İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI MELEZ BULANIK PID KONTROLÖR YAPISI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Işın ERENOĞLU

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI MELEZ BULANIK PID KONTROLÖR YAPISI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Işın ERENOĞLU
(504031112)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Haziran 2006

Tez Danışmanı :	**Prof.Dr. İbrahim EKSİN**
Diğer Jüri Üyeleri	**Prof.Dr. Müjde GÜZELKAYA (İ.T.Ü.)**
	Yrd.Doç.Dr. Berk ÜSTÜNDAĞ (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Doğru tez konusunu seçmemi sağlayarak, bu konuda beni yönlendiren ve sonuca varmamı sağlayan, herzaman destek olan değerli danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. İbrahim EKSİN'e, yardımları ve önerileriyle çalışmanın sonuçlanmasında yardımcı olan Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA'ya, fikirleriyle bana yol gösterip, daima bilgilerini aktaran Araştırma Görevlisi Engin YEŞİL'e ve karşılıksız maddi ve manevi desteğiyle beni bugünlere getiren çok sevgili aileme, anneme , babama ve kardeşime yürekten teşekkür ederim.

Haziran 2006 Işın ERENOĞLU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ.....vi
ŞEKİL LİSTESİ.....vii
SEMBOL LİSTESİ ix
ÖZET.....x
SUMMARY.....xi

1. BULANIK MANTIK.....1
1.1. Giriş.....1
1.2 Bulanık Mantığın Tarihteki İlk Önemli Uygulamaları.....2
1.3 Bulanık Kümeler.....3
1.3.1 Bulanık Küme Tanımı.....3
1.3.2 Üyelik fonksiyonları.....4
1.3.3 Bulanık küme işlemleri.....5

2. BULANIK KONTROL.....7
2.1 Bulanık Kontrol Yapısı.....7
2.2 Bulanık Kural Tabanı.....8
2.2.1 Bulanık Karar Tabloları.....8
2.2.2 Bulanık Önermediki Sonuç İfadesinin Yapısına Göre Bulanık Kural Tabanları.....9
2.2.3 Bulanık Kontrol Kural Tabanı Oluşturulması.....11
2.3 Bulandırma.....12
2.4 Durulama.....13
2.5 Ölçekleme Çarpanları.....14

3. BULANIK KONTROLÖR.....15
3.1 Bulanık PID Kontrol Yapıları.....16
3.2 Doğrudan Bulanık PID Kontrolör.....16
3.2.1 Tek Girişli Bulanık PID Yapıları.....17
3.2.2 İki Girişli Bulanık PID yapıları.....18
3.2.3 Üç Girişli Bulanık PID yapıları.....20
3.3 Bulanık kazanç ayarlamalı PID kontrolör.....21
3.4 Melez PID Kontrolör.....22

4. KLASİK PID KONTROLÖR.....23
4.1 Klasik PID Kontrol Algoritması ve Yapısı.....23
4.2 Akıllı Melez Kontrol Yapısında PI yada PD Kontrolör Yerine PID Kontrolör Kullanılması.....24

5. AKILLI MELEZ BULANIK PID KONTROLÖR.....26
5.1 Özet.....26
5.3 Giriş.....27
5.3 Akıllı Melez Bulanık PID Yapısı.....27
5.3.1 Akıllı Melez Bulanık PID de Kullanılan Klasik PID Kontrolör.....27
5.3.2 Akıllı Melez Bulanık PID de Kullanılan Bulanık PID Kontrolör.....27
5.4 Akıllı Melez Kontrolörün Anahtarlama Mekanizması.....32
5.4.1 Anahtarlama Mekanizmasının Amacı.....32
5.4.2 Anahtarlama Mekanizmasının Çalışma Prensibi.....32
5.4.3 Anahtarlama Mekanizmasının Ağırlık Çarpanı Fonksiyonları.....33
5.4.4 Hiperbol, Parabol ve Üçgen Anahtarlama fonksiyonlarının sistem çıkışlarına etkileri.....35
5.5 Parabol, Hiperbol ve Üçgen Fonksiyonların Simülasyon Sonuçları.....38
5.5.1 Parabol, Hiperbol ve Üçgen Fonksiyonların simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi.....43
5.6 Akıllı Melez Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi.....44
5.7 Akıllı Melez Kontrolör Simulasyon Sonuçları.....45
5.7.1 Akıllı Melez Kontrolörün Birinci Dereceden Ölü Zamanlı Sistem için Simülasyon sonuçları.....46
5.7.2 Akıllı Melez Kontrolörün İkinci Dereceden Ölü Zamanlı Sistem için Simülasyon sonuçları.....48
5.7.3 Akıllı Melez Kontrolörün Üçüncü Dereceden Ölü Zamanlı Sistem için Simülasyon sonuçları……..50
5.7.4 Akıllı Melez Kontrolörün Dördüncü Dereceden Ölü Zamansız Sistem için Simülasyon sonuçları……...52

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER 54

KAYNAKLAR 55
ÖZGEÇMİŞ 58

KISALTMALAR

PID	: Proportioanal Integral Derivative Kontrolör
PI	: Proportioanal Integral Kontrolör
PD	: Proportioanal Derivative Kontrolör
AMK	: Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolör
haf	: Hiperbol anahtarlama fonksiyonu
paf	: Parabol anahtarlama fonksiyonu
üaf	: Üçgen anahtarlama fonksiyonu
PI	: Başarım Ölçütü (Performance Index)

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 4.1	Klasik PID kazanç parametrelerinin kontrole katkısı.....	25
Tablo 5.1	Bulanık PID Kontrolör Kural Tabanı.....	30
Tablo 5.2	Ağırlık çarpanı fonksiyonları	46
Tablo 5.3	Birinci dereceden ölü zamanlı sitem için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri (p.a.f.).....	39
Tablo 5.4	Birinci dereceden ölü zamanlı sitem için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri (h.a.f.).....	41
Tablo 5.5	Birinci dereceden ölü zamanlı sitem için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri (ü.a.f.).....	41
Tablo 5.6	Birinci dereceden ölü zamanlı $G_1(s)$ sitemi için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri.....	47
Tablo 5.7	İkinci dereceden ölü zamanlı $G_2(s)$ sistemi için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri.....	49
Tablo 5.8	Üçüncü dereceden ölü zamanlı $G_3(s)$ sitemi için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri.....	51
Tablo 5.9	Dördüncü dereceden ölü zamansız $G_4(s)$ sitemi için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri.....	53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 : Keskin kümelerle ilgili boy tanımlaması 4
Şekil 1.2 : Bulanık Kümelerle ilgili boy tanımlaması..... 4
Şekil 1.3 : Orta Boyu temsil eden temel üyelik fonksiyonları..... 5
Şekil 1.4 : Uzun Boylular kümesi ve tümleyeni..... 6
Şekil 1.5 : Kısa ve Uzun boy kümelerinin kesişimi 6
Şekil 1.6 : Kısa ve Uzun Boy kümelerinin birleşimi..... 7
Şekil 2.1 : Bir bulanık sistemin iç yapısı..... 8
Şekil 2.2 : Mamdani tipi üyelik fonksiyonu..... 10
Şekil 2.3 : Tekli üyelik fomksiyonu..... 11
Şekil 2.4 : Hava sıcaklığını gösteren üçgen üyelik fonksiyonları..... 12
Şekil 2.5 : Fan hızını gösteren üçgen üyelik fonksiyonları..... 12
Şekil 2.6 : Ağırlık merkezi durulama yöntemi grafiği..... 14
Şekil 2.7 : Fan hızı çıkış değerinin ağırlık merkezi durulama yöntemiyle hesaplanışı..... 15
Şekil 3.1 : Bulanık PID kontrolörlerin sınıflandırılması..... 17
Şekil 3.2 : Tek girişli doğrudan bulanık tabanlı bulanık PID kontrolör..... 18
Şekil 3.3 : Tek girişli, üç bulanık kural tabanlı doğrudan bulanık PID kontrolör..... 18
Şekil 3.4 : Bulanık PD kontrolör..... 19
Şekil 3.5 : Bulanık PI kontrolör..... 19
Şekil 3.6 : İki girişli, Bulanık PI ve Bulanık PD tipi kontrolörün birleşiminden oluşan Bulanık PID tipi kontrolör..... 20
Şekil 3.7 : İki girişli, tek kural tabanlı bulanık PID kontrolör..... 20
Şekil 3.8 : Üç girişli tek kural tabanlı Bulanık PID tipi kontrolör..... 21
Şekil 3.9 : Üç ayrı kural tabanlı hata, hatanın değişimi ve toplam hata girişli bulanık PID kontrolör yapısı..... 21
Şekil 3.10 : Bulanık kazanç ayarlamalı PID kontrolör yapısı..... 22
Şekil 3.11 : Melez PID Kontrolör Yapısı..... 23
Şekil 4.1 : PID kontrolörün blok gösterimi..... 25
Şekil 5.1 : AKM'ün iki girişli ve tek kural tabanlı Bulanık PID Kontrolör yapısı..... 29
Şekil 5.2 : AMK'ün bulanık kontrolör girişlerinin üçgen üyelik fonksiyonları 30
Şekil 5.3 : AMK'ün bulanık kontrolör çıkışı üyelik fonksiyonları..... 30
Şekil 5.4 : Bulanık PID Kontrolörün, Bulanık Kontrol Yüzey Şekli..... 31
Şekil 5.5 : Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolör Sisteminin Yapısı..... 32
Şekil 5.6 : Parabol, üçgen ve hiperbol fonksiyon grafikleri..... 37
Şekil 5.7 : Parabol anahtarlama fonksiyonunun, 1.dereceden sistemiçin Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolörün sistem çıkışları..... 40
Şekil 5.8 : Parabol anahtarlama fonksiyonunun 1.dereceden sistem için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolör kontrol işaretleri..... 40

Şekil 5.9 : Hiperbol anahtarlama fonksiyonunun, 1.dereceden sistem için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolörün sistem çıkışları..... 42
Şekil 5.10 : Hiperbol anahtarlama fonksiyonunun 1.dereceden sistem için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolör kontrol işaretleri..... 42
Şekil 5.11 : Üçgen anahtarlama fonksiyonunun, 1.dereceden sistem için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolörün sistem çıkışları..... 43
Şekil 5.12 : Üçgen anahtarlama fonksiyonunun 1.dereceden sistem için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolör kontrol işaretleri..... 43
Şekil 5.13 : Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 1. dereceden ölü zamanlı $G_1(s)$ sistemi için sistem cevapları..... 48
Şekil 5.14 : Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 1. dereceden ölü zamanlı $G_1(s)$ sistemi için kontrol işaretleri..... 48
Şekil 5.15 : Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 2. dereceden ölü zamanlı $G_2(s)$ sistemi için sistem cevapları..... 50
Şekil 5.16 : Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 2. dereceden ölü zamanlı $G_2(s)$ sistemi için kontrol işaretleri..... 50
Şekil 5.17 : Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 3. dereceden ölü zamanlı $G_3(s)$ sistemi için sistem cevapları..... 52
Şekil 5.18 : Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 3. dereceden ölü zamanlı $G_3(s)$ sistemi için kontrol işaretleri..... 52
Şekil 5.19 : Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 4. dereceden $G_4(s)$ sistemi için sistem cevapları..... 54
Şekil 5.20 : Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 4. dereceden $G_4(s)$ sistemi için kontrol işaretleri..... 54

SEMBOL LİSTESİ

u	**:** Akıllı Melez Kontrolör kontrol işareti
uc	**:** Bulanık Kontrolör kontrol işareti
e	**:** Hata işareti
$\dot{e}$	**:** Hatanın türevi
μ	**:** Üyelik fonksiyonu
Kp	**:** Klasik PID Kontrolörün oransal kazancı
Ki	**:** Klasik PID Kontrolörün integral kazancı
Kd	**:** Klasik PID Kontrolörün türev kazancı
A(α)	**:** Alfa Bulanık Kontolör çıkış ölçekleme çarpanı
B(β)	**:** Beta Bulanık Kontolör çıkış ölçekleme çarpanı
K_e	**:** Hata girişinin ölçekleme çarpanı
K_d	**:** Hatanın değişimi girişinin ölçekleme çarpanı
P	**:** Aşım değeri
ts	**:** Yerleşme zamanı
tp	**:** Yükselme zamanı
e_{ss}	**:** Kararlı hal hatası
$\int e$	**:** Hatanın integrali
Je	**:** Hata girşi için ölçekleme çarpanı
Jd	**:** Hata değişimi için ölçekleme çarpanı
Ji	**:** Toplam hata girişi için ölçekleme çarpanı
Ju_1	**:** Çıkış ölçekleme çarpanı
Ju_2	**:** Çıkış ölçekleme çarpanı
Ju_2	**:** Çıkış ölçekleme çarpanı
F(e)	**:** Anahtarlama mekanizmasının ağırlık çarpanı fonksiyonu

AKILLI MELEZ BULANIK PID KONTROLÖR YAPISI

ÖZET

Bu çalışmada, Klasik PID ve Bulanık kontrolörün akıllı bir yöntemle harmanlanmasından meydana gelen Akıllı Melez Bulanık PID kontrollör yapısı tanıtılmaktadır. Temel olarak bu tasarım metodunda, sistemde oluşan hatayla ilişkili bir fonksiyona bağlı harmanlama mekanizması yardımıyla klasik PID Kontrolör ve Bulanık Kontrolör birleştirilmektedir. Buna ek olarak, akıllı bir anahtarlama mekanizması, harmanlama mekanizmasının hangi kontrolörün (Klasik PID veya Bulanık Kontrolör) kontrol eyleminde öncelikli olarak baskın kullanılacağının kararını almaktadır. Yeni Akıllı Melez Kontrolör yapısı ile çeşitli sistemler için simülasyonlar yapılmakta ve değerlendirmeler sonucu hem geçici hal cevabında hem de karalı hal cevabında her iki kontrolörden de (klasik PID kontrolör ve Bulanık kontrolör) daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Kontrolör parametreleri genetik algoritmalar yardımıyla belirlenmektedir.

AN INTELLIGENT FUZZY PID CONTROLLER STRUCTURE

SUMMARY

In this study, a design methodology is introduced that blends the classical PID and the Fuzzy controllers in an intelligent way and thus a new intelligent hybrid controller has been achieved. Basically, in this design methodology, the classical PID and fuzzy controller has been combined by a blending mechanism that depends on a certain function of actuating error. Moreover, an intelligent switching scheme is induced on the blending mechanism that makes a decision upon the priority of the two controller parts; namely, the classical PID and the fuzzy constituents. The simulations done on various processes using the new hybrid fuzzy PID controller provides 'better' system responses in terms of transient and steady-state performances when compared to the pure classical PID or the pure fuzzy controller applications. The controller parameters are all tuned by the aid of genetic search algorithm.

1.BULANIK MANTIK

1.1 Giriş

Gelişen teknoloji ile daha kompleks sistemleri kontrol altına almak mümkün olmaktadır. Dünyadaki sistemleri tanımlamak ve kontrol etmek için kesin yargılar çoğu zaman yetersiz kalmaktadır çünkü sistemler çoğu kez belirsizlikler ve doğrusal olmayan yapılar içerir.

Bu nedenle, California Berkeley Üniversitesinden Prof. Lotfi Zadeh 1965 yılında klasik Aristo mantığına alternatif olarak Bulanık mantık teorisini tanımlamıştır[7]. Bilgisayar mantığındaki kesinliğin yerine insan düşünce sisteminde bulunan belirsizliklere göre matematiksel bir yöntem olarak bulanık mantığı sunmuştur. Bulanık mantığın amacı bilgisayarın insan gibi düşünmesini sağlamak amacıyla insan ile bilgisayar arasındaki engeli ortadan kaldırmaktır[8].

Bulanık mantıkta bilgisayarda kullanılan Aristo mantığındaki kesin ve ayrık ifadeler 1-0, var-yok, siyah-beyaz, yerine insan düşünce sistemine daha yakın olan dilsel değişkenler "çok sıcak", "ılık", "soğuk", "az", "yeterince" gibi kesinlik taşımayan kavramlar kullanılır. Klasik mantık bize çok kesin sınırlar sunmaktadır. Örneğin klasik mantığa göre bir odanın sıcaklığını tanımlarken, 30 derece ve üstü için sıcak, altı için soğuk tanımı yapılıyorsa, 29 derece sıcaklık, soğuk olarak tanımlanacaktır. Oysa bulanık mantık odanın ne kadar sıcak olduğunu tanımlar. Klasik mantık gibi sıcaklık değerlerine sıcak (1) yada soğuk (0) gibi kesin değerler vermez. 0.1, 0.2, 0.3, ….. gibi daha hassas ve esnek değerler verir. Böylece 29 derece sıcaklığa "0" değeri yani "soğuk" yerine, 0.4 gibi bir sıcaklıktadır demektedir. İşte bu esneklik sayesinde bulanık mantık uygulandığı her sahada daha hassas uygulamalara imkan sağlamaktadır.

1.2 Bulanık Mantığın Tarihteki İlk Önemli Uygulamaları

Bulanık mantık ilk kez 1973 yılında, Londra'daki Queen Mary College'de profesör olan H. Mamdani tarafından bir buhar makinesinde uygulandı. Ticari olarak ise ilk defa, 1980 yılında, Danimarka'daki bir çimento fabrikasının fırınını kontrol etmede kullanıldı.

"Bulanık mantık kuramının ilk önemli endüstriyel uygulaması 1980 yılında Danimarka'daki bir çimento fabrikasında (F.L. Smidth) gerçekleştirmiş, değirmen içinde çok hassas bir denge ile oranlanması gereken sıcaklık ve oksijen ayarı en uygun bir biçimde yapılmıştır. Bundan sonra bir başka dikkate değer uygulama ise Hitachi firması tarafından 1987 yılında Sendai Metro'sunda gerçekleştirilmiştir. Bu sayede trenin istenen konumda durması üç kat daha iyileştirilmiş, kullanılan enerji ise %10 azaltılmıştır. Bunun üzerine Hitachi firmasına benzeri bir sistemin Tokyo Metro'suna da kurması için talep gelmiştir. Yamaichi Securities'in geliştirdiği Bulanık Mantık temelli uzman sistem, 1988 yılının Ekim ayında kara Pazar adlı Tokyo Borsası'nda yaşanan krizin sinyallerini onsekiz gün önceden haber vermiştir. Bu kadar başarılı uygulamaların ardından bulanık mantığa olan ilgi artmış, uluslararası bir çalışma ortamı oluşturabilmek amacıyla 1989 yılında aralarında SGS, Thomson, Omron, Hitachi, NCR, IBM, Toshiba ve Matsuhita gibi dünya devlerinin de bulunduğu 51 firma tarafından LIFE (Laboratory for Interchange Fuzzy Engineering) laboratuarları kurulmuştur"[7].

