

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BULANIK PID KONTROLÖRLERİNİN ÇIKIŞ ÜYELİK FONKSİYONLARINI
ÇEVİRİMİÇİ AYARLANMA YÖNTEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet DELİBAŞ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA

HAZİRAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BULANIK PID KONTROLÖRLERİNİN ÇIKIŞ ÜYELİK FONKSİYONLARINI
ÇEVİRİMİÇİ AYARLANMA YÖNTEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet DELİBAŞ
(504191119)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA

HAZİRAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504191119 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet DELİBAŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BULANIK PID KONTROLÖRLERİNİN ÇIKIŞ ÜYELİK FONKSİYONLARINI ÇEVİRİMİÇİ AYARLANMA YÖNTEMİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa DOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cenk ULU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 Mayıs 2022
Savunma Tarihi : 10 Haziran 2022





Canım aileme,



ÖNSÖZ

Bana güvenip danışmanlığına kabul eden, çalışmamda bana yön gösteren, destek ve bilgilerini esirgemeyen, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA'ya, her zaman yardımcı olup ve beni tez çalışma sürecim boyunca cesaretlendiren değerli hocam Prof. Dr. İbrahim EKSİN'e, bilgilerini paylaşan ve değerli zamanını ayıran, desteğini esirgemeyen kıymetli hocam Öğr. Gör. Dr. Erhan YUMUK'a teşekkürü bir borç bilirim. Her zaman yanımda olan, hayatım boyunca beni destekleyen ve bana duydukları güvenden dolayı aileme teşekkür ederim.

Haziran 2022

Mehmet DELİBAŞ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. BULANIK MANTIK SİSTEMLERİ	5
2.1 Giriş	5
2.2 Dilsel İfadeler	6
2.2.1 Üyelik fonksiyonları.....	6
2.2.2 Dilsel terimler ve değişkenler.....	7
2.3. Bulanık Sistem Öğeleri.....	8
2.3.1 Bulanıklaştırma	8
2.3.2 Bulanık kural tabanı	9
2.3.3 Bulanık çıkarım mekanizması	9
2.3.3.1 Mamdani tipi bulanık çıkarım mekanizması	10
2.3.3.2 Takagi-Sugeno tipi bulanık çıkarım mekanizması.....	11
2.3.3.3 Tekil tip bulanık çıkarım mekanizması	12
2.3.3.4 Tsukamoto tipi bulanık çıkarım mekanizması	13
2.3.4 Durulaştırma.....	14
2.3.4.1 Ağırlık merkezi yöntemi.....	14
2.3.4.2 Alanın ortayı yöntemi	15
2.3.4.3 Ağırlık ortalaması yöntemi.....	16
2.3.4.4 Maksimumun ortalaması yöntemi.....	16
3. BULANIK PID KONTROLÖRLERİ.....	19
3.1 Giriş	19
3.2 Bulanık PD ve PI Kontrolörler	19
3.3 Bulanık PID Kontrolör	20
4. ÖZAYARLAMALI BULANIK KONTROLÖR YAPILARI	23
4.1 Giriş	23
4.2 Hata Tabanlı Bulanık Kural Ağırlıklandırma Yöntemi	23
4.2.1 Bulanık kural ağırlıklandırma.....	24
4.2.2 Kural tabanlı çevrimiçi kural ağırlık ayarlama yöntemi	25
4.2.3 Özayarlama parametresi belirlenmesi ve analizi.....	29
4.3 Üyelik Fonksiyonlarının Merkezinin Ayarlanmasına Dayalı Özayarlama Bulanık Kontrolör Yapısı.....	35
4.3.1 Özayarlama parametresi belirlenmesi ve analizi.....	39

5. ÜYELİK FONKSİYONLARININ MERKEZİNİN VE BULANIK KURAL AĞIRLIKLARININ BİRLİKTE AYARLANMASINA DAYALI ÖZAYARLAMA YÖNTEMİ.....	47
5.1. Özayarlama Yöntemi	47
5.2. Benzetim Çalışmaları.....	48
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	69



KISALTMALAR

BMK	: Bulanık Mantık Kontrolörü
PID	: Proportional, Integral and Derivative
PD	: Proportional and Derivative
PI	: Proportional and Integral
H.T.K.A.Y	: Hata Tabanlı Kural Ağırlıklandırma Yöntemi
Ç.Ü.F.M.A.Y	: Çıkış Üyelik Fonksiyonlarının Merkezinin Ayarlanması Yöntemi



SEMBOLLER

e	: Hata
é	: Hatanın Değişimi





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Sistem 1 “a” katsayısına göre başarıml analizi.....	32
Çizelge 4.2 : Sistem 2 “a” katsayısına göre başarıml analizi.....	34
Çizelge 4.3 : Sistem 1 için DURUM 1, DURUM 2, DURUM 3 ‘e ilişkin başarıml analizi.	43
Çizelge 4.4 : Sistem 2 için DURUM 1, DURUM 2, DURUM 3 ‘e ilişkin başarıml analizi.	45
Çizelge 5.1 : a = 0.5 ve DURUM 1 için sistem 1’e ilişkin başarıml analizi.....	50
Çizelge 5.2 : a = 0.5 ve DURUM 2 için Sistem 1’e ilişkin başarıml analizi.	51
Çizelge 5.3 : a = 0.5 ve DURUM 3 için Sistem 1’e ilişkin başarıml analizi.	52
Çizelge 5.4 : a = 0.6 ve DURUM 1 için Sistem 1’e ilişkin başarıml analizi.	53
Çizelge 5.5 : a = 0.6 ve DURUM 2 için sistem 1’e ilişkin başarıml analizi.	54
Çizelge 5.6 : a = 0.6 ve DURUM 3 için Sistem 1’e ilişkin başarıml analizi.	55
Çizelge 5.7 : a = 0.5 ve DURUM 1 için Sistem 2’ye ilişkin başarıml analizi.	57
Çizelge 5.8 : a = 0.5 ve DURUM 2 için Sistem 2’ye ilişkin başarıml analizi.	58
Çizelge 5.9 : a = 0.5 ve DURUM 3 için Sistem 2’ye ilişkin başarıml analizi.	59
Çizelge 5.10 : a = 0.6 ve DURUM 1 için Sistem 2’ye ilişkin başarıml analizi.	60
Çizelge 5.11 : a = 0.6 ve DURUM 2 için Sistem 2’ye ilişkin başarıml analizi.	61
Çizelge 5.12 : a = 0.6 ve DURUM 3 için Sistem 2’ye ilişkin başarıml analizi.	62



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bulanık mantık sistem yapısı.	6
Şekil 2.2 : (a) Üçgensel üyelik fonksiyonu (b) Yamuk üyelik fonksiyonu (c) Gauss üyelik fonksiyonu (d) Tekil üyelik fonksiyonu.....	7
Şekil 2.3 : “Hızlı” dilsel değişkeni, dilsel değerler ve üyelik fonksiyonları.....	8
Şekil 2.4 : İki kurallı mamdani tipi bulanık çıkarım mekanizması.....	10
Şekil 2.5 : İki kurallı takagi-sugeno tipi bulanık çıkarım mekanizması.	12
Şekil 2.6 : İki kurallı tekil tipi bulanık çıkarım mekanizması.	13
Şekil 2.7 : İki kurallı tsukamoto tipi bulanık çıkarım mekanizması.	14
Şekil 2.8 : Ağırlık merkezi yöntemi.	15
Şekil 2.9 : Alanın ortayı yöntemi.....	15
Şekil 2.10 : Ağırlık ortalaması yöntemi.....	16
Şekil 2.11 : Maksimumun ortalaması yöntemi.	17
Şekil 3.1 : Bulanık PD kontrolör yapısı.....	20
Şekil 3.2 : Girişlerin hata ve hatanın integrali olarak alınması durumunda elde edilen bulanık PI kontrolör yapısı.....	20
Şekil 3.3 : Girişlerin hata ve hatanın türevi olarak alınması durumunda elde edilen bulanık PI kontrolör yapısı.....	20
Şekil 3.4 : Bulanık PD ve PI kontrolörlerin birleştirilmesinden oluşan bulanık PID kontrolör yapısı.	21
Şekil 3.5 : Bir kural tabanı ile bulanık PID kontrolör yapısı.	21
Şekil 3.6 : Girişlerin hata, hatanın değişimi ve hatanın integrali olması durumunda elde edilen bulanık PID kontrolör yapısı.	22
Şekil 4.1 : Bulanık PID kontrolör uygulanan kapalı çevrimli kontrol sistem yapısı.	23
Şekil 4.2 : Hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi için bulanık PID kontrolör yapısı.	24
Şekil 4.3 : Hata ve hatanın değişiminin üçgensel tip üyelik fonksiyonları.	24
Şekil 4.4 : Hatanın üyelik fonksiyonlarına göre basamak yanıtının bölgelere ayrılması.....	26
Şekil 4.5 : n x m giriş üyelik fonksiyonları için kendi kendini ayarlayan kural ağırlık tablosu.	28
Şekil 4.6 : 5x5 giriş üyelik fonksiyonları (25 kural) durumu için kendi kendini ayarlayan kural ağırlık tablosu.	29
Şekil 4.7 : (a) Girişler "e" ve "è" 'nin üyelik fonksiyonları (b) Çıkış "u" 'nun üyelik fonksiyonları.	30
Şekil 4.8 : Bulanık kontrolör sistemin kural tablosu.	30
Şekil 4.9 : Sistem 1 için “a” katsayısına göre (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.	32
Şekil 4.10 : Sistem 2 için “a” katsayısına göre (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.	34

Şekil 4.11 : Çok seviyeli bulanık kontrolör yapısı.....	35
Şekil 4.12 : (a) Girişlerin üyelik fonksiyonları (b) Çıkış üyelik fonksiyonu.	36
Şekil 4.13 : Bulanık kontrolör sistemin kural tablosu.	37
Şekil 4.14 : Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının kural tablosu.	37
Şekil 4.15 : Bulanık kontrolörün (a) Girişler "e" ve "è" 'nin üyelik fonksiyonları (b) Çıkış "u" 'nun üyelik fonksiyonları.....	39
Şekil 4.16 : Bulanık PID kontrolörüne ilişkin kural tablosu.....	41
Şekil 4.17 : Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının kural tablosu.	41
Şekil 4.18 : Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması (a) Girişler "e" ve "è" 'nin üyelik fonksiyonları (b) Çıkış "u" 'nun üyelik fonksiyonları..	42
Şekil 4.19 : Sistem 1 için DURUM 1, DURUM 2, DURUM 3 'e ilişkin (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.	43
Şekil 4.20 : Sistem 2 için DURUM 1, DURUM 2, DURUM 3 'e ilişkin (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.	44
Şekil 5.1 : Bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ve üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanmasına dayalı yönteminin birleştirilmesi ile elde edilen kontrol yapısı.	48
Şekil 5.2 : Çıkış ayar mekanizmasının iç yapısı.	48
Şekil 5.3 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 1 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	50
Şekil 5.4 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 2 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	51
Şekil 5.5 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 3 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	52
Şekil 5.6 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 1 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	53
Şekil 5.7 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 2 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	54
Şekil 5.8 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 3 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	55
Şekil 5.9 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 1 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	57
Şekil 5.10 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 2 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	58
Şekil 5.11 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 3 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	59
Şekil 5.12 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 1 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	60
Şekil 5.13 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 2 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	61
Şekil 5.14 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 3 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.....	62
Şekil 5.15 : Geleneksel bulanık PID kontrol yüzeyi.....	63
Şekil 5.16 : a katsayısı 0.5 için hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin kontrol yüzeyi.....	64
Şekil 5.17 : DURUM 3 (b katsayısı 0.8) için çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanması yönteminin kontrol yüzeyi.	64
Şekil 5.18 : Önerilen yöntemin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 3 için) kontrol yüzeyi.	64

BULANIK PID KONTROLÖRLERİNİN ÇIKIŞ ÜYELİK FONKSİYONLARINI ÇEVİRİMİÇİ AYARLANMA YÖNTEMİ

ÖZET

Lotfi Zadeh 1965 yılında bulanık küme mantığını geliştirmiştir. Bulanık küme teorisi klasik mantığın belirsizliğidir. Böylece hayatta karşımıza çıkan birçok belirsizlik içeren problemin çözümünü de kolaylaştırmaktadır. Bulanık küme mantığı kontrol alanına ilk olarak 1975 yılında uygulanmıştır. Daha sonraki yıllarda araştırmacılar tarafından oldukça önemli bir çalışma alanı haline gelmiş ve endüstride bulanık kontrolörlerin kullanımı arttırmıştır. Geleneksel PID kontrolör tekniklerinin doğrusal sistemlere karşı başarılı bir şekilde uygulanmasına rağmen karmaşık ve belirsiz sistemler üzerindeki etkisinin yetersizliğinden dolayı bulanık kontrolörler oldukça cazip bir hale gelmiştir. Literatürde geleneksel bulanık PID kontrolörlerin başarımını geliştirmek amacıyla çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler kontrolör parametrelerini çevrimiçi ayarlamaya dayalı yöntemlerdir. Ayar parametreleri olarak giriş ve çıkış ölçekleme katsayıları, bulanık kurallar, üyelik fonksiyonlarının parametreleri ve bulanık kural ağırlıkları kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak, Karasakal ve diğ. (2011) tarafından önerilen hata tabanlı çevrimiçi bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ele alınmıştır. Bu yöntemde, hatanın pozitif büyük ve hatanın değişiminin negatif olduğu bölgede kullanılan sabit bir katsayı serbest parametre olarak seçilmiş ve çeşitli değerler verilerek analizi yapılmıştır. Daha sonra Xu ve Shin (2005) tarafından önerilen bulanık kontrolörün çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezini ayarlayan yöntem ele alınmıştır. Bu yöntemde, çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezini ayarlamak amacıyla bulanık yapıda bir ayar mekanizması bulunmaktadır. Bu ayar mekanizmasının kendi giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları ve kural tablosu bulunmaktadır. Çalışmamızda ikinci olarak bu çıkış ayarlama mekanizması kural tablosunda bulunan bazı parametreler serbest parametre olarak değerlendirilmiş ve bu parametrelerin analizi yapılmıştır. Son olarak hata tabanlı çevrimiçi bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ile bulanık kontrolörün çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezini ayarlayan yöntem birleştirilmiştir. Birleştirilmiş yöntemin etkinliği geleneksel bulanık PID kontrolör yöntemi, hata tabanlı çevrimiçi bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ve bulanık kontrolörün çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezini ayarlayan yöntem ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler MATLAB/SIMULINK ortamında doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler üzerinde yapılmış ve irdelenmiştir.



ON-LINE ADJUSTMENT OF THE OUTPUT MEMBERSHIP FUNCTIONS OF FUZZY PID CONTROLLERS

SUMMARY

The fuzzy set theory developed by Lotfi Zadeh in 1965 adds uncertainty to classical logic. Thus, it facilitates the solution of many uncertain problems that we encounter in life. Fuzzy set logic was first applied in the control field by Mamdani and Assilian in 1975. In the following years, it has become a very important field of study by researchers.

Most of the real systems own high order, time delays, nonlinearities, or unsatisfactory mathematical models. Conventional PID controllers are usually not effective for these real-time systems because of their linear structures. Therefore, fuzzy logic is extensively used in processes where system dynamics are very complex or exhibit a non-linear character. In this respect, fuzzy logic has been combined with PID controller designs in order to improve the control system performance. In literature, we see various PID controller types in which fuzzy logic is used. In some of them, only the gains of the conventional PID controller are tuned using fuzzy inference. The controllers that are constructed as a set of heuristic control rules, and the control signal is directly deduced from the knowledge base are referred to as fuzzy PID (FPID) controllers. The structures of these controllers are analogous to the conventional PID controllers from the input-output relationship point of view.

The design parameters of fuzzy PID controllers can be divided into two categories: (a) tuning parameters, (b) structural parameters. The tuning parameters include input/output scaling factors and parameters of membership functions. The structural parameters of FPID controllers are input/output variables to fuzzy inference, fuzzy linguistic sets, membership functions, fuzzy rules, inference mechanism, and defuzzification mechanism. For the desired system performance, fixed scaling factor values may not be sufficient for the systems that own nonlinearities, parameter changes, and disturbances. Therefore, many tuning algorithms for the adjustment of scaling factors have been presented in the literature. For some cases scaling factor tuning algorithms may not be sufficient. Therefore, there exist some methods to tune the membership functions and fuzzy rules of the fuzzy controllers. In this respect, genetic algorithm and extended Kalman filter based methods have been used for membership function tuning of FPID controllers. The rule base structure has an important function in the performance of the fuzzy controllers. A rule base shifting method for dead-time systems is proposed. Moreover, there are methods to change the rule base structure by adjusting fuzzy rule weights. For this purpose, a method that adjusts rule weights using system error is presented. A fuzzy mechanism with normalized acceleration and system error inputs is also used to adjust the rule weights in an online manner. A fuzzy adjustment mechanism is also observed for tuning the centers of the output membership functions.

In this thesis, firstly the error-based online rule weight adjustment method proposed in Karasakal et al. (2011) is discussed. In this study, the transient phase of the unit system response of the closed-loop system is considered. It is assumed that the transient phase of the control system step response is divided into a certain number of regions. Then, these regions are assigned in accordance with the number of membership functions defined for the error input of the fuzzy logic controller. As they create a symmetrical structure with respect to the reference signal, they are named as the approach and departure regions from the reference value. For each region, descriptive rules have been determined for obtaining the required control signal. The effect of the fuzzy rules used in obtaining the desired control signal in each region is determined and associated with the fuzzy rule weight variable. For the online adjustment of fuzzy rule weights, two simple functions of the absolute value of the system error variable are used. These functions possess a parameter. The value of this parameter is selected as “1” except one region. In the region where the error is large and the error variation is negative, it has been halved in order to prevent the system from accelerating. In this thesis, various values are given to this parameter and its effect on the system response is examined.

Secondly, the multilevel fuzzy controller used in Xu and Shin (2005) is considered. In this paper, a multilevel fuzzy control system is proposed which can adaptively compensate the effects of external load disturbances and time-varying parameters. A fuzzy adjustment mechanism called “the output membership function adjustment mechanism” is used. The inputs of this mechanism are the error of the control system and the change of this error. The fuzzy adjustment mechanism has its own input and output membership functions and has a rule table. Its output is the “change value” that will set the center of the output membership function of the fuzzy controller. The type, number and linguistic variables of the input and output membership functions of the adjustment mechanism are the same as the type, number and linguistic variables of the input and output membership functions defined for the fuzzy controller for easy calculation purposes. When the purpose of the output membership function tuning mechanism is to reduce the overshoot and oscillation, we made the following analyzes:

- i) Moving the center value of the membership function closer to the center slows down the system response. (So, the error converges to zero slowly). The maximum value of the control sign decreases. It reduces the oscillation and therefore the overshoot value.
- ii) Decentralizing the center value of the membership function speeds up the system response. (So, the error converges to zero fast). The maximum value of the control sign increases. Overshoot and oscillation increase.

The rule table of the mechanism determined in the original paper is 11x11. In our thesis, the size of the rule table of the adjustment mechanism is reduced to 5x5. Three different values are used in the table. These are “0”, “1” and a free parameter “b”. Different values are selected for the value “b” and the system performance over rise time, settling time and overshoot are investigated.

Xu and Shin (2005) and Karasakal et al. (2011) are both on-line methods for adjusting the structural parameters of the fuzzy controller. One of them aims to change the center of the output membership functions, while the other aims to change the rule weights. In our thesis, we desire to make the online adjustment of two fuzzy controller design parameters simultaneously. In this respect, we propose to combine the methods in Xu and Shin (2005) and Karasakal et al. (2011) and adjust the centers and rule weights of the output membership functions together in an online manner. The input membership

functions defined for FPID are triangular membership functions and there are five in total. The output membership functions are singleton type membership functions. The design parameters of both methods are again analyzed for this combination. In order to observe the effect of the proposed method on the system responses and performance, it is compared with the traditional fuzzy PID controller, the fuzzy controller with the error-based fuzzy rule weighting method, and the fuzzy controller with the method based on the adjustment of the center of the output membership functions through simulation studies. For this purpose, linear and nonlinear systems models were used. Input and output scaling factors are kept the same for each simulation. Finally, when the system responses and performance results were compared, it is observed that the proposed method increases the system performance in certain time domain and optimal criteria respects.

The thesis was structured as follows: In Chapter 2, linguistic expressions and fuzzy system elements of fuzzy logic are explained. In Chapter 3, fuzzy PID controller structures are discussed. In Chapter 4, error-based fuzzy rule weighting method and the method based on adjusting the center of membership functions are explained, and freely selected parameters are analyzed by applying them on linear and non-linear systems. In Chapter 5, a method based on adjusting the center of output membership functions and fuzzy rule weights together is proposed, and the effect of the method on system response and performance is discussed on linear and nonlinear systems.



1. GİRİŞ

Gerçek sistemlerin çoğu, yüksek-mertebeli, zaman gecikmeli, doğrusal olmayan yapılara sahiptir ve analitik modelleri ise her zaman tam olarak elde edilemeyebilir. Geleneksel PID kontrolörleri, lineer yapıları nedeniyle, bu tür gerçek zamanlı sistemler için uygun değildir. Bu nedenle, bulanık mantık, sistem dinamiklerinin çok karmaşık olduğu veya doğrusal olmayan bir karakter sergilediği süreçlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bulanık küme kavramı ilk olarak Zadeh (1965) tarafından önerilmiş ve Bellman ve Zadeh (1970) bulanık kontrolde “EĞER - O HALDE” kuralları ile dilsel değişkenler kavramını ortaya koymuşlardır. Mamdani (1974), Bellman ve Zadeh (1970)’de önerilen çıkarım mekanizması kullanılarak dinamik sistem kontrolü önerilmiştir. Daha sonra Mamdani ve Assilian (1975) tarafından bulanık mantık kontrolörü (BMK) bir buhar makinasını kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu algoritma büyük ölçüde uzman operatörün bilgisine dayanır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırabilmek maksadıyla, Mac Vicar-Whelan (1976) birtakım genel kurallar önermiştir. Bulanık kontrolörlerde çoğunlukla Mamdani (1974) tarafından önerilen min-max çıkarım mekanizması ve Mizumoto (1990) tarafından önerilen çarpım-toplam çıkarım mekanizması kullanılmaktadır. Keskin bir sayı elde etmek amacıyla kullanılan durulaştırma süreci işlem yükü yüksek bir süreçtir. Çarpım-toplam bulanık çıkarım mekanizması ile birlikte Takagi-Sugeno (1985) tarafından önerilen bulanık kontrolör kurallarının sonuç kısmında keskin sayıların kullanılması iyi bir sistem başarımı sağlamıştır. Böylece durulaştırma sürecindeki işlem yükünü hafifletmiştir. Bulanık kontrolörlerde çarpım-toplam bulanık çıkarım mekanizması, ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi, giriş üyelik fonksiyonu olarak düzgün dağılmış üçgensel üyelik fonksiyonları ve çıkış üyelik fonksiyonu için tekil üyelik fonksiyonları kullanıldığında geleneksel PID kontrolörleri ile bulanık PID kontrolörleri arasında, bir eşdeğerlik olduğu Qiao ve Mizumoto (1996) tarafından gösterilmiştir. Aynı çalışmada bulanık kontrolörü klasik PID’ye ilişkilendiren, PID kontrolörünün yapısına benzer bir kontrolör yapısı önerilmiştir. Bulanık PID kontrolörünün sahip olduğu bulanık

kuralların doğrusal olmayan parametrelere dönüştürülmesi nedeniyle, bu kontrolörler birçok doğrusal olan ve olmayan sistemlere başarılı şekilde uygulanabilmektedir.

Bulanık PID kontrolörlerine ilişkin tasarım parametreleri (a) ayar parametreleri ve (b) yapısal parametreler şeklinde ikiye ayrılabilir (Hu ve diğ, 1999). Ayar parametreleri, giriş ve çıkış ölçeklendirme faktörlerini ve üyelik fonksiyonlarının parametreleri içerir. Literatürde ölçekleme çarpanlarının ayarlanmasına yönelik birçok algoritma sunulmuştur (Güzelkaya ve diğ, 2003; Karasakal ve diğ, 2005; Mudi ve Pal, 1999; Qiao ve Mizumoto, 1996; Woo ve diğ, 2000). Yapısal parametreler, bulanık çıkarıma giriş ve çıkış değişkenleri, bulanık dilsel kümeler, üyelik fonksiyonları, bulanık kurallar, çıkarım mekanizması ve durulaştırma mekanizmasıdır. Üyelik fonksiyon ayarı için Juang ve diğ. (2008) tarafından önerilen genetik algoritma ve Ahn ve Truong (2009) tarafından önerilen genişletilmiş Kalman filtresi tabanlı yöntemler kullanılmıştır.

