

**AKIŞKAN YATAKLI BUHAR KAZANININ YATAK
SICAKLIĞININ PARÇACIK SÜRÜSÜ
OPTİMİZASYONU TABANLI PID KONTROLÖR
(PSO-PID) İLE KONTROLÜ**

**2011
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

HİLMİ AYGÜN

**AKIŞKAN YATAKLI BUHAR KAZANININ YATAK SICAKLIĞININ
PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU TABANLI PID KONTROLÖR
(PSO-PID) İLE KONTROLÜ**

HİLMİ AYGÜN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2011**

Hilmi AYGÜN tarafından hazırlanan “AKIŞKAN YATAKLI BUHAR KAZANININ YATAK SICAKLIĞININ PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU TABANLI PID (PSO-PID) KONTROLÖR İLE KONTROLÜ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 23/ 06/ 2011

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. Erzat ERDİL (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yusuf ÇAY (KBÜ)

İmzası

...../...../2011

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.

Hilmi AYGÜN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKIŞKAN YATAKLI BUHAR KAZANININ YATAK SICAKLIĞININ PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU TABANLI PID (PSO-PID) KONTROLÖR İLE KONTROLÜ

Hilmi AYGÜN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL

Haziran 2011, 51 sayfa

Günümüzde klasik kontrol yöntemlerinin yerini modern kontrol yöntemleri almıştır. Bu çalışmada, akışkan yataklı buhar kazanının yatak sıcaklığını kontrol etmek için, parçacık sürüsü optimizasyonu tabanlı oransal-integral-türev (PSO-PID) kontrolör kullanılmıştır. Bunun yanında klasik PID kontrolör ve bulanık mantık tabanlı kontrolör (FLC) ile kontrol edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları kullanılan kontrolörler için farklı kazan yüklerinde elde edilmiştir. Kullanılan kontrolörlerin simülasyon sonuçlarını karşılaştırabilmek amacıyla, sonuçlar üst üste bindirilerek gösterilmiştir. Kullanılan kontrolörlerin simülasyon sonuçlarına bakılarak, PSO-PID kontrolörün aşmaları oldukça azalttığı ve diğer kullanılan kontrolörlere kıyasla, yerleşme zamanını azalttığı görülmektedir. Bulanık mantık tabanlı kontrolör (FLC) ile elde edilen simülasyon sonuçlarında aşma olmamasına rağmen, yerleşme zamanı, PSO-PID kontrolörle elde edilen sonuçlara göre, daha uzundur. Klasik PID kontrolörle elde edilen simülasyon sonuçlarında, oldukça fazla

aşma meydana gelmiştir. Hem sistemin daha kısa sürede oturması, hem de aşma seviyesinin düşük olması dikkate alındığında, PSO-PID kontrolörün, kullanılan akışkan yataklı buhar kazanının yatak sıcaklığının kontrolünde daha etkili olduğu görülmektedir.

Anahtar Sözcükler : Parçacık sürüsü optimizasyonu, yatak sıcaklığı, buhar kazanı

Bilim Kodu : 905.1.084

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

CONTROL OF BED TEMPERATURE OF FLUIDIZED BED BOILER BY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION BASED PID (PSO-PID) CONTROLLER

Hilmi AYGÜN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL

July 2011, 51 pages

Nowadays modern control methods are being used instead of the classical control methods . In this study, Particle Swarm Optimisation based PID controller is used to control the bed temperature of fluidized bed boiler. It is also controlled by classical PID controller and Fuzzy Logic Controller (FLC). They have been compared. Simulation results are obtained for all controllers at different boiler loads. Simulation results show that PSO-PID controller decreases overshoot very well and if it is compared with the other controllers, settling time is shorter . In simulation results of FLC, there is no overshoot but if it is compared with PSO-PID controller, settling time is longer. In simulation results of PID controller, overshoots are bigger. Simulation results show that PSO-PID controller must be preferred because it decreases both overshoot and settling time.

Key Words : Particle swarm optimization, bed temperature, steam boiler
Science Code : 905.1.084

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütölmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen, Hasan TİRYAKİ'ye ve Öğr. Gör. Erdinç SABUR'a teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. LİTERATÜR TARAMASI.....	2
1.2. ÇALIŞMANIN AMACI.....	6
BÖLÜM 2	7
BUHAR KAZANLARI	7
2.1 AKIŞKAN YATAKLI BUHAR KAZANLARI.....	9
2.1.1. Akışkan Yataklı Buhar Kazanının Çalışma Prensibi.....	10
2.1.2. Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisinin Özellikleri.....	12
2.1.3. Akışkan Yataklı Kazanların Sınıflandırılması.....	13
2.1.4. Akışkan Yataklı Buhar Kazanının Yatak Sıcaklığı Modeli.....	15
BÖLÜM 3	17
KONTROL YÖNTEMLERİ.....	17
3.1. KLASİK PID KONTROL YÖNTEMİ	17
3.1.1. Klasik PID Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi.....	19
3.2. BULANIK MANTIK	20
3.2.1. Bulanık Mantığın Uygulama Alanları	21

	<u>Sayfa</u>
3.2.2. Bulanık Mantıkta Üyelik Derecesi	22
3.2.3. Üyelik Fonksiyonu.....	22
3.2.4. Dilsel Değişkenler.....	23
3.2.5. Bulanık Mantık Denetimi	24
3.3. PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU	26
3.3.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması	26
BÖLÜM 4	33
ARAŞTIRMA BULGULARI.....	33
4.1. TASARLANAN DENETLEYİCİLERİN MODELE UYGULANMASI	33
4.2. PID KONTROLÖR PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ.....	34
4.3. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ (FLC).....	36
4.3.1. Giriş ve Çıkış Aralıklarının Belirlenmesi	36
4.3.2. Bulanık Kuralların Çıkarımı	38
4.3.3. Bulanık Mantık Denetleyici Simülasyon Sonuçları.....	38
4.4. PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU TABANLI PID KONTROLÖR	40
BÖLÜM 5	43
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	43
5.1. SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	43
5.2. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Buhar kazanının şematik diyagramı.....	8
Şekil 2.2. Sabit yatak, minimum akışkanlaşma, kabarcıklı akışkan yatak konumu.	11
Şekil 2.3. Dolaşımli akışkan yataklı kazana dayalı termik santral şeması.....	15
Şekil 2.4. Yatak sıcaklığının açık döngü birim basamak cevabı.....	16
Şekil 3.1. PI kontrol sisteminin birim basamak cevabı	18
Şekil 3.2. Birim basamak cevap eğrisi	20
Şekil 3.3. Klasik mantıkla bulanık mantığın karşılaştırılması.....	22
Şekil 3.4. Üyelik fonksiyonları.....	23
Şekil 3.5. Bulanık mantık denetleyicisinin blok şeması.....	24
Şekil 3.6. Max-Min Çıkarımı	25
Şekil 4.1. Modellenen sistemin blok diyagramı	33
Şekil 4.2. PID denetleyici simülasyon sonuçları.....	34
Şekil 4.3. Giriş ve çıkış aralıkları	36
Şekil 4.4. Bulanık mantık denetleyici simülasyon sonuçları.....	39
Şekil 4.5. PSO-PID denetleyici simülasyon sonuçları.	41
Şekil 5.1. Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. KAYK ve DAYK'ların tipik işletme koşulları	13
Çizelge 2.2. Farklı kazan yüklerinde parametre değerleri	16
Çizelge 3.1. Klasik kontrolör parametre değerlerinin hesaplanması	20
Çizelge 4.1. Bulanık kuralların çıkarımı	38
Çizelge 5.1. Kullanılan Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

CO	: Karbonmonoksit
de	: Hatanın değişimi
e	: Hata
F _p	: P matrisinin uygunluk değeri
F _x	: X matrisinin uygunluk değeri
g _i	: Global konum
K _d	: Türevsel kazanç
K _i	: İntegral kazancı
K _p	: Oransal kazanç
K _s	: Sistem kazancı
NO	: Azotmonoksit
p _i	: Lokal konum
R	: Referans değer
SO ₂	: Kükürtdioksit
t	: Zaman
T	: İterasyon sayısı
T _ö	: Ölü zaman gecikmesi
T _s	: Sistemin zaman sabiti
v _i	: Parçacığın hızı
w	: Atalet ağırlığı
x _i	: Parçacığın konumu

KISALTMALAR

AAYK : Atmosferik Akışkan Yataklı Kazan

BAYK : Basıncılı Akışkan Yataklı Kazan

DAYK : Dolaşımli Akışkan Yataklı Kazan

FLC : Bulanık Mantık Kontrolör

KAYK : Kabarcıklı Akışkan Yataklı Kazan

PID : Oransal-İntegral-Türev

PSO : Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

Trapmf : Yamuk Üyelik Fonksiyonu

Trimf : Üçgen Üyelik Fonksiyonu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Dünyada elektrik enerjisine olan talep, nüfus artışı ve hızla büyüyen sanayileşmeye paralel olarak artmaktadır. Elektrik enerjisinin depo edilememesi, ihtiyaç duyulan enerjinin anlık olarak üretilmesini gerektirmektedir. Buhar üretiminde ve termik santrallerde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kazanların, fosil yakıtları kullanmalarından dolayı, kazan ve ısıtıcı boru yüzeylerinin kirlenmesiyle birlikte, santralin verimi düşmekte ve çevreye oldukça fazla zararlı gazlar yayılmaktadır. İnsan sağlığının korunması açısından, kömürü yakmak için temiz kömür teknolojilerinin kullanımı gereklidir. Bu açıdan bakıldığında, sanayide kullanılan hareketli ızgaralı kömür kazanları ve pulverize kömürlü kazanların bazı işletme problemleri vardır. Hareketli ızgaralı kazanlarda, kömür tanecikleri, yanma olayının gerçekleşmesi için yeterli havaya maruz kalamadığı için, yanma verimleri düşüktür. Pulverize kömürlü kazanlarda, düşük kaliteli kömür kullanıldığında, yanma sonucu oluşan ısının aktarımı zorlaştığından dolayı, aynı miktarda üretimin yapılabilmesi için, kullanılan kömür miktarını artırmak gerekir. Ancak bu artış, çevreye yayılan zararlı emisyon miktarını artıracaktır. Bu durumda, temiz ve verimli enerji elde edebilmek için akışkan yataklı buhar kazanı kullanmak en iyi çözümdür. Bu kazanlarda, yatak malzemesinin yüksek ısı kapasitesi sayesinde, düşük ısı değerli yakıtlar bile rahatlıkla kullanılabilir. Fosil yakıtların yanması sonucu oluşan zararlı gazların en önemlilerinden birisi SO₂ oluşumudur. Dolaşımli akışkan yataklı buhar kazanlarında, kireçtaşının kullanılması ve kazanı terk eden parçacıkların tekrar geri verilmesi ile SO₂ gazı tutulmaktadır ve mükemmel katı gaz karışımının sağlanmasıyla, yanma verimi yatak sıcaklığıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Bunun nedeni, karbonun yüksek sıcaklıklarda daha hızlı yanması ve yüksek yatak sıcaklığının yanma kayıplarının azaltılmasında etkili olmasıdır. Maksimum SO₂ tutulması için yatak sıcaklığının optimum değerinde olması gerekir. Düşük yatak sıcaklığı, kireçtaşının kükürt tutma verimini artırır. Yatak sıcaklığı, aynı zamanda

SO₂ gazı dışında diğer zararlı emisyonları da etkiler. NO_x emisyonu, yatak sıcaklığındaki artışla lineer olarak artarken, CO emisyonu, yatak sıcaklığının NO_x emisyonu üzerindeki etkisinin aksine, yatak sıcaklığındaki artışla lineer olarak azalır. Bu emisyonları azaltmak ve yanma verimini artırmak için dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanında kazanın işletmesi açısından yatak sıcaklığının kontrolü oldukça önemlidir.

Klasik PID kontrolörün kullanılması, kazandaki ani değişimlere hızlı cevap verememektedir. Bu yüzden çeşitli modern kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yöntem, kuşların davranışlarından esinlenerek gerçekleştirilen “parçacık sürüsü optimizasyonu” (PSO)’dur. PSO kavramı aslında, sosyal yaşamın basitleştirilmiş bir benzetimidir.

1.1. LİTERATÜR TARAMASI

Bir dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanı üzerinde yapılan bir çalışmada, B. Lixia, Z. Junxia ve F. Song, akışkan yataklı buhar kazanının yatak sıcaklığının modellenmesini ve simülasyonunu gerçekleştirmişler. Yatak sıcaklığının dinamik karakteristiğinin, kullanılan kömür ve hava ile değiştiğini gözlemişler [1].

Ping Fu vd., bu matematiksel modeli kullanarak, bulanık mantık tabanlı PID denetleyiciyle yatak sıcaklığını kontrol etmişler ve klasik PID denetleyiciyle karşılaştırarak, bulanık mantık tabanlı PID denetleyicinin klasik PID denetleyiciye göre daha etkili bir denetleyici olduğunu göstermişlerdir [2].

Ali Akbar Jalali ve Aboozar Hadavand, aynı matematiksel modelle, H ∞ algoritmasını kullanarak yatak sıcaklığını kontrol etmişler ve sistemin yerleşme zamanını azaltmışlar fakat sistemde aşmalar meydana gelmiştir [3].

Bir g santraline ait kazan kontrolü yapılan diğer bir çalışma olarak da, Malki ve Chen'in yapmış oldukları uygulama gösterilebilir. Houston'da bir g santraline ait buhar kazanının kontrolünü, bulanık mantık tabanlı PI kontrolörle gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada yakıt, yanma gazı ve su gibi kontrol

değişkenlerini ayarlayarak, kazan çıkışındaki buhar akışı, basıncı ve sıcaklığını düzenlemeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda buhar kazanının ısı ve sıvı seviye kontrolünü başarıyla gerçekleştirmişler, klasik PI kontrolör ile bulanık mantık tabanlı PI kontrolörü karşılaştırmışlardır. Kullanılan bulanık mantık tabanlı PI kontrolör ile maksimum aşmaların azaldığını, cevap sürelerinin kısaldığını ve kalıcı-hal hata osilasyonlarının minimize edildiğini göstermişlerdir [4].

Tiryaki tarafından yapılan tez çalışmasında, bir termik santralin güç ve entalpi çıkışlarını kontrol etmek amacıyla, bulanık mantık kurallarına dayalı PI kontrolör ve bulanık mantık kontrolör kullanılmıştır. Bu çalışmada birinci modelde kazanın temiz ve santral çalışma kapasitesinin %95 olduğu durum incelenmiş, ikinci modelde kazanın temiz ve santral çalışma kapasitesinin %70 olduğu durum incelenmiş ve son olarak üçüncü modelde, kazanın kirli ve santral çalışma kapasitesinin %70 olduğu durum incelenmiştir. Sonuçlar, bulanık mantık tabanlı PI kontrolörün, sistemin durumuna göre kendi parametrelerini de değiştirerek sisteme uyum sağlamak ve sistemin istenen hızını korumakta olduğunu göstermiştir [5].

2000'li yılların başından itibaren parçacık sürüsü optimizasyonunun endüstriyel uygulamalarda kullanılmasıyla birlikte, kolay geliştirilebilmesi ve parametrelerinin uygun seçildiği takdirde sonuca hızlı yakınsaması gibi performans üstünlükleri nedeniyle, PID denetleyicilerin parametrelerinin parçacık sürüsü algoritması ile ayarlanmasına yönelik çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [6-9].

Gaing, 2004 yılında, generatör uyarım sisteminde reaktif güç akışının kontrolü için kullanılan otomatik gerilim regülatörünün PID denetleyicisinin parametrelerini, parçacık sürüsü optimizasyonu ile ayarlamıştır. Çalışmasında, aşım, yükselme zamanı, oturma zamanı ve sürekli durum hatasını kullanarak geliştirdiği yeni bir hedef fonksiyonu denemiş ve sonuçlarını genetik algoritma ile elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır [10].

Hu vd., 2005 yılında, sürekli miknatıslı senkron motor servo sisteminin kontrolünde kullanılan PID denetleyici için parçacık sürüsü optimizasyonu kullanmışlardır. Aynı zamanda genetik algoritma ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonuçlar,

parçacık sürüsü optimizasyonu yönteminin, kompleks sistemlerde, PID parametrelerini ayarlama da genetik algoritmaya göre daha iyi bir optimizasyon tekniği olduğunu göstermiştir [6].

Ou ve Lin, 2006 yılında parçacık sürüsü optimizasyonu ile PID parametrelerini ayarlamak için kendi hedef fonksiyonlarını geliştirmişler ve sonuçlarını genetik algoritma ile karşılaştırmışlardır [7].

Pillay vd., 2007 yılında, PID parametrelerinin sistem modelinden bağımsız ayarlanabilmesi için parçacık sürüsü optimizasyonundan faydalanmıştır. Algoritmada, Clerc'in önerdiği K faktörünü ve hedef fonksiyonu olarak zamanla ağırlıklandırılmış hatanın mutlak değerleri toplamını kullanmışlardır [8].

