ile titreşim olayı kontrol altına alınabilir. Tasarlanan mekanik sistemlerdeki titreşim etkilerinin incelenebilmesi için titreşim analizi uygulanmaktadır. Titreşim analizi sonuçları istenen düzeyde değilse güvenlik, konfor gibi sebeplerle mekanik sistemler iyileştirilir. Bu iyileştirme işlemi mekanik sistemin tasarımı değiştirilerek ya da çeşitli kontrol yöntemleri ile sağlanabilir. Titreşim analizine ilk önce incelenmek istenen mekanik sistemin fiziksel modeli çıkartılıp kütle, sönüm ve yay parametreleri belirlenerek başlanır. Fiziksel modelin hareket denklemleri çeşitli yöntemlerle oluşturulur. Bu hareket denklemlerinin ivme-zaman, hız-zaman ve konum- zaman sonuçları sisteme giren bozucu girişin etkisine göre incelenir. Ayrıca mekanik sistemlerin frekans cevapları da incelenmelidir. Sistemde yapılan her değişiklikten sonra da titreşim analizi işlemi yapılarak sonuçlar karşılaştırılır.

2.1.1 Yapılarda Titreşim Analizi

Günümüze kadar çok sayıda insan depremlerin etkisiyle yapıların çökmesi sonucu hayatını kaybetmiştir. Bu yüzden yapı tarihi boyunca depreme dayanıklı yapılar inşa edilmeye çalışılmıştır. İlk önce klasik dönem diye adlandırılan statik kuvvetlere dayalı analizler yapılarak yapılar inşa edilmiştir. Ancak deprem gibi dış zorlayıcılar yapılara dinamik olarak etki etmektedir. Statik analiz sonucu inşa edilen yapılar da deprem ve rüzgâr gibi dış etkilere karşı dayanamayarak yıkılmışlardır. İkinci olarak dinamik analiz işlemleri sonucu yapılar inşa edilmeye başlanmıştır. Bu ikinci döneme modern çağ denmektedir. Dinamik analiz sonucu yapıların kesitlerinin büyümesi ve malzemelerinin iyileştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu zorunlulukların yapıları inşa etmeyi zorlaştırması, maliyeti arttırması nedenleri ile pasif ve aktif kontrol sistemleri geliştirilmiş ve yapılar üzerinde kullanılmaya başlanmıştır. Kontrol sistemlerinin kullanılmaya başlandığı bu döneme ise post modern çağ denir [4, 19, 20, 21].

Yapıların titreşim analizlerine fiziksel modelleri çıkartılarak başlanır. Fiziksel model, depremlerin yıkıcılığının yatay yönde olması sebebiyle sadece yatay yönde hareket edebilen ve zemine ankastre olarak mesnetli bir şekilde oluşturulur. Yapıların kat kütleleri, her katın kütlesi ile katın altında ve üstünde bulunan kolonların yarısının kütleleri toplanarak hesaplanır. Katların rijitlik değerleri ise kolonların her iki ucunun da ankastre kabul edildiği öteleme rijitliği formülü ile bulunur. Katlara ait sönüm değerlerine ise yapıda kullanılan malzemenin sönüm oranı (örneğin; çelik için sönüm oranı 0.02) kullanılarak ulaşılır. Eğer malzemenin sönüm oranı bilinmiyorsa Rayleigh sönüm prensibi kullanılarak sönüm değerleri elde edilir. Fiziksel modeli çıkartılan yapıların hareket denklemleri Lagrange yöntemi kullanılarak bulunur [11, 22].

Kolonların her iki ucunun da ankastre kabul edildiği kolon öteleme rijitliği Denklem 2.1’de görülmektedir. Burada E elastisite modülünü, I_{atalet} atalet momentini ve L de kolon uzunluğunu ifade etmektedir. Bu formül yardımıyla her kat için k rijitlik değerleri hesaplanmıştır.

$$k = \frac{12EI_{atalet}}{L^3} \quad (2.1)$$

Sönüm oranından kütle ve yayı da kullanarak sönüm değeri Denklem 2.2'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada ξ sönüm oranını, k rijitlik değerini ve m ise kütle değerini temsil etmektedir. Bu formül ile her kat için sönüm değeri elde edilmiştir.

$$c = \xi 2\sqrt{km} \quad (2.2)$$

$\alpha=0.0265$ ve $\beta=0.00011431$ olmak üzere Rayleigh sönüm prensibi Denklem 2.3'teki gibidir. Burada $[M]$ kütle matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini ve $[C]$ sönüm matrisini ifade eder.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2.3)$$

Lagrange yöntemi Denklem 2.4'teki gibidir. Burada E_K toplam kinetik enerjini, E_D toplam sönüm enerjisini, E_P toplam potansiyel enerjini, Q_i genelleştirilmiş kuvvetleri, q_i genelleştirilmiş koordinatları ve $\dot{q}_i$ genelleştirilmiş hızı ifade eder.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_P}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.4)$$

Yapılarda titreşim analizleri için, elde edilen hareket denklemleri MATLAB-Simulink programı ile simüle edilerek yer değiştirme, hız ve zaman cevapları incelenebilir. Sadece yatay yönde hareket edebilen ve zemine ankastre mesnet ile bağlı olmayan tek katlı bir bina modeli düşünüldüğünde deprem ivmesi olan $\ddot{x}_g$ sonucu zemin x_g kadar yer değiştirme hareketi yapar. Zeminden uygulanan bir sismik zorlama sonucu kat kütlelerinin zemine göre bağlı yer değiştirmesi x olur. Kat kütlelerinin mutlak yer değiştirmesi ise zeminin yer değiştirmesiyle katın bağlı yer değiştirmesinin toplamı olan $x_g + x$ kadar olur. Kat kütlelerinin ivmesine mutlak yer değiştirmenin iki defa türevi alınarak ulaşılır ve $\ddot{x} + \ddot{x}_g$ olarak bulunur. Bu ivme değeri ile kat kütlesi çarpılırsa, kata etki eden atalet kuvveti hesaplanır. Zemini ankastre olarak bağlı olmayan bu modelde kat kütlesi üzerine etki eden atalet kuvveti $m(\ddot{x} + \ddot{x}_g)$ 'dir [23].

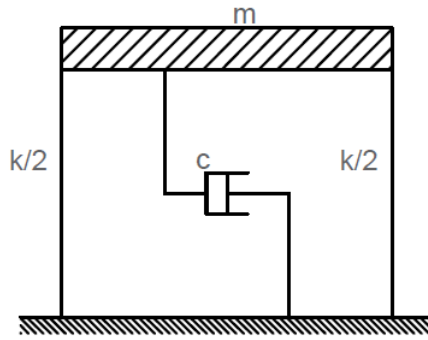
Sadece yatay yönde hareket edebilen ve zemine ankastre olarak bağlı tek katlı bir bina modeli düşünüldüğünde ise depremin sismik zorlaması sonucu kat kütlesi sadece x kadar yer değiştirmesine uğrar. Bu yer değiştirmenin iki defa türevi alınır da katın ivmesi olan $\ddot{x}$ değerine ulaşılır. Buradan kat kütlelerinin atalet

kuvveti $m\ddot{x}$ olarak hesaplanır. Bu kuvvet zemine bağlı olmayan modeldeki kuvvetten farklıdır. Bu farkın ortadan kaldırılabilmesi için zemine bağlı olan modeldeki kat kütlelerine $-m\ddot{x}_g$ dinamik bir dış kuvveti uygulanmalıdır [23].

Genel hareket denklemi Denklem 2.5'teki gibidir. Burada $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini temsil etmektedir. $F(t)$ kontrolcü kuvvetini ve kontrolcünün yerini gösteren ifadedir. $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$ ve $x(t)$ ifadeleri sırasıyla binaların ivme, hız ve yer değiştirmelerini temsil eder. $\ddot{x}_g(t)$ binalara uygulanan sismik ivme girişidir.

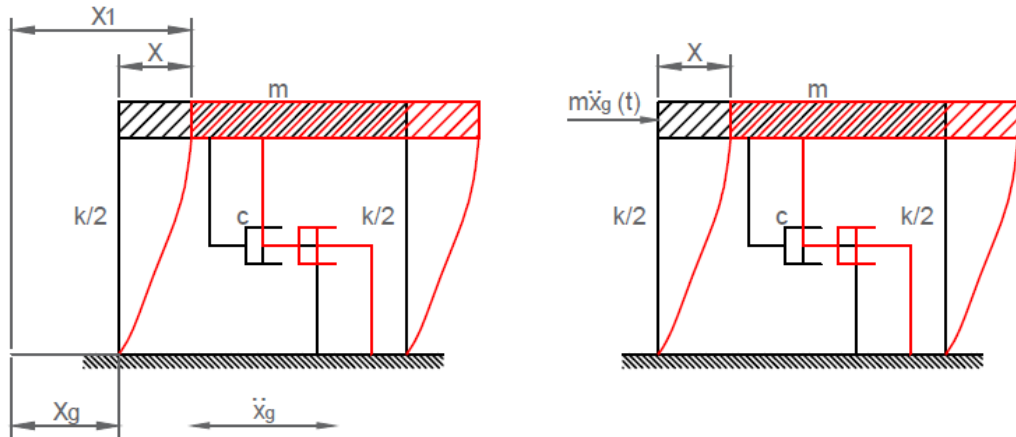
$$[M]\ddot{x}(t) + [C]\dot{x}(t) + [K]x(t) = -[M][1]\ddot{x}_g(t) + F(t) \quad (2.5)$$

Şekil 2.1'de tek serbestlik dereceli bina modeli görülmektedir.



Şekil 2.1 Tek serbestlik dereceli bina modeli

Şekil 2.2'de hareket edebilen ve tabana ankastre bağlı eşdeğer sistem görülmektedir.



Şekil 2.2 Hareket edebilen ve tabana ankastre bağlı eşdeğer sistem

2.1.2 Doğal Frekans, Rezonans ve Modal Analiz

Bir yapının sadece rijitliğine ve kütesine bağlı olarak değişen, uyarıldığı frekans değerinde uyarıcı etki ortadan kaldırılsa dahi sürekli olarak yüksek (sonsuz) genlikli dalgalar oluşturduğu frekans değerine o yapının doğal frekansı denir. Bir yapının doğal frekansları, kütle ve rijitlik değerleri hariç tüm değerlerin sıfır kabul edildiği genel hareket denklemi Denklem 2.6 çözülerek frekans değerlerinin elde edilmesiyle hesaplanır. Burada $[M]$ ve $[K]$ matrisleri sırasıyla kütle ve rijitlik matrislerini ifade eder. $\ddot{x}(t)$ ve $x(t)$ ifadeleri sırasıyla binaların ivme ve yer değiştirmelerini temsil eder. [24, 25, 26].

$$[M]\ddot{x}(t) + [K]x(t) = 0 \quad (2.6)$$

Eğer bir yapı doğal frekans değerinde zorlayıcı bir kuvvet ile titreşime giriyorsa bu yapıda rezonans durumu oluşur. Rezonans sonucu yapı aşırı titreşim salınımları yaparak hasar görebilir veya çökebilir. Rezonansa verilebilecek en iyi örnek ABD’de 1940 yılında kullanıma açılan ve dört ay sonra yıkılan döneminde dünyanın en büyük üçüncü asma köprüsü olan Tacoma Köprüsü’dür. Köprünün dinamik hesapları uygun yapılmadığı için en hafif rüzgarlarda bile salınım hareketi yapıyordu. Bu yüzden köprü rüzgârlı günlerde trafiğe kapatılıyordu. Tacoma Köprüsü, 7 Kasım 1940 tarihinde hafif bir rüzgârın etkisiyle salınım hareketi yaparken köprünün doğal frekans değeri ile rüzgârın frekans değerinin birbirine yaklaşmasıyla köprü salınım hareketi yaparak çökmüştür. Köprü o gün de trafiğe kapalı olduğu için köprü üzerinde bulunan bir köpek dışında can kaybı yaşanmamıştır [27].

Şekil 2.3’te salınım hareketi yapan Tacoma Köprüsü görülmektedir.



Şekil 2.3 Salınım hareketi yapan Tacoma köprüsü

Şekil 2.4'te rezonans etkisiyle çöken Tacoma Köprüsü görülmektedir.



Şekil 2.4 Rezonans etkisiyle çöken Tacoma köprüsü

Modal analiz, yapıların doğal frekans değerleri hesaplanması ve bu frekans değerlerinde alacakları mod şekillerinin belirlenmesidir. Yapılara etki eden zorlayıcı kuvvetlerin frekansları ile doğal frekans değerleri birbirlerine yaklaştırılmamalıdır. Zorlayıcı kuvvetler, doğal frekans bölgelerinden geçecekse hızlı bir frekans artışıyla geçmelidir. Yapı rezonans durumunda ne kadar az süre kalırsa o kadar az rezonanstan etkilenir [25, 26, 28].

2.1.3 Binalarda Titreşim Kontrolü

Bu yüzden binaların deprem, rüzgâr gibi zorlayıcı dış kuvvetler etkisinde hareketlerinin güvenlik ve konfor kaygısıyla kontrol altına alınması gerekmektedir. Yapıların titreşimleri sismik izolasyon, pasif kontrol ve aktif kontrol sistemleri olarak üç yöntemle kontrol altına alınabilir [4].

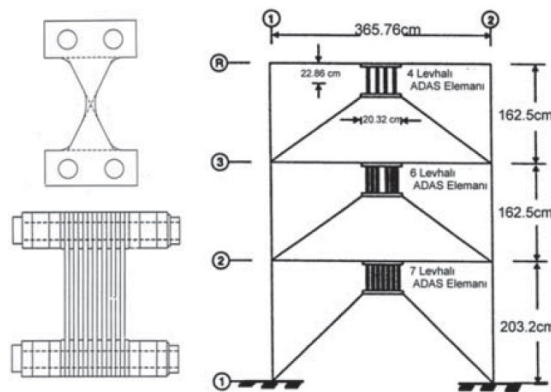
2.1.4 Binalarda Uygulanan Pasif Kontrol Yöntemleri

Pasif kontrol sistemleri, yapılara yerleştirilen özel elemanlar ile yapıların deprem, şiddetli rüzgâr vb. nedenlerle yapıya uygulanan dış kuvvetlerden kaynaklı enerjinin sönümlenmesini kolaylaştırır. Pasif kontrol sistemlerinin hesaplamaları kolay ve maliyetleri düşüktür. Kullanımları için dışarıdan güç alabilecekleri bir kaynağa ihtiyaç duymazlar. Bu sayede, deprem anında elektrik kesintilerinden de etkilenmezler. Ancak pasif kontrol sistemleri titreşimi aktif kontrol sistemleri kadar iyi sönümleyemezler. Pasif kontrol sistemleri çeşitli yöntemlerle uygulanabilir [4, 29, 30, 31].

2.1.4.1 Mekanik Sönümleyiciler

Binalara etki eden zorlayıcı enerjinin üçgen, dikdörtgen ve X şeklinde yumuşak çelik malzemeden üretilmiş levhalar üzerinde toplanması ve bu levhaları elastik olmayan deformasyona uğratmasıyla enerji sönümlenir. Elastik deformasyona uğrayan bu plakalar belirli aralıklarla değiştirilerek binaların pasif kontrol sistemi işletilir [4, 29].

Şekil 2.5'te X şekilli metalik sönümleyici görülmektedir.



Şekil 2.5 X şekilli metalik sönümleyici [29]

2.1.4.4 Viskoz Akışkanlı Sönümleyiciler

İçinde viskoz akışkanın bulunduğu piston-silindir düzeneği binalara yerleştirilerek titreşimler kontrol altına alınmaya çalışılır [4, 29, 33].

Şekil 2.8’de viskoz akışkanlı sönümleyici görülmektedir.

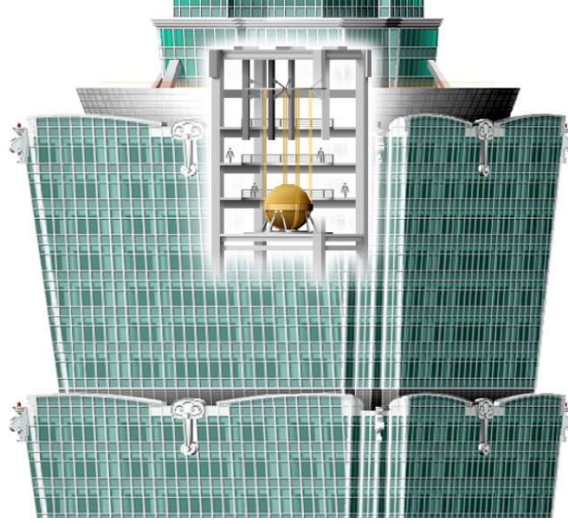


Şekil 2.8 Viskoz akışkanlı sönümleyici [29]

2.1.4.5 Ayarlı Kütle Damperi (AKD)

Ayarlı kütle damperleri kullanılarak binaların titreşimleri istenilen düzeye getirilmeye çalışılır. Ayarlı kütle damperlerinin bir başka amacı ise yıkıcı etkisi en büyük olan birinci doğal frekansın genliğini baskılamaktır. Literatürde “Tuned Mass Damper (TMD)” olarak adlandırılır. Ayarlı kütle damperlerinin yerleştirildiği ilk yapı Avustralya’nın Sydney şehrindeki Centerpoint gökdelenidir. Amerika Birleşik Devletleri’ndeki ilk binalar ise New York’ta bulunan Citicorp Center ve Boston’da bulunan John Hancock gökdelenidir. Japonya’da ise Chiba Port gökdeleni ve Osaka’da bulunan Funade Bridge gökdelenidir. Dubai’de ise Burj Al Arab otelinde ve Emirates kulelerinde kullanılmıştır. Ayarlı kütle damperleri birçok köprüde de kullanılmaktadır [4, 12, 24, 29, 34].

Şekil 2.9’da Taipei 101’de kullanılan AKD’nin konumu görülmektedir.



Şekil 2.9 Taipei 101’de kullanılan AKD’nin konumu

Şekil 2.10’da Taipei 101’de kullanılan sarkaç DTS görülmektedir.



Şekil 2.10 Taipei 101’de kullanılan AKD

Şekil 2.11’de Burj Al Arab Oteli ve 5 tonluk AKD görülmektedir.



Şekil 2.11 Burj Al Arab Oteli 5 tonluk AKD

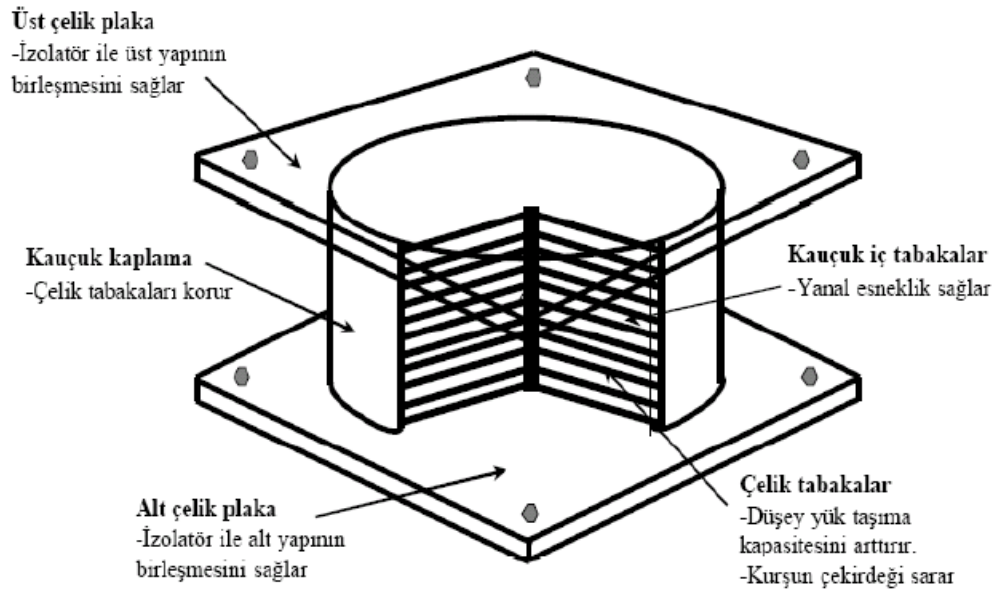
2.1.5 Sismik İzolasyon

Sismik izolatörler düşeyde rijit yatayda elastiktir. Bu sayede zemin ile bina arasına yerleştirilen sismik izolatörler binaların deprem etkisinde davranışlarının elastik bölgede kalmasını sağlar. Enerjinin sönümü bu sismik izolatörler üzerinde sağlanır [4, 29, 35].

2.1.5.1 Düşük Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk İzolatörler

İki çelik levha arasında bulunan bu izolatörler kolayca üretilebilme, modellenmesinin kolaylığı ve çevre şartlarından az etkilenmesi sebepleriyle tercih edilmektedir. Ancak ek sönümleme elemanlarına ihtiyaç duyarlar [4, 29, 32].

Şekil 2.12’de düşük sönümlü kauçuk izolatör görülmektedir.



Şekil 2.12 Düşük sönümlü kauçuk izolatör [32]

2.1.5.2 Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler

Düşük sönümlü kauçuk izolatörlerin ortalarından kayma deformasyonlarını engellemek için kurşun çekirdek kullanılmasıyla oluşturulur. Yeni Zelanda, Japonya ve ABD’de kullanılmaktadır [4, 29].

Şekil 2.13’te kurşun çekirdekli kauçuk izolatör görülmektedir.

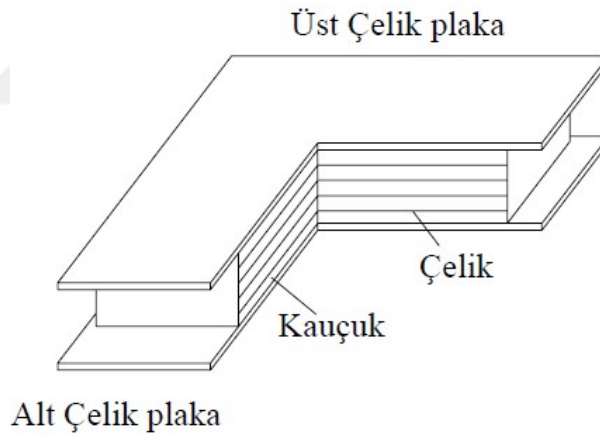


Şekil 2.13 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör [29]

2.1.5.3 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler

Düşük sönümlü kauçuk izolatörlerin ek sönümleme elemanına ihtiyaçlarının olmaması için Malezya Kauçuk Üreticileri Birliği tarafından 1982’de üretilmiştir. Sönüm değeri reçine, yağ, karbon blokları ve dolgu malzemeleri ile iyileştirilmiştir [4, 29].

Şekil 2.14’te yüksek sönümlü kauçuk izolatör görülmektedir.

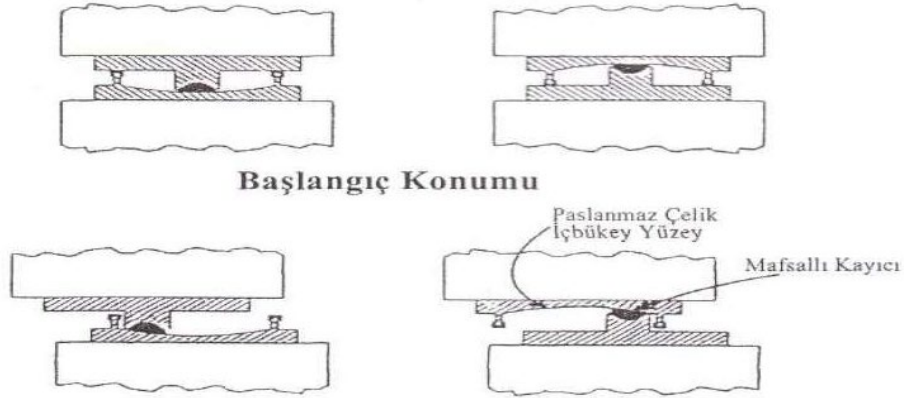


Şekil 2.14 Yüksek sönümlü kauçuk izolatör [4]

2.1.5.4 Kayma Tipi İzolatörler

Küresel bir kayma yüzeyi kullanılarak deprem etkisinde binanın başlangıç konumundan yükselip alçalarak potansiyel ve kinetik enerji dönüşümleri oluşturur. Bu sayede yapıların burulma hareketi yapması önlenir. Enerji, malzemelerin sürtünmeleri ile de bir miktar sönümlenir. Bina üzerindeki enerji bitene kadar bu enerji dönüşümleri devam eder ve sonunda izolatör başlangıç durumuna geri gelir.

Şekil 2.15'te kayma tipi izolatörler görülmektedir.



Şekil 2.15 Kayma tipi izolatörler [4]

2.1.5.5 Yaylar

Enerji tesisleri, fabrikalar gibi binalarda titreşimden kaynaklanan hareketin üç boyutlu olarak sönümlenmesinin istendiği durumlarda kauçuk ve kayma tipi izolatörlere ek olarak yaylar da kullanılır. Çünkü kauçuk ve kayma tipi izolatörler yatay hareketin sönümlenmesi için kullanılır [4, 29].

2.1.6 Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif kontrol sistemleri, zorlayıcı bir dış kuvvet etkisindeki binaların titreşimlerinin dışarıdan bir enerji kaynağı kullanılarak istenilen düzeye getirilmesidir. Kontrol sistemi kullanılmayan veya pasif kontrol sistemi kullanılmış bir bina aktif kontrol sistemi ile yıkılmaktan korunabilir. Pasif kontrol sistemlerinin titreşimleri sönümlemedeki başarısı kısıtlıdır. Örneğin ayarlı kütle damperleri sadece ana binaların birinci doğal frekansına göre tasarlanır. Aktif kontrol sistemleri ise daha geniş bir frekans aralığında başarı gösterir. Denetleyici kuvvetinin oluşturulması için gücün daima hazır bulundurulması ve elde edilmesi, sistem kurulum, işletme ve bakım maliyetlerini yüksek olması aktif kontrol sistemlerinin bazı dezavantajlarıdır [4, 11, 29, 36, 37].

Aktif kontrolü sağlamanın bir yolu çıkış geri beslemeli algoritmalarıdır. PID, FUZZY gibi aktif kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan kontrolcülerin çoğu PID kontrolcüdür. PID kontrolcülerin bu kadar yaygın kullanılmasının sebebi basit ve güvenilir olmasıdır [38].

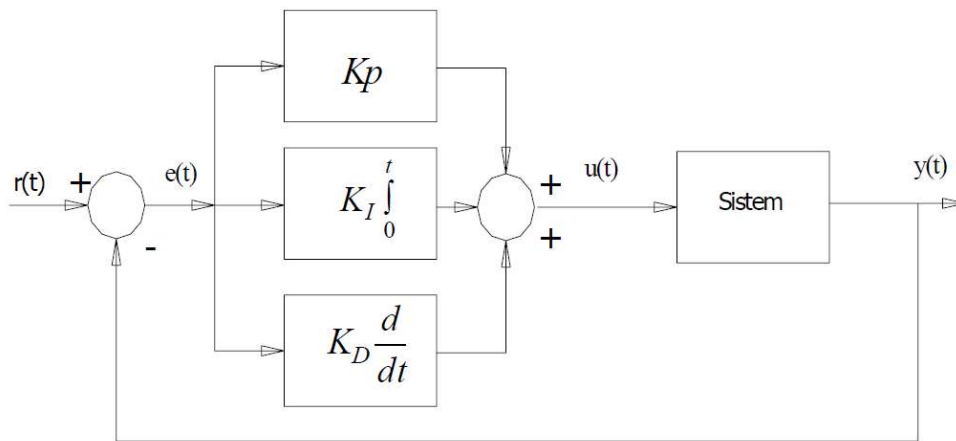
2.1.6.1 Binalarda PID Kontrolcü Kullanımı

PID kontrolcüler orantı, integral ve türev kontrol sistemlerinin birleşiminden oluşmaktadır. PID kontrolcü olduğu üç kontrol sisteminin üstün özelliklerini birleştirerek uygulandığı mekanik sistemlerin titreşimlerinin daha etkin bir şekilde azaltılmasını sağlar. Orantı (P) kontrol sistemi sayesinde kalıcı durum hatası azaltılır. İntegral (I) kontrol sistemi ile hatanın integrali herhangi bir anda büyük olursa düzeltme etkisi sağlar. Aynı zamanda kalıcı durum hatasını sıfırlar. Türev (D) kontrol sistemi kullanılarak da hatanın büyümesi önceden kontrolcü tarafından öngörüldüğünde daha hata ortaya çıkmadan harekete geçer [4, 11, 36].

PID denetleyicilerin kontrol yasası Denklem 2.7'deki gibidir. Burada K_p orantı kontrol katsayısı, K_I integral kontrol katsayısı, K_D türev kontrol katsayısı, $e(t)$ hata sinyali ve $u(t)$ kontrol sinyalidir.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{K_I}{K_p} \int_0^t e(t) dt + \frac{K_D}{K_p} \frac{de}{dt} \right] \quad (2.7)$$

Şekil 2.16'da örnek bir PID kontrolcünün blok diyagram gösterimi görülmektedir.



Şekil 2.16 Örnek bir PID kontrolcünün blok diyagram gösterimi [8]

Binalara PID tasarımı yapılırken titreşimleri azaltılmak istenen katın yer değiştirme verisi referans olarak alınan bir değerden çıkartılarak hata sinyali elde edilir. Referans sinyali bina modellerinde sıfır olarak alınır. Hata sinyali PID

denetleyiciden geçirilerek sisteme verilir. PID denetleyicilerin parametreleri deneme yoluyla elde edilir. Deneme işlemi katların titreşimlerinin sönümlenmesi, frekans cevaplarının uygun ölçüde bastırılması ve hata sinyalinin en az değerde olması esaslarına dayanır. Deprem, rüzgâr gibi bir dış etki altında titreşim hareketi yapan binalarda PID kontrolcü devreye girerek örneğin lineer bir motor ya da hidrolik bir silindir sayesinde binalara denetleme kuvveti verir. Bu kuvvet sayesinde binaların titreşimleri azaltılır [13].

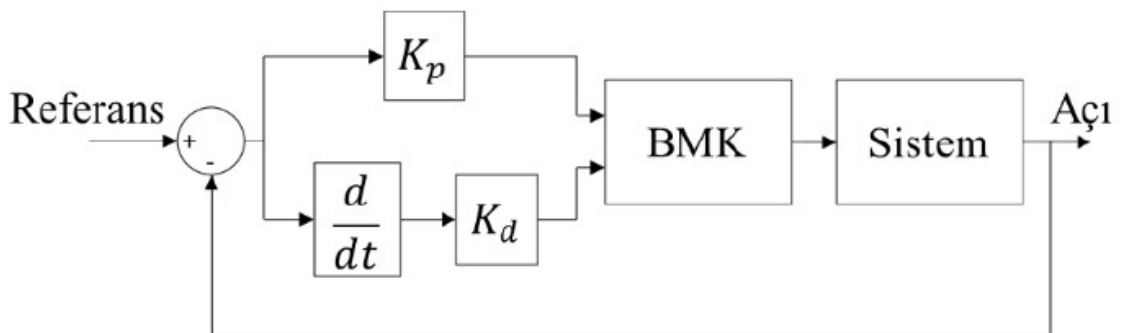
Altıncı katın titreşimlerinin azaltılmak istendiği bir model için hata sinyali Denklem 2.8'deki gibidir. Burada $e(t)$ hata sinyalini, $X_{ref6}(t)$ referans sinyalini ve $X_6(t)$ altıncı kat için yer değiştirmeyi ifade eder.

$$e(t) = X_{ref6}(t) - X_6(t) \quad (2.8)$$

2.1.6.2 Binalarda Bulanık Mantık Kontrolcüsü Kullanımı

Bulanık mantık kontrolcü insanın düşünme sistemi ve dilsel izah üzerine kurulmuştur. Bulanık mantık olayların kesin taraflarından çok yaklaşıklıklar üzerinde durur. Bulanık mantığın amacı, insanların kesin olmayan bilgiler doğrultusunda, doğru kararlar vermelerini sağlayan, düşünme ve karar verme mekanizmalarının modellenmesidir [4, 7, 8, 10].

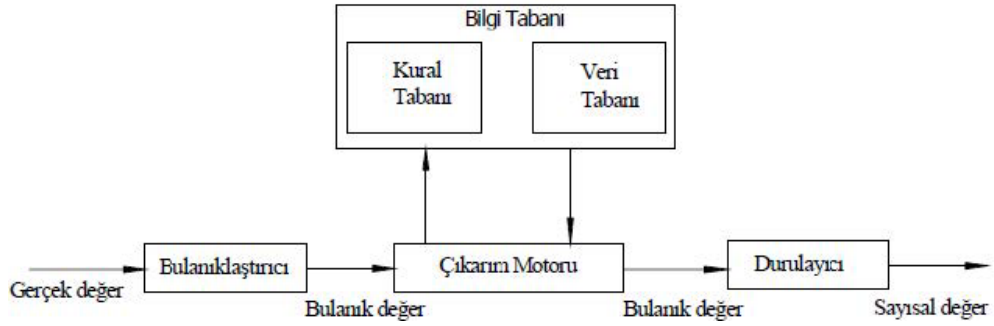
Şekil 2.17'de bulanık mantık kontrolcü yapısı görülmektedir.



Şekil 2.17 Bulanık mantık kontrolcü yapısı

Bulanık mantık kontrolcü sisteme Şekil 2.17'deki gibi uygulanmaktadır. Bulanık kontrolcüdeki hata katsayısı K_p ve hata hızı katsayısı K_d olarak belirtilmiştir.

Şekil 2.18’de bulanık mantık kontrolcüsünün blok diyagramı görülmektedir.



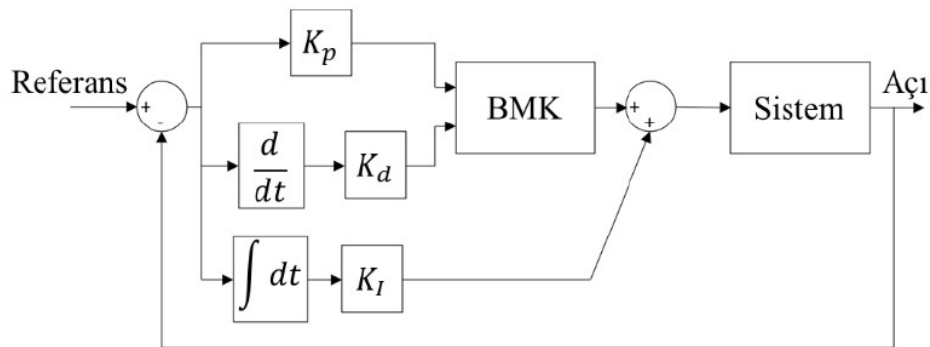
Şekil 2.18 Bulanık mantık kontrolcüsünün blok diyagramı [4]

Bulanıklaştırıcı gerçek dünyadaki fiziksel değerlerin bu değerlere bulanık değerler atanarak bulanık uzaya taşınmasını sağlar. Uzman kişinin bilgi ve tecrübeleri ışığında hazırlanan kurallar bilgi tabanını oluşturur. Bulanık giriş değerleri çıkarım motoru ile kural tabanına göre yorumlanır. FUZZY kontrolcüsünün çıkışında elde edilen bulanık değerler netleştirici ile fiziksel dünyada kullanılabilecek forma getirilir [39].

