

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BULANIK PID KONTROLÖRLERİ İÇİN ÇEVİRİM İÇİ KURAL
AĞIRLIKLANDIRMA YÖNTEMLERİ**

DOKTORA TEZİ

Onur KARASAKAL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

NİSAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BULANIK PID KONTROLÖRLERİ İÇİN ÇEVİRİM İÇİ KURAL
AĞIRLIKLANDIRMA YÖNTEMLERİ**

DOKTORA TEZİ

**Onur KARASAKAL
(504042108)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA

NİSAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504042108 numaralı Doktora Öğrencisi **Onur KARASAKAL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BULANIK PID KONTROLÖRLERİ İÇİN ÇEVİRİM İÇİ KURAL AĞIRLIKLANDIRMA YÖNTEMLERİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yorgo İSTEFANOPULOS**
Işık Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim EKSİN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Taner ARSAN
Kadir Has Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Osman Kaan EROL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Ocak 2012**
Savunma Tarihi : **25 Nisan 2012**

Aileme ve sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Öncelikle bana güvenip danışmanlığımı kabul etmesi ve doktora çalışmam boyunca her zaman, her konuda destek olması sebebiyle değerli hocam Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA'ya, her türlü yardımı esirgemeyen ve özellikle samimiyetinden dolayı hocam Prof. Dr. İbrahim EKSİN'e, bilgilerini her zaman benimle paylaşan ve danışmanım kadar değerli Yrd. Doç. Dr. Engin YEŞİL'e, her türlü imkan ve desteği bana sağlayan Dr. Tufan KUMBASAR'a, tüm hayatım boyunca bana verdikleri destek ve bana karşı duydukları güvenden ötürü aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Nisan 2012

Onur KARASAKAL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. BULANIK MANTIK SİSTEMLERİ	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Dilsel İfadeler.....	9
2.2.1 Üyelik fonksiyonları	9
2.2.2 Dilsel terimler ve değişkenler	10
2.2.3 Dilsel niteleyiciler	11
2.3 Bulanık Sistem Öğeleri	12
2.3.1 Bulanıklaştırma	12
2.3.2 Bulanık kural tabanı	12
2.3.3 Bulanık çıkarım mekanizması.....	12
2.3.3.1 Mamdani tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması.....	13
2.3.3.2 Takagi-Sugeno tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması.....	14
2.3.3.3 Tekil (Singleton) tip yapı için bulanık çıkarım mekanizması.....	14
2.3.4 Durulaştırma.....	15
2.3.4.1 Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi	15
2.3.4.2 Ağırlık ortalaması durulaştırma yöntemi	16
2.3.4.3 Maksimum durulaştırma yöntemi	17
3. BULANIK MANTIK KONTROLÖRLERİ.....	19
3.1 Giriş.....	19
3.2 Bulanık PID Kontrolör Yapıları.....	20
3.2.1 Çarpım-toplam tekil bulanık kontrolör	21
3.2.2 Bulanık PD kontrolörü	25
3.2.3 Bulanık PI kontrolörü.....	26
3.2.4 Bulanık PID kontrolörü.....	27
3.3 Bulanık PID Kontrolörü Tasarımı.....	30
3.3.1 Giriş.....	30
3.3.2 Bulanık PID kontrolörü tasarım parametreleri.....	30
3.3.3 Özayarlama bulanık PID kontrolörü	31
3.3.3.1 Ölçekleme çarpanlarının ayarlanmasına dayalı yöntemler	31
3.3.3.2 Üyelik fonksiyonu parametrelerinin ayarlanmasına dayalı yöntemler ..	34
3.3.3.3 Bulanık kural ağırlıklarının ayarlanmasına dayalı yöntemler	36
4. BULANIK KURAL AĞIRLIKLANDIRMA YÖNTEMLERİ.....	39
4.1 Giriş.....	39

4.2 Bulanık Kural Ağırlıkları	40
4.3 Hata Tabanlı Kural Ağırlıklandırma Yöntemi	47
4.3.1 Kural ağırlıklandırma yönteminin açıklanması.....	47
4.3.2 Benzetim sonuçları.....	55
4.3.3 Deney sonuçları.....	63
4.4 Birimselleştirilmiş İvme Tabanlı Kural Ağırlıklandırma Yöntemi.....	67
4.4.1 Birimselleştirilmiş ivme kavramı	67
4.4.2 Kural ağırlıklandırma yönteminin açıklanması.....	69
4.4.3 Benzetim sonuçları	77
4.4.4 Deney sonuçları.....	85
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	101

KISALTMALAR

PID	: Proportional, Integral and Derivative
PCS	: Process Control Simulator
BMK	: Bulanık Mantık Kontrolörü
PD	: Proportional and Derivative
PI	: Proportional and Integral
IAE	: Integral Absolute Error
TV	: Total Variation
ITAE	: Integral Time Absolute Error
OS	: Over Shoot
HATKAY	: Hata Tabanlı Kural Ağırlıklandırma Yöntemi
BİTKAY	: Birimselleştirilmiş İvme Tabanlı Kural Ağırlıklandırma Yöntemi
BKY	: Ayarlamasız Bulanık Kontrolör Yanıtı
ÇAY	: Çıkış Ölçekleme Çarpanı Ayarlama Yöntemi
EKAY	: Eniyileştirilmiş Kural Ağırlık Yöntemi

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 4.1 : Bulanık PID kontrolörü için kural tablosu.	42
Çizelge 4.2 : Sistem I için başarıml analizleri.	44
Çizelge 4.3 : Sistem II için başarıml analizleri.	46
Çizelge 4.4 : Bulanık PID kontrolörü için kural tabanı tablosu.	56
Çizelge 4.5 : Sistem III için başarıml analizleri.	57
Çizelge 4.6 : Sistem IV için başarıml analizleri.	59
Çizelge 4.7 : Sistem V için başarıml analizleri.	60
Çizelge 4.8 : Sistem VI için başarıml analizleri.	63
Çizelge 4.9 : Bulanık kural tabanı.	66
Çizelge 4.10 : Deney için başarıml analizleri.	66
Çizelge 4.11 : De(.) ile dde(k) işaretleri arasındaki ilişki ve sistem yanıtının yapısı	69
Çizelge 4.12 : 9 kural için bulanık kural ağırlık düzenleyici için kural tabanı.	75
Çizelge 4.13 : 25 kural için bulanık kural ağırlık düzenleyici için kural tabanı.	76
Çizelge 4.14 : Her bir bölge için bulanık kural ağırlıklandırması.	77
Çizelge 4.15 : Bulanık PID kontrolörü için kural tabanı.	79
Çizelge 4.16 : Sistem VII için başarıml analizleri.	81
Çizelge 4.17 : Sistem VIII için başarıml analizleri.	81
Çizelge 4.18 : Sistem IX için başarıml analizleri.	83
Çizelge 4.19 : Sistem X için başarıml analizleri.	84
Çizelge 4.20 : RT 552 pH prosesine ait temel parametreler..	86
Çizelge 4.21 : Durum 1 için başarıml analizleri.	88
Çizelge 4.22 : Durum 2 için başarıml analizleri.	89
Çizelge 4.23 : Durum 3 için başarıml analizleri.	90

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Basit bir bulanık mantık sistemi yapısı.	8
Şekil 2.2 : Üyelik fonksiyonu tipleri (a) Üçgen tip, ve (b) Yamuk tip.	10
Şekil 2.3 : Üyelik fonksiyonu tipleri (a) Gauss tipi, ve (b) Çan eğrisi tipi.	10
Şekil 2.4 : “Sıcaklık” dilsel değişkeni ve dilsel terimleri.	10
Şekil 2.5 : İki kurala sahip Mamdani tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması. ..	13
Şekil 2.6 : Takagi-Sugeno tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması.	14
Şekil 2.7 : Tekil tip yapı için bulanık çıkarım mekanizması.	15
Şekil 2.8 : Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi.	16
Şekil 2.9 : Ağırlık ortalaması durulaştırma yöntemi.	16
Şekil 2.10 : Maksimum durulaştırma yöntemi.	17
Şekil 3.1 : Giriş değişkenlerine atanan dilsel değişkenler ve çıkış değişkeni için e-è düzlemi.	21
Şekil 3.2 : Bulanık PD kontrolörüne ait blok gösterimi.	26
Şekil 3.3 : Girişlerin hata ve hatanın integrali olarak alınması durumunda elde edilen bulanık PI kontrolöre ait blok gösterimi.	26
Şekil 3.4 : Bulanık PI kontrolöre ait blok gösterimi.	27
Şekil 3.5 : Girişlerin hata, hatanın değişimi ve hatanın integrali olması durumunda elde edilen bulanık PID kontrolöre ait blok gösterimi.	28
Şekil 3.6 : Hata ve hatanın değişimi olmak üzere iki adet girişe ve iki ayrı kural tabanına sahip bulanık PID kontrolöre ait blok gösterimi.	28
Şekil 3.7 : Bulanık PID kontrolöre ait blok gösterimi.	29
Şekil 4.1 : Kapalı çevrim bulanık PID kontrolör sisteminin genel yapısı.	39
Şekil 4.2 : Giriş değişkenleri e ve Δe için atanan üçgen tip üyelik fonksiyonları.	40
Şekil 4.3 : a) Giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları, b) Çıkış değişkeni için üyelik fonksiyonları; c) Kontrol yüzeyi.	43
Şekil 4.4 : Sistem I için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.	45
Şekil 4.5 : Sistem II için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.	46
Şekil 4.6 : Sistem basamak yanıtının hata değişkenine atanan üyelik fonksiyonu sayısına bağlı olarak bölgelere ayrıştırılması.	47
Şekil 4.7 : Hata tabanlı kural ağırlıklandırma yönetimi kullanan bulanık PID kontrolörün kapalı çevrim kontrol yapısı.	50
Şekil 4.8 : $n \times m$ giriş üyelik fonksiyonları için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.	51
Şekil 4.9 : 3×3 giriş üyelik fonksiyonları (9 kural) durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.	52
Şekil 4.10 : 5×5 giriş üyelik fonksiyonları (25 kural) durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.	52
Şekil 4.11 : 7×7 giriş üyelik fonksiyonları (49 kural) durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.	53

Şekil 4.12 :	Sistem birim basamak yanıtının hata değişkenine atanan 3 üyelik fonksiyonuna bağlı olarak bölgelere ayrıştırılması.	54
Şekil 4.13 :	(a) e ve Δe girişleri için üyelik fonksiyonları, (b) U çıkışı için üyelik fonksiyonları; (c) Kontrol yüzeyi.	56
Şekil 4.14 :	Sistem III için sonuçlar: (a) Sistem yanıtları ve (b) Kontrol işaretleri. ...	58
Şekil 4.15 :	Sistem IV için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri. ...	59
Şekil 4.16 :	Sistem V için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.	61
Şekil 4.17 :	Sistem VI için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri. ...	62
Şekil 4.18 :	FEEDBACK PCS 327 Proses Kontrol Simülatorü deney seti.	65
Şekil 4.19 :	(a) e ve Δe girişleri için üyelik fonksiyonları, (b) U çıkışı için üyelik fonksiyonları; (c) Kontrol yüzeyi.	65
Şekil 4.20 :	Proses Simülatoründe oluşturulan sistem için deney sonuçları: (a) Sistem yanıtları ve (b) Kontrol işaretleri.	67
Şekil 4.21 :	Basamak girişi için sistem yanıtlarına ait bağıl hızların gösterimi.	68
Şekil 4.22 :	Birimselleştirilmiş ivme tabanlı kural ağırlıklandırma yönetimi kullanan bulanık PID kontrolörün kapalı çevrim kontrol yapısı.	70
Şekil 4.23 :	$n \times m$ giriş üyelik fonksiyonları için kural ağırlıklandırma tablosu.	72
Şekil 4.24 :	9 kural durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.	73
Şekil 4.25 :	25 kural durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.	73
Şekil 4.26 :	49 kural durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.	74
Şekil 4.27 :	9 kural için e, rv girişleri ve γ çıkışına atanan üyelik fonksiyonları.	75
Şekil 4.28 :	25 kural için e, rv girişleri ve γ çıkışına atanan üyelik fonksiyonları.	76
Şekil 4.29 :	(a) e ve Δe girişleri için üyelik fonksiyonları, (b) U çıkışı için üyelik fonksiyonları; (c) Kontrol yüzeyi.	79
Şekil 4.30 :	Sistem VII için sonuçlar: (a) Sistem yanıtları ve (b) Kontrol işaretleri.	80
Şekil 4.31 :	Sistem VIII için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.	82
Şekil 4.32 :	Sistem IX için sonuçlar: (a) Sistem yanıtları, ve (b) kontrol işaretleri.	83
Şekil 4.33 :	Sistem X için sonuçlar: (a) Sistem yanıtları, ve (b) kontrol işaretleri.	85
Şekil 4.34 :	(a) Deney setinin genel görünümü, (b) Deney setinin blok gösterimi. ...	86
Şekil 4.35 :	Durum 1 için deney sonuçları: (a) Sistem yanıtları, (b) Kontrol işaretleri.	88
Şekil 4.36 :	Durum 2 için deney sonuçları: (a) Sistem yanıtları, (b) Kontrol işaretleri.	89
Şekil 4.37 :	Durum 3 için deney sonuçları: (a) Sistem yanıtları, (b) Kontrol işaretleri.	90
Şekil 4.38 :	Durum 4 için deney sonuçları: (a) Sistem yanıtı, (b) Kontrol işareti.	91

BULANIK PID KONTROLÖRLERİ İÇİN ÇEVİRİM İÇİ KURAL AĞIRLIKLANDIRMA YÖNTEMLERİ

ÖZET

Bulanık küme kuramı, ilk olarak 1965 yılında Lotfi Zadeh tarafından ortaya konulduktan sonra, ilk uygulamasını 1974 yılında kontrol alanında bulmuştur. Takip eden yıllarda bulanık kontrol birçok araştırmacı tarafından önemli bir çalışma konusu olarak ele alınmıştır. Son onbeş yıl içerisinde bulanık kontrolörler endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Klasik PID kontrolörlerinin sadece basit yapılı ve doğrusal sistemler için başarımının yüksek olması bilinen bir gerçektir. Bulanık kontrolörlerin her türlü sistem tipi için doğrusal olmayan kontrol eylemi sağlaması, sistem başarımını artırmak maksadıyla bu iki tip kontrolör yapısının birleştirilerek daha etkin bir kontrolör yapısının elde edilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda günümüzde endüstride en yaygın olarak kullanılan bulanık kontrolörler, giriş çıkış ilişkisi bakımından yapıları itibarıyla klasik PID kontrolörleri ile denkliği ortaya konmuş olan bulanık PID kontrolörleridir. Literatürde, bu tip kontrolörlerin başarımını artırmak amacıyla, kontrolör tasarım parametrelerinin çevrim içi olarak ayarlanmasına dayalı çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Herhangi bir ayarlama yöntemini kullanan bulanık kontrolörlere özayarlamalı bulanık PID kontrolörleri adı verilmektedir. Bu yöntemlerde temel ayarlama parametreleri ölçekleme çarpanları, üyelik fonksiyonu parametreleri, bulanık kurallar ve bulanık kural ağırlıklarıdır.

Bu tez çalışmasında, bulanık PID kontrolörüne ait bulanık kural ağırlıkları için ayarlama yöntemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda iki ayrı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi önerilmiştir. Bu kural ağırlıklandırma yöntemlerinde sistem bilgisi kullanılmış ve yöntemler çevrim içi olarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemler genel bir yapıya sahip olduklarından, her türlü sistem tipine uygulanabilmektedir. Söz konusu kural ağırlıklandırma yöntemlerinin ilkinde sadece sisteme ait hata bilgisi kullanılmıştır. İkincisinde hata bilgisine ek olarak sistem hız bilgisi sağlayan birimselleştirilmiş ivme değişkeni de kullanılmıştır. Önerilen yöntemler ilk olarak Matlab ortamında bazı doğrusal olan ve olmayan test sistemlerine benzetimler yoluyla uygulanmış ve irdelenmiştir. Benzetim ortamında tasarlanan bir kontrolör yapısının, fiziksel sistemler üzerinde uygulanması neticesinde başarımda birtakım farklılıkların ortaya çıkabildiği bilinen bir gerçektir. Bu kapsamda, benzetim uygulamalarının yanı sıra, önerilen bulanık PID kontrolör yapıları Proses Kontrol Simülatörü ve pH Kontrol Deney Seti üzerinde de gerçek zamanda uygulanmıştır. Elde edilen sistem yanıtları ve başarımları irdelenmiş ve değişik başarımlar ölçütleri doğrultusunda karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının başlangıcında, bulanık PID kontrolör yapılarında kullanılan üyelik fonksiyonları, dilsel terimler ve dilsel değişkenler hakkında kuramsal bilgiler ve temel tanımlar verilmiştir. Bu tanımlara ek olarak bir bulanık sistem yapısında yer alan ölçekleme çarpanları, bulanıklaştırıcı, bulanık kural tabanı, bulanık çıkarım mekanizması ve durulayıcı gibi sistem öğeleri hakkında tanımlamalar ve bu öğelerin temel işlevlerine ilişkin bilgiler özetlenmiştir. Sonrasında bulanık kontrolör

tasarımında kontrolöre ait çıkış değişkenine tekil tip üyelik fonksiyonunun atanması ve çarpım-toplam çıkarım mekanizmasının kullanılması durumunda elde edilen bulanık kontrolör yapısının klasik PID kontrolör yapısına denk bir yapıda olduğu, bu tip kontrolör yapısının kullanılması ile bulanık PID kontrolörlerinin elde edilebileceği kuramsal olarak gösterilmiştir. Daha sonra, literatürde mevcut ve ölçekleme çarpanları, üyelik fonksiyonu parametreleri, bulanık kurallar ve bulanık kural ağırlıkları gibi kontrolör parametrelerini kullanan ayarlama yöntemleri özetlenmiştir. Yapılan çalışmalarda, özellikle bulanık PID kontrolörüne ait doğrusal kontrol eylemini daha etkin kılmak amacıyla ölçekleme çarpanlarına ilişkin ayarlama yöntemlerinin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu yöntemlerin sistem bilgisini kullandıkları ve sistematik bir yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Buna karşın, kontrolöre ait doğrusal olmayan kontrol eylemini daha etkin hale getirmek üzere üyelik fonksiyonları ve bulanık kural ağırlıkları gibi parametreler çoğunlukla eniyileme yöntemleri kullanılarak ve genellikle çevrim dışı olarak uyarlanmaktadır. Üyelik fonksiyonları ve bulanık kural ağırlıkları gibi parametrelere ilişkin ayarlama yöntemlerinin sistem bilgisini kullanmadığı, her sistem yapısı için geçerli ve sistematik bir yapıya sahip olmadıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca, bulanık PID kontrolörüne ait bu parametrelerin değişik sistemler için her defasında ayrı ayrı uyarlanması gerekmektedir. Bu süreç ise işlem karmaşıklığına ve tekrarına neden olmaktadır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla bu tez çalışmasında, çevrim içi bulanık kural ağırlıklandırma yöntemleri önerilmiştir. Önerilen yöntemler her sistem tipi için geçerli ve sistematik bir yapıya sahip olmakla birlikte, çevrim içi olarak sistem bilgisini kullanılmaktadırlar.

Bu amaçla, ilk olarak sistem kapalı çevrim birim basamak yanıtı dikkate alınmıştır. Sistem yanıtı, bulanık PID kontrolörüne ait hata giriş değişkeni için tanımlanmış üyelik fonksiyonu sayısına bağlı olarak belirli sayıda temel bölgelere ayrıştırılmıştır. Bu bölgeler, referans değeri dikkate alınarak referans değerine yaklaşma ve referans değerinden uzaklaşma bölgeleri biçiminde adlandırılmıştır. Bu bölgelerin elde edilmesinde, istenen sistem başarımını sağlayabilmek için gerekli kontrol işareti değerinin üretilmesi amaçlanmıştır. Örneğin, sistem hata değerinin pozitif büyük olduğu bölgelerde sistem yanıtını yeteri kadar hızlandırmak amacıyla pozitif büyük değerli kontrol işareti değerine gerek duyulmakta, benzer olarak sistem hata değerinin negatif büyük olduğu bölgeler de ise gerekli sistem yanıtı hızını sağlamak amacıyla negatif büyük değerine sahip kontrol işaretine gerek duyulmaktadır. Bu doğrultuda, her bir bölgede sistemin etkin olarak kontrolü için gerekli olan kontrol işareti değerinin elde edilmesi amacıyla birtakım temel tanımlayıcı kurallar belirlenmiştir. Bu tanımlayıcı kurallar kullanılarak gerekli kontrol işaretinin elde edilebilmesi maksadıyla bulanık PID kontrolörüne ait bulanık kuralların her bir bölgede ayrı ayrı önemi ve etkisi belirlenmiş, söz konusu önem ve etkiler her bir bulanık kural için tanımlanmış olan bulanık kural ağırlık değişkeni ile ilişkilendirilmiştir. Dolayısıyla, her bir bölgede gerekli olan kontrol işareti değerinin, üyelik fonksiyonu aitlik derecesi tanımını korumak üzere bulanık kural ağırlıklarının $[0,1]$ değer aralığında uygun biçimde değiştirilerek elde edilebileceği belirlenmiştir.

Sistem hata değerinin kapalı çevrim kontrol sistemleri için geçici sistem yanıtı süresince azalıp arttığı ve her örneklem zamanı değerinde hesaplanabildiği dikkate alınarak, bulanık kural ağırlıkları ilk olarak sistem hata değerinin mutlak değeri kullanılarak uyarlanmıştır. Mutlak değer fonksiyonunun kullanılması ile birimselleştirilmiş hata değeri $[0, 1]$ aralığına eşlenmiştir. Böylelikle hata değişkeni belirlenen tanımlayıcı kurallar doğrultusunda bulanık kural ağırlıklandırmasında bir

ayarlama parametresi olarak kullanılmıştır. Sistem hata değişkeninin mutlak değerine bağlı olarak elde edilen iki basit fonksiyonun kullanımı ile basit ve sistematik bir bulanık kural ağırlıklandırma yapısı elde edilmiş, bu yöntem “hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi” olarak adlandırılmıştır. Önerilen bu yönteme sahip bulanık PID kontrolörü değişik doğrusal olan ve olmayan test sistemlerine Matlab ortamında benzetimler yoluyla uygulanmış ve Proses Kontrol Simülatörü Deney Setine gerçek zaman uygulaması olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar değişik başarımlar ölçütleri dikkate alınarak, herhangi bir ayarlama yöntemine sahip olmayan bulanık PID kontrolörünün ve çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine sahip bulanık PID kontrolörünün kullanılması ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin kullanılması ile çok daha iyi sistem başarımlarının elde edildiği ve bozucu etkisinin daha etkin olarak giderildiği gözlemlenmiştir.

Sonrasında, elde edilen temel bölgeler ve tanımlanan tanımlayıcı kurallar doğrultusunda, ilave bir sistem bilgisini kullanan diğer bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem ile hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin başarımının artırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, sistem hata değişkenini ve sistem hız bilgisi sağlayan birimselleştirilmiş ivme değişkenini girişleri olarak kullanan bir bulanık mekanizma yapısı önerilmiştir. Gerekli kontrol işaretinin elde edilebilmesi amacıyla, söz konusu bulanık mekanizma çıkışı için birtakım tanımlayıcı kurallar belirlenmiştir. Böylelikle, mekanizma çıkışı doğrudan kural ağırlıklandırmasında bir ayarlama parametresi olarak kullanılmıştır. Bulanık mekanizmanın giriş değişkenleri için tanımlanmış üyelik fonksiyonlarına bağlı olarak simetrik kural tablosu oluşturulmuştur. Tasarlanan bulanık mekanizmanın kullanılması ile elde edilen kural ağırlıklandırma yöntemi “birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi” olarak adlandırılmıştır. Birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör değişik doğrusal olan ve olmayan test sistemlerine Matlab ortamında benzetimler yoluyla uygulanmıştır. Benzetimlere ek olarak söz konusu kural ağırlıklandırma yöntemi değişik referans değerleri için pH Kontrol Deney Seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sistem yanıtları, değişik başarımlar ölçütleri doğrultusunda hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörü, çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine sahip bulanık PID kontrolörü, herhangi bir ayarlama yöntemine sahip olmayan bulanık PID kontrolörü ve bulanık kural ağırlıkları genetik arama yöntemi ile eniyileştirilmiş bulanık PID kontrolörünün kullanılması ile elde edilen sistem yanıtları ve başarımlar ölçütü sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen benzetimler ve gerçek zaman uygulamalarında, basit bir kontrolör yapısı elde ederek işlem karmaşıklığını asgari düzeyde tutabilmek amacıyla, bulanık PID kontrolörü girişlerinin her birisi için 3 üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Böylece her bir kontrolör yapısı için 9 kurala sahip bir bulanık kural tabanı elde edilmiştir. Ayrıca uygulamalarda ve benzetimlerde her bulanık PID kontrolörü için aynı ölçekleme çarpanı değerleri kullanılmış, böylelikle sistem başarımlarının karşılaştırılmasında eşit koşullar sağlanmıştır.

Sonuç olarak, elde edilen sistem yanıtları ve başarımlar analizleri neticesinde, her iki kural ağırlıklandırma yönteminin sistem başarımını artırdığı gözlemlenmiştir. Önerilen iki yöntem karşılaştırıldığında, birimselleştirilmiş ivme tabanlı kural ağırlıklandırma yönteminin kullanılması ile en iyi sistem başarımına ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu yöntem, diğerine oranla daha fazla hesaplama yüküne neden olmaktadır.

ONLINE RULE WEIGHTING METHODS FOR THE FUZZY PID CONTROLLERS

SUMMARY

The fuzzy set theory was proposed by Lotfi Zadeh in 1965 and the first control application of this theory was accomplished in 1974. In the following years, the fuzzy control has been accepted as an important field by many researchers and in the last decade fuzzy controllers have found a wide range of application area in industry. It is a known fact that the performances of the classical PID controllers are only satisfactory for the simple structured and linear systems. Since the fuzzy controllers provide nonlinear control actions on any type of control systems, a necessity has occurred to combine these two controller structures in order to improve the overall system performance. Within this scope, the commonly used fuzzy controllers in the industry are the fuzzy PID controllers, the structures of which are analogous to that of the conventional PID controllers from the input-output relationship point of view.

In literature, many studies have been made to improve the performance of the conventional fuzzy PID controllers. The parameters of the fuzzy PID controllers have been tuned in an on-line manner. The fuzzy PID controllers which use any kind of tuning methodology have been called as self-tuned fuzzy PID controllers. In these controller structures, the main tuning parameters are the scaling factors, membership functions, fuzzy rules and fuzzy rule weights.

In this thesis, it has been aimed to develop tuning methods for the fuzzy rule weights of the fuzzy PID controllers. Within this scope, two different fuzzy rule weight assignment methods are proposed. These weight assignment methods use the system information and are accomplished in an on-line manner. The methods can be applied to any kind of system because of the generality in their structures. In the first fuzzy rule weight assignment method, only the system error information is used. In the second method beside the system error, the normalized acceleration information is also taken into consideration. The normalized acceleration provides relative information on fastness or slowness of the system response. The proposed two fuzzy rule weight assignment methods are firstly applied to some benchmark systems by simulations in Matlab environment. It is a known fact that there could be some performance degradations when a controller structure designed in a simulation environment is applied to real physical systems. In this context, beside the simulations, the same fuzzy PID controller structures are implemented on PCS 327 Process Control Simulator and G.U.N.T. RT-552 pH Control experimental sets. The obtained system responses and the performance results are examined and compared using various performance measures.

At the beginning of the thesis, some theoretical information and main definitions on the linguistic terms, membership functions and linguistic variables are given. In addition, some descriptions about the common elements of a fuzzy system such as scaling factors, fuzzifier, fuzzy rule base, fuzzy inference mechanism and defuzzifier are also summarized briefly. Then, it has been theoretically shown that the obtained

fuzzy controller structure is analogous to that of the conventional PID controller structure from the input-output point of view under certain conditions that singleton membership functions are assigned to the output of the fuzzy controller and the product-sum fuzzy inference mechanism is used. Afterwards, the self tuning methods partaking in the literature using the fuzzy controller parameters such as scaling factors, membership functions, fuzzy rules and fuzzy rule weights are summarized. It has been concluded from the studies that in order to activate the linear control action of the fuzzy PID controller, especially the tuning methods related to scaling factors are used. These methods rely on system information and they have systematical structures. In spite of that, the design and structural parameters such as membership functions and fuzzy rule weights are used to activate the non linear control action of the controllers and they are generally tuned by optimization techniques in an off-line manner. It has been observed that the tuning methods related to the adjustment of membership functions and fuzzy rule weights lack of any on-line system information and general structures to be applied to all kinds of systems. Moreover, the parameters of the fuzzy PID controller have to be optimized for each type of system and this creates computational complexity. In order to eliminate such kind of disadvantages, on-line fuzzy rule weight assignment methods are proposed in this thesis. The proposed rule weighting methods are both general for all system types and have systematical structures. In addition, they use system information in an on-line manner.

For this purpose, first of all, the transient phase of the unit response of the closed loop control system is taken into consideration. The transient phase of the response is assumed to be divided into certain regions which are assigned in accordance with the number of membership functions defined for the error input of the fuzzy PID controller. These regions are named as approach and drift regions with regard to the reference value. The required control signal to achieve the desired control performance is taken into consideration in partitioning these regions. For example, when the system error value is positive big, big positive control signal is needed in order to fasten the system response sufficiently. Similarly, when the system error value is negative big, negative big control signal is needed in order to slow down the system response, thus possible overshoot can be prevented. Then, the relative importance or influences of the fired fuzzy rules of the fuzzy PID controller are determined for each region and the meta-rules are derived in order to obtain the required control signal for the desired system performance. The importance and the influence of each fuzzy rule are associated to the fuzzy rule weight variable. Thus, it has been determined that the required control signal for each region could be obtained by changing the value of the fuzzy rule weights properly in the interval of $[0, 1]$. Assigning a value to the rule weights in the interval of $[0, 1]$ ensures the membership degree validity.

Since the value of the system error varies during the transient system response and it is available at each sampling time, the weight assignment is firstly accomplished using the absolute value of this error variable. Using the absolute value function, the normalized error value is mapped to the interval $[0, 1]$. Thus, the normalized system error is directly used for the assignment of the fuzzy rule weights by an adequate arrangement in accordance with the meta-rules derived. With the use of two simple functions based on the absolute value of the system error, a simple and systematic fuzzy rule weighting structure is obtained and this weighting method is named as “error based fuzzy rule weight adjustment method”. The fuzzy PID controller which

has this weight adjustment is applied to both linear and nonlinear benchmark systems by simulations in Matlab environment and it is also implemented on PCS 327 Process Control Simulator as a real time application. Considering some specific performance measures such as maximum overshoot, settling time, integral of absolute error, integral time of absolute error and total variation of control input, the obtained results are compared with those of the conventional fuzzy PID controller and the fuzzy PID controller with a self-tuning scheme for the output scaling factor. It has been observed that with the use of error based fuzzy rule weight adjustment method much better system performance and load disturbance rejection are obtained.

Next, in accordance with the regions obtained and the meta-rules derived, another fuzzy rule weight assignment method that uses an additional system information is proposed. Here, it is aimed to improve the performance of the previous error based fuzzy rule weight assignment method. In this context, a simple fuzzy mechanism that uses both system error variable and the normalized acceleration as its inputs is proposed. The normalized acceleration variable provides the relative information on the fastness or slowness of the system response. If the system response is very fast, this variable approaches to 1 and if the system response is very slow, it approaches to -1. In order to obtain the required control signal, some meta-rules are derived for the output of the fuzzy mechanism. Thus, the output of the fuzzy mechanism is directly charged as the tuning variable of the fuzzy rule weights. Depending on the membership functions assigned to the inputs of the fuzzy mechanism, a symmetrical rule base is obtained. The fuzzy rule weighting that uses this fuzzy mechanism is named as “normalized acceleration based fuzzy rule weight adjustment method”. The fuzzy PID controller that uses this rule weight adjustment method is applied to some linear and nonlinear benchmark systems by simulations in Matlab environment. In addition to the simulations, the fuzzy rule weighting method is implemented on G.U.N.T. RT-552 pH neutralization process for various reference values. The results are compared with those of four different fuzzy PID controller structures which are the fuzzy PID controller with error based fuzzy rule weight adjustment method, the fuzzy PID controller with a self-tuning scheme for the output scaling factor, the fuzzy PID controller with optimized rule weights via genetic search algorithm according to the integral of absolute error performance measure and the conventional fuzzy PID controller.

In all simulations and real time experiments, in order to design a simple fuzzy PID controller structure 3 membership functions are assigned to each input of the controller so as to minimize the computational complexity. In this manner, a rule base with 9 fuzzy rules is obtained. In addition, the same scaling factor values are used for each fuzzy PID controller so as to ensure equivalent operating conditions.

Finally, it has been observed that both proposed rule weighting methods improve the system performance. When the two proposed rule weighting methods are compared with each other, the best system performance is obtained when the normalized acceleration based fuzzy rule weight adjustment method is used. However, this method has a computational burden compared to the error based fuzzy rule weight adjustment method.

1. GİRİŞ

Birçok araştırmanın ve yüksek sayıda değişik çözüm yolunun önerilmesine karşın, çoğu endüstriyel kontrol sistemi hala PID kontrolüne dayanmaktadır. PID kontrolörün endüstride kullanım oranının yaklaşık olarak %90 ile %99 arasında olduğu bilinmektedir. Bu yüksek kullanım oranının bazı sebepleri şu şekilde ifade edilebilir:

- a) PID kontrolörleri dayanıklı ve tasarımları basittir.
- b) PID ile sistem yanıtına ait parametreler arasında belirgin bir ilişki mevcuttur. Bir PID kontrolörünün sadece üç adet parametreye sahip olmasından dolayı, operatörler bu parametrelerin etkileri ve sistem yanıtı açısından birbirlerine karşı olan üstünlükleri hakkında geniş bir bilgiye sahiptir.

Klasik PID kontrolörlerinin yaygın olarak kullanılmasına karşın, bu tip kontrolörler bütün kontrol problemlerine karşı genel bir çözüm sağlayamamaktadır. Zaman gecikmesine ve doğrusal olmayan özelliklere sahip, karmaşık, zamanla değişen sistemler karşılaşılabilecek bu tür problemlere örnek olarak verilebilir. Bir sistem analitik modellerle ifade edilemeyecek kadar karmaşık bir yapıya sahip ise o zaman bu sistemin klasik yaklaşımlar ile etkili biçimde kontrol edilebilmesi imkansız hale gelmektedir. Bu durumda bulanık kontrol bir çözüm olarak düşünülebilir. Bulanık mantık ile kontrol, uzman kişi bilgisini ve kontrol yöntemlerini sayısal algoritmalara başarılı şekilde aktarabilmektedir.

Zadeh (1965) ile bulanık küme kuramının önerilmesinin ardından, bulanık kontrol kavramı ilk olarak Bellman ve Zadeh (1970) çalışmasında açıklanmıştır. Bu makalede, bulanık kontrolde insan bilgisinin "EĞER - O HALDE" kurallarıyla ifade edilmesi için dilsel değişkenler kavramı ortaya konulmuştur. Son 30 yıl içerisinde, bulanık kontrolör uygulamaları çeşitli endüstriyel kontrol uygulamalarını ve önemli araştırma çalışmalarını kapsayacak şekilde genişlemiştir. 1974 yılında Mamdani, Bellman ve Zadeh (1970) ile önerilen çıkarım mekanizmasını dinamik bir sistemi kontrol etmekte kullanmıştır (Mamdani, 1974). Bir yıl sonra Mamdani ve Assilian ilk

bulanık mantık kontrolörü (BMK) geliştirmişler ve bu kontrolörü bir buhar makinasını kontrol etmek amacıyla kullanmışlardır (Mamdani ve Assilian, 1975). Ancak bu algoritmanın büyük ölçüde uzman operatörün bilgi ve tecrübesine dayanmasından dolayı, Mac Vicar-Whelan bu olumsuzluğu ortadan kaldırabilmek maksadıyla birtakım kurallar önermiştir (Mac Vicar-Whelan, 1976).

Bulanık kontrolörlerde yaygın olarak Mamdani (1974) ile önerilen min-max çıkarım mekanizması ve Mizumoto (1990) ile önerilen çarpım-toplam çıkarım mekanizması kullanılmaktadır. Durulaştırmanın zaman alıcı bir işlem olması nedeniyle, özellikle Takagi ve Sugeno (1985)' da önerilen bulanık kontrol kurallarının sonuç kısmında bulanık kümeler yerine gerçel sayılar kullanılmasıyla elde edilen kural yapısı ile çarpım-toplam çıkarım mekanizmasının beraber olarak kullanılması, oldukça iyi bir başarımla ve kolay bir algoritma üretmektedir.