Bulanık kontrolörlerin işleyişinde kural tabanı yapısının önemli işlevi bulunmaktadır. Genç ve diğ. (2009) tarafından ölü zamanlı sistemler için kural tabanı öteleme yöntemi önerilmiştir. Kural tabanı yapısının değiştirilebilmesi amacıyla bulanık kural ağırlıklarının ayarlanması yoluna da gidilmiştir. Bu amaçla, kural ağırlıklarını sistem hatasından yararlanılarak çevrimiçi olarak ayarlayan bir yöntem sunulmuştur (Karasakal ve diğ, 2011). Ayrıca, kural ağırlıklarının çevrimiçi ayarlanmasında, normalize ivme ve sistem hatası girişli bulanık bir mekanizma kullanılmıştır (Karasakal ve diğ, 2013).

Bu tez çalışmasında öncelikle Karasakal ve diğ. (2011)'de önerilen hataya dayalı çevrimiçi kural ağırlık ayarlama yöntemi ele alınmıştır. Bu çalışmada ilk olarak, kontrol sistem basamak yanıtı bulanık PID kontrolörü girişlerinden olan hata değişkenine ait üyelik fonksiyonu sayısına göre belirli sayıda bölgelere ayrılmıştır. Bu bölgelerin referans işaretine göre simetrik bir yapı oluşturmaktadır. Simetrik bölgeler referans değerine yaklaşma ve uzaklaşma bölgeleri olarak adlandırılmıştır. Her bir bölge için gerekli kontrol işaretinin elde edilmesine yönelik tanımlayıcı kurallar belirlenmiştir. Her bölgede istenen kontrol işaretinin elde edilmesinde kullanılan bulanık kuralların etkisi belirlenmiş ve bulanık kural ağırlık değişkeni ile ilişkilendirilmiştir. Bulanık kural ağırlıklarının çevrimiçi ayarlanması için sistem hata değişkeninin mutlak değerine bağlı iki basit fonksiyon kullanılmış ve simetrik bir kural ağırlıklandırma yapısı oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlarda bir parametre

kullanılmaktadır. Bu parametrenin değeri hatanın büyük olduğu ve hata değişiminin negatif olduğu bölge dışında “1” olarak seçilmiştir. Hatanın büyük olduğu ve hata değişiminin negatif olduğu bölgede ise sistemin aşırı hızlanmasını önlemek amacıyla yarıya düşürülmüştür. Bu tezde bu parametreye çeşitli değerler verilerek, bu parametrenin sistem cevabı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Tezde, daha sonra Xu ve Shin (2005) tarafından kontrol sistemine bozucuların ve zamanla değişen parametrelerin etkilerini telafi edebilmek için önerilen çok seviyeli bulanık kontrolör yapısı ele alınmıştır. Bu yapıda “çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması” adı verilen bir bulanık ayar mekanizması kullanılmıştır. Bu ayar mekanizmasının girişleri, kontrol sistem hatası ve hatanın değişimidir. Çıkış üyelik fonksiyonu ayarlama mekanizmasının kendi giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları ve bir kural tablosu vardır. Mekanizmanın çıkışı, bulanık kontrolörün çıkış üyelik fonksiyonunun merkezini ayarlamak için kullanılmaktadır. Mekanizmanın kural tablosu 11x11 olarak belirlenmiştir. Tez çalışmamızda ayarlama mekanizmasının kural tablosunun boyutu küçültülmüş, tablonun bazı değerleri serbest seçilerek, bu serbest değerlere göre yöntemin başarımı incelenmiştir.

Xu ve Shin (2005) ve Karasakal ve diğ. (2011) makalelerinde önerilen yöntemlerin her ikisi de bulanık kontrolörün yapısal parametrelerini ayarlamaya yönelik çevrimiçi yöntemlerdir. Yöntemlerden biri çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezini değiştirirken diğeri kural ağırlıklarını değiştirmeyi hedeflemektedir. Tez çalışmamızda bu iki yöntem çevrimiçi olarak birleştirilmiş, çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezi ve kural ağırlıkları çevrimiçi olarak birlikte ayarlanmıştır. Her iki yöntem için daha önce ayrı ayrı belirlenmiş olan serbest parametre değerleri birleştirilmiş yöntem için yeniden analiz edilmiştir. Hedef olarak düşük aşım değerine öncelik verilmiştir.

Önerilen birleştirilmiş yöntemin sistem cevapları ve başarımındaki etkisini gözlemlemek amacıyla yöntemin etkisi, geleneksel bulanık PID kontrolör, hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık kontrolör ve çok seviyeli üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanmasına dayalı yönteme sahip bulanık kontrolör benzetim çalışmaları üzerinden ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler modelleri kullanılmıştır.

Tez şu şekilde yapılandırılmıştı: Bölüm 2’de, dilsel ifadeleri ve bulanık sistem öğeleri anlatılmış ve içeriği hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 3’te, bulanık PID kontrolör

yapıları ele alınmıştır. Bölüm 4’te çevrimiçi bulanık kontrolör yapıları olan hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ve üyelik fonksiyonlarını merkezinin ayarlanmasına dayalı yöntemi ayrı ayrı açıklanmış, doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler üzerine uygulanarak serbest seçilen parametrelerin analizi yapılmıştır. Bölüm 5’de üyelik fonksiyonlarının merkezinin ve bulanık kural ağırlıklarının birlikte ayarlanmasına dayalı yöntem önerilmiş önerilen yöntemin sistem yanıtı ve başarımı üzerindeki etkisi, doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler üzerinde tartışılmıştır.



2. BULANIK MANTIK SİSTEMLERİ

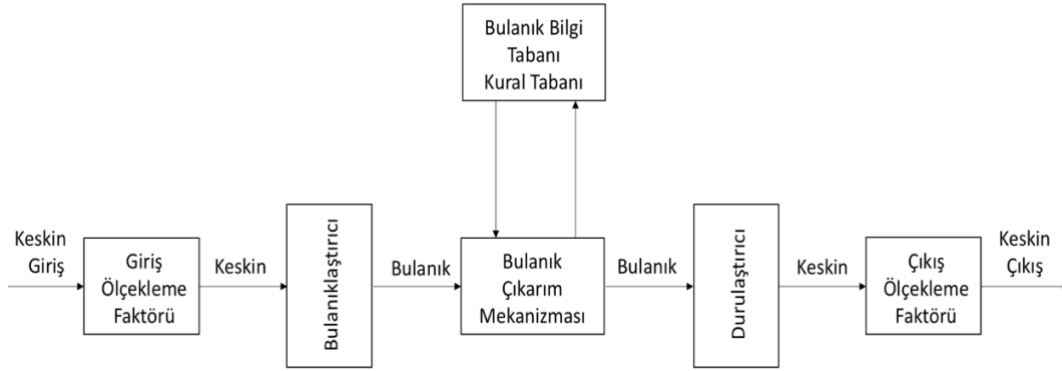
Bulanık mantık sistemleri keskin girişleri bulanık değerlere çevirir ve daha sonra bu bulanık değerleri sisteme uygulanacak olan tek bir mantıklı keskin değere çevirir.

2.1 Giriş

Bulanık mantık teorisi 1965 yılında Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Bulanık mantık, klasik küme kuramı yerine bulanık küme kuramına dayanan bir matematiksel yaklaşımdır. Klasik küme mantığına göre bir elemanın kümeye ait olması 0 ya da 1'dir. 0 ise kümenin elemanı değil, 1 ise kümenin elemanıdır. Üçüncü bir seçenek yoktur. Oysa bulanık mantıkta bir elemanın kümeye aitliğini üyelik derecesi ile belirlenir. Üyelik derecesi 0 ile 1 arasında herhangi bir değeri alabilir. Klasik kümelerde, bir elemanın, kümenin elemanı olup olmadığını keskin bir şekilde belirlenirken, bulanık mantıkta ise bir elemanın bir kümeye ait olma derecesi $[0, 1]$ değer aralığında bir derece ile ifade edilir. Günlük hayatımızda karşılaştığımız problemlerin hemen hemen hepsi bir belirsizlik içerir. Zadeh, bu belirsizliklerin klasik mantık ile çözülemeyeceğini, yani klasik küme mantığının yetersiz olduğunu bulanık mantıkla birlikte dilsel ifadelerin kullanılmasıyla problemlerin daha iyi bir şekilde çözülebileceğini savunmaktadır. Bulanık mantıkta dilsel değerler ve dilsel değişkenler kullanılır. Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifadeler ile tanımlanan belirli kurallar ile gerçekleştirilir. Bulanık mantık, matematiksel modeli çok zor bulunabilen veya karmaşık yapıdaki sistemler için çok elverişlidir.

Bulanık sistemler, bulanık kurallardan oluşmaktadır. Bu bulanık kurallar ise “EĞER – O HALDE” biçiminde ifade edilmektedir. Şekil 2.1’de yer alan bulanık mantık sistem yapısı, giriş ölçekleme faktörü, bulanıklaştırıcı, bulanık bilgi tabanı (kural tabanı), bulanık çıkarım mekanizması, durulaştırıcı ve çıkış ölçekleme faktöründen oluşur. Bulanık mantık sistemi tasarımında ilk olarak sistemin girişleri belirlenir. Giriş değerleri herhangi bir aralıkta keskin değerlere sahip olabilir. Bu nedenle, bu giriş değişkenlerinin değerleri giriş ölçekleme faktörüyle çarpılarak bulanık çıkarım mekanizması içerisinde tanımlanmış olan aralık değerlere çekilirler. Bulanıklaştırıcı,

ölçekleme faktörüyle çarpılmış keskin değerleri, üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanık değerlere çevirir. Daha sonra bu bulanık değerler, kural tablosu ve bulanık çıkarım mekanizması kullanılarak tek bir bulanık değere dönüştürülür. Bulanık değer durulaştırıcı kullanılarak keskin bir değere dönüştürülür ve daha sonra bu keskin değer çıkış ölçekleme çarpanı adı verilen katsayı ile çarpılır.



Şekil 2.1 : Bulanık mantık sistem yapısı.

2.2 Dilsel İfadeler

Bu bölümde üyelik fonksiyonları, dilsel terimler ve değişkenler anlatılacaktır.

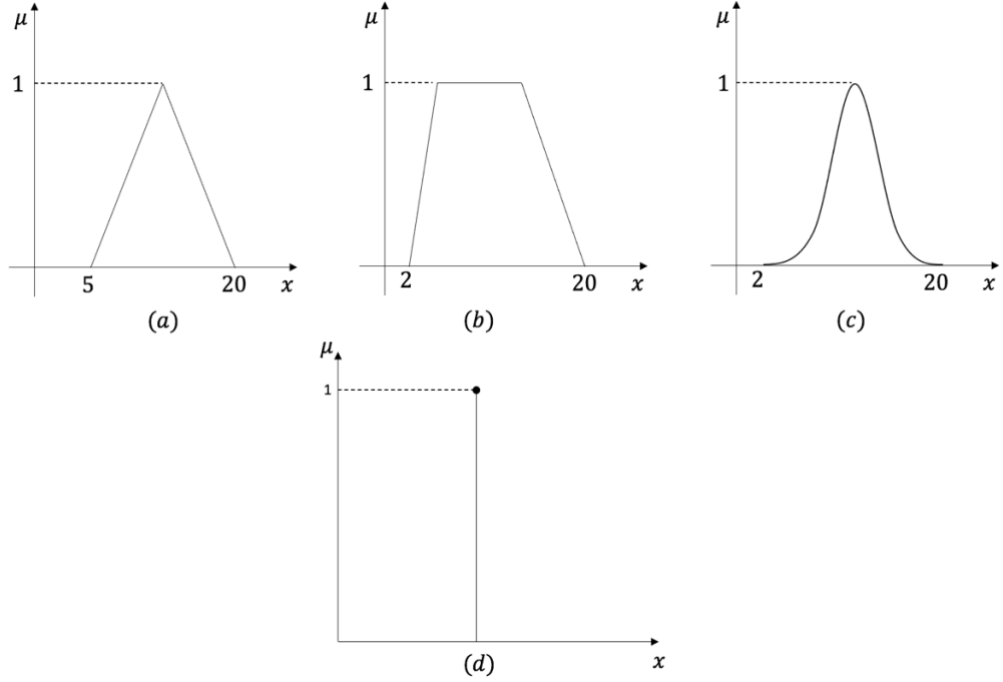
2.2.1 Üyelik fonksiyonları

Bulanık küme kuramı, bir elemanın bir kümeye kısmi üyeliğine olanak sağlar. Bulanık kümeler üyelik fonksiyonları ile tanımlanır. Eğer üyelik derecesi olarak adlandırılan üyelik fonksiyonunun değeri bire eşitse x elemanı bulanık kümeye tamamen aittir. Eğer bu değer sıfır ise, x bulanık kümeye ait değildir. Eğer üyelik derecesi sıfır ile bir arasında ise x bulanık kümenin kısmi üyesidir. Bu durumda, her üyelik fonksiyonu, her zaman keskin bir küme olan belirli bir evrensel X kümesinin elemanlarını $[0,1]$ aralığındaki gerçek sayılarla eşler (Klir ve Yuan, 1995). Literatürde üyelik fonksiyonlarını belirtmek için en yaygın olarak kullanılan gösterim ise şudur,

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

Bu gösterime göre, A bulanık kümesinin etiketi, μ_A üyelik fonksiyonuyla ifade edilir. Aynı zaman μ_A ifadesi üyelik derecesi olarak da ifade edilebilir. μ_A değerinin 1'e yaklaşması x elemanının A bulanık kümesine daha yüksek mertebeden ait olduğunu, 0 değerine yaklaşması ise A bulanık kümesine daha düşük mertebeden ait olduğunu

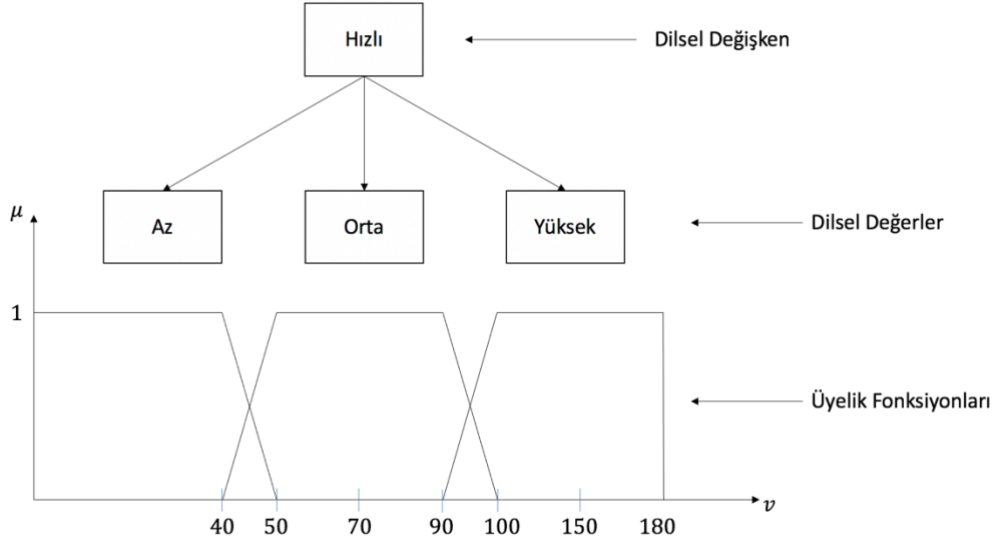
belirler. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesine ilişkin net bir yöntem bulunmamaktadır. Sistemin analizine dayalı olabilir ya da uzman bilgisine göre değişkenlik gösterebilir. Şekil 2.2’de literatürde en fazla kullanılan üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. Bunlar, üçgen tipi, gauss tipi, yamuk tipi ve tekil üyelik fonksiyonlarıdır (Klir ve Yuan, 1995).



Şekil 2.2 : (a) Üçgensel üyelik fonksiyonu (b) Yamuk üyelik fonksiyonu (c) Gauss üyelik fonksiyonu (d) Tekil üyelik fonksiyonu.

2.2.2 Dilsel terimler ve değişkenler

Değerleri zayıf, çok zayıf, şişman, çok şişman gibi dilsel ifadeler veya kelimeler olan değişkenlere dilsel değişkenler denir. Şekil 2.3’de “hızlı” dilsel değişkeni örneği verilmiştir. “Hızlı” dilsel değişkeni belirli bir çalışma uzayında “Az”, “Orta” ve “Yüksek” olarak tanımlanmış üç adet dilsel terime sahiptir. Her dilsel terimin kendi bulanık kümesine olan aitliği yaklaşık bir üyelik fonksiyonu ile belirlenir.



Şekil 2.3 : “Hızlı” dilsel değişkeni, dilsel değerler ve üyelik fonksiyonları.

Her bir dilsel terim için tanımlanmış olan üyelik fonksiyonları sırasıyla şu şekilde ifade edilmektedir,

$$\mu_{Az} = \begin{cases} 1 & 0 < v < 40 \\ \frac{50-v}{10} & 40 < v < 50 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\mu_{Orta} = \begin{cases} 1 & 50 < v < 90 \\ \frac{v-40}{10} & 40 < v < 50 \\ \frac{100-v}{10} & 90 < v < 100 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\mu_{Yüksek} = \begin{cases} 1 & 100 < v < 180 \\ \frac{v-90}{10} & 90 < v < 100 \end{cases} \quad (2.4)$$

2.3. Bulanık Sistem Öğeleri

Bulanık sistem öğeleri bulanıklaştırma, bulanık kural tabanı, bulanık çıkarım mekanizması ve durulaştırmadan oluşmaktadır.

2.3.1 Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma operatörü ile giriş olarak gelen keskin değer, çeşitli üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanık bir değere dönüştürülür. $u_i \in U_i$ sayısal girişler olsun ve U_i^* , U_i üzerinde tanımlanabilecek tüm olası bulanık kümelerin kümesi olduğunu gösterebiliriz. Bulanıklaştırma, u_i değerini U_i söylem evreninde tanımlanan $\hat{A}_i^{fuz}$ ile

gösterilen bir bulanık kümeye dönüştürür (Passino ve Yurkovich, 1998). Bu dönüşüm, bulanıklaştırma operatörü olan F ile yapılır ve şu şekilde tanımlanır,

$$F: U_i \rightarrow U_i^* \quad (2.5)$$

$$F(u_i) = \hat{A}_i^{\text{fuz}} \quad (2.6)$$

Bulanık kümelere ya da bulanık değerlere dönüştürmemizin amacı ise bulanık kural tabanının ve bulanık çıkarım mekanizmasının bulanık değerleri ya da bulanık kümeleri kullanarak işlem yapabilmeleri içindir.

2.3.2 Bulanık kural tabanı

Bulanık mantıkta giriş ve çıkış arasındaki eşleme bulanık kurallar ile yapılmaktadır. Bir bulanık EĞER – O HALDE kural tabanı genel olarak şu şekilde ifade edilir,

EĞER öncül O HALDE sonuç

A ve B, sırasıyla X ve Y söylem evrenleri üzerinde bulanık kümeler tarafından tanımlanan dilsel değerler ve “x” giriş , “y” ise çıkış değişkeni olmak üzere,

EĞER x A ise O HALDE y B’dir.

ifadesi bulanık bir kuralı gösterir. Bulanık sistemlerin girişlerine öncül, çıkışlarına ise sonuç denir. Bu ifadenin kısaltması olarak $A \rightarrow B$ kullanılabilir. 2 adet girişin ve 1 adet çıkışın bulanık kuralı ise şu şekilde verilmektedir,

EĞER x A ise ve m M ise O HALDE y B’dir

Buradaki “ve” ifadesi ise kuralın öncül kısımlarını birleştirir. Genel olarak, n adet girişli ve 2 adet çıkışlı sistemin bulanık kuralı ise şu şekilde verilir (Passino ve Yurkovich, 1998),

EĞER $x_1 A_1$ ise ve $x_2 A_2$ ise ve...ve $x_n A_n$ ise O HALDE $y_1 B_1$ ve $y_2 B_2'$ ’dir.

2.3.3 Bulanık çıkarım mekanizması

Bir bulanık çıkarım mekanizmasının temel yapısı üç kavramsal bileşenden oluşmaktadır: bir dizi bulanık kural içeren bir kural tabanı; bulanık kurallarda kullanılan üyelik fonksiyonlarını tanımlayan bir veri tabanı; ve uygun bir çıkış elde

etmek için kurallar ve verilen bu kurallar üzerinden çıkarım gerçekleştirilen kuralların ateşlendiği mekanizmadır (Passino ve Yurkovich, 1998). Bulanık çıkarım mekanizması yöntemi olarak çok farklı yöntemler vardır. Bu çalışmada en çok kullanılan 4 adet bulanık çıkarım yöntemi anlatılmıştır.

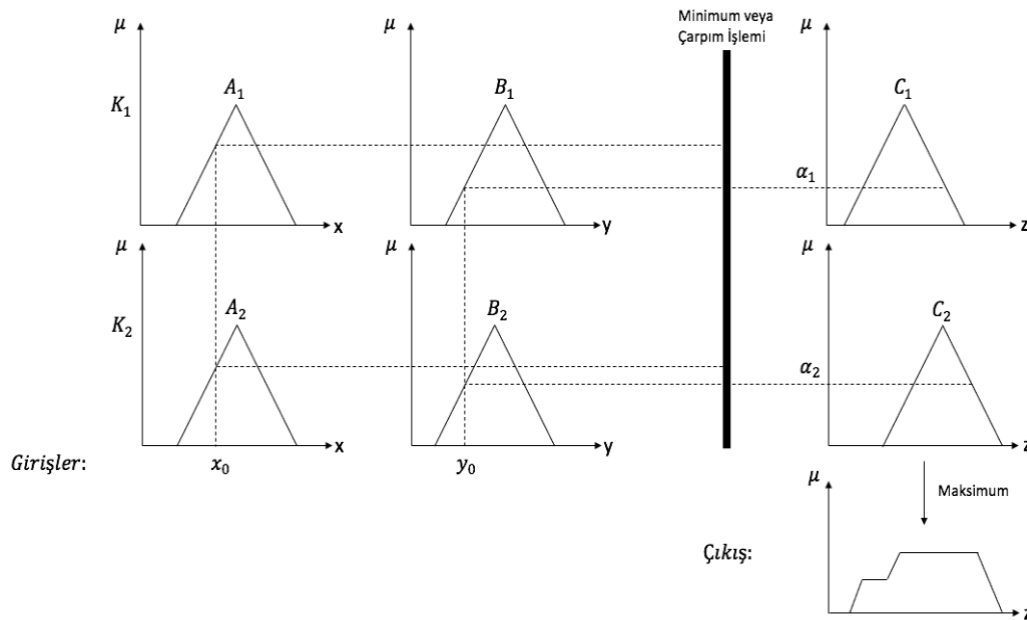
2.3.3.1 Mamdani tipi bulanık çıkarım mekanizması

Mamdani bulanık çıkarım sistemi (Mamdani ve Assilian, 1975), deneyimli insan operatörlerden elde edilen bir dizi dilsel kontrol kuralı ile bir buhar motoru ile kazanın birleşimini kontrol etmeye yönelik ilk girişim olarak önerilmiştir. Örnek olarak, iki giriş ve bir çıkış için kurallar

K_1 : 1 Eğer x A_1 ve y B_1 ise o halde z C_1 'dir.

K_2 : 2 Eğer x A_2 ve y B_2 ise o halde z C_2 'dir.

şeklinde ele alınsın. Burada “ x ” ve “ y ” giriş değişkenleri, “ z ” çıkış değişkeni, “ A ”, “ B ” ve “ C ” ise sırasıyla giriş ve çıkış değişkenlerine ait bulanık kümelerdir. Şekil 2.4’te ilişkin çıkarım mekanizması görülmektedir.



Şekil 2.4 : İki kurallı mamdani tipi bulanık çıkarım mekanizması.

Bu gösterimde sırasıyla bulanık kesişim operatörü olarak minimum işlemi ve daha sonrasında ise bulanık birleşim operatörü olarak maksimum işlemi kullanılmıştır. Bulanık kesişim operatörü olarak cebirsel çarpımı da seçilebilir. Mamdani tipi bulanık çıkarım mekanizmasının sonuç kısmında bulanık küme kullanılır.

