

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK SERBESTLİK DERECELİ BİR YAPININ
TİTREŞİMLERİNİN BULANIK MANTIKLA KONTROLÜ**

Makine Müh. Hakan YAZICI

FBE Makine Teorisi Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Savunma Tarihi	: 01.06.2006
Tez Danışmanı	: Doç Dr. Rahmi GÜÇLÜ
Jüri Üyeleri	: Prof. Dr. İsmail YÜKSEK
	: Prof. Dr. Turgut KOCATÜRK

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. DEPREM	5
2.1 Deprem Nedir?	5
2.2 Yerkürenin İç Yapısı ve Depremlerin Oluş Nedenleri	5
2.3 Deprem Hareketi	9
2.4 Deprem Türleri	11
2.5 Deprem Parametreleri	11
2.5.1 Odak Noktası	11
2.5.2 Dış Merkez	12
2.5.3 Odak Derinliği	12
2.5.4 Eşşiddet Eğrileri	13
2.5.5 Şiddet	13
2.5.6 Büyüklük	14
2.6 Depremlerin Sınıflandırılması	15
2.7 Öncü ve Artçı Depremler	16
2.8 Türkiye’de Depremler	16
3. AKTİF VE PASİF YAPI KONTROLÜ	19
3.1 Pasif Kontrol Sistemleri	21
3.1.1 Pasif Enerji Sönümleyiciler	22
3.1.1.1 Eğilmeli Metal Sönümleyiciler	22
3.1.1.2 Sürtünmeli Sönümleyiciler	22
3.1.1.3 Viskoelastik Sönümleyiciler	23
3.1.1.4 Viskoz Sönümleyiciler	24
3.1.1.5 Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD)	24
3.1.1.6 Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (TLD)	25
3.1.2 Sismik İzolasyon Sistemleri	26
3.1.2.1 Düşük Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk Mesnetler (LDRB)	26

3.1.2.2	Yüksek Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk Mesnetler (HDNR).....	27
3.1.2.3	Kurşun Çekirdekli Doğal Kauçuk Mesnetler (LBR).....	29
3.1.2.4	Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (FPS)	30
3.1.2.5	Esnek Sürtünmeli Taban İzolasyonu (R-FBI)	33
3.1.2.6	Electricite-de France Sistemi (EDF)	35
3.1.2.7	EERC Bileşik Sistemi.....	36
3.1.2.8	Yay Tipi Sistemler.....	37
3.2	Aktif Kontrol Sistemleri	38
3.2.1	Aktif Giriş Kontrolü	40
3.2.2	Aktif Kütle Sönümleyicisi ve Aktif Kütle Sürücüsü	41
3.2.3	Yerçekimini Harekete Geçirici Sistem	41
3.2.4	Aktif Rijitlik Değiştirici (AVS).....	42
3.2.5	Aktif Kablo Kontrolü.....	44
3.2.6	Aktif Kontrolde Kullanılan Malzemeler.....	47
3.2.6.1	Piezoelektrik Seramikler	47
3.2.6.2	Elektroreolojik Sıvılar	48
3.2.6.3	Şekil Hafızalı Alaşımlar	50
3.2.7	Aktif Kontrolün Dezavantajları	50
3.2.7.1	Modelleme Hataları	50
3.2.7.2	Zamanın Gecikmesi.....	51
3.2.7.3	Yapının Lineer Olmaması	52
3.2.7.4	Yapının Parametrelerindeki Belirsizlikler	52
3.2.7.5	Algılayıcı ve Kontrol Elemanı Sayısının Sınırlı Olması	52
3.3	Karma ve Yarı Aktif Kontrol Sistemleri	52
3.3.1	Karma Kontrol Sistemleri.....	53
3.3.1.1	Karma Kütle Sönümleyiciler (HMD).....	53
3.3.1.2	Karma Sismik İzolasyon (HSI).....	54
3.3.2	Yarı Aktif Kontrol Sistemleri	54
4.	KONTROL SİSTEMLERİ	56
4.1	PID Kontrol	56
4.1.1	Orantı Kontrol (P-Kontrol).....	57
4.1.2	İntegral Kontrol (I-Kontrol).....	58
4.1.3	Türev Kontrol (D-Kontrol).....	59
4.1.4	Orantı +İntegral Kontrol (PI-Kontrol)	60
4.1.5	Orantı+Türev Kontrolü (PD-Kontrol)	61
4.1.6	Orantı+İntegral+Türev Kontrolü (PID Kontrol).....	62
4.1.6.1	PID Kontrolün Temel Özellikleri	63
4.2	Bulanık Mantık Kontrolcü (BMK).....	64
4.2.1	Bulanık Mantığın Avantajları	67
4.2.1.1	Bulanık Mantığın Sakıncaları	67
4.2.2	Bulanık Mantığın Günümüzdeki Uygulama Alanları.....	68
4.2.3	Bulanık Kümeler.....	69
4.2.3.1	Üyelik Fonksiyonu	70
4.2.3.2	Üyelik Fonksiyonunun Kısımları	71
4.2.4	Bulanık Küme İşlemleri.....	73
4.2.5	Bulanık Sayılar	75
4.2.6	Bulanık Mantık Kontrolcülerin Genel Yapısı.....	75
4.2.7	Bulanık Kontrol Basamakları	77
4.2.7.1	Bulanıklaştırma Ünitesi	77

4.2.7.2	Üyelik Fonksiyonlarının Oluşturulması	78
4.2.7.3	Bilgi Tabanı	80
4.2.7.4	Veri Tabanı	80
4.2.7.5	Kural Tabanı	81
4.2.7.6	Çıkarım Ünitesi.....	83
4.2.7.7	Durulama Ünitesi.....	85
5.	YAPISAL SİSTEM VE SİMÜLASYON.....	90
5.1	15 Serbestlik Dereceli Binanın Dinamik Modeli	90
5.2	PID ve Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı	95
5.2.1	PID Kontrolcü Tasarımı	95
5.2.2	Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı.....	96
5.3	Binanın Adım Girişine Göre Simülasyonu.....	98
5.4	Binanın Gerçek Deprem Girişine Göre Simülasyonu	104
6.	SONUÇLAR.....	111
	KAYNAKLAR.....	113
	EKLER	116
	Ek 1 Kütle (M), Sönüm (C) ve Rijitlik (K) Matrisleri.....	117
	Ek 2 Bina Parametreleri, , PID Kontrolcü Parametreleri, Bulanık Mantıklı Kontrolcü Giriş- Çıkış Ölçekleme Faktörleri, Lineer Motor Parametreleri, Katların Tabii Frekansları, Simülasyon Şekli.	120
	Ek 3 Bulanık Mantıklı Kontrolcünün Fuzzy Toolbox Tasarım Aşamaları	123
	ÖZGEÇMİŞ.....	127

SİMGE LİSTESİ

A_i	: Öncül dilsel terimler
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
B	: Big
B_i	: Sonuç dilsel terimler
Cd	: Kadmiyum
c_i	: Katlara ait sönüm katsayısı ($c_1, c_2, \dots, c_{15}$)
Cu	: Bakır
de	: Hatanın türevi
e	: Hata
E	: Deprem hareketi ile yapıya giren toplam enerji
E_D	: Toplam Sönüm enerjisi
E_d	: İlave sönüm araçlarıyla yutulan enerji
E_h	: Elastik olmayan araçlarla yutulan enerji
E_k	: Toplam kinetik enerji
E_P	: Toplam potansiyel enerji
E_s	: Elastik yerdeğiştirme enerjisi
f_i	: Katların tabii frekansları ($f_1, f_2, \dots, f_{15}$)
F_u	: Kontrol kuvveti
F_d	: Yapıya uygulanan bozucu kuvvet
g	: Yerçekimi ivmesi
i	: Kontrol voltaj girişi
K_e	: Voltaj sabiti
K_f	: Bobin sargısının itme sabiti
k_i	: Katlara ait yay katsayısı ($k_1, k_2, \dots, k_{15}$)
K_D	: Türev katsayısı
K_I	: İntegral katsayısı
K_P	: Orantı katsayısı
m	: Hacim dalgalarından hesaplanan magnitüt
M	: Yüzey dalgalarından hesaplanan magnitüd
M	: Medium
M_w	: Deprem moment büyüklüğü
m_i	: Katlara ait kütleler ($m_1, m_2, \dots, m_{15}$)
$\mu(.)$	: Bulanık üyelik fonksiyonu
N	: Negative
Ni	: Nikel
Q_i	: Genelleştirilmiş kuvvetler
q_i	: Genelleştirilmiş koordinatlar
P	: Positive
R	: Gerçel sayılar
R	: Bobin sargısının direnç değeri
$r(t)$	: Referans giriş büyüklüğü
S	: Small
Se	: Hata işaretine ait giriş ölçekleme faktörü
Sd	: Hatanın türevine ait giriş ölçekleme faktörü
Su	: Çıkış ölçekleme faktörü
T	: Titreşim periyodu
T_d	: Türev zaman sabiti
T_i	: İntegral zaman sabiti

t_f	: Simülasyon bitiş zamanı
t_i	: Simülasyon başlama zamanı
T_s	: Zaman sabiti
u	: Kontrol voltaj girişi
W	: Watt
x_0	: Deprem etkisiyle zeminin yerdeğiştirmesi
x_i	: Katlara ait yerdeğiştirmeler ($x_1, x_2 \dots x_{15}$)
X_{r2}	: Referans girişi
X	: Giriş öncül değişken
X	: Evrensel küme
Y	: Çıkış öncül değişken
$y(t)$	: Geribeslenen çıktı büyüklüğü
Z	: Zero
Z_n	: Çinko

KISALTMA LİSTESİ

AVS	Active Variable Stiffness Systems
BMK	Bulanıklı Mantık Kontrolcü
COA	Center of Largest Area
D	Derivative (Türev)
EERC	Earthquake Engineering Research Center
EDF	Electricite-de-France
EPROM	Erasable Programmable Read Only Memory
ER	Elektroreolojik
FPS	Friction Pendulum System
HDNR	High Damping Natural Rubber
HMD	Hybrid Mass Damper
HSI	Hybrid Seismic Isolation
I	Integral
Inf	Infimum
I/O	Input / Output
LDRB	Low Damping Rubber Bearings
LQG	Linear Quadratic Gaussian
MM	Mercalli Cetveli
MDOF	Multi Degree of Freedom System
MOM	Mean-Max Membership
MRPA	Malaysian Rubber Producers Research Association.
MSK	Medvedev-Sponheur-Karnik
P	Proportional (Orantı)
PD	Proportional-Derivative (Orantı-Türev)
PI	Proportional-Integral (Orantı-İntegral)
PID	Proportional-Integral-Derivative (Orantı-İntegral-Türev)
PLC	Programmable Logic Controller
RAM	Random Acces Memory
R-FBI	Resilient-Friction Base Isolation
sup	Supremum
TLD	Tuned Liquid Damper
TMD	Tuned Mass Damper

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Yer kabuğu hareketinin şematik anlatımı	6
Şekil 2.2 Litosferdeki levhalar	7
Şekil 2.3 P dalga hareketi	9
Şekil 2.4 S dalga hareketi	9
Şekil 2.5 Gölge bölgelerin gösterilmesi	10
Şekil 2.6 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi P dalgaları tahmini erişim süreleri	10
Şekil 2.7 Odak noktası, dış merkez ve sismik deprem dalgalarının yayılışı	12
Şekil 2.8 Türkiye'nin etkisi altında olduğu levhalar	17
Şekil 2.9 Türkiye deprem bölgeleri haritası	18
Şekil 3.1 Eğilmeli metal sönümleyiciler ve kuvvet-deformasyon diyagramı	22
Şekil 3.2 Pall tarafından önerilen sürtünmeli sönümleyiciler	23
Şekil 3.3 Viskoelastik sönümleyiciler	23
Şekil 3.4 Viskoz sönümleyici	24
Şekil 3.5 Ayarlı kütle sönümleyici tipleri	25
Şekil 3.6 Ayarlı sıvı sönümleyicileri	25
Şekil 3.7 Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnetler (LDRB) a) Kesit özellikleri b) Şematik modeli c) Lineer kuvvet –yerdeğiştirme davranışı	27
Şekil 3.8 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet (HDNR) a)Yüksek sönümlü kauçuk mesnetin elemanları b) Şematik model c) Nonlineer kuvvet-yerdeğiştirme davranışı	28
Şekil 3.9 Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet	29
Şekil 3.10 Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet	30
Şekil 3.11 Sürtünmeli Pandül Sistemi	31
Şekil 3.12 Sürtünmeli sarkaç sistemlerin hareket mekanizmaları	31
Şekil 3.13 Sürtünmeli sarkaç sistemlerin başlangıç ve yerdeğiştirme konumları	32
Şekil 3.14 Esnek sürtünmeli sistemler	35
Şekil 3.15 Elastomerli EDF sistemi	36
Şekil 3.16 Yay sistemi serbestlik dereceleri	37
Şekil 3.17 Viskosönüm detayı ve viskosönümlü yay sistemi	38
Şekil 3.18 Aktif kontrol sistemlerinin çalışma şeması	39
Şekil 3.19 Aktif giriş kontrolü	40
Şekil 3.20 Aktif kütle sönümleyicisi	41
Şekil 3.21 Kütlelerin ivmelendirilmesiyle oluşan kuvvet çiftleri	42
Şekil 3.22 Rijitlik değiştirici aletlerin çalışma prensibi	44
Şekil 3.23 AVS sisteminin şematik gösterimi	44
Şekil 3.24 Kablolarda uygulanan aktif kontrol sistemi	45
Şekil 3.25 Hareketli ve sabit mesnetten oluşan kablo sistemi	46
Şekil 3.26 Üç katlı araştırma amaçlı aktif kablo kontrolü uygulanan yapı	47
Şekil 3.27 Reometre	49
Şekil 3.28 ER sıvısının elektrik alanıyla değişen basınç dayanımını ölçen akma deney aracı	49
Şekil 3.29 Karma Kütle Sönümleyici	54
Şekil 3.30 Yarı-aktif sismik kontrol sistemi	55
Şekil 4.1 Orantı tipi kontrolcü	57
Şekil 4.2 İntegral tipi kontrolcü yapısı	58
Şekil 4.3 Türev tipi kontrolcü yapısı	60
Şekil 4.4 Orantı+İntegral (PI) kontrol	60
Şekil 4.5 Orantı + türev (PD) kontrol	61
Şekil 4.7 Kontrol sistemlerinin karşılaştırılması	64
Şekil 4.8 Çeşitli üyelik fonksiyonları a)Monotonik, b)Üçgen, c)Yamuk, d)Çan eğrisi	70

Şekil 4.9 Üyelik fonksiyonu kısımları.....	71
Şekil 4.10 Bulanık kümeler a)normal olmayan b)normal	72
Şekil 4.11 Bulanık kümeler a)dış bükey b)dış bükey olmayan (karma)	72
Şekil 4.12 Beş ile sekiz arasında bulanık bir değer	73
Şekil 4.13 Dört civarında bulanık bir değer	74
Şekil 4.14 A ve B bulanık kümelerinin kesişimi	74
Şekil 4.15 A ve B bulanık kümelerinin birleşimi	74
Şekil 4.16 Bulanık bir kümenin tersi	75
Şekil 4.17 Bulanık mantık kontrolcüsünün blok diyagramı	76
Şekil 4.18 Hava sıcaklığı üyelik fonksiyonları.....	77
Şekil 4.19 Üyelik fonksiyonu daraltılması	78
Şekil 4.20 Üyelik fonksiyonu genişletilmesi	79
Şekil 4.21 Üyelik fonksiyonu yoğunlaştırılması	79
Şekil 4.22 Minimum ilişki yöntemiyle kuralların belirlenmesi.....	85
Şekil 4.23 Üyelik fonksiyonlarının maksimum noktaları ile durulama işlemi.....	86
Şekil 4.24 Merkez yöntemi ile durulama işlemi.....	86
Şekil 4.25 Ağırlıklı ortalama yöntemi ile durulama işlemi	87
Şekil 4.26 Maksimum noktaların ortalaması yöntemiyle durulama işlemi	87
Şekil 4.27 Geniş alan merkezi metodu ile durulama işlemi	88
Şekil 4.28 İlk ve son yükselti metodu ile durulama işlemi.....	89
Şekil 5.1 Onbeş serbestlik dereceli bina modeli.....	91
Şekil 5.2 PID kontrolcü blok diyagramı	96
Şekil 5.3 Bulanık mantık kontrolcü blok diyagramı.....	97
Şekil 5.4 Binaya uygulanan adım girişi	98
Şekil 5.5 İkinci katın yerdeğiştirmeleri	99
Şekil 5.6 İkinci katın ivmeleri	100
Şekil 5.7 Onbeşinci katın yerdeğiştirmeleri	100
Şekil 5.8 Onbeşinci katın ivmeleri	101
Şekil 5.9 PID ve BMK için kontrol voltajındaki değişim	101
Şekil 5.10 İkinci katın yerdeğiştirmelerinin frekans cevapları.....	102
Şekil 5.11 İkinci katın ivmelerinin frekans cevapları.....	102
Şekil 5.12 Onbeşinci katın yerdeğiştirmelerinin frekans cevapları.....	103
Şekil 5.13 Onbeşinci katın ivmelerinin frekans cevapları.....	103
Şekil 5.14 17 Ağustos Kocaeli depremi yer hareketi	104
Şekil 5.15 İkinci katın yerdeğiştirmeleri	105
Şekil 5.16 İkinci katın ivmeleri	106
Şekil 5.17 Onbeşinci katın yerdeğiştirmeleri	106
Şekil 5.18 Onbeşinci katın ivmeleri	107
Şekil 5.19 PID ve BMK için kontrol voltajındaki değişim	107
Şekil 5.20 İkinci katın yerdeğiştirmelerinin frekans cevapları.....	108
Şekil 5.21 İkinci katın ivmelerinin frekans cevapları.....	108
Şekil 5.22 Onbeşinci katın yerdeğiştirmelerinin frekans cevapları.....	109
Şekil 5.23 Onbeşinci katın ivmelerinin frekans cevapları.....	109

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Deprem şiddet cetveli	14
Çizelge 2.2 Şiddet ve büyüklük değerleri arasındaki dönüşümler	15
Çizelge 2.3 Depremlerin büyüklüklerine göre sınıflandırılması	15
Çizelge 2.4 Depremlerin derinliklerine göre sınıflandırılması	16
Çizelge 2.5 Depremlerin uzaklıklarına göre sınıflandırılması	16
Çizelge 4.1 BMK uygulamaları	69
Çizelge 5.1 BMK için kural tabanı	98

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, deprem tehdidindeki çok serbestlik dereceli bir yapının titreşimlerinin Bulanık Mantıkla aktif kontrolü gerçekleştirilmiştir. Üç farklı disiplin; deprem, aktif-pasif yapı kontrolü ve bulanık mantık kavramları bir araya getirilmiştir. Yapay zekanın konularından biri olan bulanık mantık ve bulanık mantık kontrolcülere olan ilgimi, deprem ve bina titreşimlerinin aktif kontrolü gibi son derece önemli ve gelecek vadeden bir konuyla birleştirmemi sağlayan, çalışma disiplininden ve bilgi birikiminden çok etkilendiğim, beni değerli bilgilerinden yararlandıran Sayın Doç.Dr. Rahmi GÜÇLÜ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca aldığım Taşıt Titreşimlerinin Aktif Kontrolü ve Sistem Dinamiği ve Kontrol dersleriyle, Kontrol ve Matlab alanında bilgi sahibi olmamı sağlayan Sayın Prof.Dr. İsmail YÜKSEK'e teşekkürlerimi sunarım. Yine çalışmam süresince yardımlarını ve ilgilerini esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. İbrahim Beklan KÜÇÜKDEMİRAL, Araş.Gör. Ali Volkan AKKAYA ve Makine Mühendisi Murat TIKNAZ'a sonsuz teşekkürler. Ve bütün hayatım boyunca bana destek olan bugünlere gelmemde büyük katkıları olan Anne ve Babama sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

ÖZET

17 Ağustos 1999 tarihinde Kocaeli’de meydana gelen depremin binalarda sebep olduğu hasar, binalarda depreme karşı titreşim kontrolünü bir kez daha gündeme getirmiştir. Yapılardaki titreşimler; yerdeğiştirmelere, gerilmelere ve pek çok önemli hasara neden olabilir. Yakın geçmişte yapısal titreşim kontrolü üzerine bir takım çalışmalar yapılmış ve pratik uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Sismik koruma sistemleri genel olarak Aktif Koruma Sistemleri ve Pasif Koruma Sistemleri olmak üzere iki kısımdan ibarettir.

Bu çalışmada, depreme karşı çok serbestlik dereceli bir yapının aktif kontrolü için, Bulanık Mantık Kontrolcü ve PID Kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Yıllar boyu PID kontrolcüler basit yapıları ve dizayn kolaylığı ile endüstride en çok kullanılan kontrolcü yapıları olmuştur. Ancak, klasik PID kontrolcüler doğrusal olmayan sistemler için fazla uygun değildir. Bulanık yapıli kontrolörler bu eksikliği gidermeye adaydır. Bulanık mantık 1965 yılında Zadeh tarafından tanımlandıktan sonra pek çok alanda uygulamaları gerçekleşmiştir. Kontrol uygulamalarında, özellikle matematiksel olarak tanımlanması zor olan sistemleri dilsel terimlerle kolayca tanımlama imkanı sunduğundan dolayı kendine önemli bir yer bulmuştur. Bulanık mantık yaklaşımının avantajı, sağlamlığı ve doğrusal olmayan sistemlerdeki başarımıdır. Bu çalışmada simüle edilen sistem 15 serbestlik derecesine sahiptir. Yapısal sistem, 17 Ağustos 1999 yılında meydana gelen ve 20.000’den fazla insanın ölümüne neden olan yıkıcı Kocaeli depreminin ($M_w=7.4$) yer hareketine karşı simüle edilmiştir. Çalışmada aktif izolatör olarak bir lineer motor kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, kat yerdeğiştirmelerinin ve ivmelerinin zaman cevapları ile katların frekans cevapları, hem kontrolcülü hem de kontrolcüsüz olarak sunulmuş ve sonuçlar tartışılmıştır. Tasarlanan bulanık mantık kontrolcü, PID kontrolcüye göre daha iyi aktif kontrol performansı göstermiştir. Rezonans değerlerindeki gelişme ve titreşim genliklerindeki azalma bu sonucu desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Deprem kaynaklı titreşim, çok serbestlik dereceli yapı, sismik izolasyon, PID kontrol, bulanık mantık kontrol.

ABSTRACT

The damage on buildings caused by the earthquake on August 17th, 1999 at Kocaeli has made vibration control of buildings against earthquakes popular again. Vibration in structures can induce added displacement, stress and many results in significant damage. A number of studies on structural vibration control have recently been done and practical applications have been realized. Seismic protective systems, in general, consist of two categories, namely Passive Control Systems and Active Control Systems.

In this study, a fuzzy logic based controller and PID controller are designed for an active control device considering a multi-degree-of-freedom structure against earthquakes. PID controllers are most widely used in industry for years, due to their simple structure and easy of design. However classic PID controllers are not well suited to nonlinear systems. Fuzzy type controllers are candidates to be used in this area. After fuzzy logic was defined by Zadeh in 1965, it has been applied for many areas. It finds an important place in control applications since it gives the opportunity of describing the systems especially, which are difficult to describe mathematically, linguistically. The advantage of this approach is its robustness and ability to handle non-linear behavior of the system. The simulated system has fifteen degrees of freedom. Structural system was simulated against the ground motion of the destructive Kocaeli earthquake ($M_w=7.4$), which resulted in more than 20.000 deaths in Turkey on 17 August, 1999. In this study a linear motor is used as the active isolator. At the end of the study, the time history of the storey displacements, accelerations and frequency response of both the uncontrolled and controlled analytical structures are presented and the results are discussed. It was shown that a designed fuzzy logic controller brought better active control performance than a PID controller. The improvement in resonance values and decrease in vibration amplitudes support this result.

Keywords: Earthquake induced vibration, multi-degree-of-freedom structure, seismic isolation, PID control, fuzzy logic control.

1. GİRİŞ

17 Ağustos 1999 tarihinde Kocaeli merkezli olarak Marmara Bölgesinde meydana gelen deprem, binalarda büyük bir yıkım oluşturarak Türkiye'deki özellikle yüksek binaların depreme karşı titreşim kontrolünün önemini ortaya koymuştur. Bu çerçevede, son dönemlerde yapısal titreşimlerin kontrolü, gerek teorik gerekse pratik olarak oldukça hızlı bir gelişme göstermiştir. Titreşim kontrol teknikleri uygulama metoduna göre; pasif koruma teknikleri, aktif koruma teknikleri ve karma koruma teknikleri olarak sınıflandırılabilir.

Pasif kontrol sistemleri, yapıya yerleştirilen özel elemanlar vasıtası ile deprem ve rüzgar gibi sisteme dışardan giren enerjiyi ısıya dönüştürür veya üzerine alırlar. Bu şekilde yapının zorlayıcı dış etkilere karşı tepkisinde azalma meydana getirmek suretiyle, yapının dayanma kapasitesinin artmasını sağlarlar. Elastik yatak kullanılarak titreşim izolasyonu gerçekleştirmek, pasif titreşim kontrol metodlarının en popüler olanlarından biridir. Kauçuk yaprak ve çelik plakalar içeren elastik yatak, deprem karşısında iyi sonuç verebilmektedir. Ayrıca, literatürde yarı aktif titreşim metodları da önerilmektedir. Yoshida ve Fujio (1999), titreşim kontrolünde, viskoz sönüm katsayısı değiştirilen yarı aktif bir kontrol metodunu temele uygulamıştır.

Son yıllarda, deprem kaynaklı titreşimleri izole etmek için kullanılan aktif ikaz edicilerle ilgili yapılmış çalışmalar vardır. Bu çalışmalar, daha ziyade geleceğe yönelik olarak görülmektedir. Bu teknik süratle gelişmekte olup elektronik endüstrisinin son yıllarda gösterdiği ilerlemelere paralel olarak uygulamaya konulabilecek düzeye erişmiştir. Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla yapının yerdeğiştirmelerini istenilen düzeyde tutmak için geliştirilen sistemlerdir. Bu sistemler çok gelişmiş bilgisayarlar ile donatılmış olup; titreşimlerin etkilerini yapıda karşı bir hareket üreterek sönümlendirmeye çalışan ve çok yüksek binalar için de uygun olan kontrol sistemleridir. Aktif kontrol uygulaması ilk olarak Japonya'da uygulanma başlamış ve birkaç bina bu teknoloji ile donatılmıştır. Fukushima vd. (1996), yüksek binalarda rüzgar ve depremden kaynaklanan titreşimleri azaltmayı amaçlayan aktif-pasif kompozit ayarlı kütle sönümleyici geliştirdiler. Binalarda, belirsizlikler ve sabit olmayan sistem parametreleri mevcut olduğundan, yapıların aktif kontrolü için robust (dayanıklı) kontrol metodları önerilmektedir (Nishimura vd., 1996). Kwan-Soon Park vd., (2002), deprem tehdidindeki 3 katlı bir yapının aktif kontrolü için bir bulanık mantık kontrolcü (BMK) tekniği geliştirmişlerdir. Bu teknik çift katlı kontrol yapısıdır. Birinci kattaki kontrolcü optimal kontrol teorisine göre sistemi kontrol ederek katların yerdeğiştirmesini minimize etmeye çalışırken, 2. kattaki BMK, bulanık sonuç çıkarma

mekanizması sayesinde kat yerdeşiştirmelerine göre her bir an için kontrol kazançlarını ayarlar. Bulanık mantık ayarlama yöntemiyle statik kazançlar yerine dinamik kazançlar kullanılarak, gelişmiş bir sismik kontrol performansı elde edilmiştir. Yağız vd. (2000), yapısal titreşimleri azaltmak için Kayan Kipli Kontrol metodu kullanmıştır. Guclu ve Sertbas (2005), 5 serbestlik dereceli AMD (Aktif Kütle Sönümleyici)'li bir binaya kayan kipli kontrol ve PID kontrol uygulamışlardır.

Agarwala vd.(2000), 5 katlı binanın tasarlanan deprem ve rüzgar kuvvetlerine karşı, aktif titreşim kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, binaya iki ayrı tip kontrolcü yerleştirilmiştir. Birinci kontrolcü, binanın temeline yerleştirilmiş kütle ve yaydan oluşan ve gerekli uyarı kuvvetini bir DC servo motordan alan sistemdir. Birinci katın yerdeşiştirmesini minimize etmek için tasarlanmıştır. İkinci kontrolcü ise en üst kata yerleştirilmiş Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici (ATMD) sisteminden ibarettir. Bu sisteme, Bulanık Kazanç Ayarlamalı PID Kontrolcü uygulanmış ve kontrolsüz durumla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kontrol işleminin performansını arttırabilmek için kontrolörün yapısı tek katlı kontrol yapısından çok katlı kontrol yapısına çıkarılmıştır. Birinci katta PID kontrolcü sistemi kontrol ederken ikinci kattaki BMK, PID kontrolcünün parametrelerini değişen şartlara ve sistemin çıkışına göre  evrimi i olarak ayarlayabilmektedir. Bu tip kontrolcüler sabit parametrelere bağlı olmadıkları için doğrusal olmayan PID kontrolcü olarak adlandırılırlar. Simülasyon sonuçları bu yapının rüzgar ve deprem nedeniyle oluşan titreşimlerinin sönümlenmesinde oldukça iyi sonuçlar vermiştir.

Aldawod vd. (2001), yüksek binaların rüzgar etkisindeki titreşimlerinin aktif kontrolünü bir BMK ile gerçekleştirmişlerdir. Söz konusu bina, Avusturalya'nın Melbourne şehrinde bulunan 306 metre uzunluğunda ve 76 katlı bir yapıdır. Aktif titreşim kontrolü için LQG (Lineer Quadratic Gaussian) ve BMK tasarlanmış ve bu iki yapının performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre BMK'n n LQG kontrolcüden biraz daha iyi sonuçlar verdiği g r lm ştir.

Guclu (2001), yaptığı çalışmada, 5 serbestlik derecesine sahip gerçek bir bina modeline, 17 Ağustos Kocaeli depreminin ($M_w=7.4$) sismik verilerinden elde ettiği gerçek deprem girişini bozucu etki olarak uygulamış, meydana gelen bina titreşimlerinin aktif kontrolü için BMK ve PD kontrolcü tasarlayıp, bu iki kontrol sisteminin performanslarını karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda, BMK yapısının kat yerdeğiştirmelerinin ve ivmelerinin zaman ve frekans cevabında, PD kontrolün cevaplarına göre oldukça iyi olduğu gözlenmiştir. BMK yapısının mevcut üstünlükleri ile bina titreşimlerinin aktif kontrolünde bilinen

kontrolcülerden daha iyi cevaplar elde edilebileceği ortaya konulmuştur.

Yukarıda anlatılan çalışmalar, binaların aktif titreşim kontrolü için yapılan çalışmalardan bazılarıdır. Bu tez çalışmasının amacı, deprem tehdidindeki çok serbestlik dereceli bir yapının titreşimlerinin aktif kontrolü için, kontrolcü tasarımı yapmaktır. Çalışmada kullanılacak kontrolcüler, PID (Proportional-Integral-Derivative, Orantı-İntegral-Türev) Kontrolcü ve Bulanık Mantık Kontrolcü (Fuzzy Logic Controller) yapılarıdır. Basit yapıları ve pek çok şartta göstermiş oldukları başarıları nedeniyle PID kontrolcüler endüstride en çok tercih edilen yapılardır. Ancak, kontrol edilen sistemlerin yüksek mertebeden olması durumunda PID yapıları iyi bir kontrol gerçekleştirememektedirler. Bu tip durumlar için Bulanık kontrolcüler bir alternatif olarak sunulabilir. Bulanık kontrolün dayandığı bulanık mantık, insanoğlunun düşünme sistemini ve dilsel izah tarzını temel alır. Bulanık mantık, yeryüzündeki olayların kesin taraflarından çok, yaklaşımlar üzerinde durur. Aslında bulanık kontrol sistemleri, uzman kişinin görüşlerine dayanan dilsel bir kontrol stratejisidir. BMK, özellikle kontrol edilen sistemin analizinin çok zor olduğu durumlarda veya sistem bilgilerinin yetersiz olduğu durumlarda klasik kontrol sistemlerinden daha üstün cevaplar vermektedir. Özellikle son yirmi yıldır BMK, bulanık kümeler teorisinin üzerinde en çok çalışılan dalı haline gelmiştir. Bulanık kontrol üzerine ilk çalışmalar, Mamdani ve arkadaşları (1997), tarafından yapılmıştır. Onları bulanık kontrol sistemleri üzerinde çalışmaya teşvik eden ise Zadeh'in "Bulanık kümeler teorisine dayanan dilsel yaklaşım ve sistem analizi" adlı makalesi olmuştur. Daha sonra, bu konuda pek çok çalışma yapılmıştır (Küçükdemiral, 2002). Bulanık mantık kontrolcüler bina titreşimlerinin kontrolü için geliştirilen aktif kontrol çalışmalarında da başarıyla uygulanmıştır. Çalışmada, 15 katlı binanın hareket denklemleri çıkartılarak, binanın dinamik davranışı incelenmiştir. BMK ve PID kontrol yapıları Matlab Simulink ortamında oluşturulmuş ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Binaya ilk olarak, zeminin 0.01 metre yerdeğiştirmesi sonucu oluşan yer hareketi bozucu etki olarak alınmıştır. Bozucu etkiye karşı PID ve BMK kontrolcü tasarımı yapılmıştır. İkinci tip simülasyonda ise gerçek deprem yer hareketi binaya bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Bu tezde binaya bozucu giriş olarak, 17 Ağustos'ta meydana gelen ve 20.000'in üzerinde insanın ölmesine neden olan Kocaeli depremi ($M_w=7.4$) uygulanmış ve bu etkiye karşı kat yerdeğiştirmelerinin ve ivmelerinin zaman ve frekans cevapları iki farklı kontrolcü ve kontrolcüsüz olmak üzere karşılaştırılmıştır. Simülasyonların sonucunda; BMK'nün bilinen PID kontrolcüden daha iyi cevaplar verdiği tespit edilmiştir. Çalışmada aktif izolatör olarak lineer bir motor kullanılmıştır.

Tez çalışmasının geri kalan kısmı ise şu şekildedir: 2. Bölümde deprem olayı tanıtılarak Türkiye'nin depremselliği anlatılmıştır. 3.Bölümde, bilinen aktif ve pasif yapı kontrol yöntemleri uygulamalarıyla ve çalışma prensipleriyle açıklanmıştır. 4. Bölümde çalışmanın ana hedefini oluşturan kontrol sistemleri tanıtılmış, PID kontrolcüler, Bulanık mantık ve BMK yapısı detaylı olarak anlatılmıştır. 5. Bölümde kontrolcü tasarımı çok serbestlik dereceli bir yapı için uygulanmış ve elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu tezde, deprem kuşağında yer alan ülkemizde sismik zararlardan korunmak için geliştirilmiş ve birçok ülkede uygulanmakta olan teknolojilerin tanıtılması amaçlanmış ve bulanık kontrolcülerin, yapısal titreşimlerin aktif kontrolündeki başarıları ortaya konulmuştur.

2. DEPREM

İnsanlık tarihi boyunca tüm uygarlıkların kaderini, depremler başta olmak üzere yaşanan doğal afetler (deprem, sel, çığ vb.) belirlemiştir. Dünyanın oluşumundan beri, sismik yönden aktif bulunan bölgelerde depremlerin ardışıklı olarak olduğu ve sonucunda da milyonlarca insanın hayatını kaybettiği ve barınakların yok olduğu bilinmektedir.

Bilindiği gibi yurdumuz dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Geçmişte yurdumuzda birçok yıkıcı depremler olduğu gibi, gelecekte de sık sık oluşacak depremlerle büyük can ve mal kaybına uğrayacağımız bir gerçektir.

Deprem Bölgeleri Haritası'na göre, yurdumuzun %92'sinin deprem bölgeleri içerisinde olduğu, nüfusumuzun %95'inin deprem tehlikesi altında yaşadığı ve ayrıca büyük sanayi merkezlerinin %98'i ve barajlarımızın %93'ünün deprem bölgesinde bulunduğu bilinmektedir.

Son 58 yıl içerisinde depremlerde, 58.202 vatandaşımız hayatını kaybetmiş, 122.096 kişi yaralanmış ve yaklaşık olarak 411.465 bina yıkılmış veya ağır hasar görmüştür. Sonuç olarak denilebilir ki, depremlerden her yıl ortalama 1.003 vatandaşımız ölmekte ve 7.094 bina yıkılmaktadır (Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi).

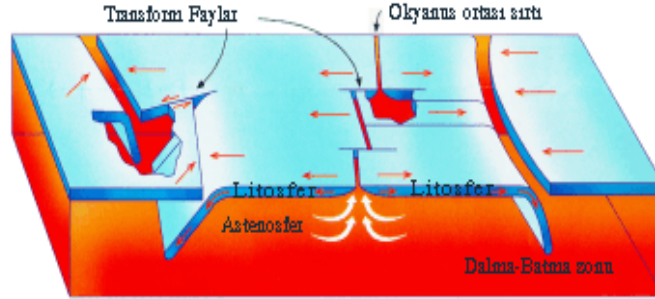
2.1 Deprem Nedir?

Deprem, yer kabuğunda fay olarak adlandırılan kırıklar üzerinde biriken elastik şekil değiştirme enerjisinin aniden boşalması sonucunda meydana gelen yerdeğiştirme hareketinin neden olduğu, karmaşık elastik dalga hareketidir. Bir başka tanımla deprem, yer kabuğu içindeki kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yer yüzeyini sarsması olayıdır. Depremin nasıl oluştuğunu, deprem dalgalarının yerküre içinde ne şekilde yayıldığını, ölçü aletleri ve yöntemlerini, kayıtların değerlendirilmesini ve deprem ile ilgili diğer konuları inceleyen bilim dalına Sismoloji denir. Sismik kelimesi Yunanca'dan gelir ve anlamı salınımdır (Alptekin, 1996).

2.2 Yerkürenin İç Yapısı ve Depremlerin Oluş Nedenleri

Dünyanın iç yapısı konusunda, jeolojik ve jeofizik çalışmalar sonucu elde edilen verilerin desteklediği bir yeryüzü modeli bulunmaktadır (www.deprem.gov.tr). Bu modele göre, yerkürenin dış kısmında yaklaşık 70-100 km. kalınlığında oluşmuş bir taşküre (Litosfer) vardır. Kıtalar ve okyanuslar bu taşkürede yer alır. Litosfer ile çekirdek arasında kalan ve kalınlığı 2.900 km. olan kuşağa Manto adı verilir. Manto'nun altındaki çekirdeğin Nikel-

Demir karışımından oluştuğu kabul edilmektedir. Yerin yüzeyinden derine gidildikçe ısıнын arttığı bilinmektedir. Enine deprem dalgalarının yerin çekirdeğinde yayılamadığı olgusundan yola çıkılarak çekirdeğin sıvı bir ortam olması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Şekil 2.1’de yer kabuğu hareketinin şematik anlatımı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Yer kabuğu hareketinin şematik anlatımı (www.deprem.gov.tr)

Manto genelde katı olmakla beraber yüzeyden derine inildikçe içinde yerel sıvı ortamları bulundurmaktadır.

Taşküre'nin altında Astenosfer denilen yumuşak Üst Manto bulunmaktadır. Burada oluşan kuvvetler, özellikle konveksiyon akımları nedeni ile, taş kabuk parçalanmakta ve birçok "Levha"lara bölünmektedir. Üst Manto'da oluşan konveksiyon akımları, radyoaktivite nedeni ile oluşan yüksek ısıya bağlanmaktadır. Konveksiyon akımları yukarılara yükseldikçe taşkürede gerilmelere ve daha sonra da zayıf zonların kırılmasıyla levhaların oluşmasına neden olmaktadır. Halen 10 kadar büyük levha ve çok sayıda küçük levhalar vardır. Şekil 2.2’de Litosfer’de yer alan levhalar gösterilmektedir. Bu levhalar üzerinde duran kıtalarla birlikte, Astenosfer üzerinde sal gibi yüzmekte olup, birbirlerine göre insanların hissedemeyeceği bir hızla hareket etmektedirler.

Konveksiyon akımlarının yükseldiği yerlerde levhalar birbirlerinden uzaklaşmakta ve buradan çıkan sıcak mağmada okyanus ortası sırtlarını oluşturmaktadır. Levhaların birbirlerine değdikleri bölgelerde sürtünmeler ve sıkışmalar olmakta, sürtünen levhalardan biri aşağıya Manto'ya batmakta ve eriyerek yitme zonlarını oluşturmaktadır. Konveksiyon akımlarının neden olduğu bu ardışıklı olay taşkürenin altında devam edip gitmektedir.

Levha hareketleri yerkürenin oluşumundan beri sürmektedir. Süper kıta Pangea'nın, bundan 225 milyon yıl önce parçalanmaya başladığı ve bu hareketliliğin sonucunda kıtaların günümüzdeki şekli aldığı düşünülmektedir.



Şekil 2.2 Litosferdeki levhalar (www.benkoltd.com)

Günümüzde Litosfer’de 1 ila 15 cm/yıl arasında hızlarla hareket halinde bulunan 7 ana ve birçok küçük levha vardır. Bunların hareketleri çok karmaşıktır ve bu hareketlerin niteliğinin tam olarak saptanması, depremlerin zamanının önceden kestirilmesi için gereklidir.

Levhaların birbirleriyle etkileşimleri bakımından levha hareketlerini 3 ana başlıkta toplayabiliriz. Uzaklaşma-ayrılma; yaklaşma-çarpışma; yanal yerdeğiştirme-sıyırma. Bu hareket türleri, aynı zamanda bu sınırlarda oluşan depremlerin ve volkanik faaliyetlerin niteliklerini de belirler.

İşte yerkabuğunu oluşturan levhaların birbirine sürtündükleri, birbirlerini sıkıştırdıkları, birbirlerinin üstüne çıktıkları ya da altına girdikleri bu levhaların sınırları dünyada depremlerin oldukları yerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünyada olan depremlerin hemen büyük çoğunluğu bu levhaların birbirlerini zorladıkları levha sınırlarında dar kuşaklar üzerinde oluşmaktadır.

Yukarıda, yerkabuğunu oluşturan levhaların, Astenosferdeki konveksiyon akımları nedeniyle hareket halinde oldukları ve bu nedenle birbirlerini ittikleri veya birbirlerinden açıldıkları ve bu olayların meydana geldiği zonların da deprem bölgelerini oluşturduğu belirtilmiştir.

Birbirlerini iten ya da diğerinin altına giren iki levha arasında, harekete engel olan bir sürtünme kuvveti vardır. Bir levhanın hareket edebilmesi için bu sürtünme kuvvetinin giderilmesi gerekir.

İtilmekte olan bir levha ile bir diğer levha arasında sürtünme kuvveti aşıldığı zaman bir hareket oluşur. Bu hareket çok kısa bir zaman biriminde gerçekleşir ve şok niteliğindedir.

Sonunda çok uzaklara kadar yayılabilen deprem (sarsıntı) dalgaları ortaya çıkar. Bu dalgalar geçtiği ortamları sarsarak ve depremin oluş yönünden uzaklaştıkça enerjisi azalarak yayılır. Bu sırada yeryüzünde, bazen gözle görülebilen, kilometrelerce uzanabilen ve Fay adı verilen arazi kırıkları oluşabilir. Bu kırıklar bazen yeryüzünde gözlenemez, yüzey tabakaları ile gizlenmiş olabilir. Bazen de eski bir depremden oluşmuş ve yeryüzüne kadar çıkmış, ancak zamanla örtülmüş bir fay yeniden oynayabilir (Erguvanlı, 1979).

Depremlerinin oluşumunun bu şekilde ve "Elastik Geri Sekme Kuramı" adı altında anlatımı 1911 yılında Amerikalı Reid tarafından yapılmıştır ve laboratuvarlarda da denenerek ispatlanmıştır.

Bu kurama göre, herhangi bir noktada, zamana bağımlı olarak, yavaş yavaş oluşan birim deformasyon birikiminin elastik olarak depoladığı enerji, kritik bir değere eriştiğinde, fay düzlemi boyunca var olan sürtünme kuvvetini yenerek, fay çizgisinin her iki tarafındaki kayaç bloklarının birbirine göre göreceli hareketlerini oluşturmaktadır. Bu olay ani yer değiştirme hareketidir. Bu ani yer değiştirmeler ise bir noktada biriken birim deformasyon enerjisinin açığa çıkması, boşalması, diğer bir deyişle mekanik enerjiye dönüşmesiyle ve sonuç olarak yer katmanlarının kırılma ve yırtılma hareketi ile olmaktadır.

Aslında kayaların, önceden bir birim yerdeğiştirme birikimine uğramadan kırılmaları imkansızdır. Bu birim yerdeğiştirme hareketlerini, hareketsiz görülen yer kabuğunda, üst mantoda oluşan konveksiyon akımları oluşturmakta, kayalar belirli bir deformasyona kadar dayanıklılık gösterebilmekte ve sonra da kırılmaktadır. İşte bu kırılmalar sonucu depremler oluşmaktadır. Bu olaydan sonra da kayalardan uzun zamandan beri birikmiş olan gerilmelerin ve enerjinin bir kısmı ya da tamamı giderilmiş olmaktadır.

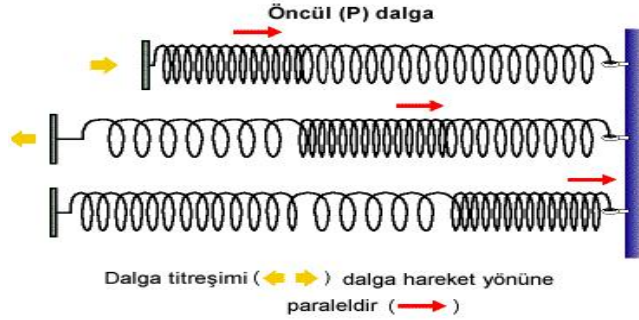
Çoğunlukla bu deprem olayı esnasında oluşan faylarda, elastik geri sekmeler (atımlar), fayın her iki tarafında ve ters yönde oluşmaktadırlar.

Faylar genellikle hareket yönlerine göre isimlendirilirler. Daha çok yatay hareket sonucu meydana gelen faylara Doğrultu Atımlı Fay denir. Fayın oluşturduğu iki ayrı bloğun birbirlerine göreceli olarak sağa veya sola hareketlerinden de bahsedilebilir ki bunlar sağ veya sol yönlü doğrultulu atımlı faya bir örnektir.

Düşey hareketlerle meydana gelen faylara da Eğim Atımlı Fay denir. Fayların çoğunda hem yatay, hem de düşey hareket bulunabilir.

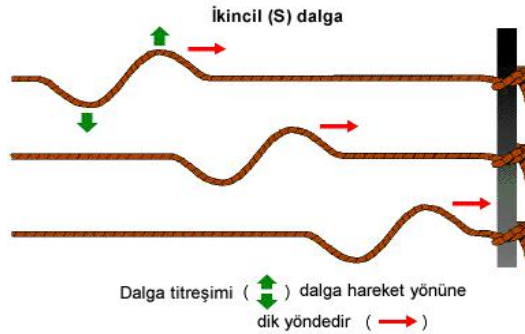
2.3 Deprem Hareketi

Deprem oluştugu anda yerkabuğuna iki farklı hareket dalgası yayar: P-dalgası ve S-dalgası. P-dalgası (Primary-wave) öncül dalgadır ve yer yüzeyine paralel doğrultuda salınımlardan oluşur. P-dalgası davranışı aşağıdaki Şekil 2.3’de açıklanmıştır. Dalganın titreşim yönü (sarı ok) ve dalganın hareket yönü (kırmızı ok) birbirine paraleldir.



Şekil 2.3 P dalga hareketi (www.benkoltd.com)

S-dalgası (Secondary-wave) yeryüzeyine göre dik yönde ve düşeyde hareket eder, yani bir yüzme havuzundaki su dalgası gibidir. S-dalgası davranışını aşağıdaki Şekil 2.4 açıklamaktadır. Dalganın titreşim yönü (yeşil ok) ve dalganın hareket yönü (kırmızı ok) birbirine diktir.



Şekil 2.4 S dalga hareketi (www.benkoltd.com)

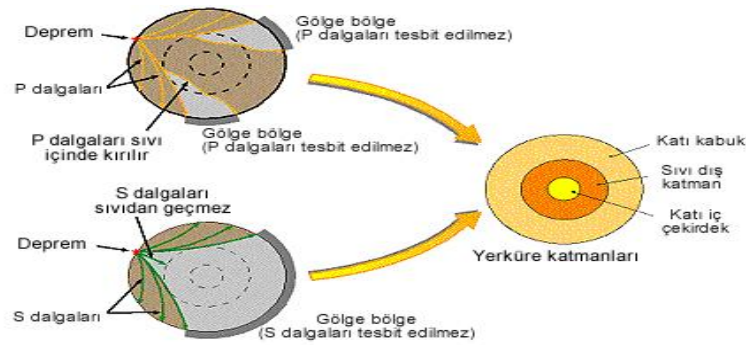
P ve S dalgaları içinden geçtikleri ortama göre 5 ile 15 km/saniye hızla ilerlerler. S-dalgaları ilerleme hızı P-dalgalarına göre yarı yarıyadır. Yani öncelikle P-dalgası yapıya etkir ve arkasından S-dalgası gelir.

Deprem dalgalarının hızı içinden geçtikleri ortamın yoğunluğuna bağlı olduğundan, P ve S dalgaları yerkabuğunun derinliklerinde bir kayaç türünden diğerine geçerken kırılırlar. Bilim

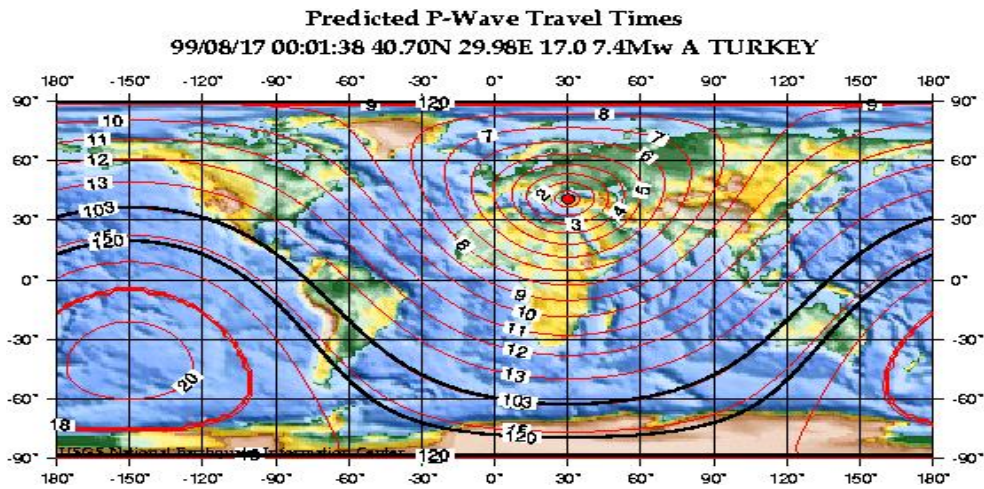
adamları bu dalgaların kırılma şekillerini inceleyerek yerkürenin derinliklerinin bir modelini oluşturabilirler.