Qiao ve Mizumoto (1996)' da, bu tip çıkarım mekanizmasına sahip bir bulanık kontrolörü klasik PID'ye ilişkilendiren, PID kontrolörünün yapısına benzer bir kontrolör yapısı önerilmiştir. Elde edilen bu kontrolöre özayarlanmasız bulanık PID kontrolör adı verilmektedir. Burada kontrol işareti bilgi tabanı ve çıkarım mekanizmasından üretilmekte ve kontrolöre ait tüm parametreler tasarım başlangıcında ayarlanarak kontrolöre ait sistem yanıtı elde edilmektedir.

Klasik PID kontrolörünün gerçekenmesinin kolay olmasına ve doğrusal kontrol işareti üretmesine karşın, bulanık PID kontrolörleri genellikle doğrusal olmayan kontrol eylemi için doğrusal olmayan parametreler sağlarlar. Bulanık PID kontrolörünün sahip olduğu bulanık kuralların söz konusu doğrusal olmayan parametrelere dönüştürülmesi ile bu tip kontrolörlerin bir çok doğrusal olan ve olmayan sistemlere başarılı şekilde uygulanması sağlanmaktadır. Endüstride bulanık PID kontrolör uygulamalarına artan seviyede ilgi gösterilmesine karşın literatürde klasik PID kontrolörlerine oranla bu tip kontrolör yapıları için standart ve sistematik ayarlama yöntemlerinin sayısı daha azdır ve son yıllarda yapılan çalışmalar ile sınırlıdır. Bu kapsamda, daha etkin bir kontrol eylemi sağlamak için bulanık PID kontrolörü parametrelerinin temel olarak iki seviyede ayarlanması önerilmiştir (Mann ve diğ, 2001; Duan ve diğ, 2008). Bu doğrultuda düşük seviye ayarlama bulanık PID kontrolörüne ait doğrusal kontrol eylemini gerçekleştirmek maksadıyla kontrolöre ait ölçekleme çarpanları ayarlanmıştır (Qiao ve Mizumoto, 1996; Chung ve diğ, 1998; Mudi ve Pal, 1999; Woo ve diğ, 2000; Güzelkaya ve diğ, 2003;

Battarcharya ve diğ, 2004; Karasakal ve diğ, 2005; Chen ve diğ, 2009). Yüksek seviye ayarlama ise bulanık PID kontrolörüne ait doğrusal olmayan özelliği daha etkin kullanabilmek amacıyla kontrolöre ait bilgi tabanı parametreleri (üyelik fonksiyonu parametreleri, bulanık kurallar, bulanık kural ağırlıkları, v.b.) uyarlanmıştır (Juang ve diğ, 2008; Gürocak, 1999; Fang ve diğ, 2008; Ahn ve Truong, 2009; Sharkawy, 2010; Alcalá ve diğ, 2005; Cho ve Park, 2000; Alcalá ve diğ, 2003; Mona ve diğ, 2011).

Literatürde mevcut çalışmalar dikkate alındığında, bulanık PID kontrolörüne ait ölçekleme çarpanlarının uyarlanmasına ilişkin yöntemlerde genellikle sistem bilgilerini kullanan standart ve sistematik ayarlama yapıları kullanılmıştır. Ancak üyelik fonksiyonu parametrelerinin, bulanık kuralların ve bulanık kural ağırlık değerlerinin uyarlanmasına yönelik yapılan çalışmaların yaklaşık olarak hepsinde ayarlama işlemi özellikle genetik arama algoritması olmak üzere sayısal eniyileme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş, ayarlama için sistematik bir yapı önerilmemiştir. Bu parametrelerin sadece eniyileme yöntemlerinin kullanılarak ayarlanması bu alanda sistem bilgisini kullanarak ayarlama yöntemlerinin geliştirilmesi gereksinimini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda bu tez çalışmasında bulanık PID kontrolörlerin bilgi tabanında kullanılan, bulanık kuralların önemini belirten bulanık kural ağırlıklarını sistem bilgisini kullanarak çevrim içi olarak ayarlamak maksadıyla iki farklı kural ağırlıklandırma yöntemi önerilmiştir.

Bu kapsamda ilk olarak, sistem kapalı çevrim basamak yanıtı bulanık PID kontrolörü girişlerinden olan hata değişkenine atanan üyelik fonksiyonu sayısına bağlı olarak belirli sayıda temel bölgelere ayrıştırılmıştır. Bu bölgelerin referans işaretine göre simetrik bir yapı oluşturmaktan ötürü söz konusu bölgeler referans değerine yaklaşma ve referans değerinden uzaklaşma bölgeleri olarak adlandırılmıştır. Her bir bölgede istenen sistem başarımının sağlanması amacıyla uygun değere sahip kontrol işaretinin üretilmesi gerekliliği dikkate alınarak, gerekli kontrol işaretinin elde edilmesine ilişkin birtakım tanımlayıcı kurallar belirlenmiştir. Bu doğrultuda her bölgede istenen kontrol işaretinin elde edilmesinde kullanılan bulanık kuralların önem ve etkisi belirlenmiş ve bu kavramlar bulanık kural ağırlık değişkeni ile ilişkilendirilmiştir. Böylelikle daha fazla önem ve etkiye sahip bulanık kuralın ağırlık değerinin daha yüksek olması ve daha az öneme ve etkiye sahip bulanık kuralın

ağırlık değerinin daha düşük olması ayarlama yöntemi tasarımında temel ölçüt olarak belirlenmiştir.

Bu doğrultuda ilk olarak, bulanık kural ağırlık değerlerinin çevrim içi uyarlanması amacıyla her bir bölgede ve örnekleme zamanında hesaplanabilen sistem hata değişkeni ayarlama parametresi olarak kullanılmıştır. Bulanık kural ağırlıklarına uygun ve geçerli değerler vermek amacıyla hata değişkeninin mutlak değerine bağlı olarak elde edilen iki basit fonksiyonun kullanılması ile kolay ve simetrik bir kural ağırlıklandırma yapısı oluşturulmuştur. Elde edilen hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin etkinliğini göstermek amacıyla bazı test sistemleri için benzetimler gerçekleştirilmiş, ayrıca söz konusu yöntem PCS 327 Proses Kontrol deney seti üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Sonrasında, daha önce elde edilen temel bölgeler ve belirlenen tanımlayıcı kurallar doğrultusunda, sistem yanıtının hızı hakkında bilgi sağlayan birimselleştirilmiş ivme değişkeni de kullanılmıştır. Bu kapsamda, girişleri hata ve birimselleştirilmiş ivme değişkenleri olan bir bulanık mekanizma tasarlanmıştır. Söz konusu mekanizmanın çıkışı doğrudan kural ağırlıklandırma yönteminde ayarlama parametresi olarak kullanılmıştır. Bu doğrultuda, gerekli kontrol işaretinin üretilmesi amacıyla bulanık mekanizmanın çıkış değişkeni için bir takım tanımlayıcı kurallar belirlenmiştir. Elde edilen birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin etkinliğini göstermek amacıyla bazı test sistemleri üzerinde benzetimler gerçekleştirilmiştir. İlave olarak söz konusu yöntemin gerçek sistemlere de uygulanabilirliğini göstermek amacıyla yöntem G.U.N.T. pH kontrol deney seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde ve gerçek zaman uygulamasında, söz konusu yöntemde sahip bulanık PID kontrolörüne ait sistem yanıtları ve başarımlar ölçütleri, hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörüne, çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine sahip bulanık PID kontrolörüne, özayarlamasız bulanık PID kontrolörüne ve kural ağırlıkları genetik algoritma ile eniyileştirilmiş bulanık PID kontrolörüne ait sistem yanıtları ve başarımlar ölçütleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu amaçla, bu tez kapsamında temel olarak bulanık PID kontrolör yapısı ele alınmıştır. Bölüm 2’de, bulanık PID kontrolöründe kullanılan dilsel ifadeler ile bulanık sistem öğelerinin içeriği ve yapısı anlatılmıştır. Bölüm 3’te, giriş-çıkış ilişkisi bakımından klasik PID kontrolör yapılarına benzeyen bulanık PID kontrolör

yapıları hakkında kuramsal bilgiler verilmiş, bu tip kontrolörlere ait tasarım parametrelerinin uyarlanması ilişkin literatürde mevcut çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 4'te, bulanık PID kontrolörlerinin sahip olduğu bulanık kural ağırlıklarını çevrim içi olarak ayarlamak için ilk olarak sadece sistem hata bilgisini kullanan bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi, sonrasında sistem başarımını daha fazla artırmak maksadıyla sistem hata bilgisi ile hata değerinden elde edilen ve sistem hız bilgisi sağlayan birimselleştirilmiş ivme değişkenini kullanan ikinci bir bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi önerilmiştir. Her iki kural ağırlıklandırma yönteminin etkinliğini göstermek amacıyla söz konusu yöntemler değişik doğrusal olan ve olmayan test sistemlerine benzetim yoluyla uygulanmış, ilave olarak PCS 327 Proses Kontrol deney seti ve G.U.N.T. pH kontrol deney seti üzerinde gerçek zaman uygulamaları olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Yapılan bu çalışmanın bu konularda çalışacak olan diğer kontrol mühendislerine rehberlik edeceği düşünülmektedir.

2. BULANIK MANTIK SİSTEMLERİ

2.1 Giriş

Bulanık mantık, klasik küme kuramı yerine bulanık küme kuramına dayanan bir matematiksel yaklaşımdır. Temelde insan mantığında olduğu gibi günlük hayatta kullanılan dilsel değişkenleri ve dilsel niteleyicileri esas alır. Bulanık mantık yaklaşımındaki ilk ciddi çalışma 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından yayınlanan bir makaledir. Bu çalışmada klasik küme kuramı ile ifadenin yetersiz olduğu, kesin ifadelerin yanı sıra dilsel niteleyicilerin ve ara seviyedeki ifadelerin de kullanılması gerektiği ve bu tip yaklaşımın insan mantığını daha iyi modellediği vurgulanmıştır.

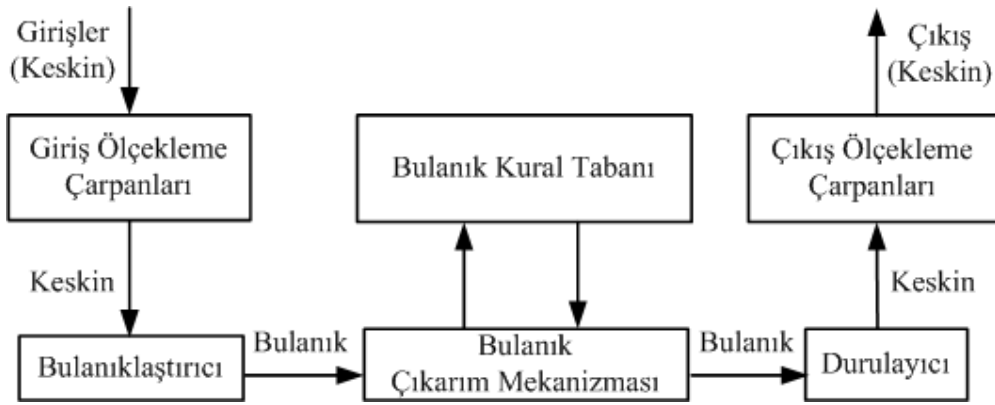
Bulanık mantığın temel özellikleri Lotfi A. Zadeh tarafından şu şekilde belirtilmiştir (Elmas, 2003):

- a) Bulanık mantıkta herşey sadece “0” veya “1” ile değil, $[0, 1]$ değer aralığında bir derece ile ifade edilir.
- b) Bulanık mantıkta dilsel ifadeler ve dilsel niteleyiciler kullanılır.
- c) Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifadeler ile tanımlanan belirli kurallar ile gerçekleştirilir. Bu kurallara bulanık kurallar adı verilir.
- d) Her mantıksal sistem bulanık mantık ile ifade edilebilir.
- e) Bulanık mantık matematiksel modeli çok zor elde edilen veya yapısı karmaşık olan sistemler için çok elverişlidir.

Bulanık mantık kuramına ilave olarak ayrıca Zadeh kesin olmayan ara seviyedeki ifadeleri açıklayan dilsel bilgilere ve dilsel niteleyicilere bağlı olarak insanların kontrol alanlarında makinelerin eksikliklerini giderdiklerini ve onlardan daha etkili olduklarını ifade etmiştir. Bu yeni mantığın önerilmesinin ardından klasik kontrol yöntemlerine göre daha esnek bir yapı sunan bulanık mantık kontrolü hızla gelişmiş ve kontrol uygulamaları alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Bulanık mantık sistemleri “EĞER - O HALDE” biçiminde ifade edilen kuralların kullanılması ile tanımlanır. Bu özelliğinden dolayı bu tip sistemler kural tabanlı

bulanık sistemler olarak adlandırılırlar. Genel olarak bir bulanık mantık sisteminin blok gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 : Basit bir bulanık mantık sistemi yapısı.

Şekil 2.1’den de görüldüğü üzere bir bulanık mantık sistemi temel olarak giriş ölçekleme çarpanları, bulanıklaştırıcı, bulanık kural tabanı, bulanık çıkarım mekanizması, durulayıcı ve çıkış ölçekleme çarpanları öğelerinden meydana gelir. Bulanık mantık sistemi tasarımında ilk olarak sistemin girişleri belirlenir. Bu giriş değişkenleri herhangi bir değer aralığında keskin değerlere sahiptirler. Dolayısıyla bu giriş değişkenlerinin değerleri bulanık sistem için anlamlı hale getirilmek üzere giriş ölçekleme çarpanları adı verilen katsayılar ile çarpılır. Böylelikle bu değişken değerleri bulanık sistem içinde kullanılan değişkenlerin tanımlanmış oldukları aralık değerlerine eşleştirilir. Bulanıklaştırıcı, birimselleştirilmiş keskin değerli işareti, tanımlanan üyelik fonksiyonlarını kullanarak bulanık değerlere dönüştürür. Mevcut bulanık değerlere sahip işaretler, kural tabanında tanımlanan birtakım kurallar ve bulanık çıkarım mekanizması için geçerli olan birtakım işlemler kullanılarak tek bir bulanık değere çevrilir. Elde edilen bu işaret bulanık değere sahip olduğu için sisteme uygulanabilir bir değer tipi değildir, dolayısıyla bu bulanık değer durulayıcı birimi kullanılarak keskin değere dönüştürülür. Son olarak elde edilen bu keskin değerli işaret çıkış ölçekleme çarpanı adı verilen katsayı ile çarpılarak sisteme uygulanabilir işaret değer aralığına getirilir.

2.2 Dilsel İfadeler

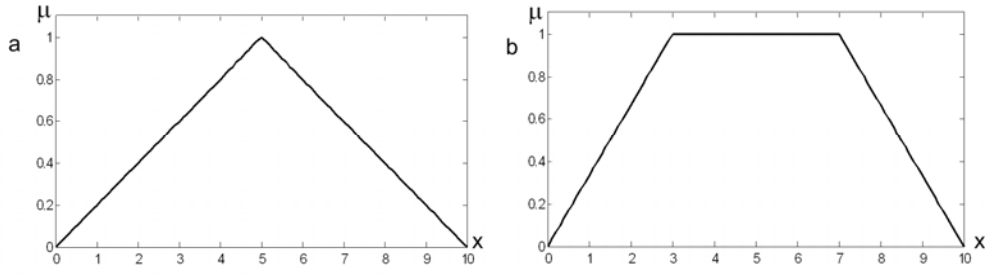
2.2.1 Üyelik fonksiyonları

Kesin küme kuramında kümenin herhangi bir elemanı ya o kümeye aittir ya da ait değildir. Buna karşılık bulanık mantık küme kuramında elemanın bulanık kümeye aitliği derecelendirilir. Kesin kümeler karakteristik fonksiyonlar ile tanımlanırken bulanık kümeler üyelik fonksiyonları ile tanımlanır. Bu kapsamda, kesin kümeler için karakteristik fonksiyonlarda bir elemanın kümeye aitlik derecesi ya 0 ya da 1 iken bulanık kümeler için üyelik fonksiyonlarında elemanın aitlik derecesi 0 ile 1 arasında gerçel bir değerdir. Dolayısıyla X evrensel kümesi üzerinde tanımlı bir A bulanık kümesi μ_A üyelik fonksiyonu ile tanımlanan bir kümedir ve söz konusu üyelik fonksiyonu aşağıda verilen eşlemeyi gerçekleştirir.

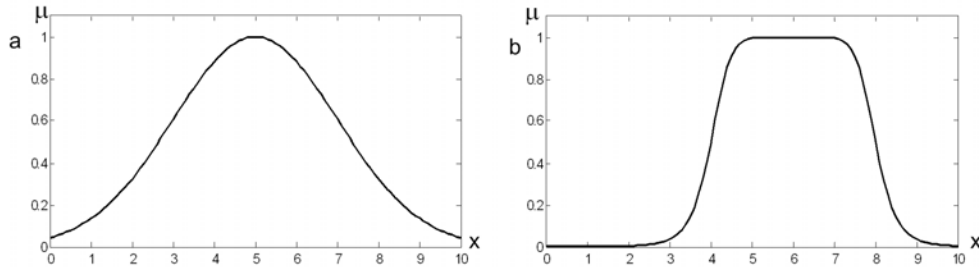
$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (2.1)$$

Yukarıda verilen ifadede $\mu_A(x)$ değeri X evrensel kümesinin x elemanının A bulanık kümesi için üyelik fonksiyonu değerini ya da üyelik derecesini belirtir. Başka bir ifadeyle x elemanının A bulanık kümesine ait olma derecesini temsil eder. $\mu_A(x)$ değerinin 1 değerine daha fazla yaklaşması x elemanının A bulanık kümesine daha yüksek derece ile ait olduğunu, 0 değerine daha fazla yaklaşması ise A bulanık kümesine daha düşük derece ile ait olduğunu ifade eder. $\mu_A(x)$ değerinin 0 olması ise x elemanının A bulanık kümesinin bir elemanı olmadığını belirtir.

Üyelik fonksiyonu parametrelerinin belirlenmesine ilişkin kesin bir yöntem mevcut değildir. Ancak üyelik fonksiyonu tipinin belirlenmesinde iki genel yaklaşım vardır. İlk yaklaşım uzman kişi bilgi ve tecrübesinin kullanılmasıdır. Bu yaklaşımda dilsel ifadeler ile genel bir üyelik fonksiyonu tanımı çıkartılabilmektedir. Ancak sonrasında genellikle deneme yanılma yöntemi ile bu fonksiyonun iyileştirilmesi gerekmektedir. Diğer yaklaşım ise sisteme ait verilerin toplanıp üyelik fonksiyonu tipinin seçilmesinin ardından fonksiyonun oluşturulmasıdır. Kontrol edilecek sistem durumuna göre literatürde en sık kullanılan üyelik fonksiyonları üçgen tipi, yamuk tipi, Gauss tipi ve çan eğrisi tipi üyelik fonksiyonları olup, sırasıyla Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



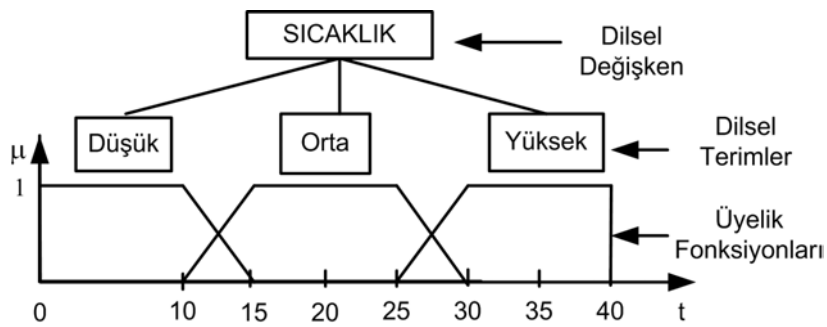
Şekil 2.2 : Üyelik fonksiyonu tipleri (a) Üçgen tip, ve (b) Yamuk tip.



Şekil 2.3 : Üyelik fonksiyonu tipleri (a) Gauss tipi, ve (b) Çan eğrisi tipi.

2.2.2 Dilsel terimler ve değişkenler

Dilsel terimler, dilsel kurallar vasıtasıyla belirli bir ilişkiyi tanımlamak için kullanılan nitel değerlerdir. Değerleri sayısal değerler yerine, örneğin, genç, çok genç, yaşlı, çok yaşlı gibi dilsel ifadeler veya kelimeler olan değişkenlere ise dilsel değişkenler adı verilir. Bu kavramların daha açık olarak anlaşılabilmesi için Şekil 2.4'te “Sıcaklık” dilsel değişkeni örneği verilmiştir. “Sıcaklık” kavramı kişiden kişiye değiştiği için tam olarak tanımlanamaz ancak bulanık kümeler kullanılarak bu kavram yaklaşık olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.4 : “Sıcaklık” dilsel değişkeni ve dilsel terimleri.

Şekil 2.4’te örnek olarak verilen “Sıcaklık” dilsel değişkeni belirli bir çalışma uzayında “Düşük”, “Orta” ve “Yüksek” olarak tanımlanmış üç adet dilsel terime sahiptir. Her dilsel terimin kendi bulanık kümesine olan aitliği uygun olan yaklaşık bir üyelik fonksiyonu ile ifade edilir. Her bir dilsel terim için yaklaşık olarak tanımlanan üyelik fonksiyonları sırasıyla aşağıda verilmektedir.

$$\mu_{DÜŞÜK} = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 10 \\ \frac{15-t}{5}, & 10 \leq t < 15 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\mu_{ORTA} = \begin{cases} \frac{t-10}{5}, & 10 \leq t < 15 \\ \frac{30-t}{5}, & 15 \leq t < 30 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\mu_{YÜKSEK} = \begin{cases} \frac{t-25}{5}, & 25 \leq t < 30 \\ 1, & 30 \leq t < 40 \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2.3 Dilsel niteleyiciler

Evrensel küme altında bulanık A kümesi, bu küme için $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonu ve bulanık kümeye ait “m” dilsel niteleyicisi (çok, değil, oldukça, v.b.) tanımlanmış olsun. Bu durumda “mA” şeklinde elde edilen ifade nitelenmiş bulanık kümeyi ve $\mu_{mA}(x)$ olarak elde edilen değer ise nitelenmiş bulanık kümenin üyelik fonksiyonunu tanımlar. Bulanık mantıkta sıklıkla kullanılan bazı dilsel niteleyiciler ve bu dilsel niteleyicilere ait üyelik fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

$$\text{Degil} : \mu_{\text{Degil}A}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

$$\text{Çok} : \mu_{\text{Çok}A}(x) = [\mu_A(x)]^2 \quad (2.5)$$

$$\text{Oldukça} : \mu_{\text{Oldukça}A}(x) = [\mu_A(x)]^{1/2}$$

2.3 Bulanık Sistem Öğeleri

2.3.1 Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma eylemi bulanıklaştırıcı birimi tarafından yerine getirilir. Bulanıklaştırma, bulanıklaştırıcı birimi giriş değişkenlerinin sahip olduğu keskin değerlerin değişik tipteki (üçgen, yamuk, gauss, v.b.) üyelik fonksiyonlarının kullanılması ile bulanık değerlere dönüştürülmesi işlemidir. Bulanıklaştırmanın gerekliliği, bulanık çıkarım mekanizmasında ve bulanık kural tabanında bulanık kümeler üzerinde işlemlerin yapılmasından dolayı ortaya çıkmaktadır.

2.3.2 Bulanık kural tabanı

Bulanık kural tabanı “EĞER – O HALDE” yapısına sahip bulanık kurallardan meydana gelir. Bulanık kurallar bulanık sistemin girişleri ve çıkışları arasındaki ilişkiyi sağlarlar. “x” ve “y” giriş değişkenleri ile “z” çıkış değişkeni olmak üzere iki giriş tek çıkış değişkeni bulunan bir bulanık mantık sistemi için örnek bir bulanık kural (K_i)

K_i :Eğer x A ise ve y B ise o halde z C’dir; “w” bulanık kural ağırlığı ile.

şeklinde elde edilir. Örnek olarak verilen bulanık kuralda “A” ve “B” giriş değişkenlerine ait bulanık kümeleri ve “C” ise çıkış değişkenine ait bulanık kümeyi ifade eder. Bulanık kural sonunda yazılan “w” değişkeni ise ilgili bulanık kuralın ağırlığını ifade eden bir değişkendir ve bulanık kuralların tanımı gereğince genellikle $[0, 1]$ değer aralığına sahiptir. Bulanık kural ağırlıklarına ilişkin daha ayrıntılı bilgi Bölüm 4.2’de verilmektedir.

2.3.3 Bulanık çıkarım mekanizması

Bulanık çıkarım mekanizması bir bulanık sistemin en önemli birimidir ve genel olarak insanın karar verme, önerme ve çıkarım yapma kabiliyetine paralel biçimde çıkarım yapar. Çıkarım mekanizması belirli bir zaman değeri için geçerli olan girişleri dikkate alarak bulanık kural tabanındaki her bir bulanık kuralın bu giriş değişkenleri için ne kadar ateşlendiğini tespit eder ve bulanık kuralları kullanarak çıkışları hesaplar. Bulanık çıkarım mekanizması için bir çok farklı yapı bulunmaktadır. Aşağıda en çok tercih edilen üç adet çıkarım yöntemi verilmiştir.

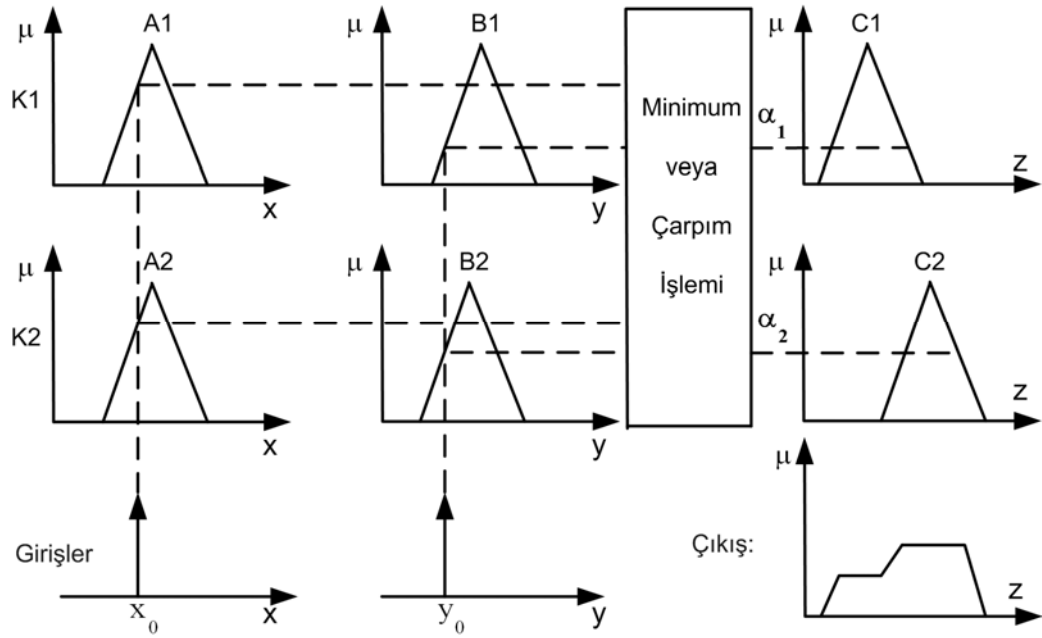
2.3.3.1 Mamdani tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması

Bu tip bulanık çıkarım mekanizmasında bulanık kural tabanında yer alan bulanık kuralların sonuç kısmında bulanık kümeler kullanılır. Bu durumda aşağıda örnek olarak verilen iki giriş ve bir çıkış değişkeni bulunan iki kurallı yapı için kurallar

K_1 : Eğer x A_1 ve y B_1 ise o halde z C_1 'dir.

K_2 : Eğer x A_2 ve y B_2 ise o halde z C_2 'dir.

şeklinde elde edilir. Tanımlanan bulanık kurallarda yer alan “x” ve “y” giriş değişkenleri, “z” çıkış değişkeni, “A”, “B” ve “C” ise sırasıyla giriş ve çıkış değişkenlerine ait bulanık kümelerdir. Şekil 2.5'te Mamdani tipi yapıya ilişkin bulanık çıkarım mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.5 : İki kurala sahip Mamdani tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması.

Belirli bir zaman değeri için uygulanacak girişlerin değerlerine bağlı olarak ilgili bulanık kurallar ateşlenir ve ateşlenen kurallar için her bir girişin üyelik fonksiyonu değeri hesaplanır. Elde edilen üyelik fonksiyonu değerlerine minimum mantıksal işleminin veya çarpım işleminin uygulanması sonucunda her bir kural için kurala ait toplam ateşlenme şiddeti (α_i) hesaplanır. Ateşlenen kuralın sonuç kısmındaki bulanık küme ile elde edilen toplam ateşlenme şiddeti değeri tekrar minimum mantıksal işlemine veya çarpım işlemine tabi tutulur, böylece bulanık kümenin α_i

değeri ile belirlenen üst kısmı kırpılmış olur. Ateşlenen tüm bulanık kurallar sonucunda elde edilen kırpılmış çıkış bulanık kümelerinin birleşimi ile durulaştırma birimine uygulanacak olan nihai bulanık küme elde edilir.

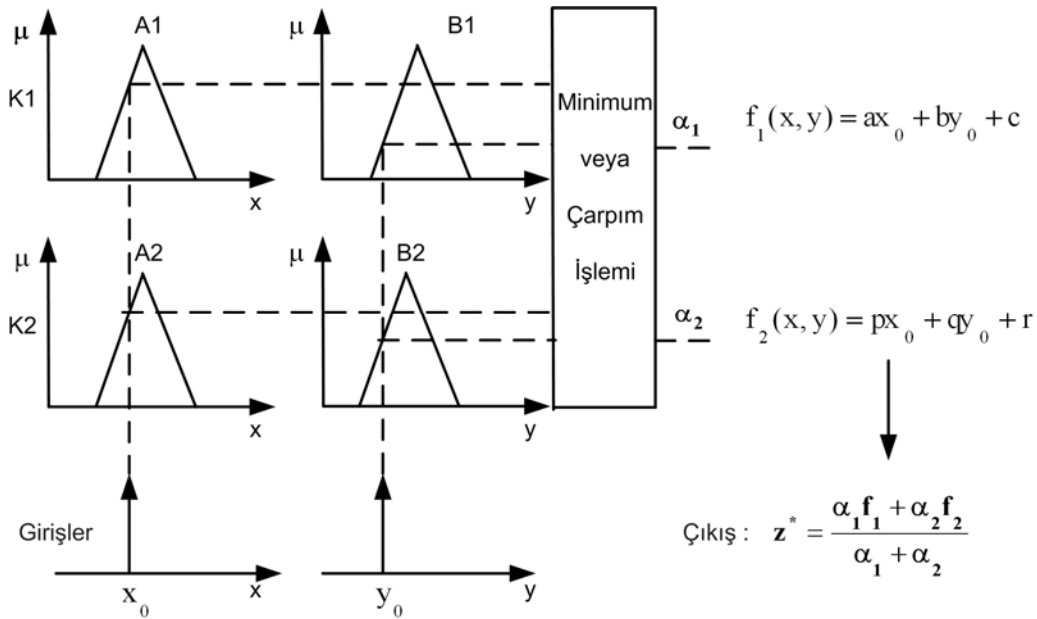
2.3.3.2 Takagi-Sugeno tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması

Bu tip yapı için bulanık kural tabanındaki bulanık kuralların sonuç kısmında giriş değişkenlerine bağlı keskin değerli fonksiyonlar kullanılır. Bu durumda aşağıda örnek olarak verilen iki giriş ve bir çıkış değişkeni bulunan iki kurallı yapı için kurallar

K_1 : Eğer $x \in A_1$ ve $y \in B_1$ ise o halde $z = f_1(x, y)$ 'dir.

K_2 : Eğer $x \in A_2$ ve $y \in B_2$ ise o halde $z = f_2(x, y)$ 'dir.

şeklinde elde edilir. Şekil 2.6'da bu yapıya ilişkin bulanık çıkarım mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : Takagi-Sugeno tipi yapı için bulanık çıkarım mekanizması.

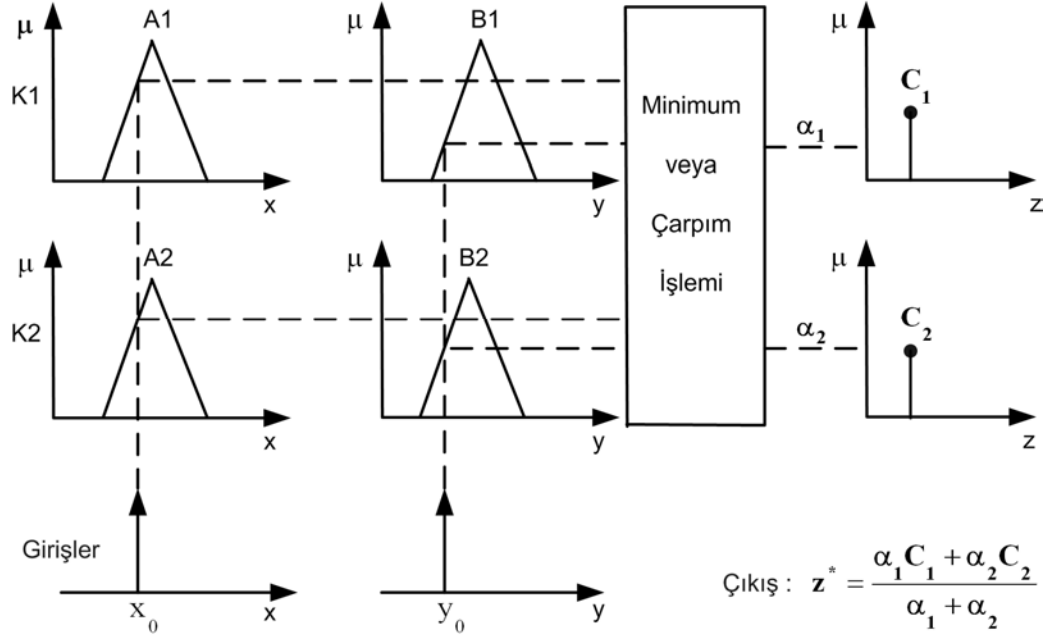
2.3.3.3 Tekil (Singleton) tip yapı için bulanık çıkarım mekanizması

Bu tip yapı için ise bulanık kural tabanındaki bulanık kuralların sonuç kısmında sabit keskin değerler kullanılır. Bu yapı Mamdani ve Takagi-Sugeno tipi yapıların özel bir biçimidir. Bu durumda aşağıda örnek olarak verilen iki giriş ve bir çıkış değişkeni bulunan iki kurallı yapı için kurallar

K_1 : Eğer $x \in A_1$ ve $y \in B_1$ ise o halde $z = C_1$ 'dir.

K_2 : Eğer $x \in A_2$ ve $y \in B_2$ ise o halde $z = C_2$ 'dir.

şeklinde elde edilir. Şekil 2.7'de bu yapıya ilişkin bulanık çıkarım mekanizması gösterilmektedir.



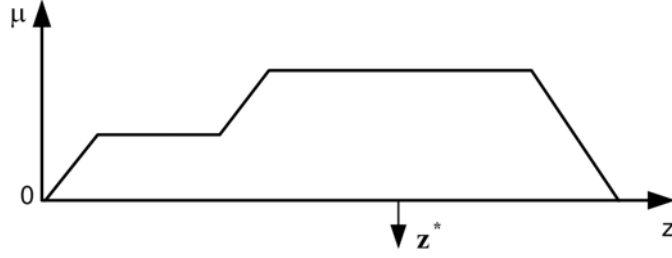
Şekil 2.7 : Tekil tip yapı için bulanık çıkarım mekanizması.

2.3.4 Durulaştırma

Bulanık çıkarım mekanizması ile elde edilen çıkış değeri bulanık kümedir. Bu çıkışın tekrar keskin değere dönüştürülmesi işlemine durulaştırma ve bunu gerçekleştiren birime ise durulayıcı adı verilir. Durulaştırma işlemi için literatür değişik yöntemler kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntemler ağırlık merkezi, ağırlık ortalaması ve maksimum durulaştırma yöntemleridir.