Zhou vd. ise 2007 yılındaki çalışmalarında, Ou ve Lin'in 2006'daki çalışmalarına benzer bir hedef fonksiyonu geliştirmişler ve örnek modeller üzerinde denemişlerdir. Çeşitli uygunluk fonksiyonlarının sisteme uygulanmasıyla, farklı cevap eğrileri gözlenmiştir [9].

Aynı yıl, Ying vd. parçacık sürüsü optimizasyonu ile adaptif yapı bir PID denetleyici geliştirmişlerdir ve elde edilen denetleyicinin farklı dereceden sistemler için uygun olduğunu belirtmişlerdir [11].

Yih-Lon Lin vd., lineer olmayan dinamik filtreler için parametre kestirime çözüm bulmada, parçacık sürüsü optimizasyonunu kullandılar ve genetik algoritmayla karşılaştırdılar. Böylece, lineer olmayan dinamik filtrelerde parçacık sürüsü optimizasyonunun daha etkili olduğunu gösterdiler [12].

Wei-Der Chang ve Shun-Peng Shih, lineer olmayan sistemlerde, geliştirilen bir parçacık sürüsü optimizasyonu yaklaşımı ile PID parametrelerini optimize etmeye çalıştılar. Bu yaklaşımı ters sarkaç izleme kontrolünde kullanarak, etkili olduğunu gösterdiler [13].

Bulanık mantık konusu ilk defa 1965 yılında L.A. Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Zadeh bu çalışmasında, insanların bazı sistemleri makinelerden daha iyi denetleyebilmelerinin nedenini, insanların kesinlik ile ifade edilemeyen bazı bilgileri kullanarak karar verebilme özelliğine sahip olmalarına dayandırmıştır [14].

Bulanık mantık uygulamasını ilk olarak 1974 yılında, Mamdani, bir dinamik santralin kontrolü için yapmıştır [15]. Mamdani ve Assilian, ilk bulanık mantık kontrolörü tasarlayarak, bir santraldaki buhar makinesini başarıyla kontrol etmişlerdir. Mamdani ve Assilian'ın çalışmalarında tanımlanmış olan ilk bulanık mantık kontrolör, hata ve hata değişimlerini giriş olarak alan, iki girişli bulanık PI kontrolörden oluşmaktaydı [16].

Kickert ve Lemke yaptıkları çalışmada, daha önce ileri sürülen bulanık mantık küme teorisini, sıcak su tesisi kontrol sisteminde uygulamışlardır [17].

Ying, bulanık mantık denetleyicilerin dinamik ve statik davranışlarını, uygun sonuç çıkarım metodlarıyla karşılaştırmıştır ve aynı zamanda lineer PI kontrolörün dinamik ve statik davranışlarıyla karşılaştırmıştır. Bulanık kontrol sistemlerinin lineer PI kontrol sisteminde olduğu gibi, denge noktasında lokal kararlılığa sahip olduğunu göstermiştir. [18].

Ambuel vd. tarafından hidrolik motor kontrolü için, PI ve bulanık mantık PI kontrolörler kullanılmıştır. Gerçek zamanlı bir IBM PC AT veya eşdeğer bir sistemde çalışacak yazılım geliştirmişlerdir [19].

Sugawara ve Suziki, ev ve otomobil klima kontrolü için bulanık mantık sistemini kullanmışlardır. Sistem, bir dizi sıcaklığı otomatik olarak ayarlamak için gerçekleştirilmiştir [20].

1.2. ÇALIŞMANIN AMACI

Akışkan yataklı buhar kazanlarında, en önemli parametrelerden biri yatak sıcaklığıdır. Yatak sıcaklığı, tüm sistemin verimini ve artık gazda bulunan kirletici emisyonları etkiler. Dolayısıyla, yatak sıcaklığının kontrolü önem arzeder.

Endüstriyel kontrol sistemlerinin büyük bir çoğunluğunda kullanılmakta olan klasik kontrol yöntemlerinden PID kontrolörün tasarımında en önemli adım, oransal kazanç K_p , integral kazanç K_i ve türevsel kazanç K_d parametrelerinin ayarlanmasıdır.

Bu çalışmada, parametrelerinin uygun seçilmesi takdirde, sonuca hızlı yakınsaması gibi performans üstünlükleri olan, modern kontrol yöntemlerinden parçacık sürüsü optimizasyonu tabanlı PID kontrolör (PSO-PID) ile B. Lixia'nın akışkan yataklı buhar kazanın yatak sıcaklığının kontrolü için elde ettiği matematiksel model kullanılarak, buhar kazanının yatak sıcaklığı kontrol edilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda, önerilen kontrolörün üstünlüğünü ispatlamak amacıyla, akışkan yataklı kazanın yatak sıcaklığı, bulanık mantık kuralları ile programlanan kontrolör (FLC) ve klasik PID kontrolör ile kontrol edilerek, performansları karşılaştırılmış ve PSO-PID kontrolörün diğerlerine göre üstünlükleri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

BUHAR KAZANLARI

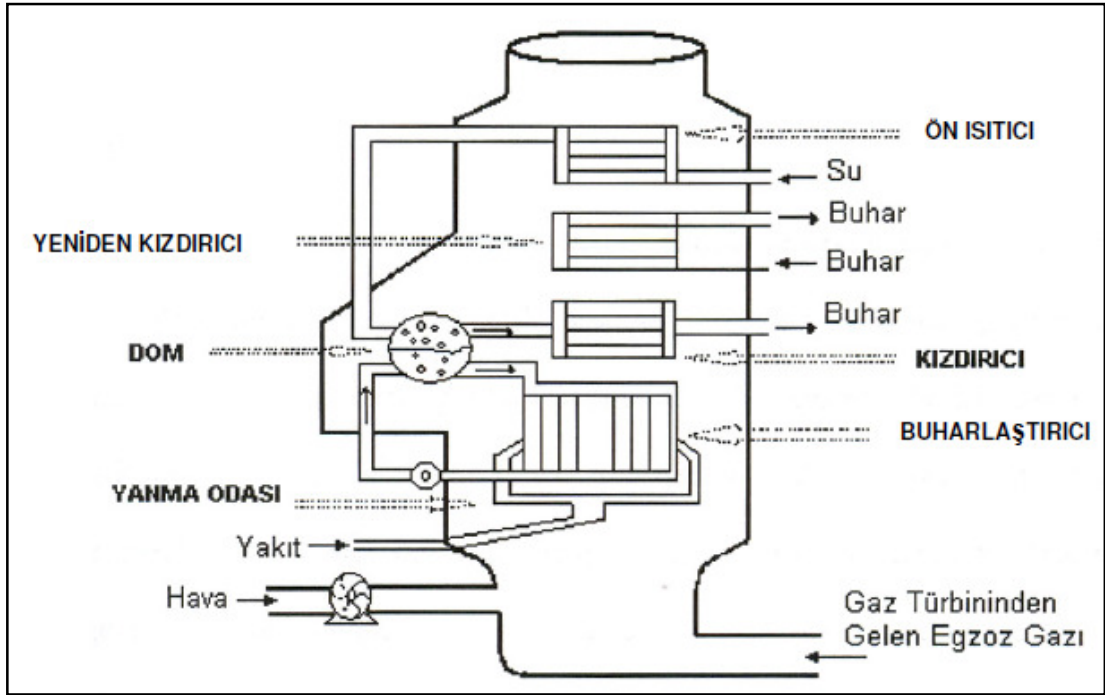
Elektrik enerjisinin elde edilebilmesi için buhar üretimine ihtiyaç vardır. Santrallerde bu ihtiyacı buhar kazanları gidermektedir. Buhar kazanları, istenilen basınç ve istenilen sıcaklıkta, istenilen miktarda buhar üreten cihazlardır. Sıvının buharlaştırılması için çeşitli yollarla elde edilen ısı enerjisi, sıvıya verilir. Buhar kazanlarında sıvıya verilen ısı enerjisi, günümüzde çoğunlukla fosil yakıtların yakılmasından elde edilse de, elektrik enerjisinden, nükleer enerjiden veya eldeki artık bir ısının uygun şekilde kullanılmasından da elde edilebilir [21].

Kazanda yakıtların yakılmasıyla meydana gelen yanma olayı sonucunda, yakıtın kimyasal enerjisi, ısı enerjisine dönüşür. Yanma sonucunda oluşan baca gazları, konveksiyon ve radyasyon (ışınma) yoluyla, ısılarını kazan borularına vererek, boruların içerisinden geçmekte olan suyun sıcaklığını artırır. Su sıcaklığı, kazan basıncının karşılığı olan kaynama sıcaklığına ulaştığında, su buharlaşmaya başlar. Böylece oluşan su-buhar karışımı, genellikle "dom" denilen bir haznede toplanarak, doymuş buhar ve doymuş su olmak üzere ikiye ayrılır. Domda toplanan doymuş su, yeniden ısıtılarak, buhar üretiminde kullanılmak üzere besleme suyu pompası yardımıyla tekrar çevrimin başlangıç noktasına gönderilir. Kızdırıcılarda mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıklara erişilmesi, santral işletmeciliği yönünden istenilen bir durumdur. Yani, kızdırıcılardan geçen baca gazının sıcaklığı oldukça yüksektir. Bu nedenle baca gazları dışarı atılmadan önce, besleme suyunun ve yanma havasının ön ısıtılması için kullanılabilir. Bu ön ısıtmanın yapıldığı kısma ekonomizer adı verilir. Ayrıca kazan, ekonomizer dışında, yakıcılar, fanlar, emisyon kontrol ekipmanları ve baca gibi çeşitli yardımcı elemanlara sahip olabilir [22].

Buhar kazanlarında buhar üretilmesi amacıyla, yeterli sıcaklık seviyesinde bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Bu amaçla, ısı enerjisi genellikle buhar kazanlarının

ocaklarında fosil yakıtların yakılmasıyla elde edilir. Yakıt enerjisindeki yanabilir elemanların, havanın oksijeni ile kimyasal reaksiyona girerek çevreye ısı yayması “yanma” olarak tanımlanır. Yakıt ve havadaki oksijen, yanma elemanlarıdır. Karbondioksit, su buharı ve ısı enerjisi ise tam yanma için yanma ürünleridir [21].

Yakıtlar yakıldıkları zaman, kullanılabilir miktarda ısı açığa çıkaran maddelerdir. Fiziksel durumlarına göre yakıtlar, katı yakıtlar (kömür vb.), sıvı yakıtlar (benzin, gazyağı, motorin, vb.) ve gaz yakıtlar (LPG-sıvılaştırılmış petrol gazı, havagazı, doğalgaz, vb.) olmak üzere 3 grupta toplanır [21]. Şekil 2.1’de buhar kazanının görünümü verilmiştir.



Şekil 2.1. Buhar kazanının şematik diyagramı [22].

Buhar kazanlarını oluşturan temel elemanlar aşağıda belirtilmiştir.

- OCAK: Yakıtların yakılarak ısı enerjisinin elde edildiği kısımdır.
- ASIL ISITMA YÜZEYLERİ: Sıcak duman gazları ile buharlaşmakta olan suyun temas halinde olduğu yüzeyler.

- c) KIZDIRICI: Doymuş buharın sabit basınç altında ısıtılarak kızgın buhar haline getirilmesi işlemi kızdırıcılarda gerçekleşir. Kızgın buharın iki önemli faydası vardır. Birincisi kızgın buharın aynı basınçtaki doymuş buhara göre daha yüksek entalpiye sahip olmasıdır. İkincisi de, kızgın buharın nemsiz olması nedeniyle türbin işletmesinde kazanç sağlamasıdır.
- d) SU ISITICILARI: Besleme suyu, asıl ısıtma yüzeyine girmeden önce su ısıtıcılarında bir miktar ısıtılır.
- e) EKONOMIZER: Besleme suyunun kazana ilk girdiği bölümdür. Ekonomizer'in görevi, doymuş buhar elde edilebilmesi için daha beslenecek olan kazan besleme suyunun sıcaklığını, yanmış baca gazlarının yüksek sıcaklığından yararlanarak artırmaktır. Böylece baca gazlarında bulunan artık ısı enerjisinin değerlendirilmesiyle, atmosfere verilen ısı miktarı önemli ölçüde azaltılarak, ısı tasarrufu sağlanmış olur.
- f) HAVA ISITICILARI (Luvolar): Hava Isıtıcıları, yakma havasının duman gazları ile ısıtıldığı yüzeylerdir.
- g) KAZAN DOMLARI: Doymuş buharda bulunan su-buhar karışımının ayrılması domda gerçekleşir.
- h) BACA: Duman gazlarını kazandan uzaklaştıran elemandır [23].

2.1 AKIŞKAN YATAKLI BUHAR KAZANLARI

Kazanlarda fosil yakıtların yakılmasıyla atmosfere yayılan zararlı emisyonlar sağlığını olumsuz etkilemektedir. İnsan sağlığının korunması açısından, kömürü yakmak için temiz kömür teknolojilerinin kullanımına gerek duyulmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, elektrik üretiminde kullanılan pulverize kömürlü kazanların ve sanayide kullanılan hareketli ızgaralı kömür kazanların bazı işletme problemleri vardır [24].

Hareketli ızgaralı kazanların yanma verimleri düşüktür. Bunun nedeni, hareketli ızgara üzerinde hareket eden kömür tanecikleri, yanma olayının gerçekleşmesi için yeterli havaya maruz kalamadığından dolayı, yeterince yanmaz ve içerisinde %40-%45'e varan yanmamış karbon içeren kül olarak kazanı terkeder [24].

Pulverize kömürlü kazanların kullanıldığı santrallerde, kaliteli kömürler kullanıldığında, yanma başarıyla gerçekleşirken, düşük kaliteli kömür kullanıldığında, aynı başarı elde edilemez. Bunun nedeni, pulverize edilen mikron boyutundaki kömür taneciklerinin, erime noktasına gelindiğinde eriyerek buharın üretildiği su duvarı üzerinde camsı bir tabaka oluşturarak, yanma sonucu oluşan ısının aktarımını zorlaştırmasıdır. Dolayısıyla aynı miktarda üretimin yapılabilmesi için, kullanılan kömür miktarını artırmak gerekmektedir. Ancak kullanılan kömür miktarının artırılması, çevreye yayılan zararlı emisyon miktarını artıracaktır [24].

Tüm bu etkenler dikkate alındığında, hem temiz hem de verimli enerji elde edilmesi bakımından en uygun olanı, akışkan yataklı buhar kazanı kullanmaktır. Akışkan yataklı buhar kazanının pulverize kömürlü kazana göre dezavantajı, işletme kapasitesinin küçük olmasıdır. Pulverize kömürlü kazan 1000 MWe kapasitesinde iken, akışkan yataklı kazan 250 MWe kapasitesine kadar işletmede bulunmaktadır. Ancak, akışkan yataklı buhar kazanları üzerinde yapılan çalışmalar, gelecekte işletme kapasitesi bakımından pulverize kömürlü kazanlara yetişeceğini göstermektedir [24].

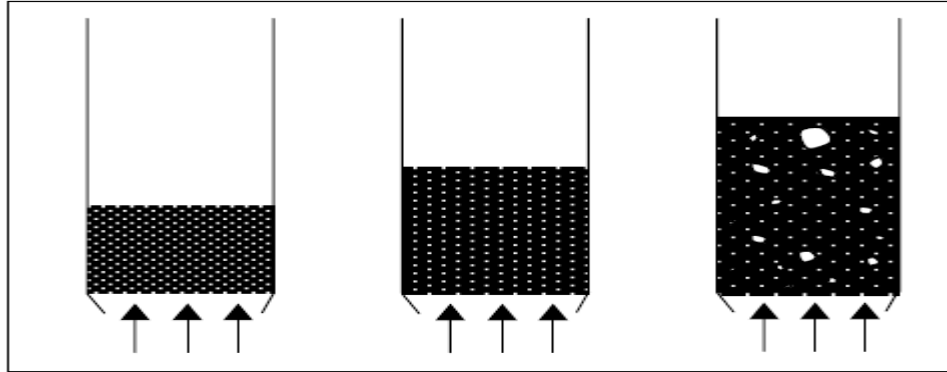
2.1.1. Akışkan Yataklı Buhar Kazanının Çalışma Prensibi

Bir kabın içinde yığılmış durumda bulunan taneciklerin oluşturduğu yatak bölgesine, alttan düşük bir hızla hava verilmeye başlandığında, düşük hızda verilen hava, parçacıklara yeterince kuvvet uygulayamadığından dolayı, parçacıkların arasında bulunan boşluklardan yukarı doğru hareket eder. Bu durum, parçacıkların hareket etmediği sabit yatak konumudur [25].

Altan verilen havanın akış hızı artırılmaya başlandığında, havanın parçacıklara daha fazla kuvvet uygulamasıyla, parçacıkların arasındaki yerçekiminden kaynaklanan kuvvetleri azalttığı görülür. Havanın akış hızı artırılmaya devam edilirse,

parçacıklara uygulanan kuvvet, parçacıkların arasındaki yerçekiminden kaynaklanan kuvvetleri dengeleyerek, parçacıkların yukarı doğru akan havanın içinde asılı olarak kalmasını sağlar. Böylece, parçacıklar akışkan özelliği kazanmış olur ve bu duruma minimum akışkanlaşma koşulu, bunu sağlayan gaz hızına da, minimum akışkanlaşma hızı denilmektedir [25].