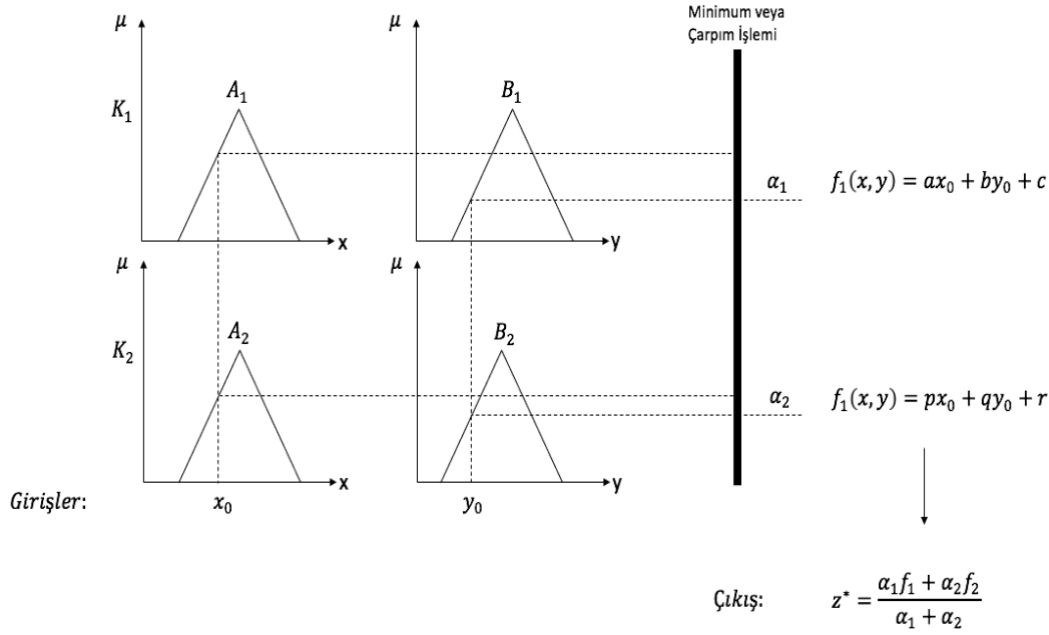
Keskin giriş değerleriyle ilgili olarak karşılık gelen bulanık kural ateşlenir. Ateşlenen kuralın üyelik fonksiyonu değeri ise o girişe karşılık gelen üyelik fonksiyonu ile hesaplanır. Bu işlem öncül kısmında kaç tane giriş varsa hepsi için uygulanır ve daha sonra ise minimum işlemi ya da çarpım işlemi kullanılarak her bir kurala karşılık gelen toplam ateşleme şiddeti yani α değerleri hesaplanır. Daha sonra bu toplam ateşleme şiddeti sonuç kısmında bulunan bulanık kümeye uygulanır ve burada uygulanan toplam ateşleme gücüne karşılık gelen bulanık değer elde edilir. Sırasıyla bu işlem bütün kurallar için uygulanır ve daha sonra elde edilen bulanık değerler ise maksimum operatörü uygulanarak birleştirilir. Bir bulanık küme elde edilir ve daha sonra durulaştırıcı yöntemlerinden biri kullanılarak keskin değer bulunur.

2.3.3.2 Takagi-Sugeno tipi bulanık çıkarım mekanizması

Takagi-Sugeno bulanık modeli, belirli bir giriş-çıkış veri setinden bulanık kurallar üretmek için sistematik bir yaklaşım geliştirmek amacıyla Takagi, Sugeno ve Kang tarafından sunulmuştur (Sugeno ve Kang, 1988; Takagi ve Sugeno, 1985). Takagi-Sugeno bulanık modelindeki tipik bir bulanık kural ise şu şekilde gösterilmiştir;

$$\text{EĞER } x \text{ A ise ve } y \text{ B ise O HALDE } z=f(x,y)$$

Buradaki A ve B öncül kısmındaki bulanık kümelerdir. Çıkış kısmında bulunan $z=f(x,y)$ ifadesi ise sonuç kısmındaki keskin bir fonksiyondur. Ancak kuralın öncülü tarafından belirtilen bulanık bölge içinde modelin çıkışını yaklaşık olarak tanımlayabildiği sürece herhangi bir fonksiyon olabilir. $f(x,y)$ birinci dereceden bir polinom olduğunda, elde edilen bulanık çıkarım mekanizmasına birinci dereceden Takagi-Sugeno modeli denir. Şekil 2.5'te iki girişe ve bir çıkışa sahip iki kurallı bir Takagi-Sugeno bulanık çıkarım mekanizması yapısı görülmektedir.



Şekil 2.5 : İki kurallı takagi-sugeno tipi bulanık çıkarım mekanizması.

İki kuralın gösterimi ise şu şekildedir,

K_1 : EĞER x A_1 ise ve y B_1 ise O HALDE $z=f_1(x,y)$ 'dir.

K_2 : EĞER x A_2 ise ve y B_2 ise O HALDE $z=f_2(x,y)$ 'dir.

Bulanık kesişim işlemi olarak minimum ya da cebirsel çarpım işlemi kullanılabilir. Bu durulaştırma işleminin sonucunda da bir keskin değer elde edilir.

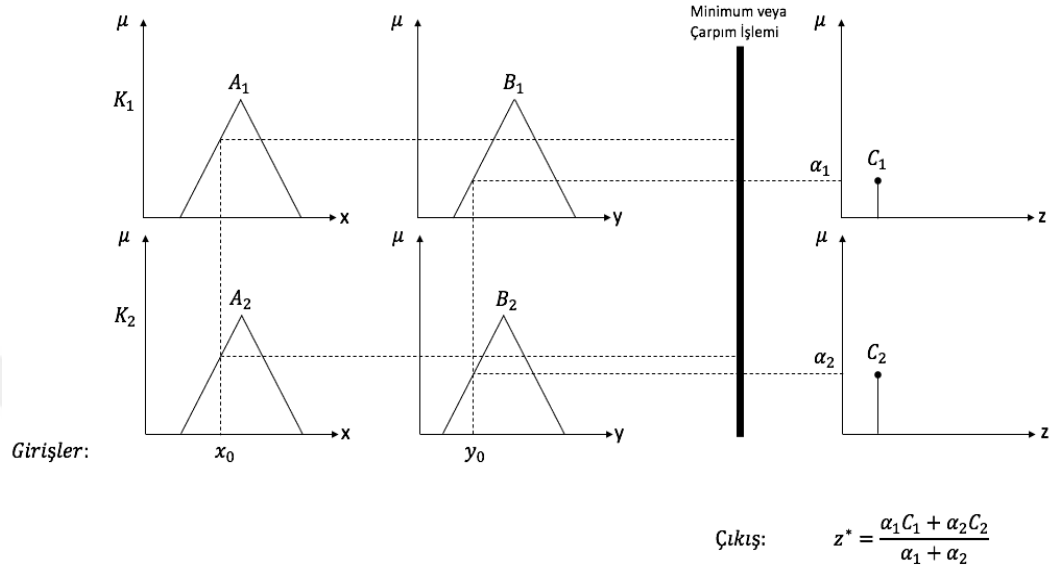
2.3.3.3 Tekil tip bulanık çıkarım mekanizması

Tekil tipi bulanık çıkarım mekanizmasının sonuç kısmında sabit ve keskin bir değer kullanılır. Yani $f(x,y)$ sabit bir sayıya eşittir. Bu tarz bulanık modellere sıfırıncı dereceden Takagi-Sugeno bulanık modeli de denebilir. Aslında tekil tip bulanık çıkarım mekanizması, Mamdani ve Takagi-Sugeno bulanık çıkarım mekanizmalarının özel bir durumudur. Şekil 2.6'da gibi iki girişe sahip ve bir çıkışa sahip iki kurallı bir tekil tipi bulanık çıkarım mekanizması gösterilmektedir. Bu iki kuralın gösterimi şu şekildedir,

K_1 : EĞER x A_1 ise ve y B_1 ise O HALDE $z=C_1$ 'dir.

K_2 : EĞER x A_2 ise ve y B_2 ise O HALDE $z=C_2$ 'dir.

Şekil 2.6’da gördüğünüz gibi bulanık kesişim operatörü olarak ya minimum ya da cebirsel çarpım kullanılır. Bu bulanık kesişim işlemlerin sonucu olarak ise her bir kural için ateşleme şiddeti elde edilir. Bu ateşleme şiddetlerine bağlı olarak sabit ve keskin bir sayı bulunur.



Şekil 2.6 : İki kurallı tekil tipi bulanık çıkarım mekanizması.

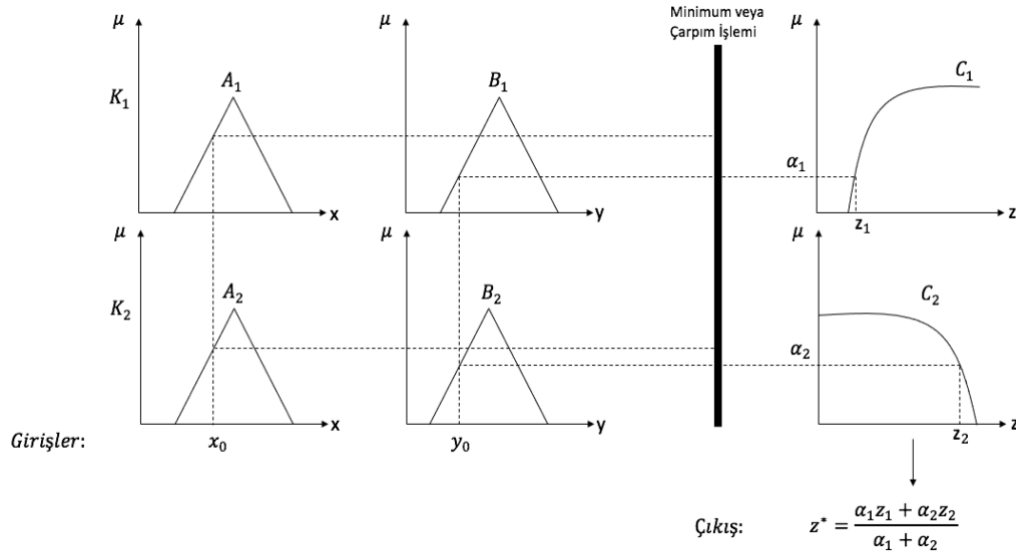
2.3.3.4 Tsukamoto tipi bulanık çıkarım mekanizması

Tsukamoto tip bulanık çıkarım mekanizmasında, her bir bulanık kuralın sonucu monoton olarak artan ya da monoton olarak azalan üyelik fonksiyonuna sahip bir bulanık küme ile gösterilir (Tsukamoto, 1979). Sonuç olarak her bir kuralın çıkışı, kuralın ateşleme gücü tarafından temsil edilen keskin bir değer olarak tanımlanır. Her bir kuralın keskin bir çıkışı vardır ve daha sonra ise durulaştırma işlemi yapılarak ortak bir keskin çıkış elde edilir. Ancak, Tsukamoto bulanık çıkarım mekanizması, Mamdani ya da Takagi-Sugeno bulanık çıkarım mekanizmaları kadar açık olmadığı için sıklıkla kullanılmaz.

Şekil 2.7’de iki kurallı bir Tsukamoto bulanık çıkarım mekanizması gösterilmektedir. Bu şekilde gösterildiği gibi bu bulanık çıkarım mekanizması 2 girişe ve 1 çıkışa sahip iki kuraldan oluşmaktadır. Kurallar ise şu şekilde ifade edilmektedir,

K_1 : EĞER x A_1 ise ve y B_1 ise O HALDE $z_1=C_1$ ’dir.

K_2 : EĞER x A_2 ise ve y B_2 ise O HALDE $z_2=C_2$ ’dir.



Şekil 2.7 : İki kurallı tsukamoto tipi bulanık çıkarım mekanizması.

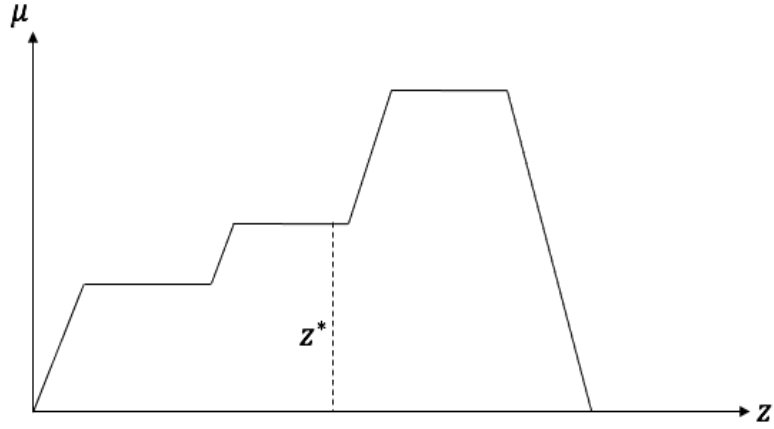
Her bir kuralın ateşleme gücü, bulanık kesişim işlemi olarak minimum işlemi ya da cebirsel çarpım işlemi kullanılarak elde edilir. Daha sonra bu ateşleme güçlerine karşılık gelen keskin değerler bulunur ve daha sonrasında ise bu keskin değerler ile ateşleme güçleri kullanılarak nihai bir keskin değer elde edilir.

2.3.4 Durulaştırma

Bulanık çıkarım mekanizmasından elde edilen değer bulanıktır. Durulaştırma, bu bulanık değerın keskin bir değere çevrilmesi için yapılır. En çok kullanılan yöntemler aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

2.3.4.1 Ağırlık merkezi yöntemi

Bulanık çıkarım mekanizması sonucu bir bulanık değer elde edilir. Bu bulanık değerın alanının ağırlık merkezi bulunarak durulaştırma yapılabilir. Bu durulaştırma yönteminin gösterimi Şekil 2.8’de verilmiştir (Jang ve diğ, 1997).



Şekil 2.8 : Ağırlık merkezi yöntemi.

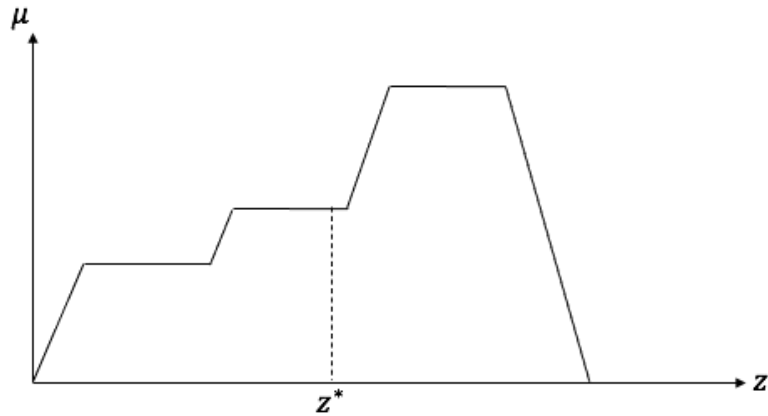
Sonuç aşağıdaki (2.7) ifadesi ile bulunur,

$$z^* = \frac{\int \mu_A(z)zdz}{\int \mu_A(z)dz} \quad (2.7)$$

Burada, $\mu_A(z)$, toplanmış çıkış üyelik fonksiyonudur. Bu durulaştırma yöntemi en yaygın olarak kullanılan durulaştırma yöntemidir.

2.3.4.2 Alanın ortayı yöntemi

Bu yöntemde ise bulanık çıkarım mekanizmasından elde edilen bulanık alan, aynı alana sahip iki bölgeye bölünür ve keskin değer bu şekilde hesaplanır. Bu durulaştırma yöntemi Şekil 2.9’da gösterilmiştir (Jang ve diğ, 1997).



Şekil 2.9 : Alanın ortayı yöntemi.

$$z^* = \int_{\alpha}^z \mu_A(z)dz = \int_z^{\beta} \mu_A(z)dz \quad (2.8)$$

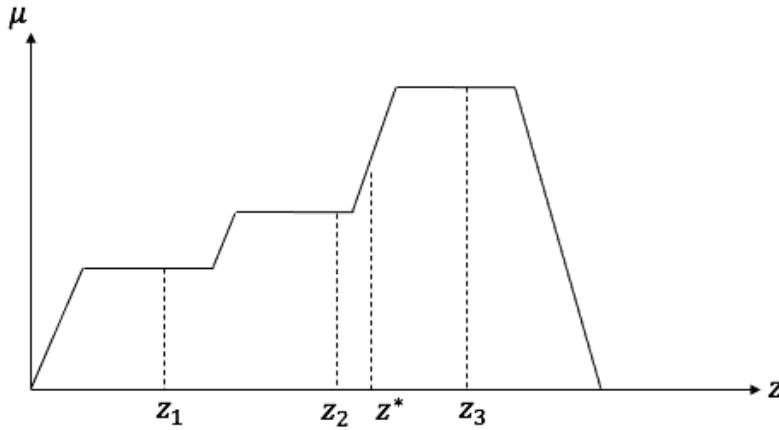
(2.8)'de gösterildiği gibi bölge $z=\alpha$, $z=\beta$, $y=0$ ve $y=\mu_A(z)$ arasındaki bölgeyi aynı alana sahip 2 bölgeye ayırır.

2.3.4.3 Ağırlık ortalaması yöntemi

Simetrik çıkış üyelik fonksiyonları için geçerlidir. Hesaplama yoğunluğu çok azdır (Jang ve diğ, 1997). Çıkıştaki her bir fonksiyonun ilgili maksimum üyelik değerinin ağırlıklandırılmasıyla oluşturulur. Aşağıdaki (2.9) ile hesaplanır,

$$z^* = \frac{\sum \mu_A(z)z}{\sum \mu_A(z)} \quad (2.9)$$

Şekil 2.10'da da bu durulaştırma yöntemi gösterilmektedir.



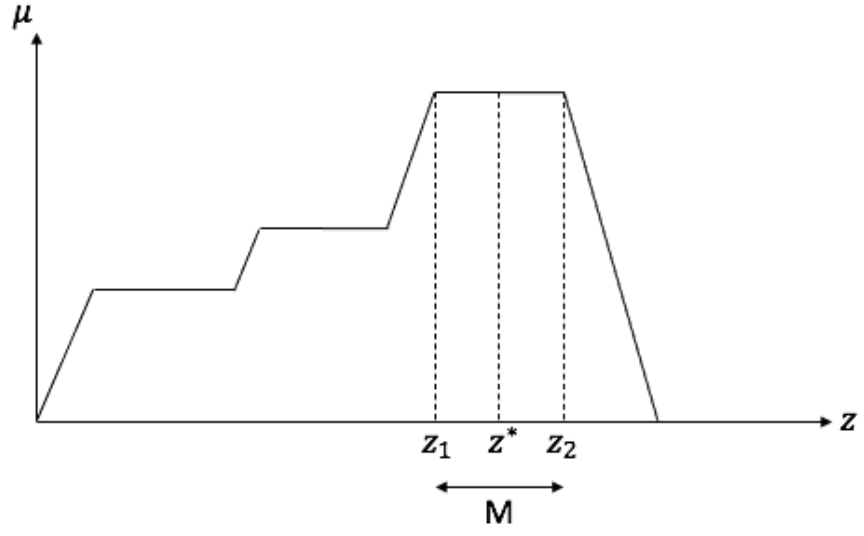
Şekil 2.10 : Ağırlık ortalaması yöntemi.

2.3.4.4 Maksimumun ortalaması yöntemi

Bu yöntemde ilk olarak nihai bulanık kümenin maksimum üyelik derecesine sahip aralığı tespit edilir. Bu aralığın başındaki değer ile sonundaki değer arasında bir ortalama alınır. Böylece, sonuçta keskin değer elde edilir. (2.10)'da bu yönteme ilişkin ifade verilmiştir (Jang ve diğ, 1997).

$$z^* = \frac{\sum_{z_k \in M} z_k}{|M|} \quad (2.10)$$

Şekil 2.11'de ise maksimumun ortalaması yönteminin şekil üzerinde anlatımı verilmiştir.



Şekil 2.11 : Maksimumun ortalaması yöntemi.



3. BULANIK PID KONTROLÖRLERİ

Bulanık PID kontrolörleri doğası gereği doğrusal olmayan yapıları sayesinde doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerde yüksek başarımlar göstermektedir.

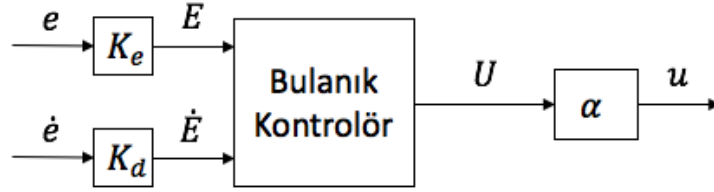
3.1 Giriş

Endüstriyel kontrol süreçlerinde kullanılan en iyi bilinen kontrolörler, basit yapıları ve çok çeşitli çalışma koşullarında sağlam başarımları nedeniyle orantısal-integral-türev (PID) kontrolörlerdir. Bununla birlikte, doğrusal olan PID kontrolörleri, doğrusal olmayan sistemler için uygun olmayabilir. Bu nedenle, bulanık mantık kontrolörleri (BMK), özellikle bulanık PID kontrolörleri, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemler için basitlik ve etkinlik ile ilişkili sezgisel yapıları nedeniyle endüstriyel işlemler ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Mamdani (1974) tarafından uygulanan ilk bulanık mantık kontrol algoritması, yetenekli bir insan operatörünün dilsel kontrol protokolünü sentezlemek için oluşturulmuştur. Bu tip BMK uygulaması klasik kontrolörlere kıyasla başarılı olmasına rağmen, tasarım prosedürü operatörün deneyim ve bilgisine bağlıdır ve sezgisel kontrol kurallarının açıklanması ile sınırlıdır. Operatörün kontrol deneyimine bağlı olan bu büyük zorluk veya dezavantajdan kaçınmak için Mac Vivar-Whelan (1976) ilk olarak bulanık kontrolörlerin yapısı için bazı genel kurallar önermiştir.

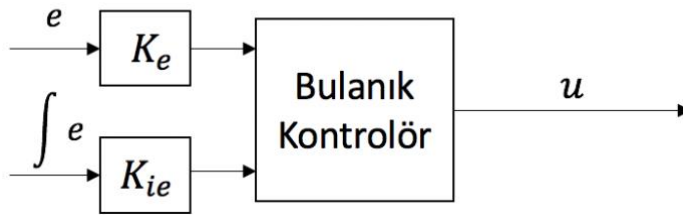
3.2 Bulanık PD ve PI Kontrolörler

Bulanık PID kontrolör oluşturmak için iki giriş kullanılırsa, bulanık PD veya bulanık PI kontrolör elde edilebilir. Örneğin, girişler hata (e) ve hatanın türevi (veya değişimi) ($\dot{e}$) olarak seçilirse, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi bir bulanık PD kontrolörü elde edilir. Girişler hata (e) ve hatanın integrali (veya toplamı) olarak seçildiğindeki PI kontrolör yapısı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu yapı ile sürekli hal hatası ortadan kaldırılmakta ancak seçilen parametrelerin değerlerine göre yavaş yükselme zamanı veya büyük bir aşım rastlanabilmektedir.

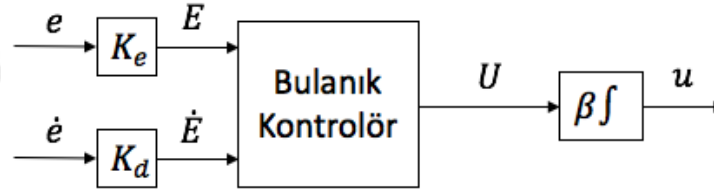
Kontrolör girişlerini hata ve hatanın değişimi olarak ve kontrolör çıkışının integralini alınarak farklı bir PI yapısı elde etmek mümkündür. Bu tip kontrolöre ait blok gösterimi Şekil 3.3’de görülmektedir (Arzen ve diğ, 1999).



Şekil 3.1 : Bulanık PD kontrolör yapısı.



Şekil 3.2 : Girişlerin hata ve hatanın integrali olarak alınması durumunda elde edilen bulanık PI kontrolör yapısı.