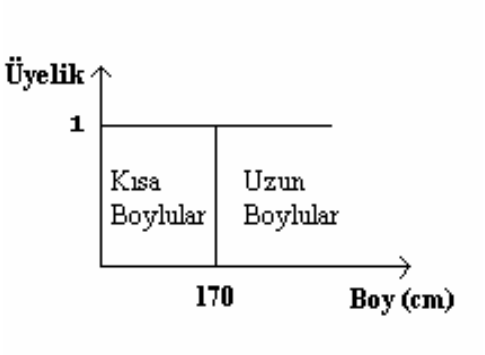
LIFE'ın yanında FLSI (Fuzzy Logic Systems Institute) adındaki diğer araştırma merkezi de Bulanık Mantığın Elektronik, Otomotiv ve Üretim teknolojisi alanında yeni uygulamalar kazandırmaktadır. Günümüzde bulanık mantığın endüstride ve günlük hayatımızda başarıyla uygulandığı bir çok alan bulunmaktadır.

1.3 Bulanık Kümeler

1.3.1 Tanım

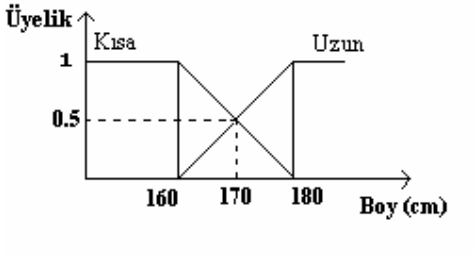
A bulanık kümesi $\mu_A(y)$ üyelik fonksiyonu ile bir Y evrensel kümesi içinde tanımlanır ve her y değerine karşı düşen üyelik fonksiyonu değerine o, y elemanının "A bulanık kümesine ait üyelik derecesi" denir. Üyelik fonksiyonu [0,1] aralığında tanımlıdır. $\mu_A : y \rightarrow [0,1]$ Üyelik derecesinin 0 olması, karşılık gelen y elemanının o bulanık kümenin tamamen dışında, 1 olması ise tamamen içinde olduğu anlamına gelir. Üyelik derecesi o elemanın söz konusu kümeye aitlik derecesini belirtir.

Örneğin, uzun ve kısa boylular kümesi keskin kümeler olarak Şekil.1.1 deki gibi gösterilebilir.



Şekil 1.1 Keskin kümelerle ilgili boy tanımlaması

Bu durumda boyu 170 cm 'den uzun olanlar uzun boylu, kısa olanlar kısa boylu olarak tanımlanmıştır. Kişinin boyu 169 cm ise kısa boylu olarak, 171 cm ise uzun boylu olarak nitelendirilmektedir. Aynı örneği bulanık kümelerde inceleyecek olursak;



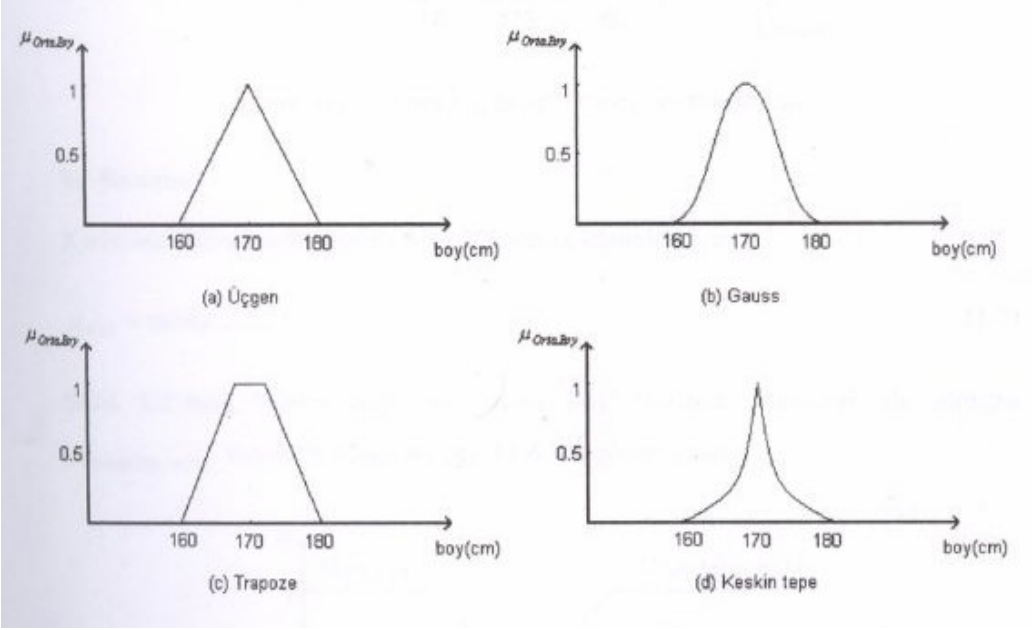
Şekil 1.2 Bulanık kümeler ile boy tanımlaması

Şekil 1.2 ‘de görüldüğü gibi 170 cm boyundaki bir kişi 0.5 üyelik derecesiyle Kısa boy ve yine 0.5 üyelik derecesiyle Uzun boy kümesine ait olmaktadır. 160 cm ‘nin altındakiler $\mu_{Kısaboy} = 1$ ve $\mu_{Uzunboy} = 0$ yani kısa boylu, 180 cm üzerindekiler uzun boylu kabul edilmektedir. 160 cm ve 180 cm arasındakiler, sahip oldukları üyelik dereceleri büyüklüğünde iki kümeye de ait olmaktadır.

1.3.2 Üyelik Fonksiyonları

Bulanık kümeler oluşturulurken tanımlanacak kavramın karakteristiğine göre [0,1] aralığında istenilen değerleri alacak farklı fonksiyonlar tanımlanabilir.

Gauss, trapezoid, keskin tepe, üçgen üyelik fonksiyonları gibi bazı genel üyelik fonksiyonları şekil 1.3 ‘de gösterilmektedir.



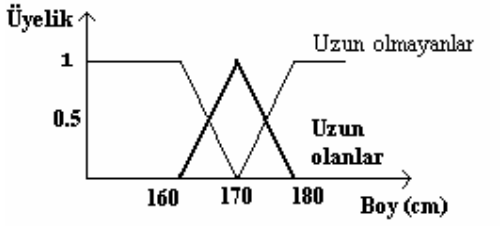
Şekil 1.3 Orta boyu temsil eden üçgen, trapezoid, keskin tepe, gauss üyelik fonksiyonları

1.3.3 Bulanık Küme İşlemleri

Y evrensel kümesinde tanımlanan bir A bulanık kümesini için, tümleme kesişim ve birleşim işlemlerini tanımlanmaktadır.

I)Tümleme İşlemi

$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$ ile tanımlanmaktadır.

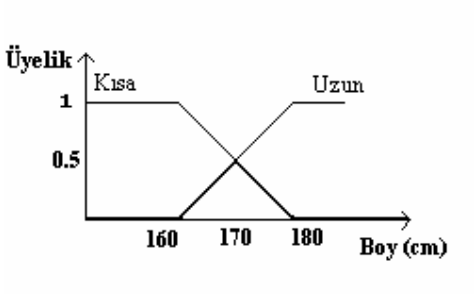


Şekil 1.4 Uzun boylular kümesi ve tümleyeni

II) Kesişim İşlemi

Y evrensel kümesinde tanımlanmış A ve B bulanık kümeleri için, kesişim işlemi şekil 1.5 de gösterilmektedir.

$\mu_{A\cap B} = \min(\mu_A, \mu_B)$ ile tanımlanmaktadır.

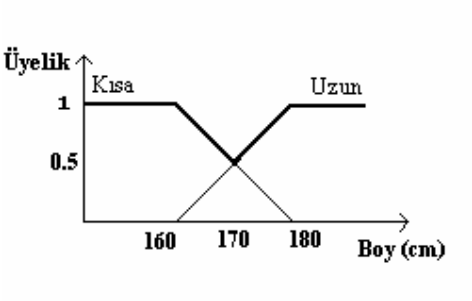


Şekil 1.5 Kısa ve Uzun Boy bulanık kümelerinin kesişimi

III) Birleşim İşlemi

Y evrensel kümesinde tanımlanmış A ve B bulanık kümeleri için, birleşim işlemi şekil 1.6 da gösterilmektedir.

$\mu_{A\cup B} = \max(\mu_A, \mu_B)$ ile tanımlanmaktadır.

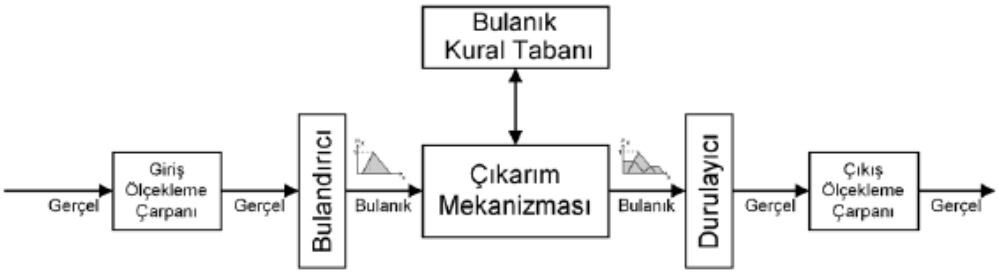


Şekil 1.6 Kısa ve Uzun Boy kümelerinin birleşimi

2. BULANIK KONTROL

2.1 Bulanık Kontrolörün Yapısı

Bulanık sistemlerin çok büyük bir kısmı, EĞER (If) – O HALDE (Then) kuralları ile tanımlanmıştır. Bu tür sistemler, "Kural tabanlı bulanık sistemler " olarak adlandırılır. Bulanık sistemler, modelleme, veri çözümlemesi, kestirim ve kontrol gibi farklı amaçlar için kullanılabilirler.



Şekil 2.1 Bir bulanık sistemin iç yapısı

En basit bulanık sistemin ana yapıları bulanık kural tabanı ve çıkarım mekanizmasıdır. Kural tabanında, bulanık EĞER – O HALDE kuralları bulunur. Kural tabanı ve çıkarım mekanizmasından oluşan temel bulanık sistem yapısı bulandırıcı ve durulayıcı adı verilen iki birim daha içermektedir. Bulandırıcı gerçel değerli sistem girişini bulanık kümelere dönüştürürken, durulayacı, tersine, çıkarım mekanizmasının ürettiği bulanık kümeleri gerçel değerli sistem çıkışına dönüştürmektedir. Bu tür bulanık sistemlere ilişkin blok şema şekil 2.1 'de verilmiştir[14].

2.2 Bulanık Kural Tabanı

2.2.1 Bulanık Karar Tabloları

Bulanık kontrol, bulanık kuralları oluştururken, mantıksal "ve", "veya" ve "değil" işlemleri kullanılmaktadır. Bunlar şu şekilde tanımlanmaktadır[4].

i) VE : Bulanık VE işlemi için kullanılan minimum ve çarpım olarak iki yöntem vardır, μ_A bir gerçel giriş değerinin A bulanık kümesine aitliği olsun, μ_B de başka bir gerçel giriş değerinin B bulanık kümesine aitliği olsun.

i. 1) Minimum

$$\mu_{AveB} = \mu_A \wedge \mu_B = Min(\mu_A, \mu_B) \quad \textbf{(2.1)}$$

i. 2) Çarpım

$$\mu_{AveB} = \mu_A \wedge \mu_B = \mu_A \times \mu_B \quad \textbf{(2.2)}$$

ii) VEYA: Bulanık VEYA işlemi için kullanılan maksimum ve birleşim olarak iki yöntem vardır, μ_A bir gerçel giriş değerinin A bulanık kümesine aitliği olsun, μ_B de başka bir gerçel giriş değerinin B bulanık kümesine aitliği olsun.

ii. 1) Maksimum

$$\mu_{AveyaB} = \mu_A \vee \mu_B = Max(\mu_A, \mu_B) \quad \textbf{(2.3)}$$

ii. 2) Birleşim

$$\mu_{AveyaB} = \mu_A \vee \mu_B = \mu_A + \mu_B - (\mu_A \times \mu_B) \quad \textbf{(2.4)}$$

iii) DEĞİL

μ_A bir gerçel giriş değerinin A bulanık kümesine aitliği olsun,

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad \textbf{(2.5)}$$

Bulanık sistemlerde değişkenler arasındaki ilişkiler

"EĞER öncül (antecedent) önerme **O HALDE** sonuç (consequent) önerme**"** yapısındaki bulanık kurallarla ifade edilir.

2.2.2 Bulanık önermedeki sonuç ifadesinin yapısına göre bulanık kural tabanları

a) Mamdani Tipi Bulanık Kurallar

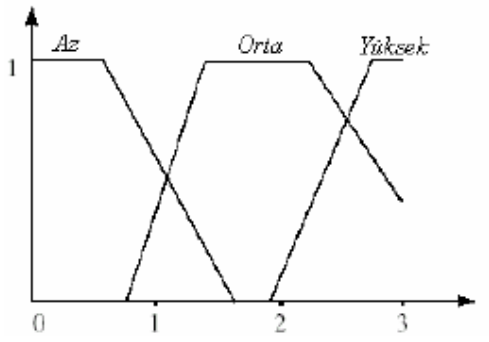
Mamdani tipi bulanık kurallarda durumlar ve cevaplar bulanık olarak tanımlanmaktadır [5].

EĞER $\tilde{x}$ Ai ise **O HALDE** $\tilde{y}$ Bi'dir **(2.6)**

şeklindedir. Burada, $\tilde{x}$ giriş (öncül) dilsel değişken ve Ai 'ler ise öncül dilsel terimlerdir. Benzer şekilde $\tilde{y}$ çıkış (sonuç) dilsel değişken ve Bi 'ler ise sonuç dilsel terimlerdir. Kurallarda yer alan $\tilde{x}$, $\tilde{y}$ dilsel değişkenlerinin değerleri ve Ai, Bi dilsel terimleri kendi tanım bölgelerinde tanımlı bulanık kümelerdir: $x \in X \subset R^P$ ve $y \in Y \subset R^q$. Öncül bulanık kümelerine ilişkin üyelik fonksiyonları,

$$\mu(x): X \to [0,1], \mu(y): Y \to [0,1] \quad \textbf{(2.7)}$$

şeklinde dönüşümlerdir. Ai bulanık kümeleri, ilişkili sonuç önermelerinin geçerli olduğu öncül uzaydaki bulanık bölgeler olmaktadır. Ai ve Bi dilsel değişkenleri genellikle daha önceden tanımlanmış "küçük", "orta", "büyük", "negatif", "positif" gibi terimlerden seçilebilir. Bu kümeler, **A** ve **B** ile gösterilirse Ai ve Bi 'ler, $Ai \in \mathbf{A}$ ve $Bi \in \mathbf{B}$ şeklinde ifade edilebilir. Örnek olarak, ısınma gücünün (W) az, orta ve yüksek bulanık kümelerini içeren Mamdani tipi üyelik fonksiyonu şekil 2.2'de verilmektedir.



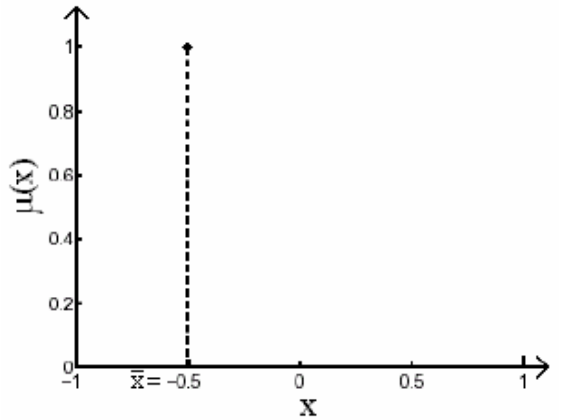
Şekil 2.2 Mamdani tipi üyelik fonksiyonu

b)Tekli (Singleton) Tipi Bulanık Kurallar

Mamdani tipi bulanık kuralların özel bir halidir. Kuralların sonuç önermesinde yer alan B_i bulanık kümelerin tekli bulanık küme seçilmesiyle oluşturulur.
Tekli üyelik fonksiyonu,

$$\mu(x)=\begin{cases}1 & ,x=\overline{x}\\ 0 & ,\text{aksi halde}\end{cases} \qquad \textbf{(2.8)}$$

şeklinde tanımlanır.



Şekil 2.3 Tekli Üyelik Fonksiyonu

B_i bulanık kümeleri, b_i gerçel sayılar ile aşağıdaki gibi basitçe ifade edildiğinde Tekli kurallar,

EĞER x, A_I ise O HALDE y= b_i , i=1,2,3,…,r **(2.9)**

şeklinde yazılabilir.

c) Takagi-Sugeno Tipi Bulanık Kümeler

Mamdani tipi bulanık EĞER - O HALDE kurallarındaki öncül ve sonuç kısımlar bulanık önermeler ile sistemi ifade etmektedir. Oysaki Takagi-Sugeno [6] bulanık modelinin sonuç kısımda, bir belirgin (kesin) fonksiyon mevcuttur. Dolayısıyla bu model hem matematiksel, hem de dilsel ifadelerle oluşturulan bir model olarak görülebilir. Öncül kısım, sonuç kısmındaki fonksiyonların varolduğu, giriş uzayının bulanık bölgelerini ifade eder. Takagi-Sugeno modelinde kurallar (2.10)'daki yapıdadır.

EĞER x, A_I ise O HALDE $y_i = f_i(x)$, i=1,2,3,…,r **(2.10)**

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

EĞER x, A_i ise O HALDE $y_i = a_i{}^T x + b_i$ i=1,2,3,…,r **(2.11)**

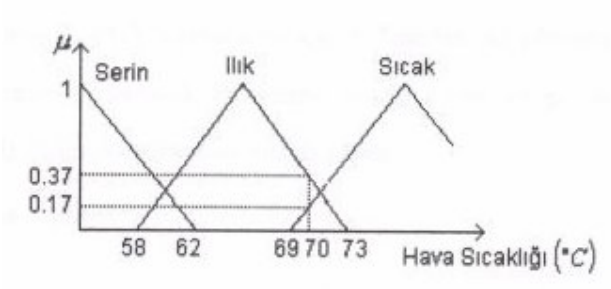
Burada a_i parametre vektörü, b_i ise bir skalerdir. Dikkat edilecek olursa, kurallardaki tüm a_i ler sıfır vektörü olarak alındığında tekli model elde edilir.

2.2.3 Bulanık Kontrol Kural Tabanı Oluşturulması

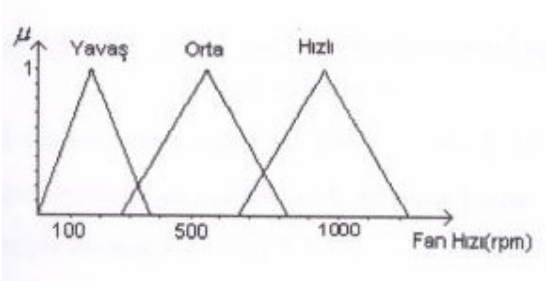
Kural tabanı, giriş ve çıkış değerleri için üyelik fonksiyonları belirlendikten sonra giriş değerleri ile çıkış cevapları arasında bağlantıyı belirlemek için oluşturulmaktadır. Bulanık kural tabanındaki kurallar,

EĞER (durum) O halde (sonuç) şeklinde tanımlanmaktadır.