2.3.4.1 Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi

Bu durulaştırma yönteminde bulanık çıkarım mekanizması sonucunda elde edilen alanların ağırlık merkezi bulunur. Şekil 2.5'te verilen ve bulanık çıkarım mekanizması ile elde edilen iki bulanık kümenin birleştirilmesi sonucunda oluşan alana ağırlık merkezi durulaştırma yönteminin uygulanması Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi.

Durulaştırma işlemi aşağıda verilen formül ile gerçekleştirilir.

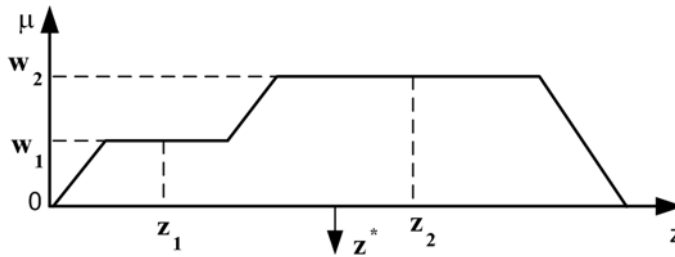
$$z^* = \frac{\int \mu_C(z).z.dz}{\int \mu_C(z)dz} \quad (2.6)$$

2.3.4.2 Ağırlık ortalaması durulaştırma yöntemi

Bu yöntemde bütün bulanık değerler ve üyelik dereceleri kullanılarak durulaştırma yapılmaktadır. Her bir üyelik fonksiyonunun, kendisinin maksimum değeri ile ağırlıklandırılması yolu ile ve aşağıda verilen formül kullanılarak çıkış değeri hesaplanır.

$$z^* = \frac{\sum \mu_C(z).z}{\sum \mu_C(z)} \quad (2.7)$$

Şekil 2.9’da ağırlık ortalaması durulaştırma yöntemi ile çıkış değerinin hesaplanması gösterilmiştir.



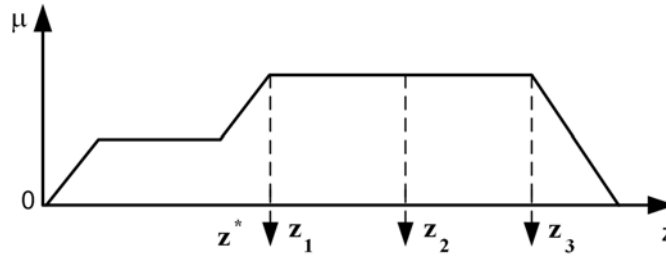
Şekil 2.9 : Ağırlık ortalaması durulaştırma yöntemi.

Şekil 2.9’da verilen durum için ağırlık ortalaması durulaştırma yöntemi ile hesaplanacak keskin değer aşağıdaki formülle elde edilir.

$$z^* = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2}{w_1 + w_2} \quad (2.8)$$

2.3.4.3 Maksimum durulaştırma yöntemi

Bu durulaştırma yönteminde ilk olarak elde edilen kırpılmış ve birleştirilmiş alan için en yüksek üyelik derecesine sahip aralık belirlenir. Sonrasında üç değişik yöntem kullanılarak durulaştırma işlemi gerçekleştirilir. İlk yöntemde en yüksek üyelik derecesine sahip aralığın ilk değeri, ikinci yöntemde en yüksek üyelik derecesine sahip aralığın orta değeri ve üçüncü yöntemde ise en yüksek üyelik derecesine sahip aralığın son değeri durulaştırılmış keskin sonuç değeri olarak elde edilir. Şekil 2.10'da maksimum durulaştırma yöntemi ile çıkış değerinin hesaplanması gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Maksimum durulaştırma yöntemi.

3. BULANIK MANTIK KONTROLÖRLERİ

3.1 Giriş

Endüstriyel uygulamalarda kontrol edilen sistemin kararlılığı ve istenilen başarımın yüksek seviyede olması temel tasarım ölçütleridir. Bu koşulların gerçekleştirilebilmesi için kontrol edilecek sistemin temel yapısının ve sahip olduğu dinamiklerin iyi seviyede bilinmesi ve dolayısıyla da sisteme ait matematiksel modelin doğru olarak elde edilmesi gerekmektedir. Ancak sisteme ait belirsizliklere, sistem parametrelerinin zaman içinde değişmesine ya da ortam koşullarına bağlı olarak her durumda sisteme ait matematiksel model doğru olarak elde edilemeyebilir. Bu koşullar altında literatürde mevcut bazı klasik kontrol yöntemleri belirsizliğe, zamanla değişen parametrelere veya eksik model yapısına sahip sistemlere yeterli başarım elde edilecek şekilde uygulanamayabilir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla bu gibi durumlarda uzman kişi bilgi ve deneyimlerinden yararlanmak bir çözüm oluşturabilir. Böylelikle uzman kişinin bilgi ve tecrübesi doğrultusunda kullanacağı dilsel ifadelerin sayısal bilgisayar ortamına aktarılması ile kontrol eylemi gerçekleştirilir. Bu aşamada makinelere uzman kişi bilgi, deneyim ve verilerini aktarabilme imkanı sağlayan yaklaşım bulanık mantıktır. Bulanık mantık, sistem dinamiğinin karmaşık yada yüksek derecede doğrusal olmayan özellik gösterdiği sistemlerde kullanılır.

İlk bulanık mantık algoritması 1974 yılında Mamdani tarafından uzman kişi dilsel kontrolünü gerçeklemek üzere bir buhar makinesinin bulanık kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla uygulanmıştır (Mamdani, 1974). Klasik kontrolörlerle karşılaştırıldığında, bu tip bulanık mantık kontrolörlerin (BMK) daha başarılı olmalarına rağmen, algoritma önemli derecede operatörün deneyim ve bilgisine dayanmaktadır. Operatör deneyimine bağlılığın yarattığı sıkıntıdan kurtulmak amacıyla ilk olarak 1976 yılında bulanık mantık kontrolör yapısını oluşturmak için genel kurallar önerilmiştir (Mac Vicar-Whelan, 1976).

Bulanık mantık için yukarıda bahsedilen hususlar ile endüstride yaygın olarak kullanılan klasik kontrol sistemi yapıları dikkate alındığında, daha etkin bir kontrol

sistemi tasarlamak amacıyla, uzman deneyim ve bilgisinin kullanılması ile oluşturulan kurallara sahip bulanık mantık kontrolör yapıları ile endüstride yaygın olarak kullanılan ve genellikle basit birinci ve ikinci mertebeden sistemlerin kontrolünde etkili olan ancak yüksek mertebeye, ölü zaman, doğrusal olmayan özelliklere veya zamanla değişen parametrelere sahip sistemlerin kontrolünde başarımı azalan klasik PID kontrolör yapısının birleştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Böylelikle, karmaşık sistemleri daha etkin kontrol etmek maksadıyla klasik PID kontrolör ile elde edilen doğrusal kontrol eylemi ve bulanık mantık kontrolörlerinin sahip olduğu uzman bilgi ve deneyimine dayanan dilsel kuralların oluşturduğu kural tabanı yapısı kullanılarak bulanık PID kontrolör yapıları elde edilmiştir.

3.2 Bulanık PID Kontrolör Yapıları

Tasarımlarına göre, bulanık mantığın PID kontrolörlerine (PI ve PD içeren) uygulanması temel olarak iki sınıfa ayrılır (Xu ve diğ., 2000).

- i) PID kontrolörün kazançları, bilgi tabanı ve çıkarım mekanizmasına göre güncel şekilde ayarlanır ve kontrol işareti PID kontrolör tarafından üretilir.
- ii) Sezgisel kontrol kurallarının kullanımı ile bir bulanık mantık kontrolörü oluşturulur ve kontrol işareti bilgi tabanı ve çıkarım mekanizmalarından elde edilir (Mizumoto, 1992; Qin ve Borders, 1994; Palm ve Driankov, 1996; Xu ve diğ., 1998; Galichet ve Foulloy, 1995).

Birinci sınıfta bahsedilen tasarım ile klasik PID kontrolörün kazanç parametrelerini kontrol edilen sistemin mevcut çalışma şartlarında ayarlamak amacıyla bulanık çıkarım mekanizması tasarlanır. İkinci sınıfta elde edilen kontrolörler giriş-çıkış ilişkisi bakımından yapılarının PID kontrolörü yapılarına benzemesinden ötürü bulanık PID kontrolörler olarak bilinirler. Bu tip tasarım ile istenilen kontrol başarımını sağlamak amacıyla giriş değişkenlerine bağlı olarak sırasıyla Bölüm 3.2.1, Bölüm 3.2.2, Bölüm 3.2.3 ve Bölüm 3.2.4’de anlatılan bulanık PD, bulanık PI ve bulanık PID kontrolörleri elde edilebilmektedir.

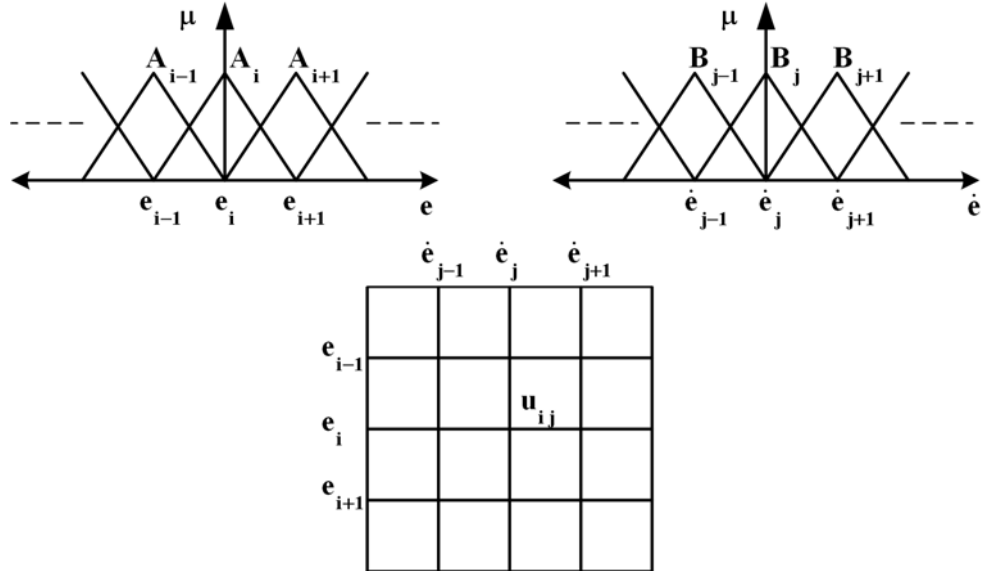
3.2.1 Çarpım-toplam tekil bulanık kontrolör

Bulanık PID kontrolör yapılarına geçmeden önce bu tip kontrolörlerin temelini oluşturan, çarpım-toplam bulanık çıkarım mekanizmasına sahip ve bulanık kuralların sonuç kısmında keskin değerlerin kullanıldığı çarpım-toplam tekil bulanık kontrolörü tanımlamak faydalı olacaktır.

Bulanık kontrolörün hata (e) ve hatanın değişimi ($\dot{e}$) olmak üzere iki giriş değişkenine ve bir çıkış değişkenine (u) sahip olduğu, giriş değişkenleri için A_i ($i \in I = [-m, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, m]$) ve B_j ($j \in J = [-n, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, n]$) dilsel terimler olmak üzere üçgen tip üyelik fonksiyonlarının tanımlandığı varsayalım. Giriş ve çıkış değişkenlerine bağlı olarak bulanık kontrolör aşağıda verilen yapıda bulanık kurallara sahip olacaktır.

Eğer e A_i ve $\dot{e}$ B_j ise o halde u u_{ij} 'dir.

Bulanık kuralın sonuç kısmında mevcut $u_{ij} \in U(i \in I, j \in J)$ keskin değeri ifade etmektedir. Bulanık kontrolörün kural tabanındaki kural sayısının $I \times J$ olduğu, yani kural tabanının tam olduğu varsayalım. Giriş değişkenlerine atanan dilsel değişkenler ile çıkış değişkeni için tanımlanmış e - $\dot{e}$ düzlemi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Giriş değişkenlerine atanan dilsel değişkenler ve çıkış değişkeni için e - $\dot{e}$ düzlemi.

Herhangi bir örnekleme zamanı değerinde girişlerin sırasıyla e ve $\dot{e}$ olması ve çarpım-toplam bulanık çıkarım mekanizmasının kullanılması durumunda ateşlenen kurallara ait ateşlenme şiddeti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$f_{ij} = A_i(e)B_j(\dot{e}) \quad (3.1)$$

Durulaştırma yöntemi olarak ağırlık merkezi durulaştırma yönteminin kullanılması durumunda bulanık kontrolör çıkışı aşağıdaki biçimde hesaplanır.

$$u = \frac{\sum_{i,j} f_{ij} u_{ij}}{\sum_{i,j} f_{ij}} \quad (3.2)$$

Bulanık kontrolörün herhangi bir örnekleme anındaki e ve $\dot{e}$ girişleri için Şekil 3.1’de gösterilen dilsel terimler matematiksel olarak aşağıdaki biçimde elde edilir.

$$\begin{aligned} A_i(e) &= 1 - \frac{e - e_i}{e_{i+1} - e_i}, & A_{i+1}(e) &= \frac{e - e_i}{e_{i+1} - e_i} \\ B_j(\dot{e}) &= 1 - \frac{\dot{e} - \dot{e}_j}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j}, & B_{j+1}(\dot{e}) &= \frac{\dot{e} - \dot{e}_j}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Her örnekleme zamanında girişler için en fazla dört adet bulanık kural ateşlenecektir. Örneğin, bulanık kontrolör girişlerinin $[e_i, e_{i+1}] \times [\dot{e}_j, \dot{e}_{j+1}]$ bölgesi içinde olması durumunda, (3.2) ifadesi ile hesaplanan bulanık kontrolör çıkışı (3.3) ifadesinin kullanılması ile aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u = A_i(e)B_j(\dot{e})u_{ij} + A_{i+1}(e)B_j(\dot{e})u_{(i+1)j} + A_i(e)B_{j+1}(\dot{e})u_{i(j+1)} + \\ A_{i+1}(e)B_{j+1}(\dot{e})u_{(i+1)(j+1)}$$

$$u = \left(\frac{e_{i+1} - e}{e_{i+1} - e_i} \right) \left(\frac{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \right) u_{ij} + \left(\frac{e - e_i}{e_{i+1} - e_i} \right) \left(\frac{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \right) u_{(i+1)j} + \\ \left(\frac{e_{i+1} - e}{e_{i+1} - e_i} \right) \left(\frac{\dot{e} - \dot{e}_j}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \right) u_{i(j+1)} + \left(\frac{e - e_i}{e_{i+1} - e_i} \right) \left(\frac{\dot{e} - \dot{e}_j}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \right) u_{(i+1)(j+1)} \quad (3.4)$$

(3.4) ifadesinden de açıkça görüldüğü üzere, e - $\dot{e}$ düzleminin herhangi bir noktası için elde edilecek bulanık kontrolör çıkışı, girişlerin doğrusal olmayan bir fonksiyonu olmaktadır. Dolayısıyla bu doğrusal olmayan özellik aşağıda verilen fonksiyon ile ifade edilebilir.

$$u = f(e, \dot{e}, t) \quad (3.5)$$

(3.5) ile verilen doğrusal olmayan fonksiyonun e_i ve e_j değerleri için nominal çözümü

$$u = f(e_i, \dot{e}_j, t) = u_{ij} \quad (3.6)$$

biçiminde olur.

e - $\dot{e}$ düzleminde e_i ve $\dot{e}_j$ nominal değerleri ile herhangi e , $\dot{e}$ ve u değerleri arasındaki farklar

$$\delta e = e - e_i \\ \delta \dot{e} = \dot{e} - \dot{e}_j \\ \delta u = u - u_{ij} \quad (3.7)$$

olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla (3.5) ifadesi, “n” çalışma noktası için aşağıda verilen doğrusal fonksiyonlar ile yaklaşık olarak kestirilebilir.

$$\delta u = \left[\frac{\partial f}{\partial e} \right]_n \delta e + \left[\frac{\partial f}{\partial \dot{e}} \right]_n \delta \dot{e} \quad (3.8)$$

Bu durumda e- $\dot{e}$ düzleminde ($e_i, \dot{e}_j$) noktası için (3.4) ifadesi

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial f}{\partial e} \right]_{(e_i, \dot{e}_j)} &= \frac{u_{(i+1)j} - u_{ij}}{e_{i+1} - e_i} \\ \left[\frac{\partial f}{\partial \dot{e}} \right]_{(e_i, \dot{e}_j)} &= \frac{u_{(i+1)j} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \end{aligned} \quad (3.9)$$

olarak elde edilir. (3.8) ve (3.9) ifadelerinin birleştirilmesi ile

$$\delta u = \frac{u_{(i+1)j} - u_{ij}}{e_{i+1} - e_i} \delta e + \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \delta \dot{e} \quad (3.10)$$

elde edilir. O halde (3.10) ifadesinin kullanılması ile kontrol işareti

$$\begin{aligned} u - u_{ij} &= \frac{u_{(i+1)j} - u_{ij}}{e_{i+1} - e_i} (e - e_i) + \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} (\dot{e} - \dot{e}_j) \\ u &= \left[u_{ij} - \frac{u_{(i+1)j} - u_{ij}}{e_{i+1} - e_i} e_i - \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \dot{e}_j \right] + \frac{u_{(i+1)j} - u_{ij}}{e_{i+1} - e_i} e + \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \dot{e} \\ &= A + Pe + D\dot{e} \end{aligned} \quad (3.11)$$

biçiminde elde edilir. Bu durumda (3.11) ifadesindeki A, P ve D terimleri sırasıyla aşağıdaki şekilde verilir.

$$\begin{aligned}
A &= u_{ij} - \frac{u_{(i+1)j} - u_{ij}}{e_{i+1} - e_i} e_i - \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j} \dot{e}_j \\
P &= \frac{u_{(i+1)j} - u_{ij}}{e_{i+1} - e_i} \\
D &= \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - \dot{e}_j}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Çarpım-toplam bulanık çıkarım mekanizmasına sahip ve bulanık kuralların sonuç kısmında keskin değerlerin kullanıldığı çarpım-toplam tekil bulanık kontrolörün dinamik davranışının detaylı analizi Qiao ve Mizumoto (1996)'da bulunabilir.

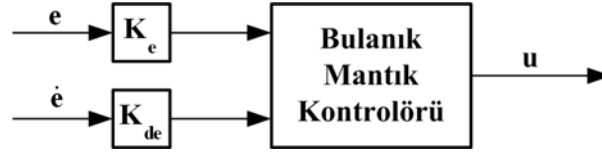
3.2.2 Bulanık PD kontrolörü

Tasarlanacak bulanık kontrolörün hata (e) ve hatanın değişimi ($\dot{e}$) olmak üzere iki girişinin ve bir çıkışının (u) olması, hata ile hatanın değişiminin her bir dilsel değerine üçgen tip ve çıkış değişkeninin her bir dilsel değerine tekil tip üyelik fonksiyonlarının atanması, çıkarım mekanizması olarak çarpım-toplam çıkarım mekanizmasının kullanılması, kural tabanında her bir giriş değişkenine atanan üyelik fonksiyonları sayısının çarpımı kadar bulanık kural bulunması (kural tabanının tam olması) ve giriş değişkenleri için ölçekleme çarpanlarının kullanılması durumunda bulanık kontrolöre ait ifade (3.11) ile elde edilen kontrol işareti

$$u = A + K_e P_e + K_{de} D_e \tag{3.13}$$

yapısında olur (Qiao ve Mizumoto, 1996).

Elde edilen kontrol işaretine bakıldığında tasarlanan bulanık kontrolörün yaklaşık olarak bir PD kontrolörü gibi davrandığı görülmektedir. Bu sebepten ötürü bu tip kontrolörlere bulanık PD kontrolörler adı verilir. Bu durumda eşdeğer oransal ve türev kontrol bileşenleri, sırasıyla, giriş ve çıkış değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanan P ve D olur. Elde edilen kontrol işareti ifadesindeki K_e ve K_{de} terimleri giriş değişkenlerine ait giriş ölçekleme çarpanlarıdır. Bu tip kontrolöre ilişkin blok gösterimi Şekil 3.2' de görülmektedir.

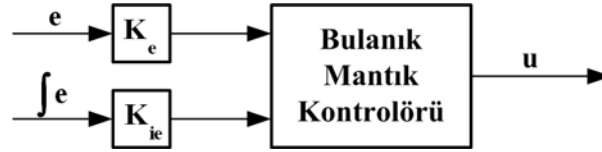


Şekil 3.2 : Bulanık PD kontrolörüne ait blok gösterimi.

Bulanık PD kontrolörü de yaklaşık olarak bir PD kontrolörü gibi davranacağından, eğer sistem tipi sıfır ise o zaman bulanık PD kontrolör de sistem yanıtında sürekli hal hatasının oluşmasına neden olacaktır. Bu nedenden ötürü tıpkı PD kontrolörü gibi, bulanık PD kontrolörü için de kontrol başarımı tatmin edici olmayacaktır. Ancak sistem başarımı bulanık kontrolöre integral kontrolünün eklenmesi ile artırılabilir.

3.2.3 Bulanık PI kontrolörü

Sistem yanıtında oluşacak sürekli hal hatasını ortadan kaldırmak maksadıyla integral kontrolünü bulanık kontrolöre dahil etmenin ilk yolu, bulanık PD kontrolörün girişlerinden olan hatanın değişimi yerine hatanın integralini koymak olacaktır. Bu tip kontrolöre ait blok gösterim Şekil 3.3’ te görülmektedir.



Şekil 3.3 : Girişlerin hata ve hatanın integrali olarak alınması durumunda elde edilen bulanık PI kontrolöre ait blok gösterimi.

Elde edilen bu tip kontrolör ile sürekli hal hatası ortadan kaldırılmaktadır ancak oransal kontrol parametresinin küçük seçilmesi durumunda sistem yanıtı yavaş yükselme zamanına ve oransal yada integral kontrol parametrelerinin büyük seçilmesi durumunda ise sistem yanıtı büyük bir aşımaya sahip olacaktır. Ayrıca sistemi kontrol eden uzman kişi için kontrolör girişinde bulunan hatanın integralini takip etmek pek mümkün değildir. Dolayısıyla kontrolör girişlerini hata ve hatanın değişimi olarak ve kontrolör çıkışının integralini alarak kontrol işaretinin elde edilebileceği yeni bir kontrolör yapısı tasarlanabilir. Bu tip kontrolöre ait blok gösterimi Şekil 3.4’ te görülmektedir.



Şekil 3.4 : Bulanık PI kontrolöre ait blok gösterimi.

Tasarlanan bu tip kontrolöre ait kontrol işareti (3.13) ile verilen ifadeden

$$u = \beta A t + \beta K_{de} D e + \beta K_e P \int e dt \quad (3.14)$$

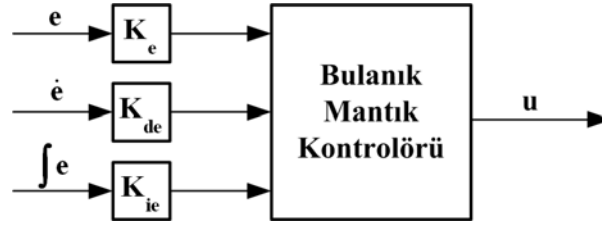
şeklinde olacaktır (Qiao ve Mizumoto, 1996).

Elde edilen kontrol işaretine bakıldığında, (3.14) ifadesinde mevcut olan $\beta A t$ teriminden dolayı kontrolörün aslında parametresi zamanla değişen PI kontrolörü gibi davrandığı görülmektedir. Bu tip kontrolörlere bulanık PI kontrolörler adı verilir. Bu durumda eşdeğer oransal ve integral kontrol bileşenlerinin değerleri, sırasıyla, giriş ve çıkış değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanan P ve D terimlerinin çıkış ölçekleme çarpanı ile çarpılmasıyla elde edilen değer olur.

3.2.4 Bulanık PID kontrolörü

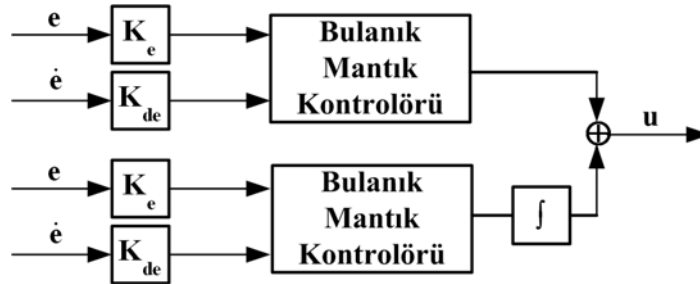
Bulanık PI kontrol, bulanık PD kontrole nazaran daha kullanışlı olarak bilinir çünkü bulanık PD kontrol için sürekli hal hatasını ortadan kaldırmak oldukça zordur. Ancak integrasyon nedeniyle, bulanık PI kontrolörün yüksek mertebeli sistemler için geçici hal cevabında düşük başarımlı gösterdiği bilinmektedir. Bulanık PD kontrolör kullanılması sonucunda ortaya çıkan sürekli hal hatası ve bulanık PI kontrolör kullanılması durumunda karşılaşılabilecek büyük aşım ve yavaş yükselme zamanı gibi olumsuzluklar ancak integral ve türev kontrollerinin birarada kullanılması ile ortadan kaldırılabilir. Dolayısıyla teorik olarak bulanık PID kontrol başarımlı daha fazla artıracaktır. Bu sebepten ötürü oran, integral ve türev kontrol elemanlarını biraraya getirerek PI ve PD etkilerini birleştirmek yoluyla bulanık PID kontrolör elde etmek mümkündür (Kwok ve diğ, 1990; Li ve Gatland, 1996; Qiao ve Mizumoto, 1996; Golob, 2001; Güzelkaya ve diğ, 2001).

Türev ve integral kontrolün birleştirilmesi, kontrolör girişinde hata, hatanın değişimi ve hatanın integralinin kullanılması ile gerçekleştirilebilir. Bu tip kontrolöre ait blok gösterimi Şekil 3.5' te görülmektedir.



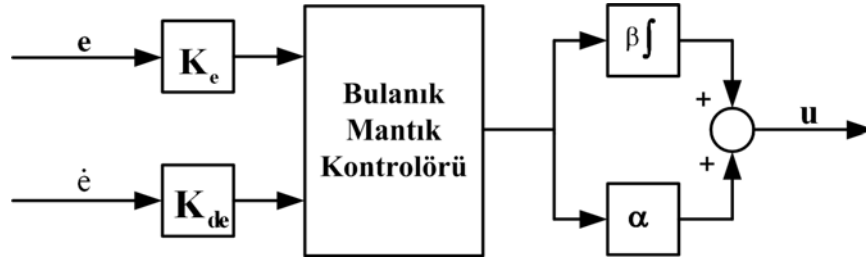
Şekil 3.5 : Girişlerin hata, hatanın değişimi ve hatanın integrali olması durumunda elde edilen bulanık PID kontrolöre ait blok gösterimi.

Ancak bu yöntem uygulamada oldukça zordur, çünkü kontrolör girişinde kullanılan hatanın integralinin sistemi kontrol eden operatör tarafından takip edilip kontrol işleminde düzenlemeler yapılması çok güçtür. Buna ilave olarak kontrolöre ait giriş sayısının ikiden üçe çıkarılması ile beraber bulanık kontrolör yapısında oluşturulacak kural sayısında da önemli derecede artış olacaktır. Örneğin, iki adet giriş için her bir girişe ait yedi adet dilsel değişken kullanılması durumunda toplam 49 adet kural yazılması gerekirken, kontrolör giriş sayısının üçe çıkarılması ile beraber kural sayısı da 343 olacaktır. Kontrolör tasarımında karşılaşılabilecek bu iki önemli olumsuzluktan kurtulmak için Şekil 3.6’ da verilen kontrolör yapısı oluşturulabilir.



Şekil 3.6 : Hata ve hatanın değişimi olmak üzere iki adet girişe ve iki ayrı kural tabanına sahip bulanık PID kontrolöre ait blok gösterimi.

Şekil 3.6’ dan da görüldüğü üzere iki ayrı kural tabanına sahip bulanık PD ve bulanık PI kontrolörlerinin birleştirilmesi ile yeni bir bulanık kontrolör yapısı elde edilmektedir. Kontrolörlerin girişlerinde hata ve hatanın değişimi değişkenleri alınarak girişte hatanın integralini takip etme durumu ortadan kaldırıldığı gibi bulanık mantık kontrolöründe oluşturulacak kural sayısında, yine her bir girişe ait yedi dilsel değişken kullanılması durumunda bulanık PD tip kontrolör için 49 ve bulanık PI tip kontrolör için 49 olmak üzere toplamda 98 adet kurala indirgenmektedir. Ancak bu yapıdan daha kullanışlı başka bir kontrolör yapısı Şekil 3.7’ de görülmektedir.



Şekil 3.7 : Bulanık PID kontrolöre ait blok gösterimi.

Şekil 3.7’ den de görüldüğü gibi önce bir bulanık PD kontrolör, daha sonra kontrolör çıkışının integrali alınarak ve β katsayısı ile çarpılarak bir bulanık PI kontrolör oluşturulmakta ve bu kontrolör elde edilen bulanık PD kontrolörün α değeri ile çarpımı ile toplanarak yeni bir bulanık kontrolör yapısı oluşturulmaktadır. Elde edilen kontrol işareti

$$u = \alpha A + \beta At + (\alpha K_e P + \beta K_{de} D)e + \beta K_e P \int edt + \alpha K_{de} D\dot{e} \quad (3.15)$$

şeklindedir (Qiao ve Mizumoto, 1996).

Kontrol işaretine bakıldığında, tasarlanan kontrolörün parametresi zamanla değişen klasik PID kontrolörü gibi davrandığı görülmektedir. Bu tip kontrolörlere bulanık PID kontrolörler adı verilir. Kontrolör yapısına bakıldığında aslında bulanık PD ve PI kontrolörlerin paralel olarak bağlanmasıyla bulanık PID kontrolör elde edilmektedir. Bu durumda, elde edilen bulanık PID kontrolörünün eşdeğer oransal, türev ve integral kontrol bileşenleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$\text{Oransal kazanç : } \alpha K_e P + \beta K_{de} D$$

$$\text{Türev kazancı : } \alpha K_{de} D \quad (3.16)$$

$$\text{İntegral kazancı : } \beta K_e P$$

Burada K_e ve K_{de} ’ye giriş ölçekleme çarpanları, α ve β ’ya ise çıkış ölçekleme çarpanları adı verilmektedir. Bu tip kontrolörde, kontrolör girişleri olarak hata ve hatanın değişimi alınmakta böylece Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da verilen kontrolör tiplerine nazaran daha az sayıda bulanık kurala sahip olunmaktadır. Örneğin her bir girişe ait yedi adet dilsel değişken tanımlanması durumunda toplam 49 adet kural yazılması gerekmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta,

Şekil 3.6’ da verilen kontrolör tipiyle karşılaştırıldığında, bu kontrolörün daha az sayıda giriş ölçekleme çarpanına sahip olmasıdır. Dolayısıyla bu yapıda ölçekleme çarpanlarının ayarlanması daha büyük bir önem taşımaktadır.

3.3 Bulanık PID Kontrolörü Tasarımı

3.3.1 Giriş

Genel olarak klasik PID kontrolörleri karmaşık sistemler için iyi bir başarımlı sağlayamamaktadır. Endüstride kullanılan sistemler çoğunlukla doğrusal olmayan özelliklere sahiptir ve önemli derecede ölü zamana sahip yüksek mertebeli sistemlerdir. Çoğu sistemin parametreleri ortam koşullarına bağlı olarak zaman içinde değişebilmektedir. Bu sebepten dolayı istenilen kontrol başarımlı için kontrol eylemi hata ve hatanın değişiminin doğrusal olmayan bir fonksiyonu olmalıdır. Bulanık PID kontrolörlerinde bu doğrusal olmayan özellik kısıtlı sayıdaki “ EĞER - O HALDE ” kurallarıyla sağlanmaya çalışılır. Ancak bu kurallar genellikle ihtiyaç duyulan kontrol işaretini elde etmek için yeterli olmamaktadır. Bu gibi durumlarda sabit üyelik fonksiyonu parametrelerine, ölçekleme çarpanlarına ve bulanık kural ağırlıklarına sahip bulanık PID kontrolörleri istenilen kontrol eylemini gerçekleştirmede yetersiz kalmaktadırlar. Tüm parametrelerinin sadece tasarımı başlangıcında çevrim dışı olarak ayarlanan ve parametre değerleri zaman içinde çevrim içi olarak güncellenmeyen bu tip bulanık PID kontrolörlere özayarlanmaz bulanık PID kontrolörleri adı verilir. Özayarlanmaz bulanık PID kontrolörlerinin gerekli kontrol işaretini elde etmekte yetersiz olduğu durumlarda daha etkin bir kontrol eylemi gerçekleştirebilmek amacıyla bulanık PID kontrolörün sahip olduğu giriş / çıkış ölçekleme çarpanlarının, üyelik fonksiyonu parametrelerinin, bulanık kuralların veya bulanık kural ağırlıklarının güncel çevrim içi olarak ayarlanması bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır.

3.3.2 Bulanık PID kontrolörü tasarım parametreleri

Bulanık mantık kontrolörleri için tasarım parametreleri iki ayrı grupta toplanabilir (Hu ve diğ, 1999).

- a) Yapısal parametreler
- b) Ayarlama parametreleri

Temel olarak, yapısal parametreler bulanık çıkarım için giriş / çıkış değişkenleri, bulanık dilsel kümeleri, üyelik fonksiyonları, bulanık kuralları, çıkarım mekanizmasını ve durulama mekanizmasını içerir. Ayarlama parametreleri ise giriş / çıkış ölçekleme faktörlerini, üyelik fonksiyon parametrelerini ve bulanık kural ağırlıklarını içerir. Genellikle yapısal parametreler çevrim dışı biçimde ayarlanırken, ayarlama parametreleri sistem belirsizliğine ve sistem gürültüsüne karşı ayarlama kapasitesinin düzenlenmesi ve dolayısıyla sistem başarımını artırmak maksadıyla çevrim içi olarak ayarlanır. Parametreleri güncel çevrim içi ayarlanan bulanık PID tipi kontrolörlere özayarlamalı bulanık PID kontrolörleri adı verilir.

3.3.3 Özayarlamalı bulanık PID kontrolörü

Klasik doğrusal PID kontrolörünün gerçekleştirilmesi kolaydır ve literatürde bu tip kontrolör parametrelerinin ayarlanması için yeterli kural mevcuttur. Ayrıca mevcut olan bu ayarlama kurallarının anlaşılması ve gerçek sistemlere uygulanması basittir. Klasik doğrusal PID kontrolörlerine kıyasla bulanık PID kontrolörleri genellikle doğrusal olmayan kontrol eylemi için doğrusal olmayan parametreler sağlarlar. Bulanık PID kontrolörün sahip olduğu bulanık kuralların söz konusu doğrusal olmayan parametrelere dönüştürülmesi ile bu tip kontrolörlerin bir çok doğrusal olan ve doğrusal olmayan sistemlere başarılı bir şekilde uygulanması sağlanmaktadır. Endüstrinin bulanık PID kontrolör uygulamalarına gittikçe artan derecede ilgi göstermesine karşın, klasik PID kontrolörlerine kıyasla bu tip kontrolörler için standart ve sistematik ayarlama yöntemlerinin sayısı son yıllarda yapılan çalışmalar ile sınırlıdır. Daha etkin bir kontrol eylemi gerçekleştirmek amacıyla bulanık PID kontrolör parametreleri iki seviyede ayarlanabilir (Duan ve diğ, 2008; Mann ve diğ, 1999). Düşük seviye ayarlama, ayarlama işlemi doğrusal kontrol başarımını gerçekleştirebilmek amacıyla kontrolöre ait ölçekleme çarpanları ayarlanır. Yüksek seviye ayarlama ise kontrolörün doğrusal olmayan özelliğini daha etkin kılabilmek için kontrolöre ait kural tabanını ve bulanık çıkarım mekanizmasını kapsayan bilgi tabanı parametrelerinin ayarlanması gerçekleştirilir.

3.3.3.1 Ölçekleme çarpanlarının ayarlanmasına dayalı yöntemler

Düşük seviye ayarlama bulanık PID kontrolörüne ait ölçekleme çarpanlarının ayarlanması amacıyla literatürde birtakım çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, Mudi ve Pal (1999)'da sistem üzerinde daha fazla etkiye sahip olan bulanık PID

kontrolörün çıkışındaki integral terimine ait çıkış ölçekleme çarpanı her örnekleme anında bir katsayı ayarlama parametresi ile çevrim içi olarak uyarlanmıştır. Ayarlama parametresinin değeri girişleri hata ve hatanın değişimi olan bir bulanık mekanizma kullanılarak hesaplanmıştır. Ayarlama işlemi söz konusu ölçekleme çarpanının bulanık mekanizma çıkışı olan katsayı ayarlama parametresi ile çarpımı biçiminde gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemde sahip özayarlama bulanık PID kontrolörün başarımı, bu tip kontrolörün benzetim ortamında değişik sistem modellerine uygulanması ile gösterilmiştir.