Havanın hızı daha da artırılmaya devam edilirse, yatak içinde hava kabarcıkları meydana gelir ve bu hava kabarcıkları suyun kaynamasına benzer şekilde yatağı terkeder. Bu durum, kabarcıklı akışkan yatak konumudur. Bu konumda, hava ile parçacıklardan meydana gelen gaz-katı karışımının hacmi, sabit yatak konumuna göre artar. Fakat buna rağmen, yatak bölgesi ile serbest bölge arasında kolayca ayırım yapılabilmektedir. Şekil 2.2’de sabit yatak konumu, minimum akışkanlaşma konumu ve kabarcıklı akışkan yatak konumu verilmiştir [25].



Şekil 2.2. Sabit yatak, minimum akışkanlaşma, kabarcıklı akışkan yatak konumu [24].

Akışkan yatakta yanma olayı, kömürün, yukarı doğru akan hava sayesinde akışkanlaşan yatak malzemesini içeren sıcak akışkan yatakta yanmasıdır. Yatak malzemesi, eylemsiz parçacıklardan oluşur. Bu eylemsiz parçacıklar, yakıtın kendi külü olabildiği gibi kum da olabilmektedir. Ayrıca, yatak malzemesi olarak SO₂ gazının tutulması için kireçtaşı kullanılmaktadır. Yataktaki kömür taneciklerinin oranı en fazla % 2 olacak şekilde ayarlanarak, eylemsiz parçacıkların oluşturduğu akışkan yatağa beslenir ve kömür tanecikleri eylemsiz taneciklerin içinde, 750-900°C aralığında yanar [24].

2.1.2. Akışkan Yatakta Yakma Teknolojisinin Özellikleri

- a) Yüksek Yanma Verimi: Mükemmel gaz-katı karışımının elde edilmesi ve yakıtın yatakta uzun süre kalmasının sağlanmasıyla yanma verimi artar.
- b) Yüksek Isı Transfer Katsayısı: Eylemsiz sıcak parçacıkların birbirine ve ısı transfer yüzeyine çarpması sonucu, yüksek ısı transfer katsayısı oluşur. Bu nedenle akışkan yataklı buhar kazanının boyutları, konvansiyonel katı yakıtlı kazanlara göre daha küçüktür.
- c) Yakıt Hazırlama Kolaylığı: Pulverize kömürlü santrallerde, kömürün öğütülmesi için kullanılan değirmenler, yakıtlara göre ayrı bir tasarım gerektirir ve yakıt olarak yüksek küllü kömür kullanıldığında, daha sık bakım gerektirir. Böylece maliyet açısından ayrıca bir yük getirir. Akışkan yataklı buhar kazanında bu sorunlara rastlanılmamaktadır. Çünkü, kömürün öğütülmesi için ayrı bir tasarım gerektirmeyen kırıcılar kullanılmaktadır.
- d) Düşük Kaliteli Yakıtlara Uygunluk: Akışkan yataklı kazan teknolojileri, yüksek kaliteli kömürleri başarıyla yakabildiği halde, düşük kaliteli yakıtların kullanılması açısından daha uygundur.
- e) Yakıt Bileşimine Esneklik: Kazanlar genelde kullanacağı kömüre göre tasarlanır. Akışkan yataklı buhar kazanlarında, kullanacağı yakıttan daha farklı ısıl kapasitesi bulunan bir yakıt kullanılsa bile, içerdeki denge bozulmamaktadır. Bunun nedeni, akışkan yataklı kazanlarda, ısıl dengenin, yatak bölgesinde bulunan eylemsiz sıcak parçacıklar tarafından sağlanmasıdır. Bu nedenle, akışkan yataklı buhar kazanları, ısıl değeri tasarlandıkları yakıttan daha farklı yakıtları kullanabilir.
- f) Düşük NO_x ve SO₂ Emisyonları: Akışkan yataklı kazanlarda, yanma sıcaklığı 850°C olmasına karşı, pulverize kömür teknolojisinde yanma sıcaklığı 1200°C-1500°C arasındadır. Dolayısıyla akışkan yataklı buhar kazanlarında, pulverize kömürlü kazanlara göre yanma sıcaklığı daha düşük olduğundan,

havayla giren azotun oksitlenmesi sonucu meydana gelen ısı NO_x en alt seviyede olur. Aynı zamanda, yakıt azotundan kaynaklanan NO_x emisyonu ise, kademeli hava besleme tekniği ile azaltılabilir.

Akışkan yataklı buhar kazanlarında düşük yanma sıcaklığı, kireçtaşının kükürt tutma verimini artırır. Bu nedenle, NO_x ve SO_2 emisyonları, pahalı ve karmaşık baca gazı arıtma tesislerine gerek kalmadan, emisyon sınır değerlerinin altında tutulabilir [26].

2.1.3. Akışkan Yataklı Kazanların Sınıflandırılması

Akışkan yataklı buhar kazanları, atmosferik ve basınçlı olmak üzere 2 gruba ayrılır. Atmosferik akışkan yataklı buhar kazanları (AAYK), atmosferik basınç civarında çalışırken, basınçlı akışkan yataklı buhar kazanlar (BAYK), 16 atmosfere kadar basınç altında çalışırlar. Aynı zamanda, her iki kazan da, akışkanlaştırma koşullarına göre, kabarcıklı akışkan yataklı kazanlar (KAYK) ve dolaşimli akışkan yataklı kazanlar (DAYK) olmak üzere ikiye ayrılır [24]. Çizelge 2.1'de kabarcıklı akışkan yataklı kazan ile dolaşimli akışkan yataklı kazanın tipik işletme koşulları verilmiştir.

Çizelge 2.1. KAYK ve DAYK'ların tipik işletme koşulları [24].

İşletme Koşulları	KAYK	DAYK
Max. Besleme Boyutu, mm	50	10
Yatak Tanecik Boyutu, mm	0,1-4,0	0,05-1,0
Akışkanlaştırma Hızı, m/s	1-3	4-12
Yatak Yoğunluğu, kg/m^3	800-1600	30-300
Yanma Verimi, %	90-99	95-99

2.1.3.1. Kabarcıklı Akışkan Yataklı Kazanlar

Akışkan yataklı buhar kazanlarında, kırıcılardan geçirilerek öğütülen yakıt ve kireçtaşı parçacıkları, alttaki dağıtıcı plakadan geçerek, yukarı doğru akan hava akımında asılı kalırlar. Minimum akışkanlaşma koşulunu sağlayan hava akış hızının

üstüne çıkıldığında, yatak içerisinde kabarcıklar meydana gelir. Kabarcıklar, taneciklerin yatak içerisinde dolaşımını sağlayarak, taneciklerin kazan içerisinde çok iyi karışmasını mümkün kılar. Kabarcıklı akışkan yataklı kazanlarda, katı-hava karışımının gerçekleştiği yatak bölgesiyle yukarıda bulunan serbest bölge arasında kalan yüzey oldukça belirgindir. Yanma sonucunda meydana gelen uçucu küller gazla beraber sürüklenerek, iri olanları siklonda, ince olanlar da, elektrostatik filtre ya da torba filtrede tutulur. Bazı uygulamalarda, yanma ve kükürt tutma verimlerinin artırılması için, siklonda tutulan uçucu kül, yatak bölgesine tekrar beslenir [27].

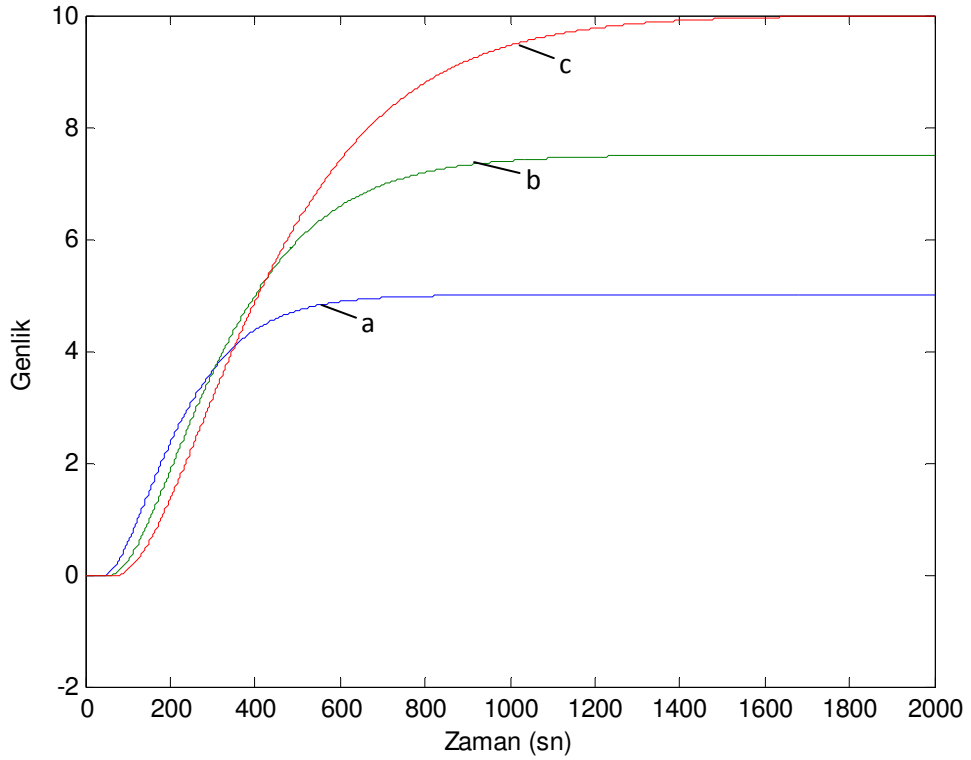
2.1.3.2. Dolaşimli Akışkan Yataklı Kazanlar

Dolaşimli akışkan yataklı buhar kazanlarında, parçacıkların küçük tanecik boyutu ve yüksek gaz hızına sahip olması nedeniyle, yatak ve serbest bölge boyunca sürüklenir. Bu kazanlarda, gaz hızlarının kabarcıklı akışkan yataklı buhar kazanındaki sisteme göre 2-3 kat daha fazla olması nedeniyle, parçacıklar rahatlıkla sürüklenerek, taneciklerin yoğun olduğu bölge ile seyrek olduğu bölgeleri ayıran belirli bir yüzeyin oluşmasını engeller. Böylece yanmanın tüm kazan boyunca sürmesi sağlanır. Yanma olayı 800-900°C'de gerçekleşirken, mikron boyutundaki ince tanecikler 4-6m/s yanma gazı hızıyla yakıcının dışına taşınırlar. Bu parçacıklar, yanma odası dışına yerleştirilen siklonlar tarafından tutularak yanma odasına tekrar gönderilerek dolaşım gerçekleştirilmiş olur ve yanma veriminin artması sağlanır. Parçacık dolaşımı, parçacıkların ısısından maksimum seviyede faydalanarak, yanma odası duvarlarına verimli ısı transferini sağlar. Aynı zamanda, kazandan ayrılan parçacıkların kazana yeniden dönmesiyle, kömüre yanma, kireçtaşına da kükürt tutması için yanma odası içinde daha uzun kalması sağlanır [24]. Şekil 2.3'de dolaşimli akışkan yataklı kazanın kullanıldığı bir termik santral şeması görülmektedir.

Çizelge 2.2. Farklı kazan yüklerinde parametre değerleri [1].

Parametreler	% 25 Kazan yükü altında	% 65 Kazan yükü altında	% 100 Kazan yükü altında
K_p	5	7,5	10
T_p	100	150	200
τ	30	45	60

Şekil 2.4'de 3 farklı kazan yükü için açık döngü birim basamak cevap eğrileri verilmiştir. a eğrisi, % 25 kazan yükü, b eğrisi % 65 kazan yükü, c eğrisi % 100 kazan yükü için açık döngü birim basamak cevap eğrisini göstermektedir. Bu eğriler, kazan yükü arttıkça, τ değerinin artmasına paralel olarak, gecikme süresinin ve sistemin kararlı hale geçme süresininin arttığını göstermektedir.



Şekil 2.4. Yatak sıcaklığının açık döngü birim basamak cevabı

BÖLÜM 3

KONTROL YÖNTEMLERİ

3.1. KLASİK PID KONTROL YÖNTEMİ

Orantı etkide, denetim organının çıkışı $m(t)$ ile hata sinyali $e(t)$ arasındaki bağıntı Eşitlik 3.1'de verilmiştir.

$$m(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

Burada K_p orantı kazancıdır. Sadece orantı etkinin kullanılması, kalıcı durum hata oluşmasını sağlayacaktır. Bu hatayı önleyebilmek için kontrol sistemine integral etki ilave edilerek, PI kontrol sistemi oluşturulmaktadır. İntegral etkide denetim organının çıkışı $m(t)$ ile hata sinyali $e(t)$ arasındaki bağıntı Eşitlik 3.2'de verilmiştir.

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.2)$$

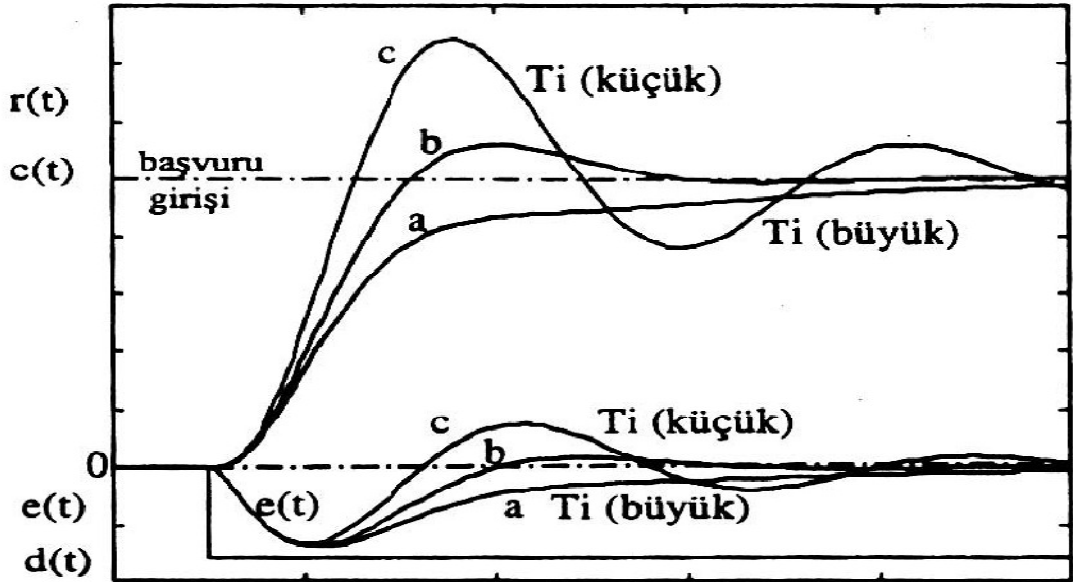
İntegral denetim sisteminin transfer fonksiyonu Eşitlik 3.3'de verilmiştir.

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \text{ veya } \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{1}{T_i s} \quad (3.3)$$

Burada K_i integral etki kazancı, T_i integral zaman sabitidir ve $K_i = 1/ T_i$ değerine eşittir. İntegral etki denetim sistemlerinde tek başına kullanılmamakla birlikte, orantı etkiyle birlikte kullanılabilmesinin yanında, orantı etki ve integral etkiye türev etkisinin eklenmesiyle de kullanılabilir. PI denetim sisteminin transfer fonksiyonu Eşitlik 3.4'de verilmiştir.

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (3.4)$$

Burada integral etki zamanı $T_i = K_p / K_i$ şeklinde hesaplanır. Şekil 3.1’de farklı integral etki zamanları için, bir sistemin basamak giriş cevabı eğrileri verilmiştir. Şekle bakıldığında ‘a’ eğrisinde integral etki zamanı en büyük değerde olmakla birlikte, hatanın sıfırlanması uzun zaman almaktadır. ‘c’ eğrisinde ise, integral etki zamanı en küçük değerde olmasıyla birlikte, cevabın istenen değere ilk defa ulaşması diğerlerine göre daha hızlı olup, bu değere tam olarak oturmadan önce biraz salınım yapmaktadır. Hem istenen değere hızlı ulaşma hem de az salınım yapması açısından en iyi durum ‘b’ eğrisinde görülmektedir [22].



Şekil 3.1. PI kontrol sisteminin birim basamak cevabı [22].

PID denetim, 3 temel denetim etkisinin birlikte kullanılmasıyla oluşur. PID kontrolörün çıkışı ve denetim yasası Eşitlik 3.5’de ve Eşitlik 3.6’da verilmiştir.

