

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MELEZ KONTROLÖR TASARIMI VE UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Cihan BULUT

Anabilim Dalı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Programı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MELEZ KONTROLÖR TASARIMI VE UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Cihan BULUT
(504061107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim EKSİN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA (İTÜ)
Prof. Dr. Serhat ŞEKER (İTÜ)

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca yardımlarını esirgemeyen başta tez danışmanım sayın Prof. Dr. İbrahim EKSİN olmak üzere değerli hocam sayın Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Özellikle çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren ve akıl veren meslektaşım, hocam, dostum Yük. Müh. Tufan KUMBASAR'a da teşekkürü bir borç bilirim.

Benden maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen aileme, özellikle her türlü zorluğa göğüs germenin, hayatını sevdikleri için yaşamanın ne demek olduğunu gösteren, tüm seçimlerimde arkamda olan ve olacağını bildiğim anneme, varlıklarıyla kendimi güvende hissettiğim dayıma, teyzeme, annem ve dedeme, bana inanmayı hiç bırakmayan, umutsuzluğa kapıldığım anlarda beni yeniden motive eden yol arkadaşlarım Atakan TATLIDİL, Cenk AVCI ve Uğraş AYRILMAZ'a, derslerin ve çalışma hayatının stresini, sıkıntılarını paylaştığım meslektaşlarım Ceyhun Erhan ÜZÜMCÜ, Yasin DİLMAÇ ve adlarını sayamadığım dostlarıma ve son olarak tez çalışmamı tükenmez bir sabırla destekleyen iş arkadaşlarıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, yüksek lisans öğrenimimde Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı çerçevesinde bana burs desteği veren TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na yüksek lisans tez çalışması desteği için teşekkür ederim.

Mayıs 2009

Cihan Bulut

Kontrol Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. BULANIK MANTIK	3
2.1 Giriş.....	3
2.2 Bulanık Mantık Uygulamaları.....	4
2.3 Bulanık Kümeler	5
2.3.1 Bulanık küme işlemleri	6
2.3.1.1 Tümlleme işlemi	6
2.3.1.2 Kesişim işlemi	6
2.3.1.3 Birleşim işlemi	6
2.4 Bulanık Sistemlerin İç Yapıları.....	7
2.4.1 Mamdani tipi bulanık kurallar.....	8
2.4.2 Tekli (Singleton) tip bulanık kurallar.....	8
2.4.3 Takagi-Sugeno tip bulanık kurallar.....	9
2.4.4 Tsukamoto tipi bulanık kurallar	9
3. BULANIK KONTROLÖR ve KLASİK PID KONTROLÖR.....	11
3.1 Bulanık Kontrolör	11
3.2 Klasik PID Kontrolör	13
4. BULANIK ve KLASİK PID KONTROLÖRLERİ İLE KURAL TABANLI MELEZ YAPI	15
4.1 Amaç	15
4.2 Sistemin Genel Yapısı	15
4.3 Bulanık Kontrolör	17
4.4 Klasik PID Kontrolör	18
4.5 Harmanlama Mekanizması.....	18
4.5.1 Harmanlama mekanizması özellikleri.....	19
4.6 Geliştirilmiş Melez Kontrolör	19
4.6.1 Harmanlama algoritması	21
5. BULANIK ve KLASİK PID KONTROLÖRLERİ İLE KURAL TABANLI MELEZ YAPI UYGULAMALARI	23
5.1 Benzetim Çalışmaları	23
5.1.1 İkinci dereceden ölü zamanlı bir sistem için benzetim çalışması	23
5.1.2 Doğrusal olmayan bir sistem için benzetim çalışması	26

6. BULANIK ve KLASİK PID KONTROLÖRLERİ İLE BULANIK	
HARMANLAMALI MELEZ YAPI.....	29
6.1 Amaç.....	29
6.2 Sistemin Genel Yapısı	29
7. BULANIK ve KLASİK PID KONTROLÖRLERİ İLE BULANIK	
HARMANLAMALI MELEZ YAPI UYGULAMALARI.....	33
7.1 Benzetim Çalışmaları	33
7.1.1 İkinci dereceden ölü zamanlı bir sistem için benzetim çalışması	33
7.1.2 Dördüncü dereceden bir sistem için benzetim çalışması	36
7.2 Isıl Süreç Sistemi ile Gerçek Zaman Uygulamaları	38
7.2.1 Isıl süreç sistemi PT-326'nın tanıtılması.....	38
7.2.2 Isıl sürecin modellenmesi ve benzetim çalışmaları.....	40
7.2.2.1 Ziegler-Nichols methodu ile belirlenen parametreler ile benzetim çalışması	41
7.2.2.2 Aşım yapmayacak şekilde aratılan parametreler ile benzetim çalışması	44
7.2.3 Bulanık harmanlamalı melez kontrolörün ısı süreçte uygulanması	46
7.2.3.1 Ziegler-Nichols methodu ile belirlenen parametreler ile gerçek zaman uygulaması	46
7.2.3.2 Aşım yapmayacak şekilde aratılan parametreler ile gerçek zaman uygulaması	48
8. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	55

KISALTMALAR

KTMK	: Kural Tabanlı Melez Kontrolör
BHMK	: Bulanık Harmanlamalı Melez Kontrolör
PID	: Proportional Integral Derivative Kontrolör
PI	: Proportional Integral Kontrolör
PD	: Proportional Derivative Kontrolör
FPID	: Bulanık PID Kontrolör
e	: Hata
Δe	: Hatanın değişimi
u	: Kontrol işareti
K	: Sistem kazancı
L	: Sistem ölü zamanı
T	: Sistem zaman sabiti
ufuzz	: Bulanık kontrolör kontrol işareti
upid	: Klasik PID kontrolör kontrol işareti
val	: Anahtarlama fonksiyonu çıkışı
ufuzz_new	: Yeni bulanık kontrolör kontrol işareti
upid_new	: Yeni klasik PID kontrolör kontrol işareti
f(e)	: Anahtarlama fonksiyonu
Ke	: Bulanık kontrolör hata giriş ölçekleme çarpanı
Kd	: Bulanık kontrolör hatanın değişimi giriş ölçekleme çarpanı
alfa	: Bulanık kontrolör çıkış ölçekleme çarpanı
beta	: Bulanık kontrolör çıkış ölçekleme çarpanı
KP	: PID kontrolör oran kazancı
KI	: PID kontrolör integral kazancı
KD	: PID kontrolör türev kazancı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bazı bulanık küme sınıflarında birleşim ve kesişim işlemleri.	6
Çizelge 4.1 : En genel bulanık kontrolör kural tabanı	18
Çizelge 5.1 : İkinci dereceden ölü zamanlı sistem için kontrolör parametreleri.	23
Çizelge 5.2 : Doğrusal olmayan sistem için kontrolör parametreleri.	27
Çizelge 6.1 : Bulanık harmanlama mekanizması kural tabanı.	31
Çizelge 7.1 : İkinci dereceden ölü zamanlı sistem için kontrolör parametreleri.	33
Çizelge 7.2 : Dördüncü dereceden sistem için kontrolör parametreleri.	36
Çizelge 7.3 : Ziegler-Nichols ile kontrolör parametreleri	42
Çizelge 7.4 : Aşım yapmayacak şekilde belirlenen kontrolör parametreleri.....	44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bir bulanık sistemin iç yapısı	7
Şekil 3.1 : Bulanık kontrolörlerin gruplandırılması.....	11
Şekil 3.2 : Tasarımda kullanılan iki girişli tek kural tabanlı kontrolör.....	12
Şekil 3.3 : Klasik PID kontrolör.	13
Şekil 4.1 : Kural tabanlı melez kontrolör genel yapısı	16
Şekil 4.2 : Kural tabanlı melez kontrolör iç yapısı	16
Şekil 4.3 : e ve Δe için üyelik fonksiyonları.....	17
Şekil 4.4 : u için üyelik fonksiyonları.....	18
Şekil 4.5 : Geliştirilmiş Melez kontrolör genel yapısı.....	20
Şekil 4.6 : Geliştirilmiş Melez kontrolör iç yapısı.....	20
Şekil 4.7 : Harmanlama akış diyagramı.....	21
Şekil 5.1 : $G_1(s)$ sistemine uygulanan referans işaret	24
Şekil 5.2 : $G_1(s)$ sistemine uygulanan bozucu işaretler	24
Şekil 5.3 : $G_1(s)$ sisteminin KTMK, PID ve FPID cevapları.....	25
Şekil 5.4 : $G_1(s)$ sisteminde KTMK, PID ve FPID kontrol işaretleri	25
Şekil 5.5 : Küresel tank sistemi	26
Şekil 5.6 : Doğrusal olmayan sisteme uygulanan referans işaret	27
Şekil 5.7 : Doğrusal olmayan sisteme uygulanan bozucu işaretler	27
Şekil 5.8 : Doğrusal olmayan sistemin KTMK, PID ve FPID cevapları.....	28
Şekil 5.9 : Sistemde KTMK, PID ve FPID kontrol işaretleri	28
Şekil 6.1 : Bulanık harmanlamalı melez kontrolör genel yapısı.....	29
Şekil 6.2 : u_{pid} ve u_{fuzz} için üyelik fonksiyonları.....	30
Şekil 6.3 : val için üyelik fonksiyonları.....	30
Şekil 6.4 : Bulanık harmanlama yüzey şekli	31
Şekil 6.5 : Bulanık harmanlamalı melez kontrolör iç yapısı	32
Şekil 7.1 : $G_2(s)$ sistemine uygulanan referans işaret	34
Şekil 7.2 : $G_2(s)$ sistemine uygulanan bozucu işaretler	34
Şekil 7.3 : $G_2(s)$ sisteminin BHK, PID ve FPID cevapları.....	35
Şekil 7.4 : $G_2(s)$ sisteminde BHK, PID ve FPID kontrol işaretleri.....	35
Şekil 7.5 : $G_3(s)$ sistemine uygulanan referans işaret	36
Şekil 7.6 : $G_3(s)$ sistemine uygulanan bozucu işaretler	37
Şekil 7.7 : $G_3(s)$ sisteminin BHK, PID ve FPID cevapları.....	37
Şekil 7.8 : $G_3(s)$ sisteminde BHK, PID ve FPID kontrol işaretleri.....	38
Şekil 7.9 : Isıl sistem PT326'ya ait yapı.....	39
Şekil 7.10 : Kullanılan deney düzeneği	40
Şekil 7.11 : Elde edilen model cevabı ile gerçek sistem cevabı	41
Şekil 7.12 : $G_4(s)$ sistemine uygulanan referans işaret	42
Şekil 7.13 : $G_4(s)$ sistemine uygulanan bozucu işaretler	42
Şekil 7.14 : $G_4(s)$ sisteminin BHK, PID ve FPID cevapları	43
Şekil 7.15 : $G_4(s)$ sisteminde BHK, PID ve FPID kontrol işaretleri.....	43

Şekil 7.16 : $G_4(s)$ sistemine uygulanan referans işaret	44
Şekil 7.17 : $G_4(s)$ sistemine uygulanan bozucu işaretler	45
Şekil 7.18 : $G_4(s)$ sisteminin BHK, PID ve FPID cevapları.....	45
Şekil 7.19 : $G_4(s)$ sisteminde BHK, PID ve FPID kontrol işaretleri	46
Şekil 7.20 : BHK, PID ve FPID için reel sistem cevapları	47
Şekil 7.21 : BHK için reel kontrol işareti (Çizelge 7.3'teki parametreler ile)	47
Şekil 7.22 : Model değişimi etkisiyle BHK sistem cevabı.....	48
Şekil 7.23 : BHK, PID ve FPID için reel sistem cevapları	49
Şekil 7.24 : BHK için reel kontrol işareti (Çizelge 7.4'teki parametreler ile)	49

MELEZ KONTROLÖR TASARIMI VE UYGULAMALARI

ÖZET

Bu çalışmada, paralel olarak kullanılan Bulanık PID Kontrolör ve Klasik PID kontrolör cevapları karşılaştırılıp özel yöntemlerle birleştirerek yeni bir kontrol işareti üreten kontrol yapıları tanıtılmaktadır. İki kontrol işaretini belirli oranlarda karıştırarak harmanlayıp yeni bir işaret oluşturan mekanizma ‘Melez Kontrolör’ olarak adlandırılmıştır. Kısaca melez kontrolör tasarımı fikri, yapısında bulunan kontrolörlerin avantajlarını birleştirmekten gelmektedir. Böylece hem lineer hem de lineer olmayan sistemler için uygun bir kontrol metodolojisi geliştirilecektir.

Amaç, daha hızlı cevap veren kontrolöre yakın kontrol işaretinden zamanla referansa yaklaşan kontrol işaretine tasarlanan yöntemler vasıtasıyla geçilmesidir. Daha büyük harmanlama çarpanı ile çarpılan kontrolörün işareti daha baskınken diğer kontrolörün kontrol işareti, yeni kontrol işaretinde daha düşük oranda olacak, hata değiştikçe bu oranlar da değişecektir. Böylece sistem performansının gözle görünür biçimde arttırılacağı düşünülmüştür.

Harmanlama mekanizmasında anlık sistem hatasının bir fonksiyonu ya da bulanık mantık kullanılarak oluşturulan çarpanlar kullanılmaktadır. Harmanlama mekanizması ile hangi kontrolörün kontrole önce başlayacağı ve sistem hatası sıfıra yaklaştıkça hangi kontrolör çıkışının hangi oranda melez kontrolör çıkışına etkiyeceği belirlenir. Bu çalışmada iki farklı yapıda harmanlama mekanizması tasarımı anlatılmıştır. Yapılan benzetimler ve gerçek zaman uygulaması sonrasında Melez Kontrolör sistem cevabı ve kontrolör çıkışları ile bulanık PID kontrolör ve klasik PID kontrolör sistem cevabı ve kontrolör çıkışları karşılaştırılmış ve yapılan değerlendirmeler sonucu hem kararlı hal cevabı hem geçici hal cevabında hem de bozucular altında, yapısındaki diğer iki kontrolörden de daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

HYBRID CONTROLLER DESIGN AND APPLICATIONS

SUMMARY

In this study, control structures that blend the control signals of two parallel controllers namely a conventional PID and a fuzzy PID, with special methods by comparing the control signals of the controllers is studied. The mechanism that blends the control outputs and creates a new control signal is called as “Hybrid Controller”. Basically, the idea of this design methodology is to combine the benefits of both controllers in its own structure. Hybrid controllers can be applied to both linear and nonlinear systems.

The aim is to use the fastest controller and then the one with little error by this method. Bigger blending factor will reduce the weight of the controller output that is multiplied. When the error changes, the blending factor will change, the control signal that will increase the system performance will be used.

In blending mechanism, which of the controller output will have a bigger in hybrid controller output is decided. Two different blending mechanism designs are introduced in this work. After simulation studies and real-time applications, hybrid controller system response and control outputs are compared with the system response and control outputs of the other controllers. Moreover, they all proved that the presented controller performs better in terms of not only transient state but also steady-state than the controllers in its structure even under disturbance.

1. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı, bulanık ve klasik PID kontrollerin paralel olarak kullanılmasıyla hem klasik PID kontrolörün avantajlarını hem de bulanık kontrolörün avantajlarını akıllı bir yöntemle birleştirecek bir yapı oluşturmaktır.

Klasik PID kontrolörler, basit yapıları ve gösterdikleri kabul edilebilir performans nedeniyle endüstride en çok tercih edilen yapılardır. Fakat kontrol edilecek sistem yüksek mertebeden veya doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğunda klasik PID kontrolörlerin performansları sınırlı ve yetersiz kalmaktadır.

Bulanık kontrolörler özellikle klasik PID kontrolörlerin zayıf kaldığı uygulamalarda çok iyi performans sergilemektedir [1]. Bulanık kontrolörlerde giriş değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan kural tabanlarını kullanır. Ancak; detaylı oluşturulması gereken kural tabanları ve artan giriş değişken sayısı yapının da karmaşıklığını arttırırken kontrolörün uygulanmasını zorlaştırır.

Bu nedenlerle hem doğrusal sistemlerde hem de doğrusal olmayan sistemlerde başarılı olacak olan melez bir yapı tasarlanılabilir. Tasarımın amacı her iki kontrolörün geçici ve kararlı hal cevaplarından daha iyi cevap üretecek bir Melez Kontrolör yapısı oluşturmaktır. Bu fikir bir çok mühendisin ilgisini çekmiştir ki literatürde bu konuda çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bunlar arasında Bulanık PI ve klasik PD [2] yapıları ile oluşturulan melez kontrolörler incelendiği gibi bulanık PID ve klasik PID ile oluşturulan melez kontrolör yapıları da incelenmiştir [3]. Bazı uygulamalarda yapıdaki iki kontrolörü birleştirmek için anahtar kullanılmıştır [4-6].

İkinci bölümde bulanık mantık ile ilgili literatür araştırması özeti, üçüncü bölümde ise bulanık kontrolörler ve klasik PID kontrolör hakkında literatür araştırması özeti verilmiştir. Dördüncü bölümde, bulanık PID ve klasik PID kontrolörleri ile kural tabanlı melez kontrolör yapısı (KTMK) tasarımı ve beşinci bölümde bu tasarımla gerçekleştirilen benzetimler anlatılmıştır. Altıncı bölümde bulanık PID ve klasik PID kontrolörleri ile bulanık harmanlamalı melez (BHMK) tasarımı anlatılmış, yedinci bölümde ise bu tasarıma ait benzetim çalışmaları ve bir ısıtım sistemi üzerinde gerçek

zaman kontrol uygulamasına yer verilmiştir. Gerçek sistem olarak ölü zamanlı ısıt sistem olan Feedback firmasının Process Trainer PT326 deney seti kullanılmıştır. Bu bölümdeki benzetimler sonucunda altıncı bölümde tasarlanan BHK kontrolörlerin dördüncü bölümde tasarlanan melez kontrolörlerden de daha iyi performans sağladığı görülmektedir.

Yapılan benzetimler sonucunda her iki melez kontrolörün de hem kararlı hal cevabı hem de geçici hal cevabında ve bozucu girişler altında yapısındaki klasik PID ve bulanık PID kontrolörden de daha iyi performans sergilediği görülmektedir.

Sonuç bölümünde de tasarımlar, benzetim çalışmaları sonuçları ve gerçek zaman uygulaması sonuçları üzerinden genel bir özet ile birlikte konu ile ilgili gelecekte yapılabilecek çalışmalar ve yorumlara yer verilmiştir.

2. BULANIK MANTIK

2.1 Giriş

Bulanık mantık yaklaşımı, bilgisayarların insanların deneyimlerinden ve önsezilerinden yararlanarak özel verilerini işleyebilme ve çalışabilme yeteneğidir. Bulanık mantık, günümüzde zaman gibi en önemli kavramlardan birinde tasarruf sağlayarak ekonomik açıdan faydalar getirdiği gibi endüstride verimliliği artırır ve daha uygun üretim sağlar. Bulanık mantığın birçok uygulama alanından biri olan kontrol mühendisliğinde, bulanık mantık kullanılarak tasarlanan kontrolörler, genellikle matematik modelleri zor türetilen ya da bilinen yöntemlerle kontrol edilmeye çalışıldığında verimli sonuç alınamayan sistemlerde kullanılır.

Bir kuantum felsefecisi olan Max Black tarafından yayımlanan bir makalede liste ya da nesnelerden oluşan kümelere "çok değerli mantığı" uygulayarak ilk bulanık küme eğrilerini çizmiş olsa da, 1965’de Lotfi Zadeh tarafından yayınlanan makale belirsizlik kavramının modern anlamda değerlendirilmesinde önemli bir adım olarak kabul edilmektedir [7].

California Berkeley üniversitesinden Prof. Lotfi Zadeh klasik Aristo mantığına alternatif olarak bulanık mantık teorisini tanımlamıştır [8]. Bu çalışmada, doğru ve yanlış arasındaki sonsuz farklı değerleri $[0,1]$ aralığındaki sayılarla ifade etmiş, ilk kez bu makalesinde sembolik ifadelerin makinelere aktarılmasının matematiksel bir temele dayandığından bahsetmiştir. İnsan düşüncesinin büyük çoğunluğunun bulanık olduğunu, kesin olmadığını belirtmiştir. Bu yüzden 0 ve 1 ile temsil edilen bulanık mantık bu düşünce işlemini yeterli bir şekilde ifade edememektedir [8].

Bu makalenin önemi sadece ihtimaller teorisine karşı duruşu ile ilgili değil, ayrıca ihtimaller teorisinin temelini oluşturan Aristo mantığına karşı da bir meydan okuma olması ile de ilgilidir. Zadeh’in “bulanık küme” kavramı, klasik sistem kuramının matematiksel yöntemlerinin gerçek dünyadaki pek çok sistemde yetersiz kalmasından ortaya çıkmıştır.