Hava sıcaklığını tanımlayan üyelik fonksiyonlarını (Şekil 2.4), giriş değişkenlerini bulandırmak için kullanılan üyelik fonksiyonları olarak alırsak, çıkış değişkenleri için üyelik fonksiyonlarını (Şekil 2.5)'teki gibi tanımlarsak, basit bir fan sistemi için kural tabanı oluşturabiliriz[2].



Şekil 2.4 Hava sıcaklığını gösteren üçgen üyelik fonksiyonları



Şekil 2.5 Fan hızını gösteren üçgen üyelik fonksiyonları

Hava sıcaklığını giriş üyelik fonksiyonları, fan hızını da çıkış üyelik fonksiyonları olarak aldığımızda aşağıdaki kurallar oluşturulabilir.

Eğer Hava Sıcaklığı "sıcak" ise , O Halde Fan "hızlı" çalışacak.

Eğer Hava Sıcaklığı "ılık" ise , O Halde Fan "orta hızda" çalışacak.

Eğer Hava Sıcaklığı "soğuk" ise , O Halde Fan "yavaş" çalışacak.

Şekil 2.4'teki giriş üyelik fonksiyonundan görüleceği üzere, $70^{\circ}C$ giriş sıcaklık değeri için iki kural ateşlenir, bunlar;

Eğer Hava sıcaklığı "ılık" ise, O Halde fan orta hızla çalışmaktadır ve $70^{\circ}C$ için 0.37'lik bir kuvvetle ateşlenmektedir.

Eğer Hava sıcaklığı "sıcak" ise, O Halde fan orta hızla çalışmaktadır ve $70^{\circ}C$ için 0.17'lik bir kuvvetle ateşlenmektedir.

Bu örnekte, bulanık kural tabanı, fazla giriş/çıkış değişkenine bağlı olmasa da Eğer ~ O halde olarak tanımlanan kurallarla birden çok giriş ve çıkış değişkeni için bulanık kural tabanları oluşturulabilir. Bu bulanık kurallar dilsel değişkenlerle oluşturulduğu için, çok çeşitli kural tabanları oluşturmak mümkündür bu da doğrusal yapıya sahip olmayan sistemlerin bile kontrolüne olanak sağlamaktadır.

2.3 Bulandırma

Bulanık kontrolör gerçek dünyadaki değişkenleri kendi sistemi içinde tanımlayabilmek için, gerçel işaretleri, bulanık değişkenler kümesine dönüştürmektedir. Bulandırma safhasında, gelen gerçel sinyalere karşılık düşecek üyelik fonksiyonları oluşturulmaktadır.

Şekil 2.4'de hava sıcaklığı ölçümüne karşılık oluşturulan üyelik fonksiyonları gösterilmektedir ve görüleceği gibi sıcaklık değişkenini bulandırmak için, "serin", "ılık" ve "sıcak " durumlarını gösteren 3 ayrı bulanık küme tanımlanmaktadır. Bu kümeler birbirlerini kısmı olarak kapsamaktadır. Dolayısı ile bir gerçel giriş bir yada daha fazla bulanık kümece tanımlanabilmektedir.

Yukarıdaki örnekte de işlendiği gibi $70^{\circ}C$ sıcaklık giriş değeri için, 0.37'lik üyelik derecesiyle "ılık" kümesine ve 0.17'lik üyelik derecesiyle "sıcak" kümesine aittir[2].

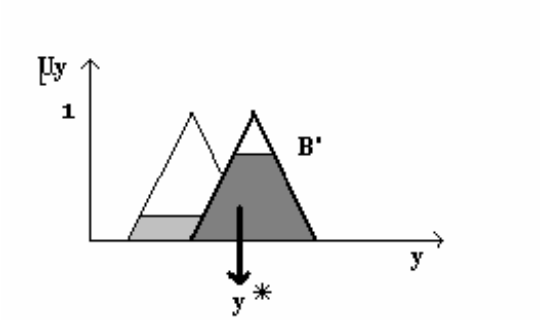
2.4 Durulama

Bulanık kontrolör son aşamada elde ettiği bulanık çıkış değişkenlerini tekrar gerçel değişkenlere dönüştürmektedir. Bu işleme durulama denir.

Durulama işlemi için ağırlıkların merkezi, alanlar toplamının merkezi, en büyük alanın merkezi, yüksekliklerin ortalaması gibi çeşitli yöntemler vardır. Bunların en yaygın olarak kullanılanı ağırlıkların merkezi yöntemidir[23].

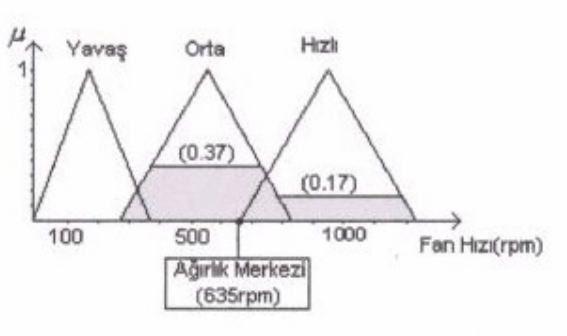
$\mu_{B'}(y)$ bulanık bir küme olarak kabul edilirse, ağırlık merkezi durulama yöntemi denklemi, ayrık durumda (2.12)'deki formül ile hesaplanmaktadır.

$$y^* = \frac{\sum y\mu_{B'}(y)}{\sum \mu_{B'}(y)} \qquad \textbf{(2.12)}$$



Şekil 2.6 Ağırlık merkezi durulama yöntemi grafiği

Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları şekil 2.4 ve şekil 2.5'te gösterilen, bulanık kontrol tabanı oluşturulan $70^{\circ}C$ gerçel giriş için ağırlık merkezi durulama yöntemiyle durulanışı[2] Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7 Fan hızı çıkış değerinin ağırlık merkezi durulama yöntemiyle hesaplanışı

Sonuç olarak, örnekte verilen bulanık kontrolör ile, 70°C sıcaklık girişi için 635 rpm'lik bir fan hızı çıkışı elde edilmektedir.

2.5 Ölçekleme Çarpanları

Üyelik fonksiyonları oluşturulurken normalize edilmiş tanım kümesi kullanıldığında ölçekleme çarpanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle kontrolör tasarımında ölçekleme çarpanının önemi büyüktür. Genellikle PI, PD ve PID kontrol yapılarında giriş üyelik fonksiyonları [-1,1] aralığında keskin girişler için tanımlanır.

3. BULANIK KONTROLÖR

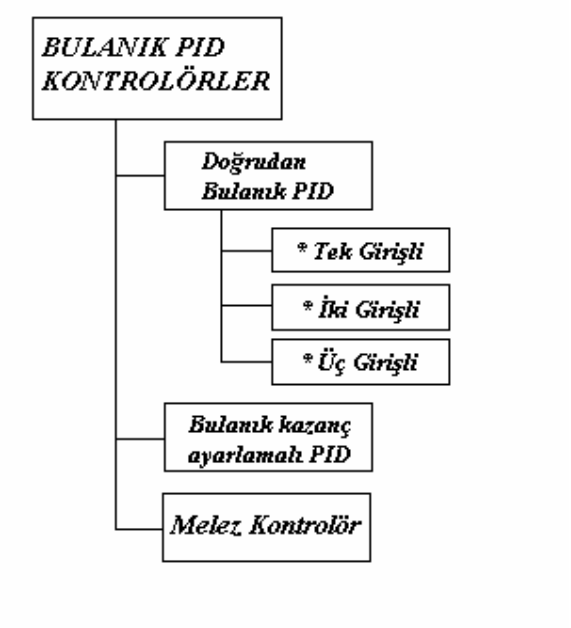
Bulanık kontrolörler, sistem dinamiğinin karmaşık veya yüksek dereceden doğrusal olmayan özellik taşıdığı sistemlerde kullanılırlar. 1974 yılında ilk bulanık mantık algoritması, Mamdani tarafından insan operatörünün dilsel kontrolünü birleştirmek amacıyla oluşturulmuştur[5]. Klasik kontrolörlerle karşılaştırıldığında bulanık kontrolörlerin daha başarılı olmasına rağmen, algoritma büyük ölçüde operatörün deneyim ve bilgisine dayanmaktadır. Operatör deneyimine bağlı oluşacak bu olumsuzluktan kurtulmak amacıyla, ilk olarak Bulanık kontrolörlerin yapısı için 1976 yılında Mac-Vicar-Whelan[12] tarafından önerilen bu bulanık kurallar ile, Tang ve Mulholland PI ve PD kontrolör yapılarına yaklaşılmış ve oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir[13].

Literatürde birçok değişik tipte bulanık PID (PI ve PD içeren) kontrolör tasarlanmaktadır. Bulanık kontrolörler daha çok kontrol kurallarından tipik bir bulanık mantık kontrolu oluşturulur ve kontrol sinyali[12] yada köşegen kural tabanı oluşturma yaklaşımlarında[22], olduğu gibi bilgi tabanı ve çıkarım mekanizmalarından elde edilir.

Bu tipteki kontrolörler, giriş-çıkış ilişkisi bakımından PID kontrolör yapılarına benzediği için Bulanık PID tipi kontrolörler olarak tanımlanmaktadır.

3.1 Bulanık PID Kontrolör Yapıları

Literatürde Bulanık PID ve kontrolörler için pek çok yapı tanımlanmıştır. Bulanık PID Kontrolörlerin sınıflandırılması şekil 3.1'de verilmektedir[10].



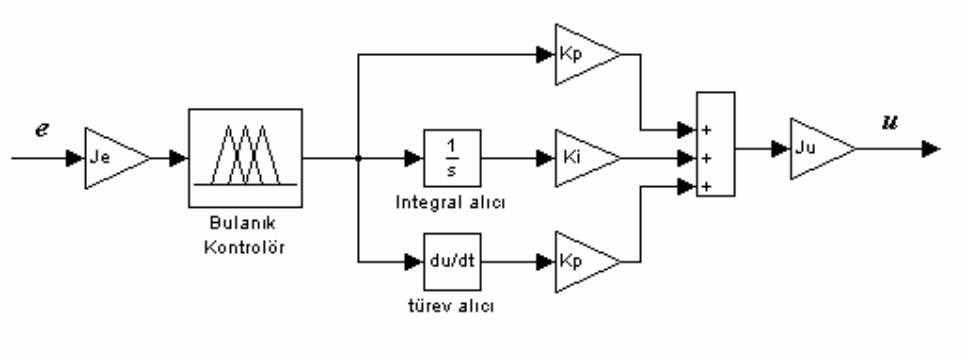
Şekil 3.1 Bulanık PID kontrolörlerin sınıflandırılması

3.2 Doğrudan Bulanık PID Kontrolör

Kontrol işaretinin bilgi tabanından ve bulanık çıkarım mekanizmasından elde edildiği tipik bir bulanık mantık kontrolör yapısıdır. İşlem direkt olarak bulanık model olarak sürdürüldüğünden bu tipteki kontrolöre doğrudan Bulanık Kontrolör denir[10,15]. Kontrolör giriş sayılarına göre üç sınıfa ayrılmaktadır.

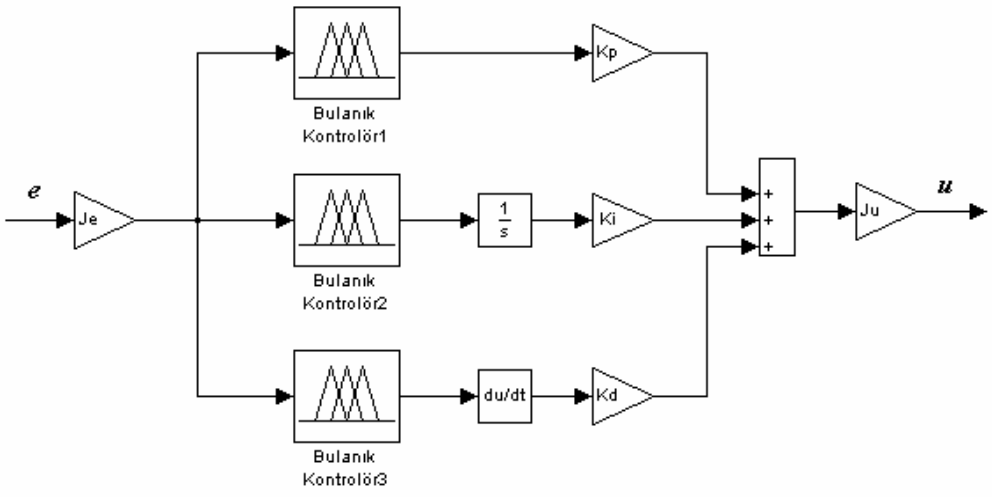
3.2.1 Tek Girişli Bulanık PID

Hata bilgisini kontrol için referans olarak kullanmaktadır. Tek girişli (hata girişli) bulanık kontrolör yapısı şekil 3.2'de gösterilmektedir. Bu yapıda, hatanın, bulanık oransal, doğrusal olmayan izdüşümünün klasik yapılı bir PID kontrolörle kaskad bağlanmış hali görülmektedir. [17]



Şekil 3.2 Tek girişli doğrudan bulanık tabanlı bulanık PID kontrolör

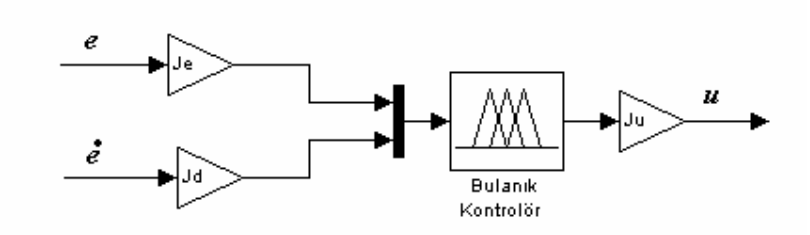
şekil 3.2' deki yapıda verilen tek olan bulanık PID kontrolörü, klasik PID'nin her kazancı için (oransal, türev ve integral kazançları) farklı olarak atadığımızda üç ayrı bulanık kontrolör ile oluşturulmuş, hata girişli başka bir doğrudan bulanık PID kontrolör yapısı da şekil 3.3' deki gibi elde edilmektedir [12,16].



Şekil 3.3 Tek girişli, üç bulanık kural tabanlı doğrudan bulanık PID kontrolör

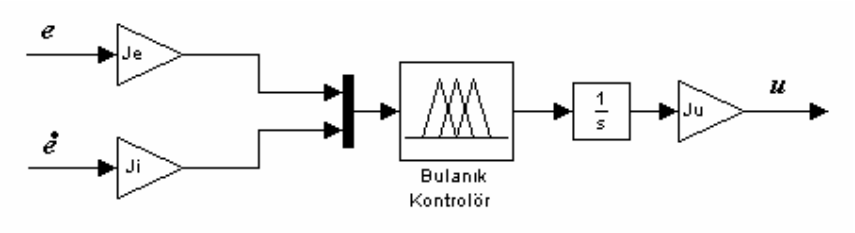
3.2.2 İki Girişli Bulanık PID

İki girişli yapıda kontrol girişi olarak hata ve hatanın değişimi alınmaktadır. İki girişli bir bulanık PD yapısı gösterilmektedir(şekil 3.4). Bulanık PD tipi kontrolör ve klasik PD kontrolör arasındaki denklik bazı özel koşullar ile oluşturulmaktadır[22].



Şekil 3.4 Bulanık PD kontrolör

Bulanık PD tipi kontrolör sürekli hal hatasını ortadan kaldıramadığı için Bulanık PI tipi kontrolör daha etkilidir. Bunun yanında integral işlemi nedeniyle, bulanık PI tipi kontrolör yüksek mertebeli sistemlerde, salınım yapabilmekte ve kararlı hale gelmesi daha çok zaman alabilmektedir. Şekil 3.5'te bulanık PI kontrolörün yapısı gösterilmektedir[3].

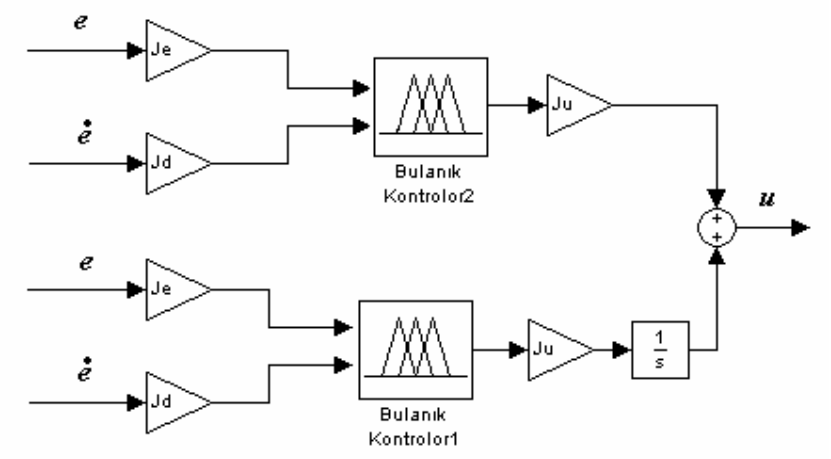


Şekil 3.5 Bulanık PI kontrolör

Yukarıda anlatılan nedenlerden dolayı bulanık PID tipi kontrolör teorik olarak başarımı arttıracaktır.

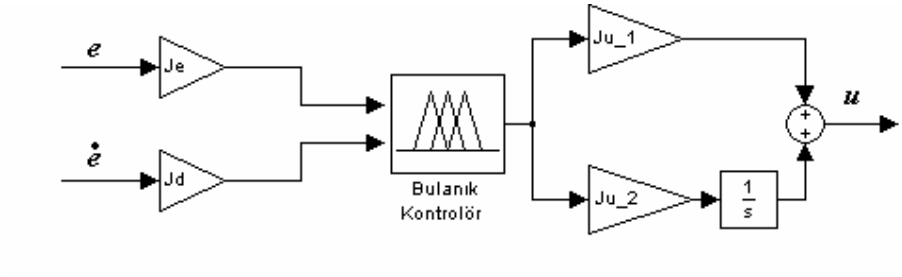
Bulanık PID tipi kontrolör kural tabanı için üç boyutlu kural tabanını kullanmak algılamada uzman oparatör açısından oldukça güçtür. Bu nedenle PI ve PD etkilerini birleştirmek yöntemiyle Bulanık PID kontrolör elde etmek mümkündür[18,22].

Bulanık PID tipi kontrolör, iki girişli, iki farklı kural tabanına sahip Bulanık PI ve Bulanık PD tipi kontrolörün Şekil 3.6'daki gibi birleştirilmesiyle meydana getirilebilir[19].



Şekil 3.6 İki girişli, Bulanık PI ve Bulanık PD tipi kontrolörün birleşiminden oluşan Bulanık PID tipi kontrolör.

İki girişli bulanık PID' lere bir başka yapı şekil 3.7 de verilmektedir. Bir bulanık PD tipi kontrolörün çıkışına integral ve toplam elemanı koyarak tek kural tabanlı olarak Bulanık PID elde etmek mümkündür [22].