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (3.5)$$

veya

$$m(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de}{dt}) \quad (3.6)$$

Buradan transfer fonksiyonu Eşitlik 3.7’de olduğu gibi hesaplanır.

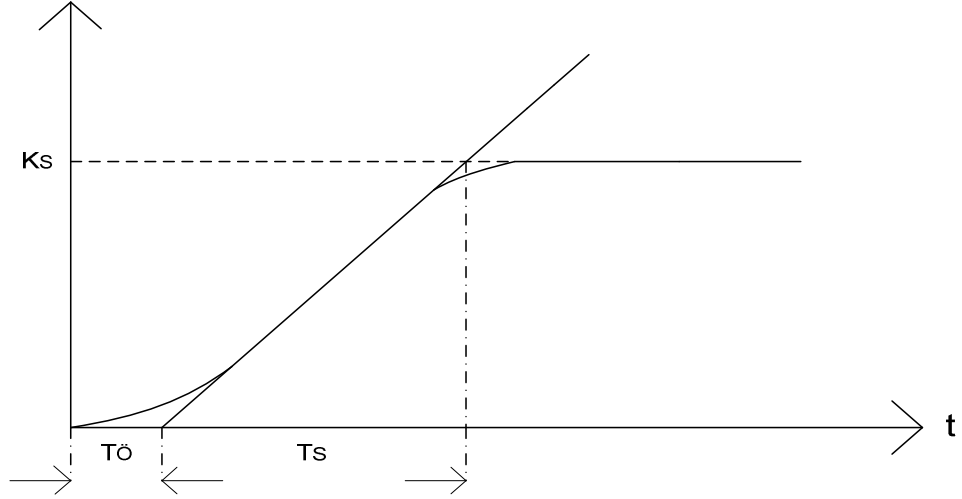
$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (3.7)$$

Oransal (P) etki, denetim sinyalinin hata miktarı ile doğru orantılı olan değerdir. İntegral (I) etki, sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlarken, türev etki (D), hatanın büyümesini önceden kestirir ve büyük bir hata oluşmadan düzeltme etkisi sağlar [28].

3.1.1. Klasik PID Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi

Kontrol organının türüne göre, oransal kazanç K_p , integral kazanç K_i ve türevsel kazanç K_d parametrelerinin iyi sonuç verecek şekilde ayarlanması için deneysel ve hesaba dayanan metodlar geliştirilmiştir.

Bu uygulamada, PID kontrolör parametrelerini belirlemek için, Ziegler ve Nichols tarafından ileri sürülen yöntemde göre, Şekil 3.2’de gösterilen sistemin birim basamak cevap eğrisinden faydalanılır. Bu yöntemde, sisteme birim basamak uygulanarak sistemin çıkışı izlenmektedir. Sistemin birim basamak karşısında gösterdiği cevap eğrisinde, ölü zaman gecikmesi T_0 , sistemin istenen değere ulaşması ve bu değere oturması için geçen süre T_s , sistem kazancı K_s ’dir [28].



Şekil 3.2. Birim basamak cevap eğrisi [29].

$q = \frac{T_s}{T_ö K_S}$ bağıntısına göre, Çizelge 3.1’de verilen değerler hesaplanır.

Çizelge 3.1. Klasik kontrolör parametre değerlerinin hesaplanması [22].

Kontrolör	K_p	T_i	T_d
P	q	-	-
PI	0,9q	3,33 $T_ö$	-
PD	1,2q	-	(0,25-0,5) $T_ö$
PID	1,2q	2 $T_ö$	0,5 $T_ö$

3.2. BULANIK MANTIK

Klasik mantıkta, “Her önerme ya doğrudur ya da yanlıştır” varsayımı geçerlidir. Halbuki ölçümlerin temel sınırlamalarından dolayı, bazı önermelerin doğruluk değerleri belirsiz olabilmektedir. Bu durumda bulanık mantık, iki önerme arasında belirsizlik adı verilen bir önerme ortaya koymuştur. Böylece, klasik mantıkta doğru ve yanlış olan doğruluk değerleri, bulanık mantıkta daha esnek hale getirilmiştir [17].

Bulanık mantık konusu ilk defa L.A. Zadeh tarafından ortaya çıkarılmıştır. Zadeh bu çalışmasında, insanların bazı sistemleri makinelerden daha iyi kontrol edebildiklerini

belirtmiş ve bunun sebebini, insanların kesinlik ile ifade edilemeyen belirsiz bazı bilgileri kullanarak karar verebilmelerine dayandırmıştır [14].

Bulanık mantık işlemleri, bir problemin analizi ve tanımlanması, değişken kümelerin ve mantık ilişkilerinin bulanık kümelere dönüştürülmesi işlemlerinden oluşmaktadır. Bulanık mantık algoritması her türlü problem için çözüm üretemeyebilir. Dolayısıyla başka bir modeli kullanmanın uygun olduğu durumda, bulanık mantık kullanmak, istenen sonucu vermeyebilir. Genellikle, işlemin matematiksel bir modeli bulunmadığı ve gerçek zaman işlemleri için hesaplamaların çok karmaşık olduğu durumlarda bulanık mantık uygulanabilir [28].

3.2.1. Bulanık Mantığın Uygulama Alanları

Bulanık mantığın denetim sistemlerinin de ötesinde birçok uygulama alanları vardır. Geliştirilen son teoremler bulanık mantığın, ister mühendislik, ister fizik ya da ekonomi olsun, her türlü alanda sürekli sistemleri modellemek üzere kullanabileceğini göstermektedir.

Bilim adamları, bulanık mantık teorisinin doğa (hava, okyanuslar gibi) veya insan yapısı (ekonomi, borsa gibi) sistemlerin modellenmesi ve kontrolü için en iyisi olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca bulanık mantığın kullanılmasının istenen sonucu veremeyeceği alanlar olabilir. Örneğin, optimum kontrol denklemleri elde edilmiş sistemlerde, bulanık bir yaklaşım kullanmak tavsiye edilmez.

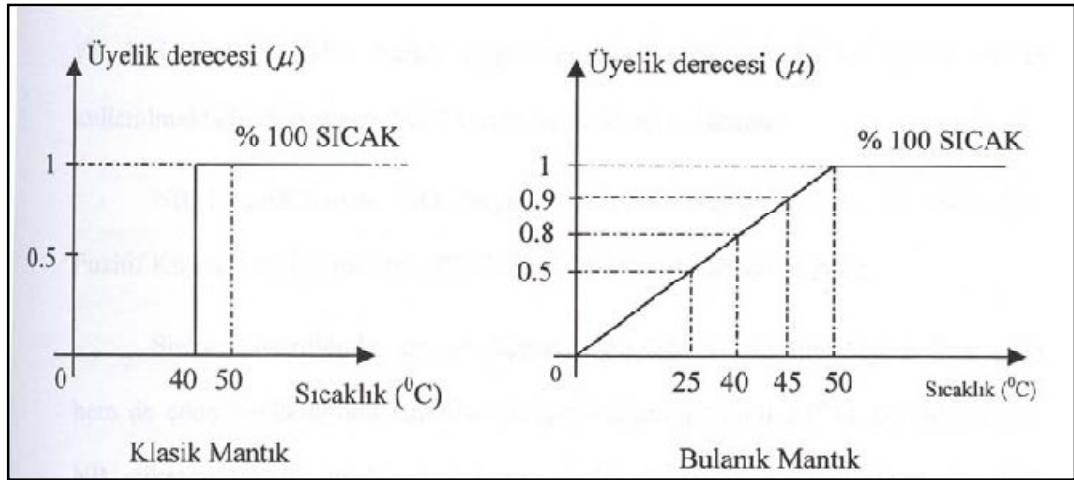
Bulanık mantığın aşağıdaki sistemlerde kullanılması en iyi çözümü verir [5].

- a) Matematiksel modeli çıkarılamayan ya da yeterli doğrulukta modellenmeyen çok karmaşık sistemlerde
- b) Lineer olmayan sistemlerde
- c) Başlangıç koşullarında, girişlerinde veya tanımlarında belirsizliklerin bulunduğu sistemlerde
- d) Çok değişkenli olan sistemlerde

3.2.2. Bulanık Mantıkta Üyelik Derecesi

Klasik mantıkta bir eleman bir kümeye aitse üyelik ağırlığı 1, değilse 0 ile ifade edilir. Bulanık mantıkta, üyelik ağırlığı maksimum 1 değerinde ve minimum 0 değerinde olur ve bu iki değer arasında bir değer de olabilir.

Şekil 3.3'e bakıldığında, klasik mantıkta 40°C ve 40°C'nin üstünde bulunan sıcaklıklar SICAK kümesi içinde bulunurken, 40°C'nin altında bulunan sıcaklıklar SOĞUK kümesi içinde bulunur. Ama bulanık mantığa göre 38°C sıcaklık, SOĞUK kümesi içinde yer almaz. Bunun nedeni kısmen de olsa SICAK kümesi içinde yer almasıdır. Bulanık kümesi olan SICAK kümesine bakıldığında, 25°C sıcaklığın üyelik derecesi 0,5 olup, tam olarak sıcak değil ama soğuk da değil anlamına gelmektedir. Benzer şekilde 40°C sıcaklık, klasik kümeye göre üyelik derecesi “% 100 sıcak kümesindedir” olmasına rağmen, bulanık kümeye göre üyelik derecesi 0,8 olduğundan “% 80 sıcak kümesindedir” olacaktır [5].

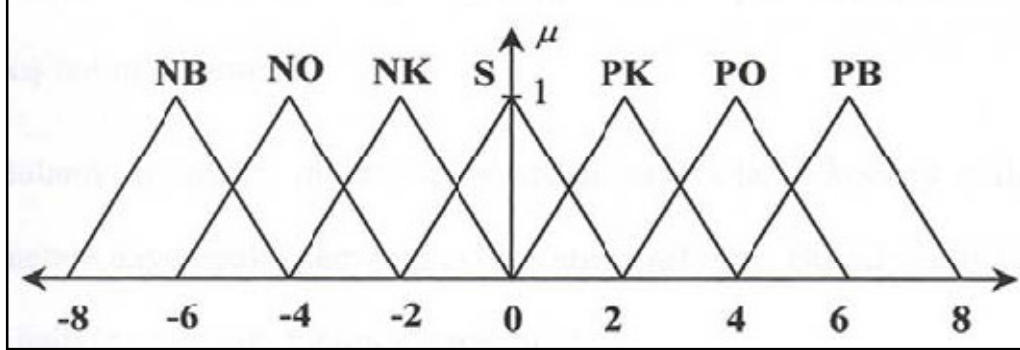


Şekil 3.3. Klasik mantıkla bulanık mantığın karşılaştırılması [29].

3.2.3. Üyelik Fonksiyonu

Üyelik işlevi biçimsel olarak denetlenen sistemin özelliğine göre, üçgen, yamuk vb. biçimlerde olabilir. Sistem kontrolünde en fazla kullanılan üyelik işlevi, üçgen şeklindeki üyelik fonksiyonudur. Farklı uygulamalarda çeşitli sayıda etiket kullanılır. Ancak genellikle kontrol uygulamalarında 7 ayrı etiket kullanılır. Bu etiketler Şekil

3.4'de verildiği gibi; NB: Negatif Büyük, NO: Negatif Orta, NK: Negatif Küçük, SF: Sıfır, PK: Pozitif Küçük, PO: Pozitif Orta, PB: Pozitif Büyük olarak adlandırılır.



Şekil 3.4. Üyelik fonksiyonları [29].

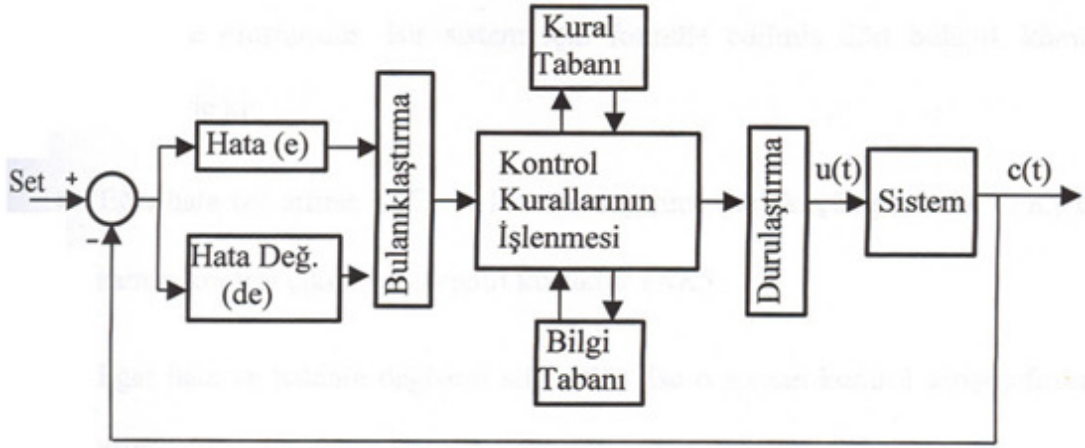
Şekil 3.4'de görüldüğü üzere, PK etiketini taşıyan üyelik fonksiyonu 0 ile 4 aralığında tanımlanmıştır. PO etiketini taşıyan üyelik fonksiyonu 2 ile 6 aralığında tanımlanmıştır. Bu nedenle üyelik fonksiyonu 3 değerini hem PK hem de PO için hesaplayacak ve sıfırdan farklı bir değer alacaktır [29].

3.2.4. Dilsel Değişkenler

Bulanık kümelerin önemli uygulamalarından biri dilsel hesaplamalardır. Burada amaç, kesin rakamların yerine kelimeleri kullanarak klasik mantıkta yapıldığı gibi hesaplamaların yapılabilmesidir. "Bu gün hava çok soğuk" cümlesinde "Bugünün hava sıcaklığı" bir değişken ve "çok soğuk" onun değeri olarak ele alınabilir. "Hava sıcaklığı" değişkeni rakam olarak 25°C, 35°C gibi değerler aldığıında, bu değişkeni matematiksel olarak işlemek için yöntemler vardır. Fakat değişkenin değerini kelime olarak ele aldığımızda, bu değişkeni işlemek için matematiksel bir teori yoktur. Bundan dolayı dilsel değişken kavramı kullanılır. Kabaca, eğer değişkenin değeri olarak rakamlar değil de kelimeler ele alınırsa, bu değişkene "dilsel değişken" denilmektedir [5].

3.2.5. Bulanık Mantık Denetimi

Bir bulanık denetleyicinin dört bileşeni vardır ve bunlar bulanıklaştırma ara birimi, bilgi tabanı, karar verme ünitesi ve duruluşturma ara birimidir. Bir bulanık mantık denetleyicisini içeren geri beslemeli kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Bulanık mantık denetleyicisinin blok şeması [5].

Hata (e) = Referans değer (R) - O andaki değer (c)

Hatadaki değişim (de) = Şimdiki hata (e(k)) - Önceki hata (e(k-1))

Denetim kurallarının sonuçsal kısmı denetim çıktısı olan kontrol sinyali (u) olup, bu değer hata ve hatadaki değişiminin, $u = f(e, de)$ şeklindeki herhangi bir fonksiyonu olacaktır [5].

3.2.5.1. Bulanıklaştırma Birimi

Bulanıklaştırma birimi, fiziksel değerleri sözcüklere dönüştürür. Bu dönüştürme işlemleri için kural esasına dayanan dil sözcükleri, “Pek Çok”, “Çok”, “Hiç”, “Az”, “Pek az” gibi bir küme içerisinde olabilir. Daha sonra bu sözcüklerin 0 ile 1 arasında yer alan değerlere karşılık gelen tanımları verilir. Örneğin Pek Çok’un karşılığı 1, Hiç’in karşılığı 0 ve Çok’un karşılığı 0,5’tir. Hiç tanımının altında kalan tanımların değerleri, üstte kalan değerlerin negatif sayılı değerleridir. Bulanıklaştırma işlemi, her bir fiziksel veri için dil sözcüklerinin üyeliğinin bulunmasıdır [28].

3.2.5.2. Kurallar Kümesi

Bulanık kümeler kullanılmasıyla nitel bilgi temsil edilebilir. Örneğin “düşük sıcaklık”, “yüksek hız” gibi. Kurallar kümesi sözcükler arasındaki neden-sonuç ilişkisini belirtir [28].