Bulanık mantıkta, bilgisayarlarda kullanılan Aristo mantığındaki kesin ve ayrık ifadeler olan 1-0, var-yok, siyah-beyaz yerine insan düşünce sistemine daha yakın olan dilsel değişkenler olan ‘çok soğuk’, ‘ılık’, ‘az’, ‘yeterince’ gibi kesinlik taşımayan kavramlar kullanılır. Burada kullanılan ‘biraz’, ‘çok’ terimleri dilsel terimler olup “bulanık değişkenler” olarak isimlendirilirler. Klasik mantığa göre erkekler için 1.85m ve üzeri için uzun tanımı yapılıyorsa 1.84m boyundaki bir erkek kısa olarak tanımlanacaktır. Hâlbuki bulanık mantık o insanın ne kadar uzun olduğunu tanımlar. Böylece bu boydaki bir insan ‘0’ yani ‘kısa’ yerine ‘0.9 uzunluktadır’ gibi bir esnek değerle tanımlanır [8].

2.2 Bulanık Mantık Uygulamaları

1970’li yılların ortalarına kadar uygulama alanı bulamayan bulanık mantık, Londra’daki Queen Mary College’da profesör olan Ebrahim H. Mamdani tarafından bir buhar makinası için ilk defa bir kontrol sisteminde gerçekleştirilmiştir [9]. Bu kullanımdan sonra "bulanık mantık" terimi bulanık kümeler yardımıyla akıl yürüten herhangi bir matematik ya da bilgisayar sistemini ifade etmeye başlamıştır. Bulanık mantık kuramı endüstride ise ilk defa F.L. Smith tarafından Danimarka’daki bir çimento fabrikası değirmen sıcaklık ve oksijen kontrolünde uygulanmıştır.

Matsushita Electric Industrial şirketi bulanık mantığı uygulayan ilk şirket olmuş ve 1987’de, su sıcaklığını bulanık olarak ayarlayan bir duş üretmiştir. Günümüzde ise bulaşık makineleri, klimalar, mikrodalga fırınlar, fotoğraf makineleri, kameralar, televizyon setleri, fotokopi makineleri ve hatta otomobillerde bulanık mantık uygulamalarına rastlamak mümkündür. Bu uygulamaların algılayıcılarla birlikte bulanık mantığı kullanması otomatik kontrol uygulamalarını çok kolaylaştırır. Örneğin fotoğraf makineleri farklı odaklanmalara sahiptirler ve bunu bulanık mantığın eğer-öyleyse kurallarıyla gerçekleştirmek çok kolaydır.

Bulanık mantık ilk olarak Amerika’da keşfedilmiş olmasına rağmen teknolojinin hızlı ilerleyişi Japonya’dan başlayıp tekrar Amerika’ya ve Avrupa’ya ulaşmıştır. Bulanık mantık konusunda yapılan araştırmalar Japonya’da oldukça fazladır ve bulanık mantık araştırmaları dev bir bütçeyle desteklenmektedir. Özellikle ‘Fuzzy Process Controller’ olarak isimlendirilen özel amaçlı bulanık mantık mikroişlemcinin üretilmesine çalışılmaktadır. Bu teknoloji fotoğraf makineleri, çamaşır makineleri, klimalar ve otomatik iletim hatları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bundan

başka uzay araştırmaları ve havacılık endüstrisinde de kullanılmaktadır. TAI'de araştırma gelişme kısmında bulanık mantık konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Bulanık mantık, karışık endüstriyel proseslerin ve metro sistemlerinin kontrolünde, uzman sistemlerin tasarımında kazançlı bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Bulanık mantık hala Japonya'da hızlı bir ilerleme seyri sürdürmektedir. Avrupa'da ve Amerika'da çalışmalar bu muhteşem Japon başarısını yakalama yönünde sürdürülmektedir. Örneğin bulanık mantığı NASA şu anda uzay üslerindeki karmaşık iniş kalkış manevralarına uygulamaya çalışmakla meşguldür [10].

Günümüzde bulanık mantığın uygulama alanları sadece kontrol sistemleriyle sınırlı değildir. Bulanık mantık olarak mühendislik, biyoloji ve ekonomi gibi birçok alanda sürekli sistemleri modellemek için kullanılabilir. Ayrıca bu alanların çoğunda bulanık mantık temelli sağduyulu modellerin standart matematiksel modellerden daha yararlı ya da daha kesin sonuçlar verdiği görülmektedir. Genel olarak; bilgisayar ve bilgi sistematiği bilimleri, kontrol sistemleri, karar-alma algoritmaları bulanık mantığın yoğun olarak kullanıldığı alanlar olarak görülmektedir.

2.3 Bulanık Kümeler

Bulanık mantık bilginin tam olmadığı ve klasik 'Evet' (ya da '1') ve 'Hayır' (ya da '0') içeren ikili mantığın (binary logic) mümkün olmadığı durumlar için tasarlanmıştır. Bulanık mantık kavramı 'Bulanık küme' konsepti ile başlar.

Y evrensel tanım kümesi üzerinde X bulanık kümesi, üyelik fonksiyonları ile tanımlanır. Üyelik fonksiyonu girişteki her noktanın 0 ile 1 arasındaki hangi üyelik değerine ya da üyelik derecesine sahip olduğunu tanımlayan bir eğridir. Giriş evrensel küme olarak tanımlanır. Yani bir X bulanık kümesi, Y evrensel kümesi içinde $\mu_X(y)$ üyelik fonksiyonu ile tanımlanırken $\mu_X(y)$ değeri y elemanının X bulanık kümesine ait üyelik derecesidir ve $0 \leq \mu_X(y) \leq 1$ olacaktır.

Bulanık küme kuramı, bir elemanın bir kümeye kısmi üyeliğine olanak sağlar. Eğer üyelik derecesi olarak adlandırılan üyelik fonksiyonunun değeri 1 ise y elemanı bulanık kümeye tamamen aittir. Üyelik fonksiyonu değeri 0 ise, y bulanık kümeye ait değildir. Eğer üyelik derecesi 0 ve 1 arasında ise y bulanık kümenin kısmi üyesidir.

2.3.1 Bulanık küme işlemleri

2.3.1.1 Tümlleme işlemi

Bir F bulanık kümesinin tümleneninin üyelik fonksiyonu tüm $u \in U$ için tanımlı olarak $\mu_F(u) = 1 - \mu_F(u)$ olarak gösterilir. Bu operasyon mantıksal ‘DEĞİL’ operasyonuna karşı düşmektedir.

2.3.1.2 Kesişim işlemi

Bir X bulanık kümesi ile bir Y bulanık kümesinin kesişiminin $Z = X \cap Y$ üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilir;

$$\mu_{X \cap Y}(u) = \mu_X(u) \wedge \mu_Y(u) \leq \min(\mu_X(u), \mu_Y(u)) \quad (t \text{ üçgen norm})$$

2.3.1.3 Birleşim işlemi

Bir X bulanık kümesi ile bir Y bulanık kümesinin birleşiminin $Z = X \cup Y$ üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilir;

$$\mu_{X \cup Y}(u) = \mu_X(u) \vee \mu_Y(u) \geq \max(\mu_X(u), \mu_Y(u)) \quad (s \text{ üçgen ko-norm})$$

Çizelge 2.1’de bir takım bulanık küme sınıflarında işlemler görülmektedir [11].

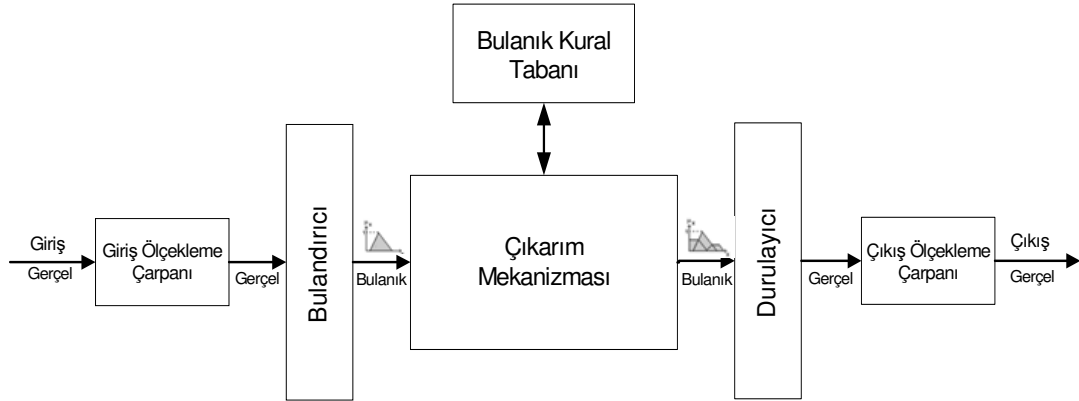
Çizelge 2.1 : Bazı bulanık küme sınıflarında birleşim ve kesişim işlemleri.

REFERANS	BULANIK BİRLEŞİM	BULANIK KESİŞİM	PARAM.
	$\max(a,b)$	$\min(a,b)$	
	$a + b - ab$	ab	
Schweizer & Sklar [1961]	$1 - \max[0, (1-a)^{-p} + (1+b)^{-p} - 1]^{1/p}$	$\max[0, a^{-p} + b^{-p} - 1]^{-1/p}$	$p \in (-\infty, \infty)$
Hamacher [1978]	$(a+b-(2-g)ab)/(1-(1-g)ab)$	$ab/(g+(1-g)(a+b-ab))$	$g \in (0, \infty)$
Frank [1979]	$1 - \log_s[1 + (s^{1-a}-1)(s^{1-b}-1)/s-1]$	$\log_s[1 + (s^a-1)(s^b-1)/s-1]$	$s \in (0, \infty)$
Yager [1980]	$\min[1, (a^w + b^w)^{1/w}]$	$1 - \min[1, (1-a)^w + (1-b)^w]^{1/w}$	$w \in (0, \infty)$
Dubois & Prade [1980]	$\frac{a + b - ab - \min(a, b, 1-\alpha)}{\max(1-a, 1-b, \alpha)}$	$ab/\max(a,b,\alpha)$	$\alpha \in (0, 1)$
Dombi [1982]	$\frac{1}{1 + [(\frac{1}{a} - 1)^{-\lambda} + (\frac{1}{b} - 1)^{-\lambda}]^{-1/\lambda}}$	$\frac{1}{1 + [(\frac{1}{a} - 1)^{\lambda} + (\frac{1}{b} - 1)^{\lambda}]^{1/\lambda}}$	$\lambda \in (0, \infty)$

2.4 Bulanık Sistemlerin İç Yapıları

Bulanık kontrol işlemleri, karmaşık ve klasik kontrol algoritmalarıyla değil de bilgi ve deneyime dayalı sözel kurallarla gerçekleştirilir. Örneğin, ‘sıcak’, ‘hızlı’, ‘kısa’ gibi sözel bulanık terimlerini içeren komut kümesi ile bir sistem için gerekli kontrol davranışları temsil edilebilir. Bu komut kümeleri “EGER-O HALDE (If-Then)” kuralları yardımıyla oluşturulur. Kısacası kural tabanlı bulanık kontrol sistemleri kullanılarak bilgisayarların doğruluğu ve hızları ile insanların karar verme ve sonuç çıkarma özelliklerinin bir araya getirilmiştir [8].

Kural tabanlı ve çıkarım mekanizmasından oluşan temel bulanık sistem yapısı bulandırıcı ve durulayıcı adı verilen iki birim daha içerir. Bulandırıcı gerçel değerli sistem girişini bulanık kümelerle dönüştürürken, durulayıcı, bu olayın aksine, çıkarım mekanizmasının ürettiği bulanık kümeleri gerçel değerli sistem çıkışına dönüştürür. Bu tür bulanık sistemlere ilişkin blok şema Şekil 2.1’de verilmiştir [12]. Elde edilen bulanık model, bulanık kuralların türüne göre adlandırılır.



Şekil 2.1 : Bir bulanık sistemin iç yapısı.

Bulanık önermedeki sonuç ifadesinin yapısına göre bulanık kural tabanı dört farklı yapı oluştururlar:

- i. Mamdani tipi bulanık kurallar
- ii. Tekli (Singleton) tip bulanık kurallar
- iii. Takagi-Sugeno tipi bulanık kurallar
- iv. Tsukamoto tipi bulanık kurallar

2.4.1 Mamdani tipi bulanık kurallar

Bu tip “Eğer-O Halde” bulanık kurallar bilgiyi yarı-niteliksel olarak içerirler. Bu kurallar aşağıdaki şekildedir;

$$\mathbf{Ki: EĞER} \tilde{x} A_i \text{ ise } \mathbf{O HALDE} \tilde{y} B_i \text{'dir}$$

Burada, $\tilde{x}$ giriş (öncül) dilsel değişken ve A_i ‘ler ise öncül dilsel terimlerdir. Benzer şekilde $\tilde{y}$ çıkış (sonuç) dilsel değişken ve B_i ‘ler ise sonuç dilsel terimlerdir. Kurallarda yer alan $\tilde{x}$ ($\tilde{y}$) dilsel değişkenlerinin değerleri ve A_i (B_i) dilsel terimleri kendi tanım bölgelerinde tanımlı bulanık kümelerdir: $x \in X \subset R_p$ ve $y \in Y \subset R_q$

Öncül (/sonuç) bulanık kümelerine ilişkin üyelik fonksiyonları

$$\mu(x):X \rightarrow [0, 1], \mu(y):Y \rightarrow [0, 1] \quad (2.1)$$

şeklinde dönüşümlerdir.

A_i bulanık kümeleri, ilişkili sonuç önermelerinin geçerli olduğu öncül uzaydaki bulanık bölgelerdir. A_i ve B_i dilsel değişkenleri genellikler daha önceden tanımlanmış KÜÇÜK, ORTA, BÜYÜK, NEGATİF, POZİTİF gibi terimlerden seçilir. Bu kümeler, A ve B ile gösterilirse A_i ve B_i ‘ler, A_i A ve B_i B şeklinde ifade edilebilir.

2.4.2 Tekli (Singleton) tip bulanık kurallar

Mamdani tipi bulanık kuralların özel bir halidir. Kuralların sonuç önermesinde yer alan B_i bulanık kümelerinin tekli (singleton) bulanık küme seçilmesiyle oluşturulur.

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & , x = \bar{x} \\ 0 & , \text{aksi halde} \end{cases} \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanır [2].

A_i bulanık kümeleri, b_i gerçel sayılar ile aşağıdaki gibi basit şekilde ifade edildiğinde kurallar aşağıdaki şekildedir;

$$\mathbf{Ki : EĞER} x, A_i \text{ ise } \mathbf{O HALDE} y = b_i, i = 1, 2, 3 \dots r$$

2.4.3 Takagi-Sugeno tip bulanık kurallar

Takagi-Sugeno tipi bulanık kural yapılarında öncül kısım giriş uzayının bulanık bölgelerini ifade ederken sonuç kısmında kesin (belirgin) fonksiyon mevcuttur. Bu kurallar aşağıdaki şekildedir;

Ki : EĞER x, A_i **ise** **O HALDE** $y_i = b_i, i= 1, 2, 3 \dots r$

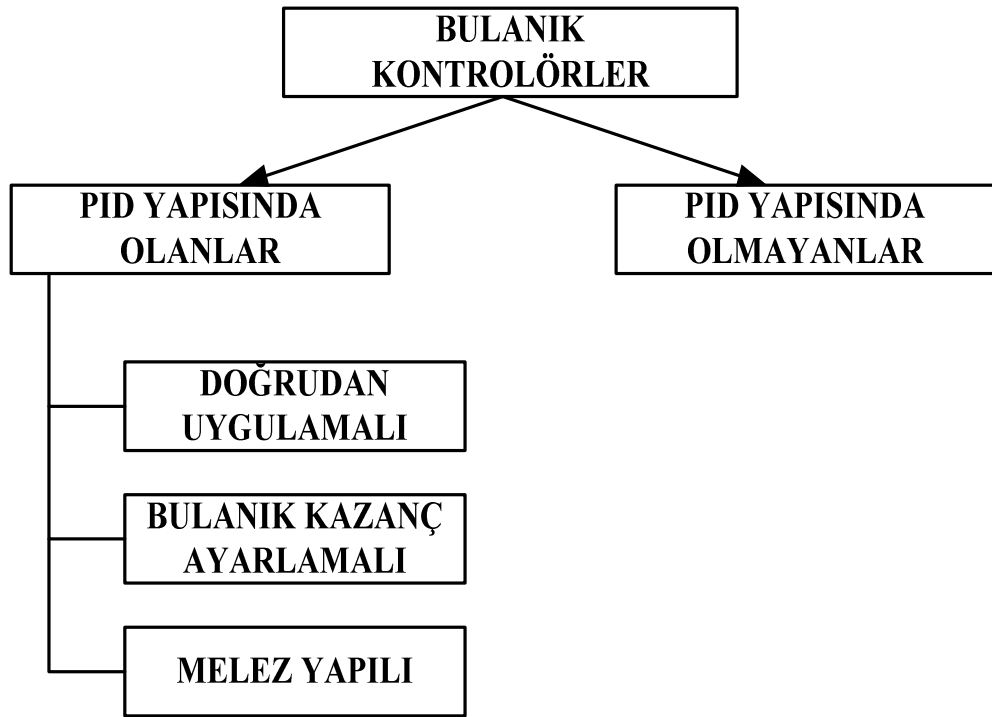
2.4.4 Tsukamoto tipi bulanık kurallar

Tsukamoto monoton tip yani sürekli azalan ya da artan tip üyelik fonksiyonlarının kullanıldığı bulanık çıkarım sistemidir.

3. BULANIK KONTROLÖR ve KLASİK PID KONTROLÖR

3.1 Bulanık Kontrolör

Literatürde bulanık kontrolörler için pek çok yapı tanımlanmıştır. Bulanık PID kontrolörlerin gruplanması Şekil 3.1’de verilmiştir;



Şekil 3.1 : Bulanık kontrolörlerin gruplandırılması [13].

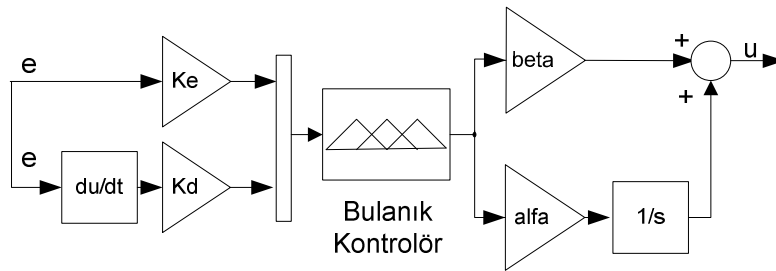
Bulanık kontrolörlerin avantajları şu şekilde sıralanabilir [14];

- Bulanık kontrolörlerde ‘0’ ya da ‘1’ ile beraber bunların ara değerleri de hesaplanır. Örneğin; bir endüstriyel kontrol sisteminde ani motor hızı değişimleri yerine yumuşak geçişlerle kontrol sağlanır ve gerektiğinde ani değerler kullanılabilir. Böylelikle hem kontrol kalitesi, ekipmanların ömrü arttırılmış, hem de enerji tasarrufu sağlanmış olur.
- İnsana ait tecrübe ile öğrenme kavramı ile sistemin kolay modellenebilmesi ve belirsiz kavramların bile matematiksel olarak ifade edilebilmesini sağlayarak lineer olmayan sistemlere yaklaşım yapılabilmesini sağlar.

- c) İşletme koşullarına göre klasik PID kontrolörde ekipmanların parametreleri sürekli ayarlanmalıyken, bulanık mantık kontrolör işletmenin şartlarına göre kendi kendine ayarlanmış olur.
- d) Bulanık kontrolörler tamsayı aritmetiği ile çalıştıkları için (8 bit, 16 bit, 32 bit) çıkarım algoritmaları çok büyük zorluklarla karşılaşmadan programlanabilir. Yani doğrusal olmayan karmaşık bir fonksiyon bile kayan noktalı hesap birimi olmayan bir hesaplayıcı ile bulanık mantık kullanılarak gerçekleştirilebilir ve çok hızlı hesaplanabilir.
- e) Mikro kontrolör ve PLC gerektiren sistemlerde de uygulanabilmesi mümkündür.

Bu çalışmada bulanık kontrolörlerden PID yapısında olan ve doğrudan uygulanan bir bulanık kontrolör kullanıldığından sadece bu kontrolör incelenecektir. Bulanık kontrolörlerde giriş değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan kural tabanlarını kullanır. Ancak; detaylı oluşturulması gereken kural tabanları ve artan giriş değişken sayısı yapının karmaşıklığını da arttırırken, kontrolörün uygulanmasını zorlaştırır. Ayrıca karmaşık sistemlerde tüm bulanık kuralların oluşturulması zaman gerektiren bir süreçtir [9].