2.1.6.3 Binalarda Adaptif Bulanık Mantık PID Kontrolcüsü Kullanımı

BPID temelde FUZZY ve PID özelliklerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. FUZZY’de ortaya çıkan kararlı hal hatası bu sayede ortadan kaldırılabilirken daha iyi bir kararlı hal cevabı elde edilebilmektedir [40, 41].

Şekil 2.19’da BPID kontrolcü yapısı görülmektedir.



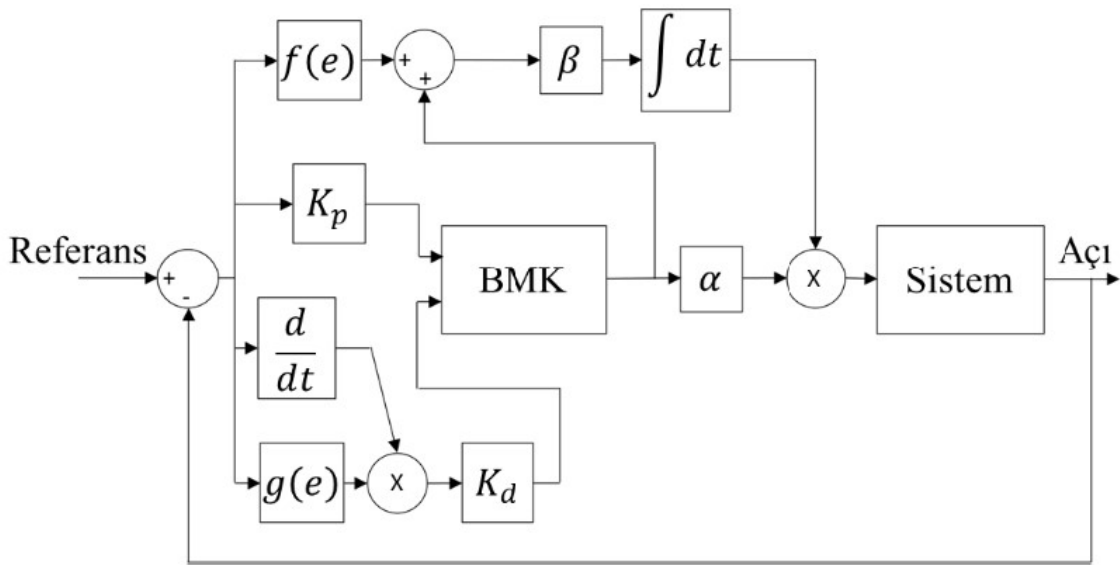
Şekil 2.19 BPID kontrolcü yapısı

Gerçek sistemde sistem parametrelerinde değişim olacağından dolayı kontrolcü çarpanlarının yeniden düzenlenerek kullanılması gerekmektedir. Bunu

sağlayabilmek için kontrolcü kazançlarının tekrar ayarlanması özelliği eklenmesi gerekmektedir. Bunun için AFPID kontrolcü geliştirilmiştir [42].

AFPID kontrolcünde hata sinyali üzerine fonksiyonlar tanımlanır. Bu fonksiyonlar hata sinyalini kullanarak kontrol kazançlarını anlık olarak günceller. Kontrolcü değişen kontrol parametreleri sayesinde sistemdeki değişikliklere uyum sağlayabilir.

Şekil 2.20’de AFPID kontrolcü yapısı görülmektedir.



Şekil 2.20 AFPID kontrolcü yapısı

AFPID kontrolcü yapısında görülen $f(e)$ ve $g(e)$ parametre uyarlama fonksiyonlarıdır. Denklem 2.9 ve Denklem 2.10’da bu fonksiyonlar verilmiştir. Burada a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , α ve β pozitif sabit sayılardır [41].

$$f(e) = a_1|e| + a_2 \quad (2.9)$$

$$g(e) = b_1(1 - |e|) + b_2 \quad (2.10)$$

Bulanık PID kontrolcü çıkışı Denklem 2.11’de verilmiştir. Burada F bulanık kontrolcü çıkışındaki sinyaldir.

$$u = \alpha F \beta \int (f(e) + F) dt \quad (2.11)$$

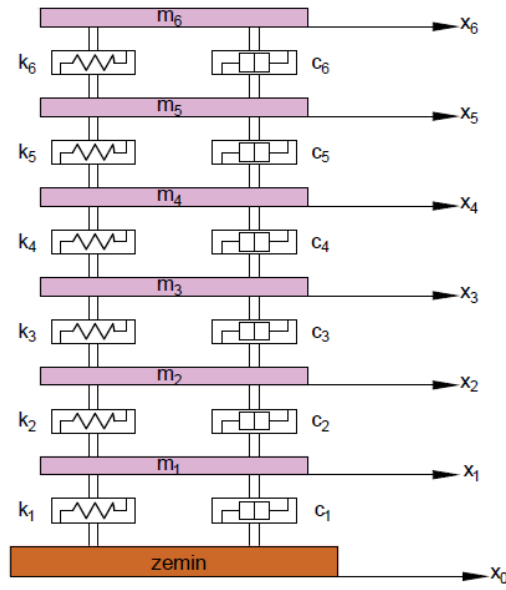
2.1.7 Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Yarı aktif kontrol sistemlerinde elektrik ve manyetik alanlar yardımıyla pasif kontrol sistemleri olan MR sıvılarının mekanik özelliklerinin kontrolü üzerine çalışır. Yarı aktif kontrol sistemleri, aktif kontrol sistemlerine göre daha az güç ile çalışır. Bu yüzden pille dahi çalıştırılabilir. Bu özellik sayesinde yarı aktif kontrol sistemi deprem anında elektrik kesilse bile çalışır [4, 29].

2.2 Laboratuvar Bina Modeli

Bu çalışmada, çok serbestlik dereceli laboratuvar ortamında tasarlanan bina modeli kullanılarak titreşim analizleri yapılmıştır. Bina modelinin fiziksel modeli oluşturulmuş ve Lagrange yöntemi ile hareket denklemleri elde edilmiştir. Zorlayıcı etki olarak Türkiye Kocaeli’nde 1999 yılında meydana gelen $M_w = 7.4$ (M_w moment büyüklüğünü ifade etmektedir) şiddetindeki Kocaeli depremi, Japonya Kobe’de 1995 yılında meydana gelen $M_w = 6.9$ şiddetindeki Kobe depremi ve Amerika Birleşik Devletleri Los Angeles Reseda’da 1994 yılında meydana gelen $M_w = 6.7$ şiddetindeki Northridge depremi verileri kullanılmıştır. Son olarak MATLAB-Simulink programı ile bina modelinin frekans cevapları elde edilmiştir. Yapılan titreşim analizleri sonuçları yorumlanarak kat titreşimlerinin azaltılması için pasif kontrol sistemi olan ayarlı kütle damperi (AKD) tasarlanarak titreşim analizi işlemleri tekrarlanmıştır. Kat titreşimlerini daha da azaltabilmek için ayarlı kütle damperi (AKD) bulunan bina modeline aktif kontrol sistemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcüler uygulanmıştır. Her kat için yer değiştirme-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri titreşim analizleri tekrarlanarak çizdirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Laboratuvar bina modeli olarak Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Laboratuvarında bulunan çelik konstrüksiyon halinde inşa edilen altı katlı bina modeli kullanılmıştır. Laboratuvar bina modelinin, ankastre mesnet ile zemine bağlı ve sadece yatayda hareket edebilen bir sistem şeklinde fiziksel modeli oluşturulmuştur. Bu durumun sebebi, depremlerin yapıya üç boyutlu olarak etki etmesine rağmen asıl yıkıcı etkiyi yatay yöndeki titreşimlerle oluşturmasıdır.

Şekil 2.21’de laboratuvar bina modelinin fiziksel modeli görülmektedir.



Şekil 2.21 Laboratuvar bina modelinin fiziksel modeli

Laboratuvar bina modeline ait bilgiler Tablo 2.1’deki gibidir. Burada E elastisite modülünü, L kolon uzunluğunu, b kolon genişliğini, h kolon yüksekliğini ve I_{atalet} atalet momentini ifade etmektedir.

Tablo 2.1 Laboratuvar bina modeline ait bilgiler [9]

Kat	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)	Diğer Bilgiler
1	107.5	16.59	145150	$E = 210 \cdot 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$
2	107.5	16.59	145150	$L = 0.25 \text{ (m)}$
3	106.8	16.59	145150	$b = 0.1 \text{ (m)}$
4	106.8	16.59	145150	$h = 0.003 \text{ (m)}$
5	106.8	16.59	145150	$I_{atalet} = \frac{bh^3}{12} \text{ (m}^4\text{)}$
6	106.8	16.59	145150	Kolon sayısı: 4

2.2.1 Laboratuvar Bina Modelinin Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Bina modelinin hareket denklemlerini oluşturmak için Lagrange yöntemi kullanılmıştır.

Lagrange yönteminin genel ifadesi;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_P}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.12)$$

Altı serbestlik dereceli bina modeline ait enerji denklemleri:

$$E_K = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}_3^2 + \frac{1}{2} m_4 \dot{x}_4^2 + \frac{1}{2} m_5 \dot{x}_5^2 + \frac{1}{2} m_6 \dot{x}_6^2 \quad (2.13)$$

$$E_P = \frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (x_3 - x_2)^2 + \frac{1}{2} k_4 (x_4 - x_3)^2 + \frac{1}{2} k_5 (x_5 - x_4)^2 + \frac{1}{2} k_6 (x_6 - x_5)^2 \quad (2.14)$$

$$E_D = \frac{1}{2} c_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2} c_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2 + \frac{1}{2} c_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2 + \frac{1}{2} c_6 (\dot{x}_6 - \dot{x}_5)^2 \quad (2.15)$$

Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilen hareket denklemleri:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = 0 \quad (2.16)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 - c_3 \dot{x}_3 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3) x_2 - k_3 x_3 = 0 \quad (2.17)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 - c_3 \dot{x}_2 + (c_3 + c_4) \dot{x}_3 - c_4 \dot{x}_4 - k_3 x_2 + (k_3 + k_4) x_3 - k_4 x_4 = 0 \quad (2.18)$$

$$m_4 \ddot{x}_4 - c_4 \dot{x}_3 + (c_4 + c_5) \dot{x}_4 - c_5 \dot{x}_5 - k_4 x_3 + (k_4 + k_5) x_4 - k_5 x_5 = 0 \quad (2.19)$$

$$m_5 \ddot{x}_5 - c_5 \dot{x}_4 + (c_5 + c_6) \dot{x}_5 - c_6 \dot{x}_6 - k_5 x_4 + (k_5 + k_6) x_5 - k_6 x_6 = 0 \quad (2.20)$$

$$m_6 \ddot{x}_6 - c_6 \dot{x}_5 + c_6 \dot{x}_6 - k_6 x_5 + k_6 x_6 = 0 \quad (2.21)$$

Bozucu bir dış etki altında ve kontrolcüye sahip genel bina modelinin hareketi denklemi:

$$[M] \ddot{x}(t) + [C] \dot{x}(t) + [K] x(t) = -[M][1] \ddot{x}_g(t) + F(t) \quad (2.22)$$

Burada $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t) \ x_5(t) \ x_6(t)]^T$ katların yatay yer deşiştirmelerini, $\ddot{x}_g$ sisteme uygulanan bozucu girişini, $F(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ F_u - F_u]^T$ kontrolcü kuvvetini ve yerini göstermektedir. $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ ise sırasıyla bina modeline ait kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir [1, 43].

Kütle Matrisi:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_6 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Sönüm Matrisi:

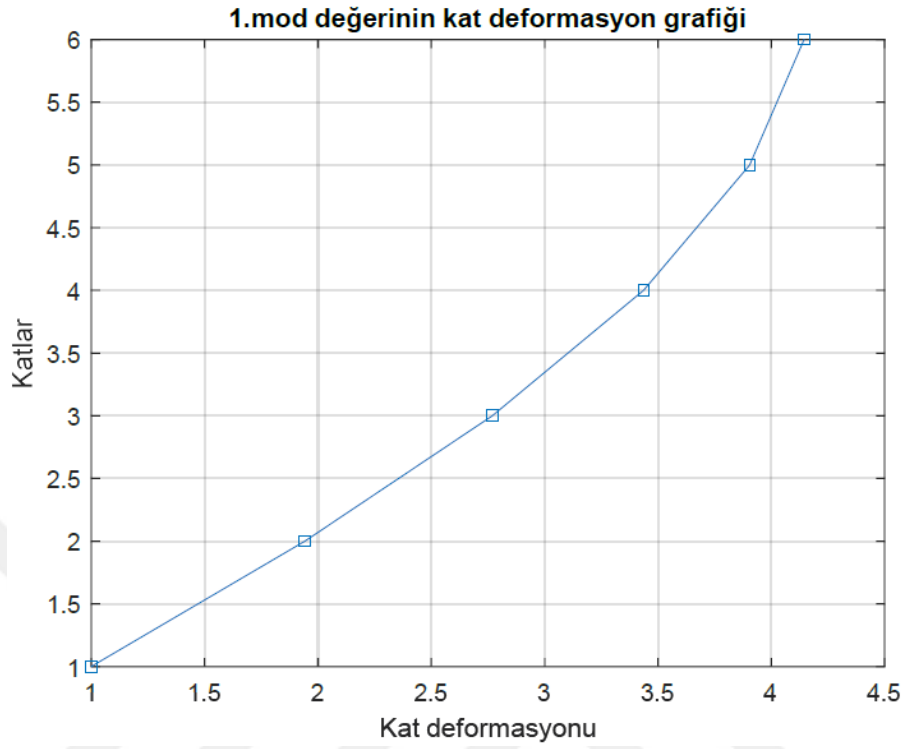
$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_5 & -c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 + c_6 & -c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_6 & -c_6 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Rijitlik Matrisi:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 + k_6 & -k_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_6 & -k_6 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

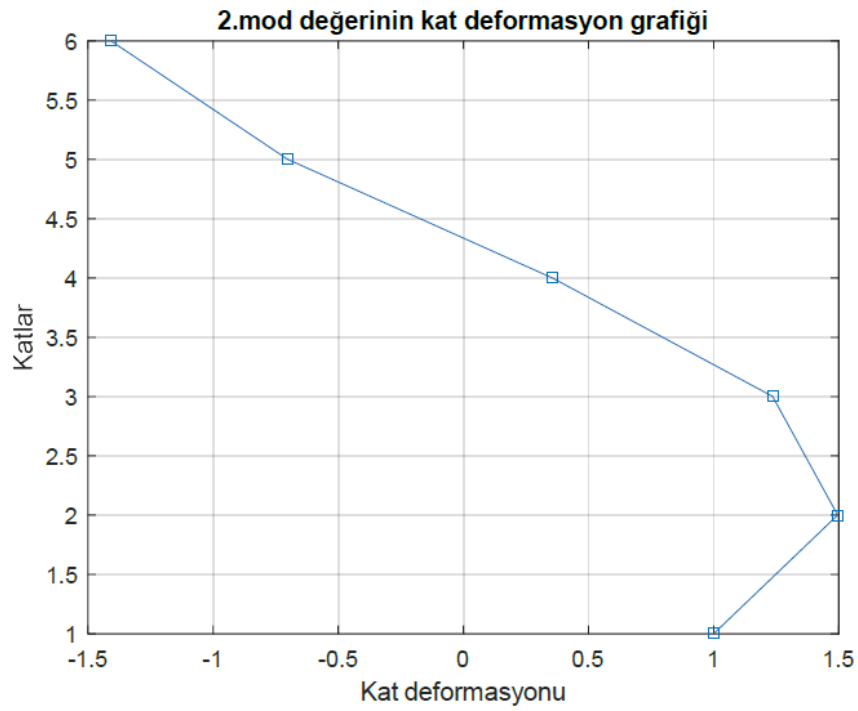
2.2.2 Laboratuvar Bina Modelinin Mod Şekilleri

Şekil 2.22’de laboratuvar bina modelinin 1. mod şekli görülmektedir.



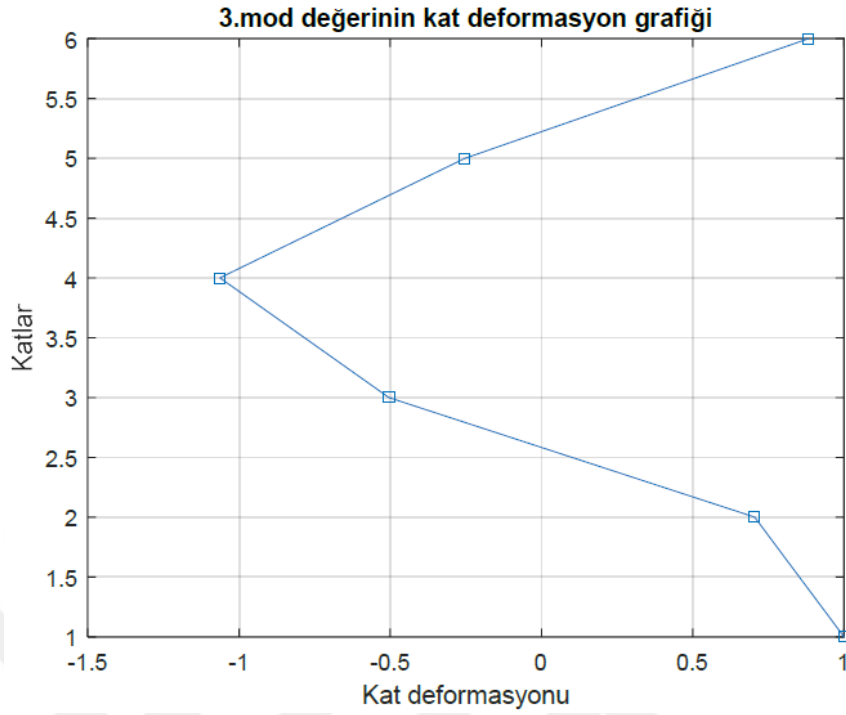
Şekil 2.22 Laboratuvar bina modelinin 1. mod şekli

Şekil 2.23’te laboratuvar bina modelinin 2. mod şekli görülmektedir.



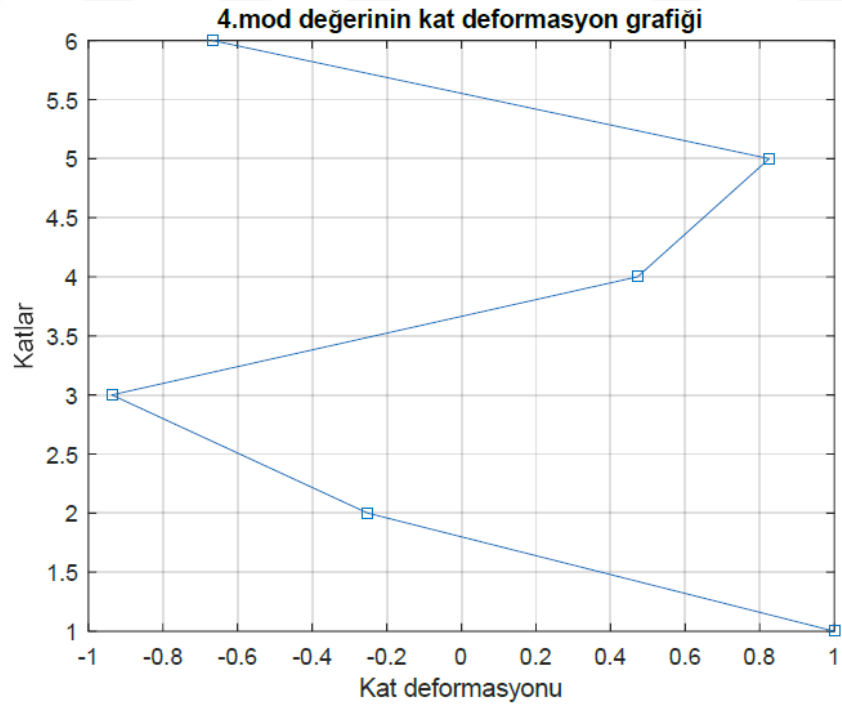
Şekil 2.23 Laboratuvar bina modelinin 2. mod şekli

Şekil 2.24'te laboratuvar bina modelinin 3. mod şekli görülmektedir.



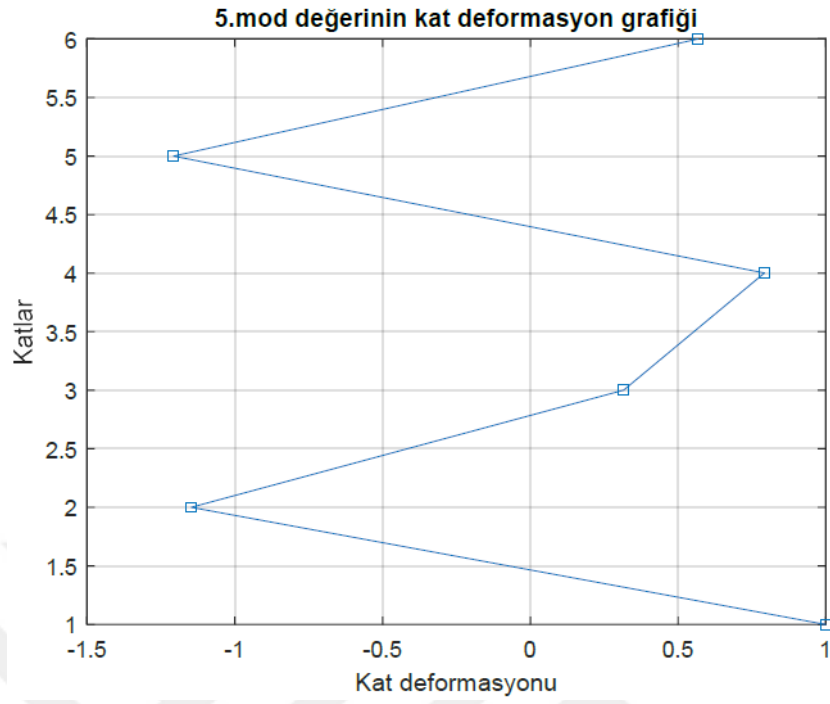
Şekil 2.24 Laboratuvar bina modelinin 3. mod şekli

Şekil 2.25'te laboratuvar bina modelinin 4. mod şekli görülmektedir.



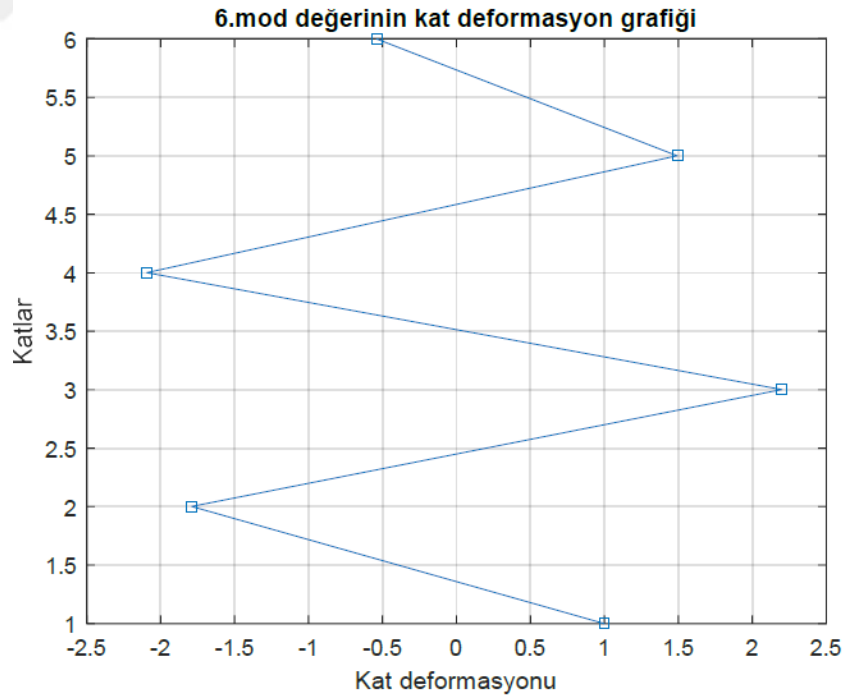
Şekil 2.25 Laboratuvar bina modelinin 4. mod şekli

Şekil 2.26'de laboratuvar bina modelinin 5. mod şekli görülmektedir.



Şekil 2.26 Laboratuvar bina modelinin 5. mod şekli

Şekil 2.27'de laboratuvar bina modelinin 6. mod şekli görülmektedir.



Şekil 2.27 Laboratuvar bina modelinin 6. mod şekli

2.2.3 Laboratuvar Bina Modeli Titreşimlerinin Azaltılması için AKD Tasarımı

Binaların birinci doğal frekans değeri deprem esnasındaki en tehlikeli ve en yıkıcı frekansıdır. Bu yüzden pasif kontrol sistemi olan ayarlı kütle damperlerinin kütle, sönüm ve rijitlik parametreleri ana binanın birinci doğal frekansına göre hesaplanır. Ayarlı kütle damperlerinin binalarda kullanılması sonucu kat titreşimleri azaltılırken birinci doğal frekans değerinin genliği de bastırılmaya çalışılır. Deprem etkisindeki binalarda titreşim etkisiyle hareketin daha fazla olduğu en üst kata ayarlı kütle damperi (AKD) yerleştirilir [44].

Tablo 2.1'deki veriler kullanılarak laboratuvar bina modelinin sönüm oranı yaklaşık olarak 0.002, toplam kütlesi 642.2 [kg] olarak hesaplanmıştır. Laboratuvar bina modelinin doğal frekansları Tablo 2.2'de görölmektedir.

Tablo 2.2 Laboratuvar bina modelinin doğal frekansları

No	Doğal Frekans (Hz)
1	1.4141
2	4.1552
3	6.6572
4	8.7742
5	10.3742
6	11.4096

Sönüm oranı:

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (2.26)$$

Burada ξ sönüm oranını, k rijitlik değeri, m ise kütle değeri ve c sönüm değeri temsil etmektedir [6].

Toplam kütle:

$$m_T = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 \quad (2.27)$$

Burada m laboratuvar bina modelinin toplam kütesini, $m_1 \dots m_5$ laboratuvar bina modelinin her katının kütesini ifade eder [9].

Ayarlı kütle damperi kütesinin ana bina kütesine oranı %1 olarak seçilmiştir. Ayarlı kütle damperinin doğal frekansının ana yapının doğal frekansına oranı Şekil 2.28'den 0.988, ayarlı kütle damperinin sönüm oranı ise Şekil 2.29'dan 0.06 değerleri okunmuştur. Bu tablolar okunurken ana binanın sönüm oranı 0.002 gibi çok küçük bir değer olduğu için sönüm oranı 0.02 olan çizgiler dikkate alınmıştır. Bu değerler kullanılarak ayarlı kütle damperi parametreleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$m_{AKD} = \bar{m}m_T \quad (2.28)$$

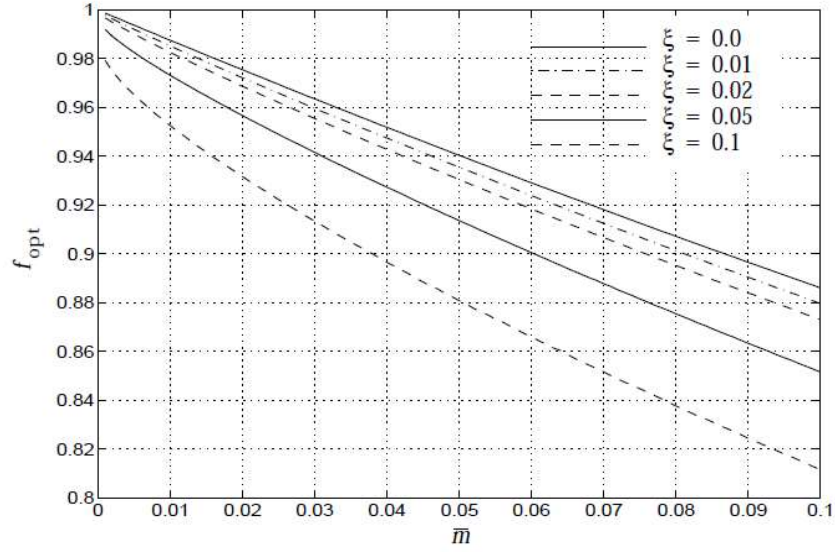
$$w_{AKD} = f_{opt}w_1 \quad (2.29)$$

$$c_{AKD} = 2\xi_{d|opt}w_{AKD}m_{AKD} \quad (2.30)$$

$$k_{AKD} = (w_{AKD})^2m_{AKD} \quad (2.31)$$

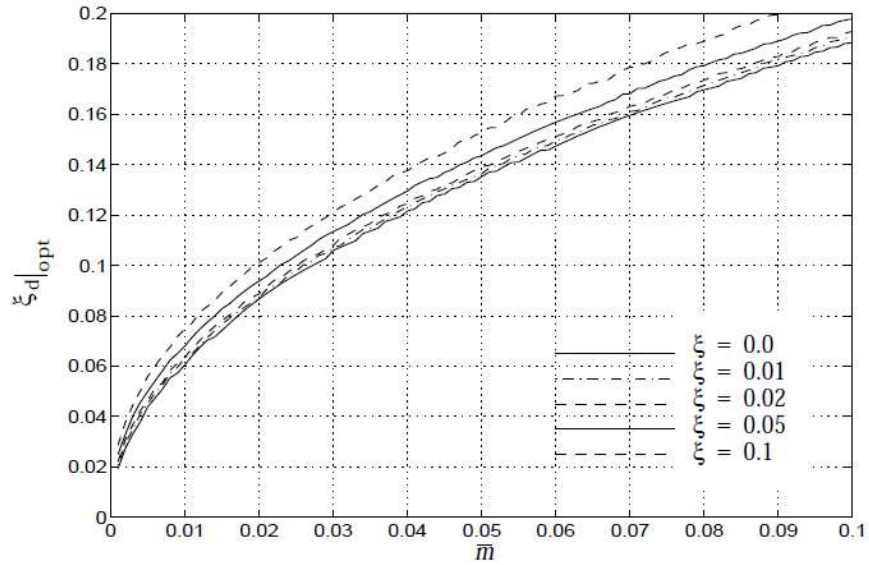
Burada $\bar{m}$ AKD kütesinin ana yapının kütesine oranını, m_T binaların kütlelerinin toplamını, m_{AKD} AKD kütle değerini, w_1 bina modelinin birinci doğal frekansını, f_{opt} AKD doğal frekansının ana yapının doğal frekansına oranını, w_{AKD} AKD doğal frekansını, $\xi_{d|opt}$ AKD'nin sönüm oranını, c_{AKD} AKD sönüm değerini ve k_{AKD} AKD rijitlik değerini ifade eder.

Şekil 2.28'de AKD optimum frekans oranı görülmektedir.



Şekil 2.28 AKD optimum frekans oranı [3]

Şekil 2.29’da AKD optimum sönüm oranı görülmektedir.



Şekil 2.29 AKD optimum sönüm oranı [3]

Yapılan işlemler sonrası ayarlı kütle damperi için kütle, sönüm ve rijitlik değerleri Tablo 2.3’teki gibi hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak hareket denklemleri düzenlemiştir. Bu hareket denklemleri de MATLAB-Simulink programında bina modeli tekrar oluşturulmuştur. Gerçek deprem verileri ve doğal frekanslardan oluşan sinüs dalgalarının toplamı zorlayıcı etki olarak Simulink modelinde

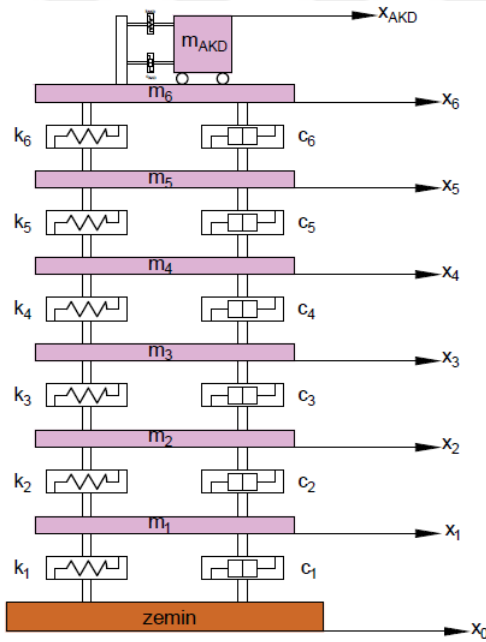
kullanılmış ve titreşim cevapları elde edilmiştir. Ayrıcı frekans cevapları da elde edilmiştir.

Laboratuvar bina modeli AKD parametreleri Tablo 2.3'teki gibidir.

Tablo 2.3 Laboratuvar bina modeli AKD parametreleri

Kütle (m_{AKD})	6.42 [kg]
Sönüm c_{AKD}	6.765 [Ns/m]
Rijitlik k_{AKD}	494.8849 [N/m]

AKD kullanılan laboratuvar bina modelinin fiziksel modeli Şekil 2.30'daki gibidir.



Şekil 2.30 AKD kullanılan laboratuvar bina modelinin fiziksel modeli

2.2.4 Laboratuvar Bina Modeli Titreşimlerinin Azaltılması için PID Kontrolcü Tasarımı

Ayarlı kütle damperi kullanılan laboratuvar bina modeline aktif kontrol sistemi olan PID kontrolcüsü tasarlanmıştır. Bu şekilde karma kontrol sistemi elde edilmiştir. Binaya verilecek olan dış kuvvet için lineer bir elektrik motoru kullanılabilir. Bu motora ait parametreler Tablo 2.4'te bulunmaktadır.

Kullanılan lineer motora ait denklemler,

$$R_i + K_e(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = u \quad (2.32)$$

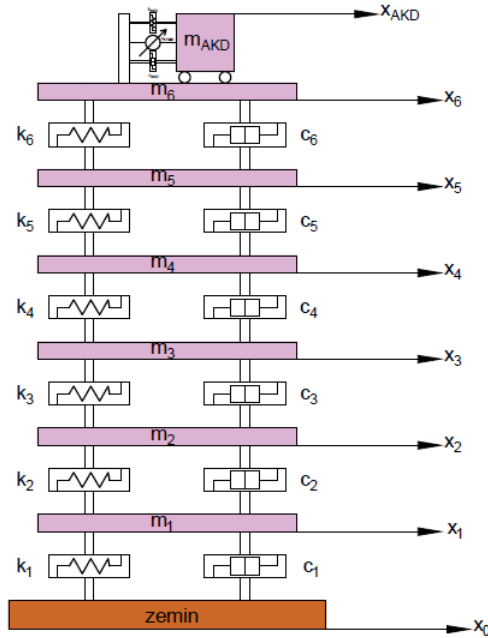
$$F_u = K_f i \quad (2.33)$$

Burada R bobin sargısının direnç değeri, u bobin sargısının voltajı ve kontrol voltajını, K_f bobin sargısının itme sabitini, i bobin sargısının akımını ve F_u kontrolcü kuvvetini ifade eder.