“Eğer hata Pek Çok ve hatanın değişimi Az ise çıktı değişimini Sıfır olarak ver”

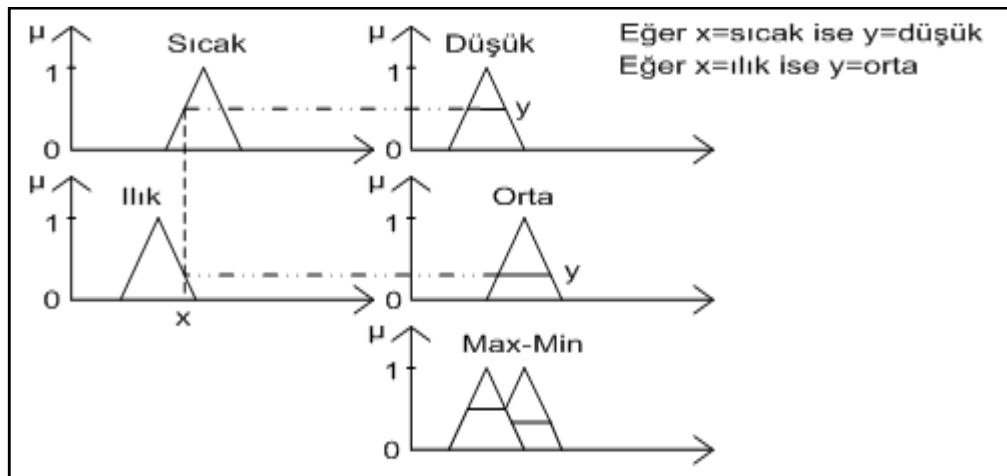
“Eğer hata Çok ve hatanın değişimi Çok ise çıktı değişimini Az olarak ver” gibi.

Örnek olarak, yakıt girdisi ve sıcaklık arasında bulunan ilişki şu biçimde olabilir.

Eğer { Yakıt miktarı yüksekse }, o halde { Sıcaklık 70°C den büyük olur }

3.2.5.3. Bulanık Çıkarım ve Durulaştırma

Bulanık mantıkta belirsiz ifadeler “and” veya “or” gibi ifadelerle temel kümelerin çapraz çarpımı sonucu ortaya çıkan bulanık bağıntıya aktarılır. Şart ve sonuç kısımlarından oluşan kurallar, bulanık operatör olarak tanımlanır. Bulanık operatör, problemin çözülmesi için oldukça önemlidir. Bulanık modelleme için bulanık operatörlerden en basit ve en çok kullanılanı MIN operatörüdür. Çıkarım mekanizması, Mamdani çıkarım mekanizmasına dayanıyorsa Şekil 3.6’da verildiği gibi MAX-MIN çıkarımı uygundur [5]. Bu çalışmada Mamdani çıkarım mekanizması kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Max-Min Çıkarımı [5].

3.3. PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU

Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), 1995 yılında J.Kennedy ve R.C.Eberhart tarafından, kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş populasyon tabanlı bir optimizasyon yöntemidir. Doğrusal olmayan problemlere, çok parametrelili ve çok değişkenli optimizasyon problemlerine çözüm bulmak için kullanılmaktadır [30].

PSO, arama uzayında optimum noktayı ararken, optimize edilecek olan fonksiyonun muhtemel çözümlerini barındıran bir popülasyonu kullanması açısından, genetik algoritma gibi hesaplama teknikleriyle benzerlik göstermektedir. Bununla beraber, PSO'da her sürü üyesinin arama uzayındaki hareketini belirleyen ve şartlara göre değişebilen bir hızı mevcuttur. Ayrıca her üyenin, daha önce ziyaret edilmiş en iyi noktayı tuttuğu bir hafızası da bulunmaktadır. Sonuç olarak, her bir PSO algoritması iterasyonunda, sürüdeki her bir parçacık, arama uzayındaki kendi pozisyonunu o iterasyona kadar bulunmuş en iyi parçacık pozisyonuna dayalı olarak ayarlar [31].

3.3.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması

Parçacık sürüsü optimizasyonunda her birey, uçuş doğrultusunu, kuş sürülerinde olduğu gibi kendi uçuş doğrultusuna ve tüm sürünün uçuş doğrultusuna göre ayarlar. Yani, parçacık sürüsü optimizasyonunda, bireyler kendilerinin ve tüm sürünün geçmiş deneyimlerinden faydalanır [32].

Parçacıklar, problemin muhtemel çözümlerini belirten ve boyutu, optimize edilmesi istenen parametrelerin sayısı ile belirlenen D-boyutlu arama uzayında dolaşan birer noktadır. M adet parçacığın her biri, arama uzayında D-boyutlu birer diziyle Eşitlik 3.8'de olduğu gibi gösterilir [7].

$$x_i = (x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3} \ x_{i4} \ \dots \ x_{iD}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (3.8)$$

Parçacıkların konum değiştirme ivmelenmeleri ise hız olarak tanımlanır ve arama uzayında D-boyutlu birer diziyle Eşitlik 3.9'da olduğu gibi belirtilir [7].

$$v_i = (v_{i1} v_{i2} v_{i3} v_{i4} \dots v_{iD}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (3.9)$$

Buna göre, D-boyutlu arama uzayında dolaşan M adet parçacığın konumları ve hızları Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11’de verilen matrislerle ifade edilebilir [33].

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{M1} & x_{M2} & \dots & x_{MD} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$v = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1D} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{M1} & v_{M2} & \dots & v_{MD} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Parçacıklar, arama uzayında o ana kadar elde ettikleri en iyi konuma doğru giden bir koordinat izleme eğilimindedirler. Her bir parçacığın en iyi konum bilgisi, parçacığın lokal en iyi konumu (p_i) olarak tanımlanır. Lokal en iyi konum, her parçacık için D-boyutlu bir dizi ile Eşitlik 3.12’de verildiği gibi belirtilirken, tüm parçacıklar için MxD boyutlu bir matris ile Eşitlik 3.13’de verildiği gibi gösterilebilir [33].

$$p_i = (p_{i1} p_{i2} p_{i3} p_{i4} \dots p_{iD}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (3.12)$$

$$p = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1D} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{M1} & p_{M2} & \dots & p_{MD} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

P matrisi, parçacıkların o ana kadar elde ettikleri en iyi konum bilgilerini içerir ve optimize edilecek parametrelerin her biri için en iyi konum bilgisi ise tüm sürünün global en iyi konumunu (g_i) oluşturur ve sürünün önceki deneyimini ifade eder. Global en iyi konum D-boyutlu bir dizi ile Eşitlik 3.14’de olduğu gibi gösterilir [33].

$$g_i = (g_1 g_2 g_3 g_4 \dots g_D), \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (3.14)$$

Parçacıkların en iyi konuma ulaşabilmek için hızları farklı rastgele terimler ile ağırlıklandırılır. Her bir parçacığın hızı ve konumu, Eşitlik 3.15 ve Eşitlik 3.16 ile güncellenir [34].

$$v_{iD}^{t+1} = v_{iD}^t + c_1 r_1 (p_{iD}^t - x_{iD}^t) + c_2 r_2 (g_i^t - x_{iD}^t) \quad (3.15)$$

$$x_{iD}^{t+1} = x_{iD}^t + v_{iD}^{t+1} \quad (3.16)$$

Parçacığın yeni hızı, Eşitlik 3.15’de olduğu gibi, parçacığın önceki hızına ve mevcut konumunun lokal ve global en iyi konumlara olan uzaklığına göre hesaplanır. Bu eşitlikte, ilk terim parçacığın o anki hızını içeren terimdir. İkinci ve üçüncü terim parçacığın kendi deneyimini ve tüm sürünün deneyimini içerir. c_1 ve c_2 sayıları, parçacığı lokal en iyi konuma ve global en iyi konuma doğru çeken sabitlerdir. r_1 ve r_2 sayıları ise $[0,1]$ aralığında rastgele sayılardır ve her iterasyonda rastgele atanır. Parçacığın yeni konumu, güncellenen yeni hızı kullanılarak, Eşitlik 3.16’da olduğu gibi belirlenir [34].

Shi ve Eberhart, parçacığın hızının hedefe yaklaştıkça azalmasını sağlamak amacıyla, belirli bir aralıkta doğrusal olarak azalan w atalet ağırlığı terimini Eşitlik 3.17’de olduğu gibi kullanmışlardır [32].

$$v_{iD}^{t+1} = w \cdot v_{iD}^t + c_1 r_1 (p_{iD}^t - x_{iD}^t) + c_2 r_2 (g_i^t - x_{iD}^t) \quad (3.17)$$

w 'nın değerinin artması global arama yeteneğini arttırırken, küçülmesi lokal arama yeteneğini arttırır. İterasyonun başlangıcında global arama yeteneğinin, sonlarına doğru ise lokal arama yeteneğinin daha yüksek olması gereklidir. Eşitlik 3.18’de olduğu gibi, w değerinin her iterasyonda doğrusal olarak azaltılmasıyla, optimizasyon performansında artış sağlanabilmektedir. Eşitlikte T , iterasyon sayısını göstermektedir [10].

$$w = w_{maks.} - T \cdot \frac{w_{maks.} - w_{min.}}{T_{maks.}} \quad (3.18)$$

Shi ve Eberhart 2001 yılında, w katsayısının değerini parabolik olarak azaltmışlar ve yakınsama performansının arttığını göstermişlerdir [35].

Clerc, w atalet ağırlığı yerine optimizasyonun yakınsama performansını artırmak amacıyla Eşitlik 3.19 ile tanımlanan K faktörünü kullanmayı ve parçacığın yeni hızını Eşitlik 3.20'de olduğu gibi güncellemeyi önermiştir. Clerc, K değerinin hesabında c sabitlerinin değerini 2,05 almıştır [36].

$$K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \quad \varphi = c_1 + c_2 > 4 \quad (3.19)$$

$$v_{iD}^{t+1} = K \cdot [v_{iD}^t + c_1 r_1 (p_{iD}^t - x_{iD}^t) + c_2 r_2 (g_i^t - x_{iD}^t)] \quad (3.20)$$

Parçacıkların arama uzayından çıkmasını önlemek için konumlarının ve hızlarının sınırlandırılması önemlidir. Hız değeri, parçacığın konumunun $[x_{\min.}, x_{\max.}]$ aralığında belirlenen değerine göre $[v_{\min.}, v_{\max.}]$ aralığında Eşitlik 3.21 ve Eşitlik 3.22'de belirtilen şekilde sınırlandırılır. Bununla beraber parçacıkların sınırlarının uygun belirlenmesi, algoritmanın doğru sonuca yakınsamasında önemlidir [37].

$$v^{maks.} = (x^{maks.} - x^{min.}) \cdot (\%10 \sim \%20) \quad (3.21)$$

$$v^{min.} = -v^{maks.} \quad (3.22)$$

Chen vd., parçacıkların sınırlarının belirlenmesi için Eşitlik 3.23'deki yöntemi önermişlerdir [33].

$$v^{maks.} = k \cdot x^{maks.} \quad 0,1 \leq k \leq 0,5 \quad (3.23)$$

Buna göre parçacıkların hızı ve konumu aşağıdaki gibi sınırlandırılır [38].

Eğer $(v^{k+1} > v^{maks.})$ ise $(v^{k+1} = v^{maks.})$

Eğer $(v^{k+1} < v^{min.})$ ise $(v^{k+1} = v^{min.})$

Eğer $(x^{k+1} > x^{\text{maks.}})$ ise $(x^{k+1} = x^{\text{maks.}})$

Eğer $(x^{k+1} < x^{\text{min.}})$ ise $(x^{k+1} = x^{\text{min.}})$

Başlangıç değerlerinin belirlenmesinden sonra, parçacık sürüsü optimizasyonunun algoritmasında aşağıdaki adımlar izlenir [37-40].

Adım-1: Parçacıkların her bir elemanı için hız ve konum sınırlarının belirlenmesiyle beraber, güncelleme eşitliklerinde kullanılacak parametrelerin değerleri atanır.

Adım-2: Arama uzayında, parçacıkların başlangıç konumlarını ve hızlarını tanımlayan X ve V matrisleri, belirlenen sınırlar içerisinde rastgele atanır.

Adım-3: X ve P matrislerinin, seçilen uygunluk fonksiyonuna göre uygunluk değerleri belirlenir. P matrisinin en iyi uygunluk değerine sahip parçacığı, global en iyi konum ve uygunluk değeri olarak atanır. X ve P matrislerinin uygunluk değerleri Eşitlik 3.24 ve Eşitlik 3.25’de belirtildiği gibi M boyutlu F_x ve F_p vektörleri ile gösterilir.

$$F_x = [f_{x1} f_{x2} f_{x3} f_{x4} \dots f_{xM}]^T \quad (3.24)$$

$$F_p = [f_{p1} f_{p2} f_{p3} f_{p4} \dots f_{pM}]^T \quad (3.25)$$

Adım-4: Her parçacığın uygunluk değeri (F_x), kendi lokal en iyi konumunun uygunluk değeri (F_p) ile karşılaştırılır. Eğer parçacığın o anki konumunun uygunluk değeri, lokal en iyi konumunun uygunluk değerinden daha iyi ise parçacığın konumu ve uygunluk değeri, lokal en iyi konumuna ve uygunluk değerine aktarılır.

Eğer $(F_{pi}^t < F_{xi}^{t+1})$ ise $(p_i^{t+1} = x_i^{t+1})$ ve $(F_{pi}^{t+1} = F_{xi}^{t+1})$

Eğer $(F_{pi}^t > F_{xi}^{t+1})$ ise $(p_i^{t+1} = p_i^t)$ ve $(F_{pi}^{t+1} = F_{pi}^t)$

Adım-5: Lokal en iyi konum vektörünün en iyi uygunluk değeri, global en iyi konumun uygunluk değeri ile karşılaştırılır. Eğer lokal en iyi konum vektörünün en iyi uygunluk değeri, global en iyi konumun uygunluk değerinden daha iyi ise o

parçacığın konumu ve uygunluk değeri, global en iyi konuma (g_i) ve uygunluk değerine (F_{gi}) aktarılır.

Eğer ($F_{pi}^{t+1}(eniye) < F_{gi}^t$) ise ($g_i^{t+1} = g_i^t$) ve ($F_{gi}^{t+1} = F_{gi}^t$)

Eğer ($F_{pi}^{t+1}(eniye) > F_{gi}^t$) ise ($g_i^{t+1} = p_i^{t+1}(eniye)$) ve ($F_{gi}^{t+1} = F_{pi}^{t+1}(eniye)$)

Adım-6: Parçacıkların hızları ve konumları, Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 3.20 ile belirtilen güncelleme eşitliklerine göre yenilenir.

Adım-7: Evrim süreci, iterasyon sayısı tamamlanıncaya kadar üçüncü adımdan itibaren tekrarlanır. Evrim sonunda elde edilen global en iyi konum, problemin çözümü olarak alınır.

Optimizasyon problemlerinin çözümünde hedef fonksiyonu olarak kullanılan hataların mutlak değerlerinin toplamı (HMT), hataların kareleri toplamı (HKT) ve zamanla ağırlıklandırılmış hataların kareleri toplamı (ZHKT), Eşitlik 3.26, Eşitlik 3.27 ve Eşitlik 3.28'de verildiği gibi kullanılmaktadır [10].

$$HMT = \sum_{k=1}^q |e(k)| \quad (3.26)$$

$$HKT = \sum_{k=1}^q e^2(k) \quad (3.27)$$

$$ZHKT = \sum_{k=1}^q t \cdot e^2(k) \quad (3.28)$$

Burada, q her bir parçacığın uygulanması sırasında hatanın ölçüm sayısıdır. Uyum fonksiyonu, hedef fonksiyonun tersinin alınmasıyla hesaplanır ve Eşitlik 3.29'da olduğu gibi bulunur. Optimizasyonda amaç hedef fonksiyonunun minimize edilmesidir [10].

$$f = \frac{1}{f(x)} \quad (3.29)$$

Yukarıdaki fonksiyonlara ek olarak, Eşitlik 3.30'da verildiği gibi Rosenbrock fonksiyonunun, Eşitlik 3.31'de verildiği gibi Rastrigrin fonksiyonunun da hedef fonksiyon olarak kullanıldığı görülmektedir [34].

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (100 \cdot (X_{i+1} - X_i^2)^2 + (X_i - 1)^2) \quad (3.30)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cdot \cos(2\pi x_i) + 10) \quad (3.31)$$

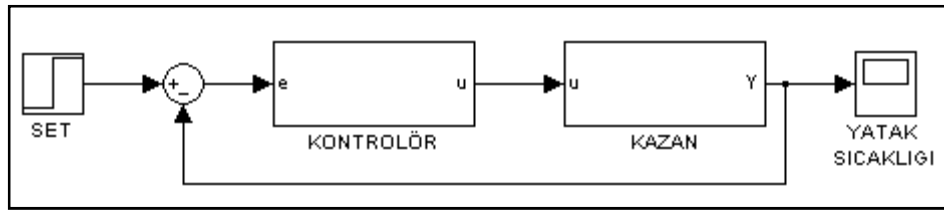
BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tez çalışmasında, klasik kontrol yöntemlerinden olan PID kontrolörün yerine modern kontrol yöntemlerinden olan parçacık sürüsü optimizasyonu tabanlı PID kontrolör (PSO-PID) ile bulanık mantık kurallarına dayalı kontrolör kullanılacak ve birbirlerine göre üstünlükleri incelenecektir. Öncelikle klasik PID kontrolörün tasarımı yapılacak ve parametreleri Ziegler–Nichols Yöntemine göre belirlenecektir. Daha sonra bulanık mantık kurallarına dayalı olarak tasarlanan kontrolörle yatak sıcaklığı kontrol edilecek. Son olarak, parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasıyla optimize edilen PID kontrolörle yatak sıcaklığının kontrol işlemi gerçekleştirilecek.