PID yapısında olan ve doğrudan uygulamalı grupta yer alan iki girişli tek kural tabanlı bir bulanık PID kontrolörlerin genel yapısı Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Tasarımda kullanılan iki girişli tek kural tabanlı bulanık kontrolör.

Melez kontrolörün yapısında hata (e) ve hatanın değişimi (Δe) olmak üzere iki girişi olan bir bulanık PID kontrolör kullanılmıştır.

3.2 Klasik PID Kontrolör

PD Kontrolör, sistemin hızına olumsuz etki verirken sistemin kararlı hal davranışını etkilemez. PI Kontrolörler ise, görelî kararlılığı ve aynı zamanda kararlı hal hatalarını düzeltir, ancak yükselme zamanını artırır. Bu sonuçlar neticesinde PI ve PD kontrolörlerin avantajlarından yararlanılarak PID kontrolörler oluşturulur.

PID kontrolör seri bağılı bir PI ve PD kontrolörlerinden oluşur. Klasik PID kontrolör üç-parametrelî kontrolör olarak bilinmektedir ve genel olarak şu transfer fonksiyonuyla ifade edilmektedir;

$$G_c(s) = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} = (1 + K_{D1} s) (K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s}) \quad (3.3)$$

Burada K_p , K_D , K_I ve K_{D1} , K_{I2} , K_{P2} kontrolör parametreleridir.

PID kontrolörlerde üç parametreye ihtiyaç duyulduğundan PD kısmının orantı katsayısı birim alınır ve denklemde iki taraf da eşitlenirse;

$$K_p = K_{P2} + K_{D1} K_{I2} \quad (3.4)$$

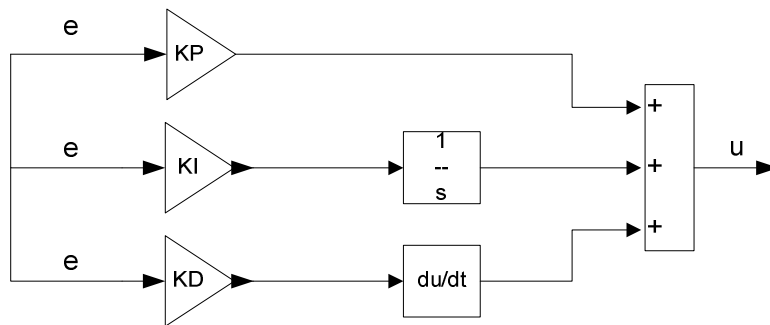
$$K_D = K_{D1} K_{P2} \quad (3.5)$$

$$K_I = K_{I2} \quad (3.6)$$

elde edilir.

Burada K_p , K_D , K_I kontrolör parametreleridir [15].

Klasik PID kontrolörlerin genel yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 : Klasik PID kontrolör.

Klasik PID kontrolörler, basit yapıları ve gösterdikleri kabul edilebilir performans nedeniyle endüstride en çok tercih edilen yapılardır. Tercih edilme nedenleri;

- a) Dayanıklı ve tasarımının kolay olması
- b) PID parametreleri ve sistem cevabı arasında açık bir ilişki bulunması
- c) Literatürde birçok PID parametre ayarlama tekniklerinin olması

olarak sayılabilir [16]. Melez kontrolörün yapısında hem daha az aşım elde etmek hem de sürekli hal hatasını sıfırlamak için PID kontrolör kullanılmıştır.

4. BULANIK ve KLASİK PID KONTROLÖRLERİ İLE KURAL TABANLI MELEZ YAPI

4.1 Amaç

Bu çalışmada, yapısında paralel olarak kullanılan Bulanık PID Kontrolör ve Klasik PID kontrolör bulunduran ve kontrolörlerin cevapları karşılaştırılıp özel bir algoritma ile karıştırılmasıyla yeni bir kontrol sinyali elde eden yapı tasarlanmıştır. Bu türde harmanlamayla yeni bir kontrol işareti üreten kontrolör de ‘Kural Tabanlı Melez Kontrolör’ olarak adlandırılmıştır. Amaç, daha hızlı cevap veren kontrolöre yakın kontrol işaretinden zamanla referansa yaklaşan kontrol işaretine harmanlama yöntemi vasıtasıyla geçilmesidir. Daha büyük harmanlama çarpanı ile çarpılan kontrolörün işareti daha baskınken diğeri daha düşük oranda olacaktır.

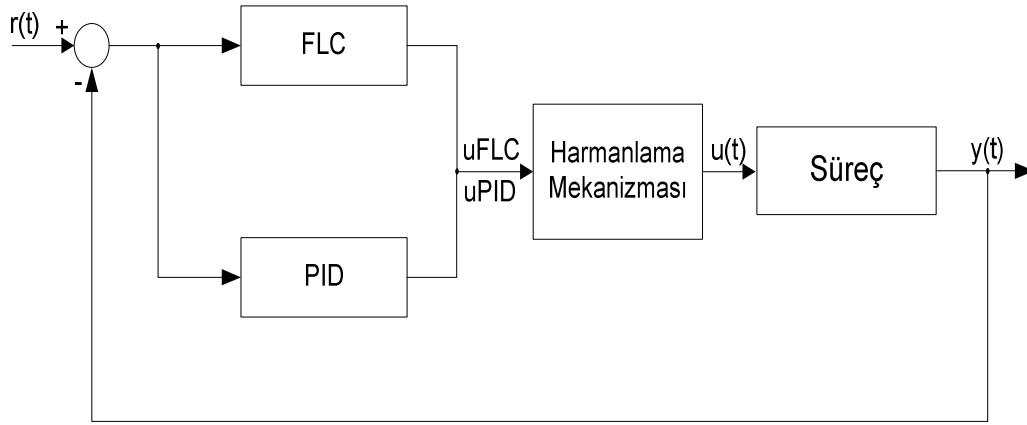
Klasik PID avantajlarının yanında tüm kontrol problemlerine genel bir çözüm bulamaz. Karmaşık yapıda, zamanla değişen, ölü zamanı olan veya Doğrusal olmayan sistemlerde etkinliği çok düşüktür. Analitik modellerle tanımlanamayacak kadar karmaşık yapıdaki süreçler yaklaşık modeller üzerinden kontrol edilse bile etkin bir performans sergileyemeyecektir.

Bulanık kontrolörlerin de avantajlarının yanında etkin ve güvenilir bir kural tabanı oluşturulması, bir çok parametrenin ayarlanma ihtiyacı ve her giriş değişkeni için kural tabanının artması gibi zorlukları vardır [17].

Melez kontrolör ile hem klasik PID kontrolörün avantajlarını hem de bulanık kontrolörün avantajlarını dezavantajlarını ortadan kaldırarak akıllı bir yöntemle birleştirecek bir yapı oluşturulmaktadır.

4.2 Sistemin Genel Yapısı

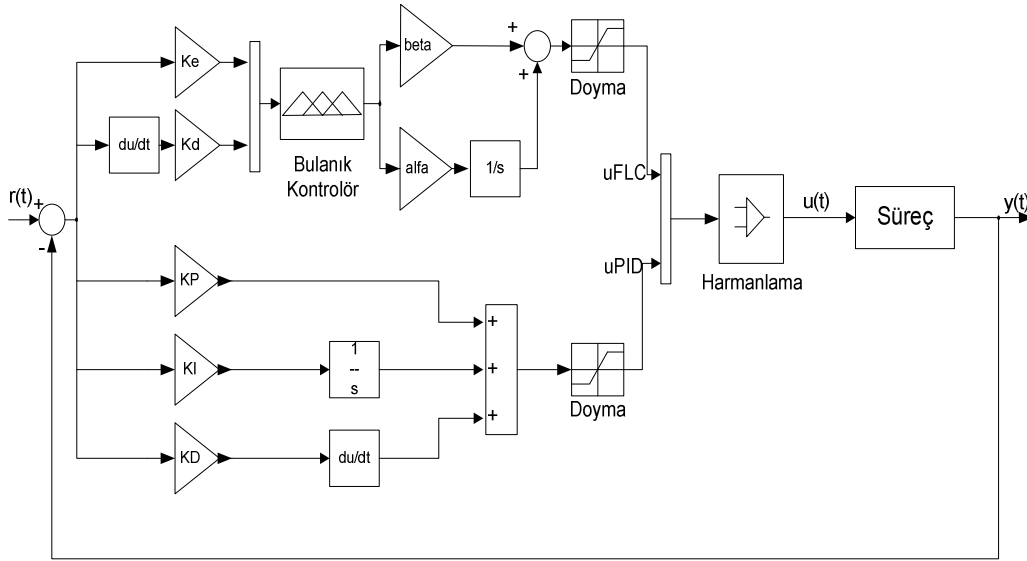
Sistem genel olarak bir klasik PID kontrolör, bir bulanık PID kontrolör (FPID) ve bunların cevaplarını karşılaştırarak yeni bir kontrol işareti üreten ‘Harmanlama’ mekanizmasından oluşmaktadır.



Şekil 4.1 : Kural tabanlı melez kontrolör genel yapısı

Şekil 4.1’de KTMK’nın genel yapısı gösterilmektedir.

Şekil 4.2’de gösterildiği gibi uFLC ve uPID çıkışları bir harmanlama fonksiyonuna girerek yeni bir kontrol işaretinin üretilmesini sağlar. Harmanlama fonksiyonu içerisinde bu girişler hatanın bir fonksiyonu ile çarpılarak yeni kontrol işaretinin üretilmesini sağlarlar. Bu işarete melez kontrol işareti denilmektedir.



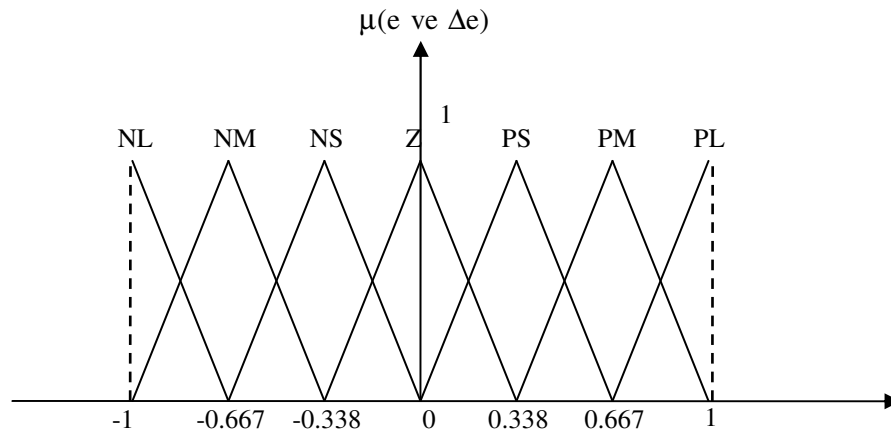
Şekil 4.2 : Kural tabanlı melez kontrolör iç yapısı.

4.3 Bulanık Kontrolör

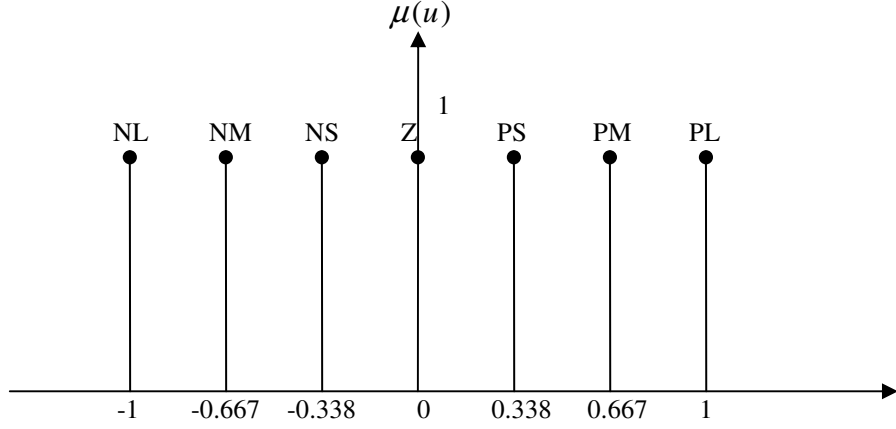
Bulanık Kontrolör olarak ‘İki Girişli – Tek kural tabanlı’ bir bulanık PID Kontrolör kullanılmıştır. Giriş (e ve Δe) ve Çıkış (u) değişkenleri $[-1,1]$ aralığında ölçeklendirilmiştir.

Girişler ve çıkış için yedişer üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Girişler e ve Δe için üyelik fonksiyonları Şekil 4.3’te ve çıkış u için kullanılan üyelik fonksiyonları ise Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

Üyelik fonksiyonları NL (negatif büyük), NM (negatif orta), NS (negatif küçük), Z (sıfır), PS (pozitif küçük), PM (pozitif orta), PL (pozitif büyük) olarak isimlendirilmiştir. Tekli (singleton) çıkış ve yedişer üyelik fonksiyonlu girişler için yalnızca 49 kurallı bir bulanık kontrolör yapısı bir çok uygulama için gerçekleşmesi kolay ve yeterli çözünürlüklü bir yapıdır. Hata ve hatanın değişimi girişleri için kullanılan en genel haldeki bulanık kontrolör kural tabanı Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.3 : e ve Δe için üyelik fonksiyonları.



Şekil 4.4 : u için üyelik fonksiyonları.

Kural tabanı (7x7) 49 adet kuraldan oluşmaktadır ve kurallar aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.1 : En genel bulanık kontrolör kural tabanı.

$\Delta e / e$	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PL	Z	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PM	NS	Z	PS	PM	PL	PL	PL
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PL	PL
Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NS	NL	NL	NM	NS	Z	PS	PM
NM	NL	NL	NL	NM	NS	Z	PS
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	Z

4.4 Klasik PID Kontrolör

Yapıda kullanılan klasik PID transfer fonksiyonu;

$$G_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (4.7)$$

şeklindedir.

4.5 Harmanlama Mekanizması

Yeni kontrol işaretinin üretildiği bloktur. Harmanlama bloğu içerisinde Bulanık ve Klasik kontrolör çıkışları karşılaştırılarak hatanın bir fonksiyonu $f(e)$ ile yeni kontrol işareti üretilir. Çeşitli durumlar da göz önüne alınarak harmanlama mekanizmasına akıllı özellikler getirilmiştir.

4.5.1 Harmanlama mekanizması özellikleri

Harmanlama mekanizmasında yeni kontrol işaretinin üretilmesi için hangi kontrol işaretinin baskın olarak rol oynayacağı belirlenir. Başlangıçta hızlı cevap veren kontrol işareti baskın olacakken, daha sonra hatanın durumuna bağlı olarak her iki kontrolör çıkışı da belirli oranda yeni kontrol işaretine dahil ederek daha iyi bir kontrol işareti oluşturur. Sistem ve kontrol parametrelerine bağlı olarak hızlı yükselen kontrol işaretini üreten kontrolör değişmektedir.

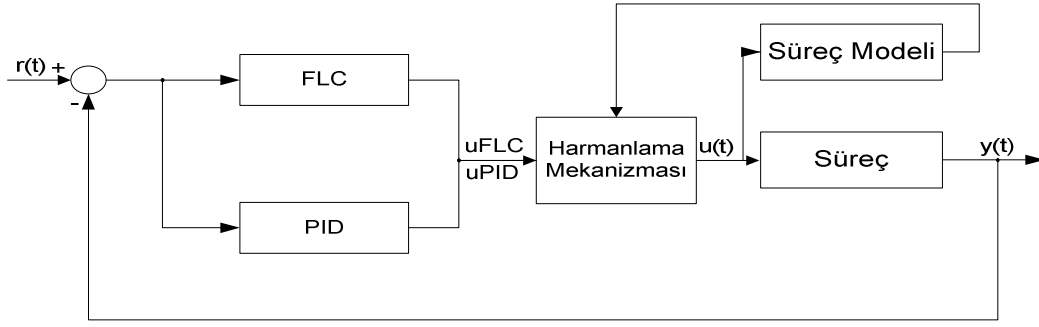
Yüksek performansa sahip bir kontrolörün hızlı sistem cevabı üretmesi beklenmektedir. Bu amaçla harmanlama mekanizmasında $f(e)$ ve $1-f(e)$ ağırlık çarpanı fonksiyonlarından büyük ‘ağırlık çarpanı’ üreten, daha hızlı cevap veren bulanık PID ya da klasik PID çıkışlarından biriyle, küçük ‘ağırlık çarpanı’ üreten fonksiyon ise daha yavaş cevap veren bulanık PID ya da klasik PID çıkışlarından biriyle çarpılır. Bu fonksiyonlar, her iki kontrolörün yeni melez kontrol işaretindeki katılım oranlarını belirler.

Ağırlık çarpanı fonksiyonu olarak hataya bağlı olarak birçok farklı fonksiyon seçilebilmektedir [18]. Bu çalışmada ağırlık çarpanı fonksiyonu olarak hatanın mutlak değerinin karesi e^2 seçilmiştir.

Hata değeri 1 iken yani mutlak hata değeri maksimumken, melez kontrolör çıkışı tamamen hızlı yükselen kontrol işareti gibi davranır. Çünkü tam ters biçimde yavaş yükselen kontrol işareti 0 ile çarpılacaktır. Böylece sistem cevabının hızlı olması sağlanmıştır. Hata değeri yüksek olduğu sürece hızlı yükselen kontrol işaretinin kontrolör çıkışında etkisi yüksek olacaktır. Fakat hızlı yükselen kontrol işareti aynı zamanda aşım neden olacağı için, hata azaldıkça anahtarlama fonksiyonu ile diğer kontrol işaretine göre daha yavaş yükselen kontrol işareti gibi davranacaktır. Böylece hem kısa bir yükselme zamanına sahip hem de çok düşük aşım ya da aşımsız bir cevap elde edilerek kısa sürede istenilen referans işarete yaklaşacaktır.

4.6 Geliştirilmiş Melez Kontrolör

Referans değişimlerinde mekanizma içerisindeki algı yöntemi ile referans – bozucu ayrımı yapılmaktadır. Referans değişimlerinde harmanlama yeniden yapılırken, bozucu olması durumunda hızlı olan kontrolörü takip etmesi istenmiştir. Şekil 4.5’te geliştirilmiş melez kontrolörün şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Geliştirilmiş Melez kontrolör genel yapısı.

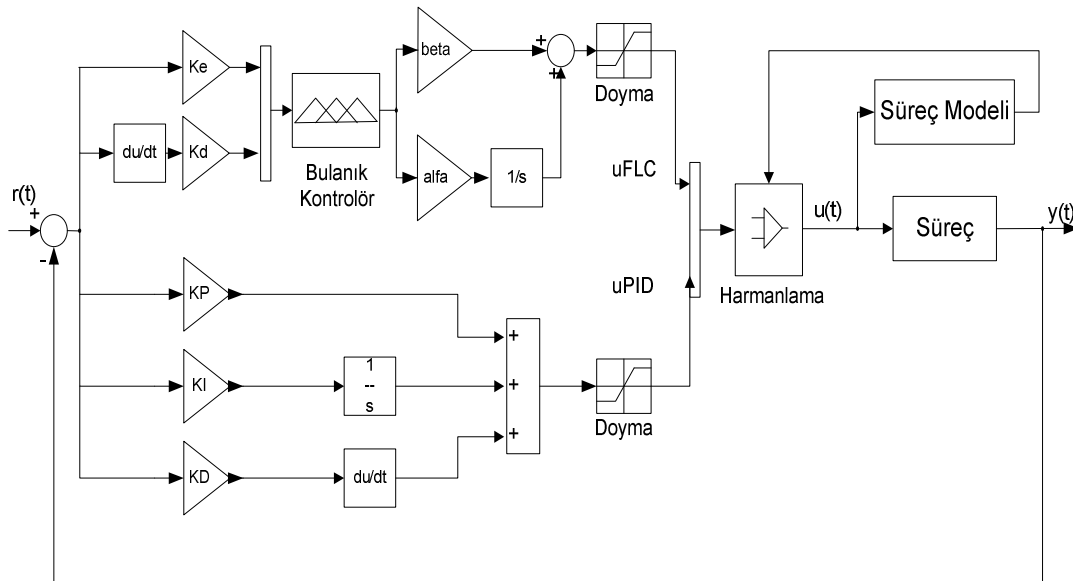
Harmanlama sırasında başlangıçta hızlı olan kontrolörün kontrol işareti büyük harmanlama fonksiyonuyla çarpılmıştır. Hataya bağlı olan bu değer hata azaldıkça azalacağından o kontrolörün etkisi de yeni kontrol işaretinde azalacaktır.

Harmanlama fonksiyonu $f(e) = e^2$ şeklinde seçilmiştir. Fakat hata referansın belirli bir değerinden daha küçükse harmanlama işareti anahtarlanarak daha büyük bir değer üreten $f(e) = 5|e|$ fonksiyonuna geçilir. Böylece küçük de olsa hata algılandığında bu hatayı bir an önce sıfırlayacak kontrol işareti üretilebilecektir.