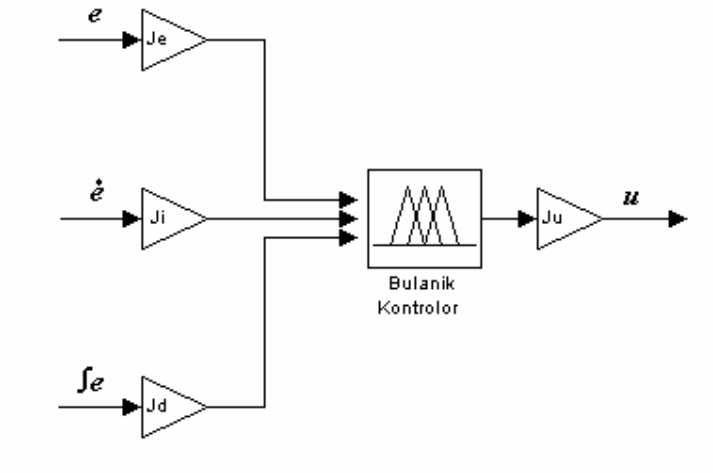


Şekil 3.7 İki girişli, tek kural tabanlı bulanık PID kontrolör.

Şekil3.7deki Bulanık PID tipi kontrolörün klasik PID kontrolöre nazaran en önemli kazancı iki adet girişe sahip olması ve kural tabanının iki boyutlu olmasıdır.

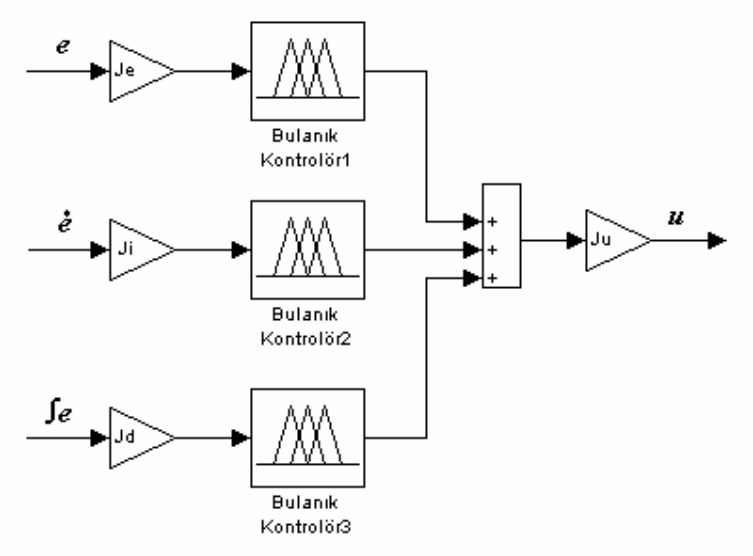
3.2.3 Üç Girişli Bulanık PID

Üç girişli PID kontrolörler, kontrol girişi olarak hata, hatanın değişimi, toplam hatayı almakta ve şekil 3.8 ki gibi bir yapıya sahip olmaktadır.



Şekil 3.8 Üç girişli tek kural tabanlı Bulanık PID tipi kontrolör.

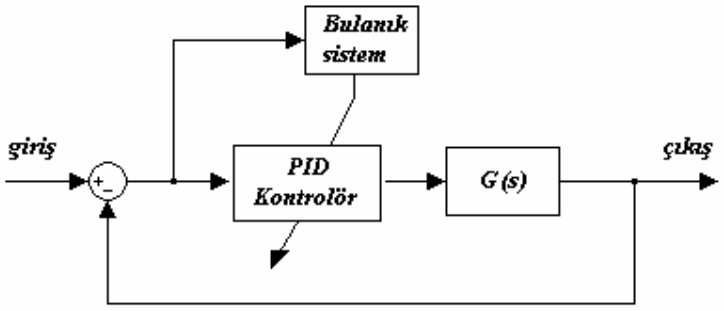
Şekil 3.8' deki yapıyı, bir bulanık kural tabanı için üç giriş değil, her bir kural tabanı için bir kontrol girişli olacak şekilde üç farklı kural tabanı kullanılarak, şekil3.9'daki yapıya dönüştürmek mümkündür.



Şekil 3.9 Üç ayrı kural tabanlı hata, hatanın değişimi ve toplam hata girişli bulanık PID kontrolör yapısı.

3.3 Bulanık Kazanç Ayarlamalı PID Kontrolör

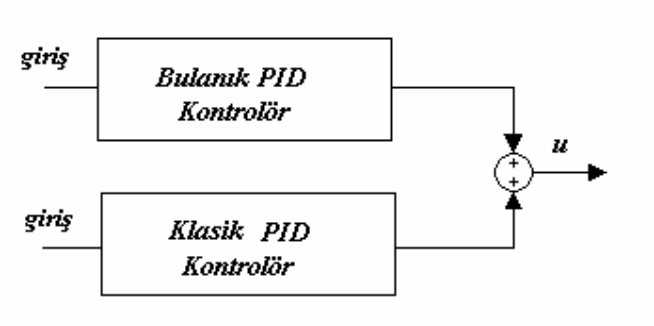
Bulanık kazanç ayarlamalı PID kontrolörler klasik bir PID kontrolörün parametrelerinin bir bulanık kazanç ayarlamalı sistem tarafından çevrimiçi olarak ayarlanması ile oluşturulmuş bir kontrol yapısıdır ve şekil 3.13'te gösterilmiştir[20].



Şekil 3.10 Bulanık kazanç ayarlamalı PID kontrolör yapısı

3.4 Melez PID Kontrolörler

Klasik PID kontrolör ve Bulanık PID tipi kontrolörün bir araya getirilmesinden oluşmaktadır. Bulanık kontrolör ile birleştirilmiş klasik PID, doğrusal sistemlerdeki başarıma ek olarak doğrusal olmayan, yüksek mertebeli kompleks sistemlerin kontrolünde de aktif rol oynamaktadır. Bu karakter yapısından dolayı Tez çalışmasında anlatılan Akıllı Melez Kontrolör, melez PID kontrolörler tipinde tasarlanmaktadır[10]. Melez Kontrolör yapısı en basit ifadesiyle şekil 3.11'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 3.11 Melez PID Kontrolör Yapısı

Bunun dışında literatürde farklı karma PID yapıları, bir bulanık PI kontrolörün klasik bir D kontrolör ile birleştirilmesi [21] veya bir klasik PID kontrolörde P kontrolörün bulanık bir P kontrolör ile değişiminden oluşan kontrolör gibi yapılar da yer almaktadır [18].

4. KLASİK PID KONTROLÖR

4.1 Klasik PID Kontrol Algoritması ve Yapısı

Basit yapıları nedeniyle endüstride en çok tercih edilen kontrol algoritması PID Kontrolördür[10]. Bu bölümde lineer sistemlerde iyi performans gösteren ve bu nedenle Akıllı Melez Kontrolör yapısında kullanılan iki temel kontrolörden biri olan klasik PID kontrolörün genel yapısı hakkında bilgiler verilmektedir.

Klasik PID kontrolörüne ait kontrol işareti denklem 4.1'deki gibi ifade edilmektedir.

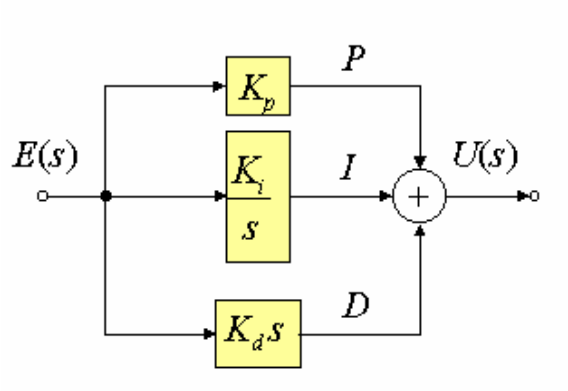
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Denklemlerdeki *u(t)* kontrol işretini, *e(t)* hata işaretini, K_P oransal kazancı, K_d türev kazancını, K_i integral kazancını, T_i integral zaman sabitini, T_d türev zaman sabitini ifade etmektedir.

Klasik PID kontrolör, üç-terimli (parametreli) kontrolör olarak bilinmekte ve genel olarak aşağıdaki transfer fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Denklem 4.1'deki ifadenin Laplace dönüşümü alınırsa transfer fonksiyonu denklem 4.2'deki gibi elde edilmektedir[1].

$$\frac{U(s)}{E(s)} = G(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_d s \qquad \textbf{(4.2)}$$

Standart bir PID kontrolörün blok gösterimi şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1. PID kontrolörün blok gösterimi

Klasik PID kontrolörün oransal, integral ve türev kazanç parametrelerinin arttıkça sisteme yaptığı etkiler, tablo 4.1'de gösterilmektedir.

Tablo.4.1. Klasik PID kazanç parametrelerinin kontrole katkısı

	Yükselme zamanı	**Aşım**	**Yerleşme zamanı**	**Sürekli_hal hatası**
Kp	Azalır	Artar	Küçük değişim	Azalır
Ki	Azalır	Artar	Artar	Sıfırlar
Kd	Küçük değişim	Azalır	Azalır	Küçük değişim

Sadece oransal kazanç ve integral kazancına bağlı olan PI kontrolörler yada oransal kazanç ve türev kazancına bağlı olan PD kontrolörler de vardır. Akıllı Melez Kontrolör tasarlanırken neden PD yada PI kontrolör yerine PID kontrolör tercih edildiği bölüm 4.2 daha detaylı anlatılmaktadır.

4.2 Akıllı Melez Kontrolör Yapısında PI yada PD Kontrolör Yerine PID Kontrolör Kullanılması

Tablo 4.1'de de belirtildiği gibi, PI kontrolörler, PID kontrolörlerle kıyaslandığında, yükselme zamanları daha kısadır fakat bununla birlikte yaptıkları aşım fazladır. Ayrıca sistemin yerleşme zamanını da uzatırlar. PD kontrolörler ile PID kontrolörler kıyaslandığında, PD kontrolörler sistem tipi sıfır ise karalı hal hatasını yok edemez, bu istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, PI kontrolörde oluşan aşımı azaltmak için türev kazancına, ve PD kontrolördeki kararlı hal hatasını yok etmek için integral kazancına ihtiyaç vardır. Dolayısı ile Akıllı Melez Kontrolörde, PID kontrolörü kullanmak tercih edilmektedir.

İki ayrı kontrolör yapısının da avantajları bir araya getirilerek, hem klasik PID gibi doğrusal sistemlerde, hem de Bulanık kontrolör gibi doğrusal olmayan yüksek mertebeli sistemlerde iyi performans sergileyecek melez yapıda bir kontrolör tasarlanmak mantıklı olmaktadır.

5. AKILLI MELEZ BULANIK PID KONTROLÖR

5.1 Özet

Bu çalışmada, klasik PID kontrolör ve Bulanık kontrolörün akıllı bir yöntemle harmanlanması sonucu elde edilen, yeni bir Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolör yapısı tanıtılmaktadır.

Temel olarak, bu yeni Akıllı Melez Kontrolör yapısında, klasik PID kontrolör ve Bulanık kontrolör, sistemde oluşan anlık hataya bağlı bir fonksiyon ile ilişkili anahtarlama mekanizması yardımıyla birleştirilmektedir. Anahtarlama mekanizması, hangi kontrolörün öncelikli olarak kontrole başlayacağının da kararını vermektedir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, çeşitli sistemler için, Akıllı Melez Bulanık PID kontrolörün sistem cevapları ve kontrol çıkışları, Bulanık PID kontrolör ve klasik PID kontrolör sistem cevapları ve kontrol çıkışlarıyla karşılaştırılmaktadır. Değerlendirmeler sonucu, Akıllı Melez Bulanık PID kontrolörün hem geçici hal hem de kararlı hal cevaplarının, bulanık kontrolör ve klasik PID kontrolör sistem cevaplarına kıyasla çok daha iyi olduğu gözlenmektedir. Kontrolör parametreleri genetik algoritmalar yardımıyla belirlenmektedir.

5.2 Giriş

Basit yapıları ve gösterdikleri dayanıklı performans nedeniyle PID kontrolörler endüstride en çok tercih edilen yapılardır[10]. Ancak, kontrol edilen sistemlerin yüksek mertebeden doğrusal olmayan sistemler olması durumunda, PID kontrolörlerin performansları sınırlı ve yetersiz kalmaktadır. Bulanık kontrolörler ise dilsel terimlere dayalı doğrusal olmayan kontrol yapısı ile doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde başarı sağlamaktadır. Bu nedenle, hem doğrusal sistemlerde hem de doğrusal olmayan sistemlerde iyi performans sergileyecek melez bir yapı ile klasik PID ve Bulanık kontrolörün avantajlarının akıllı bir yöntemle birleştirilmesi hedeflenmektedir. Tasarımın amacı, Bulanık PID tipi kontrolörün ve klasik PID kontrolörün geçici ve kararlı hal cevaplarından daha iyi cevap üreten ve sistem performansını arttıracak yeni bir Akıllı Melez Kontrolör tasarlamaktır.

Sonuç olarak, yapısı anlatılmakta olan Akıllı Melez Bulanık PID kontrolörün hızlı ve verimli çalışması istenmektedir. Simulasyonlar Matlab 6.5 Simulink programı kullanılarak yapılmakta, ve sonuçlar ilerdeki bölümlerde gösterilmektedir.

5.3 Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün Yapısı

Yapısal açıdan genel olarak baktığımızda, Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolör, (AMK) Bulanık kontrolörün ve klasik PID kontrolörün paralel olarak bağlanıp, toplanmasından oluşmaktadır[11].

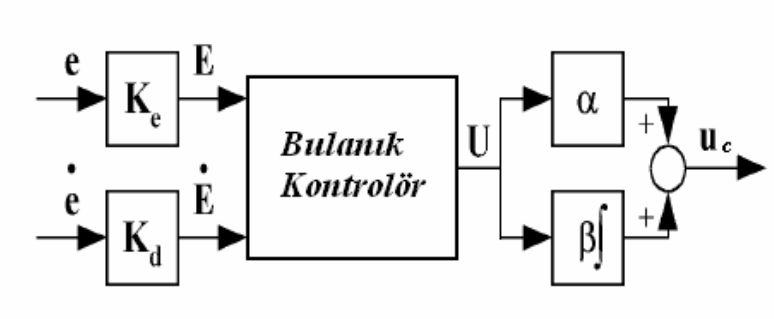
Temelde iki ana bölümden meydana gelmektedir ve bu bölümler 5.2.1 ve 5.2.2 ‘de anlatılmaktadır.

5. 3. 1 Akıllı Melez Bulanık Kontrolörde Kullanılan Klasik PID Kontrolör

Akıllı Melez Bulanık Kontrolör de ilk bölüm Klasik PID kontrolörden oluşmaktadır. Yapısı, kontrol algoritması ve kontrol parametrelerinin sisteme etkileri 4. bölümde detaylı olarak anlatılmaktadır.

5. 3. 2 Akıllı Melez Bulanık Kontrolörde Kullanılan Bulanık PID Kontrolör

Akıllı Melez Bulanık Kontrolör de ikinci bölüm Bulanık PID kontrolörden oluşmakta ve yapısı şekil 5.1’de gösterilmektedir. Hata ve hatadaki değişim olmak üzere iki girişi vardır ve tek bulanık kural tabanlıdır[9]. (e) Hata, referans ile sistem cevabı arasındaki farkı simgelemekte, ($\dot{e}$) hatanın türevini simgelemekte ve hatadaki değişimi ifade etmektedir.



Şekil 5.1 AMK'ün iki girişli ve tek kural tabanlı Bulanık PID Kontrolör yapısı

Şekil 5.1'de verilen Bulanık PID Kontrolör yapısında, K_e hata girişinin ölçekleme çarpanı, K_d hatanın değişimi girişinin ölçekleme çarpanı, β ve α ise çıkış ölçekleme çarpanlarını, u_c kontrol işaretini ifade etmektedir.

Bulanık PID Kontrolörün, kontrol işaretinin denklemi (u_c) ve eşdeğer kontrol parametreleri aşağıdaki eşitlik 5.1'de görülmektedir[22].

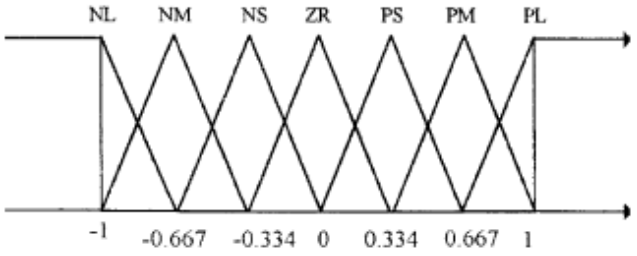
$$\begin{aligned} u_c &= \alpha u + \beta \int u \, dt \\ &= \alpha(A + PK_e e + DK_d \dot{e}) \\ &\quad + \beta \int (A + PK_e e + DK_d \dot{e}) \, dt \\ &= \alpha A + \beta A t + (\alpha K_e P + \beta K_d D) e \\ &\quad + \beta K_e P \int e \, dt + \alpha K_d D \dot{e}. \end{aligned} \tag{5.1}$$

Bulanık PID Kontrolörün eşdeğer kontrol parametreleri, 5.1'deki denklemde

Oransal katsayı: $\alpha K_e P + \beta K_d D$,
İntegral katsayısı: $\beta K_e P$,
Türev katsayısı: $\alpha K_d D$

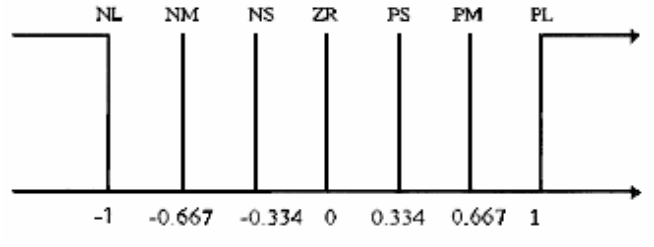
olarak gösterilmektedir [22].

Giriş değişkenleri (e) ve ($\dot{e}$) olan, "üçgen" üyelik fonksiyonları, şekil 5.2' de gösterildiği gibi [-1,1] aralığında ölçeklendirilmiş olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.2 AMK'ün Bulanık kontrolör girişlerinin üçgen üyelik fonksiyonları.

Çıkış değişkeni "*U* " için ise şekil 5.3' te gösterildiği gibi "singleton" (Tekli) üyelik fonksiyonları, ölçeklendirilmiş [-1,1] aralığında tanımlanmıştır.



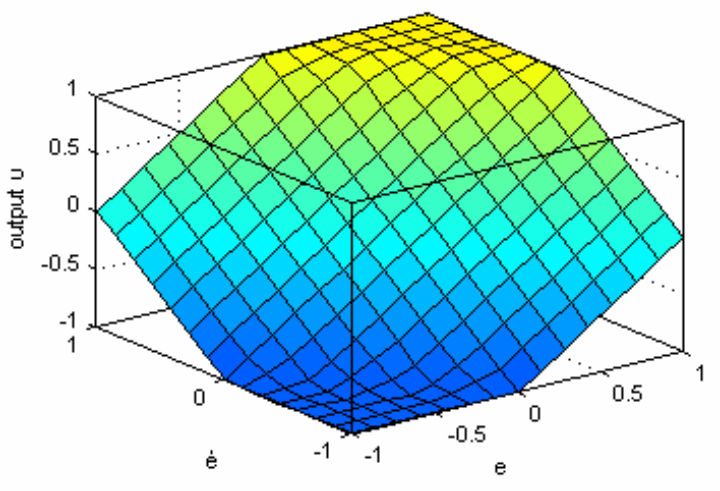
Şekil 5.3 AMK'ün bulanık kontrolör çıkışı "*U* " üyelik fonksiyonları.