S dalgaları sıvı ortamda ilerleyemez. Örnek olarak, 1999 Kocaeli depreminde Amerika'daki ölçüm istasyonları depremin S dalgalarını tespit edemediler, bu da yerkürenin içinde sıvı bir dış katman olduğunu kanıtlar.

Ayrıca, bir depremden sonra, Gölge Bölge denilen ve P veya S dalgalarını hissetmeyen bölgeler bulunmuştur. Bu bölgeler, P dalgalarının yerkabuğunun katı bölgesiyle sıvı dış katman arasından geçerken kırılmasıyla oluşur. Bu etkiyi araştıran bilim adamları sıvı dış katmanın yaklaşık 2900 km. derinlikte başladığını hesaplamışlardır. Şekil 2.5'de gölge bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Gölge bölgelerin gösterilmesi (www.benkoltd.com)



Şekil 2.6 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi P dalgaları tahmini erişim süreleri (www.benkoltd.com)

17 Ağustos Kocaeli depreminde meydana gelen P dalgalarının tahmini erişim süreleri, Şekil 2.6'da gösterilmektedir.

2.4 Deprem Türleri

Depremler oluş nedenlerine göre değişik türlerde olabilir (www.deprem.gov.tr). Dünyada olan depremlerin büyük bir bölümü yukarıda anlatılan biçimde oluşmakla birlikte az miktarda da olsa başka doğal nedenlerle de olan deprem türleri bulunmaktadır. Yukarıda anlatılan levhaların hareketi sonucu olan depremler genellikle "Tektonik" depremler olarak nitelenir ve bu depremler çoğunlukla levhaların sınırlarında oluşurlar. Yeryüzünde olan depremlerin %90'ı bu gruba girer. Türkiye'de olan depremler de büyük çoğunlukla tektonik depremlerdir. İkinci tip depremler "Volkanik" depremlerdir. Bunlar volkanların püskürmesi sonucu oluşurlar. Yerin derinliklerinde ergimiş maddenin yeryüzüne çıkışı sırasındaki fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda oluşan gazların yapmış oldukları patlamalarla bu tür depremlerin meydana geldiği bilinmektedir. Bunlar da yanardağlarla ilgili olduklarından yereldirler ve önemli zarara neden olmazlar. Japonya ve İtalya'da oluşan depremlerin bir kısmı bu gruba girmektedir. Türkiye'de aktif yanardağ olmadığı için bu tip depremler olmamaktadır.

Bir başka tip depremler de "Çöküntü" depremlerdir. Bunlar yeraltındaki boşlukların (mağara), kömür ocaklarında galerilerin, tuz ve jipsli arazilerde erime sonucu oluşan boşlukların tavan bloğunun çökmesi ile oluşurlar. Hissedilme alanları yerel olup enerjileri azdır, fazla zarar getirmezler. Büyük heyelanlar ve gökten düşen meteorların da küçük sarsıntılara neden olduğu bilinmektedir.

Odağı deniz dibinde olan derin deniz depremlerinden sonra, denizlerde kıyılara kadar ulaşan ve bazen kıyılarda büyük hasarlara neden olan dalgalar oluşur ki bunlara Tsunami denir. Deniz depremlerinin çok görüldüğü Japonya'da Tsunami'den 1896 yılında 30.000 kişi ölmüştür.

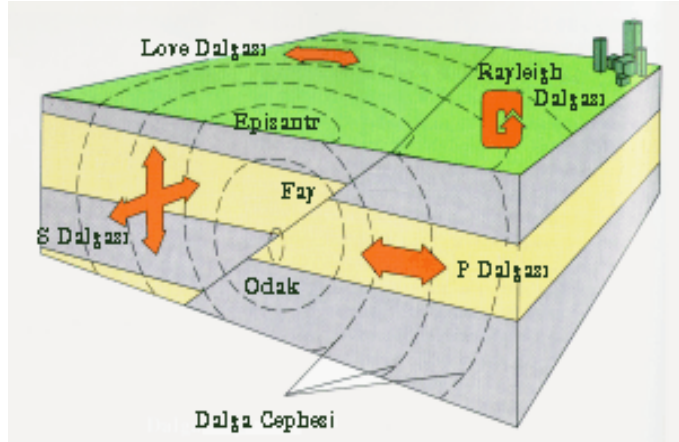
2.5 Deprem Parametreleri

Herhangi bir deprem oluştuğunda, bu depremin tariflenmesi ve anlaşılabilmesi için Deprem Parametreleri olarak tanımlanan bazı kavramlardan söz edilmektedir (Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi web sayfası, www.deprem.gov.tr). Aşağıda kısaca bu parametrelerin açıklaması yapılacaktır.

2.5.1 Odak Noktası (Hiposantr)

Odak noktası yerin içinde depremin enerjisinin ortaya çıktığı noktadır. Bu noktaya odak noktası veya iç merkez de denir. Gerçekte enerjinin ortaya çıktığı bir nokta olmayıp bir

alandır fakat pratik uygulamalarda nokta olarak kabul edilmektedir. Odak noktası, dış merkez ve sismik deprem dalgalarının yayılışı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Odak noktası, dış merkez ve sismik deprem dalgalarının yayılışı
(www.deprem.gov.tr)

2.5.2 Dış Merkez (Episantr)

Odak noktasına en yakın olan yer üzerindeki noktadır. Burası aynı zamanda depremin en çok hasar yaptığı veya en kuvvetli olarak hissedildiği noktadır. Aslında bu, bir noktadan çok bir alandır. Depremin dış merkez alanı depremin şiddetine bağlı olarak çeşitli büyüklüklerde olabilir. Bazen büyük bir depremin odak noktasının boyutları yüzlerce kilometreyle de belirlenebilir. Bu nedenle Episantr Bölgesi ya da Episantr Alanı olarak tanımlama yapılması gerçeğe daha yakın bir tanımlama olacaktır.

2.5.3 Odak Derinliği

Depremde enerjinin açığa çıktığı noktanın yeryüzünden en kısa uzaklığı, depremin odak derinliği olarak adlandırılır. Depremler odak derinliklerine göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma tektonik depremler için geçerlidir. Yerin 0-60 km. derinliğinde olan depremler sığ deprem olarak nitelenir. Yerin 70-300 km. derinliklerinde olan depremler orta derinlikte olan depremlerdir. Derin depremler ise yerin 300 km.’den fazla derinliğinde olan depremlerdir. Türkiye’de olan depremler genellikle sığ depremlerdir ve derinlikleri 0-60 km. arasındadır. Orta ve derin depremler daha çok bir levhanın bir diğer levhanın altına girdiği bölgelerde olur. Derin depremler çok geniş alanlarda hissedilir, buna karşılık yaptıkları hasar azdır. Sığ depremler ise dar bir alanda hissedilirken bu alan içinde çok büyük hasarlar yapabilirler.

2.5.4 Eşşiddet (İzoseit) Eğrileri

Aynı şiddetle sarsılan noktaları birbirine bağlayan eğrilere denir. Bunun tamamlanmasıyla eşşiddet haritası ortaya çıkar. Genelde kabul edilmiş duruma göre, eğrilerin oluşturduğu yani iki eğri arasında kalan alan, depremlerden etkilenme yönüyle, şiddet bakımından sınırlandırılmış olur. Bu nedenle depremin şiddeti eşşiddet eğrileri üzerine değil, alan içerisine yazılır.

2.5.5 Şiddet

Herhangi bir derinlikte olan depremin, yeryüzünde hissedildiği bir noktadaki etkisinin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle depremin şiddeti, onun yapılar, doğa ve insanlar üzerindeki etkilerinin bir ölçüsüdür. Bu etki, depremin büyüklüğü, odak derinliği, uzaklığı yapıların depreme karşı gösterdiği dayanıklılık dahi değişik olabilmektedir. Şiddet, depremin kaynağındaki büyüklüğü hakkında doğru bilgi vermemekle beraber, deprem dolayısıyla oluşan hasarı yukarıda belirtilen etkenlere bağlı olarak yansıtır.

Depremin şiddeti, depremlerin gözlenen etkileri sonucunda ve uzun yılların vermiş olduğu deneyimlere dayanılarak hazırlanmış olan "Şiddet Cetvelleri"ne göre değerlendirilmektedir. Diğer bir deyişle "Deprem Şiddet Cetvelleri" depremin etkisinde kalan canlı ve cansız herşeyin depreme gösterdiği tepkiyi değerlendirmektedir. Önceden hazırlanmış olan bu cetveller, her şiddet derecesindeki depremlerin insanlar, yapılar ve arazi üzerinde meydana getireceği etkileri belirlemektedir.

Bir deprem oluştuğunda, bu depremin herhangi bir noktadaki şiddetini belirlemek için, o bölgede meydana gelen etkiler gözlenir. Bu izlenimler, şiddet cetveli'nde hangi şiddet derecesi tanımına uygunsa, depremin şiddeti, o şiddet derecesi olarak değerlendirilir (Çizelge 2.1). Örneğin; depremin neden olduğu etkiler, şiddet cetvelinde VIII şiddet olarak tanımlanan bulguları içeriyorsa, o deprem VIII şiddetinde bir deprem olarak tariflenir. Deprem şiddet cetvellerinde, şiddetler romen rakamıyla gösterilmektedir. Bugün kullanılan başlıca şiddet cetvelleri değiştirilmiş "Mercalli Cetveli (MM)" ve "Medvedev-Sponheur-Karnik (MSK)" şiddet cetvelidir. Her iki cetvel de XII şiddet derecesini içermektedir. Bu cetvellere göre, şiddeti V ve daha küçük olan depremler genellikle yapılarda hasar meydana getirmezler ve insanların depremi hissetme şekillerine göre değerlendirilirler.

VI-XII arasındaki şiddetler ise, depremlerin yapılarda meydana getirdiği hasar ve arazide oluşturduğu kırılma, yarıлма, heyelan gibi bulgulara dayanılarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 2.1 Deprem şiddet cetveli (www.deprem.gov.tr)

İvmesi	Tanım	İvmesi	(g=yerçekimi ivmesi)
I	Sadece duyarlı aletler algılar.	~ 1 cm/s ²	0.001 g
II	Üst katlarda, dinlenen kişiler hissedebilir, asılı cisimler sallanabilir.	2~3 cm/s ²	0.002~0.003g
III	Binada hissedilir, duran bir aracın yanından kamyon geçmiş gibi sallanır.	3~7 cm/s ²	0.003~0.007g
IV	Binada çoğunluk ve dışarıda az kişi hisseder, kapacak sallanır.	7~15 cm/s ²	0.007~0.015g
V	Herkes hisseder, tabak, pencere v.b. kırılır	15~30 cm/s ²	0.015~0.03g
VI	Herkes hisseder, birçoğu korkup dışarı fırlar, baca, sıva düşer, hafif hasar olur.	30~70 cm/s ²	0.03~0.07g
VII	Herkes dışarı kaçar, yapı sağlamlığına göre hasar olur, otomobildekiler de hisseder.	70~150 cm/s ²	0.07~0.15 g
VIII	Duvarlar çerçevelerden ayrılır, baca, duvar devrilebilir. Kum, çamur fışkırır	150~300 cm/s ²	0.15~0.3 g
IX	Yapı temelden ayrılır, çatlar, eğilir. Zemin ve yeraltı boruları çatlar.	300~700 cm/s ²	0.3~0.7 g
X	Kargir ve çerçeve yapıların çoğu tahrip olur, zemin çatlar, raylar eğilir, toprak kaymaları olur.	700~1500 cm/s ²	0.7~1.5 g
XI	Yeni tip yapılar ayakta kalabilir, köprüler yıkılır, toprak kayar, raylar bükülür.	1500~3000 cm/s ²	1.5~3 g
XII	Hemen herşey harap olur, toprak yüzeyinde dalgalanma görülür, cisimler havaya fırlar.	3000~7000 cm/s ²	3~7 g

2.5.6 Büyüklük

Deprem sırasında açığa çıkan enerjinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Enerjinin doğrudan doğruya ölçülmesi mümkün olmadığından, Amerika Birleşik Devletleri'nden Prof. C. Richter tarafından 1930 yıllarında bulunan bir yöntemle depremlerin aletsel bir ölçüsü olan Büyüklük (magnitüd) tanımlanmıştır. Prof. Richter, dış merkezden (episantr) 100 km. uzaklıkta ve sert zemine yerleştirilmiş özel bir sismografla (2800 büyütmeli, doğal periyodu 0.8 saniye ve %80 sönümü olan bir Wood-Anderson torsiyon sismografi ile) kaydedilmiş zemin hareketinin mikron cinsinden (1 mikron 1/1000 mm) ölçülen maksimum genliğinin 10 tabanına göre logaritmasını bir depremin "büyüklüğü" olarak tanımlamıştır. Bugüne dek olan depremler istatistik olarak incelendiğinde kaydedilen en büyük magnitüd değerinin 8.9 olduğu görülmektedir (31 Ocak 1906 Colombiya-Ekvator ve 2 Mart 1933 Sanriku-Japonya depremleri).

Büyüklük, aletsel ve gözlemsel büyüklük değerleri olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Aletsel büyüklük, yukarıda da belirtildiği üzere, standart bir sismografla kaydedilen deprem hareketinin maksimum genlik ve periyod değeri ve alet kalibrasyon fonksiyonlarının

kullanılması ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmektedir. Aletsel büyüklük değeri, gerek hacim dalgaları ve gerekse yüzey dalgalarından hesaplanılmaktadır.

Genel olarak, hacim dalgalarından hesaplanan büyüklükler m ile yüzey dalgalarından hesaplanan büyükler ise M ile gösterilmektedir. Her iki büyüklük değerini birbirine dönüştürecek bazı bağıntılar mevcuttur.

Gözlemsel büyüklük değeri ise, gözlemsel inceleme sonucu elde edilen episantr şiddetinden hesaplanmaktadır. Ancak, bu tür hesaplamalarda, büyüklük-şiddet bağıntısının incelenilen bölgeden bölgeye değiştiği de göz önünde tutulmalıdır.

Gözlemeyleri tarafından bildirilen bu depremin büyüklüğü depremin enerjisi hakkında fikir vermez. Çünkü deprem sığ veya derin odaklı olabilir. Büyüklüğü aynı olan iki depremden sığ olanı daha çok hasar yaparken, derin olanı daha az hasar yapacağından arada bir fark olacaktır. Yine de Richter ölçeği depremlerin özelliklerini saptamada çok önemli bir unsur olmaktadır.

Depremlerin şiddet ve büyüklükleri arasında birtakım ampirik bağıntılar çıkarılmıştır. Bu bağıntılardan şiddet ve büyüklük değerleri arasındaki dönüşümler, Çizelge 2.2'deki gibi verilebilir.

Çizelge 2.2 Şiddet ve büyüklük değerleri arasındaki dönüşümler

Siddet	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Richter Büyüklüğü	4	4.5	5.1	5.6	6.2	6.6	7.3	7.8	8.4

2.6 Depremlerin Sınıflandırılması

Depremler büyüklüklerine (Çizelge 2.3), derinliklerine (Çizelge 2.4) ve uzaklıklarına (Çizelge 2.5) göre sınıflandırılabilirler.

Çizelge 2.3 Depremlerin büyüklüklerine göre sınıflandırılması

Büyüklük (m)	Büyüklük Sınıflaması
$M > 7$	Büyük Deprem
$5 < M < 7$	Orta Deprem
$3 < M < 5$	Küçük Deprem
$1 < M < 3$	Mikro Deprem
$M < 1$	Küçük Mikro Deprem

Çizelge 2.4 Depremlerin derinliklerine göre sınıflandırılması

Derinlik H (km)	Derinlik Sınıflaması
$H < 60$	Sığ Deprem
$60 < H < 300$	Orta Derin Deprem
$H > 300$	Derin Deprem

Çizelge 2.5 Depremlerin uzaklıklarına göre sınıflandırılması

Uzaklık (D) km	Uzaklık Sınıflaması
$D < 100$	Yerel Deprem
$100 < D < 1000$	Yakın Deprem
$1000 < D < 5000$	Bölgesel Deprem
$D > 5000$	Uzak Deprem

2.7 Öncü ve Artçı Depremler

Bazen büyük bir deprem olmadan önce küçük sarsıntılar olur. Bu küçük sarsıntılara Öncü Depremler denilmektedir. Büyük bir depremin oluşundan sonra da belki birkaç yüz adet küçük deprem olmaya devam etmektedir. Bu küçük depremler, Artçı Depremler olarak isimlendirilir ve büyük depremin oluş anına göre bunların şiddetinde ve sayısında azalma görülür.

2.8 Türkiye’de Depremler

Yerküre üzerinde oluşan depremlerin büyüklüğü ve neden oldukları zararlar göz önüne alındığında iki ana deprem kuşağı en çok ilgi çeken bölgelerdir. Bunlardan biri Büyük Okyanusu çevreleyen ve özellikle Japonya üzerinde etkili olan Pasifik Deprem Kuşağı, diğeri ise Cebelitarık’tan Endonezya adalarına uzanan ve Türkiye’nin de içinde bulunduğu Akdeniz-Himalaya deprem kuşağıdır (www.deprem.gov.tr).

Türkiye’nin bulunduğu bölgede büyük levhalar arasında küçük birçok levhanın olması, Türkiye’nin büyük bir bölümünün deprem kuşağı içerisinde yer almasına neden olur. Türkiye, üç büyük levhanın; Avrasya, Afrika ve Arap levhalarının etkisi altındadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Türkiye'nin etkisi altında olduğu levhalar

Bu levhalar arasındaki etkileşim şöyledir: Afrika levhası, Akdeniz'de Helenik-Kıbrıs Yayı denilen bölgede, Avrasya veya onun bir parçası olan Anadolu levhasının altına dalar. Arap levhası ise Kızıldeniz'deki açılma nedeniyle kuzeye doğru hareket eder ve Anadolu levhasını sıkıştırır. Bu sıkıştırma sonucu, Bitlis Bindirme Kuşağı oluşmuştur. Sıkıştırma halen sürdüğü için, Anadolu levhası kuzey ve güneydeki fay hatları boyunca batıya doğru hareket eder. Anadolu levhasının kuzey sınırı, bir bölümünde 17 Ağustos depreminin olduğu Kuzey Anadolu Fayı'dır. Güney sınırını ise, Helenik-Kıbrıs Yayı ile Doğu Anadolu Fayı oluşturur.

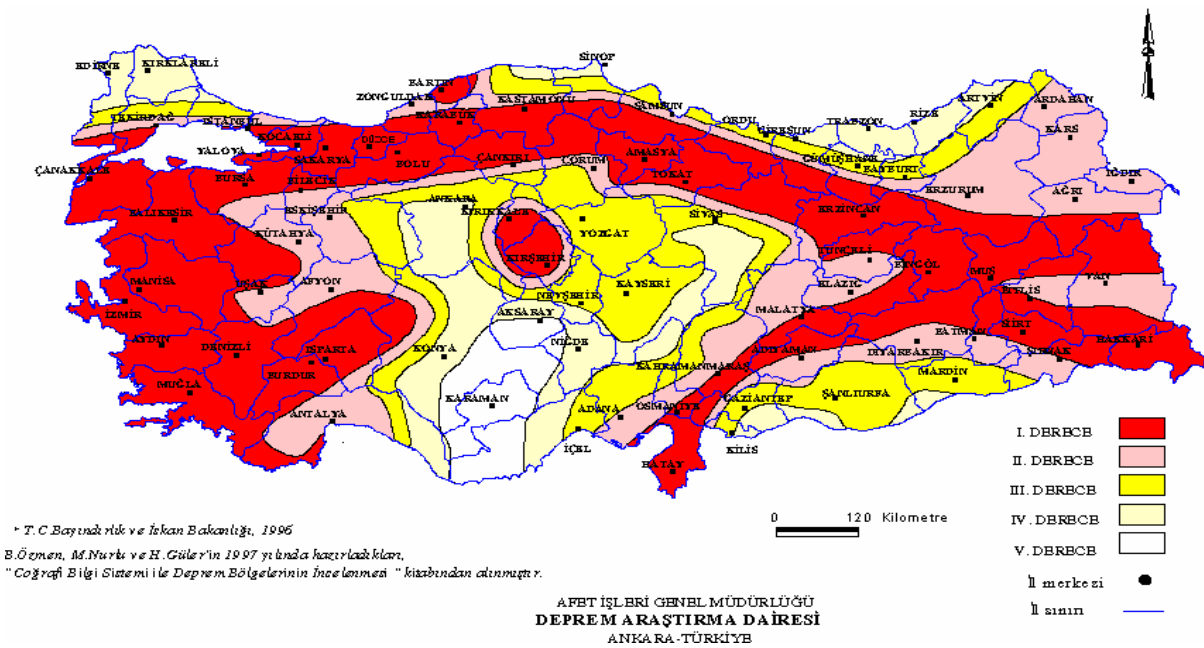
Arap levhasının sıkıştırması sonucu batıya kayan Anadolu levhasının sınırlarında ve Afrika levhasının Avrasya levhasının altına dalması sonucu Akdeniz'de ve Ege Graben Sistemi içersinde depremler meydana gelir. Ancak, Arap levhasının sıkıştırması bu bölgelerdeki hareketlenme ile tamamen telafi edilemediği için İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde de içsel deformasyon nedeniyle depremler olabilmektedir.

Yapılan araştırmalar sonucunda, Türkiye deprem bölgeleri haritası çıkarılmıştır (Şekil 2.9). Deprem Bölgeleri Haritası ile afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik bir birini tamamlamaktadır. Bu yönetmeliğe göre deprem bölgelerinde kabul edilen hesap ivmeleri, 1. derece için 0.4g, 2. derece için 0.3g, 3. derece için 0.2g, 4. derece için 0.1g olarak alınmalıdır. 5. derece için deprem hesabı yapmak zorunlu değildir.

Yerleşim birimlerinin hangi deprem bölgesinde yer aldığı örneklerde açıklanmıştır. Haritada yer almayan yerleşim birimleri için, bağlı olduğu il veya ilçe merkezine ait deprem bölgesi

esas alınmaktadır. Türkiye Deprem Bölgeleri, ivme değerlerine göre aşağıdaki şekilde derecelendirilmiştir.

1. Derece deprem bölgesi: beklenen ivme değeri 0.40 g 'den büyük
2. Derece deprem bölgesi: beklenen ivme değeri 0.40 g ile 0.30 g arasında
3. Derece deprem bölgesi: beklenen ivme değeri 0.30 g ile 0.20 g arasında
4. Derece deprem bölgesi: beklenen ivme değeri 0.20 g ile 0.10 g arasında
5. Derece deprem bölgesi: beklenen ivme değeri 0.10 g 'den az



Şekil 2.9 Türkiye deprem bölgeleri haritası

Türkiye bir deprem ülkesidir. Geçmişte olan depremler gelecekte de tekrarlanacaktır. Erzincan 1992, Dinar 1995, Adana-Ceyhan 1998, 17 Ağustos Kocaeli depremi ve 12 Kasım Düzce depremleri etkileri bakımından kent depremleridir. Eldeki veriler, Marmara Denizi'nin kuzeyinde tek parça olarak devam eden fayın birkaç depremle kırılma olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir. Bu fayın 7'nin üzerinde deprem üretebileceği tahmin edilmektedir. Yoğun nüfus ve nitelikli sanayinin bulunduğu Marmara Bölgesi ciddi tehdit altındadır. Bu nedenle depremle ilgili alınacak önlemlere bakış açısının değiştirilmesi gerekmektedir (Gündoğdu vd., 2003).

3. AKTİF VE PASİF YAPI KONTROLÜ

Depreme dayanıklı yapı tasarımı düşüncesi yapı tarihi kadar eskidir. Eskiden insanlar çeşitli yöntemler kullanarak yapılarını depreme karşı korumaya çalışmışlardır. İnsanların bu konuda ne kadar başarılı oldukları yaşanan depremlerden test edilerek, eski çağlardan günümüze kadar gelen yapılardan belli olmaktadır.

Tarihsel süreç olarak yapı tasarımı üç safhaya ayrılabilir. Bunlardan klasik dönem sadece statik kuvvetlerle ilgilenir ve tasarlanan yapının depreme karşı koyacak yeter rijitlikte olması prensibine dayanır. İkinci dönem ise modern çağdır. Modern çağda yapı tasarlanırken dinamik analize de başvurulur, hangi durumlarda dinamik analize başvurulacağı yönetmeliklerde belirtilir. Bu iki dönemde de yapılar dinamik kuvvetlere kendi başlarına karşı koyarlar, bu sebeple sistem yeter rijitlikte ve süneklikte olmalıdır. Bu ise kesit alanlarının büyümesini veya kullanılan malzeme dayanımının artmasını gerektirir. Yapısal tasarım açısından üçüncü dönem ise yapının dinamik kuvvetlere karşı, bir geri besleme sistemi yardımıyla kendini adapte edebilmesi prensibine dayanır. Aktif veya pasif kontrol sisteminin kullanılmasının sebebi, şiddetli depremlerde veya rüzgarda, hastane ve iletişim merkezleri gibi yapıların içindeki değerli eşyaların korunmasını da içerir. Asıl amaç insan hayatını kurtarmak olmakla birlikte, yapının güvenliği, işlevselliği dolayısıyla gerilme ve yerdeğişimi gibi iç kuvvetleri de sınır değerleri aşmamalıdır. Sınır durumlar güvenlik yönünden veya konfor bakımından seçilir ve genelde yerdeğişimleri kontrol altına alınarak azaltılmaya çalışılır.

Bir yapının sismik tasarımında ana amaç, yapıda oluşan iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeleri güvenlik, servis ve konfor koşullarını kullanarak sınırlamaktır. Bunun için deprem gibi çevresel etkilere karşı yapıyı koruma önlemlerinin alınması gerekir. Deprem etkilerine karşı yapıları korumak amacıyla geliştirilen düşünceleri iki gruba ayırabiliriz. Birinci grup düşüncede, kolon rijitliklerini azaltarak, kirişlere mafsallar koyarak ya da bunun gibi yöntemlerle yapıya bir form vererek, depreme karşı dayanımı sağlanır. Burada amaç, depremden yapıya intikal eden enerjinin belirli yapı elemanları tarafından sönmülmesi veya sisteme enerji girişinin azaltılmasıdır. İkinci grup düşünce ise, yapıya katı veya sıvı sönmüleyiciler, özel mesnetler ve kayma elemanları dediğimiz ilave elemanlar koyarak birinci grupta belirtilen amaçların gerçekleştirilmesidir. Birinci gruptaki önlemler ile belli bir koruma sağlansa bile, bazı elemanlarda oluşabilecek olan plastik deformasyonlar, yapıya ciddi hasarlar verebilir. Yapının tabanına ya da içine konan ilave elemanlar ile korunmasıyla bu dezavantaj ortadan kaldırılabilir.

Yapısal kontrole başlıca şu sebeplerden dolayı ihtiyaç duyulur:

- Yeni malzemelerin dayanımları artarken elastisite modülleri aynı oranda artmaktadır. Bu nedenle yeni malzemelerle yapılan binalarda az malzeme kullanılmasına karşın binalar daha esnek olmaktadır. Ayrıca, yeni malzemelerde mukavemet artışı, yüksek yapı yapmaya imkan verdiği için yapılar daha yüksek ve esnek olmaktadır. Yüksek binaların üst katları daha fazla yerdeğişimi yaparak konfor problemlerine sebep olur.
- Eskiden yapılar can kaybı olmayacak şekilde tasarlanmaktaydı. Bir depremde yapının bazı bölümleri can kaybı olmayacak şekilde çöker veya işlevlerini yapamaz hale gelebilirdi. Şimdi düşünülen güvenlik kriterinde ise depremden sonra haberleşme ve hastane gibi önemli yapılar işlevlerine devam edebilmelidir. Güvenlik kriteri yükselmiştir.
- Çok önemli yapılarda yalnız yapı değil içindeki aletlerin güvenliğinin sağlanması gerekir. Nükleer tesislerde, önemli haberleşme merkezlerinde yapı kadar içindeki aletlerin güvenliği de önemlidir.
- Yıkıldığı zaman çevreye büyük zararlar verecek nükleer tesis, yüksek kule, açık deniz yapılar için de kontrol uygulanması tercih edilir.

Mühendisler için depreme dayanıklı yapı tasarımı denince genellikle akla gelen ilk iki şey kuvvetler ve yerdeğiştirmeler olmaktadır. Ne var ki, deprem aslında enerji kökenli bir olay olduğundan, enerji kavramı düşünülmesi gereken çok daha temel bir olgudur. Yapıda deprem etkisiyle oluşan kuvvetlerin ve yerdeğiştirmelerin kökeninde depremin enerjisi vardır. Kuvvet ve yerdeğiştirme, bu enerjinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Aşağıdaki denklem, yapı içinde deprem enerjisinin hangi yollarla karşılandığını göstermektedir.

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \quad (3.1)$$

E = Deprem hareketi ile yapıya giren toplam enerji.

E_k = Toplam kinetik enerji.

E_s = Elastik yer değiştirme enerjisi.

E_h = Elastik olmayan hareket ile yutulan enerji.

E_d = İlave sönüm araçları ile yutulan enerji.

Sisteme giren toplam enerji (E), yapıdaki toplam taban kesme kuvveti tarafından yapılan işi

göstermektedir. Bu da yapının eylemsizlik kuvvetlerini içermektedir. Klasik yapı tarzında sisteme giren enerjinin, sistemde oluşan zararlar karşılığında değinilmişti. Elastik olmayan deformasyon arttıkça, bu şekilde yutulan enerji de (E_h) artış görülür. Ayrıca, elastik olmayan şekil değiştirme yapısal sistemi yumuşatır esnekliğini artırır, bu da etkisini yapıya giren toplam enerjinin azalması şeklinde gösterir (Soong ve Constantinou, 1994).

Esneklik ve enerji sönümleme yeteneği ile karakterize edilen sismik izolasyon metodu, bir yapı sisteminin temelinde deprem gibi etkileri karşılama işini gerçekleştirir. Sadece esneklik ile yapıda elastik olmayan deformasyon meydana gelmeden deprem enerjisinin büyük bir kısmı karşılanır. İzolasyon sistemindeki enerji sönümü, yerdeğiştirmeleri sınırlamada ve rezonansı önlemede yararlıdır.

Sismik koruma teknikleri uygulama metoduna göre; pasif koruma teknikleri, aktif koruma teknikleri ve karma koruma teknikleri olarak sınıflandırılabilir (Özpalanlar, 2005).

3.1 Pasif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol sistemleri; yapıya yerleştirilen özel elemanlar aracılığı ile deprem, şiddetli rüzgar vb. nedenlerle sisteme dışarıdan giren enerjiyi ısıya dönüştürür veya üzerlerine alırlar. Dolayısıyla, yapının bu dış etkilere karşı tepkisinde azalma meydana getirmek suretiyle, yapının dayanma kapasitesinin artmasını sağlarlar.

Pasif kontrol sistemlerinin hesabı kolay ve maliyeti düşüktür. Dışarıdan bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar. Dolayısıyla, deprem esnasında oluşabilecek güç kesintisinden etkilenmedikleri gibi, dış enerji vermediği için yapıda stabilite sorununa da neden olmazlar. Fakat bununla birlikte aktif kontrol sistemleri kadar etkin değildirler. Yapının ömrü boyunca maruz kalabileceği deprem şiddetleri göz önüne alınarak hesap edilirler. Tasarlanandan daha şiddetli bir deprem meydana gelirse yapıda büyük deformasyonlar oluşabilir.

Pasif kontrol sistemleri, pasif enerji sönümleyicileri ve sismik izolasyon sistemleri olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Pasif enerji sönümleyiciler, sisteme ilave edilen araçlar sayesinde sistemin enerji yutma kapasitesini artırır. Sismik izolasyon sistemleri ise, yapının zeminin titreşiminden izole edilmesi için genellikle temelle zemin arasına yerleştirilen cihazlardır.

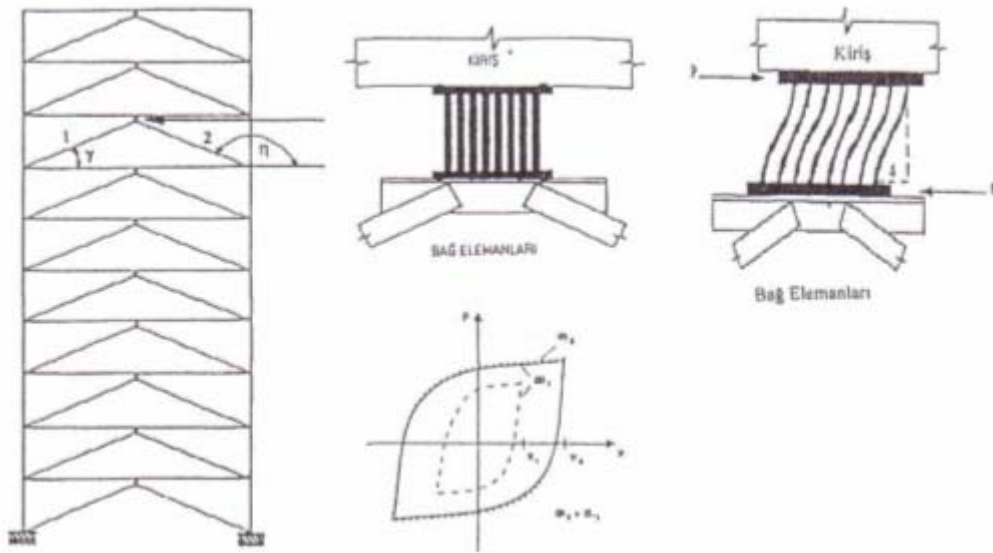
3.1.1 Pasif Enerji Sönümleyiciler

Pasif enerji sönümleyiciler; deprem ve şiddetli rüzgar gibi dış etkilerin yapıya verdiği enerjiden dolayı oluşan kesit zorlanmalarını ve yerdeğiştirmelerini istenilen düzeyde tutmak için geliştirilmiş mekanik aletlerdir.

Enerji sönümlemek, kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürmek veya enerjiyi titreşim modlarına transfer etmek şeklinde olabilir. Birinci yol sürtünme katsayısıyla, metallerin eğilmesiyle, metallerin faz değiştirmesiyle, viskoelastik katı ve sıvıların deformasyonu ile olabilir. İkinci yol ise yapıya sarkaç ilave ederek, sarkacın dinamik sönümleyici gibi davranmasını sağlayarak gerçekleştirilebilir.

3.1.1.1 Eğilmeli Metal Sönümleyiciler

Binaya yerleştirilen yumuşak çelik elemanların elastik olmayan deformasyon yapması sonucu enerji yutulur. Enerjinin belli noktalarda yoğunlaşması sağlanır ve bu sayede taşıyıcı sistem zarar görmez. Şekil değiştirmiş araçlar daha sonra sökülebilir ve yerine yenisi takılabilir. Bu sistem için bükülebilir kiriş, esnek kiriş, U-şerit enerji sönümleyici gibi bir çok eleman geliştirilmiştir. Şekil 3.1’de eğilmeli metal sönümleyiciler ve kuvvet-deformasyon grafikleri gösterilmektedir.

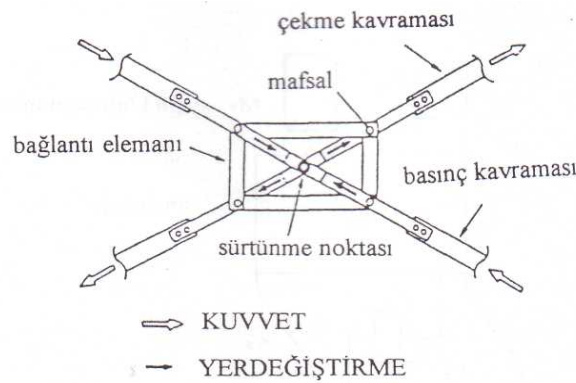


Şekil 3.1 Eğilmeli metal sönümleyiciler ve kuvvet-deformasyon diyagramı

3.1.1.2 Sürtünmeli Sönümleyiciler

1982 ve 1987’de Pall tarafından önerilen bu araçlar, yapı çerçevesine yerleştirilen diyagonal kavramalar arasına konulan ve hidrolik olarak çalışan enerji yutucu araçlardır (Şekil 3.2).

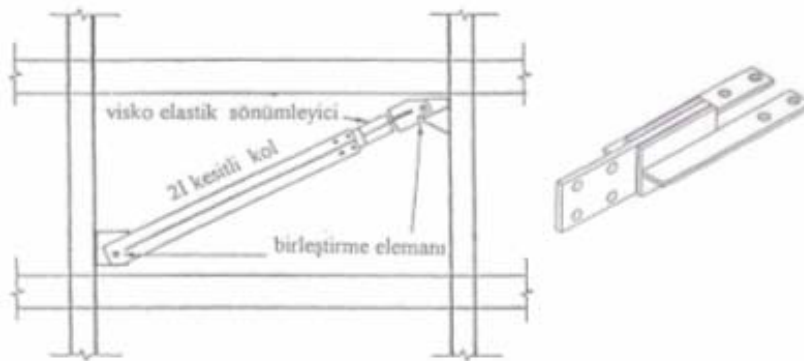
Japonya'da demiryolları ve yüksek binalarda kullanılmıştır. Deprem, rüzgar, dalga vb. sismik yükler yapıya etkidiği zaman, sürtünme noktasında gerilmiş olan (çekme etkisindeki) kavrama, kayma ile sürüklenmeye sebep olur ve bu sırada çapraz kavramalardan diğeri (basınç kavraması) burkulur. Çapraz kavramaların gerilmesi ve basınca maruz kalması sırasında her iki kavramada (basınç ve çekme kolunda) da enerji yutulması olur. Sönümleyiciler kavramalar gibi diyagonal olarak yerleştirilmezler, kat kirişlerine paralel olarak yerleştirilirler. Bu araçların yerleştirilmesi kolay ancak bakımı zordur. Metal yüzeyler arasındaki korozyonlanma ve kayma yüzeyindeki normal yük güvenli bir şekilde kontrol edilemez ve yıllar sonra bazı gevşemeler olabilir.



Şekil 3.2 Pall tarafından önerilen sürtünmeli sönümleyiciler (Soong ve Constantinou, 1994)

3.1.1.3 Viskoelastik Sönümleyiciler

Metalik sürtünmeli araçlar öncelikle sismik etki için tanımlanmıştır. Diğer taraftan viskoelastik katı maddeler, her seviyedeki deformasyon enerjisini azaltmak için kullanılabilir. Dolayısıyla viskoelastik sönümleyiciler hem rüzgar hem de depreme karşı korumada kullanılabilir. Şekil 3.3'de viskoelastik sönümleyici ve yapıya yerleştirilmesi gösterilmiştir.

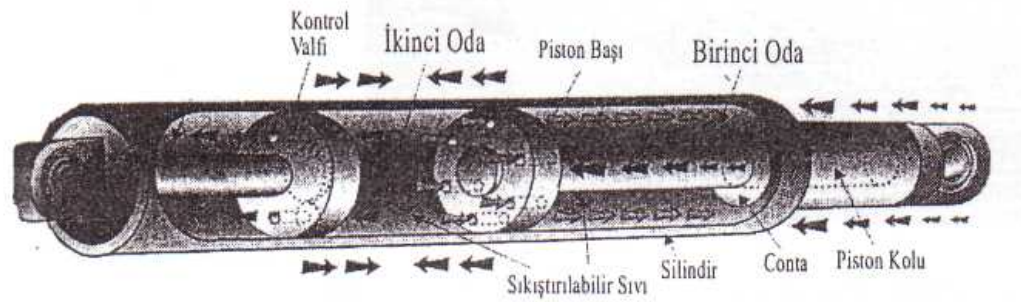


Şekil 3.3 Viskoelastik sönümleyiciler (Soong ve Constantinou, 1994)

Metalik ve sürtünmeli sönümleyicilerden farklı olarak viskoelastik sönümleyici içeren lineer yapı lineer kalmaktadır. İnşaat mühendisliğinde kullanılan viskoelastik malzemeler genelde copolimer veya camsı maddelerdir. Sönümleyiciler, viskoz sönümün artmasına yardımcı olduğu gibi yanal rijitliği de artırır.

3.1.1.4 Viskoz Sönümleyiciler

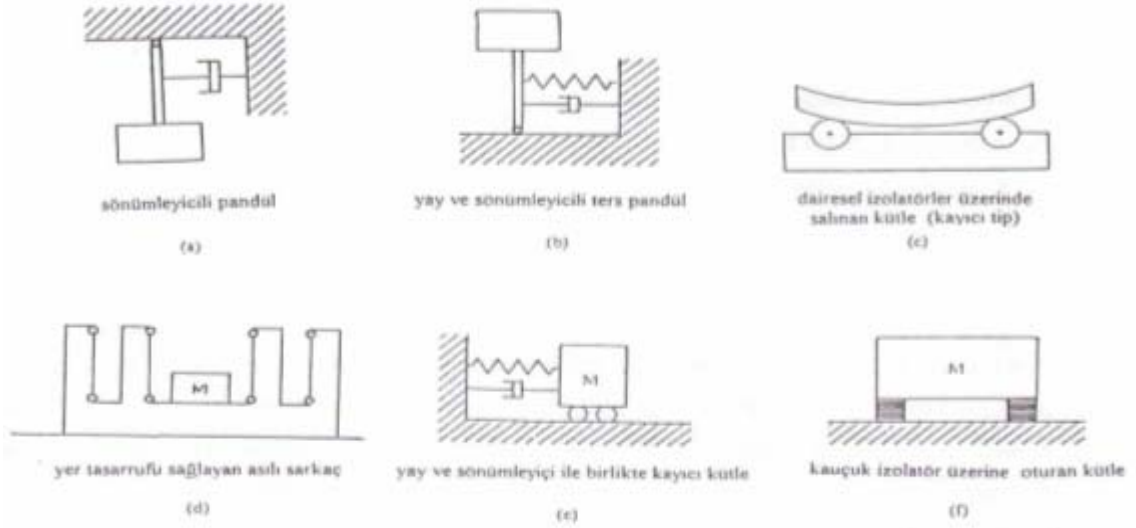
Viskoz sönümleyiciler genelde silikon veya yağın bir bileşeni ile dolu olup içlerinde piston bulundurmaktadırlar. Viskoz malzemenin geniş frekans aralığında etkili olması, ısıya duyarlı olması ve darbe etkisine karşı sıkıştırılamıyor olması gibi özellikler, bu malzemenin yapı uygulamalarında kullanılmasında etkili olmuştur. Viskoz sönümleyiciler uzun yıllar boyunca uzay çalışmaları ve askeri alanlarda, sonra otomotiv sektöründe kullanılmış olup, günümüzde yapı uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Viskoz sönümleyici

3.1.1.5 Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD)

Ayarlı kütle sönümleyiciler (Tuned Mass Damper), yapının dinamik davranışını istenen şekilde değiştirerek deprem etkilerinin hafifletilmesini sağlar. Bu sönümleyiciler frekansa bağlı bir hareket oluşturup yapının sürtünmesini arttıran, yay ve sürtünme elemanları ile uyumlu ikincil bir ağırlık içermektedir. Rüzgar etkisi altındaki yapılarda başarısı kanıtlanmıştır. Son yıllarda, ayarlı kütle sönümleyicilerin depremdeki etkisini arttırmak için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Şekil 3.5’de ayarlı kütle sönümleyici tipleri görülmektedir.

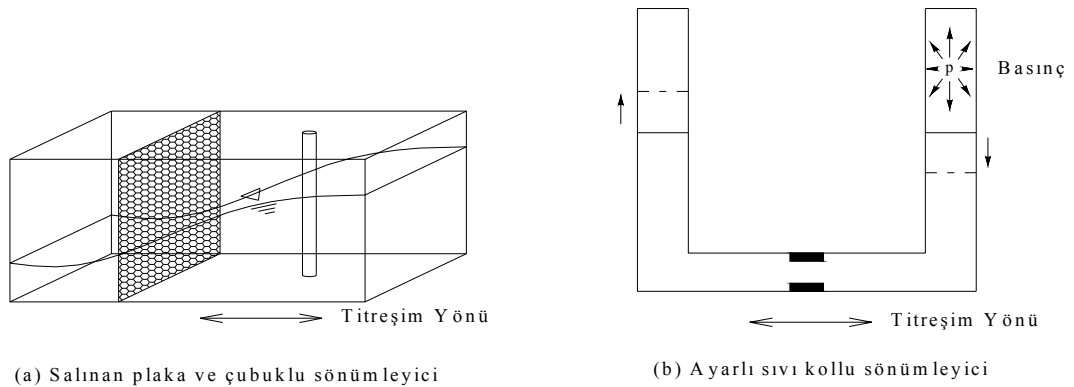


Şekil 3.5 Ayarlı kütle sönümleyici tipleri (Soong ve Constantinou, 1994)

3.1.1.6 Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (TLD)

Ayarlı sıvı sönümleyicilerin (Tuned Liquid Damper) temel amacı diğer sönümleyiciler gibi ana yapının kinetik enerjisinin yutulmasıdır. Çalışma prensibi genel olarak içinde sıvı bulunan kabın hareketi ve bu sıvının yerçekimine karşı yaptığı iş olarak açıklanabilir. Sıvı hareketi esnasında oluşan türbülans enerji yutulmasını sağlar.

- Salınan sönümleyiciler: Basit bir kap içerisindeki sıvıdan meydana gelir. Kabın içine yerleştirilen çubuk veya çelik plakalar sayesinde türbülans yaratılarak, sönüm artırılır. Titreşimin frekansı kabın büyüklüğüne, sıvının derinliğine ve vizkozitesine bağlıdır.
- Ayarlı sıvı kollu sönümleyiciler: Hava sıkıştırılmış kollardan oluşan basit bir düzendir. Kollardaki havanın basıncını ayarlamak suretiyle istenilen sönüm elde edilir.



Şekil 3.6 Ayarlı sıvı sönümleyicileri (Soong ve Constantinou, 1994)

Ayarlı sıvı sönümleyicilerin en büyük avantajı her iki yatay doğrultuda da titreşimin kolaylıkla kontrol edilebilir olmasıdır. Bunun yanında kontrol mekanizmasını harekete geçirmek için herhangi bir dış enerji kaynağına ihtiyaç yoktur. Sistemin basitliği nedeniyle maliyeti çok düşüktür ve herhangi bir eski binaya uygulanabilir. Fakat sistemin frekansı ile yapının doğal frekansının iyi ayarlanması gereklidir (Zobu, 1997).

3.1.2 Sismik İzolasyon Sistemleri

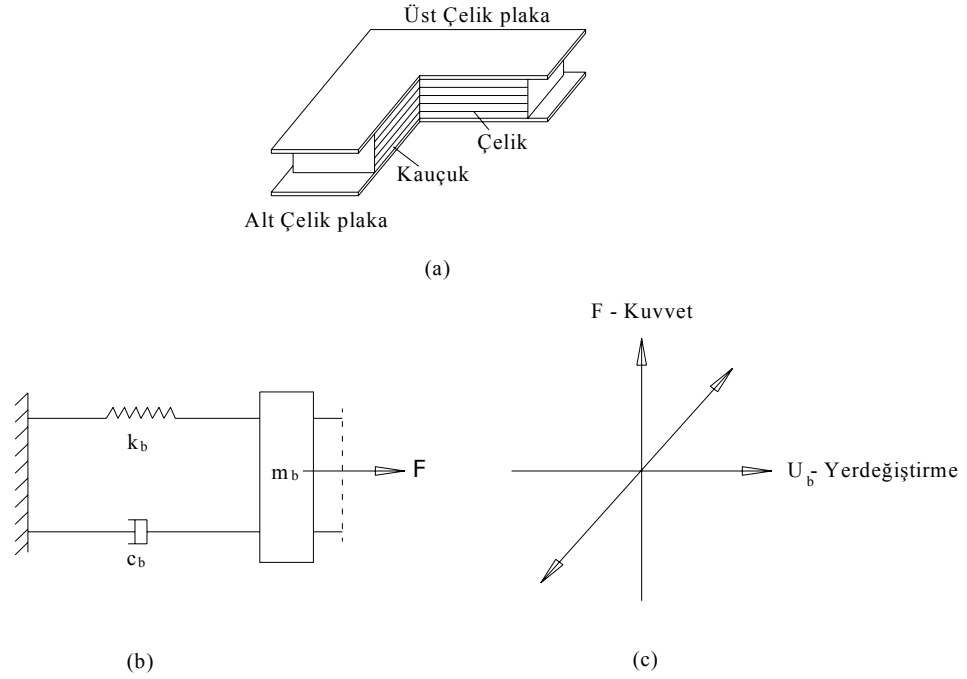
Yapıya en büyük zararı deprem hareketinin yatay bileşeni verir. Yapıya yerleştirilen taban izolasyon sistemleri, yatay ivmenin azaltılması amacıyla üst yapıyı temelden ayırarak zeminin hareketine izin verir. Sismik izolasyon sistemleri kullanıldığında yapının frekansı azalmakta başka bir deyişle periyodu artmaktadır. Periyodun artması yatay yerdeğiştirmelerin büyümesine neden olur. Bu yerdeğiştirmelerin büyük bir bölümü izolatörlere iletilir. Bir başka deyişle yapıda küçük yatay yerdeğiştirmeler, sismik izolasyonda ise büyük yatay yerdeğiştirmeler oluşur. Sistemde izolatörlerin bulunduğu kısımda meydana gelen büyük yer değiştirmeler aracılığı ile enerjinin sönümü sağlanır. Katlar arası yer değiştirmeler küçük kaldığı için deprem esnasında yapı rijit bir davranış gösterir (Özpalanlar, 2005).

Sismik izolasyon sisteminde kullanılan izolatör tipleri, şekilleri, kullanıldıkları yer, büyüklükleri ve yapıldıkları malzeme bakımından farklılıklar teşkil eder. Sismik izolasyonda kullanılan belli başlı yapılar aşağıda açıklanmıştır.