4.1. TASARLANAN DENETLEYİCİLERİN MODELE UYGULANMASI

Tasarımı yapılan kontrolörlerin sisteme uygulanabilmesi için Şekil 4.1'deki blok diyagram kullanılmıştır. Simülasyon aşamasında buradaki kontrolörün yerine sırasıyla klasik PID, FLC ve PSO-PID kontrolör kullanılmıştır. Simülasyonlar Matlab Simulink yazılımı ile yapılmıştır.



Şekil 4.1. Modellenen sistemin blok diyagramı

4.2. PID KONTROLÖR PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

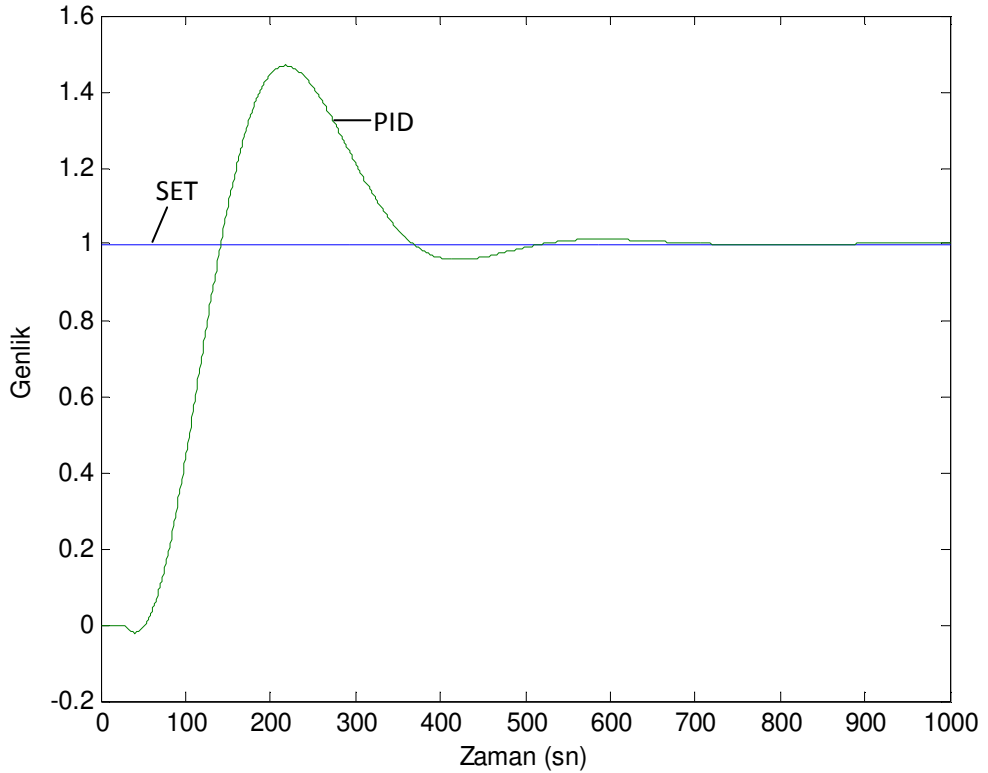
Bu çalışmada PID parametrelerinin belirlenmesinde Ziegler-Nichols metodu kullanılmıştır. Buna göre, sistemin birim basamak giriş karşısında gösterdiği cevap eğrisinden ortaya çıkan ölü zaman gecikmesi T_0 ve tüm sistemin zaman sabiti T_s belirlenmelidir. K_p , K_i ve K_d parametreleri daha önce anlatıldığı gibi hesaplanmalıdır. Elde edilen parametreler aşağıdaki gibidir.

% 25 kazan yükünde $K_p=0,66$ $K_i=0,0044$ $K_d=24,75$

% 65 kazan yükünde $K_p=0,48$ $K_i=0,0022$ $K_d=25,2$

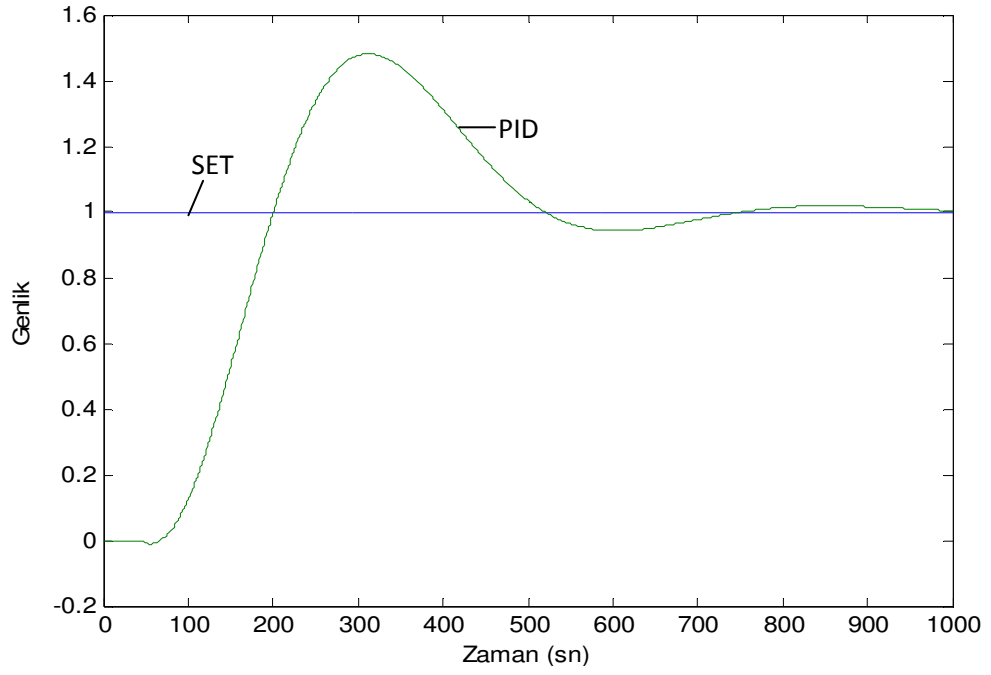
% 100 kazan yükünde $K_p=0,378$ $K_i=0,0013$ $K_d=26,46$

PID parametrelerinin sisteme uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir.

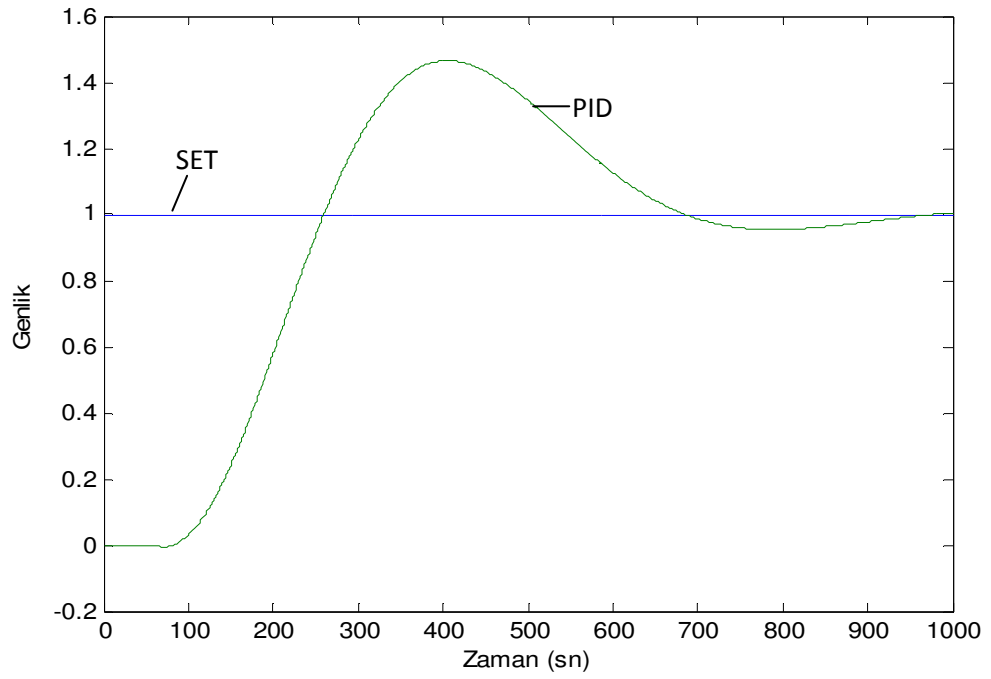


(a)

Şekil 4.2. PID denetleyici simülasyon sonuçları a) % 25 kazan yükünde b) % 65 kazan yükünde c) % 100 kazan yükünde



(b)



(c)

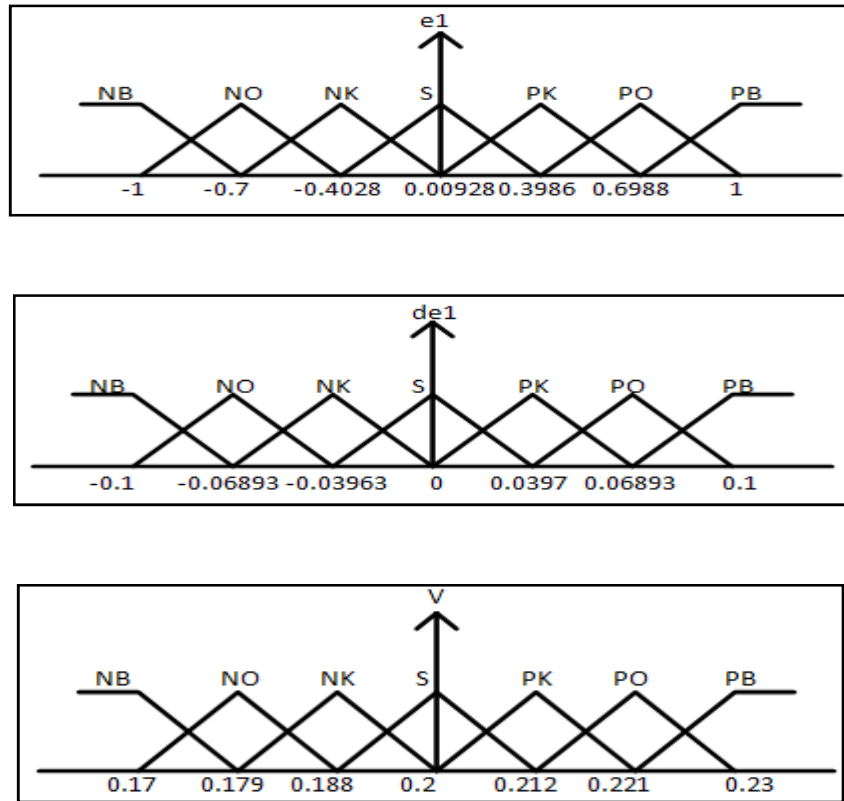
Şekil 4.2. (devam ediyor).

4.3. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ (FLC)

Kullanılan FLC kontrolörlerin her birinin giriş ve çıkış değişkenleri, 7 üyelik fonksiyonu kullanılarak oluşturulmuştur. Bu üyelik fonksiyonlarının isimleri sırasıyla; NB (Negatif Büyük), NO (Negatif Orta), NK (Negatif Küçük), S (Sıfır), PK (Pozitif Küçük), PO (Pozitif Orta), PB (Pozitif Büyük) şeklindedir. Bu üyelik fonksiyonlarından NB ve PB trapmf (trapezoid membership function-yamuk üyelik fonksiyonu) olarak, diğerleri ise trimf (triangle membership function-üçgen üyelik fonksiyonu) olarak seçilmiştir.

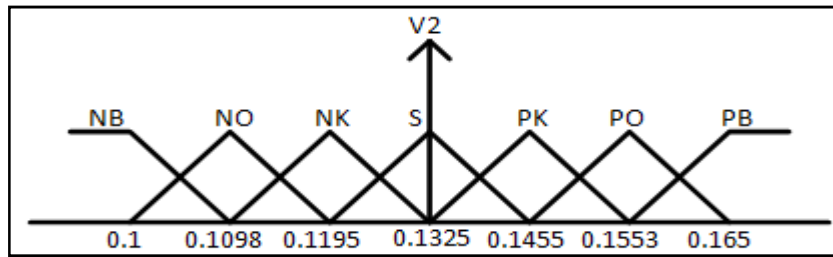
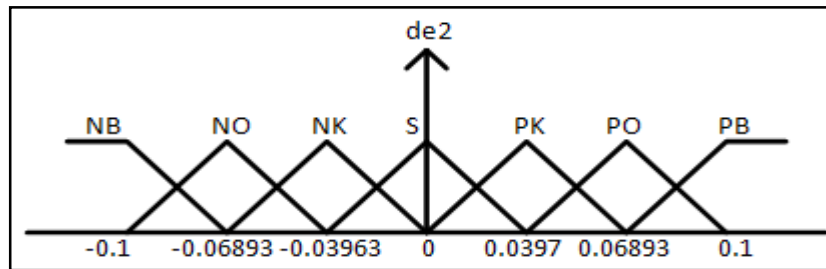
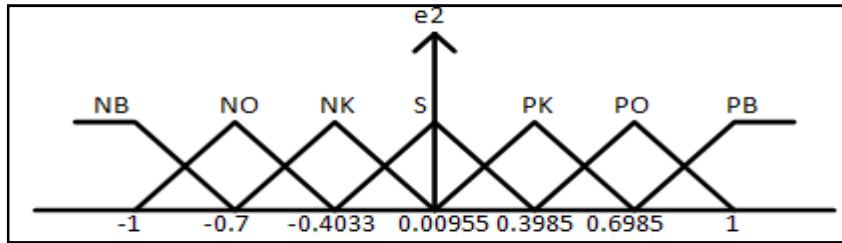
4.3.1. Giriş ve Çıkış Aralıklarının Belirlenmesi

Giriş değerleri hata (e) ve hatanın değişimi (de), çıkış değeri ise kontrol sinylidir (V). Kullanılan giriş ve çıkış aralıkları Şekil 4.3'de gösterilmektedir.

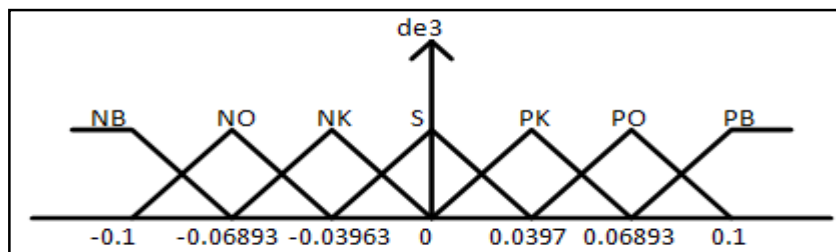
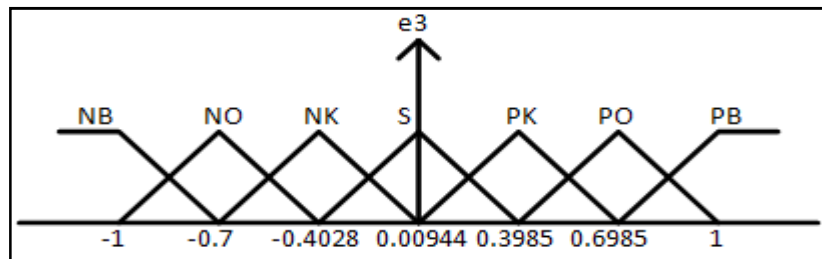


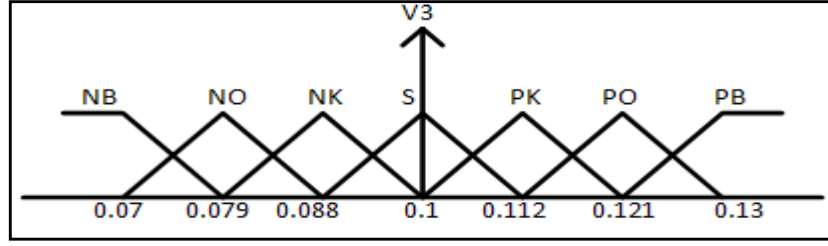
(a)

Şekil 4.3. Giriş ve çıkış aralıkları a) % 25 kazan yükünde b) % 65 kazan yükünde c) % 100 kazan yükünde



(b)





(c)

Şekil 4.3. (devam ediyor).