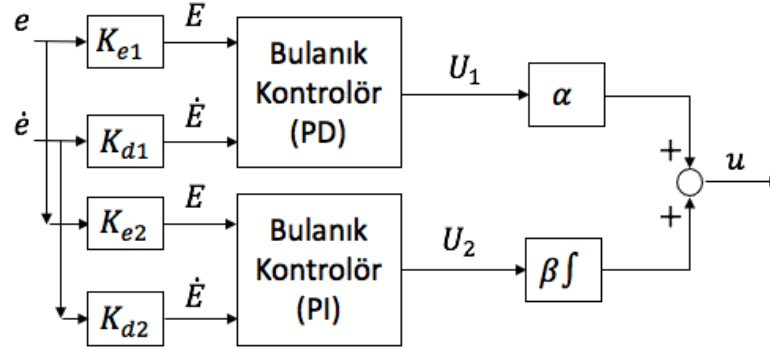
Şekil 3.3 : Girişlerin hata ve hatanın türevi olarak alınması durumunda elde edilen bulanık PI kontrolör yapısı.

Bulanık PI kontrolünün, bulanık PD’ den daha pratik olduğu bilinmektedir. Çünkü bulanık PD’nin sürekli hal hatasını ortadan kaldırması zordur. Bununla birlikte, bulanık PI kontrolörünün, integrasyon işlemi nedeniyle daha yüksek mertebeli süreçler için geçici yanıtta düşük başarımlı olduğu bilinmektedir.

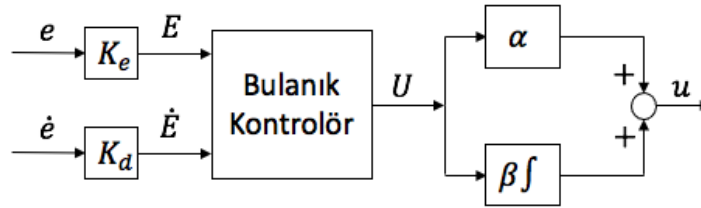
3.3 Bulanık PID Kontrolör

Orantısal, integral ve türev kontrol eylemlerini hep birlikte elde etmek için, PI ve PD eylemlerini bir araya getirmek sezgisel ve kullanışlıdır (Xu ve diğ, 2000; Qiao ve Mizumoto, 1996; Golob, 2001). Bulanık PID kontrolörü, Şekil 3.4’te olduğu gibi, iki farklı kural tabanıyla oluşturulmuş bulanık PI ve PD kontrolörlerinin birleşiminden elde edilebilir. Bulanık PID kontrolör oluşturma için diğer bir yolu ise bulanık PD

kontrolörünü çıkışta bir integratör ve bir toplama birimi ile birleştirmektir. Şekil 3.5'te verilen bu bulanık PID kontrolörü, Şekil 3.4'de verilen bulanık PID'ye göre daha az kural ve ölçekleme çarpanı içerir (Güzelkaya ve diğ, 2001).

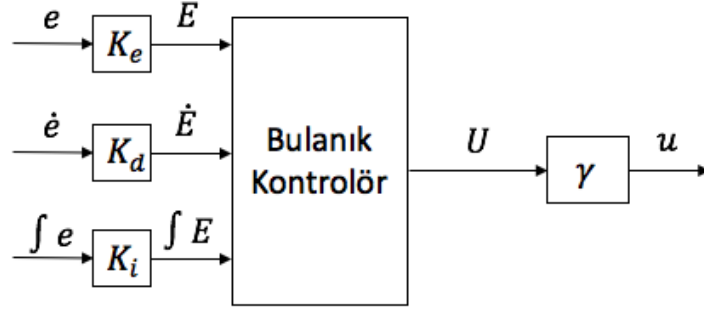


Şekil 3.4 : Bulanık PD ve PI kontrolörlerin birleştirilmesinden oluşan bulanık PID kontrolör yapısı.



Şekil 3.5 : Bir kural tabanı ile bulanık PID kontrolör yapısı.

Şekil 3.5'te bulunan yapıdaki giriş hata e ve hatanın değişimi $\dot{e}$ 'dir. Çıkış ise kontrol işaretinin değişimi U 'dur. İlk başta hata ve hatanın değişimi, K_e ve K_d giriş ölçeklendirme katsayıları ile çarpılarak, hata ve hatanın değişimi üyelik fonksiyonlarının tanım aralığında normalleştirilir. Çıkış ölçeklendirme katsayıları ise yani α ve β , bulanık kontrolörün çıkışını uygulanabilir bir değere normalleştirecektir. Hata ve hatanın türevinin yanı sıra üçüncü bilgilerin eklenmesiyle bir bulanık PID kontrolörü oluşturulabilir (Wong ve Feng, 1994; Mann ve diğ, 2001). Bu üçüncü giriş, hatanın integrali (veya toplamı) olarak seçildiğinde, Şekil 3.6'da verilen 3 boyutlu kural tabanlı bir bulanık PID kontrolör elde edilebilir (Xu ve diğ, 2000).



Şekil 3.6 : Girişlerin hata, hatanın değişimi ve hatanın integrali olması durumunda elde edilen bulanık PID kontrolör yapısı.

Aşağıdaki nedenlerden dolayı 3 boyutlu kural tabanlı bulanık PID kontrolörünü oluşturmak zordur:

- (1) Hatanın değişim oranının kullanılması durumunda, bir insan uzmanının bilginin üçüncü boyutunu, örneğin bir hareket kontrol sisteminde konum ve hızın yanı sıra ivmeyi güçlükle algılayabilir ve bu nedenle kontrol kurallarını elde etmek zordur,
- (2) Hata toplamının (integrali) kullanılması durumunda, farklı bir sistemin farklı integral kazancına ve hata toplamının (integrali) kararlı durum değerine ihtiyacı olduğundan dilsel değerlerini ölçmek zordur.
- (3) 3 boyutlu kural tabanı, her boyutun niceleme sayısı arttığında çok karmaşık olabilir ve bu durumda, kontrol kuralı sayısı niceleme sayısıyla kübik olarak artar (Xu ve diğ, 2000).

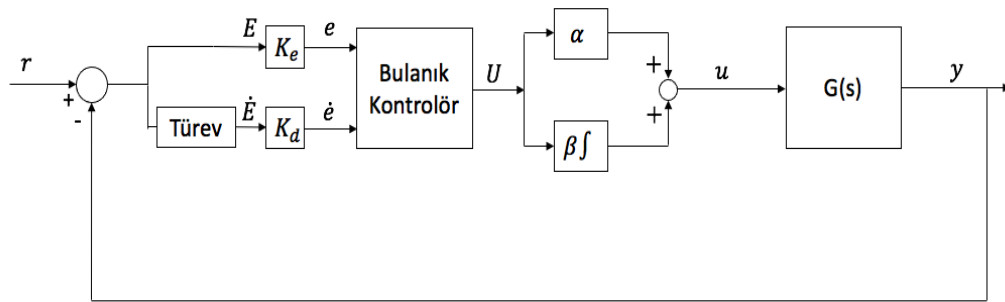
4. ÖZAYARLAMALI BULANIK KONTROLÖR YAPILARI

Bu bölümde hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ve üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanmasına dayalı özayarlamalı bulanık kontrolör yapıları anlatılacaktır.

4.1 Giriş

Tez çalışmasında ele alınan kapalı çevrimli kontrol sistem yapısı Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu bulanık PID kontrolör yapısı olarak Bölüm 3.3, Şekil 3.5’ te verilen PID yapısı kullanılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi kontrolör girişinde 2 adet giriş ölçeklendirme katsayısı kullanılmıştır. Bu katsayılar hata için K_e ve hatanın değişimi için K_d katsayılarıdır. α ve β şeklinde iki adet çıkış ölçeklendirme katsayısı vardır. Bulanık kontrolör girişleri hata e ve hatanın değişimi $\dot{e}$ olacak şekilde belirlenmiştir. Bulanık PID kontrolörün çıkışı ise U olmak üzere kontrol işaret u aşağıdaki şekilde belirlenir.

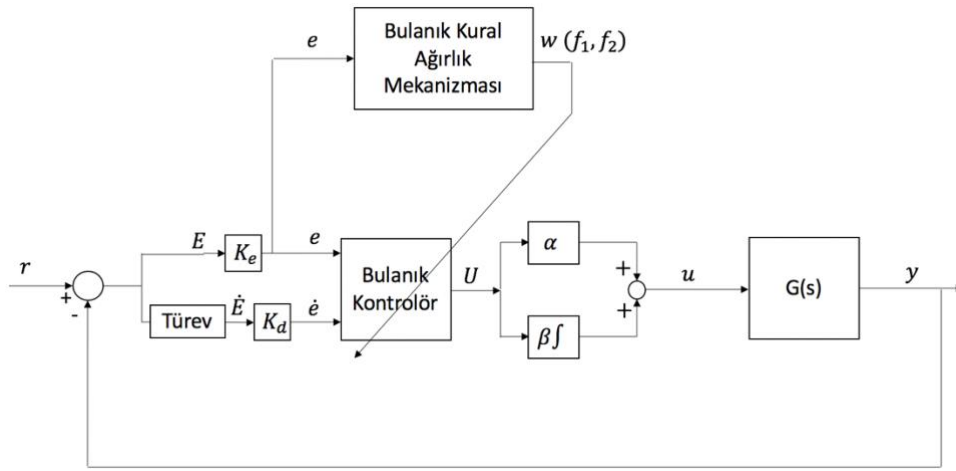
$$u = \alpha U + \beta \int U dt \quad (4.1)$$



Şekil 4.1 : Bulanık PID kontrolör uygulanan kapalı çevrimli kontrol sistem yapısı.

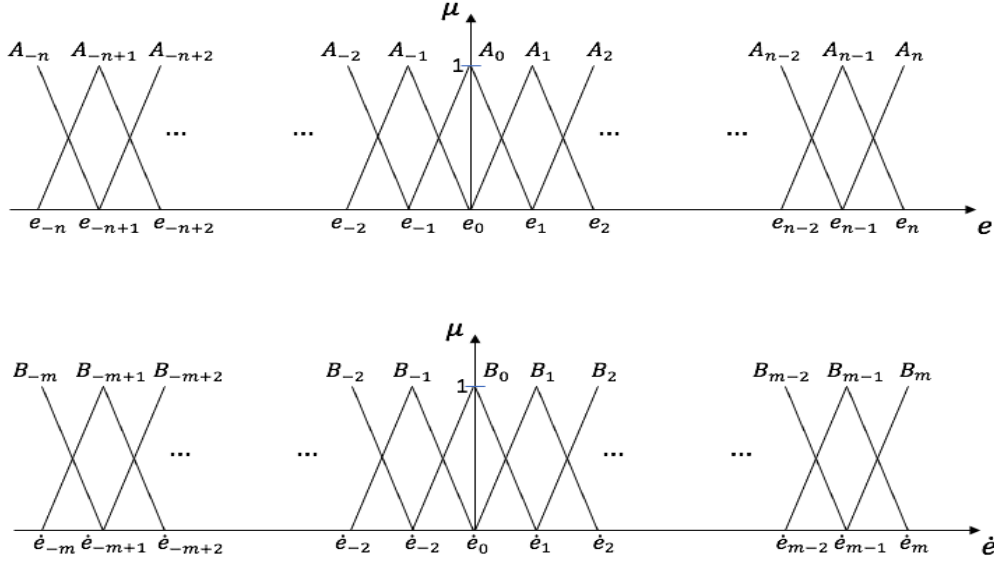
4.2 Hata Tabanlı Bulanık Kural Ağırlıklandırma Yöntemi

Bu bölümde Karasakal ve diğ. (2011) tarafından bulanık PID kontrolörleri için önerilen çevrimiçi bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ele alınacaktır. Hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin yapısı Şekil 4.2’de verilmektedir.



Şekil 4.2 : Hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi için bulanık PID kontrolör yapısı.

Burada e ve $\dot{e}$ giriş üyelik fonksiyonları ve U çıkış üyelik fonksiyonları $[-1,1]$ aralığındadır. Düzgün dağılmış ve simetrik hata ve hatanın değişimine ilişkin üçgensel üyelik fonksiyonlarının Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Bulanık PID kontrolörünün giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları aynı sayıda alınmıştır. Çarpım-toplam çıkarım yöntemi, ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 4.3 : Hata ve hatanın değişiminin üçgensel tip üyelik fonksiyonları.

4.2.1 Bulanık kural ağırlıklandırma

Ağırlık (w), her kural için değişebilen gerçek bir değer değişkenidir ve genellikle bir kurala w ifadesi eklenir. Ağırlık değerleri, bulanık PID kontrolörünün yapısal parametresi olarak düşünülebilir. Kuralın ağırlığı, belirli bir zamanda girişler için o

bulanık kuralın önemini veya etkisini gösterir. Ağırlığa sahip bulanık kontrolörün bulanık kuralları şu şekilde gösterilebilir:

K: EĞER hata (e) A ise ve hatanın değişimi (ė) B ise O HALDE kontrol işaretinin değişimi (U) w_k ağırlığı ile birlikte C olur.

Ağırlık, genellikle kurallara iki farklı şekilde uygulanır;

(a) Ağırlıklar, kuralın tamamına uygulanır. Bu durumda kuralın yerine getirilme derecesi ağırlık tarafından değiştirilir.

(b) Ağırlıklar, kuralların sonuçlarına uygulanır. Bu durumda kuralın çıkışı ağırlıkla değiştirilir.

Kuralların çıkış kısmında tekil üyelik fonksiyonlar kullanıldığında, (a) durumu için kural ağırlıkları pay ve payda toplamalarında oluşur. Bulanık kontrolörünün çıkışı Eşitlik (4.2) şu şekilde hesaplanır;

$$U = \frac{\sum_i^m (A_i(e)B_j(\dot{e})) c_k w_k}{\sum_i^m (A_i(e)B_j(\dot{e})) w_k} \quad (4.2)$$

(b) durumu için kural ağırlıkları Eşitlik (4.3)'ün payında oluşur. Dolayısıyla bulanık kontrolörünün çıkışı şu şekilde hesaplanır;

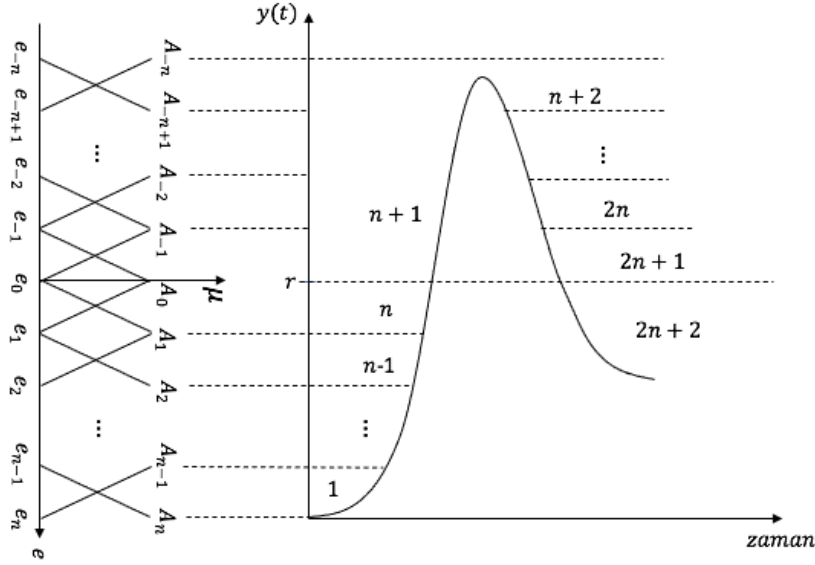
$$U = \frac{\sum_i^m (A_i(e)B_j(\dot{e})) c_k w_k}{\sum_i^m (A_i(e)B_j(\dot{e}))} \quad (4.3)$$

c_k ve w_k sırasıyla k. kuralın çıkış tekil üyelik değeri ve ağırlığıdır.

Üyelik dereceleri [0,1] aralığında değiştiğinden, A, B ve C ifadelerini bulanık kümeler olarak tutabilmek için ağırlıklar da [0,1] aralığında seçilmelidir.

4.2.2 Kural tabanlı çevrimiçi kural ağırlık ayarlama yöntemi

Kapalı çevrim sisteminin basamak yanıtı, hata (e) girişine atanan üyelik fonksiyonlarının sayısına bağlı olarak Şekil 4.4'te gösterildiği gibi $2(n+1)$ adet bölgeye ayrılır.



Şekil 4.4 : Hatanın üyelik fonksiyonlarına göre basamak yanıtının bölgelere ayrılması.

Bulanık kontrolör çıkışının hesaplanan değeri, istenen sistem başarımını elde etmek için her bölgede farklı değerler alır. Örneğin; sistem hatası değerinin pozitif olduğu başlangıç bölgelerinde (yaklaşık olarak 1'den n'nin ortasına kadar olan bölgeler), sistem yanıtını yeterince sabitlemek için pozitif büyük bir kontrol işareti değerine ihtiyaç vardır. Sistem yanıtının ayar noktasına yaklaştığı ve sistem hatası değerinin düştüğü ancak yine de pozitif olduğu bölgeler için (yaklaşık olarak n ortasından n+1'e kadar olan bölgeler için) sistem yanıtını yavaşlatmak için daha küçük kontrol işareti değeri yapılması gerekir. Sistem hatası değerinin negatif olduğu ve sistem yanıtının referans noktasından uzaklaştığı bölgede (bölge n+1), aşımı önlemek için kontrol işareti değeri negatif maksimum tutulmalıdır. Sistem hatası değerinin negatif büyük olduğu ve sistem yanıtının referans noktasına yaklaştığı bölgeler için (yaklaşık olarak n+2'den bölgenin ortasına 2n+1'e kadar olan bölgeler), negatif büyük bir kontrol işareti değeri sistem yanıtının yeterince tutturmak için gereklidir. Sistem yanıtının referans değerine yaklaştığı ve sistem hatası değerinin arttığı ancak yine de negatif olduğu bölgelerde (yaklaşık olarak bölgenin ortasından 2n+1'den 2n+2'ye kadar olan bölgelerde), sistem yanıtını yeterince yavaşlatmak için kontrol işareti değeri artırılması gerekir. Son olarak, sistem hatası değerinin pozitif olduğu ve sistem yanıtının referans değerinden (bölge 2n+2) uzaklaştığı bölgede, negatif aşımı önlemek için kontrol işareti değeri maksimum pozitif tutulmalıdır.

Yukarıdaki tartışmadan türetilen meta-kurallar aşağıdaki gibi verilebilir:

-Sistem hata değeri pozitif olduğunda ve sistem yanıtı referans noktasına yaklaştığında, sistem yanıtının gerekli hızını yeterince elde etmek için kontrol işareti zamanla azaltılmalıdır.

-Sistem hata değeri negatif olduğunda ve sistem yanıtı referans noktasından uzaklaştığında, aşımı önlemek için maksimum negatif büyük kontrol işareti gerekir.

-Sistem hata değeri negatif olduğunda ve sistem yanıtı referans noktasına yaklaştığında, sistem yanıtının gerekli hızını yeterince elde etmek için kontrol işareti değeri zamanla arttırılmalıdır.

-Sistem hata değeri pozitif olduğunda ve sistem yanıtı referans noktasından uzaklaştığında, aşımı önlemek için maksimum pozitif büyük kontrol işareti gereklidir.

Bu meta-kurallar tatmin edici bir sistem başarımı için gerekli kontrol işaretini elde etmek için bulanık kuralların önemi ile ilişkilendirilebilir. Örneğin, bir pozitif büyük kontrol işaretine ihtiyaç duyulduğunda, pozitif kural sonucu olan bulanık kuralların önemi, sonucu negatif kural olan bulanık kuralların öneminden daha büyük olacaktır. Benzer şekilde, zaman içinde kontrol işaretini azaltmak gerektiğinde, negatif kural sonucu olan bulanık kuralların önemi, pozitif kural sonucu olan bulanık kuralların öneminden daha büyük olacaktır.

Bu bulanık kuralın önemi ağırlık değeri ile ilgili olduğundan, herhangi bir bölgede bir bulanık kuralın öneminin değişmesi o kuralın ağırlık değerinin değişmesi olarak ifade edilebilir. Kapalı çevrim kontrol sistemleri için geçici sistem yanıtı sırasında sistem hatası değerinin azaldığı veya arttığı çok açıktır ve her bölge ve örnekleme zamanı için elinizin altındadır. Böylece ağırlık ayarı bu hata değeri kullanılarak yapılabilir. Kural ağırlık değerleri aralığı $[0,1]$ aralığında olması gerektiğinden, normalleştirilmiş sistem hatasının $[-1,1]$ aralığı, mutlak değer fonksiyonu kullanılarak $[0,1]$ aralığına eşlenir.

Hata fonksiyonları (4.4) ve (4.5) ifadesinde şöyle gösterilmiştir:

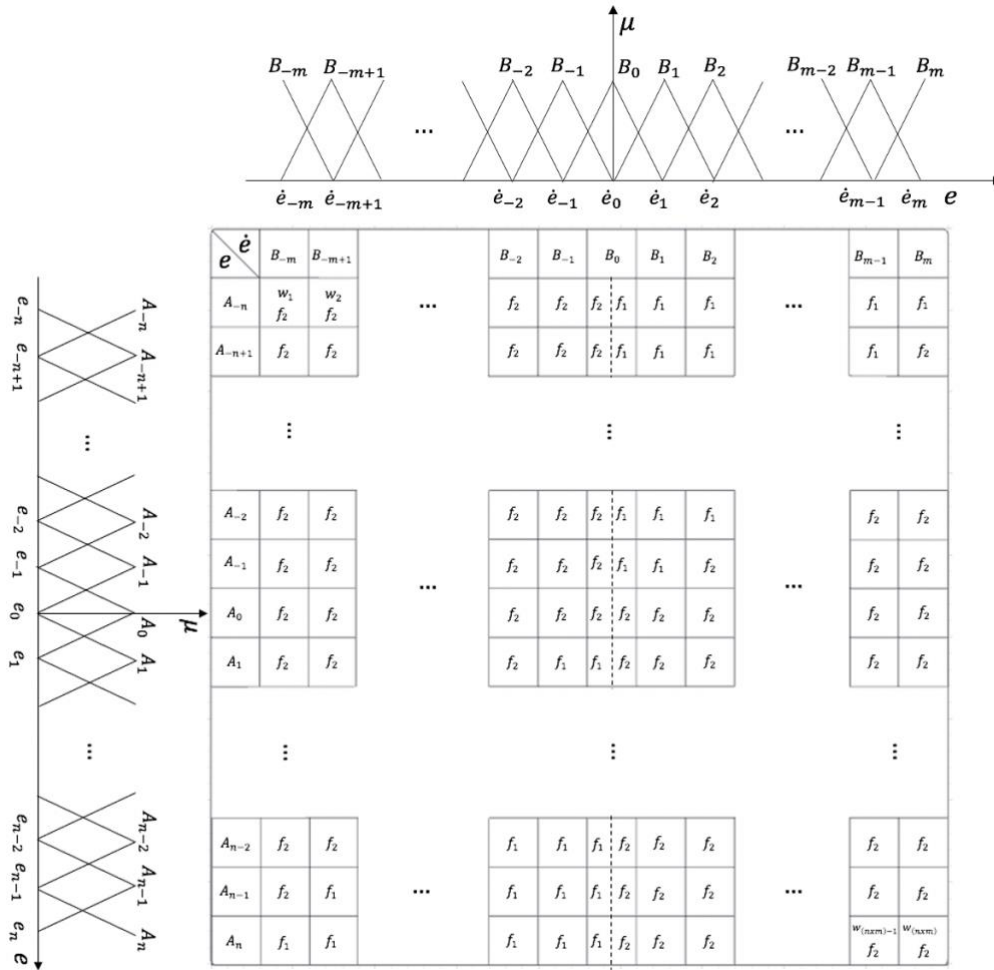
$$f_1(e)=a.Abs(e) \quad (4.4)$$

$$f_2(e)=1-Abs(e) \quad (4.5)$$

f_1 ve f_2 , yukarıda verilen meta kurallara göre uygun bir düzenleme ile doğrudan kural ağırlık değerleri olarak atanır. Bu atamalarla hata değeri, kural ağırlıklarının ayar değişkeni olur. Hata ve hata değişimi üyelik fonksiyonlarına göre f_1 ve f_2

fonksiyonlarının kural ağırlık değerleri olarak düzenlenmesi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. f_1 fonksiyonundaki “a” değeri birinci bölge dışındaki tüm bölgeler için 1 olarak alınır. Hata değeri birinci bölgede uç değerine sahip olduğundan özel bir önlem alınması gerekir. Bu bakımdan, sistem yanıtının aşırı hızlanmasını önlemek için, yalnızca birinci bölgede sonucu pozitif kural olan bir kuralın ağırlığının ayarlanması için “a” değeri 0.5 olarak alınır.