Tablo 2.4 Lineer motor parametreleri [2]

R_i	4.2 Ω
K_f	2 N/A
K_e	2 Volt

Şekil 2.31’de PID kullanılan laboratuvar bina modelinin fiziksel modeli görülmektedir.



Şekil 2.31 PID kullanılan laboratuvar bina modelinin fiziksel modeli

PID kontrolcü eyleyicisi, laboratuvar bina modelinin altıncı katı ile ayarlı kütle damperinin arasına yerleştirilmiştir. Bu sayede titreşimin daha fazla olması

beklenen en üst kattaki titreşimler kontrol altına alınmıştır. PID kontrolcü için hata sinyali oluşturulurken referans değeri sıfır alınmıştır. PID kontrolcüye ait orantı, integral ve türev değerleri ise deneme yoluyla elde edilmiştir. Deneme işlemi katların titreşimlerinin en iyi şekilde sönümlenmesi, frekans cevaplarının uygun ölçüde bastırılması ve hata sinyalinin en az değerde olması esaslarına göre uygulanır.

Laboratuvar bina modeli için PID parametreleri Tablo 2.5'teki gibidir.

Tablo 2.5 Laboratuvar bina modeli için PID parametreleri

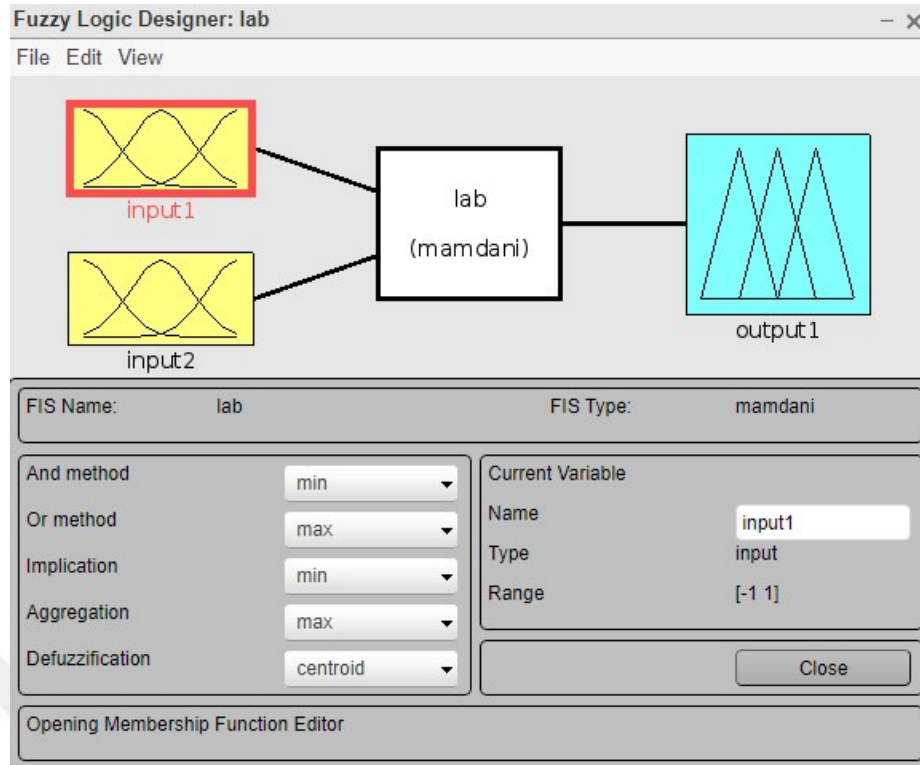
P	1
I	130
D	2

PID kullanılan fiziksel model için hareket denklemleri düzenlenerek MATLAB-Simulink programında bina modeli oluşturulmuştur. Gerçek deprem verileri ve doğal frekanslardan oluşan sinüs dalgalarının toplamı zorlayıcı etki olarak Simulink modelinde kullanılmış ve titreşim cevapları elde edilmiştir. Ayrıca frekans cevapları da bulunmuştur.

2.2.5 Laboratuvar Bina Modeli Titreşimlerinin Azaltılması için Bulanık Mantık Kontrolcüsü Tasarımı

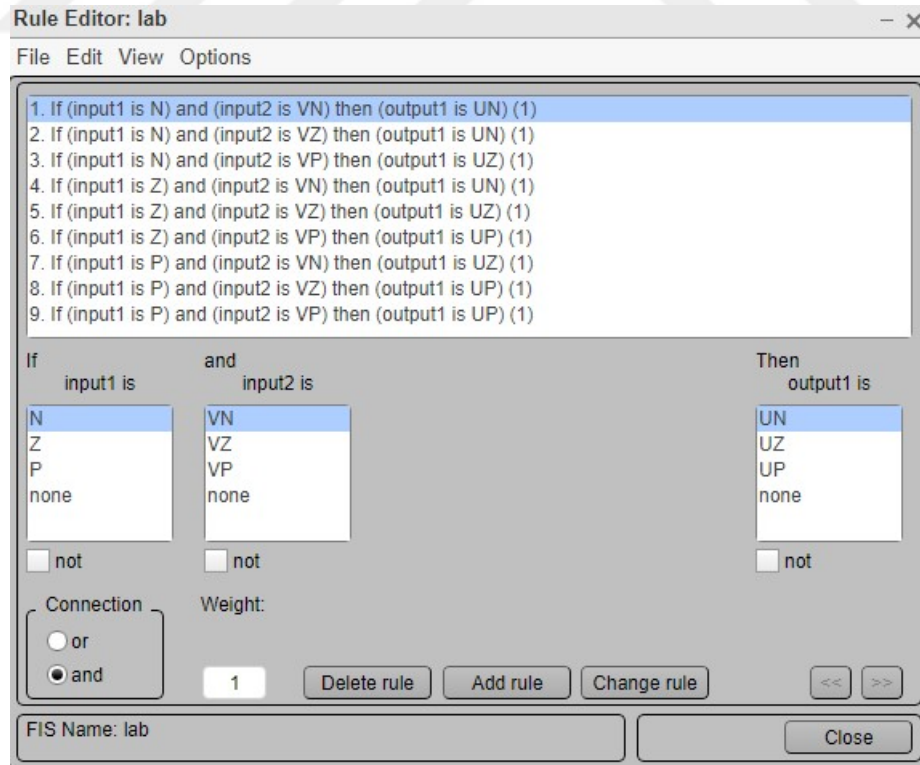
Ayarlı kütle damperi kullanılan laboratuvar bina modeline aktif kontrol sistemi olan FUZZY kontrolcüsü tasarlanmıştır. Bu şekilde karma kontrol sistemi elde edilmiştir. FUZZY kontrolcüde kullanılan lineer motor ve bina modeli PID kontrolcüdeki ile aynıdır. FUZZY kontrolcü eyleyicisi, laboratuvar bina modelinin altıncı katı ile ayarlı kütle damperinin arasına yerleştirilmiştir. Bu sayede titreşimin daha fazla olması beklenen en üst kattaki titreşimler kontrol altına alınmıştır. FUZZY kontrolcü için hata sinyali oluşturulurken referans değeri sıfır alınmıştır.

FUZZY kural tabanının ayarlanması Şekil 2.32'deki gibidir.



Şekil 2.32 FUZZY kural tabanının ayarlanması

FUZZY kural tablosunun oluşturulması Şekil 2.33'teki gibidir.



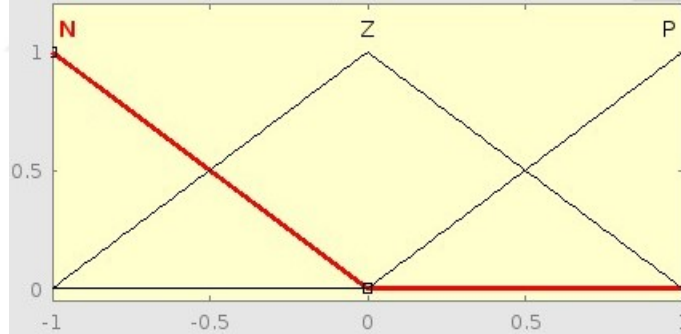
Şekil 2.33 FUZZY kural tablosunun oluşturulması

Üçgen üyelik fonksiyonları için başlangıç, tepe ve son değerleri Tablo 2.6'daki gibidir.

Tablo 2.6 Üçgen üyelik fonksiyonları için başlangıç, tepe ve son değerleri

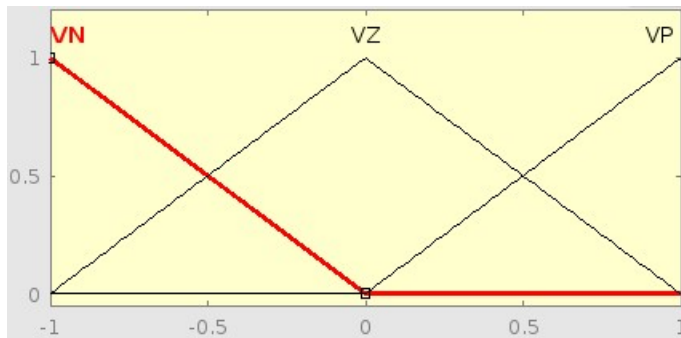
Üyelik Fonksiyonu	Üçgen Noktaları (Başlangıç, Tepe, Son)		
	N	Z	P
1. Giriş	[-2 -1 0]	[-1 0 1]	[0 1 2]
2. Giriş	[-2 -1 0]	[-1 0 1]	[0 1 2]
Çıkış	[-2 -1 0]	[-1 0 1]	[0 1 2]

Hata değeri bulanıklaştırma üyelik fonksiyonları Şekil 2.34'teki gibidir.



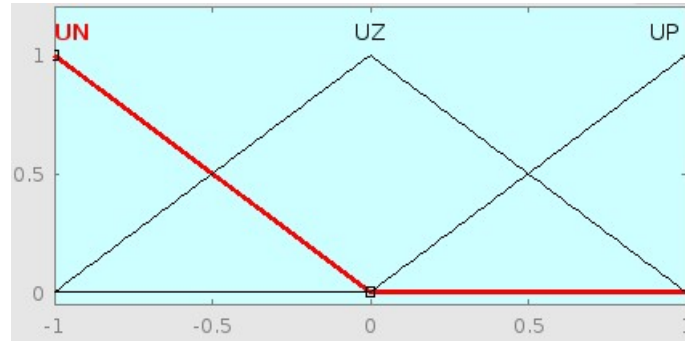
Şekil 2.34 Hata değeri bulanıklaştırma üyelik fonksiyonları

Hata değeri bulanıklaştırma üyelik fonksiyonları Şekil 2.35'teki gibidir.



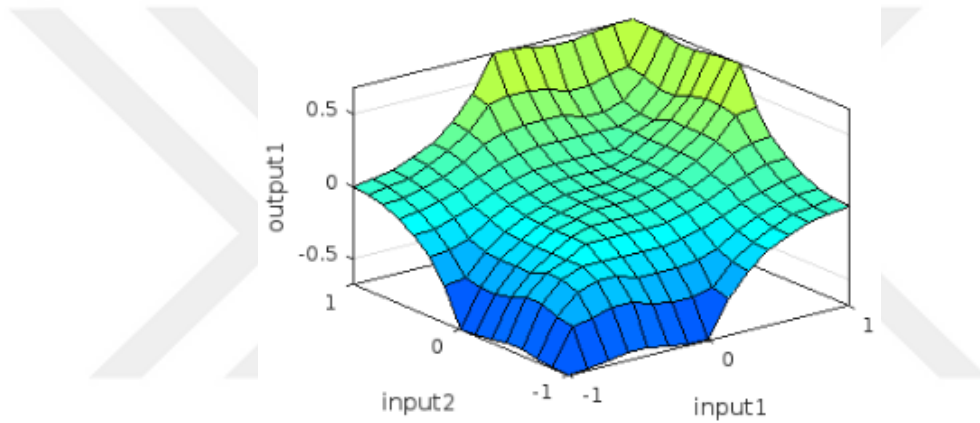
Şekil 2.35 Hata hız değeri bulanıklaştırma üyelik fonksiyonları

Çıkış sinyali netleştirme üyelik fonksiyonları Şekil 2.36'daki gibidir.



Şekil 2.36 Çıkış sinyali netleştirme üyelik fonksiyonları

FUZZY kural tablosu üç boyutlu yüzeyi Şekil 2.37'deki gibidir.

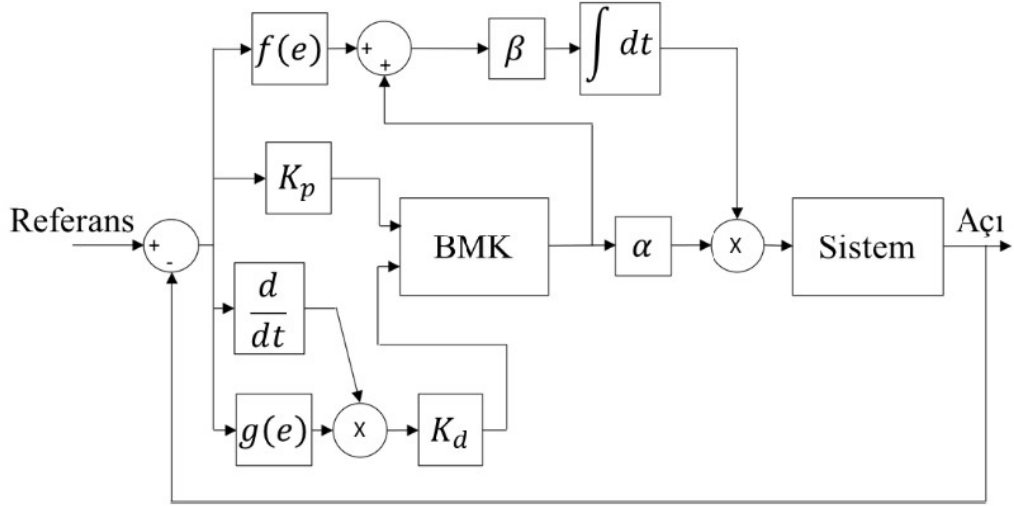


Şekil 2.37 FUZZY kural tablosu üç boyutlu yüzeyi

2.2.6 Laboratuvar Bina Modeli Titreşimlerinin Azaltılması için Adaptif Bulanık PID Kontrolcüsü Tasarımı

Ayarlı kütle damperi kullanılan laboratuvar bina modeline aktif kontrol sistemi olan AFPID kontrolcüsü tasarlanmıştır. Bu şekilde karma kontrol sistemi elde edilmiştir. AFPID kontrolcü eyleyicisi, laboratuvar bina modelinin altıncı katı ile ayarlı kütle damperinin arasına yerleştirilmiştir. Bu sayede titreşimin daha fazla olması beklenen en üst kattaki titreşimler kontrol altına alınmıştır. AFPID kontrolcü için hata sinyali oluşturulurken referans değeri sıfır alınmıştır. AFPID kontrolcüye ait üyelik fonksiyon parametreleri FUZZY kontrolcüsü ile aynıdır. Kullanılan lineer motor ve bina modeli PID ve FUZZY kontrolcülerinde kullanılan ile aynıdır.

AFPID kontrolcü yapısı Şekil 2.38'deki gibidir.



Şekil 2.38 AFPID kontrolcü yapısı

AFPID kontrolcü yapısında görülen $f(e)$ ve $g(e)$ parametre uyarılama fonksiyonlarıdır. Denklem 2.34 ve Denklem 2.35'te bu fonksiyonlar verilmiştir. Burada a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , α ve β pozitif sabit sayılardır [41].

$$f(e) = a_1|e| + a_2 \quad (2.34)$$

$$g(e) = b_1(1 - |e|) + b_2 \quad (2.35)$$

Bulanık PID kontrolcü çıkışı Denklem 2.36'da verilmiştir. Burada F bulanık kontrolcü çıkışındaki sinyaldir.

$$u = \alpha F \beta \int (f(e) + F) dt \quad (2.36)$$

Laboratuvar bina modeli için AFPID parametreleri Tablo 2.7'de görülmektedir.

Tablo 2.7 Laboratuvar bina modeli için AFPID parametreleri

K_p	1
K_d	500
α	1
β	0,0007

Tablo 2.7 Laboratuvar bina modeli için AFPID parametreleri (devamı)

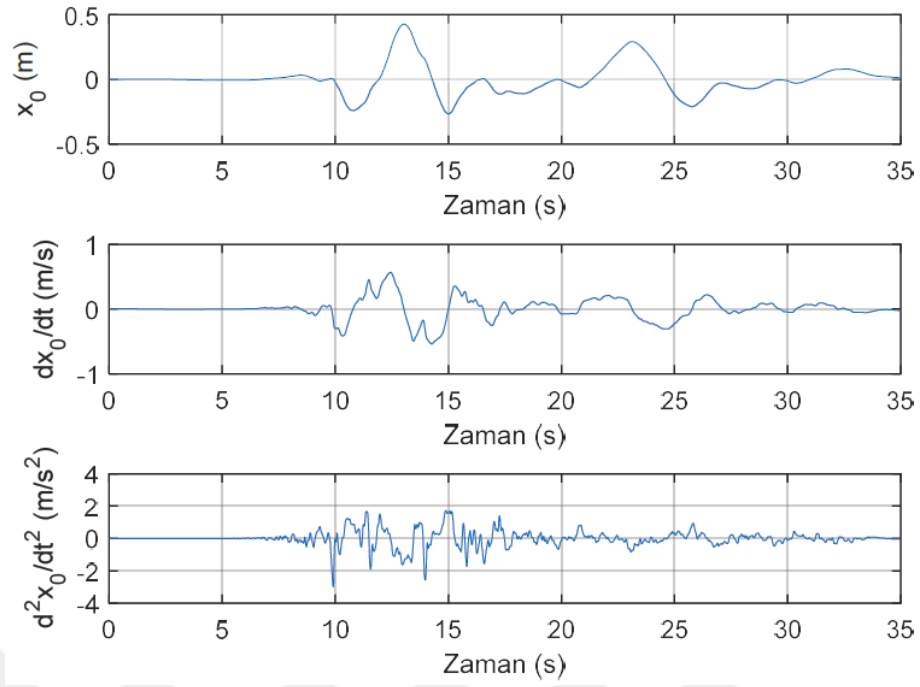
a_1	30000
a_2	18000
b_1	0,0001
b_2	0,00007

2.2.7 Laboratuvar Bina Modelinin Titreşim Analizleri Sonuçları

Titreşim analizleri kontrolcü kullanılmayan bina modeli, sadece ayarlı kütle damperi kullanılan bina modeli, ayarlı kütle damperi ile PID, FUZZY ve AFPID denetleyicinin beraber kullanıldığı bina modeli olarak beş farklı senaryoyla yapılmıştır. Bu bina modellerinin her katına ait yer değiştirme- zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri ile frekans cevapları çizdirilerek karşılaştırma işlemi yapılmıştır. Her kat için yer değiştirme RMS, maksimum yer değiştirme, ivme RMS ve maksimum ivme tabloları oluşturulmuştur. Ayrıca ISE (Integral Square Error) hataları altıncı kat için hesaplanmıştır.

2.2.8 Laboratuvar Bina Modelinin 1999 Kocaeli Depremi Etkisinde Titreşim Cevapları

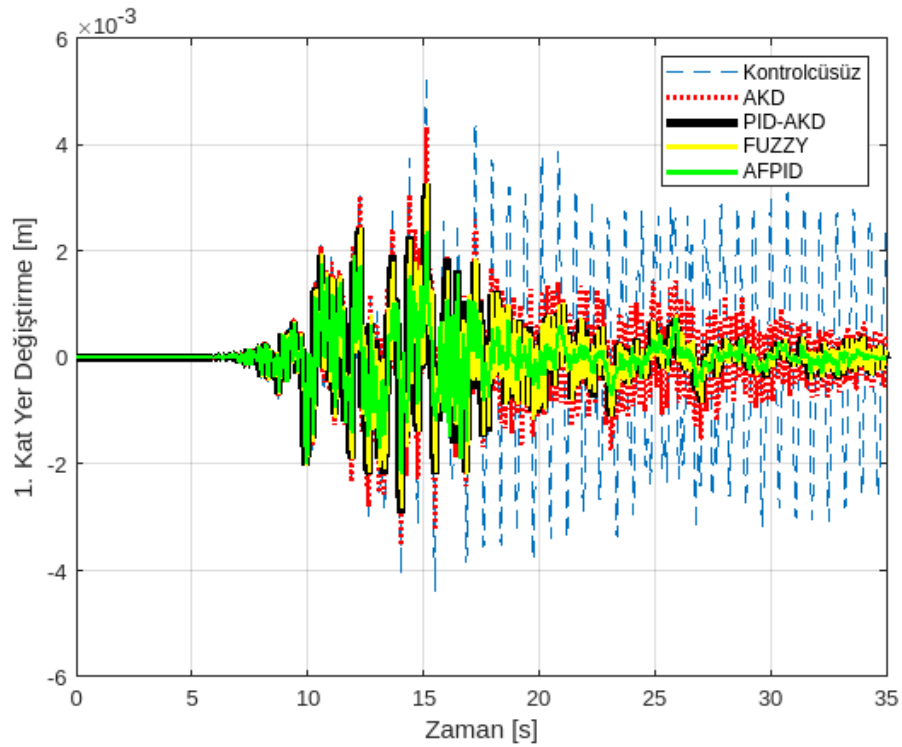
Şekil 2.39'da 1999 Kocaeli depremine ait hareketin yer değiştirme, hız ve ivmesinin zamana göre değişimi görülmektedir.



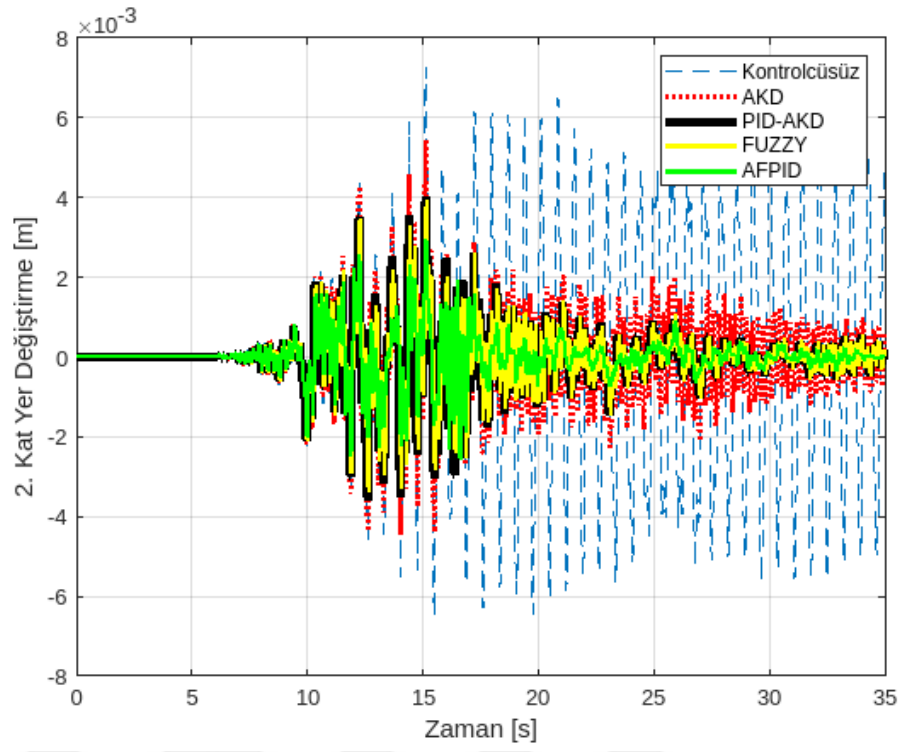
Şekil 2.39 1999 Kocaeli depremi yer hareketi

2.2.8.1 Laboratuvar Bina Modeli Kocaeli Depremi Yer Değiştirme Cevapları

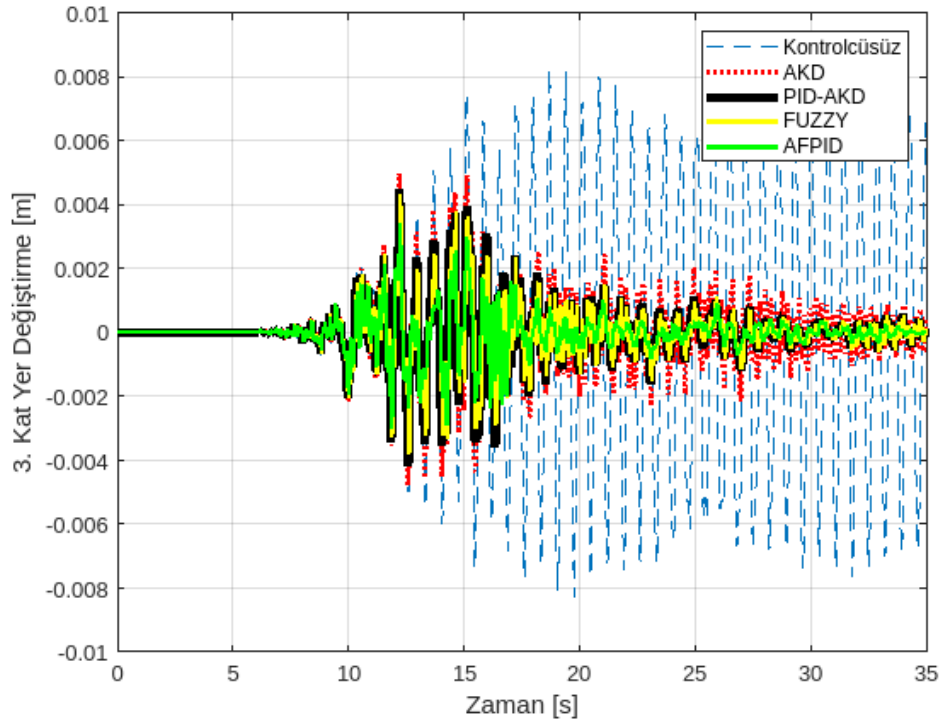
Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki yer değiştirme cevapları Şekil 2.40'ta görülmektedir.



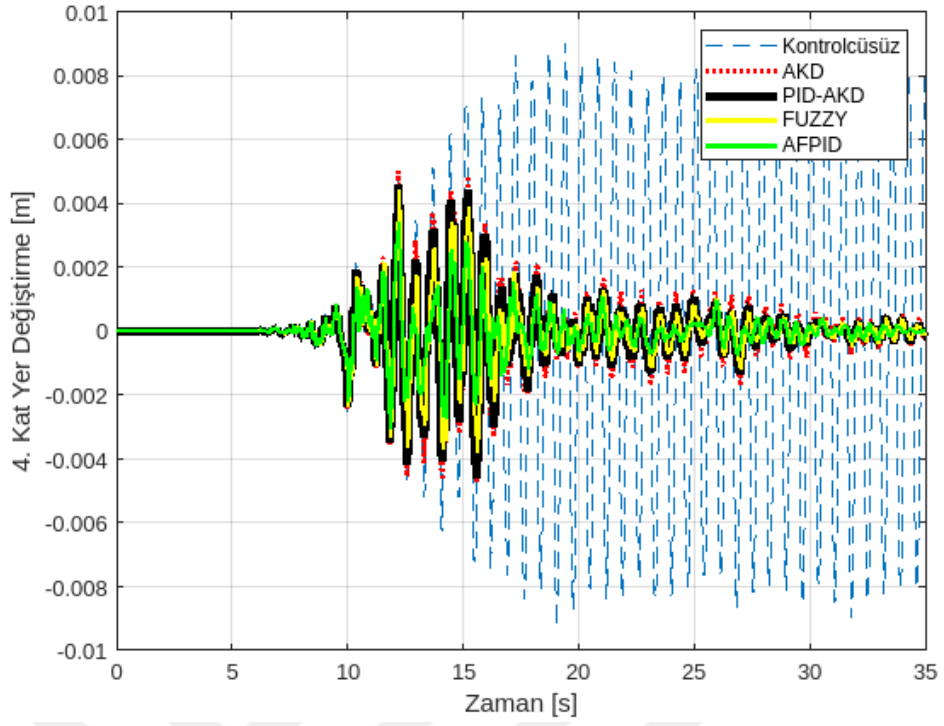
(a) 1. kat



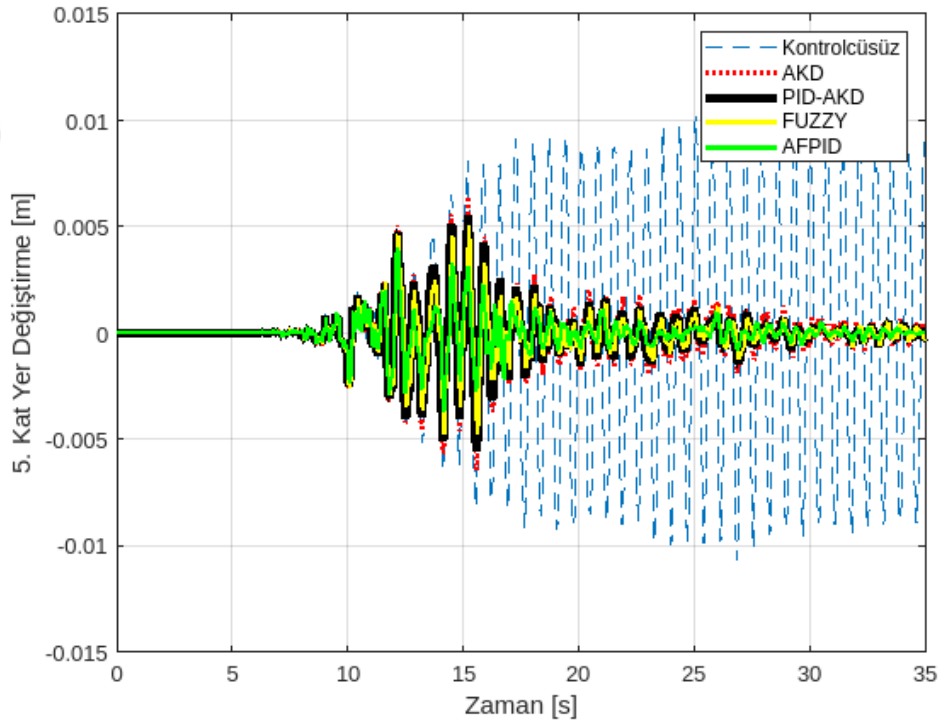
(b) 2. kat



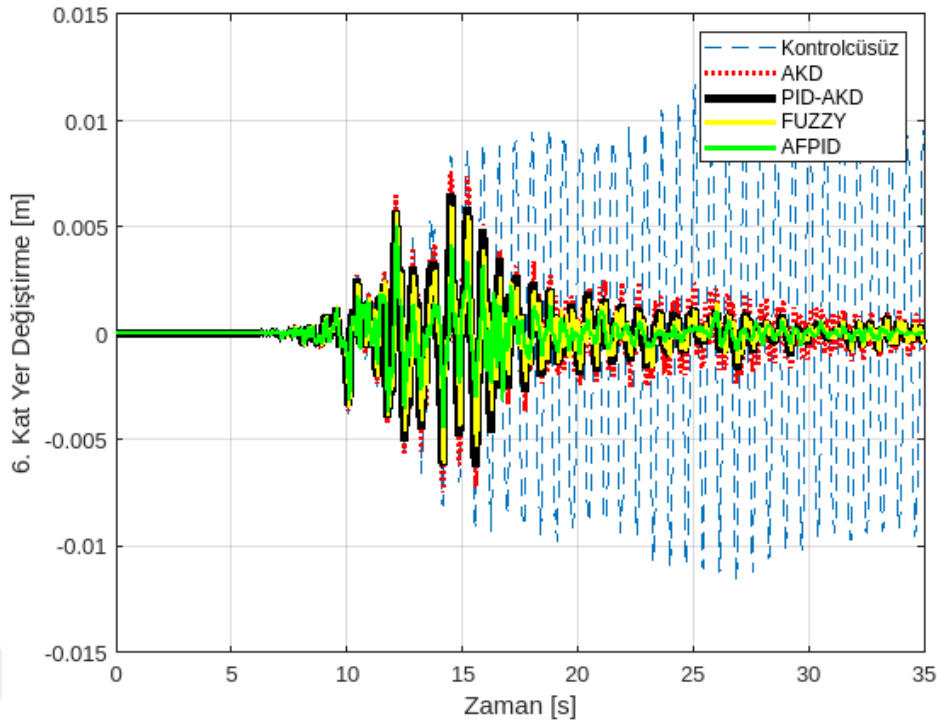
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat



(f) 6. kat

Şekil 2.40 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki yer değiştirme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri Tablo 2.8’de görülmektedir.

Tablo 2.8 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri

Katlar	Yer Değiştirme RMS Değerleri (m)				
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	1,47E-03	7,52E-04	5,64E-04	5,54E-04	4,62E-04
2	2,67E-03	1,07E-03	7,90E-04	7,51E-04	5,78E-04
3	3,65E-03	1,12E-03	9,15E-03	8,24E-04	6,23E-04

Tablo 2.8 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri (devamı)

4	4,45E-03	1,09E-03	1,01E-03	8,64E-04	6,47E-04
5	5,05E-03	1,25E-03	1,15E-03	9,83E-04	7,14E-04
6	5,40E-03	1,51E-03	1,28E-03	1,12E-03	7,88E-04

Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında yer değiştirme RMS değerleri azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcöleri kullanıldığında yer değiştirme RMS değerlerinin pasif kontrolden daha küçük olduğu görölmektedir. Bu durum aktif kontrolün titreşimleri azaltmada pasif kontrole göre daha etkili olduğunu göstermektedir. Yer değiştirme RMS değerleri incelendiğinde adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün performansının diğer kontrolcülerden daha iyi olduğu görölmektedir.

Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları Tablo 2.9’da görölmektedir.