3.1.2.1 Düşük Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk Mesnetler (LDRB)

Düşük sönümlü doğal ve sentetik kauçuk mesnetler (Low Damping Rubber Bearings), kauçuk ve çelik plakalardan oluşmaktadır. Bu izolatörlerin iki adet kalın çelikten uç levhası ve bununla birlikte bu levhaların arasında da çok sayıda ince çelikten ara sac levhaları bulunmaktadır. Kauçuk malzeme, bir kalıp içinde uygulanan sıcaklık ve basınç altında tek bir işlem dahilinde, vulkanize edilmiş ve çeliğe bağlanmıştır (Yüce, 2003). Çelik ara tabakalar, kauçuk malzemenin iki yanından şişmesini yani yanal deformasyon yapmasını önlemekte ve yüksek bir düşey rijitlik sağlamaktadır. Ancak, çelik ara tabakaların, yatay rijitlik üzerinde hiçbir etkisi bulunmamaktadır. Yatay rijitlik, kauçuk tabakaların kalınlığına ve sayısına bağlıdır. Genellikle istenilen rijitlik tabaka kalınlığı sabit tutularak, kauçuk tabaka sayısının değiştirilmesi ile sağlanır. Kayma durumunda malzemenin davranışı, % 100'ün üzerindeki kayma şekil değiştirmelerine kadar oldukça lineerdir. Aynı zamanda kritik sönüm miktarı % 2-3 arasında değişmektedir. İzolatörlerin yüksekliğinin artması mekanizmada burkulmaya yol açtığından, yükseklik çapın yarısıyla sınırlandırılmıştır. İzolatör çapının 1

metreden fazla ve taşıma kapasitesinin 500 ton civarında alınması genellikle uygundur. Çelik plaka düşey yükler altında kauçuğun yanal deformasyonuna engel olur ve yükün üniform olarak dağılmasını sağlar. Bunun bir sonucu olarak da, düşey rijitlik yatay rijitlikten daha büyüktür. Düşük sönümlü kauçuk sistemlerde yerdeğiştirme ve kuvvet birbirine bağlı olarak lineer değişmektedir. Düşük sönümlü doğal kauçuk mesnetin elemanları, Şekil 3.7 a'da; şematik modeli, Şekil 3.7 b'de; ve lineer kuvvet-yerdeğiştirme davranışı, Şekil 3.7 c'de; gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnetler (LDRB) a) Kesit özellikleri b) Şematik modeli c) Lineer kuvvet –yerdeğiştirme davranışı

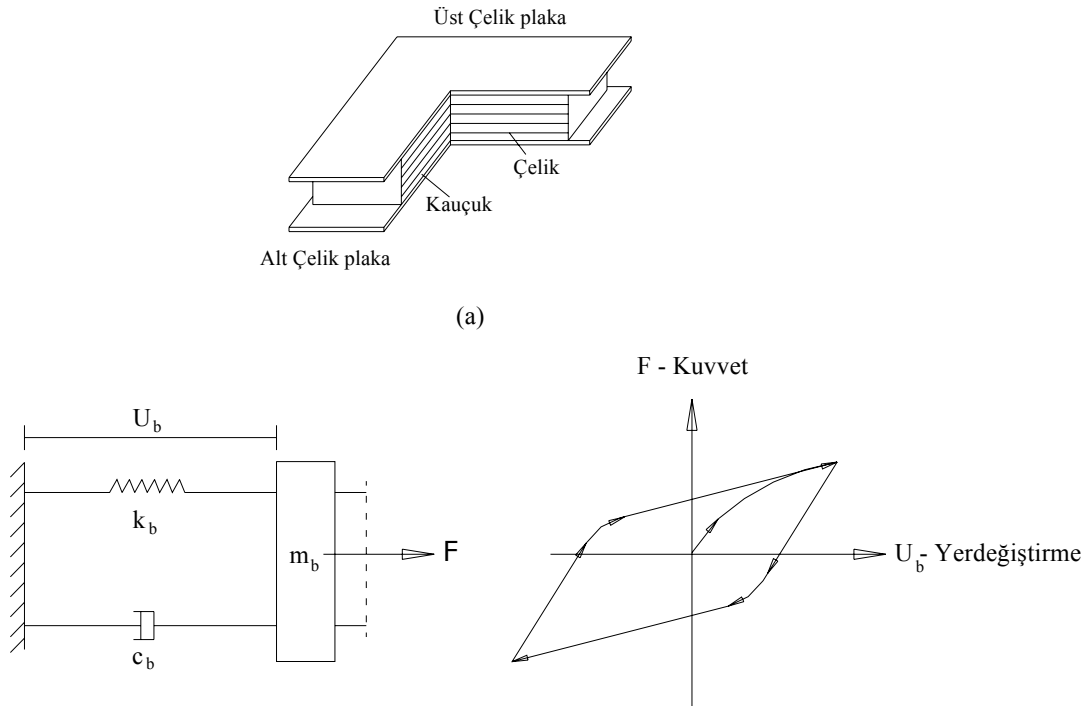
Düşük sönümlü doğal kauçuk izolatörler kolay imal edilebilmeleri, modellenmesinin kolay olması, mesnetlerin mekanik davranışının hız sıcaklık ve zamanla eskime gibi faktörlerden etkilenmemesi gibi avantajlara sahiptir. Ek bir sönüm kuvvetine ihtiyaçları olması tek dezavantajlarıdır. Bu ek sistemler; çok karmaşık ve girift bağlantılar gerektirmekte, metalik sönümleyiciler durumunda ise kısa sürede yıpranmaktadırlar. Japonya’da bu sistemin pek çok uygulamaları mevcuttur.

3.1.2.2 Yüksek Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk Mesnetler (HDNR)

Yüksek sönümlü doğal ve sentetik kauçuk mesnetlerde (High Damping Natural Rubber), mesnetler doğal kauçuktan yapılmıştır. İngiltere'ye bağlı Malaysian Rubber Producers Research Association (MRPA) kurumu tarafından 1982 yılında, ek sönüm elemanlarına olan

ihtiyacı gidermek üzere, yeterli içsel sönümü olan doğal kauçuk bir bileşimin geliştirilmesi başarılmıştır. Sönüm miktarı, aşırı saf karbon blok, yağlar veya reçineler ve diğer patentli katkı maddeleri eklenilmesi suretiyle artırılmaktadır. % 100 oranındaki kayma şekil değiştirmelerinde, sönüm % 10 ve % 20 arasındaki mertebelere çıkarılmıştır. Sönümün, düşük sertliğe karşı gelen (50-55 durometer) küçük değerlerinde kayma modülü 0.34 Mpa civarında olmaktadır. Bununla birlikte, sönümün yüksek katılığa karşı gelen (70-75 durometer) büyük değerlerinde ise kayma modülü de yükselmekte ve 1.40 Mpa değerine ulaşmaktadır.

Malzeme % 20'den az orandaki kayma şekil değiştirmelerinde nonlinear davranmaktadır. Bununla birlikte; rüzgar yükü ve düşük düzeyli deprem yüklemesi altındaki davranışının minimize edilmesine yol açacak şekilde, daha yüksek rijitlik ve daha yüksek sönüm vasıtasıyla karakterize edilmektedir. % 20 ila % 120 arasındaki kayma şekil değiştirme oranlarının ötesinde, kayma modülü düşük ve sabit olmaktadır. Büyük şekil değiştirmelerde, bir şekil değiştirme kristalizasyonu işlemine bağlı olarak kayma modülü artmaktadır. Bununla beraber, enerji yutulmasında da bir artış meydana gelmektedir. Yüksek sönümlü doğal kauçuk mesnetin elemanları Şekil 3.8 a'da, şematik modeli Şekil 3.8 b'de ve nonlinear kuvvet-yerdeğiştirme davranışı Şekil 3.8 c'de gösterilmiştir.

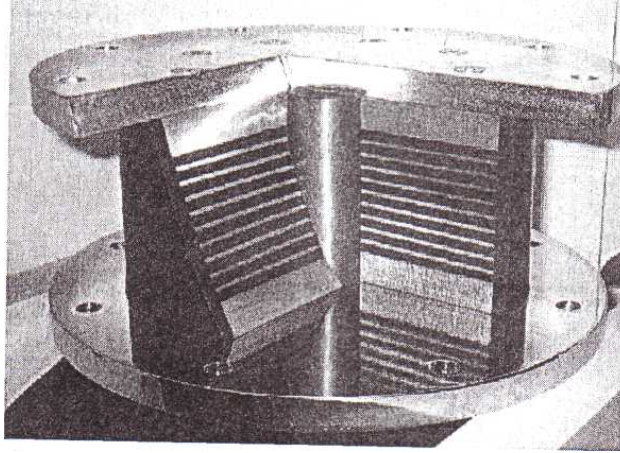


Şekil 3.8 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet (HDNR) a)Yüksek sönümlü kauçuk mesnetin elemanları b) Şematik model c) Nonlinear kuvvet-yerdeğiştirme davranışı

Yüksek sönümlü doğal kauçuk sistemin bir diğer avantajı çevresel titreşimin azaltılmasında, bir aşama sağlamasıdır. İzolatörler; trafik ya da yakınında bulunan bir metro hattı nedeniyle meydana gelebilecek yüksek frekanslı düşey titreşimleri dışarı süzmek için harekete geçmektedir. Bu sonuç, 1985 yılında Earthquake Engineering Research Center (EERC)'da uygulanan bir sarsma masası test programında gösterilmiştir.

3.1.2.3 Kurşun Çekirdekli Doğal Kauçuk Mesnetler (LBR)

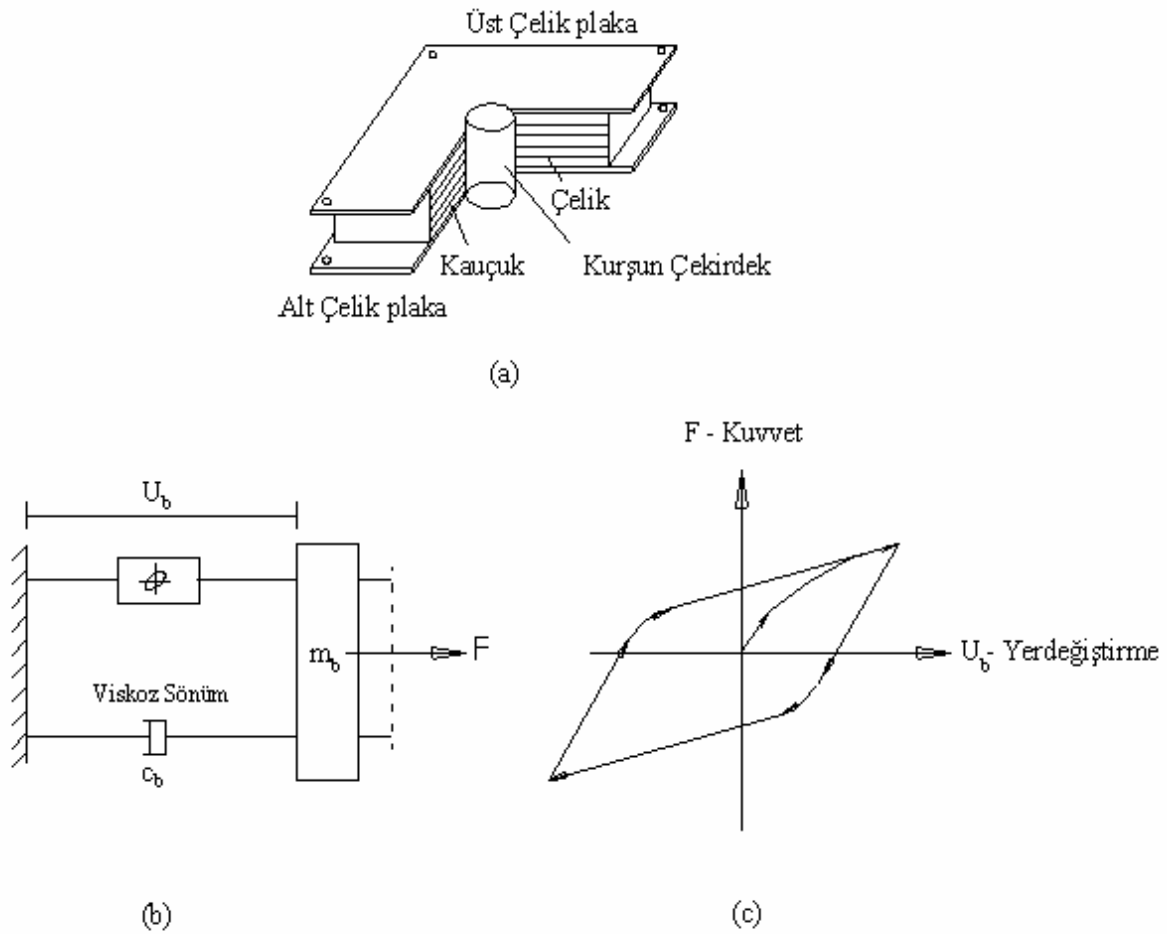
Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler, tabakalı kauçuk sisteminin benzeridir. Fakat burada ek rijitlik sağlamak amacıyla kurşun saplama çekirdek kullanılmıştır. Kurşun çekirdeğin boyutları başlangıç rijitliğine, yükün büyüklüğüne göre sistemin ihtiyaç duyduğu şekilde belirlenir. Kurşun çekirdek enerji absorbe edebilme özelliğiyle izolatörün yatay yerdeğiştirmesini azaltmaktadır. Bu sistem prensip olarak histeretik sönümleyiciler gibi davranmaktadır. Bu da kuvvet-yerdeğiştirme davranışının nonlinear olmasına neden olur.



Şekil 3.9 Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet

Şekil 3.9'da kurşun çekirdekli kauçuk mesnet'in resmi verilmiştir. Kurşun çekirdekli izolatörler, düşük sönümlü kauçuk izolatörlere benzer olarak, ince tabakalara ayrılmış kauçuk izolatörlerdir. Ancak bu izolatörlerin düşük sönümlü kauçuk izolatörlerden farkı, Şekil 3.10 a'da gösterildiği gibi, deliklerin arasına sokulmuş bir tane ya da daha fazla sayıda kurşun çekirdeklerin kullanılmasıdır. İzolatörün içindeki çelik levhalar, kurşun çekirdeği kayma sırasında şekil değiştirmeye zorlamaktadır. İzolatörün içindeki kurşun, 10 Mpa civarındaki bir kesme gerilmesinde fiziksel olarak şekil değiştirmektedir. Böylelikle izolatörün nonlinear bir davranış göstermesi sağlanmaktadır. Bu tip mesnetlerde sönüm %15 ile 30 arasında olabilmektedir. Kurşun çekirdeğin enerji sönümleme kapasitesi izolatörün

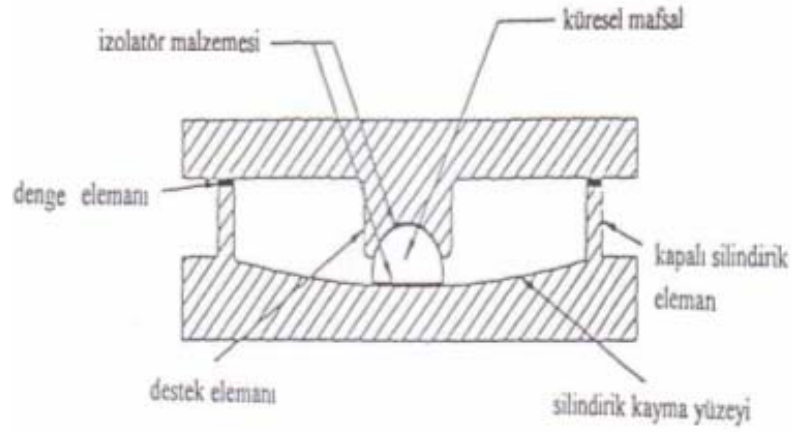
yatay yerdeğiştirmesini azaltır. Bu sistem prensip olarak histeretik sönümleyici aletler gibi davranmaktadır. Bu nedenle kurşun çekirdekli izolatörlerin kuvvet - yerdeğiştirme karakteristik özelliği, lineer olmayan diferansiyel denklemler kullanılarak modellenebilmektedir. Bu izolatör sisteminin en önemli sakıncası; şiddetli yer hareketinden sonra kurşun çekirdeğin zarar görüp görmediğinin dışarıdan tespit edilememesidir. Bu izolatörlerle sismik izolasyonu yapılan binalar, 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinde iyi bir performans sergilemişlerdir. Bu mesnetlerin kesiti Şekil 3.10 a'da, şematik modeli Şekil 3.10 b'de ve nonlinear kuvvet-yerdeğiştirme davranışı da Şekil 3.10 c'de verilmiştir.



Şekil 3.10 Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet

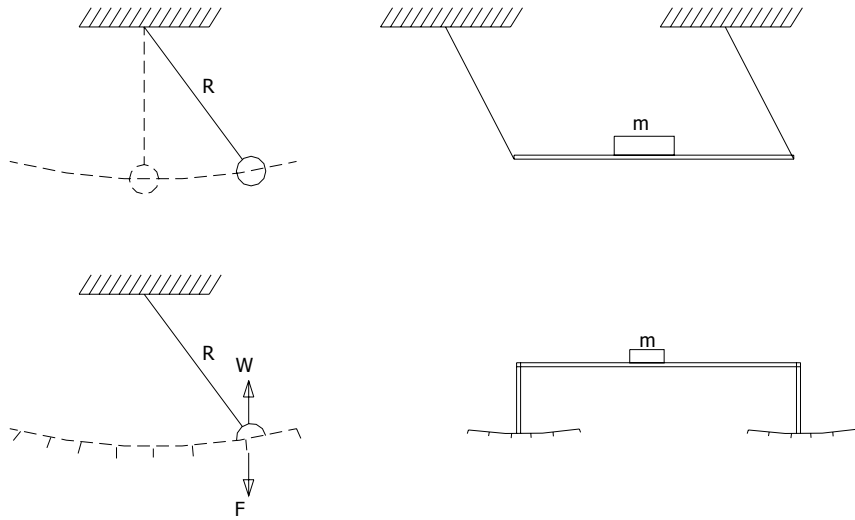
3.1.2.4 Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (FPS)

Sürtünmeli sarkaç sistemler (Friction Pendulum System) çelik mesnetlerdir. Düşük sürtünmeli, büyük yükleme kapasiteli paslanmaz çelik mafsallı, içbükey yatak üzerinde kayıcılığı sağlamaktadır. Şekil 3.11'de sürtünmeli sarkaç sistemin kesiti ve elemanları gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Sürtünmeli Pandül Sistemi (Soong ve Constantinau, 1994)

Sürtünme ve sarkaç hareketi sistemin çalışmasını sağlayan iki mekanizmadır. Sürtünmeli sarkaç sistemlerde, istenilen sismik izolasyon sonuçlarını elde ederken ağırlık ve geometriden yararlanılmaktadır. Şekil 3.12’de sürtünmeli sarkaç sistemlerinin hareket mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Sürtünmeli sarkaç sistemlerin hareket mekanizmaları

İzolatörün efektif rijitliği ve yapının izolasyon periyodu, içbükey yüzeyin eğrilik yarıçapı vasıtasıyla kontrol edilmektedir. İzolatörün titreşim periyodu,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

R: Küresel yüzeyin eğrilik yarıçapı,

g: Yerçekimi ivmesi.

Yukarıdaki ifadede görüldüğü üzere titreşim periyodu, kütleden bağımsız ancak içbükey yüzeyin eğrilik yarıçapına bağlıdır. Böylelikle yapının izolasyon periyodu tek parametreye bağlı olduğundan, değiştirilmesi kolaydır. İzolatörlerin sürtünme kuvveti aşıldığında, izolasyonlu periyot aktif hale gelmektedir. Kayma hareketi başladığında aktif olan sürtünme kuvveti, mesnet malzemesinin seçimi ile kontrol edilir. Deprem kuvvetleri sürtünme kuvvetinden az olduğu sürece, sarkaç sistemlerle mesnetlenen yapı, titreşimin izolasyonsuz periyoduna karşılık gelen bir tepki gösterecektir.

Deprem hareketi sırasında mafsal, kayıcı içbükey yüzey üzerinde kayarak kütlenin yükselmesine neden olacaktır. Üst yapının yavaşça yükselmesi kinetik enerjiyi potansiyel enerjiye dönüştürür. Dinamik hareket ortadan kalktıktan sonra sarkaç, ilk sabit denge durumuna ulaşınca kadar hareketini yeniler. İzolatör, üst yapı kütlesinden dolayı deprem hareketinden oluşacak enerjiyi gerekli oranda yutar. Kayıcı mafsal çapı, yükleme durumuna göre boyutlandırılır. Depremde oluşacak maksimum yerdeğiştirmeye bağlı olarak, bağlantı halkasının çapı boyutlandırılır. İçbükey yüzeyin üstte veya altta olması izolatörün davranışını değiştirmez.

Sürtünmeli sarkaç sistemin önemli ikinci mekanizması, sürtünmeyle deprem enerjisinin yutulmasıdır. Deprem hareketi sırasında, yanal rijitlik ve her bir yatakta oluşan sürtünme kuvveti, yatak üzerine mesnetlenen ağırlıkla direkt olarak ilgilidir. Bu nedenle yapı ağırlık merkeziyle, yatakların rijitlik merkezi çakışmalıdır. Bu, mesnetlenen yapının burulma hareketini ortadan kaldırır.



Şekil 3.13 Sürtünmeli sarkaç sistemlerin başlangıç ve yerdeğiştirme konumları

Mafsallı kayıcının kenarı, düşük sürtünmeli kompozit bir malzeme ile kaplanmıştır. Kayıcının diğer kenarı da tam küresel olup, paslanmaz çelik ile kaplıdır ve yine düşük sürtünmeli kompozit malzeme ile kaplanmış küresel bir oyuk içinde oturmaktadır. Kayıcı, küresel yüzey üzerinde hareket ettikçe taşınan kütlenin yükselmesine yol açmakta ve sistem için geri dönüş kuvveti sağlamaktadır. Mafsallı kayıcı ve küresel yüzey arasındaki sürtünme, izolatörlerde sönüm meydana getirmektedir. Şekil 3.13’de sürtünmeli sarkaç sistemlerin başlangıç ve yerdeğiştirme konumları gösterilmiştir.

Sürtünmeli sarkaç sistemlerinde bulunan koruyucu silindir, yatay yerdeğiştirmelerin engellenmesinde etkili olmaktadır. Ayrıca, iç elemanların çevresel kirlilikten korunmasını sağlamaktadır. Koruyucu silindir tarafından sağlanan yerdeğiştirme sınırlandırması, deprem yüklerinin hesap yüklerini büyük miktarda aşması halinde, çok önemli bir emniyet sağlamaktadır.

3.1.2.5 Esnek Sürtünmeli Taban İzolasyonu (R-FBI)

Esnek sürtünmeli taban izolasyonu (Resilient-Friction Base Isolation), son yıllarda Mostaghel ve Khodaverdian tarafından önerilmiştir. Bu taban izolatörleri, birbirleriyle sürtünmeli olarak temas eden teflon kaplamalı eşit merkezli daireler halindeki plakalardan ve merkezi bir kauçuk çekirdekten oluşmaktadır. Esnek sürtünmeli taban izolasyon sistemi, yüksek kayma hızlarında paslanmaz çelik üzerindeki teflonun yüksek sürtünme katsayısı probleminin üstesinden gelmeye çalışmaktadır. Bunun için, tek bir izolatör içinde çok sayıda kayıcı ara yüzeyler kullanma yöntemine gidilmektedir. Böylece izolatörün üst ve alt yüzleri arasındaki hız, tabakaların sayısına bölünmektedir. Bu sayede düşük bir sürtünme katsayısı korunarak, her bir yüzdeki hız değeri küçük olmaktadır.

Merkezi kauçuk çekirdek, hiç bir düşey yük taşımamakta, sadece yerdeğiştirme ve hızın, mesnet yüksekliği boyunca üniform olarak dağıtılmasını sağlamaktadır. Kauçuktaki kesme gerilmesini sınırlandırmak ve daha büyük yerdeğiştirme yeteneği kazandırmak amacıyla çelik levhalı tabakalı kauçuk mesnetlere, sürtünmeli plaka eklenerek esnek-sürtünmeli taban izolasyon sistemleri düzenlenmiştir.

Esnek sürtünmeli taban izolasyon sistemi, merkezi ve çevresel kauçuk çekirdekle birlikte birbirleri üzerinde kayabilen yassı halkalardan oluştuğu için kayıcı tipli izolasyon sistemleri grubuna girmektedir ve bir çok deneyle deprem etkisi altında davranışı denenmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bu sistem üzerinde yapılan testlerde kauçuk çekirdeğin, yerdeğiştirmenin tek bir ara yüzeyde toplanmasını önleyemediği görölmüştür. Bu nedenle kauçuk çekirdeğin içine, kayıcı tabakalar arasındaki yerdeğiştirme dağılımlarını düzelten, merkezi bir çelik çubuk koyulmuştur. 1988 yılında EERC'de yapılan bir deneysel çalışma dahilinde, beş katlı ve 40 ton ağırlığındaki bir çelik çerçeve modelinde esnek sürtünmeli taban izolatörleri kullanılmış ve bu model sarsma masası deneyi ile test edilmiştir.

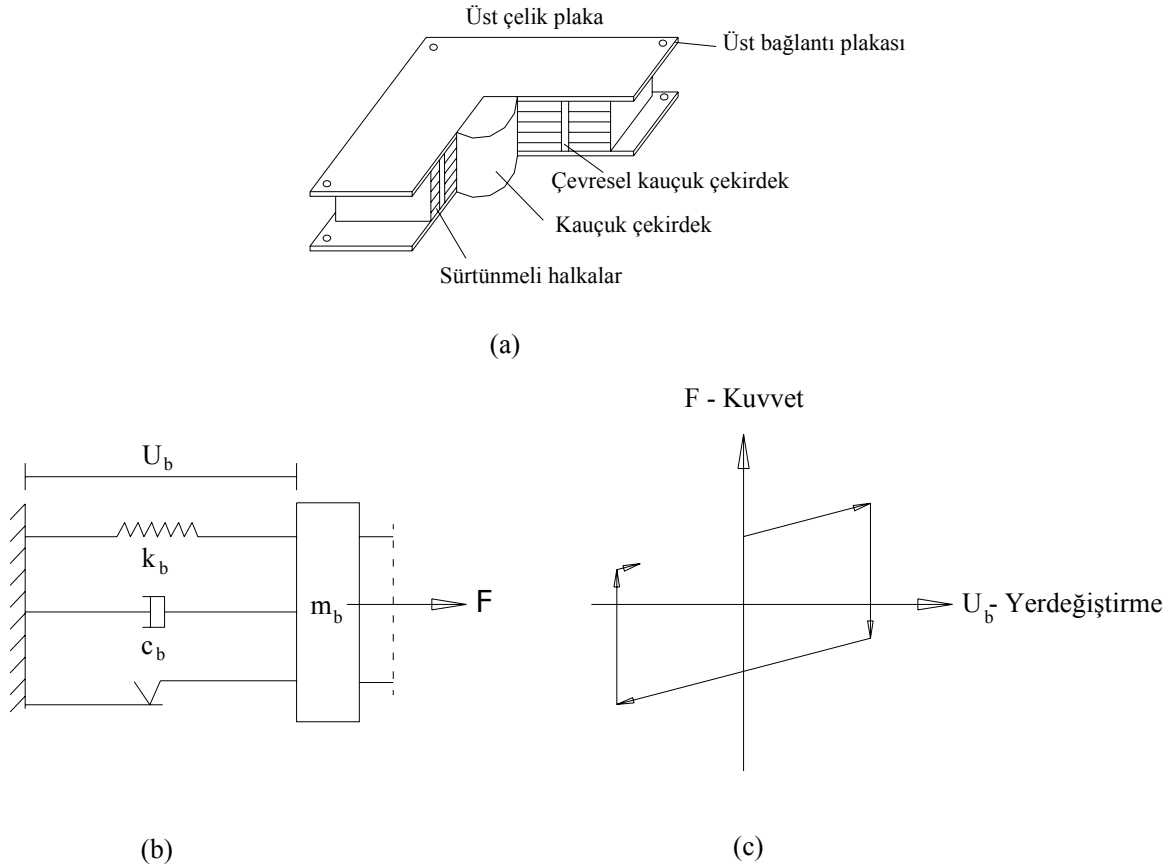
Kauçuk kılıf, mesnedi toz ve paslanma gibi dış etkilere korumakla birlikte halkaların aşınmasına engel olur. Kauçuğun sönüm yeteneği azdır. Bu nedenle enerji yutulmasında sürtünme kullanılmaktadır. Ayrıca, mesnet elemanları kauçuk çekirdeğin toplam yanal rijitliği ve sürtünme katsayısına göre karakterize edilmektedir. Yer hareketinin düşey bileşenine karşı etkinliği çok azdır.

Esnek sürtünmeli sistemlerin düzenlenmesindeki en önemli neden kayıcı sistemlerin, sistemi ilk sabit dengeli durumuna geri döndürecek kuvvete sahip olmamasıdır. Kayıcı sisteme esnek çekirdeğin eklenmesiyle bu sağlanmış olur. Ayrıca, esnek kayıcı sistemler temel yerdeğiştirmesini kontrol altında tutmaktadır.

Hareket, sürtünme kuvvetini yenene kadar mesnetlerde kayma oluşmaz. Mesnetler kaymaya başladığında kauçuk deforme olur ve sistemi eski denge haline döndürecek elastik kuvvet oluşur. Kauçuk çekirdek, yanal yerdeğiştirmeyi ayırıcının yüksekliğine çaprazlamasına dağıtır ve ağırlık yükü taşımaz. Kayma hızı kullanılan kayıcı levha sayısına göre istenilen düzeyde tutulabilmektedir. Sürtünme kuvveti enerji yutma görevini üstlenmiştir.

Esnek sürtünmeli sistem, rijitlik merkezi ve kütle merkezini izolasyon seviyesinde çakıştırdığından, simetrik olmayan yapıların düzenlenmesinde de kolaylıkla kullanılır. Sistemdeki sürtünme, rüzgar gibi düşük genlikli yanal hareketlerden tabanı korumaktadır. Sistemdeki elastik elemanlar sadece yer hareketinden doğan yanal yüklere maruz kalırlar. Ağırlık yükleri genellikle daha rijit olan kayıcı bölümlerce taşınmaktadır. Bu da ağırlık yükleri altında esneme ile ilgili problemleri azaltır. Böylece sistemin yerdeğiştirme kapasitesini ve stabilitesini de artırır.

Bu mesnetlerin kesiti Şekil 3.14 a'da şematik modeli Şekil 3.14 b'de ve nonlinear kuvvet-yerdeğiştirme davranışı da Şekil 3.14 c'de verilmiştir.



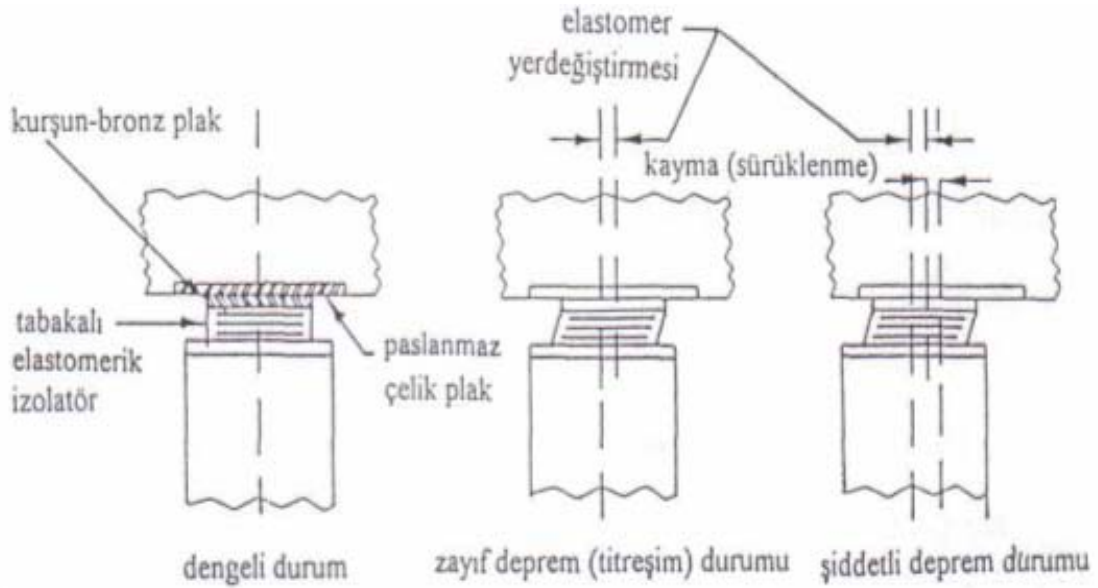
Şekil 3.14 Esnek sürtünmeli sistemler

3.1.2.6 Elektricité-de France Sistemi (EDF)

Bu sistem, Fransız elektrik kurumunun (Electricité-de-France) desteğiyle nükleer elektrik santrali tesislerine yapılacak uygulama için, 1970'li yılların başlarında geliştirilmiştir. Söz konusu kuruluş, içinde güvenliğinin sağlanması gereken donanımına sahip ve 0.2 g'lik ivmeye dayanacak nitelikte, standart bir nükleer elektrik santrali geliştirmişti. Santral, daha yüksek deprem riski olan yerlere yerleştirilmek üzereyken, donanımın ivme mertebelerini binanın sahip olduğu sınır değerinin altında tutmak için izole edilmiştir.

Sistem; tabakalı sentetik kauçuk izolatorleri, paslanmaz çelikte temas halinde olan kurşun-bronz alaşımı ile birleştirmektedir. Sistemin kayıcı yüzeyi ise, elastomerik izolatorün üstüne oturtulmaktadır. Kayıcı yüzeyin sürtünme katsayısının, izolatorün servis ömrü göz önüne alınarak, 0.2 olması gerekmektedir. Suni kauçuk tampon, ± 5 cm gibi çok düşük bir yerdeğiştirme kapasitesine sahip olup, meydana gelen yerdeğiştirmelerin bu sınır değeri aşması halinde, kayıcı eleman öngörülen yeterli hareketi sağlamaktadır.

Sistem, mesneti düzeltici yani merkeze geri çeken herhangi bir mekanizmaya sahip değildir. Bu nedenle sistemde kalıcı yerdeğiştirmeler meydana gelebilir. Sistem şimdiye kadar sadece bir kez, Güney Afrika Cumhuriyeti'ne bağlı Koeberg şehrinde inşa edilen büyük bir nükleer elektrik santralinde uygulanmıştır. Elastomerli EDF sisteminin dengeli durum, zayıf deprem ve şiddetli deprem durumuna göre davranışı Şekil 3.15'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Elastomerli EDF sistemi (Soong ve Constantinau, 1994)

3.1.2.7 EERC Bileşik Sistemi

Kauçuk esaslı ve kayıcı sistemin kombinasyonuyla oluşturulmuş bir sistemdir. Yapının iç kolonları teflon kaplı paslanmaz çelikten yapılmış kayıcı elemanlar tarafından taşınır. Dış kolonlar düşük sönümlü doğal kauçuk mesnetler üzerindedir. Kauçuk mesnetler yapının burulma davranışını kontrol ederler. Kayıcı elemanlar ise sönüm yaratır.

Bu sistemin bir başka şekli, hem Nevada Üniversitesi Maden Fakültesi Binası, hem de Kaliforniya eyaletine bağlı Willowbrook'ta inşa edilen M.L. King, Jr. Travma Teşhis ve Tanı Merkezi Hastanesi binasının güçlendirilmeleri için kullanılmıştır. Her iki yapıda, yüksek sönümlü doğal kauçuk izolatörler (HDNR) kullanılmıştır. Üniversite binasında, teflon yüzeyli, paslanmaz çelikten kayıcı elemanlar kullanılırken, hastane binası için ise paslanmaz çelik üzerinde kurşun-bronz alaşımlı levhalar kullanılmıştır.

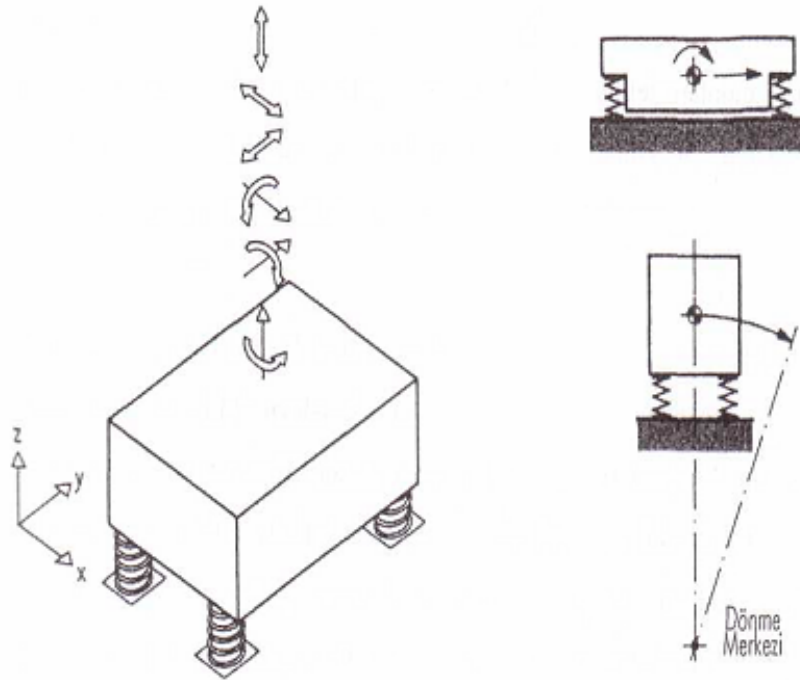
3.1.2.8 Yay Tipi Sistemler

Kauçuk esaslı ve kayıcı izolasyon sistemleri, genellikle yatay yönde izolasyonu sağlamak amacıyla kullanılırlar. Eğer düşey yönde de izolasyon sağlanmak isteniyorsa kullanılması tercih edilen izolasyon sistemleri, sarmal yaylardan oluşan izolasyon sistemleridir.

Sarmal yaylardan oluşan sismik izolasyon sistemleri, genellikle enerji santralleri ve fabrikalar gibi tesislerdeki büyük makinelerin yapıda yaratacağı titreşimi önlemek için kullanılır.

Bu tip sistemlerde, yaylar düşey harekette yatay harekete göre çok fazla rijit değildir. Buna karşılık tabakalı kauçuk mesnetlerin düşey rijitliği, yatay rijitliğin birkaç yüz katı olabilmektedir. Sarmal yaylardan oluşan sistem, üzerindeki binayı yer hareketinin düşey bileşeninden de bir dereceye kadar ayırır (Şekil 3.16).

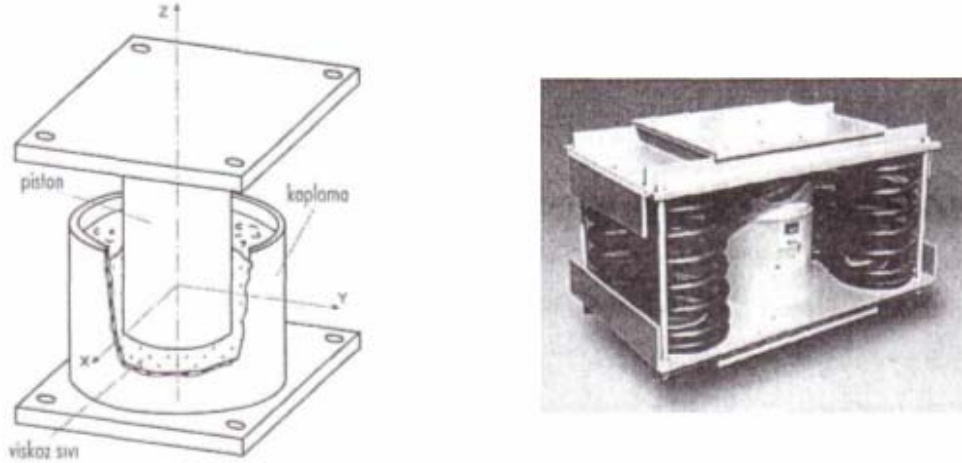
Çekme gerilmesi taşıyamayan çelik yaylarda salınım hareketinin neden olacağı çekme gerilmesi problem olabilmektedir. Bu nedenle de hem çekme hem de basınç kuvvetini taşıyabilecek viskosönümlü yaylar üretilmiştir. Bu yaylar aynı zamanda standart titreşim problemlerinde deprem rezonans büyütmesini sınırlandırmaktadır.



Şekil 3.16 Yay sistemi serbestlik dereceleri

Vizkosönüm, iki ayrı parçadan oluşmaktadır. Yüksek viskoz sıvıyla doldurulmuş yuva temele montajlanır. Sönümün diğer bir parçası da yayla mesnetlenmiş yapıya civatalanmış pistondur

(Şekil 3.17). Piston, viskoz sıvı nedeniyle, kesmeye göre tüm serbestlik derecelerinde hareket edebilmektedir. Bu yolla mekanik enerjiyi, ısı enerjisine dönüştürebilmektedir. Bu matematik modelleme bakımından oldukça karmaşıktır. Viskoz sönümle birlikte sistemde, %20-30 civarlarında düşey doğrultuda kritik sönüm sağlanabilmektedir. Basınca çalışan çelik yayların üst ve altlarından çelik plakalara vidalanmasıyla çekmeye karşı çalışması da sağlanmış olur.



Şekil 3.17 Viskosönüm detayı ve viskosönümlü yay sistemi

3.2 Aktif Kontrol Sistemleri

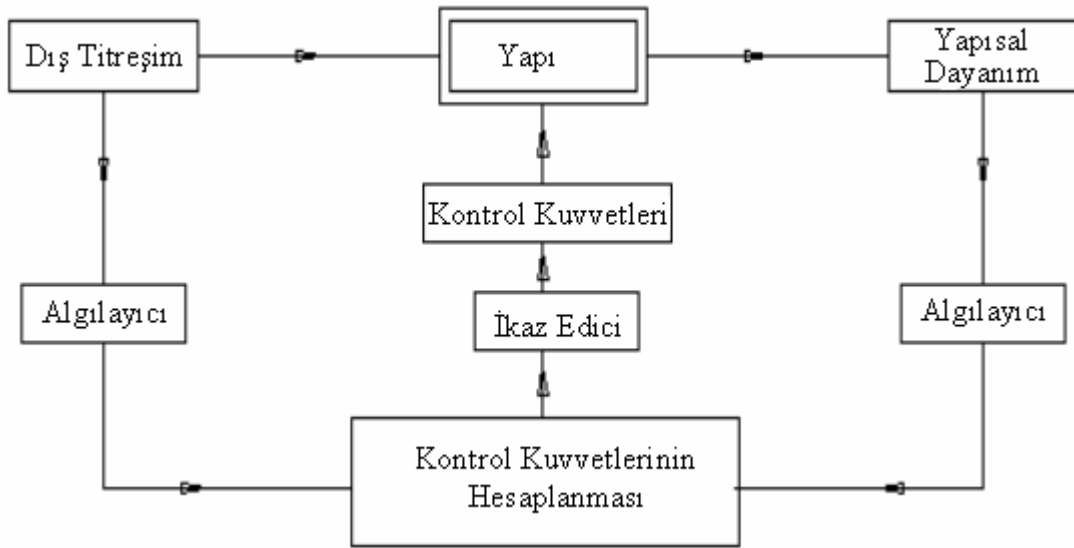
Son yıllarda yapıların titreşimini azaltmak, yapıyı kullananların güvenliğini artırmak isteğinden dolayı önem kazanmıştır. Burada amaç, sadece büyük depremlere karşı koruma sağlamak değil, aynı zamanda değerli malzemelerin binada bulunduğu durumlarda malzemelerin zarar görmelerini önlemek ve orta şiddetli depremlerin oluşturduğu titreşimler karşısında bina içinde yaşayanların konforunu artırmaktır.

Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla yapının yerdeğişimini istenilen düzeyde tutmak için geliştirilen sistemlerdir. Aktif kontrol sistemlerinin geliştirilmesinin başlıca sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yeni malzemelerin keşfinden sonra binalar artık daha yüksek ve daha esnek hale gelmişlerdir. Aktif kontrolün yerleştirilmesinin bir amacı, aşırı titreşimlere karşı binayı korumaktır.
- Aktif kontrol sisteminin yapının sağlamlaştırılmasında kullanılmasının bir diğer nedeni de pasif kontrol sistemleri gibi çok yer kaplamamasıdır. Aktif kontrol sistemleri, binaya daha az yer kaplayacak şekilde monte edilebilir.

- Yapılar tüm olası dış yüklere karşı koyabilecek şekilde projelendirilmemişlerdir. Beklenmeyen bir yükleme oluştuğunda yapı zarar görebilir, hatta yıkılabilir. Aktif kontrol kullanılmadığında yıkılabilecek bir bina, aktif kontrol sistemi kullanılarak kurtarılabilir. Bu ekstra koruma, deniz üzerindeki platformlar, hastaneler ve nükleer enerji santralleri gibi pahalı yapılar düşünüldüğünde çok önemlidir.
- Bazı yapılar değerli veya çok hassas malzemeleri barındırıyor olabilir. Bu elemanların düzgün çalışması hayati önem taşıyabilir. Aktif kontrolün monte edilmesi ile bu elemanların uygun koşullarda çalışmaları sağlanabilir.
- Pasif kontrol elemanları yapının depreme karşı performansını artırmakla birlikte sistemin doğasından kaynaklanan birtakım nedenlerle başarıları sınırlı kalmaktadır. Örneğin ayarlı kütle sönümleyiciler genelde birinci mod frekansa göre ayarlandıkları için sadece birinci modun etkin olduğu titreşimlerde etkilidirler. Ancak aktif kontrol sistemleri daha geniş bir frekans aralığında başarılıdır.
- Aktif kontrol elemanlarının yapıya uygulanması, malzemenin iyi kullanılmasını ve maliyetin düşmesini sağlayabilir.

Modern kontrol teorileri makine ve elektrik mühendisliği uygulamalarının inşaat mühendisliği alanına uygulanması ile oluşturulmuştur. Araştırmalar aktif kontrol sistemlerinin ani karşılık fonksiyonundan dolayı yüksek titreşim kontrolünü neredeyse tüm yapılarda sağlayabileceğini göstermiştir. Aktif kontrol sistemlerinin çalışma şeması Şekil 3.18 'de görülmektedir.



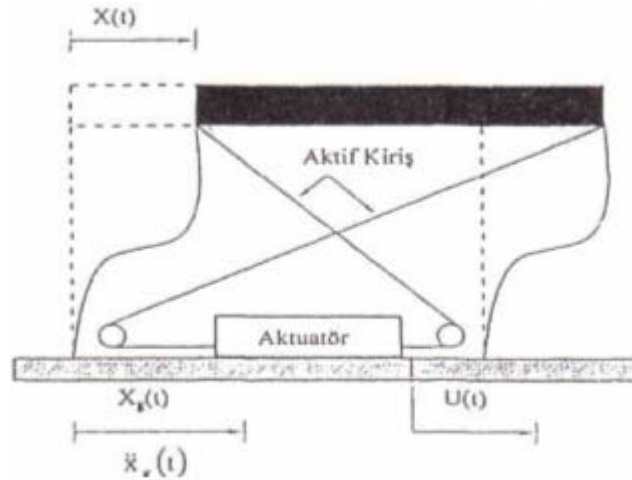
Şekil 3.18 Aktif kontrol sistemlerinin çalışma şeması

Yapıların kontrolü için birçok sistem geliştirilmiştir. Bunlar:

- Aktif Kiriş Kontrolü
- Aktif Kütle Sönümleyicisi
- Yerçekimini Harekete Geçirici Sistem
- Aktif Rijitlik Değiştirici
- Aktif Kablo Kontrolü

3.2.1 Aktif Kiriş Kontrolü

Aktif kiriş kontrol sistemi, gerilimi elektrohidrolik mekanizma tarafından kontrol edilen binaya bağlanmış öngerilmeli kirişlerden oluşmaktadır (Şekil 3.19). Kontrol bilgisayarına binanın çeşitli yerlerine yerleştirilmiş algılayıcılardan sinyaller gönderilir. Kontrol bilgisayar bu sinyalleri değerlendirir ve çeşitli hesaplamalar yaparak ikaz ediciye sinyaller gönderir. İkaz edici (Aktuatör), kontrol bilgisayarından gelen bu sinyaller doğrultusunda binaya, dış etkiyi azaltacak yönde kuvvetleri uygular. Aktif kiriş kontrolünde kontrol kuvvetleri binaya doğrudan uygulanır (Melik, 2002).



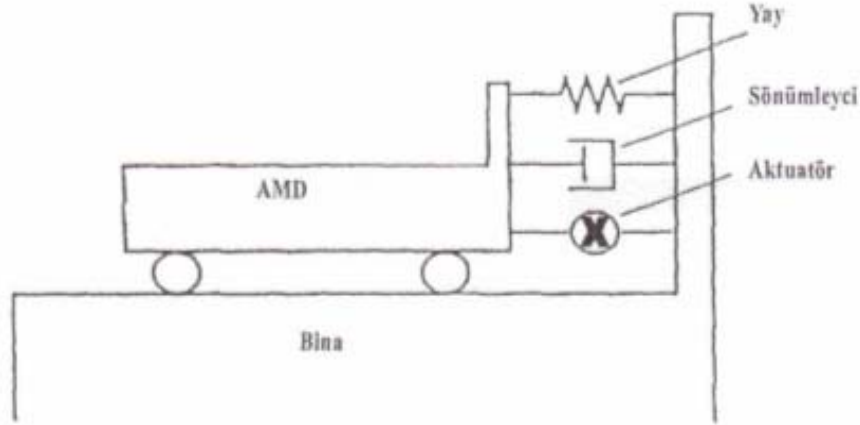
Şekil 3.19 Aktif kiriş kontrolü

Aktif kiriş kontrol sisteminin tercih edilmesinin sebeplerinden bir tanesi kirişlerin birçok çelik binada zaten mevcut olmasıdır. Böylece, mevcut kirişler kullanılmak suretiyle kapsamlı eklemeler ve değişimler yapılmasına gerek kalmaz. Sistemin bir diğer özelliği de hem pulse (çarpma) modunda hem de devamlı-zaman modunda kullanılabilmesidir. Dolayısıyla, aktif kiriş kontrolü hem devamlı-zaman hem de çarpma algoritmasını barındırabilir. Aktif kiriş kontrolü narin yapılarda, yüksek binalarda, köprülerde ve deniz üzerindeki yapılarda kullanılabilir.

3.2.2 Aktif Kütle Sönümleyicisi ve Aktif Kütle Sürücüsü

Ayarlı kütle sönümleyiciler, pasif kontrol sistemi olarak yüksek binalarda hareketi kontrol etmek için kullanılmaktadır. Pasif ayarlı kütle sönümleyici, birinci esas frekansa ayarlandığı için birinci modun egemen olduğu titreşim modlarında etkilidir. Ancak yapı, deprem tipi yüklemelere maruz kaldığı durumlarda titreşim enerjisi daha geniş bir frekans bandına yayılır. Aktif kütle sönümleyiciler dış etkinin çok sayıda doğal modu için projelendirilebilir.

Sistem, yardımcı bir kütle ve ikaz ediciden oluşmaktadır (Şekil 3.20). Yapının çeşitli yerlerine yerleştirilmiş algılayıcılardan gelen sinyaller kontrol bilgisayarıda toplanır. Kontrol bilgisayarı bu sinyalleri analiz eder ve hesaplamalar yapıp ikaz ediciye sinyaller gönderir. İkaz edici, bilgisayardan gelen bu sinyallere göre yardımcı kütleyi harekete geçirir. Bu hareketten dolayı yardımcı kütlede oluşan atalet kuvveti yapıya dışardan verilen etkiyi azaltmak için kullanılır.