Şekil 4.5, $n \times m$ giriş üyelik fonksiyonları için genel bulanık kural ağırlıklandırma tablosu verilmektedir ve f_1 ve f_2 fonksiyonlarının düzenlenmesinin e_0 ve $\dot{e}_0$ çekirdeklerinin kesişimine göre simetrik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Örneğin, öncül kısmında B_{m-1} ve A_{-n+1} üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık kural, f_1 kuralı ağırlıklandırma fonksiyonuna ihtiyaç duyar. O zaman, öncül kısmında B_{-m+1} ve A_{n-1} üyelik fonksiyonlarına sahip orijinal simetrik kural (e_0 ve $\dot{e}_0$ çekirdeklerinin kesişimi), aynı f_1 kuralı ağırlıklandırma fonksiyonuna ihtiyaç duyacaktır.

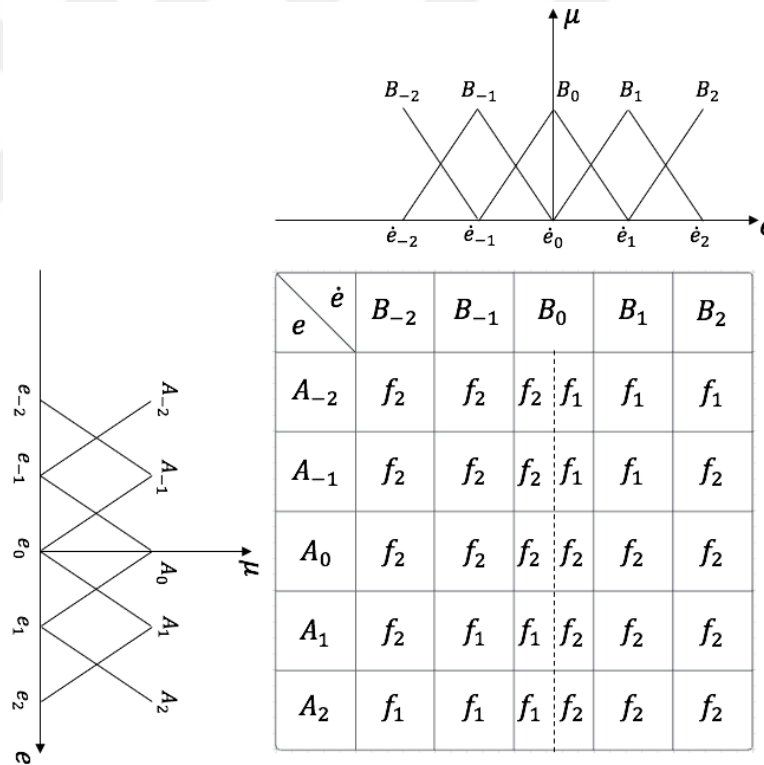


Şekil 4.5 : $n \times m$ giriş üyelik fonksiyonları için kendi kendini ayarlayan kural ağırlık tablosu.

4.2.3 Özayarlama parametresi belirlenmesi ve analizi

Benzetim çalışmalarında Mudi ve Pal (1999)' da bulunan doğrusal ve doğrusal olmayan, ölü zamanlı iki sistem ele alınmıştır.

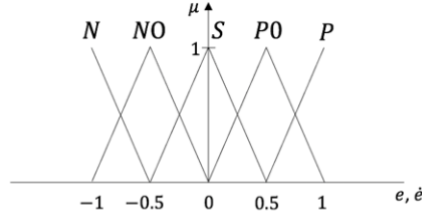
Karasakal ve diğ. (2011)' da önceki bölümde açıklanan f_1 fonksiyonundaki yer alan “a” değeri birinci bölgede “0.5”, bunun dışındaki tüm bölgeler için “1” olarak alınmıştır. Bu parametrenin önerilen yöntem için serbest bir parametre gibi ele alınması düşünülerek 1. bölge için kullanılan a katsayısına çeşitli değerler verilerek sistem yanıtları ve kontrol işaretleri karşılaştırılmıştır. a katsayısına sırasıyla 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1 değerleri verilmiştir. Örneklem zamanı olarak 0.1 sn seçilmiştir. Karşılaştırmalar ise giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları olarak aynı tip ve aynı sayıda üyelik fonksiyonu üzerinden yapılmıştır. Bu çalışmada, Şekil 4.6’da verilen 5x5 kural ağırlıklandırma tablosu kullanılmıştır.



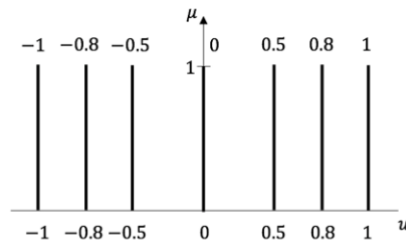
Şekil 4.6 : 5x5 giriş üyelik fonksiyonları (25 kural) durumu için kendi kendini ayarlayan kural ağırlık tablosu.

Şekil 4.7’de bulanık kontrolör yapısının giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları verilmiştir. Şekil 4.7(a)’da girişler hata e ve hatanın değişimi $\dot{e}$ için tanımlanan giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Bu giriş üyelik fonksiyonları üçgensel üyelik fonksiyonlarıdır ve toplamda beş tanedir.

Düzgün dağılmışlardır. Şekil 4.7(b)'de ise bulanık kontrolörün çıkışı olan kontrol işaretinin değişiminin çıkış üyelik fonksiyonları verilmiştir. Bu çıkış üyelik fonksiyonları ise tekil tipte üyelik fonksiyonlarıdır.



(a)



(b)

Şekil 4.7 : (a) Girişler "e" ve "ė" 'nin üyelik fonksiyonları (b) Çıkış "u" 'nun üyelik fonksiyonları.

Şekil 4.8'de bulanık kontrolör yapısının atanan bulanık kurallarla birlikte kural tablosu verilmektedir. Bu kural tablosu simetrik bir kural tablosudur.

$e \backslash \dot{e}$	N	NO	S	PO	P
N	-1 (w_1)	-1 (w_2)	-0.8 (w_3)	-0.5 (w_4)	0 (w_5)
NO	-1 (w_6)	-0.8 (w_7)	-0.5 (w_8)	0 (w_9)	0.5 (w_{10})
S	-0.8 (w_{11})	-0.5 (w_{12})	0 (w_{13})	0.5 (w_{14})	0.8 (w_{15})
PO	-0.5 (w_{16})	0 (w_{17})	0.5 (w_{18})	0.8 (w_{19})	1 (w_{20})
P	0 (w_{21})	0.5 (w_{22})	0.8 (w_{23})	1 (w_{24})	1 (w_{25})

Şekil 4.8 : Bulanık kontrolör sistemin kural tablosu.

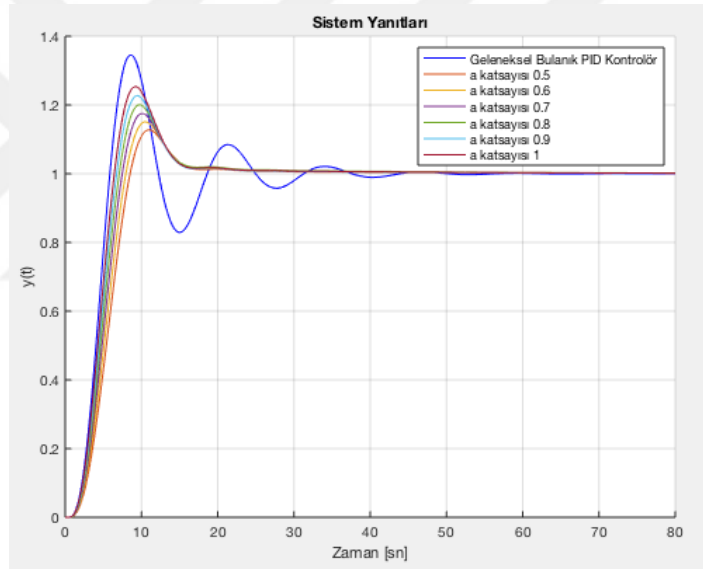
Aşağıda verilen örneklerle analiz yapılırken bulanık kontrolörün giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları için Şekil 4.7'de verilmiş olan giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Ayrıca bulanık kontrolör yapısının kural tablosu olarak Şekil 4.8'de verilen kural tablosu kullanılmıştır.

Sistem-1

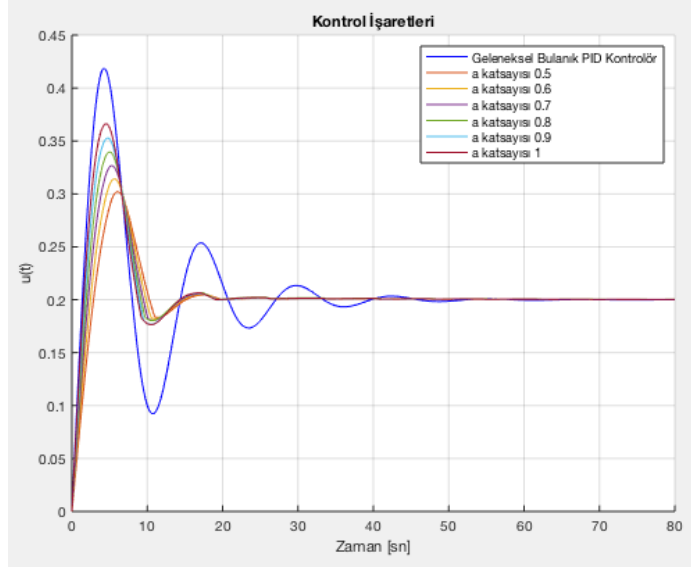
Birçok yüksek mertebeden olan sistemler ikinci mertebeden ölü zamanlı transfer fonksiyonları ile modellenebilir (Karasakal ve diğ, 2011). Bu nedenle aşağıda transfer fonksiyonu verilmiş olan sistem ele alınmıştır (Mudi ve Pal, 1999):

$$G_p(s) = \frac{e^{-0.3s}}{s^2 + s + 0.2} \quad (4.6)$$

Kontrolör parametreleri $K_e=0.9$ $K_d=13.5$ $\beta=0.02$ $\alpha=0$ olarak belirlenmiştir (Mudi ve Pal, 1999). 1. Bölge için uygulanan a katsayısı için 6 farklı katsayı üzerinden analiz yapılmıştır. Bu katsayılar ise 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1'dir. Şekil 4.9 (a) ve (b)'de ve Çizelge 4.1'de sırasıyla sistem 1 için a katsayıları açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımlar analizi verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.9 : Sistem 1 için “a” katsayısına göre (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 4.1 : Sistem 1 “a” katsayısına göre başarımlı analizi.

	Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Bulanık PID Kontrolör	3.266	34.801	%34.57
a katsayısı 0.5	4.962	15.943	%12.63
a katsayısı 0.6	4.620	15.917	%14.92
a katsayısı 0.7	4.328	15.851	%17.35
a katsayısı 0.8	4.079	16.169	%19.84
a katsayısı 0.9	3.860	15.578	%22.51
a katsayısı 1	3.671	15.705	%25.15

Çizelge 4.1’de ve Şekil 4.9’da görüldüğü gibi, Sistem 1 için özayarlama olmadığı zaman aşım, salınımlı ve yerleşme zamanı biraz fazla bir sistem yanıtı elde edilmiştir. Bu örnekte 1.bölge için kullanılan “a” katsayısının etkileri gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de ve Şekil 4.9’da hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin geleneksel bulanık PID kontrolöre göre aşım, gözle görülür bir şekilde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 4.1’de hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminde bulunan birinci bölge için kullanılan “a” katsayısının değerlerini karşılaştırdığımızda ise bu katsayı arttırıldığında aşımın arttığı gözlemlenmiştir. Salınımda ise hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin geleneksel bulanık PID kontrolöre göre çok iyi bir sonuç elde ettiği Şekil 4.9’da görülmüştür. Yerleşme

zamanı olarak ise geleneksel bulanık PID yöntemine göre oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir.

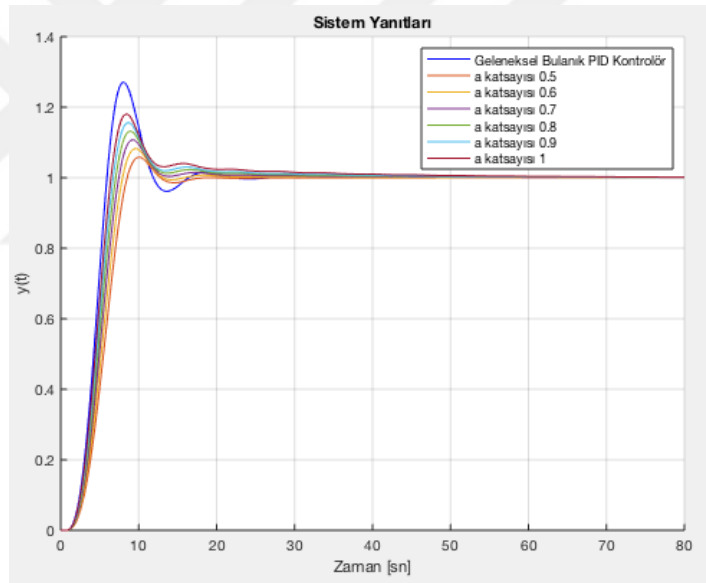
Sistem-2

İkinci analiz için aşağıda verilen doğrusal olmayan sistem modeli ve bulanık kontrolör katsayıları kullanılmıştır (Mudi ve Pal, 1999).

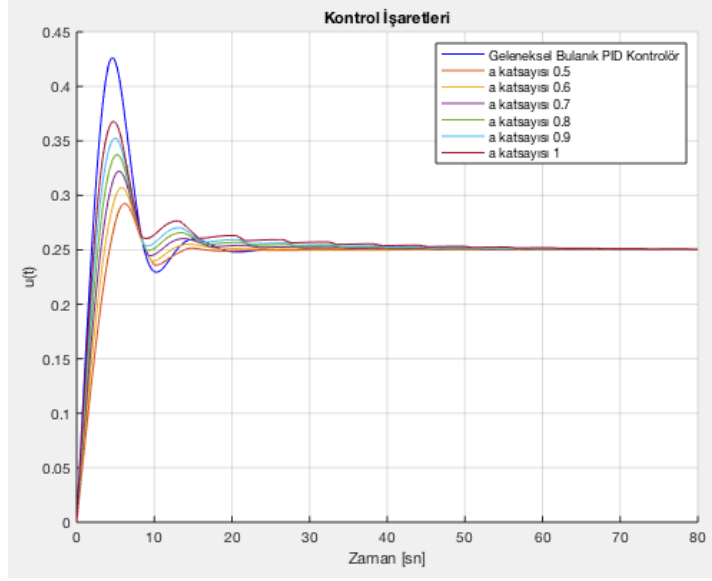
$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} + 0.25y^2 = u(t-0.5) \quad (4.7)$$

$$K_e=0.9 \quad K_d=11 \quad \beta=0.018 \quad \alpha=0 \quad (4.8)$$

Bu sistem, “a” katsayısının çeşitli değerleri için incelenmiştir. Şekil 4.10 (a) ve (b)’de ve Çizelge 4.2’de sırasıyla sistem 2 için a katsayıları açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımlar analizi verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.10 : Sistem 2 için “a” katsayısına göre (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 4.2 : Sistem 2 “a” katsayısına göre başarımlar analizi.

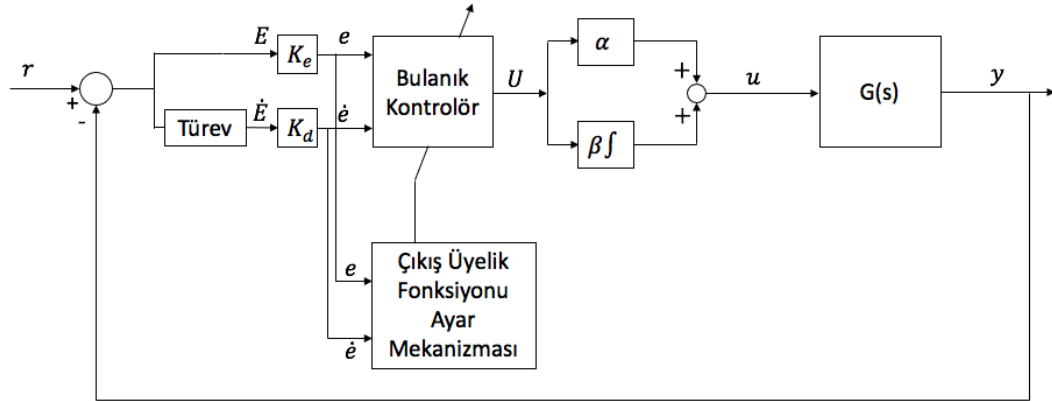
	Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Bulanık PID Kontrolör	3.111	15.342	%27.06
a katsayısı 0.5	4.632	12.013	%5.82
a katsayısı 0.6	4.309	12.129	%8.25
a katsayısı 0.7	4.040	12.297	%10.67
a katsayısı 0.8	3.812	17.656	%13.08
a katsayısı 0.9	3.615	18.594	%15.48
a katsayısı 1	3.446	23.407	%17.83

Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.10’da görüldüğü gibi, Sistem 2 için geleneksel bulanık PID kontrolör ve Mudi ve Pal (1999)’ de kullanılan kontrolör parametreleri seçildiğinde yine aşım ve salınımlı bir sistem yanıtı elde edilmiştir. Şekil 4.10’da ve Çizelge 4.2’de hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin aşımı ve salınımı iyileştirdiği görülmüştür. Çizelge 4.2’de hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminde birinci bölge için kullanılan “a” katsayısı karşılaştırıldığında ise a değeri arttığında aşım ve yerleşme zamanında artış gözlemlenmiştir.

4.3 Üyelik Fonksiyonlarının Merkezinin Ayarlanmasına Dayalı Özayarlama Bulanık Kontrolör Yapısı

Bulanık mantığa dayalı modelleme ve kontrol teknikleri, doğru matematiksel modellerin elde edilmesinin zor olduğu karmaşık endüstriyel sistemlerde doğrusal olmayan sistemlerin sistem belirsizlikleriyle ve zamanla değişen parametreleri ile başa çıkmak için oldukça uygundur.

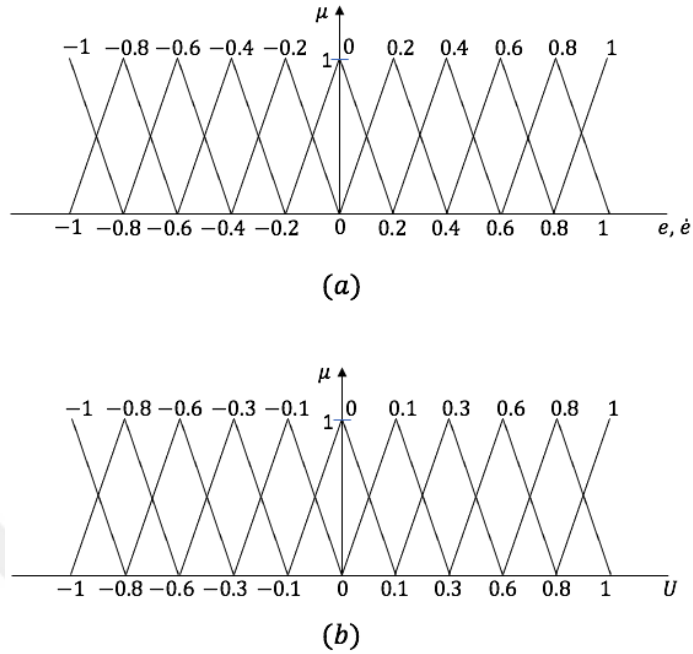
Xu ve Shin (2005)'de çok seviyeli bir bulanık kontrolör yapısı sunulmuştur. Şekil 4.11'de gösterilen bu yapıda, bulanık kontrolörün çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezini ayarlayan bulanık yapıda bir çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması kullanılmaktadır. Bu çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması, bulanık kontrolörün çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezini hata e ve hatanın değişimine $\dot{e}$ göre kaydırmaktadır. Ayar mekanizmasının girişleri bulanık kontrolörün de girişleri olan hata e ve hatanın değişimi $\dot{e}$ dir. Üyelik fonksiyonlarının merkezini kaydırma işlemi için bulanık ayar mekanizmasının keskin sayı olan çıkışı karşılık gelen kuralların üyelik fonksiyonlarının merkezini kaydırmak için bulanık kontrolörün çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezine uygulanır.



Şekil 4.11 : Çok seviyeli bulanık kontrolör yapısı

Xu ve Shin (2005) çalışmasında önerilen üçgensel üyelik fonksiyonları Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Şekil 4.12(a)'da hata e ve hatanın değişimi $\dot{e}$ 'nin giriş üyelik fonksiyonlarıdır. Şekil 4.12(b)'de ise bulanık kontrolörün çıkışı olan, kontrol işaretinin değişimi U 'nun üyelik fonksiyonları verilmiştir. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları, düzgün dağılmış ve tanım aralığı $[-1,1]$ olan üyelik fonksiyonlarıdır. Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının giriş ve çıkış üyelik fonksiyonlarının tipi, sayısı ve dilsel değerleri, kolay hesaplama amacıyla bulanık kontrolör için tanımlanan giriş ve

çıkış üyelik fonksiyonlarının tipi, sayısı ve dilsel değerleri ile aynıdır ve Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 : (a) Girişlerin üyelik fonksiyonları (b) Çıkış üyelik fonksiyonu.

Bulanık kuralı şu şekildedir;

K_1 : EĞER e A_1 ve $\dot{e}$ B_1 ise O HALDE U $U_{i,j}$ ’dir.

Hata e ’dir. Hatanın değişimi ise $\dot{e}$ ’dir. U , kontrol işaretinin değişimidir. A_1 ve B_1 sırasıyla e ve $\dot{e}$ ’nin dilsel değeridir. $U_{i,j}$ ise U ’nun dilsel değeridir. Bu ifadelerde bulunan i ve j ifadesi ise sırasıyla kural tablosundaki satır ve sütunu temsil etmektedir. Şekil 4.13’te Xu ve Shin (2005)’de önerilen bulanık kontrolörün kural tablosudur. Bu kural tablosu simetrik bir kural tablosudur.

$e \backslash \dot{e}$	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
-1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.6	0.3	0.1	0
-0.8	1	1	1	1	1	0.8	0.6	0.3	0.1	0	-0.1
-0.6	1	1	1	1	0.8	0.6	0.3	0.1	0	-0.1	-0.3
-0.4	1	1	1	0.8	0.6	0.3	0.1	0	-0.1	-0.3	-0.6
-0.2	1	1	0.8	0.6	0.3	0.1	0	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
0	1	0.8	0.6	0.3	0.1	0	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-1
0.2	0.8	0.6	0.3	0.1	0	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-1	-1
0.4	0.6	0.3	0.1	0	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-1	-1	-1
0.6	0.3	0.1	0	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-1	-1	-1	-1
0.8	0.1	0	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Şekil 4.13 : Bulanık kontrolör sistemin kural tablosu.

Şekil 4.14'te Xu ve Shin (2005)'de önerilen çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının kural tablosu verilmiştir.

$e \backslash \dot{e}$	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
-1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
-0.8	1	1	1	1	1	0.8	0	0	0	0	0
-0.6	1	1	1	1	0.8	0.6	0	0	0	0	0
-0.4	1	1	1	0.8	0.6	0.3	0	0	0	0	0
-0.2	1	1	0.8	0.6	0.3	0	0	0	0	0	0
0	1	0.8	0.6	0.3	0	0	0	-0.3	-0.6	-0.8	-1
0.2	0	0	0	0	0	0	-0.3	-0.6	-0.8	-1	-1
0.4	0	0	0	0	0	-0.3	-0.6	-0.8	-1	-1	-1
0.6	0	0	0	0	0	-0.6	-0.8	-1	-1	-1	-1
0.8	0	0	0	0	0	-0.8	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Şekil 4.14 : Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının kural tablosu.