Tablo 2.9 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları

Katlar	Maksimum Yer Değiştirme Cevapları (m)				
	Kontrolcösüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	5,32E-03	4,34E-03	3,25E-03	3,26E-03	2,36E-03
2	7,27E-03	5,44E-03	4,03E-03	3,93E-03	2,96E-03
3	8,27E-03	4,98E-03	4,47E-03	4,31E-03	3,39E-03

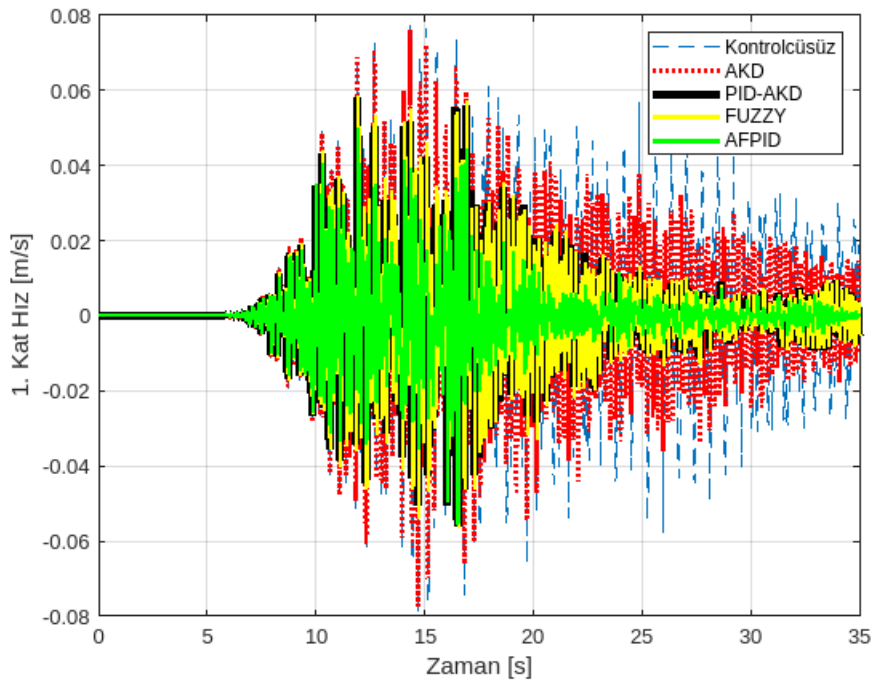
Tablo 2.9 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları (devamı)

4	9,02E-03	5,01E-03	4,57E-03	4,40E-03	3,40E-03
5	1,02E-02	6,46E-03	5,56E-03	5,05E-03	4,03E-03
6	1,17E-02	7,66E-03	6,54E-03	5,96E-03	5,08E-03

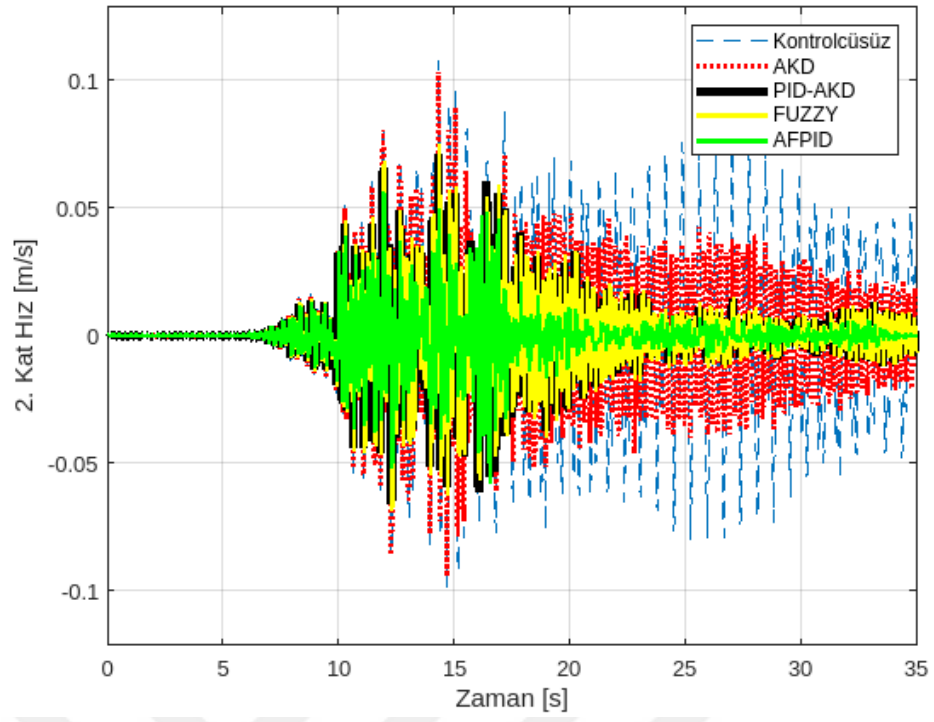
Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında maksimum yer değiştirme cevapları azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcöleri kullanıldığında maksimum yer değiştirme cevaplarının pasif kontrolden daha küçük olduğu görölmektedir. Bu durum aktif kontrolün maksimum yer değiştirme cevaplarını baskılamada pasif kontrole göre daha başarılı olduğunu göstermektedir. Yer değiştirme cevapları incelendiğinde adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün en iyi performansı sergilediği görölmektedir.

2.2.8.2 Laboratuvar Bina Modeli Kocaeli Depremi Hız Cevapları

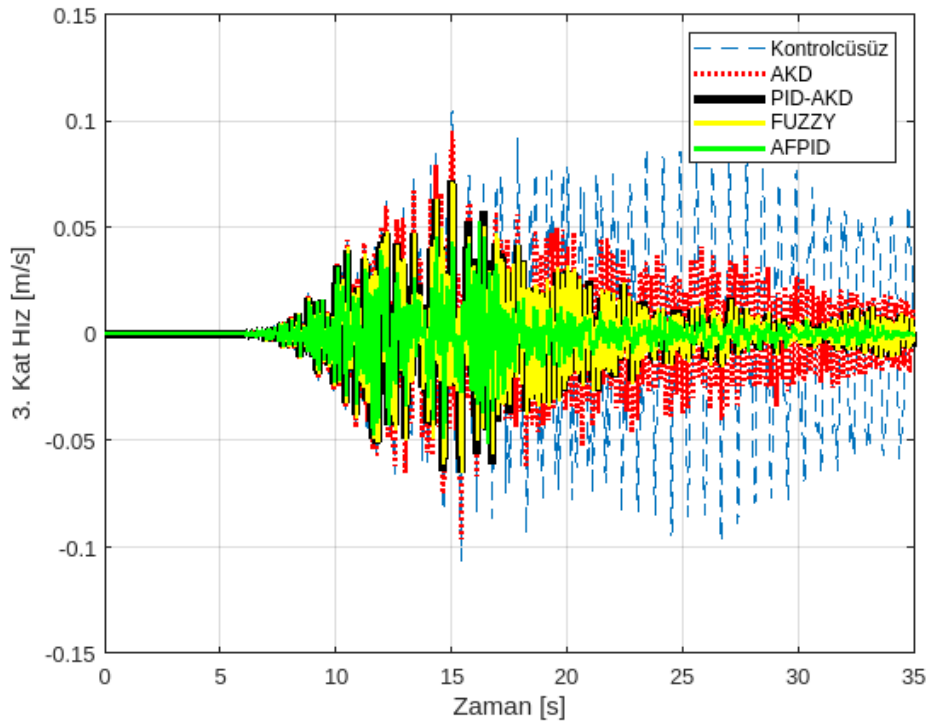
Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki hız cevapları şekil 2.41'de görölmektedir.



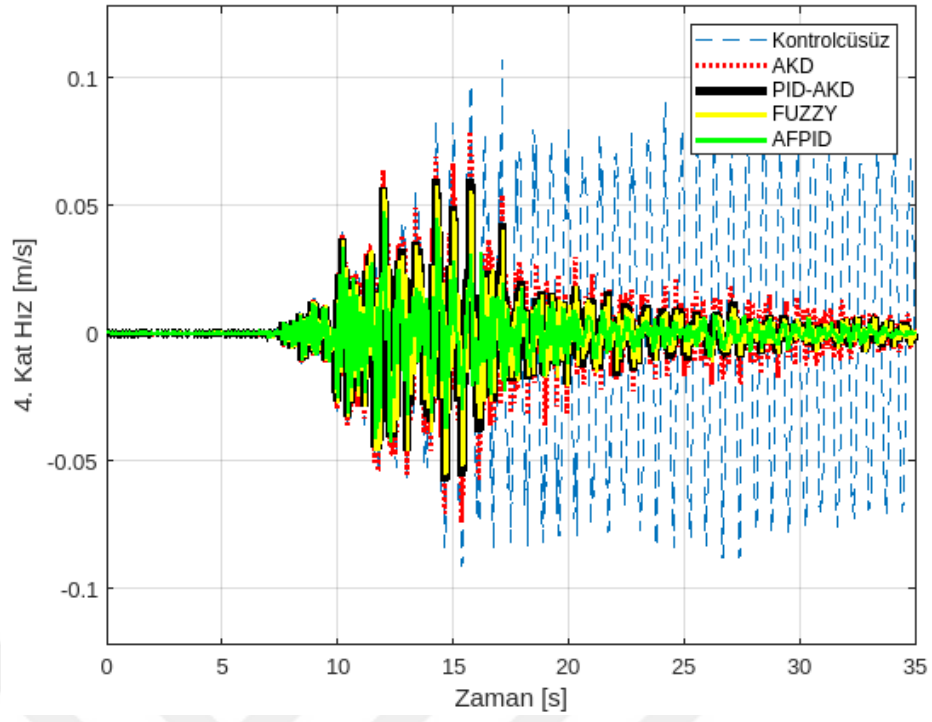
(a) 1. kat



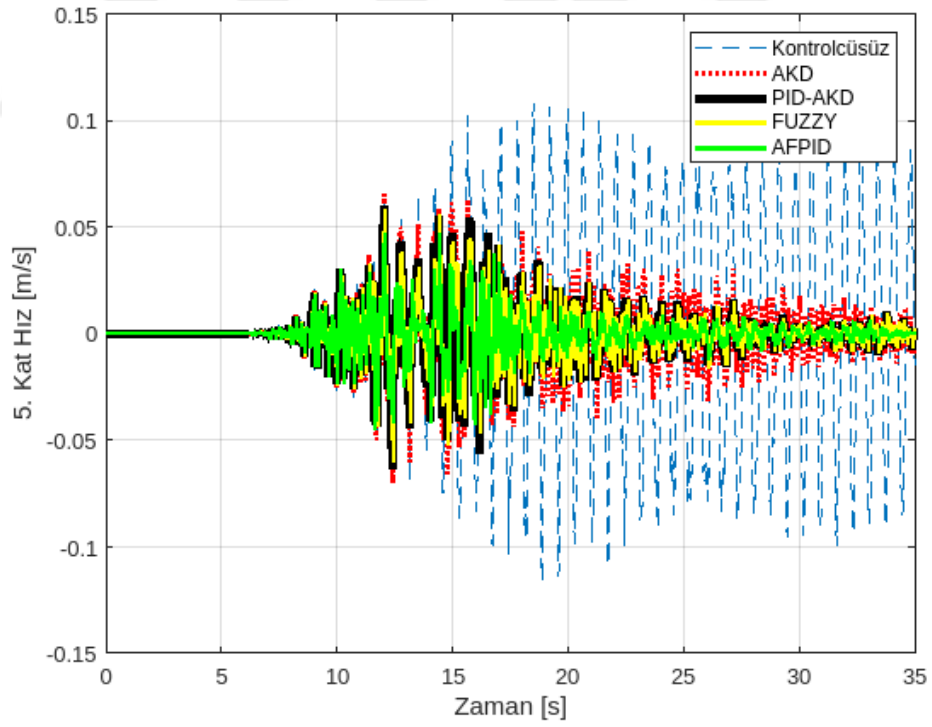
(b) 2. kat



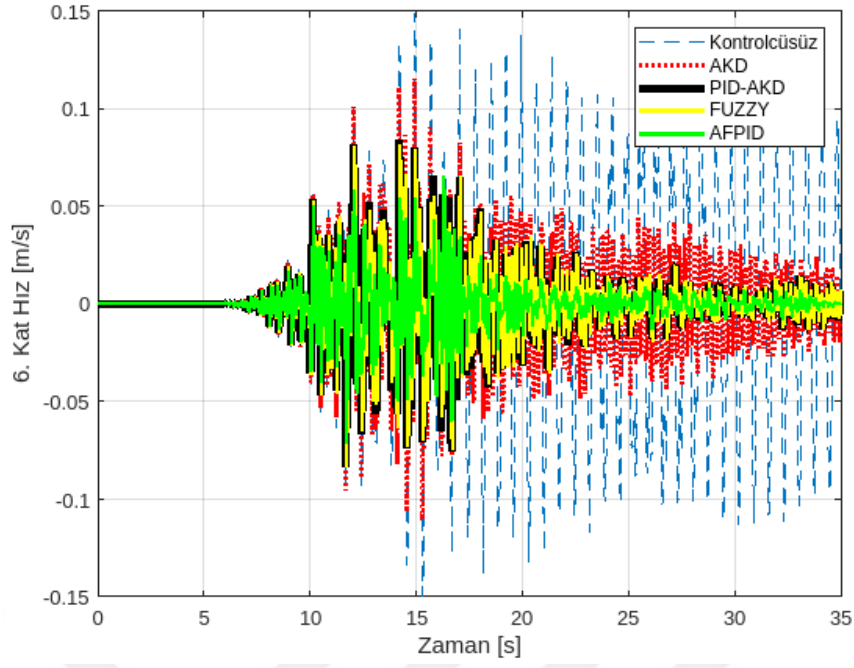
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat

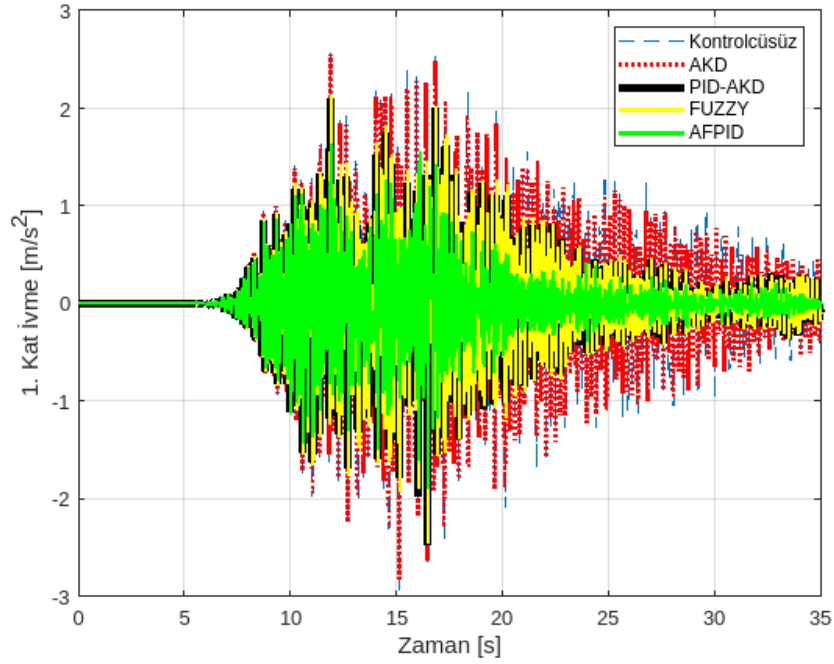


(f) 6. kat

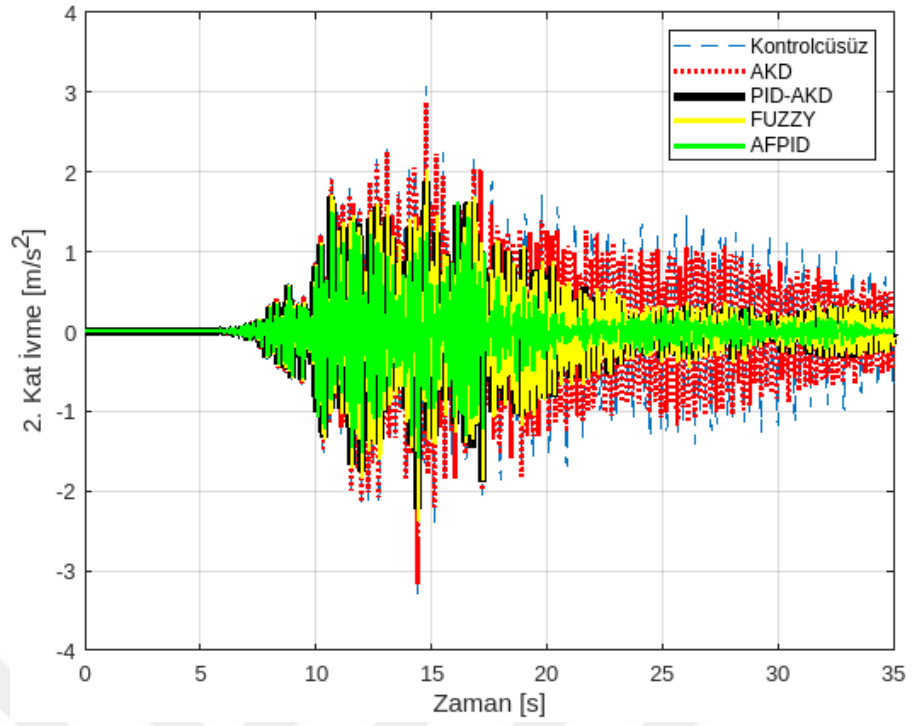
Şekil 2.41 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki hız cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

2.2.8.3 Laboratuvar Bina Modeli Kocaeli Depremi İvme Cevapları

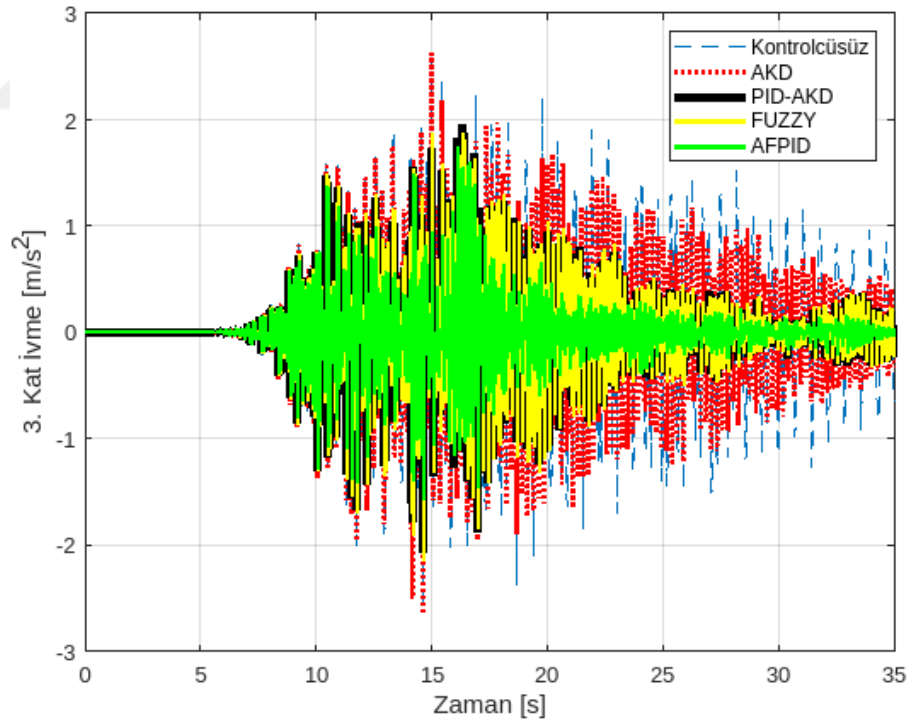
Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki ivme cevapları Şekil 2.42'de görülmektedir.



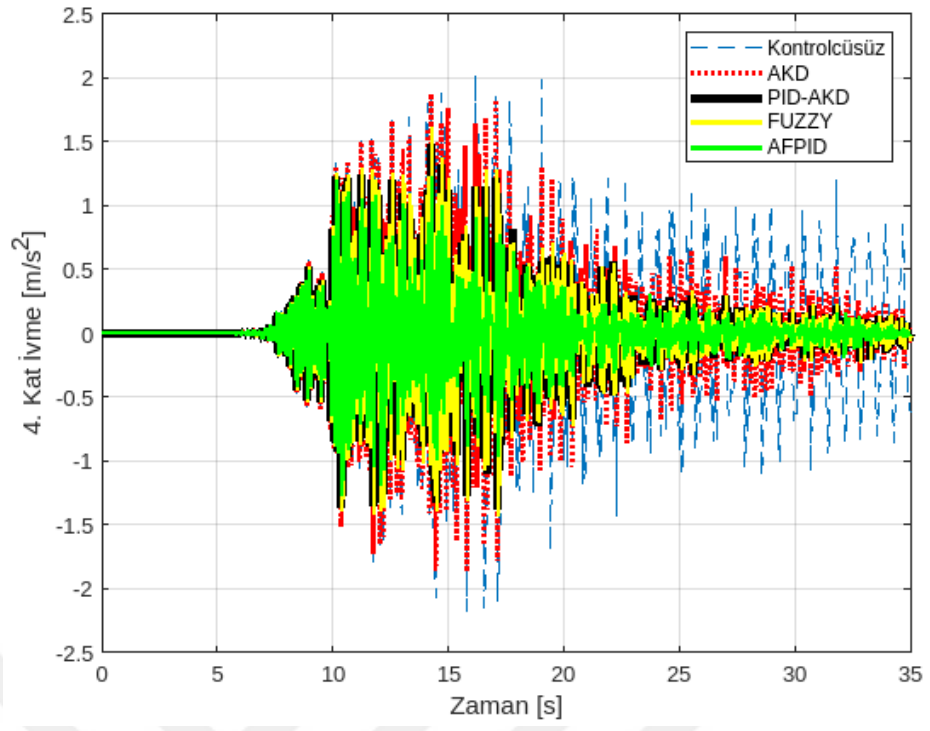
(a) 1. kat



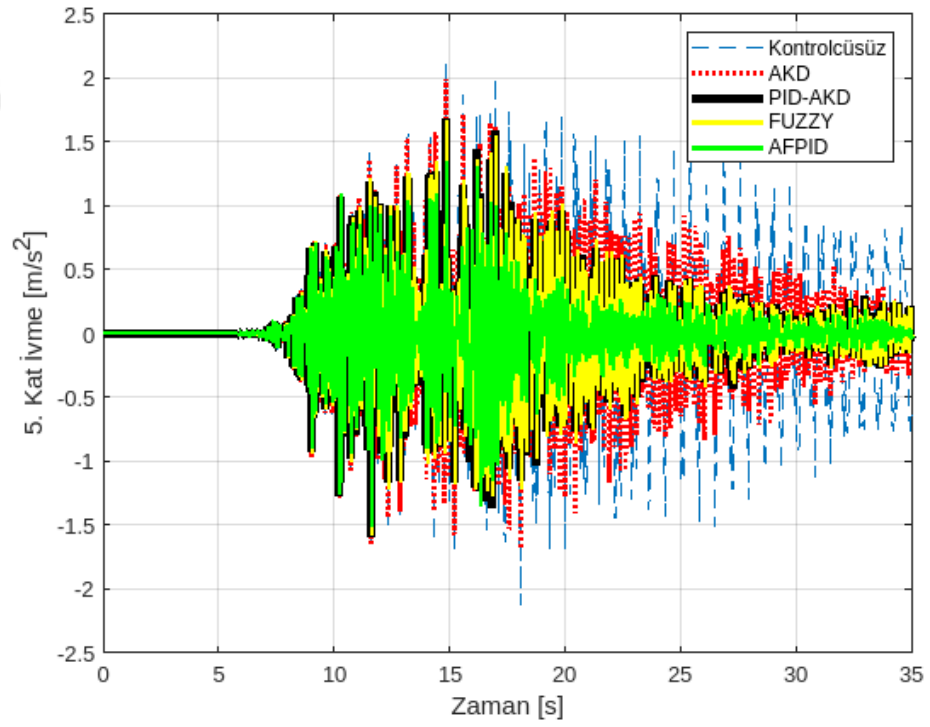
(b) 2. kat



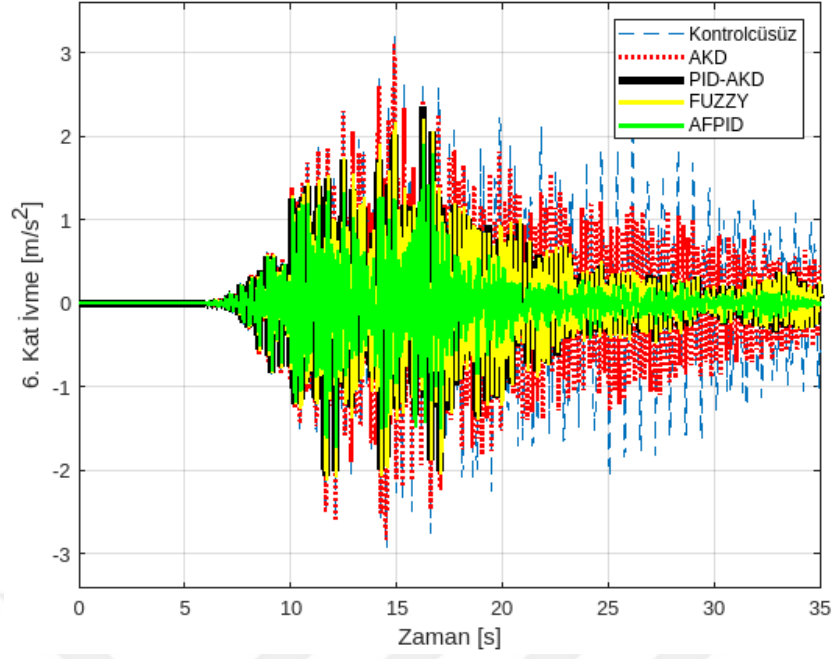
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat



(f) 6. kat

Şekil 2.42 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki ivme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki ivme RMS değerleri Tablo 2.10'da görülmektedir.

Tablo 2.10 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki ivme RMS değerleri

Katlar	İvme RMS Değerleri (m/s^2)				
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	0,6359	0,6230	0,4215	0,4418	0,3202
2	0,6693	0,6506	0,3970	0,4199	0,3058
3	0,6612	0,6078	0,3990	0,4146	0,2982
4	0,5637	0,4359	0,3020	0,3200	0,2373

Tablo 2.10 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki ivme RMS değerleri (devamı)

5	0,5802	0,4363	0,3230	0,3283	0,2540
6	0,7843	0,6745	0,4279	0,4472	0,3213

Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında ivme RMS değerleri azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcülerini kullanıldığında ivme RMS değerlerinin pasif kontrolden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum aktif kontrolün titreşimleri azaltmada pasif kontrole göre daha etkili olduğunu göstermektedir.

Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki maksimum ivme cevapları Tablo 2.11’de görülmektedir.

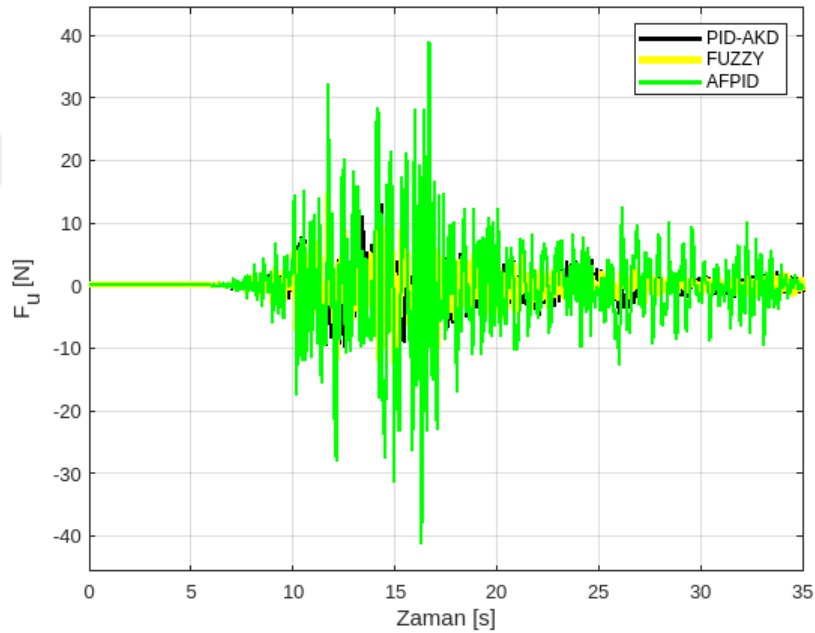
Tablo 2.11 Laboratuvar bina modelinin 1999 Kocaeli depremi etkisindeki maksimum ivme cevapları

Katlar	Maksimum İvme Cevapları (m/s ²)				
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	2,5630	2,5570	2,0930	2,1300	1,6290
2	3,0650	2,8840	1,8690	2,0200	1,6130
3	2,5630	2,6260	1,9560	1,8710	1,7500
4	2,0320	1,8830	1,4800	1,6090	1,2250
5	2,1090	1,9990	1,6810	1,6720	1,3450
6	3,2390	3,1140	2,3450	0,2194	1,8990

Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında maksimum ivme cevapları azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcileri kullanıldığında maksimum ivme cevaplarının pasif kontrolden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum aktif kontrolün maksimum ivme cevaplarını baskılamada pasif kontrole göre daha başarılı olduğunu göstermektedir. İvme cevapları incelendiğinde sistem yer değiştirme cevaplarına benzer davranış göstermiştir. İvme cevaplarında da en iyi performansı yer değiştirme cevaplarında olduğu gibi adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsü göstermiştir.

2.2.8.4 Laboratuvar Bina Modeli Kocaeli Depremi için Denetim Kuvveti

Kocaeli depremi etkisindeki laboratuvar bina modelinin denetim kuvvetindeki değişim Şekil 2.43'te görülmektedir.



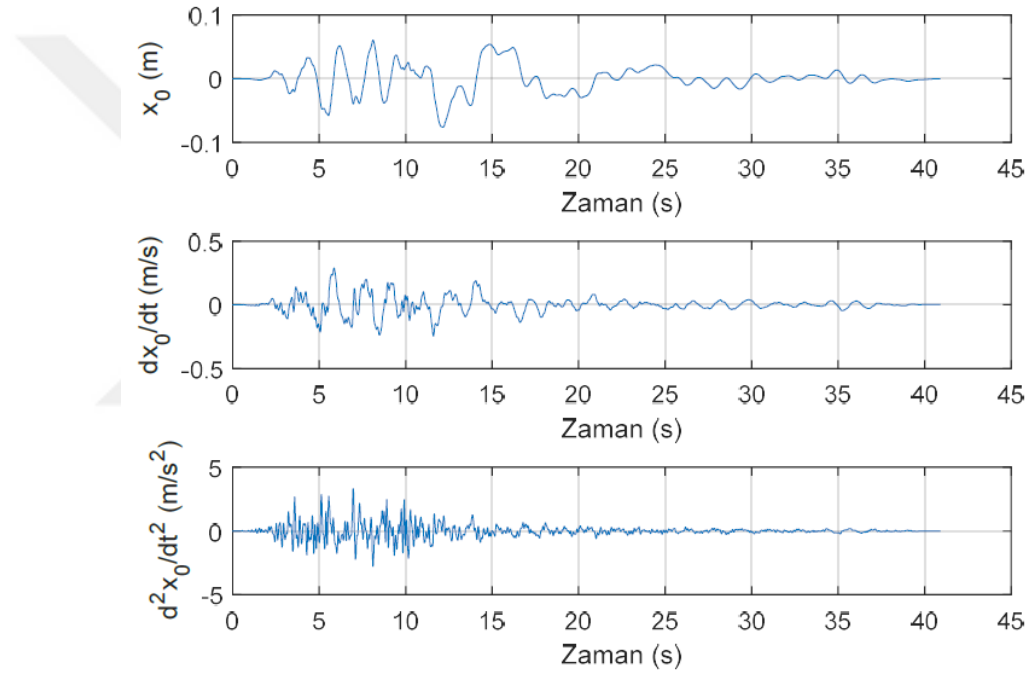
Şekil 2.43 Kocaeli depremi (1999) etkisindeki laboratuvar bina modelinin denetim kuvvetindeki değişim

Laboratuvar bina modelinin Kocaeli depremi etkisi altındaki yer değiştirme-zaman, hız-zaman ve ivme zaman grafikleri incelendiğinde pasif kontrol yöntemi olarak kullanılan AKD'nin titreşimleri azaltmada etkili olduğu görülürken aktif kontrol yöntemi olarak tasarlanan PID kontrolcü, bulanık mantık kontrolcü ve adaptif bulanık PID kontrolcünün titreşimleri azaltmada pasif kontrole göre daha

etkili olduğu görülmektedir. Yer değiştirme cevapları incelendiğinde adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Ayrıca bulanık mantık denetleyicisinin de PID kontrolcüye göre daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Hız ve ivme cevapları incelendiğinde sistemin yer değiştirme cevapları ile benzer bir durum sergilediği görülmektedir.

2.2.9 Laboratuvar Bina Modelinin 1995 Kobe Depremi Etkisinde Titreşim Cevapları

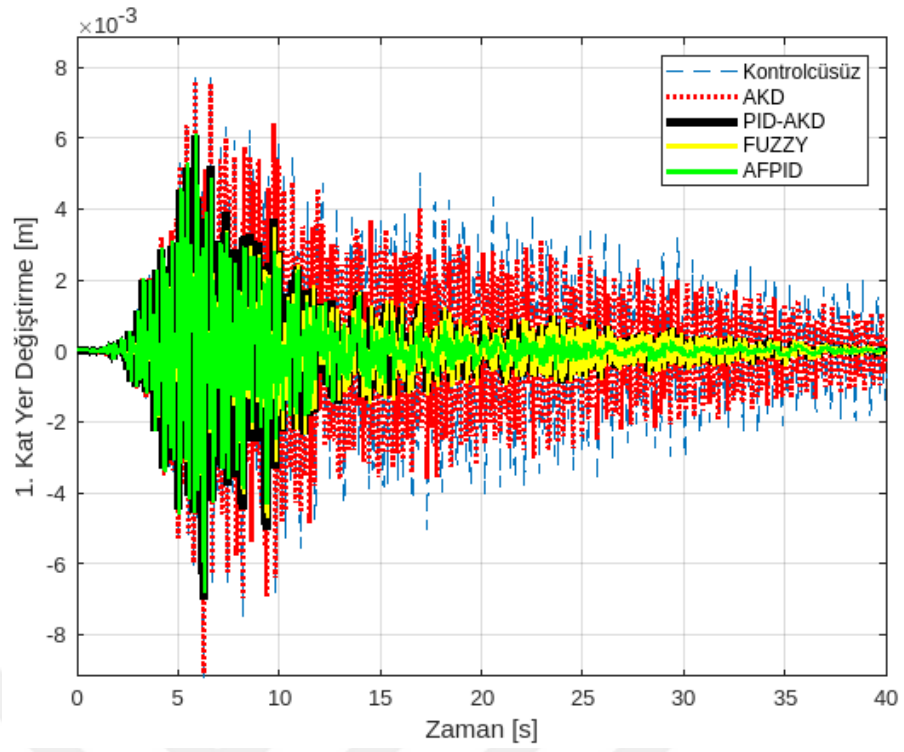
Şekil 2.44'te 1995 Kobe depremine ait hareketin yer değiştirme, hız ve ivmesinin zamana göre değişimi görülmektedir.