4.3.2. Bulanık Kuralların Çıkarımı

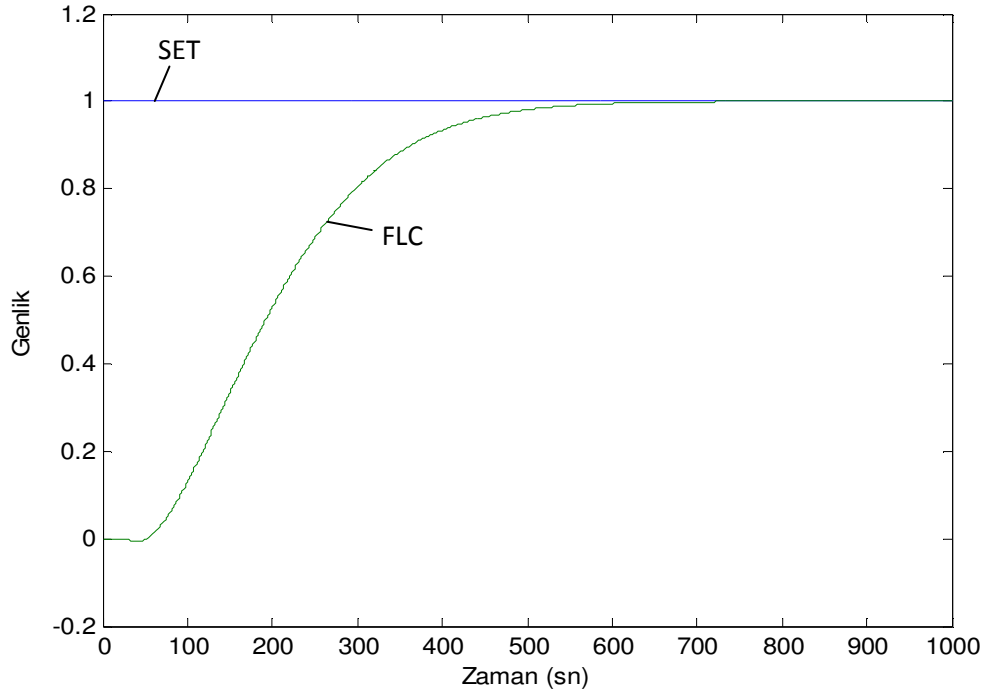
Bulanık kuralların çıkarımı Çizelge 4.1’de verilmektedir. Burada hata sinyali ve hatanın değişimi sinyallerinin üyelik derecelerine göre, kontrol sinyalinin üyelik derecesi belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Bulanık kuralların çıkarımı

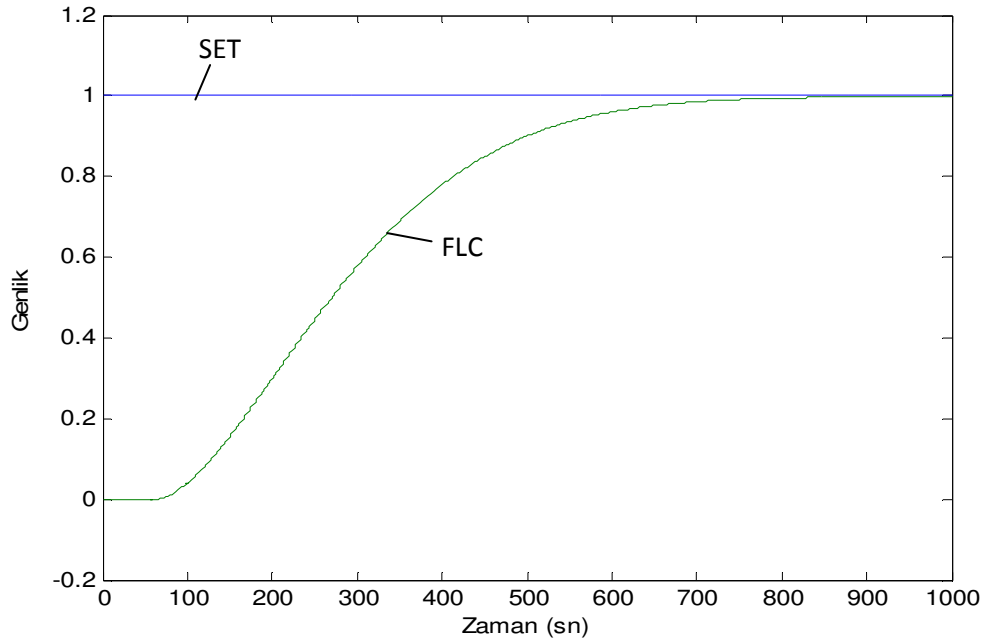
de	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
e							
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NO	NO
NO	NO	NO	NO	NO	NO	NK	NK
NK	NK	NK	NK	NK	NK	S	S
S	S	S	S	S	S	PK	PK
PK	PK	PK	PK	PK	PK	PO	PO
PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

4.3.3. Bulanık Mantık Denetleyici Simülasyon Sonuçları

Giriş ve çıkış aralıklarının belirlenmesi ve bulanık kuralların çıkarımıyla birlikte Matlab’da Fuzzy Logic Toolbox’ın ve Mamdani çıkarımının kullanılmasıyla, sırasıyla % 25 kazan yükü, % 65 kazan yükü ve % 100 kazan yükü için Şekil 4.4’deki sonuçlar elde edilmiştir.

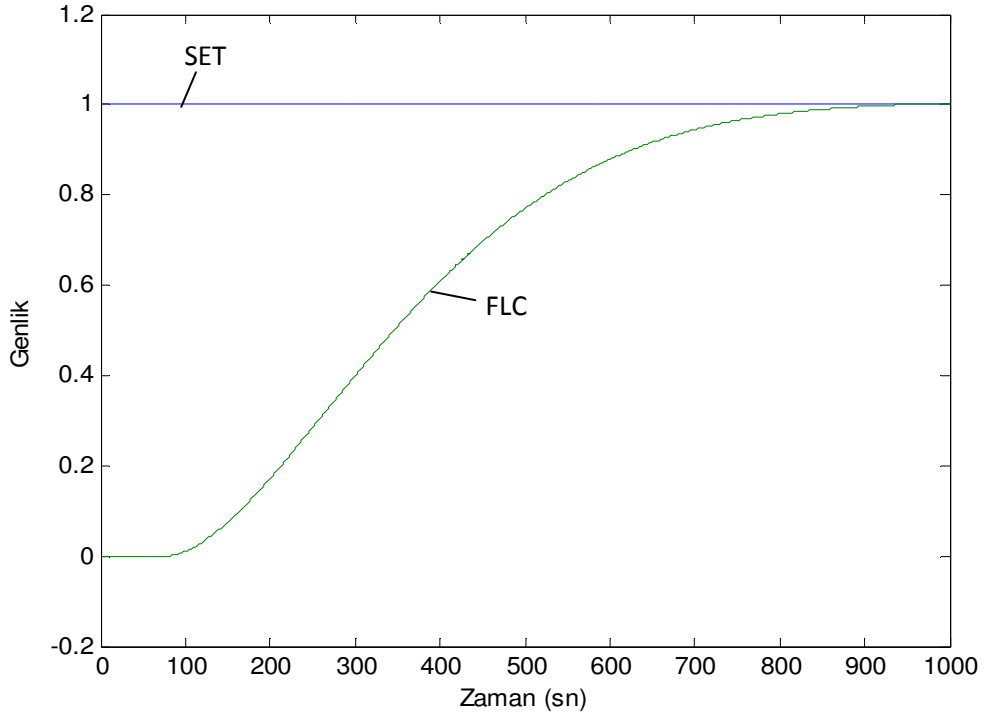


(a)



(b)

Şekil 4.4. Bulanık mantık denetleyici simülasyon sonuçları a) % 25 kazan yükünde b) % 65 kazan yükünde c) % 100 kazan yükünde



(c)

Şekil 4.4. (devam ediyor).

4.4. PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU TABANLI PID KONTROLÖR

PSO-PID kontrolörle dolaşımli akışkan yataklı buhar kazanının yatak sıcaklığını kontrol etmek için Matlab’da yazılım geliştirilmiş ve 3 farklı kazan yükünde elde edilen 3 ayrı model için yatak sıcaklığının kontrolü optimize edilmiştir. Sistemin girişine birim adım sinyali uygulanmış ve Simulink modeli üzerinden hata değerleri, her iterasyonda, bir dosyaya kaydedilerek optimizasyon yazılımına girdi yapılmıştır.

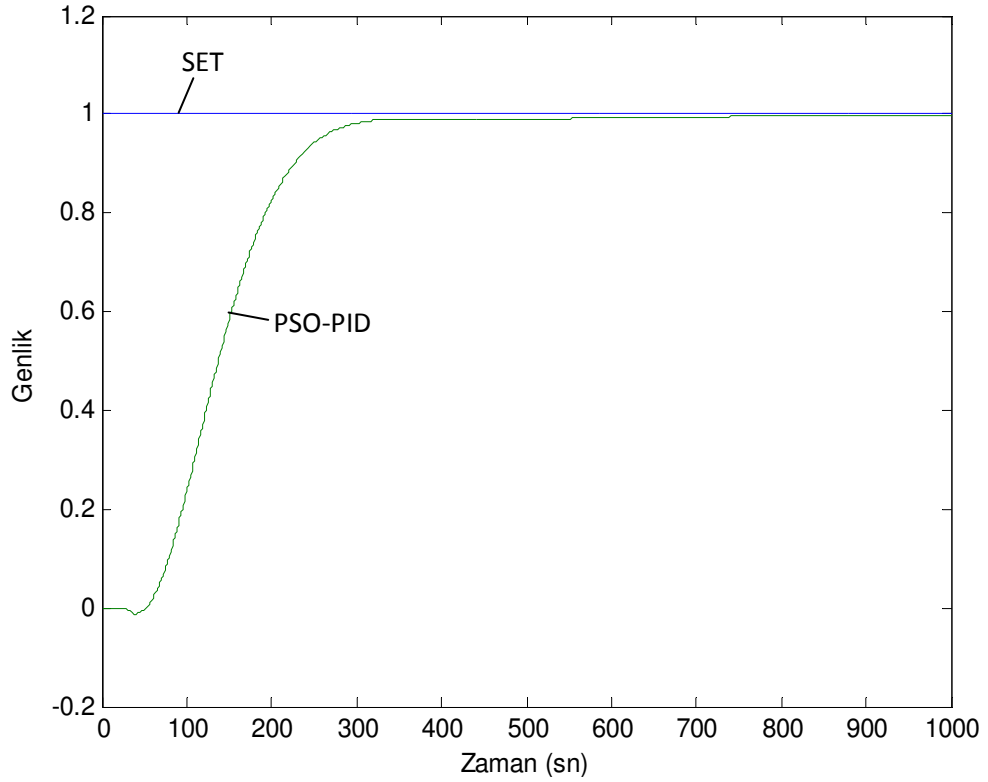
Bu yazılımda, Lokal ve global arama performanslarının dengelenmesi için Clerc’in Eşitlik 2’deki K katsayısı kullanılmıştır. Buna göre c_1 ve c_2 katsayıları 2,05 alınmıştır. Hedef fonksiyon olarak Eşitlik 3.30’daki Rosenbrock fonksiyonu kullanılmıştır. Hızın güncellenmesi için Eşitlik 3.20 kullanılmıştır. Hızın sınırlandırılması için Eşitlik 3.23 kullanılmıştır ve k katsayısı 0,2 alınmıştır. Simülasyon için parçacık sayısı 20, iterasyon sayısı 50 olarak belirlenmiştir. Elde edilen optimize PID parametreleri aşağıda verildiği gibidir.

% 25 kazan yükünde; $K_p = 0,37933$, $K_i = 0,0013206$ ve $K_d = 18,729$

% 65 kazan yükünde; $K_p = 0,4$, $K_i = 0,00078248$ ve $K_d = 30,546$

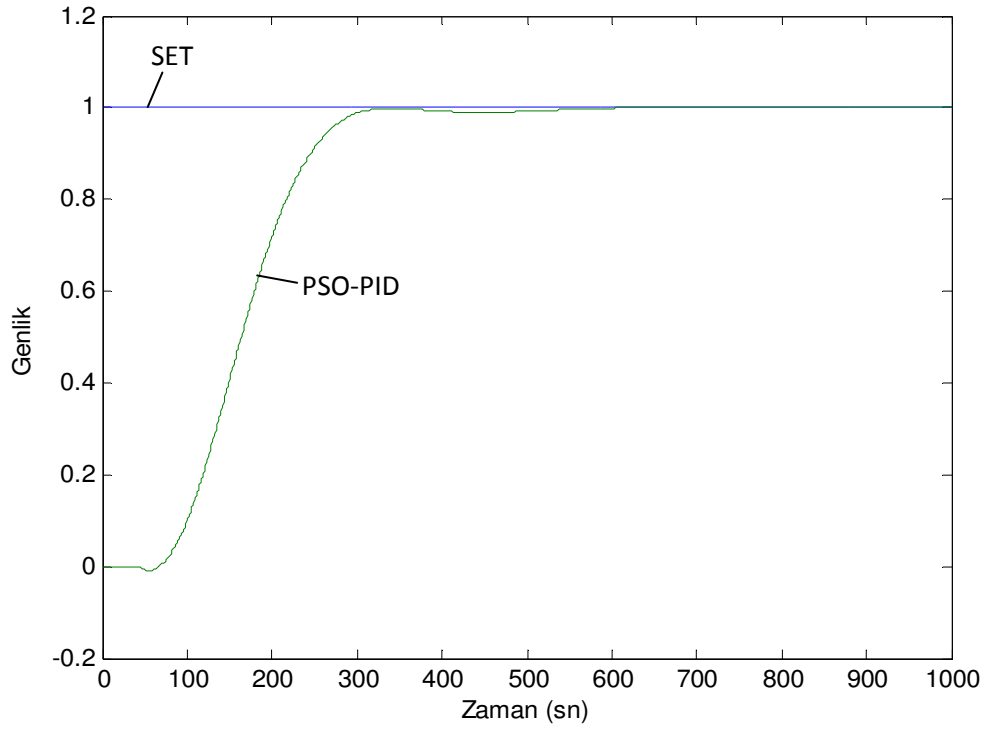
% 100 kazan yükünde; $K_p = 0,3614$, $K_i = 0,0005$ ve $K_d = 36,7762$

Elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 4.5’de verilmiştir.

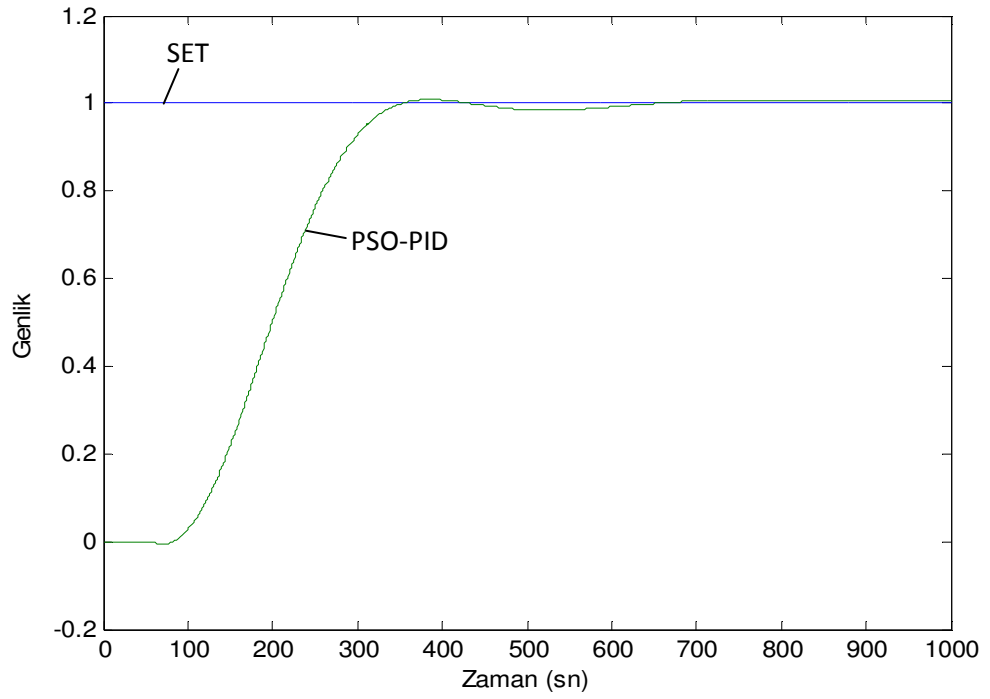


(a)

Şekil 4.5. PSO-PID denetleyici simülasyon sonuçları a) % 25 kazan yükünde b) % 65 kazan yükünde c) % 100 kazan yükünde



(b)



(c)

Şekil 4.5. (devam ediyor).