Şekil 4.14'te sağ üst köşenin ve sol alt köşede sıfır değerleri vardır. Bu, hata pozitifken ve hatanın değişimi negatifken sistem yanıtını hızlandırmamak veya yavaşlatmamak içindir. Çünkü eğer sistem yanıtı hızlandırılırsa aşım olabilir veya sistem yanıtı yavaşlatılırsa sistem yanıtı referans değerine yavaş yakınsayabilir.

Eğer hata negatif ve hatanın değişimi pozitifken sistem yanıtı hızlandırılırsa negatif aşım ve salınım olabilir. Eğer sistem yanıtı yavaşlatılırsa sistem yanıtı, referans noktasına yavaş yakınsayabilir. Bu tür durumların önüne geçmek için kural tablosunun

hata pozitif, hatanın değişimi negatif olan bölgesine ve hata negatif, hatanın değişimi pozitif olan bölgesine sıfır değeri konulmuştur.

Bulanık kontrolörünün kontrol işaretinin değişimi Eşitlik (4.9)'da şu şekilde gösterilmektedir;

$$U = \frac{\sum_{i,j} \left[(A_i(e)B_j(\dot{e})) \cdot U_{i,j} \right]}{\sum_{i,j} (A_i(e)B_j(\dot{e}))} \quad (4.9)$$

Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının bulanık kuralı şu şekilde verilmiştir;

$K_1 : \text{EĞER } e \text{ } A_1 \text{ ve } \dot{e} \text{ } B_1 \text{ ise O HALDE } s \text{ } C_{i,j} \text{'dir.}$

Hata e ve hatanın değişimi $\dot{e}$ 'dir. s , bulanık kontrolörünün çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezinin değişimidir. A_1 ve B_1 sırasıyla e ve $\dot{e}$ 'nin dilsel değeridir ve $C_{i,j}$ ise s 'nin dilsel değeridir. Bulanık çıkarım yöntemi olarak çarpım-toplam bulanık çıkarım mekanizması ve durulaştırma yöntemi olarak da ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi kullanılmıştır. Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının çıkışı olan bulanık kontrolörünün çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezinin değişimi Eşitlik (4.10)'da şu şekilde verilmiştir;

$$s = \frac{\sum_{i,j} (A_i(e)B_j(\dot{e})) C_{i,j}}{\sum_{i,j} (A_i(e)B_j(\dot{e}))} \quad (4.10)$$

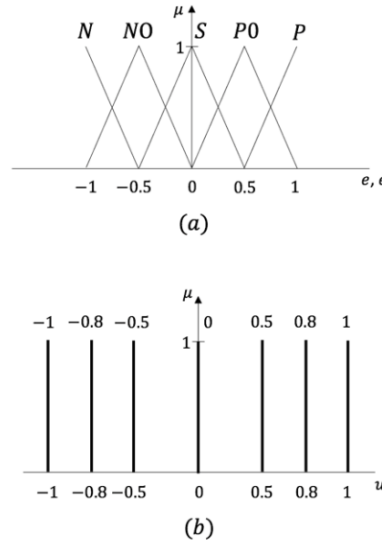
Buradaki s ifadesi bulanık kontrolörün çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezini kaydırmak için gerekli olan değişimdir. Bulanık kontrolör ile çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması birleştirilirse aşağıdaki genel ifade olan Eşitlik (4.11) elde edilir.

$$U = \frac{\sum_{i,j} \left[(A_i(e)B_j(\dot{e})) \cdot (U_{i,j} + s) \right]}{\sum_{i,j} (A_i(e)B_j(\dot{e}))} \quad (4.11)$$

Bu şekilde iyileştirilmiş bir sistem yanıtı elde edilir. Doğrusal olmayan ve zamanla değişen sistemler için sınırlı sayıda bulanık kural yeterli olacaktır.

4.3.1 Özayarlama parametresi belirlenmesi ve analizi

Bu tez çalışmasında, bulanık kontrolörü için giriş üyelik fonksiyonları üçgensel üyelik fonksiyonu olarak seçilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonu ise tekil üyelik fonksiyonudur. Şekil 4.15'te görebilirsiniz. Şekil 4.15(a)'da bulanık kontrolörünün giriş üyelik fonksiyonları üçgensel tipte verilmiştir. Giriş üyelik fonksiyonlarının sayısı ise beştir. N dilsel değeri negatif, NO dilsel değeri negatif ortayı, S dilsel değeri sıfırı, PO dilsel değeri pozitif ortayı ve P dilsel değeri pozitifini temsil etmektedir. Üyelik fonksiyonlarının tanım aralığı ise $[-1,1]$ 'dir. Şekil 4.15(b)' de çıkış üyelik fonksiyonlarının tipi ise tekil tipte üyelik fonksiyonları şeklinde verilmiştir. Yedi adet üyelik fonksiyonu vardır ve çıkış üyelik fonksiyonlarının tanım aralığı ise $[-1,1]$ aralığındadır.



Şekil 4.15 : Bulanık kontrolörün (a) Girişler "e" ve "ė" 'nin üyelik fonksiyonları (b) Çıkış "u" 'nin üyelik fonksiyonları.

Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının amacı, aşımı ve salınımı azaltmaktır. Aşağıda şu analizler yapılmıştır:

- Üyelik fonksiyonunun merkez değerini, merkeze yaklaştırmak sistem yanıtını yavaşlatır. (Yani hata, sıfıra yavaş yakınsar). Kontrol işaretinin maksimum değeri azalır. Salınım ve dolayısıyla aşım değerini azaltır.
- Üyelik fonksiyonunun merkez değerini, merkezden uzaklaştırmak sistem yanıtını hızlandırır. (Yani hata, sıfıra hızlı yakınsar). Kontrol işaretinin maksimum değeri artar. Aşım ve salınım artar.

Geleneksel Bulanık PID kontrolör sisteminin dinamikleriyle oynamayarak, sisteme çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması ekleyerek sistem yanıtı istenilen şekilde elde edilir. Bunu ise üyelik fonksiyonlarının merkezini kaydırarak sistem yanıtı hızlandırılabilir (aşım değeri de yüksek çıkabilir) ya da sistemin yanıtının aşım değeri azaltılabilir (ama sistem yanıtı az da olsa yavaşlayabilir). Bu çalışmada amaç aşım değerini azaltmaktır.

Kural tabloları genel olarak aşağıda açıklanmış olan kurallara göre düzenlenmiştir:

- Sistem hatası değerinin pozitif olduğu başlangıç bölgesinde, sistem yanıtıyla yani dolayısıyla kontrol işareti üzerinde bir işlem yapılmamıştır. Çünkü sistem kural tablosunda yeterince büyük bir kontrol işareti değeri uygulanmıştır.
- Sistem yanıtı referans noktasına yaklaştığında, sistem hatası değerinin düştüğü ve hatanın sifıra yaklaştığı bu bölgeler için ise sisteme yardımcı olmak için ve kontrol işaretinin maksimum değerini azaltmak amacıyla sistem yanıtının daha az aşım yapması için çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasından pozitif büyük bir işaret uygulayarak sistemin kontrol işaretinin maksimum değeri düşürülür ve dolayısıyla aşım değeri azaltılır.
- Sistem hatası değerinin negatif olduğu ve sistem yanıtının referans noktasından uzaklaştığı bölgede aşımı yine önlemek için çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasından pozitif büyük işaret değeri uygulanmaya devam edilir. Kontrol işaretinin maksimum değeri iyice azalır. Böylece aşım değeri iyice azalır.
- Sistem hatası değerinin negatif büyük olduğu ve sistem yanıtının referans noktasına yaklaştığı bölgede ise sistemi yavaşlatmak ya da hızlandırmak istenilmez (sistem yanıtı hızlandırılırsa negatif aşım olabilir ya da negatif aşım artar). Bu yüzden burada çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasından herhangi bir işaret gönderilmez. Yani çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması devre dışı kalır.
- Sistem yanıtının referans noktasına yaklaştığı ve sistem hatası değerinin arttığı ancak yine de negatif olduğu bölgelerde sistem yanıtını yeterince yavaşlatmamak için ya da sistem yanıtını hızlandırarak negatif aşım yapmaması için çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasından herhangi bir işaret gönderilmez.

- Son olarak, sistem hatası değerin pozitif olduğu ve sistem yanıtının referans noktası değerinden uzaklaştığı bölgede negatif aşımı önlemek için kontrol işareti değerin pozitif büyük tutulması için çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasından negatif büyük bir işaret uygulanır.

Şekil 4.16’da bulanık kontrolör için tanımlanan kural tablosu verilmektedir. Bu kural tablosu simetrik kural tablosudur.

$e \backslash \dot{e}$	N	NO	S	PO	P
N	-1	-1	-0.8	-0.5	0
NO	-1	-0.8	-0.5	0	0.5
S	-0.8	-0.5	0	0.5	0.8
PO	-0.5	0	0.5	0.8	1
P	0	0.5	0.8	1	1

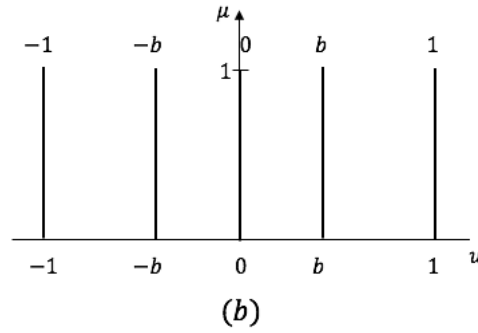
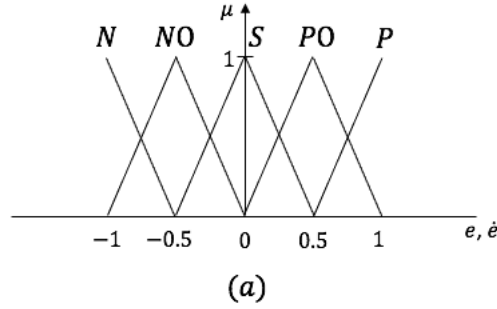
Şekil 4.16 : Bulanık PID kontrolörüne ilişkin kural tablosu.

Bu tez çalışmasında bir özayarlama parametresi elde etmek amacıyla Şekil 4.17’de verilen çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının kural tablosu önerilmiştir. Bu ayar mekanizmasının kural tablosunda bulunan “b” katsayısı özayarlama parametresi olarak belirlenmiştir. “b” parametresi için 3 farklı değer üzerinden sistem yanıtları elde edilmiştir. DURUM 1-2-3’de sırasıyla, “b” katsayısı 0.3, 0.5 ve 0.8 olarak seçilmiştir.

$e \backslash \dot{e}$	N	NO	S	PO	P
N	1	1	b	0	0
NO	1	b	0	0	0
S	b	0	0	0	-b
PO	0	0	0	-b	-1
P	0	0	-b	-1	-1

Şekil 4.17 : Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının kural tablosu.

Şekil 4.18(a)'da çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının giriş üyelik fonksiyonları, bulanık kontrolörde tanımlanan giriş üyelik fonksiyonu ile aynı tipte, aynı sayıda ve aynı dilsel değerlere sahiptir. Çıkış üyelik fonksiyonu ise tekil üyelik fonksiyonudur. Üyelik fonksiyonları b değerine göre Şekil 4.18(b)'de verilmiştir.

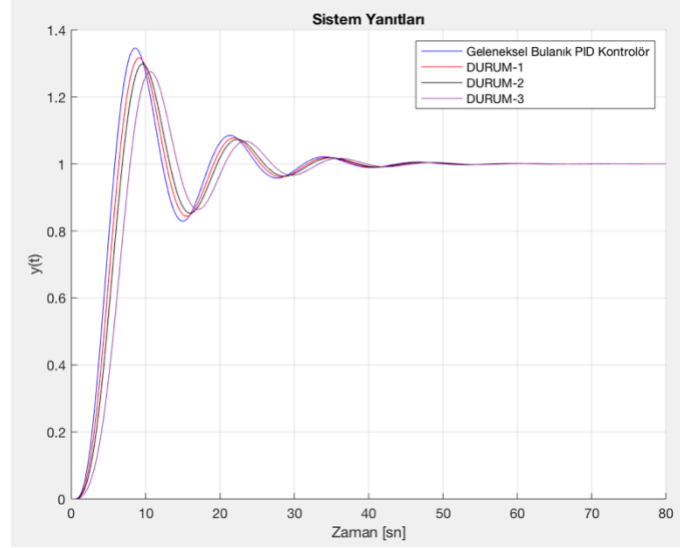


Şekil 4.18 : Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması (a) Girişler "e" ve "e" 'nin üyelik fonksiyonları (b) Çıkış "u" 'nın üyelik fonksiyonları.

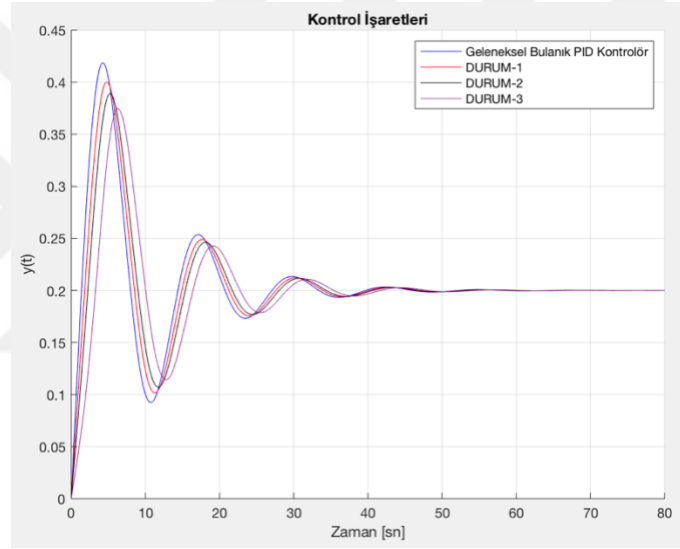
Sistem yanıtları ise yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım üzerinden analiz edilmiştir. Örneklem zamanı 0.1 sn'dir.

Sistem-1

İlk olarak (4.6) ile ifade edilmiş ölü zamanlı ikinci mertebeden sistem ele alınmıştır. Kontrolör parametreleri yine Mudi ve Pal (1999)'dan alınmıştır. DURUM 1, DURUM 2 ve DURUM 3 sırasıyla b katsayısının 0.3, 0.5 ve 0.8 değerlerine eşit olduğunu gösterir. Şekil 4.19 (a) ve (b)'de ve Çizelge 4.3'te sırasıyla sistem 1 için durumlar açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımları verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.19 : Sistem 1 için DURUM 1, DURUM 2, DURUM 3 ‘e ilişkin (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 4.3 : Sistem 1 için DURUM 1, DURUM 2, DURUM 3 ‘e ilişkin başarımlar analizi.

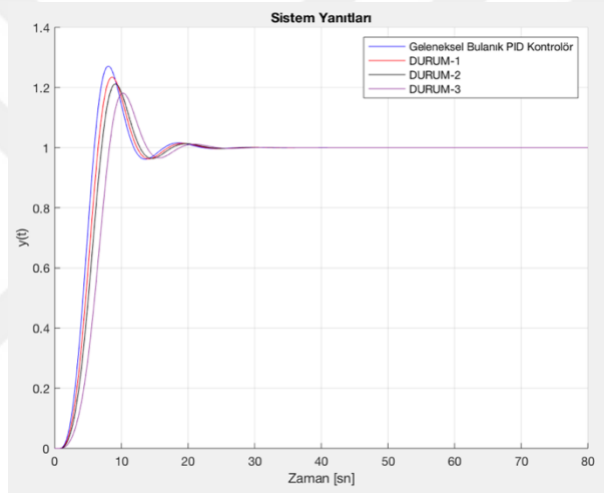
	Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Bulanık PID Kontrolör	3.266	34.801	%34.57
DURUM 1	3.554	30.502	%31.63
DURUM 2	3.789	30.876	%29.84
DURUM 3	4.239	31.781	%27.53

Çizelge 4.3’te geleneksel bulanık kontrolör ile çok seviyeli özayarlama yöntemi için üç farklı duruma ilişkin başarımlar karşılaştırılmıştır. Bu sistemlerin sistem yanıtları

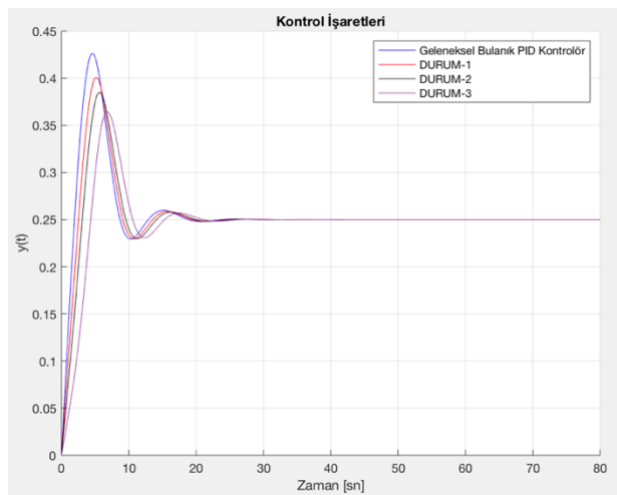
ve kontrol işaretleri Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Çizelge 4.3’te ve Şekil 4.19’da görüldüğü gibi çok seviyeli kontrolörler hem yerleşme zamanı olarak hem de aşım değeri olarak geleneksel bulanık PID kontrolöre göre çok daha iyi sonuç vermiştir. Durumlar karşılaştırıldığı zaman ise Çizelge 4.3’te, b değeri arttırıldığında yerleşme zamanında bir artış, aşımında azalış gözlemlenmiştir.

Sistem-2

İkinci olarak (4.7) ile ifade edilmiş doğrusal olmayan sistem ele alınmıştır. Kontrolör parametreleri yine Mudi ve Pal (1999)’dan belirlenmiştir. Şekil 4.20 (a) ve (b)’de ve Çizelge 4.4’te sırasıyla sistem 2 için durumlar açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımları verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.20 : Sistem 2 için DURUM 1, DURUM 2, DURUM 3 ‘e ilişkin (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 4.4 : Sistem 2 için DURUM 1, DURUM 2, DURUM 3 ‘e ilişkin başarımların analizi.

	Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Bulanık PID Kontrolör	3.111	15.342	%27.06
DURUM 1	3.426	15.880	%23.42
DURUM 2	3.688	16.345	%21.14
DURUM 3	4.204	17.396	%18.11

Çizelge 4.4’te sistem 2 için geleneksel bulanık PID kontrolörü ile çok seviyeli bulanık kontrolörlerin sistem başarımları karşılaştırılmıştır. Ayrıca sistem yanıtları ve kontrol işaretleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Çizelge 4.4’e bakıldığı zaman yükselme zamanı ve yerleşme zamanı açısından göz ardı edilecek bir fark olsa bile aşım değerinde ciddi bir azalma görülmüştür.



5. ÜYELİK FONKSİYONLARININ MERKEZİNİN VE BULANIK KURAL AĞIRLIKLARININ BİRLİKTE AYARLANMASINA DAYALI ÖZAYARLAMA YÖNTEMİ

Bu bölümde üyelik fonksiyonlarının merkezinin ve bulanık kural ağırlıklarının birlikte ayarlanmasına dayalı özayarlama yöntemi anlatılacaktır.

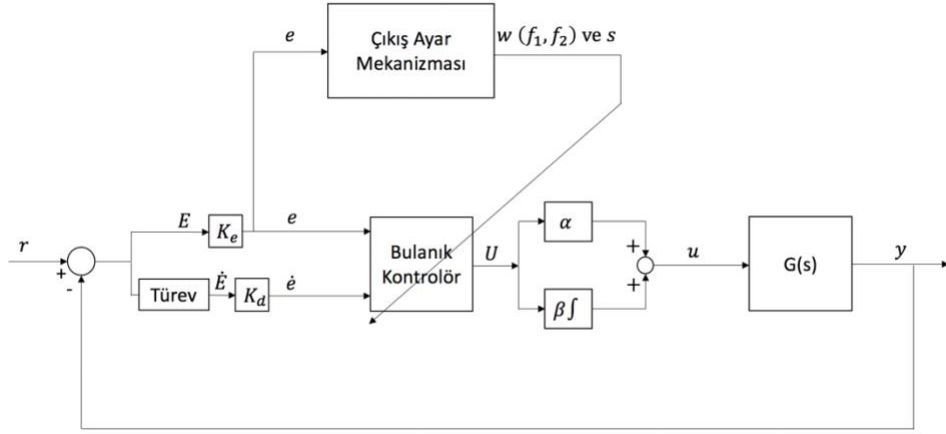
5.1. Özayarlama Yöntemi

Bu bölümde yukarıda bahsedilen hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi Karasakal ve diğ. (2011) ile üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanması Xu ve Shin (2005) yöntemine dayanan çok seviyeli bulanık kontrolör yönteminin birlikte kullanılması önerilmektedir. Bu amaçla, ilk önce üyelik fonksiyonlarının merkezi ayarlanacak ve daha sonra bulanık kurallar ağırlıklandırılacaktır. Aşağıdaki Eşitlik (5.1) ve (5.2) yararlanılmıştır.

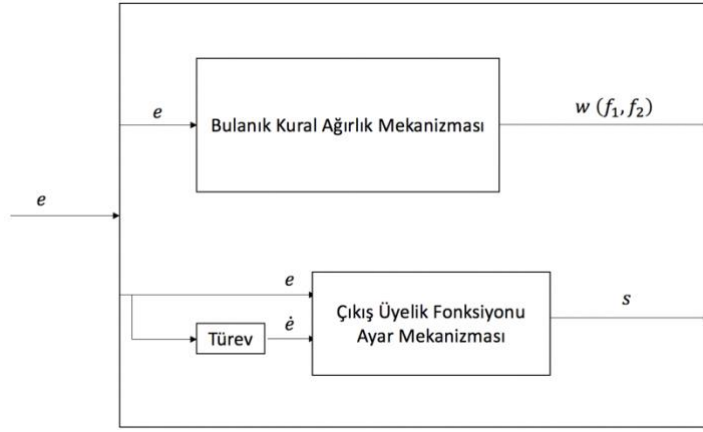
$$s = \frac{\sum_{i,j} (A_i(e)B_j(\dot{e})) C_{i,j}}{\sum_{i,j} (A_i(e)B_j(\dot{e}))} \quad (5.1)$$

$$U = \frac{\sum_{i,j} (A_i(e)B_j(\dot{e}))(U_{i,j} + s)w_{i,j}}{\sum_{i,j} (A_i(e)B_j(\dot{e})) w_{i,j}} \quad (5.2)$$

$U_{i,j}$, $w_{i,j}$ ve s sırasıyla i ve j . kuralın çıkış tekil üyelik değeri, ağırlık ve çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması çıkışıdır. A_i ve B_j ise sırasıyla e ve $\dot{e}$ 'nin dilsel değeridir. Şekil 5.1'de gösterilen bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ve üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanmasına dayalı yönteminin birleştirilmesi ile elde edilen kontrol yapısı kullanılmıştır. Şekil 5.1'de bulunan çıkış ayar mekanizmasının iç yapısı Şekil 5.2'de gösterilmiştir,



Şekil 5.1 : Bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ve üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanmasına dayalı yöntemin birleştirilmesi ile elde edilen kontrol yapısı.



Şekil 5.2 : Çıkış ayar mekanizmasının iç yapısı.

5.2. Benzetim Çalışmaları

Bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi Karasakal ve diğ. (2011) ile üyelik fonksiyonlarının merkezini ayarlayan yöntemin Xu ve Shin (2005) birleştirilmesi sonucu elde edilen etkinliği göstermek amacıyla geleneksel bulanık PID kontrolör, çok seviyeli bulanık kontrolör ve hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ise çeşitli durumlar için analiz edilmiştir. Hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminde kullanılan 1.bölge için a katsayısı değerleri olarak 0.5 ve 0.6 kullanılacaktır ve çok seviyeli bulanık kontrolör yapısı için ise b katsayısı 0.3, 0.5 ve 0.8 için sırasıyla DURUM 1, DURUM 2 ve DURUM 3 kullanılacaktır.