Güzelkaya ve diğ. (2003) ile yapılan çalışmada, Mudi ve Pal (1999)'da yapılan çalışmaya benzer olarak, bulanık PID kontrolörün girişindeki türev terimine ait ölçekleme çarpanı ile kontrolörün çıkışındaki integral terimine ait ölçekleme çarpanı her örnekleme zamanında bir bulanık parametre düzenleyici mekanizmasının çıkış parametresi ile çevrim içi olarak uyarlanmıştır. Bu amaçla, bulanık parametre düzenleyici mekanizmasının girişleri olarak sistem hata değişkeni ve sistem yanıtının hızlılığı veya yavaşlığı hakkında bağlı hız bilgisi sağlayan birimselleştirilmiş ivme değişkeni kullanılmıştır. Her örnekleme zamanında giriş ölçekleme çarpanı söz konusu bulanık mekanizmanın çıkış değişkeni değerine bölünerek ve çıkış ölçekleme çarpanı ise bu değişken değeri ile çarpılarak uyarlanmış yeni ölçekleme çarpanları elde edilmiştir. Önerilen yöntemin başarımı ve etkinliği yapılan benzetimler ile gösterilmiştir.

Escamilla ve Mort (2002)'de Ziegler Nichols klasik PID kontrolör katsayı belirleme yönteminin uygulanması sonucunda klasik PID kontrolörüne ait kontrol işareti ile bulanık PID kontrolöre ait kontrol işareti ayrı ayrı elde edilmiş ve elde edilen bu iki kontrol işareti karşılaştırılarak bulanık PID kontrolöre ait ölçekleme çarpanları klasik PID kontrolörünün kazançları cinsinden elde edilmiştir. Elde edilen ölçekleme çarpanlarına sahip bulanık PID kontrolör ile klasik PID kontrolörü benzetim ortamında ikinci dereceden ölü zamanlı ve üçüncü dereceden ölü zamansız sistemlere uygulanmış ve bulanık PID kontrolörünün başarımının daha iyi olduğu gösterilmiştir. Her iki kontrolör yapısının sisteme uygulanması neticesinde sistem yanıtları gözlenerek ve bilinen klasik integral, türev ve oran kontrolü etkileri dikkate alınarak çevrim dışı olarak ölçekleme çarpanlarına ayarlamalar uygulanmış ve elde edilen yeni ölçekleme çarpanlarına sahip bulanık PID kontrolörlü kontrol yapısının başarımı biraz daha iyileştirilmiştir.

Chung ve diğ. (1998) ile bulanık PI / PD kontrolör yapıları ele alınmış ve kontrolöre ait üç ölçekleme çarpanı yedi kurala sahip bir bulanık mekanizma kullanılarak çevrim içi olarak uyarlanmıştır. Kullanılan bulanık mekanizmanın girişi olarak sistem hata değerinin referans değerine bölünmesi ile elde edilen değişken ve çıkışı olarak kontrol işaretindeki artım miktarını belirten değişken alınmıştır. Sistem çıkışına bağlı olarak üretilen artım miktarı değişkeninin bir fonksiyonu vasıtasıyla üç ölçekleme çarpanı çevrim içi olarak uyarlanmıştır. Önerilen ayarlama yönteminin sonuçları ise söz konusu yöntemin üçüncü dereceden ölü zamana sahip sistem modeline benzetim ortamında uygulanması ile gösterilmiştir.

Bhattacharya ve diğ. (2004)'te ise bulanık PID kontrolörünün sadece integral terimine ait çıkış ölçekleme çarpanını uyarlayan Mudi ve Pal (1999) çalışmasına ilave olarak bulanık PID kontrolörün türev terimine ait çıkış ölçekleme çarpanını da çevrim içi olarak uyarlayan bir yöntem önerilmiştir. Bu maksatla girişlerin birimselleştirilmiş hata ve hatanın değişiminin olduğu ve çıkış değişkeninin çarpan olarak görev yaptığı 49 kurala sahip bir bulanık mekanizma oluşturulmuştur. Bu bulanık mekanizmanın çıkış değişkeni ile bulanık PID kontrolöre ait iki çıkış ölçekleme çarpanı çarpılarak uyarlanmıştır. Önerilen ayarlama yöntemin etkinliği bu ayarlama mekanizmasına sahip kontrol yapısının iki adet ikinci mertebeden ölü zamanlı olarak modellenmiş sisteme uygulanması ile gösterilmiştir.

Chen ve diğ. (2009) çalışmasında manyetik yatak sistemi kontrolü için bulanık ayarlama yöntemi önerilmiştir. Bu maksatla ilk olarak Güzelkaya ve diğ. (2003) ile önerilen ayarlama yöntemi oluşturularak bulanık PID kontrolörüne ait iki adet ölçekleme çarpanı uyarlanmış, sonrasında ise sistem başarımını artırmak maksadıyla ölçekleme çarpanları uyarlanmış bulanık kontrolör çıkışı oluşturulan yeni bir bulanık mekanizmanın çıkışı ile çarpılarak yeni bir kontrol işareti elde edilmiş ve bu kontrol işareti sisteme uygulanmıştır. Önerilen bulanık mekanizmanın kural tabanı ise genlikteki değişim ve titreşim miktarındaki değişim bilgileri kullanılarak tasarlanmıştır. Önerilen yeni yapının başarımı deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Qiao ve Mizumoto (1996)'da yapılan çalışmada bulanık PID kontrolör için hatanın değişimine ait giriş ve integral terimine ait çıkış ölçekleme çarpanları çevrim içi olarak uyarlanmıştır. Ölçekleme çarpanlarını ayarlamak amacıyla sistem yanıtının tepe değerleri tespit edilmiş ve her tepe oluşumu anında giriş ölçekleme çarpanı bu

tepe değerine bölünerek ve çıkış ölçekleme çarpanı ise bu tepe değeri ile çarpılarak uyarlanmıştır. Önerilen yöntemin etkinliği yapılan benzetimlerle gösterilmiştir.

Woo ve diğ. (2000)'de bulanık PID kontrolör için hatanın değişimine ait giriş ölçekleme çarpanı ve integral terimine ait çıkış ölçekleme çarpanı çevrim içi olarak uyarlanmıştır. Bu maksatla sistem hata bilgisine ve bundan başka dört adet ilave parametreye bağlı olarak iki fonksiyon tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlardan bir tanesi giriş ölçekleme çarpanı ile, diğeri ise çıkış ölçekleme çarpanı ile çarpılarak ayarlama gerçekleştirilmiştir. Ancak tanımlanan fonksiyonlarda mevcut ve sistem bilgisine dayalı olmayan toplam dört adet ilave parametrenin değerlerine ilişkin bir algoritma verilmemiş ve değerleri her sistem için ayrı ayrı deneysel olarak bulunmuştur.

3.3.3.2 yelik fonksiyonu parametrelerinin ayarlanmasına dayalı yöntemler

Bir bulanık PID kontrolörünü tasarlarken başlangıçta uygun üyelik fonksiyonlarının seçimi ve bu fonksiyonların parametrelerinin belirlenmesi temel bir tasarım problemidir. Ancak genellikle bu işlem uzman bilgi ve tecrübesine dayandığı için bu parametrelerin eniyileştirilmiş değerlerine yakın olarak belirlenmesi güçtür. lekleme arpanı ayarlama yöntemlerinin meydana getirdiği olumsuzlukları ortadan kaldırmak ve bulanık kontrolörün en önemli faydalarından bir tanesi olan doğrusal olmayan özelliğinin etkinliğini ortaya koymak amacıyla üyelik fonksiyonu parametrelerinin uyarlanması için çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, Juang ve diğ. (2008) alışmasında sistem hata bilgisini ve hatanın değişim bilgisini girişleri olarak kullanan bir bulanık mekanizma önerilmiştir. Bu bulanık mekanizmanın çıkışı yeni uyarlanmış hata bilgisi olarak alınmış ve bu yeni hata parametresi klasik PID kontrolörün girişine uygulanarak sisteme uygulanacak kontrol işareti üretilmiştir. Sistem başarımını artırmak amacıyla sırasıyla söz konusu bulanık mekanizmada giriş ve çıkış değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları, PID kontrolöre ait kazanç parametreleri genetik algoritma kullanılarak eniyileştirilmiştir. Önerilen yönteme sahip kontrol yapısının başarımı ikinci ve üçüncü mertebeden modellenmiş sistemlere benzetim ortamında uygulanarak gösterilmiştir.

Gürocak (1999) alışması ile sistem hata bilgisini ve hatanın değişimi bilgisini girişleri olarak kullanan bir bulanık mekanizma önerilmiştir. Bulanık mekanizmaya ait kural tabanında kullanılan tüm üyelik fonksiyonları genetik algoritma ile uyarlanarak eniyileştirilmiş ve bulanık mekanizmanın çıkışı klasik PID kontrolörüne

giriş olarak uygulanmıştır. Kazançları belirlenen klasik PID girişi için tasarlanan ve üyelik fonksiyonları uyarlanan bulanık mekanizmaya sahip yeni kontrol yapısı ikinci mertebeden modellenmiş sisteme benzetim ortamında uygulanmış ve sistem başarımının artırıldığı gösterilmiştir.

Fang ve diğ. (2008)'de, Juang ve diğ. (2008) ve Gürocak (1999)'da yapılan çalışmalara benzer bir çalışma yapılmıştır. Girişlerinin hata ve hatanın değişimi olan bir bulanık mekanizmaya ait kurallar için belirlenmiş üyelik fonksiyonlarının parametreleri ve klasik PID kontrolörüne ait kazanç katsayıları genetik algoritma yerine başka bir arama yöntemi olan "Particle Swarm" eniyileme yöntemi ile uyarlanmıştır. Söz konusu bulanık mekanizmanın çıkışı klasik PID kontrolörüne giriş olarak uygulanmıştır. Uyarlanan üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık mekanizmalı kontrol yapısı bir su tankı sistemine uygulanmış, sonuçlar uyarlanmamış kazançlara sahip bir klasik PID kontrolörüne sahip kontrol yapısı sonuçları ile karşılaştırılmış, önerilen yöntemin etkinliği elde edilen sonuçlarla vurgulanmıştır.

Ahn ve Truong (2009) çalışmasında klasik PID kontrolörüne ait kazanç katsayılarını eniyileştirilmiş kılabilmek amacıyla her bir katsayı için tasarlanmış bulanık mekanizmalara ait üyelik fonksiyonlarının parametreleri gürbüz Kalman filtresi yapısı kullanılarak eğitilmiş ve bu parametrelerin eniyileştirilmiş değerleri elde edilmiştir. Her bir bulanık mekanizmanın girişleri hata ve hatanın değişimi, çıkışı ise klasik PID kontrolörüne ait uyarlanmış kazanç katsayısı olarak alınmıştır. Uyarlanan yeni katsayılar PID kontrolörün yeni kazanç katsayıları olarak alınmış ve PID kontrolörün çıkışı ise sisteme kontrol işareti olarak uygulanmıştır. Klasik PID kontrolöre sahip kontrol yapısının, bulanık mekanizmaya sahip PID kontrolörlü kontrol yapısının ve üyelik fonksiyonlarının gürbüz Kalman filtresi ile uyarlanmış bulanık mekanizmaya sahip klasik PID kontrolörlü kontrol yapısının aynı sisteme uygulanması ile elde edilen sistem sonuçları dikkate alınarak önerilen yöntemin başarımı gösterilmiştir.

Sharkawy (2010)'da frenleme sistemi kontrolü için klasik PID kontrolörüne ait kazanç katsayılarını uyarlayan bir yöntem önerilmiştir. Bu amaçla sistem hata bilgisini ve hatanın değişimini girişleri olarak ve uyarlanmış PID kontrolörü kazanç katsayılarını çıkışları olarak kullanan üç adet bulanık mekanizma yapısı oluşturulmuş ve bu bulanık mekanizmaların sahip olduğu üyelik fonksiyonlarının parametreleri genetik algoritma arama yöntemi kullanılarak eniyileştirilmiştir. Eniyileştirme

sonucunda en iyi değer olarak hesaplanmış kazanç katsayılarına sahip klasik PID kontrolörü kullanılarak elde edilen kontrol işareti sisteme uygulanmıştır. Önerilen yöntemin başarımı söz konusu yönteme sahip kontrol yapısı sistem sonuçları ile eniyileştirilmemiş kazanç katsayılarına sahip klasik PID kontrolörlü kontrol yapısı kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak vurgulanmıştır.

3.3.3.3 Bulanık kural ağırlıklarının ayarlanmasına dayalı yöntemler

Bir bulanık kontrolörün başarımını artırmanın diğer bir yolu da kontrolörün sahip olduğu bulanık kurallara ait kural ağırlıklarını kullanmaktır. Gerek  l ekleme çarpanlarının gerekse üyelik fonksiyonu parametrelerinin ayarlanması sonucunda sistem kontrolü başarımında iyileştirmelerin sağlandığını vurgulayan ve yukarıda bahsedilen çalışmaların yanı sıra, literatürde kontrolör tasarımı başlangıcında uzman bilgisi doğrultusunda sabit olarak değeri belirlenen bulanık kural ağırlıklarının da sistem kontrolü başarımı konusunda etkili olduğunu gösteren az sayıda çalışma mevcuttur. Bu kapsamda, Mona ve diğ. (2011)'de sırasıyla üyelik fonksiyonları, bulanık kurallar ve bulanık kural ağırlıkları genetik algoritma arama yöntemi ile eniyileştirilmiş bulanık PD ve klasik integral kontrolörün birlikte oluşturduğu kontrol yapısı PUMA 560 adlı robota uygulanmıştır. Bu maksatla ISE başarım kriteri dikkate alınarak bulanık PD kontrolöre ait üyelik fonksiyonları, bulanık kurallar ve bulanık kural ağırlıkları genetik algoritma ile eniyileştirilmiş ve parametreleri eniyileştirilmiş üç ayrı bulanık PD ve klasik integral kontrolörünün birlikte oluşturduğu kontrol yapıları sisteme uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sistem sonuçları neticesinde bulanık kural ağırlıkları eniyileştirilmiş kontrolör yapısı ile elde edilen başarım kriteri değerinin diğerlerine oranla daha iyi olduğu vurgulanmıştır.

Alcala ve diğ. (2005) ile yapılan çalışmada bir iklimlendirme sistemini etkin olarak kontrol etmek amacıyla bulanık kontrolöre ait bulanık kuralların ağırlıkları genetik algoritma ile eniyileştirilmiş ve sonrasında değerleri sıfıra yakın olan ağırlıklara sahip bulanık kurallar gözardı edilerek kural tabanındaki bulanık kural sayısı indirgenmiştir. Bu amaçla ilk olarak çok fazla parametreye sahip sistemin değişkenleri dikkate alınarak bulanık mantık kontrolörünün giriş ve çıkış değişkenleri belirlenmiş, bu doğrultuda üç katmanlı bir bulanık kontrolör yapısı tasarlanmış ve her bir katmandaki kural tabanına ait bulanık kural ağırlıkları genetik

algoritma ile eniyileştirilmiş, ağırlıkların eniyileştirilmesine dayanan başka bir bulanık kontrolör yapısı önerilmiştir. Daha sonra sıfır değerine yakın olan ağırlıklara sahip yeni bulanık kurallar kural tabanından çıkartılarak indirgenmiş kural sayısına sahip bulanık kontrolör yapısı elde edilmiştir. İndirgenmiş kural tabanına sahip kontrolör yapılarının sadece bulanık kural ağırlıkları eniyileştirilmiş bulanık kontrolör yapılarından daha iyi başarıma sahip olduğu yapılan uygulamalarda gösterilmiştir.

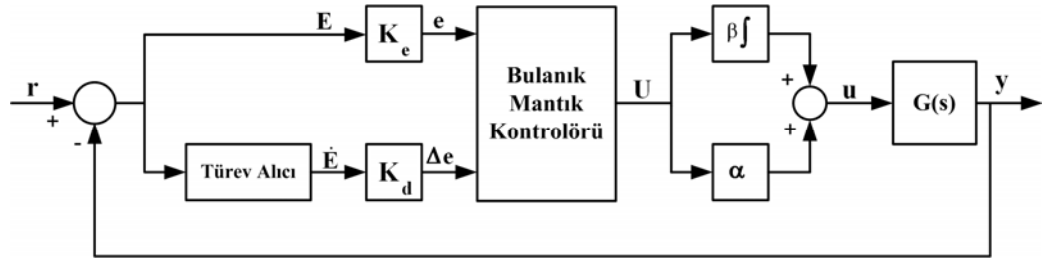
Cho ve Park (2000) ve Alcalá ve diğ. (2003) ile yapılan çalışmalarda başlangıç koşullarında oluşturulan bulanık kontrolörün kural tabanına ait birbiri ile çelişen / tutarsız bulanık kurallar kural ağırlıklarının yapay sinir ağları ile eğitilmesi neticesinde kural tabanından çıkartılarak daha basit bir kontrolör yapısı önerilmiştir. Bu maksatla yapay sinir ağları ile sistem modeli elde edilmiş ve bu modelin çıkışı ile kontrol işaretini giriş / çıkış değişkeni olarak kullanan bir yapay sinir ağı yapısı kullanılarak ağırlık değerleri eğitilmiş, bulanık kural ağırlık değerlerinin azaldığı kurallar kural tabanından çıkartılarak ve bulanık kural ağırlık değerlerinin arttığı kurallar kural tabanında tutularak daha basit bir kontrolör yapısı elde edilmiş, önerilen yapının etkinliği yapılan benzetimler ile gösterilmiştir.

Literatürdeki mevcut çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, kontrol edilen sistem için eniyileştirilmiş kontrol işaretini elde etmek amacıyla bulanık PID kontrolörüne ait ölçekleme çarpanlarını ayarlamak için sistematik çalışmalar mevcuttur. Buna karşın özellikle bulanık PID kontrolörünün doğrusal olmayan özelliğinin etkinliğini ortaya koymak üzere kontrolöre ait üyelik fonksiyonu parametreleri ve bulanık kural ağırlıkları gibi mevcut parametrelerin uyarlanmasına yönelik sistematik çalışmaların mevcut olmaması ve bu parametrelerin sadece eniyileme yöntemlerinin kullanılarak uyarlanması, bu alanda sistem bilgisini kullanarak ayarlama yöntemlerinin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır. Bu kapsamda bu tez çalışmasında, bulanık PID kontrolörüne ait bulanık kurallar için tanımlanan bulanık kural ağırlıklarının çevrim içi ayarlanması maksadıyla sistem bilgisini kullanan öz ayarlama yöntemleri önerilerek sistem başarımının artırılması amaçlanmıştır.

4. BULANIK KURAL AĞIRLIKLANDIRMA YÖNTEMLERİ

4.1 Giriş

Bu tezde, Şekil 4.1’de gösterilen standart bulanık PID kontrolör yapısı ele alınmıştır.



Şekil 4.1 : Kapalı çevrim bulanık PID kontrolör sisteminin genel yapısı.

Bu tip bulanık kontrolör yapısı, çıkışında bir toplama elemanına ve integral alıcı devre elemanına sahip bir bulanık PD kontrolör kullanılarak elde edilir.

Bulanık PID kontrolörün çıkışı aşağıdaki verilen ifade ile hesaplanır.

$$u = \alpha U + \beta \int U dt \quad (4.1)$$

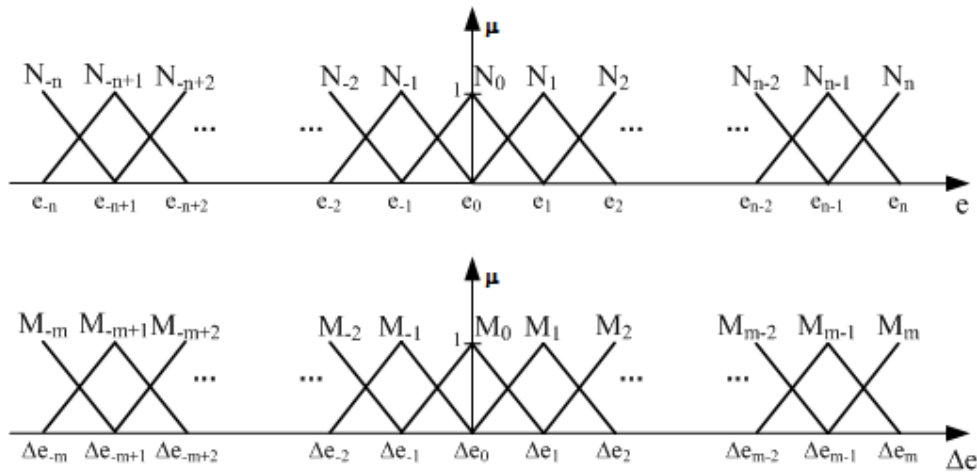
Burada U bulanık kontrolörün çıkışıdır.

Bulanık kontrolörlerin çarpım-toplam çıkarım mekanizmasına, ağırlık merkezi durulaştırma yöntemine, giriş değişkenleri için üçgen tip düzgün dağılımlı üyelik fonksiyonlarına ve çıkış değişkeni için tekil tip üyelik fonksiyonlarına sahip olması durumunda, bu tip kontrolörler ile klasik PID kontrolörleri arasında bir eşdeğerlik olduğu Qiao ve Mizumoto (1996)'da gösterilmiştir. Minimum çıkarım mekanizmasının kullanılması durumunda aynı sonuçların elde edilebileceği Huang ve diğ. (1999)'da gösterilmiştir.

Hata (e) ve hatanın değişimi (Δe) bulanık PID kontrolörün giriş değişkenleri ve kontrol işaretindeki değişim (U) çıkış değişkeni olarak kullanılmıştır. Bulanık PID kontrolörüne ait giriş değişkenlerini tanımlanan üyelik fonksiyonları tanım aralığına birimselleştirmek amacıyla, hata değişkeni için K_e ve hatanın değişimi değişkeni

için ise K_d ölçekleme çarpanları kullanılmıştır. Benzer olarak, bulanık PID kontrolörün çıkışını sistem için uygulanabilir bir değere birimselleştirmek için sırasıyla β ve α ölçekleme çarpanları kullanılmıştır. Birimselleştirme süresince, bulanık PID kontrolörün giriş ve çıkış değişkenlerinin tanım aralıkları $[-1, 1]$ olarak belirlenmiştir.

Giriş değişkenleri olan hata (e) ve hatanın değişiminin (Δe) her bir bulanık dilsel terimi için simetrik düzgün dağılımlı üçgen tipi üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır. Bulanık dilsel terimler sırasıyla, hata değişkeni için N_i ; $i = \{-n, -n+1, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, n-1, n\}$ ve hatanın değişimi değişkeni için ise M_j ; $j = \{-m, -m+1, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, m-1, m\}$ olarak ifade edilmiştir. N_i and M_j bulanık kümelerin merkezleri sırasıyla e_i ve Δe_j olarak belirlenmiştir. Bulanık PID kontrolörün çıkışına tekil tip üyelik fonksiyonları atanmıştır. Giriş değişkenleri için atanan üyelik fonksiyonları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Giriş değişkenleri e ve Δe için atanan üçgen tip üyelik fonksiyonları.

4.2 Bulanık Kural Ağırlıkları

Bulanık kural ağırlıklarının bulanık sistemlerin yorumlanabilirliğini nasıl etkilediğine ilişkin kapsamlı analiz Nauck ve Kruse (1998)’de bulunabilir. Bir bulanık kontrolörü uygun biçimde ayarlama için kullanılan en önemli parametrelerden bir tanesi de bulanık kural ağırlıklarıdır. Bulanık kural ağırlığı (w) her bir bulanık kural için değişebilir bir değerdir ve bir bulanık kurala genellikle “ w bulanık kural ağırlığı ile” ifadesi ile eklenir. Bir bulanık kuralın ağırlığı, belirli bir zaman değeri için

tanımlanan girişler için bulanık kurallarının önemini ve etkisini gösterir. Ağırlıklar ile birlikte bulanık PID kontrolörün bulanık kuralları genellikle aşağıdaki gibi yazılır:

R_k : EĞER hata (e) N ise ve hatanın değişimi (Δe) M ise

O HALDE kontrol işaret değişimi (U) C 'dir, " w_k " bulanık kural ağırlığı ile.

Burada N , M girişler için ve C ise çıkış için atanan dilsel terimleri tanımlayan bulanık kümelerdir. Bulanık kuralda bulunan e ve Δe bulanık PID kontrolörün giriş değişkenleri, U bulanık PID kontrolörün çıkış değişkenidir ve w_k ilgili bulanık kuralın ağırlığıdır.

Genellikle, ağırlıklar bulanık kurallara aşağıda belirtilen iki değişik yöntem ile uygulanır:

- a) Ağırlıklar tüm kurala uygulanır. Bu durumda kuralın etkinliği ağırlık ile değişir.
- b) Ağırlıklar bulanık kuralların sonuç kısmına uygulanır. Bu durumda kuralın çıkışı ağırlık ile değişir.

Bulanık kuralların çıkış kısmında tekil üyelik fonksiyonları kullanıldığı zaman, (a) durumu için bulanık kural ağırlıkları bulanık PID kontrolörü çıkışının hesaplanmasında hem pay hem de paydada toplam içinde yer alır. Bulanık PID kontrolörün çıkışı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U = \frac{\sum_i^m f_k c_k w_k}{\sum_i^m f_k w_k} \quad (4.2)$$

İkinci durum için, bulanık kural ağırlıkları Eşitlik (4.2)'nin sadece pay kısmında yer alır ve bulanık PID kontrolörün çıkışı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U = \frac{\sum_{k=i}^m f_k c_k w_k}{\sum_{k=i}^m f_k} \quad (4.3)$$

Burada f_k , w_k ve c_k sırasıyla k . bulanık kuralın ateşlenme şiddeti, ağırlığı ve çıkış değişkeni tekil değeridir.

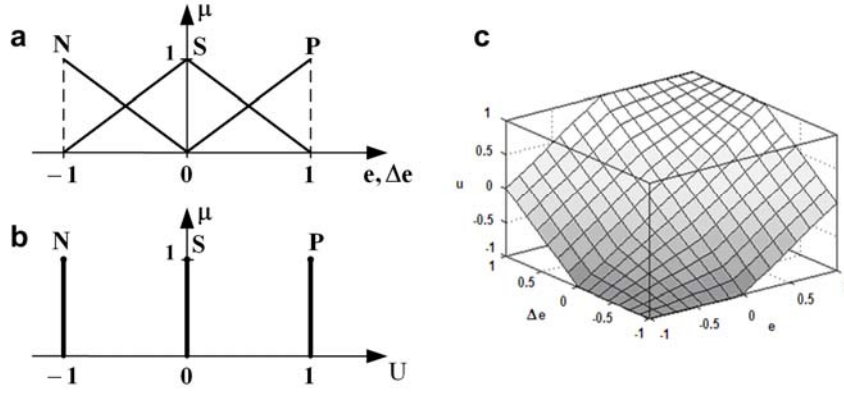
Bir değişkenin üyelik derecesi $[0, 1]$ aralığı içinde değiştiği için, N, M ve C dilsel ifadelerinin bulanık kümeler olarak tanımlanabilmesi için bulanık kural ağırlık değerleri de $[0, 1]$ aralığı içinde seçilmelidir. Ağırlık değerlerini $[0, 1]$ aralığında tutma, bulanık PID kontrolörün çıkışını bilinen yöntemler ile hesaplama olanağını sağlar. Bu tez çalışmasında, kuralın etkinliğinin değiştirilmesi amaçlandığından, ağırlıkların tüm kurala uygulandığı birinci durum dikkate alınmıştır.

Bir bulanık PID kontrolörü tasarımımda eğer kontrolöre ait ölçekleme çarpanları, üyelik fonksiyonu parametre değerleri uygun olarak seçilirse istenilen sistem başarımı elde edilebilir. Bulanık kontrolör tasarımı esnasında kural tabanında kullanılan bulanık kurallara ait kural ağırlıklarına “1” sabit değeri atanmaktadır. Ancak literatürde mevcut az sayıdaki çalışmada gösterildiği gibi, bu ağırlık değerleri değiştirildiğinde sistem başarımı artmaktadır (Mona ve diğ, 2011; Alcalá ve diğ, 2005; Alcalá ve diğ, 2003; Cho ve Park, 2000).

Bu kapsamda, öncelikle tasarlanacak bir bulanık PID kontrolörünün kural tabanında kullanılan kural ağırlıklarının etkilerini göstermek amacıyla iki sistem modeli üzerinde basit benzetimler yapılmıştır. Her bir sistem modeli için karşılaştırmaları eşit şartlarda yapabilmek amacıyla Şekil 4.1’ de gösterilen bulanık PID kontrolör yapısı dikkate alınarak aynı tip bulanık kontrolör, ölçekleme çarpanları ve üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Basit bir kontrolör yapısı oluşturmak amacıyla 9 kurala sahip bir kural tabanı kullanılmıştır. Giriş değişkenlerine düzgün dağılımlı üçgen tipi üyelik fonksiyonları ve çıkış değişkenine tekil tip üyelik fonksiyonları atanmıştır. Giriş ve çıkış değişkenleri üç değişik bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır. N : Negatif, S : Sıfır, P : Pozitif. Kontrolör tasarımımda giriş ve çıkış değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları ile kontrol yüzeyi Şekil 4.3’te ve bulanık kural tablosu Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Bulanık PID kontrolörü için kural tablosu.

e / Δe	N	S	P
N	N (w_1)	N (w_2)	S (w_3)
S	N (w_4)	S (w_5)	P (w_6)
P	S (w_7)	P (w_8)	P (w_9)



Şekil 4.3 : a) Giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları, b) Çıkış değişkeni için üyelik fonksiyonları; c) Kontrol yüzeyi.

Benzetimlerde karşılaştırma yapabilmek amacıyla, bulanık PID kontrolörlerden birtanesi için tüm ölçekleme çarpanları tasarım başlangıcı değerlerinde ve bulanık kural ağırlıkları normal koşullarda olduğu gibi “1” değerinde sabit tutulmuş, ikinci bulanık PID kontrolör için bulanık kural ağırlık değerleri “1” değerinde ve giriş ölçekleme çarpanları tasarım başlangıcı değerlerinde sabit tutulurken çıkış ölçekleme çarpanları mutlak hatanın toplamı (IAE) başarımlı kriteri dikkate alınarak genetik eniyileme yöntemi kullanılarak eniyileştirilmiş, diğer üçüncü bulanık PID kontrolör için tüm ölçekleme çarpanları tasarım başlangıcı değerlerinde sabit tutulurken bulanık kural ağırlık değerleri mutlak hatanın toplamı (IAE) başarımlı ölçütü dikkate alınarak genetik eniyileme yöntemi kullanılarak eniyileştirilmiştir. Şekillerde ağırlık değerleri ve ölçekleme çarpanları sabit tutulan bulanık PID kontrolörüne ait sistem yanıtları ve kontrol işaretleri AS olarak, sadece ağırlık değerleri eniyileştirilmiş bulanık PID kontrolörüne ait sistem yanıtları ve kontrol işaretleri ise AE olarak ve sadece çıkış ölçekleme çarpanları eniyileştirilmiş bulanık PID kontrolörüne ait sistem yanıtları ve kontrol işaretleri ise ÇE olarak gösterilmiştir. Bulanık PID kontrolörlerin başarımlı kıyaslamak amacıyla beş değişik başarımlı ölçütü dikkate alınmıştır. Bu başarımlı ölçütlerinden iki tanesi klasik geçici sistem yanıtı kriterlerinden seçilmiştir. Bunlar maksimum aşım (%OS) ve yerleşme zamanıdır (T_s). Diğer üç başarımlı ölçütü, “e” hata değeri olmak üzere aşağıda verilmiştir:

a) Mutlak Hatanın Toplamı (IAE):

$$IAE = \sum_{k=1}^n |e_k| \quad (4.4)$$

b) Mutlak Hatanın Zaman ile Çarpımının Toplamı (ITAE):

$$ITAE = \sum_{k=1}^n |e_k| \cdot k \quad (4.5)$$

c) Kontrol girişine ait Toplam Sapma (TV) (Skogestad, 2003):

$$TV = \sum_{k=1}^n |u_{k+1} - u_k| \quad (4.6)$$

Sistem I:

İlk olarak, Duan ve diğ. (2008) ile verilen aşağıdaki birinci dereceden ölü zamana sahip sistem dikkate alınmıştır.

$$G_p(s) = \frac{e^{-0.6s}}{s+1} \quad (4.7)$$

Bulanık PID kontrolörüne ait aşağıda verilen ölçekleme çarpanları da Duan ve diğ. (2008)'de önerilen ve ölçekleme çarpanları arasında olması gereken oran dikkate alınarak belirlenmiştir.

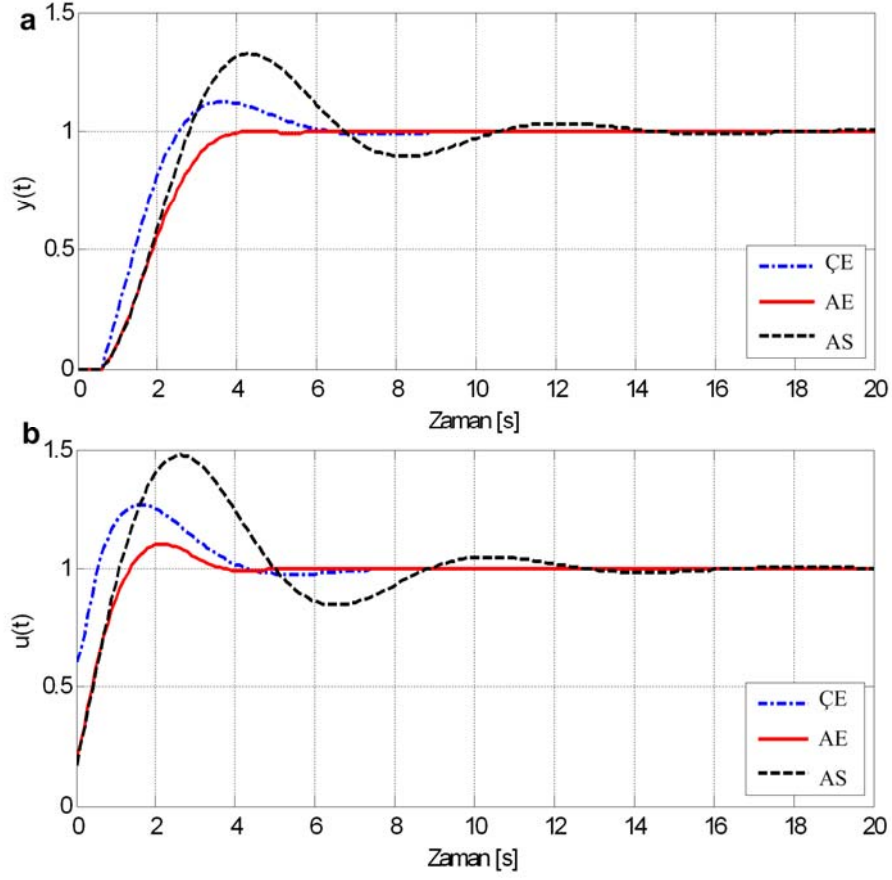
$$K_e = 1, K_d = 0.3, \beta = 0.1, \alpha = 0.1 \quad (4.8)$$

Yukarıda verilen ölçekleme çarpanları ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtına neden olmaktadır.

Sistem I için sistem yanıtları ve kontrol işaretleri sırasıyla Şekil 4.4'te, başarımlı ölçütü sonuçları ise Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Sistem I için başarımlı analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	T _s (s)	IAE	ITAE	TV
AS	32.7	9.7	3.01	9.0	0.24
ÇE	12.4	5.1	1.8	2.48	0.16
AE	0	3.3	2.02	2.29	0.12



Şekil 4.4 : Sistem I için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.

Sistem II:

Mudi ve Pal (1999) ile verilen aşağıdaki ikinci dereceden ölü zamana sahip sistem dikkate alınmıştır.