Şekil 3.20 Aktif kütle sönümleyicisi

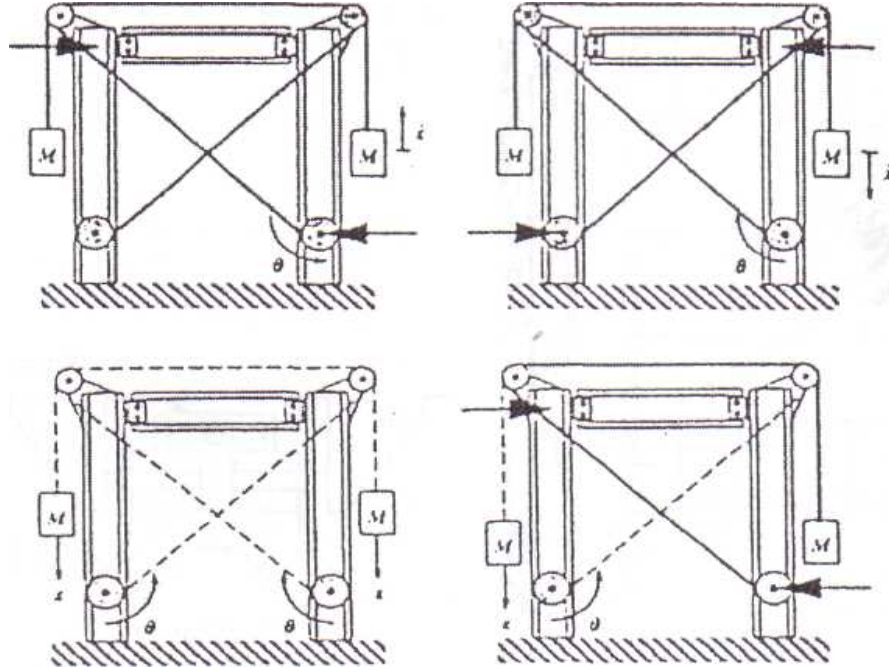
Aktif kütle sönümleyicisi, yardımcı kütleinin ataletini kontrol kuvveti olarak kullanmaktadır. Aktif kiriş kontrolde ise bir ikaz edici yardımı ile sisteme kontrol kuvveti direkt uygulanır. Bu iki sistem de basit ve çalıştırılması kolay sistemlerdir.

Ancak, bina büyüdükçe ve depremin şiddeti arttıkça sistemi çalıştırmak için gereken güç artmaktadır. Bu iki sistemin bir diğer dezavantajı da sistemin çalışması için sürekli bulundurulması gereken dış enerjidir.

3.2.3 Yerçekimini Harekete Geçirici Sistem (Gravity-Actuator System)

Sistemin amacı yapıyı sismik etkiye karşı minimum enerji gereksinimi ile korumaktır. İkaz edici ve düşey yönde hareket edebilen yardımcı bir kütleden oluşmaktadır. Kütle elastik

bir kablo ile bağlanıp iki tane makaradan geçtikten sonra altta bulunan toplama makarasına sabitlenmiştir. Toplama makarası, makaraya sarılmış kablodan ve motor-fren ünitesinden oluşur. Motor-fren ünitesi makarayı, dolayısıyla yardımcı kütleyi serbest bırakabilir, ivmelandirebilir veya frenleyebilir. Şekil 3.21’de kütlelerin ivmelendirilmesiyle oluşan kuvvet çiftleri gösterilmektedir.



Şekil 3.21 Kütlelerin ivmelendirilmesiyle oluşan kuvvet çiftleri

Tam bir yerdeğişimini harekete geçirici sistem, çerçevenin her iki yanına yardımcı kütlelerin yerleştirilmesi ile olur. Her iki yana yerleştirilen kütleler birbirine eşit olursa kontrol sistemi hareketsiz ve kablolardaki gerilmeler de birbirine eşit olur. Kablolardaki gerilimi değiştirmek için motor – fren ünitesi aracılığı ile yardımcı kütleler düşey yönde ivmelendirilir. Bu ivmelenmeden dolayı kablolardaki kuvvetlerde değişiklik meydana gelir. Dolayısıyla, kuvvetlerde oluşan bu değişiklik ile titreşimin kontrol edilmesi için kuvvet çiftleri oluşturulur. Örneğin; ikaz edici yardımı ile sağ taraftaki kütle yukarı doğru ivmelendirilirse sağ kablodaki gerilme artar ve saat yönünde, yatay kuvvet çifti oluşur. Aynı şekilde, sağ taraftaki kütle serbest bırakılırsa kablodaki gerilme azalır ve saat yönüne ters, yatay kuvvet çifti oluşur. Her iki durumda da sol taraftaki kütle sabit kalmaktadır (Melik, 2002).

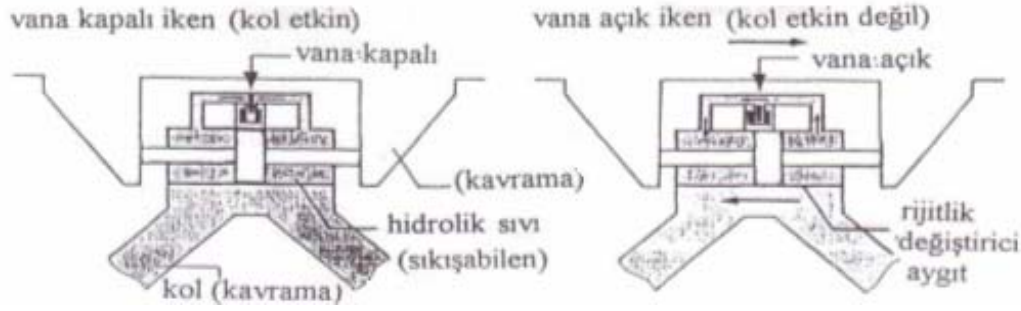
3.2.4 Aktif Rijitlik Değiştirici (AVS)

Aktif rijitlik değiştirici (Active Variable Stiffness Systems), sistem rijitliğinin depremin doğasına göre değiştirilmesi yoluyla, yapıyı dış etkilere korumayı amaçlamaktadır.

Koruma, kontrol bilgisayarından gelen sinyallere göre bağ ve kiriş arasındaki bağlanma şartları değiştirilerek sağlanır. Aktif rijitlik değiştiren araç iki ucu kapalı hidrolik silindir ve iki silindiri birbirine bağlayan bir vanadan oluşur. Vananın açık veya kapalı fonksiyonu yağın hareketi ile kontrol edilir. Bağ ve kiriş arasında vananın açık veya kapalı olması her kat için iki ayrı rijitliğin oluşmasına neden olur. Bu sistemin özellikleri şöyle sıralanabilir;

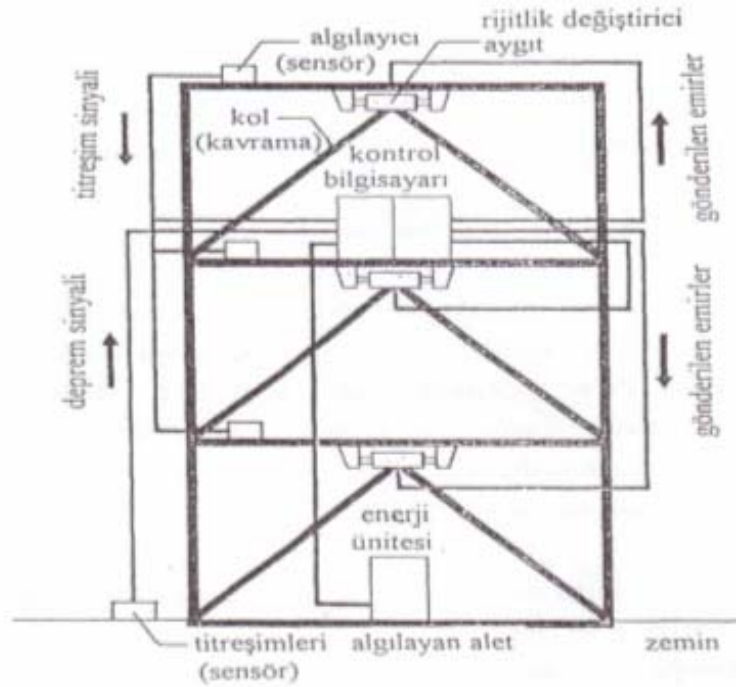
- AVS sistemi yüksek binalara uygulanabilmektedir. Depreme karşı korunmada büyük bir etki gösteren AVS sistemi her kata yerleştirilir. Böylece, yüksek yapının karmaşık salınımları bile kontrol edilebilmektedir.
- Orta şiddette ve şiddetli depremlerde, AVS sistemi beklenmeyen bazı titreşimlere karşı da oldukça etkilidir. Bir bilgisayar ile kontrol edilen AVS sistemi kendine has özel bir mekanizma ile 24 saat kesintisiz çalışabilme özelliğine sahiptir.
- AVS sistemi, enerji koruyucu tipte bir sistem olarak tasarlanır ve çok az bir miktarda elektrik enerjisi kullanarak çalıştırılabilir. Bir deprem meydana geldiği sırada depremden dolayı bir enerji kaybı olursa, sistemde acil durumlarda kullanılmak üzere hazır (yedekte) bulundurulmuş enerjiden yararlanılarak sistem başarı ile çalışmaya başlar.
- Rijitlik değiştiren bu aletler yeterince küçük olduğundan özel bir yer gerektirmezler.
- Kontrol sistemi; titreşimleri anında algılayan çok hassas sismik aletler (sensörler), kontrol bilgisayar, sismik hareketi analiz ederek elektrik enerjisindeki değişikliklere dönüştüren aletlerden (transducer) oluşmaktadır.
- Bakımı kolaydır.

Yüksek teknoloji ürünü aletlerin kullanıldığı bu sistemde Brace ismi verilen kollarla (kavramalar) desteklenen yapıda; kollar arasına ve kat kirişlerine paralel olarak rijitlik değiştirici hidrolik aletler yerleştirilmektedir (Şekil 3.22). Bu aletlerdeki kontrol vanasının bir bilgisayar aracılığı ile açılıp kapanması sonucu kolların etkinliği sağlanmaktadır. Yapının rijitliğini (esnekliğini) değiştirmek için kontrol bilgisayarından gelen emirlere göre vanaların açılıp-kapanması düzenlenir. Vana kapandığı zaman, piston içindeki hidrolik sıvının sıkışma hareketi ile kollar sabit bir pozisyona gelir. Böylece rijitlik artar. Vana açıldığı zaman ise hidrolik sıvı hareket edebilir ve bu yüzden kollar fonksiyonunu yitirir yani rijitlik azalır.



Şekil 3.22 Rijitlik değiştirici aletlerin çalışma prensibi (Kajima, Corporation, 1991)

Vanaların açılma ve kapanması işleminin tam ve basit bir şekilde yapılabilmesi için elektrik enerjisine ihtiyaç vardır; fakat gerekli enerji miktarı sadece 20 Watt'tır. Titreşimler algılayıcılar tarafından belirlendikten hemen sonra sistem harekete geçer. Bu yüzden, bu sistem normal zamanlarda hiçbir elektrik enerjisine ihtiyaç göstermez. Bu da aktif kontrol sistemlerinin enerji problemine önemli bir çözüm olmuştur. AVS sisteminin şematik gösterimi, Şekil 3.23'de gösterilmiştir.

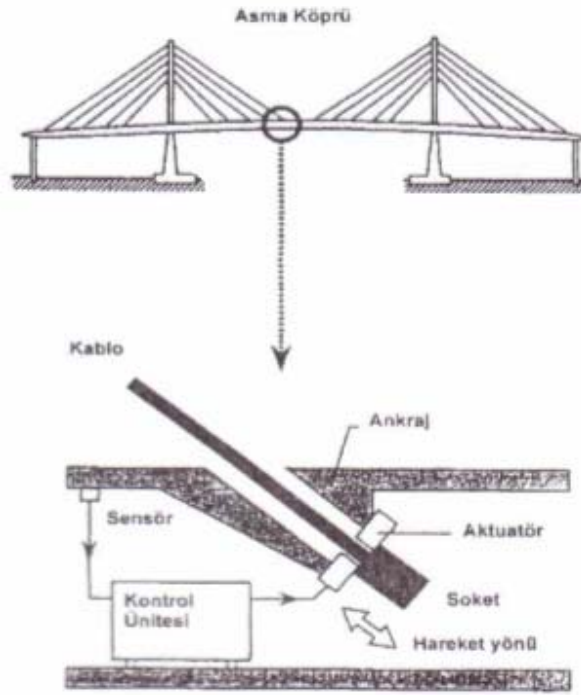


Şekil 3.23 AVS sisteminin şematik gösterimi (Kajima, Corporation, 1991)

3.2.5 Aktif Kablo Kontrolü

Kablolar, yüksek mukavemetlerinden ve hafif olmalarından dolayı çok etkili yapısal elemanlardır. Bu sebeplerden dolayı son zamanlarda inşaat mühendisliğinde asma

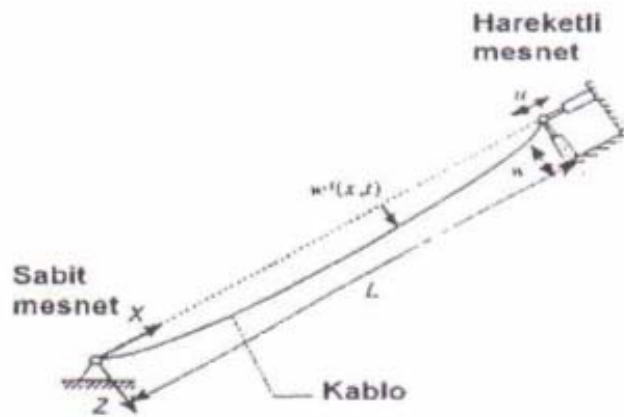
köprüler, iletim kabloları ve kablo destekli çatılar gibi alanlarda uygulanmışlardır. Kablolarda titreşimlerin sönümlenmesi için genel olarak pasif kontrol elemanları kullanılmıştır. Viskoz sönümleyiciler, Fransa'daki Brotonne asma köprüsüne, Amerika Birleşik Devletler'indeki Sunshine Skyway köprüsüne ve Japonya'da bir çok asma köprüye monte edilmiştir. Kablolarda oluşan büyük titreşimler kabloların giriş bağlamalarında hasara yol açmakta, bu nedenle kabloların korozyon koruma sistemleri tahrip olmakta ve bunun sonucunda kabloların ömürleri kısalmaktadır.



Şekil 3.24 Kablolarda uygulanan aktif kontrol sistemi

Aktif kontrol, kablo asma köprüler için daha uygun ve etkin bir korumadır. Kablolar esnek yapı elemanları oldukları için ve iç sönüm oranı düşük olduğundan dolayı rüzgar gibi dış yükler çok kolaylıkla büyük titreşimlere yol açabilir (Fujino ve Susumpow, 1994). Bu konu üzerinde ilk araştırma yapanlar, şekilde görülen sistem üzerinde durmuşlardır. Şekil 3.24'deki sistem kırışte meydana gelen titreşimleri algılayan ve kontrol ünitesine ileten kırışın alt bölmesine bağlanmış algılayıcılar, lineer geri besleme ile çalışan kontrol ünitesi ve kabloların ucuna yerleştirilmiş servohidrolik ikaz edicilerden oluşmaktadır. Kontrol ünitesinden gelen sinyaller doğrultusunda ikaz edici kablodaki gerilmeyi değiştirerek aktif kontrolü sağlar. Böylece, zamanla değişen kuvvetler kırışe uygulanmış olur. Bu uygulamadan önemli sonuçlar elde edilmiştir.

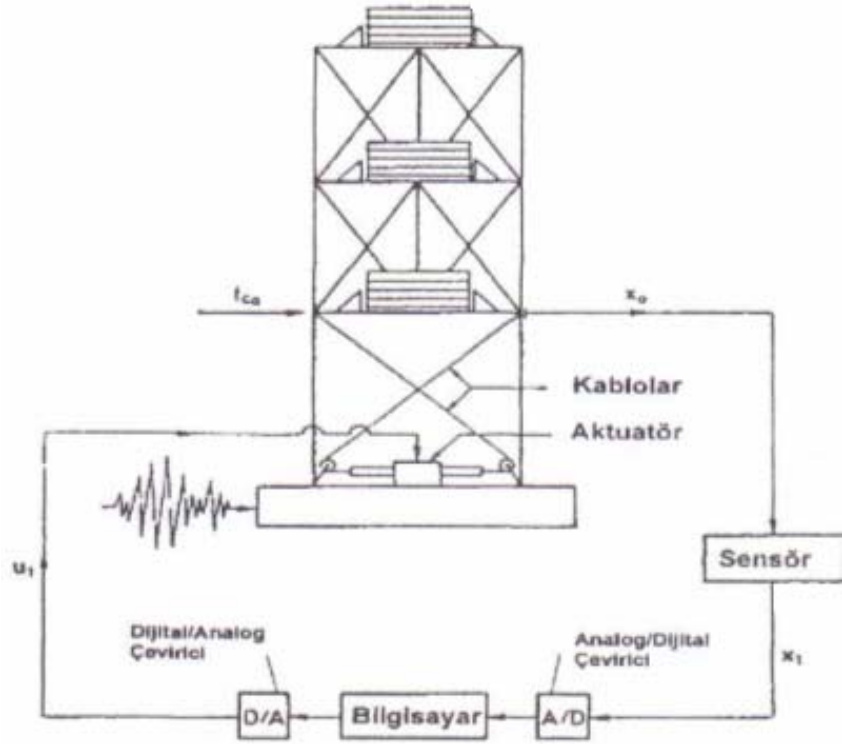
Köprü yapılarında oluşan titreşimlerde kirişte meydana gelen titreşim kablolarda rezonansa yol açabilir. Bu husus göz önüne alınarak, Warnitchai, küresel-yerel etkileşim (global-local interaction) modelini geliştirmiştir. Bu modelde küresel modlar, köprü açıklığındaki kirişi, pylonları ve kabloları bir bütün olarak göstermektedir. Ayrıca, kabloların elastik tendon gibi davrandığı kabul edilmektedir. Yerel modlar ise sabit mesnetler arasındaki kablonun enlemesine osilasyonu olarak kabul edilmektedir. Bu kontrol mekanizmasında ikaz edici kablonun üst kısmına bağlanmıştır ve kontrol edilebilir yer değiştirmesi kablonun aksel yönündeki hareketi ile sağlanır (Warnitchai ve Fujino, 1993).



Şekil 3.25 Hareketli ve sabit mesnetten oluşan kablo sistemi

Aktif kablo kontrolü, sadece köprülerde değil aynı zamanda binalarda aktif tendonlar kullanmak suretiyle de uygulanabilir. Bir örnek vermek gerekirse New York State Üniversitesi'nde kurulmuş olan 3 katlı araştırma amaçlı yapı gösterilebilir (Şekil 3.26). Bu deney sırasında aktif tendonlar ile sağlanan kontrolün, yapılan hesaplar sonucu bulunan ideal şartların dışına çıkıldığı zamanki davranışı ve fizibilitesi incelenmiştir.

Diğer bir ifadeyle, kontrol çevriminin matematik modeli ile sistemin gerçekteki davranışı arasında farklılıklar meydana gelebilir. Bu farklılıklar örneğin; mekanik ikaz edicilerin kapasite limitlerinden dolayı olabilir. Bütün bunlar sistemin performansını ve kontrol çevriminin stabilitesini tehlikeye sokar. Bu sebeble ideal şartlar altında sağlam gözüken sistem, ideal olmayan şartlar altında başarısız olabilir. Böyle durumlarda, sistemin güvenilirliği için tahmin edici stratejisi temel alınmış kontrol algoritmaları uygulanır (Lopez Almansa ve Rodellar, 1990).



Şekil 3.26 Üç katlı araştırma amaçlı aktif kablo kontrolü uygulanan yapı

3.2.6 Aktif Kontrolde Kullanılan Malzemeler

Aktif kontrolün başlıca parçaları olan algılayıcılar ve ikaz ediciler de kullanılan malzemeler, uzun araştırmalar sonucu elde edilmiş ürünlerdir. Bu malzemelerin hiçbirisi tek başına tüm uygulamalar için kesin sonuç veremez. Bu nedenden dolayı, sistemin özelliklerine ve titreşim karakterine bağlı olarak birkaç kombinasyon kullanılmalıdır (Anderson ve Crovson, 1992).

3.2.6.1 Piezoelektirik Seramikler

Bu materyallerin en önemlisi piezoelektirik seramik veya filmlerdir. Bu malzeme uzun zamandan beri çeşitli tipte iletişim cihazlarında kullanılmakta idi. Curie kardeşler tarafından 1880 yılında piezoelektirik kristallerinin elektromekanik özellikleri keşfedilmiştir. O tarihten bu yana, bu konu üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. İlk çalışmalar, özel geometriye sahip olan sonlu veya sonsuz boyutlardaki ince çubuk, plak, çember, disk, silindirik kabuk gibi cisimlerin titreşimleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Keşfedildiği tarihten beri üzerinde birçok teorik ve pratik çalışma yapılan bu malzemenin teorik çalışmaları genelde elektrostatik ve elastik denklemlerin çıkarılması ile ilgili olmuştur.

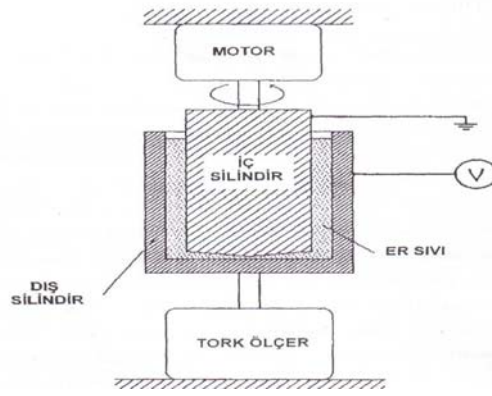
Piezoelektrisite bir elektromekanik olaydır. Yani, elektrik alanı ile elastisite birbirine bağlıdır. Genel olarak, piezoelektrik malzeme, mekanik bir kuvvete veya basınca elektirik yükü veya voltajı üreterek cevap veren bir malzeme olarak tanımlanabilir. Bu olaya doğrudan piezoelektrik etkisi denilir. Aynı şekilde, ters olarak uygulanan bir elektik yüküne veya alanına mekanik gerilme ya da şekil değiştirme ile cevap veren olaya da ters piezoelektrik etkisi denir. Direkt piezoelektrik etki, yapıdaki titreşimlerin algılanmasında, ters piezoelektrik etki ise aktif titreşim kontrolünde kullanılır (Tzou, 1992).

3.2.6.2 Elektoreolojik Sıvılar

Bir maddenin sıvı halden katı hale geçmesine örnek olarak suyun sıfırın altındaki sıcaklıkta buz haline gelmesi gösterilebilir. Fakat bu durum ancak ortamın sıcaklığının değişmesi ile mümkündür. Sıcaklığı değiştirmek zaman alan bir olaydır. Fakat günümüzde endüstride ve akademik çalışmalarda büyük ilgi uyandıran elektoreolojik sıvılar ortamın sıcaklığını değiştirmeden katı ve sıvı halde olabilen malzemelerdir.

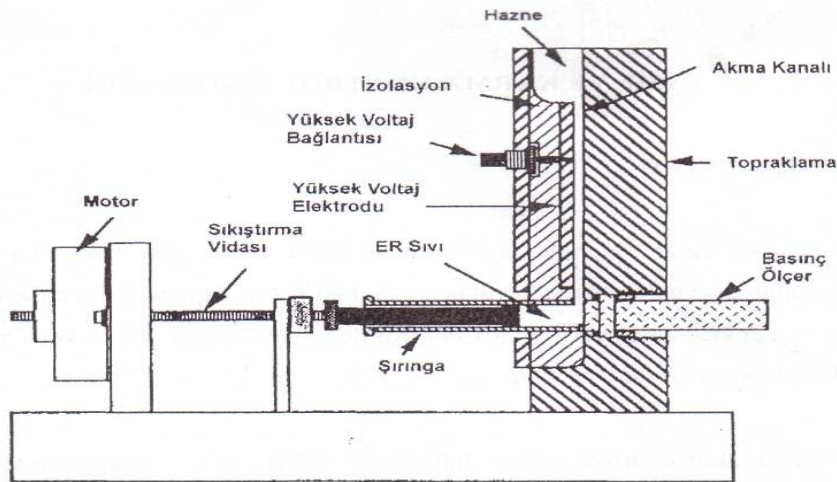
Elektoreolojik sıvılar (ER Fluid), uygulanan elektrik alanına göre reolojik özellikler gösteren, izole edilmiş sıvı ortamda asılı olan çok ince partiküllerden oluşur. Bu partiküllerin çapı yaklaşık olarak 1-100 mikron mertebesindedir. Elektrik alanı uygulandığı zaman bu partiküller polarize olarak, elektrodlar arasında bir zincir oluşturur. Bu zincir, kayma deformasyonlarına karşı dayanıklıdır ve elektrik alanı uygulanmayan diğer kısımlardaki sıvının akışını engeller. Fiziksel olarak bunun anlamı, elektrodlar arasındaki elektoreolojik sıvının yağ viskozluğu mertebesinden katı bir jel haline dönüşmesidir. Bu olay, bir milisaniyeden az bir zamanda gerçekleşir. Ayrıca, sıvının mukavemeti üzerine uygulanan elektrik alanı ile doğru orantılıdır. Yani, elektrik alanının şiddeti ne kadar büyük ise sıvı o derecede sertleşir ve sıvının akışını engeller.

Bu kadar hızlı fiziksel değişimin endüstride oldukça yaygın kullanım alanı vardır. Mesela, helikopterde hızlı manevralar sırasında pervane bıçağının üzerindeki gerilmenin artması veya azalmasına göre rijitliğinin değiştirilmesi olabilir. Diğer bir örnek olarak endüstride kullanılan robot kollarının hızlı dönmesi sırasında aniden yavaşlamaları veya durmaları gerektiğinde rijitliklerinin ayarlanması gösterilebilir. Deprem mühendisliğinde yarı aktif kontrol sistemlerinde titreşim sönümleyici olarak tasarlanan yağ kutularının (damper, dashpot) içindeki sıvı olarak kullanılabilir. Sistemdeki kontrol ünitesi istenilen elektrik alanını yaratarak gerekli sönümlemeyi sağlar. Elektoreolojik sıvıların uygulanan elektrik alanına göre kayma modellerindeki değişimi ölçmek için silindirik reometreler kullanılır.



Şekil 3.27 Reometre

Bu alet şekilde görüldüğü gibi iç içe geçmiş iki adet silindirden oluşur (Şekil 3.27). Elektoreolojik sıvı iki silindir arasında bulunmaktadır ve sıvının bulunduğu boşluk iç silindir yarıçapının yüzde biri kadardır. Üst tarafındaki servo motor sayesinde iç silindir döndürülür. Aynı zamanda, dış silindire değişen elektrik alanı uygulanır. Elektrik alanına göre rijitlik kazanan sıvının ilettiği dönme dış silindire bağlı olan tork ölçer tarafından ölçülür. Sıvının elektrik alanına bağlı değişen basınç dayanımı özelliğini ölçmek için akış aleti denilen deney aracı kullanılır. Şekil 3.28’ de görüldüğü gibi şırınga içinde bulunan elektoreolojik sıvıya motor tarafından basınç uygulanır. Üst taraftaki yüksek voltaj bağlantısı tarafından uygulanan elektrik alanı ile elektrodlar arasındaki akış kanalında bulunan sıvının sertleşerek yüksek basınçtan dolayı oluşan akımı önlemesi sağlanır. Basınç değerleri, şırınganın sonuna eklenen basınç ölçer tarafından okunur (Duclos ve Carlson 1992).



Şekil 3.28 ER sıvısının elektririk alanıyla değişen basınç dayanımını ölçen akma deney aracı

3.2.6.3 Şekil Hafızalı Alaşımlar

Şekil hafızalı alaşımların üzerinde kalıcı plastik deformasyon uygulandıktan sonra belli bir kritik sıcaklığın ötesinde ısıtıldıkları zaman plastik deformasyondan önceki şekillerini hatırlarlar ve orjinal şekline geri dönerler. Bu alaşımların en çok bilineni nikel-titanyum bazlı alaşımlardır ve yaklaşık 30 sene evvel bulunmuşlardır. Diğer alaşımlara örnek olarak; CuZn, CuAl, NiAl, AgZn, ve AgCd' u sayılabilir. Böyle alaşımların deprem mühendisliğinde kullanılabilecek alanları son derece azdır. Çünkü deprem sırasında alaşımları ısıtıp soğutacak kadar zaman yoktur. Yer hareketi hızla değiştiği için alaşımlar buna uyum sağlayamaz. Uygulama alanı olarak örnek vermek gerekirse; dönen bir şaftı tutan şekil hafızalı yayların, şaftın kritik hıza ulaştığı zaman meydana gelebilecek olan büyük titreşimleri önlemek için ısıtılıp soğutulması ile kritik hızın düşük titreşim seviyeleri ile aşılması sağlanabilir (Anderson ve Crowson, 1992).

3.2.7 Aktif Kontrolün Dezavantajları

Yapıların, deprem etkilerine karşı korunmasında aktif kontrol sistemlerinden olumlu sonuçlar elde edilmesi gelecek için oldukça umut vericidir. Ne var ki, bu sistemlerin yapı kontrolünde pratik olarak kullanılabilmesi için halledilmesi gereken bazı problemler vardır. Bunlardan önemli birkaçı;

- Yapıların maruz kaldıkları kuvvetlere karşı koyabilecek şekilde gereken gücün yaratılması sorunu
- Söz konusu olan bu gücü yaratacak olan ve aktif kontrol sistemlerini çalıştıracak olan enerjinin sürekli hazır bulundurulması gerekliliği
- Sistemin hem kurulum, hem de işletim ve bakım maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

Aktif kontrol sistemleri, ideal durumlardaki sistemler için geliştirilmiştir. Yukarıda bazıları sayılan problemler haricinde, uygulama esnasında karşılaşılabilecek birçok problem vardır. Bunların en önemlileri aşağıda açıklanmıştır (Özpalanlar, 2005).

3.2.7.1 Modelleme Hataları

İnşaat mühendisliğinde yapılar yayılı kütleli sistemlerdir. Bazı istisnalar dışında analitik olarak hesaplanmış veya simüle edilmiş kontrol mekanizmalarının sonuçları genellikle basitleştirilmiş yapı modelleriyle elde edilmişlerdir. Kontrol sistemlerinde binalar öncelikle yayılı kütleli sistemden, çok serbestlik dereceli sistem (MDOF) haline indirgenir. Daha sonra, çok serbestlik dereceli bu yapılar daha az serbestlik dereceli yapı haline getirilir. Kontrol sistemleri projelendirilirken hesaplamadaki zorluklardan dolayı yapılar az serbestlik

dereceli olarak kabul edilir.

Az serbestlik dereceli sistemler olarak kabul edilen yapılar için geliştirilen kontrol mekanizmaları, gerçek sistemlere uygulandığında kontrol ve gözlem hataları olabilmekte, stabilize sorunları ortaya çıkabilmektedir. Bu şekilde meydana gelen gözlem ve kontrol hataları, kontrol sisteminin performansında düşüşe neden olmaktadır. Bunları azaltmak için projelendirme aşamasında değişiklikler yapmak gerekir.

Hataları minimize etmek için en uygun yöntem, algılayıcı ve kontrol elemanlarını birinci modun dışındaki, diğer modların sıfır olduğu yerlere koymaktır. Bu elemanların konumlarının belirlenmesinde genellikle bütünüyle serbest olunmadığı için pek kolay bir yöntem değildir. Uygulanabilecek diğer bir yöntem ise algılayıcı ve ikaz edici arasına birinci modun dışındaki modlardan kurtulmak için filtre yerleştirmektir. Bu yöntem de, özellikle birinci modun dışındaki modların birbirlerine yakın olarak sıralandığı durumlarda pek verimli değildir.

3.2.7.2 Zamanın Gecikmesi

Kontrol sistemlerinde, yapılan tüm işlemlerin aynı anda yapıldığı varsayılmakla birlikte, aslında ölçme, ölçülen değerlerin işlenmesi, gerekli kontrol kuvvetlerinin hesaplanması ve uygulanması arasında bir süre geçmektedir. Bu zaman gecikmesi, kontrol kuvvetlerinin uygulanmasında gecikmeye yol açmaktadır. Söz konusu bu gecikme sadece kontrol sisteminin veriminde azalmaya yol açmaz, bazen sistemin stabilitesinin bozulmasına da yol açabilir. Aktif kontrol sisteminde meydana gelen zaman gecikmesinin başlıca sebepleri şunlardır;

- Yapının birçok yerindeki algılayıcılardan gelen verilerin alınması ve bilgisayara aktarılması için gerekli süre
- Alınan verilerin kontrol kuvvetini oluşturacak şekilde filtrelenmesi, işlenmesi, hesaplanması ve kontrol kuvvet sinyalinin ikaz edicilere iletilmesi için geçen süre
- İkaz edicinin sinyali aldıktan sonra istenen kuvveti oluşturmasına kadar geçen süre

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı kontrol kuvvetinin uygulanması sırasında oluşabilecek zaman gecikmesi, sistemle uyumsuz bir kontrol kuvvetinin doğmasına yol açabilir. Böyle bir kuvvet, yapının stabilitesini bozabilir ve depremden koruma sağlayacağı yerde daha kötü etkilere neden olabilir.

3.2.7.3 Yapının Lineer Olmaması

Aktif kontrol sistemleri genellikle yapıların lineer olduğu kabulü ile hareket etmektedirler. Ancak gerçekte, güçlü deprem etkisi karşısında yapılarda büyük şekil değiştirmeler ve nonlinear davranışlar görülmektedir. Kontrol sisteminin veriminin düşmesine yol açan bu problemi yok etmenin yolu, bazen hesabı büyük ölçüde güçleştirse de nonlinear özellikleri de hesaba katarak analiz yapmaktır.

3.2.7.4 Yapının Parametrelerindeki Belirsizlikler

Aktif kontrol sisteminin algoritmaları ve yapının performansı kütle, rijitlik ve sönüm oranı gibi yapı parametrelerine bağlıdır. Kontrol sistemi projelendirilirken kabul edilen bu parametreler, yapı inşa edildiğinde ortaya çıkan gerçek parametrelerle aynı olmaz. Kontrol sisteminin bu parametrelere ne kadar hassas olarak bağlı olduğu düşünülürse aradaki küçük bir farkın sonuca büyük olumsuz etkileri olabileceği kolaylıkla söylenebilir.

3.2.7.5 Algılayıcı ve Kontrol Elemanı Sayısının Sınırlı Olması

Yapıda kullanılacak algılayıcı ve kontrol elemanlarının sayısı, bu elamanlardaki artışın gerek uygulama gerekse maliyet açısından ortaya çıkarabileceği sorunlar nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Kontrol algoritmaları geliştirilirken bu algılayıcı ve kontrol elemanlarının sayısı keyfi olarak seçilse bile cevaplanması gereken iki önemli soru ile karşı karşıya kalınmaktadır:

- Yapının tam olarak gözlenebilmesi ve kontrol mekanizmasının verimli ve yeterli bir biçimde çalışabilmesi için gerekli minimum algılayıcı ve kontrol elemanı sayısı nedir?
- Bu eleman sayısı ile maksimum kontrol sağlayabilmek için bu elemanların nereye yerleştirilmesi gerekir?

Bu soruların cevapları algoritmalarındaki matrislerin incelenmesiyle bulunmaktadır fakat pratikte bu sayı yeterli gelmemekte ve daha çok algılayıcı ve kontrol elemanına ihtiyaç duyulmaktadır.

3.3 Karma ve Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol sistemleri, sistemde istenmeyen titreşimleri azaltmak için kullanılan basit, ucuz ve güvenilir sistemlerdir. Fakat sabit sönümleyiciler oldukları için performansları kısıtlıdır.

Dar bir bantta frekans genliklerini azaltabildikleri gibi sabit olmayan dış etki karşısında da verimli değildirlir.

Aktif kontrol sistemleri, yüksek ve narin yapılar için uygundur. Tek bir aktif kontrol elemanı örneğin; aktif kütle sönümleyici dış etkinin çok sayıda doğal modu için projelendirilebilir. Ancak tüm bu sistemler rüzgar ve orta şiddetteki depremler için uygundur. Aktif kontrol sistemlerinin şiddetli depremlerde kullanılabilmesi için çözülmesi gereken birçok sorun vardır. Bunlar;

- Güçlü depremlere karşı koyabilecek büyük kontrol kuvvetlerinin eldesi
- Yapının ömrü boyunca gerekli sermaye ve bakım masrafları
- Kontrol kuvvetlerinin oluşturulması için gerekli dış güç kaynağının sağlanması
- Büyük kontrol kuvvetinin yapının stabilitesini bozma ihtimalinin varlığıdır.

Karma ve yarı aktif kontrol mekanizmaları, bu sorunların bazılarının çözümünde umut verici gelişmeler sağlamışlardır.

Karma kontrol sistemleri; aktif ve pasif kontrol sistemlerinin birlikte kullanılması olarak tanımlanabilir. Yarı aktif kontrol sistemi ise pasif kontrol sistemlerinin güvenilirliğini artıran aynı zamanda aktif kontrol sisteminin çok yönlülüğünü ve kendini adapte edebilme özelliğini birleştiren sistemler olarak tanımlanabilir.

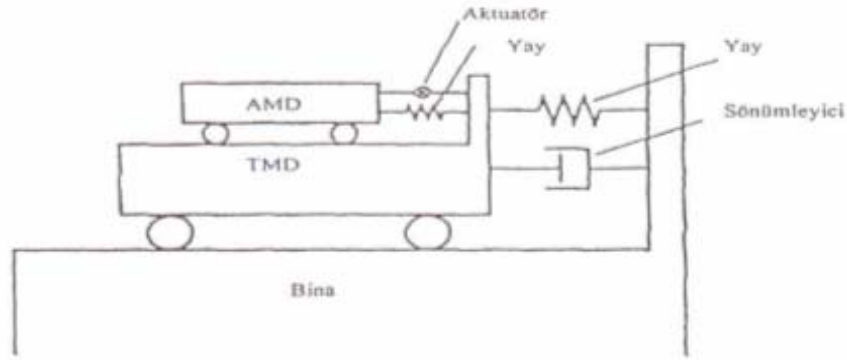
3.3.1 Karma Kontrol Sistemleri

Karma kontrol sistemleri daha verimli, avantajlı ve daha pratiktir. Bu sistem, hem pasif hem de aktif sistemlerin avantajlarını birleştirdiğinden yapının güvenliğini artırmak için daha geniş bir alanda uygulanabilir. Karma kontrol sistemlerinde iki ayrı sistemin birlikte kullanılmasından dolayı sistemlerin tek tek kullanılması ile oluşan sınırlamalar hafifleyebilir. Dolayısıyla, yüksek performans elde edilebilir. Ayrıca, daha karmaşık olmasına karşın karma kontrol sistemlerinin sonuçları daha güvenilirdir. Karma kontrol sistemleri üzerindeki çalışmalar karma kütle sönümleyici ve karma sismik izolasyon olmak üzere iki konuda yoğunlaşmıştır.

3.3.1.1 Karma Kütle Sönümleyiciler (HMD)

Karma kütle sönümleyiciler (Hybrid Mass Damper), ayarlı kütle sönümleyici (TMD) ve aktif kontrol elemanlarının birlikte kullanılmasıdır (Şekil 3.29). Sistemin özelliği, ayarlı kütle sönümleyicinin hareketinden kaynaklanan yapının cevabını azaltmaktır. Aktif kontrol sisteminden verilen kuvvet HMD'nin verimini artırmak ve yapının dinamik karakterinde bir

değişiklik olursa yapının güvenliğini artırmak için kullanılır. Tipik bir HMD için gereken enerji, aynı etkiyi sağlayan aktif kontrole göre bir hayli azdır.



Şekil 3.29 Karma Kütle Sönümleyici (HMD)

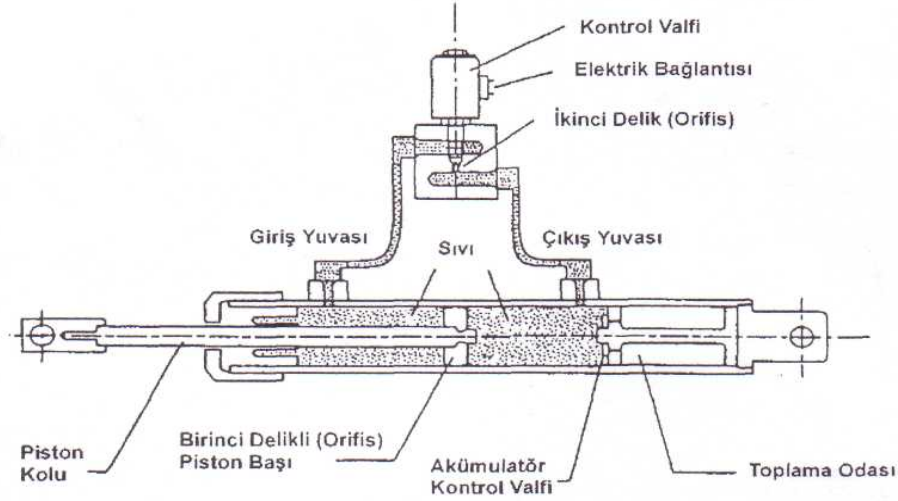
3.3.1.2 Karma Sismik İzolasyon (HSI)

Karma sismik izolasyon (Hybrid Seismic Isolation), pasif sismik izolasyon ile aktif kontrol sisteminin bir arada kullanılmasıdır. Sismik izolasyon sistemi basit, güvenilir ve etkili bir kontrol sistemidir. Fakat, pasif kontrol sistemi olduğu için deprem etkisine karşı kendini adapte edebilme yeteneği sınırlıdır. Aktif kontrol mekanizmasının taban izolasyonlu binaya ilavesi ile yüksek performans kapasitesine ulaşılır. Ayrıca, maliyette ciddi bir artış olmamaktadır.

3.3.2 Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Yarı aktif kontrol elemanları, kontrol edilebilen pasif elemanlar olarak görülür. Yapıların deprem ve rüzgar yüklerine karşı korunmasında, pasif ve aktif kontrol sistemlerinin en önemli özelliklerinin bir araya gelmesi ile oluşur. Yarı aktif kontrol bir çeşit aktif kontrol olup, gerekli dış enerjinin büyüklüğü tipik aktif kontrol sistemine göre daha azdır. Hatta gerekli enerji pille sağlanabilecek kadar azdır. Deprem esnasında ana güç kaynağının zarar görme olasılığı düşünüldüğünde bu önemli bir özelliktir. Yarı aktif kontrol elemanları sisteme mekanik enerji yüklemeler. Dolayısıyla, giriş ve çıkış stabilitesi sabittir. Çalışmalar uygun kullanılan yarı aktif kontrol sisteminin pasif kontrol mekanizmasına göre daha iyi olduğunu ve aktif kontrol sisteminin performansına yakın bir performans sağlayabileceğini göstermiştir. Bu yapıya örnek olarak; Symans ve Constantinou'nun (1997) geliştirdiği yarı-aktif kontrol sistemi verilebilir (Şekil 3.30). Bu aracın tasarımında, pasif sıvı sönümleyici temel alınmıştır. Aracın pasif bölümü paslanmaz çelik piston kolu, bronzdan yapılmış piston kafası ve içi ince silikon yağı içeren piston kolu ile yapılmış toplama (akümülatör) odasından oluşmaktadır. Piston

kafası içindeki deliklerden (orifis) geçen sıvının akışı, piston kafasının hızı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Aracın aktif bölümü ise servo-valften oluşan bir by-pass düzenek ile sağlanmıştır.



Şekil 3.30 Yarı-aktif sismik kontrol sistemi

Valfin tam kapalı olması halinde en yüksek sönüm oranı, tam açık olması halinde ise en düşük sönüm oranı elde edilir. Valfin değişik durumları için bu iki sınır arasında çeşitli sönüm seviyeleri elde edilir. Servo-valfi harekete geçirecek enerjinin kesilmesi durumunda bile kendini tamamen kapatarak yapı için en yüksek kontrol seviyesinin elde edilmesi sağlanmıştır. Kontrol valfinin tamamen kapalı olması durumunda yarı-aktif sistem tamamen pasif kontrol aracı gibi hareket eder. Zaten, valfi harekete geçirmek için en fazla 3.5 W'lık bir güce ihtiyaç vardır. Bu gücü, bataryalarla sağlamak kolaydır. Kontrol algoritması kapalı çevrimdir. Sistemin avantajı, maliyetinin düşük olması, aktif ve pasif sistemin avantajlarını aynı anda sunması, enerji ihtiyacının düşük olması, güvenlik seviyesinin yüksek olması ve yapıda kontrol kuvvetleri oluşturmadan sönümlenme yapması olarak sayılabilir (Symans ve Constantinou, 1997).

4. KONTROL SİSTEMLERİ

Kontrol sistemleri, fiziksel niceliklerden oluşurlar ve bir başka fiziksel sistemi değiştirmek kontrol etmek ya da uyarlamak amacı ile kurulurlar (Ogata, 1990).

Kontrol sistemleri tipik olarak ikiye ayrılarak incelenebilir. Bunlardan birincisi açık-devre kontrol sistemleridir. Bu sistemlerde fiziksel ortamdan elde edilen çıkış bilgileri kullanılmaz. İkinci olarak da kapalı-devre kontrol sistemleri ya da geri beslemeli kontrol sistemleri bulunmaktadır. Bu sistemlerde ise fiziksel ortamdan elde edilen çıkış bilgileri kullanılır.

Fiziksel bir ortamın denetlenebilmesi için gerekli ilk koşul bu ortama ait değişkenlerin ölçülebilmesidir. Kontrol işaretlerinin elde edildiği bu ölçümler, algılayıcılar (sensors) tarafından gerçekleştirilirler. Kapalı-devre kontrol sistemlerinde, giriş işaretleri, sistemin cevap işaretleriyle birlikte sistemi yönlendirirler.

Ayrıca bu tür sistemlerde çevrim içinde bir karşılaştırmacıya veya bir kontrolcüye gereksinim vardır. Kontrol sistemleri bazen de işleyiş biçimlerine göre iki sınıfa ayrılabilir. Bunlardan birincisi, ortamdan aldığı bilgilere göre kendini istenen biçime uydurmadır. Buna düzenleyici sistemler (regulatory) denir. Diğeri ise, izleyici kontroldür (tracking control). Burada kontrol, zamanın bir işlevi olarak adım adım yapılmaktadır. Kontrol sistemlerinde asıl sorun, sistem çıkış bilgileri, cevapları ya da fiziksel ortamdaki hata işaretleridir. Çünkü, kapalı-devre kontrol sistemlerinde bu bilgiler sistemin işleyişinde çok büyük rol oynarlar ve sistem bu bilgilere göre yönlendirilir (Baykal ve Beyan, 2004).

4.1 PID Kontrol

Bir kapalı döngü kontrol sistemi içinde kontrolcünün görevi ölçme elemanı üzerinden geribeslenen çıktı büyüklüğünü, başvuru girdi büyüklüğü ile karşılaştırmak burada çıkabilecek hata değerine ve kendi özelliğine bağlı olarak uygun kontrol sinyali üretmektir.

Klasik kontrolcülerde dört temel kontrol etkisi vardır. Bunlar ikili veya aç-kapa kontrol etkisi, orantı kontrol etkisi (P etki), integral kontrol etkisi (I etki) türev kontrol etkisi (D etki)'dir. Bunların bir veya birkaçını kullanarak, aç-kapa tipi, P tipi, I tipi, PI tipi, PD tipi, PID tipi kontrolcüler oluşturulabilir (Ogata, 1990; Kuo, 1995).

Klasik kontrolcüler, sabit zamanlı geri beslemeli kontrolcülerdir. Sistemdeki parametre değişikliklerini telafi edemez ve çevredeki değişikliklere uyum sağlayamazlar. Klasik tekniklerde donanımın matematik modellemesi ve kontrolcünün parametre ayarı, denetleyici

yürürlüğe konulmadan önce yapılır. Gerçek sistemlerin çoğu kontrol açısından doğrusal olmayan davranış gösterirler. Bu sistemleri modellemek genellikle sıkıntı verici olup, bazen fizik yasalarını kullanmak imkansızdır. Bundan ötürü klasik kontrolcüler, doğrusal olmayan kontrol uygulamalarında kullanmak uygun değildir.

Klasik orantısal-integral-türev (PID) kontrolcüler, modern endüstrilerde en çok bilinen ve en yaygın olarak kullanılan kontrolcülerdir. İstatistiklere göre günümüz endüstrilerinde kontrolcülerin % 90'dan fazlasının PID kontrolcü olduğu ve kalanının da çoğunluğunun Programlanabilir Mantık Kontrolcü (PLC) olduğu ifade edilmektedir.

Genel olarak, PID kontrolcüler basit, güvenilir ve etkindir. Düşük maliyetli ve kullanımı kolaydır. Ayrıca, alt düzey doğrusal sistemlerde ayar noktası takibi performansı çok yüksek olup, kararlıdır. Bundan dolayı gerçek dünya uygulamalarında oldukça popülerdir (Baykal ve Beyan, 2004).

4.1.1 Orantı Kontrol (P-Kontrol)

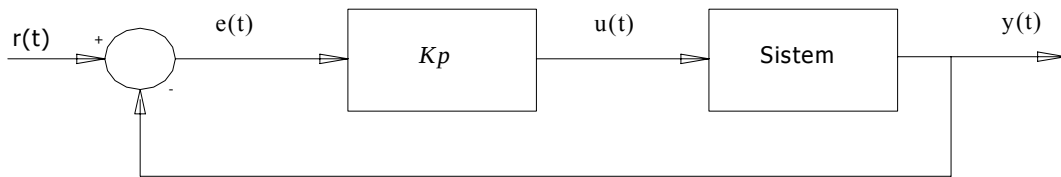
Orantı kontrolde, kontrol sistemi çıkışı bir oransal sabit yoluyla kontrol sistemi girişine oranlanır. Kontrol sistemi çıkışı $u(t)$ ile giriş hata sinyali $e(t)$ arasındaki bağıntı,

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.1)$$

şeklinde verilir. Burada, K_p orantı kazancı olup orantı kontrolün transfer fonksiyonu; kontrolcü çıkışının Laplace dönüşümünün ($U(s)$), girişin Laplace dönüşümüne ($E(s)$) oranıdır.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (4.2)$$

şeklide orantı kazancı olan bir sabite eşittir. Şekil 4.1'de orantı tipi kontrolcü yapısı gösterilmektedir. Burada; $r(t)$, referans giriş büyüklüğü, $y(t)$ geribeslenen çıktı büyüklüğüdür.



Şekil 4.1 Orantı tipi kontrolcü

Orantı kontrolde, herhangi bir anda kontrol sistemi çıkışı $u(t)$, hatanın büyüklüğüne bağlıdır ve o anda hata ne kadar büyük olursa düzeltici kontrol sinyali $u(t)$, o oranda büyük olur. Hata küçük olduğunda ise kontrol sistemi yeteri kadar etkili düzeltici sinyal üretemez. Kazanç katsayısını, K_P 'yi arttırmak, kalıcı-durum hatasını azaltmak mümkündür. Orantı kontrolün en önemli üstünlüğü, yapısının basitliğidir. Basit bir kuvvetlendirici yardımıyla dahi orantı kontrolde çalışan kontrol sistemi gerçekleştirmek mümkündür (Yüksel, 2001).