Benzetimlerde bulanık kontrolör yapısı için Şekil 4.15'te gösterilen ve tanım aralığı $[-1,1]$ olan üyelik fonksiyonları belirlenmiştir. Bulanık kural tablosu Şekil 4.16'daki

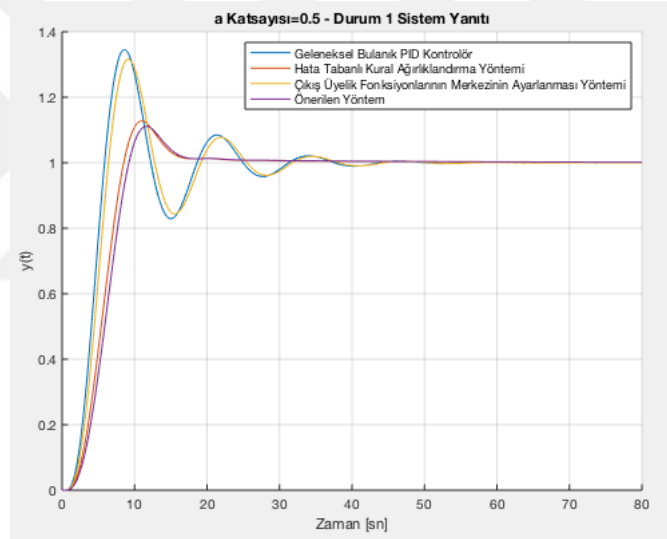
gibidir. Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının üyelik fonksiyonları Şekil 4.18’de verilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizmasının kural tablosu Şekil 14.17’de bulunmaktadır.

Bundan sonraki çizelgelerde H.T.K.A.Y, hata tabanlı kural ağırlıklandırma yöntemini ve Ç.Ü.F.M.A.Y ise çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanması yöntemini temsil etmektedir.

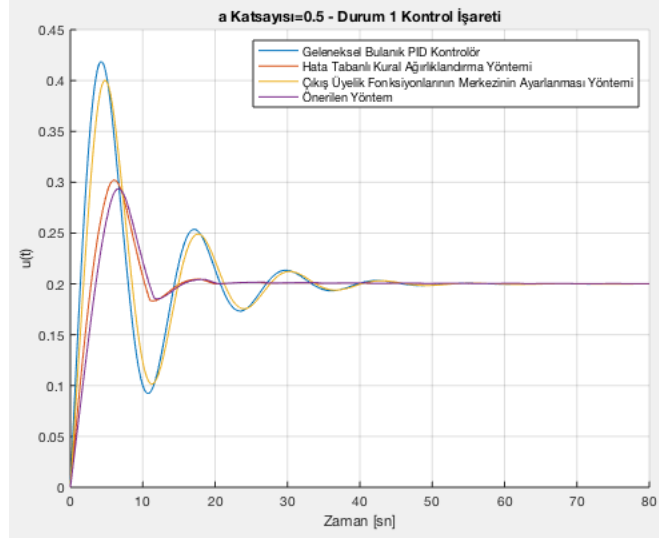
Sistem-1

İlk olarak (4.6) ile ifade edilmiş ölü zamanlı ikinci mertebeden sistem ele alınmıştır. Kontrolör parametreleri yine Mudi ve Pal (1999)’dan alınmıştır.

Şekil 5.3 (a) ve (b)’ de ve Çizelge 5.1’de sırasıyla sistem 1 için a katsayısı 0.5 ve DURUM 1 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımlı analizi verilmiştir.



(a)



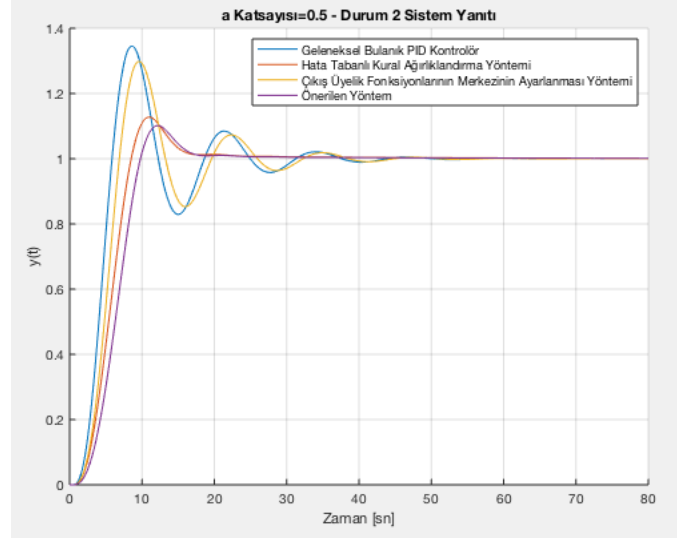
(b)

Şekil 5.3 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 1 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

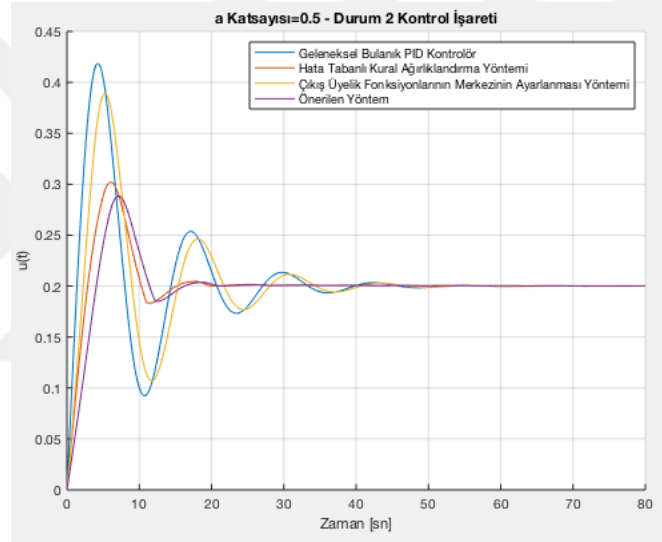
Çizelge 5.1 : $a = 0.5$ ve DURUM 1 için sistem 1'e ilişkin başarımlar analizi.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Kontrolör	Bulanık	PID	3.266	34.801	%34.57
H.T.K.A.Y	(a katsayısı 0.5)		4.962	15.943	%12.63
Ç.Ü.F.M.A.Y	(DURUM 1)		3.554	30.502	%31.63
Önerilen Yöntem	(a katsayısı 0.5 – DURUM 1)		5.340	16.380	%10.97

Şekil 5.4 (a) , (b)'de ve Çizelge 5.2'da sırasıyla sistem 1 için a katsayısı 0.5 ve DURUM 2 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımlar analizi verilmiştir.



(a)



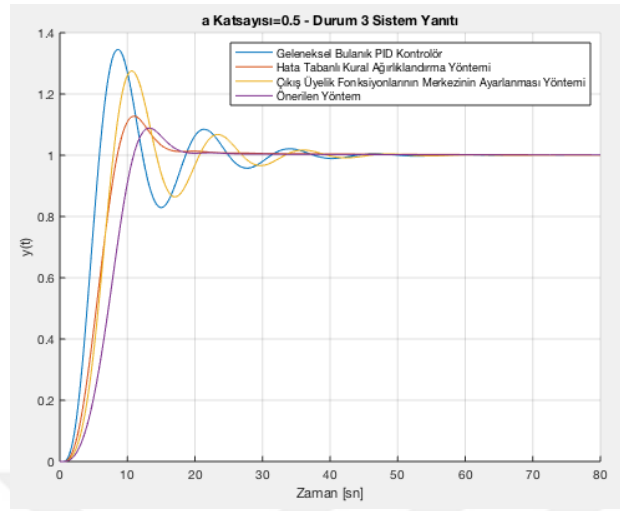
(b)

Şekil 5.4 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 2 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

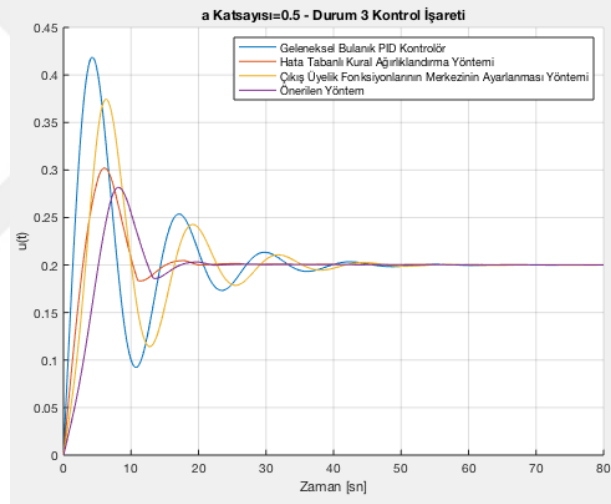
Çizelge 5.2 : $a = 0.5$ ve DURUM 2 için Sistem 1'e ilişkin başarımların analizi.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Kontrolör	Bulanık	PID	3.266	34.801	%34.57
H.T.K.A.Y	(a katsayısı 0.5)		4.962	15.943	%12.63
Ç.Ü.F.M.A.Y	(DURUM 2)		3.789	30.876	%29.84
Önerilen Yöntem	(a katsayısı 0.5 – DURUM 2)		5.627	16.536	%10.04

Şekil 5.5 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.3'te sırasıyla sistem 1 için a katsayısı 0.5 ve DURUM 3 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarım analizi verilmiştir.



(a)



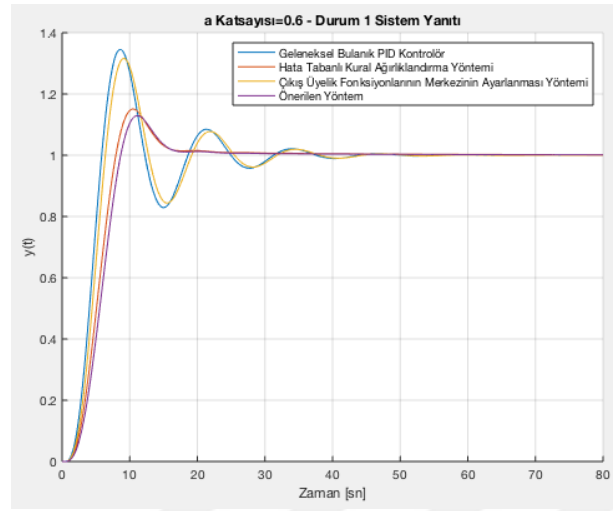
(b)

Şekil 5.5 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 3 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

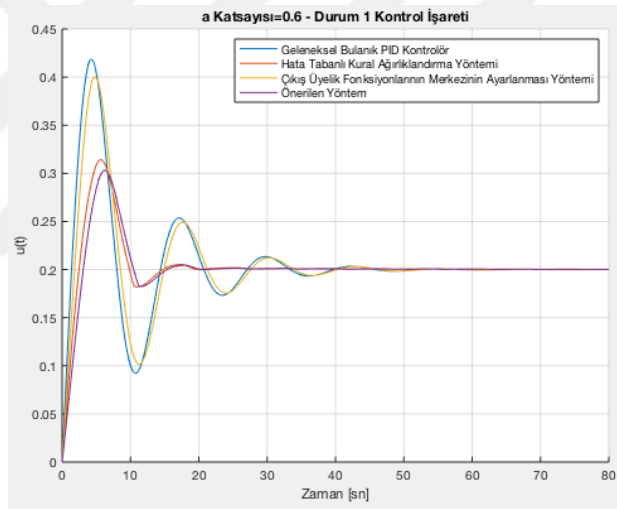
Çizelge 5.3 : a = 0.5 ve DURUM 3 için Sistem 1'e ilişkin başarım analizi.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Kontrolör	Bulanık	PID	3.266	34.801	%34.57
H.T.K.A.Y (a katsayısı 0.5)			4.962	15.943	%12.63
Ç.Ü.F.M.A.Y (DURUM 3)			4.239	31.781	%27.53
Önerilen Yöntem (a katsayısı 0.5 – DURUM 3)			6.131	17.277	%8.78

Şekil 5.6 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.4'de sırasıyla sistem 1 için a katsayısı 0.6 ve DURUM 1 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımları verilmiştir.



(a)



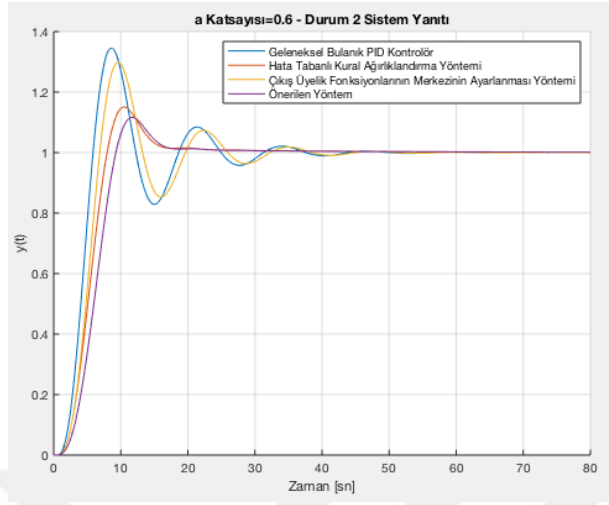
(b)

Şekil 5.6 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 1 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

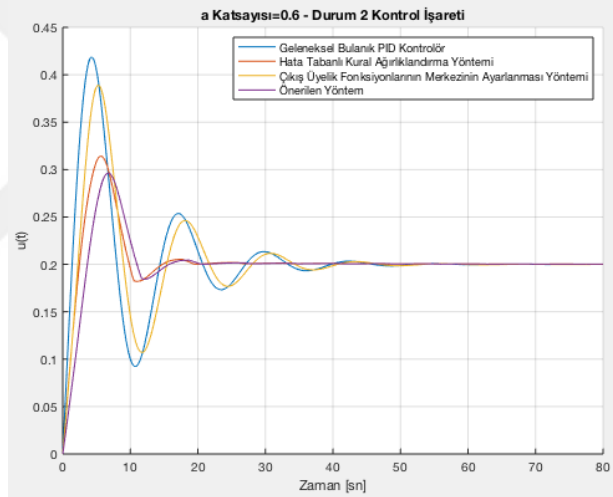
Çizelge 5.4 : a = 0.6 ve DURUM 1 için Sistem 1'e ilişkin başarımları analizi.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel	Bulanık	PID	3.266	34.801	%34.57
H.T.K.A.Y	(a katsayısı 0.6)		4.620	15.917	%14.92
Ç.Ü.F.M.A.Y	(DURUM 1)		3.554	30.502	%31.63
Önerilen Yöntem	(a katsayısı 0.6 – DURUM 1)		5.008	16.032	%12.81

Şekil 5.7 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.5'te sırasıyla sistem 1 için a katsayısı 0.6 ve DURUM 2 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımları verilmiştir.



(a)



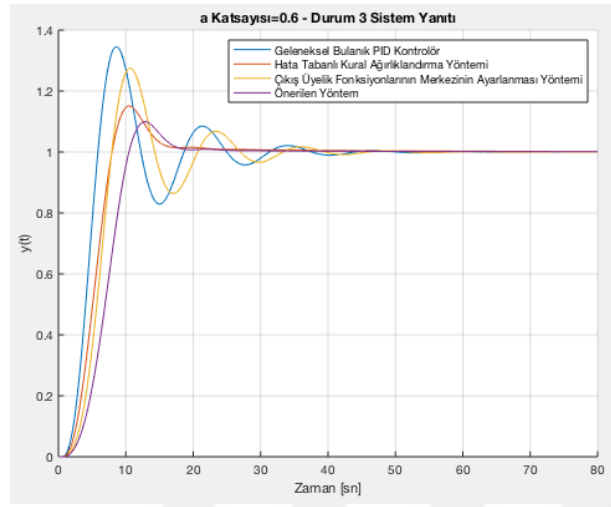
(b)

Şekil 5.7 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 2 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

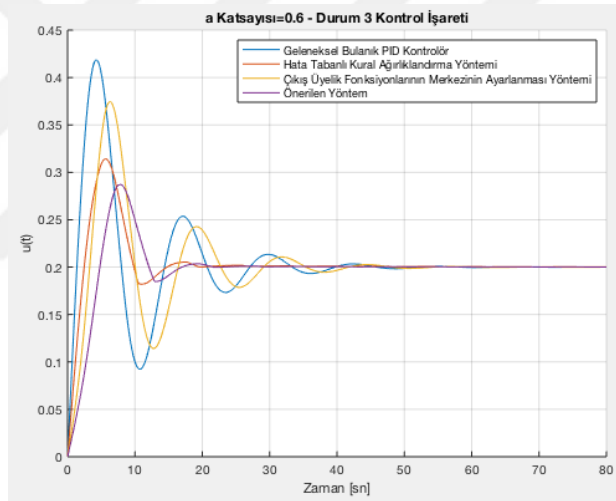
Çizelge 5.5 : a = 0.6 ve DURUM 2 için sistem 1'e ilişkin başarımları analizi.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Kontrolör	Bulanık	PID	3.266	34.801	%34.57
H.T.K.A.Y	(a katsayısı 0.6)		4.620	15.917	%14.92
Ç.Ü.F.M.A.Y	(DURUM 2)		3.789	30.876	%29.84
Önerilen Yöntem	(a katsayısı 0.6 – DURUM 2)		5.314	16.483	%11.50

Şekil 5.8 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.6'da sırasıyla sistem 1 için a katsayısı 0.6 ve DURUM 3 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarım analizi verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.8 : Sistem 1'e ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 3 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

Çizelge 5.6 : a = 0.6 ve DURUM 3 için Sistem 1'e ilişkin başarım analizi.

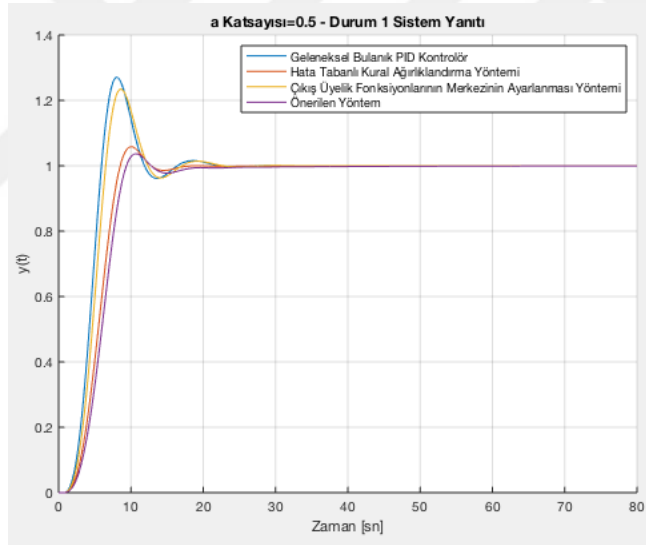
			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Kontrolör	Bulanık	PID	3.266	34.801	%34.57
H.T.K.A.Y (a katsayısı 0.6)			4.620	15.917	%14.92
Ç.Ü.F.M.A.Y (DURUM 3)			4.239	31.781	%27.53
Önerilen Yöntem (a katsayısı 0.6 – DURUM 3)			5.859	17.121	%9.84

Yukarıdaki şekil ve çizelgeler dikkate alındığında aşım açısından önerilen yöntem daha iyi sonuç vermiştir ve aşımı ciddi bir oranda azaltmıştır. Yerleşme zamanı açısından ise hata tabanlı kural ağırlıklandırma yöntemi ile arasındaki fark az olmasında rağmen hata tabanlı kural ağırlıklandırma yöntemi dışında diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuç elde edilmiştir.

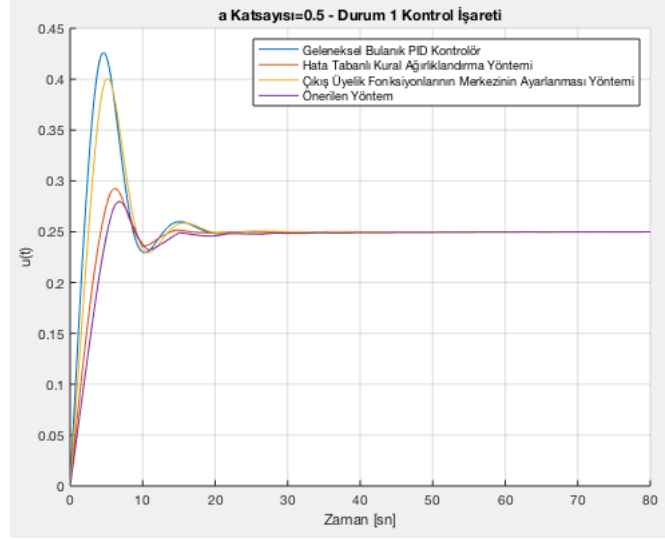
Sistem-2

İkinci olarak (4.7) ile ifade edilmiş doğrusal olmayan sistem ele alınmıştır. Kontrolör parametreleri yine Mudi ve Pal (1999)'dan belirlenmiştir. Bu doğrusal olmayan sistem kullanılarak hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi Karasakal ve diğ. (2011) ile çok seviyeli bulanık kontrolör yönteminin Xu ve Shin (2005) birleştirilmesinin etkileri gözlemlenmiştir.

Şekil 5.9 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.7'de sırasıyla sistem 2 için a katsayısı 0.5 ve DURUM 1 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımları verilmiştir.



(a)



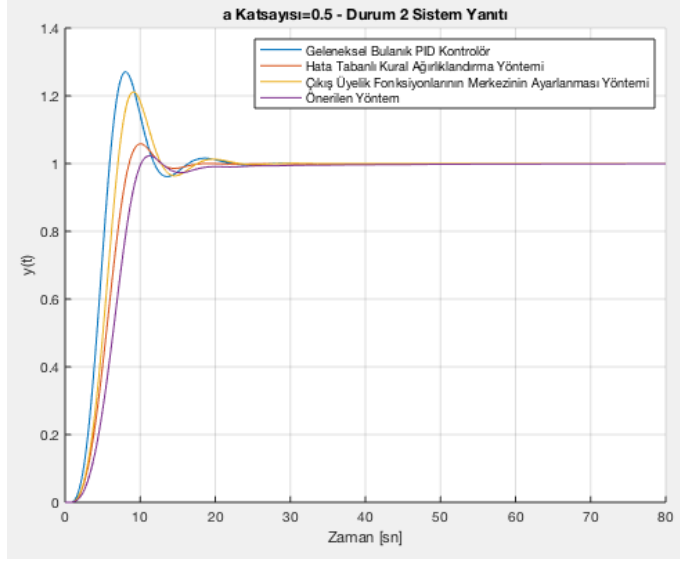
(b)

Şekil 5.9 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 1 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

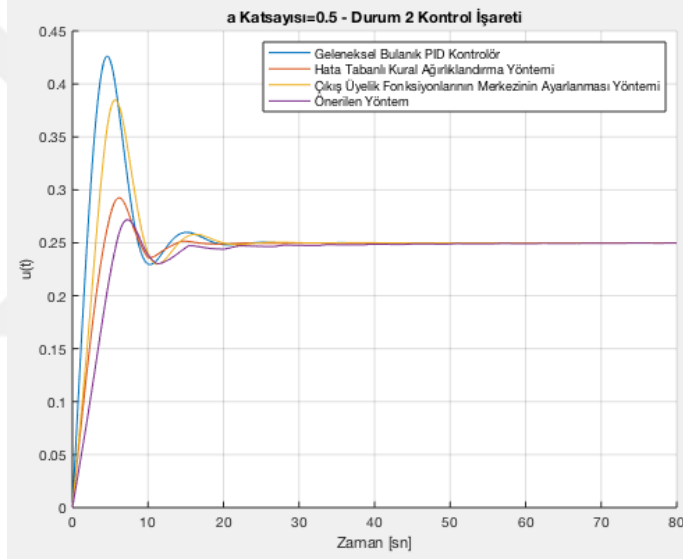
Çizelge 5.7 : $a = 0.5$ ve DURUM 1 için Sistem 2'ye ilişkin başarımlar analizi.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Kontrolör	Bulanık	PID	3.111	15.342	%27.06
H.T.K.A.Y	(a katsayısı 0.5)		4.632	12.013	%5.82
Ç.Ü.F.M.A.Y	(DURUM 1)		3.426	15.880	%23.42
Önerilen Yöntem	(a katsayısı 0.5 – DURUM 1)		5.043	15.906	%3.70

Şekil 5.10 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.8'de sırasıyla sistem 2 için a katsayısı 0.5 ve DURUM 2 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımlar analizi verilmiştir.



(a)



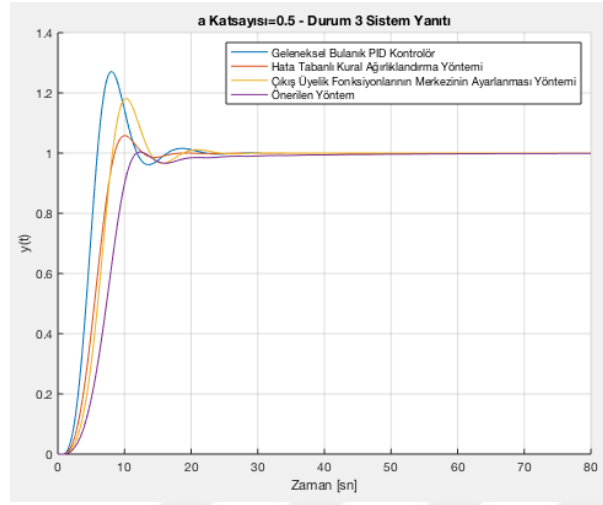
(b)

Şekil 5.10 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 2 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

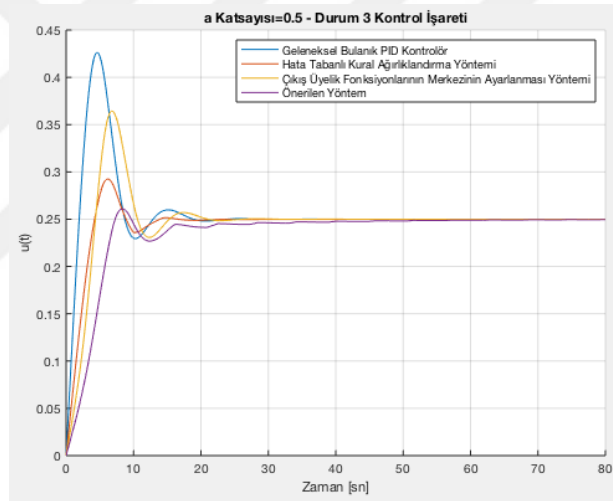
Çizelge 5.8 : $a = 0.5$ ve DURUM 2 için Sistem 2'ye ilişkin başarımlar analizi.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Kontrolör	Bulanık	PID	3.111	15.342	%27.06
H.T.K.A.Y	(a katsayısı 0.5)		4.632	12.013	%5.82
Ç.Ü.F.M.A.Y	(DURUM 2)		3.688	16.345	%21.14
Önerilen Yöntem	(a katsayısı 0.5 – DURUM 2)		5.368	16.961	%2.35

Şekil 5.11 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.9'da sırasıyla sistem 2 için a katsayısı 0.5 ve DURUM 3 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarım analizi verilmiştir.



(a)



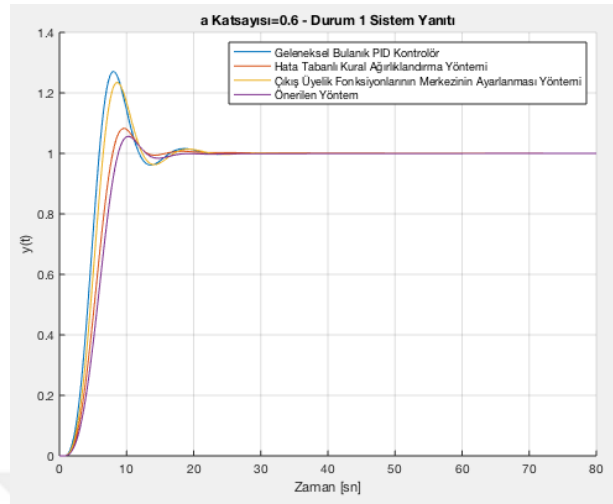
(b)

Şekil 5.11 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 3 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

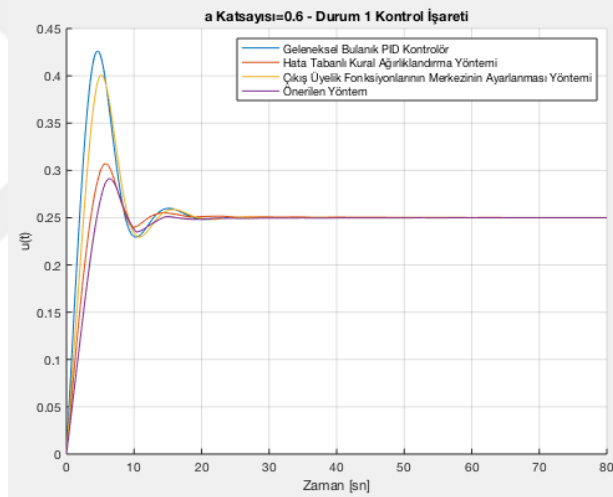
Çizelge 5.9 : a = 0.5 ve DURUM 3 için Sistem 2'ye ilişkin başarım analizi.

		Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel Bulanık PID Kontrolör		3.111	15.342	%27.06
H.T.K.A.Y (a katsayısı 0.5)		4.632	12.013	%5.82
Ç.Ü.F.M.A.Y (DURUM 3)		4.204	17.396	%18.11
Önerilen Yöntem (a katsayısı 0.5 – DURUM 3)		5.952	18.634	%0.50

Şekil 5.12 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.10'da sırasıyla sistem 2 için a katsayısı 0.6 ve DURUM 1 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarım analizi verilmiştir.



(a)



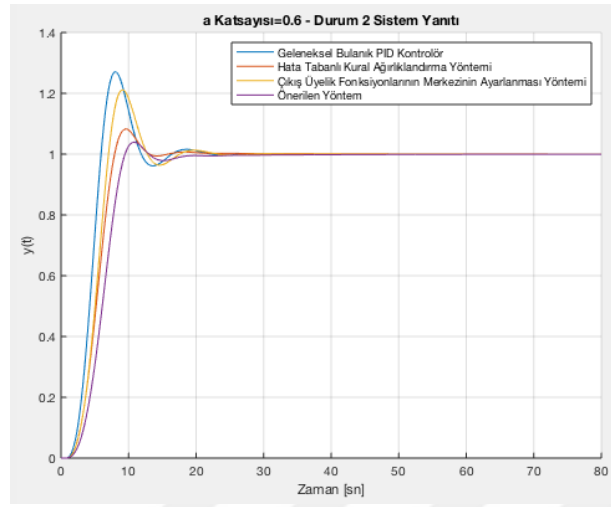
(b)

Şekil 5.12 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 1 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

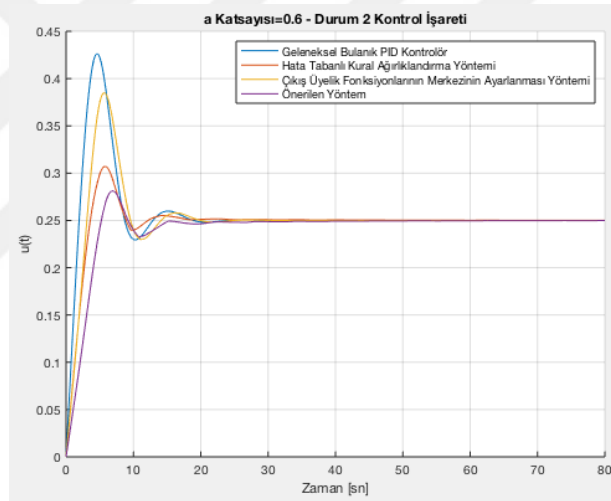
Çizelge 5.10 : a = 0.6 ve DURUM 1 için Sistem 2'ye ilişkin başarım analizi.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel	Bulanık	PID	3.111	15.342	%27.06
Kontrolör					
H.T.K.A.Y	(a katsayısı 0.6)		4.309	12.129	%8.25
Ç.Ü.F.M.A.Y	(DURUM 1)		3.426	15.880	%23.42
Önerilen Yöntem	(a katsayısı 0.6 – DURUM 1)		4.728	12.165	%5.61

Şekil 5.13 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.11'de sırasıyla sistem 2 için a katsayısı 0.6 ve DURUM 2 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarım analizi verilmiştir.



(a)



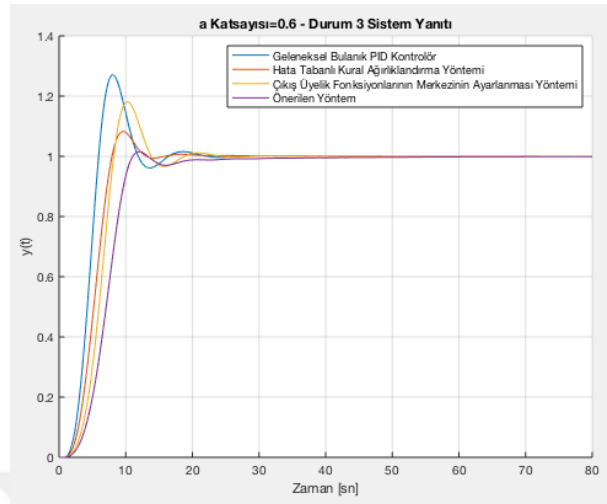
(b)

Şekil 5.13 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 2 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

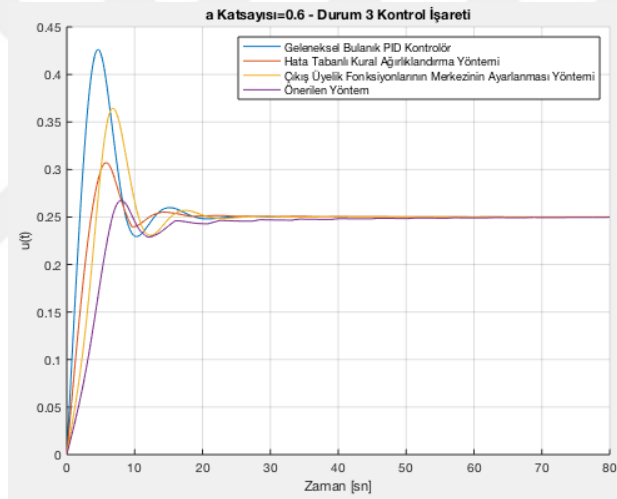
Çizelge 5.11 : a = 0.6 ve DURUM 2 için Sistem 2'ye ilişkin başarım analizi.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel	Bulanık	PID	3.111	15.342	%27.06
		Kontrolör			
H.T.K.A.Y	(a katsayısı 0.6)		4.309	12.129	%8.25
Ç.Ü.F.M.A.Y	(DURUM 2)		3.688	16.345	%21.14
Önerilen Yöntem	(a katsayısı 0.6 – DURUM 2)		5.066	15.794	%3.93

Şekil 5.14 (a) ve (b)'de ve Çizelge 5.12'de sırasıyla sistem 2 için a katsayısı 0.6 ve DURUM 3 açısından sistem yanıtı, kontrol işareti ve başarımları verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.14 : Sistem 2'ye ilişkin (a katsayısı 0.6 ve DURUM 3 için) (a) Sistem birim basamak yanıtları (b) Kontrol işaretleri.

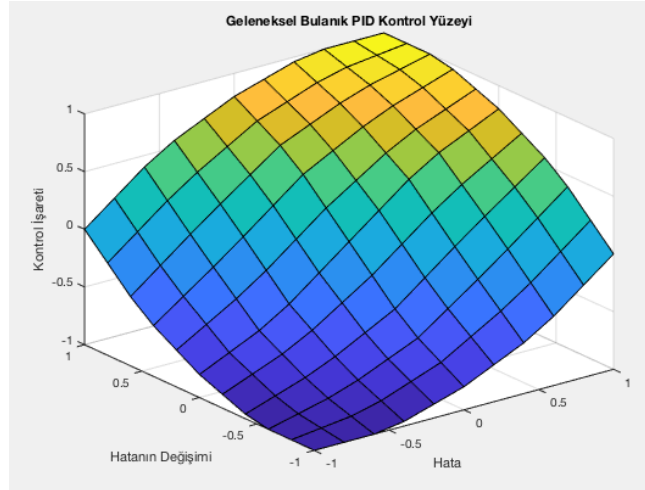
Çizelge 5.12 : a = 0.6 ve DURUM 3 için Sistem 2'ye ilişkin başarımları.

			Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım
Geleneksel	Bulanık	PID	3.111	15.342	%27.06
Kontrolör					
H.T.K.A.Y	(a katsayısı 0.6)		4.309	12.129	%8.25
Ç.Ü.F.M.A.Y	(DURUM 3)		4.204	17.396	%18.11
Önerilen Yöntem	(a katsayısı 0.6 – DURUM 3)		5.691	17.962	%1.61

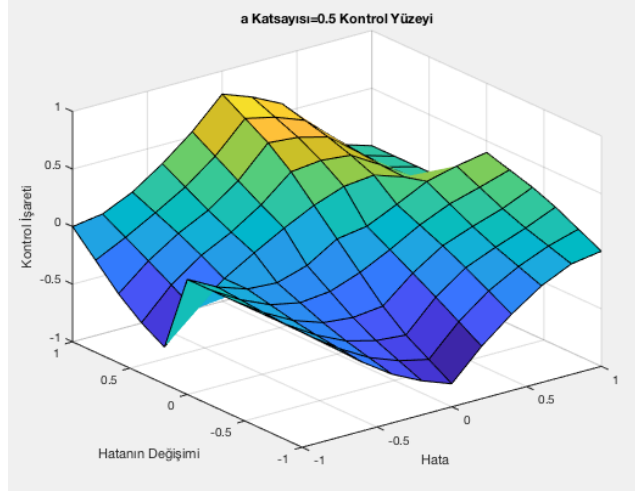
Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te aynı zamanda Çizelge 5.7, Çizelge 5.8, Çizelge 5.9, Çizelge 5.10, Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12’de görüldüğü gibi önerilen yöntem ile aşım yönünden diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuç elde edilmiştir. Önerilen yöntem yerleşme zamanı ve yükselme zamanı açısından ise geleneksel bulanık PID kontrolör, hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemi ve çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanması yöntemi ile kıyasla biraz yüksek bir sonuç elde etmesine rağmen bu fark azdır.

Bu bölümde önerilen yöntem ölü zamanlı doğrusal bir sistem ve doğrusal olmayan sistem üzerinde etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ise önerilen yöntem aşımı ciddi oranda azalttığı görülmüştür. Bazı sonuçlarda yerleşme zamanı ve yükselme zamanı açısından ise diğer yöntemlere kıyasla biraz yüksek bir sonuç elde etmiştir. Önerilen yöntemin kontrol işaretinin maksimum değerini de azalttığı gözlemlenmiştir.

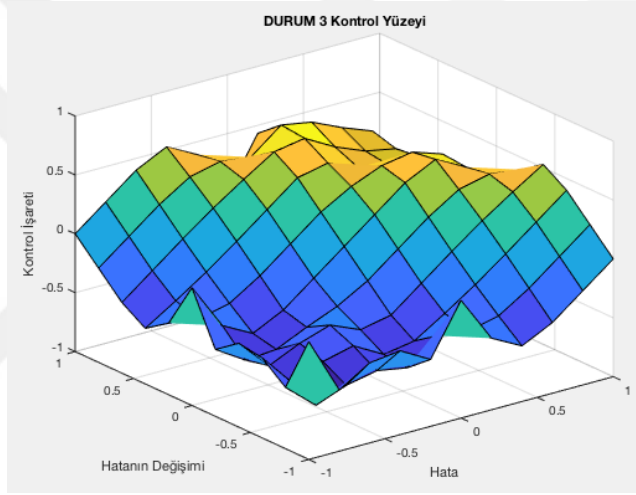
Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de sırasıyla geleneksel bulanık PID kontrolör, a katsayısı 0.5 için hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık kontrolör, DURUM 3 için çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanması yöntemine sahip bulanık kontrolör ve önerilen yöntemin kontrol yüzeyleri gösterilmiştir.



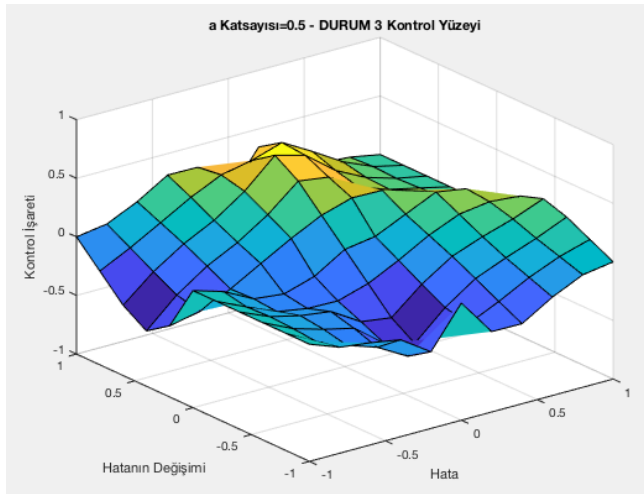
Şekil 5.15 : Geleneksel bulanık PID kontrol yüzeyi.



Şekil 5.16 : a katsayısı 0.5 için hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yönteminin kontrol yüzeyi.



Şekil 5.17 : DURUM 3 (b katsayısı 0.8) için çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezinin ayarlanması yönteminin kontrol yüzeyi.



Şekil 5.18 : Önerilen yöntemin (a katsayısı 0.5 ve DURUM 3 için) kontrol yüzeyi.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bulanık PID kontrolörlerine sistem başarımını iyileştirmek için uygulanacak olan ayarlama yöntemleri arasında, giriş ve çıkış ölçeklendirme katsayılarını ayarlamaya dayalı yöntemler oldukça yeterli sayıdadır. Buna rağmen literatürde üyelik fonksiyonlarının parametrelerini ayarlama, bulanık kuralları ayarlama ya da bulanık kural ağırlıklandırma gibi yöntemler az sayıda verilmiştir.

Bu kapsamda tezde öncelikle Karasakal ve diğ. (2011) tarafından önerilen hataya dayalı çevrimiçi kural ağırlık ayarlama yöntemi ele alınmıştır. Bu çalışmada, kapalı çevrim sistemin birim basamak sistem yanıtının geçici yanıtı değerlendirilerek, bu yanıtın belirli sayıda bölgeye bölündüğü varsayılmıştır. Daha sonra bulanık mantık kontrolörün hata girişi için tanımlanan üyelik fonksiyonları sayısına göre bu bölgeler atanmış, her bölge için gerekli kontrol işaretinin elde edilmesi için tanımlayıcı kurallar geliştirilmiştir. Her bölge için bulanık kuralların etkisi incelenmiş ve bölgeler bulanık kural ağırlık değişkeni ile ilişkilendirilmiştir. Bulanık kural ağırlıklarının çevrimiçi ayarı için, sistem hata değişkeninin mutlak değerinin basit iki fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyonlara bir parametre yer almaktadır. Bu parametrenin değeri birinci bölge hariç “1” olarak seçilmiştir. Bu parametre değeri sadece hatanın büyük olduğu ve hata değişiminin negatif olduğu bölgede sistemin hızlanmasını önlemek amacıyla yarıya indirilmiştir. Bu tezde söz konusu parametreye çeşitli değerler verilerek yöntemin çeşitli açılardan analizi yapılmıştır.

Daha sonra, Xu ve Shin (2005)’ de kullanılan çok düzeyli bulanık kontrolör ele alınmıştır. Bu yapıda “Çıkış üyelik fonksiyonu ayar mekanizması” adı verilen bir bulanık ayar mekanizması kullanılmaktadır. Bu mekanizmanın girişleri, kontrol sisteminin hatası ve bu hatanın değişimidir. Bulanık ayar mekanizmasının kendi giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları ve bir kural tablosu bulunmaktadır. Çıkışı, bulanık kontrolörün çıkış üyelik fonksiyonunun merkezini ayarlayacak olan değerdir. Söz konusu yayında bu amaçla belirlenen kural tablosu 11x11’dir. Tezimizde ayar mekanizmasının kural tablosunun boyutu 5x5’e düşürülmüş ve indirgenmiş tabloda üç farklı değer kullanılmıştır. Bunlar “0”, “1” ve serbest parametre “b” dır. “b” değeri

için farklı değerler seçilerek ve yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım üzerinden sistem başarımı incelenmiştir.

Xu ve Shin (2005) ve Karasakal ve diğ. (2011) bulanık kontrolörlerinin her ikisi de bulanık kontrolörün yapısal parametrelerini çevrimiçi olarak ayarlayan yöntemlerdir. Tezde bu iki yöntem birleştirilerek kontrolöre ait iki yapısal parametrenin aynı anda çevrimiçi olarak ayarlanması önerilmiştir. Bulanık PID girişi için beş adet üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonları, tekil tip üyelik fonksiyonları olarak alınmıştır. Birleştirilmiş yöntem için her iki yöntemin tasarım parametreleri tekrar analiz edilmiştir. Önerilen yöntem geleneksel bulanık PID kontrolör, hata tabanlı bulanık kural ağırlıklandırma yöntemine sahip bulanık kontrolör ve çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezini ayarlanması yöntemine sahip bulanık kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla doğrusal ve doğrusal olmayan sistem modelleri kullanılmıştır. Giriş ve çıkış ölçeklendirme faktörleri her benzetim için aynı tutulmuştur. Sistem yanıtları ve başarımları karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin özellikle aşım açısından sistem başarımını arttırdığı gözlemlenmiştir.

İleride kural ağırlıklandırma ve çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezlerinin ayarlanması için ortak bir mekanizmanın kullanıldığı bir yöntem önerilebilir. Bu ortak mekanizma için bulanık bir kural tablosu belirlenebilir.

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.
- Arzen, K. E, Johnsson, M., Babuska, R.** (1999). Fuzzy Algorithms for Control, Verbruggen, H. B., Zimmerman, H.-J., Babuska, R. (editors) , *Kluwer Academic Publishers*.
- Bellman, R. E. ve Zadeh, L. A.** (1970). Decision-Making in a fuzzy environment. *Management Science*, 17.
- Chengying, Xu. ve Yung, C. Shin.** (2005). Design of a multilevel fuzzy controller for nonlinear systems and stability analysis. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, Vol. 13, No.6.
- Genç, H. M., Yeşil, E., Eksin, I., Güzelkaya, M., ve Tekin, O. A.** (2009). A rule base modification scheme in fuzzy controllers for time-delay systems. *Expert Systems with Applications*, 36, 8476-8486.
- George, J. Klir. ve Bo, Yuan.** (1995) *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications*, Prentice Hall.
- Golob, M.** (2001). Decomposed fuzzy proportional-integral-derivative controllers, *Applied Soft Computing*, 1, 201-204.
- 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 Yeşil, E.** (2003). Self-tuning of PID-type fuzzy logic controller coefficient 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
- 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.
- Jyh-Shing, Roger, Jang., Chuen-Tsai, Sun., ve Eiji, Mizutani.** (1997) *Neuro Fuzzy and Soft Computing A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall.
- Karasakal, O., Güzelkaya, M., Eksin, İ., ve Yesil, E.** (2011). An error-based on-line rule weight adjustment method for fuzzy PID controllers. *Expert Syst. Appl*, 38 (8), 10124-10132

- Karasakal, O., Güzelkaya, M., Eksin, İ., Yeşil, E., ve Kumbasar, T.,** (2013). Online tuning of fuzzy PID controllers via rule weighing based on normalized acceleration. *Applications of Artificial Intelligence*, 26, 184-197.
- Karasakal, O., Yeşil, E., Güzelkaya, 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.
- 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. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7, 1-13.
- Mann, G. K. I., Hu. B. ve Gosine, R. G.** (2001). Two-level tuning of fuzzy PID controllers. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 31, 263-269
- Mizumoto, M.** (1990). Fuzzy controls by product-sum gravity method. *International Academic Publishers*, C. 1. 1-C. 1. 4.
- 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.
- Passino, K. M. ve Yurkovich, S.** (1998). *Fuzzy Control*, Addison-Wesley-Longman
- Qiao, W. Z. ve Mizumoto, M.** (1996). PID type fuzzy controller and parameters adaptive method, *Fuzzy Sets and Systems*, 78, 23-35.
- Sugeno, M., ve Kang, G. T.** (1988) Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*, 28, 15-33.
- Takagi, T., ve Sugeno, M.** (1985) Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15, 116-132.
- Wong, C. C. ve Feng, S. M.** (1994). A switching type of fuzzy controller. *Proceeding of the 3. IEEE World Conference on Computational Intelligence*, 30-34.
- 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., Hang, C. C., ve Liu, C.** (2000). Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller. *Automatica*, 36, 673-684.
- Y. Tsukamoto.** (1979) An approach to fuzzy reasoning method. In Madan M. Gupta, Rammohan K. Ragade, and Ronald R. Yager (Editors), *Advances in fuzzy set theory and applications*, 137 -149 North-Holland, Amsterdam
- Zadeh, L. A.** (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet DELİBAŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021-Günümüze FEV TÜRKİYE
 - Elektrikli Araç Sistemleri Mühendisi