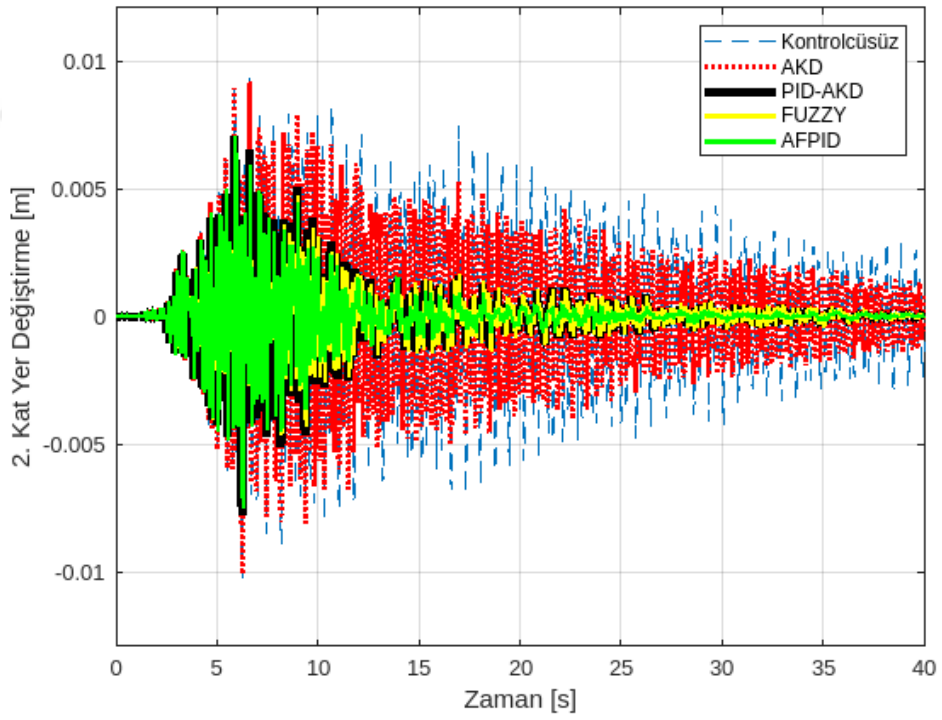
Şekil 2.44 1995 Kobe depremi yer hareketi

2.2.9.1 Laboratuvar Bina Modeli Kobe Depremi Yer Değiştirme Cevapları

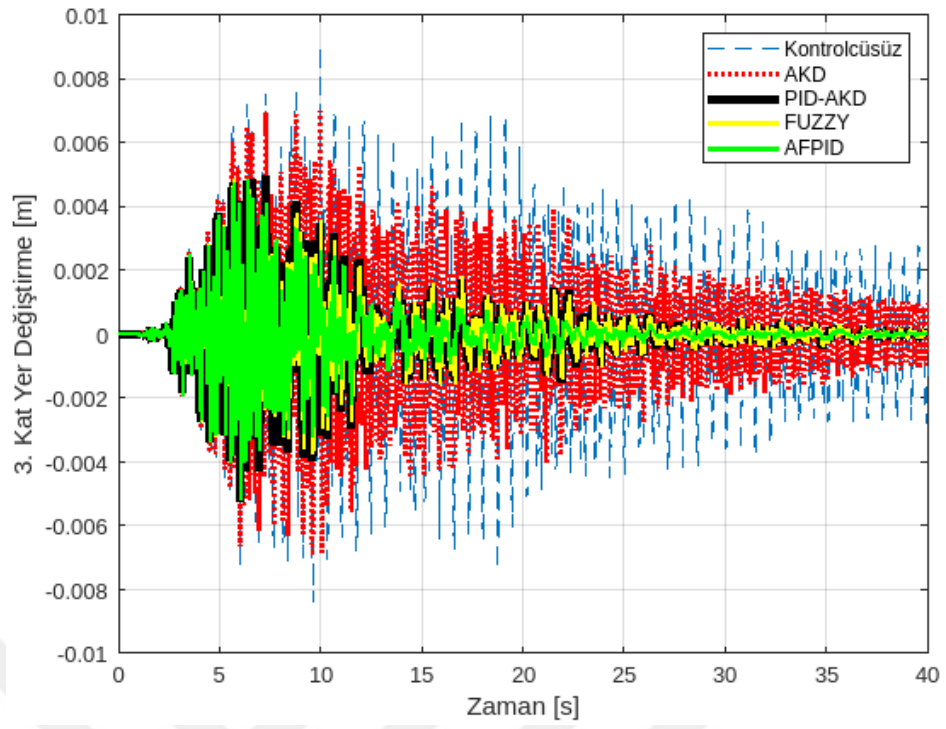
Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki yer değiştirme cevapları Şekil 2.45'te görülmektedir.



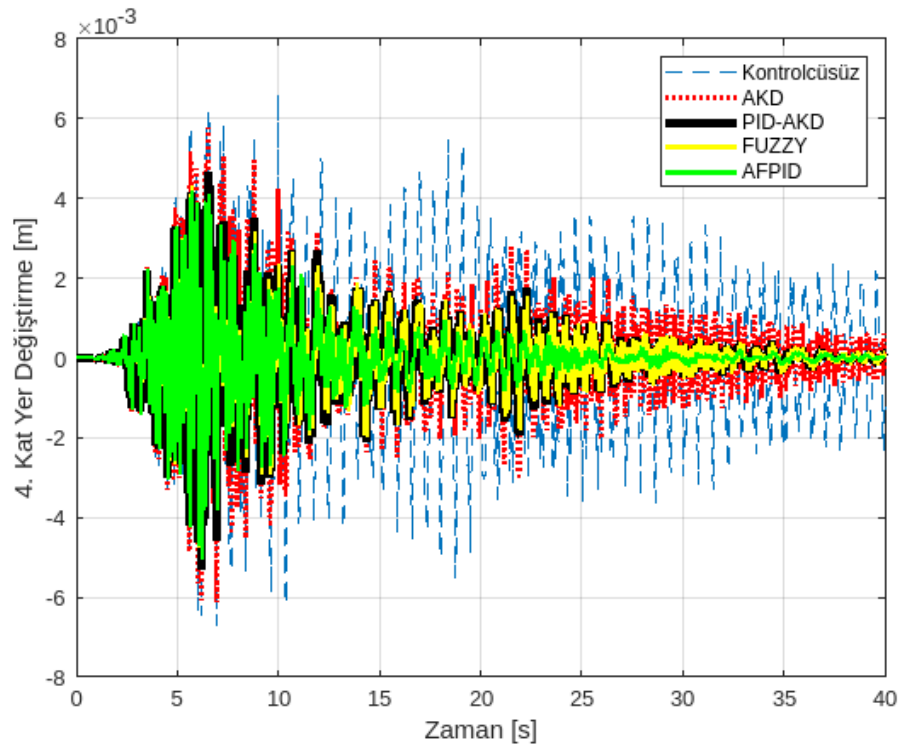
(a) 1. kat



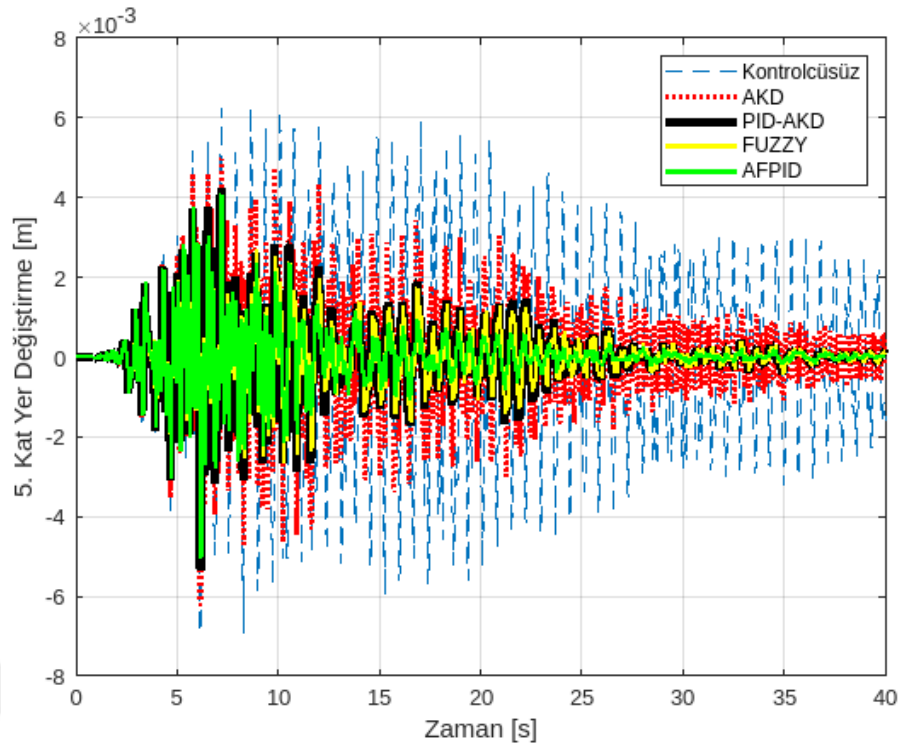
(b) 2. kat



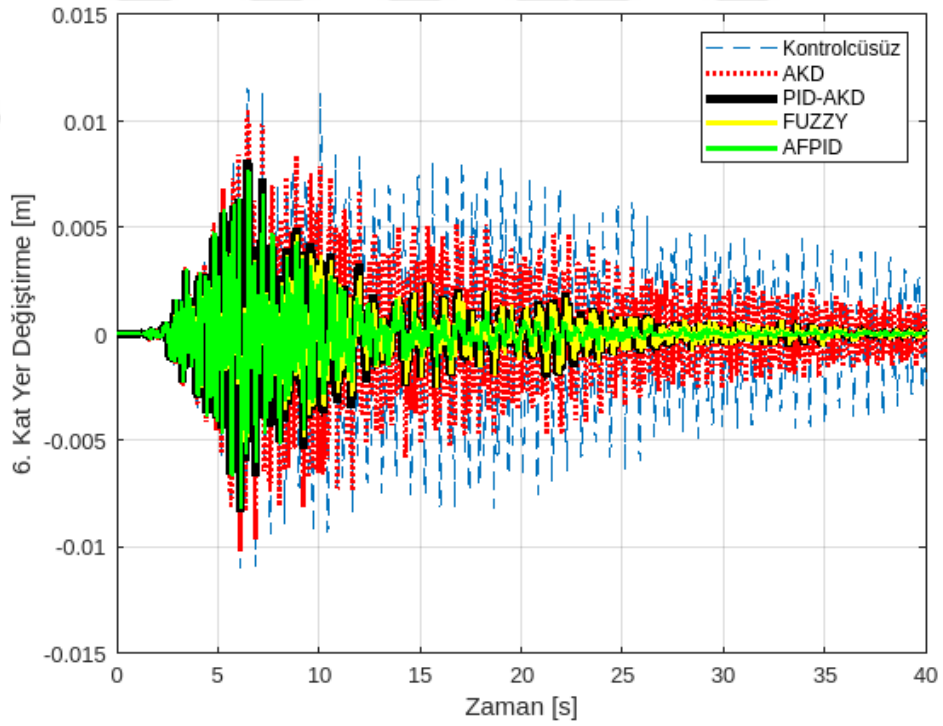
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat



(f) 6. kat

Şekil 2.45 Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki yer değiştirme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri Tablo 2.12’de g r lmektedir.

Tablo 2.12 Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri

Katlar	Yer Değiştirme RMS Değerleri (m)				
	Kontrolc�s�z	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	2,05E-03	1,83E-03	9,59E-04	9,26E-04	8,95E-04
2	2,88E-03	2,46E-03	1,14E-03	1,08E-03	1,04E-03
3	2,62E-03	2,07E-03	1,02E-03	9,52E-04	8,89E-04
4	2,02E-03	1,24E-03	9,09E-04	8,45E-04	7,80E-04
5	2,30E-03	1,35E-03	8,55E-04	7,63E-04	6,85E-04
6	3,31E-03	2,48E-03	1,31E-03	1,22E-03	1,10E-04

Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında yer değiştirme RMS değerleri azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolc leri kullanıldığında yer değiştirme RMS değerlerinin pasif kontrolden daha k      olduğu g r lmektedir. Bu durum aktif kontrolün titreşimleri azaltmada pasif kontrole göre daha etkili olduğunu göstermektedir. Yer değiştirme RMS değerleri incelendiğinde adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün performansının diğer kontrolc lerden daha iyi olduğu g r lmektedir.

Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları Tablo 2.13’te g r lmektedir.

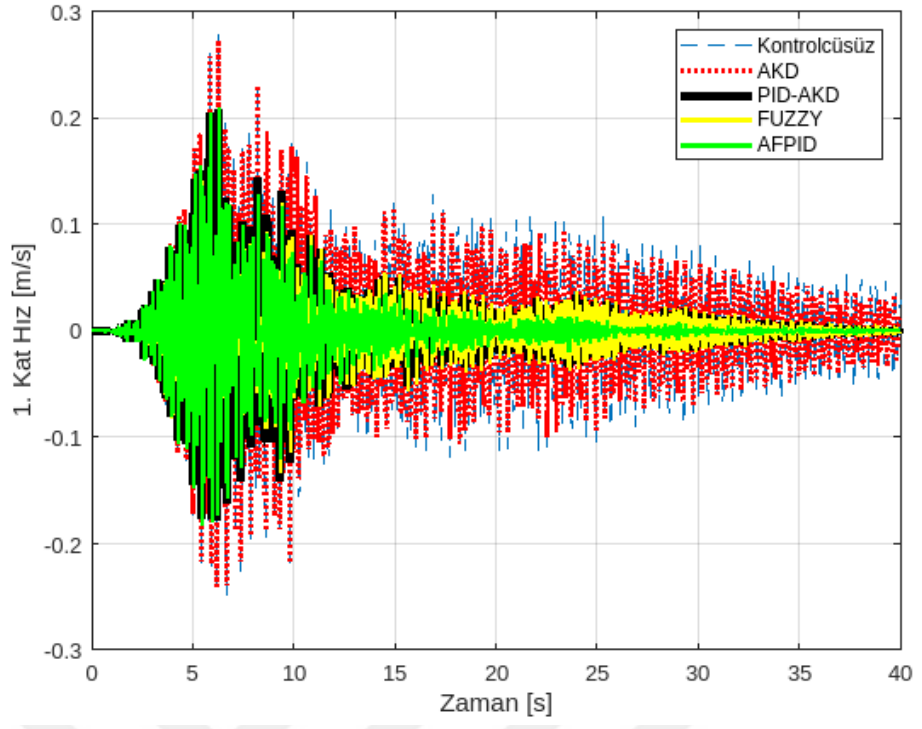
Tablo 2.13 Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları

Katlar	Maksimum Yer Değiştirme Cevapları (m)				
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	7,75E-03	7,61E-03	6,05E-03	5,82E-03	6,11E-03
2	9,43E-03	9,15E-03	7,05E-03	6,85E-03	7,06E-03
3	9,08E-03	7,01E-03	4,97E-03	4,83E-03	4,85E-03
4	6,61E-03	5,80E-03	4,66E-03	4,87E-03	4,20E-03
5	6,25E-03	4,97E-03	4,21E-03	3,74E-03	4,06E-03
6	1,15E-02	1,06E-02	8,16E-04	7,20E-04	7,68E-03

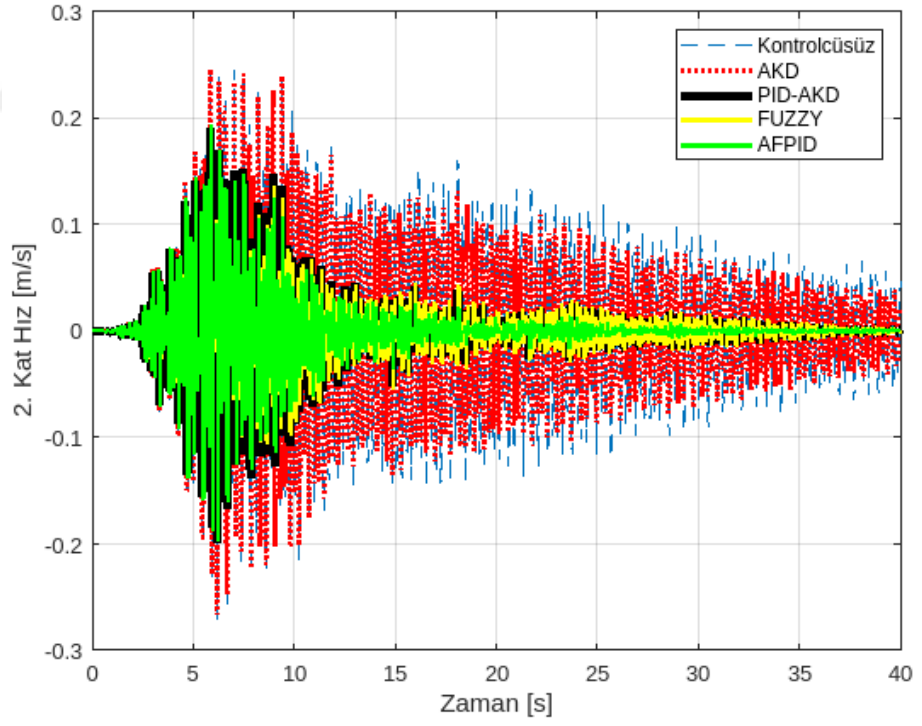
Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında maksimum yer değiştirme cevapları azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcöleri kullanıldığında maksimum yer değiştirme cevaplarının pasif kontrolden daha küçük olduğu görölmektedir. Bu durum aktif kontrolün maksimum yer değiştirme cevaplarını baskılamada pasif kontrole göre daha başarılı olduğunu göstermektedir. Yer değiştirme cevapları incelendiğinde adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün en iyi performansı sergilediği görölmektedir.

2.2.9.2 Laboratuvar Bina Modeli Kobe Depremi Hız Cevapları

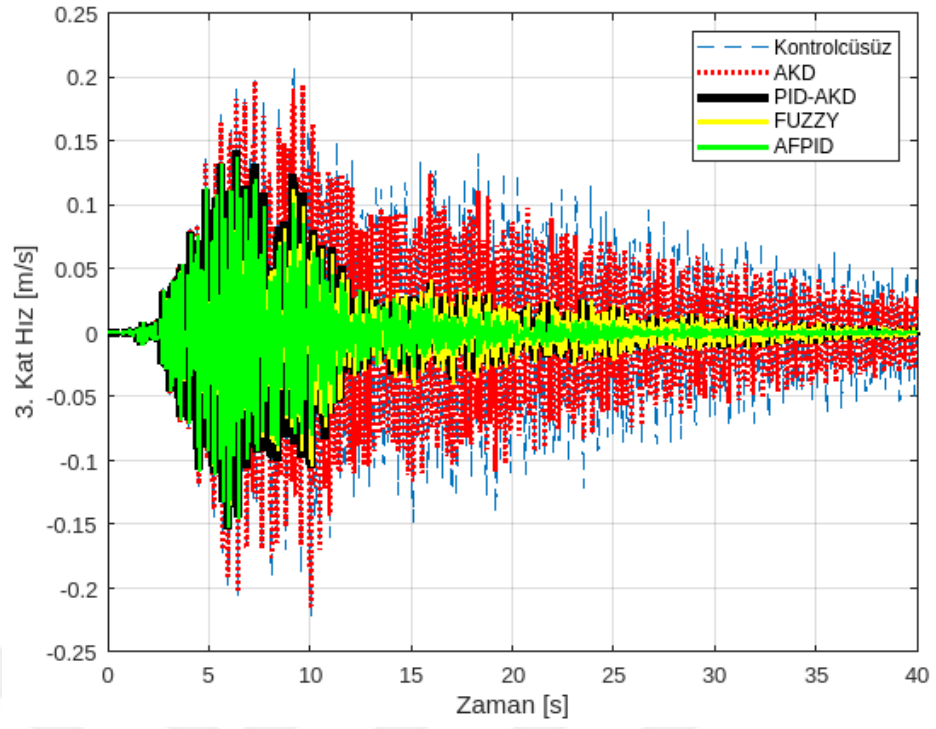
Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki hız cevapları Şekil 2.46'da görölmektedir.



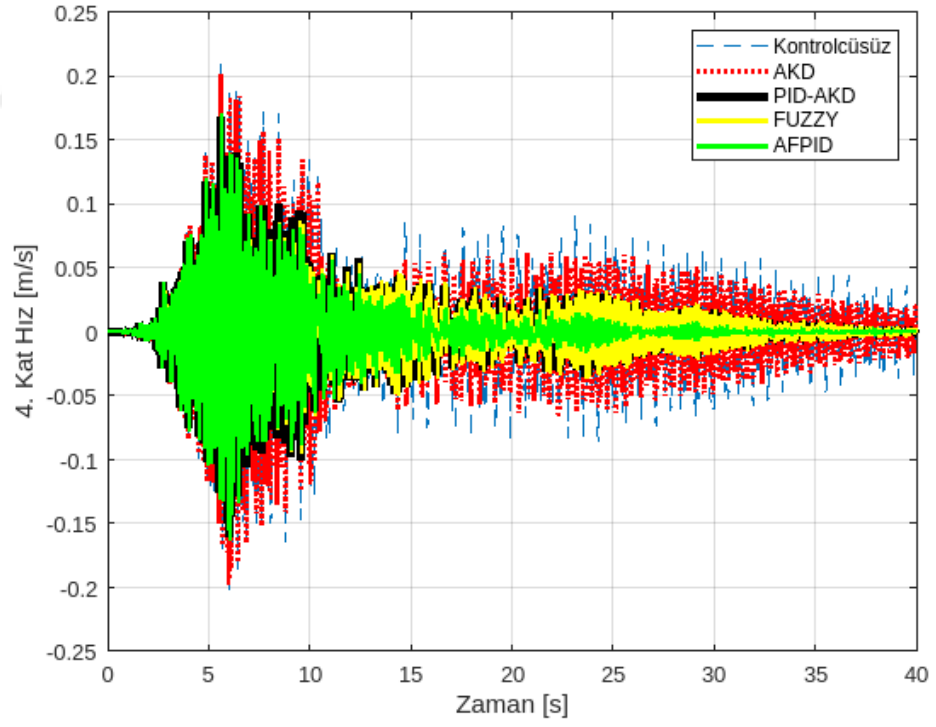
(a) 1. kat



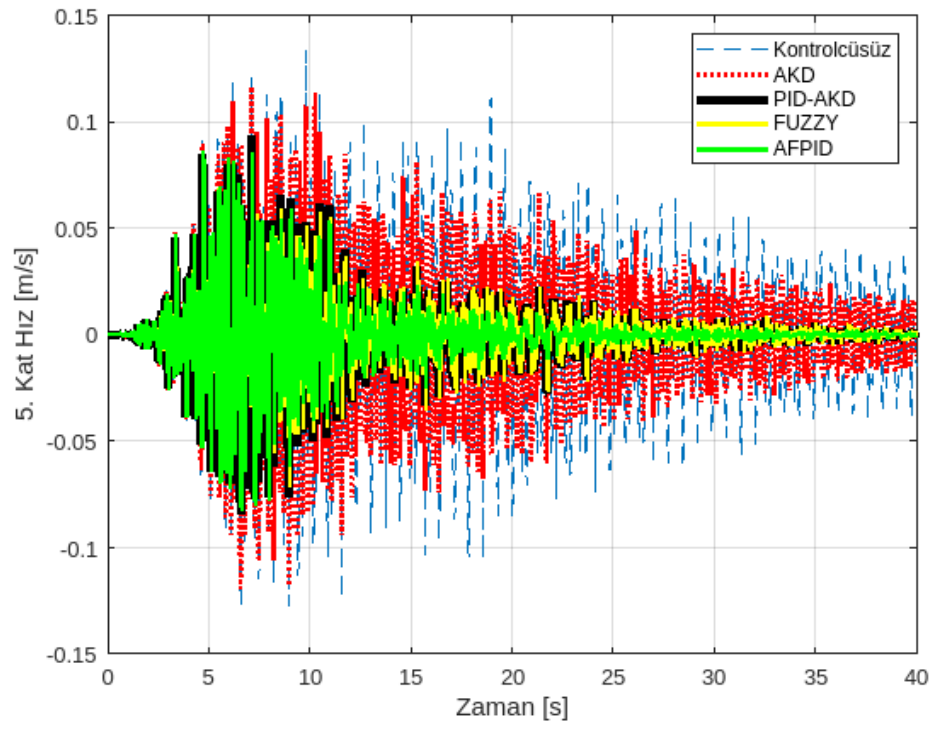
(b) 2. kat



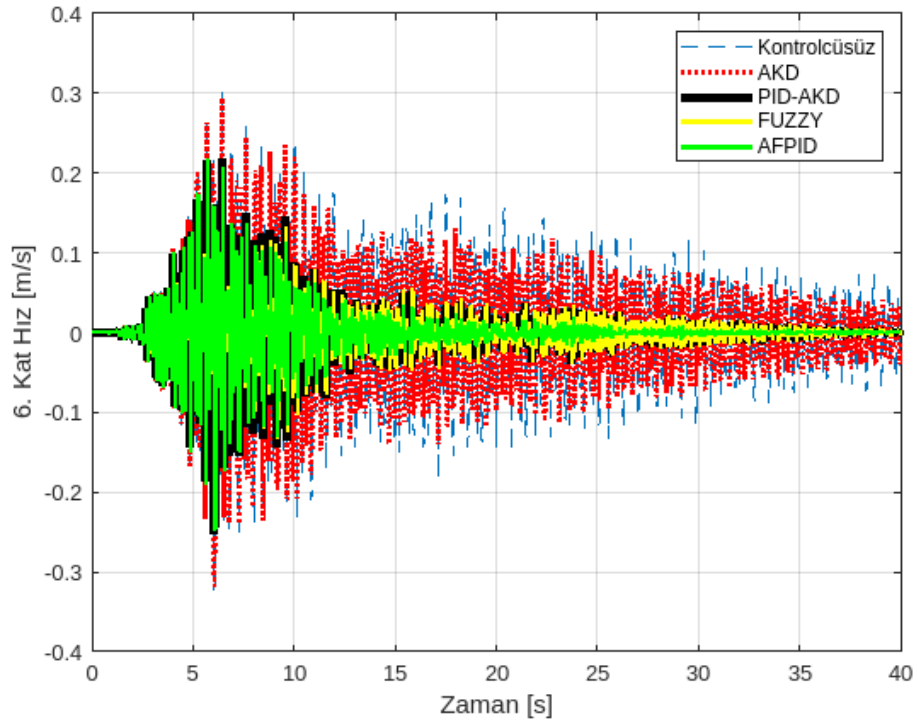
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat

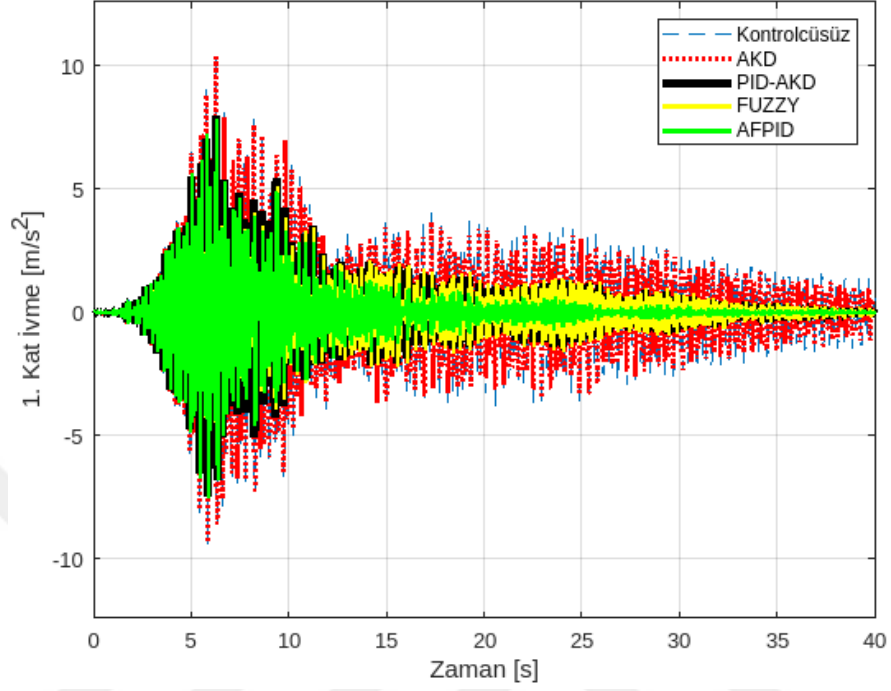


(f) 6. kat

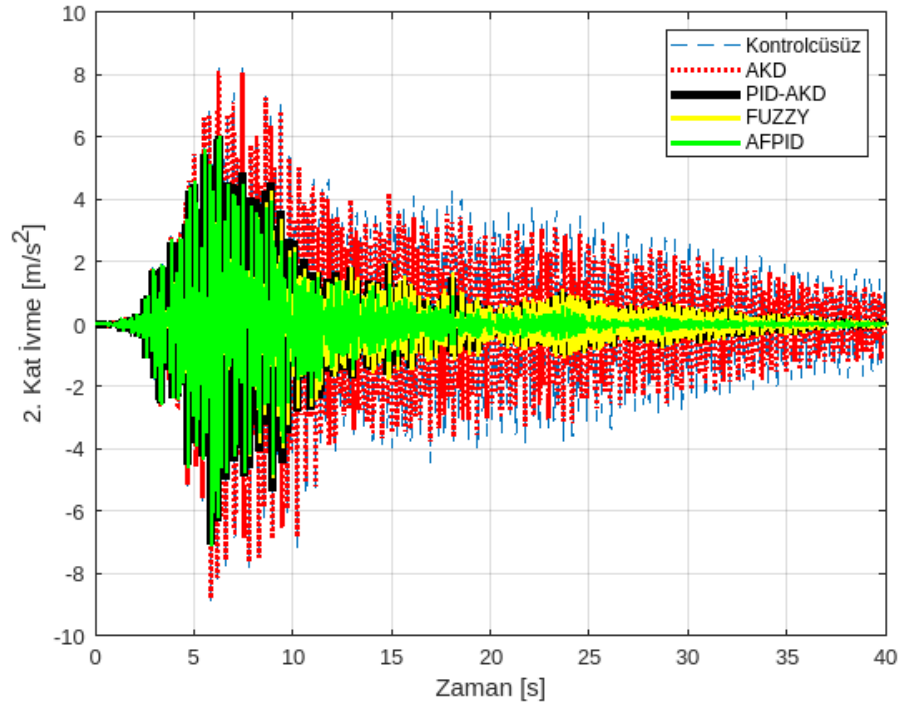
Şekil 2.46 Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki hız cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

2.2.9.3 Laboratuvar Bina Modeli Kobe Depremi İvme Cevapları

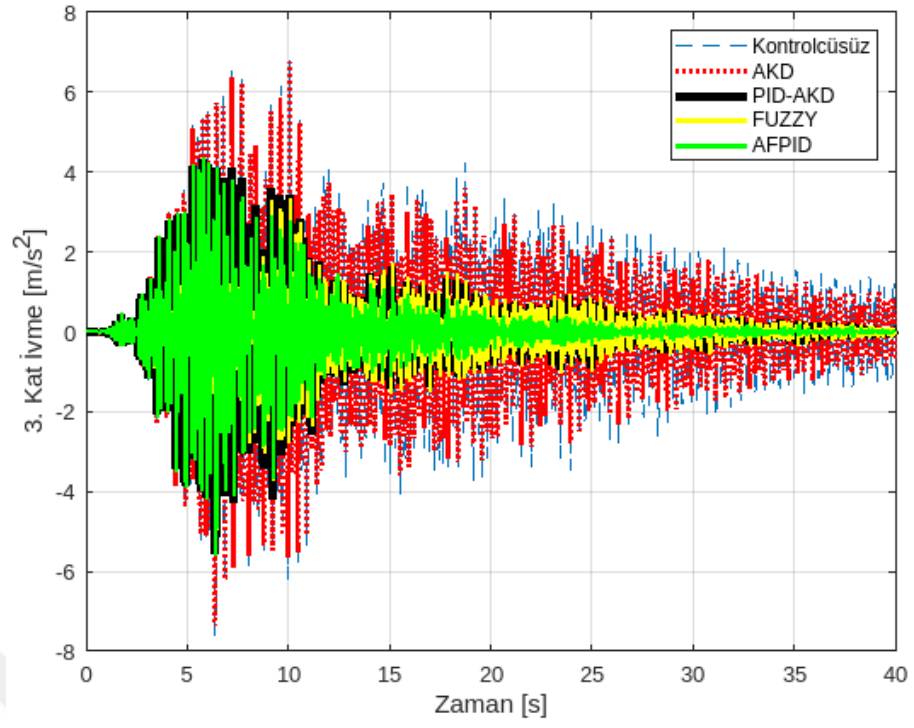
Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki ivme cevapları Şekil 2.47'de görülmektedir.