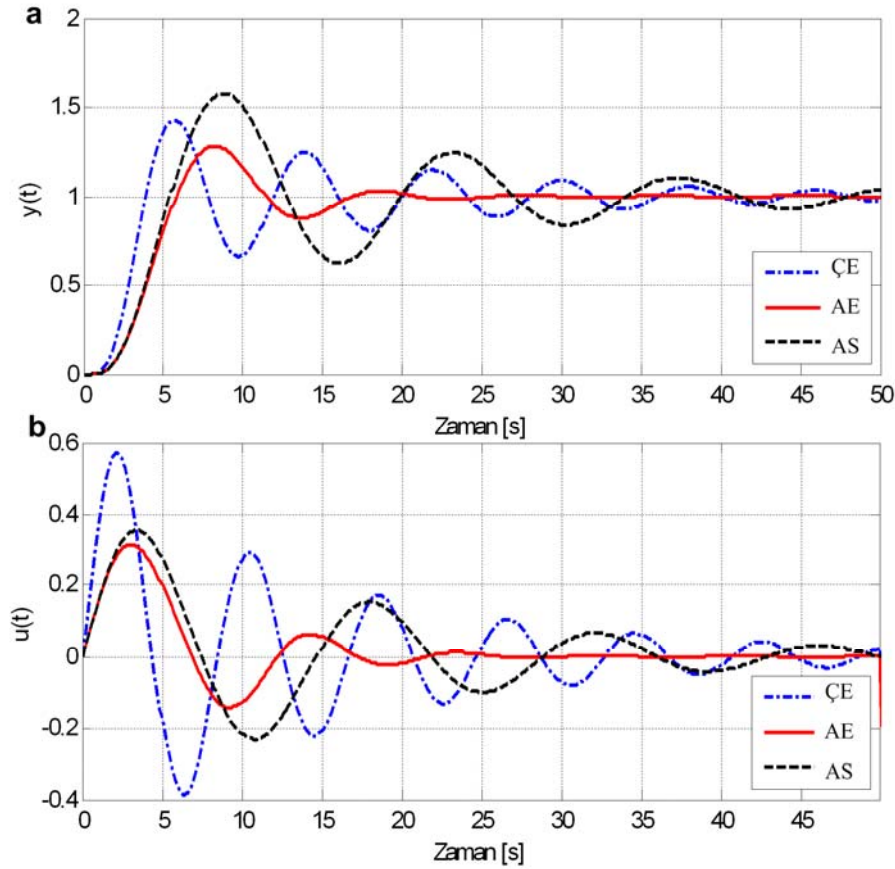
$$G_p(s) = \frac{e^{-0.3s}}{s^2 + s} \quad (4.9)$$

Bulanık PID kontrolörüne ait aşağıda verilen ölçekleme çarpanları da Mudi ve Pal (1999)'dan alınmıştır.

$$K_e = 0.9, K_d = 20, \beta = 0.022, \alpha = 0 \quad (4.10)$$

Yukarıdaki ölçekleme çarpanları ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtına neden olmaktadır. Sistem II için sistem yanıtları ve

kontrol işaretleri Şekil 4.5'te, başarımlı ölçütü sonuçları ise Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Sistem II için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 4.3 : Sistem II için başarımlı analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	$T_s(s)$	IAE	ITAE	TV
AS	57.7	46	10.8	139.9	0.195
ÇE	42.5	38.5	7.32	81.36	0.432
AE	28.2	15.7	5.46	25.94	0.112

Yapılan benzetimler neticesinde, sistem yanıtlarından ve başarımlı kriterleri değerlerinden de görüldüğü gibi, sabit “1” değerli bulanık kural ağırlıklarına sahip bulanık PID kontrolörün giriş ölçekleme çarpanlarının sabit tutulup çıkış ölçekleme çarpanlarının eniyileştirilmesi ile sistem başarımlı iyileştirmeler sağlanmasına karşın, başlangıçta sabit “1” değeri atanan bulanık kural ağırlık değerlerinin

büyük değere sahip bir kontrol işareti gereklidir. Sistem yanıtının referans değerine yaklaştığı ve aynı zamanda sistem hata değerinin azaldığı ancak hala pozitif olduğu bölgeler için (yaklaşık olarak A1 bölgesinin ortasından D1 bölgesine kadar), sistem yanıtını yavaşlatmak için kontrol işareti değerini zamanla küçültmek gerekir. Sistem hata değerinin negatif olduğu ve sistem yanıtının referans değerinden uzaklaştığı bölgede (D1 bölgesi), üstten aşımı engelleyebilmek amacıyla kontrol işareti değeri mümkün olduğunca negatif maksimum olarak elde edilmelidir. Sistem hata değerinin negatif büyük ve sistem yanıtının referans değerine yaklaştığı bölgeler için ((n+2). bölgenin başlangıcından yaklaşık olarak A2 bölgesinin ortalarına kadar), sistem yanıtını yeterince hızlandırabilmek amacıyla negatif büyük değerli bir kontrol işareti gereklidir. Sistem yanıtının referans değerine yaklaştığı ve aynı zamanda sistem hata değerinin arttığı ancak hala negatif olduğu bölgelerde (yaklaşık olarak A2 bölgesinin ortalarından D2 bölgesine kadar), sistem yanıtını yeteri kadar yavaşlatmak için kontrol işareti değerini zamanla büyütmek gerekir. Son olarak, sistem hata değerinin pozitif olduğu ve sistem yanıtının referans değerinden uzaklaştığı bölgede (D2 bölgesi), alttan aşımı engelleyebilmek amacıyla kontrol işareti değeri mümkün olduğunca pozitif maksimum olarak elde edilmelidir. Bu kapsamda, verilen bu bilgilerden aşağıda ifade edilen tanımlayıcı kurallar elde edilebilir.

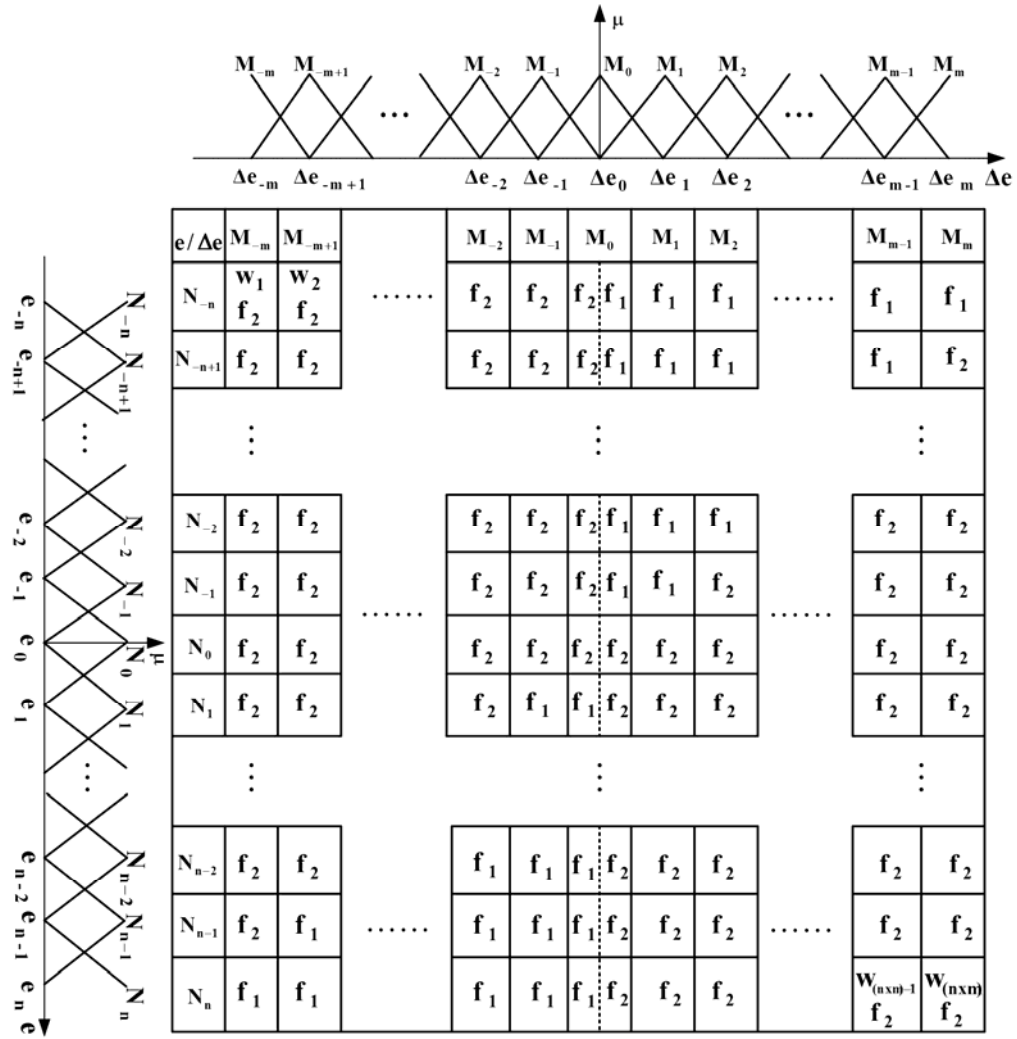
Tanımlayıcı kurallar:

- a) Sistem hata değeri pozitif olduğu ve sistem yanıtı referans değerine yaklaştığı zaman, gerekli sistem yanıt hızını elde edebilmek amacıyla kontrol işaretinin değeri zamanla azaltılmalıdır.
- b) Sistem hata değeri negatif olduğu ve sistem yanıtı referans değerinden uzaklaştığı zaman, üstten aşımı engelleyebilmek amacıyla yeteri kadar negatif büyük değerli kontrol işareti gereklidir.
- c) Sistem hata değeri negatif olduğu ve sistem yanıtı referans değerine yaklaştığı zaman, gerekli sistem yanıt hızını elde edebilmek amacıyla kontrol işaretinin değeri zamanla artırılmalıdır.
- d) Sistem hata değeri pozitif olduğu ve sistem yanıtı referans değerinden uzaklaştığı zaman, alttan aşımı engelleyebilmek amacıyla yeteri kadar pozitif büyük değerli kontrol işareti gereklidir.

Yukarıda bahsedilen bu tamamlayıcı kurallar istenen sistem başarımını sağlamak amacıyla gerekli kontrol işaretini elde edebilmek için bulanık kurallar ile ilişkilendirilebilir (Karasakal ve diğ, 2010a). Örneğin; pozitif büyük değerli bir kontrol işareti gerekli olduğu zaman pozitif kural sonuç kısmına sahip olan bulanık kuralların önemi negatif kural sonuç kısmına sahip olan bulanık kuralların öneminden daha fazla olacaktır. Benzer olarak, kontrol işaretini zaman içinde azaltma gereği duyulduğu zaman, negatif sonuç kısmına sahip olan bulanık kuralların önemi pozitif sonuç kısmına sahip olan bulanık kuralların öneminden daha fazla olacaktır. Bir bulanık kuralın öneminin o kuralın ağırlığı ile ilişkili olmasından dolayı, herhangi bir bölge içinde bir bulanık kuralın öneminin değişmesi o kuralın ağırlık değerinin değişimi ile ifade edilebilir. Şekil 4.6'dan da görüldüğü üzere, sırasıyla 1'den n ' e kadar olan bölgeler ile $n+2$ 'den $2n+1$ 'e kadar olan bölgeleri arasında ve $n+1$ ile $2n+2$ bölgeleri arasında simetrik bir yapı mevcuttur. Örneğin sistem yanıtının herhangi bir örnekleme zamanı için “ n ” bölgesi içinde herhangi bir noktadaki yeri “ x_1 ” ve aynı örnekleme zamanı için bu noktadaki kontrol işaretinin değeri “ u ” olsun. Simetrik yapının özelliği nedeniyle, “ x_1 ” noktasının “ $2n+1$ ” bölgesi içindeki simetrik noktası “ x_2 ” ($x_2 = 2r - x_1$) olsun. Bu durumda “ x_2 ” noktasındaki kontrol işareti değeri, “ x_1 ” noktasındaki kontrol işareti değeri ile aynı genlikte ancak ters işaretli, yani “ $-u$ ” olacaktır. Söz konusu bu simetri özelliği ve yukarıda oluşturulan tanımlayıcı kurallar kullanılarak, bulanık kurallara ait ağırlık değerleri Şekil 4.8'de gösterildiği gibi e_0 and Δe_0 merkezlerinin kesişimine göre simetrik olarak uyarlanmalıdır (Karasakal ve diğ, 2011a).

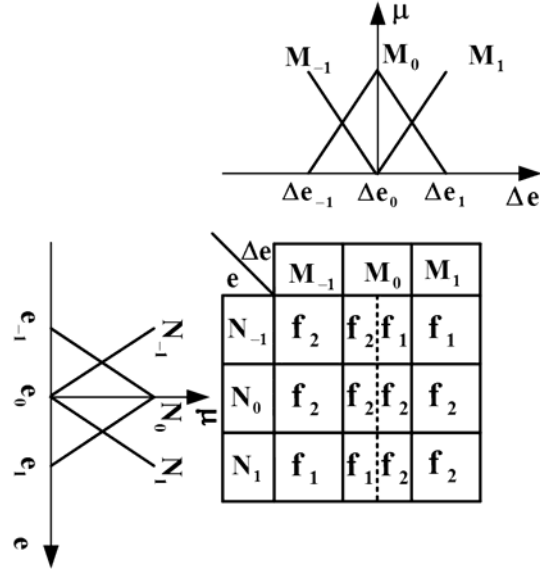
Sistem hata değerinin kapalı çevrim kontrol sistemleri için geçici sistem yanıtı süresince azalıp arttığı ve her bir bölge içinde ve her örnekleme zamanında hesaplanabildiği aşıkardır. Bu sebeple, ağırlık ayarlaması sistem hata değeri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bulanık kural ağırlık değerlerinin $[0, 1]$ aralığında olması gerektiğinden, birimselleştirilmiş sistem hata değer aralığı da mutlak değer fonksiyonu kullanılarak $[-1, 1]$ değer aralığından $[0, 1]$ değer aralığına eşlenmiştir. Bu durumda;

$$f_1(e) = a \cdot |e| \quad (4.11)$$

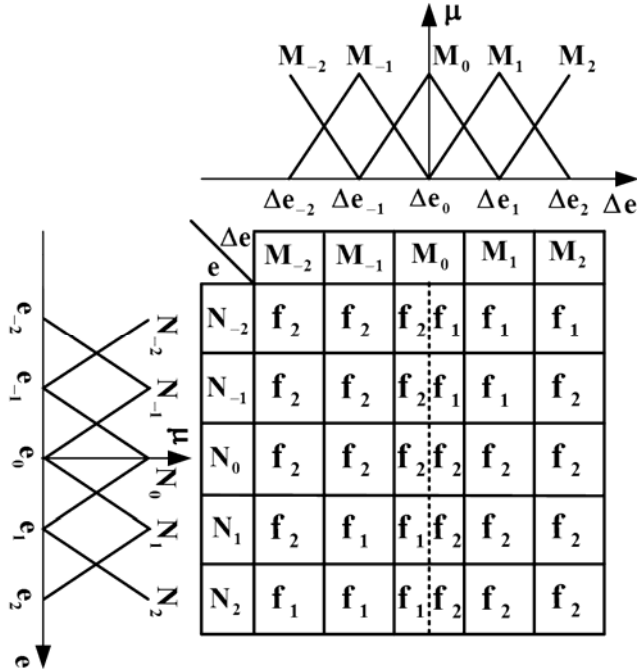


Şekil 4.8 : nxm giriş üyelik fonksiyonları için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.

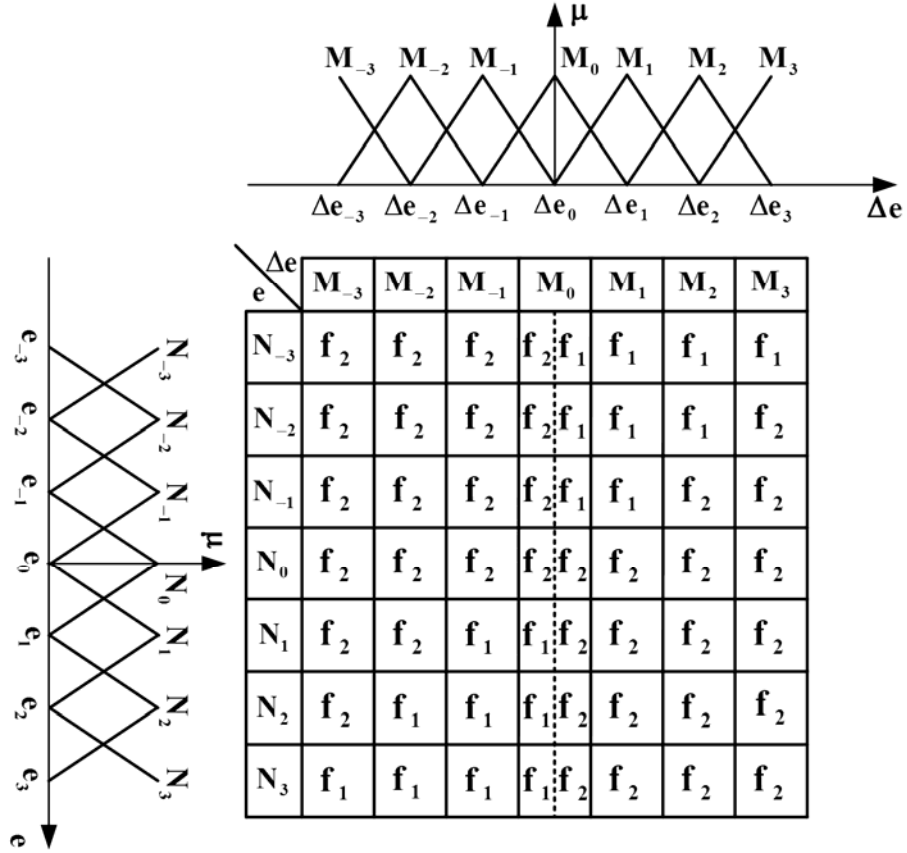
Literatürde, genellikle bulanık kontrolör uygulamalarında 9, 25 veya 49 kurala sahip kural tabanı kullanılmaktadır. Bu sebeple, köşegen bulanık kural tabanı yapısını kullanarak, 3x3 giriş üyelik fonksiyonları (9 kural), 5x5 giriş üyelik fonksiyonları (25 kural), 7x7 giriş üyelik fonksiyonları (49 kural) durumları için bulanık kural ağırlıklandırmaları düzenlenmiş ve sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Yukarıda bahsedilen bulanık kural ağırlık fonksiyonları için simetri durumu, 9, 25 ve 49 kural içeren bulanık kural tabanları için de görülebilir.



Şekil 4.9 : 3x3 giriş üyelik fonksiyonları (9 kural) durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.

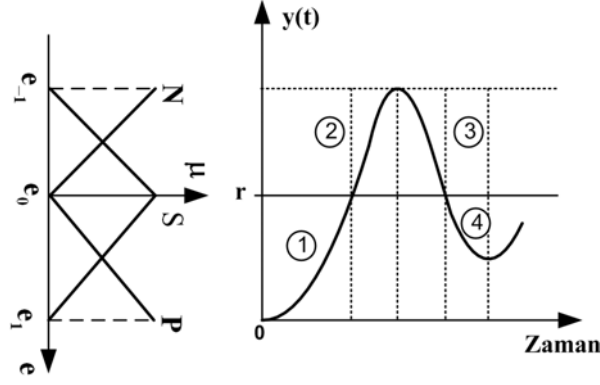


Şekil 4.10 : 5x5 giriş üyelik fonksiyonları (25 kural) durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.



Şekil 4.11 : 7x7 giriş üyelik fonksiyonları (49 kural) durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.

Bu tez çalışmasında, önerilen “hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemini” daha iyi bir biçimde açıklamak için (e) ve (Δe) girişlerine üç üyelik fonksiyonunun atandığı özel bir durum dikkate alınmış ve kural ağırlıklarının bölgelere göre etkisi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Hata (e) girişine atanan üyelik fonksiyonu sayısının üç olmasından ötürü bulanık kural ağırlıklandırması için Şekil 4.12’de görüldüğü gibi dört ana bölge elde edilmiştir.



Şekil 4.12 : Sistem birim basamak yanıtının hata değişkenine atanan 3 üyelik fonksiyonuna bağlı olarak bölgelere ayrıştırılması.

Tanımlayıcı kurallara bağlı olarak, daha önce (4.11) ve (4.12) ifadeleri ile tanımlanan $f_1(e) = |e|$ ve $f_2(e) = 1 - |e|$ fonksiyonları kullanılarak, her bir bölge için bulanık kural ağırlıklandırması aşağıda açıklanmıştır.

a) Bölge 1: Bu bölgede, hatanın mutlak değeri 1'den 0'a azalmaktadır. Dolayısıyla hatanın mutlak değeri 1'den 0'a azalırken, gerekli sistem yanıt hızını sağlamak için sekizinci ve yedinci bulanık kurallarının önemi azalırken beşinci ve dördüncü bulanık kurallarının önemi artmaktadır. Böylelikle bulanık kural ağırlıkları

$$w_4 = f_2, w_5 = f_2, w_7 = f_1, w_8 = f_1$$

biçiminde uyarlanır.

b) Bölge 2: Bu bölgede hatanın mutlak değeri 0'dan maksimum üstten aşım değerine artmaktadır. Üstten aşımı önlemek için, birinci, ikinci, dördüncü ve beşinci bulanık kurallarının önemi maksimum olarak tutulmalıdır. Böylelikle bulanık kural ağırlıkları aşağıdaki gibi uyarlanır.

$$w_1 = f_2, w_2 = f_2, w_4 = f_2, w_5 = f_2$$

c) Bölge 3: Bu bölgede hatanın mutlak değeri maksimum üstten aşım değerinden 0'a azalmaktadır. Böylelikle sistem yanıtının gerekli hızını elde etmek için ikinci ve üçüncü bulanık kuralların önemi azalırken beşinci ve altıncı bulanık kuralların önemi artmaktadır. Bu durumda bulanık kural ağırlıkları aşağıdaki gibi uyarlanır.

$$w_2 = f_1, w_3 = f_1, w_5 = f_2, w_6 = f_2$$

d) Bölge 4: Bu bölgede hatanın mutlak değeri 0'dan 1'e artmaktadır. Alttan aşımı önlemek için beşinci, altıncı, sekizinci ve dokuzuncu bulanık kuralların önemi maksimum olarak tutulmalıdır. Böylelikle bulanık kural ağırlıkları aşağıdaki gibi uyarlanır.

$$w_5 = f_2, w_6 = f_2, w_8 = f_2, w_9 = f_2$$

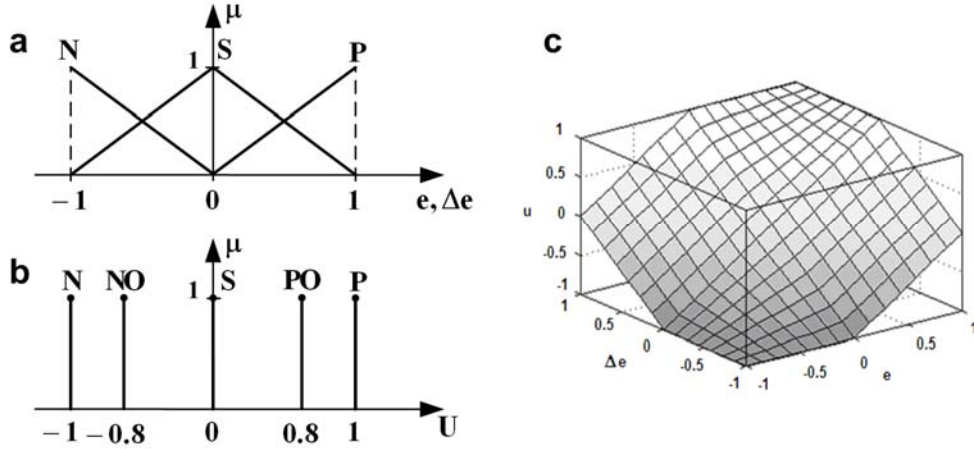
3x3 giriş üyelik fonksiyonları durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu Şekil 4.9'de gösterilmiştir.

4.3.2 Benzetim sonuçları

“Hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin” etkinliğini göstermek amacıyla dört farklı sistem için benzetimler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörü ve bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip olmayan klasik özayarlamasız bulanık PID kontrolörü iki farklı test sistemlerine uygulanmış, elde edilen sistem yanıtları ve kontrol işaretleri karşılaştırılmıştır. Daha sonra, özayarlamasız bulanık PID kontrolörüne ilave olarak, bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin bazı özel şartlar altında (örneğin, bütün bulanık kural ağırlıklarının eşit seçilmesi halinde $f_1 = f_2$ olma durumu) ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine benzemesinden dolayı “hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine” sahip bulanık PID kontrolör ve Mudi ve Pal (1999) tarafından önerilen çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine sahip bulanık PID kontrolör iki farklı sisteme uygulanarak elde edilen yanıtlar karşılaştırılmıştır. Benzetimler süresince, bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip olmayan klasik bulanık PID kontrolör BKY (**B**ulanık **K**ontrolör **Y**öntemi), çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine sahip bulanık PID kontrolör ÇAY (**Ç**ıkış ölçekleme çarpanı **A**yarlama **Y**öntemi) ve hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör ise HATKAY (**H**ata **T**abanlı **K**ural **A**ğırlıklandırma **Y**öntemi) olarak ifade edilmiştir.

Benzetimlerde, 0.1sn. örnekleme zamanına sahip ayrık benzetim yöntemi kullanılmıştır. Karşılaştırmalarda eşit şartları sağlamak amacıyla bulanık PID kontrolörlerin giriş ve çıkış değişkenlerine aynı tipte ve sayıda üyelik fonksiyonları atanmıştır. Girişler için düzgün dağılımlı üçgen tip üyelik fonksiyonları ve çıkış için tekil tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Giriş değişkenleri üç değişik bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır: N: Negatif; S: Sıfır; P: Pozitif. Çıkış değişkeni beş değişik

bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır: N: Negatif; NO: Negatif Orta; S: Sıfır; PO: Pozitif Orta; P: Pozitif. Girişler ve çıkış için atanan üyelik fonksiyonları ile kural tabanına bağlı olarak elde edilen kontrol yüzeyi sırasıyla Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Bulanık PID kontrolörler için Çizelge 4.4’te verilen köşegen simetrik kural tabanı kullanılmıştır.



Şekil 4.13 : (a) e ve Δe girişleri için üyelik fonksiyonları, (b) U çıkışı için üyelik fonksiyonları; (c) Kontrol yüzeyi.

Çizelge 4.4 : Bulanık PID kontrolörü için kural tabanı tablosu.

$e / \Delta e$	N	S	P
N	N (w_1)	NO (w_2)	S (w_3)
S	NO (w_4)	S (w_5)	PO (w_6)
P	S (w_7)	PO (w_8)	P (w_9)

Hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörünün geçici yanıtı başarımını diğer bulanık PID kontrolörlerin başarımı ile kıyaslamak amacıyla beş değişik başarım ölçütü dikkate alınmıştır. Bu başarım ölçütlerinden iki tanesi klasik geçici sistem yanıtı kriterlerinden seçilmiştir. Bunlar sırasıyla maksimum aşım (%OS) ve yerleşme zamanıdır (T_s). Diğer üç başarım ölçütü, “ e ” hata değeri olmak üzere aşağıda verilmiştir.

a) Mutlak Hatanın Toplamı (IAE):

$$IAE = \sum_{k=1}^n |e_k| \quad (4.13)$$

b) Mutlak Hatanın Zaman ile Çarpımının Toplamı (ITAE):

$$ITAE = \sum_{k=1}^n |e_k| \cdot k \quad (4.14)$$

c) Kontrol girişine ait Toplam Sapma (TV) (Skogestad, 2003):

$$TV = \sum_{k=1}^n |u_{k+1} - u_k| \quad (4.15)$$

Bulanık kural ağırlıklarının başlangıç değerleri normal koşullarda olduğu gibi “1” seçilmiştir.

Sistem III:

Bu benzetimde sağ yarı-düzlemde sıfıra sahip üçüncü mertebeden sistem ele alınmıştır (Aström ve Hägglund, 2000).

$$G_p(s) = \frac{1-s}{(s+1)^3} \quad (4.16)$$

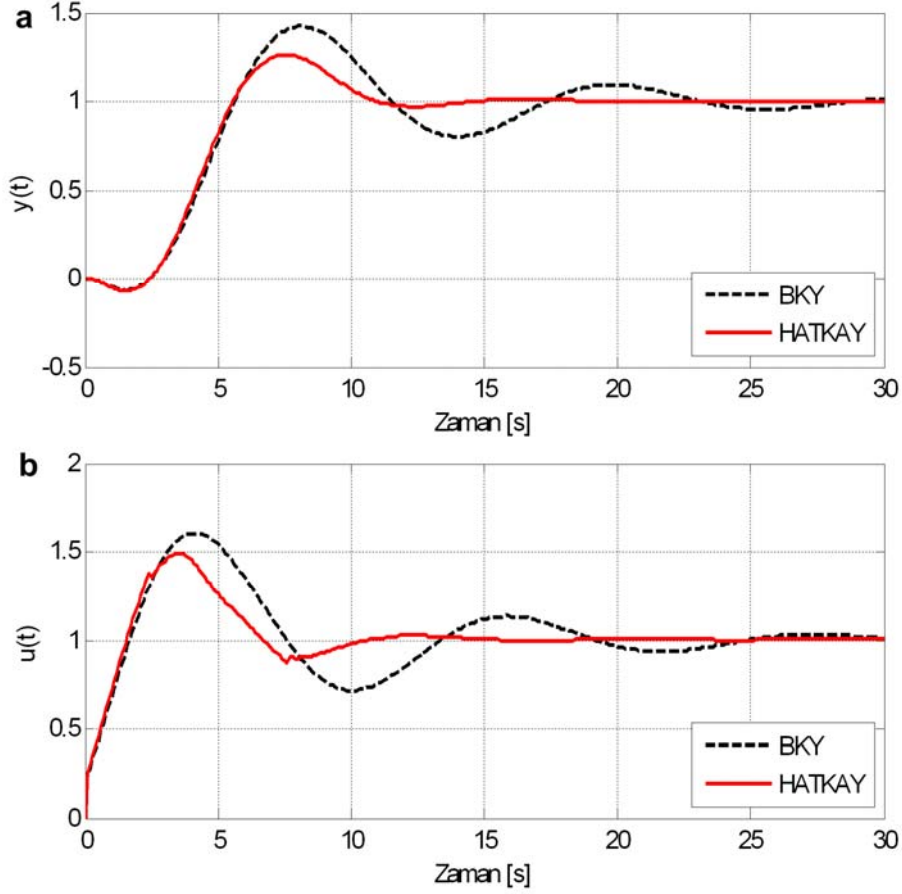
Sistemin kontrolünün zorluğu sıfırın konumunun merkeze yaklaşması ile artmaktadır. Bulanık PID kontrolörlerine ait ölçekleme çarpanları aşağıdaki gibi alınmıştır.

$$K_e = 1, K_d = 1, \beta = 0.6, \alpha = 0.2 \quad (4.17)$$

Yukarıdaki ölçekleme çarpanları ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtına neden olmaktadır. BKY ile HATKAY’a ait birim basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.14’te gösterilmiştir. Dikkate alınan başarımlar ölçütlerine göre bulanık PID kontrolörlerin başarımlar analizleri Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Sistem III için başarımlar analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	T _s (s)	IAE	ITAE	TV
BKY	43	21.8	7.145	44.1	0.324
HATKAY	21	10.3	5.125	16.53	0.214



Şekil 4.14 : Sistem III için sonuçlar: (a) Sistem yanıtları ve (b) Kontrol işaretleri.

Sistem IV:

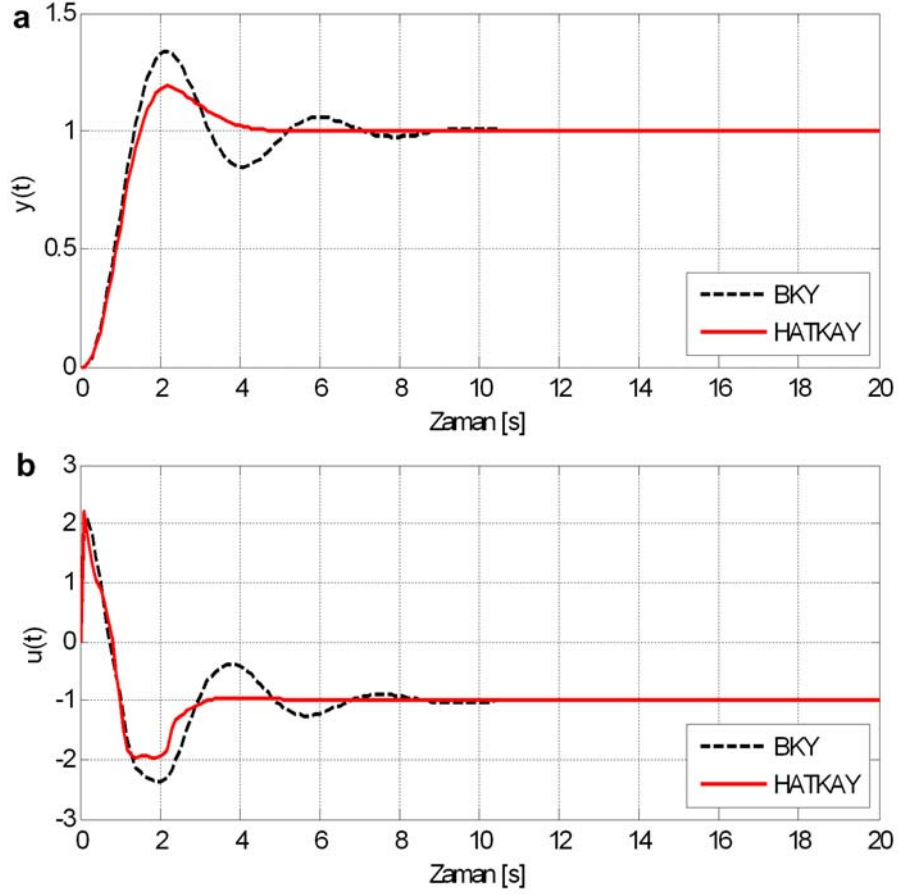
Bu benzetimde sağ yarı-düzlemde eşit iki kutba sahip ikinci mertebeden sistem ele alınmıştır (Aström ve Hägglund, 2000).

$$G_p(s) = \frac{1}{(s^2 - 1)} \quad (4.18)$$

Bu ters sarkacın basit bir modelidir. Bulanık PID kontrolörüne ait ölçekleme çarpanları aşağıdaki gibi alınmıştır.

$$K_e = 1, K_d = 1, \beta = 3, \alpha = 2.6 \quad (4.19)$$

Yukarıdaki ölçekleme çarpanları ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtına neden olmaktadır. BKY ile HATKAY'a ait birim basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 : Sistem IV için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.

Dikkate alınan başarımlar ölçütlerine göre bulanık PID kontrolörlerin başarımlar analizleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Sistem IV için başarımlar analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	$T_s(s)$	IAE	ITAE	TV
BKY	33.9	8.2	1.592	2.883	0.998
HATKAY	23.1	3.91	1.356	1.951	0.748

Eğer tüm bulanık kurallar için kural ağırlıkları aynı seçilirse, örneğin $f_1 = f_2$, bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine benzecektir. Bu sebeple hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör, Mudi ve Pal (1999) tarafından önerilen çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine sahip bulanık PID kontrolör ile ve bulanık kural

ağırlıklandırma yöntemine sahip olmayan klasik özayarlamasız bulanık PID kontrolör ile karşılaştırılmıştır.