Melez kontrolör kontrol işareti ise (4.8)'deki gibi hesaplanacaktır.

$$u = upid_new + ufuzz_new \quad (4.8)$$

Burada upid_new ve ufuz_new değerleri harmanlama fonksiyonu ile çarpılmış yeni değerler olup bu değerler oranıyla yeni kontrol işaretinde yer alacaklardır.

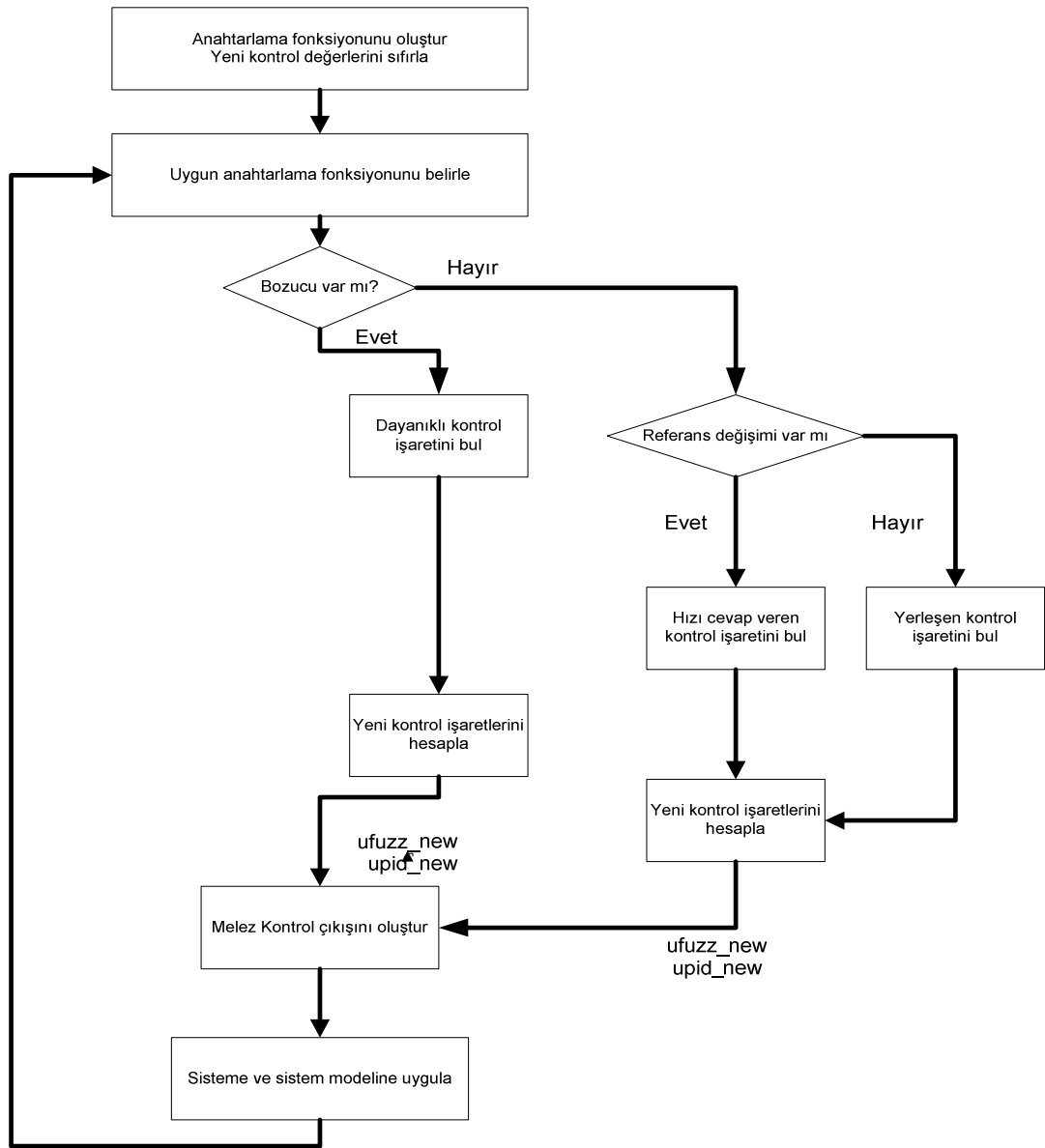


Şekil 4.6 : Geliştirilmiş Melez kontrolör iç yapısı.

Süreç modeli ise sistem girişindeki herhangi bir değişimin referanstaki değişimden mi yoksa herhangi bir bozucu yüzünden mi gerçekleştiğini algılamak için kullanılmıştır. Böylece referans değişimlerinde hızlı olan kontrol işareti baskın olacakken, bozucu altında az agresif olan kontrol işaretinin baskın olması sağlanmıştır.

4.6.1 Harmanlama algoritması

Şekil 4.7’de harmanlama mekanizması içinde çalıştırılarak karışım oranlarına karar veren algoritma bulunmaktadır.



Şekil 4.7 : Harmanlama akış diyagramı

5. BULANIK ve KLASİK PID KONTROLÖRLERİ İLE KURAL TABANLI MELEZ YAPI UYGULAMALARI

Bu bölümde, bir önceki bölümde tasarlanan KTMK kontrolör kullanılarak çeşitli sistemler için benzetim çalışmaları ve sonuçları sunulacaktır. Benzetim çalışmaları sonucunda görülmüştür ki, KTMK kontrolör ile sistem cevabı, hem Klasik PID kontrolör hem de Bulanık PID kontrolör sistem cevaplarından daha performanslıdır.

5.1 Benzetim Çalışmaları

5.1.1 İkinci dereceden ölü zamanlı bir sistem için benzetim çalışması

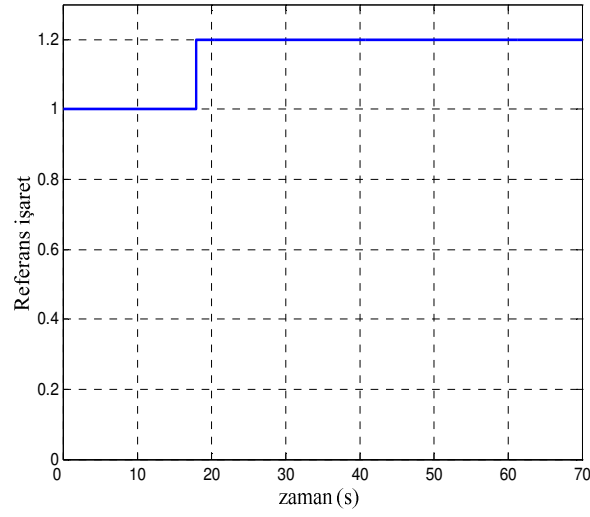
Benzetimde kullanılacak ikinci dereceden ölü zamanlı sistem $G_1(s)$ 'in transfer fonksiyonu (5.1)'de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{1}{s^2+3s+1} e^{-0.2s} \quad (5.1)$$

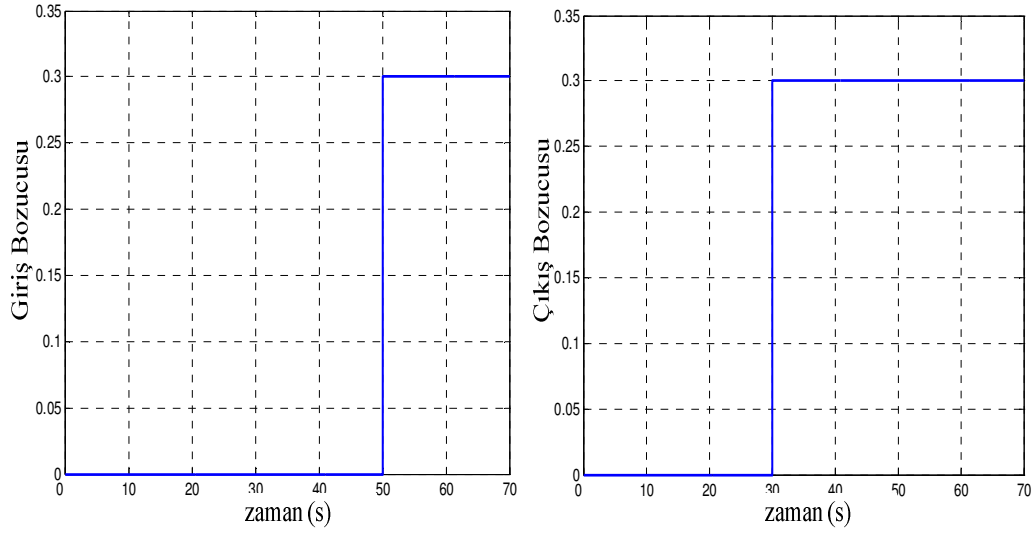
Benzetim süresi 70 saniye olarak alınmış ve sisteme referans işaret olarak Şekil 5.1'de gösterildiği gibi önce 1 verilmiş daha sonra 18. saniyede referans işaret 1.2'ye çıkartılmıştır. Sistemi biraz daha zorlamak için Şekil 5.2'de gösterildiği gibi 50. saniyede 0.3 büyüklüğünde bir giriş bozucusu ve 40. saniyede 0.3 büyüklüğünde bir çıkış bozucusu uygulanmıştır. Kullanılan kontrolör parametreleri Çizelge 5.1'de belirtilmiştir. Burada PID kontrolör parametreleri aşım yapmayacak şekilde, bulanık kontrolör parametreleri de hızlı sistem cevabı üretecek şekilde aratılmıştır.

Çizelge 5.1 : İkinci dereceden ölü zamanlı sistem için kontrolör parametreleri.

Ke	Kd	alfa	beta	KP	KI	KD
1.89	1.35	1.1	0.1	0.92	0.73	0.11

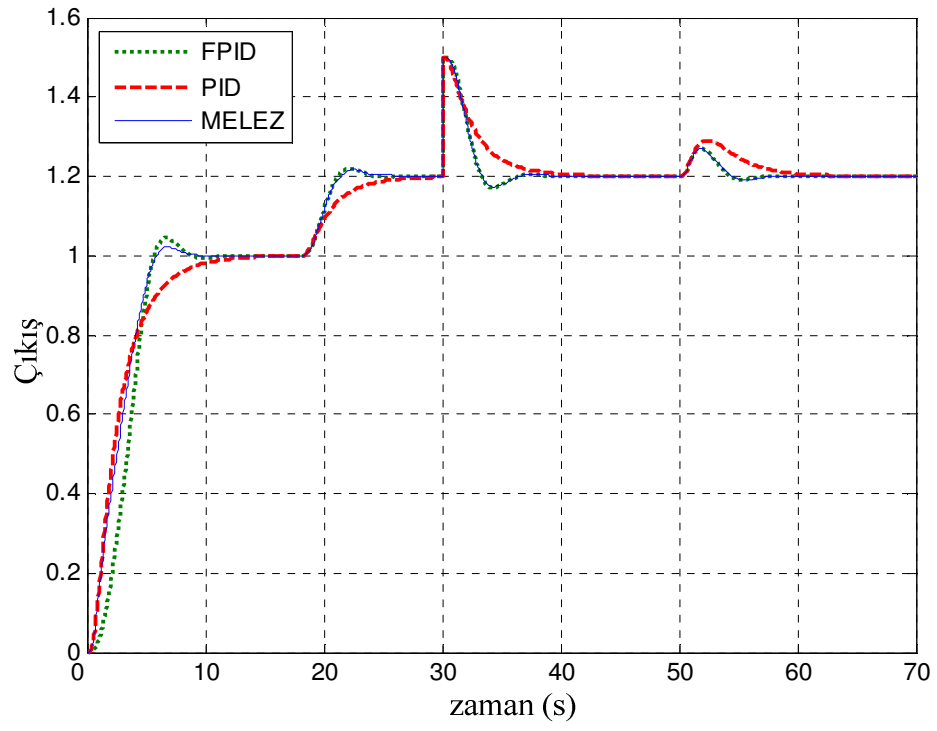


Şekil 5.1 : $G_1(s)$ sistemine uygulanan referans işaret.

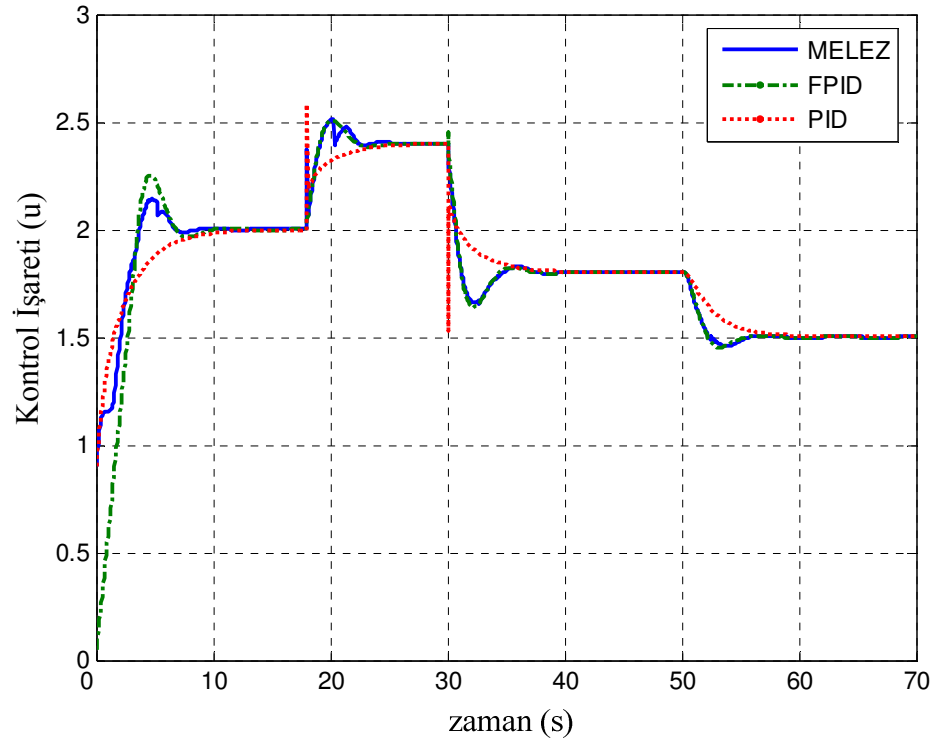


Şekil 5.2 : $G_1(s)$ sistemine uygulanan bozucu işaretler.

(5.1)' de verilen sistem ve Çizelge 5.1'deki kontrolör parametreleri için KTMK, Klasik PID kontrolör (PID) ve Bulanık PID kontrolör (FPID) sistem cevapları Şekil 5.3'te, kontrol işaretleri ise Şekil 5.4'te verilmiştir.

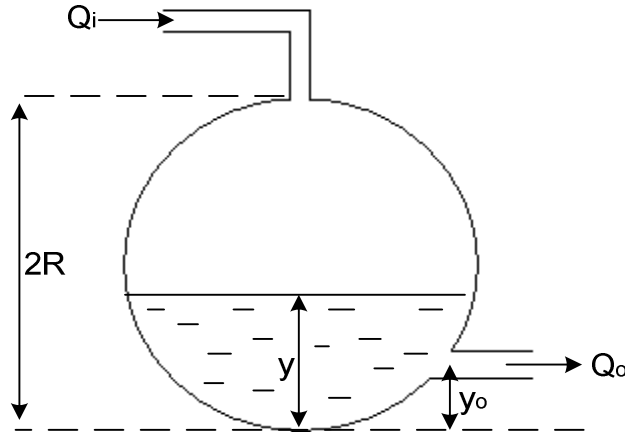


Şekil 5.3 : $G_1(s)$ sisteminin KTMK, PID ve FPID cevapları.



Şekil 5.4 : $G_1(s)$ sisteminde KTMK, PID ve FPID kontrol işaretleri.

5.1.2 Doğrusal olmayan bir sistem için benzetim çalışması



Şekil 5.5 : Küresel tank sistemi.

İkinci benzetim çalışmasında Doğrusal olmayan bir sistem olan küresel tank sisteminde seviye kontrolü yapılmıştır. Küresel tank sistemi Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

Tankın seviye kontrol sistemi ile ilgili diferansiyel denklem şu şekilde verilebilir;

$$Q_i(t - d) - Q_o = [\pi - \pi(R - y)^2] \frac{dy}{dt} \quad (5.2)$$

Burada R küresel tankın yarıçapı, Q_i içeri hacimsel akış oranı ve Q_o çıkışın hacimsel çıkış oranıdır. Q_i girişi ile çıkış y arasındaki zaman farkı d ile gösterilmiştir. Bernoulli denklemine göre çıkış akış oranı ile sıvı seviyesi y birbiriyle şu şekilde ilişkilidir:

$$Q_o = \sqrt{2g(y - y_o)} \quad (5.3)$$

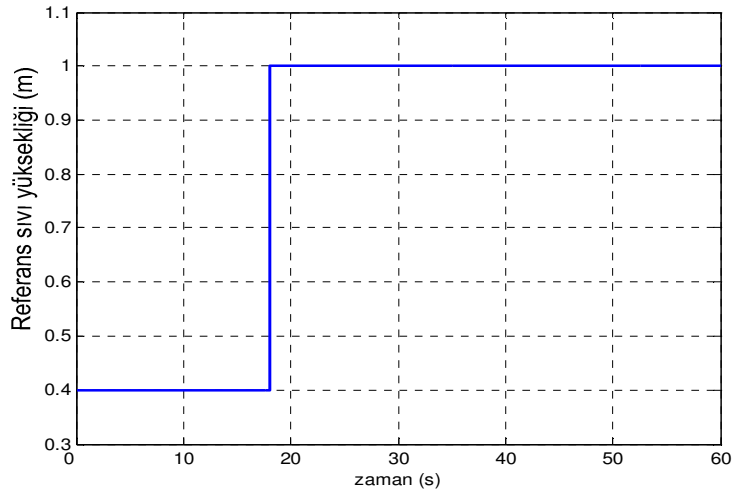
Burada g yer çekimi ivmesi ve y_o çıkıştaki borunun kürenin dibinden yüksekliğidir. Sistem parametreleri benzetimde $R = 1$ m, $d = 0$ s ve $y_o = 0.1$ m olarak kabul edilmiştir. y yüksekliğinin nominal çalışma değeri (kürenin orta noktası) 0.5 m olarak alınmış olunur. Nominal çalışma noktasında y çıkış değeri 1 m'ye yakın olduğu durumdan daha hızlı cevap verecektir [19].

Benzetim süresi 60 saniye olarak alınmış ve sisteme referans işaret olarak Şekil 5.6'da gösterildiği gibi önce 0.4m verilmiş daha sonra 18. saniyede referans işaret

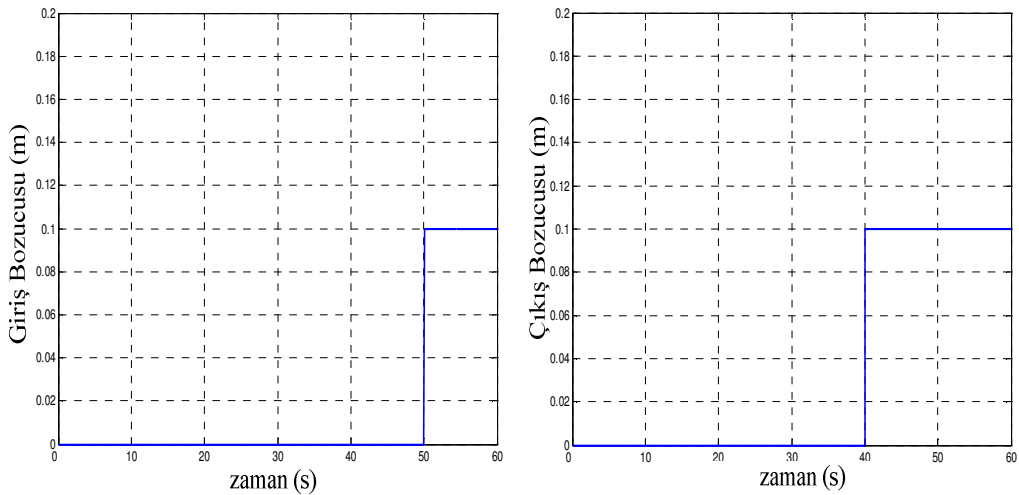
1m'ye çıkartılmıştır. Sistemi biraz daha zorlamak için Şekil 5.7'de gösterildiği gibi 50. saniyede 0.1m büyüklüğünde bir giriş bozucusu ve 40. saniyede 0.1m büyüklüğünde bir çıkış bozucusu uygulanmıştır. Kullanılan kontrol parametreleri Çizelge 5.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.2 : Doğrusal olmayan sistem için kontrolör parametreleri.