PID tipi bulanık kontrolörün kural tabanı, (7x7) 49 adet kuraldan oluşmakta ve tablo 5.1 'deki gibi gösterilmektedir.

Tablo 5.1 Bulanık PID Kontrolör Kural Tabanı

E/E	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PL	ZR	ps	pm	pl	pl	pl	pl
PM	ns	ZR	ps	pm	pl	pl	pl
PS	nm	ns	ZR	ps	pm	pl	pl
ZR	nl	nm	ns	ZR	ps	pm	pl
NS	nl	nl	nm	ns	ZR	ps	pm
NM	nl	nl	nl	nm	ns	ZR	ps
NL	nl	nl	nl	nl	nm	ns	ZR

Durulama yöntemi olarak ağırlıkların ortalaması seçilmiştir, durulama yöntemleri bölüm 2.4'te açıklanmaktadır. Bulanık PID Kontrolörün, kontrol yüzey şekli, şekil 5.4' te verilmektedir.

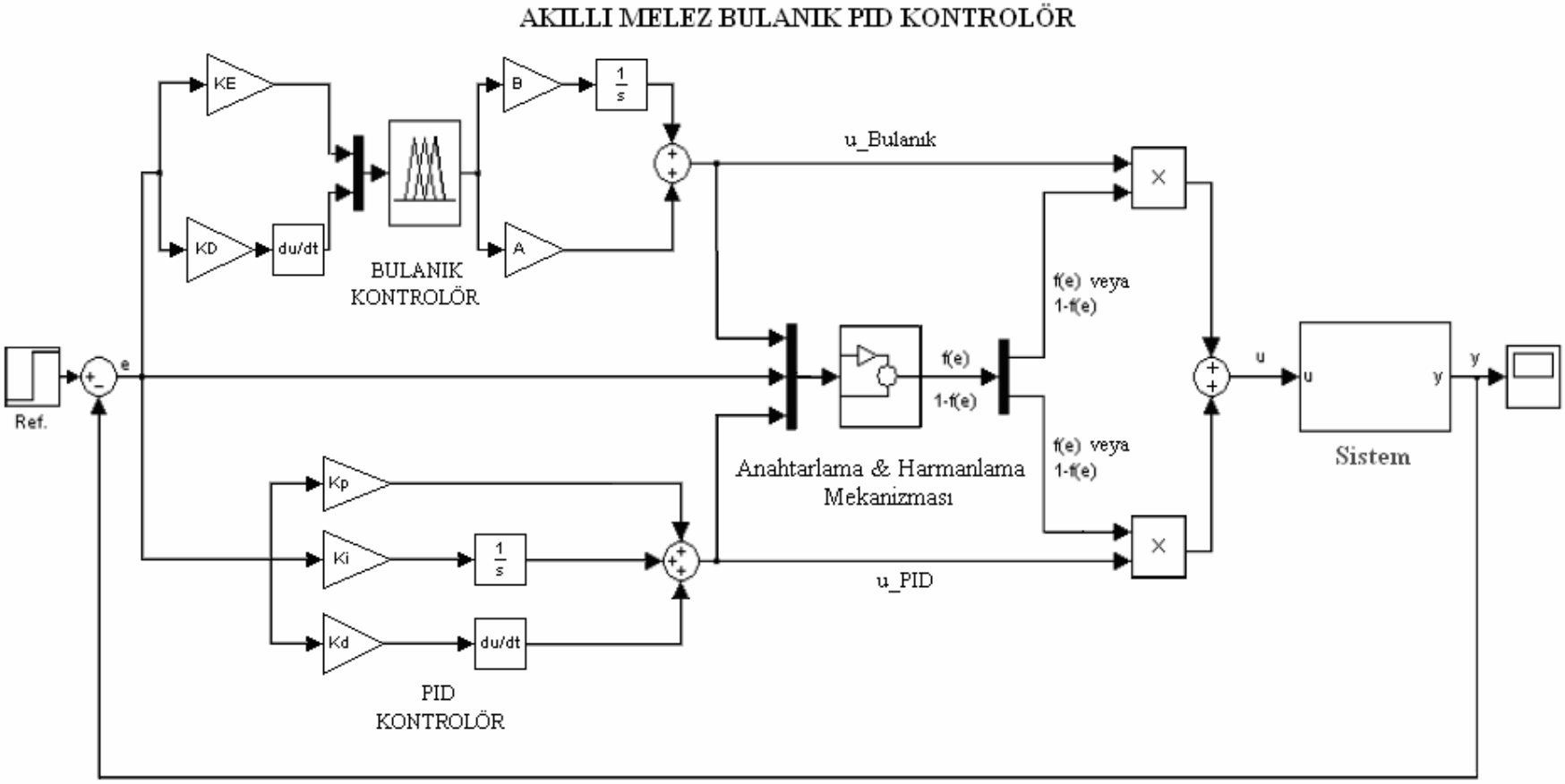


Şekil 5.4 Bulanık PID Kontrolörün, Bulanık Kontrol Yüzey Şekli

Klasik PID Kontrolör ve Bulanık Kontrolörün akıllı bir anahtarlama mekanizmasıyla birleştirilmesinden oluşan, Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün modeli şekil 5.5'te gösterilmiştir.

Akıllı melez bulanık PID kontrolörden bundan sonra sıkça bahsedileceği için kısaca "Akıllı Melez Kontrolör" adı ile söz edilecektir.

Şekil 5.1'deki Akıllı Melez Kontrolör sistemi yapısında, Kp, Ki, Kd, klasik PID kontrolörün, sırasıyla oransal, integral ve türev kazanç parametreleridir. KE, KD, parametreleri, Bulanık PID kontrolörün giriş çıkış ölçekleme çarpanları olarak tanımlanmaktadır. A ve B parametreleri, çıkış ölçekleme çarpanları olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5.5 Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolör Sisteminin Yapısı

Akıllı Melez Kontrolör, sistemin performansını arttırmak için, Bulanık kontrolörün ve Klasik PID kontrolörün, hangisinin ne zaman ve ne kadar aktif olması ve ne oranda kontrole katılmaları gerektiği esasına göre çalışmaktadır. Akıllı Melez Kontrolörde bu özellikler bir Anahtarlama Mekanizması yardımıyla oluşmaktadır.

5.4 Akıllı Melez Kontrolörün Anahtarlama Mekanizması

5.4.1 Anahtarlama Mekanizmasının Amacı

Akıllı Melez Kontrol işaretinin üretilmesi için, Akıllı Melez Kontrolörün Anahtarlama Mekanizması, esas olarak, iki kontrolörden hangisinin başlangıçta kontrol işaretinde öncelikli olarak aktif rol oynaması gerektiğine karar vermektedir. Bu işlemi hangi kontrolörün (Bulanık Kontrolör veya Klasik PID Kontrolör) ilk olarak kontrol işaretini baskın olarak etkileyeceğinin kararını alarak yapmaktadır.

Bunun yanında Anahtarlama Mekanizması, klasik PID ve/veya Bulanık kontrolör çıkışlarını belirli oranlarda Akıllı Melez Kontrolör işaretine dahil ederek, (sistemdeki hataya bağlı olarak üretilen ağırlık çarpanlarıyla çarparak), en iyi kontrol işaretini üretmek için harmanlanmasını sağlamaktadır.

5.4.2 Anahtarlama Mekanizmasının Çalışma Prensibi

Akıllı Melez Kontrolör yapısında şekil 5.5'te görüldüğü gibi Bulanık PID kontrolör ve Klasik PID kontrolör çıkışları toplanmadan önce F(e) veya 1-F(e) fonksiyonları olmak üzere, iki ayrı matlab fonksiyon bloğuyla çarpılmaktadır. Her fonksiyon bloğu, içinde ayrı bir m-file dosyası (f_selecta ve f_select2a) içermektedir. Bu fonksiyon blokları melez kontrol işaretini oluşturmak için, Bulanık PID ve klasik PID kontrolörlerin, doğru oranda katılmasını sağlayacak, yazılımı içermektedir.

Matlab fonksiyon blokları içinde tanımlanmış F(e) ve 1-F(e) fonksiyonlarının, değişen anlık hataya bağlı olarak, ürettiği katsayılar "Ağırlık Çarpanları" olarak adlandırılmaktadır. Hata, ölçeklendirilmiş $e \in [-1,1]$ aralığında tanımlanmaktadır.

Bir kontrolörün yüksek performansa sahip olması için, hızlı sistem cevabı üretmesi gerekmektedir. Bu nedenle Akıllı Anahtarlama Mekanizması, kontrolde ilk olarak baskın olacak kontrolöre karar verirken, f(e) ve [1-f(e)] ağırlık çarpanı fonksiyonlarından hangisinin, bulanık veya klasik PID kontrolör çıkışı ile çarpılacağının kararını almaktadır.

F(e) ve 1-F(e) fonksiyon bloklarından, hata büyükken, büyük ağırlık çarpanını üreten fonksiyon bloğu, kontrole hızlı başlayan kontrolörle (Bulanık PID kontrolör veya Klasik PID kontrolör) çarpılmaktadır. Böylece Akıllı Melez Kontrolörünün hızlı bir sistem cevabı üretmesi sağlanmış olur.

F(e) ve 1-F(e) fonksiyonlarının ürettiği ağırlık çarpanları harmanlama işleminde içinde kullanılmaktadır. Harmanlama işlemi sırasında kontrolörler, kontrole ağırlık çarpanları oranında dahil olmaktadırlar. Böylece kontrolörlerin yeni akıllı melez kontrol işaretindeki aktiflik oranları veya katılım seviyeleri belirlenmektedir.

Akıllı melez kontrolörün kontrol işaretinin, bulanık kontrolör ve klasik PID kontrolör işaretlerinin birleşiminden meydana gelen kontrol işaretinin, matematiksel ifadeleri, denklem 5.1 ve 5.2'de belirtilmektedir.

$$U_{MELEZ} = F(e).U_{PID} + (1 - F(e)).U_{BULANIK} \quad \textbf{(5.1)}$$

$$U_{MELEZ} = (1 - F(e)).U_{PID} + F(e).U_{BULANIK} \quad \textbf{(5.2)}$$

5.4.3 Anahtarlama Mekanizmasının Ağırlık Çarpanı Fonksiyonları

Ağırlık çarpanı fonksiyonları için hataya bağlı olarak değişen birçok farklı fonksiyon seçilebilir. Kontrol gereği fonksiyonların pozitif ağırlık çarpanları üretmesi gerekmektedir. Sistem performansının göz önüne alındığı denemeler sonucunda Akılı Melez Kontrolör modelinde hataya bağlı olarak değişen, üç ayrı F(e) fonksiyonu incelenmiştir. Bunlar tablo 5.1'de görüldüğü gibi üçgen, parabol ve hiperbol fonksiyonlardır.

Tablo 5.2 Ağırlık çarpanı fonksiyonları

Ağırlık_çarpanı $e \in [-1,1]$	{1-F(e)} Fonksiyonu	F(e) Fonksiyonu
ÜÇGEN	$1-\lvert e\rvert$	$\lvert e\rvert$
PARABOL	$1-e^2$	e^2
HİPERBOL	$1-\sqrt{\lvert e\rvert}$	$\sqrt{\lvert e\rvert}$

İyi bir kontrol performansı hızlı bir sistem cevabı üretebilmelidir. Tablo 5.2'de gösterilen fonksiyon ifadelerinden de anlaşılacağı üzere, hata (referans değer ile sistem çıkışı arasındaki fark) büyükken, f(e) 'nin ürettiği ağırlık çarpanı büyük olacağından, f(e) fonksiyonuyla çarpılan kontrolör diğer kontrolöre nazaran, akıllı melez kontrol işaretinde daha baskın olacaktır. Dolayısıyla kontrol eyleminin başlangıç aşamasında, hızlı cevap veren kontrolörün çıkışı (bulanık yada klasik PID kontrolör) f(e) fonksiyonuyla çarpılmalıdır.

Kontrolörlere fonksiyon atama işlemi, anahtarlama mekanizması tarafından, hızlı kontrole başlayan kontrolörün algılanıp, hataya bağlı fonksiyonlardan büyük ağırlık çarpanı üreten fonksiyon bloğunun (f(e) veya 1-f(e)), kontrol işaretini hızlı üreten kontrol çıkışına atanmasıyla yapılmaktadır.

Anahtarlama mekanizmasının kontrol işaretine etkisi değerlendirilirse,

Mutlak hata değeri, maksimum olduğunda yani hata bir'e eşit olduğunda, akıllı melez kontrolörün çıkışı, hızlı yükselen kontrol işareti gibi davranmakta, böylece sistem cevabının hızlı olması sağlanmaktadır. Fakat hızlı yükselen kontrol çıkışı aynı zamanda aşıma neden olacağı için, hata azaldıkça Akıllı Melez Bulanık Kontrolör çıkışı, diğerine göre daha yavaş yükselen kontrol işareti gibi davranmaya başlayacak böylece kısa bir yükselme zamanına sahip olmakla birlikte, yapacağı aşım değerini de çok büyük ölçüde azaltacak yada tamamen yok edecektir.

Hata sıfıra eşit olduğunda, yani sistem yerleştiğinde, akıllı melez kontrolör çıkışı, sadece ikinci yükselen kontrol işareti gibi davranmaktadır. Mutlak hatanın birden küçük, sıfırdan büyük olduğu ara bölgelerdeki değerleri için, bulanık kontrolörü ve klasik PID kontrolü, F(e) veya 1-F(e) bloğunun ürettiği ağırlık çarpanları oranında çarpıp toplayarak, kontrole dahil edip kontrol işaretini üretmektedir. Böylece öncelikli kontrolör seçimi ve harmanlama işlemi anahtarlama mekanizması tarafından sağlanmaktadır.

Kontrol işaretlerinin baskın olduğu süreler üzerinde ufak değişiklikler, mutlak hataya bağlı olarak değişen, farklı f(e) fonksiyonları ile yapılabilmektedir.

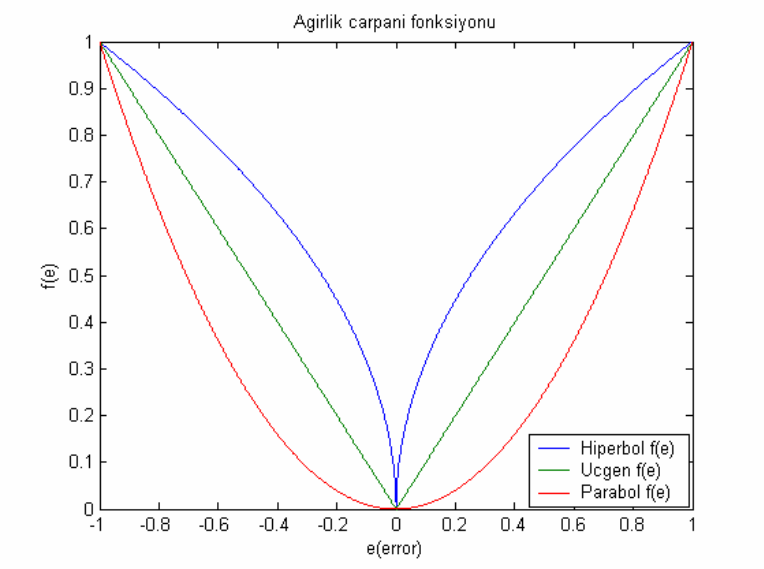
Tablo 5.1'deki Parabol, hiperbol ve üçgen anahtarlama fonksiyonlarının (ağırlık çarpanı fonksiyonu) Akıllı Melez Kontrolörün sistem çıkışlarına etkileri bölüm 5.3.4'te değerlendirilmektedir.

5.4.4 Hiperbol, Parabol ve Üçgen Anahtarlama fonksiyonlarının sistem çıkışlarına etkileri

Tablo 5.2'de hataya bağlı olarak değişen, anahtarlama fonksiyonları matematiksel olarak verilmektedir. Bulanık kontrolörün ve klasik PID kontrolörün kontrol çıkışları düşünüldüğünde, ilk başta, sistemdeki ölçeklendirilmiş hatanın mutlak değeri bire eşitken, sadece hızlı yükselen kontrol işaretinin baskın olması sağlanmakta, mutlak hata küçülürken, hızlı yükselen kontrol işaretinin pasifleşmesi ve diğerine göre daha yavaş yükselen kontrol işaretinin baskınlığının artması, son olarak da hata değeri sıfır olduğu zaman, yani sistem tamamen yerleştiğinde, yavaş yükselen kontrol işaretinin aktif olması sağlanmaktadır. Bu yapı üç fonksiyonda da aynıdır.

Fonksiyonların yarattığı farklar ise şöyle belirtilmektedir;

Anahtarlama mekanizmasındaki değişik fonksiyonların yarattığı farklar, iki kontrolörün kontrol işaretlerinin, melez kontroldeki baskınlık derecesiyle ilgili olarak, tanımlanmaktadır. Bu fonksiyonlar, sistemin, mutlak hatanın birden küçük, sıfırdan büyük olduğu zaman aralığındaki ($1>|e|>0$) kontrolüyle ilgilidir. Yani harmanlama işlemi sırasında farklılık yaratmaktadırlar. Fonksiyonların grafikleri şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Parabol, üçgen ve hiperbol fonksiyon grafikleri

Tanımlanan üç ayrı ağırlık çarpanı fonksiyonundan ilki Parabol fonksiyon olup Melez kontrol işaretine katkısı (harmanlama işlemine katkısı) aşağıda belirtilmektedir.

Parabol fonksiyon, Akıllı Melez Kontrolör sisteminde oluşan anlık hatanın karesiyle ilişkilendirilmektedir. Parabol fonksiyonda, $\{f(e) = e^2\}$, harmanlamayla ilgili olarak, matematiksel ifade gereği, hata değeri yüksekken, hızlı yükselen kontrol işareti baskındır.(Şekil 5.6) Hızlı yükselen kontrol işaretinin, ölçeklendirilmiş mutlak hata küçülürken, oluşacak pasifleşme süreci, parabol fonksiyonda, hiperbol ve üçgen fonksiyonlara oranla, daha hızlı olmaktadır. Böylece diğerine göre yavaş yükselen kontrol işaretinin, daha kısa sürede melez kontrol işaretinde baskın hale gelmesi sağlanmaktadır.

Sonuç olarak, hızlı yükselen kontrol işaretine göre yavaş yükselen kontrol işaretinin, akıllı melez kontrol işaretine katkısı, $0<|e|<1$ aralığında, parabolik fonksiyonda diğer iki fonksiyona nazaran daha fazladır.

Tanımlanan üç ayrı ağırlık çarpanı fonksiyonundan ikincisi Hiperbol fonksiyon olup Melez kontrol işaretine katkısı (harmanlama işlemine katkısı) aşağıda belirtilmektedir.