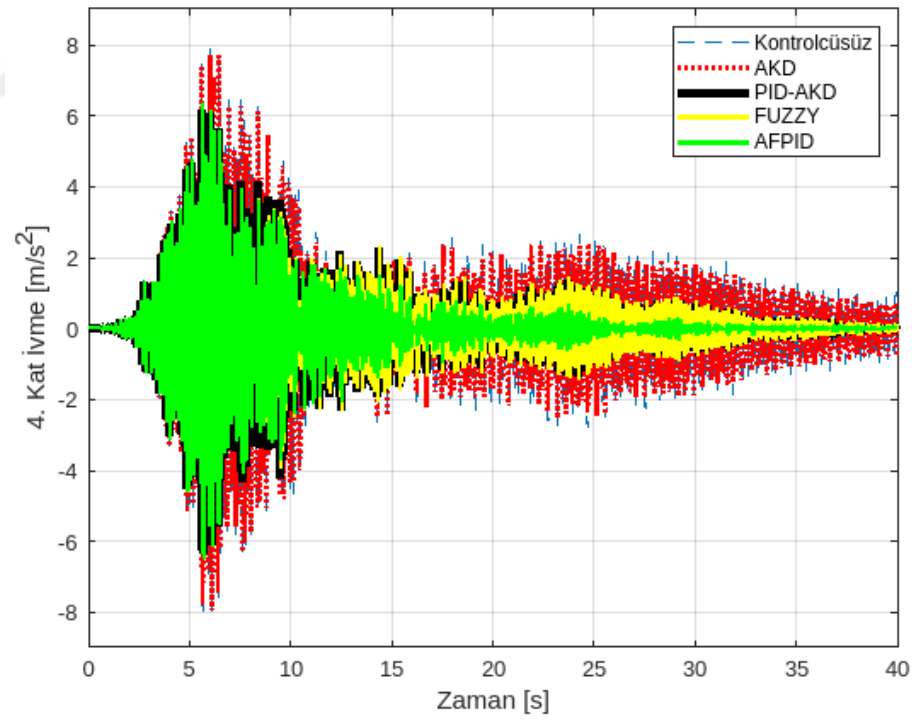
(a) 1. kat



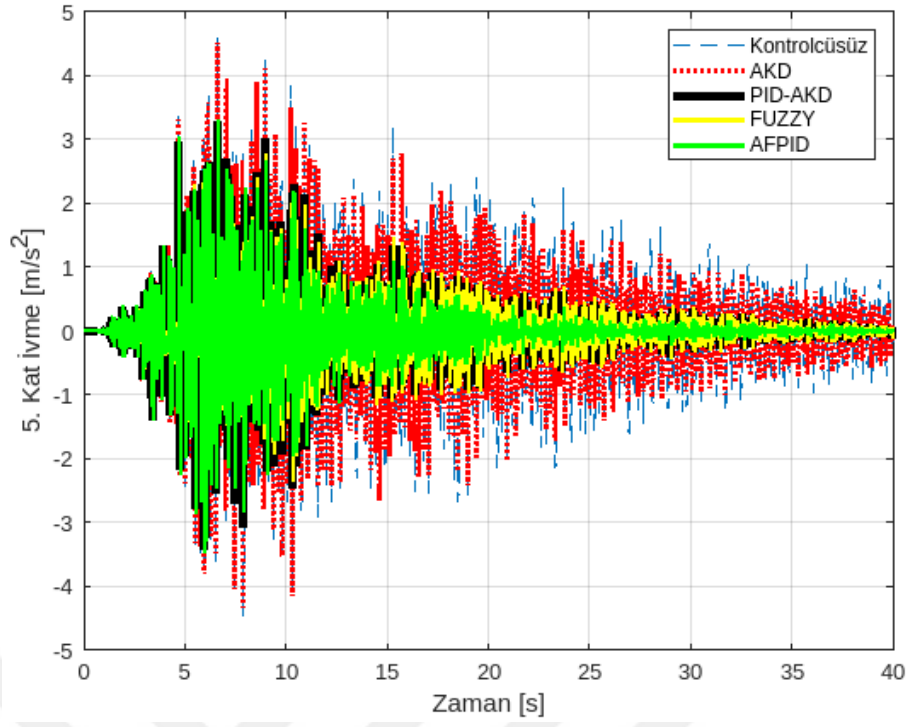
(b) 2. kat



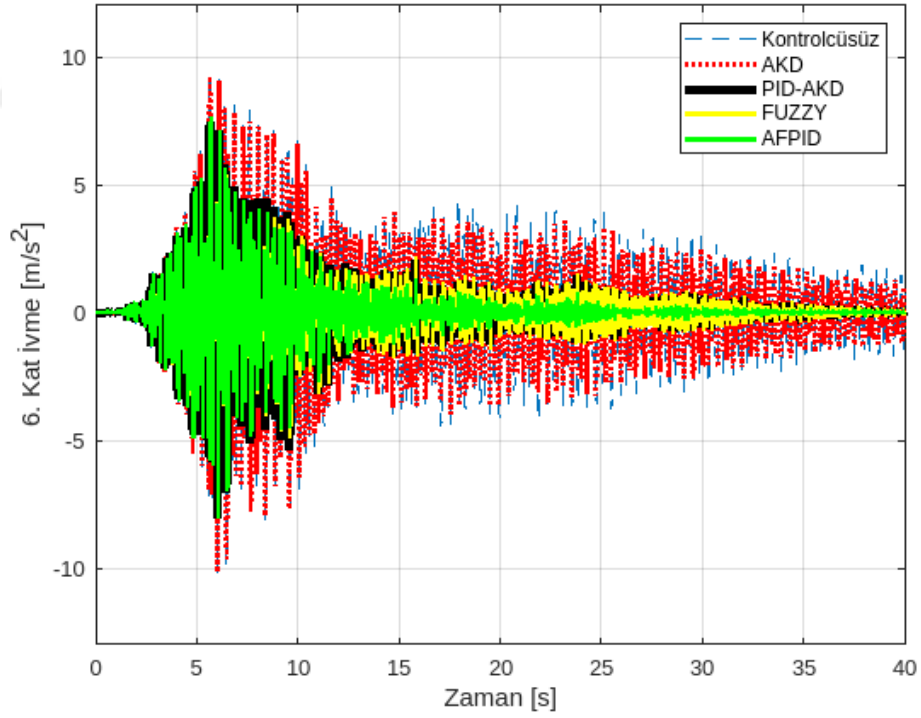
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat



(f) 6. kat

Şekil 2.47 Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki ivme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki ivme RMS değerleri Tablo 2.14'te g r lmektedir.

Tablo 2.14 Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki ivme RMS değerleri

Katlar	İvme RMS Değerleri (m/s ²)				
	Kontrolc�s�z	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	7,75E-03	7,61E-03	6,05E-03	5,82E-03	6,11E-03
2	9,43E-03	9,15E-03	7,05E-03	6,85E-03	7,06E-03
3	9,08E-03	7,01E-03	4,97E-03	4,83E-03	4,85E-03
4	6,61E-03	5,80E-03	4,66E-03	4,87E-03	4,20E-03
5	6,25E-03	4,97E-03	4,21E-03	3,74E-03	4,06E-03
6	1,15E-02	1,06E-02	8,16E-04	7,20E-04	7,68E-03

Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında ivme RMS değerleri azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolc leri kullanıldığında ivme RMS değerlerinin pasif kontrolden daha küçük olduğu g r lmektedir. Bu durum aktif kontrolün titreşimleri azaltmada pasif kontrole göre daha etkili olduğunu göstermektedir.

Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki maksimum ivme cevapları Tablo 2.15'te g r lmektedir.

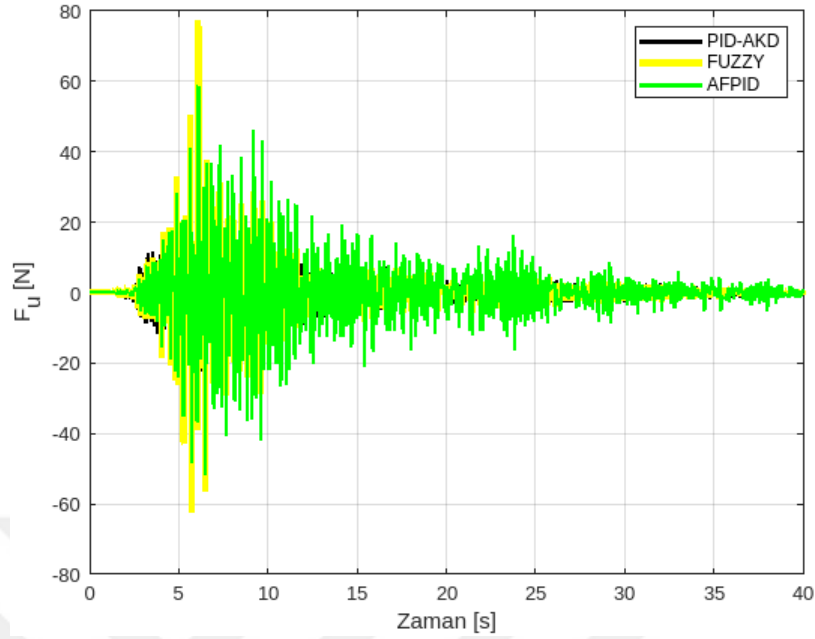
Tablo 2.15 Laboratuvar bina modelinin 1995 Kobe depremi etkisindeki maksimum ivme cevapları

Katlar	Maksimum İvme Cevapları (m/s ²)				
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	10,5300	10,3700	7,9500	7,5470	7,8510
2	8,3280	8,1400	6,0340	5,6470	6,0300
3	7,7790	6,7600	4,3060	4,2120	4,3360
4	7,8890	7,7290	6,1530	6,2770	7,3240
5	4,5810	4,5330	3,2730	3,0580	3,2970
6	9,2870	9,2080	7,4340	7,4100	7,6660

Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında maksimum ivme cevapları azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcülerini kullanıldığında maksimum ivme cevaplarının pasif kontrolden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum aktif kontrolün maksimum ivme cevaplarını baskılamada pasif kontrole göre daha başarılı olduğunu göstermektedir. İvme cevapları incelendiğinde sistem yer değiştirme cevaplarına benzer davranış göstermiştir. İvme cevaplarında da en iyi performansı yer değiştirme cevaplarında olduğu gibi adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsü göstermiştir.

2.2.9.4 Laboratuvar Bina Modeli Kobe Depremi için Denetim Kuvveti

Kobe Depremi etkisindeki laboratuvar bina modelinin denetim kuvvetindeki değişim Şekil 2.48’de görülmektedir.

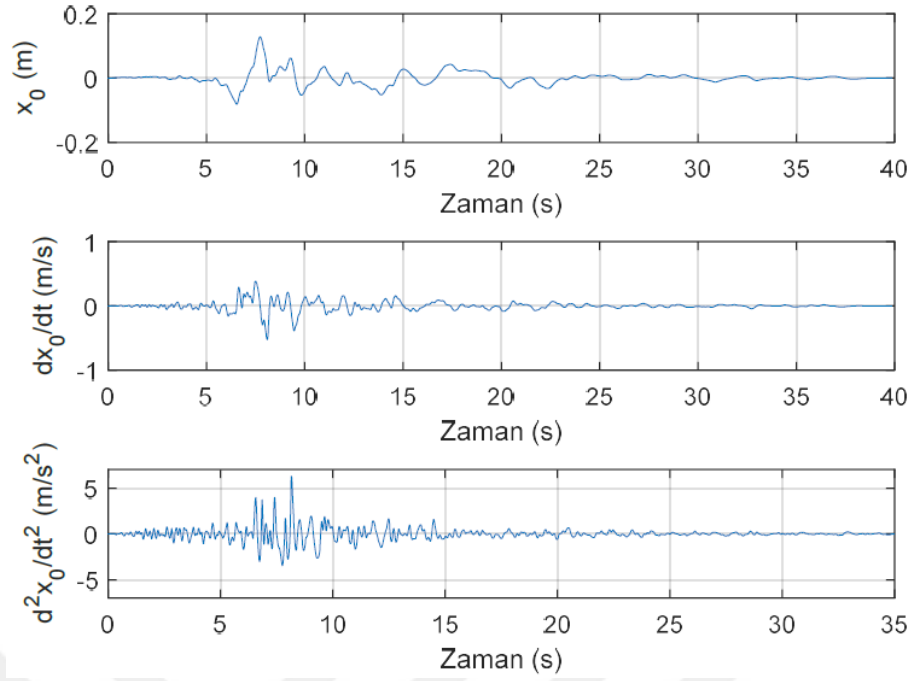


Şekil 2.48 Kobe depremi (1995) etkisindeki laboratuvar bina modelinin denetim kuvvetindeki değişim

Laboratuvar bina modelinin Kobe depremi etkisi altındaki yer değiştirme-zaman, hız-zaman ve ivme zaman grafikleri incelendiğinde pasif kontrol yöntemi olarak kullanılan AKD'nin titreşimleri azaltmada etkili olduğu görülürken aktif kontrol yöntemi olarak tasarlanan PID kontrolcü, bulanık mantık kontrolcü ve adaptif bulanık PID kontrolcünün titreşimleri azaltmada pasif kontrole göre daha etkili olduğu görülmektedir. Yer değiştirme cevapları incelendiğinde adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Ayrıca bulanık mantık denetleyicisinin de PID kontrolcüye göre daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Hız ve ivme cevapları incelendiğinde sistemin yer değiştirme cevapları ile benzer bir durum sergilediği görülmektedir.

2.2.10 Laboratuvar Bina Modelinin 1994 Northridge Depremi Etkisinde Titreşim Cevapları

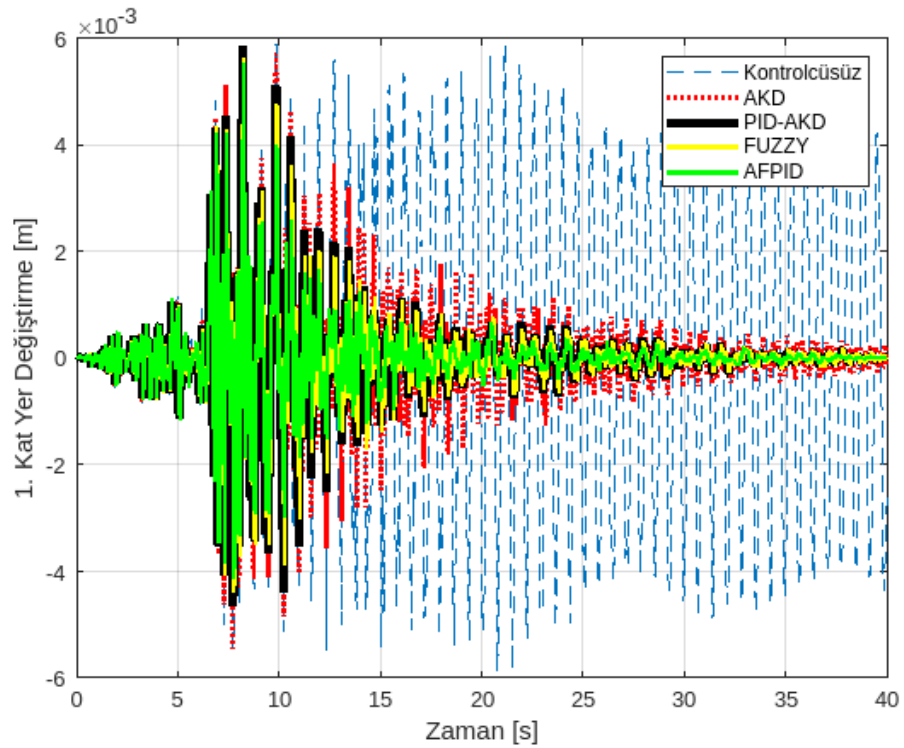
Şekil 2.49'da 1994 Northridge depremine ait hareketin yer değiştirme, hız ve ivmesinin zamana göre değişimi görülmektedir.



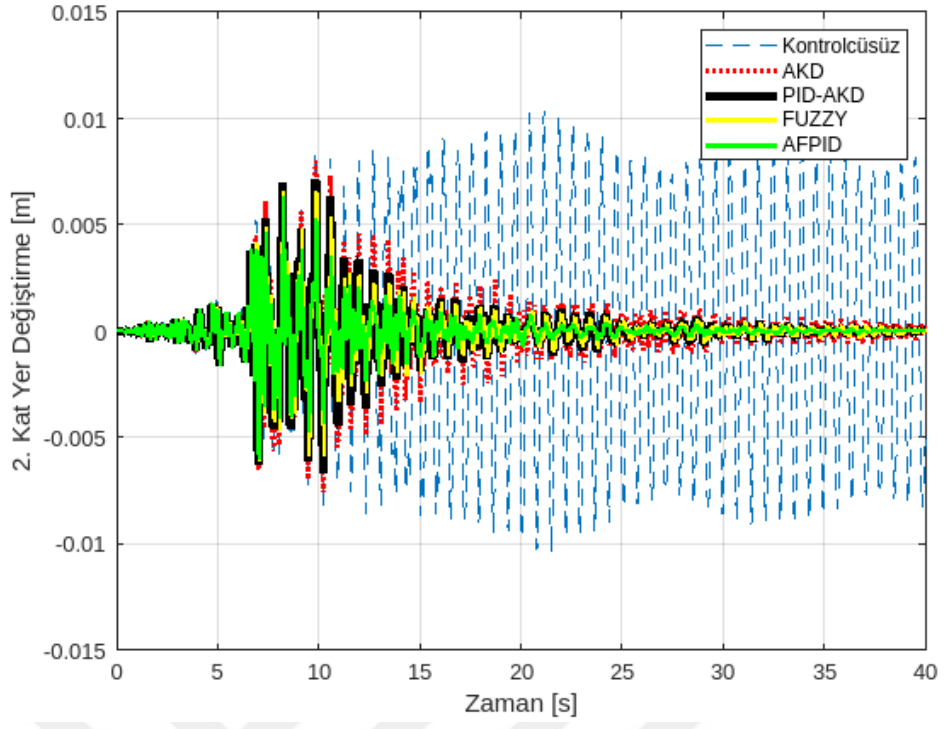
Şekil 2.49 1994 Northridge depremi yer hareketi

2.2.10.1 Laboratuvar Bina Modeli Northridge Depremi Yer Değiştirme Cevapları

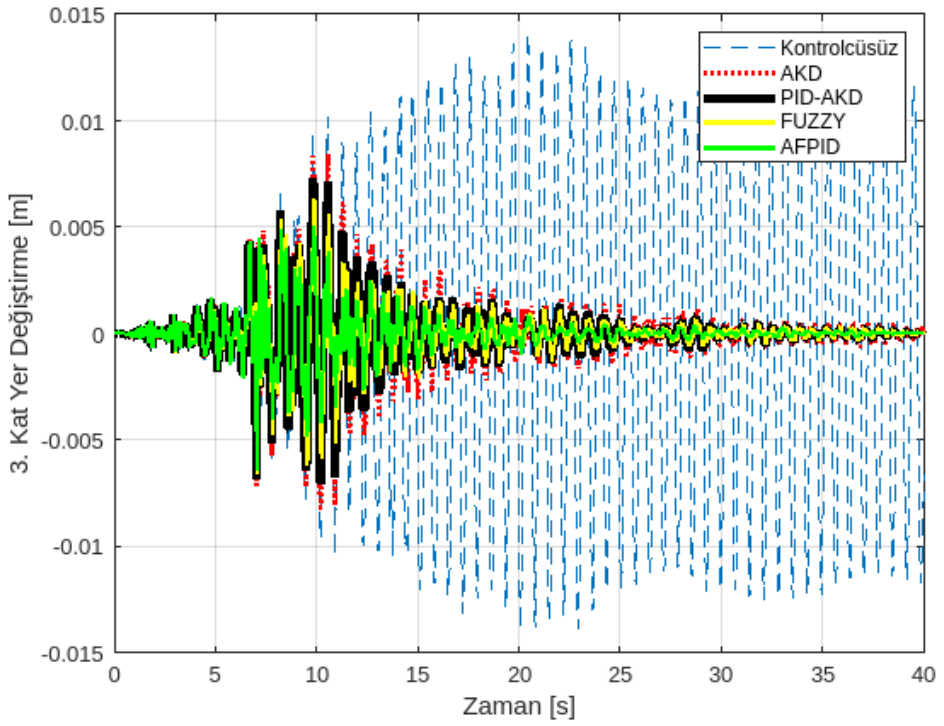
Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki yer değiştirme cevapları Şekil 2.50'de görülmektedir.



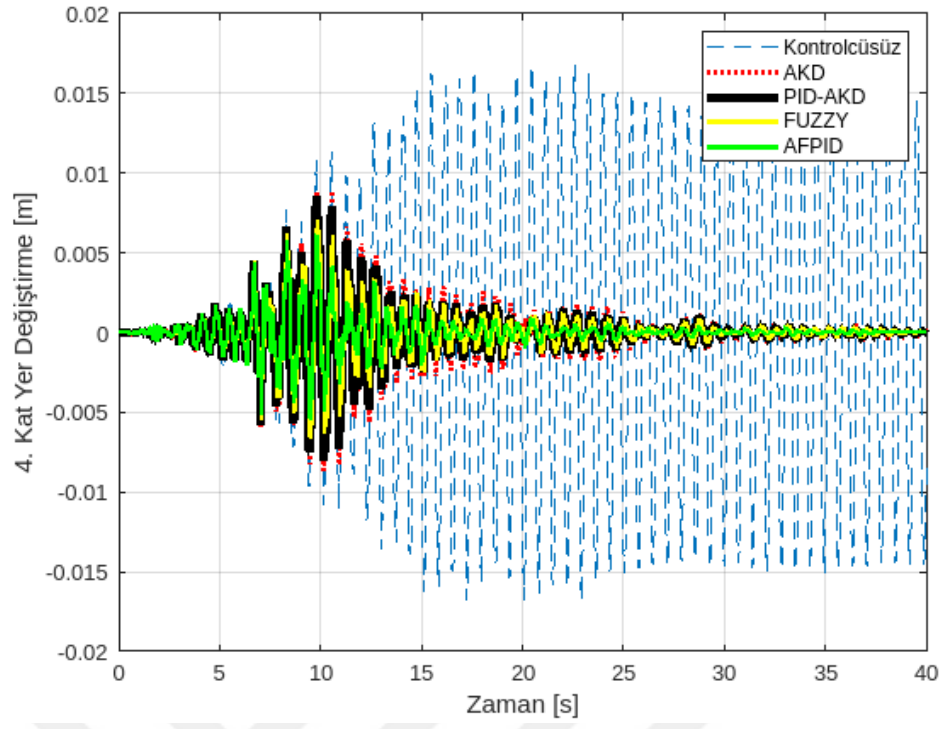
(a) 1. kat



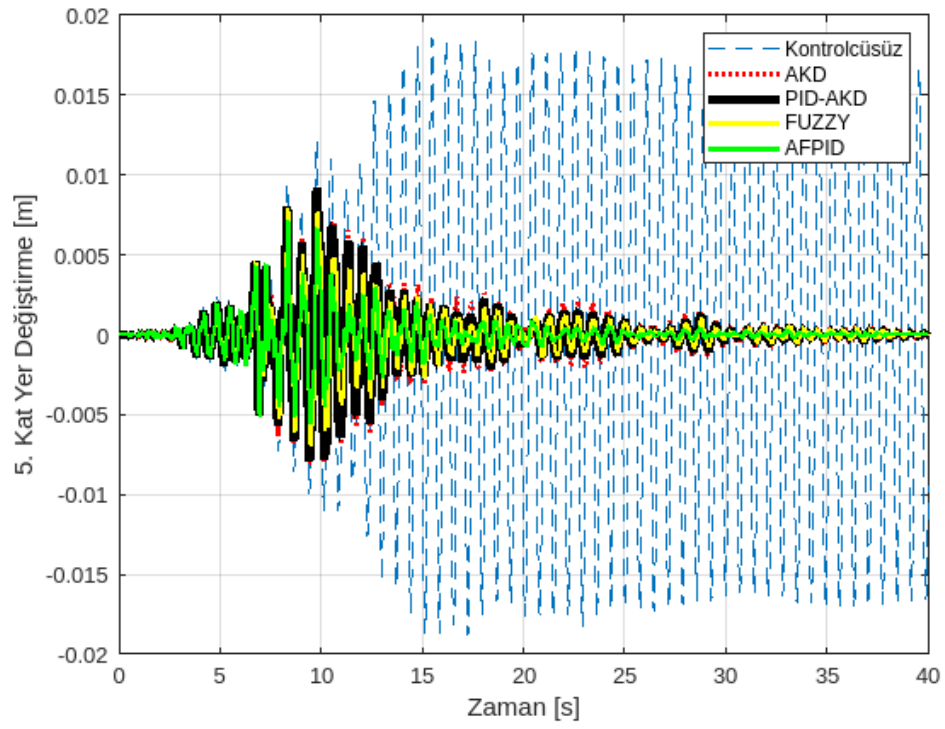
(b) 2. kat



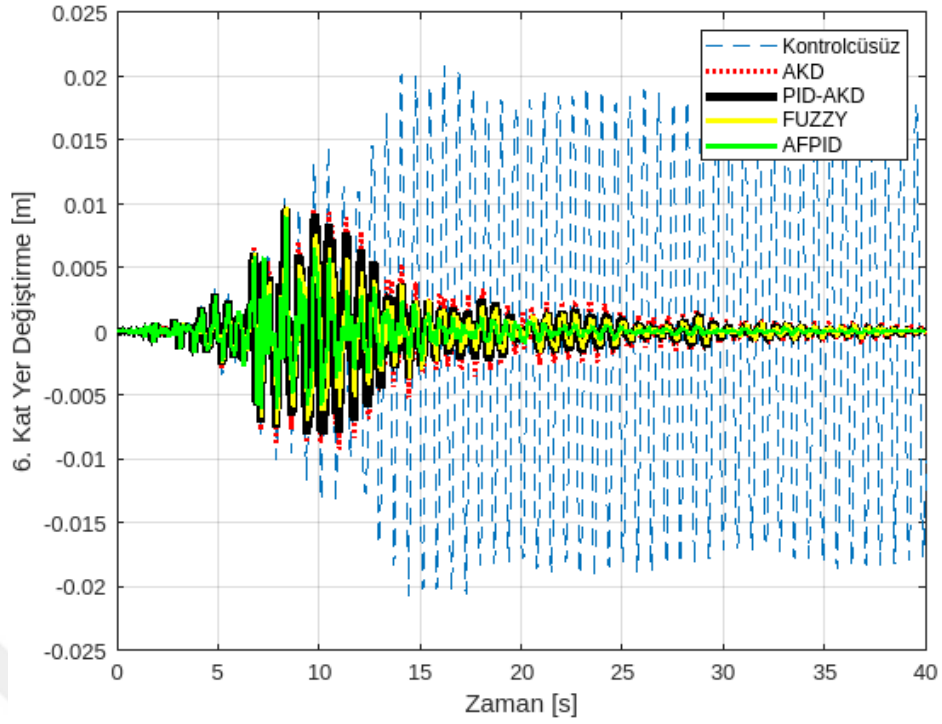
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat



(f) 6. kat

Şekil 2.50 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki yer değiştirme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri Tablo 2.16’da görülmektedir.

Tablo 2.16 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri

Katlar	Yer Değiştirme RMS Değerleri (m)				
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	2,80E-03	9,99E-04	8,33E-04	7,83E-04	7,07E-04
2	5,24E-03	1,39E-03	1,17E-03	1,05E-03	8,96E-04
3	7,35E-03	1,58E-03	1,41E-03	1,20E-03	9,61E-04

Tablo 2.16 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki yer değiştirme RMS değerleri (devamı)

4	9,06E-03	1,77E-03	1,63E-03	1,34E-03	1,02E-03
5	1,03E-02	1,98E-03	1,84E-03	1,50E-03	1,12E-03
6	1,10E-02	2,25E-03	2,03E-03	1,69E-03	1,28E-03

Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında yer değiştirme RMS değerleri azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcöleri kullanıldığında yer değiştirme RMS değerlerinin pasif kontrolden daha küçük olduğu görölmektedir. Bu durum aktif kontrolün titreşimleri azaltmada pasif kontrole göre daha etkili olduğunu göstermektedir. Yer değiştirme RMS değerleri incelendiğinde adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün performansının diğer kontrolcölerden daha iyi olduğu görölmektedir.

Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları Tablo 2.17’de görölmektedir

Tablo 2.17 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları

Katlar	Maksimum Yer Değiştirme Cevapları (m)				
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	5,90E-03	5,73E-03	5,85E-03	5,64E-03	5,54E-03
2	1,03E-02	8,01E-03	7,15E-03	6,57E-03	6,29E-03
3	1,42E-02	8,47E-03	7,26E-03	6,40E-03	5,01E-03

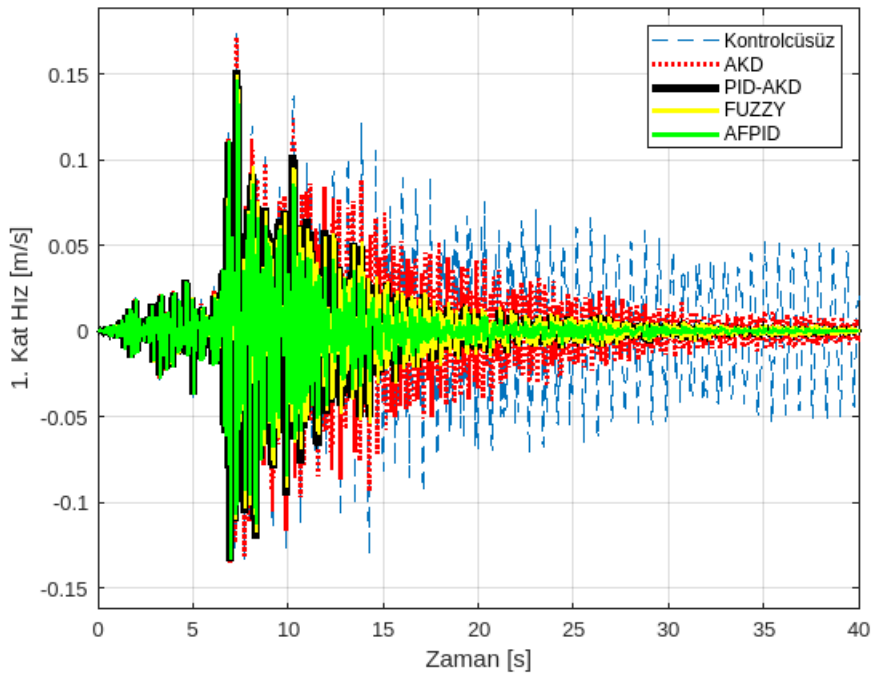
Tablo 2.17 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki maksimum yer değiştirme cevapları (devamı)

4	1,68E-02	8,92E-03	8,50E-03	7,06E-03	6,12E-03
5	1,85E-02	9,29E-03	9,19E-03	7,86E-03	7,14E-03
6	2,08E-02	9,55E-03	9,64E-03	9,67E-03	8,97E-03

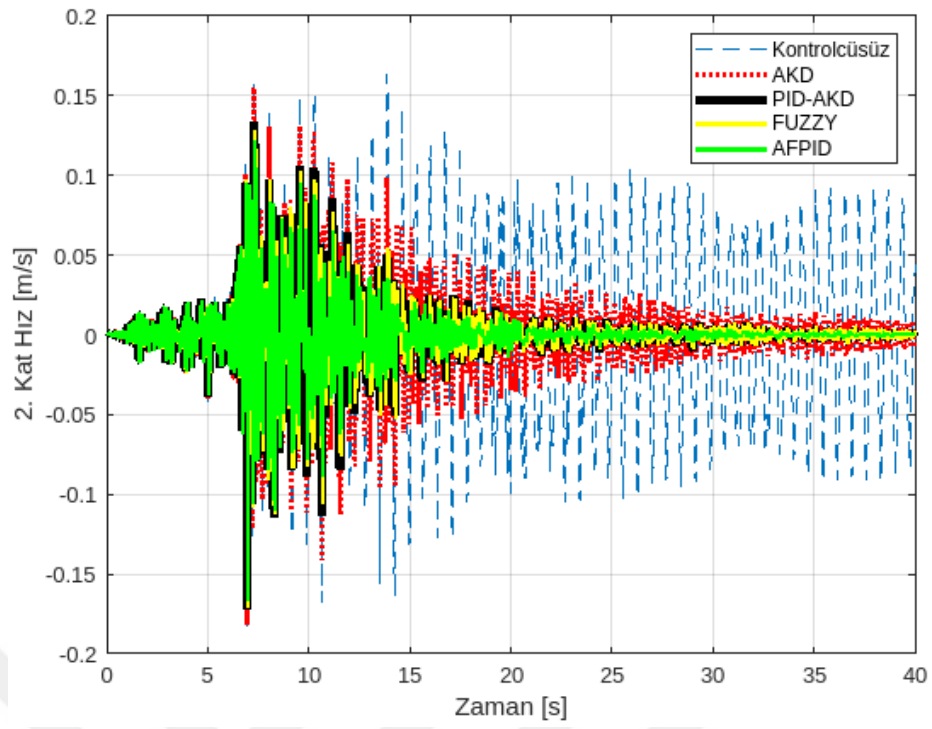
Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında maksimum yer değiştirme cevapları azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcöleri kullanıldığında maksimum yer değiştirme cevaplarının pasif kontrolden daha küçük olduğu görölmektedir. Bu durum aktif kontrolün maksimum yer değiştirme cevaplarını baskılamada pasif kontrole göre daha başarılı olduğunu göstermektedir. Yer değiştirme cevapları incelendiğinde adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün en iyi performansı sergilediği görölmektedir.

2.2.10.2 Laboratuvar Bina Modeli Northridge Depremi Hız Cevapları

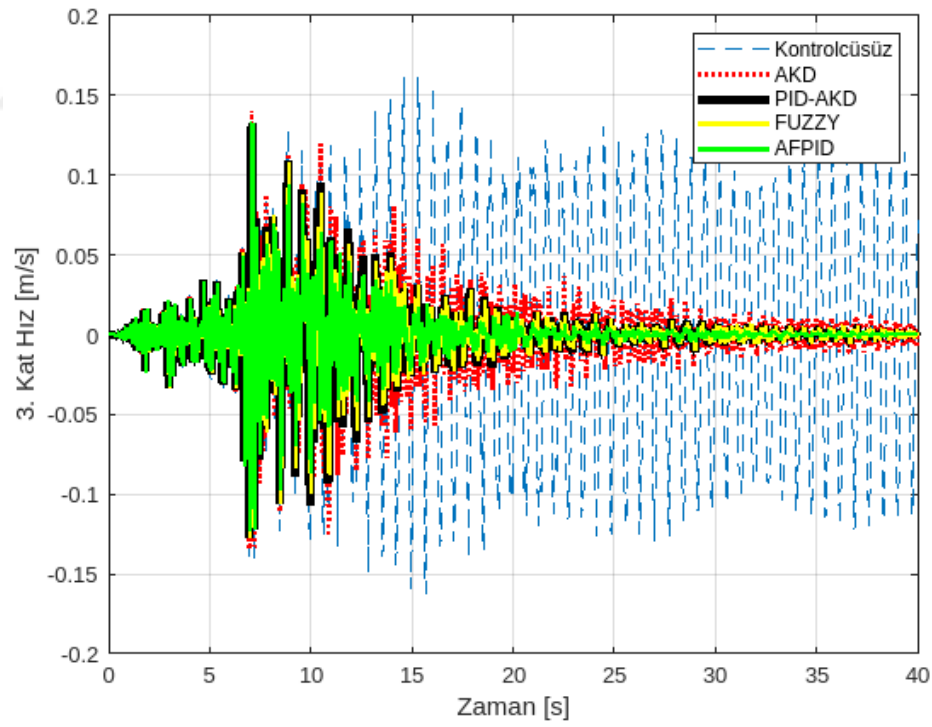
Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki hız cevapları Şekil 2.51’de görölmektedir.