Ke	Kd	alfa	beta	KP	KI	KD
4.9	1.4	6	1.4	0.5	2.2	0.05

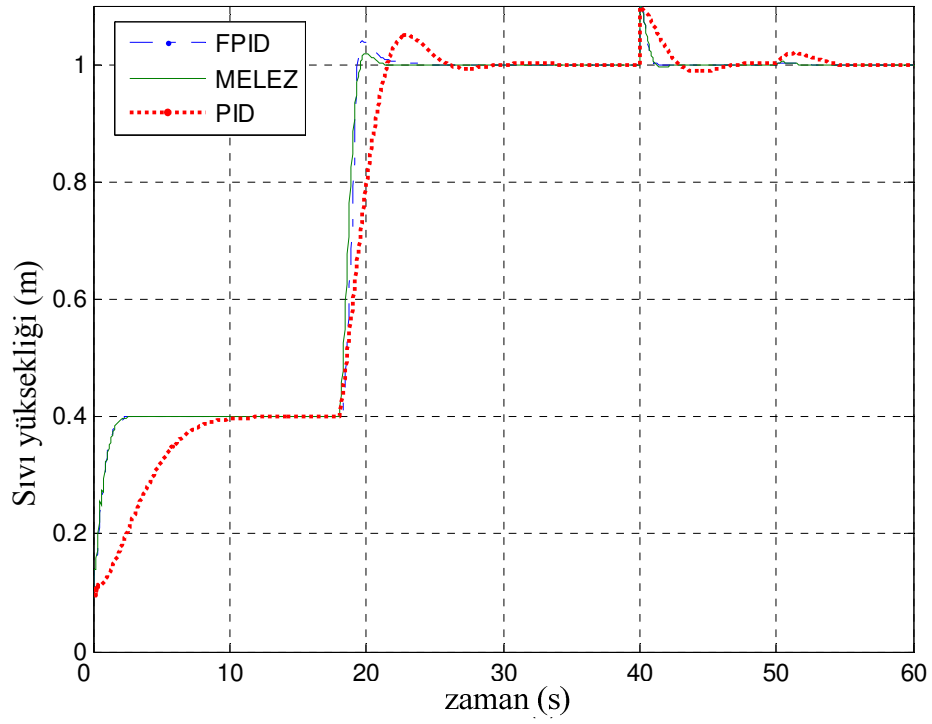


Şekil 5.6 : Doğrusal olmayan sisteme uygulanan referans işaret.

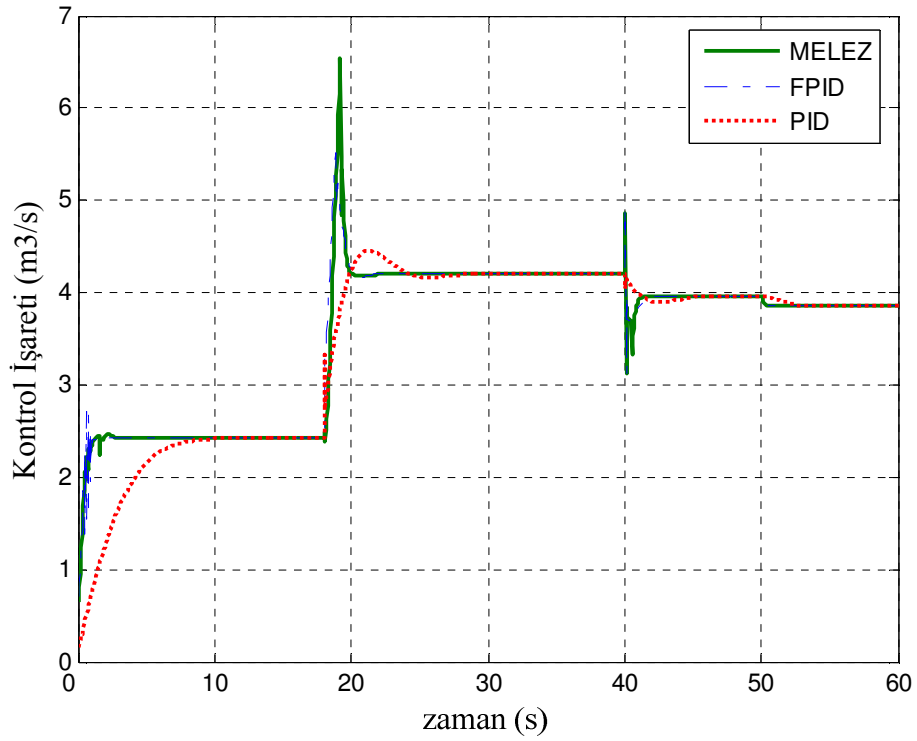


Şekil 5.7 : Doğrusal olmayan sisteme uygulanan bozucu işaretler.

Küresel tank sistemi için Çizelge 5.2'deki kontrolör parametreleri ile KTMK, Klasik PID kontrolör (PID) ve Bulanık PID kontrolör (FPID) sistem cevapları Şekil 5.8'de, kontrol işaretleri ise Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.8 : Doğrusal olmayan sistemin KTMK, PID ve FPID cevapları.



Şekil 5.9 : Sistemde KTMK, PID ve FPID kontrol işaretleri.

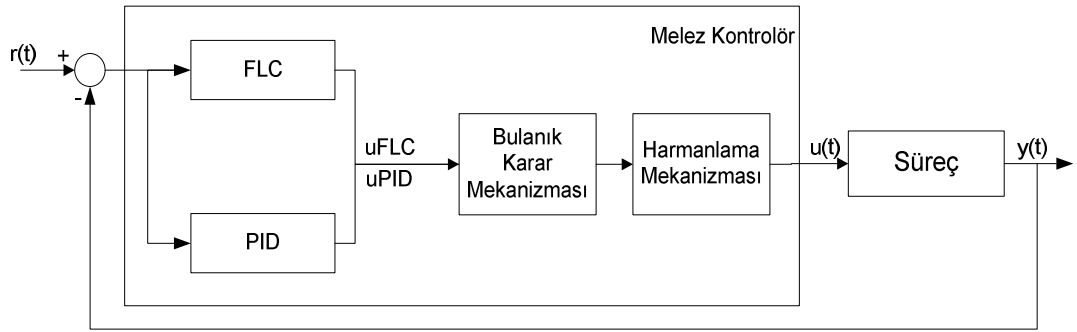
6. BULANIK ve KLASİK PID KONTROLÖRLERİ İLE BULANIK HARMANLAMALI MELEZ YAPI

6.1 Amaç

Yeni kontrol işaretinin bir harmanlama algoritmasıyla değil bulanık kurallarla değerlendirilerek üretildiği yapıdır. Bu yapının oluşturulmasındaki amaç harmanlama mekanizmasındaki karmaşık yapı ve her sistem için optimal harmanlama fonksiyonundaki farklılıkların ortadan kaldırılmak istenmesidir. Dördüncü bölümde geliştirilen algoritma basit kurallar halinde bulanık bir kontrolöre dönüştürülerek daha basit yapıda bir bulanık harmanlamalı melez kontrolör yapısı elde edilmiştir.

6.2 Sistemin Genel Yapısı

Sistem genel olarak bir klasik PID kontrolör, bir bulanık PID kontrolör (FLC) ve bunların cevaplarını karşılaştırarak yeni bir kontrol işareti üreten bulanık bir ‘Harmanlama’ mekanizmasından oluşmaktadır.

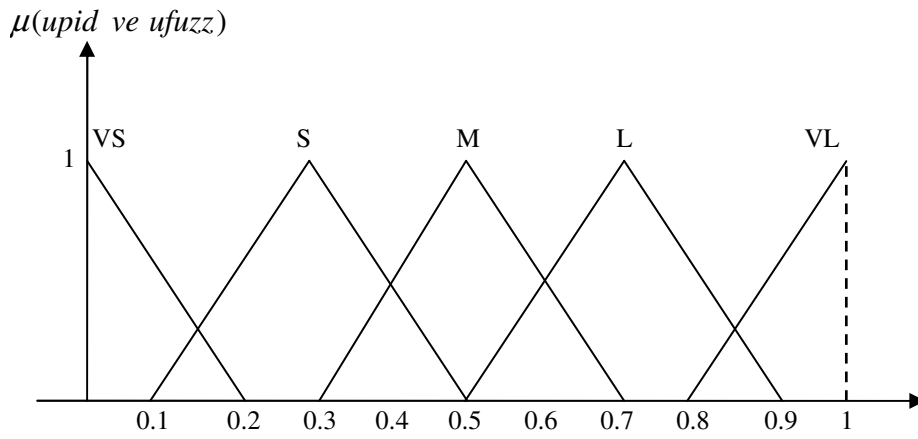


Şekil 6.1 : Bulanık harmanlamalı melez kontrolör genel yapısı.

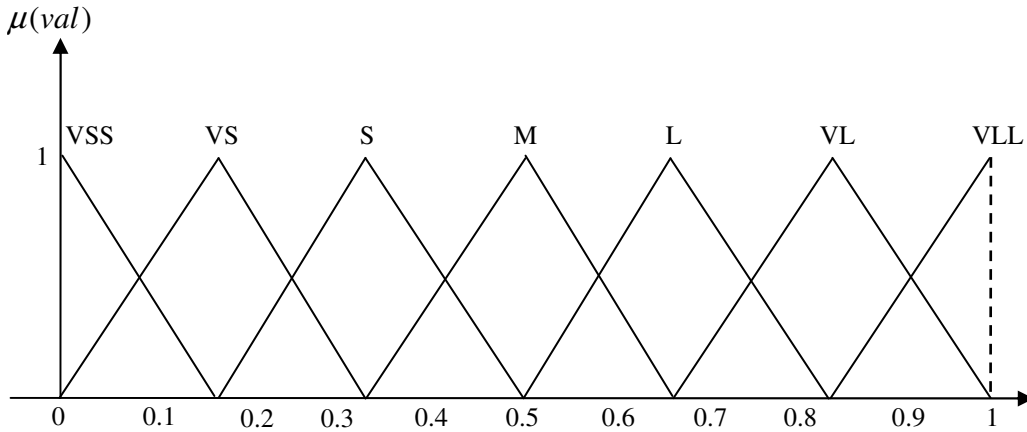
Bulanık Karar Mekanizması olarak ‘İki Girişli – Tek kural tabanlı’ bir bulanık kontrolör kullanılmıştır. Giriş (ufuzz ve upid) ve Çıkış (val) değişkenleri [0,1] aralığında ölçeklendirilmiştir. Bu yüzden Şekil 6.1’ de Bulanık Karar Mekanizması bloğu öncesinde ölçekleme çarpanı kullanılmalıdır.

Girişler ve çıkış için beşer üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Girişler upid ve ufuzz için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 6.2’de, çıkış val için kullanılan üyelik fonksiyonları ise Şekil 6.3’te verilmiştir. Giriş üyelik fonksiyonları VS (sıfıra çok yakın), S (küçük), M (orta), L (büyük), VL (bire çok yakın) olarak isimlendirilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonları ise VSS (sıfıra çok yakın), VS (sıfıra yakın), S (küçük), M (orta), L (büyük), VL (bire yakın), VLL (bire çok yakın) olarak isimlendirilmiştir.

Çıkış, harmanlama mekanizmasında kullanılan harmanlama çarpanı değeri olacaktır. Tekli (singleton) çıkış ve beşer üyelik fonksiyonlu girişler için yalnızca 25 kolay ve yeterli çözünürlüklü bir yapıdır. Bulanık kontrolör çıkış işareti (ufuzz) ve klasik PID kontrolör çıkış işareti (upid) girişleri için kullanılan en genel haldeki bulanık kontrolör kural tabanı Çizelge 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.2 : upid ve ufuzz için üyelik fonksiyonları.



Şekil 6.3 : val için üyelik fonksiyonları.

Kural tabanının ‘sugeno’ değil de ‘mamdani’ tip olarak seçilmesinin nedeni harmanlamanın daha yumuşak olmasını sağlamaktır.

Kural tabanı (5x5) 25 adet kuraldan oluşmaktadır ve kurallar Çizelge 6.1 deki gibi oluşturulmuştur.

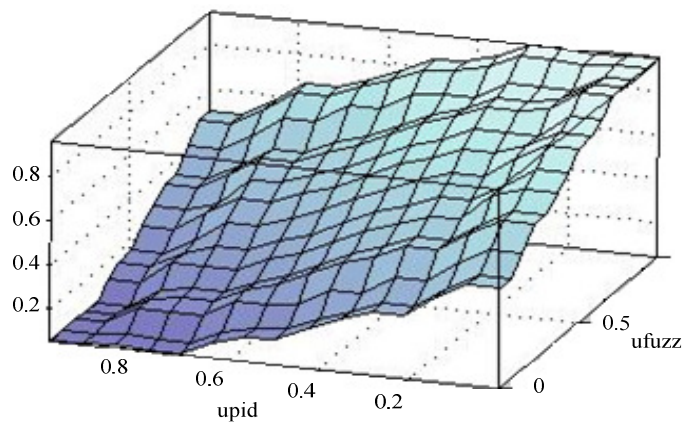
Çizelge 6.1 : Bulanık harmanlama mekanizması kural tabanı.

<i>ufuzz / upid</i>	VL	L	M	S	VS
VL	M	L	VL	VLL	VLL
L	S	M	L	VL	VLL
M	VS	S	M	L	VL
S	VSS	VS	S	M	L
VS	VSS	VSS	VS	S	M

Kurallardan da açıkça anlaşıldığı gibi bir kontrolör çıkışı, diğerinden daha büyük olduğunda büyük değerli harmanlama çarpanı (val) büyük olan kontrolör çıkışıyla çarpılarak yeni kontrol çıkışında diğer kontrolörden daha aktif rol almasını sağlar. Yükselme zamanı boyunca daha çabuk cevap veren kontrolör çıkışı daha büyük harmanlama çarpanı ile çarpılmalıdır. Tasarımda bu yöntemin kullanılmasının nedeni hızlı cevap veren sistem cevabının daha büyük kontrol çıkışına sahip olduğu fikridir.

Kural tabanı da bu düşünceyle oluşturulmuştur. Bulanık PID çıkışı (ufuzz) VL iken, klasik PID çıkışı (upid) VS ise daha büyük harmanlama çarpanı VVL ufuzz ile çarpılmalı böylece yeni kontrol işaretinde daha etkin rol oynaması sağlanmalıdır. Aynı şekilde, ufuzz M iken upid M ise eşit harmanlama için harmanlama çarpanı M değerinde olacaktır.

Bulanık harmanlama kurallarının oluşturduğu bulanık kontrol yüzey şekli Şekil 6.4’te verilmiştir.

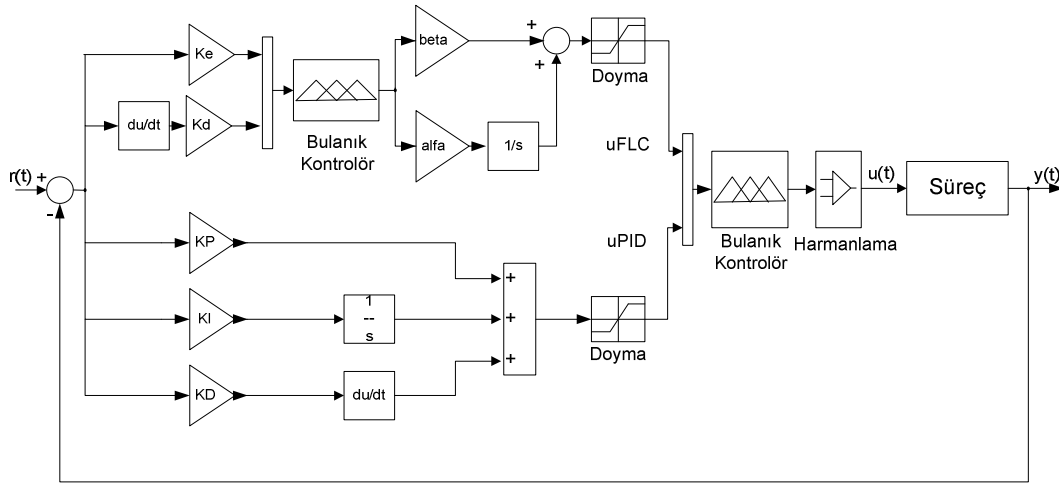


Şekil 6.4 : Bulanık harmanlama yüzey şekli.

Daha önceki bölümlerde sistemin kontrolü için ‘Harmanlama Mekanizması’ nda kullanılan fonksiyonlar yukarıdaki gibi bulanık kurallara dökülerek yeni ‘Bulanık Harmanlamalı Melez Kontrolör’ tasarlanmıştır. Böylece karmaşık yapıdaki karar mekanizması algoritması daha basit ve daha kapsamlı bir hale getirilmiş olur.

Kural tabanına birçok sistem koşulunu karşılayacak yeni kurallar eklemek mümkün olsa da yapının basitliğini korumak açısından bundan kaçınılmıştır.

Tasarlanan kontrolör yapısı Şekil 6.5’de gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : Bulanık harmanlamalı melez kontrolör iç yapısı [20].

7. BULANIK ve KLASİK PID KONTROLÖRLERİ İLE BULANIK HARMANLAMALI MELEZ YAPI UYGULAMALARI

Bu bölümde, bir önceki bölümde tasarlanan BHK kontrolör kullanılarak çeşitli sistemler için benzetim sonuçları sunulacak, daha sonra bir gerçek zaman uygulaması ile sistemin benzetim sonuçları ve gerçek sistem yanıtını incelenecektir. Benzetim çalışmalarından da görülecektir ki bu yapıda tasarlanan melez kontrolör performansı harmanlama algoritmasıyla oluşturulan melez kontrolör performansından daha iyidir.

7.1 Benzetim Çalışmaları

7.1.1 İkinci dereceden ölü zamanlı bir sistem için benzetim çalışması

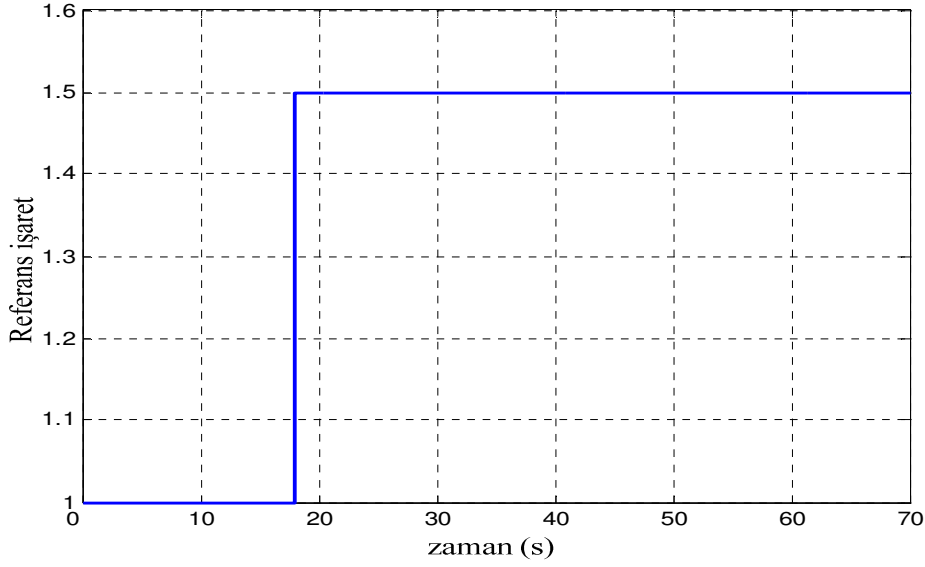
Benzetimde kullanılacak sistem $G_2(s)$ 'in transfer fonksiyonu (7.1)'de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{1}{s^2+3s+1} e^{-0.2s} \quad (7.1)$$

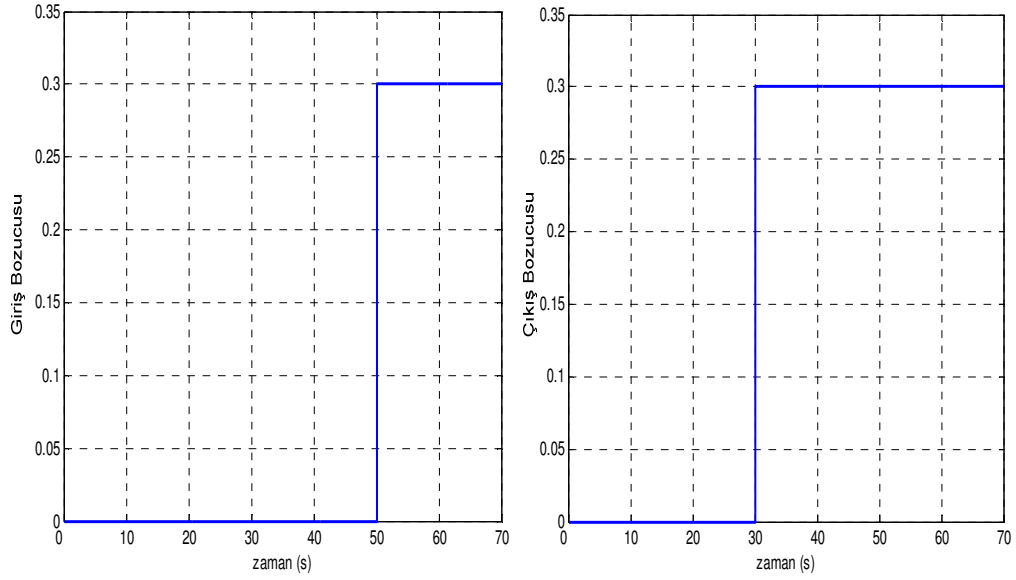
Benzetim süresi 70 saniye olarak alınmış ve sisteme referans işaret olarak Şekil 7.1'de gösterildiği gibi önce 1 verilmiş daha sonra 18. saniyede referans işaret 1.5'e çıkartılmıştır. Sistemi biraz daha zorlamak için Şekil 7.2'de gösterildiği gibi 50. saniyede 0.3 büyüklüğünde bir giriş bozucusu ve 30. saniyede 0.3 büyüklüğünde bir çıkış bozucusu uygulanmıştır. Kullanılan kontrolör parametreleri Çizelge 7.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 7.1 : İkinci dereceden ölü zamanlı sistem için kontrolör parametreleri.