Hiperbol fonksiyon, Akıllı Melez Kontrolör sisteminde oluşan anlık mutlak hatanın kareköküyle ilişkilendirilmektedir. Hiperbol fonksiyonda, matematiksel ifade gereği şekil 5.6'da görüldüğü üzere, $\{f(e) = \sqrt{|e|}\}$, parabol ve üçgen fonksiyonlara oranla,

mutlak hata küçülürken, diğerine göre yavaş yükselen kontrolörün işaretinin baskın hale gelme süresi, parabol ve üçgen fonksiyonlara oranla daha yavaş olmaktadır. Böylece hızlı yükselen kontrol işaretinin, $0<|e|<1$ aralığında melez kontrol işaretindeki baskınlığı daha uzun süre devam etmektedir.

Tanımlanan üç ayrı ağırlık çarpanı fonksiyonundan üçüncüsü Üçgen fonksiyon olup Melez kontrol işaretine katkısı (harmanlama işlemine katkısı) aşağıda belirtilmektedir.

Üçgen fonksiyon, Akıllı Melez Kontrolör sisteminde oluşan anlık mutlak hata ile ilişkilendirilmektedir. Üçgen Fonksiyonda, matematiksel ifade gereği şekil 5.6'da görüldüğü üzere, $\{f(e) = |e|\}$, harmanlama işlemi sırasında, Hızlı yükselen kontrolörün pasifleşme süresiyle ilgili olarak, parabol ve hiperbol fonksiyonlar arasında bir karaktere sahiptir. Böylece üçgen ağırlık fonksiyonu ile ortaya çıkan, hızlı yükselen kontrolör işaretinin pasifleşme süreci, ne parabol fonksiyon kadar hızlı, ne de hiperbol fonksiyon kadar yavaş olmaktadır.

Fonksiyonların matematiksel karakteri gereği, $0<|e|<1$ ölçeklendirilmiş hata aralığında, hızlı yükselen kontrol işaretinin Melez Kontrol işaretindeki pasifleşme sürecini kısaltan fonksiyon sırası, büyükten küçüğe sırasıyla aşağıdaki gibi verilmektedir.

PARABOL F.> ÜÇGEN F.> HİPERBOL F**.** **(5.3)**

Aşağıdaki şekillerde parabol, hiperbol ve üçgen ağırlık fonksiyonları için belirtilmiş sistem çıkışlarından da görüleceği gibi,

Akıllı Melez Kontrolörün iyi performansa sahip olması için hızlı cevap vermesi gerekmektedir. Bu nedenle Akıllı Melez Kontrolör hızlı çıkış üreten kontrolörle, kontrol işaretine başlamaktadır. Bu davranış tipi, Akıllı Melez Kontrolöre sistemde hatayı algılar algılamaz, kontrol işaretini üretmesini ve kontrole zaman kaybetmeden başlamasını sağlamaktadır. Fakat hızlı yükselen kontrolör genelde sistem cevabında aşım yapacağı için, diğerine göe yavaş yükselen kontrol işaretini takip etmek hata azaldıkça daha mantıklı olmaktadır. Dolayısı ile ilk yükselen kontrol işaretinin pasifleşme süresini arttıran ağırlık çarpanı fonksiyonunu kullanmak daha iyi sistem cevapları üretmek açısından yararlı olacaktır.

Hiperbol, Üçgen ve Parabol fonksiyonların simulasyon sonuçları bir sonraki bölümde verilmektedir.

5.5 Parabol, Üçgen ve Hiperbol Fonksiyonların Simülasyon Sonuçları

Birinci dereceden ölü zamanlı $G_1(s) = \frac{1}{1+s} e^{-0.2s}$ sistemi, tablo 5.3, tablo5.4 ve tablo 5.5'te belirtilen kontrol parametreleri için Akıllı Melez Kontrolör, Klasik PID Kontrolör ve Bulanık Kontrolörün sistem cevapları, şekil 5.7, şekil 5.9 ve şekil 5.11 de, kontrol işaretleri ise şekil 5.8, şekil 5.10 ve şekil 5.12 verilmektedir. Simülasyonlarda birinci dereceden ölü zamanlı $G_1(s)$ sistemi, 0.2 saniyelik ölü zaman ile 10 saniye süresince çalıştırılmaktadır. Tablolar ve şekiller sırasıyla, parabol, hiperbol ve üçgen anahtarlama fonksiyonları için verilmektedir.

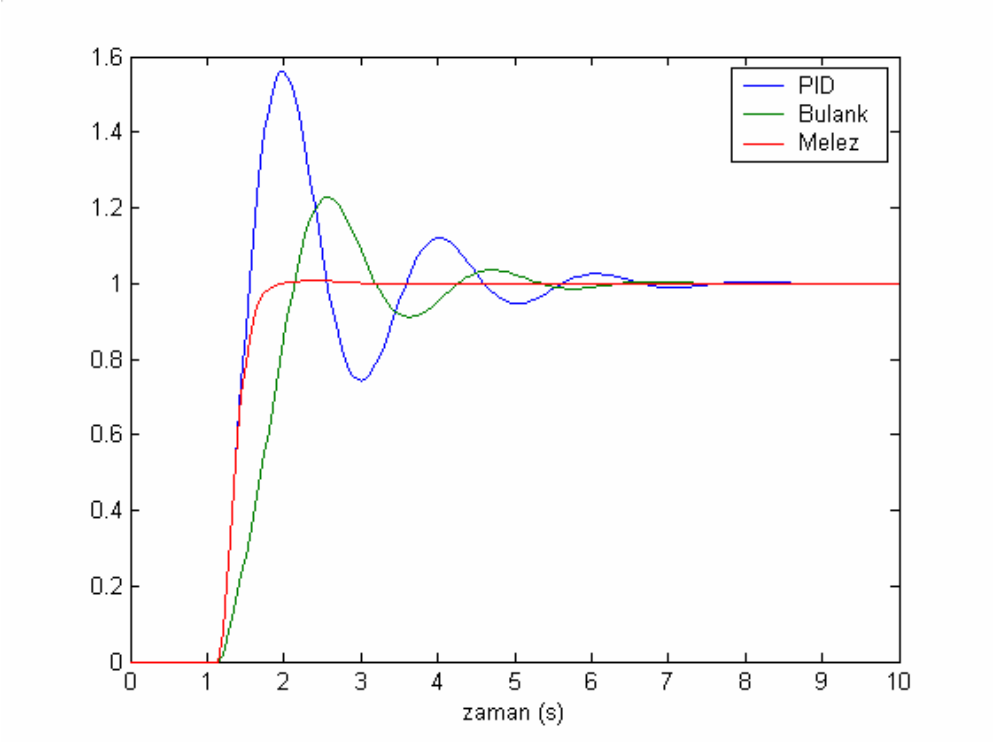
Üç farklı anahtarlama fonksiyonunun, sistem kontrolüne etkilerini daha iyi görmek açısından $G_1(s)$ sisteminde değişik anahtarlama fonksiyonları için aynı parametreler seçilmektedir.

Aynı sistemde anahtarlama fonksiyonlarını değiştirmek için Z parametresi değiştirilmektedir. Z=0.5 için "hiperbol anahtarlama fonksiyonu" Z=1 için "üçgen anahtarlama fonksiyonu" ve Z=2 için "parabol anahtarlama fonksiyonu" tanımlanmaktadır.

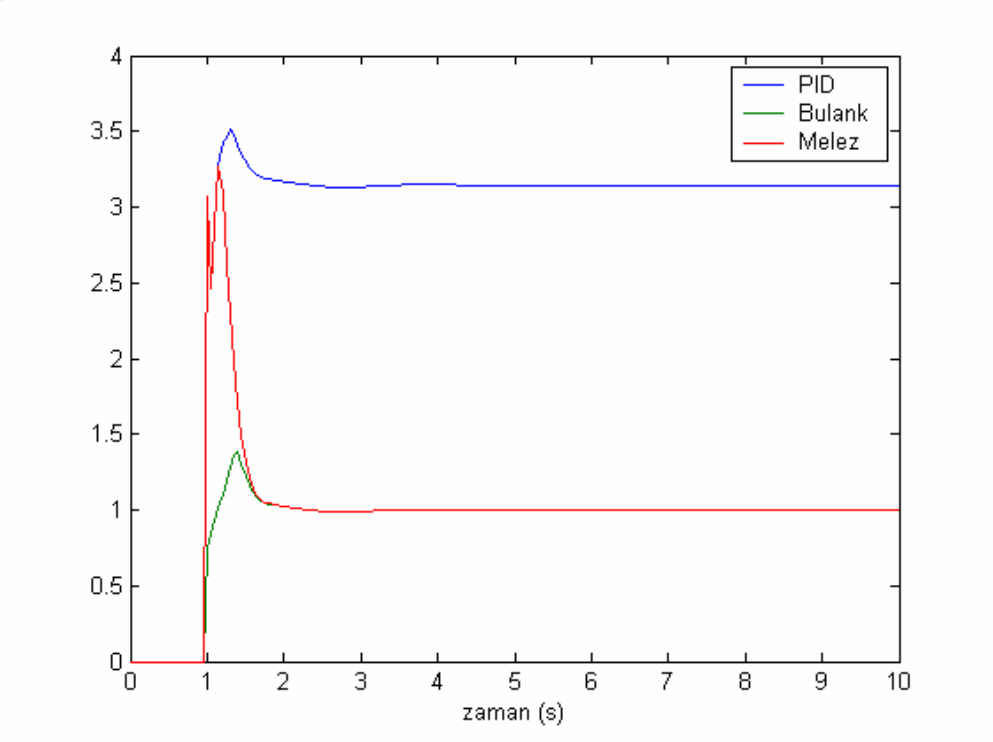
Tablo 5.3 Birinci dereceden ölü zamanlı sitem için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri (paf)

Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün Kontrol Parametreleri							
Bulanık Kontrolör Katsayıları				Klasik PID Katsayıları			Anahtarlama Fonksiyonu
A	B	KE	KD	Kp	Ki	Kd	Z
0.1	3.5	2	0.5	2	8	0.05	2

Parabol anahtarlama fonksiyonu için tablo 5.3'de belirtilen parametreler için sistem cevabı şekil 5.7'de kontrol işaretleri ise şekil 5.8'de verilmektedir.



Şekil 5.7 Parabol anahtarlama fonksiyonu için, tablo 5.2'de belirtilen parametreler için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolörün sistem çıkışları.



Şekil 5.8 Parabol anahtarlama fonksiyonu için,tablo 5.2'de belirtilen parametreler için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolör kontrol işaretleri.

Hiperbol anahtarlama fonksiyonu için tablo 5.4'deki parametreler kullanılmakta ve sistem cevabı şekil 5.9'da, kontrol işaretleri ise şekil 5.10'da verilmektedir.

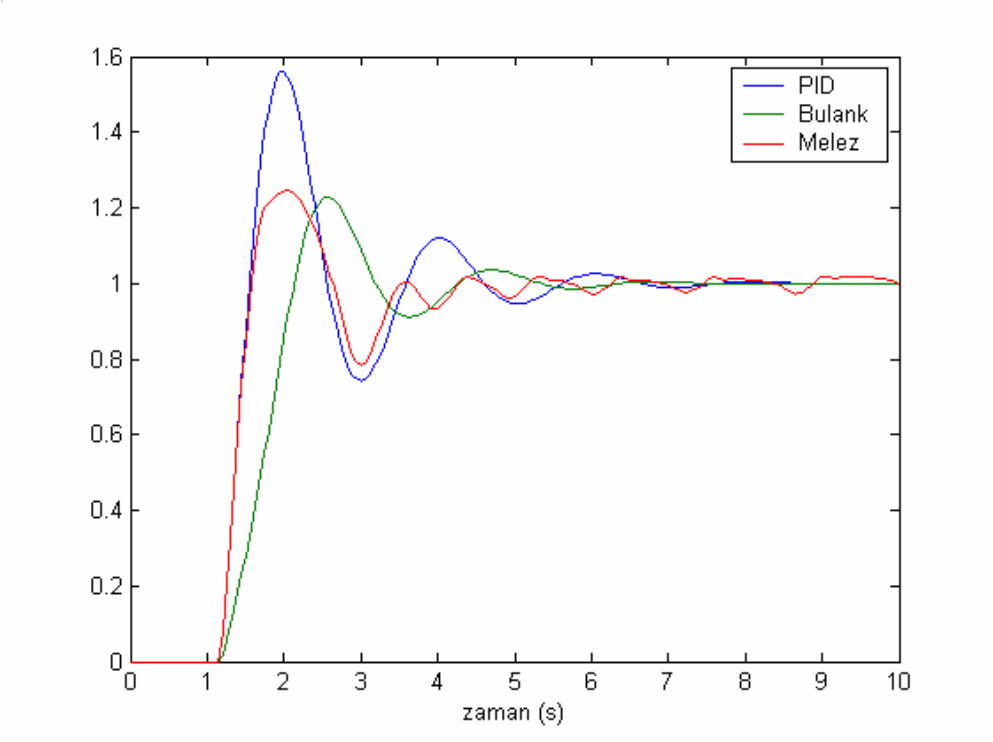
Tablo 5.4 Birinci dereceden ölü zamanlı sitem için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri (haf)

Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün Kontrol Parametreleri							
Bulanık Kontrolör Katsayıları				Klasik PID Katsayıları			Anahtarlama Fonksiyonu
A	B	KE	KD	Kp	Ki	Kd	Z
0.1	3.5	2	0.5	2	8	0.05	0.5

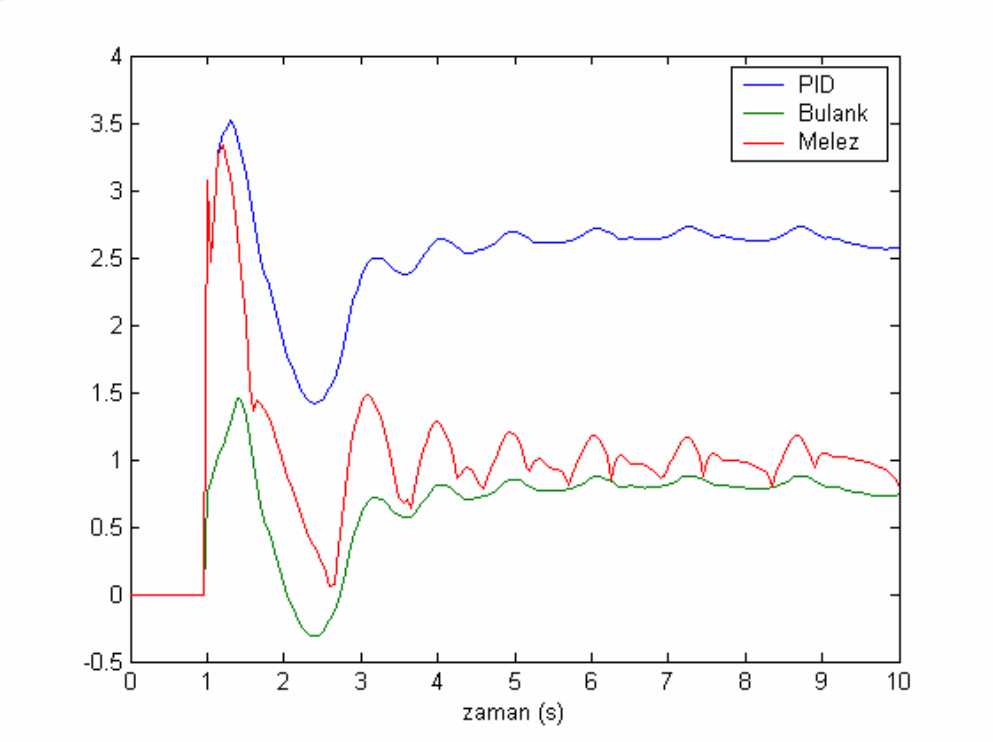
Üçgen anahtarlama fonksiyonu için tablo 5.5'deki parametreler kullanılmakta ve sistem cevabı şekil 5.10'da, kontrol işaretleri ise şekil 5.11'de verilmektedir.

Tablo 5.5 Birinci dereceden ölü zamanlı sitem için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri (üaf)

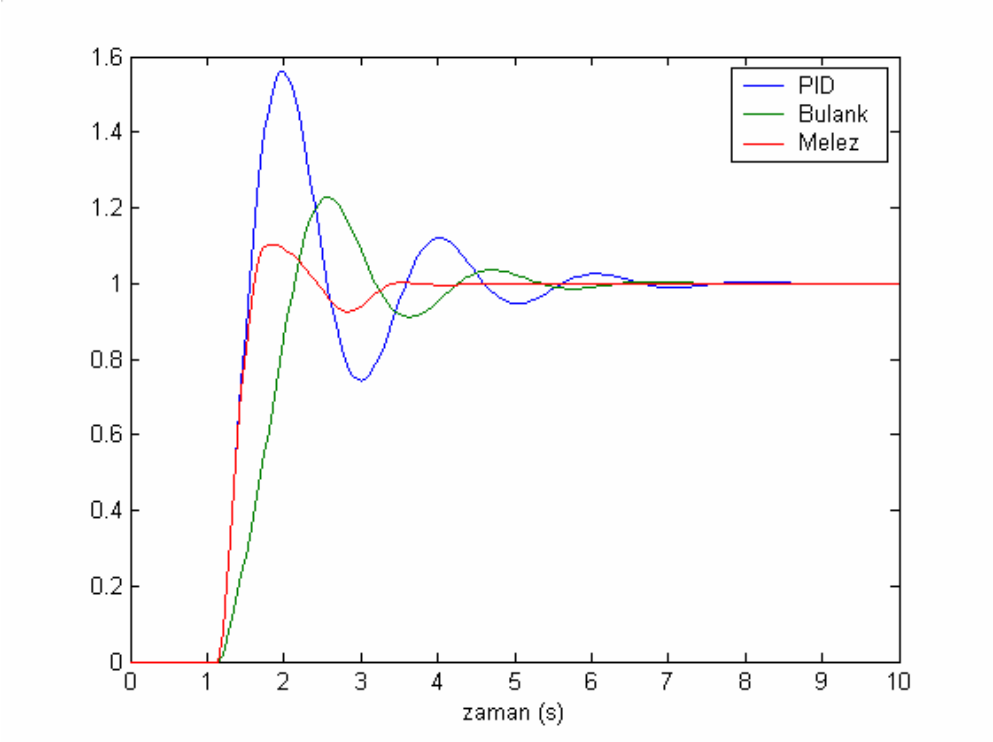
Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün Kontrol Parametreleri							
Bulanık Kontrolör Katsayıları				Klasik PID Katsayıları			Anahtarlama Fonksiyonu
A	B	KE	KD	Kp	Ki	Kd	Z
0.1	3.5	2	0.5	2	8	0.05	1



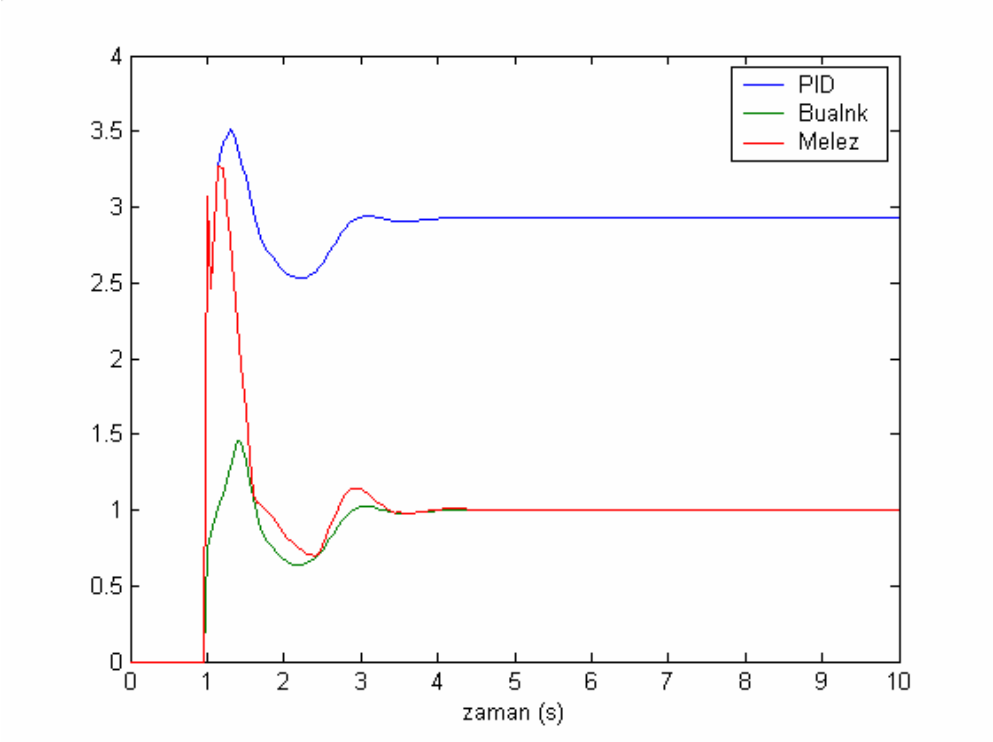
Şekil 5.9 Hiperbol anahtarlama fonksiyonu için, tablo 5.4'de belirtilen parametreler için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolör sistem cevapları.