4.1.2 İntegral Kontrol (I-Kontrol)

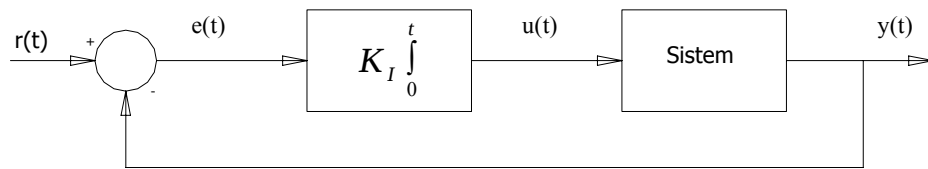
İntegral kontrolde sistem çıkışı $u(t)$, hatanın $e(t)$ zamana göre integrali ile orantılıdır. İntegral kontrol yasası,

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t)dt \quad \text{veya} \quad u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, K_I integral kontrol kazancı, T_i integral zaman sabiti adını alır. Bu kontrolün transfer fonksiyonu,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \quad \text{veya} \quad \frac{U(s)}{E(s)} = \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilir. İntegral kontrolün çıkışı geçmişte meydana gelen hatanın birikimi ile orantılıdır ve herhangi bir anda hatanın integrali büyük olursa büyük bir düzeltme etkisi sağlanır. İntegral kontrol aynı zamanda yeniden ayar adını alır. İntegral zaman sabitinin tersi yeniden ayar oranı, $K_I=1/T_i$ olarak bilinir. Şekil 4.2'de integral tipi kontrolcü yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.2 İntegral tipi kontrolcü yapısı

İntegral kontrol, orantı kontrole göre sistemde meydana gelebilecek kalıcı durum hatasını sıfır yapar. İntegral kontrolde, transfer fonksiyonu paydasına bir “s” çarpanı getirdiğinden sistemin

derecesini bir kat arttırır. Buna göre integral kontrolü olmayan bir sistemin kalıcı durum hatası bir üste çıkarılmak suretiyle iyileştirilmiş olur. İntegral kontrolünün en önemli sakıncası ise açık-döngü transfer fonksiyonunda, s-düzlemi orijininde bir kutup ilavesi getirmesidir. İntegral kontrol ile transfer fonksiyonu paydasına getirilen “s” çarpanı aynı zamanda sisteme 90°’lik faz gecikmesi de getirir. Bunun sonucu olarak integral kontrol, yavaş bir kontrol sağlar. İntegral zaman sabitini küçültürken kontrol etkisini belli oranda arttırmak mümkündür (Yüksel, 2001).

4.1.3 Türev Kontrol (D-Kontrol)

Türev kontrolde kontrol sistemi çıkışı $u(t)$, hatanın $e(t)$ zamana bağlı türevine orantılıdır. İdeal olarak,

$$u(t) = K_D \frac{de}{dt} \quad \text{veya} \quad u(t) = T_d \frac{de}{dt} \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilir. Transfer fonksiyonu,

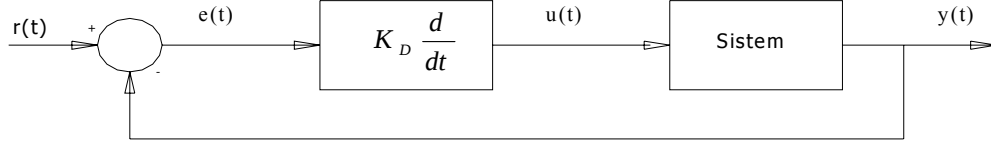
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_D s \quad \text{veya} \quad \frac{U(s)}{E(s)} = T_d s \quad (4.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada K_d türev kontrol sistemi kazancı veya T_d türev kontrol zamanı adını alır. Türev kontrolünün en önemli üstünlüğü; hatanın büyümesini önceden kestirmesi ve büyük bir hata ortaya çıkmadan bir düzeltme etkisi sağlamasıdır. Türev kontrol, daha hata değişmeye başlar başlamaz harekete geçtiğinden “önceden seziş” kontrolü olarak da bilinir. Türev kontrol, açık döngü transfer fonksiyonu payına “s” çarpanı getirerek sisteme s düzlemi orijininde bir sıfır ilave eder. Bu ise sistemin kararlılığı üzerinde iyileştirici bir etki yapar. Paydaki “s” çarpanı aynı zamanda sisteme 90°’lik faz önceliği getirir.

Sabit bir sayının türevi sıfır olduğundan türev kontrolün zamanla değişmeyen sabit hata üzerinde etkisi yoktur. $e(t) = sbt.$ olması halinde $de/dt = 0$ ve dolayısıyla $u(t) = 0$ olacağından sabit kalan hatalar üzerindeki türev kontrolünün sağlayacağı kontrol sıfırdır. Türev kontrol, yalnızca hatanın zamana göre değişimi karşısında kontrollü olduğunda kontrol sistemlerinde yalnız başına kullanılmaz ve ancak diğer kontrol sistemleri ile birleştirilerek kullanılabilir. Türev alıcı bir eleman gürültü sinyallerine çok duyarlıdır. Bu nedenle, pratikte bir işlemsel kuvvetlendirici yoluyla türev almak çok zordur. Bu durumda türev kontrol yasası,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \left(\frac{K_D s}{Ts + 1} \right) \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, T_s bire göre çok küçük bir zaman sabitidir. Türev kontrolün yapısı Şekil 4.3’de gösterilmektedir (Yüksel 2001).



Şekil 4.3 Türev tipi kontrolcü yapısı

4.1.4 Orantı +İntegral Kontrol (PI-Kontrol)

PI kontrol sistemi; Şekil 4.4’de verildiği gibi orantı ve integral kontrol sistemlerinin birleştirilmesinden meydana gelir. Kontrol sistemi çıkışı,

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (4.8)$$

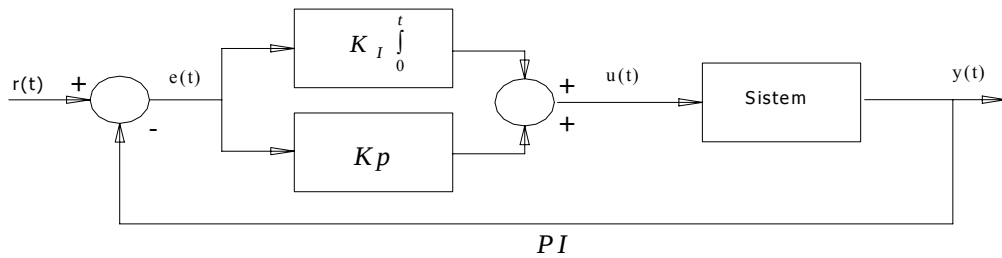
veya

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{K_I}{K_p} \int_0^t e(t) d(t) \right] \quad (4.9)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $K_p/K_I=T_i$ integral kontrol zamanıdır. PI kontrolünün transfer fonksiyonu,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4.10)$$

şeklindedir.



Şekil 4.4 Orantı+İntegral (PI) kontrol

Orantı kontrole integral kontrol ilavesi, orantı kontrolünün tek başına kullanılması halinde sistemde ortaya çıkan kalıcı durum hatasını ortadan kaldırır. İntegrasyon işlemi kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmakla beraber aynı bağıl kararlılık koşullarında verilen sistemin cevap hızı düşer. İntegral kontrol kazancı K_I 'nin arttırılması ile cevap hızı artmakla beraber, kazanç değerinin çok fazla arttırılması sistemi kararsızlığa götürebilir (Yüksel, 2001).

4.1.5 Orantı+Türev Kontrolü (PD-Kontrol)

PD kontrol sistemi, Şekil 4.5'de görüldüğü gibi orantı ve türev kontrol sistemlerinin birleşmesinden meydana gelmiş olup bu kontrol sisteminin çıkışı,

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de}{dt} \quad (4.11)$$

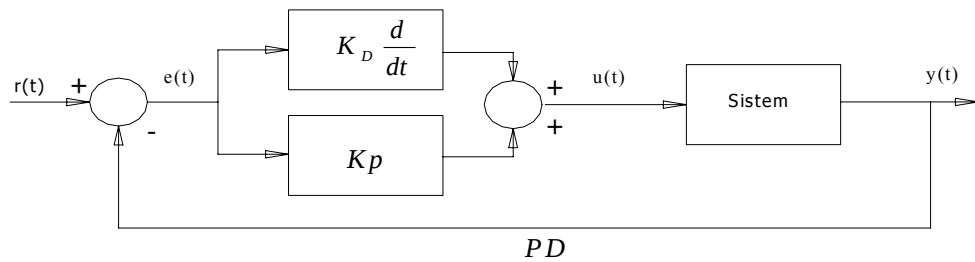
veya

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{K_D}{K_p} \frac{de}{dt} \right] \quad (4.12)$$

şeklinde verilir. Burada, $T_d = K_D/K_p$ türev kontrol zamanı olup sistemin transfer fonksiyonu,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (4.13)$$

olarak elde edilir.



Şekil 4.5 Orantı + Türev (PD) kontrol

PD kontrolünde; transfer fonksiyonunun payına ilave edilen “s” (öndelik ilavesi) yalnız orantı kontrol kullanılması haline göre, sistemin aynı bağıl kararlılığında daha büyük orantı kazancı (K_p) değerleri seçilmesine olanak sağlar. Bu durumda, sistemin cevap hızı artar. Ancak, orantı kontrol halinde ortaya çıkan kalıcı durum hatası türev kontrol ilavesi ile ortadan kaldırılamaz, yalnız orantı kontrol kullanılması durumuna göre azaltılabilir (Yüksel, 2001).

4.1.6 Orantı+İntegral+Türev Kontrolü (PID Kontrol)

Bu kontrol sistemi, Şekil 4.6'da verildiği gibi üç temel kontrol sisteminin (P,I,D) birleşiminden meydana gelmiştir. PID kontrol sisteminin çıkışı veya kontrol yasası,

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{K_I}{K_p} \int_0^1 e(t) dt + \frac{K_D}{K_p} \frac{de}{dt} \right] \quad (4.14)$$

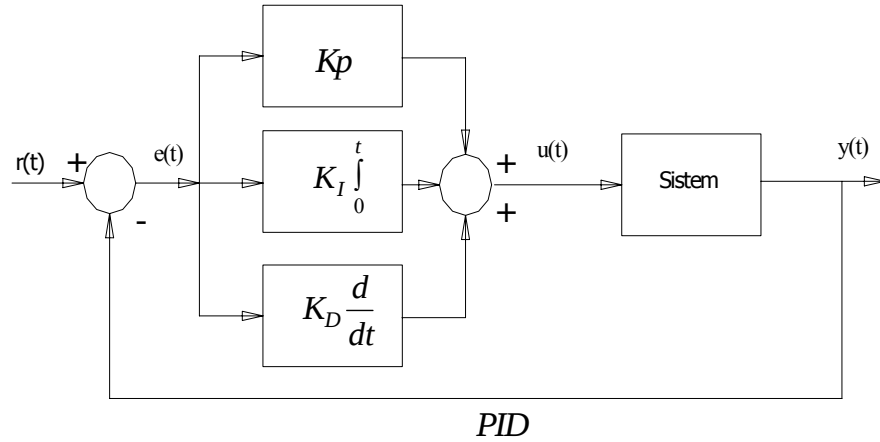
veya

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right] \quad (4.15)$$

şeklinde ifade edilir ve buradan transfer fonksiyonu,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.16)$$

olarak elde edilir.



Şekil 4.6 Orantı+İntegral+Türev kontrol

PID kontrol üç temel kontrol sisteminin üstünlüklerini tek bir birim içinde birleştiren bir kontrol sistemidir. İntegral kontrol, sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlarken türev kontrol de, yalnızca PI kontrolü kullanılması haline göre sistemin aynı bağlı kararlılığı için cevap hızını artırır. Buna göre PID kontrol sistemi, sistemde sıfır kalıcı durum hatası olan hızlı bir cevap sağlar.

PID kontrol sistemi diğerlerine göre daha karmaşık yapıda olup o oranda pahalıdır. Burada K_p , T_i ve T_d parametrelerinin uygun bir ayarı ile uygun bir kontrol sağlanabilir. Eğer bu

katsayılar, uygun bir şekilde ayarlanmayacak olursa, PID kontrolün sağlayacağı üstün özelliklerden yararlanılamaz (Kuo, 1995).

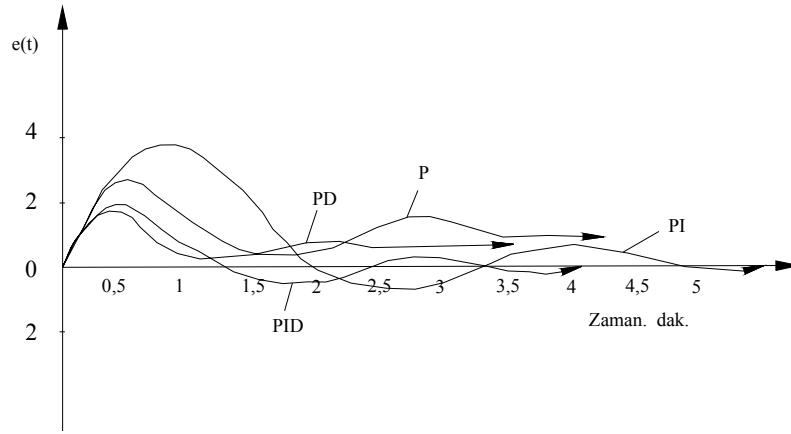
4.1.6.1 PID Kontrolün Temel Özellikleri

Burada denetlenecek sistemin dinamik yapısına bağlı olarak üç temel kontrol sisteminin mümkün olan en basit bileşimleri kullanılır. Genelleştirilmiş bir PID tipi kontrol sistemi içinde orantı, integral ve türev kontrol ilavesinin sağlayacağı özellikler ve bunlara bağlı temel parametre özellikleri ele alınacaktır.

PID tipi kontrol sisteminin genel transfer fonksiyonunu tekrar ele alacak olursak,

$$G_d(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.17)$$

- P- Kontrol: $T_i \rightarrow \infty$ ve $T \rightarrow 0$ halinde kontrol sistemi yalnızca orantı kontrol ile çalışır. Orantı kazancı, K_p 'nin ayarı ile kontrol sisteminin duyarlılığı artırılabilir. Orantı kontrol; oldukça basit bir yapıda ve makul ölçülerde ucuz ve güvenilir olması nedeniyle, endüstride kalıcı durum hatasının fazla önemli olmadığı yerlerde kullanılır.
- PI- Kontrol: Orantı kontrole integral kontrol ilavesi ile elde edilen PI tipi kontrol sisteminin yapısı nispeten basit olup özellikle zaman kontrol sistemlerinde % 75-90 arasında kullanılır. En yaygın kullanım alanları basınç, seviye ve akış kontrol sistemleridir. İntegral kontrol, çıkış büyüklüğünde meydana gelebilecek kalıcı durum hatalarını ortadan kaldırır. İntegral kontrolün kullanım amacı sistemin değişen talepleri üzerinde yeterli bir kontrolü sağlamaktır. Eğer sistemden gelen talep yalnızca P kontrolle karşılanıyorsa I kontrolün kullanılmasına gerek yoktur.
- Uzun ölü zaman gecikmelerinin ortaya çıktığı zaman kontrol sistemlerinde PI kontrolde integral kontrolcüsünün tamamlayıcısı olarak türev kontrol kullanılır. Orantı kontrole türev ilavesi ile elde edilen PD kontrol; kalıcı durum hatasını sıfırlayamamakla beraber, bozucu girişten doğan kalıcı durum hatasının fazla önemsenmediği, fakat buna karşılık orantı kontrole göre geçici durum davranışının iyileştirilmesi istenen konum servo mekanizmalarında tercih edilir. Türev kontrol ilavesi kararsız veya kararsızlığa yatkın bir sisteme sönüm ilave ederek sistem daha kararlı hale getirilebilir. Türev kontrol ilavesinin en önemli sakıncası kontrol sinyalleri yanında sistemde ortaya çıkan gürültü sinyallerini de kuvvetlendirmesidir. Şekil 4.7'de P, PI, PD ve PID kontrolcüleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.7 Kontrol sistemlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.7’ deki eğrilerden görüldüğü gibi, yalnızca P kontrol durumunda, cevap eğrisi birkaç salınım yaptıktan sonra kalıcı durum halinde olması gerektiği noktadan belli bir sapma gösterir. PI kontrol durumunda, benzer biçimde bir cevap eğrisi elde edilmekle beraber orantı kontrole integral kontrol ilavesi sistemin kararsızlığa yatkınlığını attırır. PD kontrol durumunda hata ortaya çıkar çıkmaz hem orantı kontrol hem de türev kontrol hatayı azaltır. Dolayısıyla hatanın ilk ve en yüksek değeri daha küçük olur. PD kontrol ile; P kontrole göre, daha az başlangıç sapması ve daha az kalıcı durum hatası ortaya çıkar. PID kontrol durumunda ise, daha büyük bir başlangıç hatası ortaya çıkmasına rağmen kalıcı durum hatası tamamen sıfır olur (Yüksel, 2001).

4.2 Bulanık Mantık Kontrolcü (BMK)

İki bin yıldan fazla zamandan beri batı bilimi mutlaklar üzerine kuruludur. Her şey siyah ya da beyaz, canlı veya ölü, hep ya da hiçtir.

Dünya ‘gri’dir ama bilim ‘siyah ve beyaz’dır. Sıfırlardan ve birlerden bahsedilir ama doğru bunların arasında konumludur. Bilinen anlamdaki mantık ve bilgisayar programlama cümleleri hepsi doğru veya hepsi yanlıştır, 1 veya 0. Fakat, dünya hakkındaki cümlelerinde ya değişiklik arz eder. Gerçek hakkındaki cümleler tamamen doğru veya tamamen yanlış değildir. Doğrulukları toplam doğruluk ile toplam yanlışlık arasında, yani 0 ile 1 arasında yatmaktadır. Onlar tek değerli değil çok değerli olmaktadır, yani gri, yani bulanıkırlar (fuzzy).

Bulanık Mantık insanların günlük konuşma ve algılama tarzından yola çıkarak, “az yoğun trafik, biraz kalabalık, az pişmiş, çok yoğun gibi ara değerler içeren mantık cümlelerini

değerlendirebilen IQ'su yüksek makineler üretme işlemlerinin düzenlenmesidir (Kosko,1994).

Günümüzün gelişen teknolojileri artık geleneksel elektronik kontrol biçimlerinden yeteri kadar verim alamamaktadır. Gün geçtikçe ortaya çıkan daha hassas birimler ve kaçınılmaz olan enerjiden tasarruf sağlama zorunluluğu bilim adamlarını bu yönde araştırma yapmaya itmiştir. Gitgide mükemmele yaklaşma isteği, Yapay Zeka, Yapay Sinir Ağları, Çok Değerli Mantık ve bunlarla birlikte Bulanık Mantığın ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Endüstriyel bir süreç denetiminden; sistemin güvenliği ve kararlılığını sağlaması, kolay anlaşılır, tamir edilebilir ve değiştirilebilir olması, sistemin performansını istenen seviyeye çıkarması, yatırım ve işletme açısından ucuz olması istenir. Bu koşulların gerçekleştirilmesi için kontrol edilecek sistemin yapısının ve dinamik özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekir. Sistemin değişkenleri matematiksel modelleme yapılabilecek kadar kesin olarak bilinmeyebilir veya bu değişkenler zaman içerisinde değişiklik gösterebilir. Bazı sistemlerde modelleme doğru şekilde yapılsa bile elde edilen modelin kontrolcü tasarımında kullanımı karmaşık problemlere neden olabilir. Bu nedenle, bazı kontrol algoritmalarının belirsiz, doğru olmayan, iyi tanımlanmamış, zamanla değişen ve karmaşık sistemlere uygulanması mümkün olmayabilir. Mühendislik modellemelerinde belirsizliklerin ortadan kaldırılması, kesinliğin kazanılmasına uğraşılması durumunda ise maliyetlerin artması ve zamanın uzaması söz konusudur. Çünkü, maliyetle kesinlik arasında doğru orantı bulunur. Yüksek kesinlik sadece yüksek maliyetlere değil aynı zamanda, sorunun çözülmesinin çok karmaşıklaşmasına da sebep olmuştur (Şen, 2001).

Bu gibi durumlarda, bir uzman kişinin bilgi ve deneyimlerinden yararlanılma yoluna gidilir. Uzman kişi az, çok, pek az, pek çok, biraz az, biraz çok gibi günlük hayatta sıkça kullanılan dilsel niteleyiciler doğrultusunda bir kontrol gerçekleştirir. Bu dilsel ifadeler doğru bir şekilde bilgisayara aktarılırsa hem uzman kişiye ihtiyaç kalmamakta hem de uzman kişiler arasındaki kontrol farkı ortadan kalkmaktadır. Böylece, kontrol mekanizması esnek bir yapıya kavuşmaktadır (Elmas, 2003).

Bulanık mantık yaklaşımı, makineler insanların özel verilerini işleyebilme ve onların deneyimlerinden ve önsezilerinden yararlanarak çalışabilme yeteneği verir. Bu yeteneği kazandırırken sayısal ifadeler yerine sembolik ifadeler kullanır. İşte bu sembolik ifadelerin makineler aktarılması matematiksel bir temele dayanır. Bu matematiksel temel, Bulanık Mantık Kümeler Kuramı ve buna dayanan Bulanık Mantıktır (Elmas, 2003).

Bu yaklaşım, ilk defa Amerika Birleşik Devletleri'nde düzenlenen bir konferansta 1956

yılında duyurulmuştur. Ancak bu konudaki, ilk ciddi adım Azerbeycan asıllı Lütfü Askerzade (Zadeh, 1965) tarafından yayınlanan bir makalede, bulanık mantık veya bulanık küme kuramı adı altında ortaya konulmuştur. Zadeh bu çalışmasında insan düşüncesinin büyük çoğunluğunun bulanık olduğunu, kesin olmadığını belirtmiştir. Bu yüzden, 0 ve 1 ile temsil edilen boolean mantık bu düşünce sistemini yeterli bir şekilde ifade edememektedir. Ayrıca, Zadeh insanların denetim alanında, mevcut makinelerden daha iyi olduğunu ve kesin olmayan dilsel bilgilere bağlı olarak etkili kararlar alabildiklerini savunmuştur.

Bulanık mantığın genel özellikleri Zadeh tarafından şu şekilde ifade edilmiştir;

- Bulanık mantıkta, kesin değerlere dayanan düşünme yerine, yaklaşık düşünme kullanılır.
- Bulanık mantıkta her şey $[0,1]$ aralığında belirli bir derece ile gösterilir.
- Bulanık mantıkta bilgi büyük, küçük, çok, az gibi dilsel ifadeler şeklindedir.
- Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılır.
- Her mantıksal sistem bulanık olarak ifade edilebilir.
- Bulanık mantık matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için çok uygundur.
- Bulanık mantık tam olarak bilinmeyen veya eksik girilen bilgilere göre işlem yapma yeteneğine sahiptir.

Bulanık mantığın temel amacı, insanların tam ve kesin olmayan bilgiler ışığında, tutarlı ve doğru kararlar vermelerini sağlayan, düşünme ve karar verme mekanizmalarının modellenmesidir.

Bulanık mantık olayların oluşum olasılığından çok oluşum derecesiyle ilgilenir. Bundan dolayı bazı bilim adamları bulanık mantığı olasılığın bir devamı olarak düşünmüşlerdir. Fakat ikisi de oldukça farklı kavramlardır. Olasılık bir şeyin olup olamayacağını ölçer. Bulanıklık ise bir olayın ne dereceye kadar olduğunu ölçer. Olasılıkla bulanıklık arasındaki en önemli ve temel farklılık bulanıklığın tespit edilebilir belirsizlik olmasıdır (Akbiyık, 2004).

İlk önceleri sadece teorik bir araştırma olarak çıkmış olan bulanık mantık, artık günümüzde pek çok sahada uygulama alanı bulmuştur. Bu uygulama alanlarının arasında en belirgin olanları bilgisayar bilimleri, tıp, sosyal bilimler, yapay zeka, uzman sistemler ve kontrol sayılabilir. Tüm bu uygulama alanları içerisinde en dikkate değer olanı kontrol alanındaki uygulamalardır. Dolayısıyla, özellikle 1980 yılından sonra endüstriyel kuruluşların ilgisi bu alana kaymıştır. Böylece, bulanık mantık her geçen gün gerek teorik alanda, gerekse uygulama alanında gelişmesini sürdürerek, mühendisler için önemli bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.2.1 Bulanık Mantığın Avantajları

Bulanık mantık yaklaşımının klasik yaklaşımlara göre bir takım üstünlük ve sakıncaları bulunmaktadır (Elmas, 2003).

- Sistemin matematiksel modelinin çıkarılmasının çok güç olduğu durumlarda en önemli bilgiler iki kaynaktan gelir. Bunlardan biri algılayıcılar ki bunlar durum değişkenlerinin sayısal değerlerini gösterirler. Diğeri ise operatör deneyimleridir ki bunlarda sistem hakkında operatörün dilsel tanımlamaları ve kontrol talimatlarını içerirler. Bulanık kontrol bu bilgilerden yararlanırken klasik kontrol bu bilgilerden faydalanamaz. İyi mühendislik yaklaşımının mevcut olan bütün bilgilerin kullanımını gerektirdiği düşünülürse, sistem hakkındaki bilgilerin bu türden olduğu durumlarda bulanık kontrol en iyi seçimdir.
- Bulanık mantık yaklaşımı matematiksel modele ihtiyaç duymadığından matematiksel modeli iyi tanımlanamamış, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemler en başarılı uygulama alanlarıdır.
- Bulanık mantık yaklaşımında işaretlerin bir ön işlemeye tabi tutulmaları ve geniş bir alana yayılmış değerlerin az sayıda üyelik işlevlerine indirgenmeleri, uygulamaların daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşmasını sağlar.
- Anlaşılması kolaydır. Çünkü bulanık kontrol insanın kontrol stratejisini taklit eder.
- Gerçekleşmesi basittir, çok sayıda paralel işleme izin verir. Sistemin sağlamlığını artırır.
- Diğer sistemlere göre yazılımları basit olduğundan, uygulamalar ucuza mal olmakta ve yapılan işler basitleşmektedir. Bu yüzden, bulanık kontrol yüksek performans / maliyet oranına sahip bir yaklaşımdır.

4.2.1.1 Bulanık Mantığın Sakıncaları

- Bulanık mantık uygulamalarında mutlaka kuralların uzman deneyimlerine dayanarak tanımlanması gerekir. Üyelik işlevlerini ve bulanık mantık kurallarını tanımlamak her zaman kolay değildir.
- Üyelik işlevlerinin değişkenlerinin belirlenmesinde kesin sonuç veren belirli bir yöntem ve öğrenme yeteneği yoktur. En uygun yöntem deneme yanılma yöntemidir, bu da çok uzun zaman alabilir. Uzun testler yapmadan gerçekten ne kadar üyelik işlevi gerektiğini önceden kestirmek çok güçtür.
- Bulanık mantık yaklaşımında üyelik işlevlerinin değişkenleri sisteme özeldir, başka sistemlere uyarlanması çok zordur.

- Sistemlerin kararlılık, gözlemlenebilirlik ve denetlenebilirlik analizlerinin yapılmasında ispatlanmış kesin bir yöntem olmayışı bulanık mantığın temel sorunudur. Günümüzde bu sadece pahalı deneyimlerle mümkün olmaktadır.

4.2.2 Bulanık Mantığın Günümüzdeki Uygulama Alanları

Son yıllarda, bulanık mantık oldukça büyük bir uygulama sahası bulmuştur (Çizelge 4.1). Özellikle bulanık küme teorisi üzerine yapılan araştırmaların yerine oturması ve çoğu alanda, bulanık mantıklı sağduyulu modellerin standart matematik modellerden daha yararlı sonuçlar vermesi nedeniyle, bulanık mantık günümüzün en önemli konularından biri olmuştur.

Bulanık mantığın ilk önemli uygulaması çimento sanayinde olmuştur. Bu sanayide, değirmen içerisindeki sıcaklık ve oksijen oranı kaliteli bir ürün elde etmek için son derece önemlidir. Ayrıca, ısı ve karbonmonoksit oranı gibi bilgilerin doğruluğu da iyi bir çalışma düzeni elde edilebilmesi için gereklidir. Bu şartlar altında, 1980 yılında Danimarka’da bir firma geleneksel kontrol yerine bir bulanık kontrolör kullanmış ve çok başarılı sonuçlar veren bir uzman sistem geliştirmiştir.

İkinci ve aynı zamanda en önemli bulanık kontrol uygulaması 1987 yılında Japonya’da taşımacılık alanında gerçekleştirilmiştir. Hitachi firması, ilk olarak ulaştırma bakanlığına başvurmuş ve Sendai Metro sisteminde çalışan trenlerin otomatik olarak denetimi için bulanık mantık kullanımını önermiştir. Bakanlık öneriye olumlu baktığını belirtmiş, fakat bulanık mantıklı kontrolcünün kullanılmakta olan sisteme göre belirgin üstünlükleri olacağı konusunda kanıt istemiştir. Hitachi firması, dokuz yıl içerisinde 300.000 simülasyon çalışması ve 3.000 insansız operasyon gerçekleştirmiş ve sonunda 1996 yılının sonlarına doğru ulaştırma bakanlığından kullanım iznini almıştır. Geliştirilen sistemde, daha önce tren operatörü tarafından bir PID temelli denetleyici aracılığıyla yapılan ve yolcuların sarsıntılı bir yolculuk geçirmelerine neden olabilen hızlanma ve yavaşlama gibi işlemler otomatik olarak yapılmakta ve tren operatörünün yapması gereken işler, kapıları kapatmak ve başlatma düğmesine basmak gibi bir kaç işlemle sınırlı kalmaktadır. Böylece yolcuların, demirlere tutunma gereksinimi duymadan rahat bir yolculuk yapabilmeleri sağlanmış, daha önce kullanılan sisteme göre trenin istenilen konumda durması üç kat iyileşmiş ve kullanılan enerji %10 azalmıştır.

Çizelge 4.1 BMK uygulamaları

Uygulama	BMK Fonksiyonları
Video kaydedicisi	Resimdeki hareketlerdeki en iyi odaklama ve ışık ayarlamasını sağlar.
Çamaşır makinası	Kumaşın cinsine ve miktarına göre yıkama zamanını düzenler.
Televizyon	Mükemmel bir görüntü için resmin parlaklığını, rengini ve kontrastını düzenler.
Motor kontrolü	Beklenmeyen durumlarda hareket sırasını kontrol eder ve doğruluğu artırır.
Yeraltı treni (Metro)	Yolcu trafik durumuna göre değerlendirilen sabit sürüşü ve duruş değerini artırmanın yanısıra çok rahat ve sarsıntısız kalkış ve duruşu temin eder.
Elektrik süpürgesi	Zeminin özelliğine, toz ve kirin miktarına göre elektrik süpürgesinin motor gücünü ayarlar.
Su ısıtıcısı	Kullanılacak suyun miktarı ve sıcaklığına göre rezistansın sıcaklık gücünü ayarlar.
Helikopter kontrolü	Pilotla ve rüzgâr hızı ve yönünü kapsayan uçuş durumlarıyla en iyi operasyon hareketlerini ayarlar.
Asansör denetimi	Yolcu trafiğini değerlendirir, böylece bekleme zamanını azaltır.
SLR fotoğraf makinesi	Ekranda birkaç obje olması durumunda en iyi fokusu ve aydınlatmayı belirler.
Otomobil aktarma organı	Araba kullanış stilini ve yükünü sezerek en iyi dişli oranını seçer.
ABS fren sistem	Tekerlerin kilitlenmeden frenlenmesini sağlar
Tansiyon aleti	Tansiyon ölçer.
El bilgisayar	El yazısı ile veri ve komut girişine olanak tanır
Hisse senedi alım-satım programı	Hisse senedi portfolyosunu idare eder.
Üretim planlaması	Üretim planlamasında bulanık mantık kullanır.

4.2.3 Bulanık Kümeler

Geleneksel küme teorisinde kullanılan küme kavramı bir nesnenin bir kümenin elemanı olması ya da olmaması gibi iki seçenekli bir mantığa dayanmaktadır. 1960'ların ortasında Zadeh niteliklerin ikili üyelik fonksiyonuyla ifade edildiği klasik kümeler yerine, dereceli üyelik fonksiyonuyla ifade edildiği bulanık kümeler tanımlamasını önermiştir.

Bir çeşit çok değerli küme kuramı olan bulanık küme kuramında, kümedeki her bir birey, klasik çift değerli küme kuramlarında olduğu gibi üye ya da üye değil olarak değil, bir dereceye kadar üye olarak görülmektedir. Bulanık küme de değişik üyelik derecesinde öğeleri olan bir topluluktur. Bulanık kümeler klasik kümelere benzer şekilde iki yöntemle gösterilir. Bunlardan birincisi küme elemanlarının üyelik derecelerine göre sıralanması, diğeri de matematiksel olarak üyelik fonksiyonu tanımlamak şeklindedir.

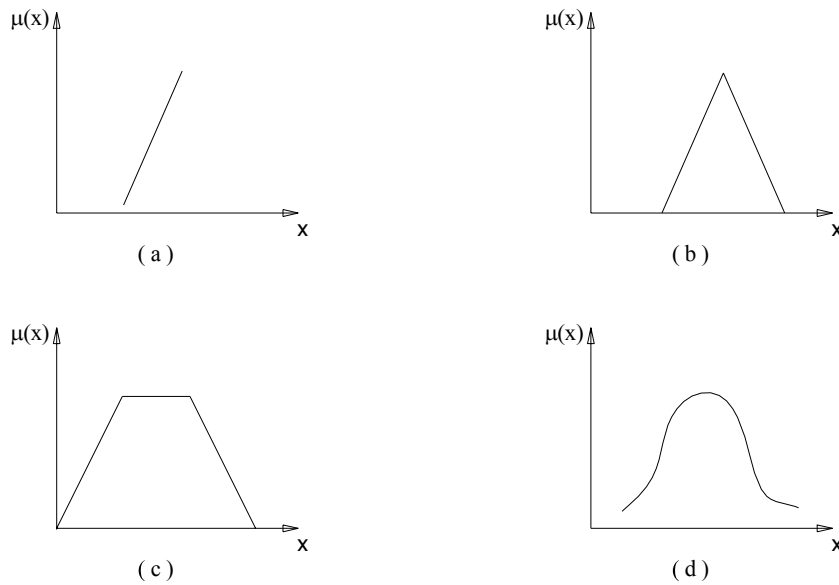
Bulanık kümelerde üyelik dereceleri arasındaki geçiş yumuşak ve sürekli bir şekilde olmaktadır. Öğeler bulanık kümeye kısmi derecede aittir. Klasik kümelerdeki karakteristik fonksiyon, $\mu_A : E \rightarrow \{0,1\}$, bulanık kümelerde yerini $\mu_A : E \rightarrow [0,1]$ olarak gösterilen üyelik fonksiyonuna bırakır.

En genel haliyle bulanık küme tanımı şu şekilde yapılabilir. Bir X evrensel kümesi içindeki A bulanık kümesi $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonu ile tanımlanır ve her x değerine karşı düşen üyelik fonksiyonu değerine o x elemanın A bulanık kümesine ait üyelik derecesi denir. Üyelik fonksiyonu $[0,1]$ aralığında tanımlanır. Üyelik derecesinin 0 olması, karşılık gelen x elemanın o bulanık kümenin tamamen dışında, 1 olması ise tamamen içinde olduğu anlamına gelir.

4.2.3.1 Üyelik Fonksiyonu

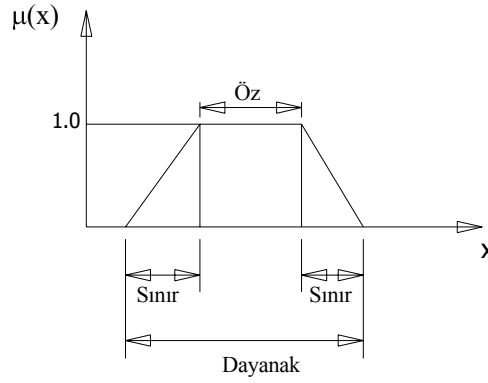
Genel olarak, küme üyelerinin değerleri ile değişiklik gösteren eğriye üyelik fonksiyonu (önem eğrisi) adı verilir. Üyelik fonksiyonu grafiğinde x eksen üyeleri gösterirken, y eksen de üyelik derecelerini gösterir. Üyelik derecesi olasılıkla karıştırılmaması gereken bir kavram olup, o elemanın söz konusu kümeye aitlik mertebesini gösterir.

Çok sayıda üyelik fonksiyonu tipi olmakla beraber pratikte en fazla kullanılanlar üçgen, yamuk, çan eğrisi, monotonik, gaussian ve sigmodal fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Çeşitli üyelik fonksiyonları a)Monotonik, b)Üçgen, c)Yamuk, d)Çan eğrisi

4.2.3.2 Üyelik Fonksiyonunun Kısımları



Şekil 4.9 Üyelik fonksiyonu kısımları

En genel hali ile, yamuk şeklindeki bir üyelik fonksiyonu Şekil 4.9’da gösterildiği gibi, değişik kısımlara ayrılabilir (Şen, 2001). Görüldüğü gibi verilen bir bulanık alt kümede bir değil, birden fazla ögenin üyelik derecesi 1’e eşit alınabilir. Bu durumda, 1 üyelik dereceli ögelerin tam anlamı ile, hiçbir şüpheye düşmeksizin, sadece o alt kümeye ait olduğu sonucuna varılır. Böyle üyelik derecesine sahip ögeler alt kümenin orta kısmında toplanmıştır. İşte üyelik dereceleri 1’e eşit olan ögelerin toplandığı alt küme kısmına, o alt kümenin özü denir. Burada $\mu(x) = 1$ ’dir. Üçgen şeklindeki üyelik fonksiyonunda bir tane ögenin üyelik derecesi 1’e eşit olduğundan, üçgen üyelik fonksiyonlarının özü bir nokta olarak karşımıza çıkar.

Bunun aksine bir alt kümenin tüm ögelerini içeren aralığa o alt kümenin dayanağı adı verilir. Dayanakta bulunan her ögenin az veya çok değerde (0 ile 1 arasında) üyelik dereceleri vardır. Bunun matematik gösterilişi $\mu(x) > 0$ şeklindedir.

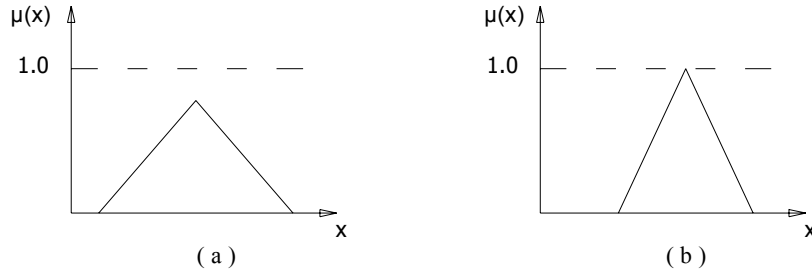
Üyelik dereceleri 1’e veya 0’a eşit olmayan ögelerin oluşturduğu kısımlara üyelik fonksiyonunun sınırları veya geçiş bölgeleri denir. Bunun matematik tanımı $0 < \mu(x) < 1$ şeklindedir. Bunlar alt kümenin kısmi ögeleridir. Aslında bir alt kümeye bulanıklık özelliğinin takılması bu geçiş yerlerinin bulunması sonucudur. Genel olarak, tüm üyelik fonksiyonlarında biri sağda diğeri de solda olmak üzere iki tane geçiş bölgesi vardır.

Yukarıda şekil olarak açıklanan bu üç özelliğe ilave olarak üyelik fonksiyonunun sahip olması gerekli olan iki tane daha özellik bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, bulanık kümenin normal olduğunu tespit etmemize yarayan bir kavramdır. Buna göre normal bulanık kümede, en azından bir tane üyelik derecesi 1’e eşit olan üye bulunmalıdır. Yani, üyelik fonksiyon derecesi 1 olan, A bulanık kümesine “normal bulanık küme” denir. Başka bir deyişle, formal olarak;

$$\max \mu_A(x) = 1 \quad (4.18)$$

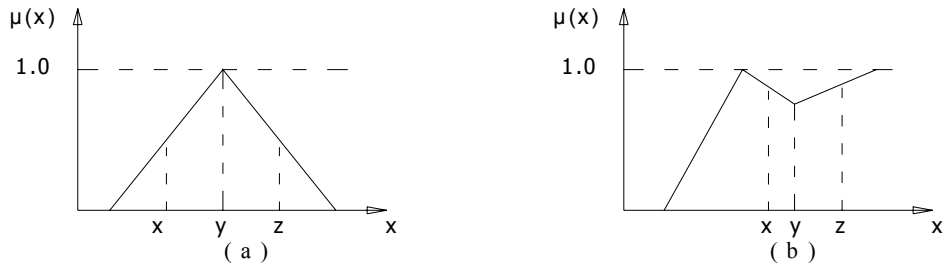
$$x \in X$$

şeklinde gösterilen bulanık kümeleri normal bulanık küme olarak ifade edebiliriz. Şekil 4.10'da normal ve normal olmayan bulanık kümeler gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Bulanık kümeler a)normal olmayan b)normal

İkinci özellik ise bulanık kümenin dış bükey (konveks) olmasıdır. Dış bükey olan bulanık kümelerde üyelik fonksiyonu kümenin dayanağı üzerinde, ya sürekli artar veya sürekli azalır veya üçgen üyelik fonksiyonunda olduğu gibi önce sürekli olarak üyelik derecesi bir öğede 1'e eşit oluncaya kadar artar, ondan sonraki dayanağa düşen öğeler için sürekli azalır. Bunun aksi durumlar da söz konusudur. Dış bükey ve dış bükey olmayan (karma) bulanık kümeler Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Bulanık kümeler a)dış bükey b)dış bükey olmayan (karma)

Dış bükeyliğin matematik olarak tanımlanmasında, aynı bulanık alt kümeye düşen x , y ve z gibi üç tane öğe düşünülürse ve bunlar arasında değerce büyüklük olarak $x < y < z$ gibi bir sıra bulunuyor ise, bunlardan ortadakinin üyelik fonksiyonu önceki ve sonrakine göre;

$$\mu(y) \geq \min[\mu(x), \mu(z)] \quad (4.19)$$

şeklindedir ve bu bağıntı daima geçerli olmalıdır. Yani y 'nin üyelik derecesi, x ve z 'nin üyelik derecesinin en küçüğünden daha büyüktür. İşte bu durumda, o kümeye dış bükey bulanık küme adı verilir.

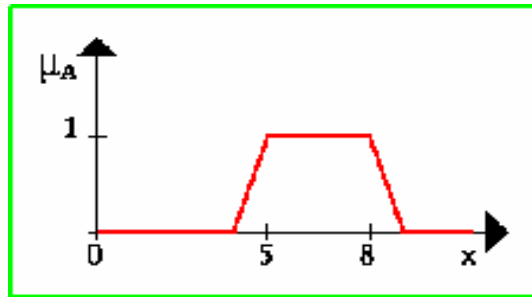
Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarında üyelik derecesinin 0.5'e eşit olması durumundaki noktaya geçiş noktası adı verilir. Yani geçiş noktasında, $\mu(x) = 0.5$ 'dir. Ayrıca bulanık kümenin yüksekliği denilen bir büyüklük, üyelik derecesinin en büyük olduğu öğelere karşı gelir. Yukarıda söylenenlerden sonra, normal bulanık kümelerde yüksekliğin 1'e eşit olması gerekliliği anlaşılır. Diğer bir ifade ile, yüksekliği 1'e eşit olmayan bulanık kümeler, normal olmadıklarından herhangi bir bulanık küme, mantık ve sistem çalışmasında kullanılamaz. Normal olmayan bulanık kümeleri normal hale dönüştürmek için, kümenin her bir üyelik derecesinin, en büyük üyelik derecesine bölünmesi gereklidir. Böylece, normal olmayan bulanık kümelerin dış bükey olmaları şartı ile nasıl normal bulanık kümeler haline dönüştürüleceği anlaşılmış olur (Şen, 2001).

4.2.4 Bulanık Küme İşlemleri

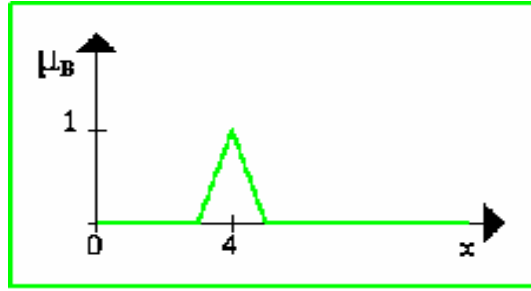
Keskin küme işlemlerinde olduğu gibi bulanık kümelere kesişme, birleşme ve ters eleman özellikleri uygulanabilir.

Bulanık mantıkla ilgili ilk makalesinde L.A.Zadeh, iki bulanık kümenin kesişimi için minimum operatörünü birleşimi için de maksimum operatörünü önermişti. Bu yaklaşımın üyelik değerlerinin 0 ya da 1 olması durumunda keskin kümelerdeki kesişim ve birleşim işlemleriyle birebir örtüştüğü kolayca görülebilir (Zadeh, 1965).

Konuya açıklık getirme adına bir örnek verilecek olursa A , 5 ile 8 arasında bulanık bir aralık olsun. B ise değeri 4 civarında olan bulanık bir değer olsun. Bu duruma uyan grafikler aşağıda verilmiştir (Şekil 4.12, Şekil 4.13) .

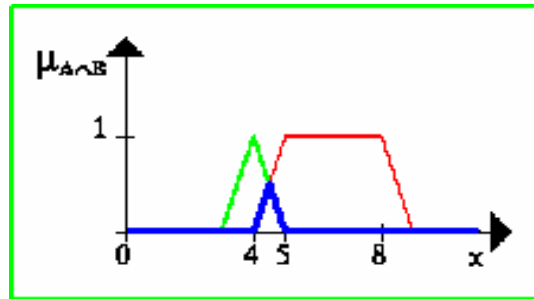


Şekil 4.12 Beş ile sekiz arasında bulanık bir değer



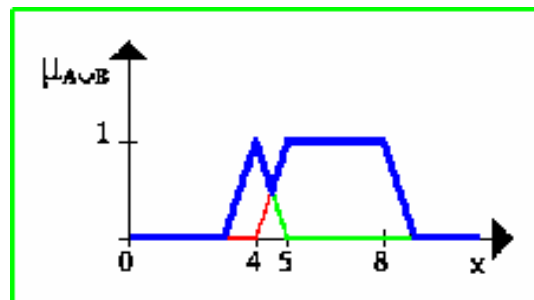
Şekil 4.13 Dört civarında bulanık bir değer

Aşağıdaki grafik değeri 5 ile 8 arasında VE 4 civarında olan bulanık kümeyi göstermektedir. VE işlemi kesişme işlemine karşılık gelmektedir ve Mavi çizgi kümelerin kesişmesinin sonucunu göstermektedir (Şekil, 4.14).



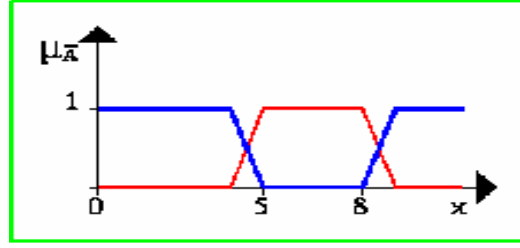
Şekil 4.14 A ve B bulanık kümelerinin kesişimi

Aşağıdaki grafik, 5 ile 8 arasında VEYA 4 civarında olan bulanık kümeyi göstermektedir. VEYA işlemi birleşme özelliğini taşımaktadır ve Mavi çizgi iki bulanık kümenin birleşimini göstermektedir (Şekil, 4.15).



Şekil 4.15 A ve B bulanık kümelerinin birleşimi

Aşağıdaki grafik bulanık kümelerin ters elemanının gösterimine bir örnektir (Şekil 4.16). Mavi çizgi A bulanık kümesinin tersini göstermektedir.



Şekil 4.16 Bulanık bir kümenin tersi

Temel bulanık işlemleri formül olarak gösterilirse, A ve B üyelik fonksiyonları sırasıyla μ_A ve μ_B olan X evrenindeki tanımlanmış iki bulanık küme olmak üzere, klasik küme teorisinde tanımlanan temel işlemler onlar için tanımlanabilir. Buna göre $\mu \in X$ için,

$$\text{BİRLEŞME} : \mu_{A \cup B}(\chi) = \max \{ \mu_A(\chi), \mu_B(\chi) \} \quad (4.20)$$

$$\text{KESİŞME} : \mu_{A \cap B}(\chi) = \min \{ \mu_A(\chi), \mu_B(\chi) \} \quad (4.21)$$

$$\text{TÜMLEME} : \mu_{\bar{A}}(\chi) = 1 - \mu_A(\chi) \quad (4.22)$$

şeklinde tanımlanır (Klir ve Folser, 1998).

4.2.5 Bulanık Sayılar

X evreninde tanımlanan F bulanık kümesi normal ve iç bükey ise bulanık küme “bulanık sayı” olarak adlandırılır. Formül olarak gösterilirse;

$$\text{Max } \mu_F(\chi) = 1 \quad (\text{normal}) \quad \chi \in X \quad (4.23)$$

$$\mu_F(\lambda\chi_1 + (1-\lambda)\chi_2) \geq \min(\mu_F(\chi_1), \mu_F(\chi_2)) \quad (\text{Konveks}) \quad (4.24)$$

$$\chi_1, \chi_2 \in X \quad \lambda \in [0,1]$$

şartlarını sağlayan F bulanık kümesine “bulanık sayı” denir.

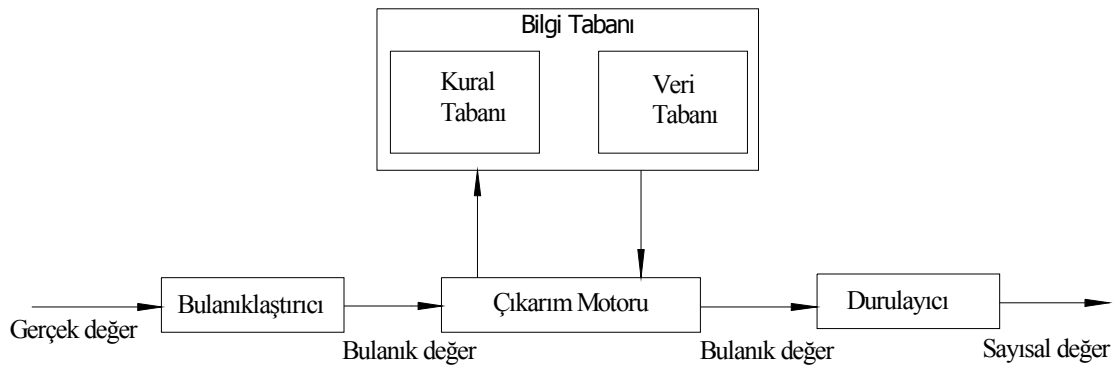
4.2.6 Bulanık Mantık Kontrolcülerin Genel Yapısı

Bulanık mantık, endüstriyel süreçleri denetlerken kesin ve tam sayısal kurallardan ziyade dilsel kuralları içine alır. BMK’leri, klasik ve modern kontrol teorisinde olduğu gibi kesin ve tam matematik modellere ihtiyaç duymaz. Çoğu sistemde benzer model ölçümleri belirtmek oldukça zordur. Denetlemesi zor olan karmaşık süreçlerde (çimento ocakları, çelik fırınları, çöp işleme fabrikaları gibi), bulanık mantık denetimini kullanmak zorunlu hale gelmektedir.