Ke	Kd	alfa	beta	KP	KD	KI
1.89	1.35	1.1	0.1	0.92	0.73	0.11

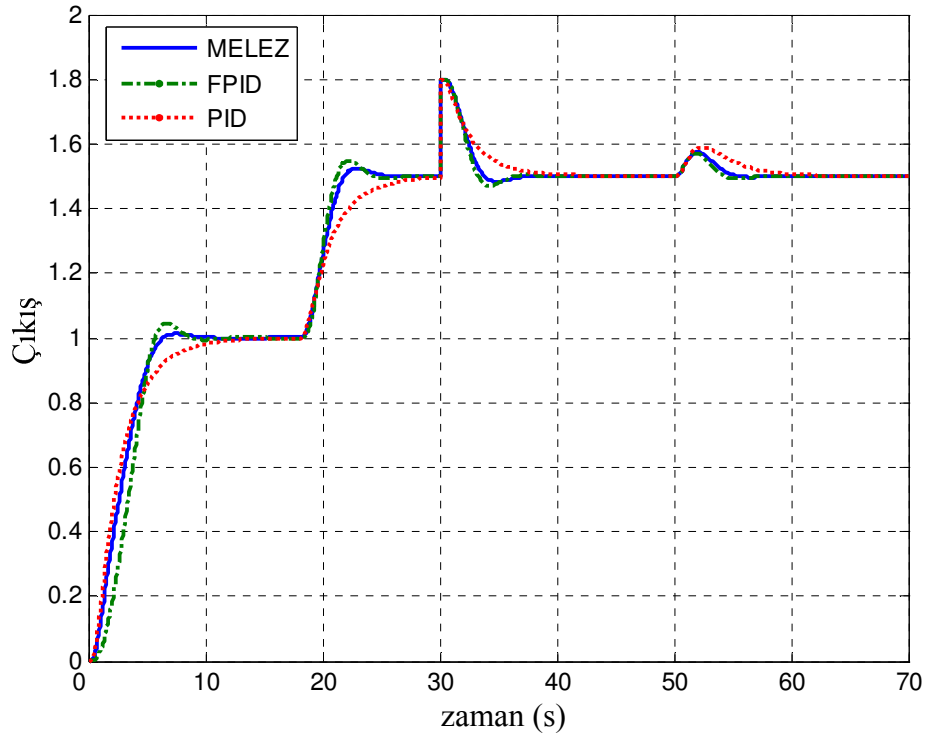


Şekil 7.1 : $G_2(s)$ sistemine uygulanan referans işaret.

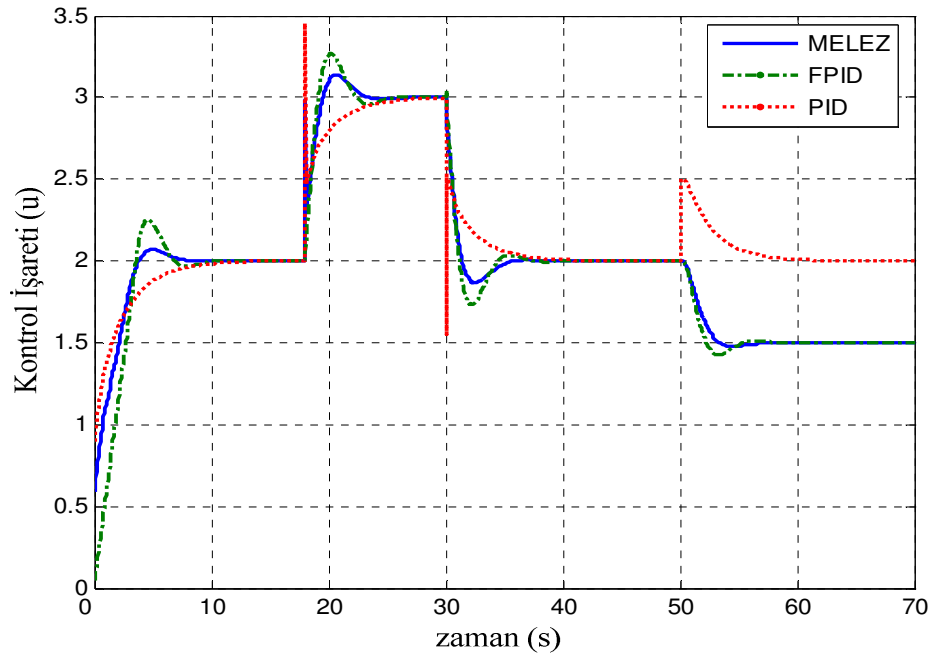


Şekil 7.2 : $G_2(s)$ sistemine uygulanan bozucu işaretler.

(7.1)' de verilen sistem ve Çizelge 7.1'deki kontrolör parametreleri için Bulanık Harmanlamalı Melez Kontrolör (BHKM), Klasik PID kontrolör (PID) ve Bulanık PID kontrolör (FPID) sistem cevapları Şekil 7.3'te, kontrol işaretleri ise Şekil 7.4'te verilmiştir. Dördüncü bölümde aynı sistem için farklı bir melez kontrolör yapısı önerilmişti. Bulanık kurallarla oluşturulan harmanlama mekanizmasıyla oluşturulan melez kontrolörün performansının daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 7.3 : $G_2(s)$ sisteminin BHKM, PID ve FPID cevapları.



Şekil 7.4 : $G_2(s)$ sisteminde BHKM, PID ve FPID kontrol işaretleri.

Şekil 7.4'teki grafikten de görüldüğü gibi iki kontrol işareti farklı oranlarda karıştırılarak yeni kontrol işareti üretilmiştir.

7.1.2 Dördüncü dereceden bir sistem için benzetim çalışması

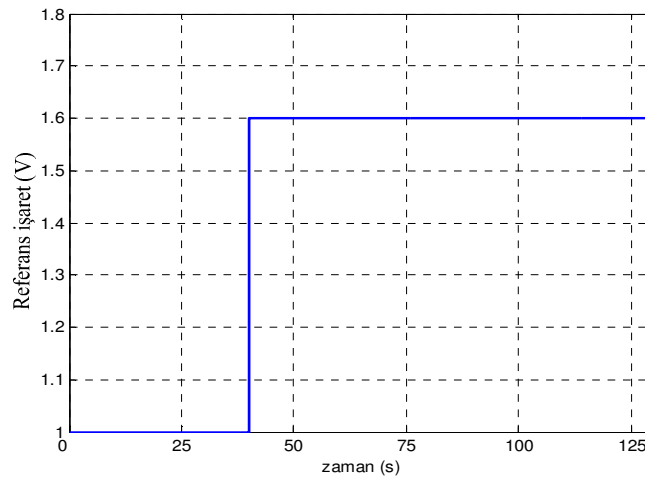
Benzetimde kullanılacak sistem $G_3(s)$ 'in transfer fonksiyonu (7.2)'de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1} \quad (7.2)$$

Benzetim süresi 130 saniye olarak alınmış ve sisteme referans işaret olarak Şekil 7.5'te gösterildiği gibi önce 1 verilmiş daha sonra 40. saniyede referans işaret 1.6'ya çıkartılmıştır. Sistemi biraz daha zorlamak için Şekil 7.6'da gösterildiği gibi 90. saniyede 0.2 büyüklüğünde bir giriş bozucusu ve 75. saniyede 0.2 büyüklüğünde bir çıkış bozucusu uygulanmıştır. Kullanılan kontrolör parametreleri Çizelge 7.2'de belirtilmiştir.

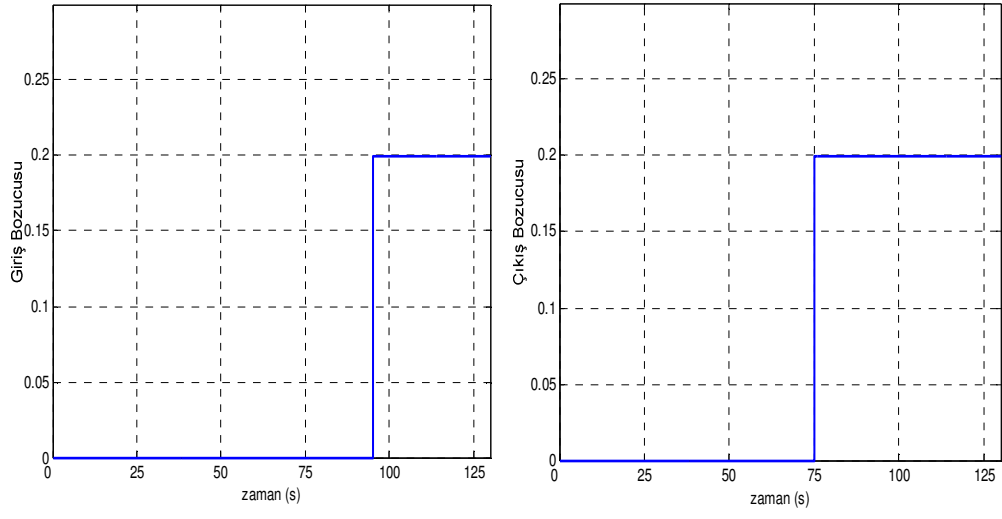
Çizelge 7.2 : Dördüncü dereceden sistem için kontrolör parametreleri.

Ke	Kd	alfa	beta	KP	KI	KD
0.88	0.99	0.85	1.2	0.48	0.4	0.5

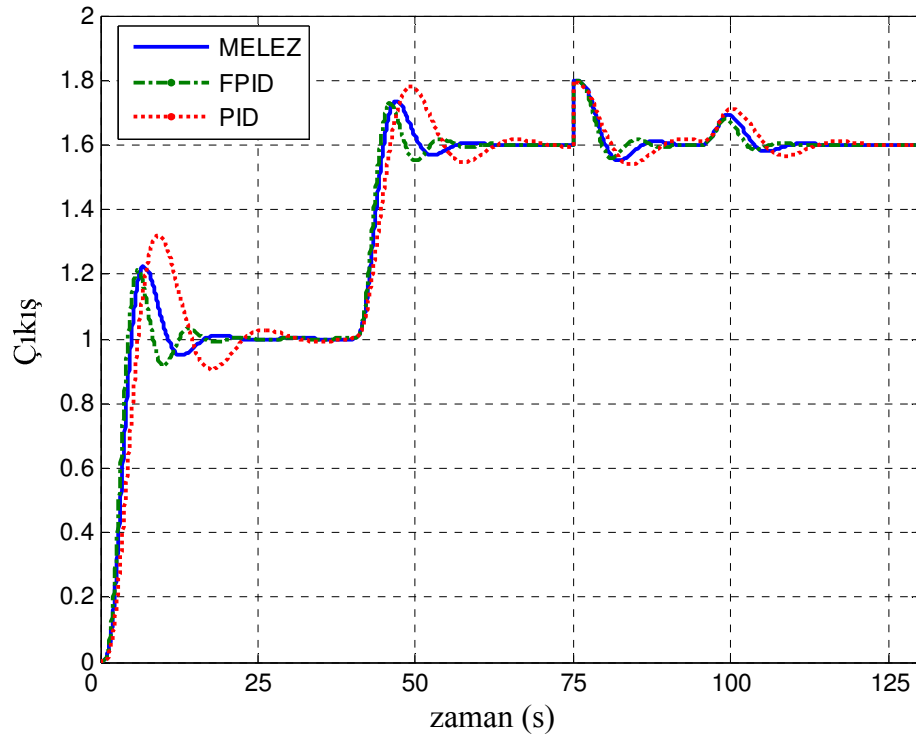


Şekil 7.5 : $G_3(s)$ sistemine uygulanan referans işaret.

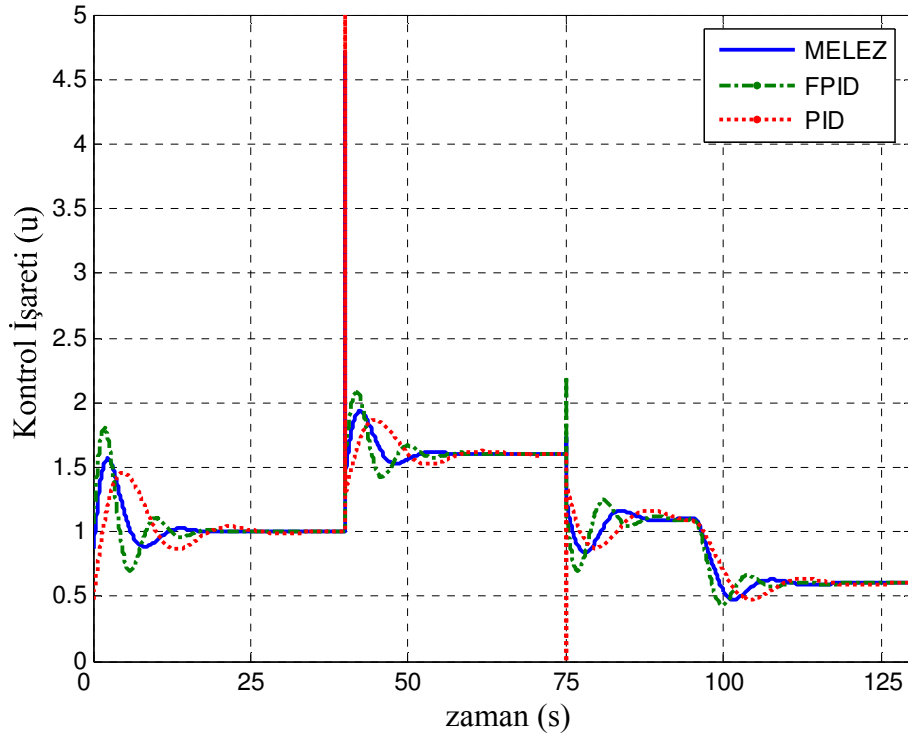
(7.2)' de verilen sistem ve Çizelge 7.2'deki kontrolör parametreleri için Bulanık Harmanlamalı Melez Kontrolör (BHKM), Klasik PID kontrolör (PID) ve Bulanık PID kontrolör (FPID) sistem cevapları Şekil 7.7'de, BHKM kontrol işareti ise Şekil 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.6 : $G_3(s)$ sistemine uygulanan bozucu işaretler.



Şekil 7.7 : $G_3(s)$ sisteminin BHK, PID ve FPID cevapları.



Şekil 7.8 : $G_3(s)$ sisteminde BHKM, PID ve FPID kontrol işaretleri.

Şekil 7.8'deki grafikten de görüldüğü gibi iki kontrol işareti farklı oranlarda karıştırılarak yeni kontrol işareti üretilmiştir.

7.2 Isıl Süreç Sistemi ile Gerçek Zaman Uygulamaları

7.2.1 Isıl süreç sistemi PT-326'nın tanıtılması

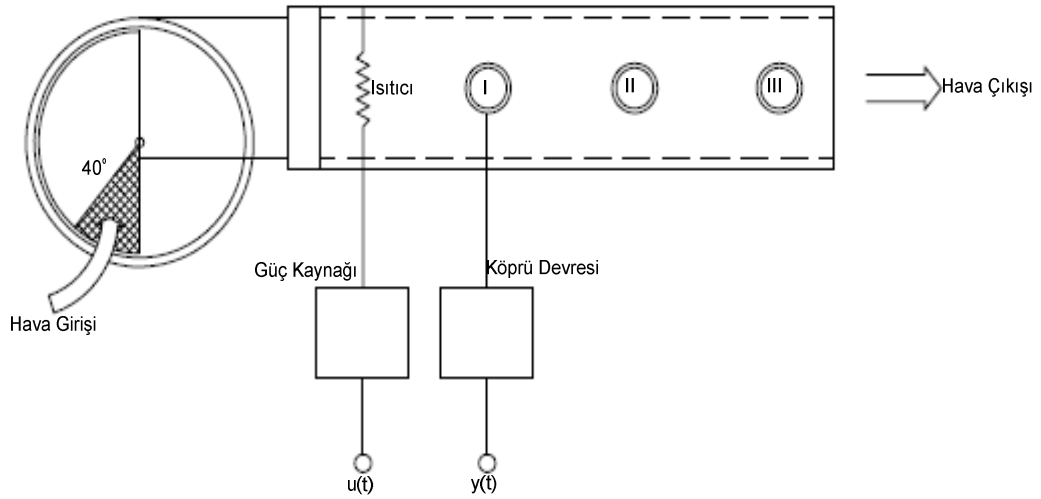
PT326 ısı süreç sistemi, bir süreç sisteminde aranan tüm temel özelliklere sahiptir. Sistemde bulunan fan dışarıdaki havanın tüpün içerisinde burada bulunan ısıtıcı ile ısıtılarak akmasını ve tüpün diğer ucundan dışarıya atılmasını sağlamaktadır. Bu süreçte kontrol işareti ısıtıcının vereceği ısıyı (uygulanacak elektriksel gücü) belirlemektedir. Tüpe hava girişi, fanın üzerinde bulunan kapak ile ayarlanabilmektedir. Süreçteki zaman gecikmesi sıcaklık algılayıcısının tüp üzerindeki konumuna bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada, hava girişi aralığı 40° olarak seçilmiştir.

Birçok makalede gerçek sistem olarak kullanılan PT326 ısı kontrol sistemi [20]'de makalesinde ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Cihaz, oransal kontrol, aç-kapa kontrol veya kontrol işaretinin dışarıdan girilmesine olanak sağlamaktadır. Cihazın temel

özelliği, sıcaklık ölçme elemanı termistörün konumunun değiştirilmesi ile ölü zamanın doğal olarak ayarlanabilmesidir [21].

Değişik zaman gecikmeleri elde etmek amacı ile algılayıcının uzaklığı, ısıtıcıdan 28mm, 140mm ve 280mm olacak şekilde ayarlanabilmektedir. Bu çalışmada, algılayıcı en yakın mesafeye (28mm) yerleştirilerek sistemin minimum zaman gecikmesine sahip (0.2s) olması sağlanmışır. Isıl süreç sistemine ait yapı Şekil 7.9’da verilmiştir.

$u(k)$ sistem girişı, ısıtıcı rezistansı besleyen güç elektroniği devresine uygulanan gerilim, $y(k)$ sistem çıkışı ise basılan havanın sıcaklığını ölçen algılayıcı çıkışıdır.



Şekil 7.9 : Isıl sistem PT326’ya ait yapı.

Kontrol algoritmasının gerçekenmesinde NI PCI-6221 (37-Pin) DAQ board kullanılmışır. Bu board ile 16 bit ve 250 kS/s 16 analog girişı, 16 bit ve 833 kS/s 2 analog çıkış ve 80 MHz 2 adet 32 bit sayıcı/zamanlayıcı özelliklerini sunmaktadır.

PCI-6221 (37-Pin) kartı Matlab/Simulink ile uyumlu bir karttır. Gerekli Simulink blokları ‘Real-Time Windows Target’ kütüphanesinde hazır olarak bulunmaktadır. Kullanılan deney düzeneği Şekil 7.10’da gösterilmiştir.



Şekil 7.10 : Kullanılan deney düzeneği.