Şekil 5.10 Hiperbol anahtarlama fonksiyonu için, tablo 5.4'de belirtilen parametreler için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolör çıkışları.



Şekil 5.11 Üçgen anahtarlama fonksiyonu için, tablo 5.5'de belirtilen parametreler için Akıllı Melez, Bulanık ve PID sistem cevapları.



Şekil 5.12 Üçgen anahtarlama fonksiyonu için,tablo 5.5'de belirtilen parametreler için Akıllı Melez, Bulanık ve PID kontrolör çıkışları.

5.5.1 Parabol, Üçgen ve Hiperbol Fonksiyonların Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan çeşitli simülasyonlar sonucu, Hiperbol anahtarlama fonksiyonun bazı parametre katsayıları için kararlı hal sistem cevabında salınıma neden olduğu ve dolayısı ile anahtarlama fonksiyonu olarak diğer fonksiyonlara oranla sistem çıkış performansını olumsuz yönde etkilediği anlaşılmakta ve yetersiz kaldığı değerlendirilmektedir.

Bu nedenle hiperbole nazaran daha iyi cevap veren üçgen ve parabol anahtarlama fonksiyonlarından da daha iyi sistem çıkışları üretilmesini sağlayan parabol fonksiyon seçilmektedir.

Yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı yapılacak diğer Akıllı Melez Kontrolör performans analizlerinde kullanılmak üzere, daha iyi sistem cevabı üretilmesini sağlayan, ağırlık çarpanı fonksiyonu olarak "Parabolik Ağırlık Çarpanı Fonksiyonu" $f(e) = e^2$ tercih edilmektedir.

5.6 Akıllı Melez Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi

Akıllı Melez Kontrolör Parametrelerinin belirlenmesi için Genetik algoritmalar kullanılmaktadır. Genetik algoritmalar için ise Matlab 6.5 Genetic Algorithms Toolbox kullanılmaktadır.

Başarım Ölçütü "PI" olarak aşağıda gösterilen,

$$\mathrm{PI} = \frac{1000}{100.\%\mathrm{P} + 6.\mathrm{tp} + 3.\mathrm{ts} + 100.\mathrm{ess}} \tag{5.4}$$

eşitlik 5.4 kullanılmaktadır. Bu eşitlikte, P aşımı, tp tepe zamanını, ts yerleşme süresini, e_{ss} kararlı hal hatasını temsil etmektedir.

Gentik aramalar, mutasyon, üreme ve çaprazlama işlemleri ile gerçekleştirilmektedir.

Genetik arama için, mutasyon oranı 0.1, çaprazlama oranı 0.4 seçilmektedir. Birey sayısı 50, nesil sayısı 100 olarak seçilmektedir. Seçim yöntemi olarak Rulet seçim yöntemi kullanılmaktadır.

Parametreleri bulmak için yapılan genetik arama, yukarıda belirtilen mutasyon, çaprazlama, nesil ve birey sayısı değerleri için Intel Pentium 4 işlemciye sahip, 2.8 Ghz işlemci hızlı, 512 MB Ram (ana bellek) kapasiteli ve 80 GB sabit disk kapasitesine sahip bir bilgisayar ile yaklaşık 7 saat sürmektedir.

5.7 Akıllı Melez Kontrolör Simülasyon Sonuçları

Akıllı Melez Kontrolör simülasyonları, birinci dereceden ölü zamanlı $G_1(s)$ sistemi için, ikinci dereceden ölü zamanlı $G_2(s)$ sistemi için, üçüncü dereceden ölü zamanlı $G_3(s)$ sistemi için ve dördüncü dereceden ölü zamansız $G_4(s)$ sistemi için yapılmakta ve sonuçlar grafikler yardımıyla verilmektedir.

Akıllı Melez Kontrolörün farklı yapıdaki sistemlerde göstereceği performansı incelemek üzere, Bulanık ve Klasik PID Kontrolörün farklı karakterdeki sistem cevapları için (farklı aşım, farklı yükselme zamanı, farklı yerleşme zamanlarına sahip Bulanık Kontrolör ve Klasik PID Kontrolör sistem cevapları için) Akıllı Melez Kontrolörün verdiği cevaplar değerlendirilmektedir. Hızlı yükselen kontrolör (Bulanık veya Klasik PID Kontrolör), bazı simulasyonlarda Bulanık Kontrolör, bazılarında ise Klasik PID Kontrolör olmaktadır. Bu parametrelerle bağlı olarak değişmektedir

5.7.1 Akıllı Melez Kontrolörün Birinci Dereceden Ölü Zamanlı Sistem için Simülasyon Sonuçları

Birinci dereceden ölü zamanlı sistem için aşağıda belirtilen $G_1(s)$ sistemi seçilmektedir. Sistemin simülasyon süresi 10 saniye ve ölü zamanı 0.2 saniyedir.

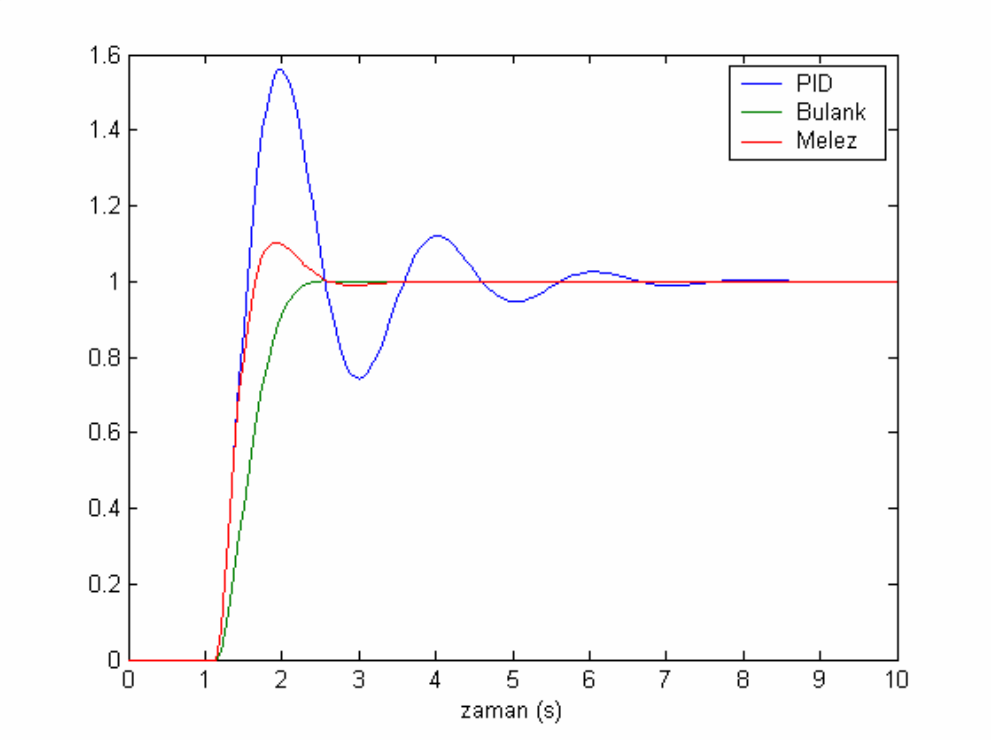
$$G_1(s) = \frac{1}{1+s} e^{-0.2s} \qquad \textbf{(5.5)}$$

Akıllı Melez Kontrolörün kontrol parametreleri, $G_1(s)$ sistemi için tablo 5.6'da verilmektedir.

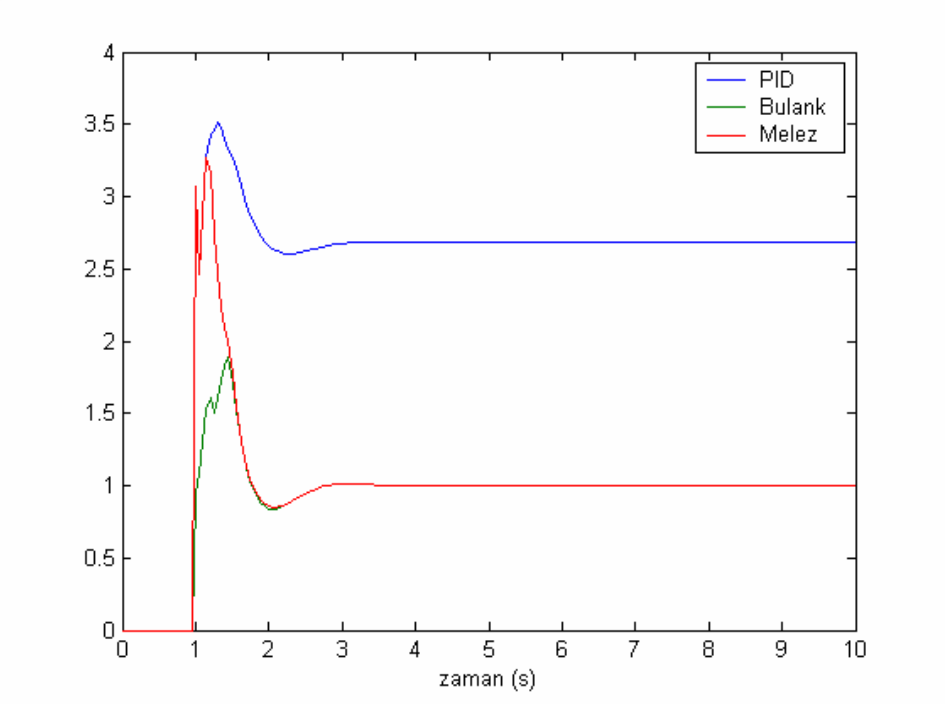
Tablo 5.6 Birinci dereceden ölü zamanlı $G_1(s)$ sitemi için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri

Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün Kontrol Parametreleri							
Bulanık Kontrolör Katsayıları				Klasik PID Katsayıları			P. Fonksiyon
A	B	KE	KD	Kp	Ki	Kd	Z
0.05	4.5	1	0.56	2	8	0.05	2

Birinci dereceden ölü zamanlı $G_1(s)$ sistemi için, Tablo 5.6 da belirtilen kontrol parametreleri için Akıllı Melez Kontrolör, Klasik PID Kontrolör ve Bulanık Kontrolör sistem cevapları şekil 5.13'te ve kontrol işaretleri şekil 5.14 de verilmektedir.



Şekil 5.13 Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 1. dereceden $G_1(s)$ sistemi için sistem cevapları



Şekil 5.14 Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 1. dereceden $G_1(s)$ sistemi için kontrol işaretleri

5.7.2 Akıllı Melez Kontrolör İkinci Dereceden Ölü Zamanlı Sistem için Simülasyon Sonuçları

İkinci dereceden ölü zamanlı sistem için aşağıda belirtilen $G_2(s)$ sistemi kullanılmaktadır. Sistemin simülasyon süresi 20 saniye ve ölü zamanı 0.2 saniyedir.

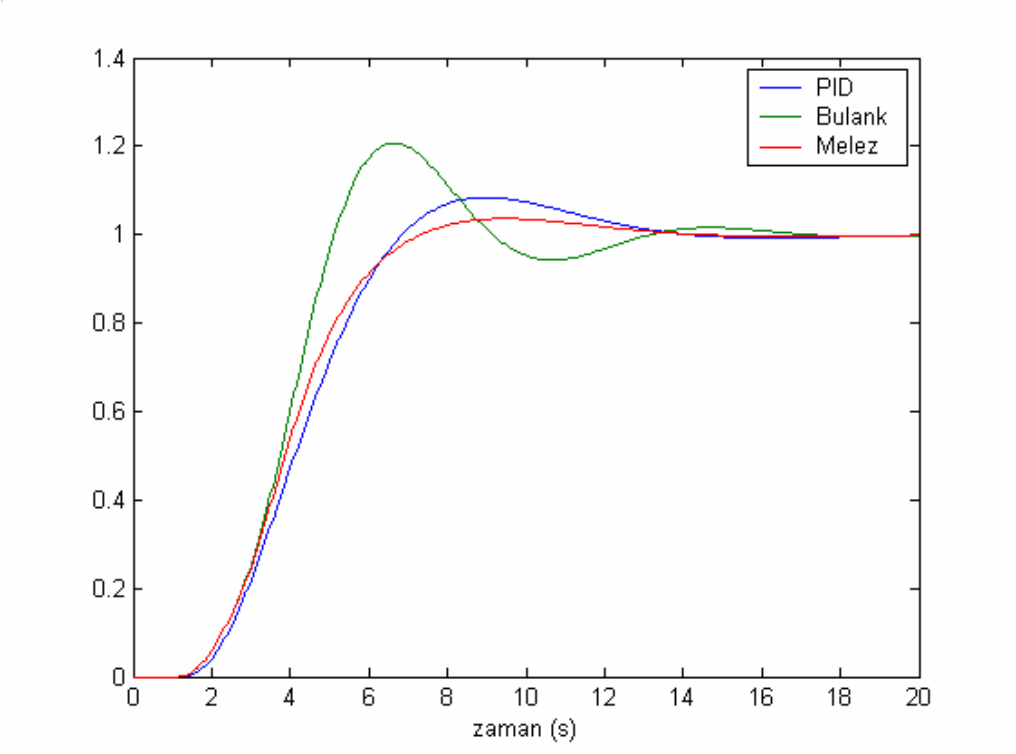
$$G_2(s) = \frac{1}{s^2 + 3s + 2} e^{-0.2s} \qquad \textbf{(5.6)}$$

Akıllı Melez Kontrolörün kontrol parametreleri, $G_2(s)$ sistemi için tablo 5.7'de verilmektedir.

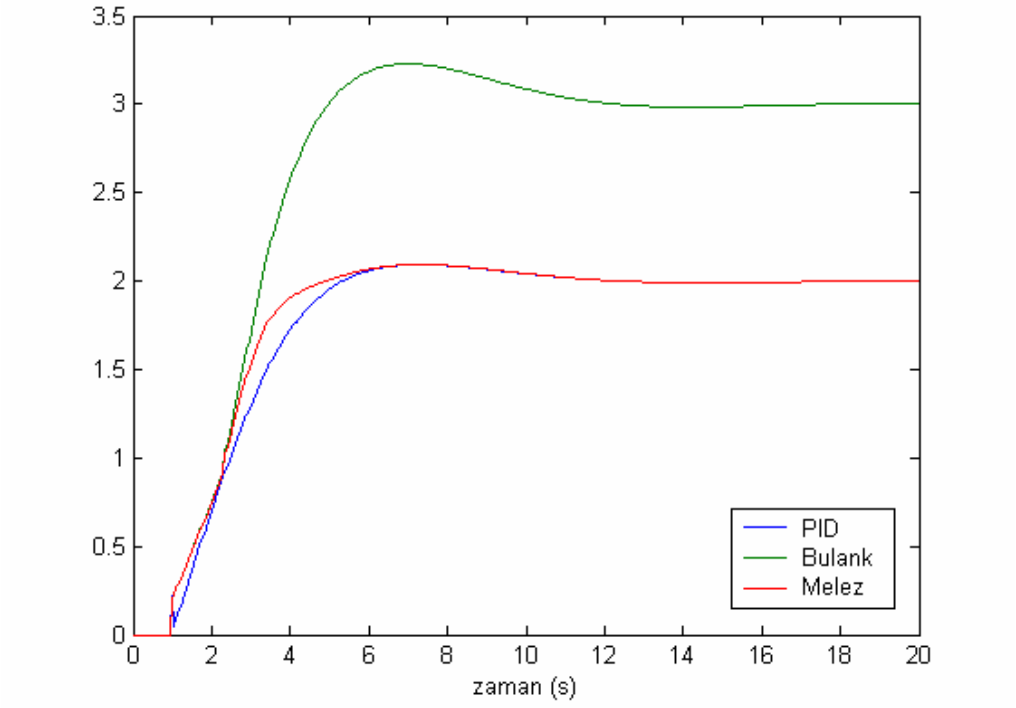
Tablo 5.7 İkinci dereceden ölü zamanlı $G_2(s)$ sistemi için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri

Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün Kontrol Parametreleri							
Bulanık Kontrolör Katsayıları				Klasik PID Katsayıları			P. Fonksiyon
A	B	KE	KD	Kp	Ki	Kd	Z
0.2	1.1	1.5	0.2	0.01	0.7	0.01	2

İkinci dereceden ölü zamanlı $G_2(s)$ sistemi için, tablo 5.7 de belirtilen kontrol parametreleri için Akıllı Melez Kontrolörün, Klasik PID Kontrolörün ve Bulanık Kontrolörün sistem cevapları şekil 5.15'te ve kontrol işaretleri şekil 5.16'da verilmektedir.



Şekil 5.15 Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 2.dereceden $G_2(s)$ sistemi için sistem cevapları



Şekil 5.16 Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 2. dereceden $G_2(s)$ sistemi için kontrol işaretleri

5.7.3 Akıllı Melez Kontrolör Üçüncü Dereceden Ölü Zamanlı Sistem için Simülasyon Sonuçları

Üçüncü dereceden ölü zamanlı sistem için aşağıda belirtilen $G_3(s)$ sistemi seçilmektedir. Sistemin simülasyon süresi 50 saniye ve ölü zamanı 0.2 saniyedir.