Bulanık mantık kontrolcülerıyla daha az bir çabayla daha fazla iş yapılabilir. Deneyimler etkin bir şekilde kullanılarak fiziksel bir sistemin kontrolü, aşağıdaki dört unsur dikkate alınarak yapılmaktadır.

- Mikrodenetleyicilerle çıkarım işlemcisi kademeli bağlayıp beraber çalıştırmak,
- Yazılım kontrolcüsü kullanmak,
- Bilgisayar tabanlı uygulamalarda ise; kural tabanı, veri tabanı, bulandırıcı, çıkarım motoru ve berraklaştırıcı olarak yazılım kullanmak ve paralel iletişimde kontrol sistemini tasarlamak,
- İçinde RAM, EPROM, I/O birimlerinin yanı sıra bulandırıcı, çıkarım motoru ve durulayıcı bölümlerinin de bulunduğu tüm devre şeklinde bulanık işlemciler kullanarak fiziksel sistemlerin kontrolünü sağlamak mümkün olacaktır.

Bulanık mantık kontrolcülerin dayandığı temel nokta; uzman bir sistem operatörünün bilgi deneyim sezgi ve kontrol stratejisini, kontrolcü tasarımında bilgi tabanı olarak oluşturmaktır. Kontrol işlemleri bilgi ve deneyime dayanan sözel kurallarla gerçekleştirilir. Örneğin bir uzman, sistem için gerekli olan kontrol davranışlarını “küçük”, “hızlı”, “yavaş” gibi sözel terimlerle tanımlarsa, “EĞER-ÖYLEYSE ” (IF-THEN) komutlarıyla oluşturulacak kurallar da sözel terimler kullanılarak elde edilecektir. Bu tür sistemler “kural tabanlı bulanık sistemler” olarak adlandırılır. Bulanık sistemler, modelleme, veri çözümlemesi, kestirim ve kontrol gibi farklı amaçlar için kullanılabilirler.



Şekil 4.17 Bulanık mantık kontrolcüsünün blok diyagramı

Şekil 4.17’de bir bulanık mantık kontrolcünün içyapısı görülmektedir. BMK, genel olarak dört ana kısımdan oluşur.

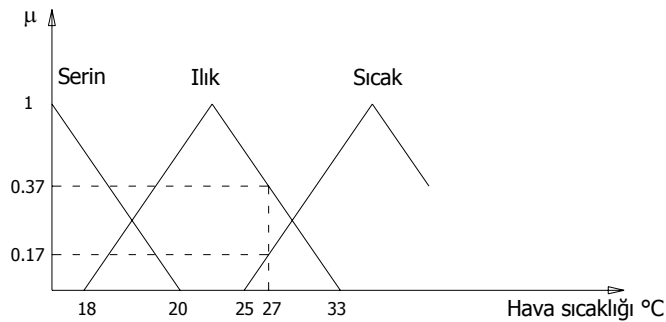
- **Bulanıklaştırma Ünitesi (Fuzzifier):** Bu bölüm giriş değişkenlerini ölçer, en son ölçülen verinin uygun dilsel değerlere dönüştürülmesini sağlar.
- **Çıkarım Motoru (Inference Engine):** Bu ünite de, kurallar bulanık mantık kurallarını uygulayarak bulanık çıkışlar verir. Burada insanın düşünüş şeklinin benzetimi yapılmaya çalışılmıştır.
- **Veri Tabanı (Data Base):** Her bir sistem değişkeninin değerleri gibi kullanılan bulanık kümelerin üyelik işlevlerini tanımlar. Çıkarım motoru, kural tabanında kullanılan bulanık kümeleri bu bölümden alır.
- **Kural Tabanı (Rule Base):** Giriş bulanık değerlerin, çıkış bulanık değerlerine tam olarak eşlenmesini temsil eder. Kontrol amaçlarına uygun dilsel denetim kuralları buradan bulunur ve çıkarım motoruna verilir.
- **Durulama Ünitesi (Defuzzifier):** Çıkarım motorunun bulanık küme üzerinde yapmış olduğu ölçek değişikliklerini, sayısal değerlere dönüştürür (Kosko, 1994).

4.2.7 Bulanık Kontrol Basamakları

4.2.7.1 Bulanıklaştırma Ünitesi

Fiziksel giriş bilgilerini, dilsel niteleyicilerle ifade edebileceğimiz bulanık mantık bilgileri şekline çevirme işlemine bulanıklaştırma (fuzzification) adı verilir. Ancak, bu bilgilerin tamamının mutlaka kesin bilgiler olması söz konusu değildir. Bulanıklaştırma işlemi önemli ölçüde kesin olmayan bilgiyi de içine alır ve bulanıklaştırır. Bulanıklaştırma sonucu elde edilen değişkenlere dilsel değişkenler (linguistic variables) denir ve işlemle birlikte tüm giriş değişkenlerinin değerleri, üyelik derecesi olarak buraya atanır.

Gelen gerçek işaretin bir bulanık değişkenler kümesine dönüştürülmesi aşağıdaki örnekle açıklanabilir. Şekil 4.18’de hava sıcaklığı ölçümüne karşılık oluşturulan üyelik fonksiyonları görülmektedir.



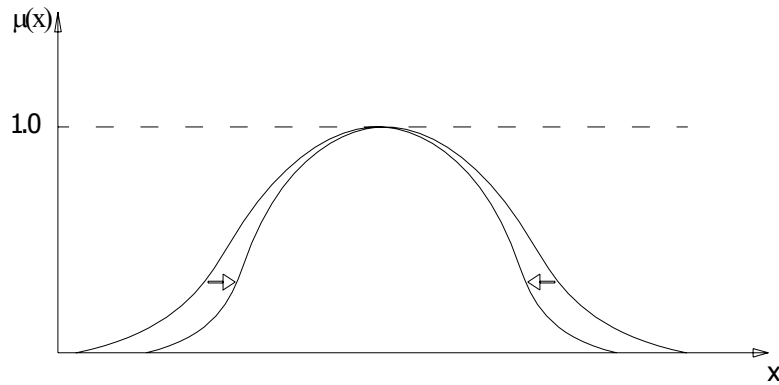
Şekil 4.18 Hava sıcaklığı üyelik fonksiyonları

Hava sıcaklığı değişimini bulandırmak için, serin, ılık ve sıcak durumları gösteren 3 bulanık küme tanımlandı. Bu kümeler, birbirlerini kısmi olarak kapsamaktadır. Dolayısıyla, her gerçek giriş bir ya da daha fazla bulanık kümede bulunabilir. Örneğin 27 °C girişi ele alındığında bu giriş için 0.37'lik üyelik derecesiyle ılık kümesine ve 0.17'lik üyelik derecesiyle sıcak kümesine aittir. Kontrolör işlemler sırasında bu ikili aitliği de hesaba katılacaktır.

4.2.7.2 Üyelik Fonksiyonlarının Oluşturulması

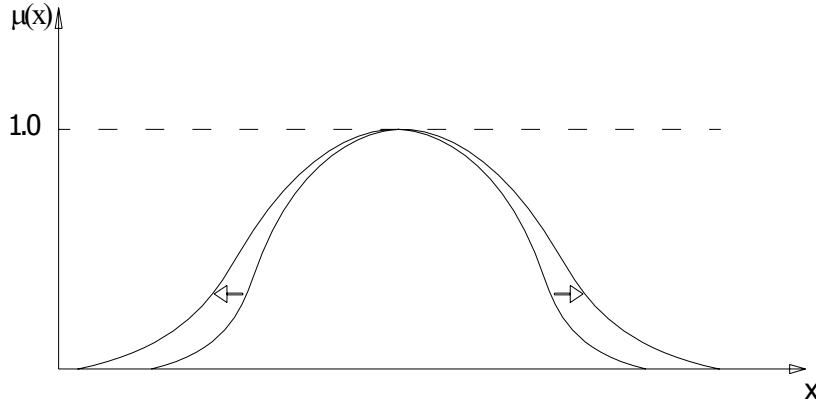
Bulanık mantıkta, dilsel ifadelerle anılan bölgelerin sınırlarını belirtmede ve giriş bilgilerine ait üyelik ağırlıklarının tespit edilmesinde kullanılmak üzere uygun üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi gerekir.

Üyelik fonksiyonunun tespiti, çok önemli bir basamaktır ve sistemin hassasiyetini belirler. Üyelik fonksiyonlarını oluşturmada özel bir kural yoktur. Fakat öncelikle, dilsel olarak ifade edilecek olan bölgelerin, sayıları tespit edilmelidir. Çünkü bu, sistemin en kaba haliyle hassasiyetini belirler. Örneğin bir koşul kümesindeki dilsel niteleyiciler {küçük, büyük, orta } bazı alanlarda yeterli olmayabilirler. O zaman {çok küçük, küçük, orta, büyük ,çok büyük } beş koşul ünitesi kullanılması gerekebilir. Daha sonraki hassasiyet ise, üyelik fonksiyonlarının şekilleriyle arttırılır. En kullanışlı üyelik fonksiyonu elde edinceye kadar birçok denemeler yapılır. Üyelik fonksiyonları daraltma, genişleme ve yoğunlaştırma işlemleriyle üyelik dereceleri değiştirilebilir (Şen, 2001).



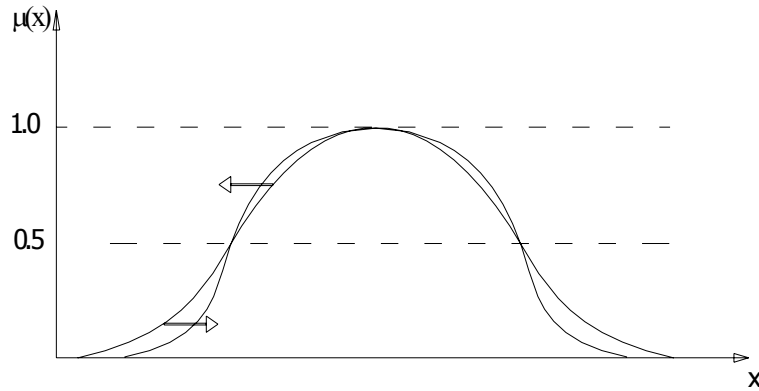
Şekil 4.19 Üyelik fonksiyonu daraltılması

Bulanık kümenin daraltılması ile sözel eşikler daha belirgin hale gelir (Şekil 4.19). Daraltma işlemi sonucunda bulanık kümede bulunan öğelerin üyelik derecelerinin tümünde azalma olur. Böylece daraltılmış bulanık küme, başlangıç alt kümesi tarafından içerilir. Üyelik derecesi büyük olan bir öğenin daraltma işlemi sonucunda üyelik derecesi daha da küçülür.



Şekil 4.20 Üyelik fonksiyonu genişletilmesi

Üyelik fonksiyonunun genişletilmesiyle verilen bir bulanık kümenin tüm öğelerinin üyelik derecelerinde artma meydana gelir (Şekil 4.20). Bir başka anlamda, başlangıç bulanık kümesi genişlemiş bulanık küme tarafından içerilir. Genişleme işlemi sonucunda düşük üyelik dereceleri büyük üyelik derecelerine göre daha fazla artar.



Şekil 4.21 Üyelik fonksiyonu yoğunlaştırılması

Eğer, bir bulanık kümenin bazı öğelerinin üyelik dereceleri azalmakta ve diğerleri çoğalmakta ise, bu işleme yoğunlaştırma adı verilir (Şekil 4.21). Genel olarak, verilen bir bulanık kümedeki öğelerin üyelik derecelerinin 0.5'den büyük olanlarının üyelik dereceleri genişleyerek artarken, 0.5'den küçük olanlarındaki daralarak azalır. Bu işlem verilen bir üyelik fonksiyonunun geçiş bölgelerinin daha dik olmasını temin eder. Yoğunlaştırma işlemi sonucunda öğelerden yarısının diğer yarısına göre netliğinde bir artış meydana gelir.

Üyelik fonksiyonları sistem parametrelerini tanımlar. Üyelik fonksiyonlarının sayısına ve şekline ait hiçbir kısıtlama yoktur. Tamamıyla tasarımcının istek ve tecrübesine bağlıdır. Bu zamana kadar yapılmış olan çalışmalarda en çok üçgen, yamuk, çan eğrisi şeklinde üyelik fonksiyonları kullanıldığı görülmektedir. Yine de bu fonksiyonlar, kontrolü yapılan sisteme göre çok değişiklik gösterebilir (Şen, 2001).

4.2.7.3 Bilgi Tabanı

Bulanık mantık uygulamalarında bilgi tabanı şeklinde kendi başına bir ünite yoktur, fakat teorik anlatımda, anlama kolaylığı sağlamak ve şematik ifade edebilme açılarından veri tabanı ve kural tabanı, ikisi beraber bilgi tabanı olarak gösterilir. Çıkarım ünitesi karar verme işlemlerinde, bilgi tabanına gidip, veri tabanından üyelik fonksiyonlarıyla ilgili bilgileri, kural tabanından ise değişik giriş değerleri için tespit edilmiş olan kontrol çıkışları bilgisini alır. Bu bakımdan bilgi tabanı ve çıkarım ünitesi sürekli ilişki halindedir.

4.2.7.4 Veri Tabanı

Üyelik fonksiyonlarının tespit edilmesi için yapılan ön çalışmalar ile son hali belli olmuş üyelik fonksiyonlarının sınır ve eğim bilgilerini içeren veri tabanını ayrı düşünmek gerekmektedir. Bir bulanık kontrol sisteminde, Basic, Pascal, C gibi üst düzey dilleri kullanan bir bilgisayar veya Assembly dilini kullanan bir mikroişlemci kullanılmış olabilir.

Her iki şekilde de üyelik fonksiyonu bilgilerinin, program olarak oluşturulması gerekmektedir. Bir veya birden fazla üyelik fonksiyonunun sınırlandırmış olduğu bir alan, dilsel olarak ifade edilen bir bölgeyi oluşturur. Bu bölgelerin, bir program dilinde oluşturulabilmesi için, her bir bölgeyi sınırlandıran üyelik fonksiyonların başlangıç, bitiş noktaları ve fonksiyon denklemlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Teorik çalışmalarda üyelik fonksiyonları grafik olarak izah edildiği ve gözle takip edilebildiği için veri tabanı grafiklerden ibaret kalmakta ve bazı çalışmalarda yüzeysel olarak anlatılmaktadır. Fakat uygulamalı bir bulanık kontrol çalışmasında, üyelik fonksiyonlarıyla oluşturulan bölge bilgilerinin, çalışmanın yapıldığı programlama dilinde oluşturulması, programlamanın önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Veri tabanı oluştururken evrensel kümenin ayrıklaştırılması yani analog bilgilerin dijitale çevrilmesi, normalizasyonu ve giriş-çıkış aralıklarının bulanık olarak bölümlendirilmesine dikkat edilmelidir. Normalizasyon sisteme esneklik kazandırmak için yapılır.

4.2.7.5 Kural Tabanı

Kural tabanında, sistemin bilgi girişlerinin alabileceği çeşitli değerlere göre mantıki olarak uygunluk gösteren sistem çıkış değerleri, kural satırları haline getirilerek, kural tabanı oluşturulur. Örneğin bir klima kontrolünde “içerisi az sıcak ise az soğut, çok sıcak ise çok soğut” şeklinde bir ilişki kurulabilir. Kural tabanında değerlendirilecek giriş bilgileri birden fazla olabileceği gibi, kontrol çıkışı da birden fazla olabilir (Bernard, 1998).

Aslında “sıcak”, “soğuk” gibi dilsel ifadeler sistemin girişinde ve çıkışındaki değer uzayını aralıklara ayırmaktadır. Kural tabanı bu şekliyle klasik sayısal kontrolleri andırmaktadır, fakat bölge bilgisinin yanında girişlere ait üyelik ağırlıklarının da dikkate alınıyor olması bulanık kontrolü, uzman sistemlerden ve diğer kontrollerden ayırmaktadır.

Basit olarak bir sistem için kural tabanı geliştirdiğimizde, sistem çıkışını etkileyebilecek ölçülebilen giriş değerleri tespit edilmelidir. Giriş bilgisine ait değer uzayı, üyelik fonksiyonları ile bölgelere ayrılarak, dilsel ifadelerle isimlendirilir ve aynı zamanda her giriş değeri için bir üyelik ağırlığı tespit edilmiş olur. Böylece her giriş değerinin, ait olduğu bir bölgesi ve bir üyelik ağırlığı olur. Kural tabanı, her biri bir bölgeyi temsil eden dilsel ifadelerle düzenlenir. Örneğin “1. giriş sıcak, 2. giriş normal ise, çıkış yüksektir.” gibi bir kural satırında görüldüğü gibi, kural tabanını oluşturan bilgiler, tamamen dilsel ifadelerdir. Fakat her kural satırındaki, tespit edilmiş olan çıkış değeri, birim fonksiyonlarla oluşturulmuş ise, sayısal değerlerle de ifade edilebilir. Bu durumda oluşturulacak kural satırları “1. giriş sıcak. 2. giriş normal ise, çıkış 1.5’tur.” şeklinde bir kuralın benzeri olabilir. Kural satırları birbirlerine “veya” bağlacı ile bağlanır ve her kural satırında girişler ve çıkışlar arasında “ve” bağlacı kullanılır.

Kural tabanında, giriş değerleri ve kontrol çıkışı değerlerinin birbirleri arasında “ve” ifadesi, ayrı davranışları ifade eden kural kümeleri arasında “veya” ifadesi kullanılır.

Kontrol tabanını oluşturan kurallar aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Her kural bağımsız bilgi parçasını içerir.
- Yeni kurallar diğer kurallardan bağımsız olarak kural tabanına eklenebilir.
- Eski kurallar diğer kurallardan bağımsız olarak değiştirilebilir.
- Kontrol sisteminin kararlarını ve çözümlerini içerir.

Bir bulanık kontrolcünün gerçekleşmesinde, denetlenecek sistemin bir matematiksel modelinden daha çok, o sistemi çalıştıracak operatörün sistem davranışı konusunda sahip olduğu bilgiler daha önemlidir. Tasarım sırasında genellikle bu tür bilgilerden yararlanılır.

Böyle bir yaklaşım, uzun yıllar boyunca kazanılan deneyimlerin kontrolcü içerisine, yorumlanmış halde kolaylıkla yerleştirilebilmesine olanak sağlar. Bu yararın yanında getirdiği sakınca, kontrolcü tasarımında belirli bir otomasyon elde edilememesidir. Buna rağmen, bulanık kontrolcünün en önemli kısmını oluşturan kural tabanının oluşturulması için kullanılabilecek çeşitli yaklaşımlar şunlardır:

- Kontrol kuralları doğrudan doğruya uzman kişinin bilgi ve deneyiminden yararlanılarak elde edilir.
- Operatörün kontrol davranışları gözlenir ve kontrolcü bu davranışlardan bulanık model oluşturur.
- Kontrol kuralları sistemin karakteristiklerinin bulanık şekilde ifade edilmiş modellerinden elde edilebilir.
- Kendi kendine organize etme, öğrenme.

Yukarıdaki metotlar arasındaki birinci metot geniş çapta çokça kullanılır.

Kural tabanının temel yapıları aşağıdaki gibidir.

- Mamdani:

Mamdani tip bulanık kurallarda durumlar ve cevaplar bulanık olarak tanımlanmıştır.

Mamdani tipi bulanık kurallar aşağıdaki şekildedir.

EĞER $x A_i$ ise O HALDE $y B_i$ 'dir. (4.25)

Burada x bir giriş (öncül) dilsel değişken ve A_i 'ler ise öncül dilsel terimlerdir. Benzer şekilde y bir çıkış (sonuç) dilsel değişken ve B_i 'ler ise sonuç dilsel terimlerdir. Kurallarda yer alan $x(y)$ dilsel değişkenlerinin değerleri ve $A_i (/B_i)$ dilsel terimleri kendi tanım bölgelerinde tanımlı bulanık kümelerdir: $x \in X \subset R^p$ ve $y \in Y \subset R^q$. Öncül (/sonuç) bulanık kümelerine ilişkin üyelik fonksiyonları,

$$\mu(x) : X \rightarrow [0,1], \mu(y) : Y \rightarrow [0,1] \quad (4.26)$$

şeklinde dönüşümlerdir. A_i bulanık kümeleri, ilişkili sonuç önermelerinin geçerli olduğu öncül uzaydaki bulanık bölgelerdir. A_i ve B_i dilsel değişkenleri genellikle daha önceden tanımlanmış küçük, orta, büyük, negatif, pozitif, gibi terimlerden seçilebilir. Bu kümeler, A ve B ile gösterilirse A_i ve B_i 'ler, $A_i \in A$ ve $B_i \in B$ şeklinde ifade edilebilir (Mamdani, 1997).

- Tekli (Single):

Mamdani tipi bulanık kuralların özel halidir. Kurallarda, sonuç önermesinde yer alan B_i bulanık kümelerinin tekli bulanık küme seçilmesiyle oluşturulur.

Tekli üyelik fonksiyonu

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x = \bar{x} \\ 0, & \text{aksihalde} \end{cases} \quad (4.27)$$

şeklinde tanımlanır.

B_i bulanık kümeleri, b_i gerçel sayılar ile aşağıdaki gibi basit şekilde ifade edildiğinde tekli kurallar,

$$\text{EĞER } x, A_i \text{ ise O HALDE } y = b_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, r \quad (4.28)$$

şeklinde yazılabilir.

- Takagi-Sugeno:

Mamdani tipi bulanık EĞER – O HALDE kurallardaki öncül ve sonuç kısımlar bulanık önermeler ile sistemi ifade etmektedir. Oysa ki, Takagi – Sugeno bulanık modelinin sonuç kısmında, bir belirgin (kesin) fonksiyon mevcuttur. Dolayısıyla, bu model hem matematiksel, hem de dilsel ifadelerle oluşturulan bir model olarak görülebilir. Öncül kısım, sonuç kısmındaki fonksiyonların var olduğu, giriş uzayının bulanık bölgelerini ifade eder. Takagi – Sugeno modelinde kurallar aşağıdaki yapıdadır:

$$\text{EĞER } x, A_i \text{ ise O HALDE } y_i = f_i(x), \quad i = 1, 2, 3, \dots, r \quad (4.29)$$

Mamdani modelinin aksine, x girişi kesin değildir. Her kuraldaki $f_i(x)$ fonksiyonu aynı tip yapıdadır, yalnızca parametreler değişiktir. Basitlik ve pratiklik açısından, $f_i(x)$ fonksiyonu için doğrusal olan aşağıdaki yapı oldukça kullanışlıdır.

$$\text{EĞER } x, A_i \text{ ise O HALDE } y_i = a_i^T x + b_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, r \quad (4.30)$$

Burada a_i , parametre vektörü, b_i ise skalerdir. Dikkat edilecek olursa, kurallardaki tüm a_i 'ler sıfır vektörü olarak alındığında tekli model elde edilir (Ross, 1995).

4.2.7.6 Çıkarım Ünitesi

Bu ünite, bulanıklaştırma biriminden gelen bulanık değerleri, kural tabanındaki kurallar

üzerinde uygulayarak bulanık sonuçlar üretmektedir. İlk olarak, her bir giriş değerinin ne oranda hangi üyelik kümesine ait olduğu saptanmaktadır. Bu değerler, kural tablosuna yerleştirilerek uygun çıkışlar elde edilmektedir. Bulanık mantık kuralları kural içerisindeki bileştiricilerin anlamlarının yorumlanması ile hesaplanmaktadır. Bu kurallar çıkarım işlemi süresince genelleştirilmiş modus ponens yöntemi kullanılmaktadır. X ve Y evrenlerinde girişi A, çıkışı B ile temsil eden iki bulanık küme tanımlansın. Bu iki bulanık küme arasındaki kural ise “Eğer A ise B” şeklinde verilsin. Bu ifadelerin oluşturduğu kural tabanı, $X \times Y$ evrenindeki bir $R_{A \rightarrow B}$ bulanık ilişkisiyle yorumlanır. Bu şekilde verilen bir bulanık ilişki; cebrik çarpım, aritmetik kural, minimum ilişki gibi değişik yöntemler kullanılarak elde edilmektedir. $R_{A \rightarrow B}$ verilen bulanık ilişki minimum ilişki yöntemiyle aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mu_R(x,y) = (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)) \quad (4.31)$$

“Eğer A’ ise B” şeklinde verilen bir kural, “Eğer A ise B” şeklindeki bir kurala uygulanırsa elde edilecek B çıkışı, A’ ile R’ nin kompozisyonu alınarak bulunmaktadır.

$$B' = A' \circ R \quad (4.32)$$

Yukarıdaki “o” işlemi bir bileşimi göstermekte olup bulanık yorumlama kuralları kullanılarak elde edilmektedir. Bu işlem, max-min yöntemiyle yorumlanırsa aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\mu_{B'}(y) = \max[\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x,y)] \quad (4.33)$$

μ_R ’ nin değeri 4.33’ de yerine yazılırsa;

$$\mu_{B'}(y) = \max[\mu_{A'}(x) \wedge (\mu_A(x) \wedge \mu_B(y))]$$

$$= \max[\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B]$$

$$\alpha = \max(\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x)) \quad \text{ise}$$

$$\mu_{B'}(y) = \alpha \wedge \mu_B(y) \quad (4.34)$$

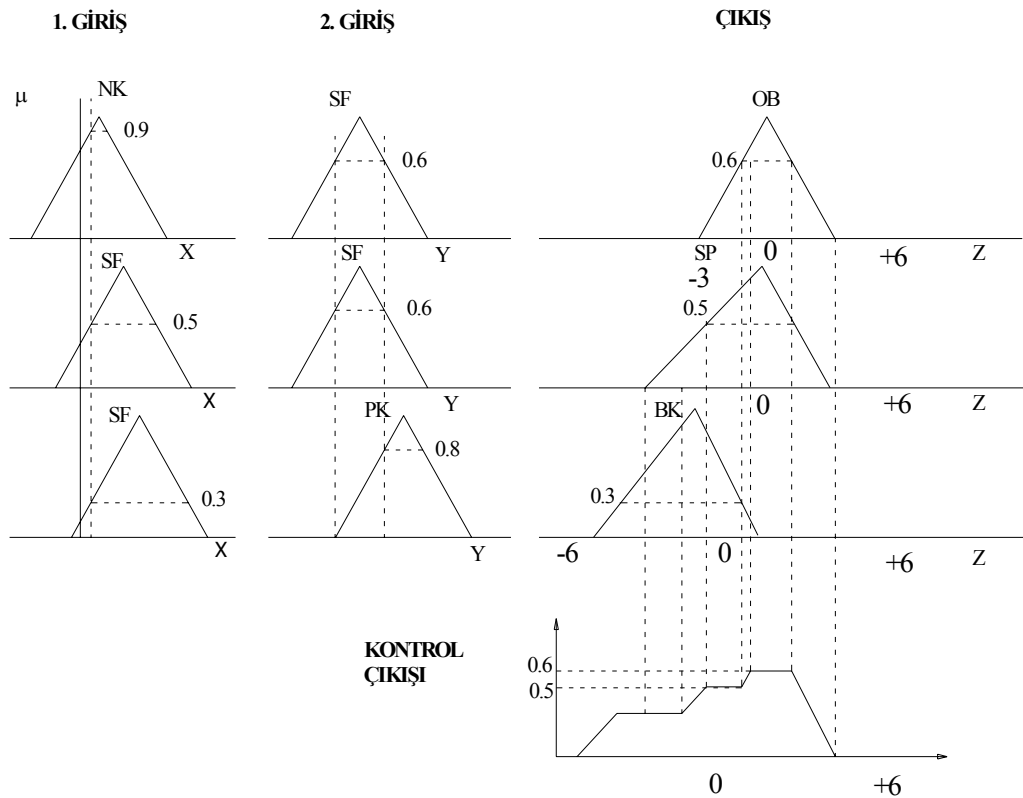
Bulanık kontrolcüsü sistemlerinde n tane kural birbirine “veya” bağlacı ile bağlanır ve n adet kuraldan oluşan bir kural tabanında bir çok kural aktif hale gelebilmektedir. Bu durumda minimum ilişki yöntemiyle tespit edilen kurallar, kendi arasında tekrar değerlendirmeye tabi tutulmaktadır (Wang,1994).

Minimum ilişki yöntemi kullanılarak elde edilen çıkarım sonuçları, “ve” bağlacı kullanılarak yorumlanmaktadır. Bulanık mantıkta “veya” bağlacı max işlemine karşılık gelmektedir. İlk olarak girişler arasında minimum işlemi uygulanarak, her bir kuralın çıkış üzerinde ne kadar etkili olacağı bulunur. Sonra çıkışlar üzerinde max işlemi uygulanarak bulanık sonuç elde edilmektedir. Eğer kurallar arasında aynı çıkışı veren kurallar mevcut ise bunların en büyüğü seçilerek diğer kural iptal edilmektedir. Şekil 4.22’de üç kural için bu işlemler gösterilmektedir.

Eğer A_1 ve B_1 ise, veya

Eğer A_2 ve B_2 ise, veya

Eğer A_3 ve B_3 ise, veya.



Şekil 4.22 Minimum ilişki yöntemiyle kuralların belirlenmesi

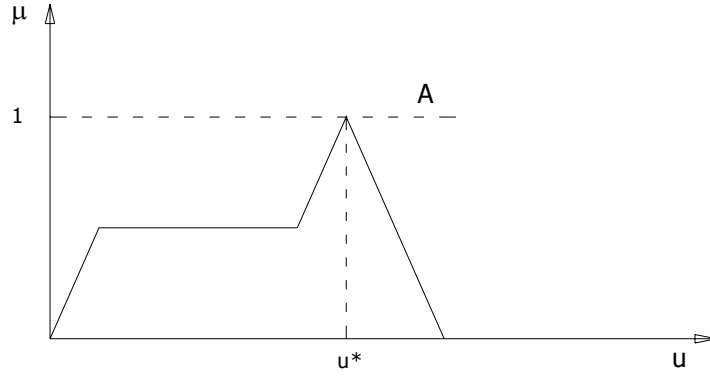
4.2.7.7 Durulama Ünitesi

Bu ünite, çıkarım ünitesinden gönderilen kontrol işaretinin fiziksel ve kesin sayılara getirilmesini sağlamaktadır. Durulayıcı, bu işlemi aşağıda kullanılan yöntemlerden birini kullanarak yapmaktadır.

- Üyelik Fonksiyonunun Maksimum Noktası (Max-Membership Principle):

Bu yöntemden “yükseklik yöntemi” olarak da söz edilmektedir. Aktif olan kuralların en büyük üyelik derecesi sayısal kontrol işareti olarak alınmaktadır (Şekil 4.23).

$$\mu_A(u^*) \geq \mu_A(u) \quad (4.35)$$

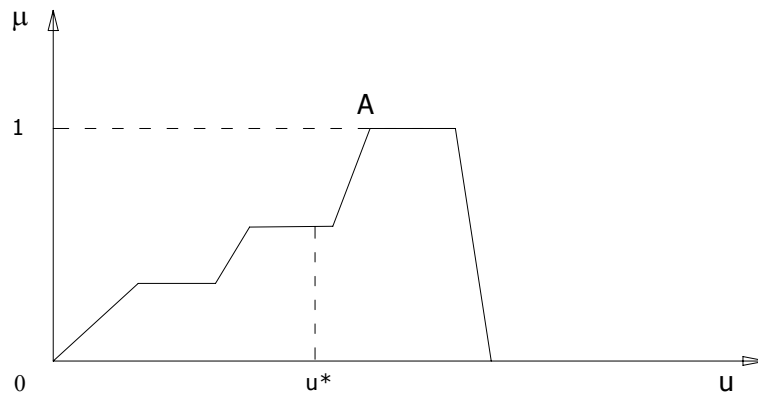


Şekil 4.23 Üyelik fonksiyonlarının maksimum noktaları ile durulama işlemi

- Merkez Yöntemi (Centroid Method):

Alan merkezi ya da ağırlık merkezi de denilen bu yöntem, durulama yöntemi olarak en çok kullanılan yöntemlerden biridir ve ağırlık merkezi hesaplanarak yapılmaktadır (Şekil 4.24).

$$u^* = \frac{\int \mu(u).u.dU}{\int \mu(u).dU} \quad (4.36)$$

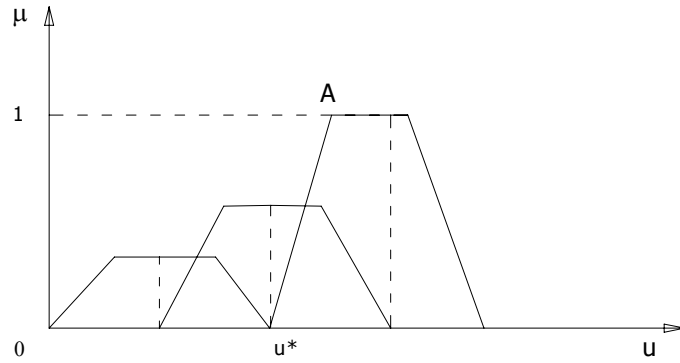


Şekil 4.24 Merkez yöntemi ile durulama işlemi

- Ağırlıklı Ortalama Yöntemi (Weighted Average Method):

Bu yöntem yalnızca simetrik çıkışlı üyelik fonksiyonları için kullanılmaktadır. Her bir simetrik üyelik değerinin tepe noktası değeri belirlenerek, ortalamaların alınmasıyla yapılmaktadır (Şekil 4.25).

$$u^* = \frac{\sum \mu(u).u}{\sum \mu(U)} \quad (4.37)$$

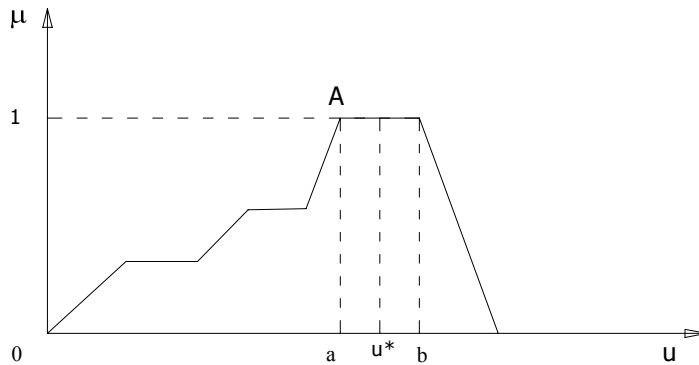


Şekil 4.25 Ağırlıklı ortalama yöntemi ile durulama işlemi

- Üyelik İşlevinin Maksimum Noktalarının Ortalaması (Mean-Max Membership-MOM):

Yüksek noktaların ortası da denilen bu yöntem, ilk yöntemle aşağı yukarı benzemektedir. Ancak, üyelik işlevinin en yüksek noktası burada tek değildir. Şekil 4.26'da görüldüğü gibi bir dörtgen olabilmektedir.

$$u^* = \frac{a+b}{2} \quad (4.38)$$

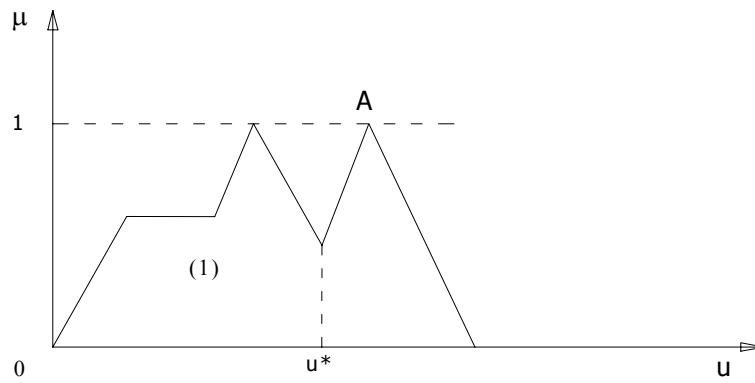


Şekil 4.26 Maksimum noktaların ortalaması yöntemiyle durulama işlemi

- Geniş Alan Merkezi (Center of Largest Area = COA):

Eğer bulanık çıkarımlar en az iki tane dışbükey üyelik elamanından oluşuyorsa bu yöntem kullanılabilir. Bu yöntemde, dışbükey olmayan üyelik değerlerinin bileşkeleri parçalanarak durulanır. Burada A_k durulanmış geniş bir parçadır. Zaten A_k dışbükey olsaydı, yöntem tamamıyla merkez yöntemiyle aynı olacaktı. Şekil 4.27’de görüldüğü gibi (1) numara ile belirlenmiş olan geniş alan ele alınmaktadır ki bu alan dışbükeydir.

$$u^* = \frac{\int \mu_{A_k}(u) \cdot u \cdot dU}{\int \mu_{A_k}(u) \cdot dU} \quad (4.39)$$



Şekil 4.27 Geniş alan merkezi metodu ile durulama işlemi

- İlk veya Son Yükselti Metodu (First or Last of Maxima):

Bu yöntem, tüm bulanık çıkışlarda uygulanabilecek bir yöntemdir. Bileşkedeki en yüksek değer,

$$\text{hgt}(A_k) = \sup \mu_{A_k}(u) \text{ olmak üzere;}$$

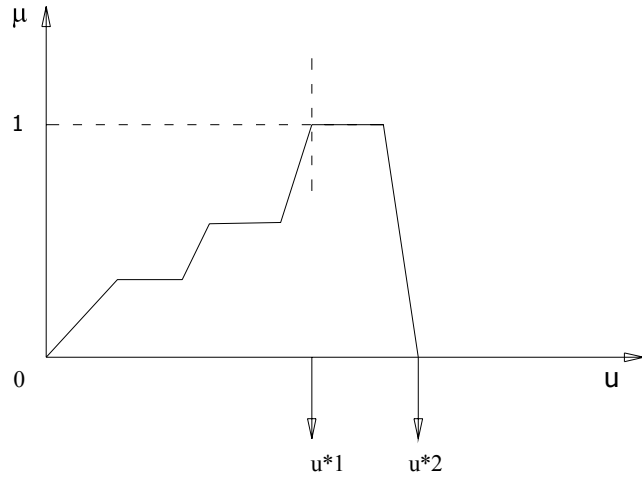
($u \in U$) ilk yükselti,

$$u^* = \inf \{u \in U \mid \mu_{A_k}(u) = \text{hgt}(A_k)\} \quad (4.40)$$

ya da son yükselti,

$$u^* = \sup \{u \in U \mid \mu_{A_k}(u) = \text{hgt}(A_k)\} \quad (4.41)$$

burada $\sup$ (supremum), en düşük yüksek sınırı ve $\inf$ (infimum) da en yüksek düşük sınırı göstermektedir. Şekil 4.28’ de görüldüğü gibi ilk yükselti çözümü u_1^* veya son yükselti çözümü ise u_2^* ’ dir.



Şekil 4.28 İlk ve son yükselti metodu ile durulama işlemi

Burada altı ayrı durulama yönteminden söz edildi. Ancak, akla “Acaba bunlardan hangisi daha iyi?” ya da “Acaba hangisini kullanmalıyım?” şeklinde bir soru gelmektedir. Bunun cevabı, probleme en uygun olanının seçilmesidir. En uygun olanın seçilmesi için beş seçenek vardır. Bunlar; süreklilik (continuity), belirsiz olmama (disambiguity), uygunluk (plausibility), hesapsal kolaylık (computational simplicity) ve ağırlık yöntemi (weighting method) dir. Ayrıca, fiziksel sistemin yapısı ve kullanıcıların deneyimleri de elbette durulama yönteminin seçilmesi için dayanak noktasını oluşturmaktadır.

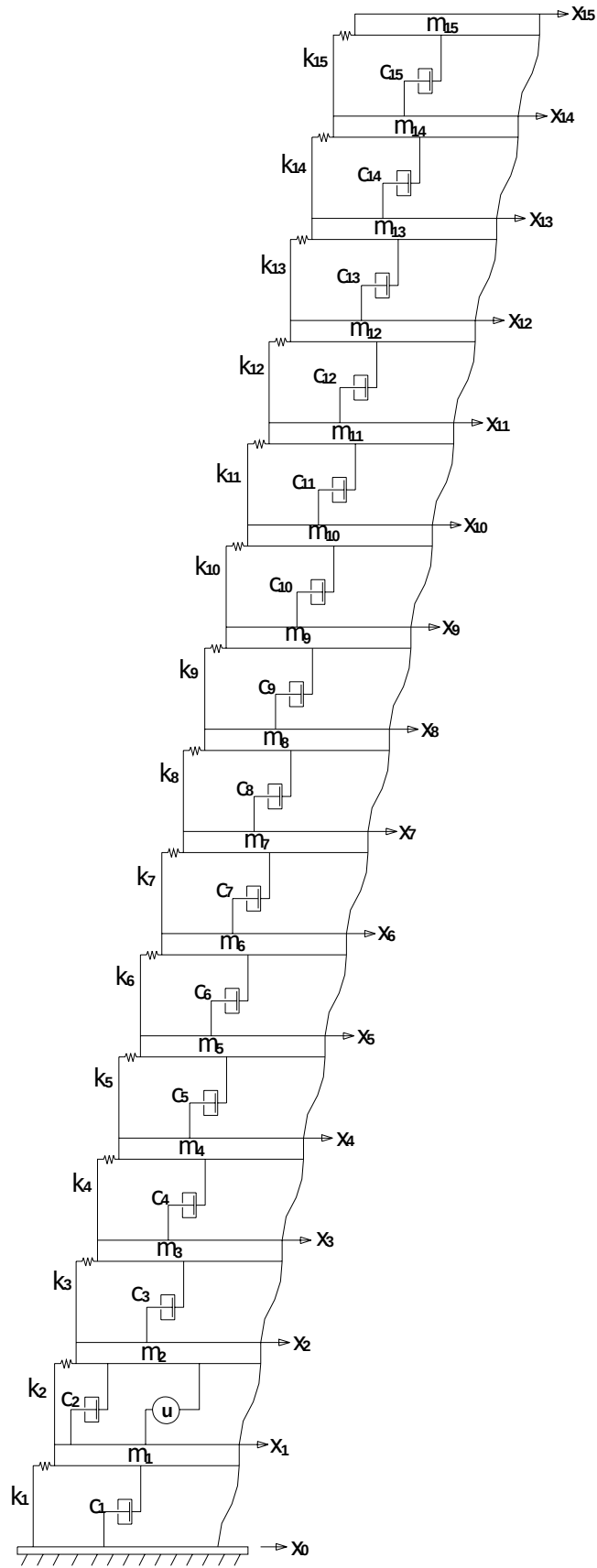
5. YAPISAL SİSTEM VE SİMÜLASYON

Bu bölümde, deprem tehdidindeki çok serbestlik dereceli gerçek parametrelere sahip bir bina modelinin önce titreşim analizi yapılmış, daha sonra binanın aktif titreşim kontrolü için iki ayrı tip kontrolcü tasarlanarak bu kontrolcülerin performansları karşılaştırılmıştır. Bu kontrolcüler, Bölüm 4’de tanıtılan PID ve Bulanık Mantıklı Kontrolcü (BMK) yapılarıdır. Simülasyonu yapılan sistem 15 katlı betonarme bir yapıdır. Çalışmada iki ayrı tip simülasyon gerçekleştirilmiştir. Binaya ilk olarak yerin 0.01 metre yerdeğiştirmesi sonucu oluşan yer hareketi, bozucu etki olarak alınarak sanal bir deprem girişi uygulanmıştır. Bozucu etkiye karşı PID ve BMK kontrolcü tasarımı yapılmıştır. İkinci tip simülasyonda ise gerçek deprem yer hareketi 15 katlı binaya bozucu bir giriş olarak uygulanmıştır. Kullanılan deprem hareketi, 17 Ağustos 1999’da meydana gelen Kocaeli depremi’nin ($M_w = 7.4$) sismik verilerinden elde edilmiştir. Modellenen binanın, Kocaeli depremi’ne karşı aktif kontrolü için kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Çalışmada aktif izolatör olarak lineer bir motor kullanılmıştır.

17 Ağustos 1999 tarihinde saat 3.02’de, Kuzey Anadolu Fay Hattının Adapazarı, Kocaeli, Gölcük segmenti üzerinde, $M_w = 7.4$ büyüklüğünde ve yaklaşık 45-50 saniye süren bir deprem meydana gelmiştir. Deprem, Marmara Bölgesinin tamamı ile Kuzey Anadolu Fay Hattının doğu yönündeki uzantısında yer alan Düzce ve Bolu gibi şehirleri de etkilemiştir. Bu depreminin ülkemizde endüstrinin ve şehirleşmenin en yoğun olduğu Marmara Bölgesinde meydana gelmiş olması, can kaybının ve hasarın da çok büyük olmasına sebep olmuştur. 1967 Adapazarı Depreminden sonra bölgeyi etkileyen en büyük deprem olan 17 Ağustos 1999 depremi, İstanbul’un Avcılar, Küçükçekmece, Tuzla ilçeleri ile İzmit, Adapazarı, Gölcük, Yalova, Düzce ve Bolu şehirlerinde 20.000 dolayında can kaybına ve maddi hasara yol açmıştır. Deprem binalarda sebep olduğu hasar, binalarda depreme karşı titreşim kontrolünü gündeme getirmektedir. Bu çerçevede, son dönemlerde yapısal titreşimlerin kontrolü, gerek teorik gerekse pratik olarak oldukça hızlı bir gelişme göstermiştir.

5.1 15 Serbestlik Dereceli Binanın Dinamik Modeli

Ele alınan bina modeli, yatay yönde 15 serbestlik derecesine sahiptir. Depremlerin yıkıcı etkileri yatay titreşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıktığından, serbestlik derecesi sadece bu yönde hesaba katılmıştır. Sistemde aktif izolatör olarak lineer motor kullanılmıştır. Bina modeli, Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Onbeş serbestlik dereceli bina modeli

Binanın dinamik davranışını incelemek üzere hareket denklemleri çıkartılmıştır. Bunun için Lagrange denklemlerinden yararlanılmıştır. Lagrange denklemlerinin genel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_P}{\partial q_i} = Q_i \quad (5.1)$$

Burada;

E_k = Toplam kinetik enerji

E_P = Toplam potansiyel enerji

E_D = Toplam sönüm enerjisi

Q_i = Genelleştirilmiş kuvvetler

q_i = Genelleştirilmiş koordinatlar

ifadelerini temsil etmektedir.

Buradan hareketle 15 katlı binanın hareket denklemleri şu şekilde elde edilir;

$$E_k = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}_3^2 + \frac{1}{2} m_4 \dot{x}_4^2 + \frac{1}{2} m_5 \dot{x}_5^2 + \frac{1}{2} m_6 \dot{x}_6^2 + \frac{1}{2} m_7 \dot{x}_7^2 + \frac{1}{2} m_8 \dot{x}_8^2 + \frac{1}{2} m_9 \dot{x}_9^2 + \frac{1}{2} m_{10} \dot{x}_{10}^2 + \frac{1}{2} m_{11} \dot{x}_{11}^2 + \frac{1}{2} m_{12} \dot{x}_{12}^2 + \frac{1}{2} m_{13} \dot{x}_{13}^2 + \frac{1}{2} m_{14} \dot{x}_{14}^2 + \frac{1}{2} m_{15} \dot{x}_{15}^2 \quad (5.2)$$

$$E_D = \frac{1}{2} c_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2} c_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2 + \frac{1}{2} c_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2 + \frac{1}{2} c_6 (\dot{x}_6 - \dot{x}_5)^2 + \frac{1}{2} c_7 (\dot{x}_7 - \dot{x}_6)^2 + \frac{1}{2} c_8 (\dot{x}_8 - \dot{x}_7)^2 + \frac{1}{2} c_9 (\dot{x}_9 - \dot{x}_8)^2 + \frac{1}{2} c_{10} (\dot{x}_{10} - \dot{x}_9)^2 + \frac{1}{2} c_{11} (\dot{x}_{11} - \dot{x}_{10})^2 + \frac{1}{2} c_{12} (\dot{x}_{12} - \dot{x}_{11})^2 + \frac{1}{2} c_{13} (\dot{x}_{13} - \dot{x}_{12})^2 + \frac{1}{2} c_{14} (\dot{x}_{14} - \dot{x}_{13})^2 + \frac{1}{2} c_{15} (\dot{x}_{15} - \dot{x}_{14})^2 \quad (5.3)$$

$$E_P = \frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (x_3 - x_2)^2 + \frac{1}{2} k_4 (x_4 - x_3)^2 + \frac{1}{2} k_5 (x_5 - x_4)^2 + \frac{1}{2} k_6 (x_6 - x_5)^2 + \frac{1}{2} k_7 (x_7 - x_6)^2 + \frac{1}{2} k_8 (x_8 - x_7)^2 + \frac{1}{2} k_9 (x_9 - x_8)^2 + \frac{1}{2} k_{10} (x_{10} - x_9)^2 + \frac{1}{2} k_{11} (x_{11} - x_{10})^2 + \frac{1}{2} k_{12} (x_{12} - x_{11})^2 + \frac{1}{2} k_{13} (x_{13} - x_{12})^2 + \frac{1}{2} k_{14} (x_{14} - x_{13})^2 + \frac{1}{2} k_{15} (x_{15} - x_{14})^2 \quad (5.4)$$

Binanın birinci katının hareket denklemini elde etmek için,

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_1} = m_1 \dot{x}_1 \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_1 \ddot{x}_1$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial x_1} = 0 \quad \frac{\partial E_p}{\partial x_1} = k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) \quad \frac{\partial E_D}{\partial \dot{x}_1} = c_1 \dot{x}_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$

İfedeler Lagrange denkleminde yerine konulursa; Birinci katın hareket denklemi elde edilir.