7.2.2 Isıl sürecin modellenmesi ve benzetim çalışmaları

Isıl sisteme ‘5’ büyüklüğünde basamak referans işaret uygulanarak sistemin zaman yanıtı incelenmiştir. Buradan sistemin 1.dereceden ölü zamanlı bir sistemin davranışı sergilediği görülmüştür ki transfer fonksiyonu;

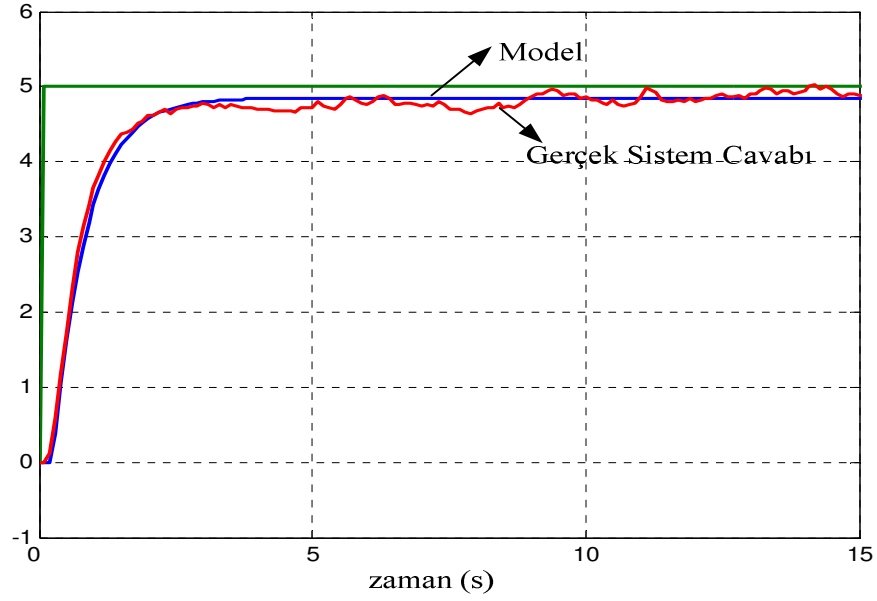
$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad (7.3)$$

Burada K kazanç, T zaman sabiti ve L ölü zamandır.

Sistem tanıma yöntemlerinden biri olan 3 parametre yöntemi uygulanarak sistemin lokal modeli $G_4(s)$ aşağıdaki gibi bulunmuştur;

$$G(s) = \frac{0.97}{0.61s + 1} e^{-0.2s} \quad (7.4)$$

Şekil 7.11’de 5V referans giriş altında gerçek sistem cevabı ve elde edilen modelin cevabı gösterilmektedir.



Şekil 7.11 : Elde edilen model cevabı ile gerçek sistem cevabı.

Bu transfer fonksiyonu öncelikle benzetimlerde kullanılmış daha sonra da tasarlanan melez kontrolör gerçek sisteme uygulanmıştır.

7.2.2.1 Ziegler-Nichols methodu ile belirlenen parametreler ile benzetim çalışması

Ziegler-Nichols methodu ile klasik PID parametreleri belirlendiğinde sistem aşım yapacaktır. Bu şekilde aşımlı bir sistem cevabı melez kontrolör ile hem hızlı hem de daha az aşımlı hale getirilebilir.

$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls}$ şeklinde transfer fonksiyonuna sahip bir sistem için L ölü zaman, K kazanç, τ zaman sabiti olmak üzere $u_c = K_c(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$ şeklindeki bir kontrol çıkışına sahip PID kontrolör için kontrol parametreleri,

$$K_c = \frac{1.2\tau}{KL}, T_i = 2L, T_d = 0.5 L \quad (7.5)$$

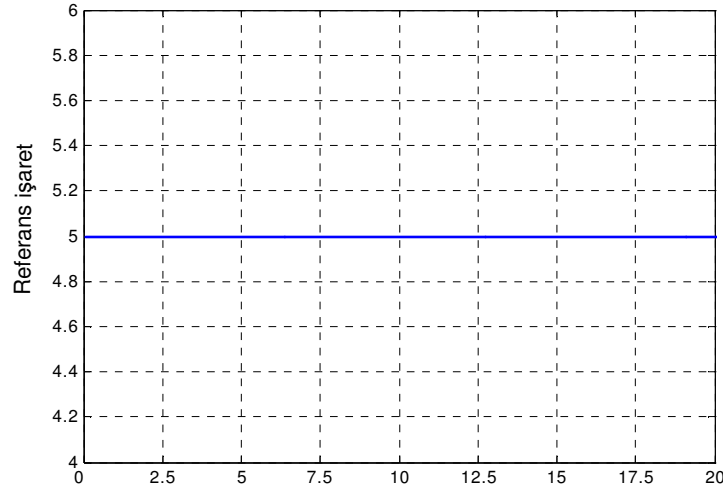
şeklinde belirlenebilir [22].

Değişkenler yerlerine koyulduğunda parametreler $K_c = 3.7732$, $T_i = 0.4$, $T_d = 0.1$ olarak hesaplanır. Benzetim süresi 20 saniye olarak alınmış ve sisteme referans işaret olarak Şekil 7.12’de gösterildiği gibi 5V verilmiştir. Sistemi biraz daha zorlamak için Şekil 7.13’de gösterildiği gibi 15. saniyede 0.5V büyüklüğünde bir giriş bozucusu ve

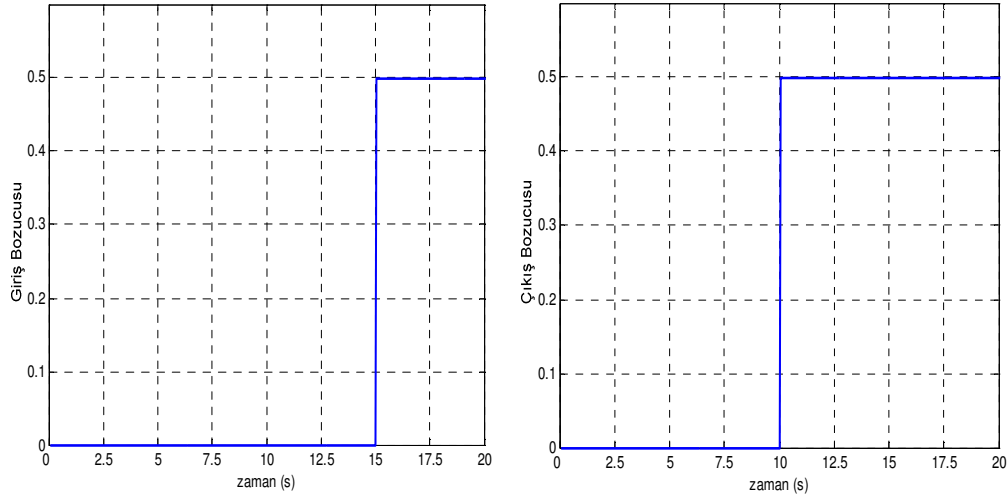
10. saniyede 0.5V büyüklüğünde bir çıkış bozucusu uygulanmıştır. Kullanılan kontrolör parametreleri Çizelge 7.3’de belirtilmiştir.

Çizelge 7.3 : Ziegler-Nichols ile kontrolör parametreleri.

Ke	Kd	alfa	beta	KP	KI	KD
0.2	0.008	7.5	7	3.7732	8.4330	0.31732

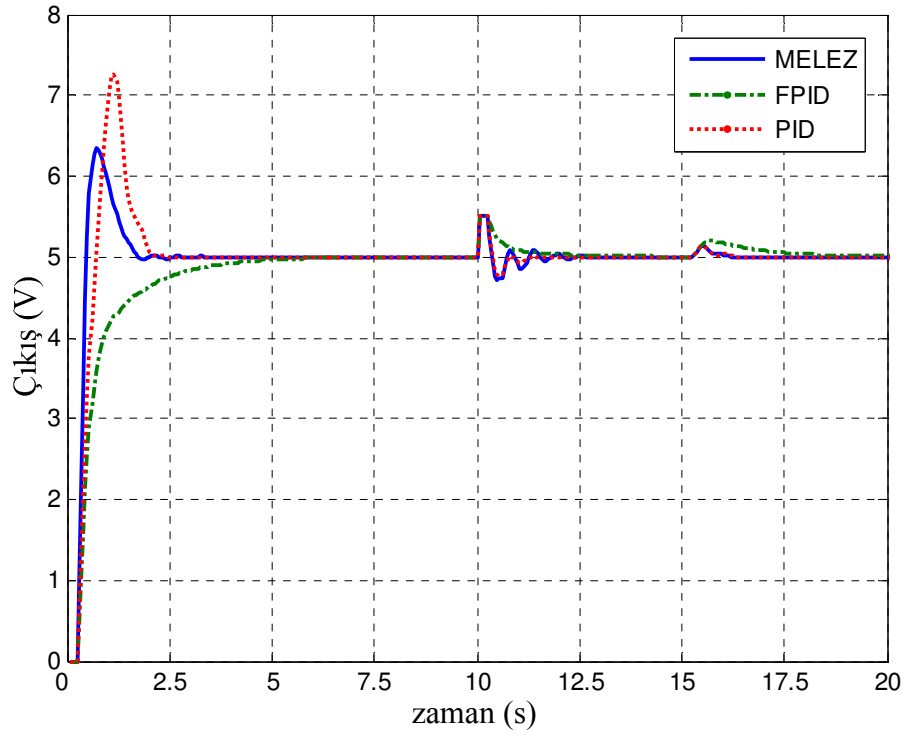


Şekil 7.12 : $G_4(s)$ sistemine uygulanan referans işaret.

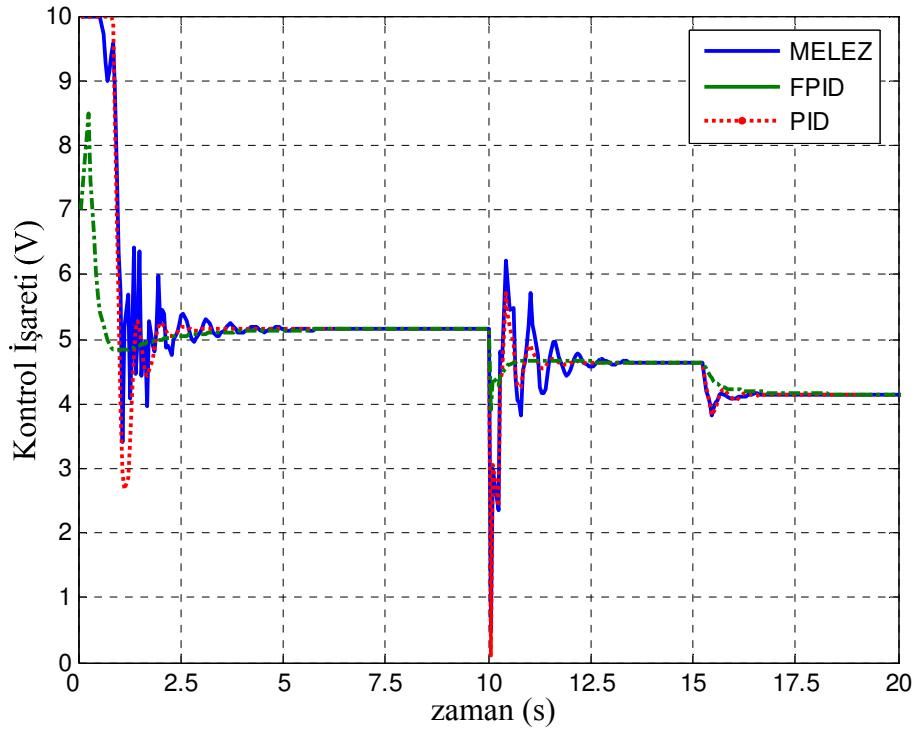


Şekil 7.13 : $G_4(s)$ sistemine uygulanan bozucu işaretler.

(7.4)’ te verilen sistem ve Çizelge 7.3’deki kontrolör parametreleri için Bulanık Harmanlamalı Melez Kontrolör (BHMK), Klasik PID kontrolör (PID) ve Bulanık PID kontrolör (FPID) sistem cevapları Şekil 7.14’de, kontrol işaretleri ise Şekil 7.15’te verilmiştir.



Şekil 7.14 : $G_4(s)$ sisteminin BHKM, PID ve FPID cevapları.



Şekil 7.15 : $G_4(s)$ sisteminde BHKM, PID ve FPID kontrol işaretleri.

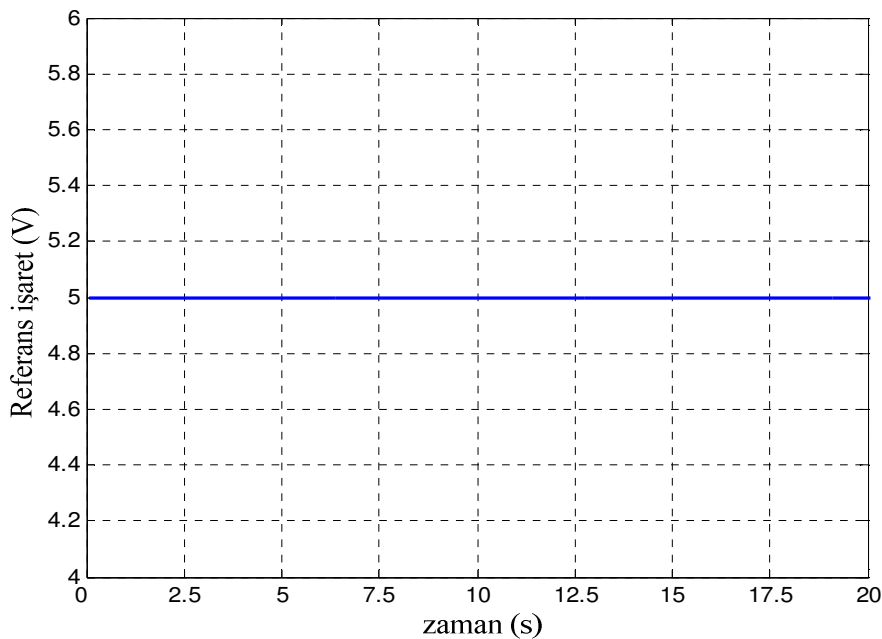
7.2.2.2 Aşım yapmayacak şekilde aratılan parametreler ile benzetim çalışması

Klasik PID katsayıları aşım yapmacak şekilde, bulanık PID parametreleri ise hızlı cevap verecek şekilde aratılmıştır. Melez kontrolör kullanılarak sistem hızlandırılmıştır.

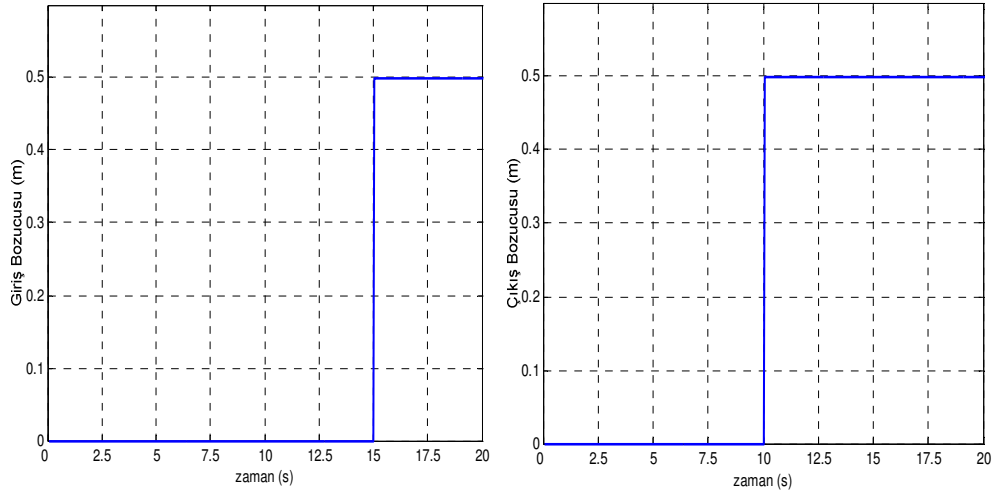
Benzetim süresi 20 saniye olarak alınmış ve sisteme referans işaret olarak Şekil 7.16'da gösterildiği gibi 5V verilmiştir. Sistemi biraz daha zorlamak için Şekil 7.17'de gösterildiği gibi 15. saniyede 0.5V büyüklüğünde bir giriş bozucusu ve 10. saniyede 0.5V büyüklüğünde bir çıkış bozucusu uygulanmıştır. Kullanılan kontrolör parametreleri Çizelge 7.4'te belirtilmiştir.

Çizelge 7.4 : Aşım yapmayacak şekilde belirlenen kontrolör parametreleri.

Ke	Kd	alfa	beta	KP	KI	KD
1.05	0.05	6.9	4.05	1.29	1.4	0.254

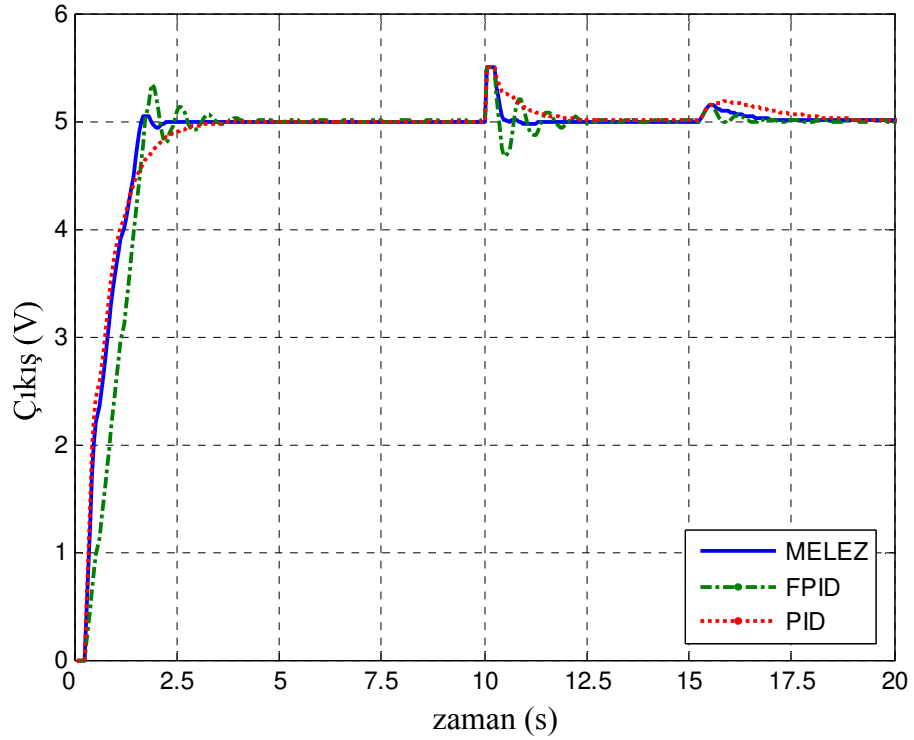


Şekil 7.16 : $G_4(s)$ sisteme uygulanan referans işaret.

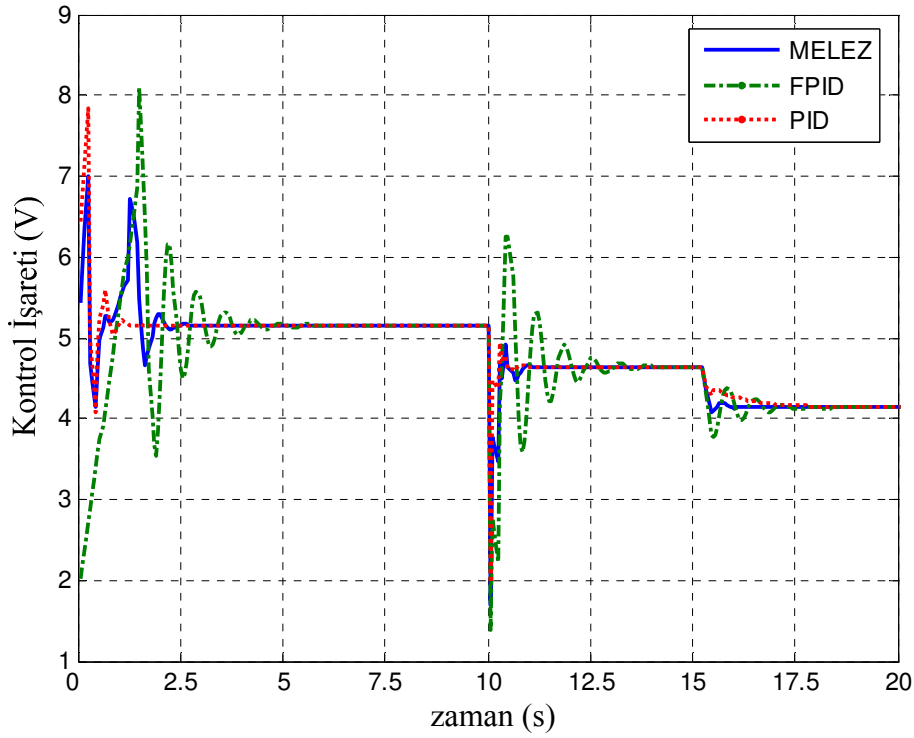


Şekil 7.17 : $G_4(s)$ sisteme uygulanan bozucu işaretler.