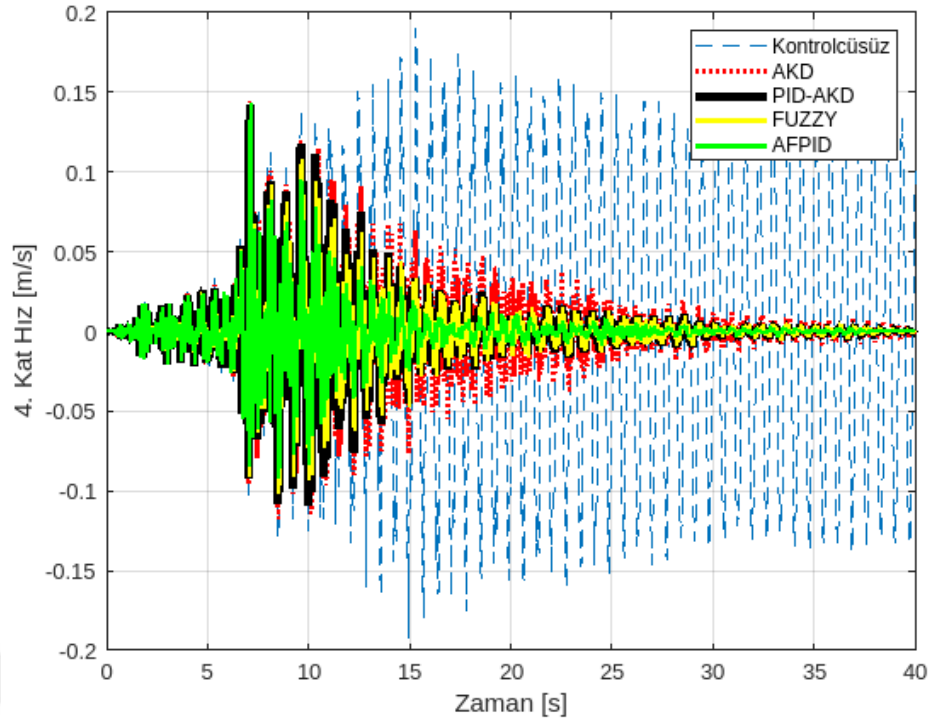
(a) 1. kat



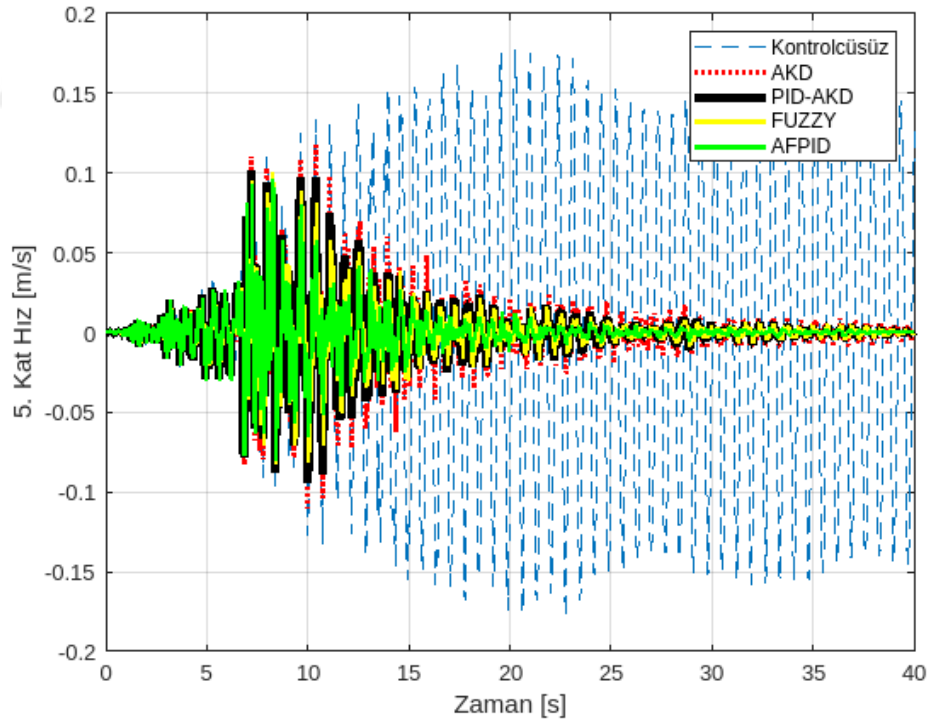
(b) 2. kat



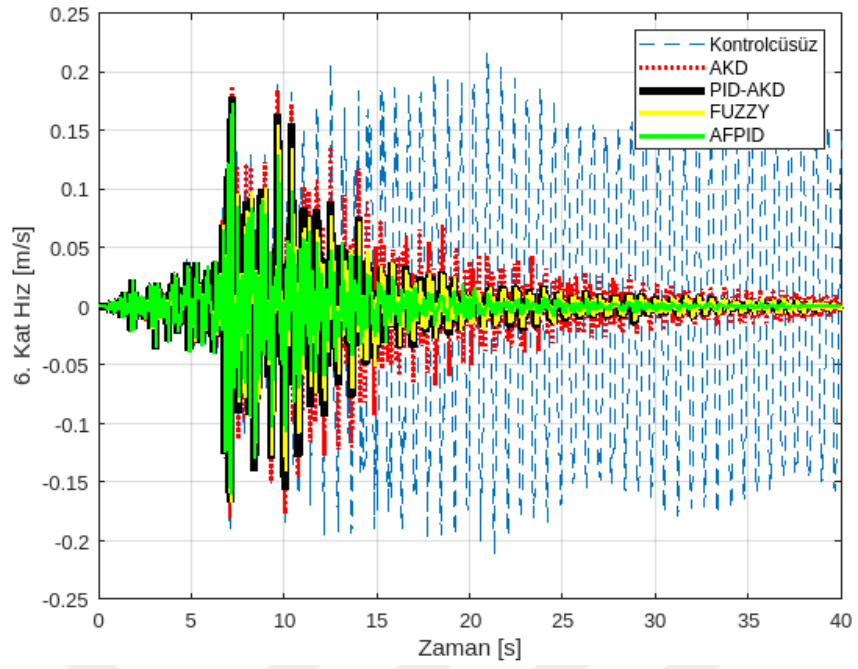
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat

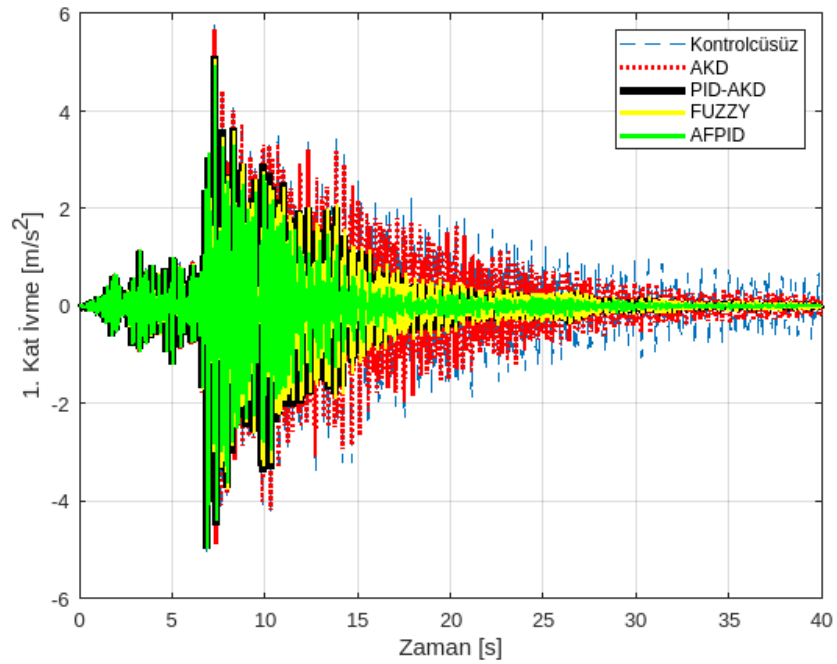


(f) 6. kat

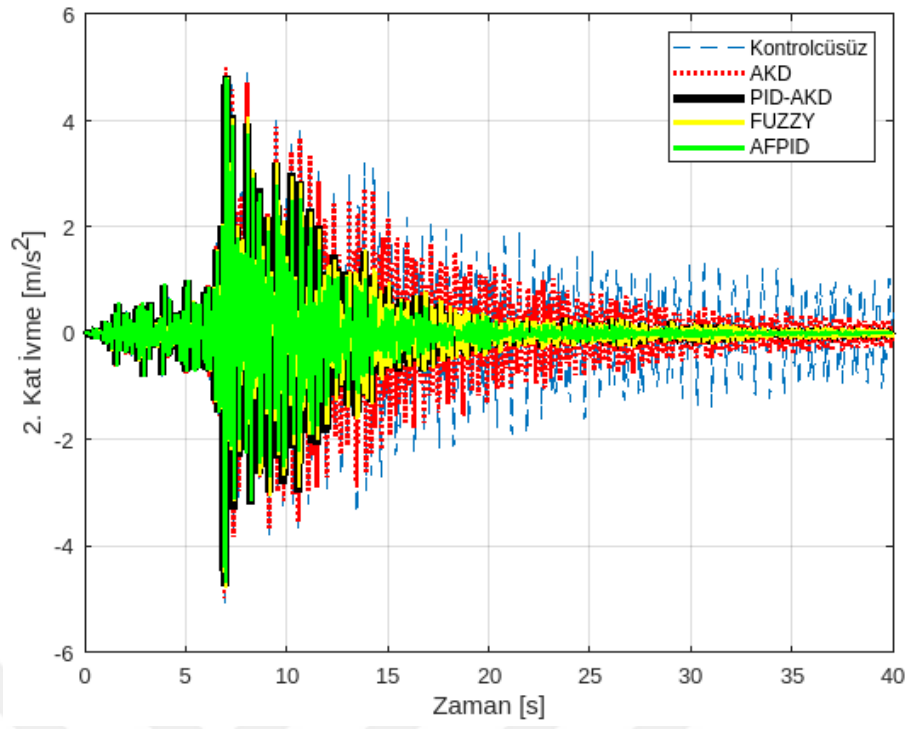
Şekil 2.51 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki hız cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

2.2.10.3 Laboratuvar Bina Modeli Northridge Depremi İvme Cevapları

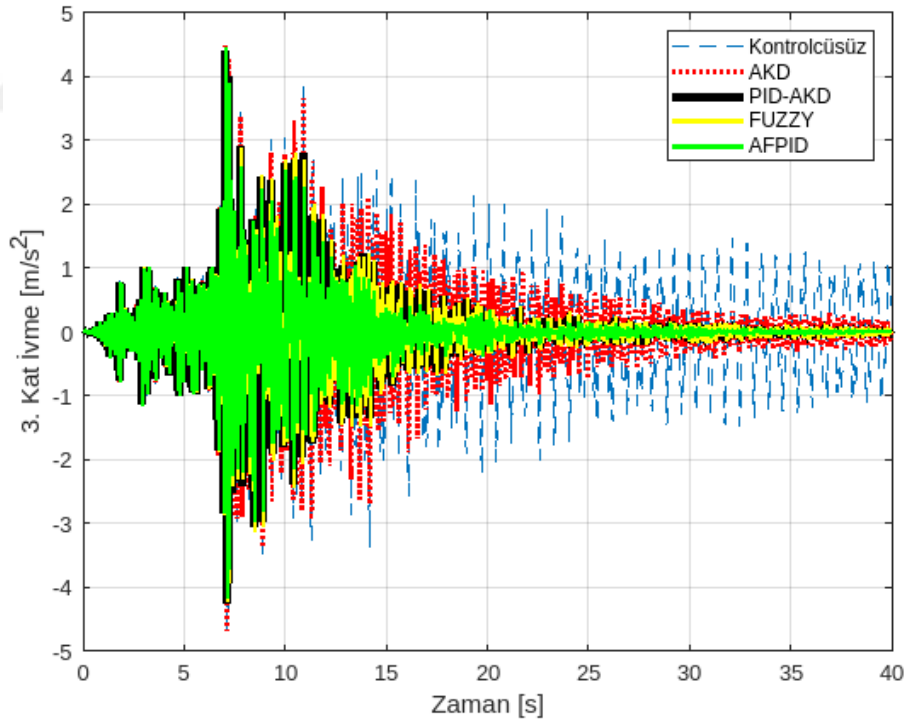
Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki ivme cevapları Şekil 2.52’de görülmektedir.



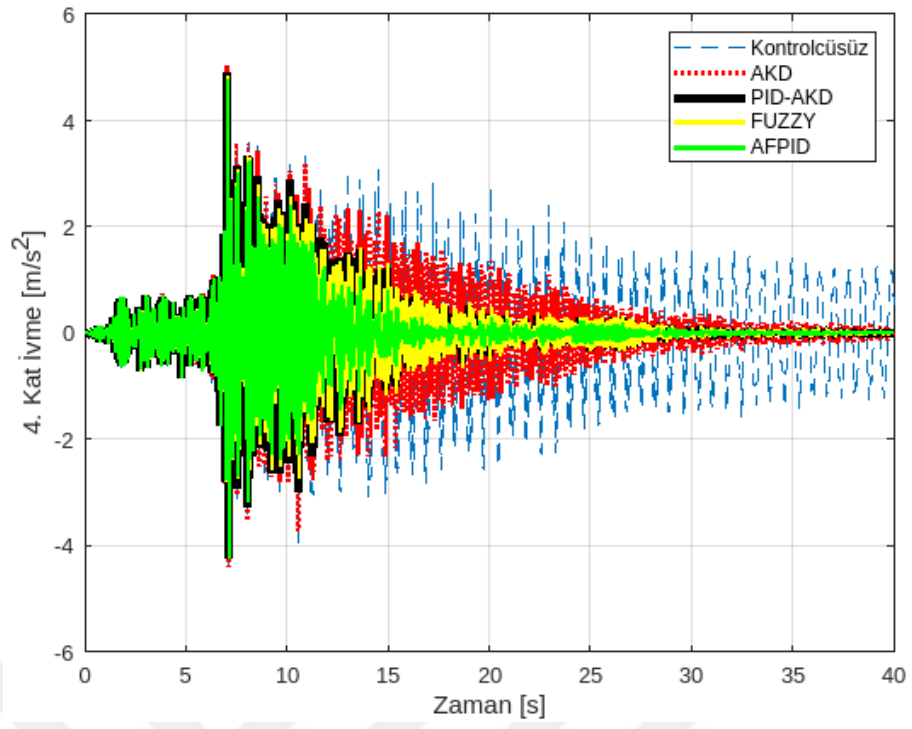
(a) 1. kat



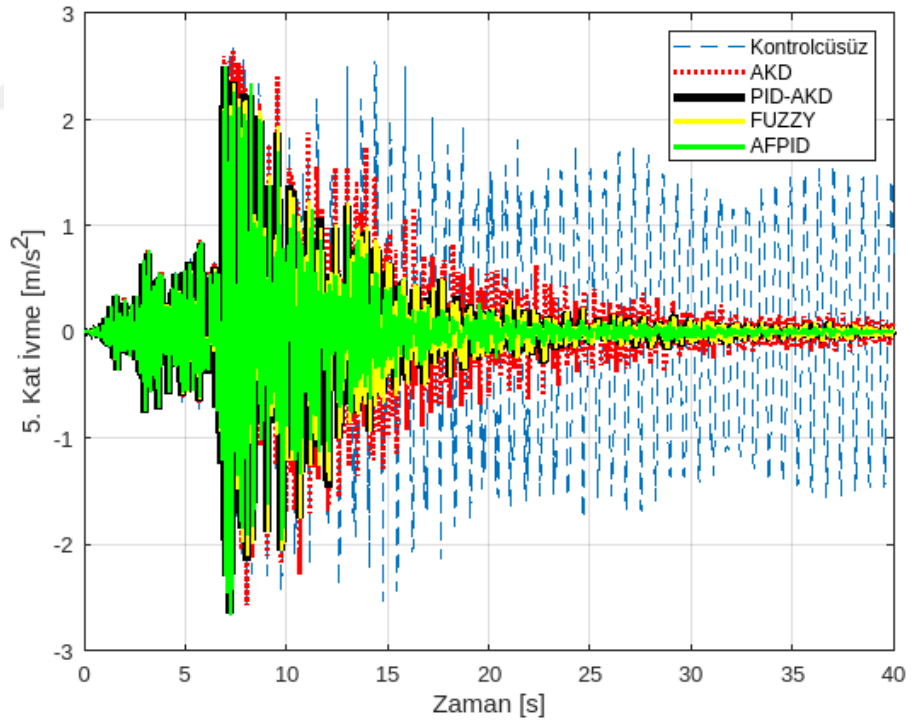
(b) 2. kat



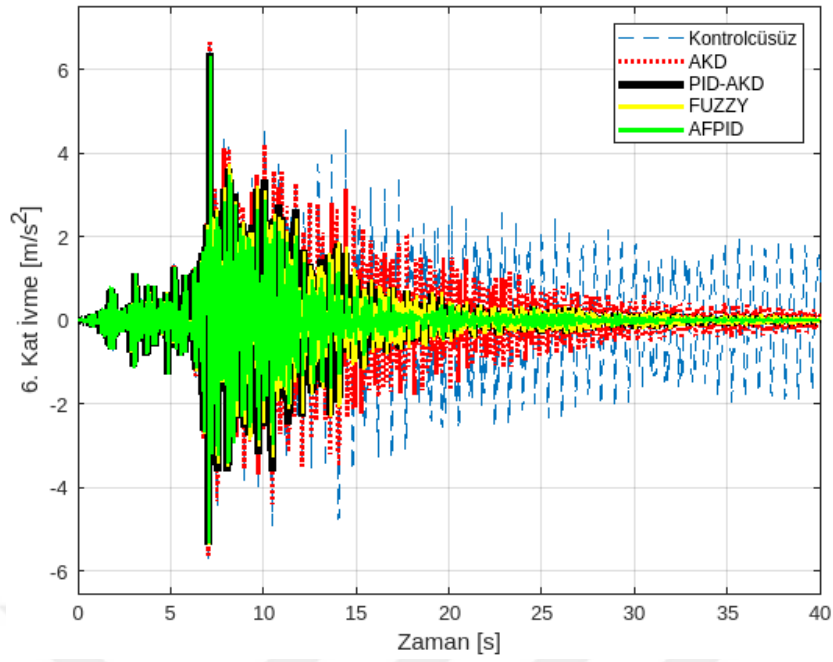
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat



(f) 6. kat

Şekil 2.52 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki ivme cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki ivme RMS değerleri Tablo 2.18’de görülmektedir.

Tablo 2.18 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki ivme RMS değerleri

Katlar	İvme RMS Değerleri (m/s ²)				
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	0,9736	0,9173	0,6736	0,6692	0,5857
2	0,9739	0,8351	0,6078	0,6059	0,5532
3	0,9495	0,7191	0,5439	0,5468	0,5014
4	1,1210	0,8540	0,6323	0,6154	0,5383

Tablo 2.18 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki ivme RMS değerleri (devamı)

5	0,9433	0,4851	0,3879	0,3892	0,3593
6	1,2930	0,9336	0,6948	0,6829	0,6135

Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında ivme RMS değerleri azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcülerini kullanıldığında ivme RMS değerlerinin pasif kontrolden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum aktif kontrolün titreşimleri azaltmada pasif kontrole göre daha etkili olduğunu göstermektedir.

Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki maksimum ivme cevapları Tablo 2.19’da görülmektedir.

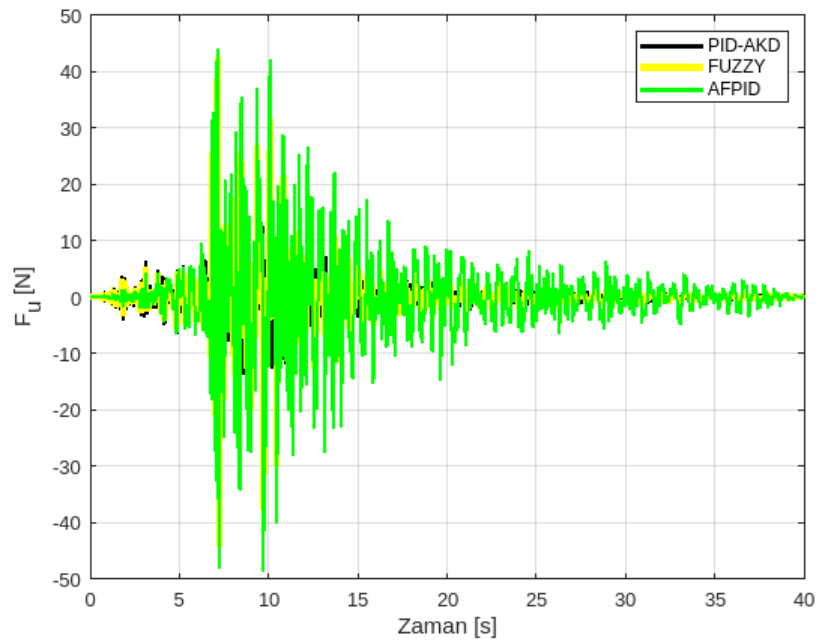
Tablo 2.19 Laboratuvar bina modelinin 1994 Northridge depremi etkisindeki maksimum ivme cevapları

Katlar	İvme RMS Değerleri (m/s ²)				
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
1	5,7600	5,6890	5,1090	5,0420	4,9340
2	4,9280	4,9950	4,8380	4,7890	4,7900
3	4,4330	4,4920	4,4060	4,4300	4,4490
4	5,0130	5,0490	4,8940	4,8350	4,7780
5	2,7080	2,6430	2,4910	2,4670	2,4960
6	6,6310	6,6370	6,3850	6,2200	6,3140

Pasif kontrol yöntemi olarak AKD kullanıldığında maksimum ivme cevapları azalmaktadır. AKD ile aktif kontrol yöntemi olarak PID, FUZZY ve AFPID kontrolcileri kullanıldığında maksimum ivme cevaplarının pasif kontrolden daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum aktif kontrolün maksimum ivme cevaplarını baskılamada pasif kontrole göre daha başarılı olduğunu göstermektedir. İvme cevapları incelendiğinde sistem yer değiştirme cevaplarına benzer davranış göstermiştir. İvme cevaplarında da en iyi performansı yer değiştirme cevaplarında olduğu gibi adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsü göstermiştir.

2.2.10.4 Laboratuvar Bina Modeli Northridge Depremi için Denetim Kuvveti

Northridge Depremi etkisindeki laboratuvar bina modelinin denetim kuvvetindeki değişim Şekil 2.53'te görülmektedir.



Şekil 2.53 Northridge depremi (1994) etkisindeki laboratuvar bina modelinin denetim kuvvetindeki değişim

Laboratuvar bina modelinin Northridge Depremi etkisi altındaki yer değiştirme-zaman, hız-zaman ve ivme zaman grafikleri incelendiğinde pasif kontrol yöntemi olarak kullanılan AKD'nin titreşimleri azaltmada etkili olduğu görülürken aktif kontrol yöntemi olarak tasarlanan PID kontrolcü, bulanık mantık kontrolcü ve adaptif bulanık PID kontrolcünün titreşimleri azaltmada pasif kontrole göre daha

etkili olduğu görülmektedir. Yer değiştirme cevapları incelendiğinde adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Ayrıca bulanık mantık denetleyicisinin de PID kontrolcüye göre daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Hız ve ivme cevapları incelendiğinde sistemin yer değiştirme cevapları ile benzer bir durum sergilediği görülmektedir.

2.2.11 Laboratuvar Bina Modeli için ISE Sonuçları

Tablo 2.20’de laboratuvar bina modeli için ISE sonuçları görülmektedir.

Tablo 2.20 Laboratuvar bina modeli için ISE sonuçları

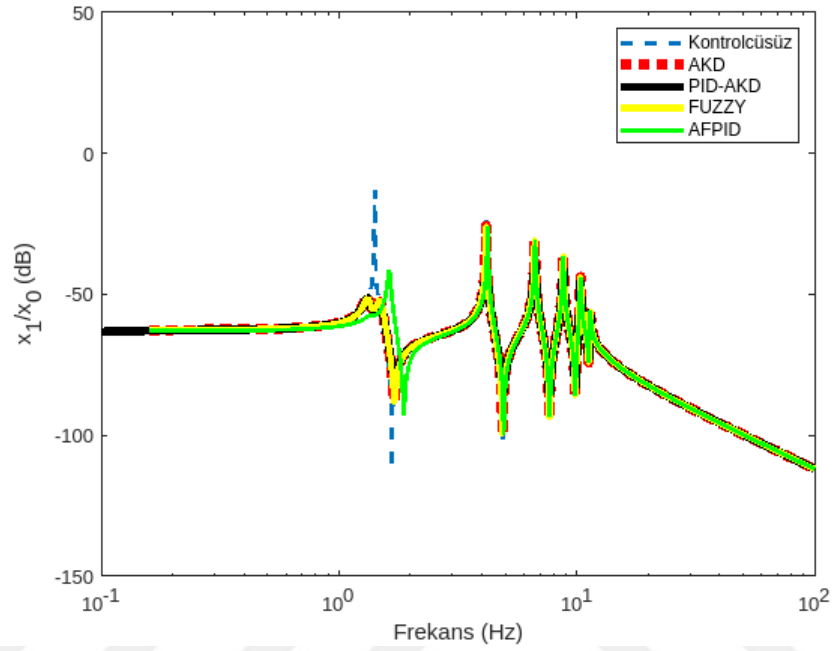
	Kontrolcüsüz	AKD	PID-AKD	FUZZY	AFPID
Kocaeli Depremi (1999)	1,01E-03	8,18E-05	6,00E-05	4,58E-05	2,29E-05
Kobe Depremi (1995)	4,36E-04	2,45E-04	6,97E-05	5,99E-04	5,15E-05
Northridge Depremi (1994)	4,76E-03	2,05E-04	1,67E-04	1,16E-04	6,79E-05

Laboratuvar bina modelinin Kocaeli depremi, Kobe depremi ve Northridge depremi etkisi altındaki kontrolcüsüz, AKD, PID-AKD, FUZZY ve AFPID uygulanmış durumlarda 6. katı için elde edilen ISE sonuçları incelendiğinde pasif kontrol yöntemi olarak kullanılan AKD’nin titreşimleri azaltmada etkili olduğu görülürken aktif kontrol yöntemi olarak tasarlanan PID kontrolcü, bulanık mantık kontrolcü ve adaptif bulanık PID kontrolcüsünün titreşimleri azaltmada daha etkili olduğu görülmektedir. Adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün titreşimleri sönümlemede diğer kontrolcülere göre daha üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca bulanık mantık denetleyicisinin performansın da PID kontrolcüsüne göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

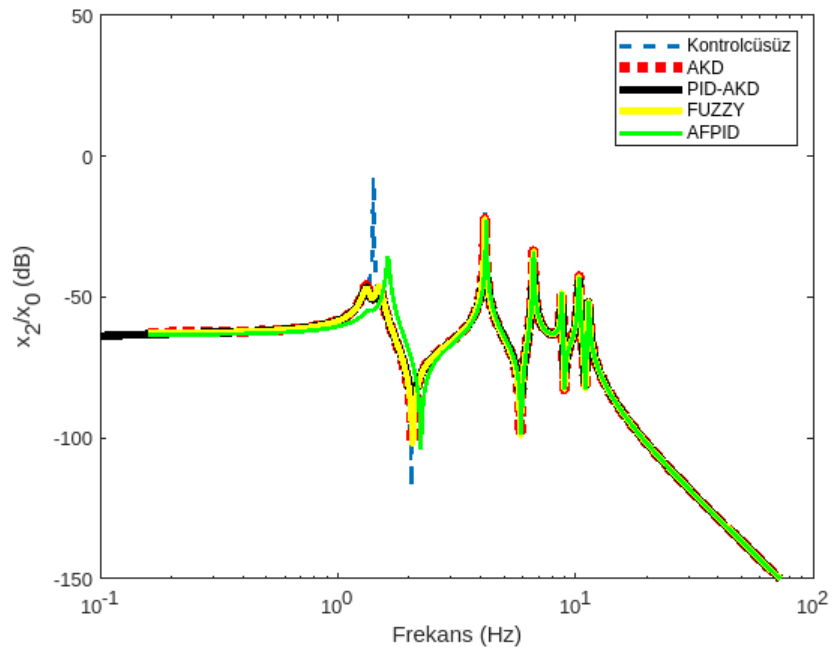
2.2.12 Laboratuvar Bina Modelinin Frekans Cevapları

2.2.12.1 Laboratuvar Bina Modelinin Yer Değiştirme Frekans Cevapları

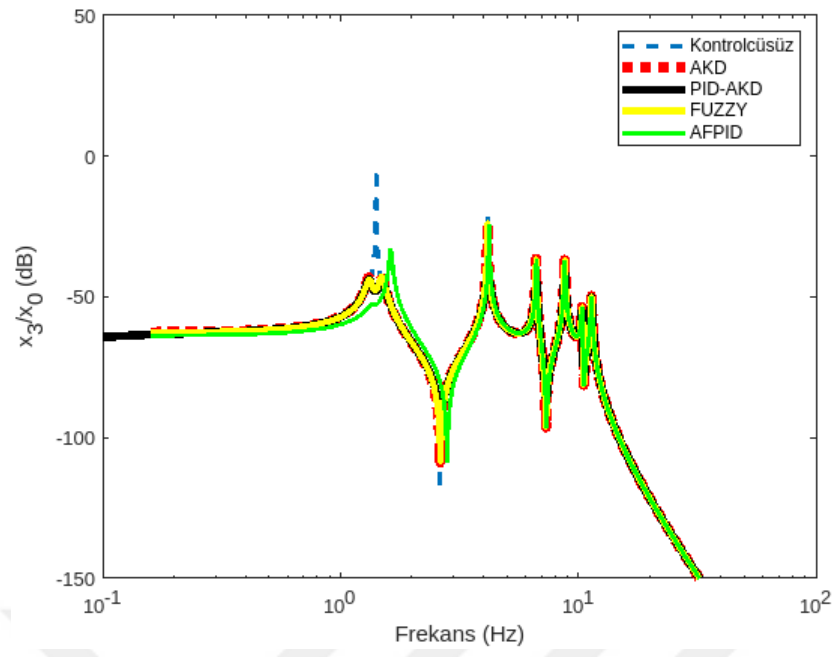
Şekil 2.54'te laboratuvar bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları görülmektedir.



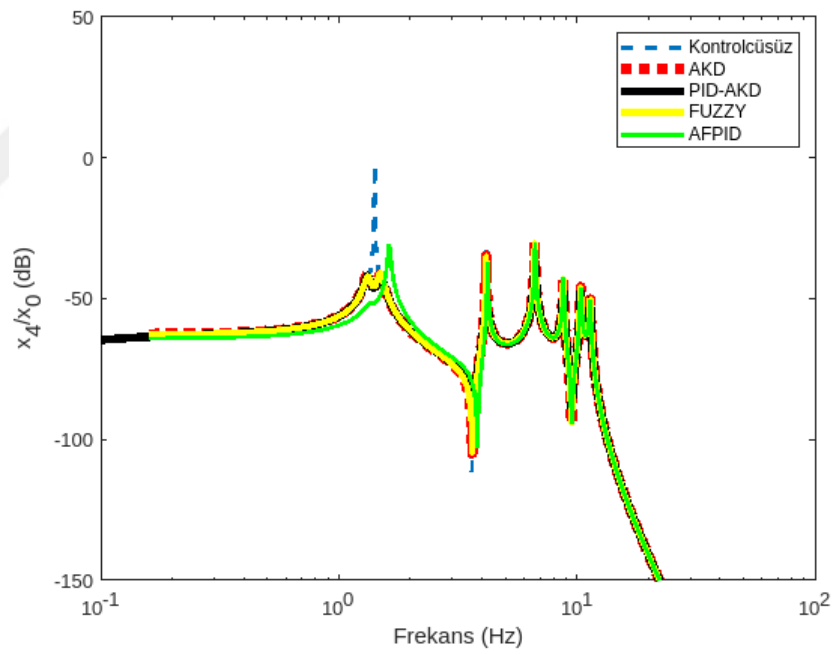
(a) 1. kat



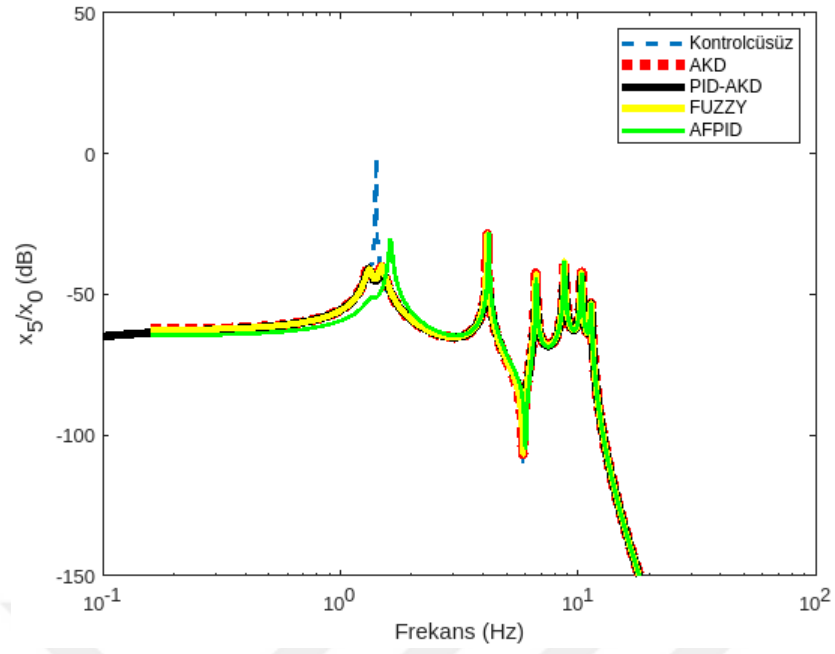
(b) 2. kat



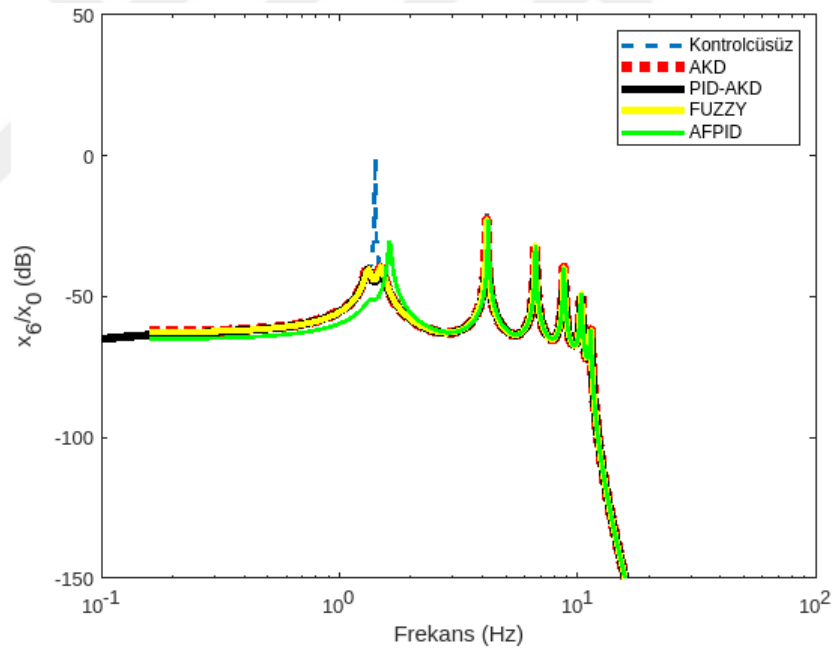
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat

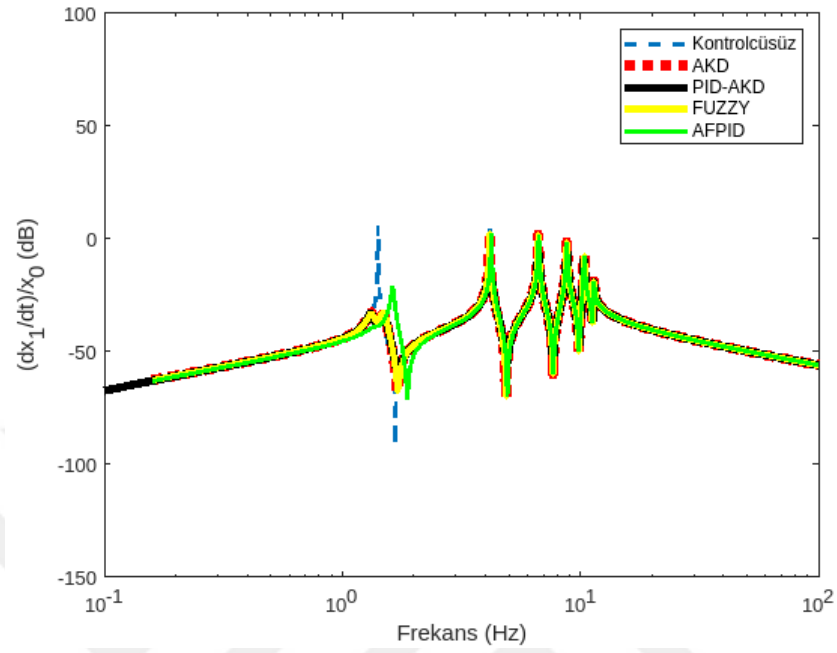


(f) 6. kat

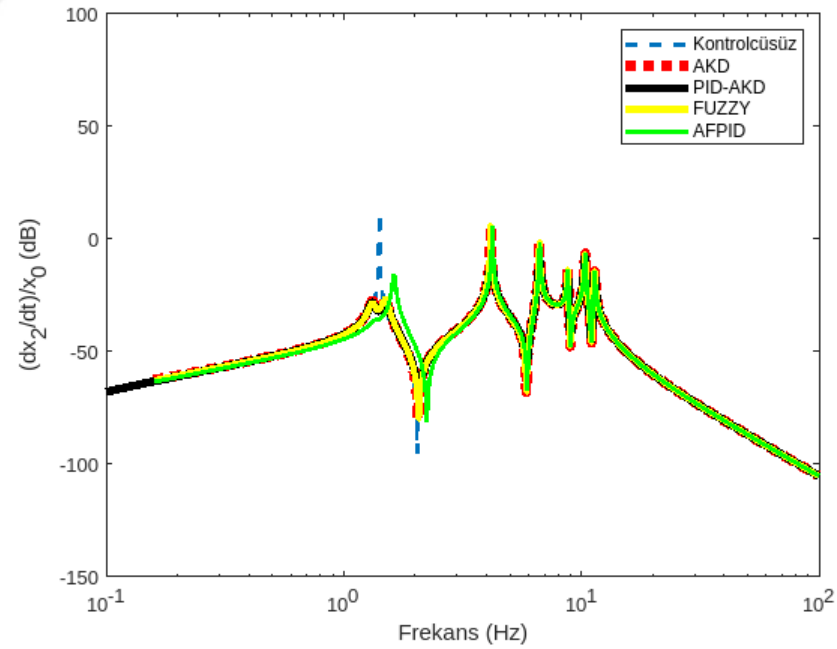
Şekil 2.54 Laboratuvar bina modelinin yer değiştirme frekans cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

2.2.12.2 Laboratuvar Bina Modelinin Hız Frekans Cevapları

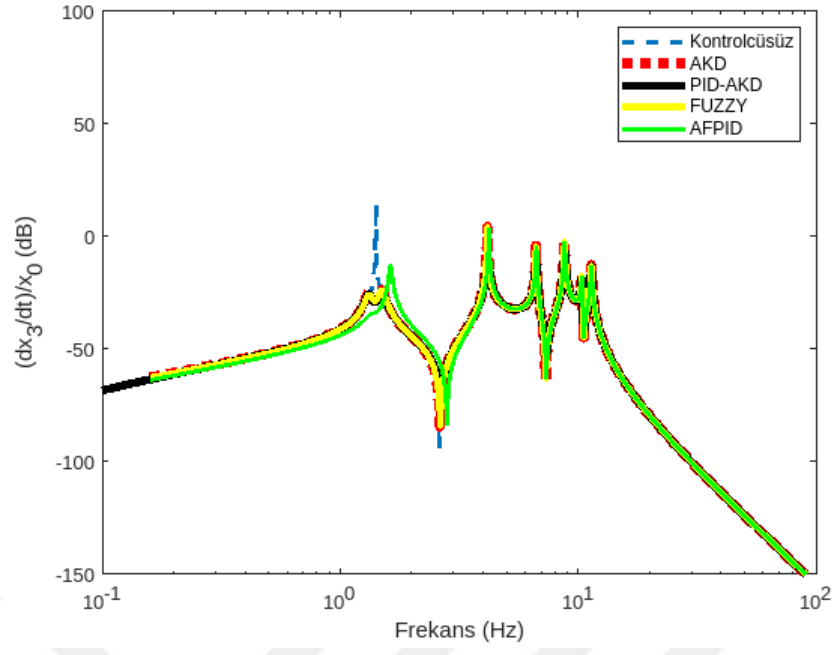
Şekil 2.55'te laboratuvar bina modelinin hız frekans cevapları görülmektedir.



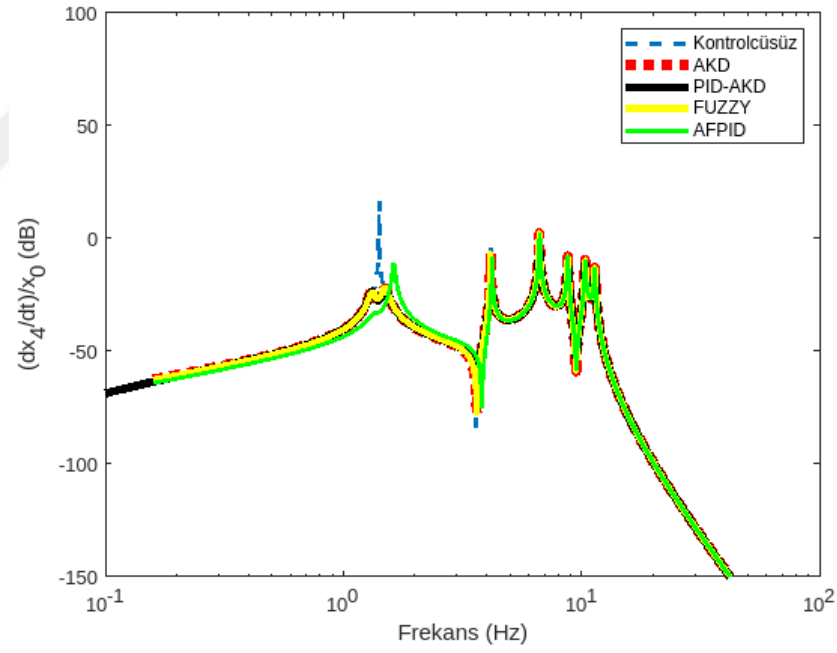
(a) 1. kat



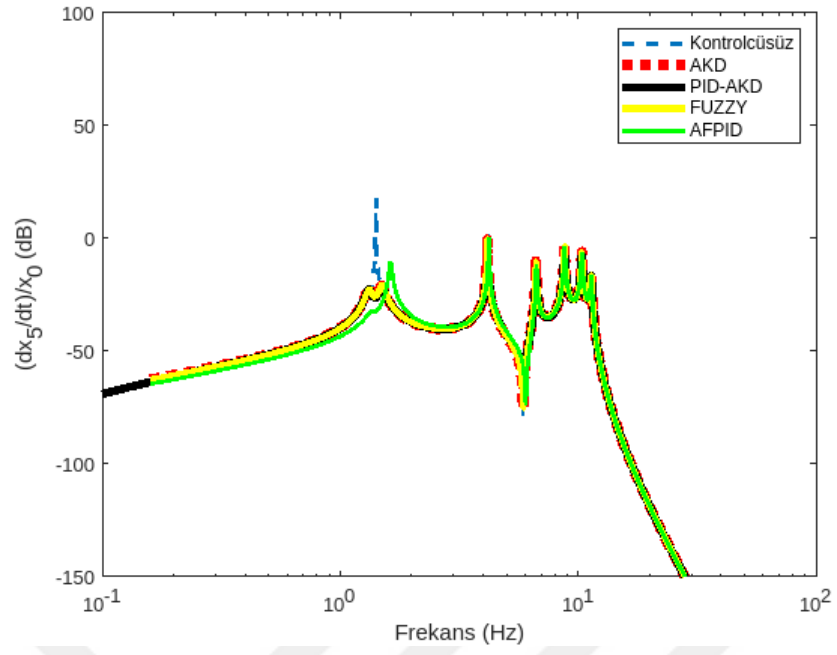
(b) 2. kat



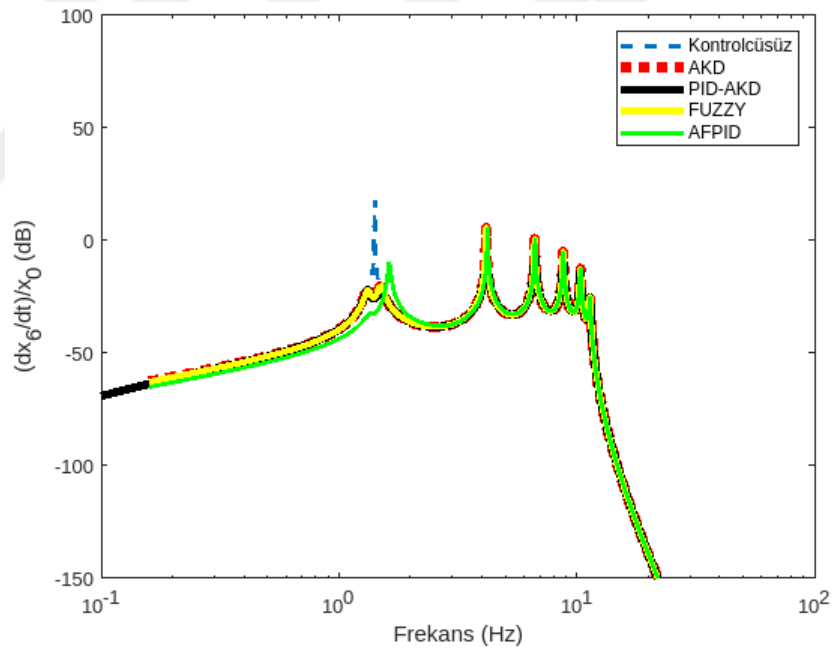
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat

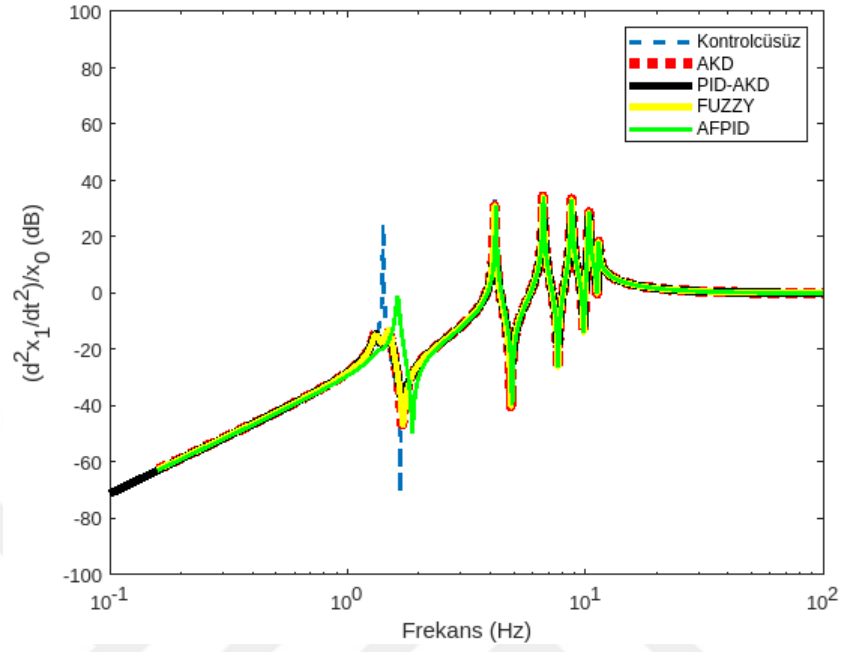


(f) 6. kat

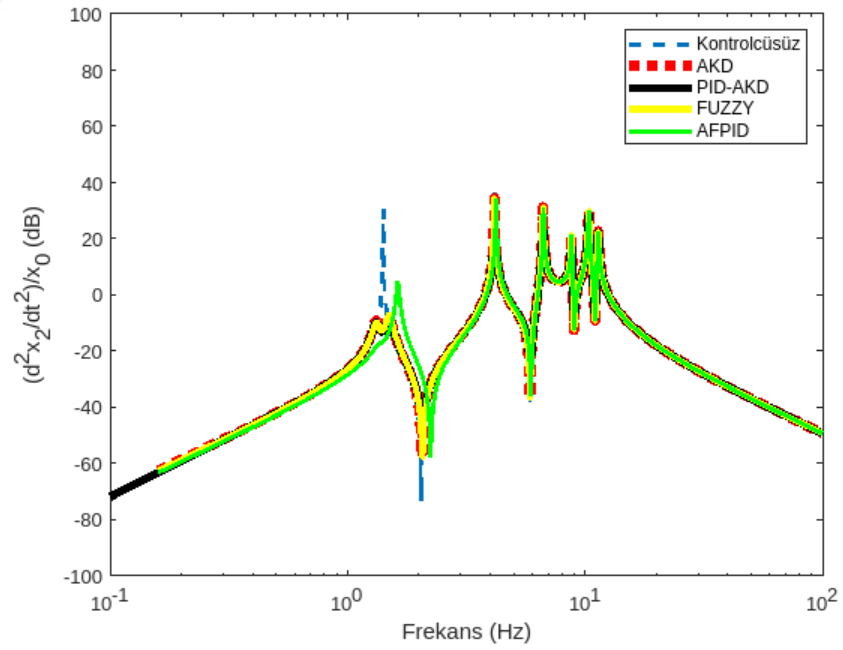
Şekil 2.55 Laboratuvar bina modelinin hız frekans cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

2.2.12.3 Laboratuvar Bina Modelinin İvme Frekans Cevapları

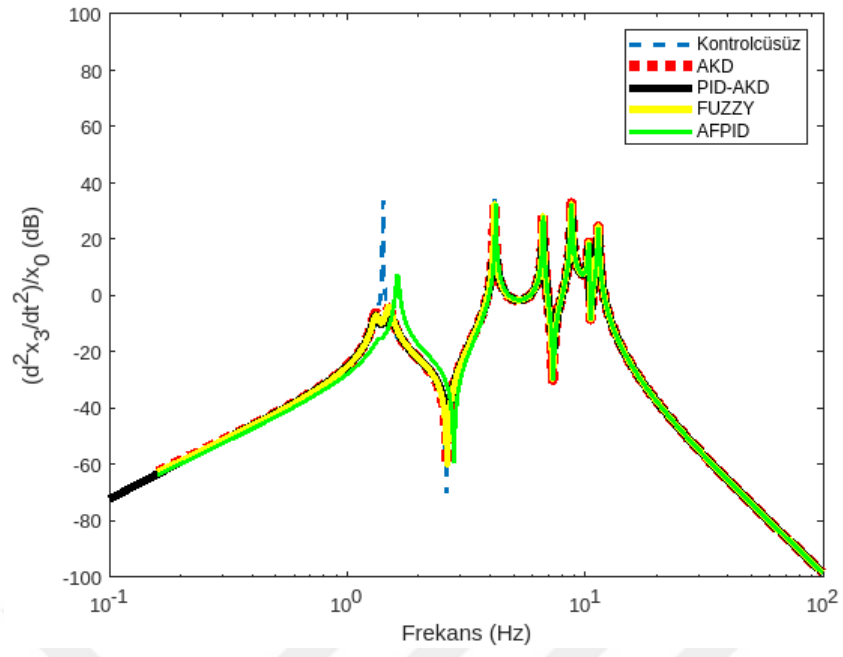
Şekil 2.56'da laboratuvar bina modelinin ivme frekans cevapları görülmektedir.



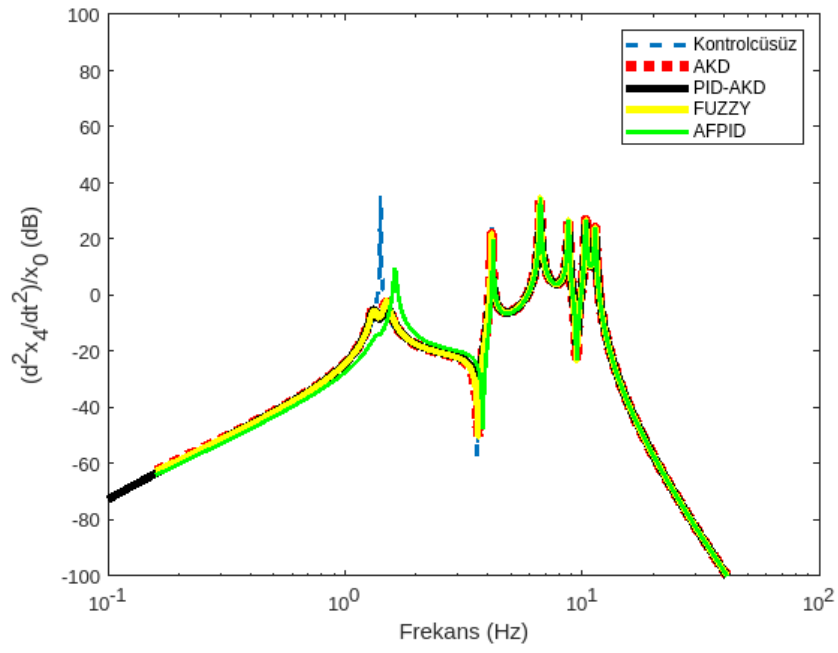
(a) 1. kat



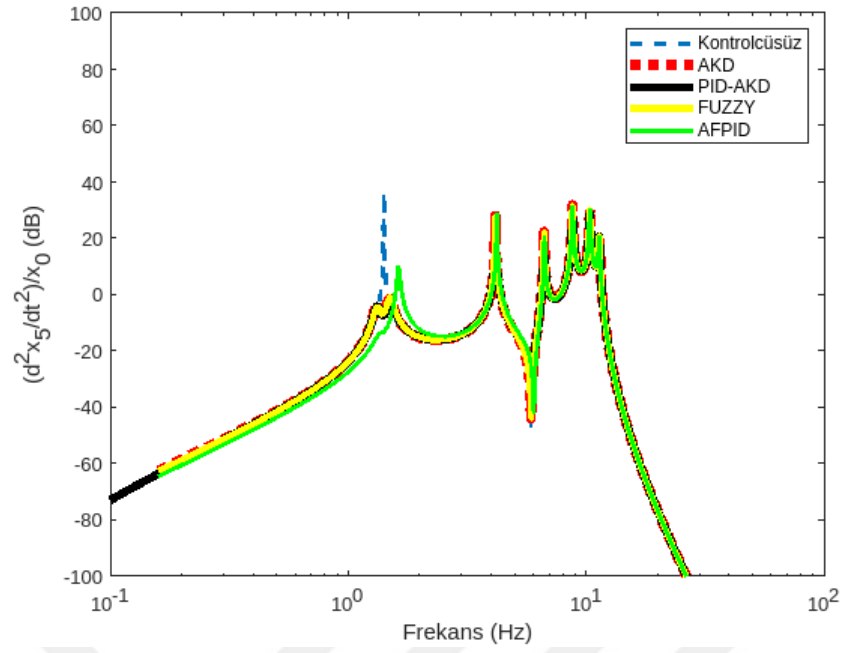
(b) 2. kat



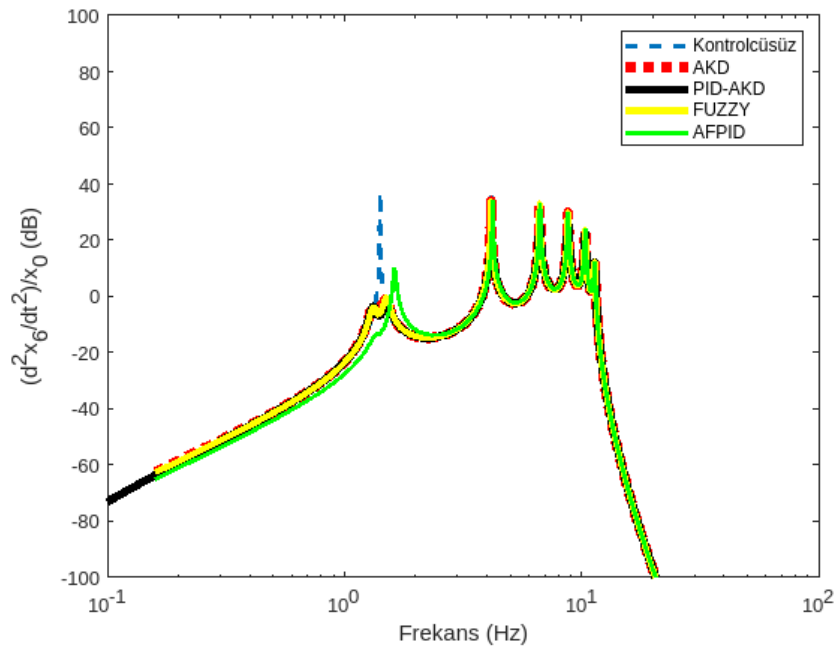
(c) 3. kat



(d) 4. kat



(e) 5. kat



(f) 6. kat

Şekil 2.56 Laboratuvar bina modelinin ivme frekans cevapları (a) 1. kat, (b) 2. kat, (c) 3. kat, (d) 4. kat, (e) 5. kat, (f) 6. kat

Adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün birinci doğal frekansı baskılamada performansının diğer kontrolcülere göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

3

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bina titreşimlerinin kontrolü alanında yapılan çalışmalarda maliyet analizleri ve yapıları etkileyen faktörlerin iyi tahmin edilmesi önemli yer tutmaktadır. Bu çalışma ile zemin kaynaklı bozucu girişler etkisindeki laboratuvar şartlarında inşa edilen bina modelinin titreşim analizleri MATLAB-Simulink programında yapılarak her kat için yer değiştirme-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri ile frekans cevapları grafikleri elde edilmiştir. Laboratuvar bina modeli olarak Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Laboratuvarında bulunan bina modeli kullanılmıştır.

Titreşim analizleri kullanılan bina modeli için herhangi bir kontrolcünün kullanılmadığı, sadece AKD kullanıldığı, AKD ile PID denetleyicisinin birlikte kullanıldığı, AKD ile FUZZY denetleyicisinin birlikte kullanıldığı ve AKD ile AFPID denetleyicisinin birlikte kullanıldığı beş farklı durum için yapılmıştır. Bu sayede dünya üzerinde meydana gelen şiddetli depremlerin etkisinde bina modellerinin titreşim cevapları incelenmiştir. Titreşim etkilerinin daha fazla olması beklenen binanın en üst katı için ISE (Integral Square Error) hataları beş durum için hesaplanmıştır. Ayrıca her kat için yer değiştirme RMS, maksimum yer değiştirme, ivme RMS ve maksimum ivme cevapları hesaplanmıştır.

Bu tezde ilk defa bina titreşimleri adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsü ile kontrol edilmiştir.

Bu çalışma sonucu elde edilen çıktılar şunlardır:

Binaların fiziksel modellerinin oluşturulmasında zorlayıcı kuvvetin deprem ivmesi ile her katın kütesinin çarpımından elde edilme şekli anlatılmıştır.

AKD ile AFPID denetleyicilerinin birlikte kullanıldığı bina modelinin titreşimi azaltmada diğer durumlara göre daha iyi performans sergilediği sonucuna ISE hataları, RMS değerleri ve titreşim analizi grafikleri incelenerek ulaşılmıştır.

Adaptif bulanık mantık PID kontrolcüsünün birinci doğal frekansı baskılamada performansının diğer kontrolcülere göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

AKD yapıların her katına uygulanabilir. Ancak yapıların yüksekliği arttıkça titreşimlerinin daha fazla olması beklenir. Bu yüzden genellikle en üst kata uygulanır. İdeal durumda ise titreşimin en çok olacağı kat belirlenerek o kata uygulanabilir.

Titreşim analizi sonuçlarının etkinliği kontrolcünün kullanılmadığı, sadece AKD kullanıldığı, AKD ile PID, FUZZY ve AFPID denetleyicinin kullanıldığı durumları karşılaştırılarak grafiklerde gösterilmiştir.

Yapılan teorik çalışmanın ardından deprem bölgelerinde bu yöntemlerin uygulanarak depremlerin etkilerinin azaltılması için kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonraki çalışmalarda aktif kontrol sistemi kullanılarak oluşturulan denetleyici kuvvetinin azaltılması, kontrol sistemlerinin binalarda uygulanabileceği en uygun yerlerin belirlenebilmesi, farklı denetleyiciler kullanarak titreşim cevaplarının incelenmesi, nümerik olarak titreşim analizinin bütünsel bina modelleri için uygulanması konuları araştırılabilir.

Bina titreşimlerinin kontrolünde doğru ve sağlıklı sonuçlar elde etmek bu alanda kazanılan tecrübe ve bilgi birikimi ile mümkündür. Bu çalışmanın, bina titreşimlerinin kontrolü ile uğraşan kişiler için bilgi birikimlerine önemli katkı sağlayacağı umulmaktadır.

- [1] N. Yağız, R. Güçlü, ve İ. Yüksek, “Aktif Kütle Sönümleyicili Çok Serbestlik Dereceli Bir Binanın Depreme Karşı LQR Kontrolü”, Mühendis ve Makine Dergisi, ss. 20-24, 2001.
- [2] R. Güçlü, "Fuzzy Logic Control of Vibrations of Analytical Multi-Degree-of-Freedom Structural System", Tr. Journal of Engineering & Environmental Sciences, vol. 27, pp. 157-167, 2001.
- [3] J.J. Connor, “Introduction to Structural Motion Control”, Prentice Hall Pearson Education, New York, 2003.
- [4] H. Yazıcı, “Çok Serbestlik Dereceli Bir Yapının Titreşimlerinin Bulanık Mantıkla Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [5] Ü. Aldemir, “Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı için Yeni Teknikler”, XV. Ulusal Mekanik Kongresi, ss. 9-18, 2007, Isparta.
- [6] H.Ö. Özer, “Bir Bina Modelinin Titreşimlerinin Deneyssel Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [7] R. Güçlü, ve H. Yazıcı, "Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers," JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION, vol. 318, pp. 36-49, 2008.
- [8] R. Güçlü, ve H. Yazıcı, “Seismic-Vibration Mitigation of a Non-Linear Structural System with an ATMD Through a Fuzzy PID Controller”, Nonlinear Dynamics, vol. 58, pp. 553-564, 2009.
- [9] Ş. Çetin, “MR Sönümleyici ile Yapıların Titreşim Kontrolü”, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [10] A. Sağırılı, C.O. Azeloğlu, R. Güçlü, ve H. Yazıcı, “Self-tuning Fuzzy Logic Control of Crane Structures Against Earthquake Induced Vibration”, Nonlinear Dynamics, vol. 64, pp. 375-384, 2011.
- [11] R. Güçlü, H. Yazıcı, M. Metin, G. Keskin, ve M. Bayraktar, “Yapısal Sistemlerin Farklı Bozucu Girişler Etkisi Altındaki Titreşimlerinin Analizi ve Aktif-Pasif Kontrolü”, Tübitak Projesi, YTÜ, İstanbul, 2012.
- [12] R.K. Pekgökgöz, ve G. Taş, “Ayarlı Kütle Sönümleyici Yerleştirilmiş Betonarme Yüksek Minarelerin Dinamik Analizi”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, cilt. 32 sayı. 1, ss. 265-282, 2017.
- [13] A.E. Kayabekir, G. Bekdaş, S.M. Nigdeli, ve Z.W. Geem, “Optimum Design of PID Controlled Active Tuned Mass Damper via Modified Harmony Search”, Applied Sciences, 10, 2020.
- [14] H. Aggümüş, "MR Sönümleyici Kullanarak H_∞ Yöntemi ile Yapıların Titreşim Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.

- [15] H. Aggümüş, "Simülasyon Çevriminde Donanım Yöntemiyle Yarı Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin Performans Analizi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2020.
- [16] K.M. Shum, "Tuned Vibration Absorbers with Nonlinear Viscous Damping for Damped Structures Under Random Load", Journal of Sound and Vibration, vol. 346, pp. 70-80, 2015.
- [17] L. Zuo, and S.A. Nayfeh, "Minimax Optimization of Multi Degree of Freedom Tuned Mass Dampers", Journal of Sound and Vibration, vol. 272, pp. 893-908, 2004.
- [18] S. Krenk, and J. Høgsberg, "Tuned Mass Absorbers on Damped Structures Under Random Load", Probabilistic Engineering Mechanics, vol. 23, pp. 408-415, 2008.
- [19] C. Ertal, "Bina Titreşimlerinin Teorik Analizi", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [20] A. Mubuli, "Bina Türü Yapılar İçin Pasif Sönümleyici Sistemlerin Optimizasyonu ve Analizi", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2021.
- [21] N. Yağız, "Yapıların ve Taşıtların Etkileşimli Titreşimlerinin Analizi", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [22] E. B. Özarslan, "Aktif Ayarlanan Eş Yerleştirilmemiş Titreşim Sönümleme Sisteminin İncelenmesi ve Simülasyon Ortamında Gerçeklenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2022.
- [23] B. Akbaş, ve J. Shen, "Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı ve Enerji Kavramı", İMO Teknik Dergi, ss. 2877-2901, 2003.
- [24] E. Toprak, "Yüksek Binalar İçin Optimal Dinamik Titreşim Sönümleyicisi Tasarımı Problemi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [25] A. Köken, ve A. Karabulut, "Takım Tezgahlarında Titreşim Sönümleyici Kullanılarak Zemine İletilen Kuvvetin Azaltılması", Journal of Polytechnic, cilt. 25 sayı. 1, ss. 399-404, 2022.
- [26] İ.H. Çağlayan, "Rezonans: Makinaların ve Yapıların Gizli Düşmanı", Mühendis ve Makina", cilt. 50, sayı. 598, ss. 55-60, Ankara.
- [27] Ö.K. Kınacı, "Girdap Kaynaklı Titreşimler", GMO-SHIPMAR, sayı. 206, ss. 51-65, 2016.
- [28] S.M. Nigdeli, ve G. Bekdaş, "Optimum Pasif Kütle Sönümleyicilerinin Belirsiz Özellikli Yapılardaki Etkileri", 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 2011, Ankara.
- [29] Ü. Aldemir, ve E. Aydın, "Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Yeni Yaklaşımlar", Türkiye Mühendislik Haberleri, sayı. 435, ss. 81-89, 2005, Isparta.

- [30] G. Bekdaş, ve S.M. Nigdeli, "Değişik Periyotlu Yapılar İçin Optimum Pasif Kütle Sönümleyici Özelliklerinin Belirlenmesi", 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 2011, Ankara.
- [31] E. Aydın, B. Öztürk, H.M. Gökdemir, ve H. Çetin, "Sarkaç Tipi Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Harmonik Etkiler Altındaki Davranışı: Deneysel Bir Çalışma", 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 2015, İzmir.
- [32] O. Okut, "Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Sismik Etkiler Altındaki Betonarme Yapılarda Performansının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [33] H. Çetin, E. Aydın, ve B. Öztürk, "Ayarlı Kütle Sönümleyicili ve Viskoz Sönümleyicili Yapılarda Karma Bir Pasif Kontrol Uygulaması", XX. Ulusal Mekanik Kongresi, ss. 797-806, 2017, Bursa.
- [34] V. Kahya, O. Araz, ve M. Turan, "Hareketli Yük Altında Köprü Titreşimlerinin Ayarlı Kütle Sönümleyiciler Kullanılarak Azaltılması", XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi, ss. 280-288, 2013, Manisa.
- [35] S. Naimi, ve M.H. Waheb, "Deprem Etkisindeki Yapıların Sismik Taban İzolasyonu ve Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemleri ile Karma Korunması", Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, cilt. 12 sayı. 1, ss. 499-516, 2019.
- [36] H. Yazıcı, "Eyleyici Gecikmesine Bağlı Doyumlu ve Dayanıklı H_∞ Denetleyiciyle Deprem Etkisi Altındaki Yapısal Sistemlerin Titreşimlerinin Kontrolü", Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [37] O. Çetinus, "Mekanik Sistemlerde Farklı Modellerle Aktif Titreşim Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2009.
- [38] M. Batı, ve K. Beyen, "8 Katlı Yapının Dinamik Yükler Altında Titreşim Kontrolü", Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, cilt. 3, sayı. 1 ss. 65-76, 2020.
- [39] S. Anlak, ve E. Düven, "Hidrolik Test Makinalarının Performansının Bulanık Mantık Temelli Bir Yaklaşımla İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2021.
- [40] Y.G. Ömür, ve M. Alcı, "Adaptif Bulanık Denetleyici ile Doğrusal Olmayan Sistem Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2009.
- [41] M. Metin, ve R. Güçlü, "Ölçekleme Çarpanları Kendiliğinden Ayarlanabilen PID Tipli Bulanık Kontrolör ile Bir Hafif Metro Aracına Ait Düşey Titreşimlerin Aktif Kontrolü", TOK 08 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, cilt. 1, sayı. 1, ss. 551-556, İstanbul, 2008.
- [42] H. Açıkgöz, Ö.F. Keçecioğlu, M. Güneş, ve M. Şekkeli, "Öz Ayarlamalı Bulanık-PID Denetleyici ile Hidrolik Türbinin Benzetim Çalışması", Academic Platform-Journal of Engineering and Science, cilt. 3, sayı. 1, ss. 7-15, 2015.

- [43] A. Okatan, C. Balkaya, ve M. Arslan, “Çok Katlı Binaların Depremde Davranışlarının Sistem Mühendisliği Açısından İncelenmesi”, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, ss. 799-808, 2017.
- [44] H. Çetin, E. Aydın, ve B. Öztürk, “Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Üç Katlı Yapı Modelinin Sismik ve Harmonik Davranışına Etkileri”, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 2013, Hatay.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. B. Kılınç, ve M. Metin, “Bina Titreşimlerinin Adaptif Bulanık Mantık Denetleyicisi ile Kontrolü”, 2. Uluslararası Malzeme Mühendisliği ve İleri İmalat Teknolojileri Kongresi, ss. 39-46, 2023, İstanbul.