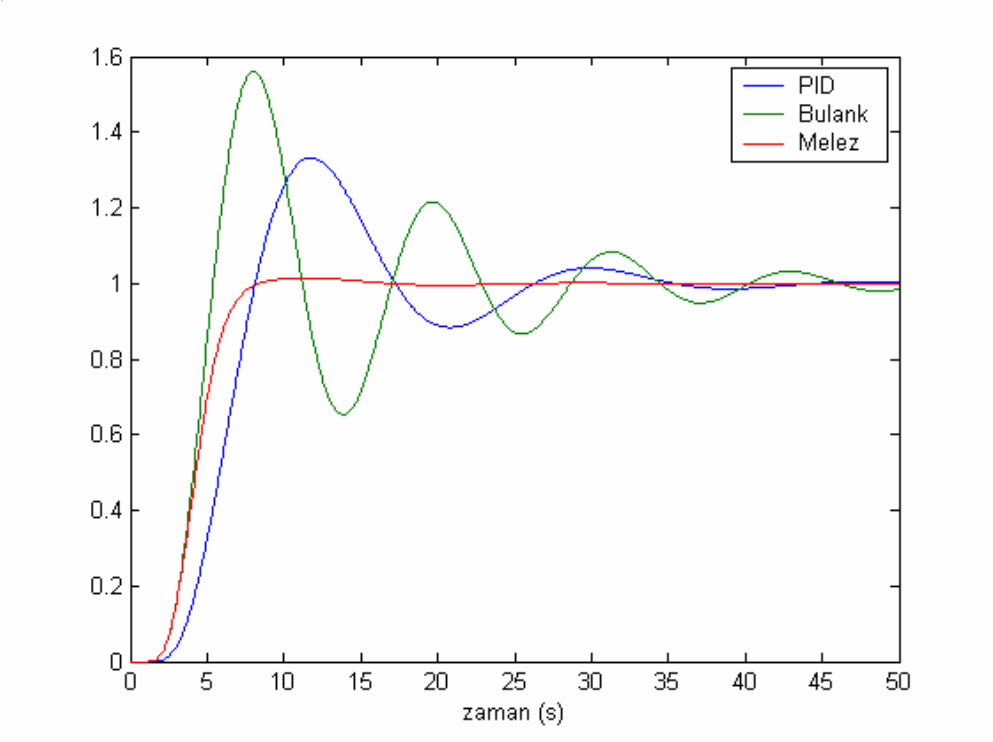
$$G_3(s) = \frac{1}{(s+1)^3} e^{-0.2} = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} e^{-0.2} \qquad \textbf{(5.7)}$$

Akıllı Melez Kontrolörün kontrol parametreleri, $G_3(s)$ sistemi için tablo 5.8'de belirtilmektedir.

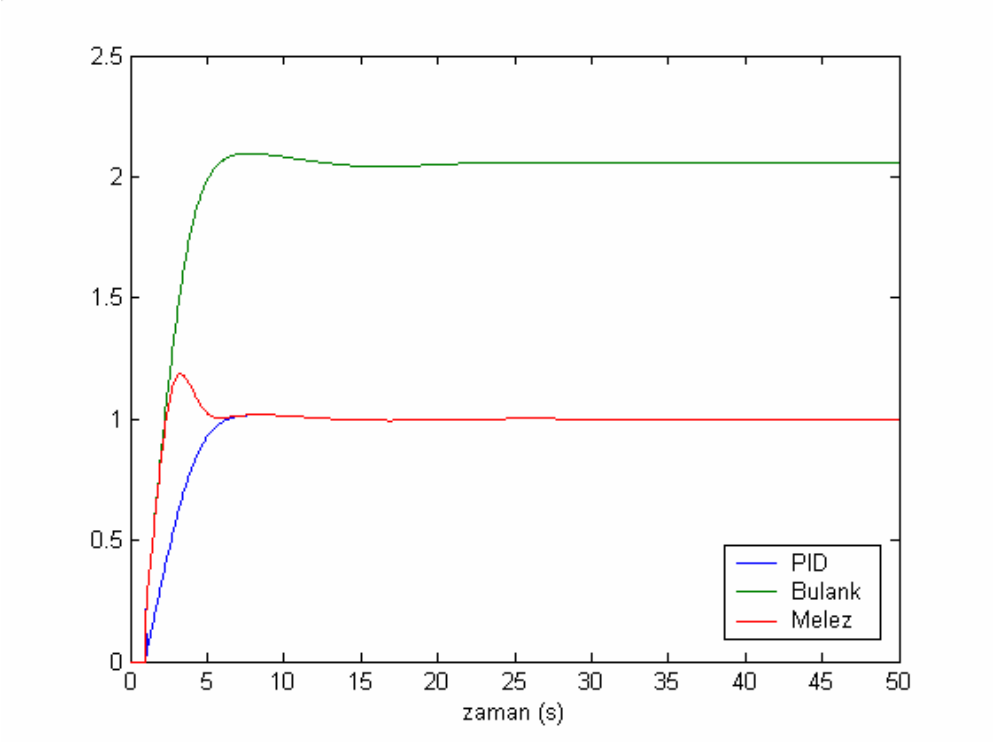
Tablo 5.8 Üçüncü dereceden ölü zamanlı $G_3(s)$ sitemi için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri

Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün Kontrol Parametreleri							
Bulanık Kontrolör Katsayıları				Klasik PID Katsayıları			P. Fonksiyon
A	B	KE	KD	Kp	Ki	Kd	Z
0.1998	1.1	0.6	0.2	0.01	0.3	0.01	2

Üçünü dereceden ölü zamanlı $G_3(s)$ sistemi için, Akıllı Melez Kontrolörün, Tablo 5.8 'de belirtilen kontrol parametreleri için Klasik PID Kontrolörün ve Bulanık Kontrolörün sistem cevapları şekil 5.17'de ve kontrol işaretleri şekil 5.18'de verilmektedir.



Şekil 5.17 Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 3. dereceden $G_3(s)$ sistemi için sistem cevapları



Şekil 5.18 Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 3. dereceden $G_3(s)$ sistemi için kontrol işaretleri

5.7.4 Akıllı Melez Kontrolör Dördüncü Dereceden Ölü Zamansız Sistem için Simülasyon Sonuçları

Dördüncü dereceden ölü zamanlı sistem için aşağıda belirtilen $G_4(s)$ sistemi seçilmektedir. Sistemin simülasyon süresi 50 saniyedir ve ölü zamanı yoktur.

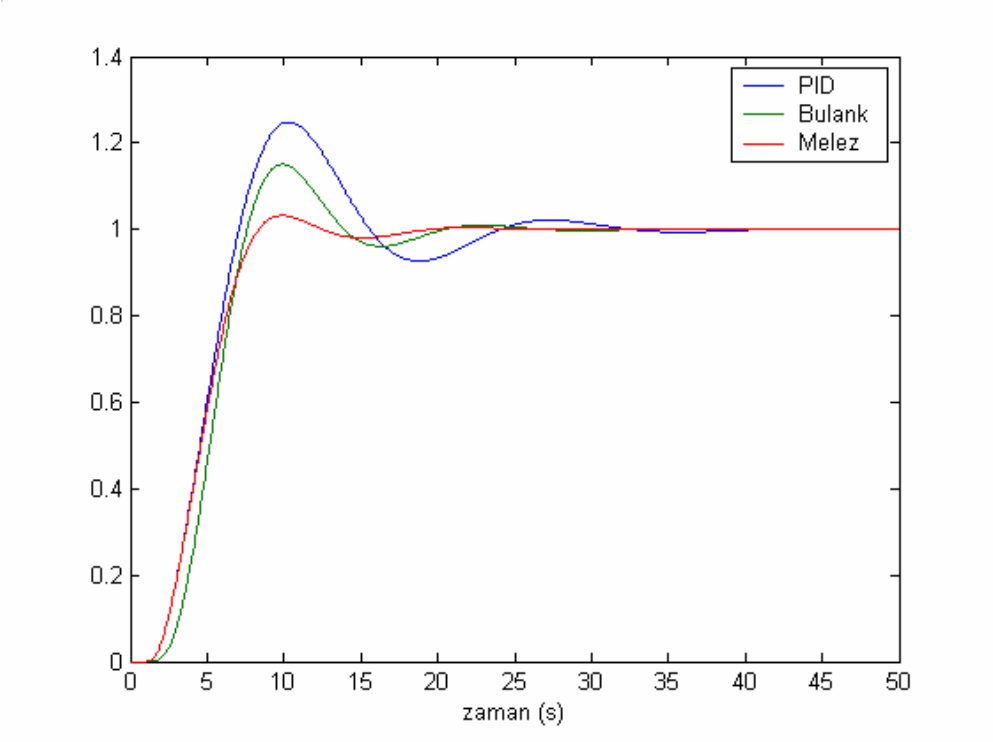
$$G_4(s) = \frac{1}{(s+1)^4} = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1} \qquad \textbf{(5.8)}$$

Akıllı Melez Kontrolörün kontrol parametreleri, $G_4(s)$ sistemi için tablo 5.9'da belirtilmektedir.

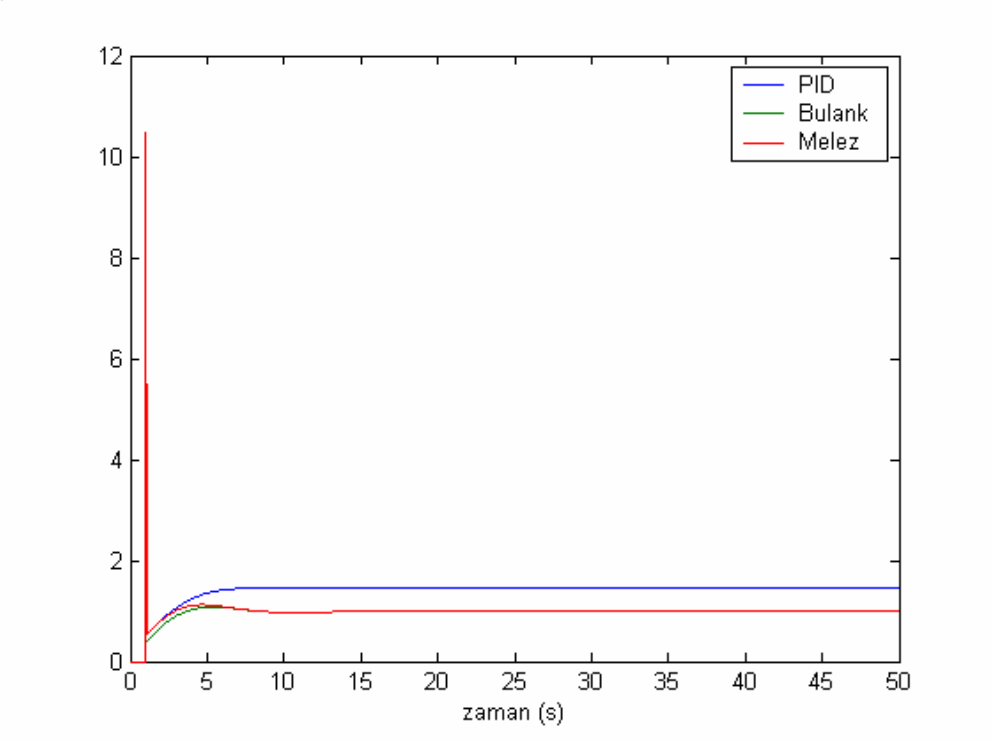
Tablo 5.9 Dördüncü dereceden ölü zamansız $G_4(s)$ sitemi için Akıllı Melez Kontrolör Parametreleri

Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün Kontrol Parametreleri							
Bulanık Kontrolör Katsayıları				Klasik PID Katsayıları			P. Fonksiyon
A	B	KE	KD	Kp	Ki	Kd	Z
0.2	0.65	0.6	0.99	0.48	0.4	0.5	2

Dördüncü dereceden ölü zamanlı $G_4(s)$ sistemi için, Akıllı Melez Kontrolörün, Tablo 5.9 da belirtilen kontrol parametreleri için Klasik PID Kontrolörün ve Bulanık Kontrolörün sistem cevapları şekil 5.19'da ve kontrol işaretleri şekil 5.20'de verilmektedir.



Şekil 5.19 Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 4. dereceden $G_4(s)$ sistemi için sistem cevapları



Şekil 5.20 Akıllı Melez Kontrolörün, Bulanık Kontrolörün ve PID Kontrolörün 4. dereceden $G_4(s)$ sistemi için kontrol işaretleri

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bulanık Kontrolün ve Klasik PID Kontrolörün sistemde oluşan anlık hataya bağlı bir ağırlık çarpanı fonksiyonu ile birleştirilmesinden oluşan melez yapıdaki Akıllı Melez Kontrolörün, çalışma prensibi, yapısı, ve farklı dereceden ölü zamanlı ve ölü zamansız sistemler için simulasyon sonuçları verilmektedir.

Akıllı Melez Kontrolör, melez yapısı gereği iki kontrolöründe avantajlı yönlerini bünyesinde toplayarak Bulanık ve Klasik PID kontrolörden daha üstün bir kontrol performansı sergilemektedir.

Akıllı Melez Kontrolör, hızlı cevap veren kontrolörle, kontrole başaldığı için kısa bir yükseleme zamanına sahip olur. Hızlı yükselen kontrolörün yaptığı aşımdan etkilenmemek için ise sistemde oluşan hatanın azalmasına bağlı olarak, diğerine göre daha yavaş yükselen kontrolör gibi davranmaya başlar. Böylece Akıllı Melez Kontrolör sistem cevabının, hem hızlı olması sağlanmakta, hemde hızlı cevap vermesi nedeniyle oluşacak aşımdan kaçınması sağlanmış olmaktadır.

Sistem cevaplarının ve kontrol işaretlerinin verildiği simulasyon sonuçlarından da görüldüğü üzere, Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolörün, Bulanık Kontrolör ve Klasik PID Kontrolöre nazaran geçici hal ve kararlı hal cevaplarının her ikisinde de daha iyi performans sergilediği görülmektedir.

"Akılı Melez Bulanık PID Kontrolör Yapısı" yüksek lisans tez çalışmasıyla ilgili olarak yazılan "An Intelligent Fuzzy PID Controller" adlı makale, 2006 yılının 28-31 Mayıs tarihleri arasında Almanyanın Bonn şehrinde düzenlenecek olan ECMS (20th European Conferance on Modelling and Simulation) 20. Uluslar Arası Modelleme ve Simulasyon Konferansında sunulmak üzere kabul almış bulunmaktadır.[24]

Akıllı Melez Kontrolör yapısının daha da geliştirilmesi adına anahtarlama fonksiyonları daha farklı seçilebilir veya daha iyi sistem cevaplarının üretilmesini sağlayan kontrolör parametreleri farklı yöntemlerle belirlenebilir.

KAYNAKLAR

[1] Aström, K. J., Haegglund, T., 1995. PID Controllers:Theory, design, tuning. ISA Pres, Research triangle park, North Carolina Control

[2] Adcock, T.A., George, M. Jr. , Thrift P., 1992 Implementation of fuzzy logic, selected applications Texas Instruments Incorporated.

[3] Babuska, R., Arzen, K.E., Johansson, M., 1999. Fuzzy Algorithms for Control, Kluwert Academic Publishers

[4] Passino K. M., Yurkovich S., 1998. Fuzzy Control, Addison-Wesley.

[5] Mamdani, E.H., 1974. Application of Fuzzy Algorithms for control of simple dynamic plant, *Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci.* **121,** 1585-1588

[6] Takagi, T. And Sugeno, M., 1985. Fuzzy Identification of systems and its applicationsto modelling and control, *IEEE Trans Systems, Man, Cybern.,* **SCM-15,** 116-132.

[7] Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets, *Informat. Control*, **8**, 338-353

[8] Zadeh, L. A., 1984, Making computers think like people, *IEEE Spectrum,* **21(8),** 26-32.

[9] Kim, J.H., Choi, K.K., 1987. Self tuning discrete PID controler, *IEEE Trans. Indust., Electron.* **34 (2)** 298-300

[10] Yeşil, E., Güzelkaya, M., Eksin, İ., 2003. Fuzzy PID Controllers: An overview, The third Triennial ETI International Conference on Applied Automatic Systems, Macedonia, 17-21 September.

[11] Oh, S.K., Lee, D., Pedryez,W., Kim, D., 2004. The Genetic Design of Hybrid Fuzzy Controllers, An Int. J. *Cybernetics and Systems,* 35: 333-361

[12] Mac Vicar-Whelan, P.j., 1976. Fuzzy sets for Man/Machine Studies, *Int. J. Man/Machine Studies***, 8**, 687-697

[13] Tang, M. L. And Mulholland, R.J., 1987. Compairing fuzzy logic with classical controller designs*, IEEE Trans. on Systems, Man, Cybernetics*, **17(6),** 1085-1087

[14] Akbıyık, B., 2004. Bulanık PID Kontrolör Yapılarının Temel Sistemlerdeki Başarımının Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[15] Mann, G.K.I., Hu, B., Gosine, R. G., 1999. Analysis of direct action fuzzy PID controlers structures, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cyybernetics***, 29(3)** 371-388.

[16] Hu, B., Mann, G.K.I., Gosine, R.G. 2001. A systematic study of fuzzy PID controllers Function-based evalution approach. *IEEE Trans. Fuzzy Systems,* **9(5),** 669-712.

[17] Hu, B., Mann, G.K.I., Gosine, R.G., 1997 Theoretic and genetic designs of a three-rule fuzzy PI controller. Proc. Sixth IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst. 1489-1496.

[18] Li, W., 1998 Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative control, *IEEE Trans on systems, Man, Cybernetics*, **6(4),** 449-463.

[19] Güzelkaya, M., Eksin, İ., 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.

[20] Zhao, Z.Y., Tomizuka, M. Isaka, S., 1993 Fuzzy gain scheduling of PID controlers, *IEEE Trans on Systems, Man, Cybernetics*, **23(5),** 1392-1398.

[21] Er, M. J., Sun, Y.l., 2001 Hybrid fuzzy proportional-integral plus conventional derivative control of linear and nonlinear systems, *IEEE Trans on Industrial Electronics,* **48(6),** 1109-1117.

[22] Mizumoto, M., Qiao, W.Z., 1995. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method , *Fuzzy sets and Systems,* 78 (1996) 23-35

[23] Hussu, A., 1995 Fuzzy Control and Defuzzification, *Mechatronics*, **5(5),** 513-526.

[24] Erenoglu, I., Eksin, İ., Yeşil, E., Guzelkaya, M., 2006. An Intelligent Hybrid Fuzzy PID Controller. ECMS 2006. *Twentieht European Conference on Modelling and Simulation*. 62-66.

ÖZGEÇMİŞ

Işın ERENOĞLU, 15.12.1981 İstanbul doğumludur. Orta okul ve lise eğitimini İstek Atanur Oğuz Lisesinde tamamlamıştır. 2003 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Aynı yıl İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.