(7.4)' te verilen sistem ve Çizelge 7.4'deki kontrolör parametreleri için Bulanık Harmanamalı Melez Kontrolör (BHK), Klasik PID kontrolör (PID) ve Bulanık PID kontrolör (FPID) sistem cevapları Şekil 7.18'de, kontrol işaretleri ise Şekil 7.19'da verilmiştir.



Şekil 7.18 : $G_4(s)$ sisteminin BHK, PID ve FPID cevapları.



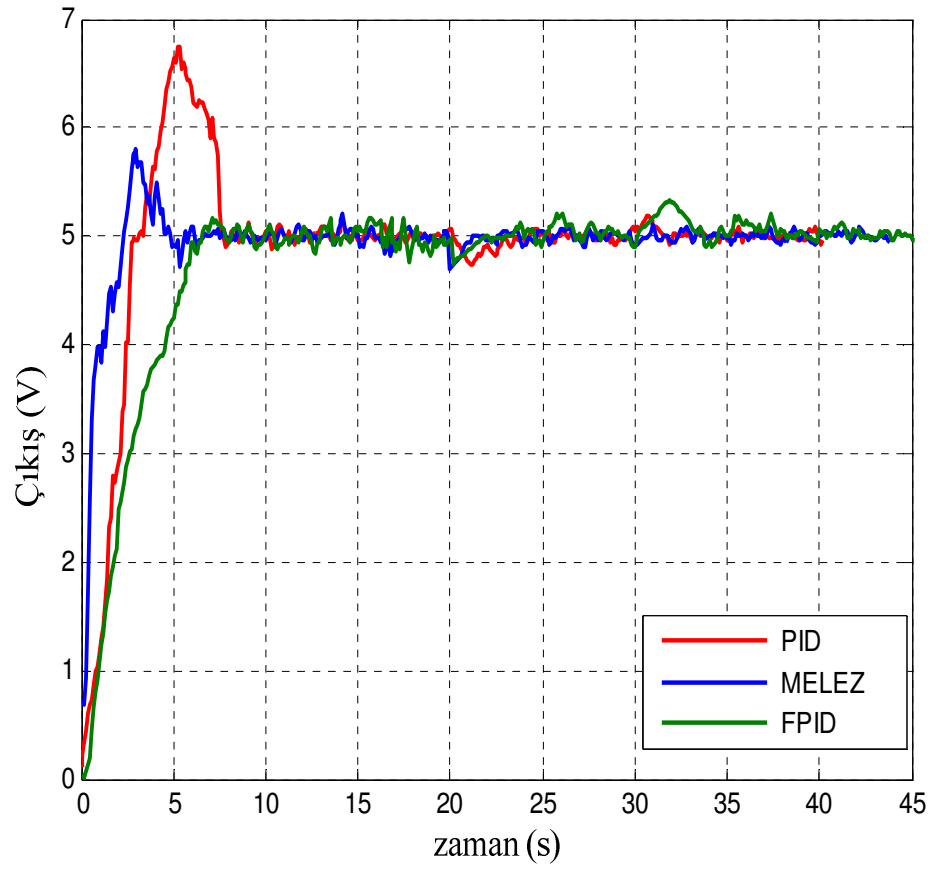
Şekil 7.19 : $G_4(s)$ sisteminde BHK, PID ve FPID kontrol işaretleri.

7.2.3 Bulanık harmanlamalı melez kontrolörün ısıl süreçte uygulanması

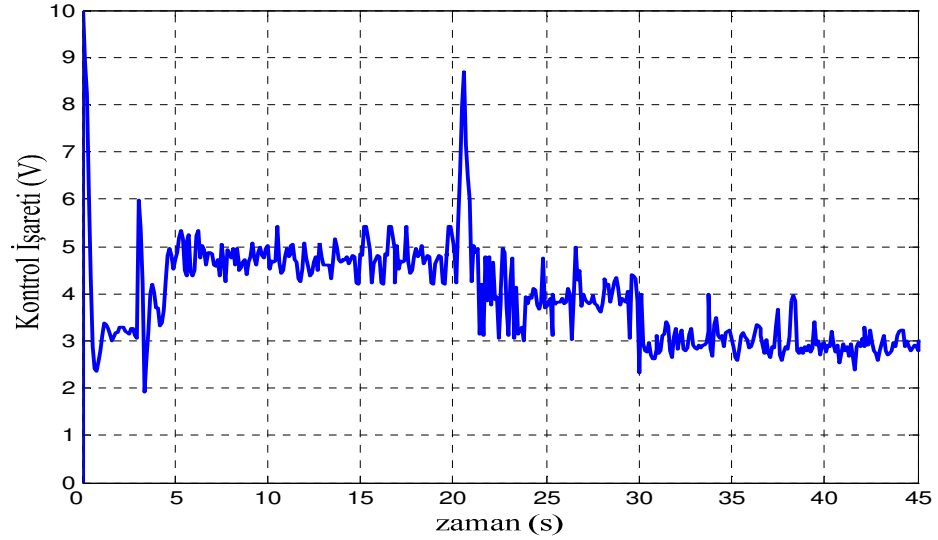
Uygulama sırasında örnekleme zamanı $T_s=0.1s$ olarak seçilmiştir. PID Kontrolör parametreleri önce Ziegler-Nichols methoduyla daha sonraki adımda da aşım yapmayacak şekilde aratılmıştır.

7.2.3.1 Ziegler-Nichols methodu ile belirlenen parametreler ile gerçek zaman uygulaması

Uygulamada Çizelge 7.3'teki parametreler kullanılmıştır. Bozucu davranışlarını da incelemek için 20.saniyede 0.5V'luk bir çıkış bozucusu, ve 30.saniyede 0.5V'luk giriş bozucusu uygulanmıştır. Bulanık Harmanlamalı Melez Kontrolör (BHK), Klasik PID kontrolör (PID) ve Bulanık PID kontrolör (FPID) sistem cevapları Şekil 7.20'de, BHK kontrol işareti ise Şekil 7.21'de verilmiştir.



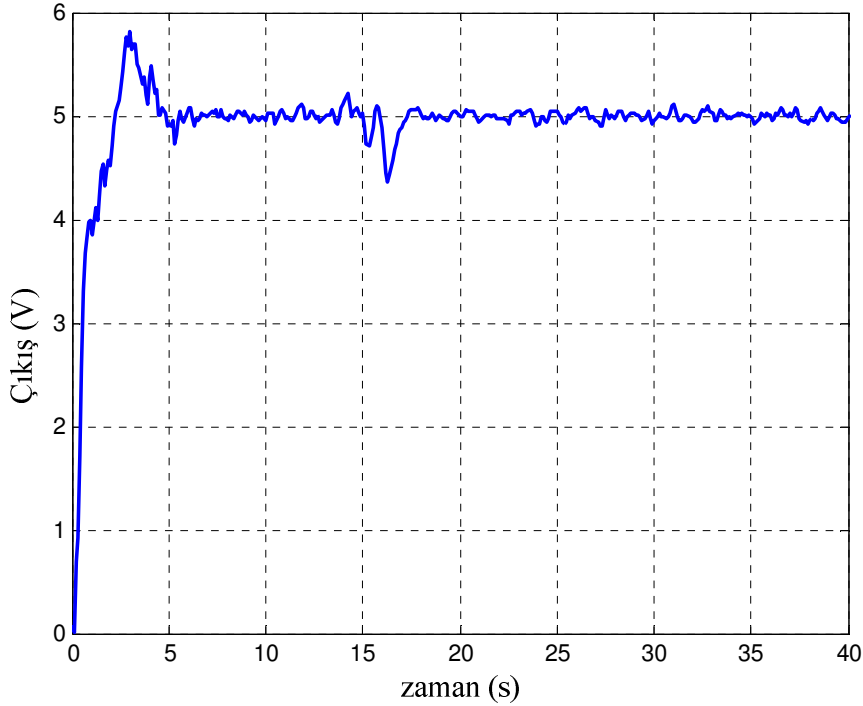
Şekil 7.20 : BHKM, PID ve FPID için reel sistem cevapları.



Şekil 7.21 : BHKM için reel kontrol işareti (Çizelge 7.3' teki parametreler ile).

Sistem çalışması sırasında hava girişi 40° olarak alınmıştır. Sistemin modellemesi de bu hava aralığı değerine göre yapılmıştır. BHKM sistem cevabının hava aralığının değişmesi durumunda değişimini incelemek amacıyla 15.saniyede hava aralığı 50° ye

getirildiğinde elde edilen sistem cevabı Şekil 7.22’de verilmiştir. Bu durumda da BHKM’nın performansının iyi olduğu görülmektedir.

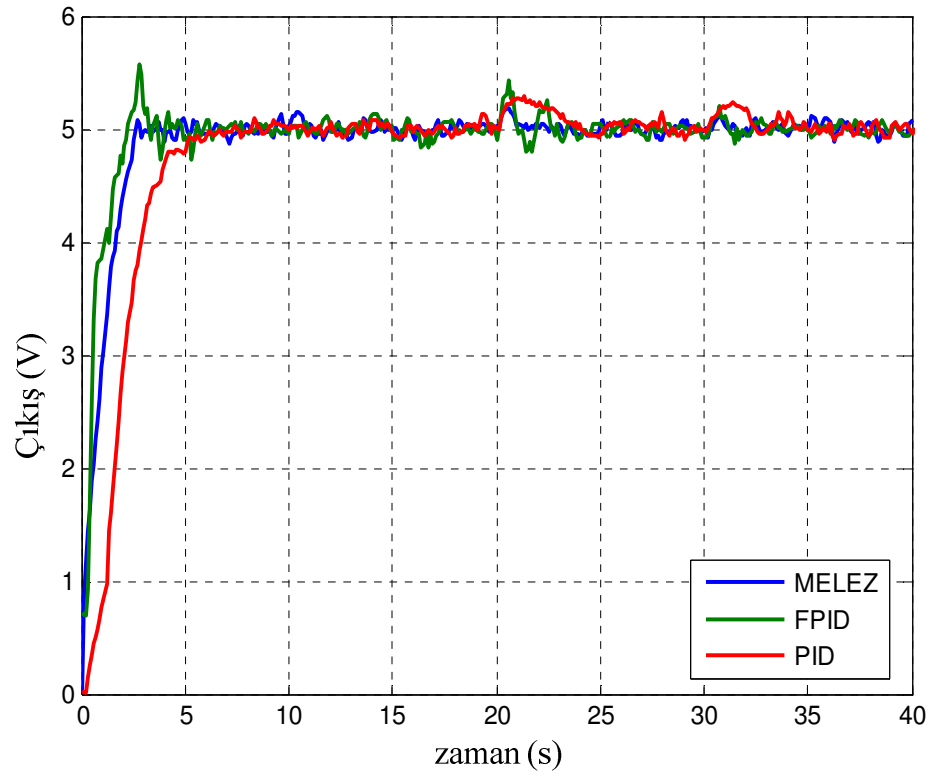


Şekil 7.22 : Model değişimi etkisiyle BHKM sistem cevabı.

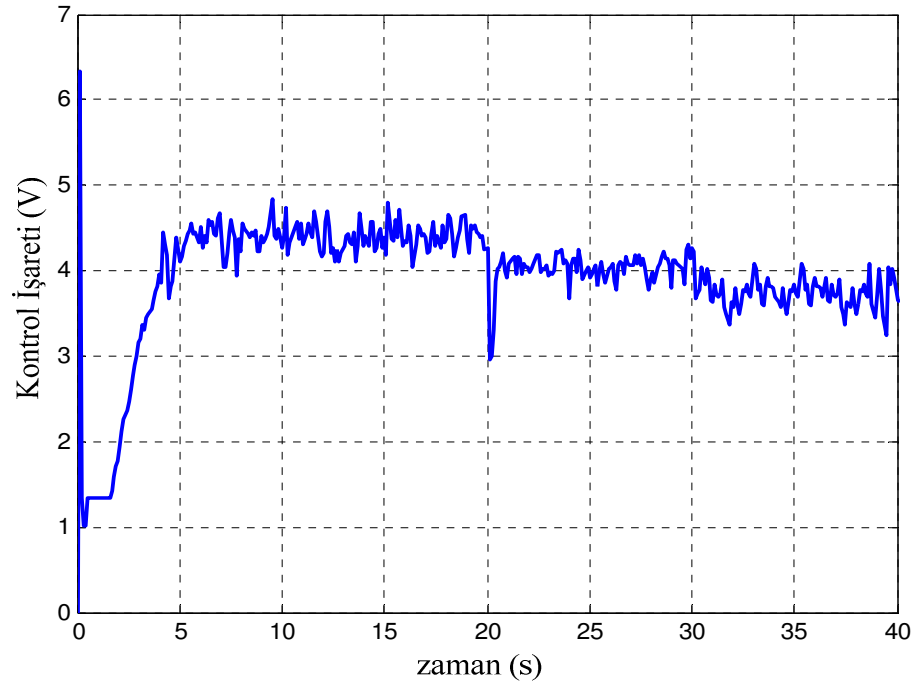
7.2.3.2 Aşım yapmayacak şekilde aratılan parametreler ile gerçek zaman uygulaması

Uygulamada Çizelge 7.4’teki parametreler kullanılmıştır. Bozucu davranışlarını da incelemek için 20.saniyede 0.5V’luk bir çıkış bozucusu, ve 30.saniyede 0.5V’luk giriş bozucusu uygulanmıştır. BHKM, Klasik kontrolör (PID) ve Bulanık PID kontrolör (FPID) sistem cevapları Şekil 7.23’te, BHKM kontrol işareti ise Şekil 7.24’te verilmiştir.

Sonuçlardan da açıkça görülebildiği gibi, kontrolör çıkışlarının harmanlanmasıyla elde edilen melez kontrolör sistem cevabı yapısında bulunan diğer kontrolörlerden hem geçici halde hem de sürekli halde bozucular varken bile daha iyi performans sergilemektedir.



Şekil 7.23 : BHKM, PID ve FPID için reel sistem cevapları.



Şekil 7.24 : BHKM için kontrol işareti (Çizelge 7.4' teki parametreler ile).

8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, endüstride sıkça kullanılan klasik PID kontrolörle bulanık kontrolörlerin avantajlarını birleştiren ve bu iki kontrolörden daha iyi performans sergileyen farklı melez kontrolör yapıları anlatılmıştır. Çalışmada melez kontrolörlerin çalışma prensibi, kontrolör tasarımı, farklı dereceden ölü zamanlı ve ölü zamansız, doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için benzetim çalışmaları ve bir gerçek zaman uygulaması sonuçlarına yer verilmiştir.

Geliştirilen ilk yapı kural tabanlı bir melez kontrolör yapısıdır. Bu yapıda melez kontrolör çıkışı hızlı cevap veren kontrolörün çıkışına yakın cevap verdiği için kısa bir yükselme zamanına sahip olmaktadır. Zamanla azalan hata ile daha yavaş yükselen kontrolör çıkışına yakın çıkış üretileceğinden bu kontrolör gibi davranmaya başlar. Böylece melez kontrolör ile sistem cevabı hem hızlı, hem de az aşımli ya da aşimsiz olacaktır. Bozucular da düşünülerek yapılan tasarım sonucunda giriş bozucusu, çıkış bozucusu ve referans değişimlerini algılayarak yeni kontrol işareti üreten bir tasarım sunulmuştur.

Çalışmanın ilerleyen bölümünde ise anahtarlama mekanizması basitleştirerek birçok durumu içerecek şekilde kurgulanmasını sağlayan bulanık karar mekanizmalı melez kontrolör yapısı sunulmuştur. Burada benzetim çalışmalarına ek olarak, laboratuvar imkânları dâhilinde olan PT 326 (Process Trainer 326) süreç eğitim deney seti ve gerçeklemede NI PCI-6221 (37-Pin) DAQ board kullanılmıştır. Bu kart MATLAB/Simulink ile uyumludur ve gerekli Simulink blokları ‘Real-Time Windows Target’ kütüphanesinde hazır olarak bulunmaktadır.

Benzetim sonuçlarından ve gerçek zaman uygulamasından da görüldüğü üzere geliştirilen “Melez Kontrolör” sistem cevaplarının, klasik PID kontrolör ve bulanık kontrolöre göre hem kararlı hal hem geçici hal hem de bozucu altındaki davranışlarının daha performanslı olduğu görülmektedir.

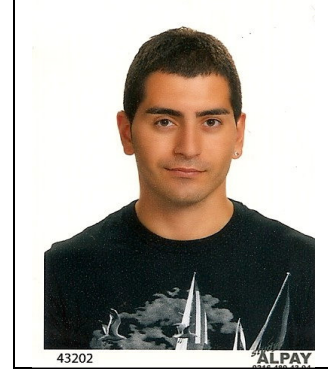
Önerilen yöntemlerin ikisinde de kullanılan akıl yapısındaki kontrolörlerden bağımsız olduğundan ileriye yönelik olarak farklı kontrolör yapılarının melezleştirilmesi denenerek daha iyi performans sergileyecek melez kontrol yapıları denenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Sugeno, M.**, (1985): Industrial Application of Fuzzy Control, North-Holland
- [2] **Brehm, T., Rattan, K.S.**, (1993): Hybrid fuzzy logic PID controller, *Proceeding of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, **2**, 807-813
- [3] **Otsubo, A., Hayashi, K., Murakami, S., Maeda, M.**, (1998): Fuzzy hybrid control using simplified indirect inference method, *Fuzzy Sets and Systems*, **99**, 265-272
- [4] **Ketata, R., Geest, D.D., Titli, A.**, (1995): Fuzzy controller: design, evaluation, parallel and hierarchical combination with a PID controller, *Fuzzy Sets and Systems*, **71**, 113-129
- [5] **Matsunaga, N., Kawaji, S.**, (1991): Fuzzy hybrid control for DC servomotor, *Trans. Inst. Electrical Eng. Japan D*, **111**, 195-200
- [6] **Parnichkum, M., Ngaecharoenkul, C.**, (2001): Kinematics control of pneumatic systems by hybrid fuzzy PID, *Mechatronics*, **11**, 1001-1023
- [7] **Black, M.**, (1937): Vagueness: An exercise in logical analysis, *Philosophy of Science*, **4**, 427-455
- [8] **Zadeh, L.A.**, (1965): Fuzzy sets, *Informat. Control*, **8**, 338-353
- [9] **Mamdani, E.H.**, (1974): Application of Fuzzy Algorithms for control of simple dynamic plant, *Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci.* **121**, 1585-1588
- [10] **Kahaner D.K.**, (1992): Bulanık Kuram ve Uygulamalarında Gelişmeler, *Elektrik Mühendisliği*, **388**, 239-242
- [11] **Reznik, L.** (1997): Fuzzy Controllers, *Newnes*
- [12] **Akbıyık, B.**, (2004): Bulanık PID kontrolör yapılarının temel sistemlerdeki başarımının değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [13] **Yeşil, E., Güzelkaya, M., Eksin, İ.**, (2003): Fuzzy PID Controllers: An overview, *The third Triennial ETI International Conference on applied Automatic Systems, Macedonia, 17-21 September*
- [14] **Şen, Z.**, (2001): Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, *Bilge Sanat Yapım Yayınevi*, İstanbul
- [15] **Kuo, B.**, (1995): Otomatik Kontrol Sistemleri, *Prentice-Hall*, New Jersey
- [16] **Reznik, L., Ghanayem, O., Bourmistrov, A.** (2000): PID plus fuzzy controller structure as a design base for industrial applications, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **13**, 419-430

- [17] **Güzelkaya, M., Eksin, İ., Gürleyen, F.** (2001): A new methodology for designing a fuzzy logic controller and PI, PD blending mechanism, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **11**, 85-98
- [18] **Erenoğlu, I.** (2006): Akıllı Melez Bulanık PID Kontrolör Yapısı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [19] **Kumbasar, T., Eksin, İ., Güzelkaya, M., Yeşil, E.**, (2008): Big Bang Big Crunch Optimization Method Based Fuzzy Model Inversion, *MICAI 2008*, 732–740
- [20] **Bulut, C., Eksin, İ., Güzelkaya, M., Kumbasar, T., Yeşil, E.**, (2009): Fuzzy Blending Hybrid Structure with Fuzzy and Conventional PID Controllers, *MAS 2009*
- [21] **White, A.S. and Sinclair, R.**, (2004): Quantitative validation techniques a database, *Simple examples, Simulation Modeling Practice and Theory*, **12**, 451-473.
- [22] **Ziegler, J.G., and Nichols, N.B.** (1942): Optimum settings for automatic controllers, *Trans. ASME*, **65**, 433-444

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Cihan BULUT

Doğum Yeri ve Tarihi: Kadıköy, 04/07/1984

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- Bulut, C., Eksin, I., Guzelkaya, M., Kumbasar, T., Yesil, E., 2009: Fuzzy Blending Hybrid Structure with Fuzzy and Conventional PID Controllers. *The 6th International Mediterranean Modelling Multi Conference - MAS 2009: The International Workshop on Modelling & Applied Simulation, Tenerife - Canary Islands*