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

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 = 0 \quad (5.5)$$

İkinci kat için işlemler tekrarlanırsa;

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_2} = m_2 \dot{x}_2 \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_2} \right) = m_2 \ddot{x}_2$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial x_2} = 0 \quad \frac{\partial E_p}{\partial x_2} = k_2 (x_2 - x_1) - k_3 (x_3 - x_2) \quad \frac{\partial E_D}{\partial \dot{x}_2} = c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + (k_2 + k_3) x_2 - k_2 x_1 - k_3 x_3 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 - c_3 \dot{x}_3 = 0 \quad (5.6)$$

İkinci katın hareket denklemi elde edilir. Aynı şekilde, işlem diğer katlar içinde tekrarlanırsa her bir kat için hareket denklemleri elde edilmiş olur.

$$m_3 \ddot{x}_3 + (k_3 + k_4) x_3 - k_3 x_2 - k_4 x_4 + (c_3 + c_4) \dot{x}_3 - c_3 \dot{x}_2 - c_4 \dot{x}_4 = 0 \quad (5.7)$$

$$m_4 \ddot{x}_4 + (k_4 + k_5) x_4 - k_4 x_3 - k_5 x_5 + (c_4 + c_5) \dot{x}_4 - c_4 \dot{x}_3 - c_5 \dot{x}_5 = 0 \quad (5.8)$$

$$m_5 \ddot{x}_5 + (k_5 + k_6) x_5 - k_5 x_4 - k_6 x_6 + (c_5 + c_6) \dot{x}_5 - c_5 \dot{x}_4 - c_6 \dot{x}_6 = 0 \quad (5.9)$$

$$m_6 \ddot{x}_6 + (k_6 + k_7) x_6 - k_6 x_5 - k_7 x_7 + (c_6 + c_7) \dot{x}_6 - c_6 \dot{x}_5 - c_7 \dot{x}_7 = 0 \quad (5.10)$$

$$m_7 \ddot{x}_7 + (k_7 + k_8) x_7 - k_7 x_6 - k_8 x_8 + (c_7 + c_8) \dot{x}_7 - c_7 \dot{x}_6 - c_8 \dot{x}_8 = 0 \quad (5.11)$$

$$m_8 \ddot{x}_8 + (k_8 + k_9) x_8 - k_8 x_7 - k_9 x_9 + (c_8 + c_9) \dot{x}_8 - c_8 \dot{x}_7 - c_9 \dot{x}_9 = 0 \quad (5.12)$$

$$m_9 \ddot{x}_9 + (k_9 + k_{10}) x_9 - k_9 x_8 - k_{10} x_{10} + (c_9 + c_{10}) \dot{x}_9 - c_9 \dot{x}_8 - c_{10} \dot{x}_{10} = 0 \quad (5.13)$$

$$m_{10} \ddot{x}_{10} + (k_{10} + k_{11}) x_{10} - k_{10} x_9 - k_{11} x_{11} + (c_{10} + c_{11}) \dot{x}_{10} - c_{10} \dot{x}_9 - c_{11} \dot{x}_{11} = 0 \quad (5.14)$$

$$m_{11} \ddot{x}_{11} + (k_{11}+k_{12}) x_{11} - k_{11} x_{10} - k_{12} x_{12} + (c_{11}+c_{12}) \dot{x}_{11} - c_{11} \dot{x}_{10} - c_{12} \dot{x}_{12} = 0 \quad (5.15)$$

$$m_{12} \ddot{x}_{12} + (k_{12}+k_{13}) x_{12} - k_{12} x_{11} - k_{13} x_{13} + (c_{12}+c_{13}) \dot{x}_{12} - c_{12} \dot{x}_{11} - c_{13} \dot{x}_{13} = 0 \quad (5.16)$$

$$m_{13} \ddot{x}_{13} + (k_{13}+k_{14}) x_{13} - k_{13} x_{12} - k_{14} x_{14} + (c_{13}+c_{14}) \dot{x}_{13} - c_{13} \dot{x}_{12} - c_{14} \dot{x}_{14} = 0 \quad (5.17)$$

$$m_{14} \ddot{x}_{14} + (k_{14}+k_{15}) x_{14} - k_{14} x_{13} - k_{15} x_{15} + (c_{14}+c_{15}) \dot{x}_{14} - c_{14} \dot{x}_{13} - c_{15} \dot{x}_{15} = 0 \quad (5.18)$$

$$m_{15} \ddot{x}_{15} + k_{15} x_{15} - k_{15} x_{14} + c_{15} \dot{x}_{15} - c_{15} \dot{x}_{14} = 0 \quad (5.19)$$

Deprem sırasında maksimum kat kesme kuvveti, birinci katta meydana gelmektedir. Yine depremin yıkıcı etkisinin bu kata etki etmesi beklenmektedir. Bu nedenle, aktif kontrol bu kata uygulanır.

Herbir katın kütlesi sırasıyla $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8, m_9, m_{10}, m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}$ ve m_{15} dir. $x_1, x_2, \dots, x_{15}$ de ilgili katlara ait yatay yerdeğiştirmelerdir. Katlara ait tüm yay ve sönüm elemanları, yatay yönde hareket etmektedir.

Sistemin hareketin denklemi aşağıdaki gibidir:

$$[M] \ddot{\underline{X}} + [C] \dot{\underline{X}} + [K] \underline{X} = \underline{Fu} + \underline{Fd} \quad (5.20)$$

$[M]$, $[C]$ ve $[K]$ matrisleri, EK 1’de ve gerçek bina parametreleri, EK 2’de verilmiştir. Burada;

$$\underline{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{15}]^T, \quad (5.21)$$

$$\underline{Fd} = [-(c_1 \dot{x}_0 + k_1 x_0) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (5.22)$$

$$\underline{Fu} = [-F_u \ F_u \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (5.23)$$

$\underline{Fu}$, lineer motor tarafından üretilen kontrol kuvvetidir. $\underline{Fd}$ ise yapısal sisteme uygulanan bozucu kuvvet vektörüdür. $[M]$, $[C]$, $[K]$; kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. Bu tür yapısal sistemlerde, lineer motorların kullanımı deneysel çalışmalarla ispatlanmıştır. Bu tür bir doğrusal motorun denklemi,

$$Ri + K_e(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = u \quad (5.24)$$

u ve i , sırasıyla bobin sargısının voltaj ve akımıdır. Burada u , aynı zamanda kontrol voltaj girişidir. R ve K_e , bobin sargısının direnç değeri ve etki eden voltaj sabitidir. Bobin sargısı akımı ile kontrol kuvveti arasında aşağıdaki ilişki vardır.

$$F_u = K_f i \quad (5.25)$$

K_f , bobin sargısının itme sabitidir. Bobin sargısının endüktans akımı ihmal edilmiştir. Seçilen lineer motorun parametreleri, Ek 2’de verilmiştir (Güçlü, 2001).

5.2 PID ve Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı

Modellenen yapının titreşimlerinin aktif kontrolü için PID ve Bulanık Mantıklı kontrolcüler tasarlanmış ve bu kontrol yapılarının performansları karşılaştırılmıştır. Kontrolcü tasarımı Matlab Simulink’te yapılmıştır. Her iki tasarımda da, diferansiyel denklemleri çözmek için 4. dereceden Runge-Kutto metodu tabanlı ODE45 (Dorman-Prince) çözücüsü kullanılmıştır. Simülasyon zamanları ve çözücü opsiyonları EK 2’de verilmiştir. Günümüze kadar, klasik PID kontrolcüler basit yapıları ve uygun maliyetleri nedeniyle endüstride en çok kullanım alanı bulan kontrol yapısı olmuştur. Ancak, PID kontrolcülerin sistemin doğrusal olmadığı zaman uygun kontrol imkanı sağlayamadıkları bilinmektedir. Bunun yanında mühendislik ve diğer bilim dallarında sistemler, kesin matematik modelleri kullanılmak suretiyle modellenirler. Klasik kontrolcülerin başarıları oluşturulan bu modeller yardımıyla yüksektir. Fakat, sistemin kesin matematik modelinin bilinmediği durumlarda klasik kontrolcüler uygun kontrol işlemini gerçekleştiremezler. Bu yüzden, bu tip sistemler için başka kontrol imkanları araştırılmış ve bulanık mantık kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Yapay zekanın konularından biri olan bulanık mantık, kontrol alanında matematiksel modele ihtiyaç duyulmaması sayesinde kompleks modele sahip sistemler için geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bulanık mantık üç ana kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar sırasıyla bulanıklaştırma, kural tabanı ve durulaştırma işlemleridir. Bulanıklaştırma dış dünyadan elde edilen kesin bilgilerin üyelik fonksiyonları cinsinden ifade edilmesidir. Bu işlem ile kesin değerler kural tabanında değerlendirilmek üzere bulanık değerlere dönüştürülürler. Kural tabanı ise sistem hakkındaki deneyim ve bilgi birikimine dayanılarak uygun kuralların oluşturulması işlemidir. Daha önce elde edilen bulanık değerler, bu kural tabanında değerlendirilerek uygun çıkış değeri elde edilir. Elde edilen bu çıkış değeri yine bir bulanık değer olduğu için bu değeri tekrar kesin bir değer haline getirmek gereklidir. Bulanık değerın kesin değere dönüştürüldüğü bu işleme de durulaştırma adı verilmektedir (Dalcı, 2004).

5.2.1 PID Kontrolcü Tasarımı

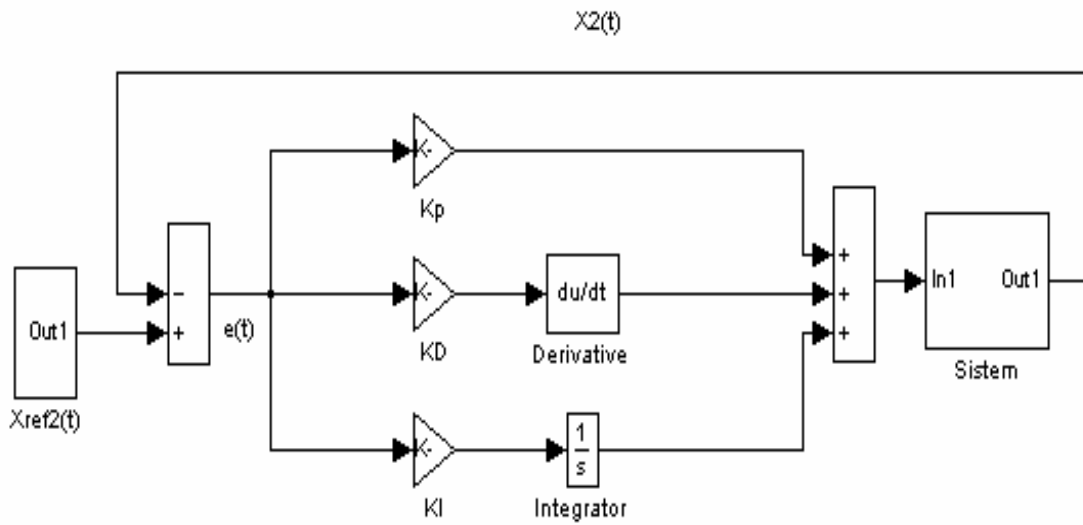
Önce yapısal sistemin aktif kontrolü için PID tipi kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Burada K_P , K_I ve K_D parametreleri sırasıyla orantı, integral ve türev sabitleridir. Alınan referans değerleri (X_{ref}) sıfır olarak kabul edilmiştir. $X(t)$ ise sistem çıkışıdır. Hata $e(t)$ ve $u(t)$ kontrol sinyalıdır.

Kontrol sinyali $u(t)$ aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edilir.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{K_i}{K_p} \int_0^1 e(t) dt + \frac{K_d}{K_p} \frac{de}{dt} \right] \quad (5.26)$$

$$e(t) = X_{ref2}(t) - x_2(t) \quad (5.27)$$

PID kontrolcünün parametreleri, deneme yanılma metoduyla belirlenmiştir. Kontrolcü tasarımı Matlab Simulink'te yapılmıştır. Şekil 5.2'de Matlab Simulinkte oluşturulan PID kontrolör yapısı görülmektedir.



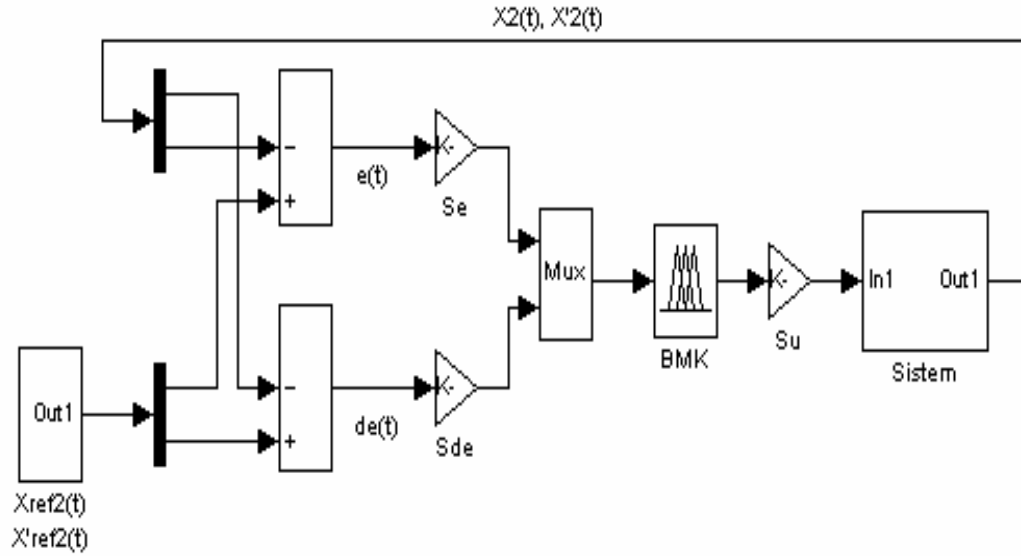
Şekil 5.2 PID kontrolcü blok diyagramı

5.2.2 Bulanık Mantık Kontrolcü (BMK) Tasarımı

PID kontrolcü tasarımı yapıldıktan sonra ikinci kontrol yapısı olan Bulanık Mantık Kontrolcü (BMK) tasarımı gerçekleştirilmiştir. BMK tasarım işlemi genellikle dört evreden oluşur. Bunlar; giriş ve çıkış üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi ve ayarı; kural tabanının tasarımı ve çıkarım ile netleştirme yöntemlerinin belirlenmesidir. Bunların arasında, giriş ve çıkış ölçekleme faktörlerinin belirlenmesine ayrı bir önem gösterilmelidir. Zira çıkış ölçekleme faktörü, sistemin kararlılığı ve salınım eğilimi üzerinde oldukça etkiliyken; giriş ölçekleme faktörleri ise kontrolcünün iyi seçilmiş bir çalışma bölgesi için temel hassasiyetini belirlemektedir. Ancak, günümüzde bile ölçekleme faktörlerinin BMK sistemleri üzerindeki etkileri tam olarak belirlenebilmiş değildir (Küçükdemiral, 2002).

Burada, giriş ve çıkış ölçekleme faktörlerinin optimal değerlerinin belirlenebilmesi için

deneme yanılma metodu kullanılmıştır. Bunun için çok sayıda simülasyon gerçekleştirilerek optimum değerlere ulaşılmaya çalışılmıştır. BMK sisteminin Matlab Simulink'te hazırlanmış blok diyagramı, Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Burada giriş ölçekleme faktörleri; S_e ve S_{de} sırasıyla hata ve hatanın türevinin ölçekleme faktörleridir. Çıkış ölçekleme faktörü S_u ise kontrol sinyali u 'nun ölçekleme faktörüdür. Yapılan simülasyonlar neticesinde ölçekleme faktörlerinin elde edilen değerleri EK 2'de verilmiştir.



Şekil 5.3 Bulanık mantık kontrolcü blok diyagramı

Yapısal sistemin analizi için Matlab Simulink ile Fuzzy Toolbox kullanılmıştır. Tasarlanan BMK sistemi iki girişli tek çıkışlıdır. Bu, uygulamada en çok rastlanan kontrolcü tasarımıdır. Giriş olarak hata ve hatanın değişimi kullanılmaktadır. Giriş olarak ikinci katın yerdeğiştirmesindeki hata ($e = X_{ref2} - X_2$) ve hatanın türevi ($de/dt = \dot{X}_{ref2} - \dot{X}_2$), çıkış olarak u kontrol kuvveti alınmıştır. Referans değerleri sıfır ($X_{ref2} = 0, \dot{X}_{ref2} = 0$) olarak hesaba katılmıştır. Dilsel değişkenler olarak kullanılan P, N, Z, B, S, M sırasıyla Positive, Negative, Zero, Big, Medium ve Small anlamına gelmektedir. İki girişli tek çıkışlı BMK için giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları $[-1 \ 1]$ aralığında tanımlanmıştır. Giriş üyelik fonksiyonları, hata (e) için beş ve hatanın türevi (de) için üç adet üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Üçgen üyelik fonksiyonları birbirlerini % 50 oranında kapsamaktadır. Yani, komşu üyelik fonksiyonları arasında % 50'lik bir çakışma vardır. Yaygın olarak kullanılan üçgen üyelik fonksiyonları seçilerek kontrol performansının artırılması amaçlanmıştır. Çıkış üyelik fonksiyonları için yine $[-1 \ 1]$ aralığında 9 adet üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Giriş ve çıkış üyelik

fonksiyonları kullanılarak kural tabanında 15 adet kural tanımlanmıştır. Mamdani tipi kurallar kullanılarak, durumlar ve cevaplar bulanık olarak tanımlanmıştır. Fuzzy Toolbox kullanılarak oluşturulan üyelik fonksiyonları ve kural tabanı EK 3’de sunulmuştur. Oluşturulan kural tabanı, Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 BMK için kural tabanı

		de		
e		VN	VZ	VB
	XNB	UNB	UNM	UNS
	XNS	UNM	UNS	UZ
	XZ	UNS	UZ	UPS
	XPS	UZ	UPS	UPM
	XPB	UPS	UPM	UPB

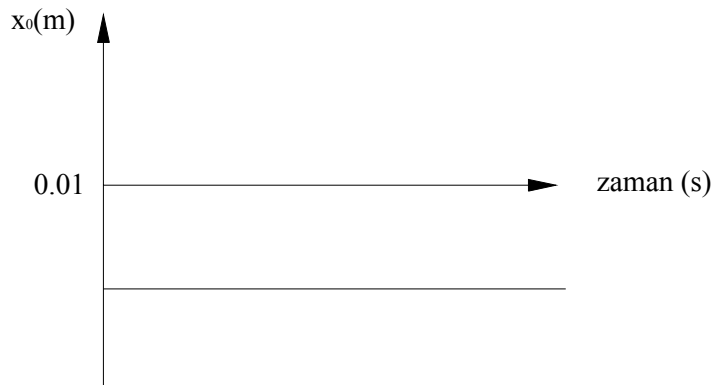
Çizelge 5.1’de kurallar şu şekilde ifade edilmiştir;

IF e is XNB and de/dt is VN THEN u is UNB. (5.28)

Diğer kurallar da benzer şekilde oluşturulmuştur. Durulaştırma işlemi için, Ağırlık Merkezi Yöntemi kullanılmıştır.

5.3 Binanın Adım Girişine Göre Simülasyonu

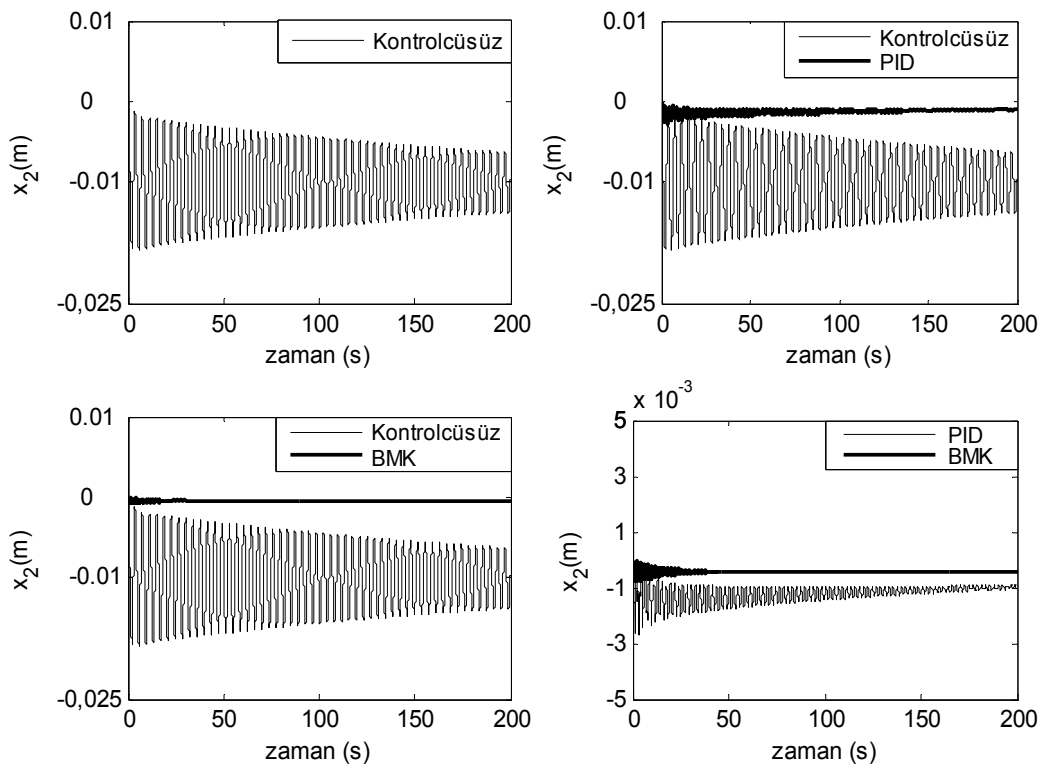
Burada zeminin 0.01 metre yerdeğiştirmesi sonucu oluşan yer hareketi, bozucu etki olarak göz önüne alınmıştır. Binaya uygulanan adım girişi Şekil 5.4’de gösterilmektedir.



Şekil 5.4 Binaya uygulanan adım girişi

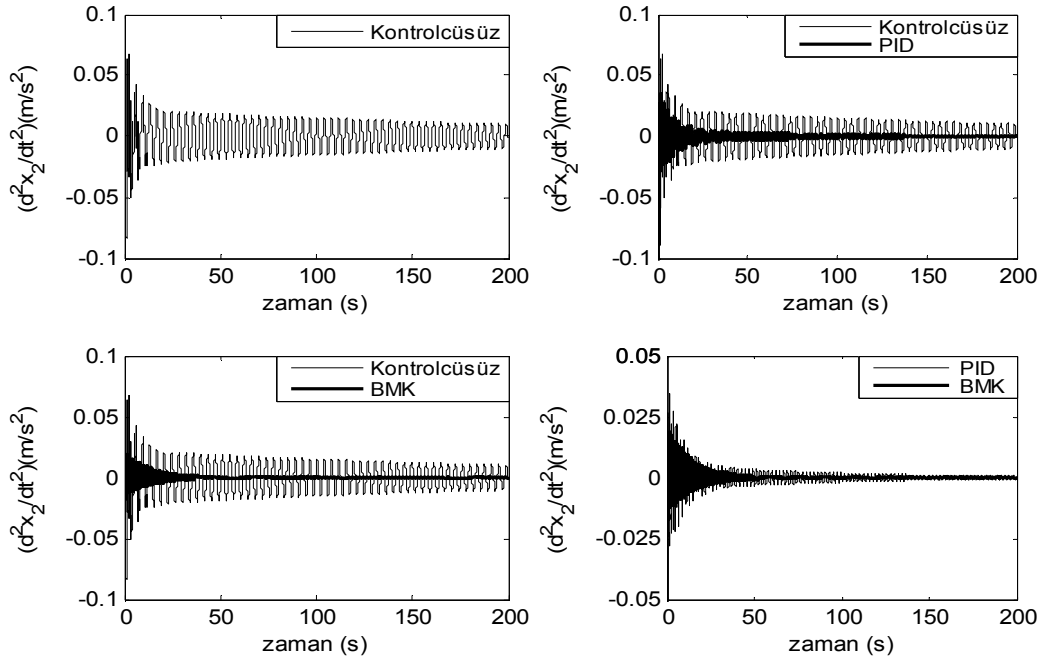
Tasarım için güvenlik ve konfor gerekli performans kriterleridir. Çok katlı binalarda rüzgar kaynaklı titreşimler konfor problemine neden olurken, deprem ise güvenlik probleminin kaynağıdır. Genel olarak yapıların güvenliği yerdeğiştirme cevaplarına bağlı olarak değerlendirilirken, konfor için ise ivme cevapları değerlendirilmektedir.

Performans kriterlerinin sağlanması amacıyla yapılan simülasyonlar sonucunda, kontrolcünün yapıya yerleştirildiği 2. kat ile yapının en üst katı olan 15. katın yerdeğiştirme ve ivmelerinin bozucu etkiye karşı zamanla değişimi belirlenmiştir. Şekil 5.5’de 2. katın yerdeğiştirmeleri sırasıyla kontrolcüsüz, PID ve BMK olarak karşılaştırılmıştır.



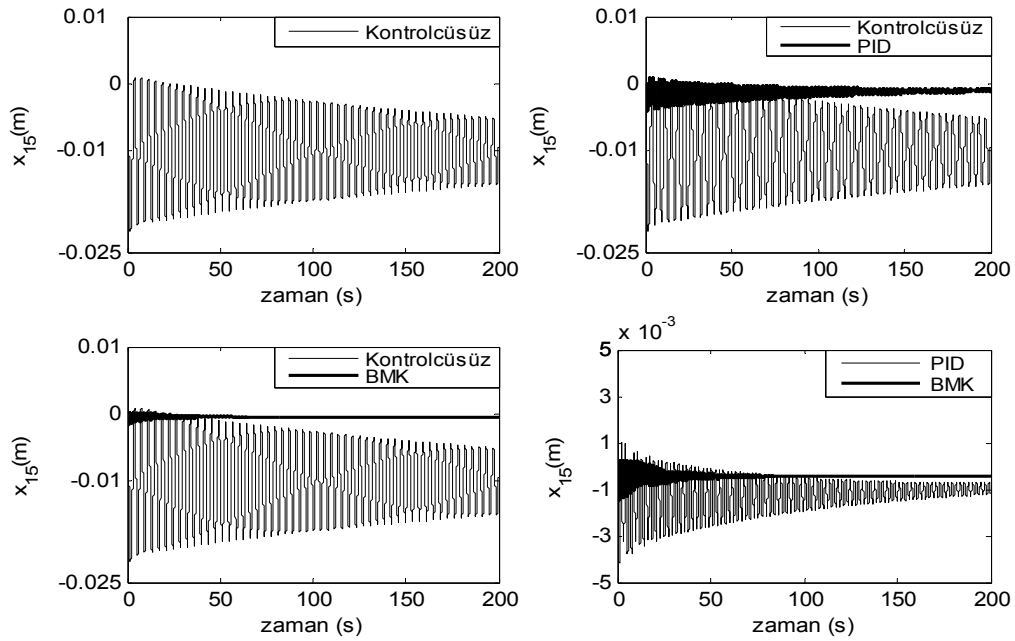
Şekil 5.5 İkinci katın yerdeğiştirmeleri

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi, tasarlanan PID ve BMK yapıları kontrolcüsüz duruma göre, 2. katın yerdeğiştirmelerinde oldukça önemli gelişme göstermişlerdir. Özellikle BMK’nün göstermiş olduğu kontrol oldukça tatmin edicidir. BMK, PID kontrolcüye göre titreşim genliklerinin azaltılması bakımından daha başarılıdır. Kontrolcünün yerleştirilmiş olduğu kat olan 2. katın yerdeğiştirmeleri, BMK kullanılarak minimize edilmiştir.

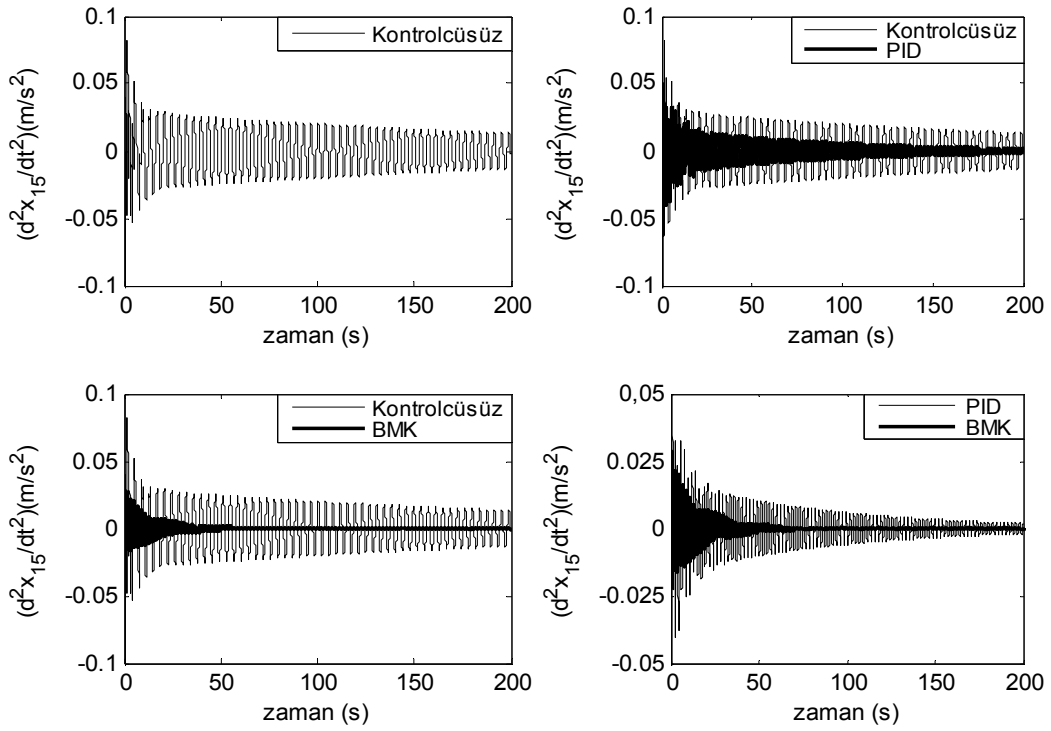


Şekil 5.6 İkinci katın ivmeleri

Şekil 5.6'da 2. katın ivme cevapları gösterilmektedir. PID ve BMK'lı cevapların daha iyi oluşu görülmektedir. BMK'nün ivme cevapları, PID kontrolcünün ivme cevaplarına göre daha iyi sonuçlar vermiştir.



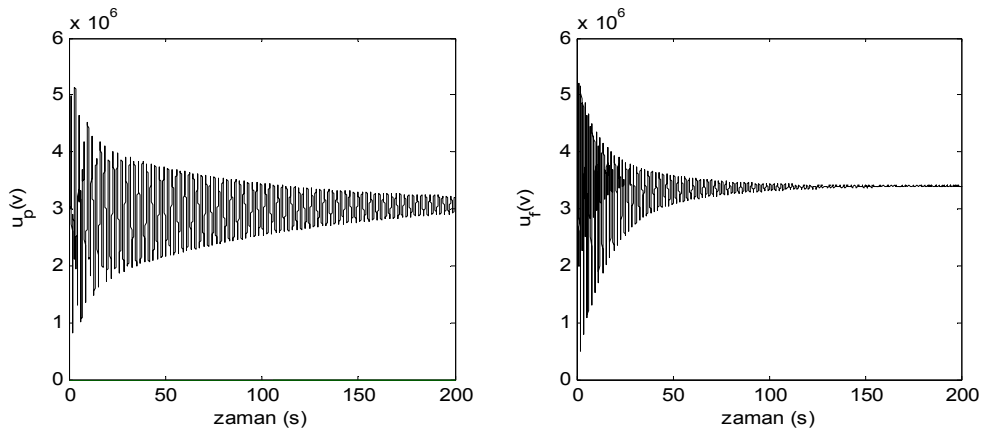
Şekil 5.7 Onbeşinci katın yerdeğiştirmeleri



Şekil 5.8 Onbeşinci katın ivmeleri

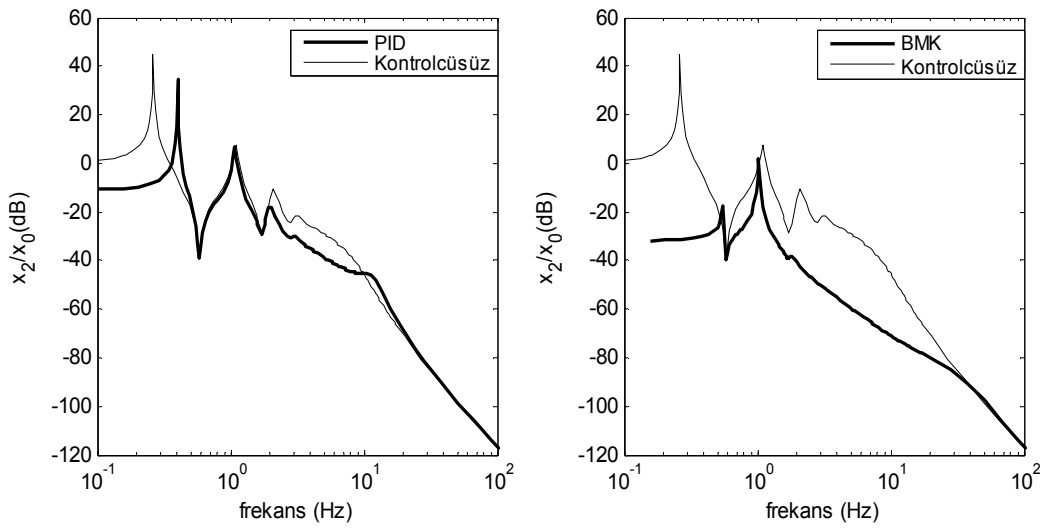
Şekil 5.7’de görüldüğü gibi, 15. katın yerdeğiştirmelerinde, BMK’nün göstermiş olduğu gelişme oldukça iyidir. Şekil 5.8’de 15. katın ivme cevapları görülmektedir. BMK son katın ivmelerinde, PID kontrole göre performansı oldukça tatmin edicidir. 15. Katın ivmeleri minimize edilmiştir.

Kontrol voltajındaki değişim her iki kontrolcü yapısı içinde Şekil 5.9’da gösterilmektedir.

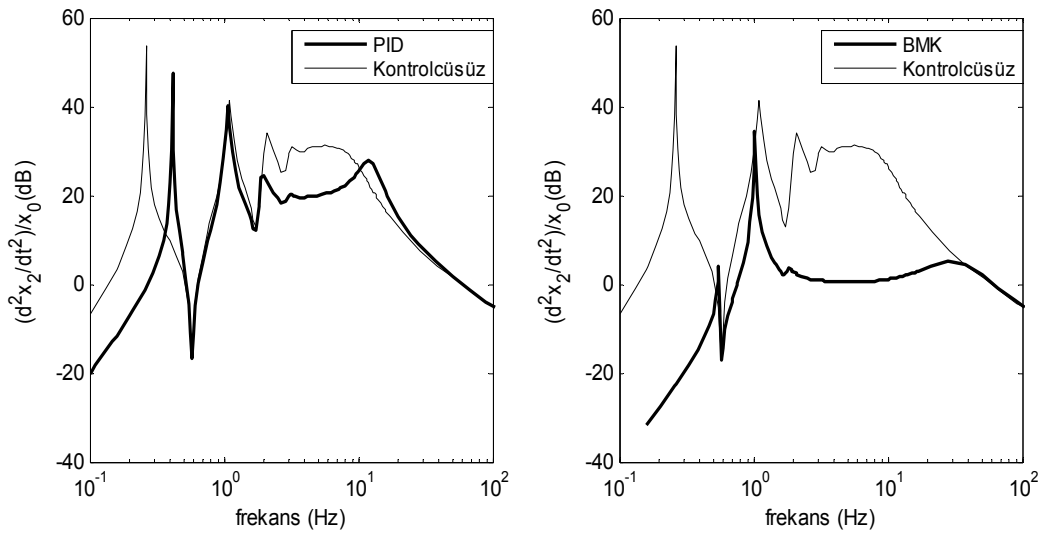


Şekil 5.9 PID ve BMK için kontrol voltajındaki değişim

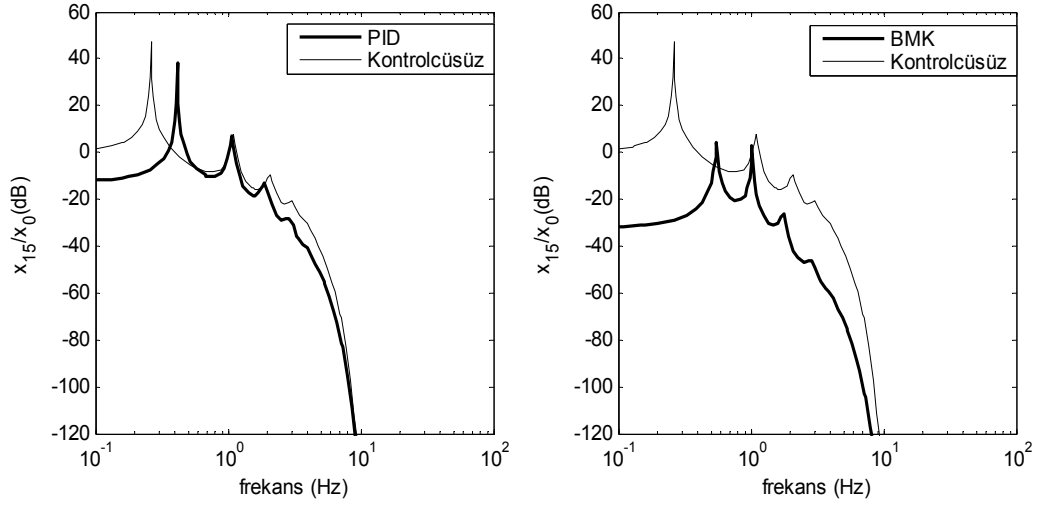
15 Katlı yapının frekans cevapları, 2. ve 15. katın ivme ve yerdeğiştirmeleri için verilmiştir. şekil 5.10'da 2.katın yerdeğiştirmelerinin frekans cevapları ve şekil 5.11'de 2. katın ivmelerinin frekans cevapları gösterilmiştir. şekil 5.12 ve şekil 5.13'de sırasıyla 15. katın yerdeğiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları verilmiştir. Sistem 15 serbestlik derecesine sahip olduğundan; 0.26, 1.10, 2.07, 3.05, 4.01, 4.94, 5.81, 6.63, 7.37, 8.04, 8.62, 9.10, 9.48, 9.76 ve 9.93 Hz. olmak üzere 15 tane doğal frekansı vardır. Bu değerler, kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak hesaplanmıştır.



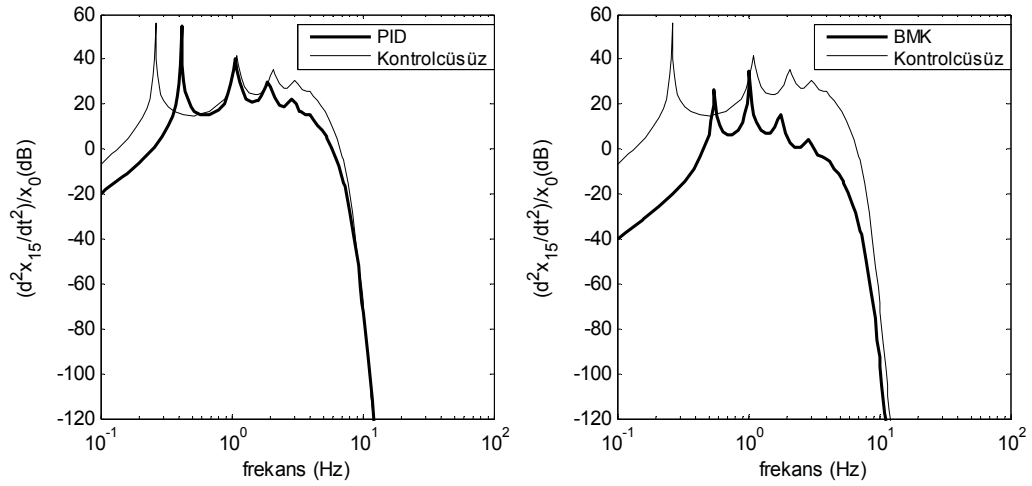
şekil 5.10 İkinci katın yerdeğiştirmelerinin frekans cevapları



şekil 5.11 İkinci katın ivmelerinin frekans cevapları



Şekil 5.12 Onbeşinci katın yerdeğiştirmelerinin frekans cevapları



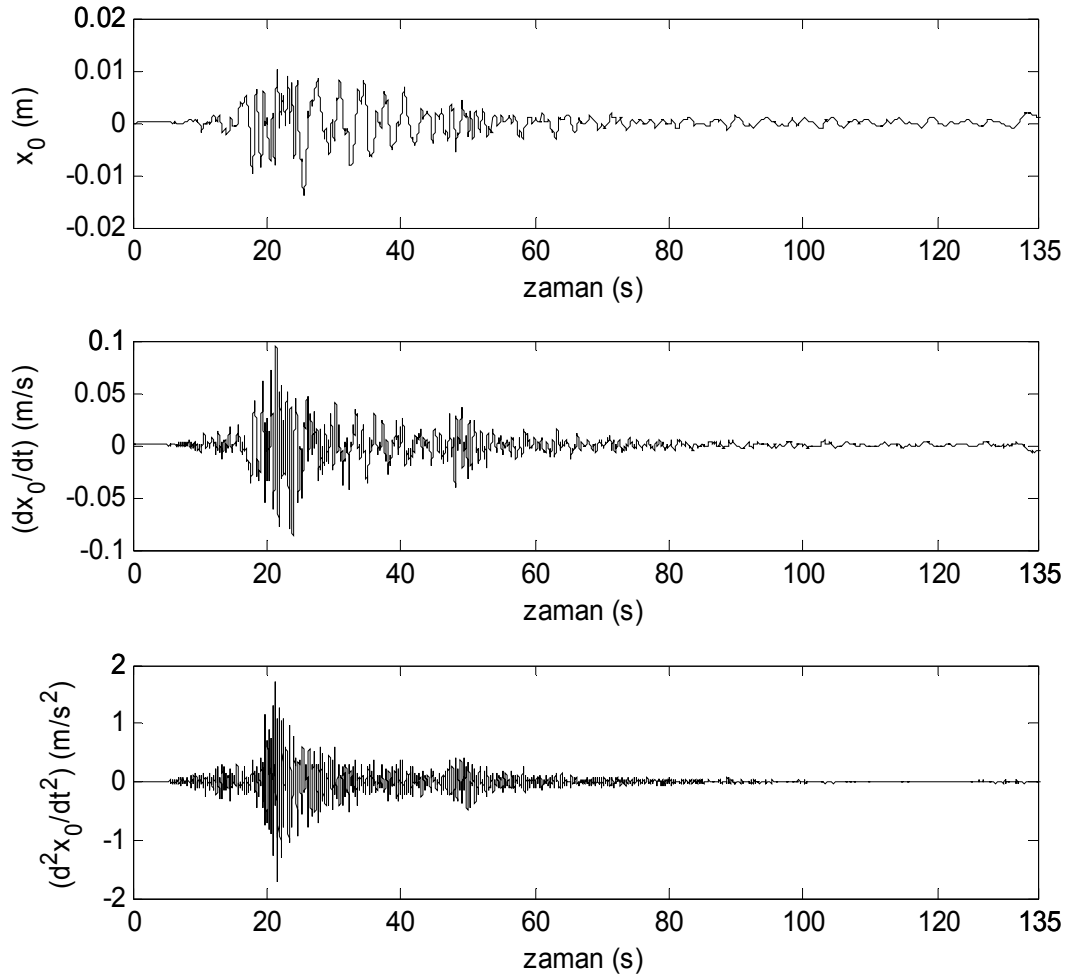
Şekil 5.13 Onbeşinci katın ivmelerinin frekans cevapları

Katların yerdeğişimi ve ivme frekans cevapları kontrolcölü ve kontrolcüsüz olmak üzere karşılaştırılmıştır. Yüksek genlikli eğriler, kontrolcünün kullanılmadığı duruma aittir. Amaçlandığı gibi, en üst katınki dahil tüm rezonans değerlerinde ciddi bir iyileştirme elde edilmiştir. BMK'nün frekans cevapları hem ivme hem de yerdeğiştirmeler göz önüne alındığında, PID kontrolcüye göre çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, eğrilerde görülen rezonans frekansları, hesapla bulunan binanın doğal frekanslarıyla çakışma göstermektedir. Bu da, yapılan simülasyonun doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Tasarlanan bulanık mantık kontrolcü, PID kontrolcüye göre daha başarılı bir kontrol performansı göstermiştir. BMK, arzu edilen performans kriterlerini karşılamıştır. Titreşim genlikleri azaltılmış ve rezonans değerleri geliştirilmiştir.

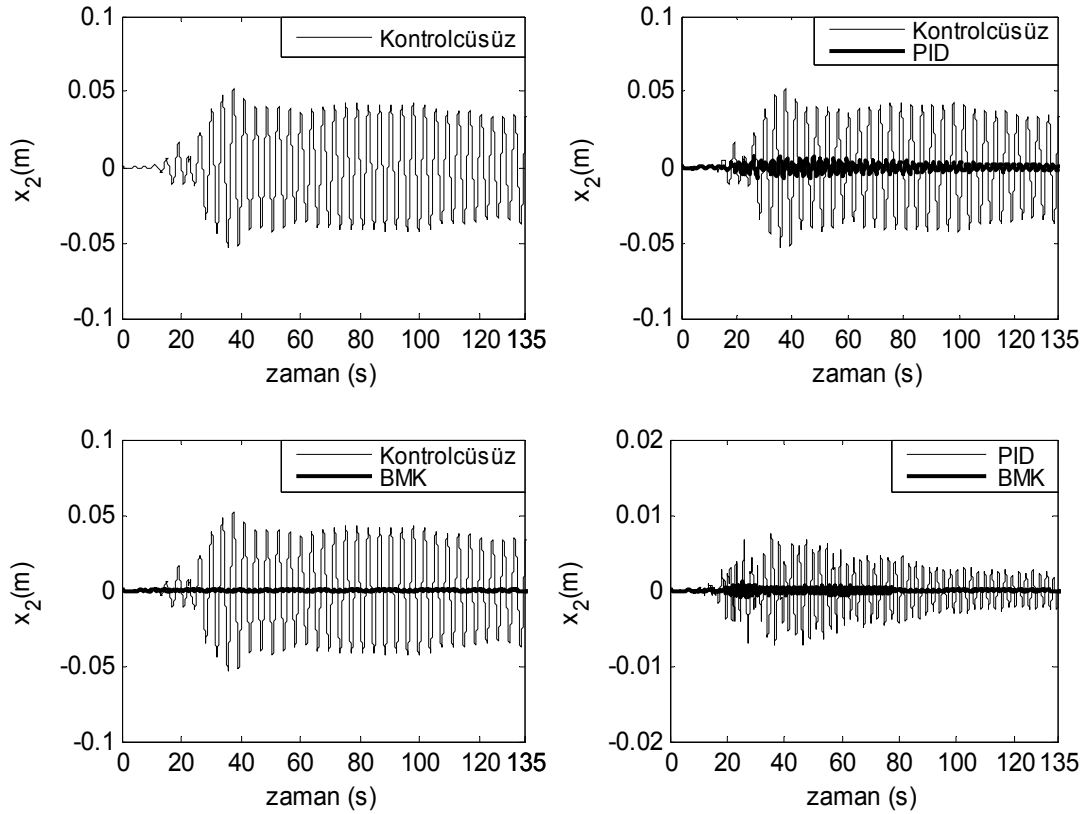
5.4 Binanın Gerçek Deprem Girişine Göre Simülasyonu

İkinci simülasyon çalışması olarak yapısal sisteme, 17 Ağustos 1999'da meydana gelen Kocaeli Depremi ($M_w=7.4$) bozucu giriş olarak uygulanmış ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Deprem ivmeleri, 17 Ağustos 1999 gecesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından İstanbul Küçükçekmece'deki Nükleer Araştırma merkezinde kaydedilmiştir. Kaydedilen depreme ait yerdeğiştirme, hız ve ivmelerin zamanla değişimleri, Şekil 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.14 17 Ağustos Kocaeli depremi yer hareketi

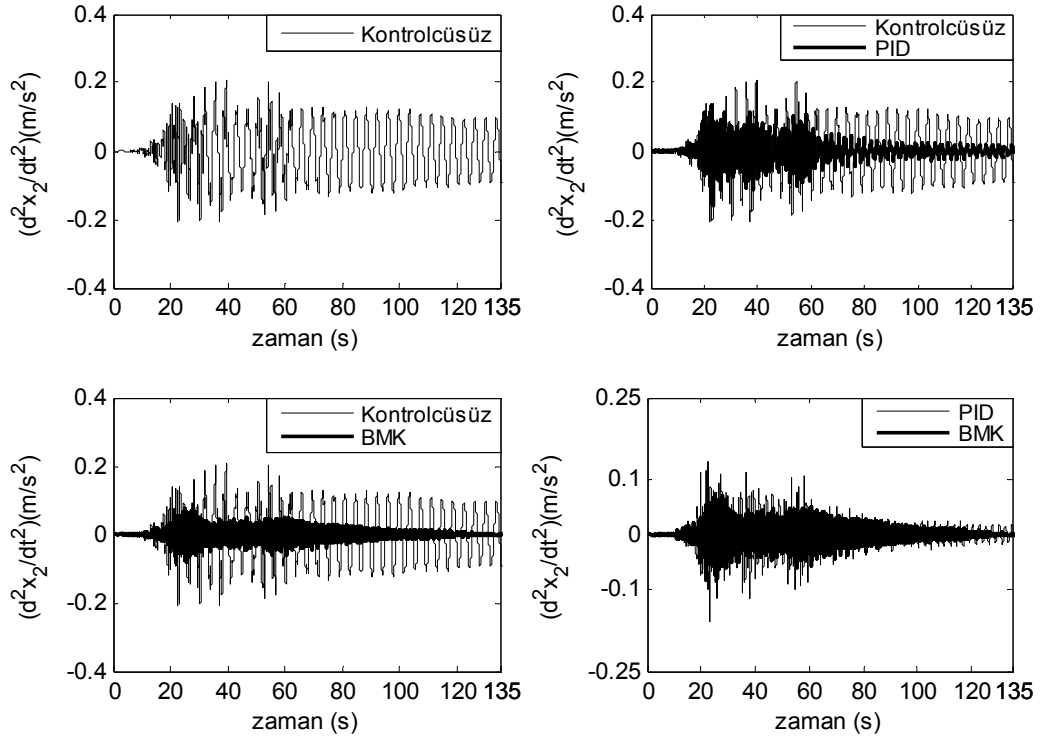
Yapılan simülasyonlar sonucunda, kontrolcünün yapıya yerleştirildiği 2. kat ile yapının en üst katı olan 15. katın yerdeğiştirme ve ivmelerinin depreme karşı zamanla değişimi belirlenmiştir. Şekil 5.15’de 2. katın yerdeğiştirmeleri sırasıyla kontrolcüsüz, PID ve kontrolcüsüz, BMK ve kontrolcüsüz, PID ve BMK olarak karşılaştırılmıştır.