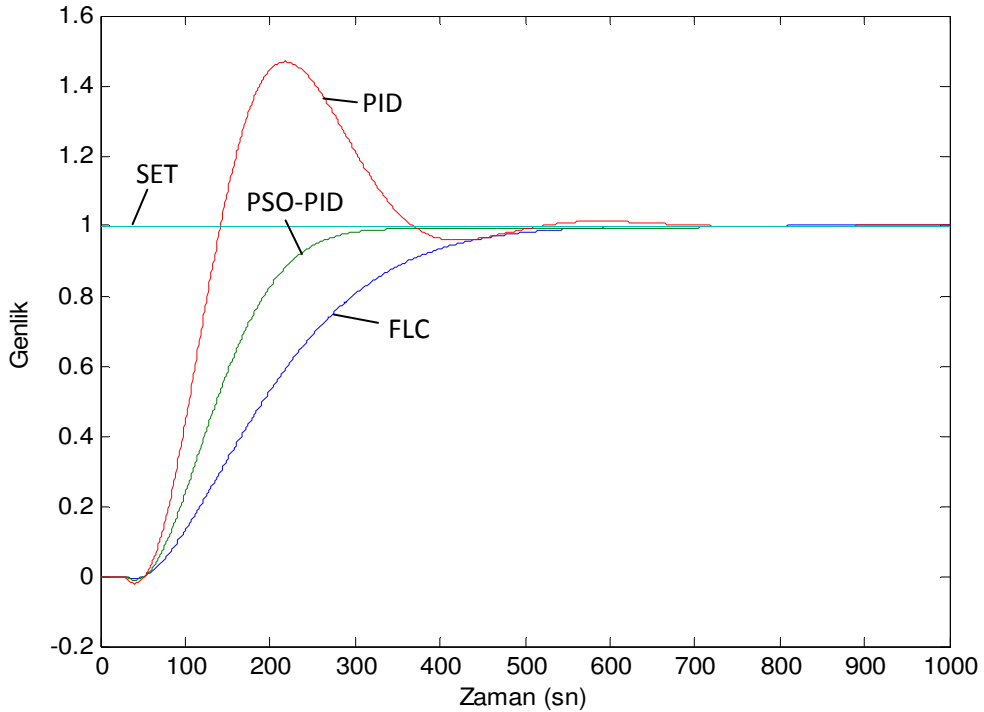
BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde PID, FLC ve PSO-PID kontrolörleri ile yapılan kontrol işlemlerinin sonucunda elde edilen simülasyonlar karşılaştırılmıştır. Her modele ait simülasyonlar birbirleri ile karşılaştırılmış ve en uygun kontrol yönteminin belirlenmesine çalışılmıştır.

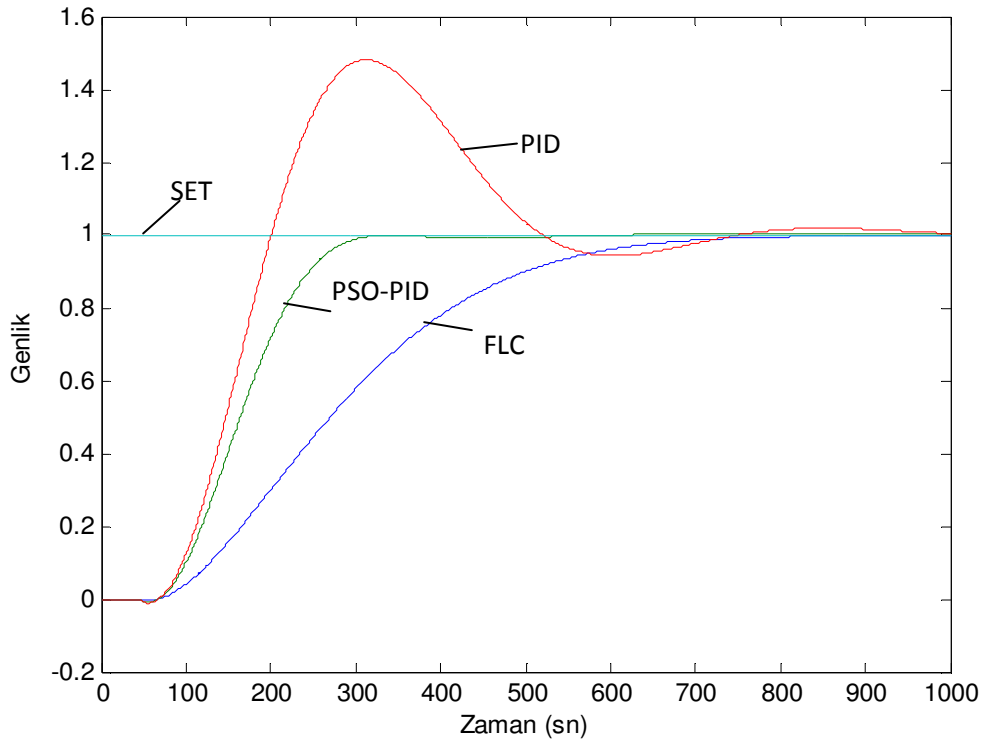
5.1. SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

PID, FLC ve PSO-PID denetleyicilerinin sonuçları üst üste bindirilerek Şekil 5.1’de verilmiştir.

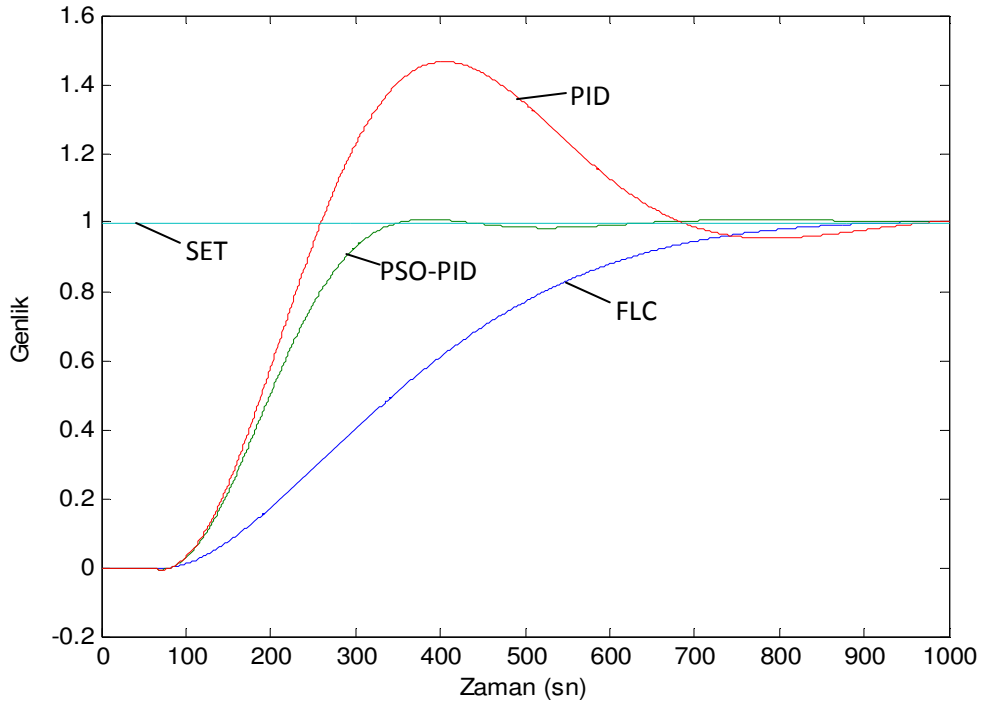


(a)

Şekil 5.1. Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması a) % 25 kazan yükünde b) % 65 kazan yükünde c) % 100 kazan yükünde



(b)



(c)

Şekil 5.1. (devam ediyor).

Akışkan yataklı buhar kazanının yatak sıcaklığının kontrolü, öncelikle % 25 kazan yükünde, daha sonra % 65 kazan yükünde ve % 100 kazan yükünde incelenmiştir. Kullanılan denetleyicilere ait parametreler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması

Kazan Yüğü	Parametreler	Klasik PID	PSO-PID	FLC
25 %	Maksimum Aşma Değeri (%)	46,5	-	-
	Oturma Zamanı (sn)	600	340	600
65 %	Maksimum Aşma Değeri (%)	48	1	-
	Oturma Zamanı (sn)	860	325	800
100 %	Maksimum Aşma Değeri (%)	46,5	1,5	-
	Oturma Zamanı (sn)	1100	385	900

5.2. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Simülasyon sonuçlarına bakıldığında, PSO-PID kontrolörün düşük seviyede bir aşmayla, FLC ve klasik PID kontrolöre göre çok daha kısa sürede istenilen seviyeye ulaştığı görülmektedir. En fazla aşma, PID kontrolörle elde edilen simülasyon sonuçlarında görülmektedir. Bulanık mantık kontrolörle denetimde, bulanık kuralların ve üyelik fonksiyonların tecrübeyle belirlenmesiyle, aşmalar azaltılmış ancak yerleşme zamanı PSO-PID ile denetime göre daha uzun kalmıştır. Bu açıdan bakıldığında, PSO-PID ile denetimde, algoritmanın karmaşık olmaması nedeniyle kolay uygulanabilir olması, tecrübe gerektirmemesi ve ertili bir çözüm sunması, büyük bir avantaj sağlamıştır. Yatak sıcaklığının kontrolünde aşmanın minimum olması ve yerleşme zamanının kısa olması istenir. Bunun nedeni, yatak sıcaklığının istenilen seviyeden uzaklaşması, daha fazla yakıt ve ısı enerjisi kullanıldığı anlamına gelir. PSO-PID kontrolörde hedef fonksiyon olarak Rosenbrock fonksiyonu kullanılarak aşma ve yerleşme zamanı oldukça azaltılmıştır. Böylece yakıttan ve ısı enerjisinden tasarruf sağlanmıştır. Yapılan bu teorik çalışmanın pratiğe dönüştürülmesi durumunda, kazanda yanma verimi artacak ve zararlı emisyonlar azalacaktır. Bunun yanında, enerji santrallerinde kullanılan ekipmanlar en az

seviyede aşınma göstererek uzun yıllar çalışabilecektir. Böylece sistemi oluşturan ekipmanlar zorlanmadan çalıştırılacağı için, bakım ve revizyon maliyetleri ve süreleri azalacaktır. Bu çalışmada, parçacık sürüsü optimizasyonu tabanlı PID kontrolörle denetim ele alınmıştır. Aynı zamanda, bulanık mantık kontrolörün klasik PID kontrolöre göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bu nedenle, parçacık sürüsü optimizasyonu tabanlı bulanık mantık kontrolörle yatak sıcaklığının denetlenmesinin daha etkili bir çözüm sunabileceği düşünülerek, ileride bu konu üzerinde çalışılabilir.

KAYNAKLAR

1. Lixia, B., Junxia, Z. and Song, F., “Modeling and simulating of bed temperature control of circulating fluidized boiler” , *Journal of North China Electric Power University*, 30 (1): 53-56 (2003).
2. Fu, P., Yu, X. and Wang, H., “Research on fuzzy control algorithm for bed temperature control of circulating fluidized bed boiler”, *Proceeding of the Forth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, 825-828 (2005).
3. Jalali, A. A. and Hadavand, A., “Bed temperature control of a circulating fluidized bed combustion system using H_{∞} algorithm”, *International Conference on Control , Automation and Systems*, Seoul, 2658-2662 (2007).
4. Malki, H. A. and Chen, G., “A fuzzy logic controller for boiler syztems in power plants”, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Atlanta, 653-656 (1996).
5. Tiryaki, H., “Bulanık mantık kontrolörler ile PID kontrolörün bir elektriksel termik santralde karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, 20-30 (2005).
6. Hu, H., Hu, Q., Lu, Z. and Xu, D., “Optimal PID controller design in PMSM servo system via particle swarm optimization”, *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, Raleigh, 79-83 (2005).
7. Ou, C. and Lin, W., “Comparison between PSO and GA for parameters optimization of PID controller”, *Proceedings Of the IEEE International Conference On Mechatronics And Automation*, Luoyang, 2471-2475 (2006).
8. Pillay, N. and Govender, P., “A particle swarm optimization approach for model independent tuning of PID control loops”, *The 8th IEEE Africon Conference*, Windhoek, 1-7 (2007).
9. Xu-zhou, L., Fei, Y. and You-bo, W., “PSO algorithm based online self tuning of PID controller”, *International Conference On Computational Intelligence and Security*, Harbin, 128-132 (2007).
10. Gaing, Z-L., “A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system”, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 19 (2): 384-391 (2004).

11. Ying, S., Zengqiang, C. and Zhunhi, Y., “Adaptive constrained predictive PID controller via particle swarm optimization”, *Proceedings of the 26th Chinese Control Conference*, Hunan, 729-733 (2007).
12. Lin, Y-L., Chang, W-D. and Hsieh, J-G., “A particle swarm optimization approach to nonlinear rational filter modeling”, *Expert Systems with Applications*, 34 (2): 1194-1199 (2008).
13. Chang, W-D. and Shih, S-P., “PID controller design of nonlinear systems using an improved particle swarm optimization approach”, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15 (11): 3632-3639 (2010).
14. Zadeh, L. A., “Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3 (1): 28-44 (1973).
15. Mamdani, E. H., “Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant”, *Proceedings of IEEE*, 121 (12): 1585-1588 (1974).
16. Mamdani, E. H. and Assilian, S., “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller”, *International Journal of Man-Machine Studies*, 7 (1): 1-13 (1975).
17. Kickert, W. J. M. and Lemke, H. R., “Application of a fuzzy controller in a warm water plant”, *Automatica*, 12 (4): 301-308 (1976).
18. Ying, H., “The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains”, *Automatica*, 29 (6): 1579-1589 (1993).
19. Ambuel, J., Steenhoek, L., Smith, R. and Colvin, T., “Control of hydrostatic transmission output speed: development and comparison of PI and hybrid fuzzy-PI controllers”, *Transactions of the ASABE*, 36 (4): 1057-1064 (1993).
20. Sugawara, S. and Suzuki, T., “Application of fuzzy control to air conditioning environment”, *Journal of Thermal Biology*, 18: 465-472 (1993).
21. Onat, K., Genceli, O. F. and Arısoy, A., “Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları” Kitabı, *Birsın Yayınları Ltd. Şti.*, İstanbul, 3-34 (2007).
22. Lüy, M., “Yapay sinir ağlarının, modellemesi yapılan termik santralde uygulanması”, Doktora Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, 17-21 (2009).
23. İnternet: İstanbul Gaz Dağıtım A.Ş. “Buhar Kazanları” <http://www.igdas.com.tr/Docs/Pdf/BuharKazanlari.pdf> (2011).

24. İnternet: Mimag-Samko Enerji Teknolojileri A.Ş. “Akışkan Yataklı Kazan Teknolojilerine Dayalı Buhar-Elektrik Üretimi Paneli” http://www.mimag-samko.com.tr/Panel_Bildirisi.pdf (2011).
25. İnternet: Mimag-Samko Enerji Teknolojileri A.Ş. “Akışkan Yataklı Kazanlar” http://www.mimag-samko.com.tr/akiskan_yatakli_kazanlar.pdf (2011).
26. İnternet: Mimag-Samko Enerji Teknolojileri A.Ş. “Kojenerasyon ve Akışkan Yataklı Kazanlar” http://www.mimag-samko.com.tr/Buhar_Elektrik_Uretimi_ve_AYKlar.pdf (2011).
27. İnternet: Makina Mühendisleri Odası “Genel Olarak Akışkan Yatak Prosesi” http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/b81c4484ebf263f_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=0 (2011).
28. İbrahim, Y., “Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri” Kitabı, *Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayınevi*, Bursa, 179-317 (1997).
29. Bütün, M., “Termik santrallerde adaptif bulanık denetimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, 18-23 (2010).
30. Kennedy, J. and Eberhart, R., “Particle swarm optimization”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, 1942-1948 (1995).
31. Gözde H., Taplamacıoğlu M. C., Kocaarslan İ. and Çam E., “Particle swarm optimization based load frequency control in a single area power system”, *University of Pitesti-Electronics and Computers Science, Scientific Bulletin*, 2 (8): 106-110 (2008).
32. Shi, Y. and Eberhart, R. C., “A modified particle swarm optimizer”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Anchorage, 69-73 (1998).
33. Chen, J., Ren, Z. and Fan, X., “Particle swarm optimization with adaptive mutation and its application research in tuning of PID parameters”, *1 st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, Harbin, 990-994 (2006).
34. Shi, Y. and Eberhart, R. C., “Emprical study of particle swarm optimization”, *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, Washington, 1945-1950 (1999).
35. Eberhart, R. C. and Shi, Y., “Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms”, *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, Seoul, 94-100 (2001).

36. Clerc, M., “The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization”, *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, Washington, DC, 1951-1957 (1999).
37. Eberhart, R. C. and Shi, Y., “Particle swarm optimization: developments, applications and resources”, *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, Seoul, 81-86 (2001).
38. Mehrabian, A. R. and Lucas C., “Automatic tuning of decentralized controllers by swarm intelligence”, *3rd International IEEE Conference on Intelligent Systems*, London, 350-353 (2006).
39. Amin, S. H. M. and Adriansyah, A., “Particle swarm fuzzy controller for behavior-based mobile robot”, *9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore, 1-6 (2006).
40. Meiyong, Y. and Xiaodong, W., “PSO-based Parameter Estimation of Nonlinear Systems”, *Proceedings of the 26th Chinese Control Conference*, Hunan, 533-536 (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Hilmi AYGÜN 1985 yılında Ankara’da doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Mimar Sinan Süper Lisesi’nden mezun oldu. 2003 yılında Kırıkkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2007 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans programını, 2011 yılında tamamladı. Halen Karabük Üniversitesi’nde çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

Tel: (554) 576 0987

E-posta: hilmiaygun@karabuk.edu.tr