Sistem V:

Genellikle çoğu yüksek mertebeden sistemlerin ikinci mertebeden ölü zamanlı doğrusal sistemler olarak modellenmesinden ötürü, Mudi ve Pal (1999) ile verilen aşağıdaki sistem dikkate alınmıştır.

$$G_p(s) = \frac{e^{-0.3s}}{s^2 + s + 0.2} \quad (4.20)$$

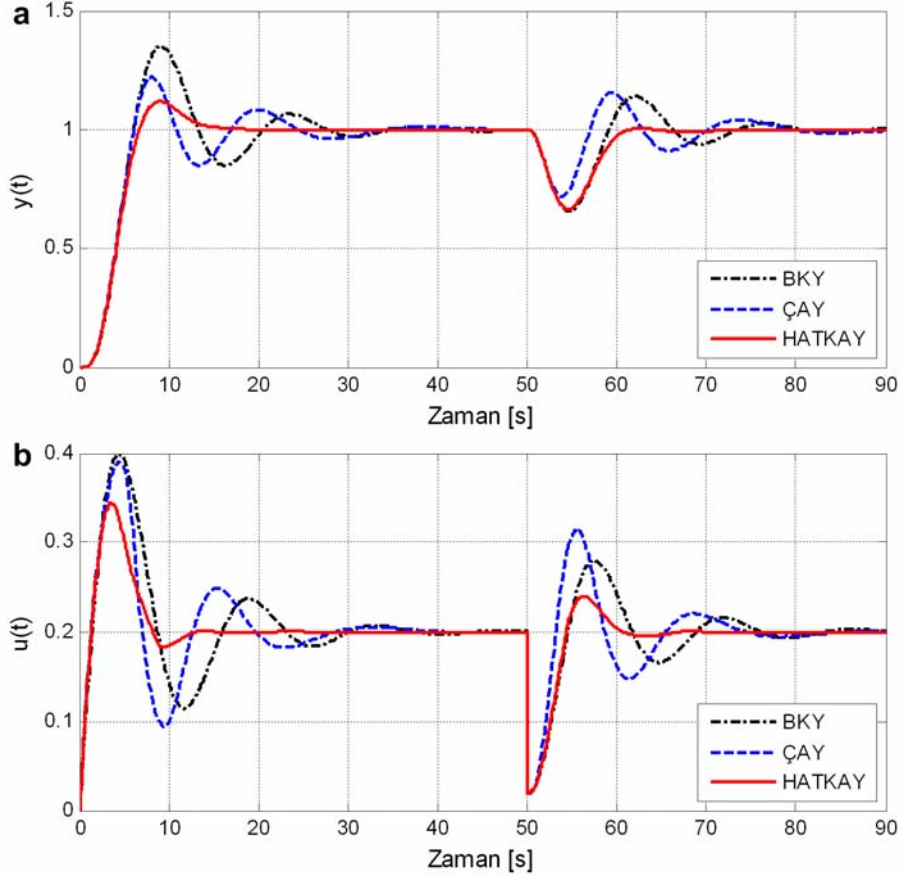
Aşağıda verilen ölçekleme çarpanları da Mudi ve Pal (1999)'dan alınmıştır.

$$K_e = 0.9, K_d = 13.5, \beta = 0.02, \alpha = 0 \quad (4.21)$$

Yukarıdaki ölçekleme çarpanları ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtına neden olmaktadır. Bulanık PID kontrolörlerin bozucuya karşı olan dayanıklılıklarını test etmek amacıyla sisteme 50. saniyede 0.18 genlikli bozucu uygulanmıştır. BKY, ÇAY ve HATKAY'a ait birim basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Dikkate alınan başarımlar ölçütlerine göre bulanık PID kontrolörlerin başarımlar analizleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Sistem V için başarımlar analizleri.

Bulanık PID kontrolör:	%OS	T _s (s)	IAE	ITAE	TV
BKY	35	25.2	9.626	215.9	0.1535
ÇAY	22	22.4	8.35	185.4	0.1682
HATKAY	12	12	6.779	127	0.098



Şekil 4.16 : Sistem V için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.

Başarım analizi sonuçlarından da görüldüğü gibi, hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör diğer bulanık PID kontrolörlere nazaran beklenildiği gibi aşımı azaltmıştır. Şekil 4.16’da gösterildiği gibi, bütün bulanık PID kontrolörler yaklaşık olarak aynı yükselme zamanına sahipken önerilen bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör diğerlerine nazaran çok daha küçük yerleşme zamanına sahiptir. Bunun yanında hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık kontrolörün IAE ve ITAE değeri diğerlerine oranla çok daha düşük elde edilmiştir. Son olarak önerilen yöntemle sahip bulanık kontrolör düşük bir TV değere sahiptir ki bu da yumuşak kontrol işaretine sahip olduğunu göstermektedir.

Sistem VI:

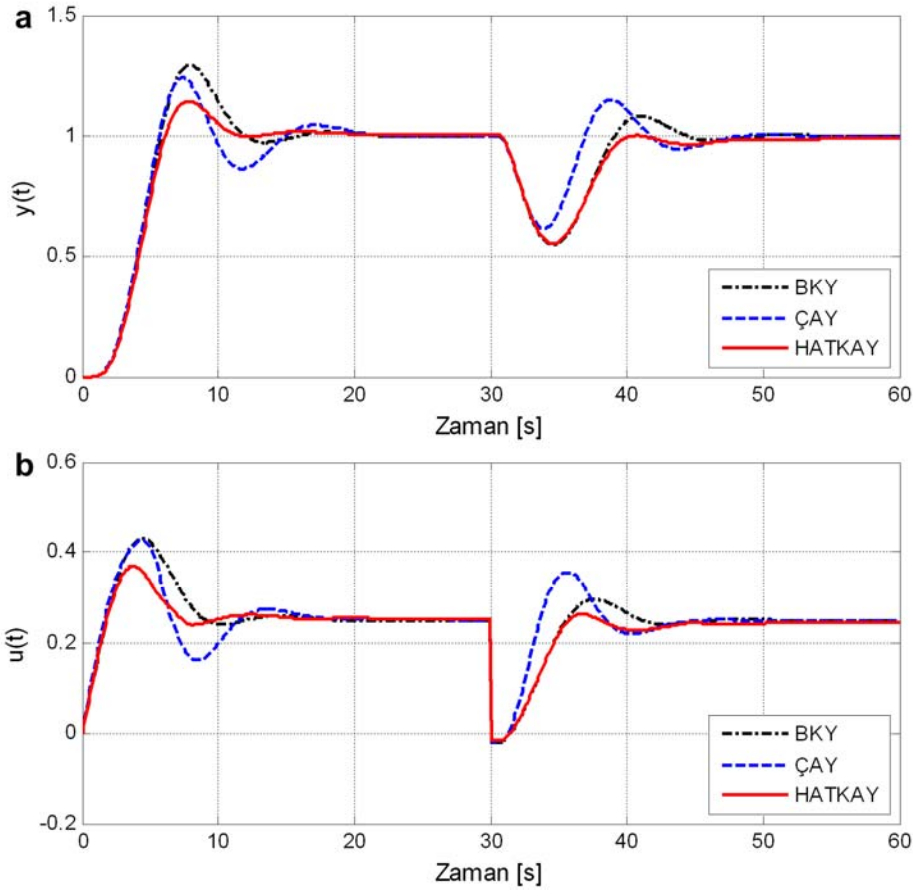
Mudi ve Pal (1999)’da verilen aşağıdaki doğrusal olmayan sistem dikkate alınmıştır.

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} + 0.25y^2 = u(t - L) \quad (4.22)$$

Mudi ve Pal (1999)'da verildiği gibi sistemdeki L parametresi değeri 0.5 ve bulanık PI kontrolörün ölçekleme çarpanları aşağıdaki gibi alınmıştır.

$$K_e = 0.9, K_d = 11, \beta = 0.018, \alpha = 0 \quad (4.23)$$

Bu ölçekleme çarpanları kullanılarak küçük yükselme zamanına sahip salınımlı sistem yanıtı elde edilmektedir. Bulanık PID kontrolörlerin bozucuya karşı olan dayanıklılıklarını test etmek amacıyla sisteme 30. saniyede 0.27 genlikli bozucu uygulanmıştır. BKY, ÇAY ve HATKAY'a ait birim basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Dikkate alınan başarımlar ölçütlerine göre bulanık PID kontrolörlerin başarımlar analizleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.17 : Sistem VI için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 4.8 : Sistem VI için başarımlar analizleri.

Bulanık PID kontrolör:	%OS	T _s (s)	IAE	ITAE	TV
BKY	26.3	11.6	7.90	113.4	0.1212
ÇAY	22	14.6	7.27	96.1	0.1458
HATKAY	13.4	10	7.25	106.1	0.1119

Doğrusal sistem için elde edilen sonuçlara benzer olarak, hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip olan bulanık PID kontrolör doğrusal olmayan sistem için de geçici sistem yanıtı başarımlarını artırmıştır. Maksimum aşım ve yerleşme zamanı değerleri azalırken yükselme zamanı yaklaşık olarak aynı değerde tutulmuştur. Bunlara ilave olarak IAE, ITAE ve TV değerleri de bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör için başarımların artırıldığını göstermektedir.

4.3.3 Deney sonuçları

Hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin gerçek zamanlı sistem üzerinde de uygulanabilirliğini ve etkinliğini göstermek amacıyla söz konusu yöntemine sahip olan ve olmayan bulanık PID kontrolörler FEEDBACK PCS 327 Proses Kontrol Simülatörü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu simülatör proses kontrol yöntemlerinin esaslarına izin veren, gömülü devre işlevsel yükselteçlere sahip özel amaçlı analog bir simülatördür. Doğrusal olmayan fonksiyonlar ile beraber birçok değişken bağlantısı simülatörü, doğrusal ve doğrusal olmayan proseslerin dinamik yanıtları ile oransal, integral, türev ve sistem başarımlarını artıran diğer birçok kontrol özellikleri üzerinde detaylı olarak çalışma yapılabilmesi açısından çok yönlü kılınmaktadır.

Proses simülatörü temel olarak transfer fonksiyonu $\frac{1}{s+1}$ olan sabit bir sistemden, zaman sabitleri bir düğme vasıtasıyla 1 sn yada 10 msn konumuna getirilebilen ve transfer fonksiyonları sırasıyla $\frac{1}{s+1}$ ve $\frac{1}{s}$ olan iki adet ilave sistemden, yine gecikme zamanı değeri düğme vasıtasıyla 1 sn yada 10 msn konumuna getirilebilen bir adet ölü zaman elemanından ve bir adet dönüştürücü elemanından oluşmaktadır. Zaman sabitleri değiştirilebilen iki adet sistem elemanı bir anahtar yardımıyla istenen

transfer fonksiyonu elde edilmek amacıyla sistem yada integratör konumuna getirilebilmektedir. Dönüştürücü, girişini ”-1” değeri ile çarparak işaret değişimini sağlamaktadır. Bu elemanlar kullanılarak sistem tipi 0, 1, 2 olmak üzere 12 değişik doğrusal sistem transfer fonksiyonu elde edilebilir.

Bu elemanlara ilave olarak simülatör üzerinde oluşturulan sistem çıkışını algılayan ve ölçen elemanlar ile sistem çıkışını ve referans değerini sürekli olarak takip eden bir gösterge, PID kontrolörüne ait oran, integral ve türev bileşenlerinin değerlerinin ayarlandığı düğmeler mevcuttur. Ancak bu çalışmada kontrolör olarak NI PCI-6221 veri toplama kartı kullanıldığı için PID kontrolörüne ait olan oran, integral ve türev elemanları kullanılmamıştır.

Bu tez çalışmasında hata tabanlı ağırlıklandırma yöntemini gerçeklemek amacıyla ikinci dereceden ölü zamanlı sistem modeli oluşturmak için simülatör üzerinde transfer fonksiyonları $\frac{1}{s+1}$ olan iki sistem elemanı ve bir ölü zaman elemanı seri olarak bağlanmıştır. Her bir sistem elemanının zaman sabiti ve ölü zaman değeri “1” olarak ayarlanmıştır. Buna ilave olarak ölü zaman değerini artırarak daha zor kontrol edilebilir bir sistem elde etmek amacıyla değeri “0.5” olan bir ölü zaman elemanı ilave bir donanım yoluyla sisteme eklenmiştir.

Proses simülatörü üzerinde oluşturulan sistem MATLAB benzetim programını çalıştıran ve bilgisayara fiziksel olarak bağlanmış NI PCI-6221 veri toplama kartı yoluyla kontrol edilmiştir. Söz konusu kart 16 bit analog işaret giriş özelliğine sahip ve kartta 16 kanal mevcuttur. Her bir kanalın örnekleme hızı 250kS/s’e kadar artabilmektedir. Ayrıca kart 16 bit analog işaret özelliğine sahip 2 çıkışa sahip olup, her kanalın örnekleme hızı 833kS/s’e kadar çıkmaktadır. Veri toplama kartı MATLAB/Simulink benzetim programı ile tamamen uyumludur. Deney setinin genel görünümü Şekil 4.18’de verilmiştir.

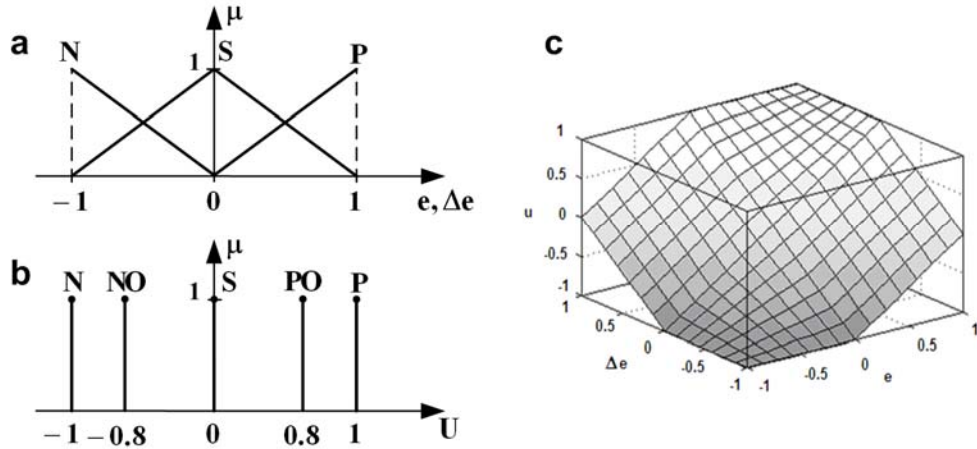
Seri olarak eklenen devre elemanları ile proses simülatörü üzerinde oluşturulan tüm sistemin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)(s+1)} e^{-1.5s} \quad (4.24)$$



Şekil 4.18 : FEEDBACK PCS 327 Proses Kontrol Simülatörü deney seti.

Bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip olan ve olmayan bulanık PID kontrolörler MATLAB benzetim programını çalıştıran bir bilgisayara fiziksel olarak bağlanmış NI PCI-6221 veri toplama kartı yoluyla gerçekleştirilmiştir. Gerçek zaman uygulaması için referans değeri 5V ve uygulamanın toplam gerçekleşme süresi 40 sn. olarak alınmıştır. Bulanık PID kontrolörlerine sahip sistem yanıtlarını ve kontrol işaretlerini karşılaştırmak amacıyla, tasarlanan bulanık PID kontrolörlerinin giriş ve çıkış değişkenleri için tanımlanan üyelik fonksiyonları ile bulanık kural tabanına bağlı olarak elde edilen kontrol yüzeyi Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Bulanık PID kontrolörleri için kural tablosu Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.19 : (a) e ve Δe girişleri için üyelik fonksiyonları, (b) U çıkışı için üyelik fonksiyonları; (c) Kontrol yüzeyi.

Çizelge 4.9 : Bulanık kural tabanı.

e /Δe	N	S	P
N	N (w ₁)	NO (w ₂)	S (w ₃)
S	NO (w ₄)	S (w ₅)	PO (w ₆)
P	S (w ₇)	PO (w ₈)	P (w ₉)

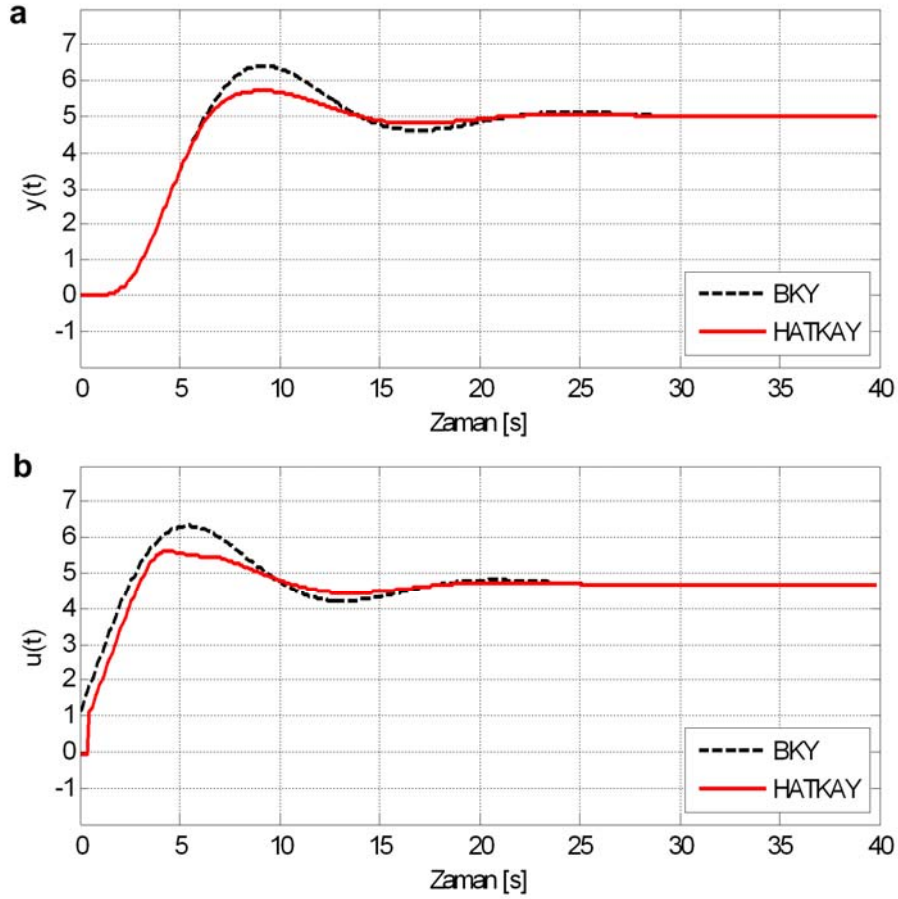
Sistem modeli kullanılarak küçük yükselme zamanı ile hızlı bir sistem yanıtı elde edebilmek amacıyla bulanık PID kontrolörler için aşağıda verilen ölçekleme çarpanları kullanılmıştır.

$$K_e = 0.2, K_d = 0.2, \beta = 0.15, \alpha = 1 \quad (4.25)$$

Yukarıda verilen ölçekleme çarpanlarının kullanılması ile yüksek değerde olmayan bir aşım ile salınımlı bir sistem yanıtı elde edilir. BKY ve HATKAY'a ait basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Dikkate alınan başarımlar ölçütlerine göre bulanık PID kontrolörlerin başarımlar analizleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Deney için başarımlar analizleri.

Bulanık PID kontrolör:	%OS	T _s (s)	IAE	ITAE	TV
BKY	28.2	19.3	30.6	163.56	0.813
HATKAY	14.2	12.5	26.1	106.75	0.726



Şekil 4.20 : Proses Simülatöründe oluşturulan sistem için deney sonuçları:
(a) Sistem yanıtları ve (b) Kontrol işaretleri.

Gerçek zaman uygulamasından elde edilen sonuçlar, benzetimlerden elde edilen sonuçları desteklemektedir. Uygulama sonucuna ait sistem yanıtlarından da görüldüğü gibi maksimum aşım ve yerleşme zamanı değerleri sırasıyla %50 ve %40 oranında azalmıştır. Bu değerlere bağlı olarak toplam mutlak hata değerinde de iyileştirmeler sağlanmıştır. Ayrıca kontrol işaretinin yumuşaklığını gösteren küçük TV parametre değeri elde edilmiştir.

4.4 Birimselleştirilmiş İvme Tabanlı Kural Ağırlıklandırma Yöntemi

4.4.1 Birimselleştirilmiş ivme kavramı

Birimselleştirilmiş ivme sistem yanıtının hızlılığı yada yavaşlılığı hakkında “Bağıl hız” bilgisi vermektedir. Birimselleştirilmiş ivme kavramına ilişkin kapsamlı analiz Güzelkaya ve diğ. (2003)’de ve Eksin ve diğ. (2001)’de bulunabilir.

Birimselleştirilmiş ivme $r_v(k)$ aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$r_v(k) = \frac{de(k) - de(k-1)}{de(.)} = \frac{dde(k)}{de(.)} \quad (4.26)$$

Burada, $e(k)$ sistem hata değeri ve $de(k)$ hata değerindeki değişim olarak bilinir ve

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4.27)$$

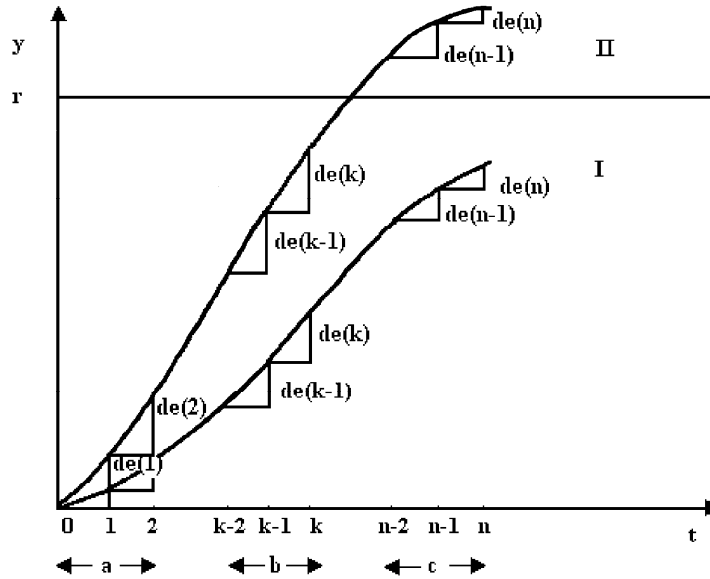
olarak verilir. Eşitlik (4.26)' da verilen $dde(k)$ ise hata değerindeki hızlanmadır ve

$$dde(k) = de(k) - de(k-1) \quad (4.28)$$

biçiminde ifade edilir. Eşitlik (4.26)' da verilen $de(.)$ ise

$$de(.) = \begin{cases} de(k) & \text{eger } |de(k)| \geq |de(k-1)| \\ de(k-1) & \text{eger } |de(k)| < |de(k-1)| \end{cases} \quad (4.29)$$

şeklinde ifade edilir. Bağıl hızın gösterimi Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 : Basamak girişi için sistem yanıtına ait bağıl hızların gösterimi.

Sistem yanıtı yumuşak ve kararlı artma yada azalmaya sahip olduğu zaman $de(k)de(k-1)$ çarpımı pozitif olacaktır ve sistem yanıtının “hızlılık” ve “yavaşlık” bilgisi yeni değişken r_v kullanılarak belirlenebilecektir. Bağıl hız kavramının önemli

ve ilginç bir özelliği Şekil 4.21’ den de görüldüğü üzere farklı zaman sabitlerine sahip iki sistem yanıtı eğrilerinin aynı $r_v(k)$ değerlerine sahip olmasıdır. Eğer hatadaki değişimin mutlak değeri bir önceki değer olan $|de(k-1)|$ ’ den büyük ise o zaman sistem yanıtı “hızlı” biçimde artmakta yada azalmaktadır. Bunun aksine hatadaki değişimin mutlak değeri bir önceki değer olan $|de(k-1)|$ ’ den küçük ise o zaman da sistem yanıtı “yavaş” biçimde artmakta yada azalmaktadır. Çizelge 4.11 dde(k) ve de(.) işaretlerine bağlı olarak sistem yanıtının “hızlılık” yada “yavaşlık” durumu hakkındaki bilgileri göstermektedir.

Çizelge 4.11 : De(.) ile dde(k) işaretleri arasındaki ilişki ve sistem yanıtının yapısı.

de(k-1) yada de(k)	dde(k)	Sistem yanıtı
Pozitif	Pozitif	Hızlı
Pozitif	Negatif	Yavaş
Negatif	Pozitif	Yavaş
Negatif	Negatif	Hızlı

Eşitlik (4.26)’ da verilen birimselleştirilmiş ivme ifadesi sistem yanıtının hızına ilişkin $[-1, 1]$ aralığında bir değer üretir. Eğer sistem yanıtı çok hızlı ise o zaman $r_v(k)$ “1” değerine ve eğer sistem yanıtı çok yavaş ise $r_v(k)$ “-1” değerine yakınsar. Sistem yanıtı sabit bir hızla azalıyor yada artıyorsa hızlılığın orta seviyede olduğu anlaşılır ve bu kez $r_v(k)$ “0” değerine yakınsar.

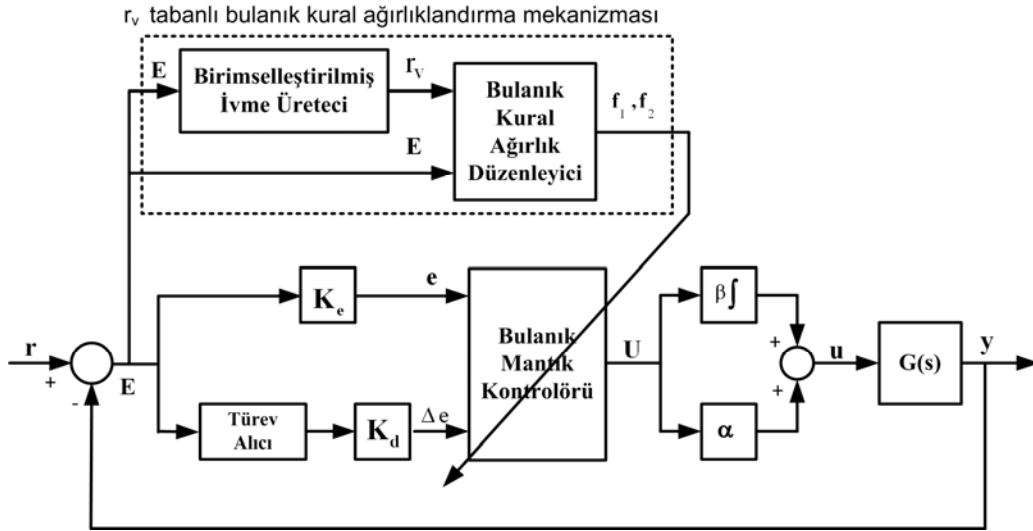
4.4.2 Kural ağırlıklandırma yönteminin açıklanması

Şekil 4.1’ de gösterilen bulanık PID kontrolör yapısı için kapalı çevrim sistemin birim basamak yanıtı, Şekil 4.2’ de gösterildiği biçimde kontrolörün giriş değişkeni olan hataya (e) atanan üyelik fonksiyonu sayısına bağlı olarak $2(n+1)$ adet ana bölgeye bölünebilir. Sistem birim basamak yanıtının hata değişkenine atanan üyelik fonksiyonu sayısına bağlı olarak bölgelere ayrıştırılması Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

İstenen sistem başarımını sağlayabilmek için her bir bölgede gerekli kontrol işaretinin elde edilebilmesine ilişkin analiz, bu analiz sonucunda oluşturulan tanımlayıcı kurallar ve söz konusu tanımlayıcı kurallar ile kural ağırlıklarının ilişkilendirilmesi Bölüm 4.3.1’de verilmiştir.

Şekil 4.6’da gösterilen ve Bölüm 4.3.1’de detaylı olarak anlatılan bölgeler arasındaki simetri özelliği ve daha önce verilen tanımlayıcı kurallar kullanılarak, bulanık kurallara ait ağırlık değerleri Şekil 4.23’te gösterildiği gibi e ve e_0 merkezlerinin kesişimine göre simetrik olarak uyarlanmalıdır.

Sistem hata bilgisinin her bir bölgede ve her örnekleme anında elde edilebileceği açıktır. Bundan dolayı birimselleştirilmiş ivme değeri de her bir bölgede ve her örnekleme anında hesaplanabilir. Dolayısıyla, bulanık kural ağırlıklandırması sistem hata değişkenini ve birimselleştirilmiş ivme değişkenini girişleri olarak kullanan bir bulanık kural ağırlık düzenleyici mekanizması ile gerçekleştirilebilir (Karasakal ve diğ, 2010b). Hata ve birimselleştirilmiş ivme giriş değişkenlerinin $[1, -1]$ aralığında olmasından ötürü bulanık ağırlık düzenleyici mekanizması için ilave giriş ölçekleme çarpanlarının kullanılmasına ihtiyaç yoktur. Bulanık mekanizmanın çıkışı " γ " olarak tanımlanmıştır. Birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine ait blok gösterim Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22 : Birimselleştirilmiş ivme tabanlı kural ağırlıklandırma yönetimi kullanan bulanık PID kontrolörün kapalı çevrim kontrol yapısı.

Bulanık kural ağırlıklarının $[0,1]$ aralığında değer almasından dolayı γ parametresi de $[0,1]$ aralığında değer almaktadır. Bu doğrultuda aşağıdaki fonksiyonlar doğrudan bulanık kural ağırlıkları olarak atanmıştır.

$$f_1 = b \cdot \gamma \quad (4.30)$$

$$f_2=1-\gamma \quad (4.31)$$

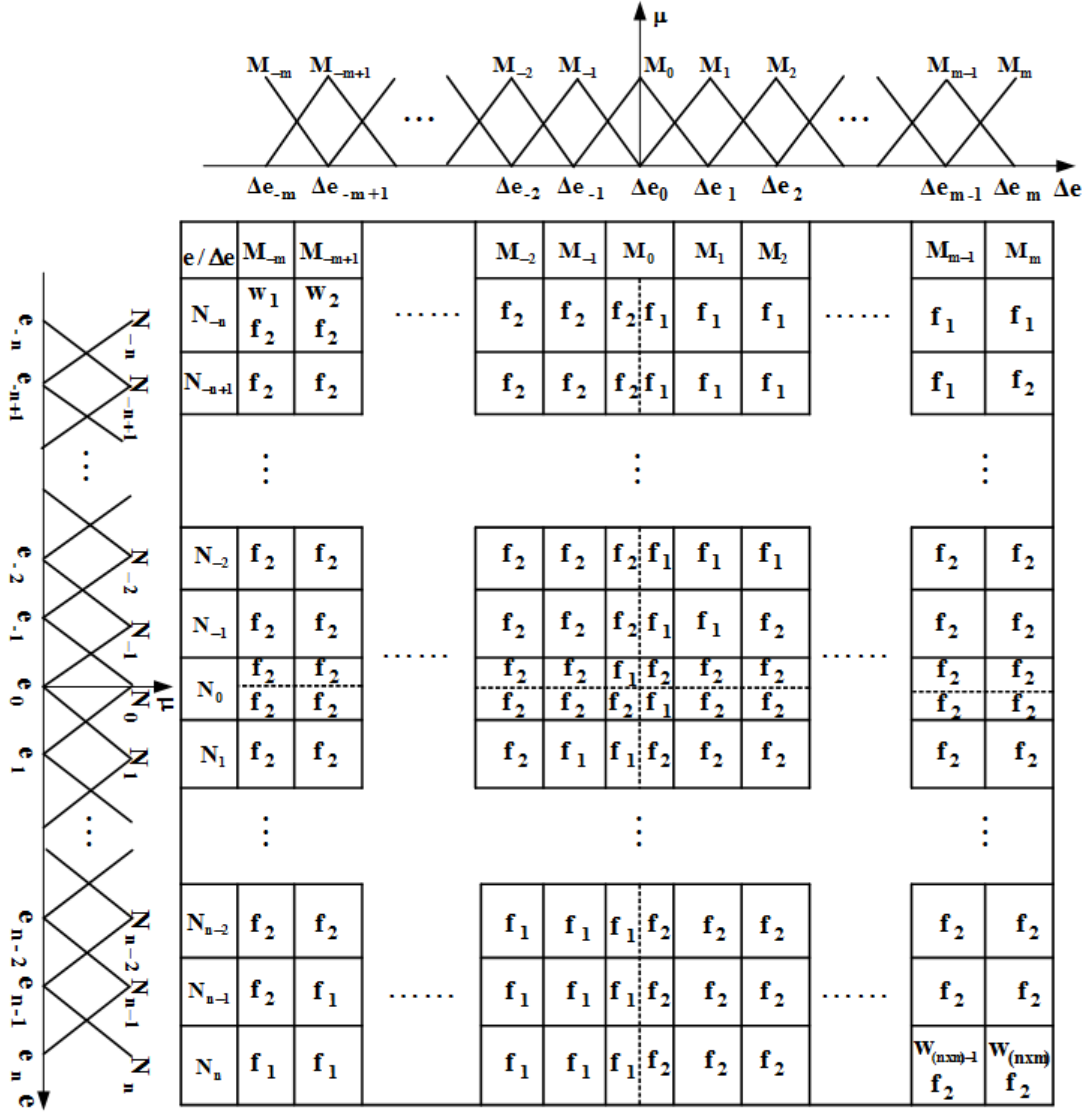
Bu atamalar ile γ parametre değeri bulanık kural ağırlıklarının uyarlanması bir ayarlama parametresi haline gelmiştir. Hata ve hatanın değişimi için tanımlanmış olan üyelik fonksiyonlarına bağlı olarak ve daha önce bahsedilen tamamlayıcı kurallar doğrultusunda yukarıda elde edilen f_1 ve f_2 fonksiyonlarının bulanık kural ağırlıkları olarak dizilişi Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Tablolarda gösterilen kesikli çizgiler, çizginin bulunduğu hücredeki bulanık kural ağırlığının iki bölge tarafından ortak olarak paylaşıldığını belirtmektedir.

Birinci bölgede sistem hata değeri kendisinin en büyük değerine sahip olmasından dolayı özel bir önlem alınması gerekmektedir. Bu anlamda, sistemin aşırı hızlanmasını ve dolayısıyla da olası aşımaları önlemek amacıyla Eşitlik (4.30)'daki "b" parametresinin değeri, sistem yanıtının ilk kez bulunduğu ve yalnızca birinci bölge için pozitif sonuç kısmına sahip bulanık kural ağırlığının uyarlanması maksadıyla Eşitlik (4.32) ile verilen fonksiyon değeri olarak tanımlanmıştır.

$$b = \frac{1}{(2n-1)^2} \quad (4.32)$$

Diğer tüm durumlar ve bölgeler için ise "b" parametresinin değeri "1" olarak alınmıştır.

Şekil 4.23, $n \times m$ giriş üyelik fonksiyonu için genel bulanık kural ağırlıklandırma tablosunu göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere f_1 ve f_2 fonksiyonlarının dizilişi e_0 ve Δe_0 merkezlerinin kesişimine göre simetrik bir yapıya sahiptir. Örneğin, M_m ve N_{n+1} öncül üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık kural f_2 bulanık kural ağırlık fonksiyonuna ihtiyaç duymaktadır. Sonrasında orjine göre (e_0 ve Δe_0 merkezlerinin kesişimi) M_m ve N_{n-1} öncül üyelik fonksiyonlarına sahip olan simetrik kural da aynı f_2 bulanık kural ağırlık fonksiyonuna ihtiyaç duyacaktır.

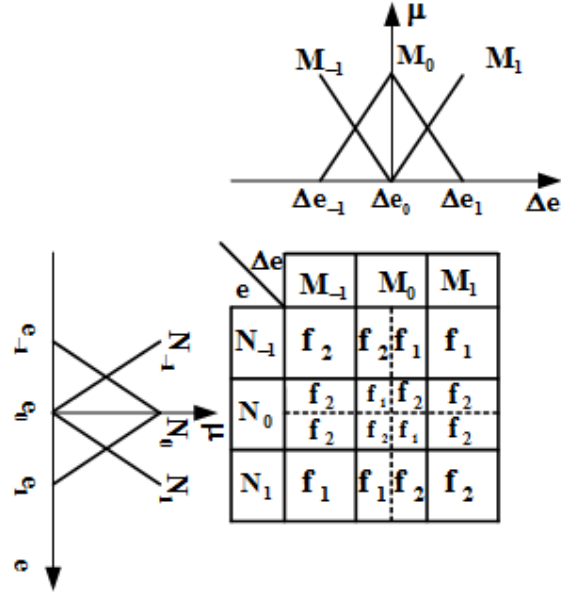


Şekil 4.23 : nxm giriş üyelik fonksiyonları için kural ağırlıklandırma tablosu.

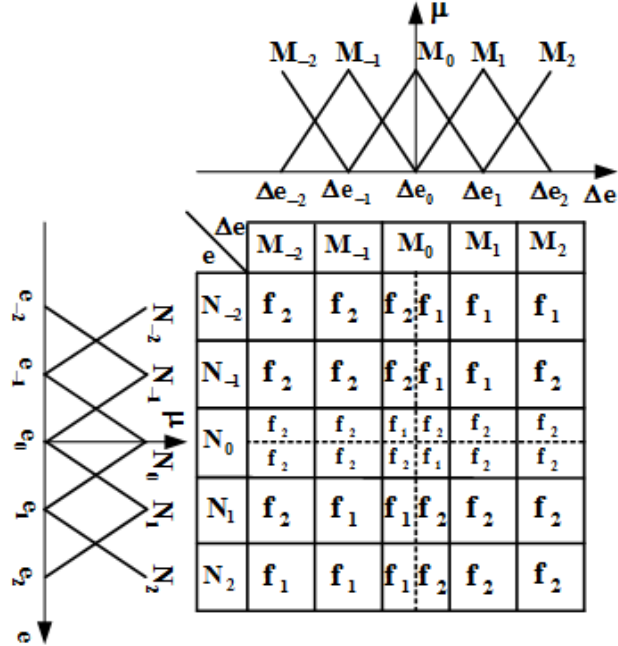
Söz konusu şekillerde verilen bulanık kural ağırlıklandırma yapılarının, Bölüm 4.3.1’de elde edilen kural ağırlıklandırma yapılarından farkı, (n+1) ve (2n+2) bölgeleri için girişlerin e_0 ve Δe_0 olması durumunda N_0 ve M_0 dilsel ifadelerinin kullanıldığı bulanık kural ağırlık değerinin f_2 yerine f_1 olmasıdır. Bu değişiklik ile (n+1) ve (2n+2) bölgelerinde oluşabilecek üstten ve alttan aşımaları engellemek amacıyla daha uygun değerli kontrol işareti elde edilmektedir.

Literatürde, bulanık PID kontrolörü uygulamalarında genellikle 9, 25 ve 49 kurala sahip kural tabanlarının kullanılmasından ötürü 9, 25 ve 49 kural durumları için bulanık kural ağırlıklandırma yapıları sırasıyla Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da

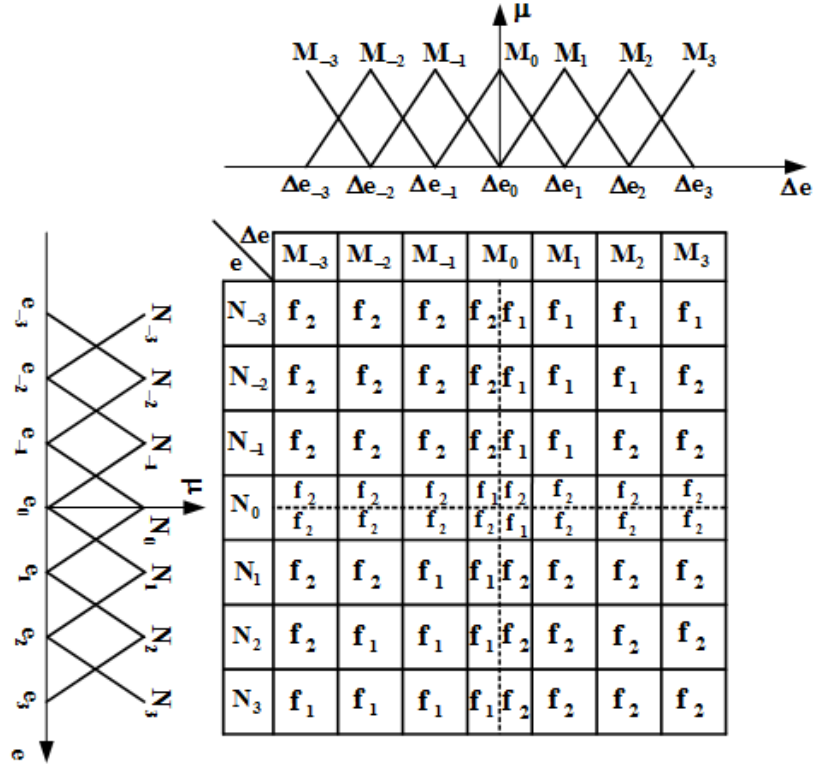
gösterilmiştir. Şekil 4.23 için bahsedilen bulanık kural ağırlık fonksiyonlarının yerleşimindeki simetri durumu 9, 25 ve 49 kural içeren bulanık kural tabanları için de görülebilir.



Şekil 4.24 : 9 kural durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.



Şekil 4.25 : 25 kural durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.



Şekil 4.26 : 49 kural durumu için bulanık kural ağırlıklandırma tablosu.

Şekil 4.23' te verilen bulanık kural ağırlıklandırma yapısındaki f_1 ve f_2 fonksiyonlarının dizilişine göre bulanık kural ağırlık düzenleyici çıkışı olan γ parametresinin elde edilmesine ilişkin tanımlayıcı kurallar aşağıda verilmiştir (Karasakal ve diğ., 2011b).

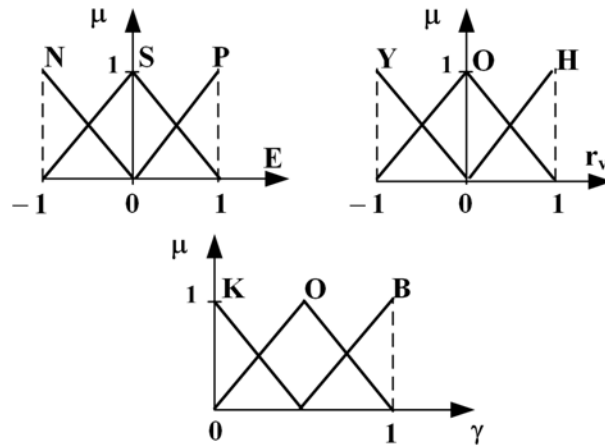
a) Eğer sistem yanıtı hızlıysa, γ küçük değere sahip olmalıdır (Bu durumda f_2 değeri büyük ve f_1 değeri küçük olacaktır). Böylelikle A1 ve D1 bölgeleri için negatif büyük / A2 ve D2 bölgeleri için pozitif büyük değerli kontrol işareti elde edilir ve sistem yanıtı yavaşlatılır. Eğer sistem yanıtı yavaşsa, γ büyük değere sahip olmalıdır (Bu durumda f_2 değeri küçük ve f_1 değeri büyük olacaktır). Böylelikle A1 bölgesi için pozitif büyük / A2 bölgesi için negatif büyük değerli kontrol işareti elde edilir ve sistem yanıtı hızlandırılır.

b) Eğer sistem yanıtı hızlıysa bu durumda küçük γ değerleri, sistem hatası değerinin sıfıra yakın olduğu bölgelerde yavaşça artırılmalıdır. Bu kontrol işaretini yumuşatacaktır.

c) Eğer sistem yanıtı yavaş ve sistem hata değeri büyükse, kontrol işaretini pozitif anlamda (A1 bölgesi için) / negatif anlamda (A2 bölgesi için) artırmak amacıyla γ

değeri büyük olmalıdır. Sistem yanıtı referans değerine yaklaştığı zaman γ değeri kontrol işaretini yumuşatmak amacıyla nisbi olarak azaltılmalıdır.

γ parametresi için yukarıda verilen tanımlayıcı kurallar doğrultusunda 9 ve 25 kurala sahip bulanık kural ağırlık düzenleyicisi için giriş ve çıkış değişkenlerine atanan üyelik fonksiyonları ile kural tabloları örnek olarak aşağıdaki gibi verilebilir. Bulanık kural ağırlık düzenleyici mekanizmanın girişleri ve çıkışı için Şekil 4.27’de gösterilen simetrik düzgün dağılımlı üçgen tip üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır.



Şekil 4.27 : 9 kural için e, rv girişleri ve γ çıkışına atanan üyelik fonksiyonları.

Giriş değişkenleri üç değişik bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır: N: Negatif; S: Sıfır; P: Pozitif ve Y: Yavaş; O: Orta; H: Hızlı.

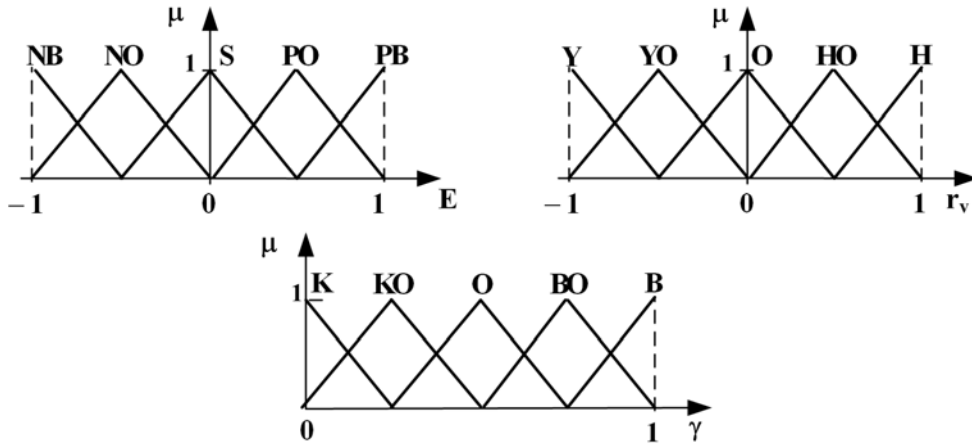
Çıkış değişkeni ise üç değişik bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır: K: Küçük; O: Orta; B: Büyük.

Yukarıda verilen tanımlayıcı kuralları sağlayan kural tablosu Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 : 9 kural için bulanık kural ağırlık düzenleyici için kural tabanı.

E / r_v	Y	O	H
N	B	O	K
S	O	K	K
P	B	O	K

Bulanık kural ağırlık düzenleyici mekanizmanın girişleri ve çıkışı için Şekil 4.28’de gösterilen simetrik düzgün dağılımlı üçgen tip üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır.



Şekil 4.28 : 25 kural için e, rv girişleri ve γ çıkışına atanan üyelik fonksiyonları.

Giriş değişkenleri beş değişik bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır: NB: Negatif Büyük; NO: Negatif Orta; S: Sıfır; PO: Pozitif Orta; PB: Pozitif Büyük ve Y: Yavaş; YO: Yavaş Orta; O: Orta; HO: Hızlı Orta; H: Hızlı. Çıkış değişkeni ise beş değişik bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır: K: Küçük; KO: Küçük Orta; O: Orta, BO: Büyük Orta, B: Büyük.

Yukarıda verilen tanımlayıcı kuralları sağlayan kural tablosu Çizelge 4.13’te verilmiştir.

Çizelge 4.13 : 25 kural için bulanık kural ağırlık düzenleyici için kural tabanı.

E / r_v	Y	YO	O	HO	H
NB	B	O	KO	K	K
NO	O	KO	K	K	K
S	BO	O	KO	KO	KO
PO	O	KO	K	K	K
PB	B	O	KO	K	K

Bu tez çalışmasında, önerilen yöntemin bir uygulamasını daha belirgin bir biçimde açıklamak için bulanık PID kontrolörün (e) ve (Δe) girişlerine üç üyelik fonksiyonunun atandığı özel bir durum dikkate alınmıştır.

Hata (e) girişine atanan üyelik fonksiyonu sayısının üç olmasından ötürü bulanık kural ağırlıklandırması için Şekil 4.12’de görüldüğü üzere dört ana bölge elde

edilmiştir. Daha önceki bölümde verilen tanımlayıcı kurallar ve tanımlanan kural ağırlıklandırma fonksiyonları doğrultusunda, $f_1 = \gamma$ ve $f_2 = 1 - \gamma$ olmak üzere her bir bölge için bulanık kural ağırlıklandırması Çizelge 4.14’te verilmiştir.

Çizelge 4.14 : Her bir bölge için bulanık kural ağırlıklandırması.

Bölge	Bulanık kural ağırlıkları								
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9
1		-		f_2	f_2	-	f_1	f_1	-
2	f_2	f_2	-	f_2	f_1			-	
3	-	f_1	f_1	-	f_2	f_2		-	
4			-		f_1	f_2	-	f_2	f_2

4.4.3 Benzetim sonuçları

“Birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin” etkinliğini göstermek amacıyla dört farklı sistem için benzetimler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörü ve bu yönteme sahip olmayan özayarlamasız bulanık PID kontrolörü iki farklı test sistemlerine uygulanmış ve elde edilen sistem yanıtları ile kontrol işaretleri karşılaştırılmıştır. Daha sonra, birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin diğer yöntemlere olan üstünlüğünü göstermek amacıyla, önerilen yönteme sahip bulanık PID kontrolör dört ayrı bulanık PID kontrolörleri ile karşılaştırılmıştır: Mudi ve Pal (1999), hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör, bulanık kural ağırlıkları eniyileştirilmiş bulanık PID kontrolör ve özayarlamasız bulanık PID kontrolör.

Bütün bulanık kural ağırlıklarının aynı değerde olması durumunda ($f_1 = f_2$ olma durumu), bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine benzeyecektir. Bu sebepten dolayı birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör, Mudi ve Pal (1999)

tarafından önerilen çıkış ölçekleme çarpanı uyarlanma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör ile karşılaştırılmıştır.

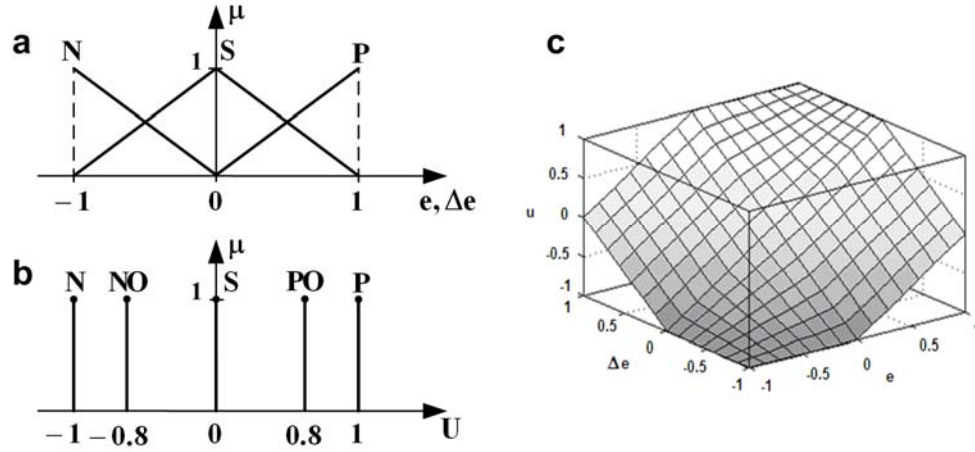
Bölüm 4.3'te anlatılan hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminde, bulanık kural ağırlıklandırması sistem hata değerinin basit iki fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulanık kural ağırlıklandırmasında hata bilgisine ilave olarak sistem yanıtının hızı hakkında bilgi sağlayan birimselleştirilmiş ivme değişkeninin de kullanılması getirdiği avantajları vurgulamak amacıyla birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör, hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör ile karşılaştırılmıştır.

Birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörün, bulanık kural ağırlıkları çevrim dışı olarak eniyileştirilmiş bulanık PID kontrolör ile karşılaştırılmasında, ağırlık eniyileştirmesinde mutlak hatanın toplamı başarımlı ölçütünü minimum yapmak için genetik arama yöntemi kullanılmıştır.

Benzetimler süresince birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör BİTKAY (**B**irimselleştirilmiş **İ**vme **T**abanlı **K**ural **A**ğırlıklandırma **Y**öntemi), hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör HATKAY (**H**ata **T**abanlı **K**ural **A**ğırlıklandırma **Y**öntemi), çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine sahip bulanık PID kontrolör ÇAY (**Ç**ıkış ölçekleme çarpanı **A**yarlama **Y**öntemi), bulanık kural ağırlıkları eniyileştirilmiş bulanık PID kontrolör EKAY (**E**niyileştirilmiş **K**ural **A**ğırlık **Y**öntemi) ve herhangi bir ayarlama yöntemine sahip olmayan özayarlamasız bulanık PID kontrolör BKY (**B**ulanık **K**ontrolör **Y**öntemi) olarak ifade edilmiştir.

Benzetimlerde, 0.1sn. örnekleme zamanına sahip ayrık benzetim yöntemi kullanılmıştır. Karşılaştırmalarda eşit şartları sağlamak amacıyla tüm bulanık PID kontrolörlerin giriş ve çıkış değişkenlerine aynı tip ve sayıda üyelik fonksiyonları atanmıştır. Girişler için düzgün dağılımlı üçgen tip üyelik fonksiyonları ve çıkış için tekil tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Giriş değişkenleri üç değişik bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır: N: Negatif; S: Sıfır; P: Pozitif. Çıkış değişkenleri ise beş değişik bulanık dilsel seviyeye ayrılmıştır: N: Negatif; NO: Negatif Orta; S: Sıfır; PO: Pozitif Orta; P: Pozitif.

Girişler ve çıkış için atanan üyelik fonksiyonları ile kural tabanına bağlı olarak elde edilen kontrol yüzeyi sırasıyla Şekil 4.29’da gösterilmiştir. Bulanık PID kontrolörler için Çizelge 4.15’te verilen köşegen simetrik kural tabanı kullanılmıştır.



Şekil 4.29 : (a) e ve Δe girişleri için üyelik fonksiyonları, (b) U çıkışı için üyelik fonksiyonları; (c) Kontrol yüzeyi.

Çizelge 4.15 : Bulanık PID kontrolörü için kural tabanı.

$e / \Delta e$	N	S	P
N	N (w_1)	NO (w_2)	S (w_3)
S	NO (w_4)	S (w_5)	PO (w_6)
P	S (w_7)	PO (w_8)	P (w_9)

Birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık kontrolörün geçici yanıtının başarımını diğer bulanık PID kontrolörlerinin başarımı ile kıyaslamak amacıyla Bölüm 4.3’te tanımlanmış olan beş değişik başarımlar ölçütü dikkate alınmıştır. Bu başarımlar ölçütleri sırasıyla maksimum aşım (%OS), yerleşme zamanı (T_s), mutlak hatanın toplamı (IAE), mutlak hatanın zaman ile çarpımının toplamı (ITAE) ve kontrol girişine ait toplam sapma (TV)’dir.

Bulanık kural ağırlıklarının başlangıç değerleri normal koşullarda olduğu gibi “1” seçilmiştir.

Sistem VII:

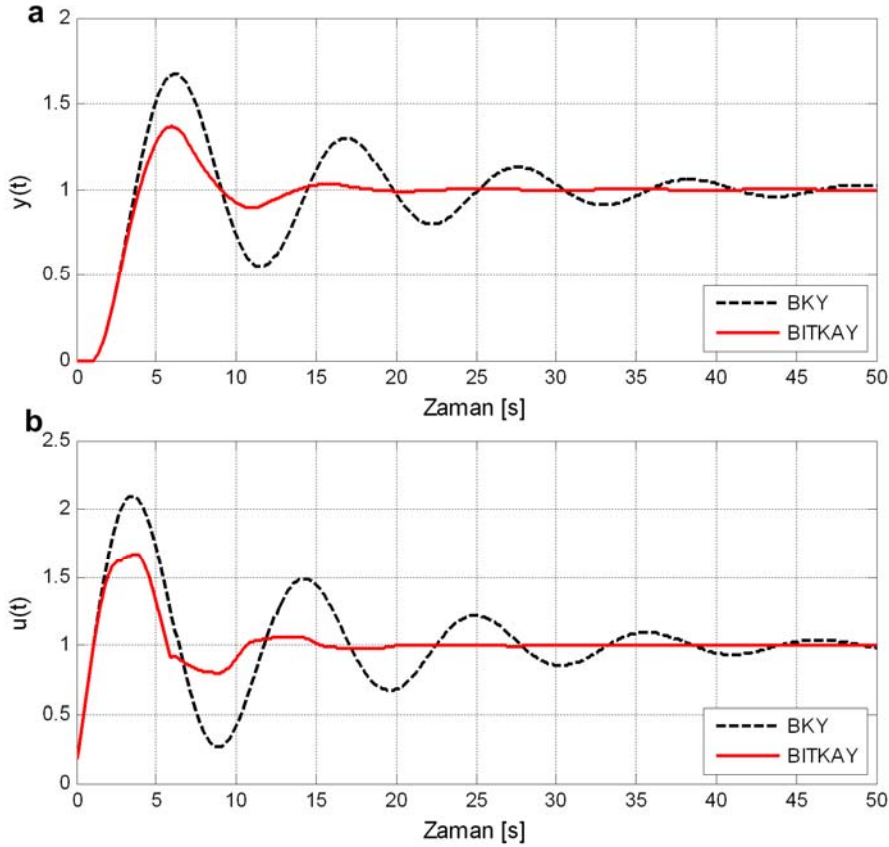
Bu benzetimde sol yarı-düzlemde kutbu olan birinci mertebeden ölü zamanlı sistem ele alınmıştır (Aström ve Hägglund, 2000). Sistemin transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir:

$$G(s) = \frac{1}{(2s+1)} e^{-s} \quad (4.33)$$

Bu tip sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Sistem mertebesi arttıkça (mertebenin ikiden daha fazla olması), sistem büyük ölü zamana sahip sistemler gibi davranmaktadır. Bulanık PID kontrolörüne ait aşağıda verilen ölçekleme çarpanları da Duan ve diğ. (2008)'de önerilen ve ölçekleme çarpanları arasında olması gereken oran dikkate alınarak belirlenmiştir.

$$K_e = 1, K_d = 0.5, \beta = 0.1, \alpha = 0.2 \quad (4.34)$$

BKY ve BİTKAY'a ait birim basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Kullanılan başarımlı ölçütlerine göre bulanık PID kontrolörlerinin başarımlı analizleri Çizelge 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.30 : Sistem VII için sonuçlar: (a) Sistem yanıtları ve (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 4.16 : Sistem VII için başarımlar analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	T _s (s)	IAE	ITAE	TV
BKY	67	39.4	9.33	107.8	0.745
BİTKAY	36	12.5	4.20	16.1	0.294

Sistem VIII:

Bu benzetimde sol yarı-düzlemde çoklu eşit kutba sahip olan dördüncü mertebeden sistem ele alınmıştır (Aström ve Hägglund, 2000). Bu tip sisteme ait transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^4} \quad (4.35)$$

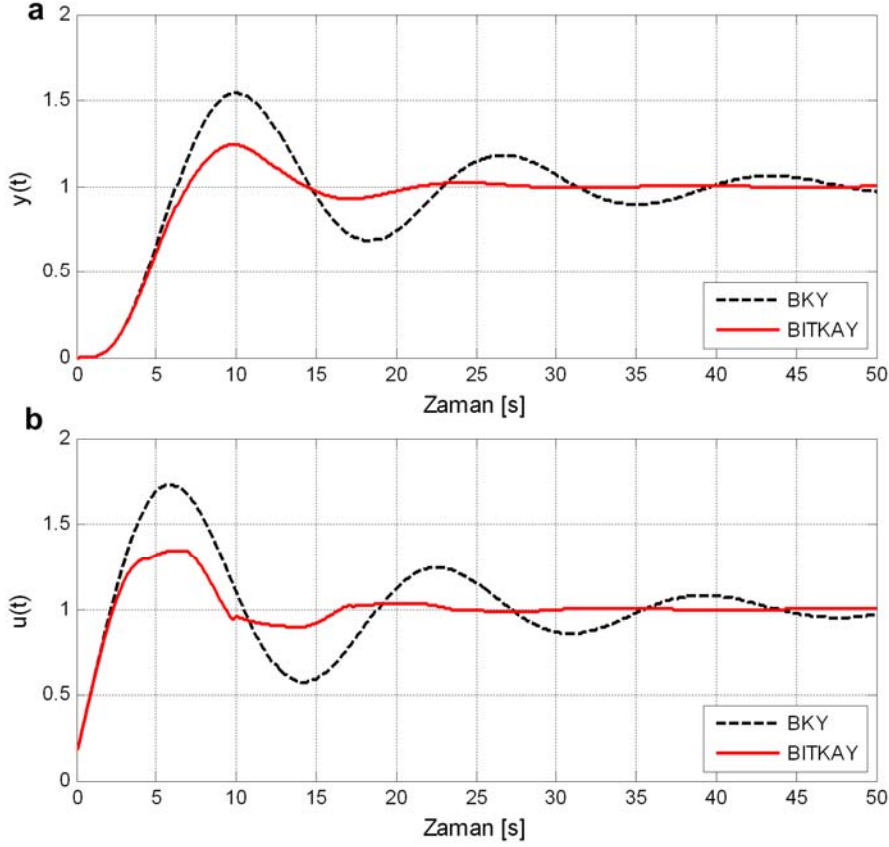
Bu tip transfer fonksiyonları sistemlerin başarımlar analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bulanık PID kontrolörlerine ait ölçekleme çarpanları ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtı elde etmek amacıyla aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$K_e = 1, K_d = 0.5, \beta = 0.07, \alpha = 1.1 \quad (4.36)$$

BKY ve BİTKAY'a ait birim basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Kullanılan başarımlar ölçütlerine göre bulanık PID kontrolörlerinin başarımlar analizleri Çizelge 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.17 : Sistem VIII için başarımlar analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	T _s (s)	IAE	ITAE	TV
BKY	54.2	45.1	10.74	131.1	0.431
BİTKAY	24.1	13.4	6.02	31.1	0.206



Şekil 4.31 : Sistem VIII için sonuçlar: (a) Sistem çıkışları ve (b) Kontrol işaretleri.

Sistem IX:

Genellikle çoğu yüksek mertebeden sistemlerin ikinci mertebeden ölü zamanlı doğrusal sistemler olarak modellenmesinden ötürü, Mudi ve Pal (1999) ile verilen aşağıdaki sistem dikkate alınmıştır.

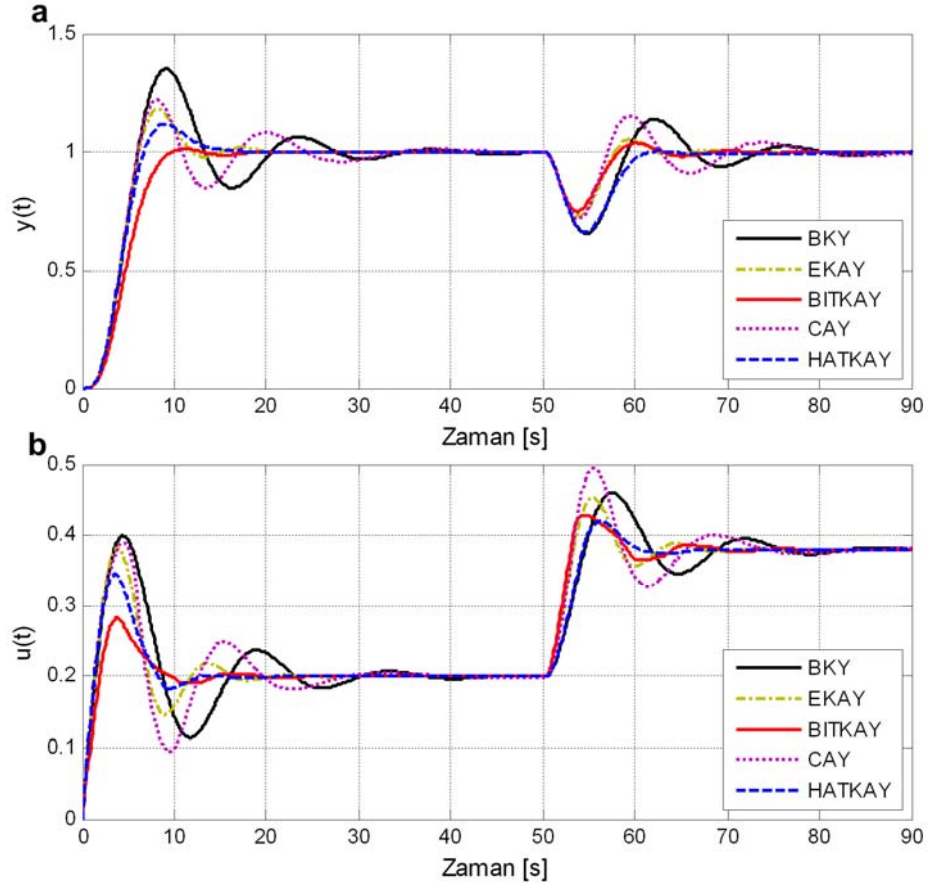
$$G_p(s) = \frac{e^{-0.3s}}{s^2 + s + 0.2} \quad (4.37)$$

Aşağıda verilen ölçekleme çarpanları da Mudi ve Pal (1999)'dan alınmıştır.

$$K_e = 0.9, K_d = 13.5, \beta = 0.02, \alpha = 0 \quad (4.38)$$

Yukarıdaki ölçekleme çarpanları ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtına neden olmaktadır. Bulanık PID kontrolörlerinin bozucuya karşı olan dayanıklılıklarını test etmek amacıyla sisteme 50. saniyede 0.18 genlikli bir bozucu işareti uygulanmıştır. Sırasıyla BKY, EKAY, ÇAY, HATKAY ve

BİTKAY'a ait birim basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Dikkate alınan başarımlar ölçütlerine göre bulanık PID kontrolörlerin başarımlar analizleri Çizelge 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.32 : Sistem IX için sonuçlar: (a) Sistem yanıtları, ve (b) kontrol işaretleri.

Çizelge 4.18 : Sistem IX için başarımlar analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	$T_s(s)$	IAE	ITAE	TV
BKY	35	25.2	9.626	215.9	0.153
EKAY	18	10.9	6.104	90.02	0.130
ÇAY	22	22.4	8.352	185.4	0.168
HATKAY	12	12.0	6.77	127	0.098
BİTKAY	1.3	8.30	6.226	84.83	0.090

Sistem X:

Mudi ve Pal (1999) ile verilen aşağıdaki doğrusal olmayan sistem dikkate alınmıştır.

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} + 0.25y^2 = u(t - L) \quad (4.39)$$

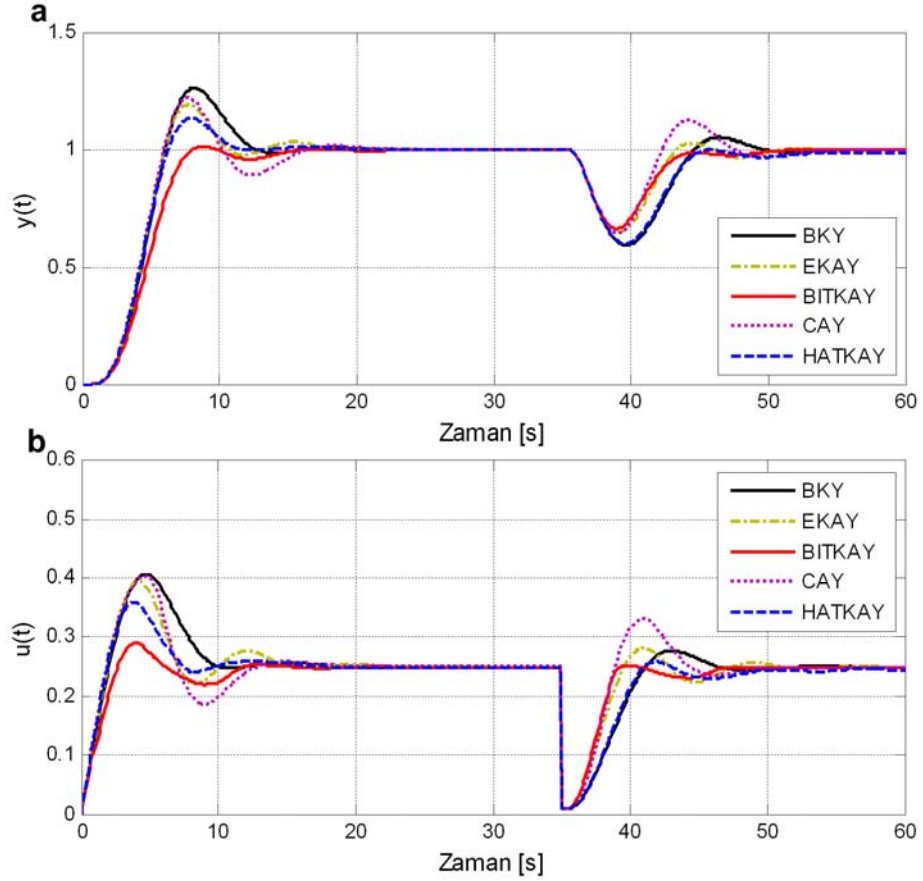
Mudi ve Pal (1999) ile verildiği gibi, sistemdeki L parametre değeri 0.5 ve bulanık PI kontrolörlerin ölçekleme çarpanları aşağıdaki gibi alınmıştır.

$$K_e = 0.9, K_d = 11, \beta = 0.018, \alpha = 0 \quad (4.40)$$

Bu ölçekleme çarpanları kullanılarak sistemin ortalama bir aşım değerine ve küçük bir yükselme zamanına sahip olması sağlanmıştır. Bulanık PID kontrolörlerinin bozucuya karşı olan dayanıklılıklarını test etmek amacıyla sisteme 35. saniyede 0.24 genlikli bir bozucu işareti uygulanmıştır. Sırasıyla BKY, EKAY, ÇAY, HATKAY ve BİTKAY'a ait birim basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.33'te gösterilmiştir. Dikkate alınan başarımlar ölçütlerine göre bulanık kontrolörlerinin başarımlar analizleri Çizelge 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.19 : Sistem X için başarımlar analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	T _s (s)	IAE	ITAE	TV
BKY	26.3	11.6	7.54	111.6	0.113
EKAY	19.5	10.0	6.56	83.4	0.128
ÇAY	22	14.6	7.53	97.3	0.137
HATKAY	13.4	10.0	6.92	106.7	0.104
BİTKAY	1.60	7.2	6.43	76.1	0.093



Şekil 4.33 : Sistem X için sonuçlar: (a) Sistem yanıtları, ve (b) kontrol işaretleri.

Başarım analizi sonuçlarından da görüldüğü gibi, birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör diğer bulanık PID kontrolörlere nazaran beklenildiği gibi aşımı ciddi değerde azaltmıştır. Ayrıca bu yöntemin kullanılması ile birlikte hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemler için diğer bulanık PID kontrolörlerine nazaran çok daha küçük yerleşme zamanı elde edilmiştir. Bunun yanında birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık kontrolörün IAE ve ITAE değeri diğerlerine oranla çok daha düşük elde edilmiştir. Son olarak önerilen yöntemle sahip bulanık kontrolör düşük bir TV değere sahiptir ki bu da yumuşak kontrol işaretine sahip olduğunu göstermektedir.

4.4.4 Deney sonuçları

Birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin gerçek zamanlı sistem üzerinde de gerçekleştirilebilirliğini ve etkinliğini göstermek amacıyla

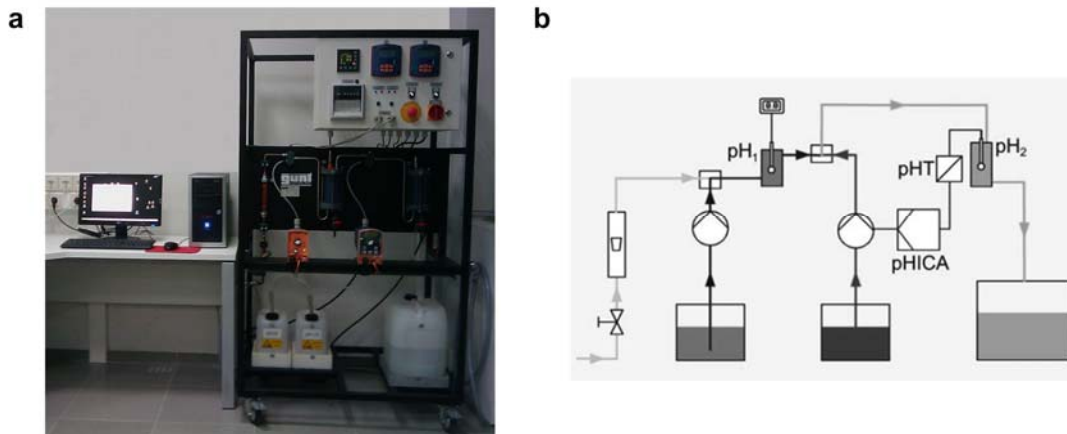
söz konusu yönteme sahip olan ve olmayan bulanık PID kontrolörler G.U.N.T RT 552 pH Kontrol deney setinde gerçekleştirilmiştir.

RT 552 pH prosesi baskın doğrusal olmayan özelliklere sahip karmaşık bir endüstriyel prostestir. Doğrusal olmayan özelliklere ve zamanla değişen bir dinamiğe sahip olmasından ötürü, kontrol algoritmalarının gerçekleştirilebileceği bir test sistemidir. Bu tez çalışmasında bulanık PID kontrolör yapısının ve önerilen kural ağırlıklandırma yönteminin gerçekleştirildiği G.U.N.T RT 552 pH Kontrol deney seti Şekil 4.34'te gösterilmiştir. Prosesin kuvvetli asit (H-Cl) ve kuvvetli baz (Na-OH) olmak üzere iki akış girişi vardır. RT 552 pH prosesine ait temel parametreler Çizelge 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.20 : RT 552 pH prosesine ait temel parametreler.

Sembol	Tanım	Değer
V	Reaksiyon tankının hacmi	0.8 lt
F _a	Asidik sıvıya ait akış hızı	1 ml/s
F _b	Bazik sıvıya ait akış hızı	0-2.1 ml/s (%0 -100)
C _a	Asidik çözeltinin konsantrasyonu	6.3096 10 ⁻⁴ M
C _b	Bazik çözeltinin konsantrasyonu	13 10 ⁻⁴ M

Asetik asit akış hızı, F_a, kendi nominal değerinde sabit tutulmuş ve baz akış hızı ayarlanmış değişken (F_b) olarak dikkate alınmıştır. Bu sebeple, proses için giriş (F_b) sodyum hidroksit akışı ve çıkış (pH₂) pH değişkeni olarak tanımlanabilir.



Şekil 4.34 : (a) Deney setinin genel görünümü, (b) Deney setinin blok gösterimi.

Bulanık PID kontrolörlerine ait ölçekleme çarpanlarını belirlemek amacıyla, prosesin bulanık modeli elde edilmiştir. Bu amaçla, RT 552 pH prosesine 2s. örnekleme

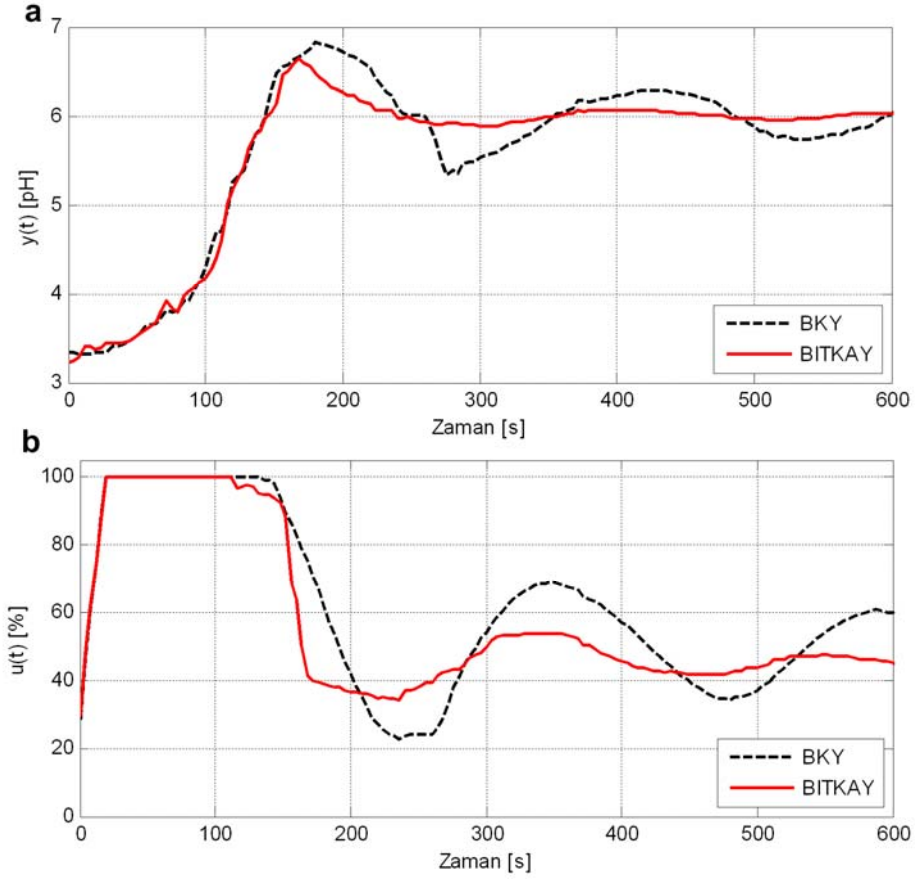
zamanı ile bir sistem tanıma deneyi yapılmıştır (Kumbasar ve diğ, 2011a; Kumbasar ve diğ, 2011b; Kumbasar ve diğ, 2011c). Sonrasında, $pH(k-1)$ ve $F_b(k-1)$ değerleri dikkate alınarak regresyon vektörü elde edilmiştir. Bulanık modeli elde etmek amacıyla, toplanan giriş ve çıkış verileri ANFIS Toolbox /MATLAB kullanılarak eğitilmiştir. RT 552 pH prosesine ait doğrusal olmayan özellikleri daha iyi göstermek amacıyla, bulanık kural tabanında kullanılan her bir giriş değişkeni için altı adet Gauss tipi üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır (Kumbasar ve diğ, 2011c).

Kontrol edilecek pH prosesinin yüksek mertebede doğrusal olmayan özelliğe sahip olmasından dolayı, birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörün başarımları ilk üç durumda değişik referans değerleri için test edilmiştir. Durum1, Durum 2 ve Durum 3 için referans değerleri sırasıyla 6, 7 ve 8 pH olarak alınmıştır. Birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörün bozucuya karşı olan dayanıklılığını test etmek amacıyla Durum 4'te ilave bir deney yapılmıştır. Sisteme bozucu, asetik asit akış hızının değiştirilmesi şeklinde uygulanmıştır. İki bulanık PID kontrolör için de daha önce verilen ve benzetimlerde kullanılan üyelik fonksiyonları ve kural tablosu kullanılmıştır. Bulanık PID kontrolörlerin başarımlarını karşılaştırmak amacıyla benzetim sonuçları için kullanılan 5 başarımlı ölçütü dikkate alınmıştır. Bulanık kural ağırlıklarının başlangıç değerleri normal koşullarda olduğu gibi 1 alınmıştır.

Durum 1: Referans olarak 6 pH değeri alınmıştır. Sistem modeli kullanılarak ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtı elde etmek amacıyla bulanık PID kontrolörler için ölçekleme çarpanları aşağıdaki gibi alınmıştır.

$$K_e = 0.11, K_d = 0.2, \beta = 15, \alpha = 50 \quad (4.41)$$

BKY ve BİTKAY'ait basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Tasarlanan bulanık PID kontrolörler için başarımlı analizleri Çizelge 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.35 : Durum 1 için deney sonuçları: (a) Sistem yanıtları, (b) Kontrol işaretleri.

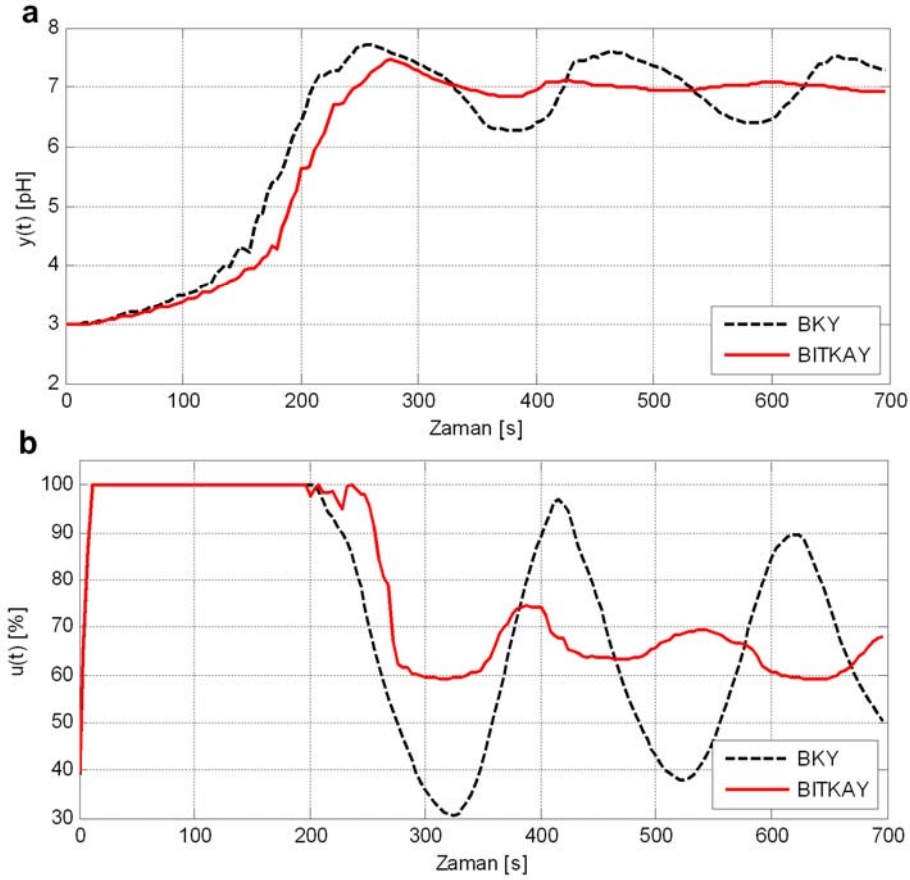
Çizelge 4.21 : Durum 1 için başarımlı analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	T_s (s)	IAE	ITAE	TV
BKY	13.69	328.0	103.3	14150	292.56
BİTKAY	10.81	192.0	81.29	6637	213.53

Durum 2: Referans olarak 7 pH değeri alınmıştır. Sistem modeli kullanılarak ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtı elde etmek amacıyla bulanık PID kontrolör için ölçekleme çarpanları aşağıdaki gibi alınmıştır.

$$K_e = 0.11, K_d = 0.2, \beta = 15, \alpha = 50 \quad (4.42)$$

BKY ve BİTKAY'a ait basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Tasarlanan bulanık PID kontrolörler için başarımlar Çizelge 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.36 : Durum 2 için deney sonuçları: (a) Sistem yanıtları, (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 4.22 : Durum 2 için başarımlar analizleri.

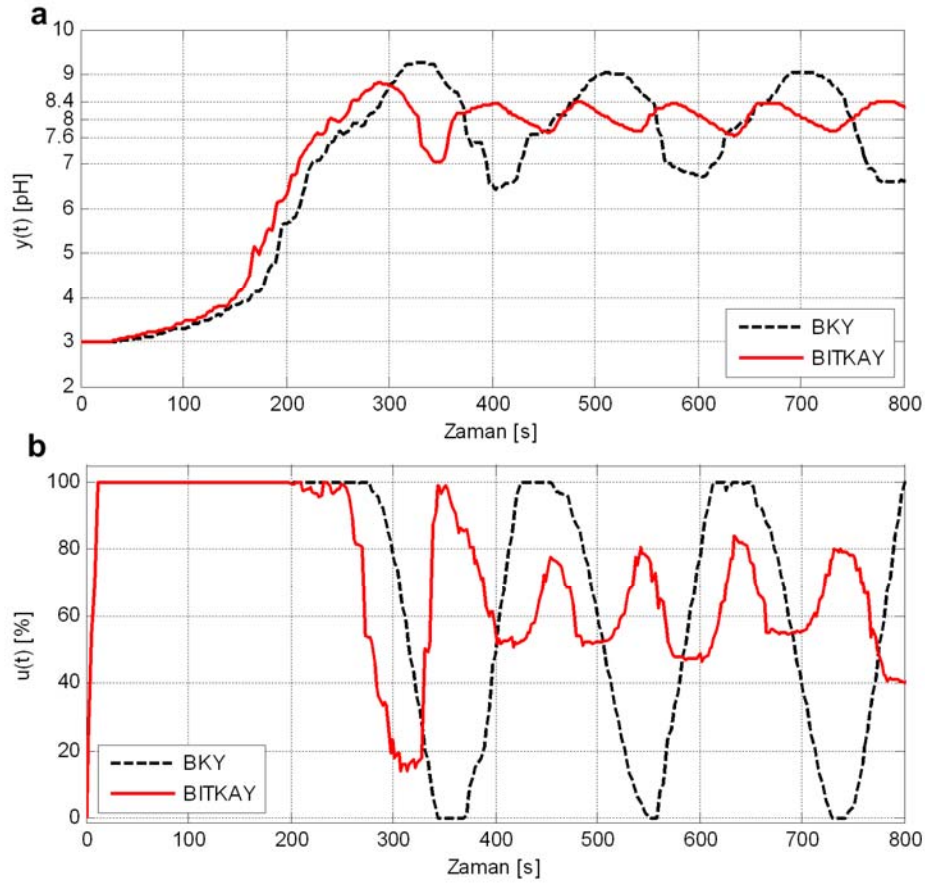
Bulanık PID Kontrolör:	%OS	$T_s(s)$	IAE	ITAE	TV
BKY	10.36	-----	210.52	36078	396.85
BİTKAY	6.68	272	191.43	21299	218.08

Durum 3: Referans olarak 8 pH değeri alınmıştır. Sistem modeli kullanılarak ortalama bir aşım ve küçük bir yükselme zamanı ile bir salınımlı sistem yanıtı elde etmek amacıyla bulanık PID kontrolör için ölçekleme çarpanları aşağıdaki gibi alınmıştır.

$$K_e = 0.11, K_d = 0.4, \beta = 15, \alpha = 50 \quad (4.43)$$

BKY ve BİTKAY'a ait basamak yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.37'de gösterilmiştir. Tasarlanan bulanık PID kontrolörler için başarımları Çizelge 4.23'te verilmiştir.

Şekil 4.37'de gösterilen kesikli çizgi sistem yanıtlarının yerleşme zamanını belirlemek amacıyla oluşturulan referans değerin %5 değeri için elde edilen bir band sınırıdır.

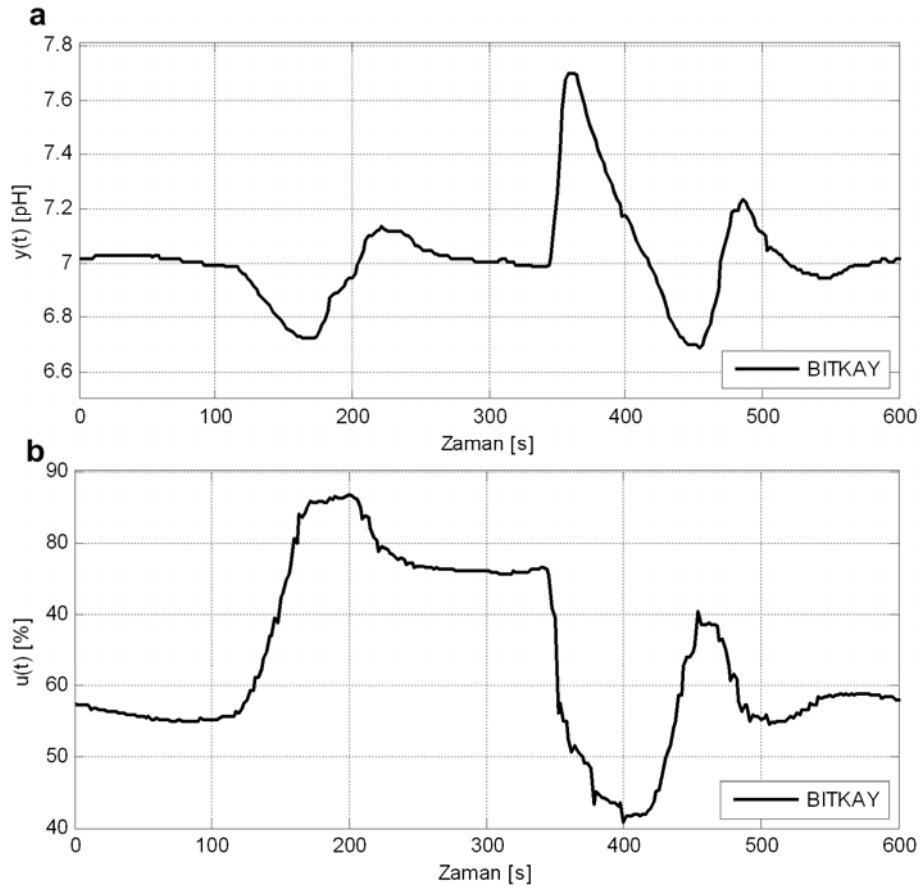


Şekil 4.37 : Durum 3 için deney sonuçları: (a) Sistem yanıtları, (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 4.23 : Durum 3 için başarımları analizleri.

Bulanık PID Kontrolör:	%OS	$T_s(s)$	IAE	ITAE	TV
BKY	15.84	----	707.7	175970	881.77
BİTKAY	10.21	360	525.63	84452	617.91

Durum 4: Birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin bozucuya karşı olan dayanıklılığını test etmek amacıyla, bu yöneme sahip bulanık PID kontrolörü G.U.N.T RT-552 pH Proses deney setine tekrar uygulanmıştır. Bu amaçla asetik asit akış hızı manuel olarak bir valf yardımıyla değiştirilerek sisteme bozucu olarak uygulanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak sisteme 7 pH referans değeri uygulanmıştır. Daha sonra akış hızı (Fa) 50% (1.5 ml/s) oranında artırılmıştır ve sonrasında tekrar 7 pH değerine düşürülmüştür. İkinci bozucu işareti uygulanmasında ise, akış hızı (Fa) 40% (0.6 ml/s) oranında azaltılmıştır ve sonrasında tekrar 7 pH değerine artırılmıştır. Bozucular sisteme sırasıyla $t = 116s$. ve $t = 342s$. zaman değerlerinde uygulanmıştır. Bulanık PID kontrolör için ölçekleme çarpanı değerleri Durum 2'deki gibi $K_e = 0.11, K_d = 0.2, \beta = 15, \alpha = 50$ olarak alınmıştır. Sistem basamak yanıtı ve kontrol işareti Şekil 4.38'de gösterilmiştir. Özayarlamasız bulanık PID kontrolörün sisteme uygulanması sonucunda elde edilen sistem yanıtının kararsız olup sonsuza gitmesinden dolayı şekilde gösterilmemiştir.



Şekil 4.38 : Durum 4 için deney sonuçları: (a) Sistem yanıtı, (b) Kontrol işareti.

Ayrı ayrı dört farklı durumda yapılan deney sonuçlarından da görüldüğü gibi, özayarlamasız bulanık PID kontrolör yapısına kıyasla, birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolör yapısı maksimum aşım değerini azaltmaktadır. Bunun yanısıra söz konusu bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin kullanılması ile yerleşme zamanı değeri de önemli derecede azalmaktadır. Diğer başarımlar kriterleri olan IAE ve ITAE dikkate alındığında, bu değerlerde de önemli miktarda iyileştirme sağlandığı göze çarpmaktadır. İlave olarak birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin kullanılması ile daha yumuşak kontrol işaretlerinin sisteme uygulandığı elde edilen düşük TV başarımlar ölçütü değerlerinden anlaşılmaktadır. Bozucuya karşı dayanıklılık analizinin yapıldığı deney sonuçları da söz konusu bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin kullanılması sonucunda sisteme uygulanan bozucu etkisinin etkin olarak giderildiğini göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Endüstrinin özayarlamasız bulanık PID kontrolör uygulamalarına gittikçe artan seviyede ilgi göstermesine karşın, bu tip kontrolörlerin başarımını artırmak için standart ve sistematik ayarlama yöntemlerinin sayısı sınırlıdır. Özellikle ölçekleme çarpanlarının uyarlanması ile ilgili literatürde sistem bilgisini kullanan yeterli sayıda sistematik ayarlama yöntemi mevcuttur. Buna karşın üyelik fonksiyonu parametrelerinin, bulanık kuralların ve bulanık kural ağırlıklarının uyarlanması ile ilgili literatürde mevcut ayarlama yöntemleri çoğunlukla eniyileme yöntemlerini kullanmaktadır. Bu kapsamda, işlem karmaşıklığından ve tekrarından kaynaklanan olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla, bu tez çalışmasında bulanık PID kontrolöre ait bulanık kurallar için tanımlanmış kural ağırlıklarının çevrim içi olarak ayarlanması için sistem bilgisini kullanan, her sistem tipi için geçerli ve genel olan iki ayrı kural ağırlıklandırma yöntemi önerilmiştir.

Bu amaçla, ilk olarak kapalı çevrim sistem yanıtı bulanık PID kontrolörü girişlerinden biri olan hata değişkenine atanan üyelik fonksiyonu sayısına bağlı olarak belirli sayıda bölgelere ayrıştırılarak, her bir bölgede gerekli kontrol işaretinin elde edilmesine ilişkin tanımlayıcı kurallar belirlenmiştir.

Belirlenen tanımlayıcı kurallar doğrultusunda ilk olarak, bulanık kural ağırlıkları sistem hata değişkeninin mutlak değeri kullanılarak basit bir yöntemle çevrim içi olarak uyarlanmıştır. Böylelikle sistem hata değişkeni ayarlama parametresi olarak kullanılmıştır. Hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin etkinliğini göstermek amacıyla söz konusu yönteme sahip bulanık PID kontrolörü değişik doğrusal ve doğrusal olmayan test sistemlerine benzetim yoluyla uygulanmıştır. Benzetimlerde değişik başarımlar ölçütleri dikkate alınarak söz konusu yönteme sahip bulanık PID kontrolörü, bu yönteme sahip olmayan bulanık PID kontrolörü ile ve Mudi ve Pal (1999)'da önerilen çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine sahip bulanık PID kontrolörü ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sistem yanıtlarından ve başarımlar analizi sonuçlarından, önerilen hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörün diğerlerine oranla sistem başarımını

önemli derecede artırdığı ve bozucu etkisini daha etkin bir biçimde giderdiği gözlemlenmiştir.

Sonrasında, hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin başarımını artırmak amacıyla hata bilgisine ilave olarak sistem hız bilgisini de kullanan ikinci bir kural ağırlıklandırma yöntemi önerilmiştir. Bu kapsamda, belirlenen tanımlayıcı kurallar doğrultusunda, sistem hata değişkenini ve sistem hızı hakkında bilgi sağlayan birimselleştirilmiş ivme değişkenini girişleri olarak kullanan bir bulanık mekanizma oluşturulmuştur. Bulanık mekanizma çıkışı doğrudan kural ağırlıklarının uyarlanmasıyla kullanılmıştır. Elde edilen birimselleştirilmiş ivme tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörü değişik doğrusal ve doğrusal olmayan test sistemlerine benzetimler yoluyla uygulanmıştır. Benzetimlerde, değişik başarımlar ölçütleri dikkate alınarak söz konusu yöntemle sahip bulanık PID kontrolörü, hata tabanlı kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörü, klasik özayarlamasız bulanık PID kontrolörü, Mudi ve Pal (1999)'da önerilen çıkış ölçekleme çarpanı ayarlama yöntemine sahip bulanık PID kontrolörü ve bulanık kural ağırlıkları genetik eniyileme yöntemi ile eniyileştirilmiş bulanık PID kontrolörü ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sistem yanıtları ve başarımların analizi sonuçları ile birimselleştirilmiş ivme tabanlı kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık PID kontrolörünün diğer kontrolörlere oranla sistem başarımını daha fazla artırdığı ve aynı zamanda sisteme uygulanan bozucu etkisini daha etkin bir şekilde giderdiği gösterilmiştir.

Elde edilen bulanık PID kontrolörlerinin genellikle sadece bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesinden dolayı, bu tip kontrolörlerin fiziksel sistemler üzerinde uygulanmaları neticesinde birtakım farklılıklar ortaya çıkabilmektedir. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında, önerilen ağırlıklandırma yöntemlerini kullanan ve kullanmayan bulanık PID kontrolör yapılarının bazı test sistemlerine benzetimler yoluyla uygulanmasının yanı sıra, aynı kontrolör yapıları PCS 327 Proses Kontrol Simülatörü ve G.U.N.T RT-552 pH Kontrol Deney Seti üzerinde gerçek zaman uygulamaları olarak gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçlarda bulanık kural ağırlıklandırma yöntemlerine sahip bulanık PID kontrolörlerinin diğer kontrolörlere kıyasla gerçek zaman sistemler üzerinde de daha etkili sistem başarımları sağladıkları ve bozucu etkilerini daha etkin olarak giderdikleri gözlemlenmiştir. G.U.N.T. pH Kontrolü deney seti üzerinde yapılan gerçekleştirilmede, sisteme bozucu işareti uygulanması

neticesinde özayarlamasız bulanık PID kontrolörünün kullanılması ile elde edilen sistem yanıtının kararsız olmasına karşın, birimselleştirilmiş ivme tabanlı kural ağırlıklandırma yönteminin kullanılması ile elde edilen sistem yanıtında sürekli hal hatasının oluşmadığı belirlenmiştir.

Yapılan benzetimler ve gerçek zaman uygulamaları neticesinde, kural ağırlıklarına sabit “1” değeri atamak veya her sistem tipi için ayrı ayrı eniyileme yöntemlerini kullanarak bu değerleri eniyileştirmek yerine, sistem bilgisini kullanarak uygun değerler ile kuralları ağırlıklandırmanın sistem başarımını önemli derecede artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kural ağırlıklandırmada tek sistem bilgisine ilave olarak ikinci bir sistem bilgisi değişkeninin kullanılması ile beklenildiği gibi çok daha iyi sistem yanıtları ve başarımı elde edilmiştir. Dolayısıyla değişik başarım ölçütleri doğrultusunda yapılan karşılaştırmalar neticesinde, bulanık kural ağırlıklandırma yöntemlerinin en kullanışlı ayarlama mekanizmaları olduğu belirlenmiştir.

Bu konularda daha fazla çalışmanın yapılabilmesi mümkündür. Bu çalışmalar; mevcut bulanık kural ağırlıklandırma yöntemlerinin başarımını artırmak maksadıyla söz konusu yöntemler üzerinde iyileştirmelerin yapılabilmesi, bu yöntemlerin değişik tipte bulanık kontrolörlere de uygulanabilmesi veya uyarlanabilmesi, bulanık PID kontrolörüne ait diğer tasarım parametrelerinin çevrim içi olarak uyarlanabilmesi maksadıyla sistem bilgisini kullanan başka ayarlama yöntemlerinin geliştirilmesi olarak sıralanabilir.

KAYNAKLAR

- Ahn, K. K. ve Truong, D. Q. (2009). Online tuning fuzzy PID controller using robust extended Kalman filter. *Journal of Process Control*, **19**, 1011-1023.
- Alcala, R., Cano, J. R., Cordon, O., Herrera, F., Villar, P., Zwir, I. (2003). Linguistic modeling with hierarchical systems of weighted linguistic rules. *International Journal of Approximate Reasoning*, **32**, 187-215.
- Alcala, R., Casillas, J., Cordon, O., Gonzalez, A., Herrera, F. (2005). A genetic rule weighting and selection process for fuzzy control of heating, ventilating and air conditioning systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **18**, 279-296.
- Aström, K. J. ve Hägglund, T. (2000). Benchmark Systems for PID Control, In: *IFAC Workshop on Digital Control. Past, present and future of PID Control*, Terrassa, Spain, 5-7 April, pp. 181-182.
- Bhattacharya, S., Chatterjee, A., ve Munshi, S. (2004). A new self-tuned PID-type fuzzy controller as a combination of two-term controllers. *ISA Transactions*, **43**, 413-426.
- Bellman, R. E. ve Zadeh, L. A. (1970). Decision-Making in a fuzzy environment. *Management Science*, **17**.
- Chen, K. Y., Tung, P. C., Tsai, M. T., ve Fan, Y. H. (2009). A self-tuning fuzzy PID-type controller design for unbalance compensation in an active magnetic bearing. *Expert Systems with Applications*, **36**, 8560-8570.
- Cho, J. S. ve Dong, J. P. (2000). Novel fuzzy logic control based on weighting of partially inconsistent rules using neural network. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, **8**, 99-110.
- Chung, H. Y., Chen, B. C., ve Lin, J. J. (1998). A PI-type fuzzy controller with self-tuning scaling factors. *Fuzzy Sets and Systems*, **93**, 23-28.
- Duan, X. G., Li, H. X., ve Deng, H. (2008). Effective Tuning Method for Fuzzy PID with Internal Model Control. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **47**, 8317-8323.
- Eksin, I., Güzelkaya, M., ve Gürleyen, F. (2001). A new methodology for deriving the rule-base of a fuzzy logic controller with a new internal structure. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **14**(5), 617-628.
- Elmas, Ç. (2003). *Bulanık mantık denetleyiciler*. Birsen Yayınevi.
- Escamilla, P. J. ve Mort, N. (2002). A novel design and tuning procedure for PID type fuzzy logic controllers. 2002 *First International IEEE Symposium "Intelligent Systems"*, September.

- Fang, G., Kwok, N. M., ve Ha, Q.** (2008). Automatic membership function tuning using the particle swarm optimization. *2008 IEEE Pasific-Asia Workshop On Computational Intelligence and Industrial Application*, 324-328.
- Galichet, S. ve Foulloy, L.** (1995). Fuzzy Controllers: Synthesis and equivalences. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **3**, 140-148.
- Golob, M.** (2001). Decomposed fuzzy proportional-integral-derivative controllers. *Applied Soft Computing*, **1**, 201-204.
- Gürocak, H.B.** (1999). A genetic-algorithm-based method for tuning fuzzy logic controllers. *Fuzzy Sets and Systems*, **108**, 29-47.
- Güzelkaya, M., Eksin, I. ve Gürleyen, F.** (2001). A new methodology for designing a fuzzy logic controller and PI, PD blending mechanism. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, **11**, 85-98.
- Güzelkaya, M., Eksin, I., ve Yesil, E.** (2003). Self-tuning of PID-type fuzzy logic controller coefficients via relative rate observer. *Applications of Artificial Intelligence*, **16**, 227-236.
- Hu, B., Mann, G. K. I., ve Gosine, R. G.** (1999). A new methodology for a analytical and optimal design of fuzzy PID controllers. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, **7**(5), 521-539.
- Huang, T.T., Chung, H. Y., ve Lin, J. J.** (1999). A fuzzy PID controller being like parameter varying PID. *IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceeding*, Seoul, Korea, **1**, 269-275.
- Juang, Y. T., Chang, Y. T., ve Huang, C. P.** (2008). Design of fuzzy PID controllers using modified triangular membership functions. *Information Sciences*, **178**, 1325-1333.
- Karasakal, O., Yesil, E., Guzelkaya, M., ve Eksin, İ.** (2005). Implementation of a new self-tuning fuzzy PID controller on PLC. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, **13** (2), 277-286.
- Karasakal, O., Guzelkaya, M., Eksin, İ., ve Yesil, E.** (2010a). Online rule weighting of fuzzy PID controllers. *2010 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, İstanbul, Turkey.
- Karasakal, O., Guzelkaya, M., Eksin, İ., ve Yesil, E.** (2010b). An On-line Rule Weighting Mechanism Based on Normalized Acceleration for Fuzzy PID Controllers. *ALCOSP 2010 Adaptation and Learning in Control and Signal Processing*, Antalya, Turkey.
- Karasakal, O., Guzelkaya, M., Eksin, İ., ve Yesil, E.** (2011a). An error-based on-line rule weight adjustment method for fuzzy PID controllers. *Expert Systems with Applications*, **38** (8), 10124-10132.
- Karasakal, O., Guzelkaya, M., Eksin, İ., Yesil, E., ve Kumbasar, T.** (2011b). Normalized acceleration based online rule weighting of fuzzy PID controllers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, in pres.
- Kumbasar, T., Eksin, İ., Güzelkaya, M., ve Yeşil, E.** (2011a). Adaptive fuzzy model based inverse controller design using BB-BC optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, **38** (10), 12356-12364.

- Kumbasar, T., Eksin, İ., Güzelkaya, M., ve Yesil, E.** (2011b). Interval type-2 fuzzy inverse controller design in nonlinear IMC structure. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **24** (6), 996 – 1005.
- Kumbasar, T., Eksin, İ., Güzelkaya, M., ve Yesil, E.** (2011c). Type-2 fuzzy model based controller design for neutralization processes. *ISA Transactions*, in pres.
- Kwok, D. P., Tam, P., Li, C. K., ve Wang, P.** (1990). Linguistic PID controllers. *Proceedings of the 11th World Congress*, Tallin, Estonia, **7**, 192-197.
- Li, H. X. ve Gatland, H. B.** (1996). Conventional fuzzy control and its enhancement. *IEEE Trans on Systems, Man, Cybernetics-Part(B)*, **26**(5), 791-797.
- Mac Vicar-Whelan, P. J.** (1976). Fuzzy sets for man-machine interaction. *Int. J. Man-Machine Studies*, **8**, 687-697.
- Mamdani, E. H.** (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci.*, **121**, 1585-1588.
- Mamdani, E. H. ve Assilian, S.** (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man-Machine Stud.*, **7**, 1-13.
- Mann, G. K. I., Hu, B. G., ve Gosine, R. G.** (2001). Two-level tuning of fuzzy PID controllers. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **31**, 2.
- Mizumoto, M.** (1990). Fuzzy controls by product-sum gravity method. *International Academic Publishers*, C. 1. 1-C. 1. 4.
- Mizumoto, M.** (1992). Realization of PID controllers by fuzzy control methods. *Fuzzy Sets and Systems*, **70**, 171-182.
- Mona, S. M., Manju, A., ve Nigam, M. J.** (2011). A study on parameter tuning of weighted fuzzy rule base using genetic algorithm for trajectory control of PUMA560. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, **3**, 9, 7016-7028.
- Mudi, R. K. ve Pal, N. R.** (1999). A robust self-tuning scheme for PI- and PD-type fuzzy controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **7**(1), 2–16.
- Nauck, D. ve Kruse, R.** (1998). How the learning of rule weights affects the interpretability of fuzzy systems. *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZIEEE'98)*, 1235-1240.
- Palm, R. ve Driankov, D.** (1996). *Model Based Fuzzy Control*, Springer.
- Qiao, W. Z. ve Mizumoto, M.** (1996). PID type fuzzy controller and parameters adaptive method. *Fuzzy Sets and Systems*, **78**, 23-35.
- Qin, S. J. ve Borders, G.** (1994). A multiregion fuzzy logic controller for nonlinear process control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **2**, 74-81.
- Sharkawy, A.B.** (2010). Genetic fuzzy self-tuning PID controllers for antilock braking systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **23**, 1041-1052.
- Skogestad, S.** (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, **13** (4), 291-309.

- Takagi, T. ve Sugeno, M.** (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans Systems, Man, Cybern.*, **15**, pp. 116-132.
- Woo, Z. W., Chung, H. Y., ve Lin, J. J.** (2000). A PID-type fuzzy controller with self-tuning scaling factors. *Fuzzy Sets and Systems*, **115**, 321-326.
- Xu, J. X., Liu, C., ve Hang, C. C.** (1998). Tuning and analysis of a fuzzy PI controller based on gain and phase margins. *IEEE Trans on Systems, Man, Cybernetics-Part(A)*, **28**(5), 685-691.
- Xu, J. X., Hang, C. C., ve Liu, C.** (2000). Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller. *Automatica*, **36**, 673-684.
- Zadeh, L. A.** (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, **8**, 338-353.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Onur KARASAKAL

Doğum Yeri ve Tarihi: Kocaeli / Türkiye, 05.04.1977

Adres: İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Müh. Fakültesi, Kontrol Müh. Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul / Türkiye

E-Posta: onur_karasakal@yahoo.com

Lisans: Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Yüksek Lisans : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:---

Yayın ve Patent Listesi:

A) Uluslararası Makaleler:

▪ **Karasakal, O.,** Yesil E., Güzelkaya M., Eksin İ., 2005. Implementation of a new self-tuning fuzzy PID controller on PLC. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 13 (2), 277-286.

B) Uluslararası Konferans Bildirileri:

▪ **Karasakal, O.,** Yesil E., Güzelkaya M., Eksin İ., 2003. An implementation of peak observer based self-tuning fuzzy PID-type controller on PLC, 2003, ELECO '2003, 3rd International Conf. on Electrical and Electronics Eng, Bursa, Turkey

▪ **Karasakal, O.,** Yesil E., Güzelkaya M., Eksin İ., 2004. An Implementation of Relative Rate Observer Based Self-tuning Fuzzy PID-type Controller on PLC, 2004, MED '04 - 12th Mediterranean Conference on Control and Automation, Kuşadası, Turkey.

▪ **Karasakal, O.,** Yesil E., Güzelkaya M., Eksin İ., 2004. The Implementation and Comparison of Different Type Self-tuning Algorithms of Fuzzy PID Controllers on PLC, 2004, ISSCI-2004 5th International Symposium on Soft Computing for Industry, Seville, Spain.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ **Karasakal, O.,** Güzelkaya M., Eksin İ., Yesil E., 2011. An error-based on-line rule weight adjustment method for fuzzy PID controllers, Expert Systems with Applications, 38 (8), 10124-10132.

▪ **Karasakal, O.,** Güzelkaya M., Eksin İ., Yesil E., Kumbasar T., 2011. Normalized

Acceleration Based Online Rule Weighting of Fuzzy PID Controllers, Engineering Applications of Artificial Intelligence, (Under Review).

▪ **Karasakal, O.**, Güzelkaya M., Eksin İ., Yesil E., 2010. Online rule weighting of fuzzy PID controllers. 2010 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, İstanbul, Turkey.

▪ **Karasakal, O.**, Güzelkaya M., Eksin İ., Yesil E., 2010. An On-line Rule Weighting Mechanism Based on Normalized Acceleration for Fuzzy PID Controllers, ALCOSP 2010 Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, Antalya, Turkey.