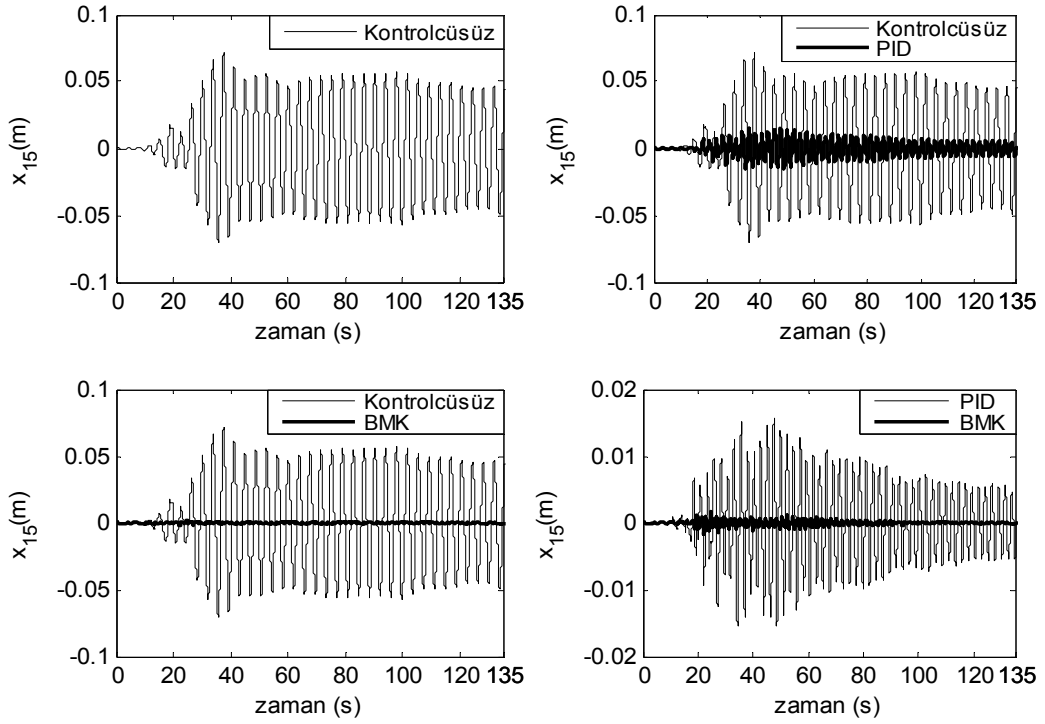
Şekil 5.15 İkinci katın yerdeğiştirmeleri

Şekil 5.15’de görüldüğü gibi, özellikle BMK’nün göstermiş olduğu kontrol oldukça tatmin edicidir. BMK, PID kontrolcüye göre daha iyi kontrol performans göstermiştir. Kontrolcünün yerleştirilmiş olduğu kat olan 2. katın yerdeğiştirmeleri, BMK kullanılarak minimize edilmiştir. Bu durum yapının deprem anındaki güvenliği için oldukça önemli bir gelişmedir.

Şekil 5.16’da 2. katın ivmeleri sırasıyla kontrolcüsüz, PID ve kontrolcüsüz, BMK ve kontrolcüsüz, PID ve BMK olarak karşılaştırılmıştır. İvme cevapları incelendiğinde kontrolcüsüz duruma göre, PID ve BMK kontrollü cevapların daha iyi oluşu görülmektedir. BMK’nün ivme cevapları, PID kontrolcünün ivme cevaplarına göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

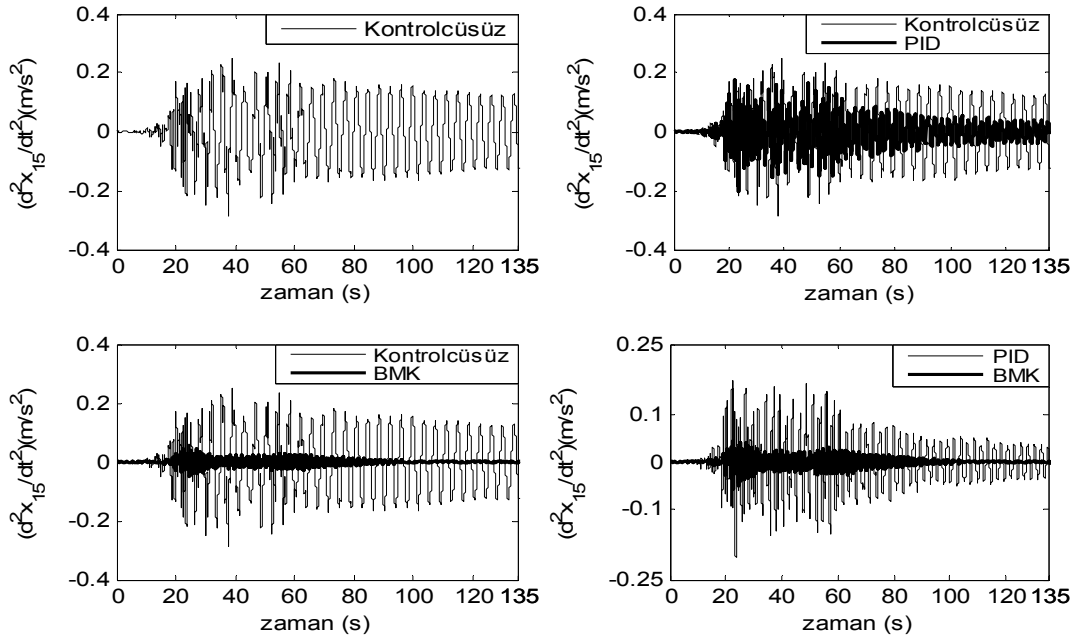


Şekil 5.16 İkinci katın ivmeleri



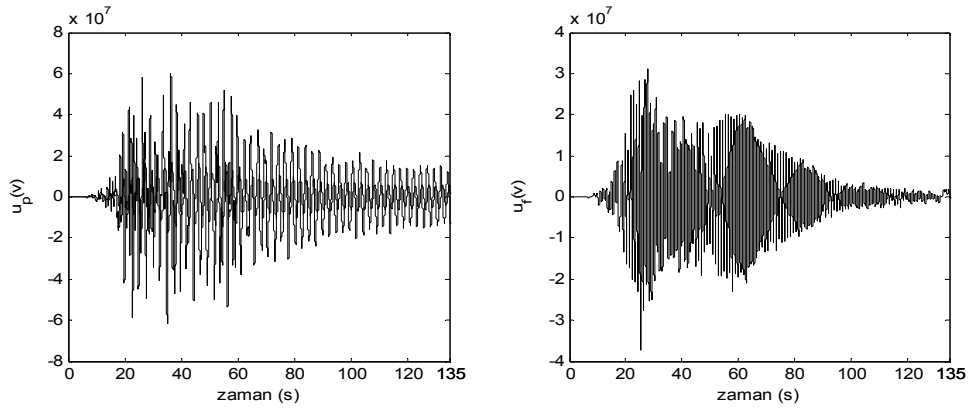
Şekil 5.17 Onbeşinci katın yerdeğiştirmeleri

Şekil 5.17’de görüldüğü gibi, binanın en üst katı olan ve en büyük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği 15. katta BMK’nün göstermiş olduğu performans oldukça başarılıdır. Şekil 5.18’de 15. katın ivme cevapları görülmektedir. BMK son katın ivmelerinde PID kontrole göre performansı çok yüksektir. 15. Katın ivmeleri minimize edilmiştir bu da konfor açısından oldukça önemli bir gelişmedir.



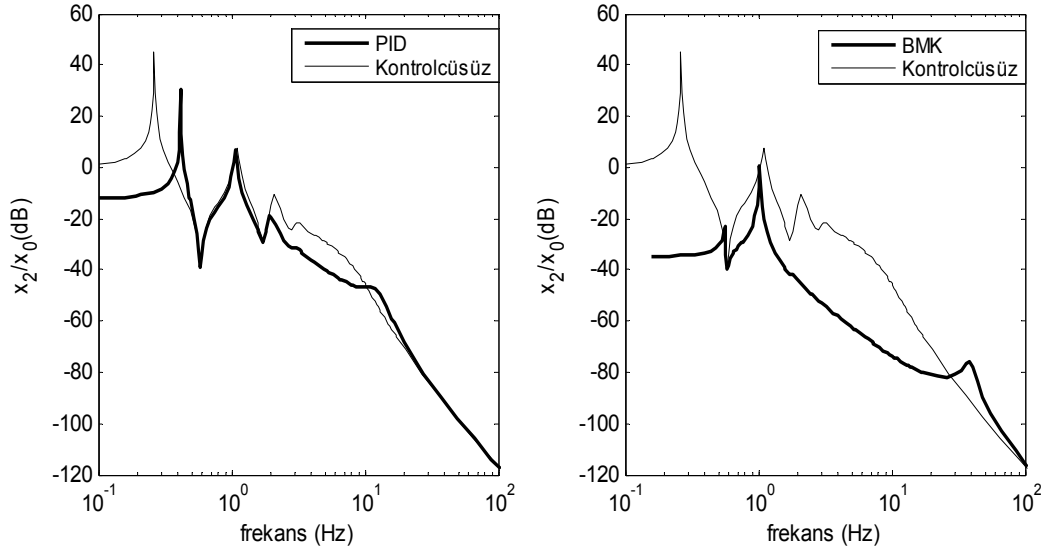
Şekil 5.18 Onbeşinci katın ivmeleri

Her iki kontrolcü yapısı için kontrol voltajındaki değişim Şekil 5.19’da gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere BMK, PID kontrolcüye göre daha düşük bir kontrol voltajı gerektirmektedir.

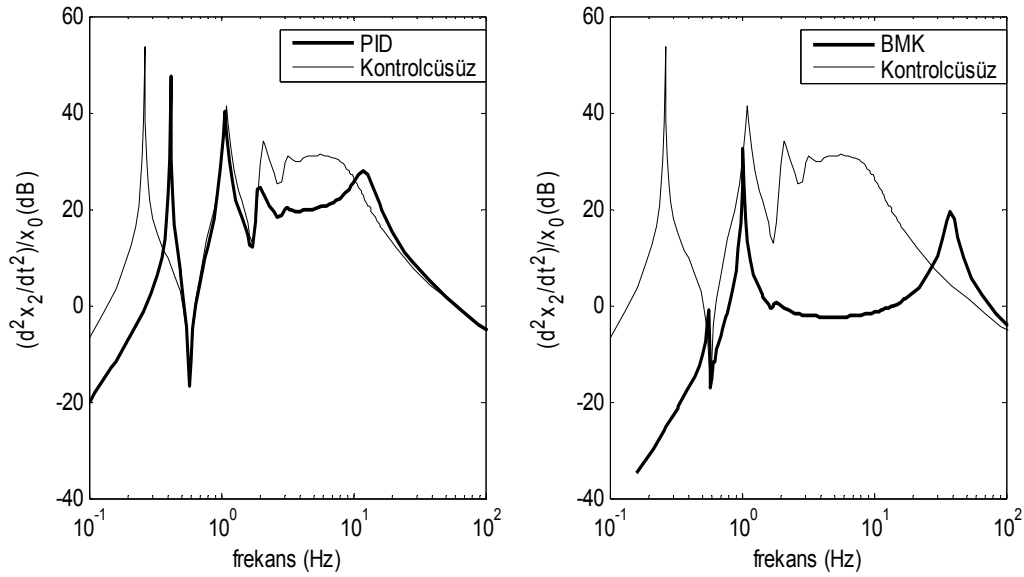


Şekil 5.19 PID ve BMK için kontrol voltajındaki değişim

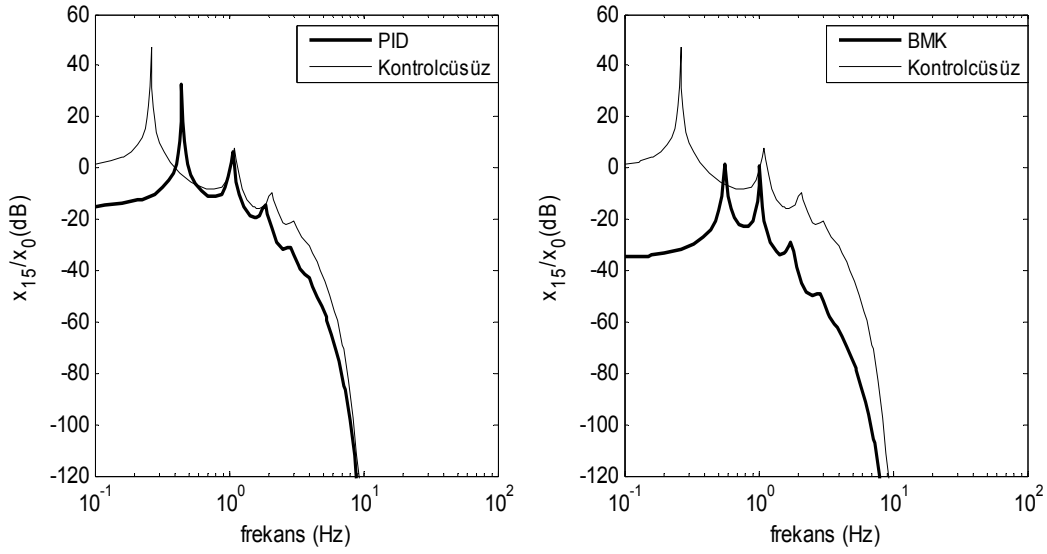
15 Katlı yapının frekans cevapları, 2. ve 15. katın ivme ve yerdeğiştirmeleri için verilmiştir. Sistem 15 serbestlik derecesine sahip olduğundan; 15 tane doğal frekansı vardır. Bu doğal frekans değerleri EK 2’de verilmiştir. şekil 5.20’de zemin yerdeğiştirmesinden 2.katın yatay yerdeğiştirmesine olan frekans cevapları ve şekil 5.21’de ise 2. katın ivmelerinin frekans cevapları gösterilmiştir. şekil 5.22 ve şekil 5.23’de sırasıyla 15. katın yerdeğiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları verilmiştir.



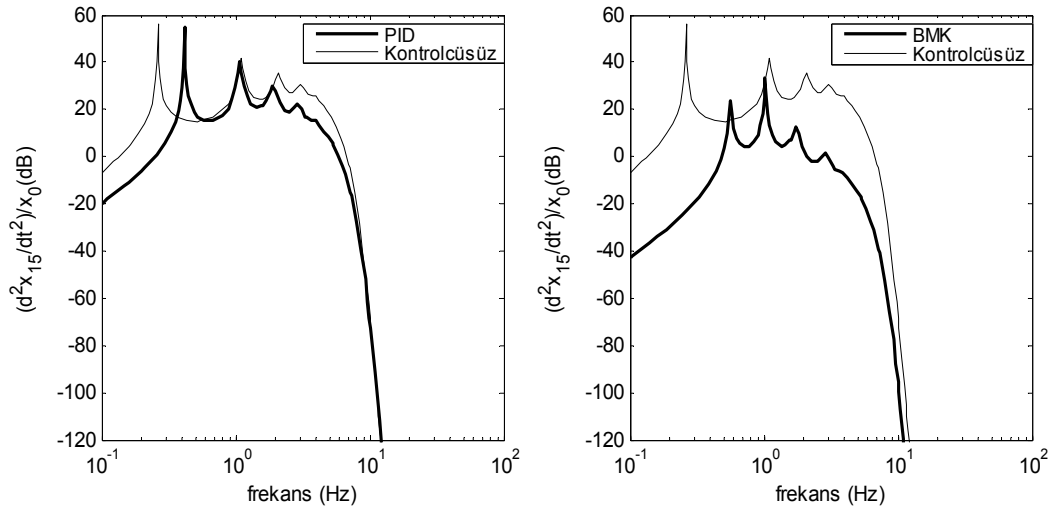
şekil 5.20 İkinci katın yerdeğiştirmelerinin frekans cevapları



şekil 5.21 İkinci katın ivmelerinin frekans cevapları



Şekil 5.22 Onbeşinci katın yerdeğiştirmelerinin frekans cevapları



Şekil 5.23 Onbeşinci katın ivmelerinin frekans cevapları

2.Katın ve en üst kat olan 15. katın yerdeğiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları kontrolcülü ve kontrolcüsüz olmak üzere karşılaştırılmıştır. Yüksek genlikli eğriler, kontrolcünün kullanılmadığı duruma aittir. Amaçlandığı gibi, en üst katınki dahil tüm rezonans değerlerinde ciddi bir iyileştirme elde edilmiştir. BMK'nün frekans cevapları hem ivme hem de yerdeğiştirmeler göz önüne alındığında, PID kontrolcüye göre çok daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. 2. ve 15. katların yerdeğiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları BMK kullanılarak,

deprem anındaki en tehlikeli mod olan ve binaların yıkılmasına veya ciddi hasarlar görmesine neden olan birinci modun (ana modun) bastırılmış olduğu görülmektedir. Deprem anında en tehlikeli frekans bölgesi düşük frekans bölgesidir. Frekans cevaplarından da görüldüğü gibi düşük frekans bölgelerinde tasarlanan BMK'nün performansı oldukça yüksektir. Ayrıca, eğrilerde görülen rezonans frekansları, hesaplara bulunan binanın doğal frekanslarıyla çakışma göstermektedir. Bu da, yapılan simülasyonun doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, deprem tehdidine karşı tasarlanan bulanık mantık kontrolcü, PID kontrolcüye göre daha başarılı bir kontrol performansı göstermiştir. Rezonans değerlerindeki gelişme ve titreşim genliklerindeki azalma bu sonucu desteklemektedir.

6. SONUÇLAR

Dünyada, yıkıcı depremler geçmişte ve son yüzyılda olduğu gibi gelecekte de tekrar edecektir. Aynı zamanda, Türkiye de bir deprem ülkesidir. Bu tezde, merkezinde insan olan sosyal, ekonomik, teknik ve siyasal boyutları bulunan depremin binalarda oluşturduğu titreşimlere ve bunların kontrolüne dikkat çekilmeye çalışılmıştır. Özellikle, elektronik endüstrisinin son yıllarda gösterdiği ilerlemelerle, deprem kaynaklı titreşimleri izole etmek için kullanılan aktif ikaz ediciler uygulamaya konulabilecek düzeye erişmiştir

Bu tezde, deprem tehdidindeki gerçek parametrelere sahip çok serbestlik dereceli bir binanın titreşimleri incelenmiş ve binanın aktif titreşim kontrolü için Bulanık Mantıklı Kontrolcü (BMK) ve PID Kontrolcü tasarlanmıştır. Matematik modellemesi yapılan bina 15 serbestlik derecesine sahiptir. Binaya ilk olarak zeminin 0.01 metre yerdeğiştirmesi sonucu oluşan yer hareketi bozucu etki olarak alınarak sanal bir deprem girişi uygulanmıştır. İkinci tip simülasyonda ise gerçek deprem yer hareketi 15 katlı binaya bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Sisteme bozucu etki olarak, 17 Ağustos 1999 yılında meydana gelen Kocaeli depremi girişi uygulanmıştır. Kontrolcülerin tasarımı bilgisayar ortamında Matlab Simulink paket programı ile yapılmıştır. Çalışmada, kontrolcünün bulunduğu 2. kat ve en üst kat olan 15. katın yerdeğiştirme ve ivmelerinin, zaman ve frekans cevapları incelenmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre, 2. katın yerdeğiştirme ve ivmelerinin zaman cevaplarında BMK'nün PID kontrolcüye göre çok daha iyi kontrol imkanı sağladığı gözlemlenmiştir. Yine 2. katın yerdeğiştirme ve ivmelerinin frekans cevaplarında BMK, PID kontrolcüye göre daha iyi sonuçlar vermiş, rezonans değerlerinde ciddi bir iyileştirme elde edilmiştir.

Deprem esnasında en fazla yerdeğiştirme yapması beklenen 15. katın simülasyon sonuçları incelendiğinde, yine yerdeğiştirme ve ivmelerin zaman ve frekans cevaplarında BMK'nün üstünlüğü gözlenmiştir. BMK ile yerdeğiştirmeler minimize edilmiş özellikle ivmelerin zaman cevaplarında, PID kontrolcünden çok daha iyi sonuçlar vermiştir. 15. katın titreşim genliklerinde azalma ve rezonans değerlerinde gelişmeler elde edilmiştir. Ayrıca, BMK'nün bir başka avantajı da PID kontrolcü'ye göre daha düşük bir kontrol voltajı gerekmesidir. Bu şekilde BMK'nün doğrusal olmayan (nonlinear) deprem gibi durumlar karşısında da başarılı bir bina titreşim kontrolü gerçekleştirdiği gösterilmiştir. Yerdeğişim ve ivmelerin frekans cevapları incelendiğinde, 15 katlı binanın doğal frekans değerleriyle eğrilerdeki rezonans frekanslarının aynı çıkması yapılan analizin doğruluğunu göstermiştir.

Bunların yanı sıra aktif kontrol sistemlerinde, yapıların maruz kaldıkları kuvvetlere karşı koyabilecek şekilde gereken gücün elde edilmesi, sistemi çalıştıracak olan enerjinin sürekli hazırda bulundurulması, sistemin kurulum, işletim ve bakım maliyetlerinin yüksek olması gibi çözüm bekleyen sorunlar vardır. Yapılan bu çalışmada olduğu gibi, bilgisayar ortamında tasarlanan ve simülasyon sonuçlarıyla başarısı kanıtlanan kontrol sistemlerinin binalarda aktif olarak kullanılabilmesi için deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Agarwala, R., Ozcelik, S., McLauchlan, R.A., Faruqi, M., (2000), “Active Vibration Control of Multi-Degree-of Freedom Structure by the use of Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers” Artificial Neural Networks in Engineering (ANNIE).

Akbıyık, B., (2004), Bulanık PID Kontrolör Yapılarının Temel Sistemler Üzerindeki Başarımının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.

Aldawod, M., Samali, B., Naghdy, F., Kwok, K.C.S., (2000), “Active Control of Along Wind Response of Tall Building Using A Fuzzy Controller”, Elsevier, Engineering Structures, Vol 23, pp. 1512-1522

Anderson, G.L., Crowson, A., (1992), “Introduction to Smart Structures”, Intelligent Structural Systems, pp. 1-8.

Alptekin, Ö., (1996), Sismoloji Ders Notları, İ.Ü. Jeofizik Mühendisliği Böl., İstanbul.

Baykal, N., Beyan, T., (2004), Bulanık Mantık Uzman Sistemler ve Denetleticiler, Bıçaklar Kitabevi, Ankara.

Bernard, J.A., (1998), Use of Rule Based Systems for Process Control, IEEE, Cont. Sys. Mag, Vol.8, No.5.

Dalcı, K.B., (2004), “Bulanık Kazanç Ayarlamalı Nonlineer PI Kontrolörün Kalıcı Mıknatıslı Doğru Akım Motor Dinamo Sistemine Uygulanması”, Doğu Üniversitesi Dergisi, Vol 5, pp.71-78.

Duclos, T.G., Carlson, J.D., (1992), “Electrorheological Fluids – Materials and Applications”, Intelligent Structural Systems, pp. 213-219.

Elmas, Ç., (2003), Bulanık Mantık Denetleyiciler, Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Erguvanlı, A., (1979), Depremlerin Oluş Nedenleri Hakkında, Deprem Araştırma Bülteni, Yıl: 6, Sayı:4

Fujino, Y., Susumpow, T., (1994), “An Experimental Study on Active Control of In-Plane Cable Vibration by Axial Support Motion”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.23, No.12, pp. 1283-1297.

Guclu, R., (2001), “Fuzzy Logic Control of Vibrations of Analytical Multi-Degree-of-Freedom Structural Systems” Turkish J. Eng. Env. Sci. Vol 27, pp.157-167.

Guclu, R., Sertbas, A., (2005), “Evaluation of Sliding Mode and Proportional –Integral-Derivative Controlled Structures with an Active Mass Damper”, Journal of Vibration and Control, Vol 11, pp.397-406.

Gündoğdu, O., Sayın, N., Özçep, F., Hisarlı, M. (2003), Marmara ve İstanbul’da Deprem tehlikesi, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, AT-060, İstanbul.

Kajima Corporation, (1991), Minimizing Tremors by Changing Building Stiffness AVC

Active Variable Stiffness System, Siesmic Response Control Series , Technical Pamphlet 91-95 E.

Klir, J.G., Folser, A.T., (1998), Fuzzy Sets, Uncertainty and Information, Practice –Hall.
Kosko, B., (1994), Fuzzy Thinking, Flamingo, An Imprint of Harpercollinspublishers.

Kuo, B.J., (1995), Automatic Control Systems, Prentice-Hall, New Jersey.

Lopez Almansa, F., Rodellar, J., (1990), “Feasibilty and Robustness of Predictive Control of Building Structures by Active Cables”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.19, No.2, pp. 157-171.

Mamdani, E.H., (1997), “Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Variables”, IEEE Trans. on Computers, Vol.C-26, pp.1182-1191.

Melik, M., (2002), Deprem Etkisindeki Yapıların Aktif Kütle Sönümleyicisi ve Aktif Kiriş Kontrol Sistemleri ile Korunması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.

Nishimura, H., Ohkubo, Y., Nonami, K., (1996), “Active Isolation Control for Multi-Degree-of-Freedom Structural System”, Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chibo, Japon.

Ogata, K. (1990) Modern Control Engineering, New Jersey, Prentice-Hall.

Özpalanlar, C.G., (2005), Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik İzolasyon ve Enerji Sönümleyici Sistemler, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.

Park, K.S., Koh, H.M., Ok, S.Y., (2002), “Active Control of Earthquake Excited Sructures Using Fuzzy Supervisory Technique” Elsevier, Advances in Engineering Software, Vol 33, pp.761-768.

Ross, T., (1995), Fuzzy Logic with Engineering Application, Mc Graw-Hill.

Soong, T.T., Constantinou, M.C., (1994), Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Enginnering, CISM Courses and Lecrures No 345, Springer-Verlag, Wien, New York.

Symans, M., Constantinou, M.C., (1997), Seismic Testing of a Building Structure with a Semi Active Fluid Damper Control System”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.26, No.7, pp. 759-777.

Şen, Z., (2001), Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, Bilge Kültür Sanat Yayınları, İstanbul.

Tzou, H.S., (1992), “Active Piezoelectric Shell Continua”, Intelligent Structural Systems, pp. 9-12.

Wang, L.X., (1994), Adaptive Fuzzy Systems and Control Design and Stability Analysis, Englewood Cliffs, Prentice Hall.

Warnitchai, P., Fujino, Y., (1993), “An Experimental Study on Active Tendon Control of Cable – Stayed Bridges”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.22, No.2,

pp. 93-111.

Yagız, N., Yüksek, İ., Guclu, R., (2000), “Sliding Mode Control of A Multi-Degree-of-Freedom Structural System”, 2nd International Symposium on Mechanical Vibrations, Islamabad, Pakistan.

Yoshida, K., Fujio, T., (1999), “Semi-Active Base Isolation for A Building Structure”, Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conference, Las Vegas, Nevada.

Yüce, İ.E., (2003), Yapılarda Sisimik İzolasyon ve Yeni Bir Performans Kavramı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.

Yüksek, İ., (2004), Sistem Dinamiği ve Kontrol, Yüksek Lisans Ders Notları, YTÜ.

Yüksel, İ., (2001), Otomatik Kontrol, Uludağ Üniversitesi Vakfı, Bursa.

Zadeh, L., (1965), “Fuzzy Sets”, Journal of Information and Control, Vol 8, pp.338-353.

Zhao, Z.Y., Tomizuka, M., Isaka, S., (1993), “Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers” IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol 23, 5, pp. 1392-1398.

Zobu, Ö., (1997), Aktif Pasif Yapı Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.

INTERNET KAYNAKLARI

www.deprem.gov.tr (Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi)

www.benkoltd.com

EKLER

- Ek 1 Kütle (M), Sönüm (C) ve Rijitlik (K) Matrisleri
- Ek 2 Bina Parametreleri, PID Kontrolcü Parametreleri, Bulanık Mantıklı Kontrolcü Giriş-Çıkış Ölçekleme Faktörleri, Lineer Motor Parametreleri, Katların Tabii Frekansları, Simülasyon Biçimi
- Ek 3 Bulanık Mantıklı Kontrolcünün Fuzzy Toolbox Tasarım Aşamaları

Ek 1 Kütle (M), Sönüm (C) ve Rijitlik (K) Matrisleri

Kütle Matrisi;

[illegible]

Sönüm Matrisi;

[illegible]

Rijitlik Matrisi;

[illegible]

Ek 2 Bina Parametreleri, , PID Kontrolcü Parametreleri, Bulanık Mantıklı Kontrolcü Giriş-Çıkış Ölçekleme Faktörleri, Lineer Motor Parametreleri, Katların Tabii Frekansları, Simülasyon Şekli.

Bina parametreleri:

Kütle değerleri;

$$m_1 = 450000 \text{ kg}$$

$$m_2 = 345600 \text{ kg}$$

$$m_3 = 345600 \text{ kg}$$

$$m_4 = 345600 \text{ kg}$$

$$m_5 = 345600 \text{ kg}$$

$$m_6 = 345600 \text{ kg}$$

$$m_7 = 345600 \text{ kg}$$

$$m_8 = 345600 \text{ kg}$$

$$m_9 = 345600 \text{ kg}$$

$$m_{10} = 345600 \text{ kg}$$

$$m_{11} = 345600 \text{ kg}$$

$$m_{12} = 345600 \text{ kg}$$

$$m_{13} = 345600 \text{ kg}$$

$$m_{14} = 345600 \text{ kg}$$

$$m_{15} = 345600 \text{ kg}$$

Sönüm katsayıları:

$$c_1 = 26170 \text{ Ns/m}$$

$$c_2 = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_3 = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_4 = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_5 = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_6 = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_7 = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_8 = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_9 = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_{10} = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_{11} = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_{12} = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_{13} = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_{14} = 2937000 \text{ Ns/m}$$

$$c_{15} = 2937000 \text{ Ns/m}$$

Yay katsayıları:

$$k_1 = 18050000 \text{ N/m}$$

$$k_2 = 340400000 \text{ N/m}$$

$$k_3 = 340400000 \text{ N/m}$$

$$k_4 = 340400000 \text{ N/m}$$

$$k_5 = 340400000 \text{ N/m}$$

$$k_6 = 340400000 \text{ N/m}$$

$$k_7 = 340400000 \text{ N/m}$$

$$k_8 = 340400000 \text{ N/m}$$

$$k_9 = 340400000 \text{ N/m}$$

$$\begin{aligned}k_{10} &= 340400000 \text{ N/m} \\k_{11} &= 340400000 \text{ N/m} \\k_{12} &= 340400000 \text{ N/m} \\k_{13} &= 340400000 \text{ N/m} \\k_{14} &= 340400000 \text{ N/m} \\k_{15} &= 340400000 \text{ N/m}\end{aligned}$$

Adım girişi için PID kontrolcü parametreleri:

$$\begin{aligned}K_D &= 10000 \\K_I &= 5000000 \\K_P &= 2300000000\end{aligned}$$

Gerçek deprem girişi için PID kontrolcü parametreleri:

$$\begin{aligned}K_D &= 10000 \\K_I &= 4000000 \\K_P &= 1900000000\end{aligned}$$

Bulanık Mantık Kontrolcü gerçek deprem girişi için giriş-çıkış ölçekleme faktörleri:

$$\begin{aligned}Se &= 67 \\Sde &= 0.04 \\Su &= 800000000\end{aligned}$$

Bulanık Mantık Kontrolcü step girişi için giriş-çıkış ölçekleme faktörleri:

$$\begin{aligned}Se &= 67 \\Sde &= 0.67 \\Su &= 165000000\end{aligned}$$

Lineer motor parametreleri:

$$\begin{aligned}R &= 4.2 \Omega \\K_f &= 2 \text{ N/A} \\K_e &= 2 \text{ Volt}\end{aligned}$$

Katların Tabii Frekansları:

$$\begin{aligned}f_1 &= 0.26 \text{ Hz.} \\f_2 &= 1.10 \text{ Hz.} \\f_3 &= 2.07 \text{ Hz.} \\f_4 &= 3.05 \text{ Hz.} \\f_5 &= 4.01 \text{ Hz.} \\f_6 &= 4.94 \text{ Hz.} \\f_7 &= 5.81 \text{ Hz.} \\f_8 &= 6.63 \text{ Hz.} \\f_9 &= 7.37 \text{ Hz.} \\f_{10} &= 8.04 \text{ Hz.} \\f_{11} &= 8.62 \text{ Hz.} \\f_{12} &= 9.10 \text{ Hz.} \\f_{13} &= 9.48 \text{ Hz.} \\f_{14} &= 9.76 \text{ Hz.} \\f_{15} &= 9.93 \text{ Hz.}\end{aligned}$$

Simülasyon Biçimi;

Adım girişi için simülasyon zamanı:

$t_i = 0$ saniye

$t_f = 200$ saniye

Gerçek deprem girişi için simülasyon zamanı:

$t_i = 0$ saniye

$t_f = 135$ saniye

Çözücü opsiyonları (Matlab Simulink):

Select:

- Solver
- Data Import/Export
- Optimization
- Diagnostics
 - Sample Time
 - Data Integrity
 - Conversion
 - Connectivity
 - Compatibility
 - Model Referencing
- Hardware Implementation
- Model Referencing
- Real-Time Workshop
 - Comments
 - Symbols
 - Custom Code
 - Debug
 - Interface

Simulation time

Start time: Stop time:

Solver options

Type: Solver:

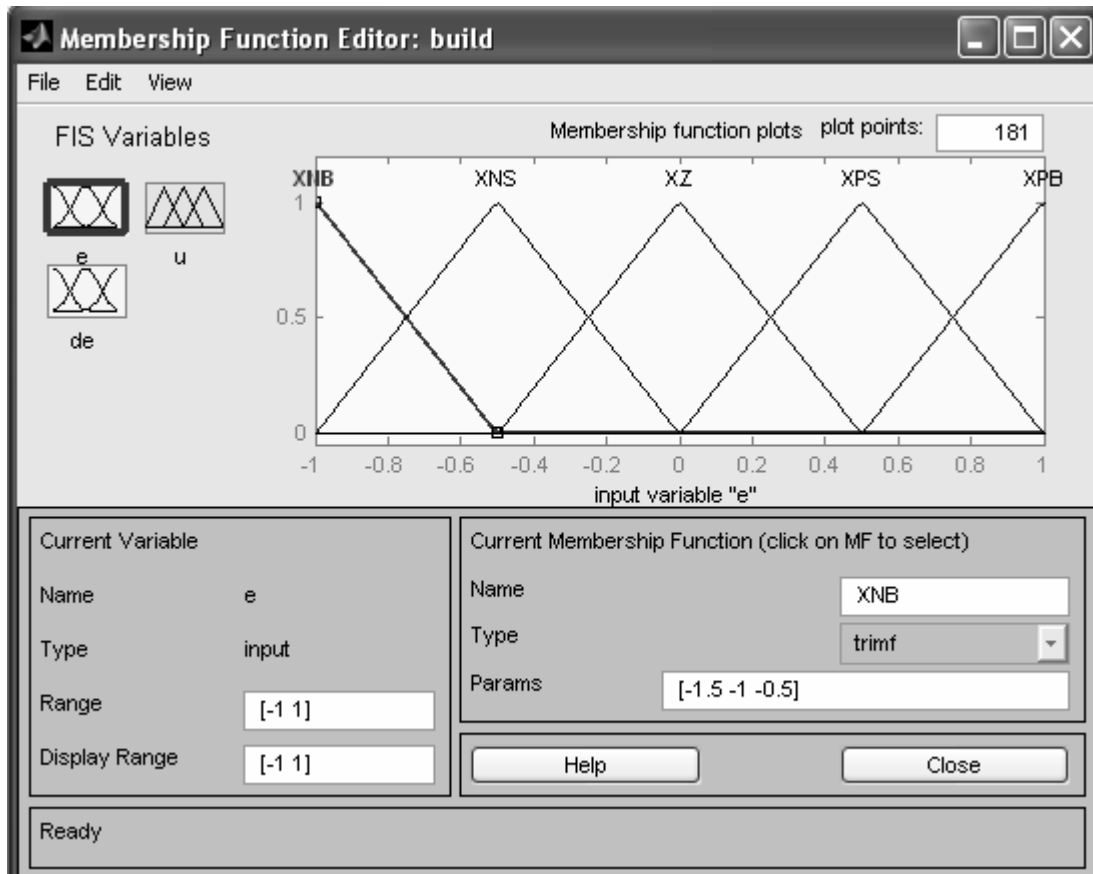
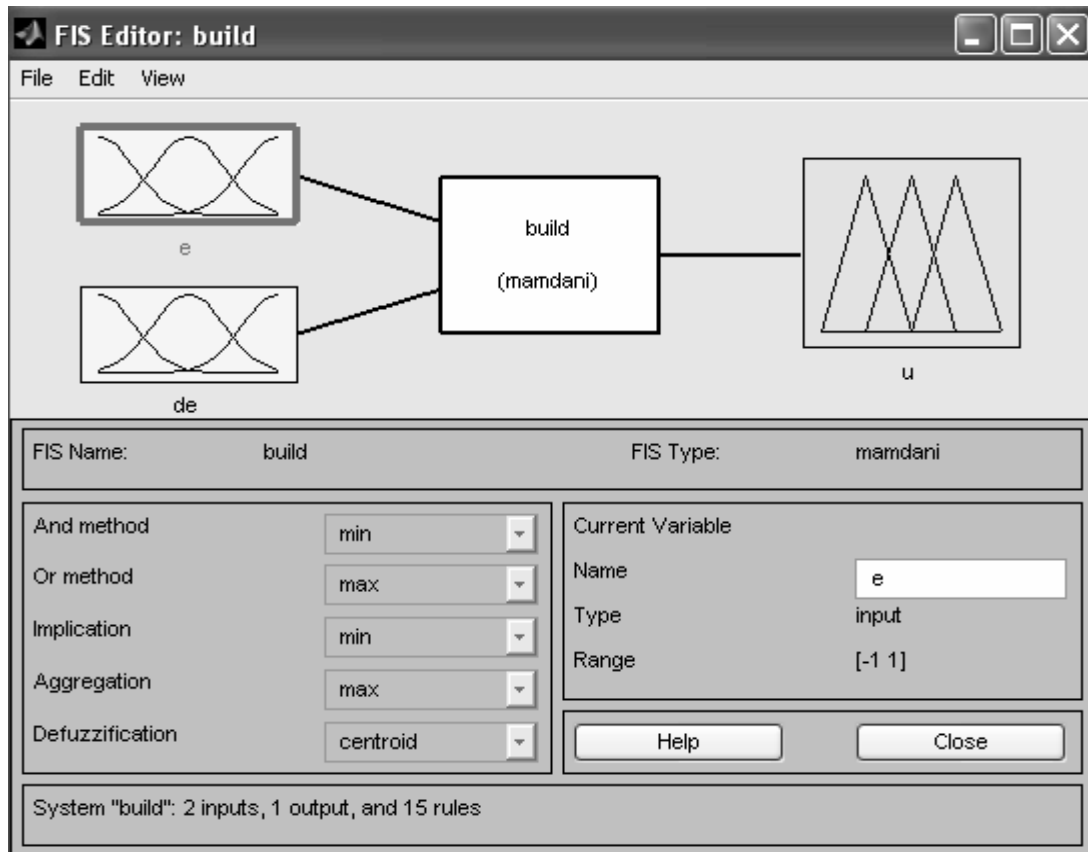
Max step size: Relative tolerance:

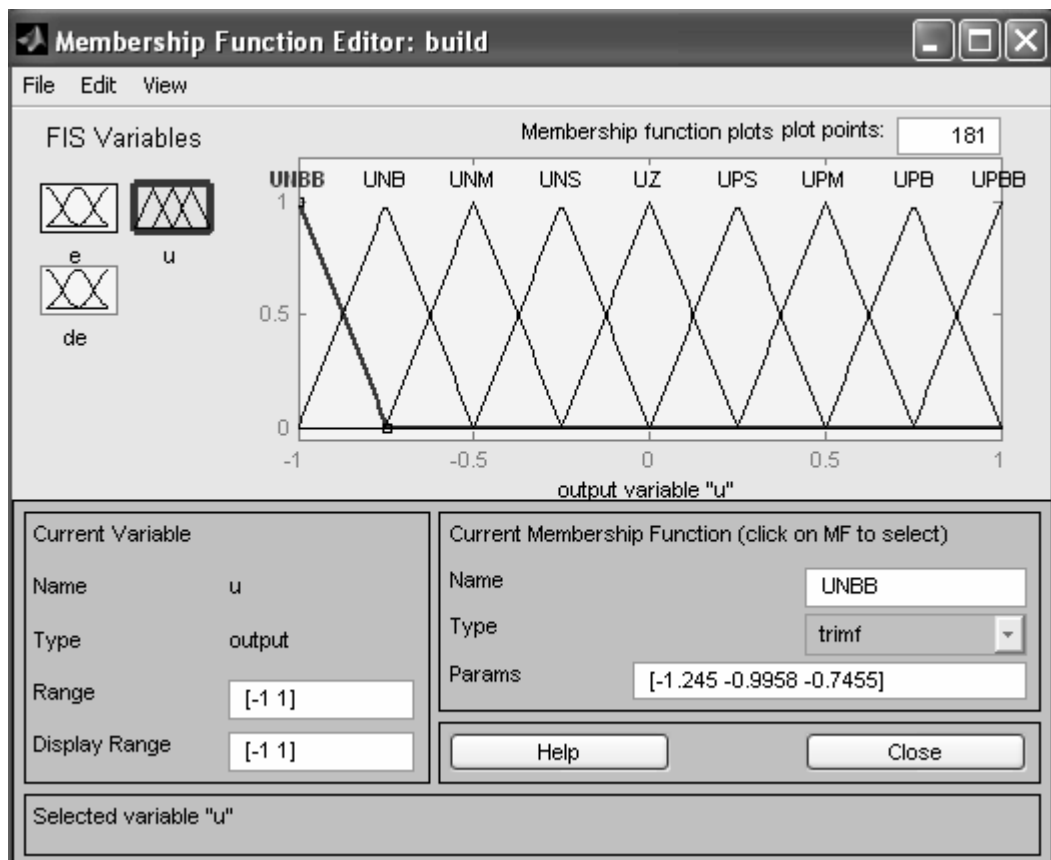
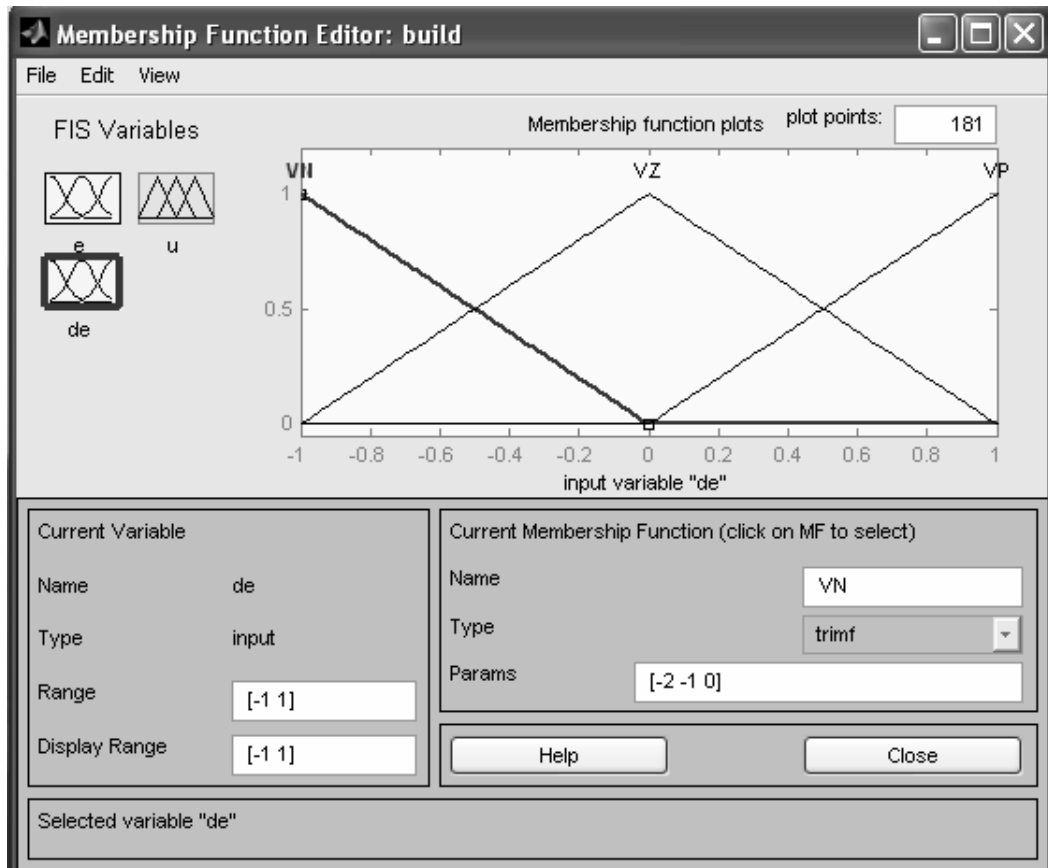
Min step size: Absolute tolerance:

Initial step size:

Zero crossing control:

Ek 3 Bulanık Mantıklı Kontrolcünün Fuzzy Toolbox Tasarım Aşamaları





Rule Editor: build

File Edit View Options

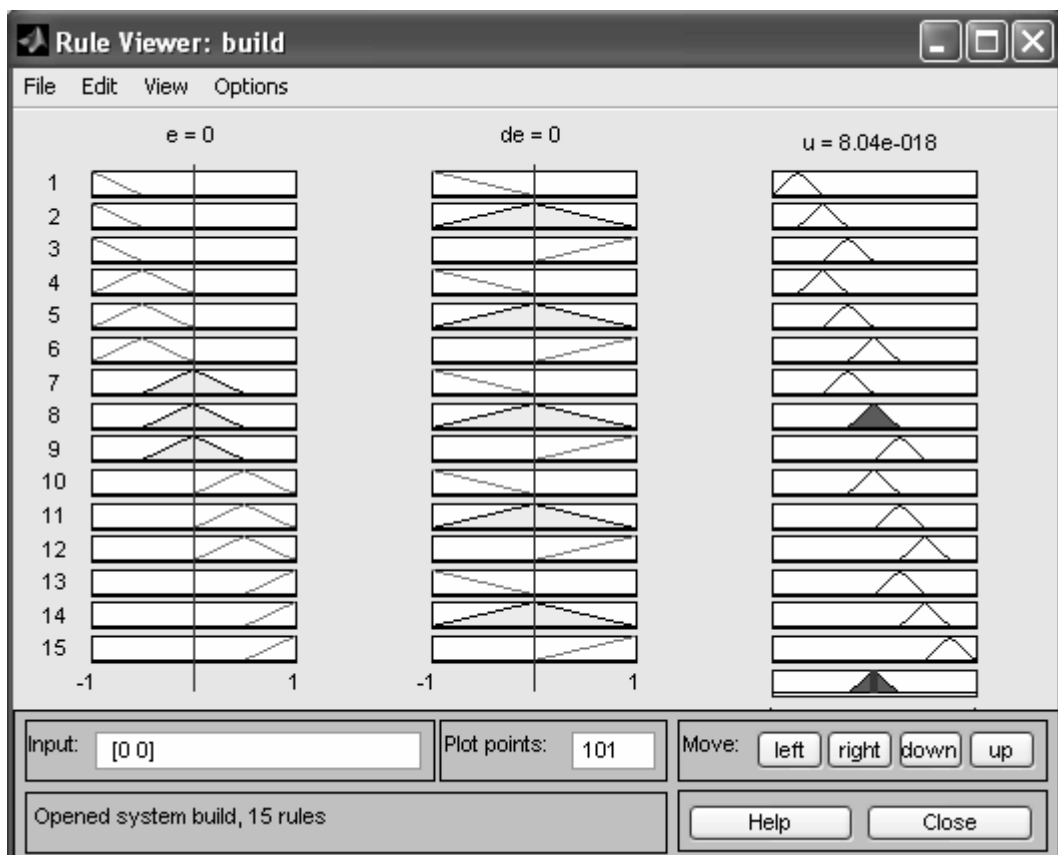
1. If (e is XNB) and (de is VN) then (u is UNB) (1)
 2. If (e is XNB) and (de is VZ) then (u is UNM) (1)
 3. If (e is XNB) and (de is VP) then (u is UNS) (1)
 4. If (e is XNS) and (de is VN) then (u is UNM) (1)
 5. If (e is XNS) and (de is VZ) then (u is UNS) (1)
 6. If (e is XNS) and (de is VP) then (u is UZ) (1)
 7. If (e is XZ) and (de is VN) then (u is UNS) (1)
 8. If (e is XZ) and (de is VZ) then (u is UZ) (1)
 9. If (e is XZ) and (de is VP) then (u is UPS) (1)
 10. If (e is XPS) and (de is VN) then (u is UZ) (1)

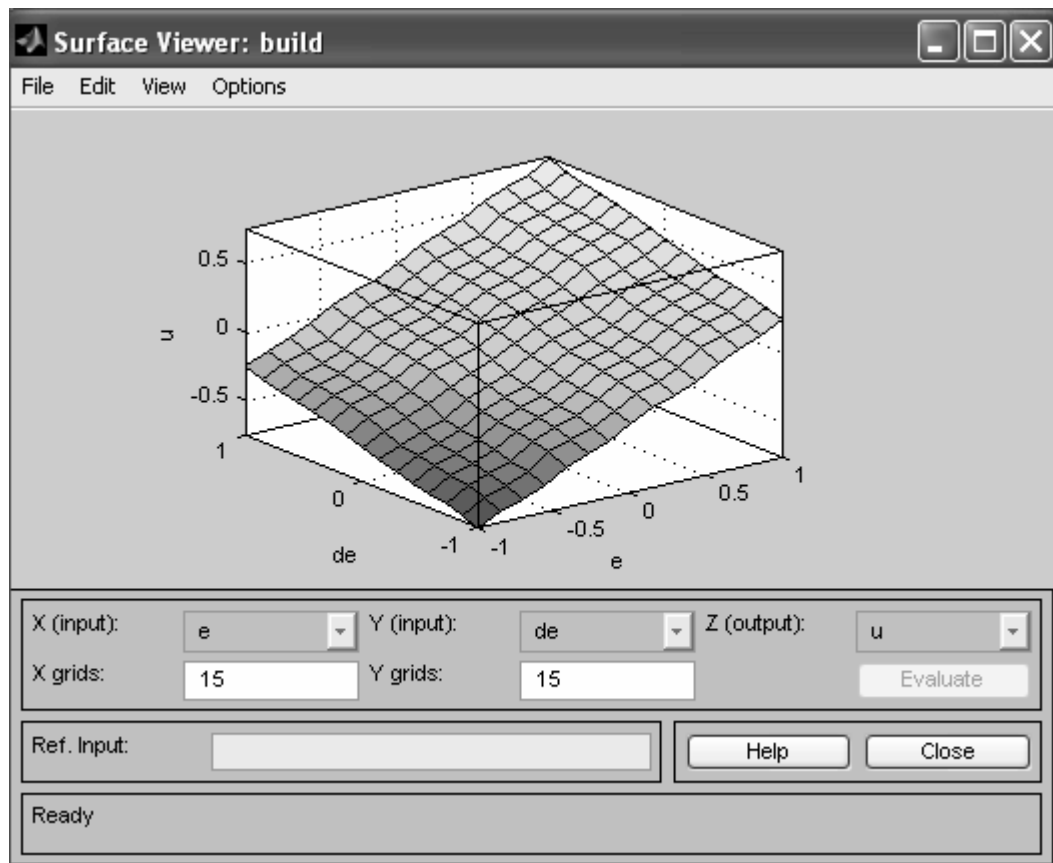
If and Then
 e is de is u is

XNB VN UNB
 XNS VZ UNM
 XZ VP UNS
 XPS none UZ
 XPB UPS
 none UNM
☐ not ☐ not ☐ not

Connection Weight:
 or 1
 and Delete rule Add rule Change rule << >>

FIS Name: build Help Close





ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 19.07.1979

Doğum yeri Trabzon

Lise 1994–1997 Pendik Süper Lisesi

Lisans 1998–2002 Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Müh. Fak.
Makine Mühendisliği BölümüYüksek Lisans 2003–2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve
Kontrol Programı**Çalıştığı kurumlar**2003–2005 Öz-Ak Filtre Yedek Parça San. ve Tic. Ltd. Şti.
2005-Devam ediyor. Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği
Bölümü, Makine Teorisi, Sistem Dinamiği ve
Kontrol Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi