

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖMÜR YAKITLI KAZANLARDA GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE YANMA
KONTROLÜ

MAHMUT DAŞKIN

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2019

Tezin Başlığı: **Kömür Yakıtlı Kazanlarda Görüntü İşleme İle Yanma Kontrolü**

Tezi Hazırlayan: Mahmut DAŞKIN

Sınav Tarihi: 26.07.2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Servet SOYGÜDER

Fırat Üniversitesi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cem ONAT

Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Oğuz YAKUT

Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. İ. Gökhan AKSOY

İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Mahir UZUN

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘**Kömür Yakıtlı Kazanlarda Görüntü İşleme İle Yanma Kontrolü**’’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mahmut DAŞKIN

ÖZET

Doktora Tezi

KÖMÜR YAKITLI KAZANLARDA GÖRÜNTÜ İŞLEMELİ YANMA KONTROLÜ

Mahmut DAŞKIN

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

157+xi sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Cem ONAT

Kömür yakıcılarında ısıl verimin iyileştirilmesi konusu, artan yakıt fiyatları ve çevresel kaygılardan dolayı mühendisler için her geçen gün daha büyük önem arz etmektedir. Bu çerçevede, verimli ve temiz çalışan yakıcıların ortak özellikleri, yakıt/hava oranını ideal değerinde denetleyen bir kapalı çevrim kontrol sistemine sahip olmalarıdır. Bu bakımdan, son zamanlarda yanma odasının kameralar aracılığıyla görüntülenmesi ve görüntü işleme teknikleri ile yanma verimliliğinin analizi konuları ilgi çekmektedir.

Bu çalışma temel olarak üç ardışık aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada 85000 kcal/h kapasiteli stokerli bir kömür yakıcısının yanma odası farklı iki açıdan kameralar aracılığı ile gözetlenmiştir. Yakıcıya olan kömür yüklemesi, sabit ve yükleme-bekleme olacak şekilde gerçekleştirilerek farklı yanma koşulları için alev görüntüleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bir baca gazı analiz cihazı yardımı ile yanmaya ait hava fazlalık katsayısı ve emisyon değerleri elde edilmiştir. Elde edilen alev görüntülerine farklı görüntü işleme teknikleri uygulanarak görüntü matrislerinden anlamlı bilgiler çıkarılmıştır. Daha sonra hava fazlalık katsayısının, görüntü bilgileri ve baca gazı sıcaklığı ve sadece görüntü bilgileri kullanılmak suretiyle iki farklı şekilde tahmin işlemi yüksek doğruluklu YSA modelleri ile gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, yanma odasına olan hava beslemesi ve hava fazlalık katsayısı arasındaki ilişki sistem tanımlama işlemi ile yüksek doğruluklu bir transfer fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Son olarak ise, tanımlanan transfer fonksiyonuna sanal gerçeklik sağlamak üzere tahmin işlemi gerçekleştirilen hava fazlalık katsayısı değerleri eklenerek, ağırlıklı geometrik merkez temelli PI-PD, H_∞ ve model öngörülü kontrol olmak üzere üç farklı kontrol ailesinden tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Kömür yakıcıları, yapay sinir ağı, AGM yöntemi, hava fazlalık katsayısı, alev görüntüsü

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

COMBUSTION CONTROL BY IMAGE PROCESSING IN CAOL COMBUSTORS

Mahmut DAŞKIN

Inönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

157+xi pages

2019

Supervisor: Associate Professor Cem ONAT

The issue of improving thermal efficiency in boilers is getting more and more important for engineers because of rising fuel prices and environmental concerns. In this context, common point of the boilers working efficiently and cleanly is to have a closed loop control system controlling fuel/air ratio on its ideal value. From this point of view, recently, monitoring of combustion chamber by using the cameras and the efficiency analyze of combustion with image processing techniques are trendy topics in this field.

This study mainly consists of three consecutive stages. In the first stage, the combustion chamber of a coal-fired burner with a capacity of 85000 kcal / h was monitored by cameras from two different angles. The coal loading to the burner was carried out in a constant and loading-waiting manner to obtain flame images for different combustion conditions. At the same time, excess air coefficient and emission values of combustion were obtained via a flue gas analyzer. Different image processing techniques were applied to the obtained flame images and significant information was gathered from image matrices. Then, the prediction of excess air factor was carried out in two different ways. The first ANN model was formed by taking image information and the flue gas temperature as input, excess air factor as output. The second ANN model was formed by taking only the image information as input and the excess air as output. In the second step, the relationship between the air supply to the combustion chamber and the excess air coefficient was defined by the system identification process with a high accuracy transfer function. Finally, three different controllers (Weighted geometric center-based PI-PD controller, H_{∞} controller and Model Predictive Controller) which are from three different families were designed and applied to the transfer function. To provide virtual reality, estimated lambda values were included to the system as disturbance.

KEYWORDS: Coal combustors, artificial neural network, WGC method, excess air coefficient, flame image

TEŞEKKÜR

117M121 numaralı TUBİTAK projesi kapsamında hazırlanan bu tez çalışmasının her noktasında bana öneri ve destekleriyle yol gösteren, değerli katkılarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Cem ONAT' a;

Deney sisteminin kurulumunda ve görüntü alımı konularındaki yardımlarından dolayı proje araştırmacıları Doç. Dr. Ö. Faruk ÖZGÜVEN, Doç. Dr. M. Fatih TALU'ya ve proje bursiyeri Arş. Grv. Sedat GOLGİYAZ'a;

Tez çalışmam boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Aileme ve Eşime;

Ayrıca katkılarından dolayı, değerli çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam	3
1.2. Literatür Özeti	4
2. KURAMSAL TEMELLER.....	10
2.1. Yapay Sinir Ağları	10
2.1.1. Biyolojik bir nöronun yapısı.....	11
2.1.2. Yapay sinir ağının kısa tarihi.....	12
2.1.3. Yapay sinir ağı modeli ve yapısı	13
2.1.4. İleri beslemeli yapay sinir ağları	15
2.1.5. Geri beslemeli yapay sinir ağları.....	16
2.1.6. Yapay sinir ağları aktivasyon fonksiyonları	18
2.1.7. Geri yayılım algoritması.....	19
2.2. Görüntü İşleme.....	20
2.2.1. Basit bir görüntü oluşturma modeli	22
2.2.2. Renk uzayları.....	22
2.2.3. Görüntü örnekleme ve niceleme.....	26
2.2.4. Dijital görüntülerin gösterimi	27
2.2.5. Dijital görüntüden özellik çıkarımı.....	29
2.2.6. Gri seviye eş oluşum matrisi	29
2.2.7. Dalgacık dönüşümü	31
2.2.8. Matris özellikleri	31
2.3. Yanma.....	32
2.3.1. Tam ve eksik yanma	33
2.3.2. Baca gazı analizi.....	34
2.3.3. Kömürün yakılması	35
2.3.4. Teorik yanma havası hesaplamaları	37
2.3.5. Hava fazlalık katsayısı.....	39

2.4.	Türkiye'nin enerji durumu	41
2.5.	Yakıcılar.....	42
2.5.1.	Yakıcı türleri ve sınıflandırılması.....	43
2.6.	Sistem Tanımlama Teorisi	45
2.7.	Kontrol Teorisi.....	47
2.7.1.	PID kontrol	49
2.7.2.	Oransal (P) kontrol	54
2.7.3.	Oransal ve integral (PI) kontrol	54
2.7.4.	Oransal ve türevsel (PD) kontrol.....	54
2.7.5.	Gülbüz kontrol.....	55
2.7.6.	Ağırlıklı geometrik merkez yöntemi	64
2.8.	YSA' lı Kontrol.....	67
2.8.1.	Sinir ağılı öngörülü kontrol	67
2.8.2.	NARMA-L2 kontrol.....	69
2.9.	Matris yaklaşımı ile çoklu lineer regresyon	71
2.9.1.	En küçük kareler yöntemi.....	73
2.10.	Kharitonov Teoremi.....	75
3.	MATERYAL VE YÖNTEM	76
3.1.	Deney Düzeneği.....	76
3.1.1.	Yakıcı sistemi	78
3.1.2.	Baca gazı analiz cihazı	83
3.1.3.	Anemometre	84
3.1.4.	Hava besleme ünitesi tasarımı	86
3.1.5.	Kameraların yerleştirilmesi	90
3.2.	MATLAB Programı.....	91
3.2.1.	Matlab Simulink	91
3.3.	Veri Toplama	92
3.4.	Görüntü İşleme ve Özellik Çıkarma Adımları	93
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	97
4.1.	Regresyon Analizi.....	97
4.2.	Adımlı Hava Sinyali Girişleri	103
4.3.	Sinüzoidal Hava Giriş Sinyalleri.....	106
4.3.1.	Frekans değeri $\pi 10$ rad/s için sinüzoidal hava giriş sinyali	106
4.3.2.	Frekans değeri $\pi 20$ rad/s için sinüzoidal hava giriş sinyali	108
4.3.3.	Frekans değeri $\pi 40$ rad/s için sinüzoidal hava giriş sinyali	110
4.4.	Yanma için ideal hava miktarlarının belirlenmesi	112
4.5.	Yapay Sinir Ağı Çalışmaları	115

4.5.1.	İz değerleri, baca gazı sıcaklığı ve hava fazlalık katsayısı ile oluşturulan YSA modeli	116
4.5.2.	Görüntü özellikleri ve hava fazlalık katsayısı ile oluşturulan YSA modeli	121
4.6.	Kontrolcü Tasarımları	125
4.6.1.	Sistem tanımlama	125
4.6.2.	PI-PD kontrol uygulaması	127
4.6.3.	Model öngörülü kontrol uygulaması	133
4.6.4.	Gürbüz H_{∞} kontrol uygulaması	135
4.7.	Kharitonov Polinomları	140
4.8.	Gerçek Zamanlı Kontrol İşlemi	144
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	146
6.	KAYNAKLAR	149
7.	EKLER	155
	ÖZGEÇMİŞ	157

SİMGELER VE KISALTMALAR

PID	Oransal-İntegral-Türev (Proportional-Integral-Derivative) Kontrol
PI	Oransal-İntegral (Proportional-Integral) Kontrol
PD	Oransal-Türev (Proportional-Derivative)
K_p	Oransal Sabit
K_i	İntegral Sabit
K_d	Türev Sabiti
MPC	Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control)
AGM	Ağırlıklı Geometrik Merkez
λ	Hava Fazlalık Katsayısı
T_b	Baca Gazı Sıcaklığı
YSA	Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Bir otomatik yüklemeli kömür yakıcısında yanma veriminin zamanla değişimi	4
Şekil 2.1.	Biyolojik bir nöronun yapısı.....	11
Şekil 2.2.	Yapay sinir ağı genel modeli	13
Şekil 2.3.	Yapay sinir ağlarının genel sınıflandırılması	17
Şekil 2.4.	Geri beslemeli yapay sinir ağı	18
Şekil 2.5.	Görünür bölge bölümü (Anonim,2018b).....	23
Şekil 2.6.	Yıldızların sıcaklık ve renk ilişkileri	24
Şekil 2.7.	Kırmızı, yeşil ve mavi rengin farklı kanallardaki görüntüsü.....	25
Şekil 2.8.	Farklı tonlardaki resimlerin R,G ve B kanallarında görünümü	25
Şekil 2.9.	Dijital görüntü oluşturma. (a) Sürekli görüntü. (b) Sürekli görüntüde A'dan B'ye olan tarama çizgisi.(c) Örnekleme ve Nicelendirme.(d) Dijital tarama çizgisi.....	27
Şekil 2.10.	Örnek bir koordinat düzlemi	28
Şekil 2.11.	Kömürün oluşum süreci (Anonim, 2019f)	36
Şekil 2.12.	Hava fazlalık katsayısındaki değişimlerin verim ve emisyon değerleri üzerindeki etkisi.....	40
Şekil 2.13.	2014 yılına ait tüketilen enerjinin sektör dağılımı.....	42
Şekil 2.14.	Alev borulu yakıcı (Anonim,2019d)	44
Şekil 2.15.	Su borulu yakıcı (Anonim, 2019d).....	45
Şekil 2.16.	Sistem tanımlama blok şeması	46
Şekil 2.17.	MATLAB sistem tanımlama araç kutusu penceresi.....	47
Şekil 2.18.	Klasik geri besleme yapısı.....	49
Şekil 2.19.	PID kontrolcü gömülü bir geri beslemeli kontrol çevrimi	50
Şekil 2.20.	S formundaki cevap eğrisi	51
Şekil 2.21.	P_{cr} periyotlu sürekli salınım.....	53
Şekil 2.22.	Sistemin blok diyagramı.....	57
Şekil 2.23.	Toplamsal bozucu yapısı	59
Şekil 2.24.	Zıt yönlü toplamsal bozucu yapısı.....	59
Şekil 2.25.	Kütle-yay-sönüm sistemine ait yapılandırılmış belirsizliklerle blok diyagramı	61
Şekil 2.26.	Sistemin standart blok diyagramı	62
Şekil 2.27.	M- Δ blok diyagramı	62
Şekil 2.28.	Kapalı döngülü blok diyagram	64
Şekil 2.29.	Basit bir geri beslemeli PI kontrol.....	65
Şekil 2.30.	Kararlılık bölgesi	66
Şekil 2.31.	Ağırlıklı geometrik merkez	66
Şekil 2.32.	Öngörülü kontrolde sistem tanımlaması.....	67
Şekil 2.33.	Sinir ağı sistem modeli	68
Şekil 2.34.	Öngörülü kontrol prosesi.....	69
Şekil 2.35.	Narma-L2 örnek uygulaması	70
Şekil 2.36.	Narma-L2 kontrolcülü sistem cevabı	71

Şekil 3.1.	Deney sisteminin şematik görünümü.	77
Şekil 3.2.	Deney sisteminin genel görünüşü.	77
Şekil 3.3.	Yakıcının yapay sinir ağı genel modeli.	78
Şekil 3.4.	Yakıcı sistemi (Anonim, 2019g).	79
Şekil 3.5.	Yakıcı sistemine ait teknik çizimler	80
Şekil 3.6.	(a) Helezon (b) Helezonun Bağlantısı	82
Şekil 3.7.	(a)Bunker, (b) Bunkere kömür yüklenmesi.....	82
Şekil 3.8.	Baca gazı analiz cihazı	83
Şekil 3.9.	Baca gazı analiz cihazının probunun konumu.....	84
Şekil 3.10.	(a) Çok fonksiyonlu ölçüm cihazı (b) Sıcak tel anemometresi	85
Şekil 3.11.	Hava kanalının şematik olarak gösterimi	85
Şekil 3.12.	Anemometre ile ölçülen hava hız bilgisi	86
Şekil 3.13.	Fan sisteminin matlab simulink ortamında blok diyagramı	87
Şekil 3.14.	Motor-Enkoder-Fan bağlantısı	87
Şekil 3.15.	Ayarlanabilir frekans dönüştürücüsü.....	88
Şekil 3.16.	Dijital-Analog dönüştürücüsünün ve elektrik devresinin bağlantı düzeneği.....	89
Şekil 3.17.	Fan sisteminin genel görünüşü	89
Şekil 3.18.	Fan sisteminin yakıcı ile bağlantısı	90
Şekil 3.19.	Kameralar ve soğutma düzenekleri	91
Şekil 3.20.	Yanmanın görüntülenmesi.....	93
Şekil 3.21.	Yan kameradan elde edilen farklı anlara ait yanma görüntüleri.....	94
Şekil 3.22.	Arka kameradan elde edilen farklı anlara ait yanma görüntüleri	95
Şekil 4.1.	Veri işleme akış şeması	98
Şekil 4.2.	Ham alev görüntüsü bilgileri.	99
Şekil 4.3.	Filtre edilmiş alev görüntüsü bilgileri	100
Şekil 4.4.	Regresyon modeliyle tahmin edilen λ değerleri.	103
Şekil 4.5.	Adımlı hava girişleri için farklı kanallarda elde edilen iz değerleri.	104
Şekil 4.6.	Basamak giriş için tüm değerler.	105
Şekil 4.7.	Sinüzoidal giriş için tüm değerler ($\pi/10$).....	107
Şekil 4.8.	Sinüzoidal hava girişi için farklı kanallarda elde edilen iz değerleri($\pi/10$).	108
Şekil 4.9.	Sinüzoidal giriş için tüm değerler ($\pi/20$).....	109
Şekil 4.10.	Farklı kanallardaki iz değerleri ($\pi/20$).....	110
Şekil 4.11.	Sinüzoidal giriş için tüm değerler ($\pi/40$).....	111
Şekil 4.12.	Farklı görüntü kanallarında elde edilen iz değerleri ($\pi/40$).....	112
Şekil 4.13.	Üç saniye yükleme 130 saniye bekleme ile elde edilen veriler	114
Şekil 4.14.	Beş saniye yükleme 115 saniye bekleme ile elde edilen veriler	115
Şekil 4.15.	Görüntü bilgisi-baca gazı sıcaklığı ve λ arasında oluşturulan model.	116
Şekil 4.16.	Kırmızı kanalla elde edilen YSA sonuçları.	117
Şekil 4.17.	Yeşil kanalda elde edilen YSA sonuçları.	118
Şekil 4.18.	Mavi kanalda elde edilen YSA sonuçları.	119
Şekil 4.19.	Gri kanalda elde edilen YSA sonuçları.	120

Şekil 4.20.	İz ve Baca gazı sıcaklığı kullanılarak elde edilen tahmin ve Gerçek λ değerleri.....	121
Şekil 4.21.	Görüntü bilgisi ve λ arasında oluşturulan model.....	122
Şekil 4.22.	Alev görüntüsüne ait dalgacık çıkışları (yaklaşım görüntüsü ve alt üç banta ait histogram bilgileri)	122
Şekil 4.23.	Filtresiz durumda lamda tahmin sonuçları (dalgacık ve eş oluşum matrisi yöntemleri için)	124
Şekil 4.24.	Median filtresi uygulanmış durumda lamda tahmin sonuçları (dalgacık ve eş oluşum matrisi yöntemleri için)	125
Şekil 4.25.	Elde edilen tahmin model cevapları	127
Şekil 4.26.	PI-PD kontrolcü şeması.....	128
Şekil 4.27.	İç çevrime ait PD kontrolcü parametreleri kararlılık bölgesi ve AGM noktası.....	130
Şekil 4.28.	İndirgenmiş sistem blok diyagramı.	130
Şekil 4.29.	PI kontrolcü parametreleri kararlılık bölgesi ve AGM noktası.	132
Şekil 4.30.	PI-PD Simulink modeli (bozucu giriş ile).....	133
Şekil 4.31.	Model öngörülü kontrol simulink modeli (bozucu giriş ile)	134
Şekil 4.32.	MPC yapı tanımlama ara yüzü	134
Şekil 4.33.	Belirsiz Parametrelili Sistemin Blok Diyagramı	136
Şekil 4.34.	Genelleştirilmiş sistem yapısı.....	137
Şekil 4.35.	H_{∞} Kontrol blok diyagramı	138
Şekil 4.36.	Farklı kontrol yöntemleri ile sistem cevabı	139
Şekil 4.37.	Kontrolcü çıkış sinyalleri	140
Şekil 4.38.	H_{∞} Kontrol uygulaması	142
Şekil 4.39.	PIPD Kontrol uygulaması.....	142
Şekil 4.40.	PID Kontrol uygulaması.....	143
Şekil 4.41.	Model Öngörülü Kontrol uygulaması	143
Şekil 4.42.	PI kontrolcü parametreleri.....	1435
Şekil 4.43.	Gerçek zamanlı kontrol sonuçları.....	1435

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. YSA ve BSA arasındaki benzer yapılar	15
Çizelge 2.2. Bazı kriterlere göre BSA ve YSA arasındaki farklar	15
Çizelge 2.3. Aktivasyon fonksiyonları	19
Çizelge 2.4. Bazı yakıt türlerine göre hava fazlalık değerleri. (Anonim,2019b).....	41
Çizelge 2.5. Sistemin basamak cevabı temelli Ziegler-Nichols ayar yöntemi (birinci yöntem).....	52
Çizelge 2.6. Kritik kazanç K_{cr} ve kritik periyot P_{cr} 'ye dayalı Ziegler-Nichols ayar yöntemi (ikinci yöntem).	53
Çizelge 3.1. Yakıcı sistemine ait teknik özellikler	81
Çizelge 4.1. Regresyon analizi sonuçları.....	102
Çizelge 4.2. Dalgacık ve eş oluşum için YSA sonuçları	123
Çizelge 4.3. Sistem Tanımlama ile elde edilen model doğrulukları.....	126
Çizelge 4.4. AGM yöntemi ile elde edilen Kontrolcü Parametreleri	133

1. GİRİŞ

Yakıcılarda ısıl verimin iyileştirilmesi konusu, artan yakıt fiyatları ve çevresel kaygılar yüzünden, her geçen gün mühendisler için daha büyük önem arz etmektedir. Verimli ve temiz çalışan yakıcıların ortak özellikleri, yakıt/hava oranını ideal değerinde denetleyen bir kapalı çevrim kontrol sistemine sahip olmalarıdır.

Alev görüntüsü yanma verimine dair önemli bilgiler barındırmaktadır. Yanma verimini büyük oranda belirleyen hava fazlalık katsayısı (λ) bilgisini alev görüntülerinden tahmin etme işi, geleneksel kapalı çevrim sistemlerde kaçınılmaz olarak yer alan yapısal zaman gecikmesi değerini ortadan kaldırması perspektifinden, son derece önemlidir. Ayrıca, geleneksel kapalı çevrim kontrol sistemlerinde hava fazlalık katsayısının ölçümü, piyasa fiyatı oldukça yüksek olan baca gazı analiz cihazları ile gerçekleştirilmektedir. Bu çerçevede, yanma odasının kamera aracılığıyla görüntülenmesi, görüntü işleme teknikleri ile yanma verimliliğinin analizi ve görüntü işlemeli kapalı çevrim sistem tasarımı konuları son zamanlarda artan bir şekilde ilgi çekmektedir.

Yakıtın kimyasal enerjisini yanma yoluyla ısı enerjisine dönüştüren ve bunu taşıyıcı akışkana aktaran makineler olarak tanımlanan yakıcıların verimi, yanma sonucu oluşan ısı enerjisinin ne kadar büyük olduğu ve hangi oranda kullanım mahalline taşındığına bağlıdır. Yanmanın iyileştirilerek veriminin yükseltilmesi aynı zamanda CO salınımını da azalttığından dolayı yakıcıyı daha çevreci kılmaktadır (Onat vd., 2015).

Optimum yanmanın gerçekleşmesi için genel bir kural olarak yakıtın beslendiği havanın belirli bir oranda arttırılması gerekmektedir. Bu orana ise hava fazlalık katsayısı denmektedir. Yakıtın cinsine göre değişiklik gösteren bu katsayının yüksek olması durumunda karbonmonoksit miktarı azalmaktadır ancak yanmaya katılmayan hava, yanmanın olduğu bölümde ısınarak baca gazı sıcaklığının yükselmesine sebebiyet vermektedir. Bu durum ise yanma verimini düşürmektedir. Hava fazlalık katsayısının gereğinden düşük olması durumu ise karbonmonoksit miktarını arttırırken, ısliliğe sebep olmakta ve yanma verimini de olumsuz yönde etkilemektedir (Bilgin, 2006). Bahsedildiği üzere hava fazlalık katsayısının yanma

verimi üzerinde bu denli etkili olması sebebiyle araştırmacıların dikkatini çeken bir konu olmaktadır.

Alev formu yanma işleminin verimliliğine dair detaylı bilgiler sunmaktadır. Bu bilgilerden faydalanarak kapalı çevrim yakma kontrol sistemleri teşkil edilebilmektedir. Yakıcılarda görüntü işlemeli yakma kontrolü sistemleri mübadil geleneksel kapalı çevrim sistemlere göre düşük maliyetlidir. Ayrıca yapısal zaman gecikmesini ortadan kaldırmasından dolayı bozucu reddi performansı daha yüksek olan bir tekniktir.

Yakıtların oksijen ile tepkimeye girerek ısı ve diğer yanma ürünlerinin oluşması prosesi olan yanma için oksijen kaynağı olarak ticari yakıcılarda taze hava kullanılmaktadır. Yanma odasına sevk edilen hava miktarının gerekenden az olması, gerekenden çok olması ya da gerektiği kadar olması yanmanın özelliklerini ve dolayısıyla oluşan ısı miktarını ve diğer yanma ürünlerinin tür ve miktarlarını belirlemektedir. Bu sebeple yakıt-hava karışımındaki havanın miktarına göre yanma; az hava ile yanma, fazla hava ile yanma ve tam yanma olarak isimlendirilmektedir. Az hava ile yanmanın en belirgin özelliği baca gazının çok koyu renkli ve isli olmasıdır. Ayrıca alev rengi de olması gerekenden daha koyu renkte olmaktadır. Bununla beraber baca gazı analizörü ile baca gazı çözümlemesi yapıldığında fazla miktarda CO görülmektedir. Fazla hava ile yanma durumunda alev rengi çok açık ve parlak olmaktadır. Baca gazı hemen hemen gözle görülmemektedir. Bu durumda ocak sıcaklığı düşer ve baca gazı sıcaklığı artar. Tam yanmada genellikle alev rengi açık sarı renktedir (BP Petrolleri A.Ş., 2014).

Yakıcılarda ısıl verimin iyileştirilmesi konusu, artan yakıt fiyatları ve çevresel kaygılar yüzünden, her geçen gün mühendisleri daha iyi tasarımlar yapma noktasında motive etmektedir. Homojen olmayan, kompakt, çoğunlukla ligno-selülozik bitki parçalarından meydana gelen, tabakalaşma gösteren, içerisinde çoğunlukla C, az miktarlarda H-O-S ve N elementlerinin bulunduğu ama inorganik (kil, silt, iz elementleri gibi) maddelerin de olabildiği, bataklıklarda oluşan, kahverengi ve siyah renk tonlarında olan, yanabilen, katı fosil organik kütleler olarak tanımlanan kömürlerin (Karaman, 2010) yanma prosesleri oldukça karmaşıktır (Wojcik vd., 2012; Sujatha vd., 2012). Kömürü oluşturan elementler ve uçucu madde bileşiminin aynı madenden elde edilen kömürlerde bile farklılıklar arz edebilmesi kömür yakma

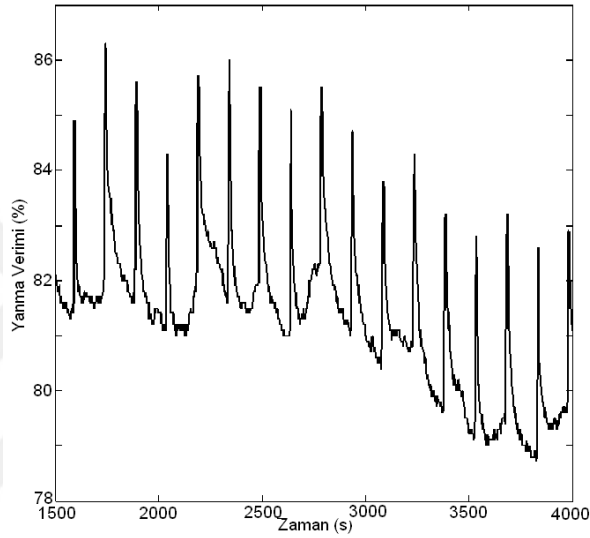
sistemlerinin gerek modellenmesi ve gerekse bunlar için kapalı çevrim yakıt/hava oranı kontrolcileri tasarımı konularını karmaşıktır. Tasarım ve işletme koşullarının aynı olmasına rağmen yakıcıların, uzun bir süre çalıştırdıktan sonra genellikle farklı yanma karakteristikleri sergilemeleri de konunun zorluk derecesini artırmaktadır (Yang vd., 2014).

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu tezin konusu üç boyutta değerlendirilmiştir. Birinci aşamada, bir yakıcıda yanma odasının kameralar aracılığıyla gözlenmesiyle elde edilen sayısal görüntü bilgilerini, eş zamanlı biçimde bir baca gazı analiz cihazı vasıtasıyla ölçülen hava fazlalık katsayısı bilgilerine farklı özellikler ile ilişkilendirmek suretiyle en ideal yapay sinir ağı tahmin algoritması geliştirilmesi konusudur. İkinci aşamayı yakıcıya olan hava besleme değerlerin geniş aralıklarda dalgalandırılarak hava fazlalık katsayısı ile arasındaki ilişkinin sistem tanımlama yöntemiyle transfer fonksiyonu olarak ortaya koyulması oluşturmaktadır. Üçüncü aşamada ise elde edilen transfer fonksiyonuna kontrolcü tasarım konusudur. Burada sistem çıkışına tahmin edilen hava fazlalık katsayısı değerleri de eklenerek sistemin bir sanal gerçeklik ortamında kontrol uygulaması amaçlanmıştır. Bu bağlamda geleneksel kontrolcü ailesinden olan PI-PD kontrolcü tasarımı, bunun yanında modern optimal kontrolcü ailesi yapısından H_∞ ve yapay sinir ağı temelli model öngörülü kontrolcü tasarımları geliştirilecek olup sonuçlarının ise karşılaştırmalı olarak verilmesi amaçlanmaktadır.

Uygulama, otomatik beslemeli fındık kömür yakıtlı bir yakıcı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ancak kömürün yakılmasındaki zorluklar düşünülünce farklı yakıtlar için de kolayca geliştirilebileceği aşikârdır. Tezin ortaya konulması noktasında araştırmacıyı güdüleyen soru; “alev görüntüsünün hangi sayısal çokluğunu bir yapay sinir ağı içinde değerlendirerek, hava fazlalık katsayısını daha yüksek doğrulukta tahmin edecek bir model geliştirilebilir” sorusudur. Bunu müteakip genişletilmiş ikinci soru; “otomatik beslemeli kömür yakıtlı yakıcıların kapalı çevrim yakma kontrolünde referans giriş olarak hava fazlalık katsayısı yerine alev görüntülerinin yapay sinir ağından süzülmesiyle elde edilen hangi sayısal çokluklar kullanılabilir ve nasıl bir kapalı çevrim kontrol sisteminde değerlendirilebilir” sorusudur.

Yukarıda bahsedilen teorik değerlendirmelerin ötesinde, pratik olarak piyasada mevcut ticari otomatik yüklemeli kömür yakıcılarının, bir helezon aracılığıyla fındık kömürün belirli bir süre ile yakma odasına sevki ve belirli bir süre bekleme şeklinde çalışması yanma veriminde kayda değer dalgalanmalar oluşturmaktadır. Örneğin, Şekil 1.1’de verilen yanma verimi değişimi grafiği 6 saniye yükleme 140 saniye bekleme modunda çalışan otomatik yüklemeli bir kömür yakıcısından alınmıştır. Burada verimin bir yükleme ve beklemeyi içeren 146 saniyelik periyotta değiştiği görülmektedir.



Şekil 1.1. Bir otomatik yüklemeli kömür yakıcısında yanma veriminin zamanla değişimi

1.2 Literatür Özeti

Yanma prosesindeki karmaşıklık, kömür yakma sistemlerinin modellenmesi ve kontrolü konusunu araştırmacıların üzerinde çalıştığı güncel bir konu kılmaktadır ve dolayısıyla da bu konuda literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar baca gazı analizi temeline dayalı modelleme, optimizasyon ve kontrol tasarımı çalışmaları buna ek olarak yanma odasının gözlenmesi temeline dayalı modelleme ve kontrol tasarımı çalışmaları şeklinde iki kategoride ele alınabilir. Çalışmalar kronolojik sıra ile düşünüldüğünde ilk göze çarpan son zamanlarda yanma odasının görüntülenmesi temeline dayalı çalışmaların çok daha fazla olduğudur. Çalışmalarda kullanılan yakıtlardaki farklılık arka planda tutularak literatüre bakıldığında; Aström ve Eklund, ana kontrol değişkenlerinin yakıt akışı ve kontrol vanası ayarı, çıkış değişkenlerinin ise tambur basıncı ve aktif çıkış gücü olduğu 160 MW gücünde bir yakıcının bütün

davranışlarını tanımlamak için doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir (Astrom ve Eklund, 1972). Kocaarslan, 750MW kapasiteli bir yakıcı için uyarlamalı kontrol tasarlamış ve uygulamıştır. Söz konusu yakıcı için indirgenmiş bir matematiksel model geliştirmiş, yakıcının elektrik gücü ve entalpi kontrolü geleneksel PID kontrol ile karşılaştırmıştır (Kocaarslan, 1993). Önerdiği uyarlamalı kontrol yapısının yakıcının verimini artırdığını göstermiştir. Endüstriyel enerji ve güç üretiminde ileri kontrol uygulamalarına genel bir bakış için Donne vd. (2001), Rees ve Lu (2002) araştırma makalelerine göz atılabilir. Birinci çalışmada iki örnekleme gerçekleştirilmiştir, kombine bir ısı ve güç sisteminin dinamik simülasyonu çalışılmıştır. Bu güç sistemi modellenirken farklı bileşenlere ait modeller türetilmiştir. Daha sonra bu modeller bağlantılandırılarak enerji, kütle ve momentumun korunumu ilkelerine dayalı olacak şekilde inşa edilmiştir. İkinci çalışmada ise kombine güç sistemi için PI(D) kontrol çevrimini otomatik olarak ayarlama stratejilerini geliştirmek için farklı programlar kullanılmıştır. Bu hususta ayarlama işlemi, doğrusal açık çevrim modellerin tanımlanması esaslı ve bu modeller üzerinde kontrolcülerin optimum şekilde ayarlanması olarak geliştirilmiştir. Daha sonra bu işlem MATLAB/SIMULINK üzerinde tasarlanmış ve doğrulanmıştır (Donne vd., 2001; Rees ve Lu, 2002).

Genelde, tasarımcılar baca gazındaki oksijen konsantrasyonunu azaltmak yoluyla daha iyi ısı verim sağlamaktadırlar. Lee ve Jou, baca gazındaki oksijen konsantrasyonunu %1 azaltmak suretiyle yanma verimini %0.6 oranında geliştirdiklerini rapor etmişlerdir (Lee ve Jou, 2011). Kauprianov ve arkadaşları baca gazı konsantrasyonu ile ısı kayıpları arasındaki ilişkiyi analiz etmişlerdir. Fueloil ve gaz yakıtlı yakıcılar için hava fazlalık katsayısının optimizasyonu üzerine bir hesaplama modeli geliştirmişlerdir. Matematiksel modelde optimizasyon ölçütü olarak toplam maliyetin minimum durumu göz önünde bulundurulmuştur. Çeşitli yakma şartları altında verilen yakıcı ve yakıt için optimum hava fazlalık katsayısını önerilen modelle elde etmek mümkündür. Yöntemin orta ve düşük kapasiteli yakıcıların analizinde daha faydalı olacağı düşünülmüştür (Kouprianov vd., 1999).

Baca gazı analizi temeline dayalı çalışmaların bir alt kategorisinde, düşük NO_x salınımı sağlamak için geliştirilen optimizasyon algoritması çalışmaları ifade edilebilir. Hao vd., yapay sinir ağı ve genetik algoritma kullanılarak toz kömür

yakıtlı yakıcılarda düşük NO_x salınımı için yanma optimizasyonu sağlamışlardır. Farklı koşullar altında çalışan 600 MW kapasiteli bir yakıcının NO_x emisyon karakteristiği deneysel olarak araştırılmış ve bir model geliştirmek amacıyla NO_x emisyon özelliklerini tanımlamak için yapay sinir ağı kullanmışlardır. (Hao vd.,2001). Hao vd. bir başka çalışmalarında, yapay sinir ağları ve genetik algoritma temelli, toz kömür yakıtlı yakıcılardaki karbon yanma davranışlarının modellenmesi ve en yüksek yakıcı ısı verimine ulaşmak amacıyla çalışma koşullarının optimizasyonu için karma bir yöntem önerilmiştir. Söz konusu yöntem, yapay sinir ağı modelinin optimum çözümünü gerçekleştirmek ve mevcut çalışma durumlarının uygun ayar noktalarını belirlemek için genetik algorithmadan yararlanmaktadır (Hao vd., 2003). Farklı yakıtlı yakıcılarda NO_x emisyonlarının azaltılmasına ilişkin optimizasyon çalışmalarına dikkat çekici bir fark getiren çalışma Liu vd.'nin yaptığı çalışmadır (Liu vd., 2012). Liu ve arkadaşları bu çalışmalarında, biokütle pellet (odun talaşı) yakıtlı düşük kapasiteli yakıcı kullanmışlardır. Söz konusu çalışmada yanma odasına ikincil bir hava girişi uyarlanmış ve bu girişin farklı seviyelerde olması durumunun NO_x ve CO emisyonlarına etkisi incelenmiştir.

Yukarıda sözü edilen çalışmalar “baca gazı analizi temeline dayalı modelleme ve kontrol tasarımı çalışmaları” kategorisindedirler. Baca gazı analizi ile oluşturulacak kapalı çevrim kontrol sistemlerinde en büyük problem kaçınılmaz olarak belirli bir zaman gecikmesi değeriyle yüzleşilmesi ve bunun verime kötü yönde yansımalarıdır. Sistem zaman gecikmeli olduğu için, bozucu etkiler sisteme etki ettiğinde kapalı çevrim kontrol sistemi doğası gereği geç cevap vermek suretiyle kötü bir bozucu reddi performansı sergilemektedir. Pratik değerlendirmeler çerçevesinde söz konusu sistemlerde yüzleşilen majör bozucu girişler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Değişen güç gereksinimiyle birlikte sistemin farklı modlarda çalışabilmesi.
- Emilen hava kalitesindeki değişimler.
- Yakıtın ısı değerindeki değişimler.
- Katı yakıtlı sistemlerde, yakıt nemine bağlı yüklem sisteminde oluşan tıkanmalar.

- Emilen hava sıcaklığındaki değişimler.

Buna karşın alev görüntüleri yanma odasının anlık durumunu derhal yansıtabilir. Son yıllarda, yakıcılarda yanma problemlerine uygulanan görüntü işleme temeline dayalı analiz ve tasarımlarına giderek artan bir ilgi vardır. Yamaguchi ve arkadaşları, farklı yakıt hava oranlarında spektral karakteristiklerin farklılıklarını keşfetmek için fiber optik sensörler kullanarak alevin emisyon yoğunluğunu analiz etmişlerdir (Yamaguchi vd., 1997). (Burkardt, H. 1992; Docquier ve Candel, 2002; Toth vd., 2014) çalışmaları bu konuda güzel bir genel değerlendirme sunmaktadır. Ultraviyole ve kızılötesi ışınımlı bazı alev detektörleri yanma rejimini teşhis etmek için kullanılmaktadır. Fakat bunlar alevin sadece bir kısmını kapsarlar ve böylece yeterli alev bilgisi sağlayamazlar. Bununla birlikte, lazerli yanma odası gözleme sistemleri de yanma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemler yanma dinamiğinin parametrelerini kantitatif olarak ortaya koyabilmelerine karşın karmaşıklıkları ve yüksek maliyetleri endüstride yaygınlaşmalarına engel oluşturmaktadır (Kohse-Hoinghaus vd., 2005; Lu vd., 2004). Lino vd. (1998), alevin dinamik davranışı belirlemek için görüntü işleme teknikleri kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır (Lino vd.,1998). Söz konusu çalışmada alevin yüksek parlaklıktaki bölgesinin zamanla değişimi gözlenmiştir. Alev görüntülerinde yanmanın kalitesini ortaya koyan bol miktarda önemli bilgi mevcudiyetini ortaya koymayı amaçlayan bir başka çalışma (Huang vd.,1999)'dür. Bu çalışmada çevrim içi olarak alev görüntüleme amacıyla yeni bir sistem geliştirilmiştir. Bu şekilde deney sonuçlarıyla sistemdeki alevin dinamik davranışlarının analiz edilebileceği ortaya konmuştur.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda kullanılan yakma sistemleri yakıtlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, kömür yakıtlı yakıcılar ile yapılan çalışmaların göreceli olarak seyrek olduğu değerlendirilmektedir. Huang ve arkadaşları toz kömür yakıtlı bir yakıcı için radyant enerji sinyalli bir kontrol sistemi önermiştir (Huang vd., 2010; Liu vd., 2016; Zhou vd., 1996; Chen vd., 2010). İlk defa Zhou vd. tarafından ortaya konan radyant enerji sinyali kavramı alev görüntülerinin işlenmesi ve spektral analiz konularını kapsamaktadır (Zhou vd., 1996). Ancak (Zhou vd., 1996) ve (Chen vd., 2010)' de önerilen kapalı çevrim kontrol sistemleri aynı zamanda bir oksijen algılayıcısına da ihtiyaç duymaktadır. Radyant enerji sinyaline bulaşmadan alev görüntülerinin işlenip doğrudan kapalı çevrim kontrol sisteminde değerlendirilmesi

konusunda Chen vd.'nin yaptığı çalışmalar oldukça güncel ve kıymetlidir (Chen vd., 2012; Chen ve Chang, 2013.). Chen vd. bu çalışmalarında esas bileşen analizi (PCA- Principle Component Analyze) yöntemini kullanmışlardır. PCA verileri daha küçük boyutlarda temsil edilmesini sağlayan istatistiksel bir boyut indirgeme tekniğidir. (Chen vd., 2012)'da 658x492x3 boyutunda 300 renk görüntüsü PCA'da değerlendirilerek, iki bileşen baskın bileşen olarak sınıflandırılmış ve böylece görüntü kümesi sadece 300x2 lik özellik vektörüyle ifade edilmiştir. PCA ile elde edilen temel bileşenlerin her ikisi de tasarlanan kontrol algoritmasında değerlendirilmiştir. Bir başka ifade ile ideal yanmaya karşılık gelen iki temel bileşen değerlerinin ikisi de referans giriş olarak kullanılmıştır. (Chen ve Chang, 2013)'da ise tasarlanan kontrol sistemi PCA ile elde edilen temel bileşenlere ek olarak baca gazındaki oksijen miktarı bilgisine de ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca (Chen ve Chang, 2013)'da önerilen kapalı çevrim sistemde iki adet kontrol girişi vardır. Sisteme giren taze havanın yanı sıra sisteme giren yakıt da kontrolcü tarafından belirlenmektedir.

Buraya kadar anılan çalışmalar düşünüldüğünde, yakıcıların verim artırma problemine yönelik güncel çözüm önerilerinin, sistemdeki zaman gecikmesini önemli ölçüde düşüren, yanma odasını gözlemek suretiyle oluşturulan kapalı çevrim kontrol sistemlerinin tasarımı çalışmaları etrafında yoğunlaştığı görülmektedir.

Endüstride en yaygın kullanılan denetçiler, basit yapıları ve yüksek dayanıklılıkları yüzünden, şüphesiz PID kontrolcüler ailesidir. Bu yüzden birçok araştırmacı daha iyi PID tasarım algoritmaları geliştirme konusunda güdülenmektedir (Yu, 2006; Han vd., 2012; Sariyildiz vd.,2015). PID kontrol uygulamada endüstriyel PID denetçilerin büyük bir çoğunluğu türev etkisine kapalıdır. Çünkü proseslerde kaçınılmaz olarak yüzleşilen ölçüm gürültüsü yüzünden PI denetçiler PID denetçilere göre daha çok tercih edilmektedirler. Türev etkisinin olmaması PI denetçi yapısını daha basit ve ölçüm gürültüsüne de daha duyarsız kılmaktadır (Shinsky, 1998; Bissell, 1994; Hamamci ve Tan, 2006). Literatürdeki PID kontrol tasarımı ile ilgili akademik çalışmalara bakıldığında, modellenmesi güç olan karmaşık sistemler için yapay sinir ağı adaptif PID kontrol tasarım çalışmalarının dikkat çekici derecede fazlalığı pratikteki karmaşık prosesler için adaptif PID tasarımının uygun çözüm

olduğuna işaret etmektedir (Asha vd., 2016; Mosaad ve Salem, 2014; Kumar vd., 2014; Cong ve Liang, 2009; Cetin ve Iplikci, 2015; Zhang ve Chen, 2013).

Son zamanlarda endüstriyel sistemlerin PI denetimi için geliştirilmiş önemli tasarım yöntemlerinden biri ağırlıklı geometrik merkez yöntemidir (Onat, 2013). Yöntem, denetim parametreleri düzleminde kararlılık bölgesinin hesaplanması ve kararlılık bölgesinin ağırlıklı geometrik merkezinin hesaplanması temeline dayalıdır. Onat, zaman gecikmeli sistemler için ağırlıklı geometrik merkez denetçisinin, geçici rejim cevabı karakteristiklerinin uzlaşması açısından, özel bir nokta olduğunu göstermiştir. Onat ve diğeri bir başka çalışmada söz konusu yöntemi diğeri yöntemler ile karşılaştırıp ağırlıklı geometrik merkez denetçisinin daha iyi performans sergilediğini göstermişlerdir (Onat vd., 2012). Onat, metodunu bir adım daha ileriye götürerek, değişken zaman gecikmesinin doğrudan ölçülebildiği ya da gözlenebildiği sistemler için yeni bir kazanç programlamalı (gain scheduling) PI denetçi tasarım yöntemi önermiştir (Onat, 2014). Önerilen PI denetçinin denetim parametreleri değişken zaman gecikmesinin birer fonksiyonudurlar. Bu fonksiyonlar, farklı zaman gecikmelerine karşılık hesaplanan ağırlıklı geometrik merkez noktalarının eğri uydurma yöntemi ile eşleştirilmesi ile elde edilmektedir. Söz konusu yöntemler kolaylıkla farklı mimarideki PID ve PI-PD kontrolcülerin tasarımı için genişletilebilir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Yapay Sinir Ağları

Günümüz dünyasında, cep telefonlarından buzdolaplarına kadar hayatımızın önemli noktalarında bulunan aletler bilgisayar sistemleri ile çalışmaktadır. İş dünyasında, kamu işleri, çevre ve organizasyon işleri ve bilhassa askeri sistemlere kadar her alanda bilgisayarlardan faydalanmak olağan hale gelmiştir. Önceleri sadece elektronik veri transferi yapmak ve karmaşık hesaplamaları gerçekleştirmek üzere geliştirilen bilgisayarların zaman içerisinde büyük miktardaki verileri filtreleyerek özetleyebilen ve mevcut bilgileri kullanarak olaylar hakkında yorumlar yapabilen nitelikler kazandığı görülmektedir. Günümüz bilgisayar sistemleri olaylar hakkında karar verme ve olaylar arasında ilişki kurabilme kapasitesine sahiptirler. (Öztemel, 2006)

Yapay sinir ağları, yapay zeka biliminin alt kolu olarak araştırmacıların ilgi odağı olan ve bilgisayarların öğrenmesine yönelik çalışmaları kapsayan bir araştırma alanıdır. Bu yapılar, insan beyninin özelliklerinden olan öğrenme ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri herhangi bir yardım almadan otomatik olarak gerçekleştirmek amacı ile geliştirilen bilgisayar sistemleri olarak tanımlanabilir.

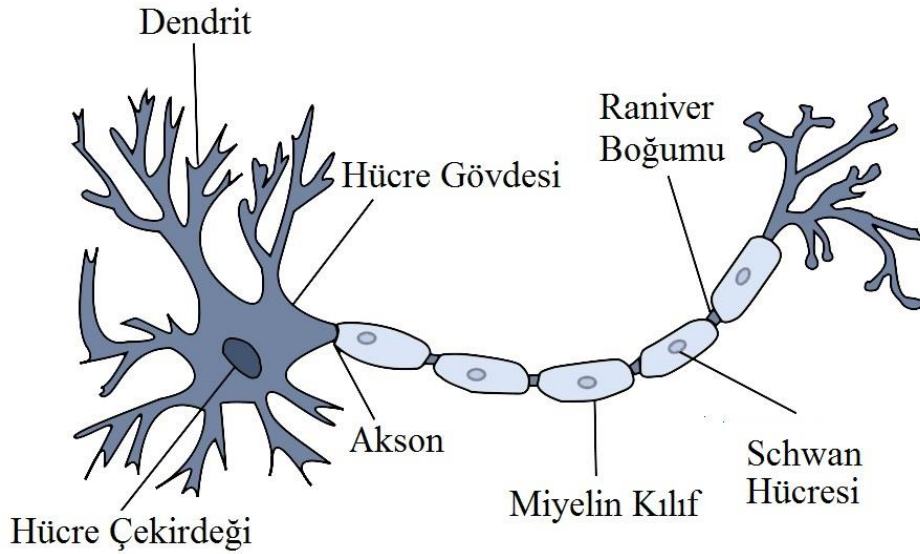
Yapay sinir ağları (YSA) temeli biyolojik sinir ağlarına benzeştirilen etkili bir hesaplama sistemidir. YSA' lar ayrıca "yapay sinir sistemleri", "paralel dağıtılmış süreç sistemleri" veya "bağlantı kurucu sistemler" olarak da adlandırılır. YSA, birimler arasında iletişime izin vermek amacıyla bazı modellerde birbirine bağlı geniş bir birim yığını edinir. Bu birimler, ayrıca düğümler ve sinirler olarak da adlandırılır, paralel olarak çalışan basit işlemcilerdir.

Her nöron bir diğerine bağlantı hattıyla bağlıdır. Her bir bağlantı hattı giriş sinyali hakkında bilgi içeren bir ağırlıkla ilişkilendirilir. Bu, nöronlar için özel problemler çözümede kullanışlı bilgilerdir çünkü ağırlık, genellikle iletilen sinyali uyarır veya kısıtlar. Her bir nöron iç duruma sahiptir ki bu da aktivasyon sinyali olarak adlandırılır. Aktivasyon kuralı ve giriş sinyalinin bütünleştirilmesinden sonra üretilen çıkış sinyalleri diğer birimlere gönderilebilir.

Yapay sinir ağlarının en temel özellikleri; öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, özellik belirleme ve optimizasyon işlemleri olarak sıralanabilir.

2.1.1 Biyolojik bir nöronun yapısı

İnsan beyni karmaşık nöron ağından oluşmaktadır. Şekil 2.1 tipik bir biyolojik nöron yapısını göstermektedir. Klasik bir nöron diğerlerinden aldığı sinyali, dendrit adı verilen ve somayı çevreleyen saç benzeri yapılar vasıtasıyla toplar. Daha sonra nöron, elektriksel eylemdeki ani gerilim yükselmelerini kablo benzeri yapıya sahip binlerce dala ayrılan akson aracılığı ile gönderir. Aksonun her telinin sonundaki sinaps olarak adlandırılan yapı eylemi aksondan, bağlantının gücüne bağlı olarak düşürebilen veya yükseltebilen ve bağlantı nöronunda artırımlara veya azalımlara sebebiyet veren elektrik etkilerine çevirir. Öğrenme, sinapsların etkinliğini değiştirerek gerçekleşir, böylece bir nöronun başka bir değişime etkisi artar (Örs 2017; Sheikhtaheri vd., 2014).



Şekil 2.1. Biyolojik bir nöronun yapısı

Biyolojik bir nörona ait temel kısımlar ve işlevleri şu şekilde sıralanabilir;

- **Dendritler:** Ağaç dalları gibidirler, bağlı oldukları nöronlardan bilgi almakla sorumludurlar. Diğer bir deyişle, nöronların kulakları gibi olduklarını söyleyebiliriz.
- **Soma:** Nöronun hücre çekirdeğidir ve dendritten alınan bilginin işlenmesinden sorumludur.

- **Akson:** Kablo benzeri yapıya sahiptir ve nöronlar bu kablo yapısı aracılığıyla bilgilerin gönderimini sağlar.
- **Sinaps:** Akson ve diğer nöron dendritleri arasındaki bağlantıdır.

2.1.2 Yapay sinir ağının kısa tarihi

YSA' nın tarihi aşağıdaki gibi üç bölümde toplanabilir:

- 1940-1960 arası YSA:

Bu aralıktaki gelişmeler şu şekildedir;

- **1943:** Sinir ağı konseptinin Warren McCulloch (Psikolog) ve Walter Pitts (**Matematikçi**) ile başladığı kabul edilmektedir. 1943 yılında beyindeki nöronların nasıl çalıştığının açıklanması amacıyla, elektrik devreleri kullanılarak basit bir sinir ağı modellenmiştir.
- **1949:** Donald Hebb “The Organization of Behavior” kitabında, bir nöronun diğerine olan tekrarlanan uyarımlarının kullanıldıkları her seferde gücünü arttığını ortaya koymuştur.
- **1956:** Tylor tarafından ilişkisel bir bellek ağı ortaya konmuştur.
- **1958:** Rosenblatt tarafından McCulloch ve Pitts nöron modeli için “Perceptron” olarak adlandırılan bir öğrenme metodu geliştirilmiştir.
- **1960:** Bernard Widrow ve Marcian Hoff “ADALINE” ve “MADALINE” olarak adlandırılan modeller geliştirmişlerdir.
- **1960-1980 arası YSA:**

Bu aralıktaki gelişmeler şu şekildedir;

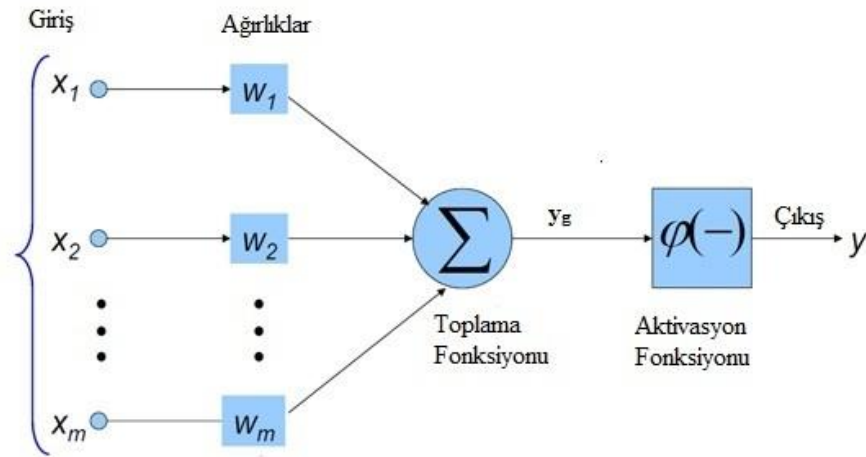
- **1961:** Rosenblatt başarısız bir girişimde bulunmuş ancak çok katmanlı ağlar için geri yayılım önerisini ortaya koymuştur.
- **1964:** Taylor, çıkış birimleri arasındaki engellemeler ile bir “kazanan hepsini alır” çevrimi inşa etmiştir.
- **1969:** Minsky ve Papert tarafından çok katmanlı algılayıcı geliştirilmiştir.
- **1971:** Kohonen ilişkilendirici hafızaları geliştirmiştir.
- **1976:** Sephen Grossberg ve Gail Carpenter adaptif rezonans teoremini geliştirmişlerdir.
- **1980'den günümüze YSA:**

Bu aralıktaki gelişmeler şu şekildedir;

- **1982:** Başlıca gelişmeler Hopfield Enerji yaklaşımı olmuştur.
- **1985:** Ackley, Hilton ve Sejnowski tarafından Boltzmann makinası icat edilmiştir.
- **1986:** Rumelhart, Hinton ve Williams Genelleştirilmiş Delta Kuralı' nı getirmişlerdir.
- **1988:** Kosko, Binary Associative Memory (BAM)' ı geliştirmişmiş ve ayrıca YSA'da bulanık mantık konseptini vermiştir.

2.1.3 Yapay sinir ağı modeli ve yapısı

Nöron, yapay sinir ağının çalışması için bilgi üreten bir yapı birimidir. Şekil 2.2 bir yapay sinir ağı yapısını göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere tipik bir nöron bazı özelliklere sahiptir ve bunlar; bir dizi giriş sinyali, her bir giriş sinyaline uygulanan ağırlık katsayısı, bir aktivasyon ve dönüşüm fonksiyonu, bir çıkış fonksiyonu, bir öğrenme algoritması olarak sıralanabilir. (Örs, 2017)



Şekil 2.2. Yapay sinir ağı genel modeli

Yukarıdaki genel yapay sinir ağı modeli için, bağıntı şu şekilde hesaplanabilir;

$$y_g = x_1 \cdot w_1 + x_2 \cdot w_2 + x_3 \cdot w_3 + \dots + x_m \cdot w_m \quad (2.1)$$

Başka bir değişle;

$$y_g = \sum_{i=1}^m x_i \cdot w_i \quad (2.2)$$

olarak ifade edilebilir.

Çıkış ise net girişe aktivasyon fonksiyonu uygulanarak hesaplanabilir.

$$Y = F(y_g) \quad (2.3)$$

Yapay sinir ağı hücrelerinin bir araya gelmesi rastgele değildir. Hücreler genel olarak 3 katman halindedir ve her katman içinde paralel şekilde bir araya gelerek ağı oluştururlar. Bu katmanlar ise;

Girdi katmanı: Bu katmandaki işlem elemanları dışarıdan bilgiler alarak ara katmanlara iletmek ile sorumludur. Bazı ağ yapılarında girdi katmanında herhangi bir veri işleme durumu söz konusu değildir.

Ara katmanlar: Girdi katmanından aldığı bilgileri işleyerek çıktı katmanına iletirler. Bilgilerin işlenmesi olayı ara katmanlarda gerçekleşir. Bir ağ için birden fazla ara katman olabilir.

Çıktı katmanı: Bu katmandaki işlem elemanları, ara katmandan gelen bilgileri işleyerek ağın girdi katmanından sunulan girdi seti (örnek) için üretmesi gereken çıktıyı üretirler. Üretilen çıktıyı ise dışarıya gönderirler. (Öztemel, 2006)

Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Biyolojik Sinir Ağları (BSA) arasında terminolojik olarak benzerlikler ve farklılıklar aşağıdaki Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2' deki gibi toparlanabilir.

Çizelge 2.1.YSA ve BSA arasındaki benzer yapılar

Biyolojik Sinir Ağı (BSA)	Yapay Sinir Ağı(YSA)
Soma	Düğüm
Dendrit	Giriş
Sinaps	Ağırlıklar veya Bağlantılar
Akson	Çıkış

Çizelge 2.2. Bazı kriterlere göre BSA ve YSA arasındaki farklar

Kriter	BSA	YSA
İşlem	Ağırlıklı olarak paralel, yavaş ve YSA'dan üstündür	Ağırlıklı olarak paralel, hızlı ve BSA'dan zayıftır
Boyut	10^{11} nöron ve 10^{15} bağlantı	10^2 den 10^4 de kadar düğüm (ağırlıklı olarak uygulamanın çeşidine ve ağ tasarımcısına bağlıdır)
Öğrenme	Belirsizliği tolere edebilir	Çok hassastır, belirsizliği tolere edebilmesi için yapılandırılmış ve biçimlendirilmiş veriye ihtiyaç duyar
Hata Toleransı	Kısmi hasarla bile performans düşüşü olur	Gürbüz performans yetisi vardır bu yüzden hata tolerans potansiyeline sahiptir
Depolama Kapasitesi	Bilgiyi sinapsa depolar	Bilgiyi sürekli bellek bölgelerine depolar

Günümüzde, değişik alanlarda kullanılmaya elverişli birçok yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir bunları genel olarak Şekil 2.3'te gösterildiği gibi sınıflandırmak mümkündür.

2.1.4 İleri beslemeli yapay sinir ağları

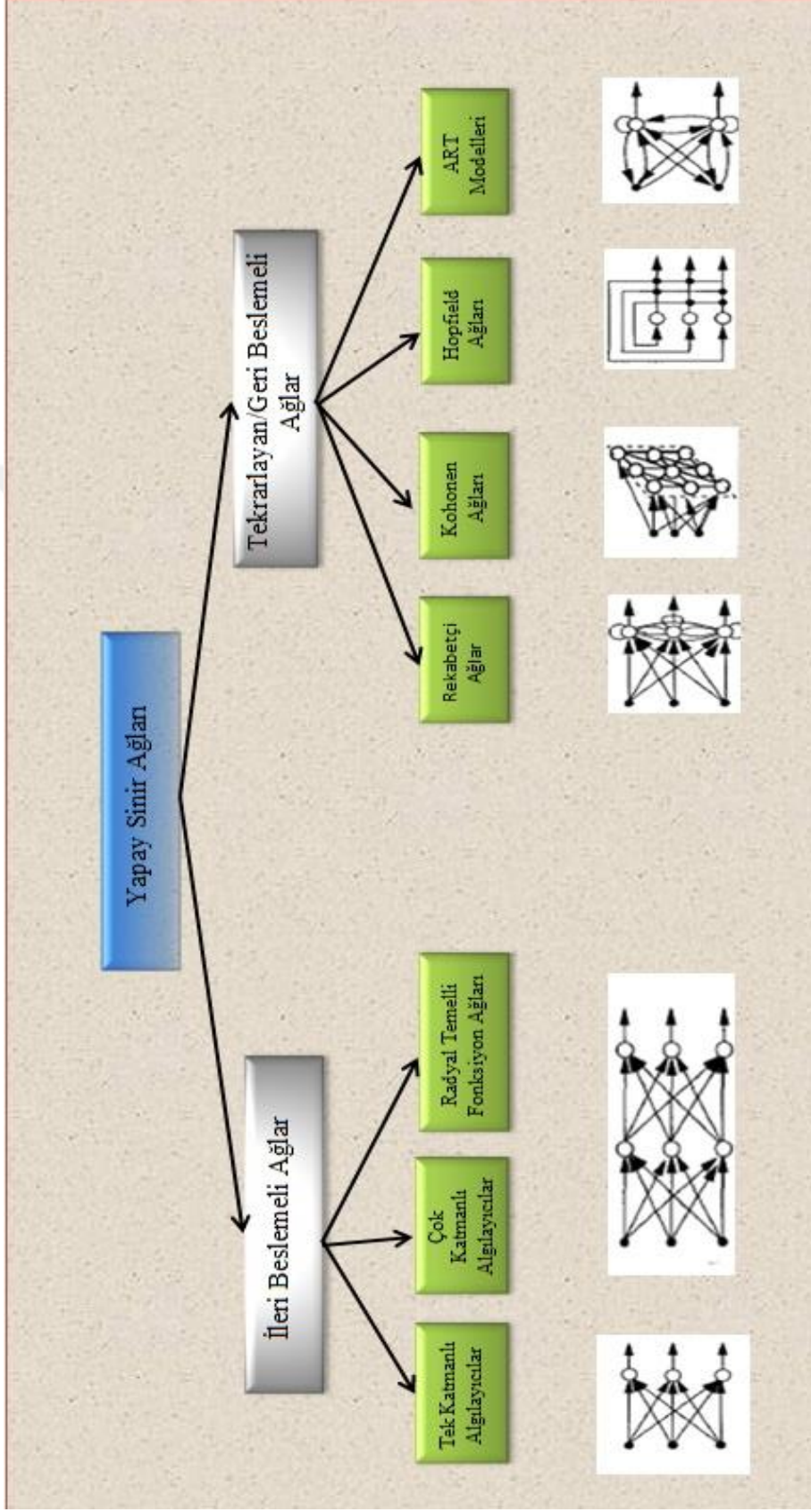
Bilginin girişten çıkışa doğru tek yönde aktığı ve geri çevrimin olmadığı yapay sinir ağı türüdür. Katman sayısı, nöronda kullanılan transfer fonksiyonu türü

veya nöronlar arasındaki bağlantı sayısında bir sınırlama yoktur. En basit ileri beslemeli yapay sinir ağı, yalnızca doğrusal problemleri öğrenebilen tek katmanlı bir algılayıcıdır.

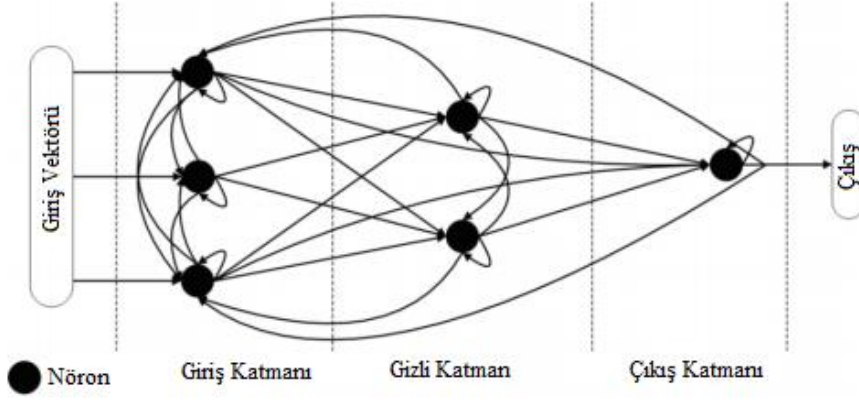
2.1.5 Geri beslemeli yapay sinir ağları

Yapı itibari ile ileri beslemeli yapay sinir ağlarına benzer ancak ek olarak geri çevrimler ihtiva eden bir yapıya sahiptir. Bu şekilde bilgi akışı tek yönde değildir. İleri yöndeki bilgi akışının yanında, geri yönde bilgi akışı da bu ağ türlerinde gerçekleşmektedir. Tekrarlayan yapay sinir ağları olarak da adlandırılan bu yapılar, herhangi bir girdi dizisini işlemek için hafızalarını kullanabilir. Şekil 2.4'te basit bir tekrarlayan yapay sinir ağını ve nöron bağlantılarının karmaşıklığı gösterilmektedir.





Şekil 2.3. Yapay sinir ağlarının genel sınıflandırılması



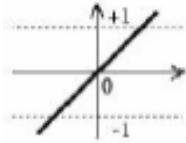
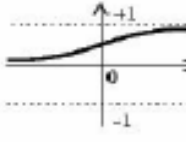
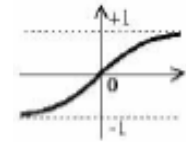
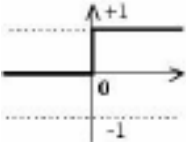
Şekil 2.4. Geri beslemeli yapay sinir ağı

Tekrarlayan yapay sinir ağının temel topolojisi, her temel yapı taşının (yapay nöron) iki yöndeki diğer temel yapı taşlarına doğrudan bağlandığı yapay sinir ağıdır. Hopfield, Elman, Jordan, çift yönlü ve diğer ağlar gibi diğer tekrarlayan yapay sinir ağları, geri beslemeli yapay sinir ağlarının özel durumlarıdır.

2.1.6 Yapay sinir ağları aktivasyon fonksiyonları

Bir hücreye gelen girdiyi işleyerek bu girdiye karşılık üreteceği çıktıyı belirleyen fonksiyonlardır. Ayrıca transfer fonksiyonu olarak da bilinen bu fonksiyonlar herhangi bir yapay sinir ağının çıkışını oluşturabilirken, aynı zamanda iki yapay sinir ağı arasına da bağlanabilir. Bu fonksiyonlar genel olarak, doğrusal ve doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrusal olmayan fonksiyonlar ise kendi arasında sigmoid, hiperbolik, eşik değer ve sinüs aktivasyon fonksiyonları olmak üzere 4'e ayrılır. Bu fonksiyonlar ve genel kullanım amaçları Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3. Aktivasyon fonksiyonları

Fonksiyon Adı	Fonksiyon Grafiği	Formülü	Açıklaması
Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu		$F(x) = A \times x$	Doğrusal problemlerin çözümünde kullanılır. Toplama fonksiyonundan alınan sonuç A sabiti ile çarpılır ve hücrenin çıkışını oluşturur.
Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu		$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	Sürekli ve bu sebeple türevlenebilir bir fonksiyondur. Doğrusal olmaması nedeniyle yapay sinir ağlarında en sık kullanılan fonksiyonlardan biridir. Girdi değerlerine karşılık 0 ile 1 arasında çıktı değeri üretir.
Tanjant Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu		$F(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}$	Sigmoid fonksiyonuna benzer özelliklere sahiptir. Ancak çıkış değerleri -1 ile 1 değerleri arasındadır.
Eşik Değer Aktivasyon Fonksiyonu		$F(x) = \begin{cases} 1; & x > 0 \\ 0; & x \leq 0 \end{cases}$	Girişlerin 0'dan büyük olması durumunda 1 değeri üretir, 0'dan küçük eşit olması durumunda ise 0 değeri üretir.

2.1.7 Geri yayılım algoritması

Geri yayılım algoritması en çok kullanılan sinir ağı modellerinden birisidir. Yapay sinir ağlarının uygulanabileceği problem aralığını büyük ölçüde genişletilmiş

ve çeşitli giriş/çıkış eşleştirme problemlerinde başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Bu algoritmalar, temel olarak giriş ile birlikte ağa sunulan sistemin çıktılarına ihtiyaç duyan öğretmenli öğrenme stratejisini kullanır. Öğrenme mekanizması ise ağın gerçek ve beklenen çıktıları arasındaki hatayı minimize eden yinelemeli eğim azalması (iterative gradient descent) yöntemine dayanır. (Torkul vd.,2017)

Geriye yayılım ağları, çeşitli katmanlar içeren tam bağlantılı ileri besleme ağlardır. Her bir proses elemanı bir sonraki katmandaki her bir proses elemanı ile bağlantılıdır. Fakat bağlantılarda geri besleme yoktur. Ayrıca aynı katmandaki proses elemanları arasında da herhangi bir bağlantı mevcut değildir (Torkul vd.,2017).

Verinin girdi katmanında ve gizli katmanda işlenmesi ile, ağın çıktıları hesaplanır ve istenen çıktılarla karşılaştırılır. Bu çıktılar arasındaki hata, azalan eğim algoritması kullanılarak ağın bağlantılarına doğru geriye yayılır. Öğrenme metodu çoğunlukla genelleştirilmiş delta kuralı olarak adlandırılır. Standart bir geriye yayılım ağının proses elemanları toplama fonksiyonu ve transfer fonksiyonu olarak sırasıyla ağırlıklı girdilerin toplamı ve sigmoid fonksiyonuna sahiptir. Öğrenme işlemine etki eden birkaç faktör vardır. Bunlar, öğrenme katsayısı, momentum ve bias terimidir (Torkul vd.,2017).

Bu algoritmada i ve j işlem elemanları arasındaki ağırlıklar $\Delta w_{ij}(t)$ değişikliği Denklem 2.4'teki gibi hesaplanabilir.

$$\Delta w_{ji} = \eta \delta_j x_i + \alpha \Delta w_{ji}(t - 1) \quad (2.4)$$

Burada η öğrenme katsayısı, α momentum katsayısı, δ_j ise ara veya çıkış katmanındaki bir j nöronuna ait faktördür.

2.2 Görüntü İşleme

Görme, gözler tarafından toplanan elektromanyetik nitelikli özgül izlenimlerin belirli sinir merkezleri düzeyinde algılanmasıdır. Görüntü ise evrende bulunan, hacmi olan her cismin bir merceğe ya da göze yansıyan şeklidir (Anonim,2018a). İnsan gözü yaklaşık olarak 20 mm'lik ortalama çapa sahip olan bir

küredir. Gözü kaplayan üç zar vardır ve bunlar; kornea, göz akı dış kapağı; koroid ve retinadır. Kornea, gözün ön yüzeyini örten sert, şeffaf bir dokudur. Korneanın devamı olan sklera (göz akı) ise kürenin geri kalan kısmını çevreleyen mat bir zardır.

Göz merceği ve sıradan bir optik mercek arasındaki temel fark, göz merceğinin esnek olmasıdır. Merceğin ön yüzeyinin eğrilik yarıçapı, arka yüzeyinin yarıçapından daha büyüktür ve şekli, siliyer cismin liflerindeki gerilimle kontrol edilir. Uzaktaki nesnelere odaklanmak için kontrolcü kaslar merceğin nispeten düzleşmesine neden olur. Benzer şekilde bu kaslar, göze yakın nesnelere odaklanmak için merceğin daha kalın olmasına izin verir (Gonzalez ve Woods., 2001).

Bir görüntü iki boyutlu bir $f(x, y)$ fonksiyonu ile tanımlanabilir. Burada x ve y düzlemsel koordinatlar ve herhangi bir (x, y) koordinat çiftinin genliği, görüntünün o noktadaki yoğunluğu veya gri seviyesi anlamına gelmektedir. x, y ve genlik değerleri sonlu veya ayrık birimler olduğu durumlarda görüntüyü, dijital görüntü olarak tanımlarız. Dijital görüntü işleme alanı, dijital görüntülerin dijital bir bilgisayar tarafından işlenmesi anlamına gelir. Dijital bir görüntü sonlu sayıdaki elemanlardan oluşur ve her biri belirli bir konum ve değere sahiptir. Bu elemanlar resim elemanları, nokta ve piksel olarak adlandırılır. Dijital bir görüntünün elemanlarını tanımlamak amacıyla en sık kullanılan terim “*piksel*” dir.

Hislerimizin en kuvvetlilerinden biri görmedir, bu sebeple görüntülerin insan algısında önemli bir rol oynaması doğaldır. Ancak elektro manyetik spektrum (EMS) görsel bandı ile sınırlanmış olan insanların tersine, görüntüleme cihazları neredeyse EM spektrumunu gamadan radyo dalgalarına kadar tümünü kapsar. Bu cihazlar, insanların görüntülerle ilişkilendirmeye alışkın olmadığı kaynaklardan elde edilen görüntüler üzerinde işlem yapabilirler. Bunlar ultrason, elektron mikroskop ve bilgisayar tarafından üretilen görüntülerdir. Bu sebeple dijital görüntü işleme, farklı geniş uygulama alanlarını kapsar.

İlk dijital görüntü uygulamalarının biri, fotoğrafların deniz altı kabloları ile Londra’dan New York’a gönderildiği gazete endüstrisidir. 1920’lerin başında Bartlane kablo görüntü iletim sisteminin kullanılması ile bir resmin Atlas Okyanusu üzerinden iletilmesi için gereken bir haftadan daha uzun bir süreyi üç saatten daha kısa bir süreye indirgemıştır. Kablo ile transfer edilebilmesi amacıyla,

özelliklendirilmiş baskı ekipmanı ile resimler kodlanmış ve iletilecek noktada tekrar düzenlenmiştir (Gonzalez ve Woods, 2001).

2.2.1 Basit bir görüntü oluşturma modeli

Görüntüler iki boyutlu $f(x,y)$ fonksiyonu ile tanımlanabilir. Koordinat düzleminde f ' in değeri veya genliği, fiziksel anlamı görüntünün kaynağı tarafından belirlenen pozitif skaler bir değerdir. Buradan anlaşılacağı üzere $f(x,y)$ sıfır olmamalı ve sonlu olmalı;

$$0 < f(x,y) < \infty \quad (2.5)$$

$f(x,y)$ fonksiyonu iki bileşenle karakterize edilebilir; bunlardan birincisi; görüntülenecek olan alandaki ışık miktarı, diğeri ise alandaki nesnelere tarafından yansıtılan ışık miktarıdır. Bunlar aydınlanma ve yansıtma bileşenleri olarak adlandırılır ve sırası ile $i(x,y)$ ve $r(x,y)$ ile tanımlanır. Bu iki fonksiyon bir araya gelerek $f(x,y)$ 'yi oluşturur.

$$f(x,y) = i(x,y)r(x,y) \quad (2.6)$$

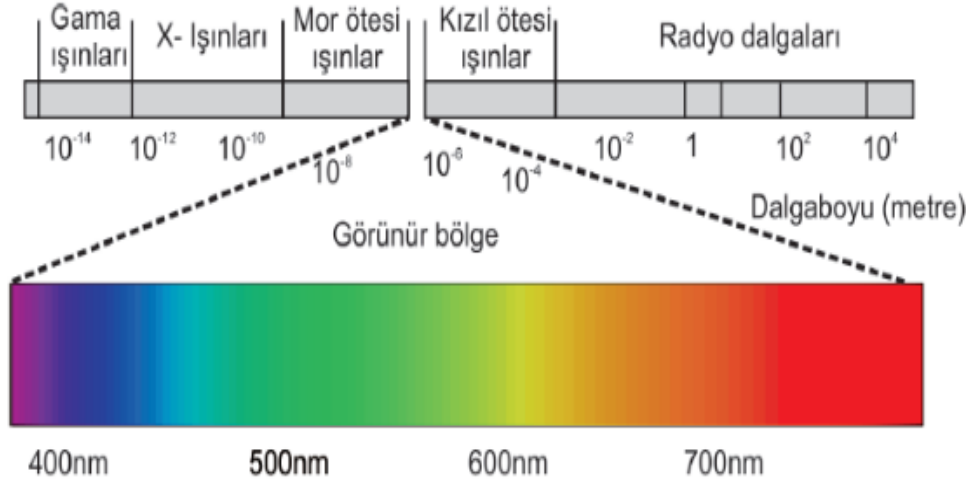
$$0 < i(x,y) < \infty \quad (2.7)$$

$$0 < r(x,y) < 1 \quad (2.8)$$

Denklem 2.8 'de yansıtıcılığın 0 (toplam soğurma) ve 1 (toplam yansıma) arasında sınırlandığı görülmektedir. $i(x,y)$ aydınlanma kaynağına bağlıdır, $r(x,y)$ ise görüntülenecek nesnenin karakteristiklerine bağlıdır.

2.2.2 Renk uzayları

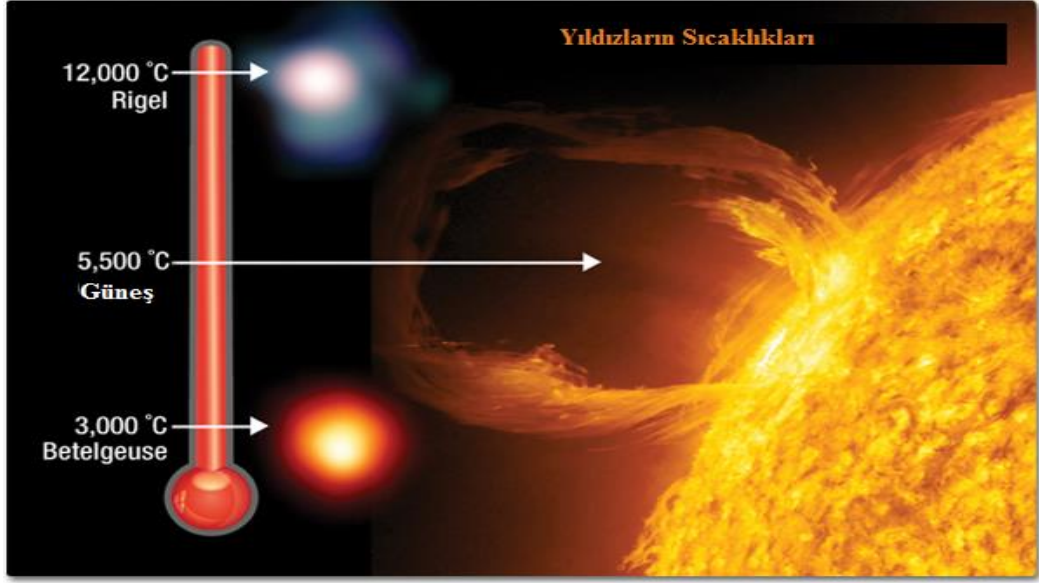
Genel tanımı ile renk, ışığın kendi öz yapısına ya da cisimlerden yansımaya bağlı olarak gözde oluşturduğu duyumdur. Renk, ışığın farklı dalga boylarında yansımalarının bir sonucudur. İnsan gözünün görebildiği ortalama ışık dalga boyu 360 nm ve 700 nm aralığındadır. Şekil 2.5' te görünebilir dalga boyu aralıkları ve türleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Görünür bölge bölümü (Anonim,2018b)

Bu arada bir nesnenin rengi, o nesneye çarpan ışık ve bu ışığın ne kadarının absorbe edilip ne kadarının yansıtıldığı ile de alakalıdır. Diğer bir deyişle, gelen ve yansıyan ışığın spektral dağılımı ile alakalıdır.

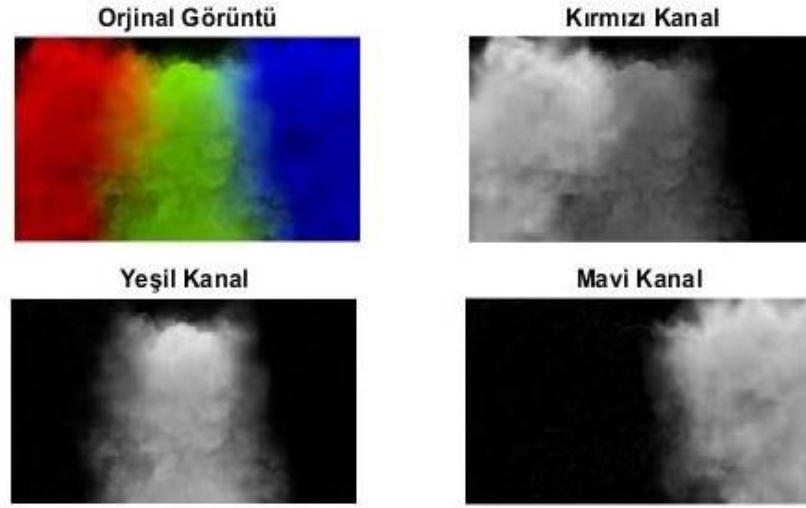
Renk ve sıcaklık: Nesnelerin sıcaklığı arttıkça kısa dalga boylarının daha baskın olduğu enerji yayarlar. Bu durum ise frekans ve enerjiyi arttırmaktadır. Bu sebeple mavi renk alevin sıcaklığı kırmızı renk alevin sıcaklığından daha yüksektir. Aynı şekilde yıldızların renkleri bilim adamlarına sıcaklıkları hakkında bilgi verir. Güneşin diğer yıldızlara göre daha sarı renkte olmasının sebebi yüzey sıcaklığının 5500°C olmasıdır. Eğer güneşin sıcaklığı daha düşük olsaydı (3000°C gibi) Betelgeuse Yıldızı gibi kırmızımsı görünürdü. Sıcaklık değeri normalden yüksek olsaydı (12000°C gibi) Rigel Yıldızı gibi mavi görünürdü. Şekil 2.6'da bu görünümler gösterilmektedir.



Şekil 2.6.Yıldızların sıcaklık ve renk ilişkileri

Newton'un 1665'teki deneyi, bir prizmanın görünür ışığı büküğünü ve her bir rengin, dalga boyuna bağlı olarak farklı bir açıda kırıldığını göstermiştir (Anonim, 2018c).

Literatürde birden fazla sayıda görüntü uzay modeli önerilmiştir. Bu modellerin her biri belirli bir renk koordinat sistemlerine sahiptir ve renk uzayındaki her bir nokta sadece belirli bir rengi temsil eder. Her renk modeli, farklı uygulamalar için yararlı olabilir. Özellikle bir dijital görüntüleme sistemi tarafından üretilen tipik renkli görüntüler; kırmızı, yeşil, mavi olarak temsil edilir ve RGB görüntüleri olarak adlandırılır. 8 bitlik kırmızı, yeşil ve mavi pikseller ile temsil edilen RGB renkli görüntü 256^3 (1677216) renge sahiptirler. Dört farklı renkli resmin RGB uzayında, farklı renk kanallarındaki görüntüsü Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



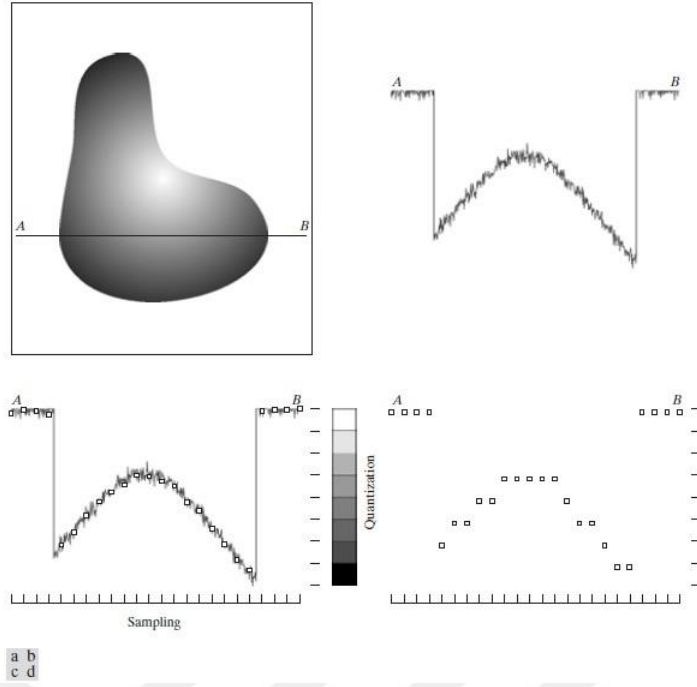
Şekil 2.7. Kırmızı, yeşil ve mavi rengin farklı kanallardaki görüntüsü



Şekil 2.8. Farklı tonlardaki resimlerin R, G ve B kanallarında görünümü

2.2.3 Görüntü örnekleme ve niceleme

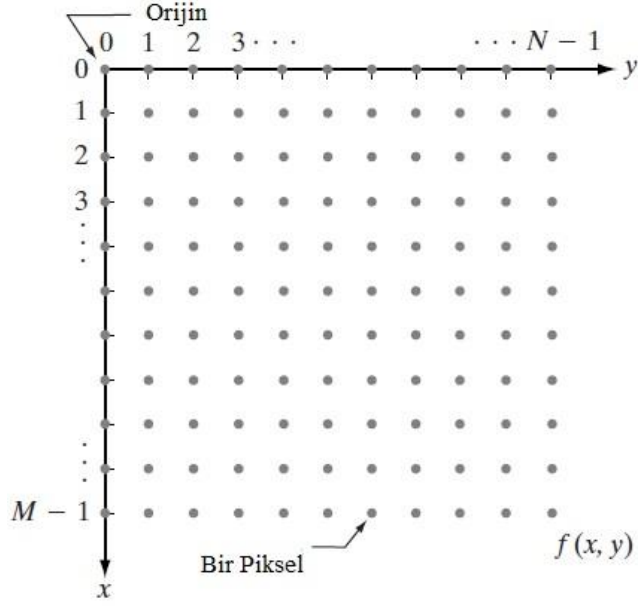
Şekil 2.9'da örnekleme ve nicelemenin temeli gösterilmiştir. Şekil 2.9(a) dijital forma çevirmek istediğimiz bir sürekli görüntüyü $f(x, y)$ göstermektedir. Bir görüntü sırasıyla x ve y koordinatlarına göre ve ayrıca bir genlikte sürekli olabilir. Görüntüyü dijital forma dönüştürmek için fonksiyonu hem koordinat düzleminde hem de genlikte örneklemeliyiz. Koordinat değerlerini dijitalleştirmek örnekleme olarak adlandırılır. Genlik değerlerini dijitalleştirmek ise niceleme olarak adlandırılır. Şekil 2.9(b)'de gösterilen tek boyutlu fonksiyon, Şekil 2.9(a)'daki AB çizgi kesiti boyunca sürekli görüntü genlik değerlerinin (gri seviye) grafiğidir. Gelişi güzel değişimler görüntü gürültülerinden dolayıdır. Bu fonksiyonu örnekleme için Şekil 2.9(c)'de gösterildiği gibi AB çizgisi boyunca eşit aralıklı örnekler alınır. Her örneğin konumu, şeklin alt kısmında dikey bir işaret ile gösterilir. Fonksiyon üzerine beyaz kareler eklenerek gösterilmektedir. Bu ayrık konum kümesi örneklenen fonksiyonu verir. Ancak, örneklerin değerleri yine de (dikey olarak) bir sürekli gri seviye değer aralığına yayılmıştır. Bir dijital fonksiyonu oluşturmak için, gri seviye değerleri de ayrık değerlere dönüştürülmelidir. Şekil 2.9(c)'nin sağ tarafı, siyahtan beyaza olmak suretiyle, sekiz ayrık parçaya bölünmüş gri seviye ölçeğini göstermektedir. Sürekli gri seviyeler, her bir örneğe sekiz ayrık gri seviyeden birinin atanmasıyla nicelendirilir. Atama işlemi, bir örneğin dikey işaret çentiğine dikey yakınlığına bağlı olarak yapılır. Hem örnekleme hem de nicelemeden elde edilen dijital örnekler Şekil 2.9(d)'de verilmiştir. Görüntünün üstünden başlayarak bu prosedürleri gerçekleştirmek iki boyutlu bir dijital görüntü oluşturur (Gonzalez ve Woods, 2001).



Şekil 2.9. Dijital görüntü oluşturma. (a) Sürekli görüntü. (b) Sürekli görüntüde A'dan B'ye olan tarama çizgisi.(c) Örnekleme ve Nicelendirme.(d) Dijital tarama çizgisi.

2.2.4 Dijital görüntülerin gösterimi

Örnekleme ve nicelemenin sonuçları gerçek sayılardan oluşan bir matristir. Bir görüntü $f(x, y)$ 'nin örneklendiğini varsayalım, böylece elde edilen dijital görüntü M satır ve N sütuna sahip olacaktır. (x, y) koordinat değerleri bu sayede ayrık değerlere dönüşür. Gösterimsel açıklık ve kolaylık amacıyla bu ayrık koordinatlar için tamsayı değerleri kullanılabilir. Böylece koordinatların orijindeki değerleri $(x, y) = (0,0)$ 'dır. İlk sütun boyunca görüntünün bir sonraki koordinat değerleri $(x, y) = (0,1)$ olarak temsil edilir. İlk sütun boyunca ikinci örneği belirtmek için $(0,1)$ gösteriminin kullanıldığını akılda tutmak önemlidir. Bu durum, görüntü örneklenirken bunların fiziksel koordinatların gerçek değerleri olduğu anlamına gelmez. Örnek bir koordinat düzeni Şekil 2.10' da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Örnek bir koordinat düzlemi

Daha önce tanımlanan gösterim sayesinde dijital görüntüyü aşağıdaki $M \times N$ formundaki kompakt matris formunda yazılabilir.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Bu eşitliğin sağ tarafı tanımı gereği dijital bir görüntüdür. Bu matris dizisinin her bir elemanı görüntü elemanı, resim elemanı, piksel veya pel olarak adlandırılır. Bazı tanımlamalarda, dijital bir görüntüyü ve elemanlarını göstermek amacıyla daha geleneksel matris gösterimi kullanılır.

$$A = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \dots & a_{0,N-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,N-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{M-1,0} & a_{M-1,1} & \dots & a_{M-1,N-1} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Burada $a_{ij} = f(x = i, y = j) = f(i, j)$ olduğu açıktır ve bu sebeple Denklem 2.9 ve 2.10 özdeş matrislerdir (Gonzalez ve Woods, 2001).

2.2.5 Dijital görüntüden özellik çıkarımı

Özellik, bir veya daha fazla ölçü fonksiyonu olarak tanımlanır, bu ölçü fonksiyonları bir nesnenin bazı ölçülebilir niteliklerini belirtir ve nesneye ait daha kayda değer nitelikler elde edilebilmesi amacıyla hesaplanır. Günümüzde çalışılan çeşitli özellikler şu şekilde sıralanabilir:

Genel özellikler: Renk, yapı ve şekil gibi uygulamadan bağımsız özelliklerdir. Soyutlama seviyelerine göre alt başlıklara bölünebilirler.

- **Piksel-seviye özellikleri:** Özellikler renk, konum gibi her bir piksel için hesaplanır.
- **Konum özellikleri:** Görüntü segmentasyonu veya kenar algılama üzerinde görüntü bandının alt bölümlerinin sonuçları üzerinden hesaplanan özelliklerdir.
- **Toplu özellikler:** Bütün görüntü üzerinde veya sadece görüntünün alt alanı üzerinde hesaplanan özelliklerdir.

Alan bazlı özellikler: İnsan yüzü, parmak izi ve kavramsal özellikler gibi uygulama temelli özelliklerdir. Bu özellikler genellikle özel bir alan için düşük seviyeli özelliklerin bir sentezidir.

Diğer taraftan bütün özellikler kabaca düşük seviyeli özellikler ve yüksek seviyeli özellikler olarak sınıflandırılabilir. Düşük seviyeli özellikler direkt olarak orijinal görüntülerden çıkarılabilir buna karşılık yüksek seviyeli görüntü çıkarımı ise düşük seviyeli özellikler temelli olmalıdır (Gonzalez ve Woods, 2001).

2.2.6 Gri seviye eş oluşum matrisi

Gri seviye eş oluşum matrisi genel tanımla, bir görüntünün iki farklı pikseli arasındaki gri seviye farklılıklarını karşılaştıran özellik çıkarma yöntemidir. İlk piksel referans, ikinci piksel ise komşu piksel olarak tanımlanır. Bilindiği üzere birinci dereceden istatistik uygulamaları bir görüntü üzerinde yoğunluk ve konum bilgisi veremez. Eş oluşum matrisleri ise görüntüye ait ikinci dereceden istatistik bilgiler (konum ve yoğunluk) vermesiyle bilinir (Talu vd., 2017). Bir görüntünün GLCM(Gray Level Co-Occurance Matrix)'si, yarıçapı δ ve yönü θ ile tanımlanan bir yer değiştirme vektörü olan d ile hesaplanır. δ 1, 2 ile 10 arasında değişen değerlerdir ve her piksel, θ 'nın 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° ve 315° değerleri için

sekiz seçeneğe izin veren sekiz komşu piksele sahip olabilmektedir(Sulochana ve Vidhya, 2013) .

Matematiksel olarak $m \times n$ boyutuna sahip bir resmin (x,y) ofset değeri için eş oluşum matrisi Denklem 2.11'deki gibi gösterilmektedir.

$$C_{x,y}(i,j) = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^m \begin{cases} 1, & \text{Eğer } I(p,q) = i \text{ ve } I(p+x,q+y) = j \\ 0, & \text{değilse} \end{cases} \quad (2.11)$$

Oluşturulan eş oluşum matrisinden Denklem 2.12 ve Denklem 2.15 arasındaki öznelikler elde edilebilir.

$$\text{Enerji: } \sum_{i,j} p(i,j)^2 \quad (2.12)$$

$$\text{Zıtlık} = \sum_{i,j} |i-j|^2 p(i,j) \quad (2.13)$$

$$\text{Korelasyon: } \sum_{i,j} \frac{(i-\mu_i)(j-\mu_j)p(i,j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (2.14)$$

$$\text{Homojenlik: } \sum_{i,j} \frac{p(i,j)}{1+|i-j|} \quad (2.15)$$

Burada, GLCM'den elde edilen enerji özelliği görüntüdeki homojenliğin bir ölçüsüdür. Tekdüzelik veya açısız ikinci moment olarak da bilinir. Sabit görüntüler için enerji 1'dir. Karşıtlık veya zıtlık özelliği görüntüde bulunan yerel değişimlerin miktarını gösterir. Bir piksel ve komşusu arasındaki yoğunluk zıtlığıdır. Sabit görüntülerde karşıtlık 0'dır. Korelasyon özelliği görüntüdeki gri seviyesi lineer bağımlılıklarının bir ölçüsüdür. İki komşu pikselin birbirileri arasındaki ilişkiyi ortata koyar. Korelasyon özelliği birbirleriyle tamamen pozitif ilişkili görüntülerde 1 ve tamamen negatif ilişkili görüntülerde ise -1'dir. Homojenlik özelliği GLCM'deki

elemanların dağılımının diyagonal GLCM'deki elemanların dağılımına yakınlığının bir ölçüsüdür. Entropi özelliği ise görüntüde bulunan gri seviyelerinin uzaysal düzensizliğinin düzeyini gösterir (Demirhan v Güler,2010).

2.2.7 Dalgacık dönüşümü

Dalgacık dönüşüm tekniği, zaman-frekans dönüşümlerinin en popülerlerinden biridir. Çoklu çözünürlükteki görüntüleri analiz etmenin ve bir görüntüdeki özelliklerin ölçeğini ve bunların konumlarını temsil etmenin genel bir yoludur, görüntü sıkıştırma ve parazit giderme gibi birçok uygulama için kullanışlıdır.

İki boyutlu gri ölçekli görüntüler için iki boyutlu ayrık dalgacık dönüşümü kullanılabilir. Orijinal görüntü giriş olarak verildiğinde dalgacık tekniği dört küçültülmüş görüntü verir. Bunlardan biri yaklaşım görüntüsü ve diğeri üçü, her biri orijinal görüntüdeki parlaklıktaki yerel ayrıntıları (detaylar) tanımlayan alt bant görüntülerdir. Dalgacık dönüşümü genel hali ile Denklem 2.16'da gösterilmektedir.

$$F(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi_{(a,b)}^*(x)dx \quad (2.16)$$

2.2.8 Matris özellikleri

Herhangi bir A matrisinin, tez çalışmasında uygulanan temel birkaç matris özelliğini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

Öz değer:

$det(\lambda * I_n - A) = 0$ Şartını sağlayan λ değerlerine A matrisinin öz değerleri denir.

1-Normu:

$$\|A\|_1 = \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n |a_{ij}| \quad (2.17)$$

2-Normu:

$$\|A\|_2 = \max_{i=1:n} \sqrt{\lambda_i(A^T A)} \quad (2.18)$$

∞ -Normu:

$$\|A\|_{\infty} = \max_{i=1:n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}| \quad (2.19)$$

Frobenius Normu:

$$\|A\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2} \quad (2.20)$$

Matrisin Rankı:

Bir A matrisinin alt kare matrislerinden determinantı 0 dan farklı olan en büyük kare matrisin boyutudur. Örneğin 3x4'lük bir matrisin alt matrislerin den 2x2'lik bir matrisin determinantı 0'dan farklı ise. Bu matrisin rankı 2' dir denir.

Matrisin İzi:

A bir kare matris olmak koşulu ile, bu matrise ait köşegen değerlerinin toplamına A matrisinin izi denir ve Denklem 2.21'deki gibi gösterilebilir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

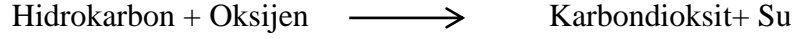
$$\text{Trace}(A) = a_{11} + a_{22} + a_{33} \quad (2.21)$$

2.3 Yanma

Bilindiği gibi ısı, buhar veya direkt enerji üretiminde kullanılan cihaz ve ekipmanlarda enerji elde edilmesinin birinci aşaması “yanma” dır. Yanmanın mükemmel ve optimum olması enerji maliyetlerini düşürmesi yanında; toplam verimlerin artmasına, daha az çevre ve cihaz kirliliğine ve cihazların kullanım ömrünün artmasına neden olur (Kartal).

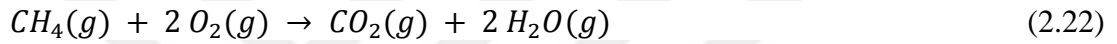
Yanma reaksiyonu önemli bir kimyasal reaksiyon sınıfıdır ve genellikle karbondioksit ve su üretmek için hidrokarbon ile oksijen reaksiyona girdiğinde oluşur. Daha genel anlamda yanma, oksitlenmiş bir ürün oluşturmak üzere herhangi bir yanıcı malzeme ve bir oksitleyici arasında bir reaksiyon gerektirir. Yanma, egzotermik bir reaksiyondur, bu nedenle ısı açığa çıkarır, ancak bazen reaksiyon yavaş yavaş ilerleyerek sıcaklık değişikliği göze çarpmayabilir

Yanma her zaman ateş ile sonuçlanmayabilir, ancak ateş olduğu zamanlar için alev, reaksiyonun karakteristik bir göstergesidir. Bir alevdeki ısı, reaksiyonu kendi kendine sürdürmek için yeterli enerji sağlayabilir fakat yanma işlemini başlatmak için eşik enerjisi yenilmelidir (örn., ateş yakmak için yanan bir kibrit kullanmak). Yanmaya ait genel reaksiyon formu aşağıdaki gibi belirtilebilir:



Yanma reaksiyonları için dengelenmiş denklemlere aşağıdaki gibi birkaç örnek verilebilir. Unutulmamalıdır ki yanma reaksiyonunu tanımanın en kolay yolu, ürünlerin daima karbondioksit ve su içermesidir.

Metanın yanması:



Naftalinin yanması:



Etanın yanması:



2.3.1 Tam ve eksik yanma

Yanma gibi kimyasal reaksiyonlar her zaman %100 verimle gerçekleşmeyebilir. Tıpkı diğer proseslerde olduğu gibi yanma işlemine girenleri sınırlandırma eğilimi gösterir. Bu sebeple karşılaşacağımız yanma türü iki çeşittir:

- Tam Yanma: Diğer bir deyişle “temiz yanma” olarak da adlandırılır. Temiz yanma, sadece karbondioksit ve su açığa çıkaran bir hidrokarbon oksidasyonudur. Temiz yanmaya bir örnek “mum” un yanmasıdır, burada fitilin ısısı havadaki oksijenle reaksiyona girerek karbondioksit ve su açığa çıkaran mumu buharlaştırır. Mum yandığında geride hiçbir şey kalmaz. Su buharı ve karbondioksit hava içinde

dağılır. Tam yanmada oluşan alev rengi ise genellikle katı ve sıvı yakıtlarda açık sarı- portakal renginde, gaz yakıtlarda ise mavi renktedir.

- Eksik Yanma: Diğer bir deyişle “kirli yanma” olarak da adlandırılır. Eksik yanma, karbondioksite ek olarak karbonmonoksit ve/veya karbon(is) açığa çıkaran hidrokarbon oksidasyonudur. Kömürün yanması eksik yanmaya örnek gösterilebilir, burada çok fazla is ve karbonmonoksit açığa çıkar. Fosil yakıtların çoğu eksik yanar ve yan ürünlerin ortaya çıkmasına sebep olur. Eksik yanmada en önemli faktör hava-yakıt oranının doğru ayarlanamamasıdır.

Az hava ile yanmanın en belirgin özelliği baca gazının çok koyu renkli ve isli olmasıdır. Ayrıca alev rengi de olması gerekenden daha koyu renktedir ve baca gazı analiz cihazı ile baca gazı çözümü yapıldığında fazla miktarda karbonmonoksit görülür. Bu nedenle ısı geçiş yüzeylerinde is ve kurum birikmesi meydana gelmesiyle ısı geçişi zorlaşır. Buna ek olarak da yakıtın kimyasal enerjisinin tamamı ısıya çevrilemediğinden dolayı verimde düşme görülür. Ayrıca zehirli bir gaz olan karbonmonoksit gazı, is ve kurum bacadan dışarı atıldığından dolayı çevre kirliliğine sebebiyet verir.

Fazla hava ile yanma durumunda alev rengi çok açık ve parlaktır. Baca gazı neredeyse gözle görünmez. Bu durumda ocak sıcaklığı düşer ve baca gazı sıcaklığı artar. Böylece aynı miktardaki ısıyı elde etmek için daha fazla yakıt yakmak durumunda kalınır. Yakılan yakıtın miktarındaki artış ise baca gazının artmasına sebep olur. Az hava ile yanma durumunda olduğu gibi hem işletme maliyeti yönünden hem de çevre sağlığı yönünden olumsuz bir durum ortaya çıkmış olur (Anonim, 2019d; Anonim, 2019e).

2.3.2 Baca gazı analizi

Baca gazı, yanma sırasında meydana çıkan atık gazlar olarak tanımlanır. İçeriği ise yakıtın türüne ve yanma şartlarına (hava oranı gibi) bağlıdır. Yakıtlar genel olarak karbon, hidrojen ve bunların bileşenlerinden meydana gelmektedir. Bunun bir sonucu olarak da yanma sonucunda bu bileşenlerin oksitleri açığa çıkmaktadır.

Baca gazı analizinin gerçekleştirilmesindeki gerekçeler ve faydaları ise şu şekilde özetlenebilir; Baca gazlarının analizi, yanma verimliliğini ortaya koyar,

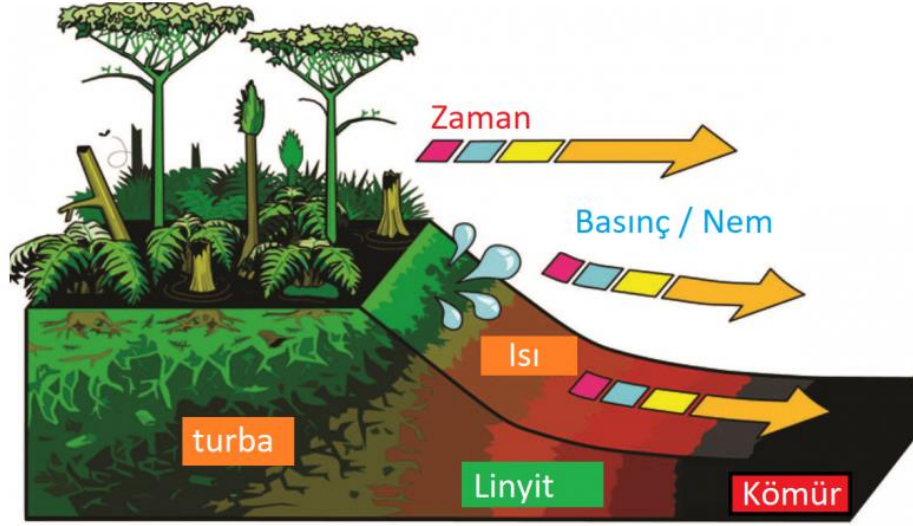
tasarımda veya sürecin kontrol edilmesinde temel faktördür ve hava yakıt oranı bilgisini barındırır.

Baca gazı analizinin bir diğer sebebi ise yanma sonucunda ortaya çıkan zararlı atıkların belirlenip bu durumun önüne geçilebilmesi için gerekli önlemlerin alınmasıdır. Örneğin, fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan bazı ana emisyonlar:

- Asit yağmuru ve solunum yolu hastalıklarına sebep olan kükürtdioksit (SO_2),
- Duman ve solunum yolu hastalıklarına katkıda bulunan azotoksitler (NO_x),
- Duman, pus ve solunum hastalıkları ve akciğer hastalığına katkıda bulunan partiküller,
- Başlıca sera gazı olan karbondioksit (CO_2),
- İnsanlarda ve diğer hayvanlarda hem nörolojik hem de gelişimsel hasarla ilişkilendirilen cıva ve diğer ağır metaller olarak sıralanabilir.

2.3.3 Kömürün yakılması

Kömür, yüzlerce milyon yıl önce, dünyanın büyük bataklık ormanlarıyla kaplandığı bazı kesimlerindeki yaşayan ve ölen bitkilerin kalıntılarında oluşan fosil bir yakıttır. Bugün kömürden elde edilen enerji, bitkilerin yüz milyonlarca yıl önceki güneşten absorbe ettiği enerjiden gelmektedir. Bataklığın dibine düşen bitkiler kir ve su katmanlarının üzerine yığılması sebebiyle çürümeye başlamış ve bu tabakalardan gelen ısı ve basınç, kimyasal değişimin meydana gelmesine neden olmuş ve zamanla kömür oluşmuştur. Kömürün oluşum süreci Şekil 2.11'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.11. Kömürün oluşum süreci (Anonim, 2019f)

Kömürün yanma durumuyla gözlemlenen reaksiyonlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;



Karbonun, karbondioksite çevrilmesi için belirli miktarda bir oksijene ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir. Denklem 2.25 'teki stokiyometrik denkleme göre (atom numaraları göz önünde bulundurularak) 32 kilogramlık oksijen 12 kg karbonla tepkimeye girerek 44 kg karbondioksit meydana getirmektedir. Buradan 1 kg karbonun 2,667 kg oksijene ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Aynı şekilde 28 kg karbonmonoksit oluşturmak için 1 kg karbon, 1,33 kg oksijene ihtiyaç duymaktadır.

2.3.4 Teorik yanma havası hesaplamaları

Belirli bir miktardaki kömürün karbon, hidrojen, azot, oksijen ve sülfür içeriğinin ağırlık yüzdesi biliniyorsa, bahsedilen miktardaki kömürün yanması için gerekli teorik hava miktarı hesaplanabilir.

Ağırlık bazlı hesaplamalar:

Analiz sonuçları aşağıdaki gibi olan kömürü düşünelim,

Karbon: %73; hidrojen: %4.5; oksijen: %5.9; nitrojen: %1.5; sülfür %5; su: %2.1; kül: %8.

Bu içerikteki 1 kg kömüre ait karbon, hidrojen ve sülfürün yakılması için gerekli olan havanın hesaplanması şu şekildedir:

$$C: 0.73 \times 2.267 \text{ kg} = 1.9469 \text{ kg Oksijen}$$

$$H: (0.045 \times 8) - 0.059 = 0.301 \text{ kg Oksijen}$$

Buradaki hesaplamada hidrojen için gerekli miktardan 0.059 kg oksijenin çıkarılmasının sebebi, kömürün ihtiva ettiği oksijen miktarıdır.

$$S: 0.05 \times 1 \text{ kg} = 0.05 \text{ kg Oksijen}$$

Burada tam yanma için gerekli toplam oksijen miktarı ise;

$$= 1.9469 + 0.301 + 0.05 = 2.298 \text{ kg'dır.}$$

Havada bulunan azot ve oksijen oranı 79:21'dir. Diğer bir deyişle 1 mol oksijenle beraber 3.762 mol nitrojen gelir ve toplam mol miktarı 4.762'dir. 1 kg oksijenin karşılığı $4.762 \times \frac{29}{32} = 4.3155 \cong 4.32$ kg havadır. Burada hava ve oksijenin atom ağırlıkları sırasıyla 29 ve 32'dir. Buradan, yukarıda özellikleri verilen 1 kg kömür için ihtiyaç duyulan teorik hava miktarı ise;

$$2.298 \times 4.32 = 9.927 \text{ kg olarak bulunur.}$$

Bu hesaplamalarla beraber, Denklem 2.29 ve 2.30 da verilen genelleştirilmiş denklemler yardımı ile de teorik hava miktarı yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Kg kömür başına ihtiyaç duyulan oksijen miktarı;

$$= 2.667 \times C + (H \times 8 - O) + S \text{ kg} \quad (2.30)$$

Kg karbon başına ihtiyaç duyulan oksijen miktarı;

$$= 4.32 \times (C \times 2.667 + (H \times 8 - O) + S)$$
$$= 11.521 \times C + 34.56 \times H + 4.32 \times (S - O) \quad (2.31)$$

Hacim bazlı hesaplamalar:

Kilogram yakıt için gerekli hava miktarı hacimsel olarak da hesaplanabilir. 1 kmol 22.4 Nm^3 hacme sahiptir. Buradan;

1 kg oksijenin $(1/32)$ kmol'e eşit olduğu bilinerek,

$$\frac{1}{32} \times 22.4 = 0.7 \text{ Nm}^3$$

1 kg karbon için gerekli oksijen miktarı $32/12$ kg ise:

$$\frac{32}{12} \times \frac{1}{32} \times 22.4 = 1.886 \text{ Nm}^3,$$

Kömür için ihtiyaç duyulan oksijen miktarı genel haliyle Denklem 2.32' de belirtilmiştir;

$$= (1.866 \times C + 5.56 \times H + 0.7 \times S - 0.7 \times O) \text{ Nm}^3/\text{kg}$$

Hava içerisinde bulunan oksijenin oranı $1/0.21$ olduğu için

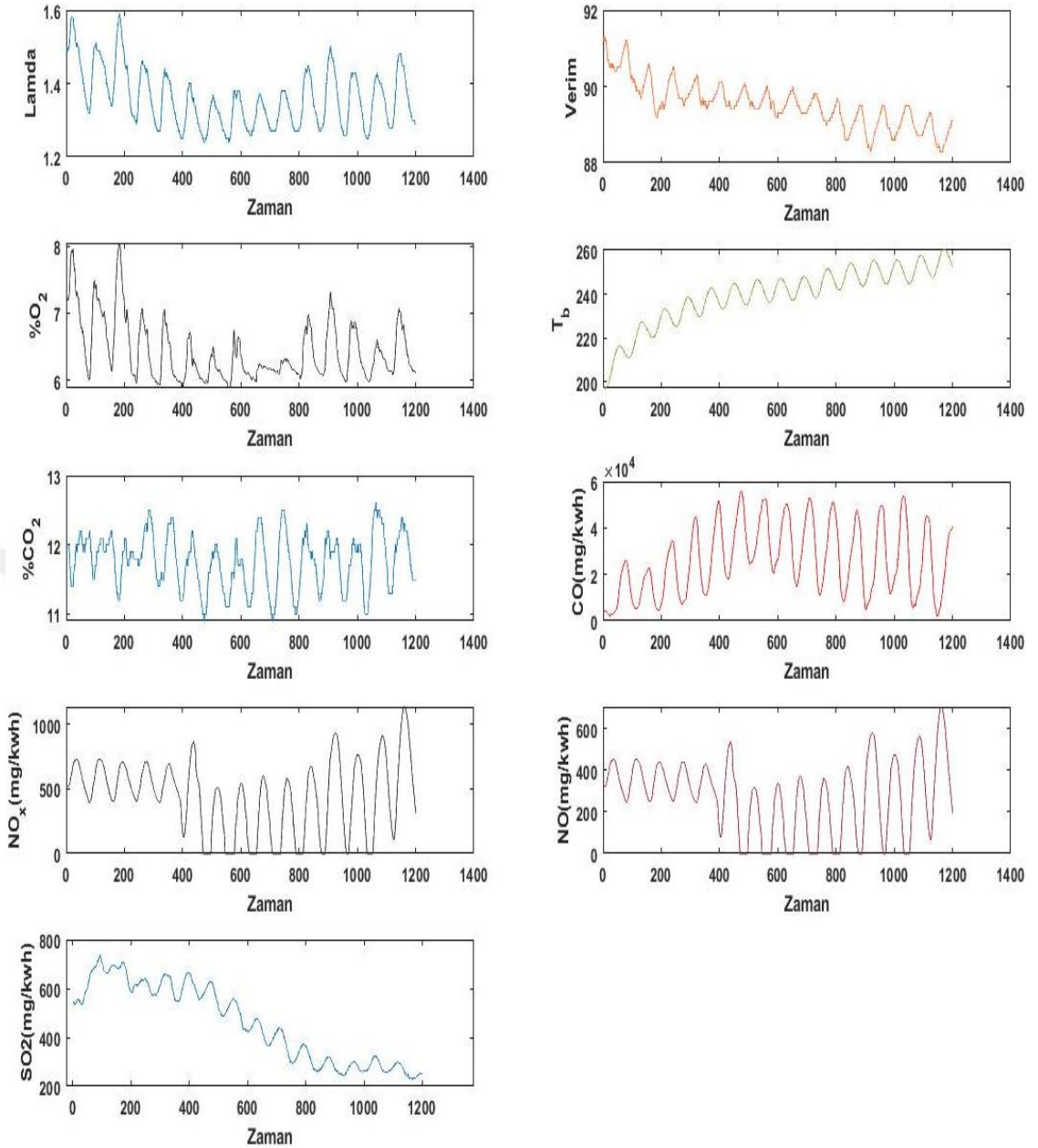
1 kg kömür için gerekli olan hava miktarı denklem 2.32 deki gibi verilebilir (Anonim,2018a).

$$\left(\frac{1}{21}\right) * (1.866 \times C + 5.56 \times H + 0.7 \times S - 0.7 \times O) Nm^3 \quad (2.32)$$

2.3.5 Hava fazlalık katsayısı

Hava fazlalık katsayısı genel anlamda, yanma ortamına fazladan verilen havayı da içeren toplam havanın, yanma için gerekli hava miktarına oranı olarak tanımlanır. Bu durumun gereksinimi ise yakıt ile havanın temasının daha iyi sağlanabilmesi için sisteme gerekli havadan biraz daha fazlası verilmesi olarak açıklanabilir. Eğer yanma için gerekli fazla hava sağlanmazsa yakıt içerisindeki karbon tam yanmayarak karbonmonoksit'e dönüşecektir.

- Hava fazlalığı, yanma verimini etkileyen en önemli faktördür. Hava eksikliği eksik yanmaya neden olur. Hava fazlalık katsayısının verimi nasıl etkilediği Şekil 2.12'de daha açık bir şekilde gösterilmektedir.
- Karışımın daha iyi olduğu gaz ve sıvı yakıtlarda λ düşük, katı yakıtlarda λ nispeten yüksek değerlerdedir (Anonim,2019b).



Şekil 2.12.Hava fazlalık katsayındaki değişimin verim ve emisyon değerleri üzerindeki etkisi.

Şekil 2.12’de hava fazlalık katsayısının verim ve emisyon değerlerini nasıl dalgalandırdığı gösterilmektedir. Yakıcıdan elde edilen bu verilerde baca gazı sıcaklığının yükselmesi sebebiyle verimdeki düşüş de görülmektedir. Ancak verimdeki düşüşün hava fazlalık katsayısı ile orantılı bir şekilde dalgalı olarak gözlemlendiği aşikârdır. Nitekim verim ve emisyon değerlerinde gözlemlenen değişimler de aynı şekilde dalgalı olarak gerçekleşmektedir. Buradan yola çıkarak yakıcı verim değerinin ve baca gazı emisyon değerlerinin birinci derecede hava fazlalık katsayısı ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur.

Bazı yakıt türlerine göre hava fazlalık katsayısı λ değerleri Çizelge 2.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 2.4. Bazı yakıt türlerine göre hava fazlalık değerleri. (Anonim,2019b)

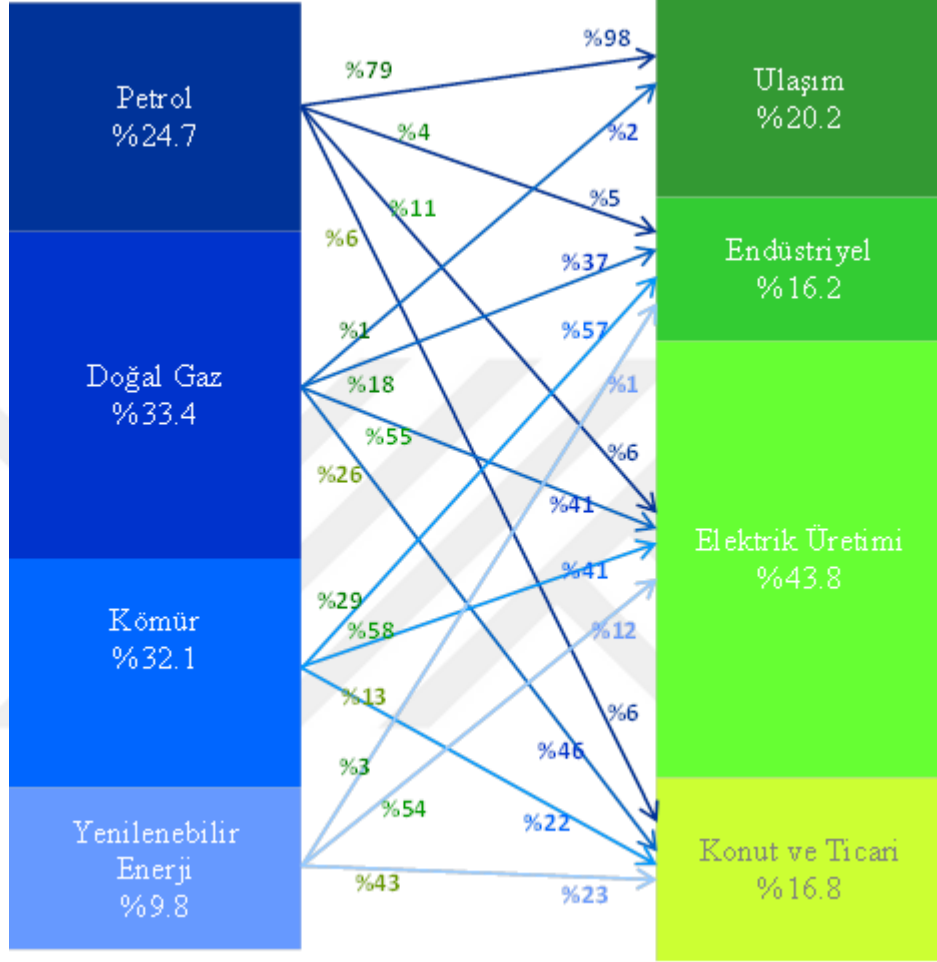
Yakıt Cinsi	λ
Gaz Yakıtlar	1,1-1,2
Fuel Oil	1,05-1,15
Toz Linyit	1,18-1,25
Toz Taşkömürü	1,25-1,50
Taşkömürü	1,38-1,69
Linyit	1,24-1,33

2.4 Türkiye'nin enerji durumu

Hızla artan enerji talebi neticesinde Türkiye'nin, başta petrol ve doğalgaz olmak üzere, enerji ithalatına bağımlılığı artmaktadır. Ülkemizin hâlihazırda toplam enerji talebinin ancak yaklaşık %26'sı yerli kaynaklardan karşılanabilmektedir (Anonim, 2019c)

Enerji kaynaklarını kullanımına ve dönüştürülebilirliklerine göre iki gruba ayırabiliriz. Kullanışlarına göre enerji kaynakları yenilenebilir (Hidrolik, Güneş, Biyokütle, Rüzgâr, Jeotermal, Hidrojen, Dalga) ve yenilenemez enerji kaynakları (Fosil Kaynaklı olarak Kömür, Petrol, Doğalgaz, Çekirdek Kaynaklı ise Uranyum ve Toryum) olarak ikiye ayrılırken; dönüştürülebilirliklerine göre enerji kaynakları birincil (kömür, petrol, doğalgaz, nükleer, biyokütle, hidrolik, güneş, rüzgar, dalga) ve ikincil enerji kaynakları (Elektrik, Benzin, Mazot, Motorin, İkincil Kömür, Kok, Petrokok, Hava gazı, Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)) şeklinde incelenmektedir. Dünyada ve Türkiye'de kullanılmakta olan enerjinin çoğu birincil enerji kaynaklarından elde edilmektedir. 2014 yılında Türkiye'de tüketilen birincil enerjinin sektörler arasındaki dağılımda %33,4'ü doğalgaz, %32,1'i kömür, %24,7'si petrol ve %9,8'si ise yenilenebilir enerjiler ve hidroenerjidir. Bu enerjileri kullanan

sektörler ise %43,8'i elektrik üretiminde, %20,2'si ulaşımda, %18,6'sı konut ve ticari ile %16,2'si sanayide olarak belirlenmiştir ve Türkiye'de 2014 yılında tüketilen birincil enerjinin kaynak ve sektör dağılımı Şekil 2.13'te verilmiştir (Koç ve Kaplan, 2008a, Koç ve Kaplan., 2008b, Yılmaz).



Şekil 2.13. 2014 yılına ait tüketilen enerjinin sektör dağılımı

2.5 Yakıcılar

Yakıcılar, yakıtlardaki kimyasal enerjiyi kullanarak suyun enerji içeriğini yükseltmek kaidesi ile ısıtma ve güç uygulamalarında kullanımı sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Birçok fosil veya fosil olmayan yakıtlar yakıcılarda yakılır ve en çok karşılaşılan yakıt türleri kömür, sıvı yakıtlar ve doğalgazdır. Yanma sürecinde karbon, hidrojen ve yakıtta bulunan diğer elementler ile oksijen tepkimeye girer ve alev ile birlikte sıcak yanma gazları üretirler. Bu gazlar yakıcı içinden çekilirken sahip oldukları ısı suya aktarılır ve böylece soğurlar. Son olarak bu gazlar bir

bacadan geçirilerek atmosfere salinir. Yakıt ve havanın her ikisi de yanma için uygun durumda ise yanma işlemleri ve ısı üretimi devam eder.

Yakıcılar yakıtın karakteristiklerine, belirli bir sıcaklık çıkışına ve istenen emisyon değerlerine bağlı olarak farklı boyut ve özelliklerde üretilirler. Bazı yakıcılar sadece sıcak su üretme yetisine sahiptir bazıları ise buhar üretecek şekilde tasarlanır (Elie, 2013).

Besleme suyu sistemi, buhar sistemi ve yakıt sistemi yakıcı sistemlerini oluşturan kısımlardır. Besleme suyu sistemi, yakıcının su ihtiyacını karşılar ve buhar ihtiyacını karşılamak için otomatik olarak düzenleme yapar. Çeşitli valfler ise bakım ve onarım için erişim sağlar. Buhar sistemi yakıcıda üretilen buharı toplar ve kontrolünü sağlar. Buhar kullanım alanına borular vasıtasıyla iletilir. Sistem boyunca buhar basıncı valfler kullanılarak ayarlanır ve buhar basınç göstergeleriyle kontrol edilir. Yakıt sistemi, gerekli ısıyı üretmek amacıyla yakıt sağlamak için kullanılan tüm ekipmanları içerir. Yakıt sisteminde gerekli ekipman, sistemde kullanılan yakıtın türüne bağlıdır.

2.5.1 Yakıcı türleri ve sınıflandırılması

Yakıcıların farklı birçok sınıflandırma türleri vardır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir:

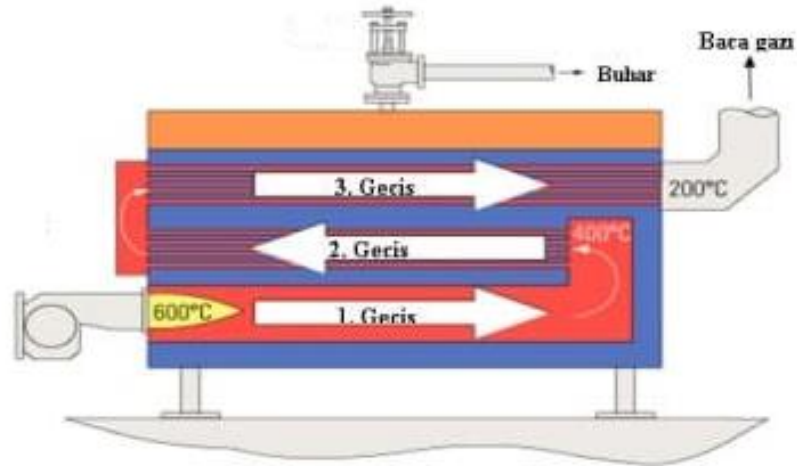
- Yakıcılar sıklıkla su borulu ve alev borulu olmak üzere sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma sistem içerisinde yanma gazı veya su dolaşımına göre yapılmaktadır.

- Yakıcılar ısı kaynaklarına göre sıvı yakıtlı, gaz yakıtlı, kömür yakıtlı ve katı yakıtlı yakıcılar olarak sınıflandırılabilir. Kömür yakıtlı yakıcılar ise yakıcıyı ateşleme ekipmanına dayalı olarak da ayrıştırılabilir. Kömür yakıtlı yakıcıların alt üç ana başlığı; toz kömür yakıtlı yakıcılar, stokerli yakıcılar ve akışkan yataklı yakıcılardır.

- Yakıcılar üretim yöntemlerine göre de sınıflandırılabilir. Montaja hazır yakıcılar bir fabrikada birleştirilir, kızak üzerine monte edilir ve yardımcı boru tesisatına bağlanmaya hazır tek bir paket halinde sahaya taşınır. İşletmede bir araya getirilen yakıcılar, bir takım parçalar veya alt montajlardan oluşturulur. Bu parçalar hizalanır, bağlanır ve test edildikten sonra tüm ünite, kuruluşa tek parça halinde gönderilir. Saha yapımı yakıcılar bütün bir montaj olarak taşınamayacak kadar

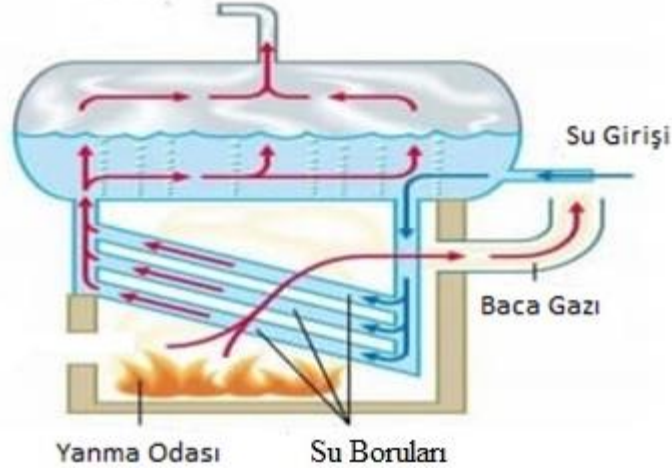
büyüktür. Bir dizi ayrı bileşenden sahada inşa edilirler. Bazen bu bileşenler, boyutları ve ağırlıkları nedeniyle özel taşıma ve kaldırma hassasiyetleri gerektirir.

Alev Borulu Yakıcılar: Bu tip yakıcılarda içi su ile dolu bir dış kabuk tarafından çevrelenmiş bir dizi borudan oluşmaktadır. Bu borular içerisinden sıcak yanma gazlarının geçeceği şekilde tasarlanmıştır. Sıcak gazlar borudan geçişleri sırasında bu boruları saran suyu ısıtırlar. Dış kabuğun boyutlarının olağandan fazla olmaması amacıyla bu tip yakıcılar düşük basınçlı uygulamalarda daha sıklıkla kullanılmaktadır. Alev borulu yakıcıların ısı kapasiteleri genellikle maksimum 50 MBtu/h civarındadır. Ancak son zamanlarda gelişen teknoloji ile birlikte bu kapasite sınırı giderek yükselmektedir. Alev borulu yakıcılar kendi aralarında temel olarak yatay geri dönüşlü, skoç tipi ve lokomotif yakıcılar olmak üzere üçe ayrılır. Şekil 2.14'te klasik bir alev borulu yakıcı gösterilmektedir. (Elie, 2013)



Şekil 2.14. Alev borulu yakıcı (Anonim,2019d)

Su Borulu Yakıcılar: Su borulu yakıcılarda yanma odası, içinden su ve buhar karışımının dolaştığı borularla çevrilidir. Bu tip yakıcılar özellikle rafineri proseslerinde alev borulu olanlara göre çok daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarımları son zamanlarda önemli gelişmeler göstermiştir. Dikey veya dikeye yakın doğrultulu borular hem radyasyon (yanma odası) hem de konveksiyon (yanma gazları) bölgelerinde verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 2.15'te tipik bir su borulu yakıcı gösterilmektedir.



Şekil 2.15.Su borulu yakıcı (Anonim, 2019d)

2.6 Sistem Tanımlama Teorisi

Bir sistemde bulunan proses seti o sistemin davranışını belirler. Her proses fiziksel ve kimyasal özellikleri ile belirlenir ancak bu özellikler her zaman kolaylıkla bulunamayabilir. Bir model en önemli özellikleri seçilerek sadeleştirilmiş sistem davranışlarının 'temellerini' taklit eder. Bu sebeple modelleme teknikleri şu şekilde sınıflandırılabilir;

Öncül modelleme, beyaz kutu veya biçimsel modelleme, fiziksel veya kimyasal yasalarla araştırmak için basit deneylerin yapılarak gerçekleştirilen modelleme türüdür.

Kara kutu modelleme, sistem hakkında önceden herhangi bir bilgi sahibi olmadan, sadece veriye dayalı (veri odaklı) bir model oluşturarak gerçekleştirilen modelleme türüdür. Model sistemin geçekte nasıl olduğunu değil de çıkışın girişle bağıntısını tanımlar.

Gri kutu modellemede, modelin tanımlanabilmesi için kısmi bir teorik yapının verilerle birleştirildiği modelleme türüdür.

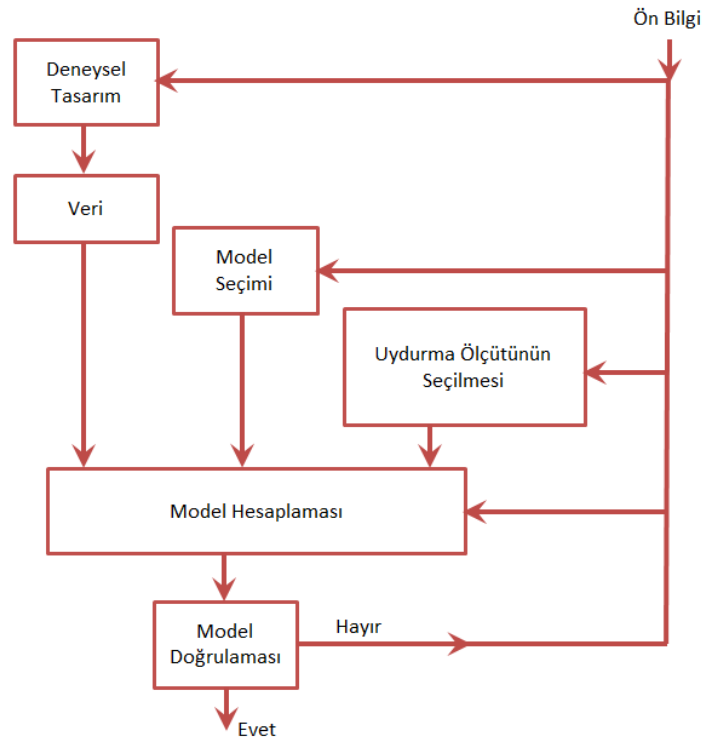
Sistem tanımlama, deneysel verilere dayanarak kara veya gri bir dinamik sistemin matematiksel modelini elde etme işlemidir. Modelin kullanım amacına göre kompakt ve yeterli olması önemli hususlardır. Kontrolcü tasarımı amacıyla dinamik sistemlere sıklıkla uygulanan bir yöntemdir. Sistem tanımlama işlemlerinde genellikle doğrusal zamanla değişmeyen sistemler olan LTI sistemlerini göz önünde

bulundurulur ve u girişine karşın y çıkışını ilişkilendiren bir transfer fonksiyonu $G(s)$ elde edilir.

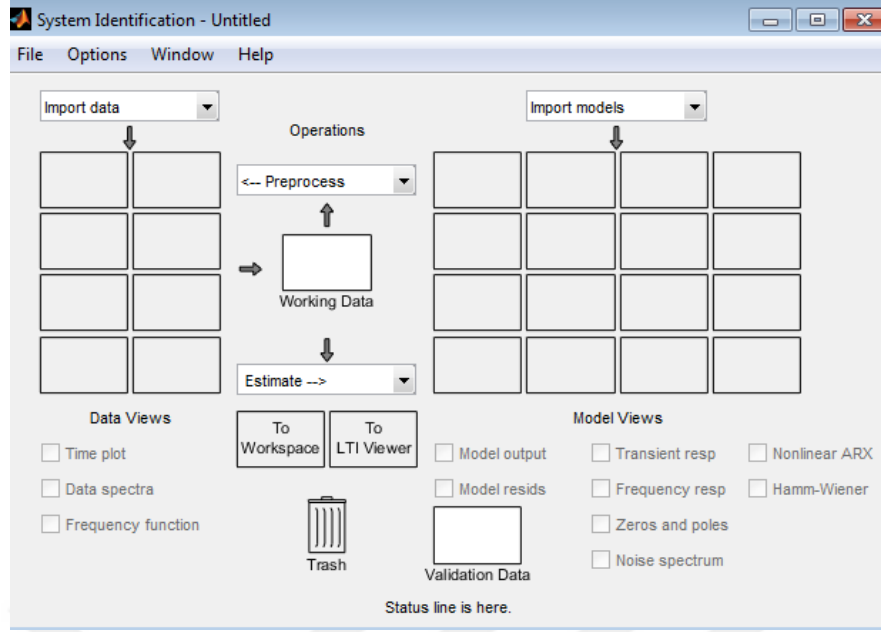
$$\frac{y(s)}{u(s)} = G(s) \quad (2.33)$$

Modeli elde edilecek sistem hakkında detaylı bilgi sahibi olabilmek için saha verileri sensörler üzerinden çekilir. Proses verilerinin, analiz için gerekli olan kalite düzeyinde elde edilmesi amacıyla belirli örnekleme süresi ve aralığı ihtiyacı ortaya çıkar.

Sistem tanımlama işlemi, MATLAB System Identification araç kutusu ile gerçekleştirmek mümkündür. Bu araç kutusu, Şekil 2.17'de gösterildiği gibi basit bir grafik ara yüze sahiptir. Ayrıca sistem tanımlama sürecinde izlenecek yollar bloklar halinde Şekil 2.16'da gösterilmektedir (Anonymous, 2012).



Şekil 2.16. Sistem tanımlama blok şeması



Şekil 2.17.MATLAB sistem tanımlama araç kutusu penceresi

2.7 Kontrol Teorisi

Günümüzde sıklıkla kullanılan kontrol teorileri klasik kontrol, modern kontrol ve robust kontrol teorileridir.

Bilim ve mühendislik alanlarında ağırlıklı olarak kullanılan kontrol türü otomatik kontroldür. Otomatik kontrol, uzay araçlarında, robotik sistemlerde, modern üretim sistemlerinin ve sıcaklık, basınç, nem, akış gibi endüstriyel işletimlerin kontrolünde önemli rol oynamaktadır. Otomatik kontrolde kayda değer ilk gelişme ise 18. yüzyılda James Watt'ın bir buhar makinasının hız kontrolü için ortaya koyduğu yöntem olarak gösterilebilir.

Modern kontrol teorisi diferansiyel eşitliklerin zaman alanında analizi temellidir ve kontrol sistemlerinin tasarımını kolaylaştırmaktadır. Bunun sebebi ise teorinin gerçek bir kontrol sistemine dayalı olmasıdır. Ancak sistemin kararlılığı gerçek sistem ve bu sistemin modeli arasındaki hataya karşı oldukça hassastır. Bu durumda sistemin modeli üzerinde tasarlanan kontrolcünün gerçek sisteme uygulanmasıyla ortaya kararlı bir sonuç koymayabilir. Böyle bir durumdan kaçınmak için tasarımcılar ilk iş olarak olası hata aralığı ayarlar ve kontrolcü bu şekilde tasarlanır. Eğer sistem kabul edilen değerler arasında kalırsa tasarlanan kontrol sistemi kararlı olacaktır. Bu prensiple uygulanan tasarım yöntemi robust

kontrol olarak isimlendirilir. Frekans-cevap ve zaman-alanı yaklaşımlarının her ikisi de bu teori kapsamındadır. Matematiksel olarak ise karmaşık bir teoridir.

Kontrol teorisinden bahsederken bilinmesi gereken bazı temel tanımlar vardır. Bunlar;

Kontrol edilen değişken ve kontrol sinyali: Kontrol edilen değişken, ölçülen ve kontrol edilen durum veya değerdir. Kontrol sinyali, kontrol edilen değişkenin değerini etkilemek amacıyla kontrolcü tarafından işlem uygulanan değer veya değişkendir. Normalde kontrol edilen değişken sistem çıkışıdır. Kontrol, istenilen sistem değişken değerinin ölçülmesi ve sisteme bu ölçülen değer düzeltilmesi veya arzu edilen limitlerden sapmalarının kısıtlanması amacıyla kontrol sinyalinin uygulanmasıdır.

Sistem(Plant): Sistem bir ekipman parçası olarak veya makine parçalarının birlikte çalışan parçalarının her biri olarak adlandırılabilir.

Bozucu: Sistem çıkışını olumsuz yönde etkileme eğiliminde olan sinyaldir. Eğer bozucu sistemin içinde üretiliyorsa 'iç bozucu', sistem dışından sisteme giriş şeklinde etki eden bozucu sinyal ise 'dış bozucu' olarak adlandırılır.

Sistem: Birlikte hareket ederek belirli bir amacı gerçekleştirmek için bir araya getirilen bileşenlerin kombinasyonudur. Bir sistem fiziksel olmak zorundadır.

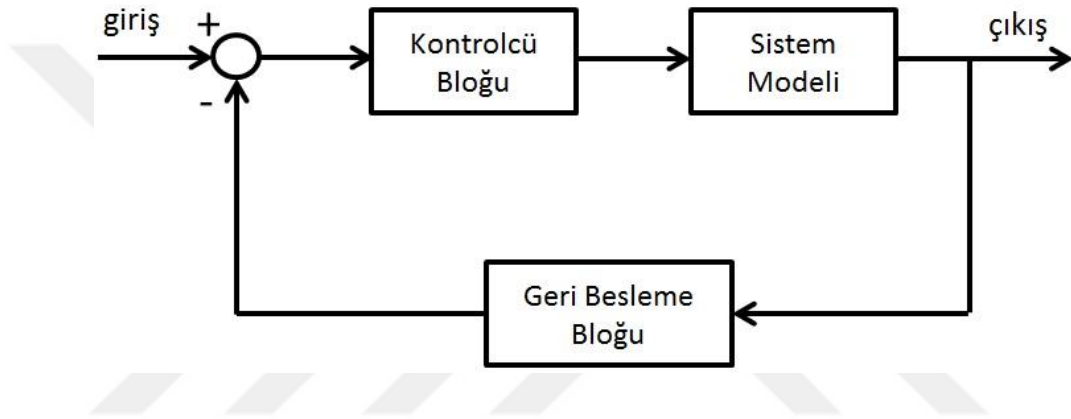
Geri beslemeli kontrol: Kapalı çevrim kontrol sistemleri olarak da adlandırılırlar. Bozucuların varlığında sistemin giriş-çıkış farkını düşürmek amacıyla uygulanan giriş-çıkış ilişki kurma yöntemidir. Geri beslemeli kontrol yöntemine oda sıcaklığı kontrolü örnek gösterilebilir. Odanın anlık olarak sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilerek referans(arzu edilen) sıcaklık ile karşılaştırılır, böylece termostat ısıtma veya soğutma sisteminin açılıp-kapanmasını sağlayarak odanın konfor sıcaklığına ulaşmasını dışardan herhangi bir müdahale olmadan sağlayabilir.

Giriş-çıkış ilişkisinin olmadığı sistemler ise açık çevrim kontrol sistemleri olarak adlandırılır. (Ogata ve Yang, 2002)

Kontrol sistem çalışmalarında tasarımcıların, sistemleri matematiksel olarak ifade etmesinin yanı sıra dinamik davranışlarını analiz ederek modellemeleri

gerekmektedirler. Dinamik bir sistemin matematiksel modeli, sistem dinamiklerini temsil eden denklem takımları ile tanımlanır. Verilen bir sistemin dinamik modeli birden fazla olabilir. Sistemler bakış açlarına göre farklı matematik modellere temsil edilebilir.

Şekil 2.18’ de üç bloğa sahip tipik bir geri beslemeli kontrol yapısı gösterilmektedir. Bu bloklar sırasıyla, sistem bloğu, kontrolcü bloğu ve geri besleme bloğudur. Bu tip geri beslemeli kontrol yapısında, sistem ve kontrol blokları ileri beslemeyi oluşturur, geri besleme ise sensör ve sinyal koşullandırmayı içerir. Bu sistem yapısı, proses kontrol ve diğer uygulamalarda sıklıkla görülür.



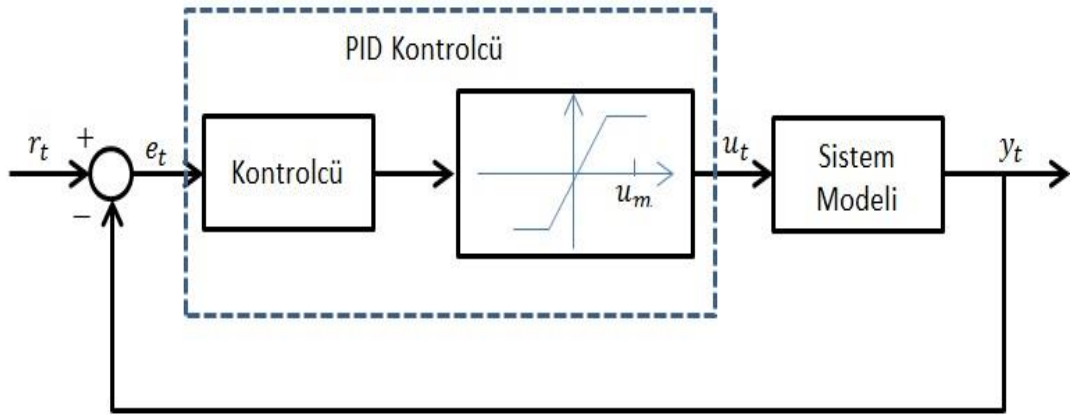
Şekil 2.18.Klasik geri besleme yapısı

Kontrol sistemlerinde geri besleme konsepti çok önemlidir. Geri beslemenin olmadığını varsayarsak, sistem yalnızca giriş sinyaliyle tahrik edilecek ve kontrol bloğunun etkisinden sonra sistemin çıkış sinyali üretilecektir. Bu tür sistem yapısı genellikle açık-çevrim kontrol yapısı olarak adlandırılır.

2.7.1 PID kontrol

Geri beslemeli bir PID kontrolcünün yapısı Şekil 2.19 ’da gösterilmektedir. PID kontrol eski kontrol stratejilerinden birisidir. Literatüre 1939’larda ilk olarak sürülmüş ve bugüne kadar proses kontrolünde en sık kullanılan kontrolcü olarak kalmıştır. Bugün ise mikro süreçlerin dijital uygulamalarında da kullanılmaktadır. PID kontrolcülerini basit bir kontrolcü yapısı vardır ve sistem tasarımcıları tarafından ayarlanması oldukça kolaydır. Çoğu kontrol sisteminde PID kontrolün kullanılıyor olması bu kontrolcülerin tatmin ediciliğini kanıtlamaktadır. Bu sebeple endüstriyel

kontrolde hala büyük bir uygulama alanına sahiptir ve yıllardır aktif bir araştırma başlığıdır.



Şekil 2.19. PID kontrolcü gömülü bir geri beslemeli kontrol çevrimi

Şekil 2.19’da da gösterildiği gibi bir PID denetleyicisinde, hata sinyali $e(t)$, ağırlıklandırılmış nihai sinyaller ve sistem modeline uygulanan kontrol sinyali $u(t)$ 'yi oluşturmak üzere toplanan orantısal, integral ve türev eylemleri üretmek için kullanılır. PID kontrolcüsünün matematiksel tanımlaması Denklem 2.34’teki, şekildedir:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.34)$$

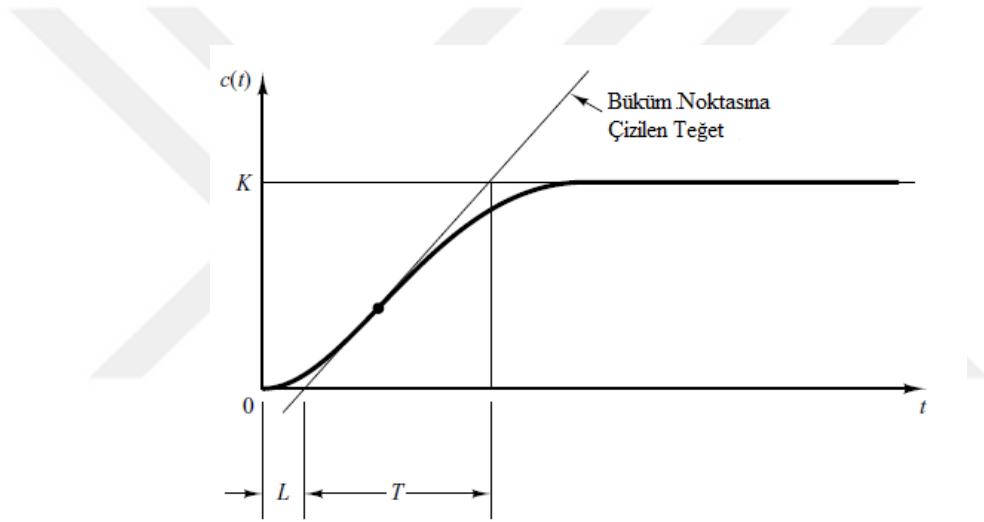
Burada $u(t)$ sisteme giriş sinyalidir, hata sinyali $e(t) = r(t) - y(t)$ olarak tanımlanır ve $r(t)$ ise referans giriş sinyalidir. (Chen ve Atherton, 2007)

Kontrol işlemi uygulanacak sistemin matematiksel modeli elde edildikten sonra, bu sistem için çeşitli kontrol işlemleri uygulanmaya başlanabilir. Böylece sistemin geçici ve kalıcı durum cevapları üzerinde iyileştirmeler yapılabilir. Sistemin matematiksel modeli elde edilemiyor veya elde edilen model çok karmaşık ise analitik/hesaplamalı yaklaşımlarla PID tasarımı mümkün olmaz. Bu durumda PID kontrolcü tasarımında deneysel yaklaşımlara başvurulur.

PID kontrolcü tasarımında birden fazla yöntem vardır. Bunlar; Ziegler-Nichols yöntemi, frekans cevabı yaklaşımı, PID parametrelerinin optimum değerini elde etmek için hesaplamalı optimizasyon yaklaşımları gibidir (Chen ve Atherton, 2007).

PID kontrolcülerini için Ziegler-Nichols yöntemi; geçici cevap karakteristiği verilen bir sistemin oransal kazancı K_p , integral zamanı T_i ve türev zamanının T_d belirlendiği bir yöntemdir. Ziegler-Nichols ayar yöntemi, birinci ve ikinci yöntemler olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

Birinci yöntem: Birinci yöntemde birim basamak girişine karşın sistemin deneysel cevabı elde edilir. Eğer sistem integratör veya baskın karmaşık eşlenik kök içermiyorsa, böyle bir sisteme ait birim basamak cevabı Şekil 2.20’de gösterildiği üzere *S* şeklinde olur. Birinci yöntem sadece basamak girişine karşın *S* formunda cevap içeren sistemler için geçerlidir.



Şekil 2.20. S formundaki cevap eğrisi

Bu eğri gecikme zamanı L ve zaman sabiti T olarak isimlendirilen iki sabitle karakterize edilebilir. Şekil 2.10’den de anlaşılacağı üzere bu iki değer, S formundaki eğrinin büküm noktasına çizilen teğet ile $c(t)=K$ doğrusunun kesiştiği noktalar ile elde edilebilir. Böylece transfer fonksiyonu $C(s)/U(s)$ ’e birinci dereceden zaman gecikmeli bir sistem ile yaklaşım şu şekilde yapılabilir;

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (2.35)$$

Çizelge 2.5. Sistemin basamak cevabı temelli Ziegler-Nichols ayar yöntemi (birinci yöntem).

Kontrolcü Türü	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 * \frac{T}{L}$	$\frac{T}{0.3}$	0
PID	$1.2 * \frac{T}{L}$	$2 * L$	$0.5 * L$

Birinci kural ile ayarlanan PID kontrolcü parametreleri şu şekilde olur,

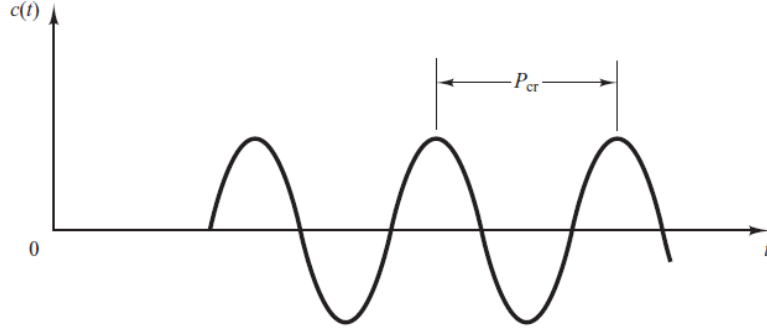
$$G_C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$= 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5s \right)$$

$$= 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad (2.36)$$

Böylece PID kontrolcünün orijinde bir kökü ve $s = -1/L$ noktasında çift katlı sıfırı olmaktadır.

İkinci yöntem: İkinci yöntemde öncelikle $T_i = \infty$ ve $T_d = 0$ değerlerine ayarlanır. Sadece oransal kontrol K_p 0'dan kritik değerine (K_{cr}) kadar artırılır ki bu değerde çıkış önce sürekli salınım gösterecektir. (K_p 'nin herhangi bir değeri için çıkışta salınımlar meydana gelmiyorsa bu yöntem uygulanamaz.) Böylece kritik kazanç K_{cr} ve buna karşılık periyot P_{cr} deneysel olarak Şekil 2.21'deki gibi elde edilmiş olur.



Şekil 2.21. P_{cr} periyotlu sürekli salınım.

Çizelge 2.6. Kritik kazanç K_{cr} ve kritik periyot P_{cr} 'ye dayalı Ziegler-Nichols ayar yöntemi (ikinci yöntem).

Kontrolcü Türü	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 * K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 * K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} * P_{cr}$	0
PID	$0.6 * K_{cr}$	$0.5 * P_{cr}$	$0.125 * P_{cr}$

Böylece ikinci yöntemle ayarlanan PID kontrolcüsü şu şekilde olur;

$$G_C(s) = 0.6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$= 0.6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right)$$

$$= 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s} \quad (2.37)$$

Böylece PID kontrolcüsünün orijinde bir adet kutbu ve $s = -4/P_{cr}$ ' de ise çift katlı sıfırı bulunmaktadır.

2.7.2 Oransal (P) kontrol

Oransal bir kontrolcü çıkışını, kontrol edilen değerin ayar noktasındaki sapmasına orantılı olacak şekilde hareket ettirir:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.38)$$

Oransal kontrolcü iyi bir regülatör değildir bunun sebebi ise, herhangi bir anda hatanın şiddeti ne kadar büyük olursa orantı etkinin hatayı düzeltme etkisi o kadar büyük olur. Ancak hata küçüldükçe denetim etkisinin şiddeti de küçülür ve hatanın belirli bir en küçük değerinden sonra denetim etkisinin şiddeti hatayı düzeltmeye yetmez. Bu durumda geri beslemeli sistemde belirli bir kalıcı hata oluşabilir (Chen ve Atherton, 2007).

2.7.3 Oransal ve integral (PI) kontrol

Endüstriyel Uygulamaların %90'ında PI kontrolcülere kullanılmaktadır. İntegral etki biriktirilmiş hataya orantılı bir denetim çıkışı oluşturarak hatanın zaman içinde sıfırlanmasını sağlar. Bu integral etkinin olumlu tarafıdır. Diğer taraftan integral etki hatayı biriktirerek düzelttiği için denetim etkisi ve hatayı düzeltmesi zaman alır. Bu da integral etkiyi yavaş tepkili kontrol türü yapar ve integral etkinin olumsuz yönüdür. Ayrıca integral etkiden dolayı paydaya katılan bir s çarpanı integral etkili denetime 90° lik faz gecikmesi verir ve bu da geri beslemeli sistemin kararlılığını kötüleştirir. Standart PI denetleyicisinin transfer fonksiyonu ise şu şekildedir (Yüksel, 2006):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.39)$$

2.7.4 Oransal ve türevsel (PD) kontrol

PD kontrolcüsünün kullanım amacı, sistem cevabının gelecekteki hatasını öngörebilme yeteneğine sahip olduğu için kontrolü iyileştirerek sistemin kararlılığını arttırmaktır. Hata sinyalindeki ani değişimlerin etkisinden uzak durmak için hata

sinyali yerine sistemin cevap çıkışındaki değişkeninin türevi alınır. Bu nedenle, D modu, hata sinyalinde ani değişikliklerden kaynaklanan kontrol çıkışında ani değişimlerin meydana gelmesini önlemek için çıkış değişkeninin değişimi ile orantılı olacak şekilde tasarlanmıştır. Buna ek olarak D doğrudan proses gürültüsünü artırır, bu nedenle sadece D-kontrolü kullanılmaz. Standart PD denetleyicisinin transfer fonksiyonu ise şu şekildedir.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + K_d s) \quad (2.40)$$

2.7.5 Gürbüz kontrol

Gerçek mühendislik sistemlerinde dış bozucular ve ölçümlerdeki gürültüler kontrol sistem tasarımlarını zayıflatan başlıca etkilerdir. Bu sebeple kontrol sistem tasarımlarında gürbüzlük büyük önem taşımaktadır. Farklı yöntemlerle tasarlanan sistemler ile gerçek sistemler arasında her zaman farklılıklar olmaktadır. Bozucu girişler, gürültüler ve sistem parametre değişimleri varlığında ‘gürbüzlük’ belirli performans kriterlerini karşılayacak kontrol işlemidir.

2.7.5.1 Gürbüz kontrol sistem tanımlaması

Doğrusal zamanla değişmeyen bir sistemin durum denklemi Denklem 2.41’deki gibi olduğu bilinmektedir.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.41)$$

Burada $x(t)$ durum vektörünü, $u(t)$ giriş vektörünü, $y(t)$ ise çıkış vektörünü tanımlamaktadır. Durum değişkenlerinin bilindiği üzere başlangıç koşullarının sıfır kabulü altında laplace dönüşümü vasıtası ile Denklem 2.42’deki transfer fonksiyonu elde edilebilir.

$$G(s) = C(sI_n - A)^{-1}B + D \quad (2.42)$$

Bir diğer matris gösterimi ile Denklem 2.43’deki gibi gösterilebilir.

$$G(s) = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Deklem 2.41'de diferansiyel denklemlerle ifade edilen sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olduğu varsayılmaktadır.

Ayrık zamanlı sistemler söz konusu ise, Denklem 2.44' deki gibi temsil edilebilir.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) & \text{veya} & & x_{(k+1)} &= Ax_k + Bu_k \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) & \text{veya} & & y_k &= Cx_k + Du_k \end{aligned} \quad (2.44)$$

Transfer fonksiyon matrisi ise;

$$G(s) = C(zI_n - A)^{-1}B + D = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Sistem kararlılığı kontrol tasarımında en önemli husustur. Kararsız bir sistemin pratik bir değeri yoktur. Bunun nedeni, herhangi bir kontrol sisteminin gerçek bir çalışma ortamındaki bozuculara ve gürültülere karşı savunmasız olması ve bu sinyallerden kaynaklanan etkinin kararsız bir sistemde beklenen normal sistem çıkışını olumsuz etkilemesidir. Geri beslemeli kontrol teknikleri, belirsizliklerin yarattığı etkiyi azaltabilir ve istenen performansı sağlayabilir. Ancak, yetersiz bir geri besleme denetleyicisi, orijinal açık döngü sistemi kararlı olsa da kararsız bir kapalı döngü sistemine yol açabilir.

Dinamik bir sistem bir transfer fonksiyonu (matris) gibi giriş/çıkış ilişkisi ile tanımlandığında, sistem herhangi bir sınırlı giriş için sınırlı çıkışlar üretmesi durumunda kararlıdır denir. Buna sınırlı giriş-çıkış dengesi (BIBO) denir. Bir transfer fonksiyonu matrisi Denklem 2.45 ile modellenen lineer, zamanla-değişmeyen bir sistem için, $G(s)$ ' nin tüm kutupları sol-açık yarı kompleks düzleminde, bir başka ifadeyle tüm kutuplar negatif gerçektir ise sistem kararlı yapıdadır (Gu vd., 2005).

Bir sistem Denklem 2.41 gibi bir durum-uzay modeli ile de gösterilebilir. Bu durumda, asimptotik kararlılık kavramından bahsedilebilir. Aynı sıfır değerindeki bir giriş için, sistem durumu herhangi bir başlangıç durumundan sifira yakınsa, sistem

asimptotik olarak kararlıdır. Denklem 2.41 ile tanımlanan lineer, zamanla-değişmeyen bir sistem için, durum matrisi A'nın bütün öz değerleri sol-açık yarı kompleks düzleminde, yani pozitif gerçektir ise, asimptotik olarak kararlıdır (Gu vd., 2005).

Tüm giriş-çıkış çiftlerinin alt sistemleri asimptotik olarak kararlı olduğunda (veya bu alan içinde ele alınan durum uzay modelleri minimal olduğunda, ilgili transfer fonksiyonu matrisleri BIBO kararlı olduğunda) birbirine bağlı sistem için kararlıdır denir. İç kararlılık, birbirine bağlı bir geri beslemeli sistemde asimptotik kararlılığa eşdeğerdir. Şekil 2.22'de verilen sistem için iki giriş r ve d (bozucu giriş) ve iki çıkış y ve u (K kontrolcünün çıkışı) olarak tanımlanır.

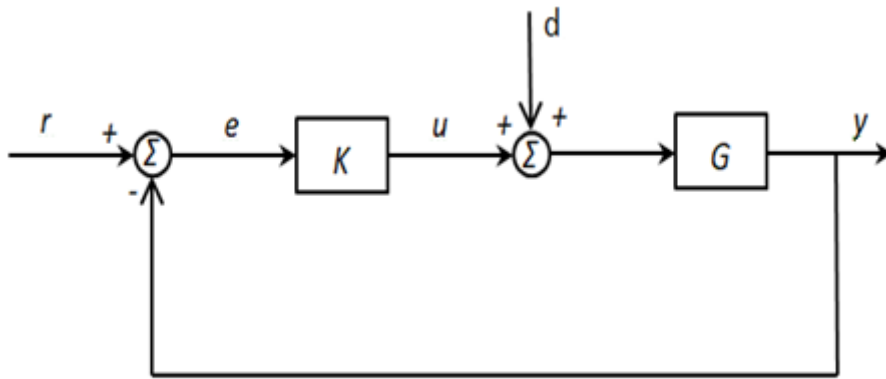
Girişlerden çıkışlara transfer fonksiyonları sırasıyla Denklem 2.46'da gösterilmektedir.

$$T_{yr} = GK(I + GK)^{-1}$$

$$T_{yd} = G(I + GK)^{-1}$$

$$T_{ur} = K(I + GK)^{-1}$$

$$T_{ud} = -KG(I + GK)^{-1} \quad (2.46)$$



Şekil 2.22.Sistemin blok diyagramı

Giriş $\begin{bmatrix} r \\ d \end{bmatrix}$, çıkış $\begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix}$ şeklinde ifade edilerek, transfer fonksiyonu matrisi (M) Denklem 2.47’de gösterilebilir.

$$M = \begin{bmatrix} GK(I + GK)^{-1} & G(I + GK)^{-1} \\ K(I + GK)^{-1} & -KG(I + GK)^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Denklem 2.47’in kararlılığı \hat{M} ’nin kararlılığıyla eşdeğerdir.

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} I - GK(I + GK)^{-1} & G(I + GK)^{-1} \\ K(I + GK)^{-1} & I - KG(I + GK)^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Basit matris işlemiyle Denklem 2.49 elde edilebilir.

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} (I + GK)^{-1} & G(I + GK)^{-1} \\ K(I + GK)^{-1} & (I + GK)^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -G \\ -K & I \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.49)$$

Dolayısıyla, Denklem 2.49 kararlıysa Şekil 2.22’deki geri beslemeli sistem içten kararlı olur.

2.7.5.2 Belirsizliklerin modellenmesi

Belirsizlikler iki kategoride incelenebilir: bozucu sinyaller ve dinamik bozucular. Birinci duruma; giriş çıkış bozukluğu, sensör gürültüsü, aktüatör gürültüsü vb. örnek gösterilebilir. Bu durum, matematiksel model ile sistemin gerçek dinamikleri arasındaki uyumsuzluğu temsil eder. Herhangi bir gerçek sistemin matematiksel modeli, sistem dinamiklerinin fiziksel gerçekliğinin bir yaklaşımıdır. Tutarsızlığın sebepleri arasında modellenmemiş (genellikle yüksek frekanslı) dinamikler, modellemede göz ardı edilen lineer olmayan noktalar, bilerek azaltılmış düzen modellerinin etkileri, sistem parametrelerinin değişmesi ve çevresel faktörler

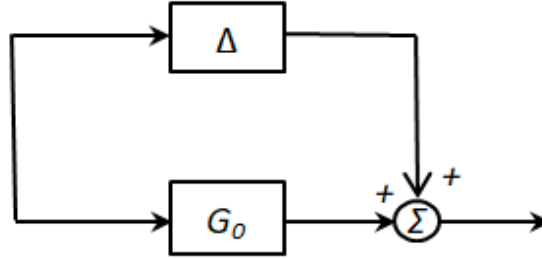
vardır. Bu modelleme hataları, bir kontrol sisteminin kararlılığını ve performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Gu vd., 2005).

Yapılandırılmamış belirsizlikler:

Bir sistemin farklı bölümlerinde oluşabilecek birçok dinamik bozucular tek bir bozucu bloğu olan Δ 'ya toparlanabilir. Bu belirsizlikler ise 'yapılandırılmamış' belirsizlik olarak isimlendirilir. Doğrusal ve zamanla değişmeyen sistemler söz konusu ise Δ , bilinmeyen bir transfer fonksiyon matrisi ile ifade edilebilir. Bir kontrol sisteminde yapılandırılmamış dinamik belirsizlikler farklı şekillerde ifade edilebilir. Burada $G_p(s)$, gerçek ve sarsılmış model dinamiklerini, $G_o(s)$ ise fiziksel sistemin nominal bir model tanımlamasını temsil etmektedir. Şekil 2.23 ve 2.24'te temel iki bozucu giriş tipi gösterilmektedir.

-Toplamsal bozucu;

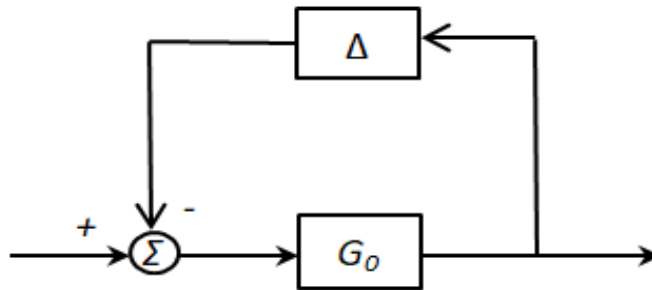
$$G_p(s) = G_o(s) + \Delta(s) \quad (2.50)$$



Şekil 2.23. Toplamsal bozucu yapısı

-Zıt yönlü toplamsal bozucu;

$$(G_p(s))^{-1} = (G_o(s))^{-1} + \Delta(s)$$



Şekil 2.24. Zıt yönlü toplamsal bozucu yapısı

Parametrik Belirsizlik:

Karmaşık belirsizlikler genellikle yüksek frekans aralıklarında görülür ve zaman gecikmeleri, parazitik eşleştirme, histeresiz ve diğer nonlineerlikler ihtiva eder. Bununla birlikte, birçok endüstriyel kontrol sistemindeki dinamik bozucular, çalışma noktalarının kaydırılmasından, bileşenlere ait özelliklerin yanlış tanımlanmasından, sistem bileşenlerindeki yıpranmış etkilerden kaynaklanabilir. Bu tür bozucular, bazı sistem değerlerinin olası değer aralıklarına (karmaşık veya gerçek) göre değişimleri ile tanımlanabilir. Düşük frekans aralığı performansını etkiler ve “parametrik belirsizlikler” olarak adlandırılır (Gu vd., 2005).

Örnek olarak bir kütle-yay-sönüm sistemini ele alalım. Bu sistemin Denklem 2.51’deki adi diferansiyel denklem ile tanımlandığını biliyoruz.

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = f(t) \quad (2.51)$$

Burada, m kütle, c sönüm katsayısı k ise yay rijitliğidir. x(t) yer değiştirme, f(t) ise dış kuvvettir. Kesin olmayan değerlerle birlikte bu şekildeki bir sistemin dinamik davranışı Denklem 2.52 ile tanımlanabilir.

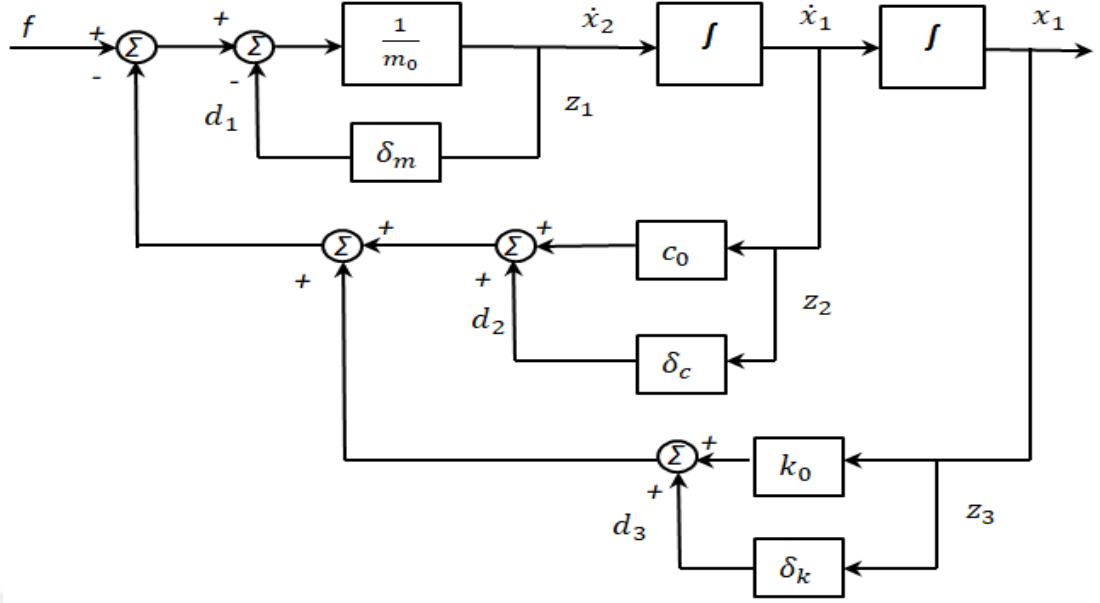
$$(m_0 + \delta_m) \frac{d^2x(t)}{dt^2} + (c_0 + \delta_c) \frac{dx(t)}{dt} + (k_0 + \delta_k)x(t) = f(t) \quad (2.52)$$

Burada m_0 , c_0 ve k_0 nominal parametre değerleridir ve δ_m , δ_c , δ_k ise belirli aralıklardaki muhtemel sapmalardır. Böylece standart durum değişken modeli Denklem 2.53’deki gibi yazılabilir. Blok diyagramı ise Şekil 2.25’deki gibidir.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m_0 + \delta_m} [-(k_0 + \delta_k)x_1 - (c_0 + \delta_c)x_2 + f] \quad (2.53)$$

$$y = x_1$$



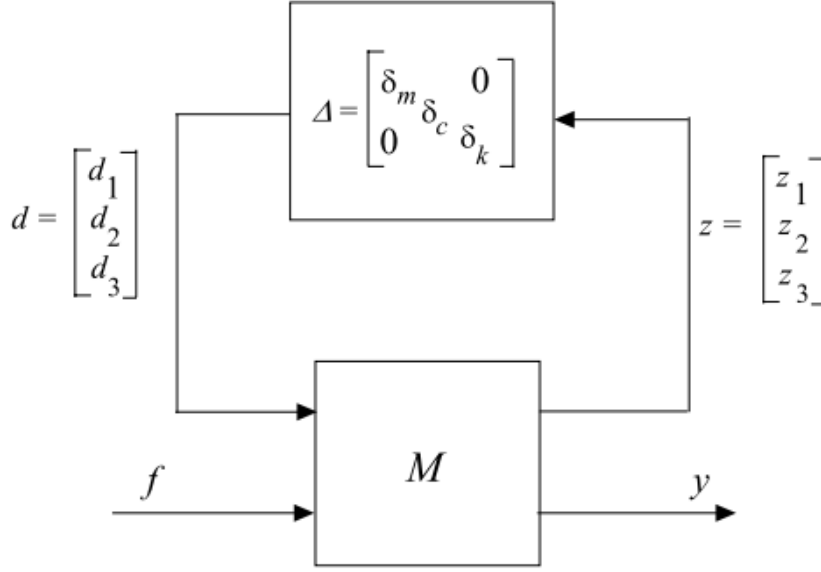
Şekil 2.25. Kütle-yay-sönüm sistemine ait yapılandırılmış belirsizliklerle blok diyagramı.

Burada, z_1, z_2 ve z_3 sırasıyla çıkış vektörü olan \dot{x}_2, x_2, x_1 olsun ve d_1, d_2, d_3 bozucu bloklardan gelen sinyallerdir. Denklem 2.54'te sistemin durum uzay modeli ve Şekil 2.26'da standart görünümü verilmektedir

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-k_0}{m_0} & \frac{-c_0}{m_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_0} \end{bmatrix} f$$

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-k_0}{m_0} & \frac{-c_0}{m_0} \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

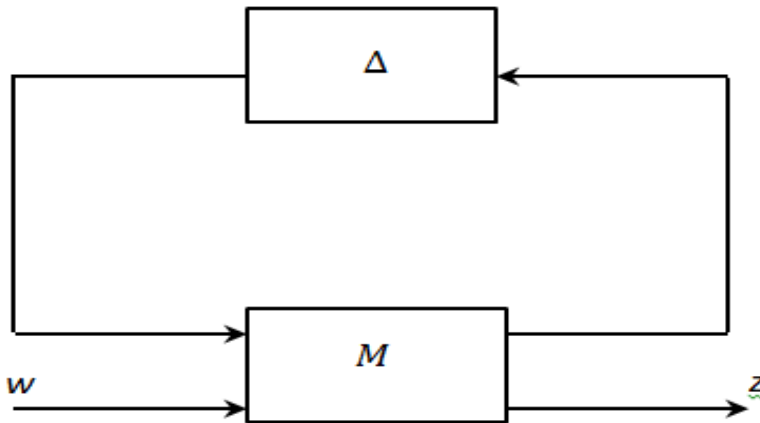


Şekil 2.26. Sistemin standart blok diyagramı

Denklem 2.54'te belirtilen durum uzay modeli Şekil 2.26'nın genişletilmiş ara bağlantı sistemini açıklamaktadır. Şekil 2.26'deki bozucu blok Δ , parametre varyasyonlarına karşılık gelir ve parametrik belirsizlik olarak adlandırılır (Onat vd., 2017).

Doğrusal kesirli dönüşümler:

Şekil 2.12'deki blok diyagram belirsizliğin, kontrol sistemi üzerindeki sistemin giriş/çıkış ilişkisini nasıl etkilediğini göstermek için standart bir referans olarak genelleştirilebilir. Genel blok diyagram Şekil 2.27'de gösterilmektedir.



Şekil 2.27. M- Δ blok diyagramı

Burada M transfer fonksiyon matrisidir ve Denklem 2.55'teki gibi gösterilebilir.

$$= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Burada, M_{11} boyutları Δ 'nın boyutları ile ilintilidir. Eğer $(I - M_{11}\Delta)$ tersinir ise standart prosedürler ile Denklem 2.56 elde edilebilir.

$$F(M, \Delta) = M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1}M_{12} \quad (2.56)$$

$F(M, \Delta)$, Δ ve M 'nin doğrusal kesirli dönüşümü olarak isimlendirilir. M 'nin "üst" çevrimi Δ bloğu tarafından kapatıldığı için, bu tür doğrusal kesirli dönüşümler üst doğrusal kesirli dönüşüm (ULFT) olarak adlandırılır ve $F_u(M, \Delta)$ ile gösterilir.

Performans etkeni:

Şekil 2.28, klasik bir kapalı devre sistem şemasını temsil etmektedir. Burada r , y , u , e , d , n , sırasıyla, referans giriş, çıkış, kontrol sinyali, hata sinyali, bozucu ve ölçüm gürültüsüdür ve birbirileri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$y = (I + GK)^{-1}GKr + (I + GK)^{-1}d - (I + GK)^{-1}GKn \quad (2.57)$$

$$u = K(I + GK)^{-1}r - K(I + GK)^{-1}d - K(I + GK)^{-1}n \quad (2.58)$$

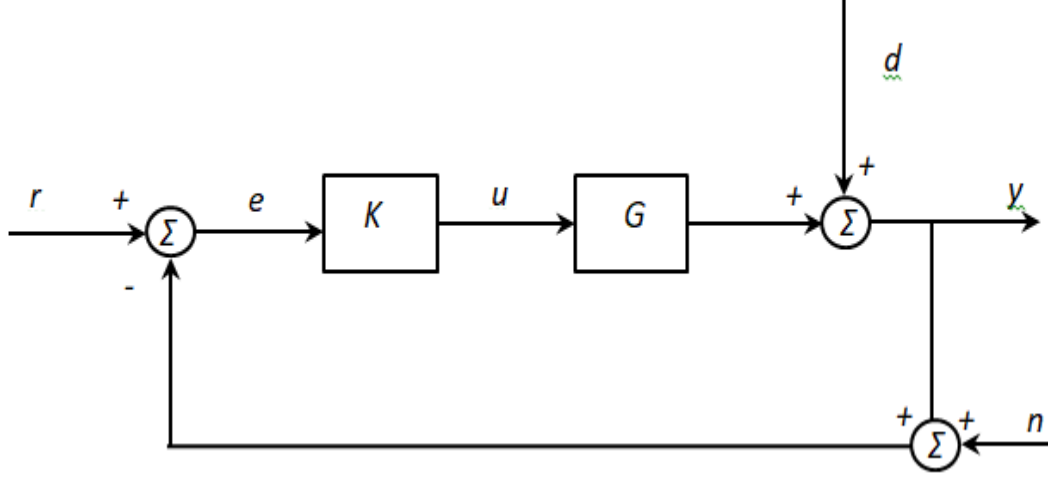
$$e = (I + GK)^{-1}r - (I + GK)^{-1}d - (I + GK)^{-1}n \quad (2.59)$$

r , d , n sinyallerinin enerjilerinin sınırlandırıldığını ve normalize edildiğini varsayalım. Ancak, bu sinyallerin tam olarak ne olduğu bilinmemektedir. İzleme, bozulma zayıflaması ve gürültü reddi gibi normal performans özelliklerinin, enerjisi 1'i geçmeyen herhangi bir r , d veya n için olabildiğince iyi olması gerekir. Sinyal ve sistem normları hakkındaki belirtilenlerden, ilgili transfer fonksiyon matrislerinin ∞ -normunun kazancı minimize edilmesi gerekmektedir. (Gu vd., 2005).

- İyi bir takip için, $\|(I + GK)^{-1}\|_{\infty}$
- İyi bozucu etkisinin sönümü (azaltılması) için, $\|(I + GK)^{-1}\|_{\infty}$
- İyi gürültü reddi için, $\|-(I + GK)^{-1}GK\|_{\infty}$

- Daha az kontrol enerjisi için $\|K(I + GK)^{-1}\|_{\infty}$

$S: -(I + GK)^{-1}$, hassasiyet fonksiyonu ve $T: -(I + GK)^{-1}GK$, tamamlayıcı hassasiyet fonksiyonu olarak belirtilir.



Şekil 2.28. Kapalı döngülü blok diyagram

Hassasiyet fonksiyonunun tepe değere etkisinin olmamasına rağmen, düşük frekanslardaki sahip olduğu küçük kazanç, kontrol başarımı açısından öneme sahiptir. Bu yüzden, doğrudan $\|S\|_{\infty}$ ' un minimize edilmesi yerine; bir ağırlık fonksiyonu olmak üzere $W(s)$ tanımlanır. $W(s)$ tanımlanırken ise düşük frekanslarda büyük kazançlı yüksek frekanslarda küçük kazançlı olması kriteri temel alınır.

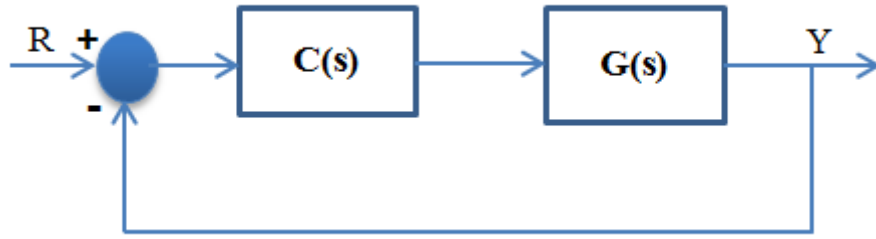
$$\min_{K \text{ stabilising}} \|W(s)S(s)\|_{\infty}$$

2.7.6 Ağırlıklı geometrik merkez yöntemi

Sistemi kararlı kılan kontrol parametreleri bölgesinin ağırlıklı geometrik merkezini hesaplama esasına dayalı olan AGM metodu son zamanlarda, zaman gecikmeli sistemlerin PI kontrolü için önerilen etkili tasarım yöntemlerinden birisidir (Onat, 2013). Bu metot herhangi bir grafiksel veya iteratif yöntem kullanmadan basit sayısal bir kalıp sunar. Onat, birinci mertebeden zaman gecikmeli sistemler için (FOPTD) ağırlıklı geometrik merkezin, yerleşme zamanı, yükselme zamanı ve maksimum aşma yüzde performanslarını uzlaştıran önemli bir nokta olduğunu göstermiştir.

Kontrolcü parametrelerinin hesaplanmasının daha detaylı verilebilmesi için örnek olarak Denklem 2.60'daki ters zamanlı ve zaman gecikmeli bir transfer fonksiyonunu ele alalım (Onat ve Daşkın, 2013). Bu sistemin basit geri beslemeli PI kontrol şeması ise Şekil 2.29'daki gibi olacağı bilinmektedir.

$$G(s) = \frac{0.547(-0.418s+1)e^{-0.1s}}{s(1.06s+1)} \quad (2.60)$$



Şekil 2.29. Basit bir geri beslemeli PI kontrol

Burada $C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$ olmak üzere PI kontrolcüdür.

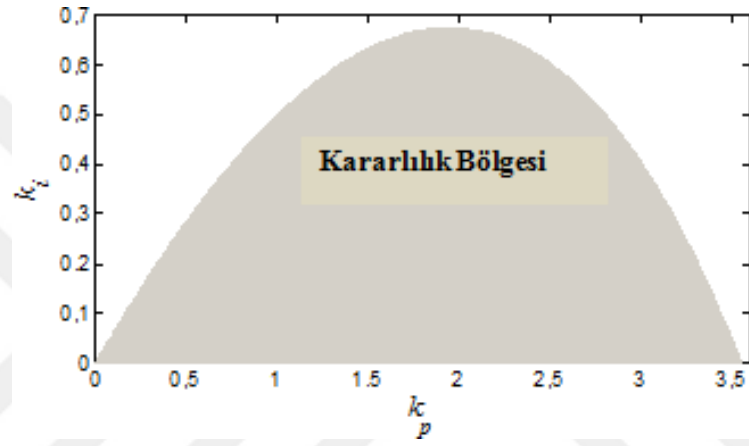
AGM esaslı PI dizayn metodu beş adımdan oluşur. İlk olarak, kapalı çevrim karakteristik denklemi Şekil 2.29'da gösterilen kontrol sisteminin kontrol parametrelerine (k_p ve k_i) uyarlanır. İkinci adımda, kapalı çevrimin karakteristik denkleminde $s = j\omega$ dönüşümü yapılır. Dönüşüm yapılmış denklem (Δ), Denklem 61'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \Delta(j\omega) &= 0.547k_i \cos(0.1\omega) - 0.547k_i \sin(0.1\omega)j \\ &- \omega^2 - 1.06\omega^3j - 0.22k_i\omega \cos(0.1\omega)j \\ &+ 0.547k_p\omega \cos(0.1\omega)j - 0.22k_i\omega \sin(0.1\omega) \\ &- 0.22k_p\omega^2 \sin(0.1\omega)j = 0 \end{aligned} \quad (2.61)$$

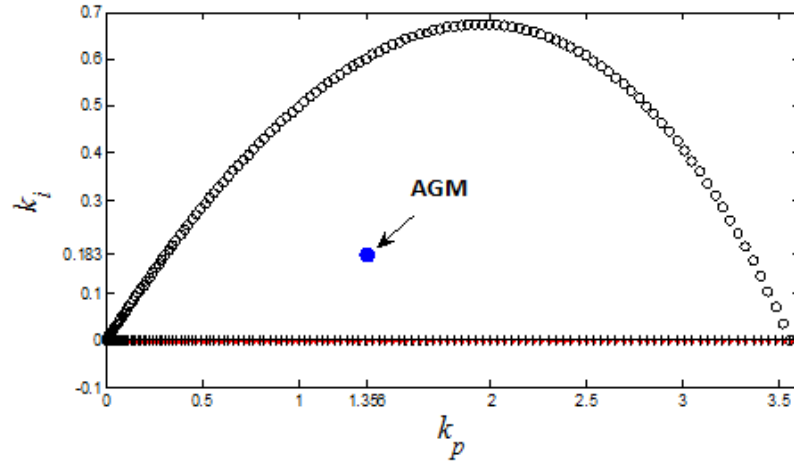
Burada $j = \sqrt{-1}$ 'dir ve " ω " frekansı temsil eder. Üçüncü aşamada, karakteristik denklemde bulunan sanal terimler gerçekte terimlerden ayrıştırılır ve iki denklem olarak ele alınır. Denklem sistemi, Denklem 2.62 kullanılarak şekillendirilir.

$$\begin{bmatrix} 1.06\omega^3 \\ \omega^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.547\omega(0.1\omega) - 0.22\omega^2\sin(0.1\omega) & -0.22\omega \cos(0.1\omega) - 0.547\sin(0.1\omega) \\ 0.22\omega^2 \cos(0.1\omega) + 0.547\omega\sin(0.1\omega) & 0.547 \cos(0.1\omega) - 0.22\sin(0.1\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_p \\ k_i \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

Dördüncü adımda, denklem sistemi frekansa göre çözülür ve daha sonra k_p - k_i düzlemindeki kararlılık bölgesi elde edilir. Kararlı kontrolcü parametreleri bölgesi Şekil 2.30'da gösterilmiştir. Son olarak, ele alınan kontrol sisteminin kararlılık bölgesinin AGM noktası hesaplanır. AGM noktası, Şekil 2.31'de gösterildiği gibi, denge sınır odak noktası kullanılarak hesaplanır. Bu şekilde, her bir (k_p, k_i) nokta, ω 'nın 0 ile 1.3 aralığında 0.01'lik adımlarla değiştirilmesiyle işaretlenmiştir.



Şekil 2.30. Kararlılık bölgesi



Şekil 2.31. Ağırlıklı geometrik merkez

Kararlılık bölgesini çevreleyen geometrik yer, $(k_{p1}, k_{i1}), (k_{p2}, k_{i2}), \dots, (k_{pn}, k_{in})$ ve $(k_{p1}, 0), (k_{p2}, 0), \dots, (k_{pn}, 0)$ olarak adlandırılan koordinatların $2n$ noktalarından oluşur. Dolayısıyla AGM noktasının k_p ve k_i koordinat değerleri, Denklem 2.63 ve 2.64 sırasıyla kullanılarak hesaplanır. Bu örnek için n 130'a eşittir. Böylece Denklem

2.60'da verilen sistem için PI kontrolcü parametreleri, $k_p=1.3556$ ve $k_i=0.1830$ olarak elde edilmiştir.

$$k_p = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n k_{pm} \quad (2.63)$$

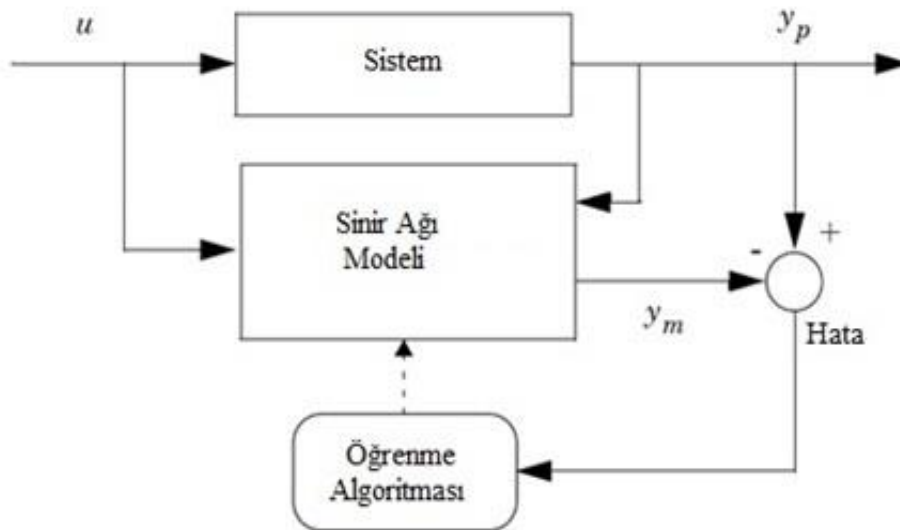
$$k_p = \frac{1}{2n} \sum_{m=1}^n k_{im} \quad (2.64)$$

2.8 YSA' lı Kontrol

2.8.1 Sinir ağı öngörülü kontrol

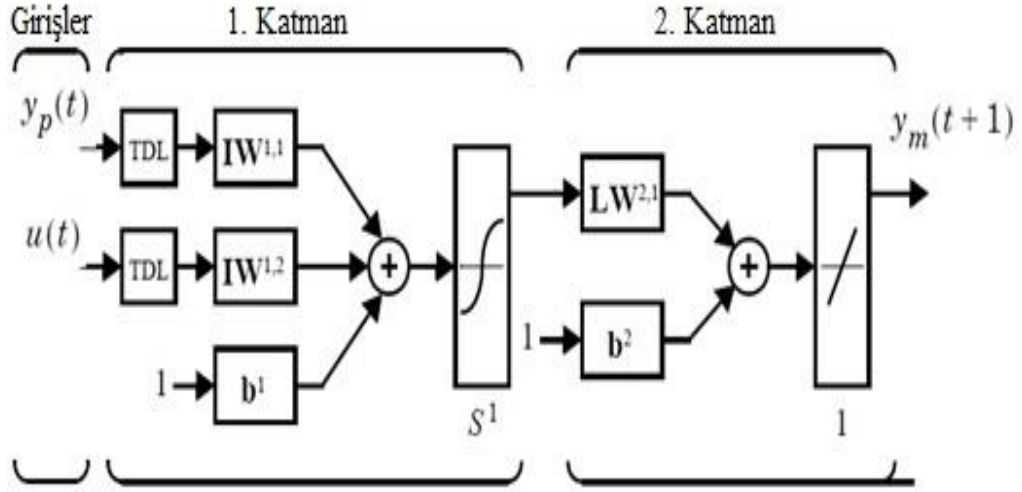
Sinir ağı araç kutusunda uygulanan sinir ağı öngörülü kontrolcü yazılımı, sistemin ilerideki performansını tahmin etmek amacıyla sistemin lineer olmayan bir sinir ağı modelini kullanır. Kontrolcü daha sonra sistem performansını tanımlanmış bir ileriki zaman dilimi için optimize edecek kontrol girişini hesaplar. Model öngörülü kontrolde ilk adım sinir ağı sistem modeline (sistem tanımlaması) karar vermektir. Daha sonra, sistem modeli kontrolcü tarafından ileriki performansını tahmin etmek için kullanılır.

Model Öngörülü kontrolün ilk adımı, sistemin ileri dinamiklerini tanımlamak için sinir ağını eğitmektir. Sistem çıkışı ve sinir ağı arasındaki tahmin hatası, sinir ağı eğitim sinyali olarak kullanılır. Süreç Şekil 2.32 'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.32. Öngörülü kontrolde sistem tanımlaması

Sinir ağı sistem modelinin yapısı ise Şekil 2.33' de gösterilmektedir.



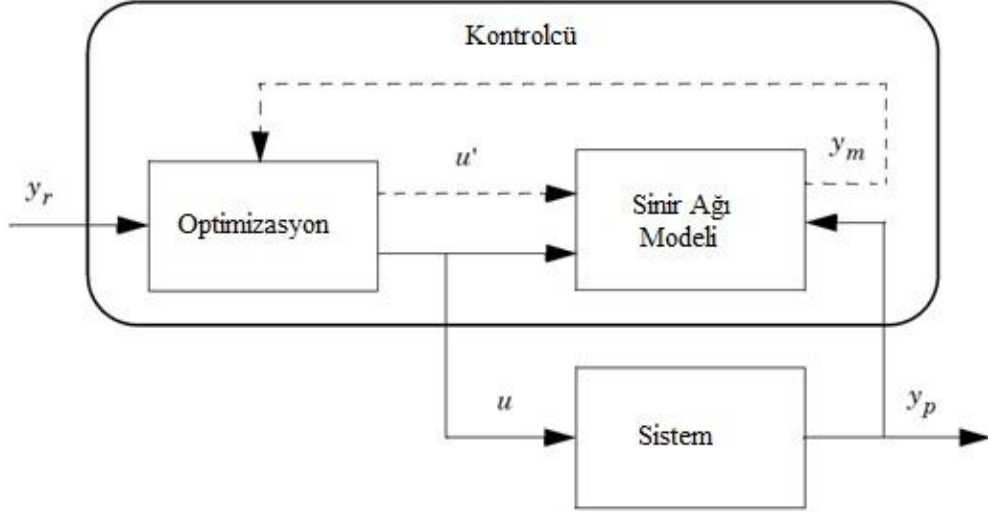
Şekil 2.33. Sinir ağı sistem modeli

Sinir ağı modeli, tanımlanmış bir zaman aralığında sistemin cevabını tahmin eder. Tahminler sayısal bir optimizasyon programı tarafından, tanımlanan zaman aralığı boyunca takip eden performans ölçütünü minimize eden kontrol sinyalini belirlemek için kullanılır. Bu performans ölçütü Denklem 2.65'teki gibi gösterilebilir.

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y_r(t+j) - y_m(t+j))^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} (u'(t+j-1) - u'(t+j-2))^2 \quad (2.65)$$

Burada N_1 , N_2 ve N_u , kontrol kazançlarının ve takip hatalarının değerlendirildiği katmanları tanımlar. u' değişkeni geçici kontrol sinyali, y_r arzu edilen cevap, ve y_m ağ model cevabıdır. ρ değeri, kontrol kazançlarının karelerinin toplamının performans göstergesine olan katkısını belirler.

Şekil 2.34'te verilen blok diyagram, model öngörülü kontrol prosesini göstermektedir. Kontrolcü, sinir ağı sistem modeli ve optimizasyon bloğundan oluşur. Optimizasyon bloğu J 'yi minimize eden u' değerlerini belirler ve daha sonra optimum u sisteme giriş olur.



Şekil 2.34. Öngörülü kontrol prosesi

2.8.2 NARMA-L2 kontrol

Bu kontrol türünün ana fikri, doğrusal olmayan sistem dinamiklerini doğrusal dinamiklere doğrusal olmayan parametreleri çıkararak dönüştürmektir. Eş formdaki sistem modeli tanıtılır ve bu modeli tanımlamak için sinir ağı kullanılır. Daha sonra tanımlanan sinir ağı modeli kontrolcü geliştirmek için kullanılır.

Model öngörülü kontrolde de olduğu gibi, NARMA-L2 kontrolde de ilk adım kontrol edilecek sistemi tanımlamaktır. Sistemin ileri dinamiklerini temsil için bir sinir ağı eğitilir. İlk adım, kullanmak için model yapısı seçmektir. Genel ayrık zamanlı doğrusal olmayan sistemleri temsil için kullanılan standart bir model, nonlinear özbağımlı-hareketli ortalama (NARMA) model Denklem 2.66'da verilmiştir.

$$y(k+d) = N[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)] \quad (2.66)$$

Burada $u(k)$ sistem girişi, $y(k)$ ise sistem çıkışıdır. Tanımlama aşaması için, sinir ağı nonlinear fonksiyon N 'ye yaklaştırmak için eğitilebilir. Bu ise sinir ağı öngörülü kontrol için kullanılan bir tanımlama işlemidir. Eğer sistem çıkışının bir referans döngüyü takip etmesi isteniyor ise $y(k+d) = y_r(k+d)$, bir sonraki adım formun bir lineer olmayan kontrolcüsünü geliştirmektir.

$$u(k) = G[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), y_r(k+d), u(k-1), \dots, u(j-m+1)] \quad (2.67)$$

Bu kontrolcünün kullanımındaki problem şöyledir, eğer bir sinir ağının ortalama karesel hatasını minimize etmek için G fonksiyonu üretmek amacıyla eğitmek istenirse, dinamik geri yayılım ([NaPa91] veya [HaJe99]) ihtiyaç duyacaktır. Bu ise oldukça yavaştır. Bir çözüm olarak Narendra ve Mukhopadhyay tarafından önerilen (NaMu97), sistemi yaklaşık olarak temsil etmek için kullanılabilir. NARMA-L2 kontrolcü yaklaşım modeli Denklem 2.68’ de verilmiştir.

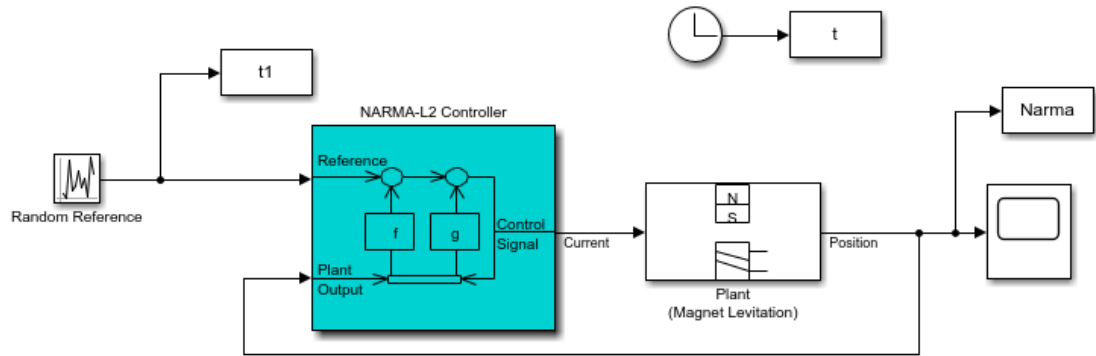
$$\begin{aligned} \ddot{y}(k+d) = & f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \\ & + g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \end{aligned} \quad (2.68)$$

Sistem çıkışının bir referans döngüyü takip etmesi durumunda $y(k+d) = y_r(k+d)$, bu form Denklem 2.69’deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} y(k+d) = & f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)] \\ & + g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]. u(k+1) \end{aligned} \quad (2.69)$$

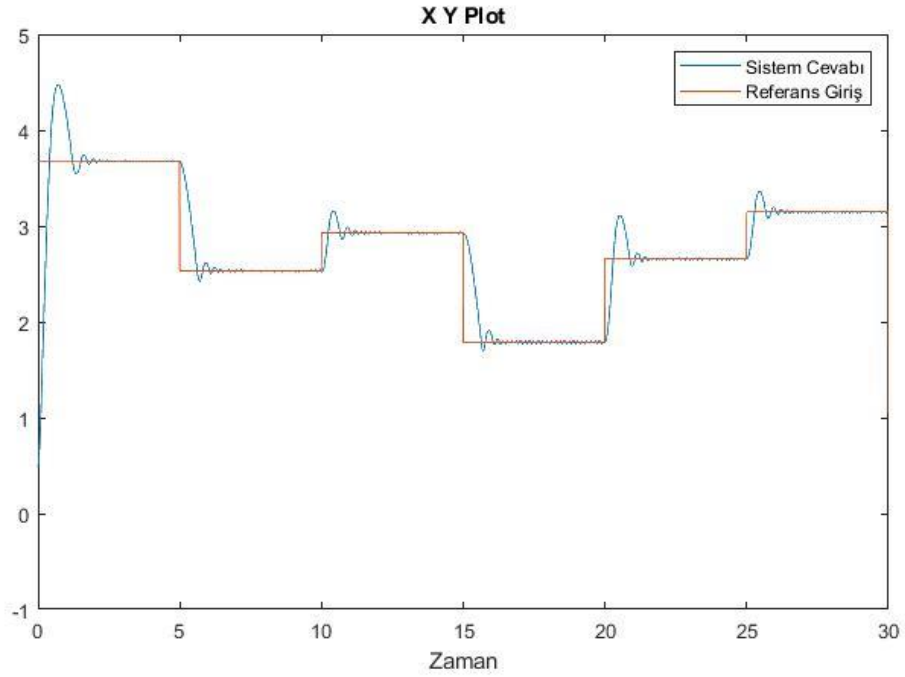
burada $d \geq 2$ ‘dir.

Narma-L2 kontrolcünün örnek uygulamasına ait blok diyagramı Şekil 2.35’te gösterilmektedir.



Şekil 2.35. Narma-L2 örnek uygulaması

Burada MATLAB Simulink ortamında örnek uygulama olarak bulunan bir manyetik levitasyon sisteminin kontrol uygulaması gösterilmektedir. Sistem tanımlaması için 0.01 aralıklandırma ile 10000 veri çekilmiştir. Daha sonra 10 gizli katman ile kontrolcü eğitimi gerçekleştirilmiştir. Narma-L2 kontrol işlemi uygulanan sistemin farklı adım sinyallerine karşın cevabı Şekil 2.36'da gösterilmektedir.



Şekil 2.36. Narma-L2 kontrolcülü sistem cevabı

2.9 Matris yaklaşımı ile çoklu lineer regresyon

Lineer regresyon, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan temel istatistik modellerinden biridir. Bu modelin genişletilmiş bir hali olan çoklu lineer regresyon, bağımlı değişken ve birkaç bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılır. Basit lineer regresyon ise bağımlı değişken y ve bağımsız değişken x arasındaki ilişkiyi regresyon denkleminde dayanarak tanımlar.

$$y_i = \beta_0 + \beta_i x_i + e_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.70)$$

Çoklu lineer regresyon model yaklaşımına göre, bağımlı değişken iki veya daha fazla bağımsız değişken ile ilişkilidir. k değişken için genel model şu formdadır;

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.71)$$

Basit lineer regresyon modeli, verilere en uyumlu düz çizgiyi elde etmek için kullanılır. Öte yandan, çoklu lineer regresyon modeli, örneğin iki bağımsız değişkenle, veriye en uygun düzlemi bulmak için kullanılır. İki den fazla bağımsız değişkeni içeren modeller yapı bakımından daha karmaşıktır, ancak yine de çoklu lineer regresyon teknikleri kullanılarak analiz edilebilir.

Çoklu doğrusal regresyon analizinde Denklem 2.48'deki regresyon katsayılarını tahmin etmek için en küçük kareler yöntemi kullanılır. Regresyon katsayıları, bağımsız değişkenlerdeki değişimin, bağımlı değişkenlerde yaratacağı değişimi göstermektedir. Basit lineer regresyonun aksine, bağımsız değişkenlerin her biri arasındaki etkileşim veya korelasyon derecesi hakkında çıkarımlar yapılmalıdır. Regresyon katsayılarını ($\beta_i, i = 1, 2, \dots, k$) bulmak için kullanılan hesaplamalar, artık kareler toplamı, kareler toplamı regresyonu, vb., oldukça karmaşıktır. Çoklu regresyon modeli hesaplamaları basitleştirmek amacıyla matris gösterimi kullanılarak yazılabilir.

Regresyon analizinde matrislerin kullanımı; hataların, regresyon katsayılarının ve regressör değişkenlerinin seviyelerini vektörel olarak sunduğundan daha kompakt bir yapı sunar (Brown, 2009). Matris yaklaşımli model Denklem 2.72'de verilmiştir.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2.72)$$

Denklem 2 matris notasyonu kullanılarak Denklem 2.73'deki gibi tekrar yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{k+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Dikkat edilirse \mathbf{Y} modelin çıkışlarını içeren $n \times 1$ boyutlu bir vektör, \mathbf{X} regresyon değişkenlerini içeren $n \times (k+1)$ boyutlu bir matris, $\hat{\beta}$ en küçük kareler tahminci vektörü ve ε ise $n \times 1$ boyutlu hataları içeren vektördür.

Matris yaklaşımli çoklu lineer regresyon analizinde ilk adım en küçük kareler tahminci vektörü $\hat{\beta}$ 'nın belirlenmesidir. Denklem 2.74'de verilen bağıntı ile $\hat{\beta}$ tanımlanır (Brown, 2009).

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\beta} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (2.74)$$

Buradan $\hat{\beta}$ Denklem 2.75'teki gibi çekilir.

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (2.75)$$

2.9.1 En küçük kareler yöntemi

Basit bir lineer model, veriler ile hesaplanacak olan β_0 ve β_1 olmak üzere iki parametreye sahiptir. Eğer Y_i 'de rastgele hata bulunmuyorsa parametrelerin değerlerini elde etmek için herhangi iki veri noktası kullanılabilir. Bununla birlikte, Y 'deki rastgele değişkenlik, gözlenen her bir veri noktası çiftinin farklı sonuçlar vermesine neden olur. (Tüm tahminler yalnızca gözlenen veriler tam olarak düz çizgiye düştüğünde aynı olacaktır.) Tüm bilgileri bir ölçüt tarafından "en iyi" olan bir çözüm üretmek için birleştirecek bir yönteme ihtiyaç vardır.

Regresyon analizinde en sık kullanılan yöntemlerden biri en küçük kareler yöntemidir. Regresyon analizinde en küçük kareler yöntemi, hata kareler toplamını en küçük yapmayı amaçlayan yöntemdir. $\hat{\beta}_0$ ve $\hat{\beta}_1$ sırasıyla β_0 ve β_1 parametrelerinin sayısal tahmin parametreleri olsun ve;

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i \quad (2.76)$$

En küçük kareler yöntemi burada $\hat{\beta}_0$ ve $\hat{\beta}_1$ ' i hataların kare değerlerinin toplamını minimize edecek şekilde seçer.

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n e_i^2 \end{aligned} \quad (2.77)$$

Denklem 2.77'de verilen $e_i = (Y_i - \hat{Y}_i)$, i' ninci gözlem için elde edilen hata değeridir. Toplam işlemi ile de 1'den n'e kadar olan işlem değerlerin toplamı ifade edilmektedir.

En küçük kareler yöntemi $\hat{\beta}_0$ ve $\hat{\beta}_1$ katsayılarını Denklem 2.78'deki gibi belirler.

$$\min \sum_{i=1}^n e_i^2 = \min \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2.78)$$

Regresyon katsayılarının en küçük karelerini hesaplamak için Denklem 2.79'daki eşitlikte $\hat{\beta}_0$ ve $\hat{\beta}_1$ 'a göre kısmi türevler alınıp sıfıra eşitlenir. Ve böylece Denklem 2.80 ve 2.81'deki normal eşitlikleri elde edilir.

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i))^2 = L \quad (2.79)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i = \hat{\beta}_0 n + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.80)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i = \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n X_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (2.81)$$

Buradan $\hat{\beta}_0$ ve $\hat{\beta}_1$ Denklem 2.82 ve 2.83'deki gibi hesaplanır(Rawlings vd., 2001).

$$\hat{\beta}_1 = \frac{n(\sum_{i=1}^n X_i Y_i) - (\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n(\sum_{i=1}^n X_i^2) - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.82)$$

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_i}{n} = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X} \quad (2.83)$$

2.10 Kharitonov Teoremi

Kontrol sistemlerinin analiz ve tasarımı yapılırken belirsizliğin hesaba katılmasının sistemin robustluğu açısından arzettiği önemden önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Kontrol sistemlerinde parametre belirsizliği söz konusu ise burada Kharitonov teoreminden bahsedilebilir. Kharitonov teoremi, belirsizlik yapısı içeren bir interval polinomun kararlılığının kümedeki dört Kharitonov polinomun kararlılığının test edilmesiyle elde edilebileceğini ifade etmektedir.

Belirsizlik yapısının olduğu bir polinom Denklem 2.84'teki gibi tanımlanmış olsun.

$$p(s, q) = p_0 + p_1 s + p_2 s^2 + p_3 s^3 + p_4 s^4 + \dots + p_n s^n \quad (2.84)$$

Burada, ($p_n \neq 0$) ve $q = [p_0, p_1, \dots, p_n]$ belirsiz parametreler, ayrıca $Q = \{q: p_i \in [\underline{p}_i, \bar{p}_i], i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ ise belirsizlik kümesidir. Burada i pertürbasyonuna ait alt ve üst limitler ise sırasıyla \underline{p}_i ve \bar{p}_i 'dir. Böylece Denklem 2.84'te verilen polinomun Kharitonov polinomları Denklem 2.85 ile 2.88 arasındaki gibi elde edilebilir (Tan ve Özyetkin, 2007).

$$k_1(s) = \underline{p}_0 + \underline{p}_1 s + \bar{p}_2 s^2 + \bar{p}_3 s^3 + \underline{p}_4 s^4 + \dots \quad (2.85)$$

$$k_2(s) = \underline{p}_0 + \bar{p}_1 s + \bar{p}_2 s^2 + \underline{p}_3 s^3 + \underline{p}_4 s^4 + \dots \quad (2.86)$$

$$k_3(s) = \bar{p}_0 + \underline{p}_1 s + \underline{p}_2 s^2 + \bar{p}_3 s^3 + \bar{p}_4 s^4 + \dots \quad (2.87)$$

$$k_4(s) = \bar{p}_0 + \bar{p}_1 s + \underline{p}_2 s^2 + \underline{p}_3 s^3 + \bar{p}_4 s^4 + \dots \quad (2.88)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

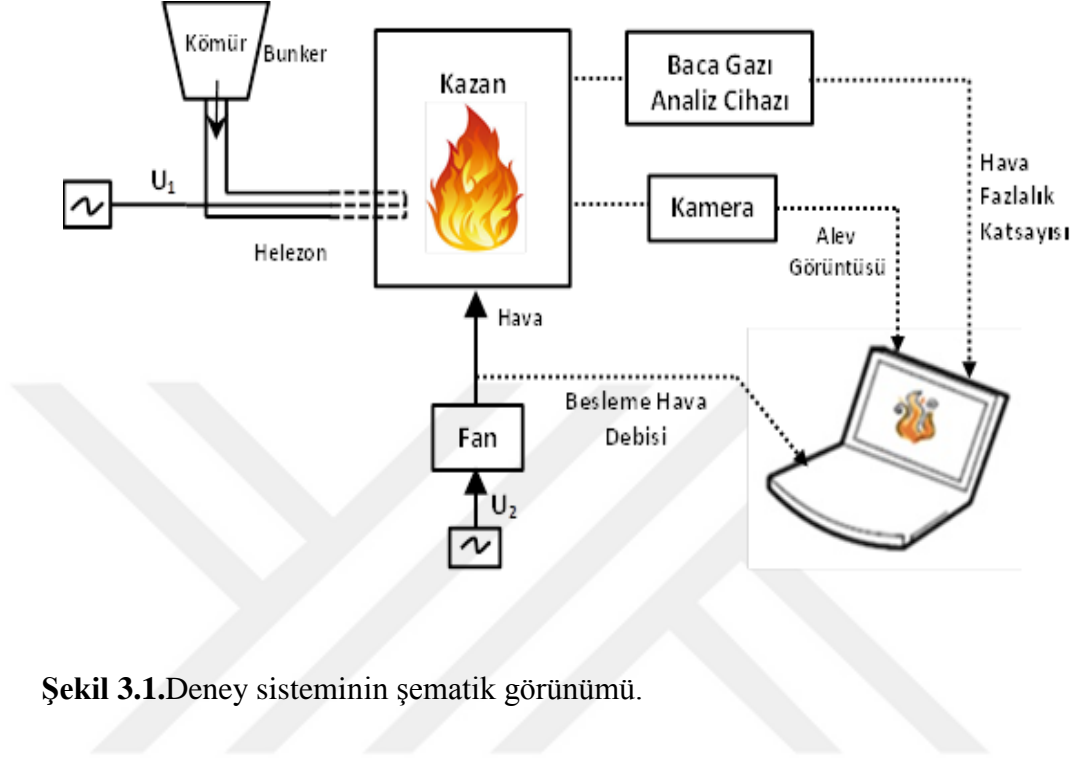
Bu tez çalışması üç ana temele dayanmaktadır. Bunlardan birincisi kömür yakıcılarında yanma verimi ile direkt olarak ilişkilendirilen hava fazlalık katsayısının alev görüntülerinden ve emisyon değerlerinden farklı özelliklerle tahminidir. Hava fazlalık katsayısı, yanma verimini en iyi şekilde ortaya koyabildiği gibi yanma verimine karşılık bir referans değer sunması kapalı çevrim kontrol sistemi teşkili için de çok önemli bir araç sunmaktadır. İkinci kısım ise, yakıcının geniş bir hava fazlalık katsayısı aralığında uzun süre yakılması sonucu kayıt altına alınan hava besleme değerleri ve hava fazlalık katsayısının ilişkilendirilerek yakıcıya ait yüksek doğruluklu transfer fonksiyonu elde etme işlemidir. Üçüncü kısımda ise, elde edilen ilgili transfer fonksiyonuna, tahmin algoritmasıyla elde edilen hava fazlalık katsayısı değerleri bozucu giriş olarak dayatılarak sanal gerçeklik sağlanan sisteme ve üç farklı aileden (klasik, modern ve YSA) uygulanan kontrol işlemleri oluşturmaktadır.

Yapılan tez çalışmasında; TÜBİTAK desteği ile bir yakıcı sistemi alınmış olup sistemin yanma odasını iki adet kamera ile olmak üzere sensörler yerleştirilerek gözlemler gerçekleştirilmiştir. Alev görüntülerinden elde edilen görsel bilgi ile hava fazlalık katsayısı λ arasındaki ilişki araştırılmıştır. Elde edilen kapalı çevrim sisteme simülatif olarak kontrolcü tasarım işlemleri gerçekleştirilmiştir.

3.1 Deney Düzenegi

Çalışmada, optik sistem görüş açısı alanı (field of view-FOV), yakıcı içindeki yanmayı görüntüleyecek biçimde Şekil 3.1'de şematik görünümü verilen deney düzenegi kurulmuştur. Şekil 3.2'de deney sisteminin genel görünüşünü yansıtan fotoğrafı verilmektedir. Deney düzeneginde, bunkerdeki findık kömür, bir elekten geçirilerek helezona gelmektedir. Helezon aracılığıyla da findık kömür, yanma odasına sevk edilmektedir. Yanma için gerekli taze hava, haberleşme süreci bir veri toplama kartı (data acquisition card) ile sağlanarak devir sayısı değiştirilebilen bir fan aracılığıyla sağlanmaktadır. Ayrıca, gözetleme penceresine yerleştirilmiş kamera aracılığıyla yanma odası görüntülenmektedir. Sistemde kullanılan CCD yüksek hızlı kamera, sistemin ana parçasını oluşturmaktadır. Kamera, temel olarak optik lens grubu, CCD algılayıcı, elektronik görüntü birleştiriciyi barındırdığından kontrol ünitesi veya bilgisayara bağlı bir kablo yardımıyla anlık 2D görüntüleri direkt

aktarabilmektedir. Söz konusu kamera, 2590 x 1942 çözünürlüğe sahiptir ve 14 çerçeve/ sn (frame/s) hızındadır.

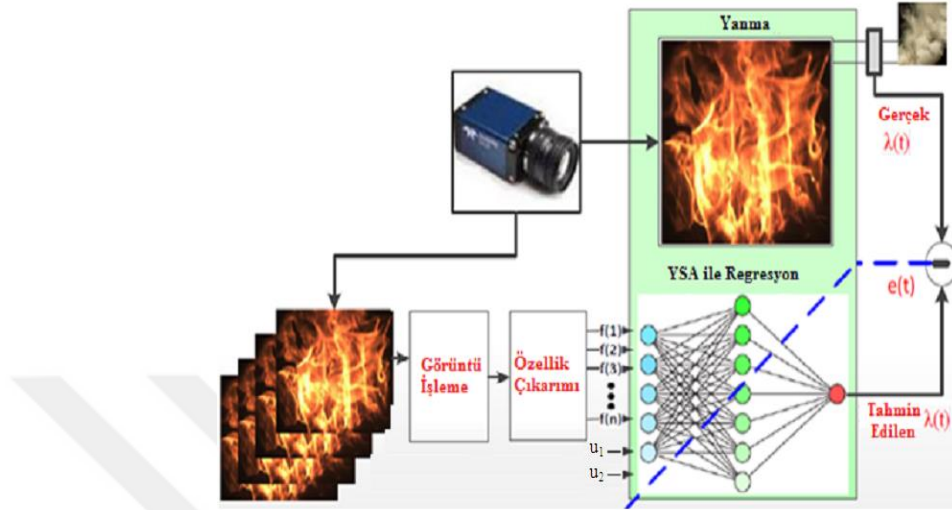


Şekil 3.1. Deney sisteminin şematik görünümü.



Şekil 3.2. Deney sisteminin genel görünüşü.

Elde edilen yüksek doğruluklu YSA modeli ile birlikte sistem Şekil 3.3'deki görünümü almaktadır.



Şekil 3.3. Yakıcının yapay sinir ağı genel modeli.

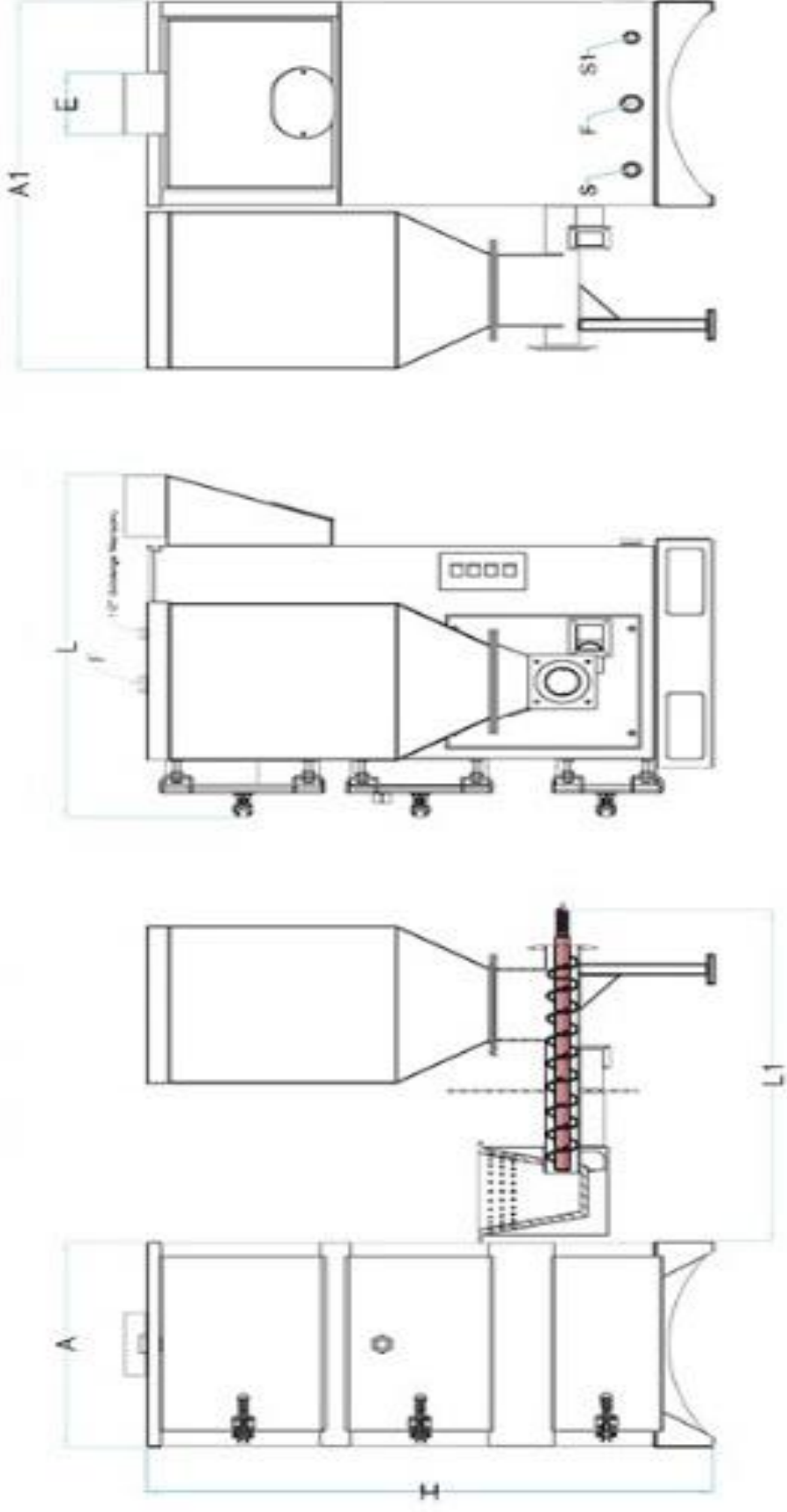
3.1.1 Yakıcı sistemi

Deneylerde kullanılan yakıcı sistemi, Malatya ilinde üretim yapmakta olan bir şirketten TÜBİTAK desteği ile tedarik edilmiş olup yakıcıya ait resimler Şekil 3.4 , Şekil 3.7 arasında verilmiştir. yakıcı kapasitesi 85000 Kcal/h'dir. Yakıcıya olan kömür beslemesi ise bunker kısmına doldurulan kömürün bir motor ve helezonlar aracılığı ile yakıcının ocak kısmına iletimi ile gerçekleşmektedir. Kömürün yanma dinamiğinin daha iyi gözlemlenebilmesi amacıyla deney süresince iki tip helezon kullanılmıştır. Bunlardan birincisi yükleme-bekleme şeklinde çalışan ve bu sürelerin kullanıcı tarafından belirlendiği standart helezon tipidir. İkinci tip helezon ise invertör ile kontrolü sağlanarak istenen miktarda sürekli yüklemeye imkan sağlayan tiptir. Sürekli yükleme sürecinde fabrikanın yükleme-bekleme süreci göz önünde bulundurularak sabit kömür miktarı belirlenmiştir.



Şekil 3.4. Yakıcı sistemi (Anonim, 2019g).

Yakıcı sistemine ait farklı görünüşteki teknik çizimler Şekil 3.5' te ve teknik değerler ise Çizelge 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3.5. Yakıcı sistemine ait teknik çizimler

Çizelge 3.1. Yakıcı sistemine ait teknik özellikler

Model		KM25	
Kapasite		kcal/h	25.000
		kW	29
Genişlik	A	mm	560
Genişlik	A1	mm	1004
Yükseklik	H	mm	1222
Uzunluk	L	mm	808
Bunker Çıkma Mesafesi	L1	mm	904
Baca Çapı	E	mm	125
Sıcaksu Gidiş/Dönüş	F	inch	1"
Emniyet Gidiş/Dönüş	S	inch	3/4"
Doldurma/Boşaltma	S1	inch	1/2"
Gösterme Manşonu	S2	inch	1/2"
Su Hacmi		Lt.	47
Susuz Ağırlık		kg	180
Bunker Kapasitesi		Lt.	120
Fan Modeli			120/60
Fan Debisi		m ³	275
Fan Motor Gücü		watt	84
Çalışma Gerilimi(monofaze)		V	220
Sirkülasyon Pompa Modeli		Wilo	4 1/6
Pompa Çalışma Gerilimi(monofaze)		V	220
Pompa Gücü		watt	45
Pompa Bağlantı Çapı		inch	1"
Redüktör Gücü		kW	0.37
Fan ve Redüktör Çalışma Gerilimi (monofaze)		V	220
İşletme Basıncı		bar	2

Yakıcıya ait bunker ve helezon sistemi ise Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.6. (a) Helezon (b) Helezonun Bağlantısı

Şekil 3.6 (b)'de 1 ile işaretlenen kısımda ise motor ile helezon arasına bağlanan redüktör gösterilmektedir. Burada redüktörün görevi motorun dönüş eksenini değiştirmek ve tork-devir ayarı gerçekleştirerek helezonda sıkışmaları engellerken istenen miktarda yüklemeyi sağlamaktır.



Şekil 3.7. (a)Bunker (b) Bunkere kömür yüklenmesi

Bunkerin kapak kısmında bulunan elek ile helezonda sıkışmaya sebebiyet vermemesi için boyutları belirli aralıkların üzerinde olan kömür parçalarının tutulması sağlanmaktadır.

3.1.2 Baca gazı analiz cihazı

Deney süresince baca gazı analiz edilerek saniyede bir değer alınmıştır. İlgili deneyler TESTO marka baca gazı analiz cihazıyla yapılmış olup Şekil 3.8’ de genel görünümü verilmiştir. Cihazın PC ile bağlantısı kurulmuş olup, CO, NO, NO_x, SO₂ ve λ (hava fazlalık katsayısı) gibi verileri bir saniyelik örnekleme zamanı ile ortamda kayıt altına alınmıştır. Baca gazı analiz cihazına ait ölçüm probu Şekil 3.9’da gösterildiği gibi yakıcı baca çıkışına yaklaşık 1 m uzaklıkta ve daha sağlıklı ölçümler alabilmek amacıyla baca çapının 2/3 derinliğine kadar daldırılmıştır.

Baca gazı analiz cihazının bazı emisyon, hava fazlalık katsayısı ve verim hesaplamaları ise Ek-1’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Baca gazı analiz cihazı



Şekil 3.9. Baca gazı analiz cihazının probunun konumu

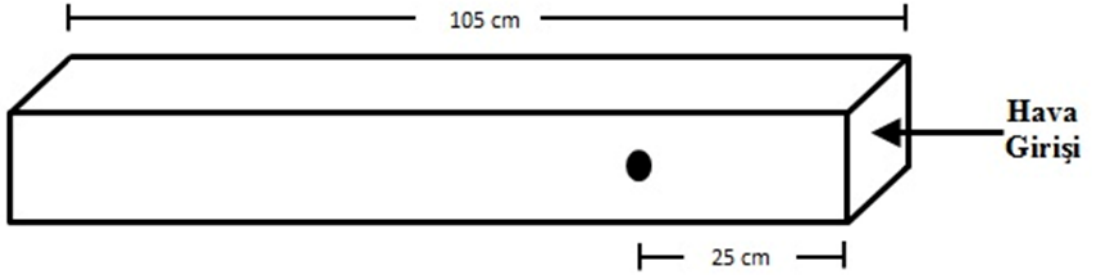
3.1.3 Anemometre

Yakıcı besleme hava ölçümlerinin Şekil 3.10 da gösterilen anemometre cihazı ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Havanın sürekli rejime girmesi amacıyla besleme fanı 1 m geri çekilmiştir ve hız ölçümleri fandan yaklaşık 25 cm uzaklıkta bulunan 1.5 cm çapa sahip bir noktadan gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin bu noktadan alınmasının sebebi ise, yakıcıda kömür yükleme sürecinde akış dalgalanmalarının meydana gelmesi ve bu dalgalanmaların ölçümü olumsuz yönde etkilemesidir. Hava akışının olduğu kanal $10 \times 10 \text{ cm}^2$ boyutlarında kare kesitine sahiptir. İlgili kesit ve ölçüm noktası Şekil 3.11’de verilmiştir.

Yapılan bu çalışmalara rağmen hava debisinin belirli seviyelerin üzerinde seyrettiği ve özellikle de kömür yüklemesi yapıldığı zamanlardaki hava dalgalanmaları sağlıklı veri alınmasını engellemiştir.

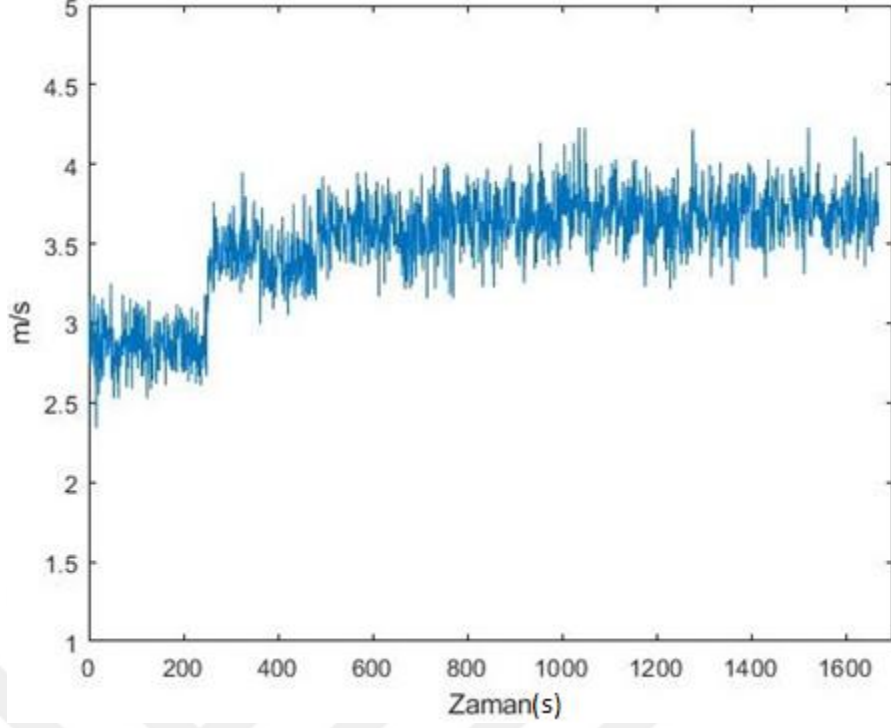


Şekil 3.10. (a) Çok fonksiyonlu ölçüm cihazı (b) Sıcak tel anemometresi



Şekil 3.11. Hava kanalının şematik olarak gösterimi

Şekil 3.12’de gösterildiği üzere fan kapasitesi belirli aralıklarla %40’tan %100’e çıkarılmakla beraber sağlıklı ölçümler elde edilememiştir. Belirli bir aralıkta artış gösteren havaya ait hız bilgileri daha sonra sabit kalmıştır. Bu sebeple yeni bir sistem tasarlanarak fan hızına anlık olarak bilgisayar üzerinden müdahale edilebilirken aynı zamanda kayıt altına alabilecek bir sistem tasarlanarak deneylere bu şekilde devam edilmiştir. Ayrıca debi ölçüm verilerindeki yüksek frekans dinamikleri, söz konusu verinin tasarlanabilecek kapalı çevrim kontrol sistemlerinde direkt veya dolaylı yoldan kullanımı için de ciddi bir handikap oluşturmaktadır.

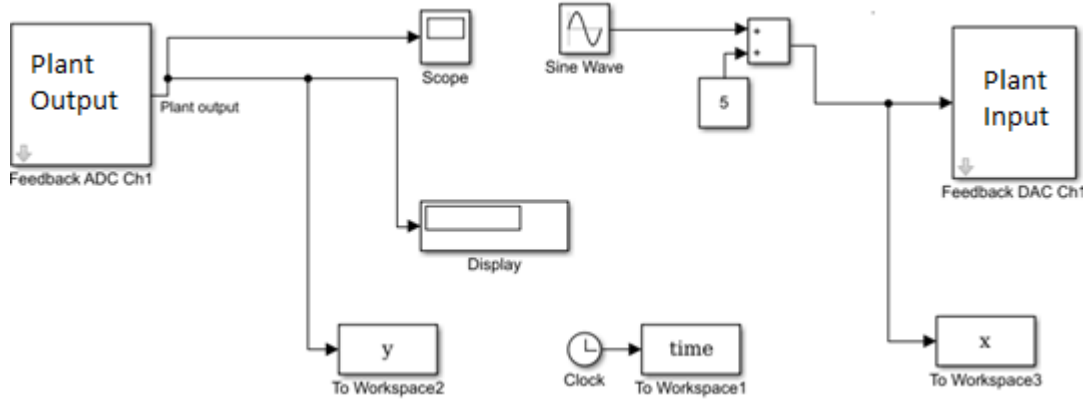


Şekil 3.12. Anemometre ile ölçülen hava hız bilgisi

3.1.4 Hava besleme ünitesi tasarımı

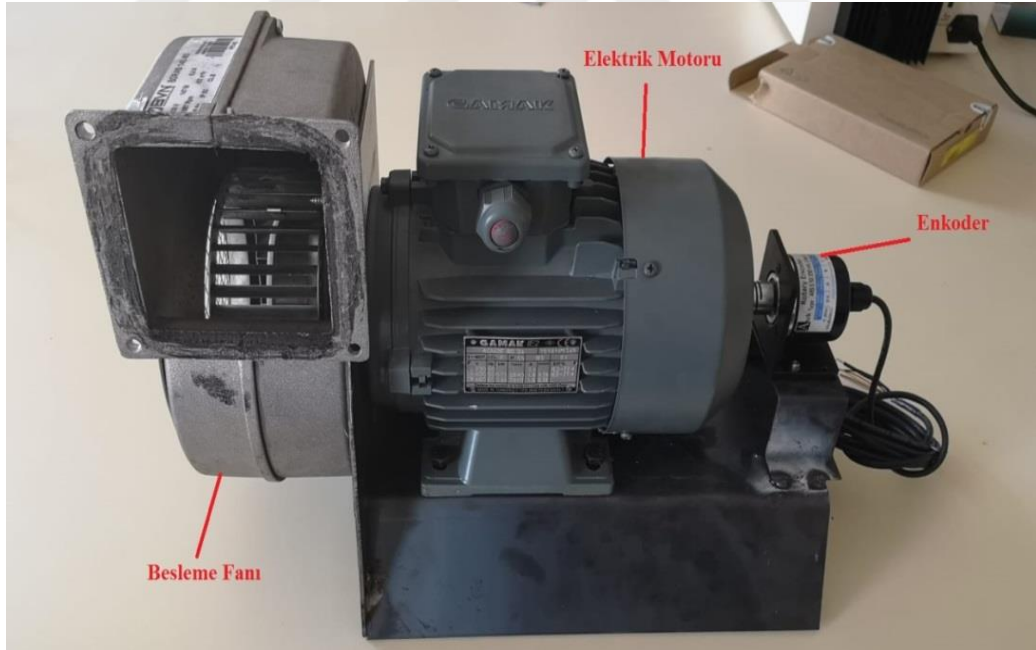
Hava besleme ünitesinin tasarlanması sırasında üzerinde durulan önemli hususlar; yakıcıya yeterli hava girdisi sağlamak ve aynı zamanda fan devir değerlerini ise kayıt altına almaktır. Bu amaçla bir adet elektrik motoru, enkoder, fan ve invertörden oluşturulan hava besleme ünitesi tasarlanmıştır. Tasarlanan hava besleme ünitesinin daha sonra bir elektrik devresi ve veri toplama kartı aracılığı ile bilgisayar bağlantısı sağlanmıştır. Böylece hava besleme fanının devrine anlık olarak MATLAB Simulink ortamında müdahale edilebilmiş ve bu değerler kayıt altına alınabilmiştir.

Sistemin tasarlanmasında araştırmacıları güdüleyen en önemli neden besleme hava debi değerinin en doğru şekilde elde edilmesi ihtiyacı olmuştur. Daha önce tasarlanan kanal ile birlikte hava akışının sürekli rejime gelmesi bir nebze de olsa sağlanmıştır. Ancak kömür yüklemesi sırasında kanalın diğer ucunda oluşan basınç değişimleri nedeniyle anemometre ile doğru ölçümler gerçekleştirilememiştir. Bu sebeple MATLAB Simulink ortamında oluşturulan ve Şekil 3.13’de verilen blok diyagram ile fan motoru arasında etkileşim sağlanmış ve motor devir bilgileri anlık olarak kontrol edilebilirken bu bilgilerin kayıt altına alınması sağlanmıştır.



Şekil 3.13. Fan sisteminin matlab simulink ortamında blok diyagramı

Sistemi oluşturan ana elemanlar; 3000d/dk lık trifaze asenkron elektrik motoru, ayarlanabilir frekans dönüştürücüsü, enkoder, analog-dijital dönüştürücü, devre tahtası ve veri toplama kartı olarak sıralanabilir. Motora Şekil 3.14’teki gibi direkt bağlı olan enkoder motordan devir bilgisini almaktadır ve enkoderin bir diğer bağlantısı ise devre kartı iledir bu sayede motorun devir bilgisi bilgisayara çekilebilmektedir.



Şekil 3.14. Motor-Enkoder-Fan bağlantısı

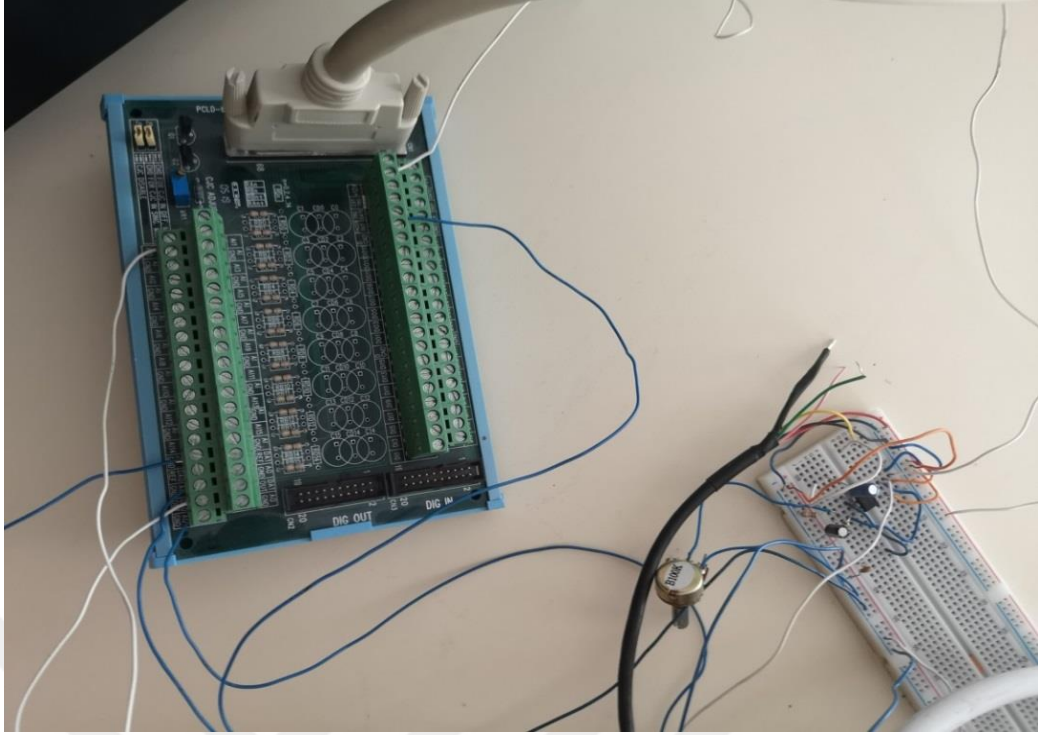
Şekil 3.14’te de açıkça görüldüğü üzere motorun birinci çıkış mili üzerine hava besleme fanı yerleştirilmiştir. Diğer çıkış miline ise gerekli düzenekler yardımı ile enkoder yerleştirilmiştir. Şekil 3.15’teki gibi kablolar ile motorla ve dijital-analog dönüştürücüye bağlantısı yapılan ayarlanabilir frekans dönüştürücüsü ise motorun

PC'den gelen komut ile devir ayarını yapmaktadır. 3000 d/dk'lık motorun devir kontrol işlemi ise gerekli devreler yardımı ile 0-10 volt arasında gerçekleştirilmektedir. Daha sonraki çalışmalarda daha hassas değişimler için bu 0-10 volt aralığı maksimum değeri 10 volta karşılık gelen 0-255 aralığına bölümlenmiştir.



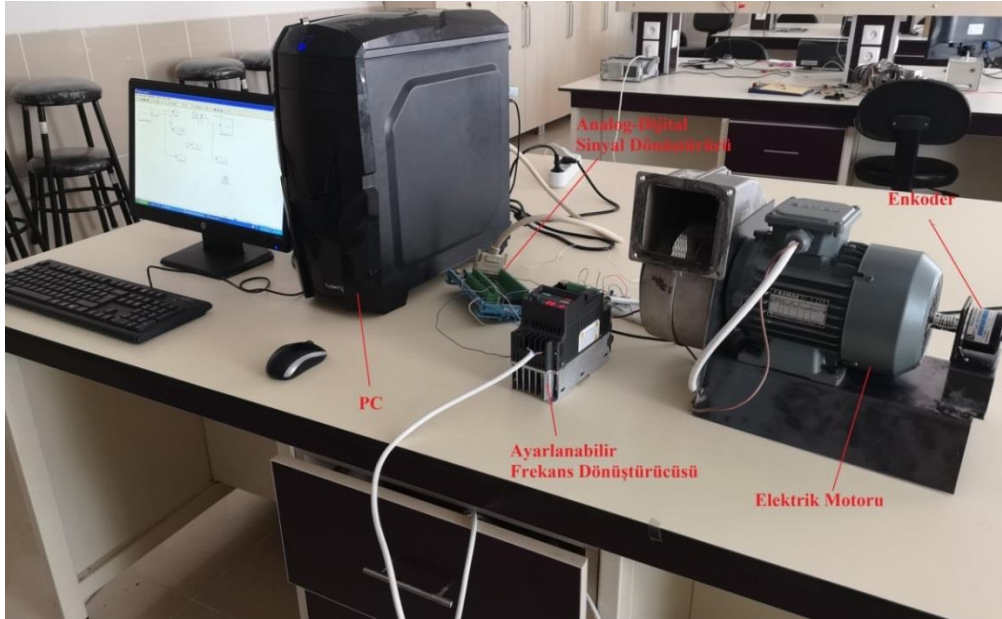
Şekil 3.15. Ayarlanabilir frekans dönüştürücüsü

Analog-dijital dönüştürücü sayesinde ise PC'den gelen analog sinyallerin dijitale çevrilerek motora iletilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16'da ise dijital-analog dönüştürücüsünün ve elektrik devresinin bağlantı düzeneği gösterilmektedir.



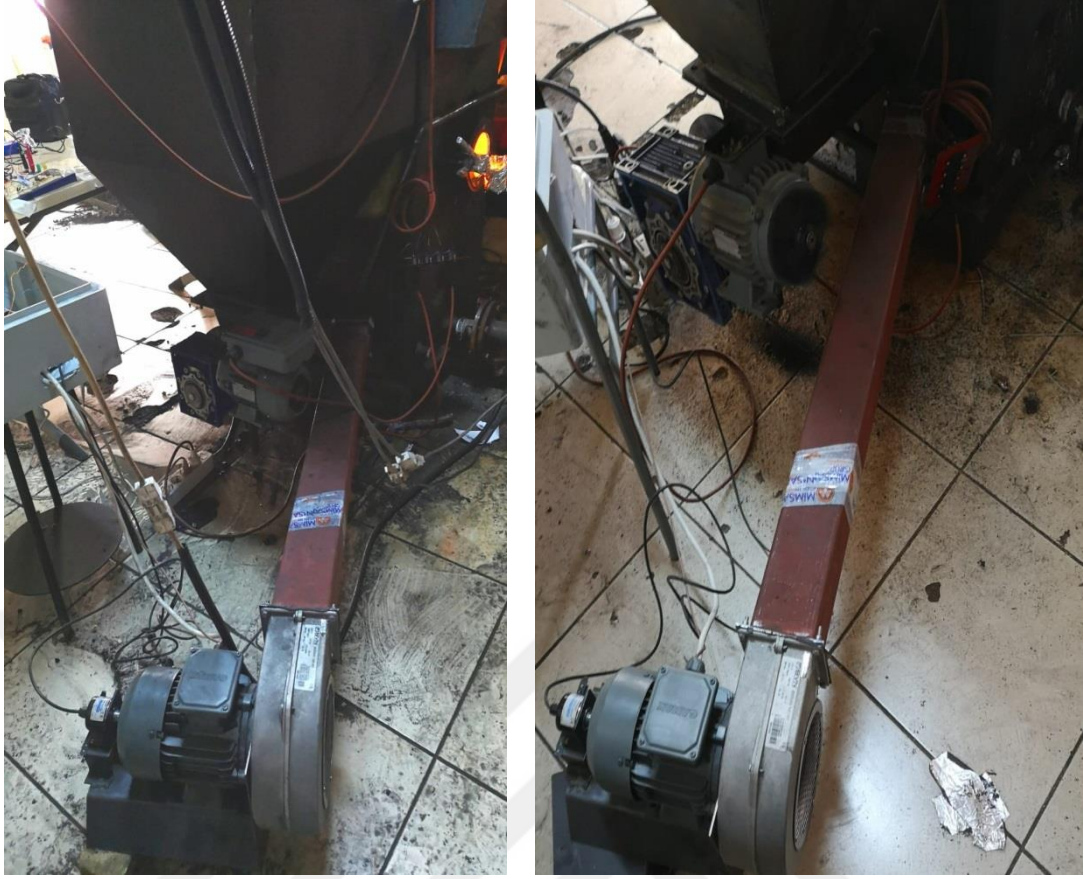
Şekil 3.16. Dijital-Analog dönüştürücüsünün ve elektrik devresinin bağlantı düzeneği

Bu şekilde MATLAB Simulink ortamında oluşturulan sinyaller direk olarak motora iletilmekte ve motor çıkış sinyali ise yine aynı ortamda anlık olarak kayıt altına alınabilmektedir. Şekil 3.17’de ise fan sistemin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 3.17. Fan sisteminin genel görünüşü

Fan sisteminin yakıcıya bağlantısı ise Şekil 3.18’deki gibidir.



Şekil 3.18. Fan sisteminin yakıcı ile bağlantısı

3.1.5 Kameraların yerleştirilmesi

Yakıcının üretim sırasında arka ve yan tarafında olmak üzere kameralar ile gözlenmesine imkan sağlayacak 10 cm çapında iki adet delik açılarak bu gözetleme deliklerine cam yerleştirilmiştir. Daha sonra yakıcının içerisinde gerçekleşen yanma prosesini tam anlamıyla gözlemleyecek şekilde kameralar yerleştirilmiştir. Yanma esnasında açığa çıkan yüksek ısının kameraları olumsuz yönde etkilememesi için iki adet fan yardımı ile bölgedeki ısı uzaklaştırılmıştır. Şekil 3.19’da kamera düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Kameralar ve soğutma düzenekleri

3.2 MATLAB Programı

MATLAB matematiksel ve mühendislik hesaplamalarını yapmak için kullanılan matris tabanlı bir sistemdir. MATLAB'ı teknik hesaplama dili olarak düşünebiliriz. MATLAB' da işlenen tüm değişkenler matrislerdir. Diğer bir deyişle, MATLAB yalnızca bir veri türüne sahiptir: sayıların matrisi veya dikdörtgen dizisi. Grafik çıktılar elde etmek için kapsamlı bir dizi rutine sahiptir. MATLAB, çeşitli araç kutuları ile kullanılır (bir araç kutusu, m-dosyaları adı verilen özel dosyaların bir koleksiyonudur). Kontrol sistemleri analizi ve tasarımı için kontrol sistemi araç kutusu ile birlikte kullanılır (Katsuhiko, 2008).

3.2.1 Matlab Simulink

Simulink, çok alanlı simülasyon ve model tabanlı tasarım için bir blok diyagram ortamıdır. Sistem düzeyinde tasarım, simülasyon, otomatik kod üretme ve gömülü sistemlerin sürekli test ve doğrulamasını destekler. Simulink, grafiksel bir düzenleyici, özelleştirilebilir blok kütüphaneleri ve dinamik sistemleri modellemek

ve simüle etmek için çözümler sunar. MATLAB algoritmalarını modellere dahil etmemizi ve simülasyon sonuçlarını daha ileri analiz için dışa aktarmayı sağlayan MATLAB ile entegredir. Bu araç kutusunun genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir. [The MathWorks. (2017)]

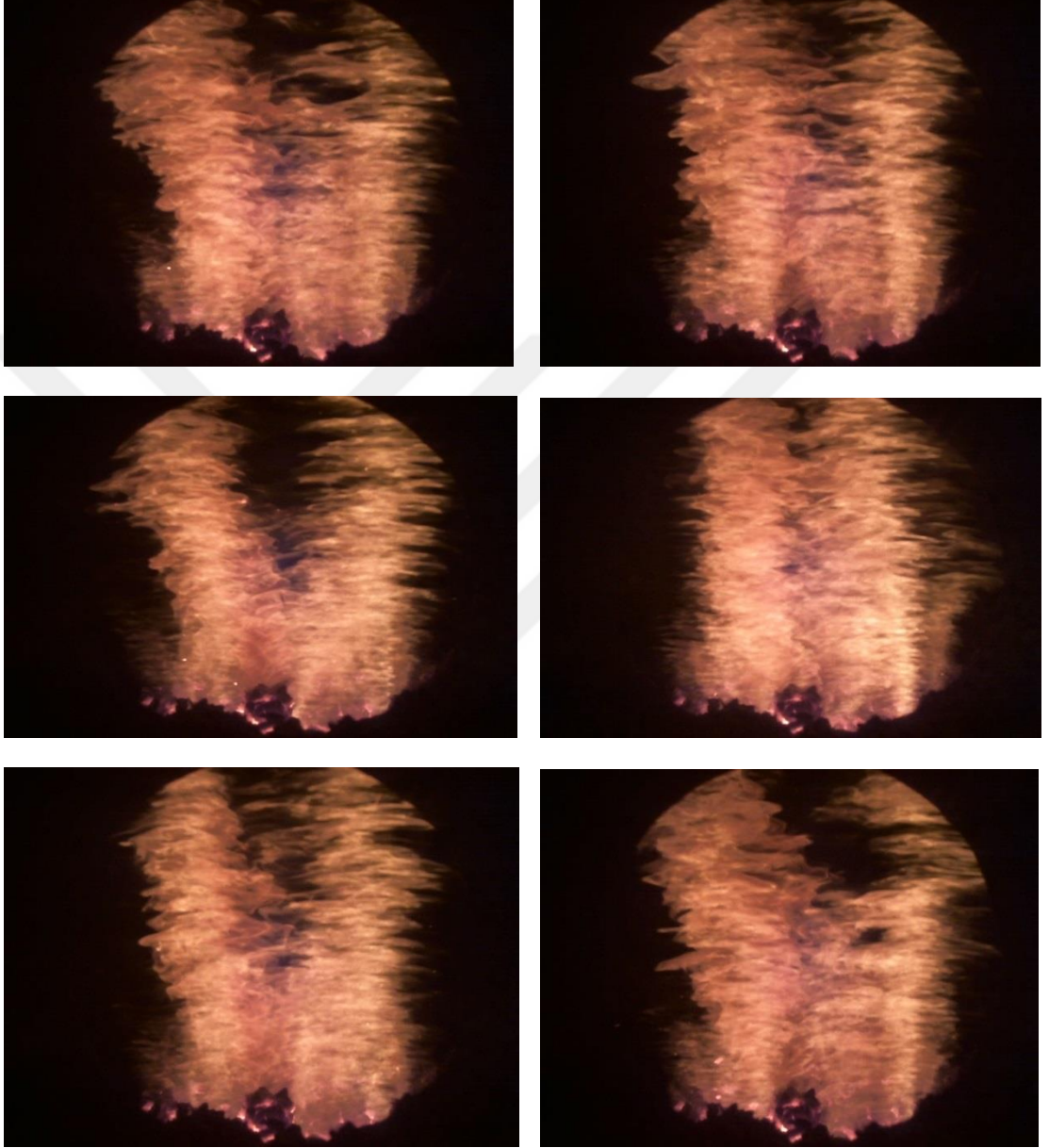
- Hiyerarşik blok diyagramları oluşturmak ve yönetmek için grafik editörü
- Sürekli zamanlı ve ayrık zamanlı sistemleri modellemek için önceden tanımlanmış blokların kütüphaneleri
- Sabit adımlı ve değişken adımlı ODE çözücülerini olan simülasyon motoru
- Simülasyon sonuçlarını görüntülemek için kapsamlar ve veri göstergeleri
- Model dosyaları ve verileri yönetmek için proje ve veri yönetimi araçları
- Model mimarisini rafine etmek ve simülasyon hızını arttırmak için model analiz araçları
- MATLAB algoritmalarını modellere almak için MATLAB İşlev bloğu
- C ve C ++ kodunu modellere içe aktarmak için kullanılan kod aracı

3.3 Veri Toplama

Alev görüntüleri ve gerçek λ ölçümleri aynı yanma sisteminden eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Alev görüntülerinin elde edilmesinde iki adet kamera kullanılmıştır. Kameralardan biri Aptina MT9P031 CMOS sensörlü Basler acA2500-14gc GigE tipi kameradır (Kamera-1) ve saniyede 14 kare üretmektedir. Kameranın gövdesine yatay görüş açısı 78^0 ve dikey görüş açısı 90^0 olacak şekilde 8 mm 'lik bir lens takılmıştır. Bu kameradan elde edilen her bir görüntü üç renk bandından (kırmızı, yeşil, mavi) oluşmaktadır ve 2590×1942 boyutlarına sahiptir. Her bir kanal için derinlik 12 bittir. Elde edilen her bir dosyanın boyutu ise 14740 kilobayttır. Bununla birlikte hava besleme ünitesi ile de besleme hava bilgisi anlık olarak elde edilmiş ve bilgisayara depolanmıştır.

Diğer kamera ise Sony PS3 Eye' dir (Kamera-2). Gerçek lamda (λ) ölçümleri saniyede bir değer veren TESTO cihazıyla elde edilmiştir. Baca çıkışından yaklaşık 1 m uzaklıkta açılmış olan profile baca çapının yaklaşık 2/3 oranında probun daldırılması ile diğer mevcut verilerle eş zamanlı olacak şekilde saniyede bir veri alınmıştır.

sırasında karşılaşılabilecek hesaplama yükünden kaçınmak için görüntülerin orijinal boyutlarını küçültmek amacıyla bir yeniden boyutlandırma işlemi uygulanmıştır. Bu şekilde alev görüntülerinin boyutları yarıya düşmüştür. Yanma esnasında farklı iki kameradan elde edilen görüntüler ise Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Yan kameradan elde edilen farklı anlara ait yanma görüntüleri



Şekil 3.22. Arka kameradan elde edilen farklı anlara ait yanma görüntüleri

Özellik çıkarımı yapay öğrenme tekniklerinin önemli adımlarındandır. Bu uygulamanın sebebi büyük bir görüntü verisi setini tanımlamak için gereken bilginin miktarını azaltmaktır. Düşük boyutlu özelliklerin çıkarılması sinir ağının daha kolay oluşmasını sağlayacaktır. Alev görüntüleri, yanma sürecine ait hacim ve yoğunluk gibi bol miktarda bilgi içermektedir. Yanmanın gerçek zamanlı analizini yüksek boyutlu alev görüntüleri ile yapmak hesaplamada karşımıza büyük bir yük getirecektir. Bu sebeple daha iyi yorumlamalar yapabilmek için alev görüntülerinden bilgilendirici ve gereksiz olmayan önemli özellikler çıkarılmalıdır. Daha da önemlisi özellik çıkarımı boyut indirgemelerine öncülük etmektedir.

Tezin hazırlanış sürecinde birden fazla yapay sinir ağı modeli elde edilmiştir. Ancak bunlar arasında en optimum olan tasarım, gerekçesi belirtilerek seçilip, kontrol işlemlerine seçilen ilgili model üzerinden devam edilmiştir. Oluşturulan modeller ise şu şekilde sıralanabilir;

- Görüntü matrislerinden çıkarılan 11 farklı özellikte birlikte baca gazı sıcaklığının girişi, hava fazlalık katsayısının ise çıkışı oluşturacağı YSA modeli. Model oluşturulmadan önce ilgili veriler matris yaklaşımı ile çoklu regresyon işlemine tabi tutulmuştur. Burada amaç baca gazı sıcaklığı ile en uyumlu görüntü matrisi özelliğinin belirlenerek en yüksek doğruluktaki YSA modelinin elde edilmesidir.
- Sadece Görüntü özelliklerinin kullanılması ile elde edilen yüksek doğruluktaki YSA modeli. Burada oluşturulan modelde ise görüntülerden 3 farklı yöntemle elde edilen özellik vektörleri YSA modellerinin girişini, hava fazlalık katsayısı ise YSA modellerinin çıkışını oluşturmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında yapılan analizlerden elde edilen bulgular; yakıcının yanma odasına yerleştirilen kameralardan elde edilen görüntüler ile birlikte baca gazı analiz cihazından ve yakıcının hava besleme ünitesinden alınan değerlerlerdir.

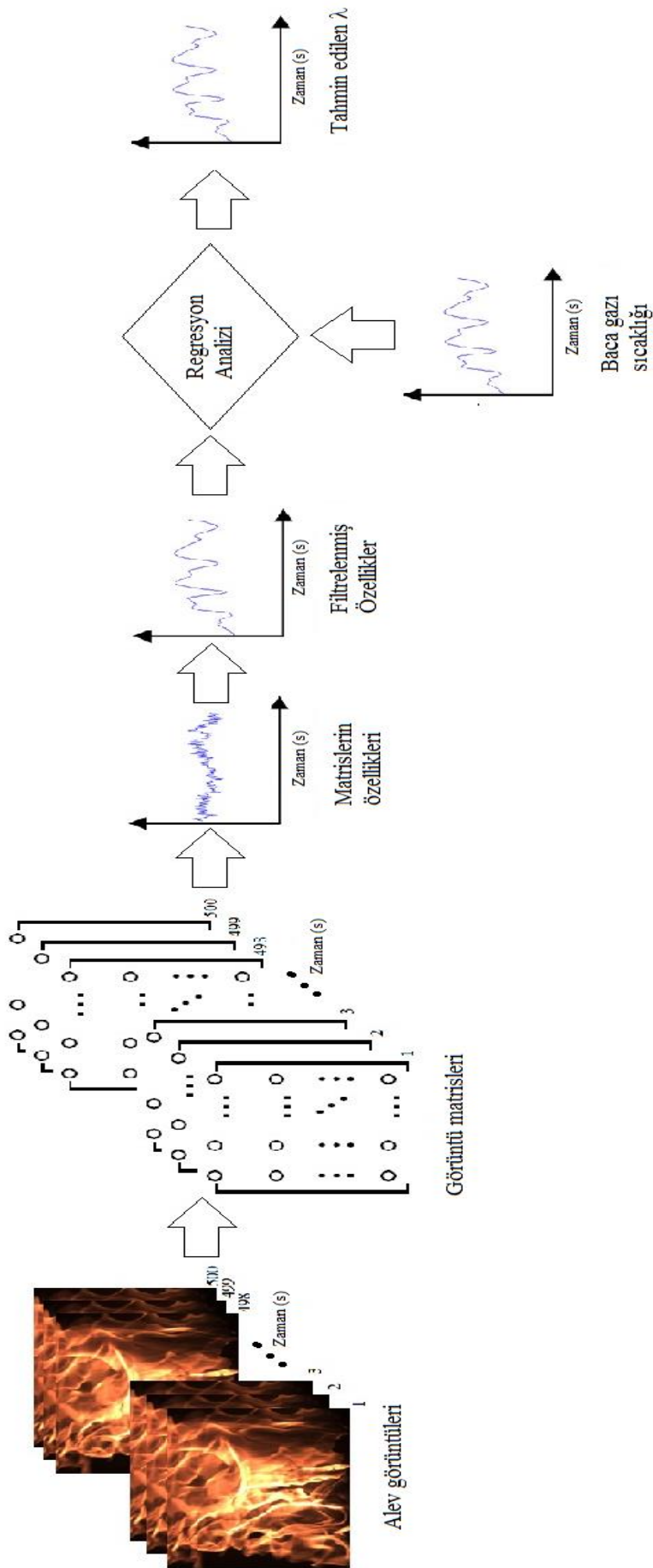
Bununla birlikte bu bölümde baca gazı sıcaklığı ve görüntü matris bilgileri çoklu doğrusal regresyon analizine tabi tutularak en düşük hata oranının elde edildiği görüntü matris özelliği de ayrıca belirlenmiştir.

4.1 Regresyon Analizi

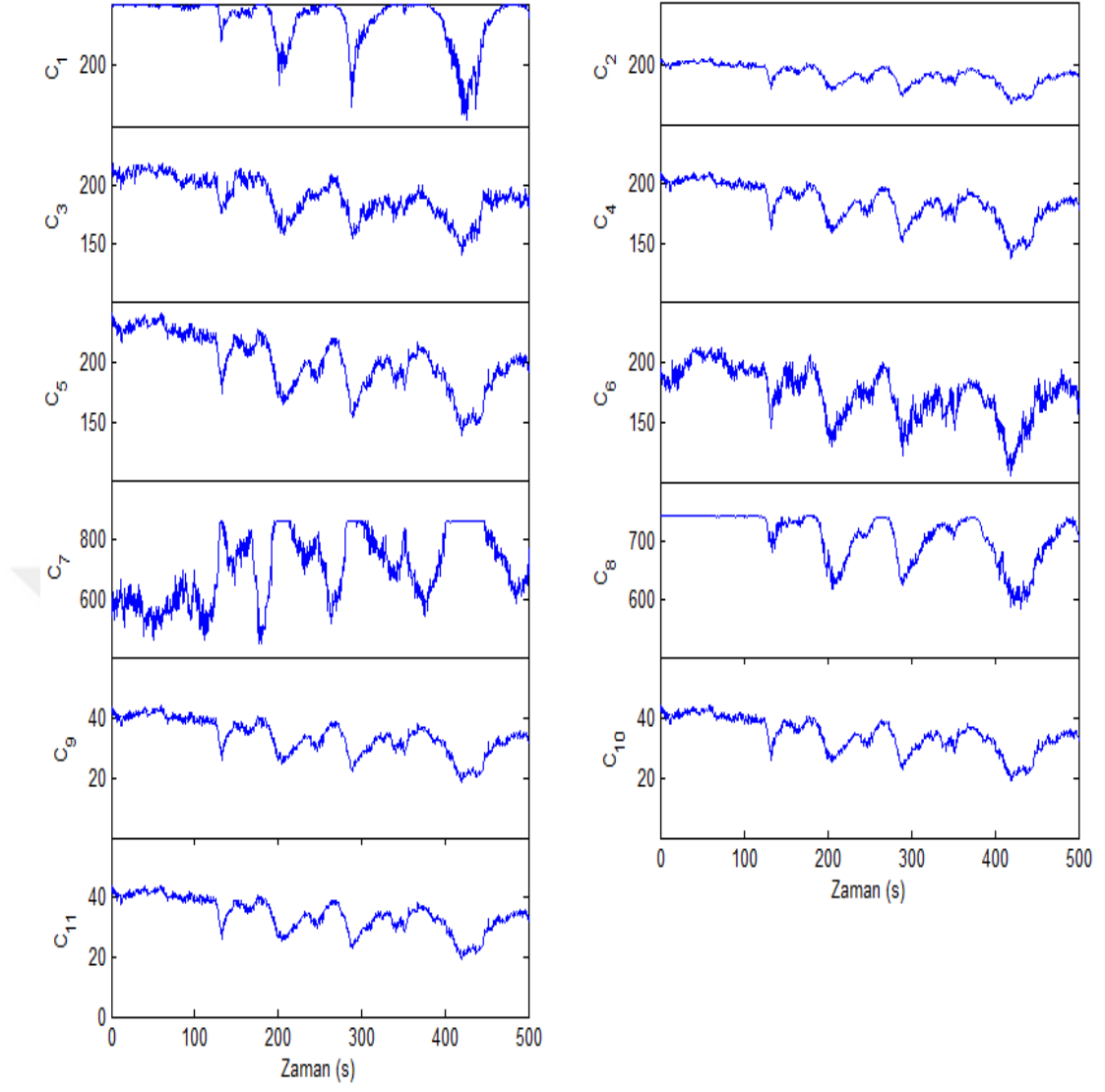
Burada kamera aracılığıyla yanma odası görüntülenen otomatik yüklemeli kömür yakıcısının hava fazlalık katsayısı ile alev görüntülerinden filtrelenmiş bir şekilde elde edilen 11 farklı görüntü parametresi baca gazı sıcaklığı ile birlikte matris yaklaşımı regresyon analizine tabi tutulmuştur. Regresyon sonucunda hata oranı en düşük olan parametre ise yapay sinir ağına giriş olacak parametre olarak seçilmiştir. Veri işleme akış şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. Buna göre CCD kameradan elde edilen alev görüntülerinden elde edilen özellikler Denklem 4.1’de verilen alçak geçiren filtre ile filtreledikten sonra baca gazı sıcaklığı bilgisiyle birlikte regresyon analizine tabi tutulmuştur.

$$F(s) = \frac{1}{28s^2 + 10s + 1} \quad (4.1)$$

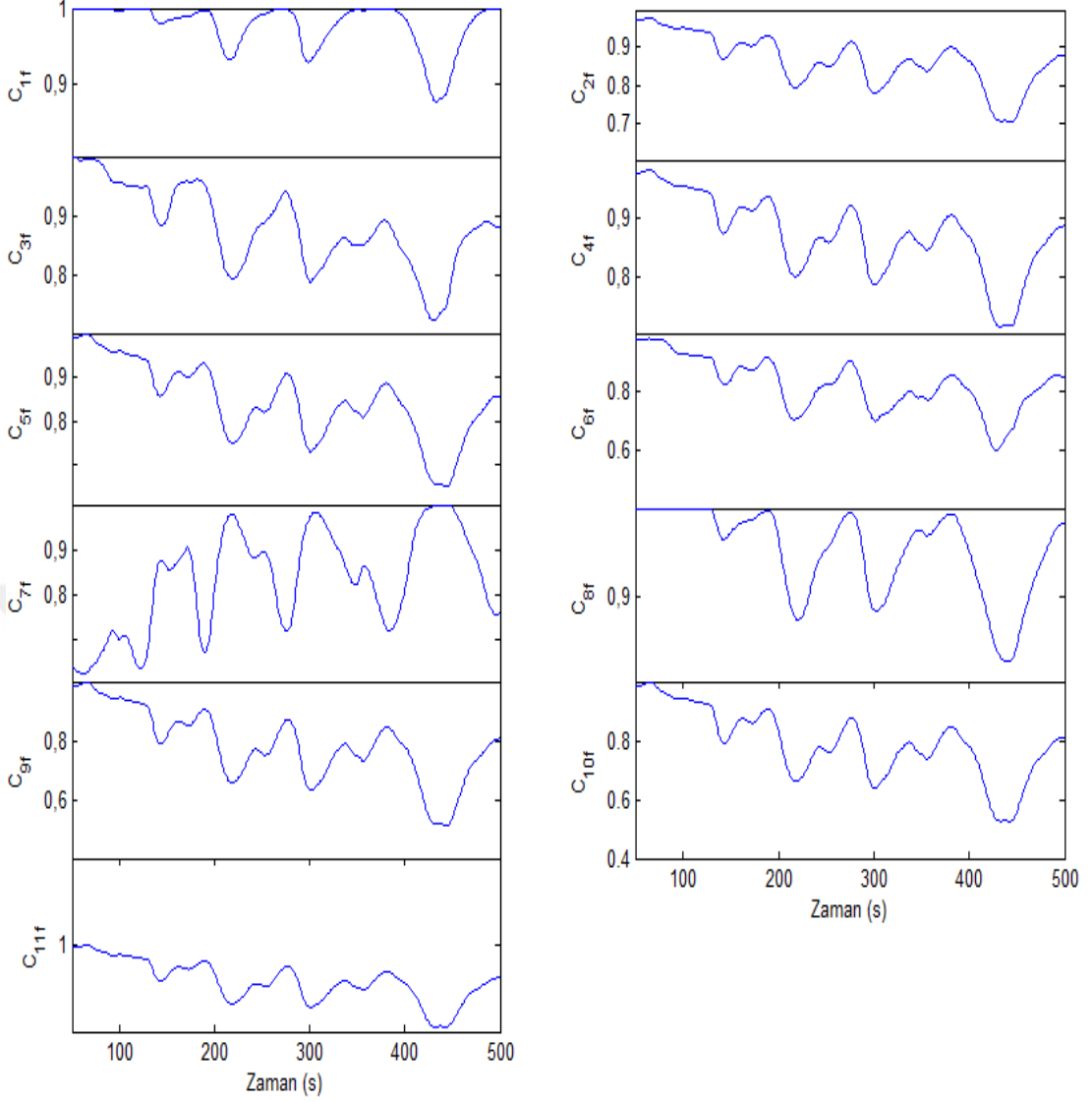
Şekil 4.2 ’de CCD kameradan alınan görüntülerden elde edilen görüntü matrisinin bir normu, iki normu, sonsuz normu, Frobenius normu, normalize edilmiş piksellerin toplamı, matrisin izi, matrisin rankı, eşik değeri 30’dan büyük olan piksel toplamı, en küçük öz-değer, en küçük 10 öz-değerin toplamı ve tüm öz-değerlerin toplamı gibi özellikleri çıkarılmıştır. Bu işlem MATLAB programı ile yazılan kod aracılığı ile saniyede bir görüntü değeri alacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kameradan alınan bu veriler sırasıyla C_1, C_2, \dots, C_{11} şeklinde adlandırılmıştır. Verilerdeki yüksek frekans gürültülerinin elemine edilmesi için Denklem 4.1’de transfer fonksiyonu verilen $F(s)$ filtresi ile filtre edildikten sonra (0 1) aralığında normalize edilmiştir. Filtrelenmiş veriler sırasıyla $C_{1f}, C_{2f}, \dots, C_{11f}$ Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.1. Veri işleme akış şeması



Şekil 4.2. Ham alev görüntüsü bilgileri.



Şekil 4.3. Filtre edilmiş alev görüntüsü bilgileri

Matris Yaklaşımıyla Regresyon Analizi:

Çalışmada, otomatik yüklemeli kömür yakıcısının 500 saniyelik bir çalışma kesiti boyunca elde edilen veriler analiz edilmiştir. Baca gazı analiz cihazından saniyede bir ölçülen anlık hava fazlalık katsayısı (λ) değerlerinin oluşturduğu set bağımlı değişken vektörü Denklem 4.2’de (\mathbf{Y}) olarak atanmıştır. Bu yüzden \mathbf{Y} vektörünün satır sayısı $n=500$ ’dür.

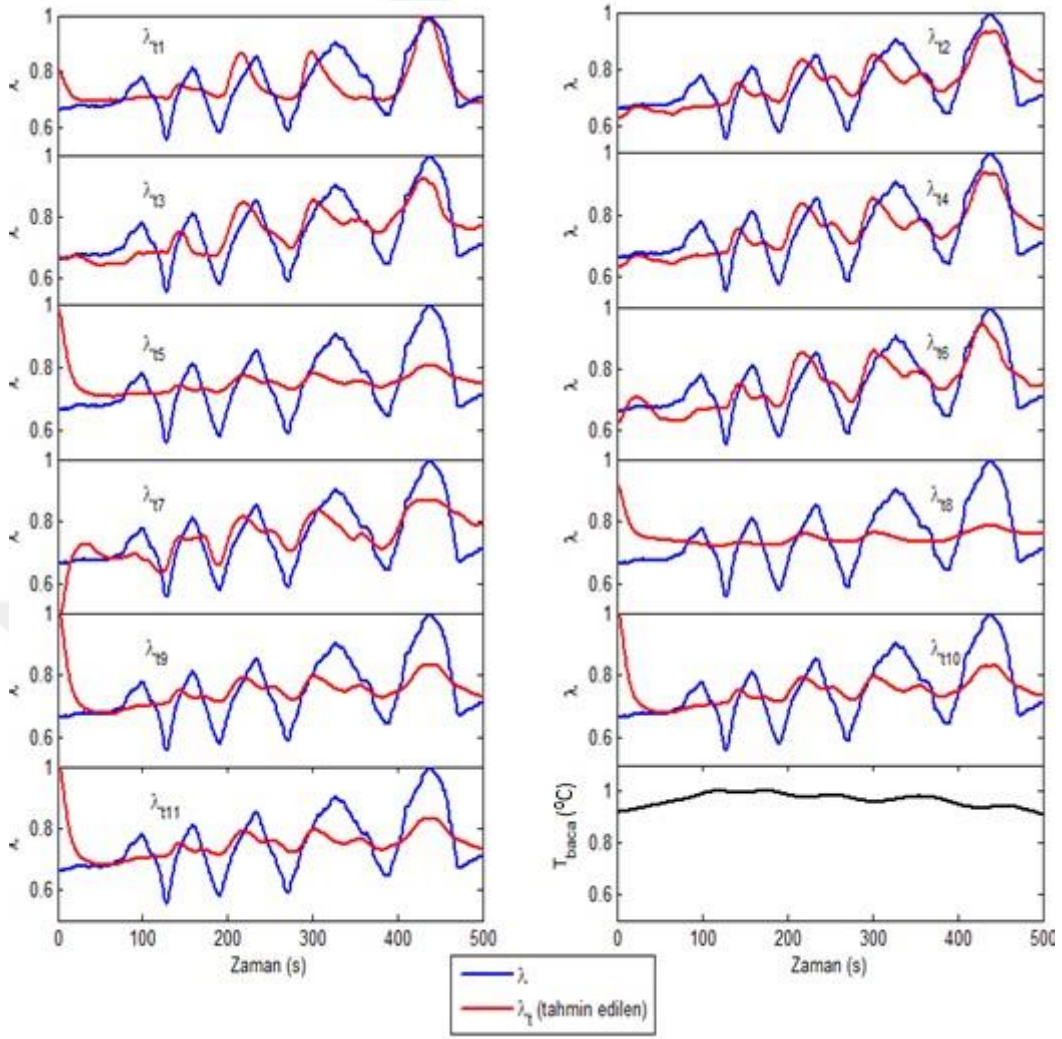
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{k+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Buna karşılık eş zamanlı biçimde CCD kameradan çekilen görüntülerden üretilen bilgi seti \mathbf{X}_1 bağımsız değişken vektörü olarak ayrıca baca gazı sıcaklık verileri ile oluşturulmuş set de \mathbf{X}_2 bağımsız değişken vektörü olarak atanmıştır. Dolayısıyla \mathbf{X} matrisinin boyutu $n \times 3$ 'dür. \mathbf{X} matrisinin birinci sütununun 1'lerden oluştuğuna dikkat ediniz. Söz konusu biçimde oluşturulan deneysel veri setleriyle 11 farklı regresyon analizi yapılmıştır. Her bir regresyon analizinde farklı görüntü parametreleri kullanılmıştır ($C_{1f}, C_{2f}, \dots, C_{11f}$).

Örneğin, birinci analizde CCD kameradan saniyede bir alınan çerçeve görüntü kaynak matrisinin bir normu \mathbf{X}_1 bağımsız değişken vektörü olarak kullanılmıştır. Alev görüntülerinin 11 farklı parametresi (özelliği) için yapılan regresyon analizlerinin sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Filtre edilmiş görüntü matrisi parametrelerine karşılık elde edilen λ tahmin bağıntıları sırasıyla $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \dots, \lambda_{111}$ şeklinde gösterilmiştir. Bu analize göre matris izi parametresi minimum hatayla λ ile ilintili olduğu görülmektedir. Norm esaslı görüntü özellik performansları beklendiği gibi birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Regresyon bağıntıları kullanılarak elde edilen tahmini λ değerleri her bir model için ayrı ayrı Şekil 4.4'te verilmiştir. Alev görüntüsünün filtre edilmiş iz değeri C_{6f} 'in hava fazlalık katsayısı λ 'yı diğer görüntü özelliklerine göre daha iyi bir şekilde takip edebildiği görülmektedir. Şekil 4.4'te norm esaslı görüntü özelliklerinin birbirine yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Söz konusu özelliklerin regresyon analizi sonuçlarında da birbirine yakın çıkması yapılan analizin tutarlılığına işaret etmektedir. Örneğin, Şekil 4.4'te birbirine çok yakın gözüken C_{2f} ve C_{4f} performanslarının regresyon sonuçları sırasıyla %13.53 ve %13.58'dir.

Çizelge 4.1. Regresyon analizi sonuçları.

Filtre edilmiş değişkenler		Regresyon bağıntısı	Maksimum hata
Bir normu	C_{1f}	$\lambda_{11}=2.9700-2.4510*C_{1f}+0.1835*T_{baca}$	%16.74
İki normu	C_{2f}	$\lambda_{12}=1.7963-1.0272*C_{2f}-0.1535*T_{baca}$	%13.53
Sonsuz normu	C_{3f}	$\lambda_{13}=1.8350-1.0177 * C_{3f}-0.1858*T_{baca}$	%13.62
Frobenius normu	C_{4f}	$\lambda_{14}=1.8429-1.0573* C_{4f}-0.1668*T_{baca}$	%13.58
Normalize edilmiş piksellerin toplamı	C_{5f}	$\lambda_{15}=1.0876-0.2709* C_{5f}-0.1168*T_{baca}$	%31.83
Matrisin izi	C_{6f}	$\lambda_{16}=1.6353-0.8118*C_{6f}-0.2171*T_{baca}$	%11.69
Matrisin rankı	C_{7f}	$\lambda_{17}=1.5122+0.4354*C_{7f}-1.1531*T_{baca}$	%20.81
Eşik değeri 30'dan büyük olan piksel toplamı	C_{8f}	$\lambda_{18}=1.3348-0.2205*C_{8f}-0.3930*T_{baca}$	%24.98
En küçük öz-değer	C_{9f}	$\lambda_{19}=0.8519-0.3284*C_{9f}+0.1583*T_{baca}$	%33.51
En küçük 10 öz-değerin toplamı	C_{10f}	$\lambda_{110}=0.8795-0.3240*C_{10f}+0.1278*T_{baca}$	%33.48
Tüm öz-değerlerin toplamı	C_{11f}	$\lambda_{111}=0.8836-0.3230*C_{11f}+0.1231*T_{baca}$	%33.45



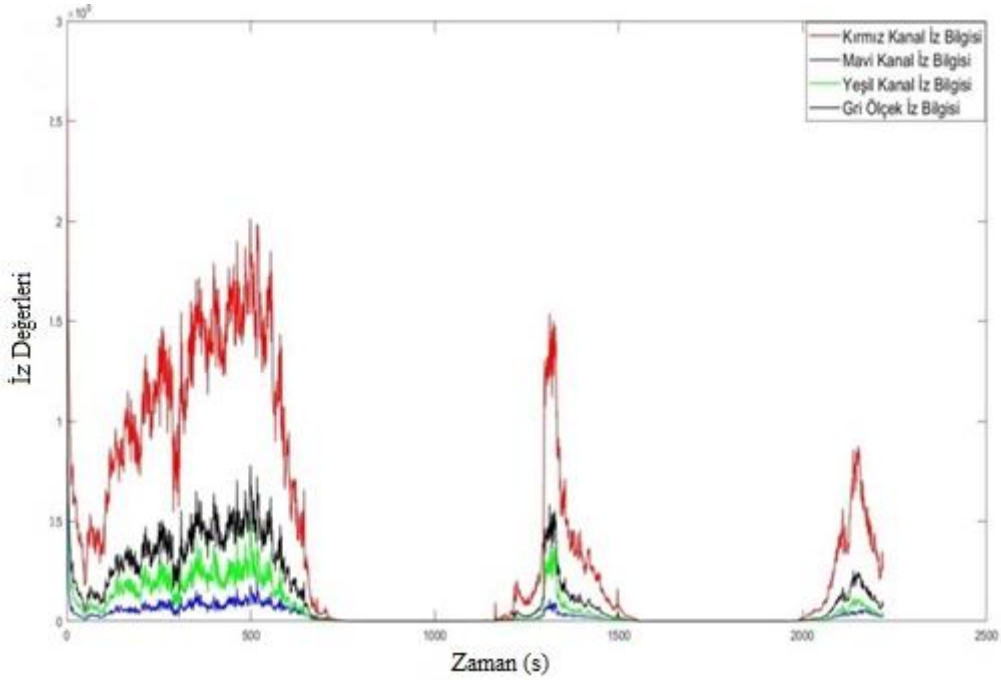
Şekil 4.4. Regresyon modeliyle tahmin edilen λ değerleri.

Alev görüntülerinden filtrelenmiş bir şekilde elde edilen 11 farklı görüntü parametresi baca gazı sıcaklığı ile birlikte matris yaklaşımlı regresyon analizine tabi tutulmuştur. Bu şekilde elde edilen regresyon modellerinin doğrulukları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Alev görüntüsünün matris izi değerinin diğer görüntü parametrelerine göre daha iyi bir sonuç sergilediği görülmüştür. Buradan yola çıkarak, söz konusu iki sistem değişkeninin giriş teşkil edileceği yapay sinir ağı modelleriyle yüksek doğruluklara ulaşılabileceği kanısına varılmıştır.

4.2 Adımlı Hava Sinyali Girişleri

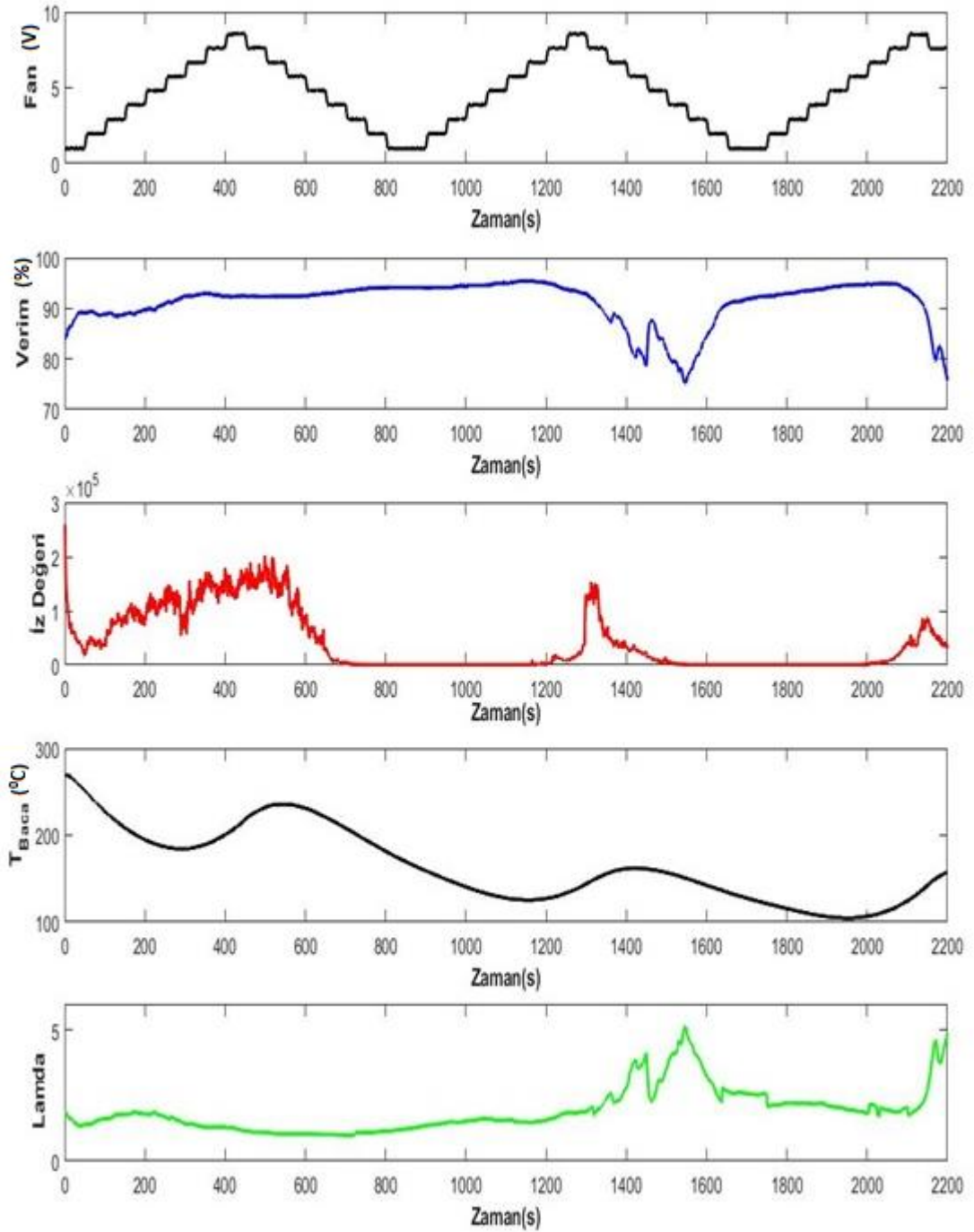
Bu bölümdeki çalışmalarda, 3000 d/dk'lık hava besleme motoru, bir elektrik devresi yardımı ile 0-10 volt gerilim altında çalıştırabilmektedir. Bu değerler arasında yakıcının hava besleme sinyali değişken basamak giriş olarak belirlenerek

bu şartlar altında çalışılmıştır. Yakıcıya olan kömür beslemesi ise bu deneyde 3 saniye yükleme ve 110 saniye bekleme şeklinde gerçekleşmiştir. Girişe karşı yakıcıdan elde edilen değerler Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir. İlgili şekillerde sırasıyla, farklı kanallara ait iz değerleri, kırmızı kanalda elde edilen iz değerlerinin ham ve filtrelenmiş hali, baca gazı sıcaklığı-matris izi, fan sinyali-baca gazı sıcaklığı değerlerine ve bu değerlerin tek bir ortamda olduğu duruma ait grafikler gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Adımlı hava girişleri için farklı kanallarda elde edilen iz değerleri.

Bölüm 4.5.1'de bahsedileceği üzere farklı kanallar üzerinde yapılan iz değeri ve baca gazı sıcaklığının girişi hava fazlalık katsayısının ise çıkışı oluşturduğu YSA çalışmalarında en iyi sonucun kırmızı kanalda elde edildiğinden bahsedilmiştir. Farklı kanallara ait iz değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Dolayısıyla, bu bölümde bahsedilen veri analizlerinde kırmızı kanal üzerinden devam edilmiştir.



Şekil 4.6. Basamak giriş için tüm değerler

Şekil 4.6’da değişken basamak fan girişine karşın, verim, iz değerleri, baca gazı sıcaklığı ve hava fazlalık katsayısı değerleri gösterilmektedir. Elde edilen verilerin birbiri arasındaki ilişkiler açıkça görülmektedir. Hava fazlalık katsayısındaki artış ve düşüşlerin ise verimi olumsuz yönde etkilediği grafikten anlaşılmaktadır. İz değerlerinin 500, 1400 ve 2200 civarlarındaki aşma değerlerinin giderek azalma sebebi ise yakıcıya ait gözetleme pencerelerindeki islenmedir.

İslenme sebebiyle alınan görüntülerin kararması iz değerlerinde düşmeye sebebiyet vermektedir. Yakıcının bu şartlarda belirli süre yakıldıktan sonra sistemdeki değişimlere daha net cevap verdiği açıkça görülmektedir.

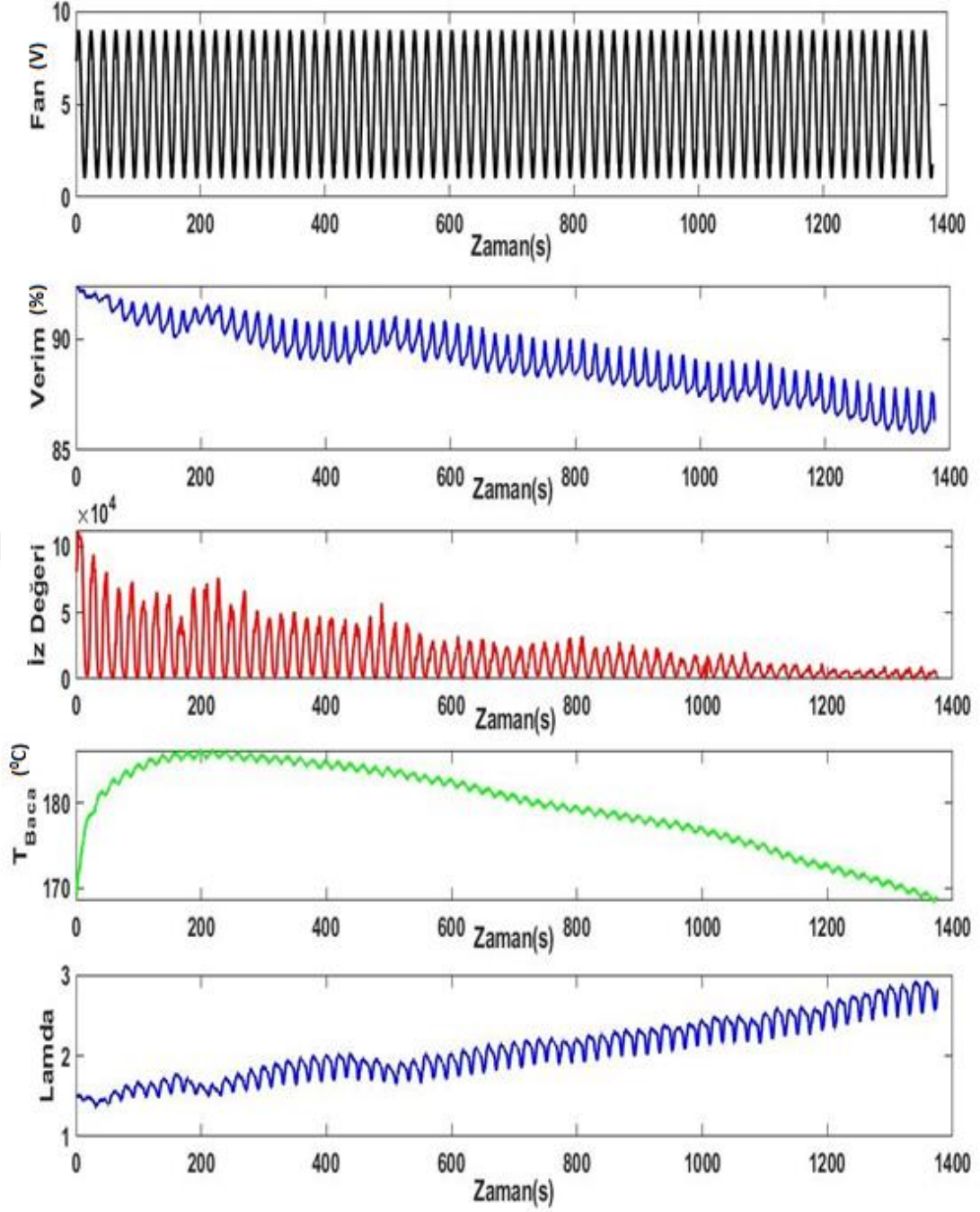
Dolayısıyla, bu değerler kullanılarak oluşturulacak YSA modellerinin yüksek doğrulukta olması kaçınılmazdır.

4.3 Sinüzoidal Hava Giriş Sinyalleri

Yakıcının yanma davranışlarının farklı şartlarda gözlemlenebilmesi amacıyla yakıcıya üç farklı frekansta sinüzoidal formda hava beslemesi gerçekleştirilmiştir. Bu frekans değerleri sırasıyla; $\frac{\pi}{10}$ rad/s, $\frac{\pi}{20}$ rad/s ve $\frac{\pi}{40}$ rad/s olarak belirlenmiştir. Farklı frekanstaki sinüzoidal girişlerin yanında, yakıcıya olan kömür beslemesi ise yükleme-bekleme şeklinde değil de 113 saniyelik periyotta 3 saniye yükleme yapacak şekilde sabit olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak kullanılan invertörün kapasitesinin düşük kalması sebebiyle bu değerlerin tam olarak tutturulamayarak 3-4 saniyelik yükleme değerleri arasında kalmak suretiyle istenen seviyenin üzerinde gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 Frekans değeri $\frac{\pi}{10}$ rad/s için sinüzoidal hava giriş sinyali

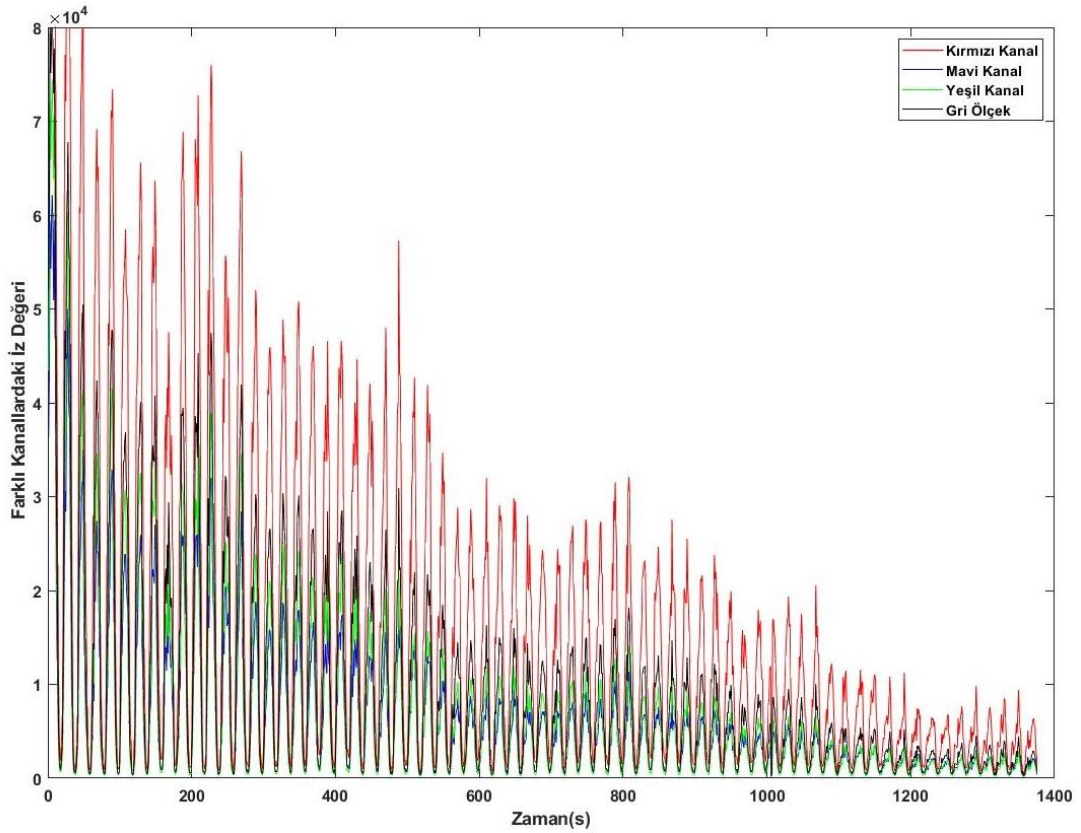
Bu deneyde fan girişine +5 volt değerinde sabit bir giriş yapılmıştır. Bu sinyale ek olarak genlik değeri 4 volt ve frekans değeri $\frac{\pi}{10}$ rad/s olan sinüzoidal giriş sağlanmıştır. Böylece besleme hava değeri +9 ve +1 volt genlik değerleri arasında tutulmuştur. Yakıcıya olan kömür girdisi ise frekans invertörlü bir motor ve bu motora bağlanan bir helezonla gerçekleştirilmiştir. Kömür yükleme işlemine 10.1 hertz olarak başlanmış ancak düşük frekanslarda motorun durması sebebiyle deney süresi içerisinde önce 13.9 hertz seviyesine ve daha sonra 15.6 hertz seviyesine çıkarılmıştır. Bu değerlerle yakıcıdan yaklaşık olarak 1200 veri alınmıştır. Elde edilen verilerin birbirileri ile olan ilişkileri ise Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Sinüzoidal giriş için tüm değerler ($\pi/10$).

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere fan değerlerindeki $\frac{\pi}{10}$ rad/s’ lik frekans değişimi aynı şekilde verim, iz değeri, baca gazı sıcaklığı ve lamda değerlerinde değişimler meydana getirmiştir. Hava fazlalık katsayısının giderek artması sonucunda baca gazı sıcaklığında düşüş görülmektedir. Aynı zamanda belirli değerlerin üzerinde seyreden hava fazlalık katsayısı verimin de düşmesine sebep olmuştur. Hava fazlalık katsayısının deney süresince sürekli olarak artış göstermesinin sebebi ise, düşük

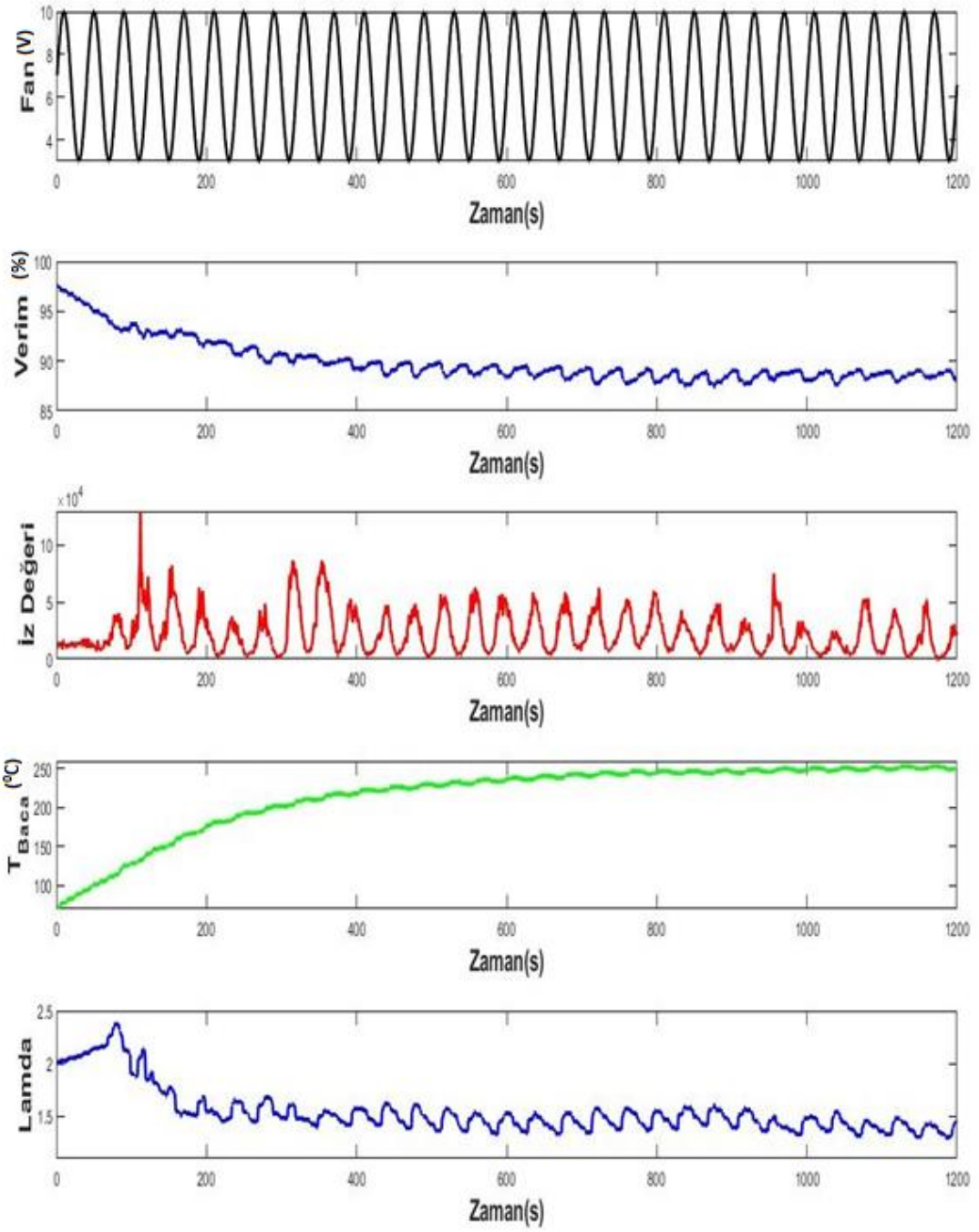
frekansta seyreden fan değerleridir. Bu deneyde elde edilen farklı kanallara ait iz değerleri ise Şekil 4.8’de verilmiştir.



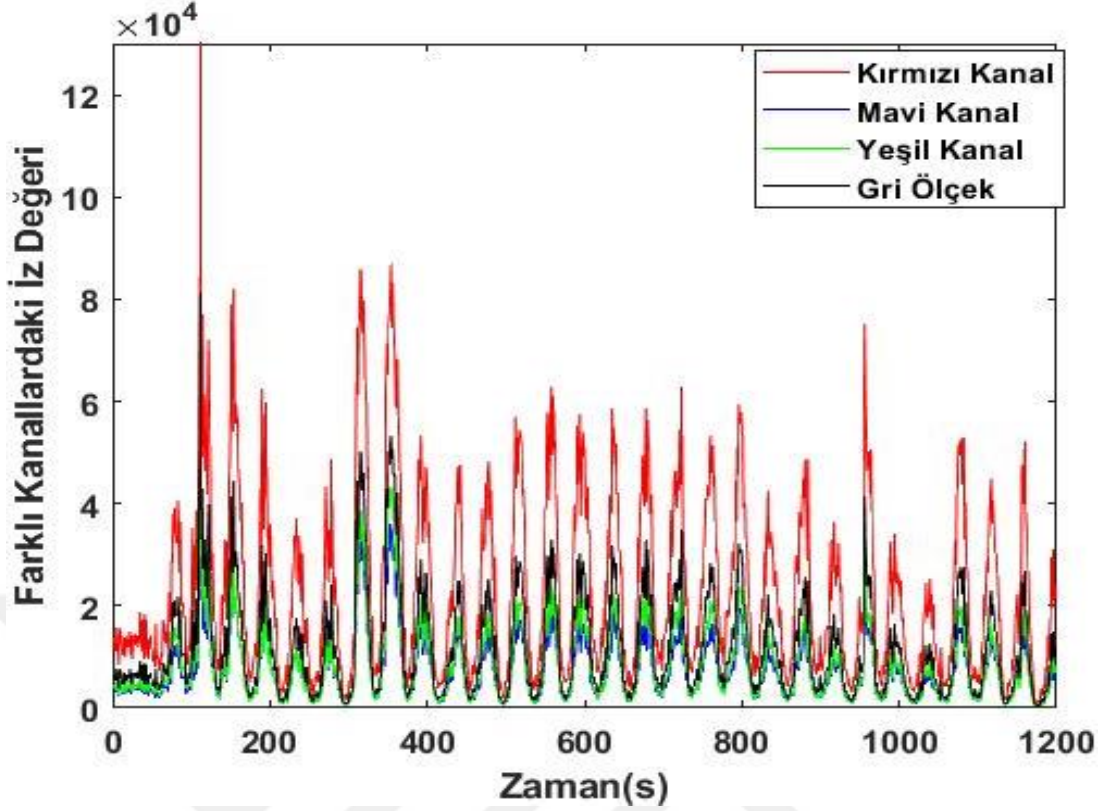
Şekil 4.8. Sinüzoidal hava girişi için farklı kanallarda elde edilen iz değerleri($\pi/10$).

4.3.2 Frekans değeri $\frac{\pi}{20}$ rad/s için sinüzoidal hava giriş sinyali

Bu deneyde fan girişine +6,5 volt değerinde sabit bir giriş yapılmıştır. Bu sinyale ek olarak genlik değeri 3,5 volt ve frekans değeri $\frac{\pi}{20}$ rad/s olan sinüzoidal giriş sağlanmıştır. Böylece besleme hava değeri +9 ve +3 volt genlik değerleri arasında tutulmuştur. Kömür yükleme işlemi 11,5 Hz civarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu değerlerle yakıcıdan yaklaşık olarak 1200 veri alınmıştır.



Şekil 4.9. Sinüzoidal giriş için tüm değerler ($\pi/20$)



Şekil 4.10. Farklı kanallardaki iz değerleri ($\pi/20$).

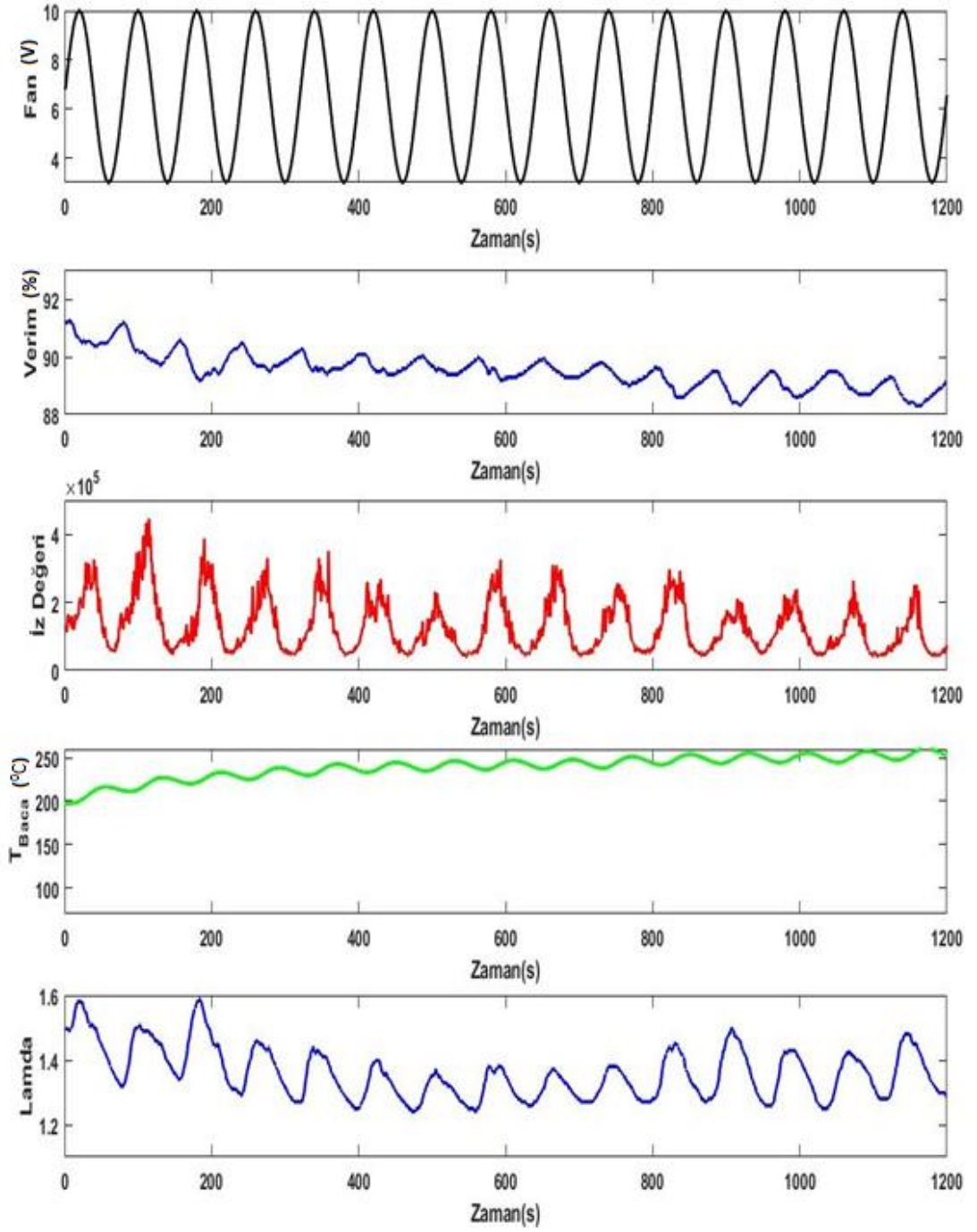
Şekil 4.10'da deneyin toplam veri sayısı olan 1207 görüntüden elde edilen iz değerleri gösterilmiştir.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'daki grafiklerde frekans değeri $\frac{\pi}{20}$ rad/s olan sinüzoidal hava besleme giriş sinyaline karşı alınan değerler birbirleri ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Deneye başlamadan önce, gerek yakıcının sürekli rejime oturmaması ve sistemin yüksek hava besleme debileri ile çalıştırılmış olması sebebiyle değerler belirli zaman sonrasında normal değerlerine ulaşmıştır. Ancak bu süreç oluşturulacak olan YSA modelini olumsuz yönde etkilemediği ileriki bölümlerde yapılacak olan YSA çalışmalarında ortaya konacaktır.

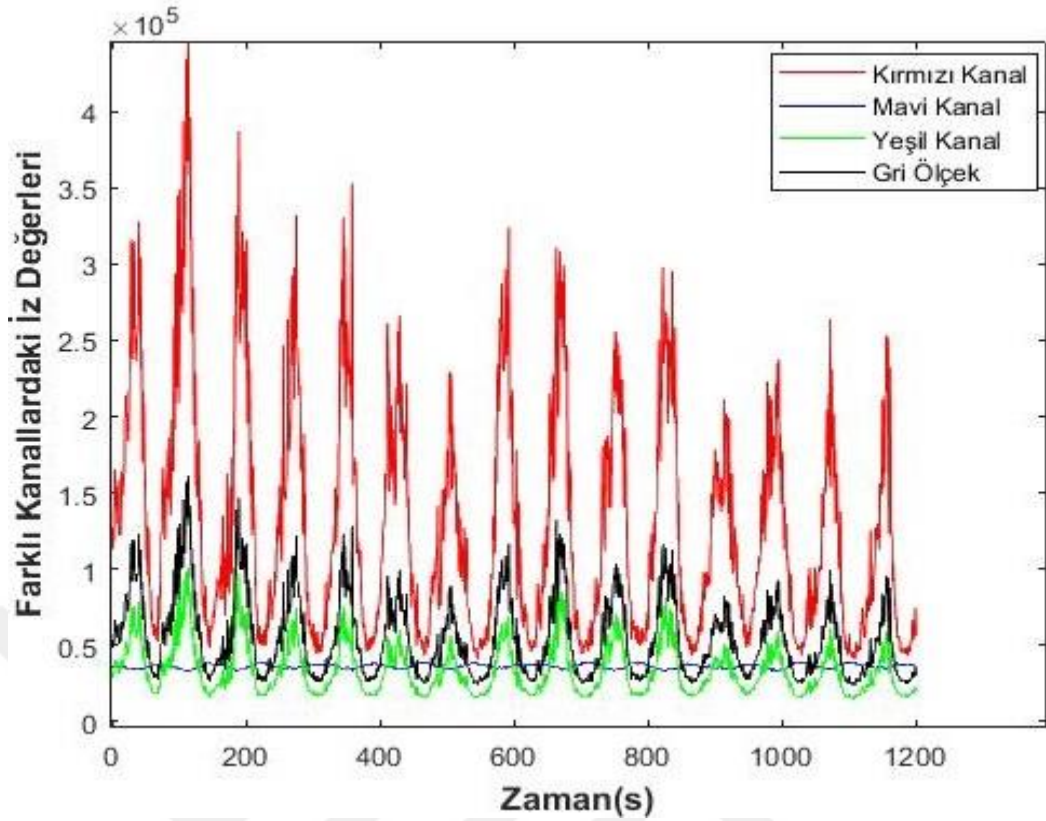
4.3.3 Frekans değeri $\frac{\pi}{40}$ rad/s için sinüzoidal hava giriş sinyali

Bu deneyde fan girişine +6,5 volt değerinde sabit bir giriş yapılmıştır. Bu sinyale ek olarak genlik değeri 3,5 volt ve frekans değeri $\frac{\pi}{40}$ rad/s olan sinüzoidal giriş sağlanmıştır. Böylece besleme hava değeri +9 ve +3 volt genlik değerleri arasında tutulmuştur. Kömür yükleme işlemi 12,5 hertz civarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu değerlerle yakıcıdan yaklaşık olarak 1200 veri alınmıştır.

Elde edilen verilerin birbirileri ile olan ilişkileri ise Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilen grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Sinüzoidal giriş için tüm değerler ($\pi/40$).



Şekil 4.12. Farklı görüntü kanallarında elde edilen iz değerleri ($\pi/40$).

Şekil 4.12’de verilen farklı kanallara ait iz değerleri, deneyde toplamda elde edilen 1201 görüntü kümesine aittir.

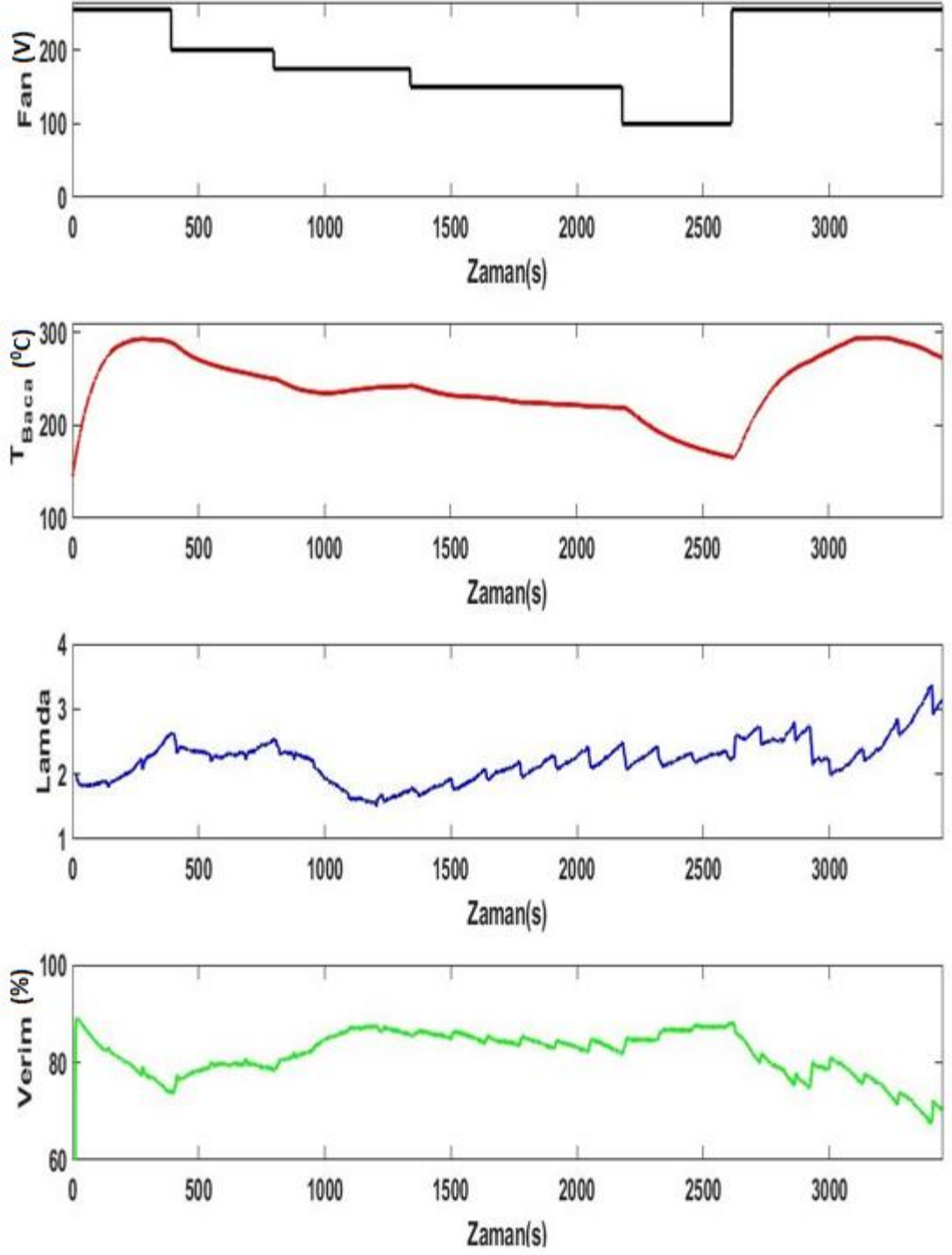
Dört farklı hava besleme durumu için yapılan deney sonuçlarında, verilerin birbiri ile en uyumlu olduğu durumlar; frekans değerleri $\frac{\pi}{20}$ ve $\frac{\pi}{40}$ rad/s olan sinüzoidal girişlerde elde edilmiştir. Bunun sebebi ise, bu değerlerde yakıcıya yeterli miktarda hava gönderilebilmesidir. Yakıcının farklı koşullarda yanması durumu sistem modellenmesi için olumlu bir sonuç teşkil etmektedir. Fakat bu değişkenliğin çok kısa süreler içerisinde gerçekleşmesi verilerin birbiri ile uyumunu azaltmış olup grafiklerde de bu durum bariz şekilde görülmektedir.

4.4 Yanma için ideal hava miktarlarının belirlenmesi

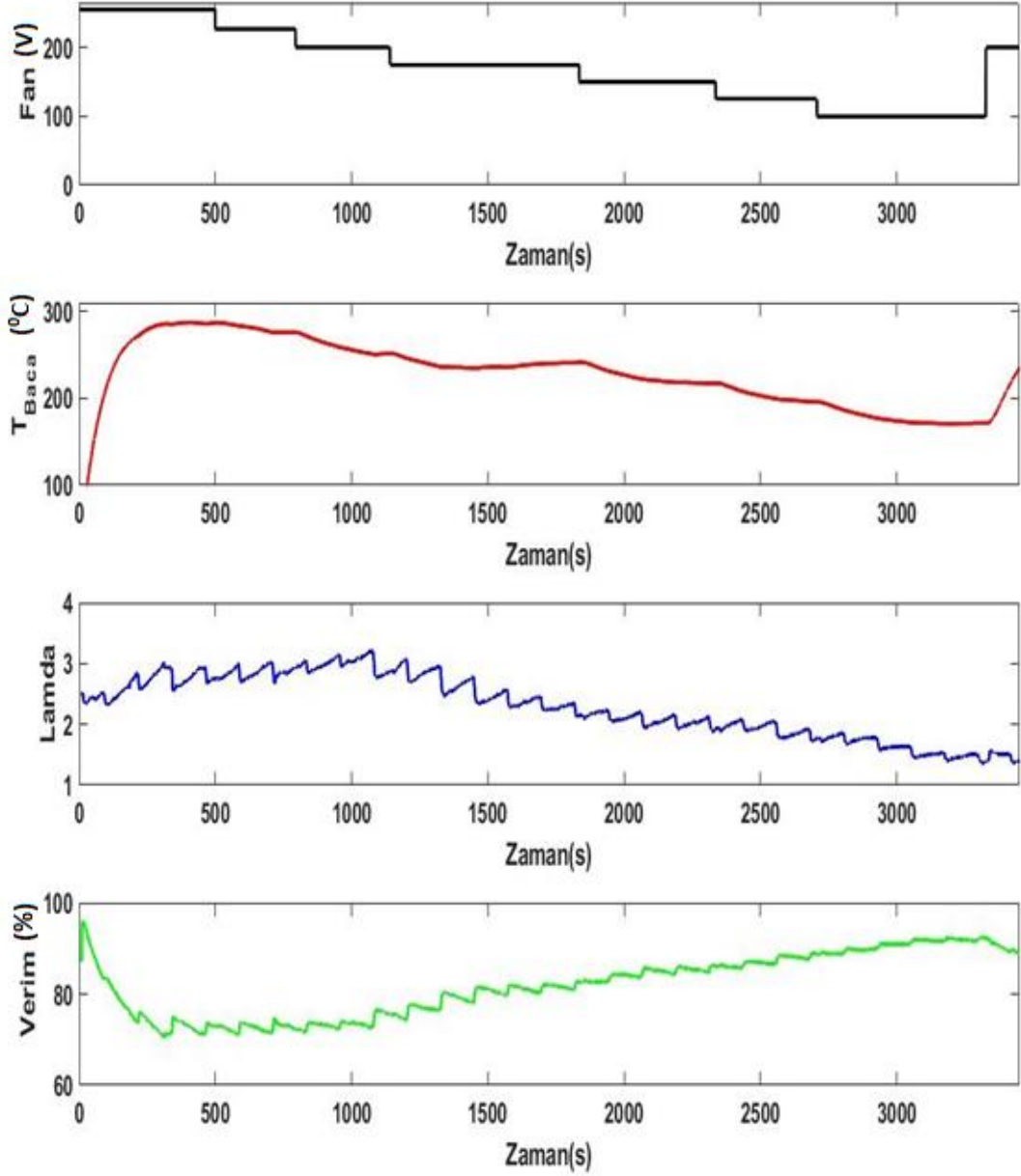
Tasarlanan hava besleme ünitesinin daha hassas aralıklarda değiştirilebilmesi için giriş sinyalli olan 0-10 volt değeri, 0-255 aralığına çekilmiştir. Buna göre ilgili aralıkta yakıcı uzun süreli farklı değerlerdeki basamak girişlerle çalıştırılarak fan üfleme seviyesinin hava fazlalık katsayısını hangi aralıklara oturttuğu gözlemlenmeye çalışılmıştır. Yakıcının kontrol işlemi sırasında uygun yakma

rejiminden çıkmaması için ise üfleme miktarına alt sınır getirilmiştir. Burada kamera görüntüleri alınmamıştır. Sadece besleme havası ile baca gazı analiz cihazından elde edilen hava fazlalık katsayısı ve baca gazı sıcaklığı değerleri üzerinde durulmuştur.

Ayrıca bu işlemler sırasında yakıcının iki farklı yükleme-bekleme standardı göz önünde bulundurulmuştur. Böylece sistemin iki farklı yanma koşulunda optimum hava miktarları belirlenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere yükleme sresinin 5 saniyeye çıkarılması ve bekleme sresinin nispeten azaltılması besleme fanı ile yakıcıyı daha uyumlu hale getirmiştir. Sabit seyreden fan debilerinde hava fazlalık katsayısındaki değişim oranı gözle görülür Şekilde azalmıştır. Yanma rejimi daha iyi olduğu için hava debisindeki düşüş ve yükselişler baca gazı sıcaklık değerlerini aynı hızda etkilememiş yanma dinamiğine bağlı olarak düşüş ve artış eğrilerinin eğiminde azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.13.Üç saniye yükleme 130 saniye bekleme ile elde edilen veriler



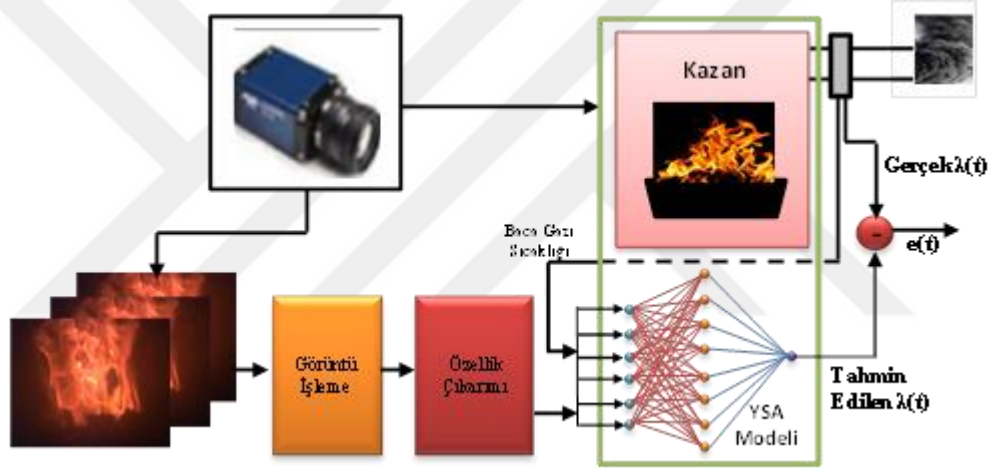
Şekil 4.14. Beş saniye yükleme 115 saniye bekleme ile elde edilen veriler

4.5 Yapay Sinir Ağı Çalışmaları

Kameralar aracılığı ile elde edilen görüntülere farklı özellik çıkarma yöntemleri uygulanmış olup bu özellikler YSA'nın girişini oluşturmaktadır. Burada görüntü matrisinden elde edilen iz değerleri baca gazı sıcaklık bilgisi ile birlikte değerlendirilmek üzere YSA'nın girişini oluşturmuştur. Ayrıca sadece görüntü bilgilerinden elde edilen anlamlı bilgilerin girişini oluşturduğu bir YSA modeli de elde edilmiştir. Her iki uygulama türünde de çıkış parametresi hava fazlalık katsayısıdır.

4.5.1 İz değerleri, baca gazı sıcaklığı ve hava fazlalık katsayısı ile oluşturulan YSA modeli

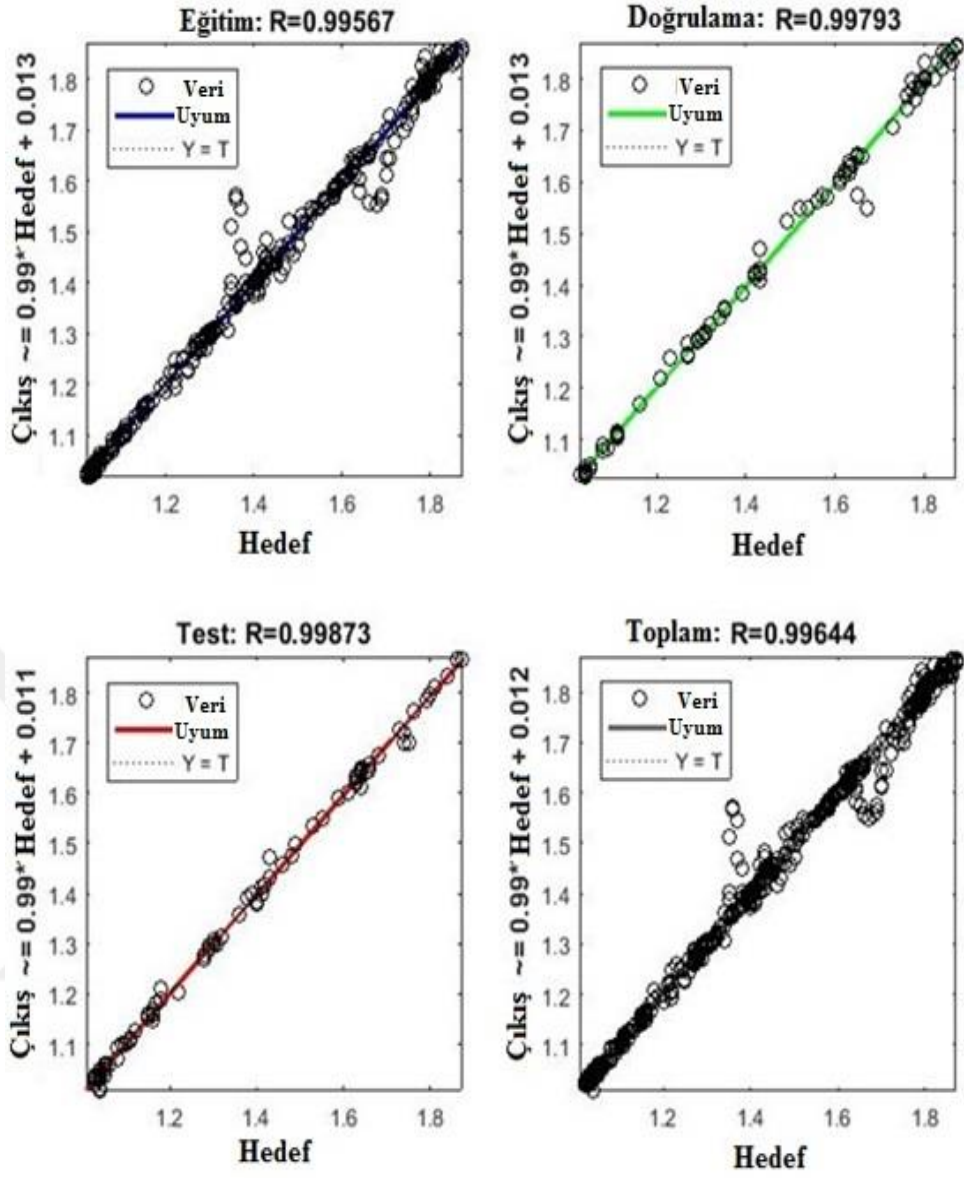
Önceki bölümlerde yapılan regresyon çalışmaları sonucunda baca gazı sıcaklığı ve iz bilgilerinin kullanılmasıyla elde edilecek modelin yüksek doğrulukta olacağından bahsedilmiştir. Burada, oluşturulan YSA model ve gerçek λ değerleri karşılaştırılmalı olarak elde edilen sonuçlarla yorumlanmıştır. Ayrıca farklı renk kanallarından elde edilen iz değerlerinin, baca gazı sıcaklığı bilgisiyle birlikte oluşturulan YSA doğruluğuna etkisi irdelenerek en yüksek doğrulukta olan renk kanalı üzerinden λ_t (tahmin edilen) ve λ_g (gerçek) grafikleri verilmiştir. Bu süreçte işlem şeması ise Şekil 4.15'deki gibi gösterilebilir.



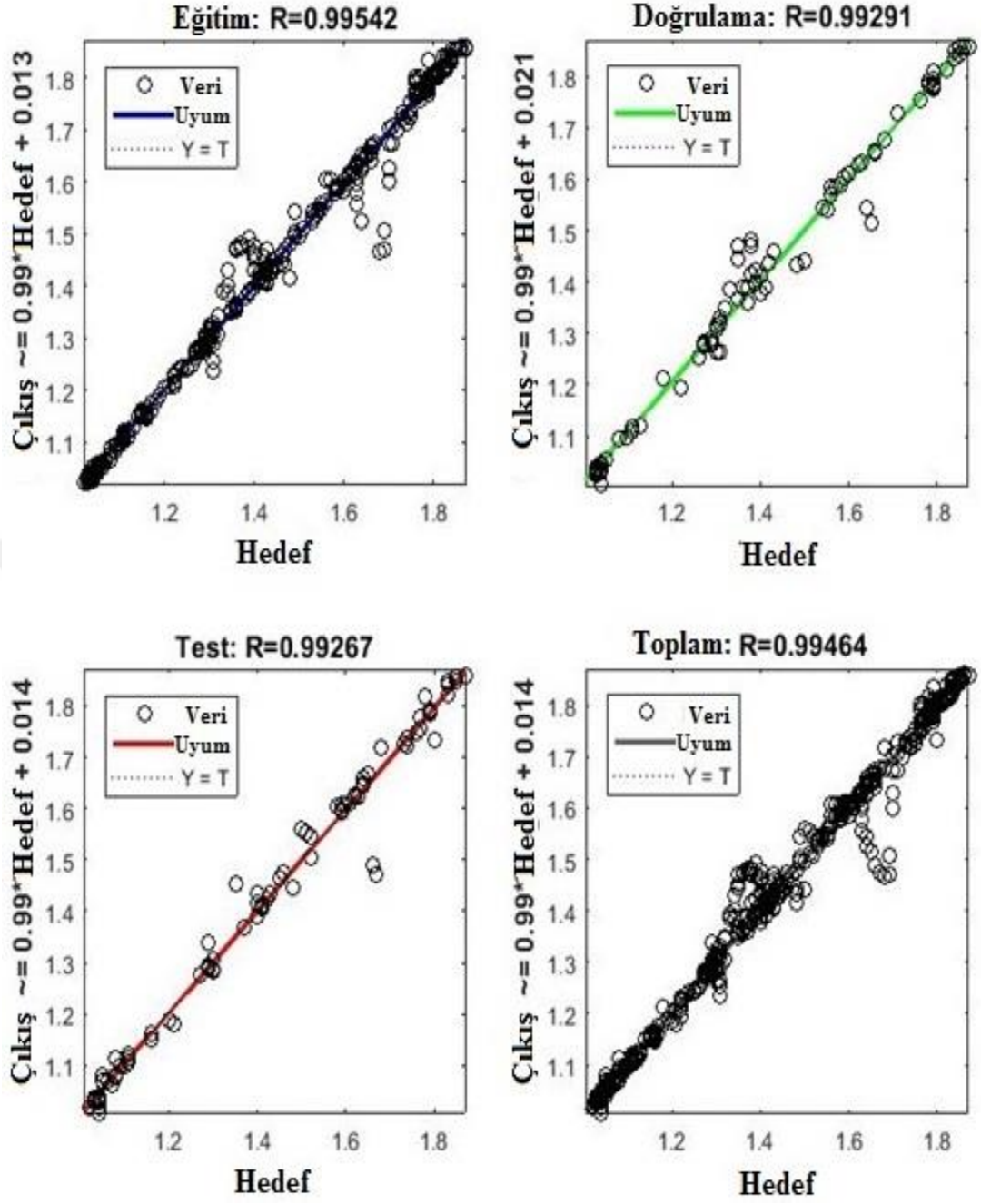
Şekil 4.15. Görüntü bilgisi-baca gazı sıcaklığı ve λ arasında oluşturulan model.

Farklı Renk Kanallarının Yapay Sinir Ağına Etkisi:

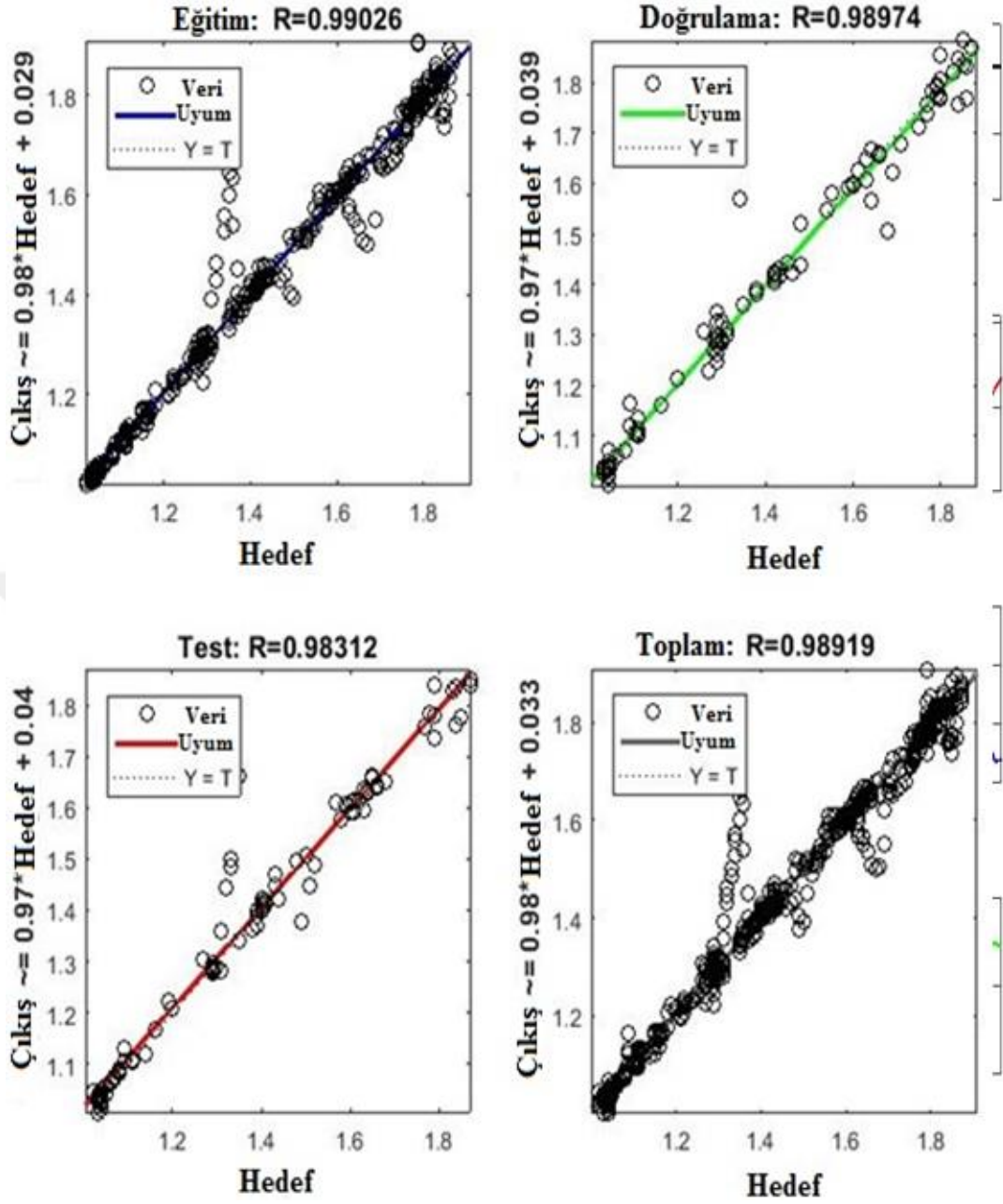
Buradaki deneylerde 870 adetlik görüntü kümesi işlenmiştir. Kırmızı, Yeşil, Mavi ve bunların ortalaması olan Gri ölçekte olacak şekilde görüntülerin iz değerleri elde edilmiştir. Yapay sinir ağı oluştururken verilerin %70'i eğitim için, %15'i doğrulama için, kalan %15'i ise test için kullanılmıştır. Gizli katman sayısı 100 olarak seçilmiştir, eğitim algoritması ise Levenberg-Marquardt olarak belirlenmiştir. Oluşturulan yapay sinir ağı model sonuçları Şekil 4.16, Şekil 4.17 Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmiştir. Tahmin edilen ve gerçek λ değerleri ise Şekil 4.20' de verilmiştir.



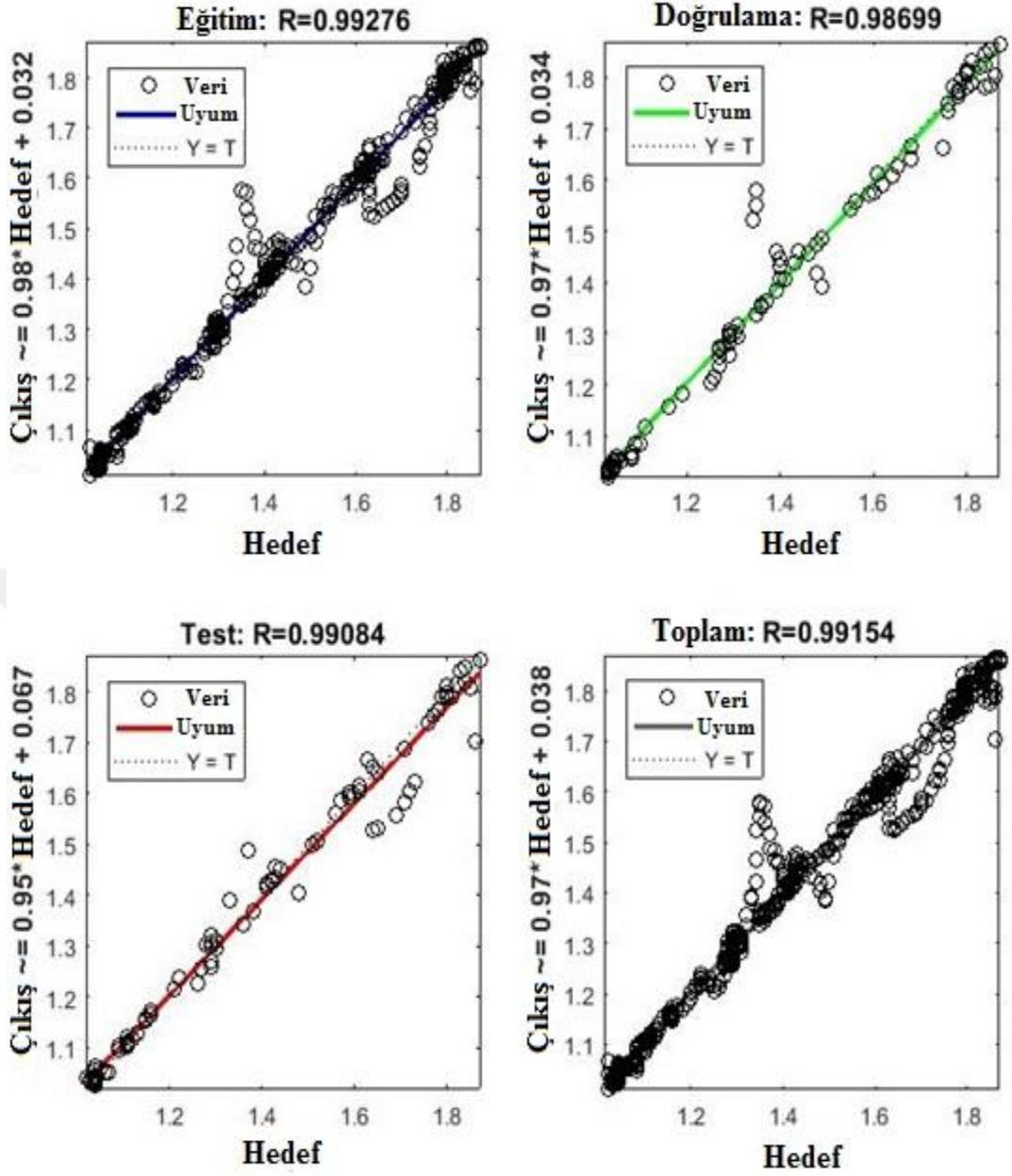
Şekil 4.16. Kırmızı kanalda elde edilen YSA sonuçları.



Şekil 4.17.Yeşil kanalda elde edilen YSA sonuçları.

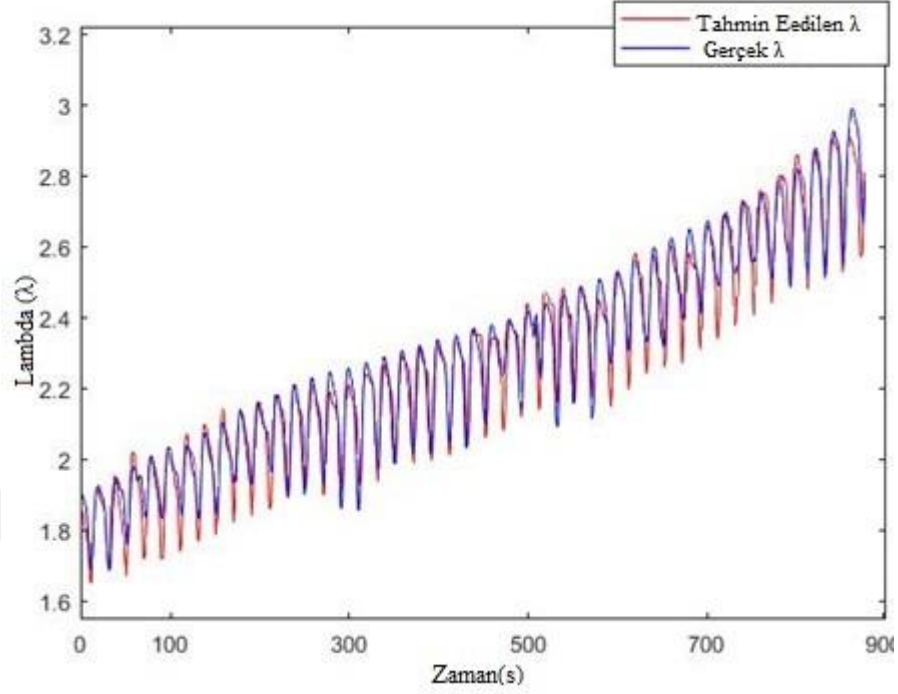


Şekil 4.18. Mavi kanalda elde edilen YSA sonuçları.



Şekil 4.19. Gri ölçekte elde edilen YSA sonuçları.

Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da görüldüğü üzere farklı renk kanallarında çok büyük farkların olmamasıyla beraber, YSA sonucunun en iyi elde edildiği kanal $R=0.99644$ ile kırmızı kanaldır. Şekil 4.20'de ise kırmızı kanalda elde edilen iz değerleri ve baca gazı sıcaklığı bilgisi ile oluşturulan YSA modelinin tahmin sonuçları verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere önerilen yöntemle tahmin işlemi gerçek değerine çok yakın sonuçlar vererek, bu konuda yapılabilecek kapalı çevrim kontrol işlemlerinde kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

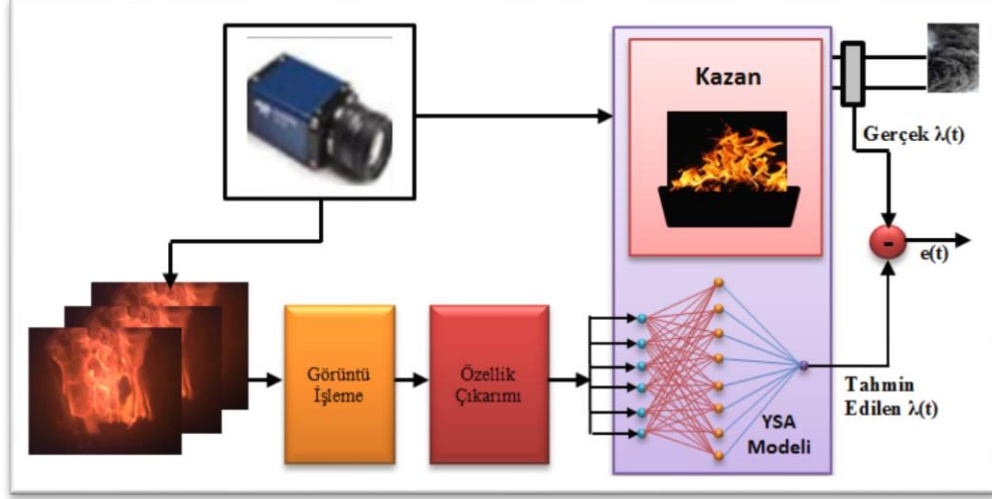


Şekil 4.20. İz ve baca gazı sıcaklığı kullanılarak elde edilen tahmin ve gerçek λ değerleri

Bu sonuçlardan yola çıkarak deney çalışmalarında trace (iz) değeri ve baca gazı sıcaklığı bilgisi alınmak üzere yapılacak olan çalışmalarda en ideal renk kanalı kırmızı kanal olarak belirlenmiştir. Böylece yapılacak olan çalışmalarda, tek kanal üzerinden işlem gerçekleştirerek mikro işlemcinin hesap yükü 1/3 oranında azaltılacağı düşünülmektedir.

4.5.2 Görüntü özellikleri ve hava fazlalık katsayısı ile oluşturulan YSA modeli

Bu bölümde sadece görüntüden farklı yöntemlerle çıkarılan anlamlı bilgiler ile hava fazlalık katsayısı arasındaki YSA modelleri tartışılmıştır. Bu durumda modelin şematik gösterimi Şekil 4.21'deki gibidir.

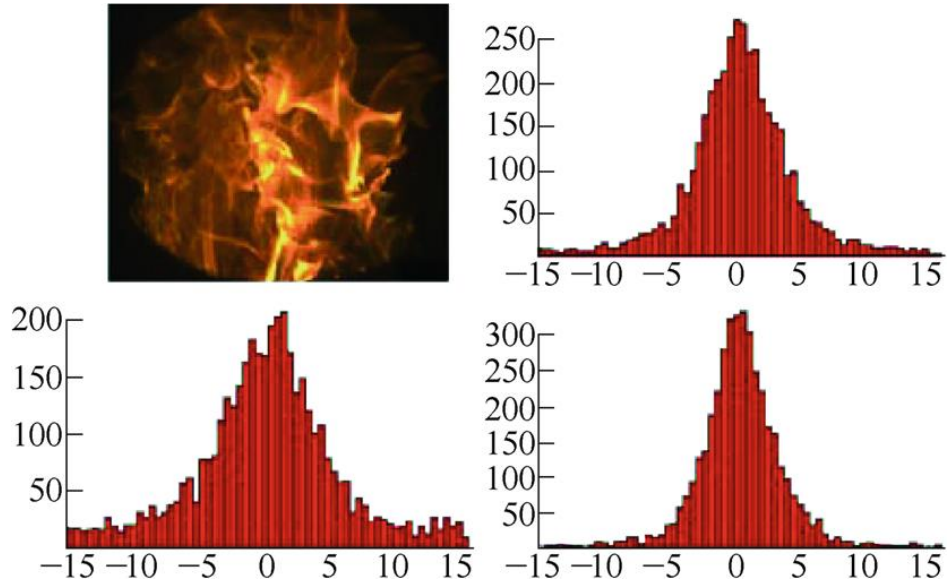


Şekil 4.21.Görüntü bilgisi ve λ arasında oluşturulan model.

Alev görüntülerine ait matris değerleri iki farklı yöntemle (eş oluşum matrisi ve dalgacık) işlenerek girişlerini oluşturduğu farklı yapay sinir ağı modelleri oluşturulmuştur. Bu teknikleri açıklayacak olursak;

Dalgacık:

Şekil 4.22’de dalgacık dönüşümü uygulanarak şeklin yaklaşım hali ve 3 alt bandına ait histogram değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.22. Alev görüntüsüne ait dalgacık çıkışları (yaklaşım görüntüsü ve alt üç banta ait histogram bilgileri)

Alt bantlara ait histogram bilgilerinden de açıkça anlaşılacağı üzere, histogram bilgileri Gauss dağılımına benzerlik göstermektedir. Buradan hareketle her bir görüntünün alt bant histogram bilgilerinden elde edilecek μ (ortalama) ve σ^2 (varyans) değerleri yapay sinir ağına giriş bilgileri olarak tanımlanmıştır. Böylece yapay ağı girişi her bir alt banttan elde edilen iki değer için toplamda 6 değer, çıkış ise hava fazlalık katsayısı bilgisidir (Talu vd., 2017).

Gri seviye eş oluşum matrisi:

Bir görüntü içerisindeki piksel ilişkisini irdeleyen bu yöntem için belirlenen ofset matrisi Denklem 4.3'te gösterilmektedir.

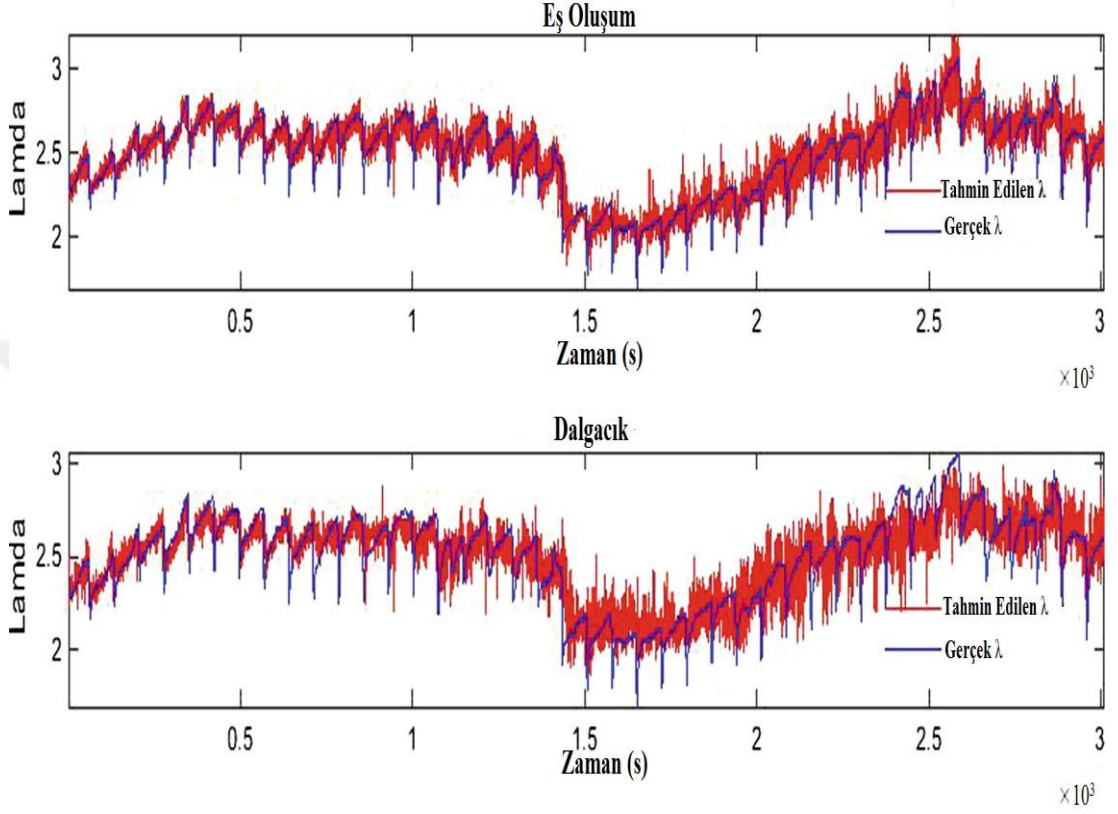
$$\text{Ofset} = \begin{bmatrix} 01; & 02; & 03; & 04 \\ 10; & 20; & 30; & 40 \\ 11; & 12; & 13; & 14 \\ 22; & 33; & 44; & 55 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Böylece her bir görüntü için farklı ilişki türlerini barındıran 16 adet eş oluşum matrisi elde edilmiştir. Daha sonra bu ilişki matrislerinden 4 adet özellik (enerji, zıtlık, kolerasyon ve homojenlik) çıkarılarak YSA'nın girişi oluşturulmuştur. Bu uygulama ile birlikte her bir görüntü için 64 adet özellik elde edilmiştir. Oluşturulan YSA model çıkışı, filtresiz, ortalama filtreli ve median filtreli durumlar için Çizelge 4.2'de gösterilmektedir.

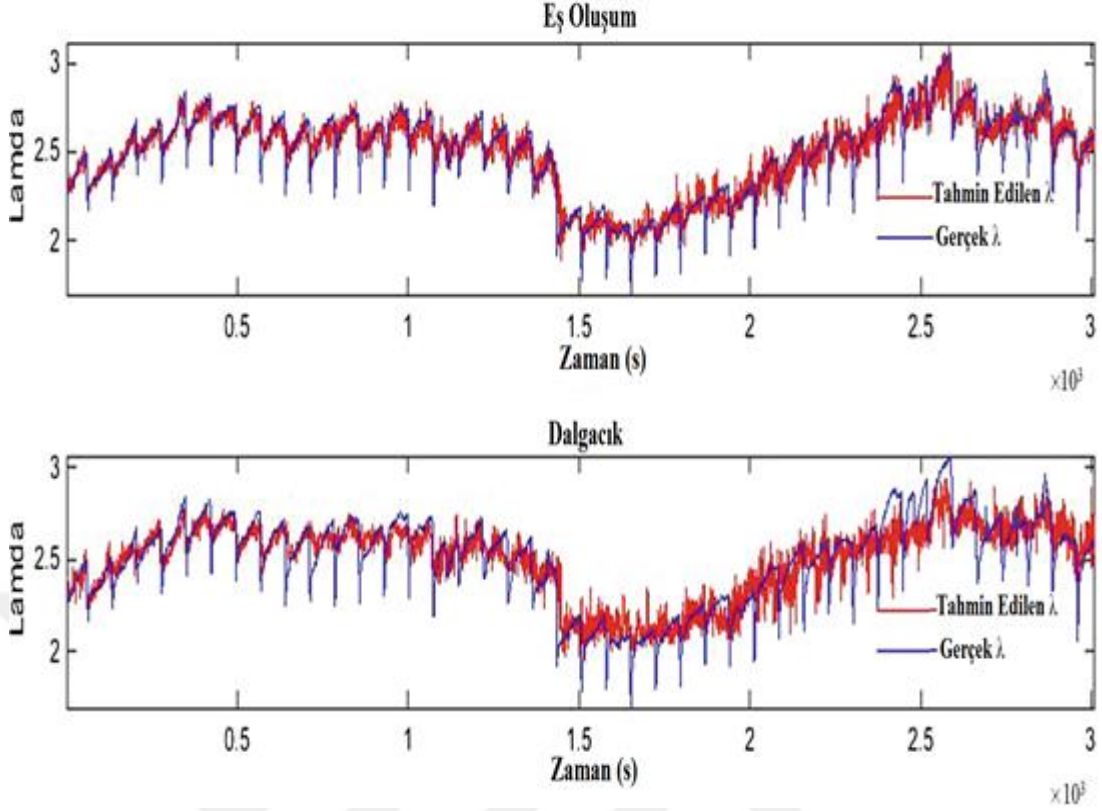
Çizelge 4.2. Dalgacık ve eş oluşum için YSA sonuçları

		YSA Sonuçları					
		Filtresiz		Median Filtreli		Ortalama Filtreli	
Algoritmalar	YSA Girişi	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R
Eş Oluşum	64	0.0890	0.9128	0.0761	0.9341	0.0763	0.9337
Dalgacık	6	0.0905	0.8545	0.1092	0.8855	0.1166	0.8703

Elde edilen bu verilerle eş oluşum matrisi yardımıyla elde edilen YSA yapısının daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Şekil 4.23 ile Şekil 4.24'te ham ve filtreli durumlarıyla eş oluşum matrisinin takip başarısı daha net bir Şekilde görülmektedir.



Şekil 4.23. Filtresiz durumda lamda tahmin sonuçları (dalgacık ve eş oluşum matrisi yöntemleri için)



Şekil 4.24. Median filtresi uygulanmış durumda lamda tahmin sonuçları (dalgacık ve eş oluşum matrisi yöntemleri için) (Talu vd., 2017).

4.6 Kontrolcü Tasarımları

Yakıcının farklı koşullarda yakılması sonucunda elde edilen verilerle yapılan bu çalışmalarda; yakıcıya olan hava beslemesi ile yakıcıdan elde edilen hava fazlalık katsayısı bilgileri arasında uygulanan sistem tanımlama işlemleri sonucunda yakıcıya ait bir transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Hava fazlalık katsayısının sistem çıkışına uygulanması ile sanal gerçeklik sağlanarak kontrolcü tasarım işlemleri gerçekleştirilmiştir.

4.6.1 Sistem tanımlama

Sistem davranışlarını en iyi şekilde temsil etmesi amacıyla birden fazla yöntem uygulanarak sistem tanımlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemle beraber doğruluğu en yüksek olan sistem seçilerek kontrol işlemlerine ilgili model üzerinden devam edilmiştir. Bu doğrultuda, Matlab programının “System Identification” araç kutusu ile farklı yöntemlerle elde edilen sistemler ve bu sistemlere ait doğruluk

değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmektedir. Elde edilen modellerin ve gerçek sistemin çıkışları ise Şekil 4.25'te gösterilmektedir.

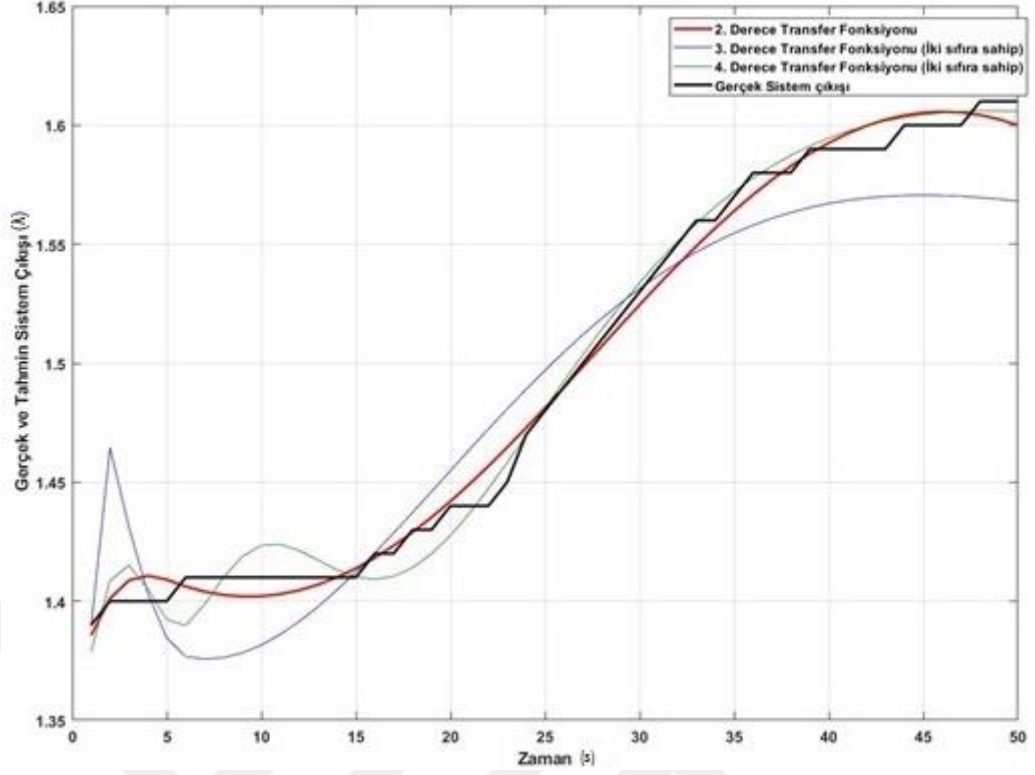
Çizelge 4.3.Sistem Tanımlama ile elde edilen model doğrulukları

Yöntem	Yöntemin Opsiyonları	Doğruluk (%)	FPE
<i>Transfer Fonksiyonu Tahmini</i>	2.derece sistem	91.55	5.6*10⁻⁵
	3. derece sistem (iki adet sifıra sahip)	70.2	8.2*10 ⁻⁴
	4. derece sistem (2 adet sifıra sahip)	90.08	9.9*10 ⁻⁴
	4. derece sistem (3 adet sifıra sahip)	90.23	1*10 ⁻⁴
<i>Durum-Uzay Modeli Tahmini</i>	4. derece	69.28	6.7*10 ⁻⁵
	5.derece	67.2	7.15*10 ⁻⁵

Burada FPE (son tahmin hatası) modelin çıktıklarına ait model uydurma hatasını simgelemektedir ve Denklem 4.3 ile ifade edilir.

$$FPE = V_n \left(1 + \frac{2p}{N-p} \right) \quad (4.3)$$

Burada N veri noktaları sayısı, V_n tahmin hatasını veya artık kareler toplamını ve p ise modeldeki parametre sayısını ifade etmektedir.



Şekil 4.25.Elde edilen tahmin model cevapları

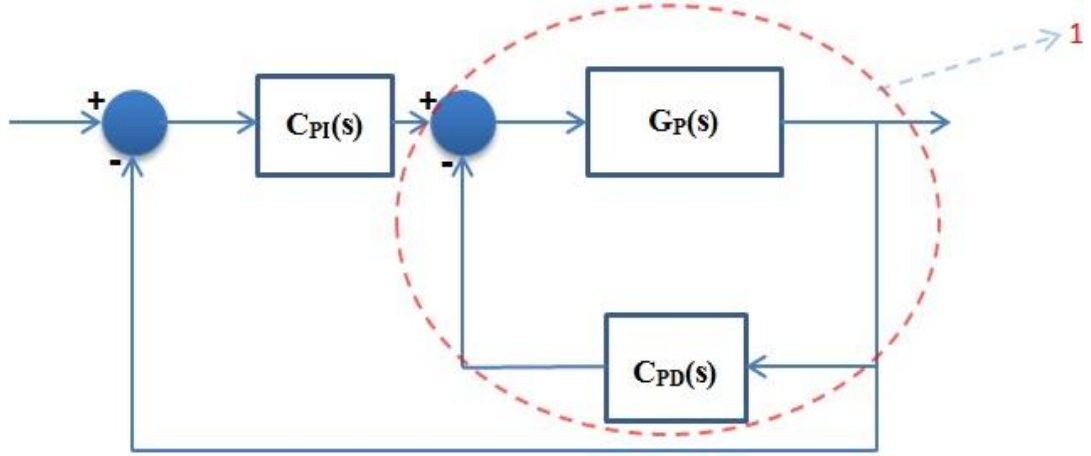
Şekil 4.25'te yüksek doğruluklu üç modelin ve gerçek sistemin cevapları gösterilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere ikinci dereceden transfer fonksiyonu ile ifade edilen modele ait çıkışlar gerçek verilerle en iyi uyumu açık şekilde ortaya koymuştur. Transfer fonksiyonunun derecesi yükseltildikçe doğrulukta nispeten düşüş gözlenmiştir. Bu sebeple, yapılan sistem tanımlama işlemleri sonucunda Denklem 4.4'de verilen transfer fonksiyonu en yüksek doğruluğa sahip olduğu için seçilerek kontrolcü tasarım işlemlerine bu transfer fonksiyonu üzerinden devam edilmiştir.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\lambda(s)}{u(s)} = \frac{-0.004518s+0.01104}{s^2+0.002346s+0.007333} \quad (4.4)$$

4.6.2 PI-PD kontrol uygulaması

Bu kısımda sistem tanımlama ile elde edilen transfer fonksiyonuna ağırlıklı geometrik merkez metodu uygulanarak PI-PD kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak kontrol sistemini kararlı kılan tüm PD kontrolör parametreleri kararlılık sınır eğrisi metodu kullanılarak hesaplanmıştır. (k_f , k_d) düzleminde çizilen

eğrinin ağırlıklı geometrik merkezi hesaplanarak PD kontrolcü için parametre çifti elde edilmiştir. Daha sonra tekrar sınır eğrisi metodu kullanılarak sistemi kararlı kılan PI kontrolcü parametreleri (k_p, k_i) düzleminde çizdirilmiş ve bu bölge içerisinde ağırlıklı geometrik merkez uygulaması ile PI kontrolcü parametre çifti elde edilmiştir. PI-PD kontrolcü blok şeması Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Burada 1 ile gösterilen kısım iç (PD kontrol) çevrimini göstermektedir.



Şekil 4.26. PI-PD kontrolcü şeması

$$G_p(s) = \frac{\lambda(s)}{u(s)} = \frac{-0.004518s+0.01104}{s^2+0.002346s+0.007333} \text{ olduğu bilinmektedir.}$$

İç çevrim için:

$$G_{iç}(s) = \frac{G_p(s)}{1+G_p(s)C_{PD}(s)}$$

$$= \frac{-0.004518s+0.01104}{s^2+0.002346s+0.007333} \times \frac{(s^2+0.002346s+0.007333) \times (s+100)}{(s^2+0.002346s+0.007333) \times (s+100) + (-0.004518s+0.01104) \times ((k_f+k_d \times 100) + k_f \times 100)}$$

$$= \frac{-0.004518s^2 - 0.4518s + 0.1104s + 1.104}{s^3 + 100.002346s^2 + 0.0241933s + 0.7333 - 0.04518s^2 k_f - 0.4518k_d s^2 - 0.44076k_p s + 1.104k_f s + 1.104k_p} \quad (4.5)$$

$s = j\omega$ değişimi uygulandıktan sonra, transfer fonksiyonunun kararlılığı payda kısmı 0'a eşitlenerek;

$$= -jw^3 - 100.002346w^2 + 0.241933jw + 0.7333 + 0.4518w^2k_f + 0.4518w^2k_d - 0.44076jwk_f + 1.104k_fjw + 1.104k_p = 0 \quad (4.6)$$

Elde edilir. Daha sonra 'j'li ve diğer terimler birbirinden ayrılır.

j'li terimler;

$$-jw^3 + 0.241933jw - 0.44076k_fjw + 1.104k_djw = 0 \quad (4.7)$$

Diğer terimler;

$$-100.02346w^2 + 0.7333 + 0.4518w^2k_d + 1.104k_f = 0 \quad (4.8)$$

olarak elde edilir. Elde edilen sonuçlar matris biçiminde yazılarak belirlenen aralıktaki 'w' değerleri için k_f ve k_d değer kümesi elde edilir.

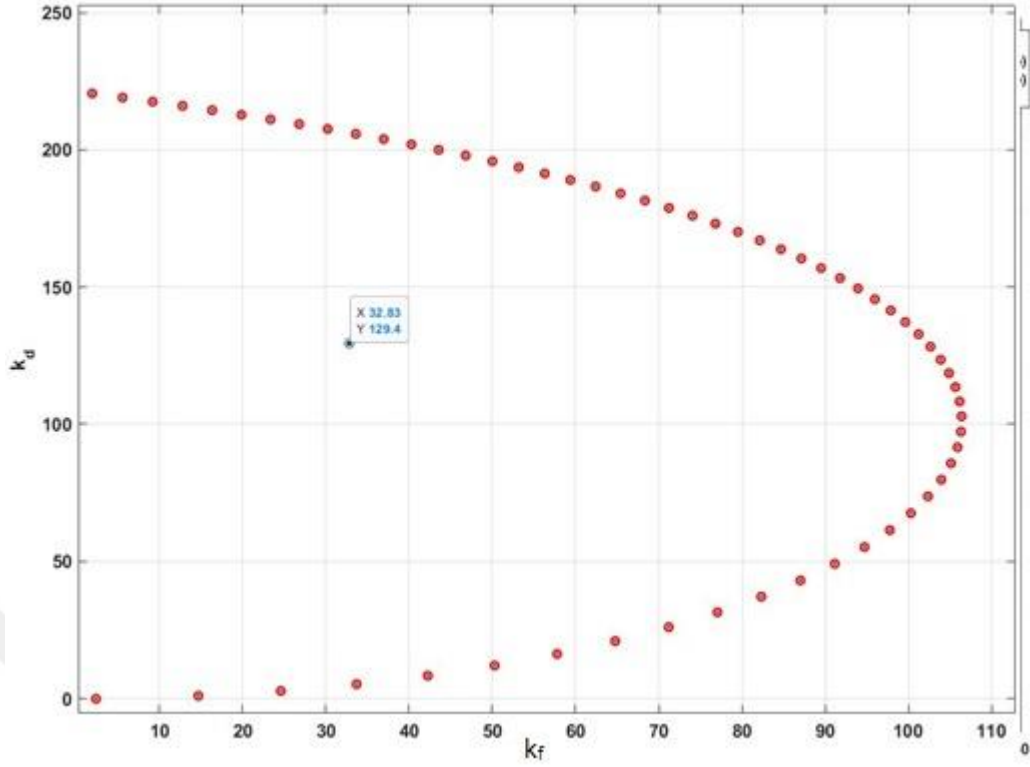
$$\begin{bmatrix} -0.4476w & 1.104 \\ 1.104w & 0.4518w^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_f \\ k_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -w^3 + 0.241933 \\ -100.002346w^2 + 0.7333 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

w'nın 0.1 aralık değerleri için k_f - k_d grafiği çizdirilip Denklem 4.10 ve 4.11 uygulanırsa Şekil 4.27'deki gibi kararlılık bölgesi içindeki ağırlıklı geometrik merkez için iç çevrim kontrolcü parametre çifti elde edilmiş olur.

$$K_d = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n k_{fi} \quad (4.10)$$

$$K_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{pi} \quad (4.11)$$

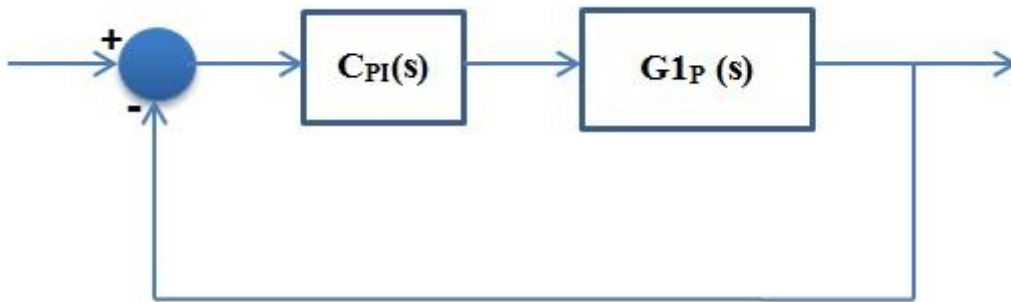
Buradan $K_d = 129.4$ ve $K_f = 32.83$ olarak bulunur.



Şekil 4.27.İç çevrime ait PD kontrolcü parametreleri kararlılık bölgesi ve AGM noktası.

Tüm sistem için:

İç çevrimdeki PD kontrolcü parametreleri hesaplandıktan sonra sistem Şekil 4.28'teki hali almıştır.



Şekil 4.28. İndirgenmiş sistem blok diyagramı.

$$G_{1p}(s) = \frac{-0.004518s^2 - 0.44076s + 1.106}{s^3 + 42.4122s^2 + 128.63s + 36.977} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned}
G_{Tüm}(s) &= \frac{C_{PI}(s)G_{1p}(s)}{1+C_{PI}(s)C_{1p}(s)} \\
&= \frac{\frac{k_p s + k_i}{s} \times \frac{-0.004518s^2 - 0.44076s + 1.104}{s^3 + 41.4122s^2 + 128.63s + 36.977}}{1 + \left(\frac{k_p s + k_i}{s} \times \frac{-0.004518s^2 - 0.44076s + 1.104}{s^3 + 41.4122s^2 + 128.63s + 36.977} \right)} \\
&= \frac{-0.004518s^3 k_p - 0.4407s^2 k_p + 1.104s k_p - 0.004518s^2 k_i - 0.44076s k_i + 1.104k_i}{s^4 + 41.4122s^3 + 128.63s^2 + 36.977s - 0.004518s^3 k_p - 0.4407s^2 k_p + 1.104s k_p - 0.004518s^2 k_i - 0.44076s k_i + 1.104k_i}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$s = jw$ değişimi uygulandıktan sonra, transfer fonksiyonunun kararlılığı payda kısmı 0'a eşitlenerek;

$$w^4 - 41.4122jw^3 - 128.63w^2 + 36.977jw + 0.004518k_p jw^3 + 0.4407k_p w^2 + 1.104jwk_p + 0.004518k_i w^2 - 0.44076jwk_i + 1.104k_i = 0 \tag{4.14}$$

Elde edilir. Daha sonra 'j'li ve diğer terimler birbirinden ayrılır.

j'li terimler;

$$-41.4122jw^3 + 36.977jw + 0.004518k_p jw^3 + 1.104jwk_p - 0.44076jwk_i = 0$$

Diğer terimler;

$$w^4 - 128.63w^2 + 0.4407k_p w^2 + 0.004518k_i w^2 + 1.104k_i = 0$$

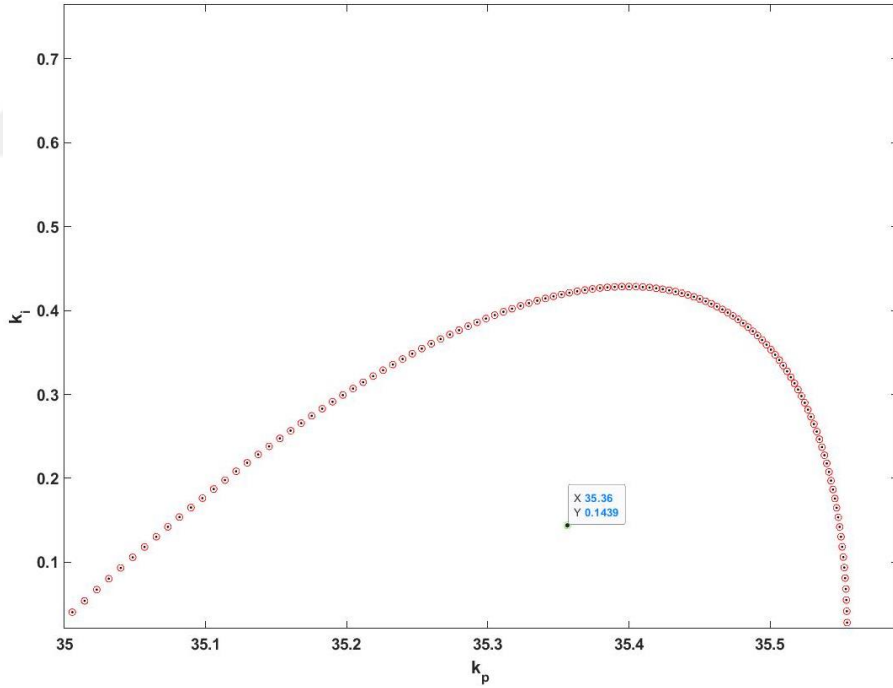
Olarak elde edilir. Elde edilen sonuçlar matris biçiminde yazılarak belirlenen aralıktaki 'w' değerleri için k_p ve k_i değer kümesi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} 0.004518w^3 + 1.104w & 0.4407w^2 \\ -0.44076w & 0.004518w^3 + 1.104 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_p \\ k_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -41.4122w^3 + 36.977w \\ w^4 - 128.63w^3 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

w'nın 0.1 aralık değerleri için k_p - k_d grafiği çizdirilip Denklem 4.16 ve 4.17 uygulanırsa Şekil 4.29'daki gibi kararlılık bölgesi içindeki ağırlıklı geometrik merkez için iç çevrim kontrolcü parametre çifti elde edilmiş olur.

$$K_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{ii} \quad (4.16)$$

$$K_p = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n k_{pi} \quad (4.17)$$



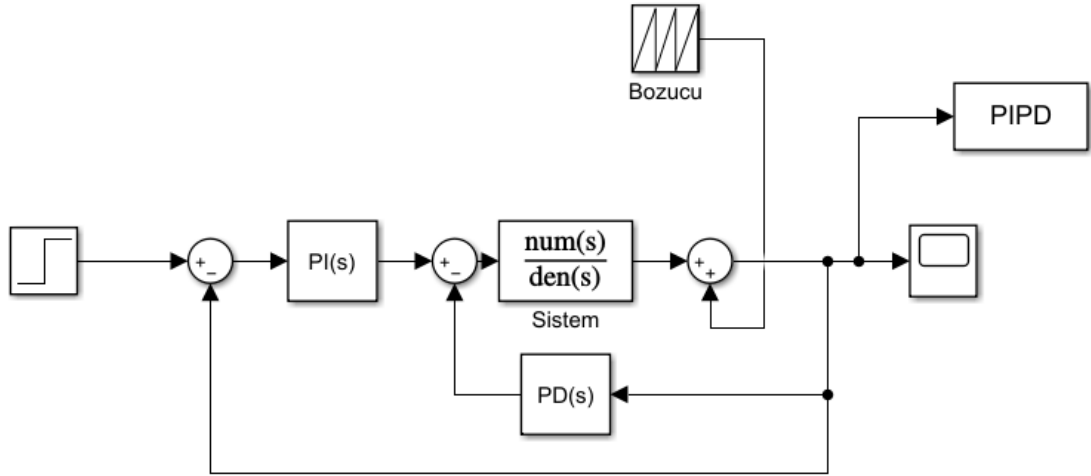
Şekil 4.29. PI kontrolcü parametreleri kararlılık bölgesi ve AGM noktası.

Transfer fonksiyonuna Ağırlıklı Geometrik Merkez yöntemi uygulanarak elde edilen PI-PD kontrolcü parametreleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. AGM yöntemi ile elde edilen Kontrolcü Parametreleri

PD		PI	
K_f	32.83	K_p	35.36
K_d	129.4	K_i	0.1439

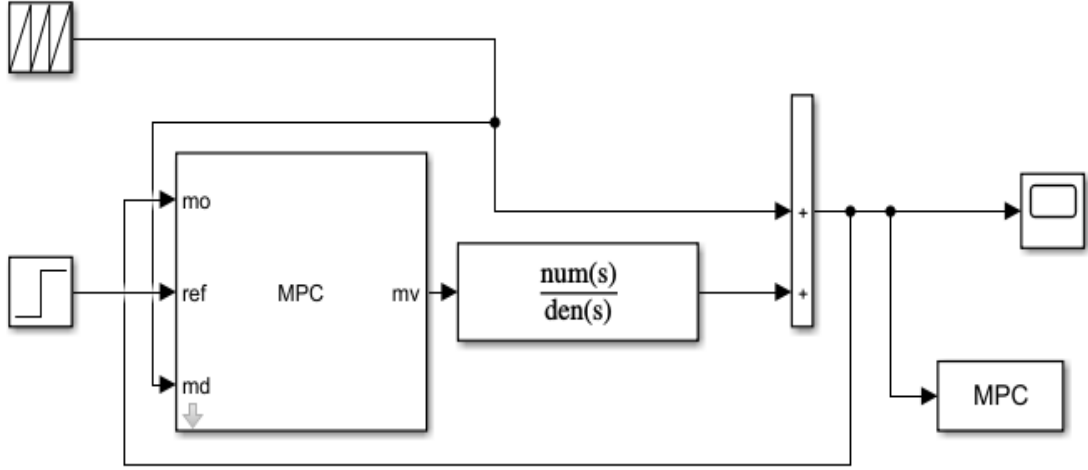
Kontrolcü parametreleri hesaplanan PI-PD kontrolcüsüne daha sonra tahmin edilen lamda değerleri bozucu giriş olarak verilmiştir. Sistemin simulink modeli Şekil 4.30'de gösterilmektedir.



Şekil 4.30. PI-PD Simulink modeli (bozucu giriş ile)

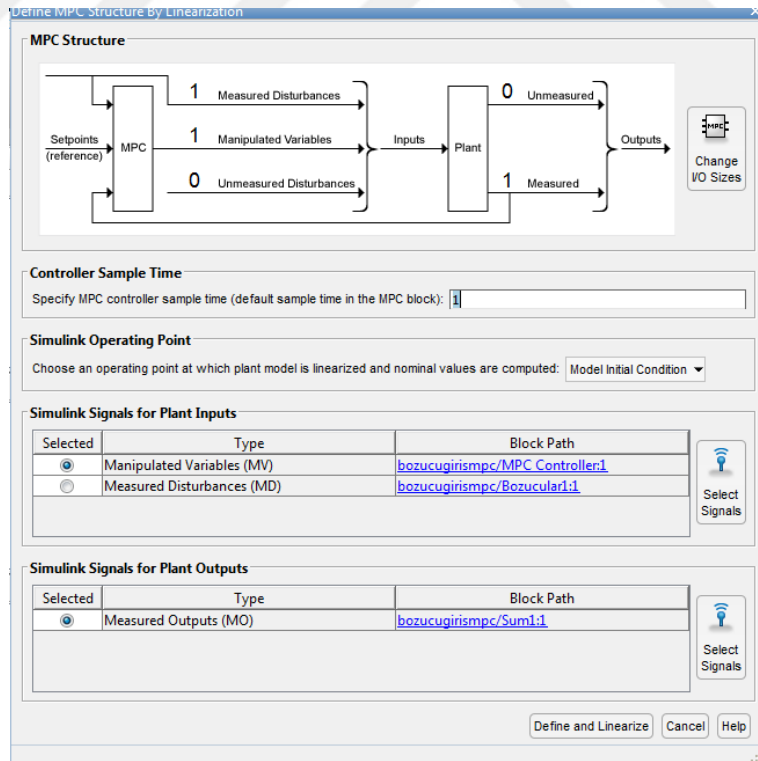
4.6.3 Model öngörülü kontrol uygulaması

Bu bölümde uygulanan model öngörülü kontrole ait simulink diyagramı Şekil 4.31'de gösterilmektedir.



Şekil 4.31. Model öngörülü kontrol simulink modeli (bozucu giriş ile)

MPC (Model Öngörülü Kontrol) çalışmasına öncelikle yapı tanımlama ile başlanır. Burada yapı tanımlama (Structure identification) için örnekleme zamanı 1 sn olarak seçilmiştir (Bozucu girişlerin örnekleme zamanı ile eş tutulmuştur). Bozucu giriş, sistem girişi ve çıkışı da ara yüze tanımlanarak kontrol işlemine geçilmiştir. Yapı tanımlama sayfası Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



Şekil 4.32. MPC yapı tanımlama ara yüzü

Daha sonra tahmin ufku 10, kontrol ufku ise 3 olarak belirlenerek kontrolcü tasarım işlemine devam edilmiştir.

4.6.4 Gürbüz H_∞ kontrol uygulaması

Sisteme ait transfer fonksiyonunun payda kısmındaki fiziksel terimler Denklem 4.18'de verildiği gibi hesaba katılabilir.

$$m = \bar{m}(1 + p_m \delta_m),$$

$$c = \bar{c}(1 + p_c \delta_c),$$

$$k = \bar{k}(1 + p_k \delta_k) \quad (4.18)$$

Sisteme ait transfer fonksiyonuna bakıldığı zaman, $\bar{m} = 1$, $\bar{c} = 0.002346$ ve $\bar{k} = 0.007333$ değerleri m , c ve k fiziksel parametrelerinin nominal değerlerini ifade etmektedir. p_m , p_c , p_k ve δ_m , δ_c , δ_k terimleri ise bu fiziksel parametrelerin muhtemel bozulmalarını (pertürbasyonlarını) ifade etmektedir. Bu durumda sisteme ait karakteristik denklem $ms^2 + cs + k$ biçiminde olduğu açıkça görülmektedir. Bu gösterim ise bilindiği üzere, temel kütle-sönüm-yay sisteminin karakteristik denklemidir.

Burada, $p_m = 0.1$, $p_c = 0.1$, $p_k = 0.1$ ve $-1 \leq \delta_m, \delta_c, \delta_k \leq 1$ olarak ele alınmıştır. Bu durumda m , c ve k parametrelerinde $\pm\%10$ 'luk değişim göz önünde bulundurulmuştur. Bu belirsiz değerlerin ise hesaba lineer kesirsel dönüşümler (*Linear Fractional Transforms*) ile hesaba katılabildiğinden Bölüm 2'de bahsedilmişti. Daha sonra bu üç fiziksel parametrenin üst (upper) lineer kesirsel dönüşüm ifadeleri ve buna ait matris ifadeleri çıkarılmış ve Denklem 4.19-4-21 arasında verilmiştir

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{\bar{m}(1 + p_m \delta_m)} = F_u(M_{mi}, \delta_m),$$

$$M_{mi} = \begin{bmatrix} -p_m & \frac{1}{\bar{m}} \\ -p_m & \frac{1}{\bar{m}} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

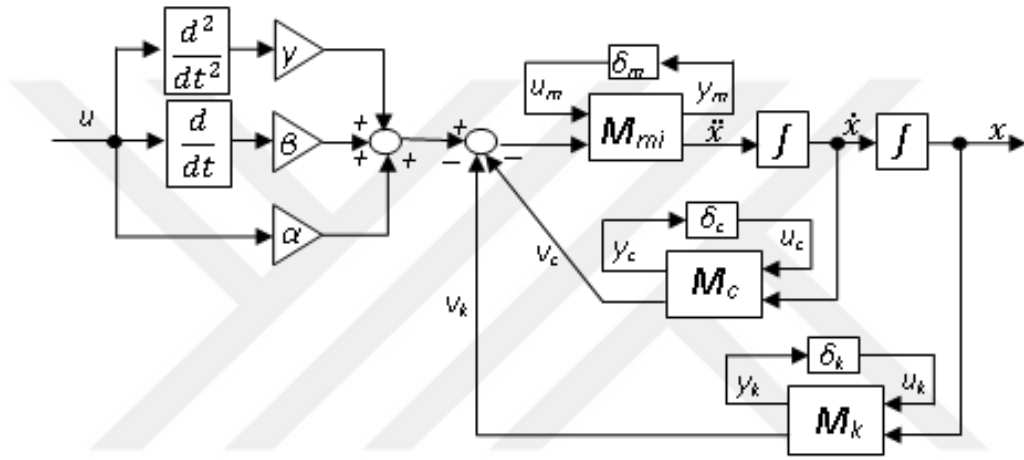
$$c = \bar{c}(1 + p_c \delta_c) = F_u(M_c, \delta_c),$$

$$M_c = \begin{bmatrix} 0 & \bar{c} \\ p_c & \bar{c} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$k = \bar{k}(1 + p_k \delta_k) = F_u(M_k, \delta_k),$$

$$M_k = \begin{bmatrix} 0 & \bar{k} \\ p_k & \bar{k} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Parametrelerin blok diyagrama eklenmesiyle Şekil 4.33 elde edilir. Böylece Denklem 4.4'teki modelin sarsılmış durum uzay modeli elde edilir.



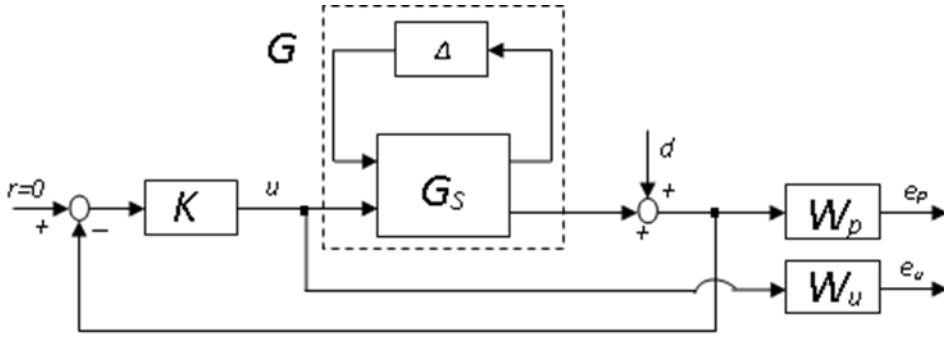
Şekil 4.33. Belirsiz parametrelili sistemin blok diyagramı

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dots \\ y_m \\ y_c \\ y_k \\ \dots \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & | & 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ -\frac{\bar{k}}{m} & -\frac{\bar{c}}{m} & | & -p_m & -\frac{p_c}{m} & -\frac{p_c}{m} & | & \frac{1}{m} \\ \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots & | & \dots \\ -\frac{\bar{k}}{m} & -\frac{\bar{c}}{m} & | & -p_m & -\frac{p_c}{m} & -\frac{p_k}{m} & | & \frac{1}{m} \\ 0 & \bar{c} & | & 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ \bar{k} & 0 & | & 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots & | & \dots \\ 1 & 0 & | & 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_m \\ u_c \\ u_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_m & 0 & 0 \\ 0 & \delta_c & 0 \\ 0 & 0 & \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_m \\ y_c \\ y_k \end{bmatrix}$$

$$(4.22)$$

Bu işlemlerden sonra sistemin genel görünümü Şekil 4.34'deki halini alır.



Şekil 4.34. Genelleştirilmiş sistem yapısı

Tasarlanan kontrolcünün sistemi tüm durumlar için kararlı kılması ve gerekli kapalı çevrim performansının istenen seviyede olması gerekmektedir. Denklem 4.23'te bu çalışma için arzu edilen kapalı çevrim performans kriteri tanımlanmıştır. Burada, kontrolcüyü K ifade etmek üzere, seçilen ağırlık fonksiyonlarının W_p ve W_u olduğu bilinmektedir. Ve Denklem 4.24'teki gibi seçilmiştir.

$$\left\| \begin{bmatrix} W_p S(G_S) \\ W_u K S(G_S) \end{bmatrix} \right\|_{\infty} < 1 \quad (4.23)$$

$$W_p = \frac{15s^2 + 500s + 14 \cdot 10^4}{s^2 + 0.018s + 8172.2}$$

$$W_u = 1 \cdot 10^{-3} \quad (4.24)$$

MATLAB programına ait Robust Kontrol araç kutusunun kullanılması ile elde edilecek K kontrolcüsünün, d 'den e_u ve e_p 'ye olan transfer fonksiyonlarına ait sonsuz normunun belirsizlik transfer matrisi olarak ifade edilen Δ 'nın tüm durumları için minimuma çekmesi beklenmektedir. Tasarlanan kontrolcüye ait durum uzayı (state space) matrisleri, Denklem 4.25'te verilmiştir.

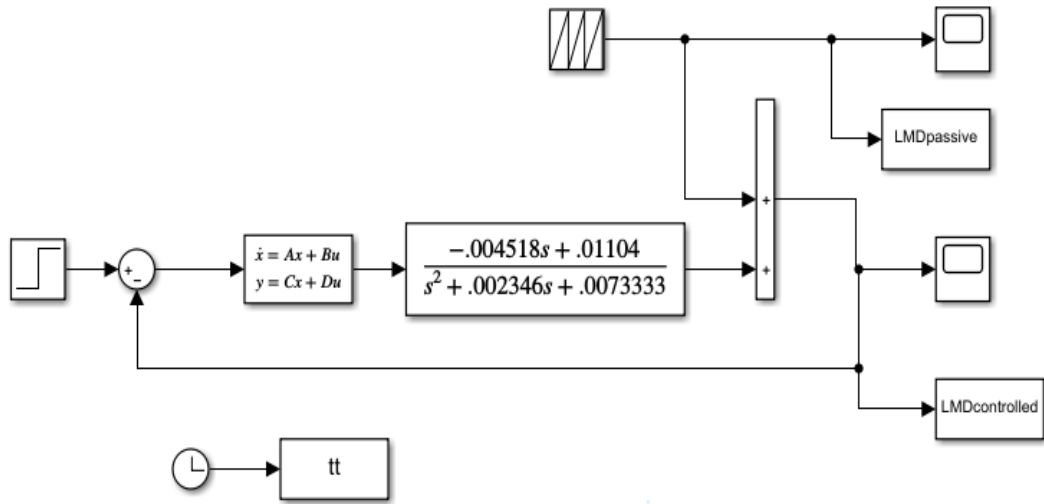
$$A_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2.1713 & -2.0926 & -3.53 & -0.002 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0025 & -0.0860 & -22.4583 \\ 0 & 0 & 0.0860 & -0.0001 & 3.8047 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2.4436 \end{bmatrix}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C_k = [-6.8432 \quad -6.6101 \quad -11.1629 \quad -0.0064 \quad 0]$$

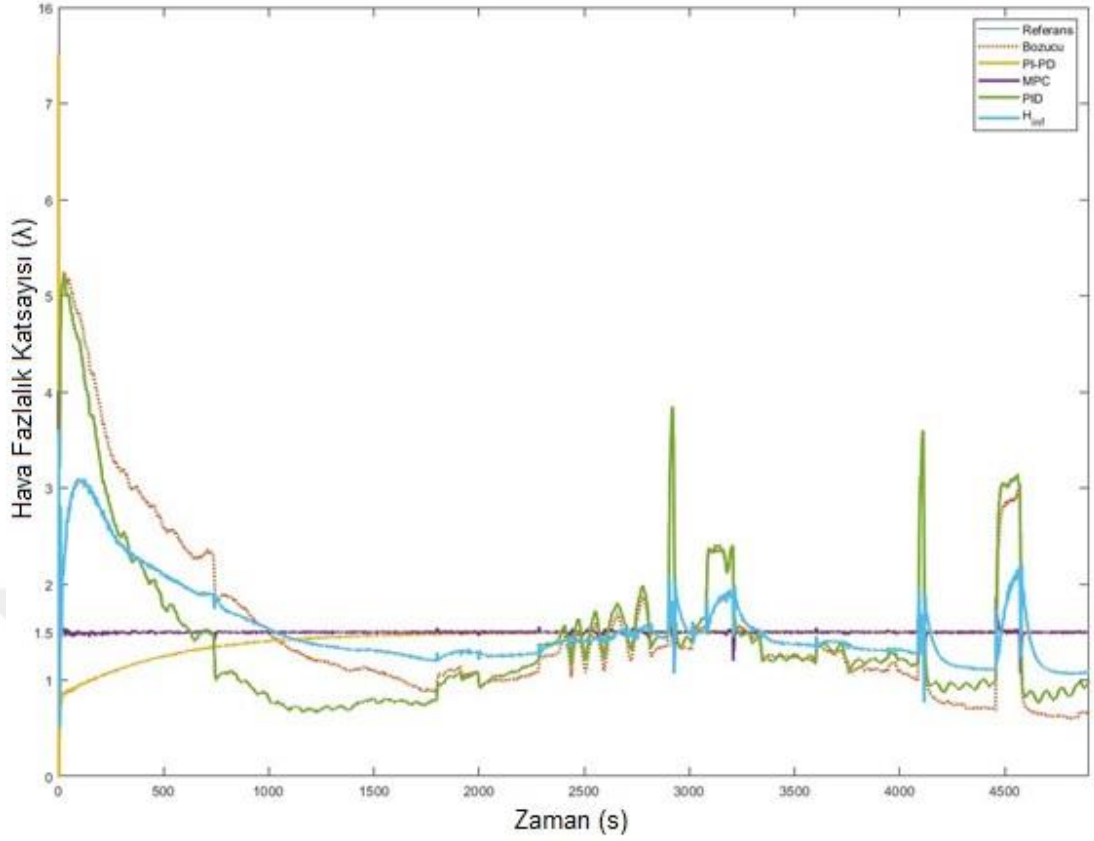
$$D_k = [0] \quad (4.25)$$

Parametreleri elde edilen kontrolcünün sisteme bağlantısı ise Şekil 4.35'teki blok diyagramı ile gösterilebilir.



Şekil 4.35. H_∞ Kontrol blok diyagramı

Bununla beraber Matlab Simulink ortamında otomatik olarak (Ziegler-Nicholes) ayarlanan bir PID kontrol işlemi de sisteme ayrıca uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda elde edilen PI-PD, MPC, H_∞ ve PID kontrolcülerinin sonuçları ise Şekil 4.36'da gösterilmektedir.

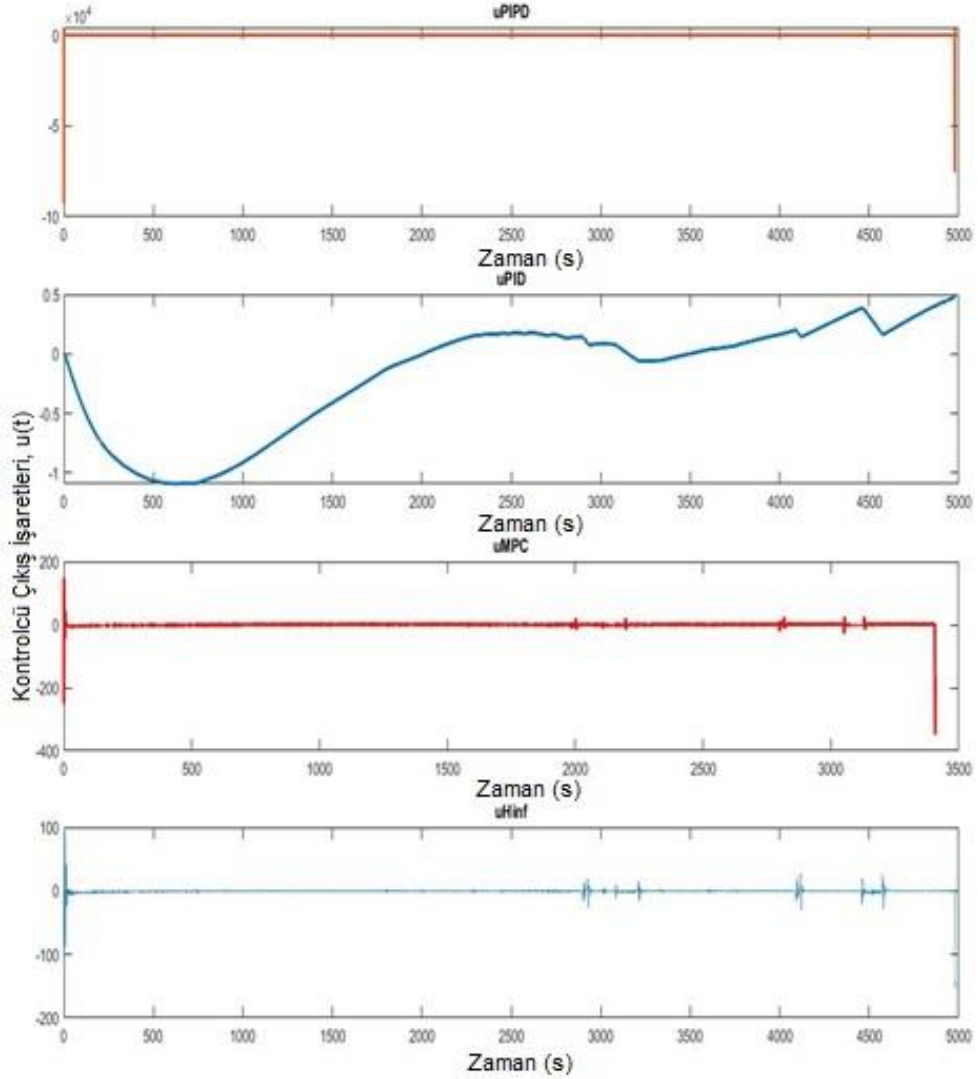


Şekil 4.36. Farklı kontrol yöntemleri ile sistem cevabı

Şekil 4.36'da da açıkça görüleceği üzere ağırlıklı geometrik merkez yöntemiyle tasarlanan PI-PD kontrolcü bozucu reddi performansı olarak en iyi sonucu ortaya koymuştur. Ancak referans işarete oturma süresi bakımından ise kötü bir performans göstermiştir. Model öngörülü kontrolcü ise, bozucu kuvvetlerin yüksek olduğu kısımlarda PI-PD kontrolcüyle birbirine yakın cevap vermiş ancak diğer bölgelerde iyi bir referans izleme ve bozucu reddi performansı göstermiş olup referans işarete oturma süresi ise dikkat çekici derecede kusursuzdur. H_{∞} kontrolcü bozucu kuvvetlerin maksimum olduğu noktalarda nispeten iyi performans göstermiş ancak referans takip sürecinde MPC ve PI-PD kontrolcü yapılarının gerisinde kalmıştır. MATLAB Simulink ortamında otomatik olarak ayarlanan PID kontrolcü ise tasarlanan kontrolcülerin oldukça gerisinde kalmıştır.

Herbir kontrolcüye ait çıkış sinyalinin büyüklüğü ise Şekil 4.37'de gösterilmektedir. Bu durum ise kontrol işlemi için gerekli enerji miktarını belirtmektedir. Buradan da açıkça görüleceği üzere AGM yöntemi ile tasarlanan PI-

PD kontrolcünün performansının çok iyi olmasına rağmen kontrolcü çıkış sinyali değerinin oldukça yüksek olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.37. Kontrolcü çıkış sinyalleri

4.7 Kharitonov Polinomları

Tasarlanan kontrolcülerin gürbüzlük açısından değerlendirilebilmesi için, sistem tanımlama ile elde edilen nominal transfer fonksiyonun Kharitonov polinomları elde edilerek bu polinomlarla oluşturulan transfer fonksiyonlarına tasarlanan kontrolcüler uygulanmıştır. Burada pay ve payda kısımlarında ayrı ayrı 4'er tane fonksiyondan bahsedilebilir. Bu fonksiyonlarla ise 16 adet transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Payda kısmına ait Kharitonov polinomları Denklem 4.26 ve 4.29 arasında verilmiştir.

$$d_1(s) = 0.0065997 + 0.0021114s + 1.1s^2 \quad (4.26)$$

$$d_2(s) = 0.0065997 + 0.0025806s + 1.1s^2 \quad (4.27)$$

$$d_3(s) = 0.0080633 + 0.0021114s + 0.9s^2 \quad (4.28)$$

$$d_3(s) = 0.0080663 + 0.0025806s + 1.1s^2 \quad (4.29)$$

Pay kısmına ait Kharitonov polinomları ise Denklem 4.30 ve 4.33 arasında verilmiştir.

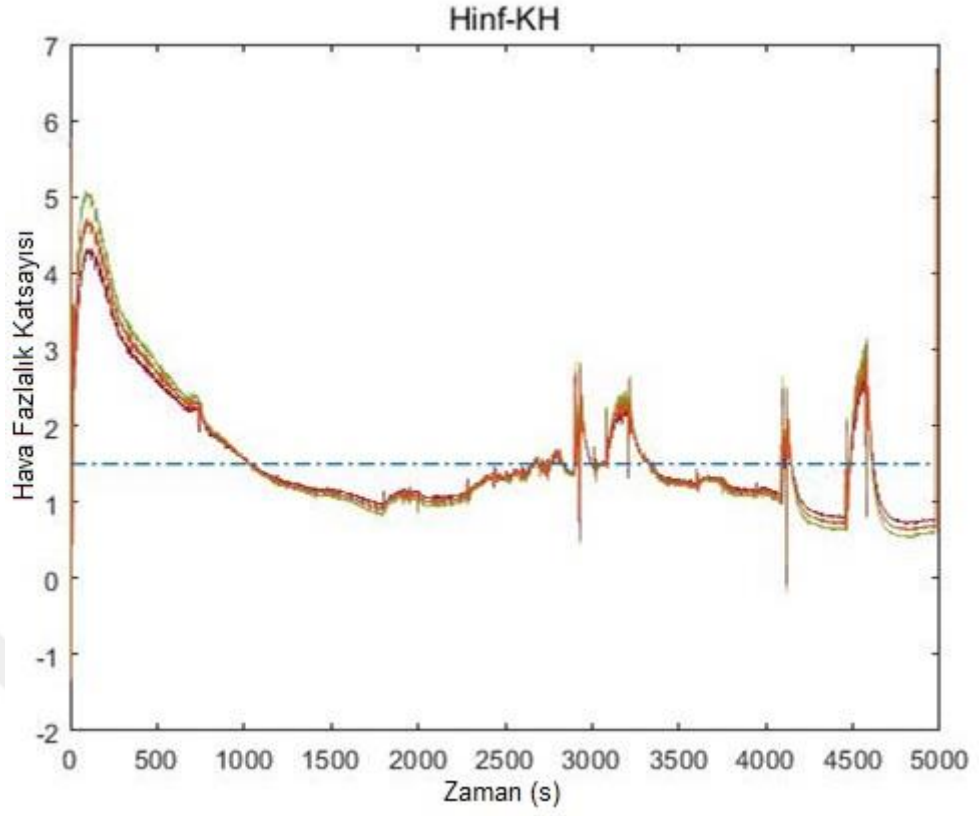
$$n_1(s) = 0.009936 - 0.004066s \quad (4.30)$$

$$n_2(s) = 0.01214 - 0.004066s \quad (4.31)$$

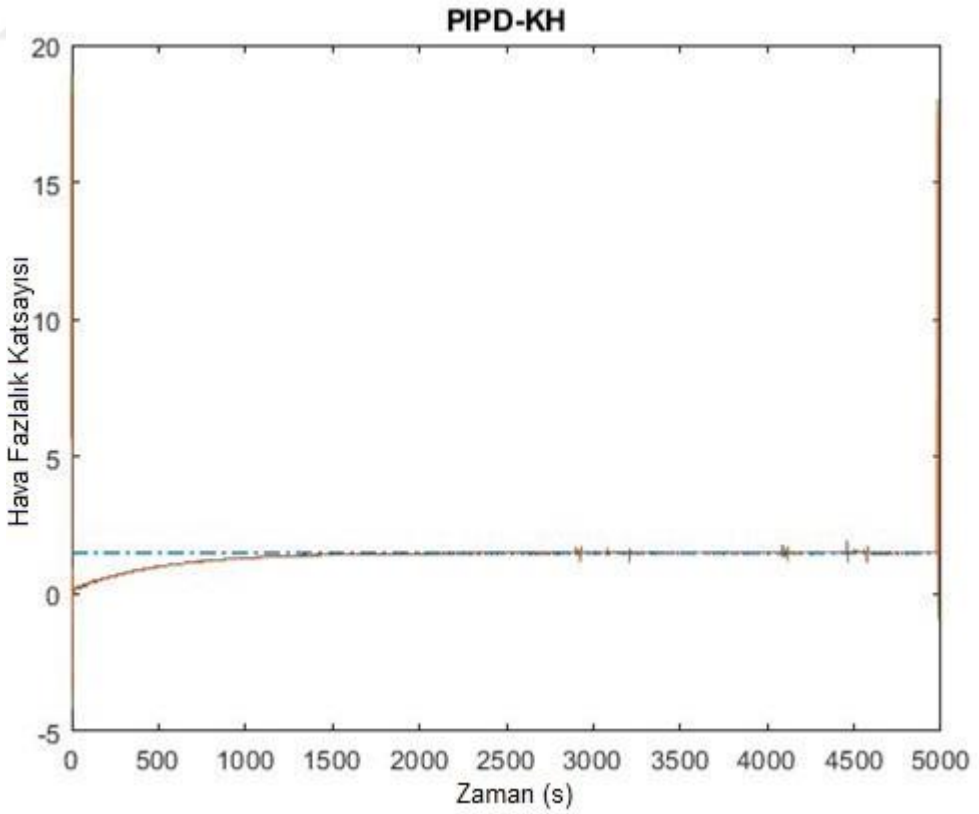
$$n_3(s) = 0.009936 - 0.00497s \quad (4.32)$$

$$n_4(s) = 0.01214 - 0.00497s \quad (4.33)$$

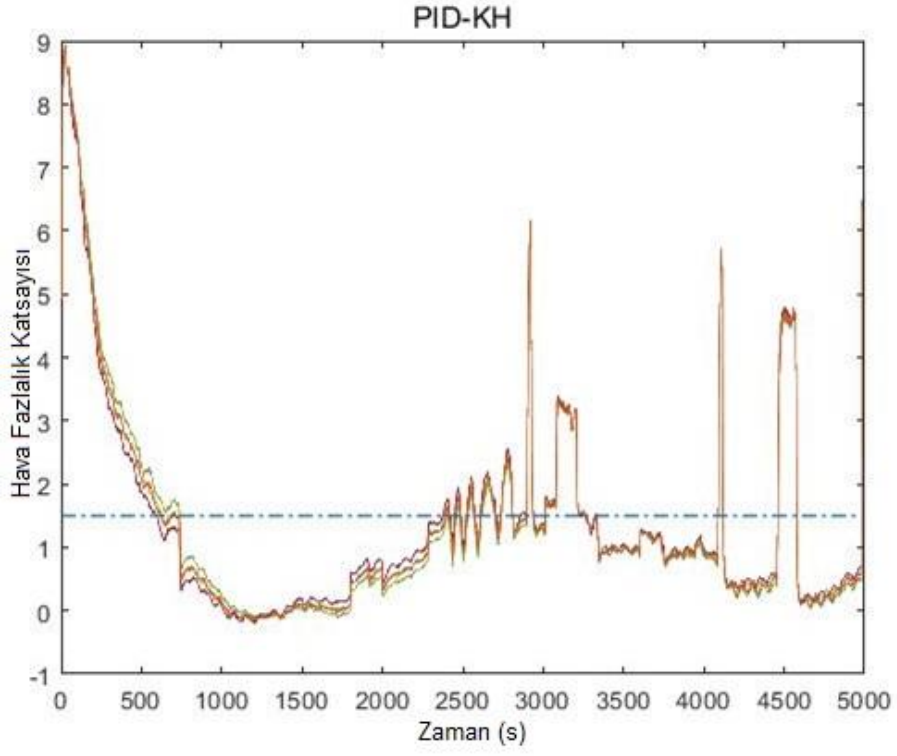
Buradan yola çıkılarak elde edilen 16 adet transfer fonksiyonuna, nominal değer üzerinden elde edilen kontrolcüler uygulanmış olup sonuçları ise Şekil 4.38 ve 4.41 arasında verilmiştir. Şekillerden açıkça görüleceği üzere ilgili belirsizlik aralığında gürbüzlük kriteri göz önünde bulundurularak en iyi sonuç Ağırlıklı Geometrik Merkez yöntemi ile tasarlanan PI-PD kontrolcü ile elde edilmiştir.



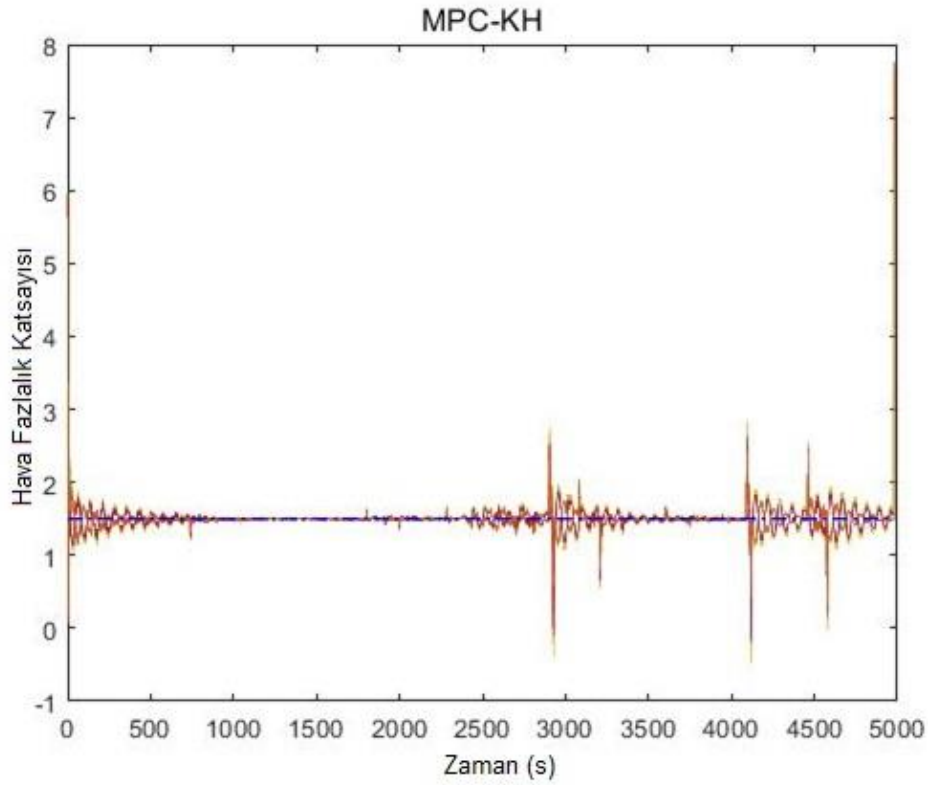
Şekil 4.38. H_{∞} Kontrol uygulaması



Şekil 4.39. PI-PD Kontrol uygulaması



Şekil 4.40. PID Kontrol uygulaması

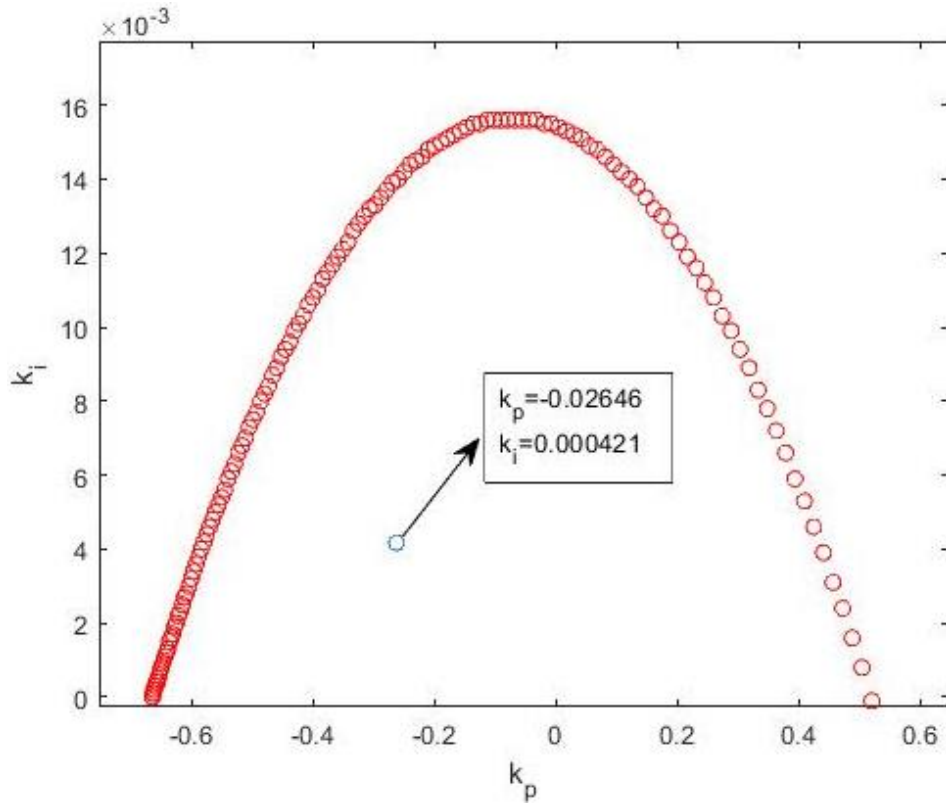


Şekil 4.41. Model Öngörülü Kontrol uygulaması

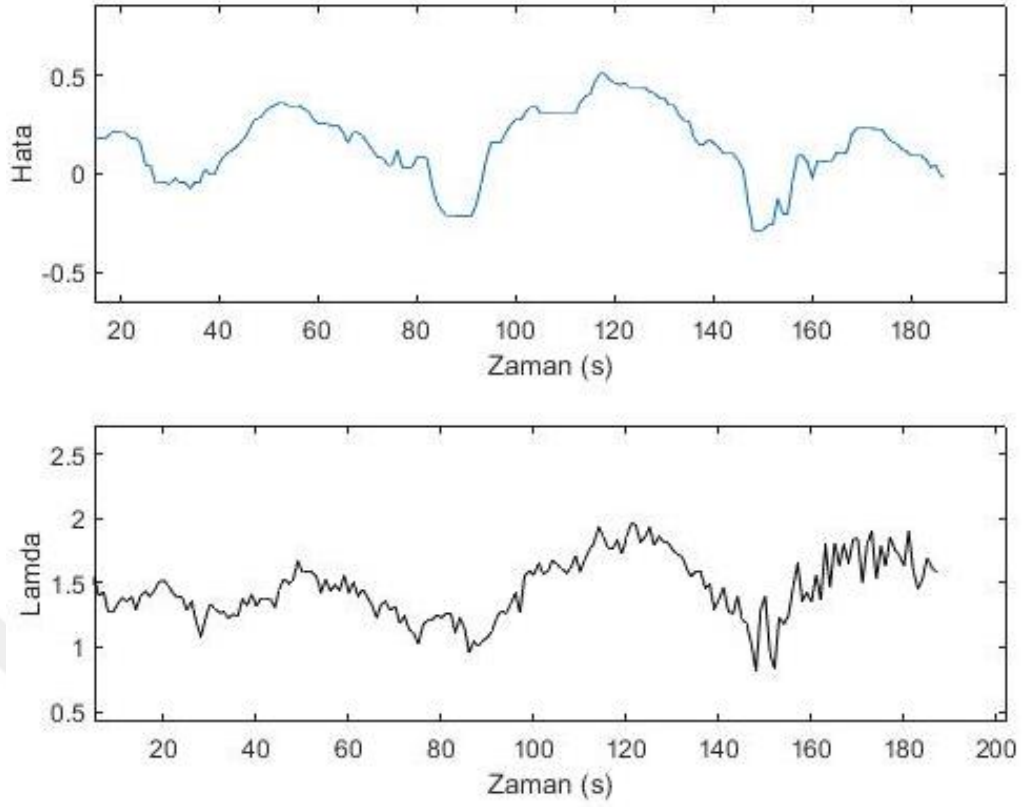
4.8 Gerçek Zamanlı Kontrol İşlemi

Önceki bölümde oluşturulan sanal gerçeklik ortamında tasarlanan ve MATLAB Simulink programı üzerinden uygulanan kontrolcüler dışında bu bölümde Ağırlıklı Geometrik Merkez yöntemi ile bir PI kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiş ve sisteme gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. PI kontrolcü için kararlılık bölgesi ve kontrolcü parametreleri Şekil 4.42’de gösterilmektedir. Yaklaşık 180 saniye boyunca gerçekleştirilen kontrol işleminde yakıcının arzu edilen hava fazlalık katsayısı değerinde tutulması sağlanmıştır. Yakıcının yanma koşulları ise 6 saniye yükleme ve 114 saniye bekleme olarak ayarlanmıştır. Bir önceki bölümde yapılan çalışmalarla ise bu koşullar için optimum hava besleme değeri belirlenmiş olup kontrol sinyali bu değer etrafında dalgalandırılmıştır. Ancak farklı yükleme-bekleme senaryoları için bu değer ayrıca tespit edilmesi gerekmektedir.

Burada, yüksek doğruluklu yapay sinir ağı modelinden gerçek zamanlı olarak elde edilen hava fazlalık katsayısının referans değerlerde tutulması için kontrolcü ile hava besleme sistemine müdahale edilmiştir. Şekil 4.43’de de açıkça görüleceği üzere sistemin arzu edilen referans hava fazlalık katsayısı etrafında tutulması işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.42. PI kontrolcü parametreleri



Şekil 4.43. Gerçek zamanlı kontrol sonuçları

Şekil 4.43'te de görüleceği üzere, tasarlanan kontrolcü hava fazlalık katsayısının 1,5 değeri için (referans değer) hatayı sıfır etrafında tutmaya muktedirdir. Ancak bu tür yakıcılarda hava fazlalık katsayısını kusursuz bir şekilde referans sinyale oturtmak imkânsızdır. Bunun sebebi ise fındık kömürün yakılmasındaki zorluklardır. Burada kontrol işlemi gerçekleştirilmeden önce yakıcının belirli bir süre yakılarak yanmanın sürekli rejime girmesi beklenmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışması temel olarak üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada 85000 Kcal/h kapasiteli stokerli bir kömür yakıcısının yanma odası farklı iki açıdan kameralar aracılığı ile gözetlenmiştir. Yakıcıya olan kömür yüklemesi, sabit ve yükleme-bekleme olacak şekilde gerçekleştirilerek farklı yanma koşulları için alev görüntüleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bir baca gazı analiz cihazı yardımı ile yanmaya ait hava fazlalık katsayısı ve emisyon değerleri elde edilmiştir. Elde edilen alev görüntülerine farklı görüntü işleme teknikleri uygulanarak görüntü matrislerinden anlamlı bilgiler çıkarılmıştır. Daha sonra hava fazlalık katsayısının, görüntü bilgileri ve baca gazı sıcaklığı, sadece görüntü bilgileri değerleri ile iki farklı şekilde tahmin işlemi yüksek doğruluklu YSA modelleri ile gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, yanma odasına olan hava beslemesi ve hava fazlalık katsayısı arasındaki ilişki sistem tanımlama işlemi ile yüksek doğruluklu bir transfer fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Son olarak ise, tanımlanan transfer fonksiyonuna sanal gerçeklik sağlamak üzere tahmin işlemi gerçekleştirilen hava fazlalık katsayısı değerleri bindirilerek, ağırlıklı geometrik merkez temelli PI-PD, H_{∞} , PID ve Model Öngörülü Kontrol olmak üzere üç farklı kontrol ailesinden kontrolcüler tasarlanmıştır.

YSA modelleri iki farklı şekilde elde edilmiştir;

- Bunlardan birincisi, baca gazı sıcaklığı ve görüntü matrisinin YSA girişini, hava fazlalık katsayısının ise YSA çıkışını oluşturduğu çalışmadır. Burada $R=0.99644$ doğruluklu bir YSA modeli elde edilmiştir. Bu modelin fazladan bir sensöre (baca gazı sıcaklık sensörü) ihtiyaç duyması oluşturulan model için bir eksi gibi görünse de çok yüksek doğruluk elde edilmesi modelin kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Baca gazı sıcaklık bilgisinin de bu tür çalışmalarda kullanılabileceği ortaya konmuştur.
- İkinci YSA çalışmasında ise, görüntü matrislerine uygulanan eş oluşum matrisi ve dalgacık yöntemleri ile elde edilen birden fazla bilgi YSA girişini, hava fazlalık katsayısı ise YSA'nın çıkışını oluşturduğu modellerdir. Bu çalışmada da ilk uygulamaya göre nispeten daha düşük doğruluk olan ancak literatürde kabule dileyebilir değerlerin üstünde olan $R=0.9341$ 'lik bir doğruluk

elde edilmiştir. Bu doğruluk ise görüntü matrisine uygulanan Gri-Seviye Eş Oluşum Matrisi işlemiyle elde edilmiştir.

Farklı formdaki besleme hava debi girişleri (değişken adım ve farklı frekanstaki sinüzoidal girişler) ile yakıcıdan elde hava fazlalık katsıyı dalgalandırılmış olup, mevcut yakıcı için tasarlanan hava besleme ünitesi ile optimum yanma için gerekli hava üfleme aralıkları belirlenmiştir. (Burada besleme fan ayarının 0-10 volt aralığında ve daha hassas ölçümler için aralığın 0-255 arasına ölçeklendirilerek deneylerin yapıldığı unutulmamalıdır.)

Farklı kömür besleme türleri için (yükleme-bekleme ve sabit yükleme), yakıcının yanma davranışları da ayrıca incelenmiş olup, bu tür yakıcılarda ısı ihtiyacına göre belirlenen aralıklarda olmak kaidesiyle yükleme-bekleme tarzında çalıştırılmasının kömürün daha etkin yanacağı kanaatine varılmıştır. Bunun sebebi ise sürekli yüklemde kömürün tam olarak yanmaması ve külde yanmamış kömüre rastlanmasıdır. Yüklem-bekleme yapılarak gerçekleştirilen beslemde ise, yüklenen kömürün tam yanması için ideal bekleme süresi ayarlanması yanmayı optimum kılmaktadır.

Gerçek uygulamalarda bu tür yakıcıların hava fazlalık katsayısı değerini sürekli olarak sıfır hata ile referans değerde tutmak imkânsızdır. Bu durumun sebepleri ise yüklem-bekleme tarzında olan besleme sebebiyle anlık olarak mevcut değerlerdeki düşüşler, yakıcının yanma dinamiklerinin sürekli olarak bozulma eğilimi göstermesi, her kömür taneciğinin tam olarak aynı yapı ve büyüklükte olmaması ve kömür tanelerinin farklı miktarda nem ve toz oranlarına sahip olabilmeleridir.

Kömürün gerek yakılmasındaki zorluk (içerisinde barındırabileceği nem, toz vb.), gerekse de yanma işleminin rejime oturma süresi bu tür çalışmaları olumsuz yönde etkileyecek parametrelerdir.

Baca gazı sıcaklık değerlerinin yakıcıdan sistematik biçimde ısı çekilmemesi nedeniyle gereğinden fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun yakıcının herhangi bir mahalın ısıtma ihtiyacı karşılanacak şekilde bağlantıları gerçekleştirildiği takdirde arzu edilen sıcaklıklara düşeceği bilinmektedir. Bu sebeple baca gazı sıcaklığının

yüksekliğinden dolayı gözlenen verim düşüşleri tez çalışmasında göz ardı edilmiş olup sadece hava fazlalık katsayısından kaynaklanan verim değişimleri gözlemlenerek irdelenmiştir.

Bir sonraki aşamada yakıcıya olan hava beslemesi ile hava fazlalık katsayısı arasındaki ilişki irdelenmiştir. Burada, Matlab System Identification araç kutusu ile hava besleme değerleri ve hava fazlalık katsayısı değerleri arasındaki ilişki %91.55'lik yüksek doğruluklu bir transfer fonksiyonu ile ortaya konmuştur.

Elde edilen yüksek doğruluklu transfer fonksiyonuna son bölümde üç farklı kontrolcü ailesinden (klasik, modern, yapay sinir ağı) kontrolör tasarımı yapılmıştır. Sisteme, görüntü işleme teknikleri ile elde edilen hava fazlalık katsayısı değerleri (sanal gerçekliğin sağlanması amacıyla) bozucu giriş olarak dayatılarak sisteme ait transfer fonksiyonu üzerinden simülatif kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan kontrolcü tasarım çalışmalarında ise, ağırlıklı geometrik merkez yöntemiyle tasarlanan PI-PD kontrolcü bozucu reddi performansı olarak en iyi sonucu ortaya koymuştur. Ancak referans işarete oturma süresi bakımından ise nispeten kötü bir performans göstermiştir. Model öngörülü kontrolcü ise, bozucu kuvvetlerin yüksek olduğu kısımlarda PI-PD kontrolcüyle birbirine yakın cevap vermiş ancak diğer bölgelerde iyi bir referans izleme ve bozucu reddi performansı göstermiş olup referans işarete oturma süresi ise dikkat çekici derecede kusursuzdur. H_∞ kontrolcü bozucu kuvvetlerin maksimum olduğu noktalarda nispeten iyi performans göstermiş ancak referans takip sürecinde MPC ve PI-PD kontrolcü yapılarının gerisinde kalmıştır. MATLAB Simulink ortamında otomatik olarak ayarlanan PID kontrolcü ise tasarlanan kontrolcülerin oldukça gerisinde kalmıştır.

Uygulanan gerçek zamanlı kontrol işleminde yanma işleminin arzu edilen referans hava fazlalık katsayısı değeri etrafında tutulması işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak gerçekleştirilen kontrol işleminin sadece belirli bir yükleme-bekleme standardı için uygulanabilir olduğu, farklı yükleme-bekleme durumları için yeni kontrolcü tasarlanması gerektiği unutulmamalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Anonymous. (2012). System Identification and Parameter Estimation. University of Twente, Faculty of Engineering Technology, Mechanical Automation and Mechatronics.
- Anonim. (2017). <http://www.yardimcikaynaklar.com/gorme-nedir> (Erişim:01.02.2017).
- Anonim. (2018a). <https://nptel.ac.in/courses/103105110/m5133.pdf> (Erişim: 21.08.2018).
- Anonim. (2018b). <https://rasyonalist.org/yazi/elektromanyetik-dalgalar-gorunur-bolge/> (Erişim: 24.08.2018).
- Anonymous. (2018c).https://science.nasa.gov/ems/09_visiblelight (on-line access on 25 Aug, 2018).
- Anonymous. (2018d). <https://www.thoughtco.com/chemistry-basics-133593> (on-line access on 03 Sep, 2018).
- Anonim. (2018e). <http://mimoza.marmara.edu.tr/~gatakok/enerji/8.htm> (Erişim: 04.10.2018).
- Anonymous. (2018f). <https://www.zmescience.com/science/geology/how-coal-is-formed/> (on-line Access on 11 Dec,2018).
- Anonim.(2019g). <https://www.mimsangrup.com.tr/domestik-kazanlar-detay/bireysel-isitma-sistemleri/kati-yakitli-uc-gecisli-otomatik-yuklemeli-stokerli-kat-kaloriferi> (Erişim: 14.10.2018).
- Anonymous. (2019a). <https://nptel.ac.in/courses/103105110/m5133.pdf> (on-line access on 05 Jan, 2019).
- Anonim.(2019b).http://kisi.deu.edu.tr//abdurrahman.bayram/CEV3016%20HKK/Ders-3_Yanma_29022016.pdf (Erişim: 11.01.2019).
- Anonim.(2019c). http://www.mfa.gov.tr/turkiye_nin-enerji-stratejisi.tr.mfa (Erişim: 17.01.2019).
- Anonim (2019d).<https://www.thesisat.org/kazanlar-ve-kazan-cesitleri.html> (Erişim: 19.01.2019).
- Asha P. Nair, N. Selvagesan, V.R. (2016). Lalithambika Lyapunov based PD/PID in model reference adaptive control for satellite launch vehicle systems. *Aerospace Science and Technology*. **51**, 70–77
- Astrom, K. J., Eklund, K. (1972). A simplified non-linear model of a drum boiler–turbine unit. *Int J Control*.**16**,145–169.
- BP Petrolleri A.ř. Kazanlar. http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/retail/retail_turkey/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/a/abp_kazanlar_tr.pdf, (Erişim: 04.02.2014).

- Bilgin, A. (2006). Kazanlarda enerji verimliliği ve emisyonlar. Retrieved from Makina Mühendisleri Odası website: http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/1673a38f02b5852_ek.pdf.
- Bissell, C. (1994). Control Engineering. Chapman and Hall, New York.
- Brown, S. H. (2009). Multiple Linear Regression Analysis: A Matrix Approach with MATLAB. *Alabama Journal of Mathematics*. **34**, 1-3.
- Burkardt, H. (1992). Image analysis and control of combustion processes. Athen: *The International Seminar on Imaging in Transport Processes*.
- Cetin, M. Iplikci, S. (2015). A novel auto-tuning PID control mechanism for nonlinear systems. *ISA Transactions*. **58**, 292–308
- Chen, Y., Atherton, D. P. (2007). *Linear feedback control: analysis and design with MATLAB*. 14,
- Chen, L. Xue, H. Sun, B. Zhou, Z. (2010). H_{∞} Robust control of Combustion Based on the Radiant Energy Signal(pp: 837-840). *4th International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*. December 13-15, Shenzhen, China.
- Chen, J. Chang, Y.H. Cheng, Y.C. Hsu, C.K. (2012). Design of image-based control loops for industrial combustion processes. *Applied Energy*. **94**, 13-21.
- Chen, J. Chang, Y. (2013). Performance Design of Image-Oxygen Based Cascade Control Loops for Boiler Combustion Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. **52**, 2368–2378
- Cong, S. Liang, Y. (2009). PID-like neural network nonlinear adaptive control for uncertain multivariable motion control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. **56**, 3872–3879.
- Demirhan, A., Güler, İ. (2010). Özörgütlemeli Harita Ağları Ve Gri Düzey Eş Oluşum Matrisleri İle Görüntü Bölütleme. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **25**, 285-291.
- Docquier, N. Candel, S. 2002. Combustion control and sensors: a review, *Progress in Energy Combustion Science*. **28**, 107–50.
- Donne, M. S. Pike, A. W. Savry, R. (2001). Application of modern methods in power plant simulation and control. *IEE Computing & Control J*. **12(2)**, 75–84.
- Elie, T P. E. (2013). Boiler Classification and Application. *Continuing Education and Development, Inc.*, NY, 10980.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E. (2001). *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA.
- Gu, D. W., Petkov, P., & Konstantinov, M. M. (2005). *Robust control design with MATLAB®*. Springer Science & Business Media.

- Hamamci, S. E. Tan, N. (2006). Design of PI Controllers for Achieving Time and Frequency Domain Specifications Simultaneously. *ISA Transactions*. **45**, 529-543.
- Han, J. Wang, P. Yang, X. (2012) .Tuning of PID controller based on fruit fly optimization algorithm. *Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. Chengdu, China, 409-413.
- Hao, Z. Qian, X. Cen, K. Fan, J. (2003). Optimizing pulverized coal combustion performance based on ANN and GA. *Fuel Processing Technology*. **85**, 113-124.
- Hao, Z. Kefa, C. Jianbo, M. (2001). Combining neural network and genetic algorithms to optimize low NO_x pulverized coal combustion. *Fuel*. **80**, 2163-2169.
- Huang, Y. Yan, Y. Lu, G. Reed, A. (1999). On-line flicker measurement of gaseous flames by image processing and spectral analysis. *Meas Sci Technol*. **10**, 726-33.
- Huang, B. Luo, Z. Zhou, H. (2010). Optimization of combustion based on introducing radiant energy signal in pulverized coal-fired boiler. *Fuel Processing Technology*. **91**, 660-668.
- Karaman, İ. (2010). *Soma linyitinin fiziksel aktivasyonu ve aktiflenmiş ürüne boyarmadde adsorpsiyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Kartal, E. Yanma ve Yanmanın Optimizasyonu.
- Katsuhiko, O.(2008). *MATLAB for Control Engineers*. Pearson Education, New Jersey, USA, 1-3.
- Kocaarslan, I. (1993). Application of adaptive control concept in a 750MW coal fired power plant. *12th Triennial world congress*. Sydney, Australia.
- Kohse-Hoinghaus, K. Barlow, R. S. Alden, M. Wolfrum, J. (2005). Combustion at the focus: laser diagnostic and control. *Proc. Combust. Inst.* **30**, 89-123.
- Kouprianov, V. Chullabodhi, C. Kaewboonsong, W. (1999). Cost based optimization of excess air for fuel oil/gas-fired steam boilers. *RERIC Int. Energy J.* **21(2)**, 83-91
- Koç, E., Kaplan, E. (2008a). Dünyada ve Türkiye’de Genel Enerji Durumu-I Dünya Değerlendirmesi. *Termodinamik Dergisi*. **187**, 70-80.
- Koç, E., Kaplan, E. (2008b). Dünyada ve Türkiye’de Genel Enerji Durumu-II Türkiye Değerlendirmesi. *Termodinamik Dergisi*. **188**, 106-118.
- Kumar, V. Gaur, P. Mittal, A.P. (2014). ANN based self tuned PID like adaptive controller design for high performance PMSM position control. *Expert Systems with Applications*. **41**, 7995-8002

- Lee, C. L. Jou, C. J. G. (2011). Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace. *Fuel Process Technology*. **92**, 2335–2340
- Lino, N. Tsuchino, F. Torii, S. Yano, T. (1998). Timewise variation of turbulent jet diffusion flame shape by means of image processing. *Journal of Flow Visualization and Image Process*. **5**, 275–81.
- Liu, D. J. Yan, Wang, F. Huang, Q. Chi, Y. Cen, K. (2012). Experimental reconstructions of flame temperature distributions in laboratory-scale and large-scale pulverized-coal fired furnaces by inverse radiation analysis. *Fuel*. **93**, 397–403.
- Liu, Z. Zheng, S. Luo, Z. Zhou, H. (2016). A new method for constructing radiative energy signal in a coal- fired boiler. *Applied Thermal Engineering*. **101**, 446-454.
- Lu, G. Yan, Y. Colechin, M. (2004). A digital imaging based multifunctional flame monitoring system. *IEEE Trans. Inst. Meas.* **53(4)**, 1152–8.
- Mosaad, M. I. Salem, F. (2014). LFC based adaptive PID controller using ANN and ANFIS techniques. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. **1**, 212–222.
- Ogata, K., Yang, Y. (2002). Modern control engineering (Vol. 4). Prentice-Hall.
- Onat, C. Hamamci, S. E. Obuz, S. (2012). A Practical PI Tuning Approach For Time Delay Systems(pp:102-107). Proceedings of the 10th IFAC Workshop on Time Delay Systems. *The International Federation of Automatic Control*. Northeastern University.
- Onat, C. (2013). A New Concept on PI Design for Time Delay Systems: Weighted Geometrical Center. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. **9(4)**, 1539-1556.
- Onat, C. (2014). WGC Based Robust and Gain Scheduling PI Controller Design for Condensing Boilers. *Advances in Mechanical Engineering*. **6**, 1-13.
- Onat, C. Talu, M.F. Daskin, M. Mercimek, M. (2015). Otomatik Beslemeli Kömür Kazanlarında Alev Formu İle Yanma Verimi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makine*. **669**, 70-79.
- Onat, C. Sahin, M. Yaman, Y. (2017). Gain-Scheduling H_∞ Control Of A Smart Beam With Parameter Varying (pp:453-463). *8th ECCOMAS Thematic Conference On Smart Structures And Materials*. June 5-8, Madrid, Spain.
- Örs, O.(2017). *Candidate Selection Process For Polymer Gel Application By Using Artificial Neural Networks*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Öztemel, E. (2003). *Yapay Sinir Ağları*. Papatya Yayıncılık. İstanbul, TURKEY, 165 p.

- Rawlings, J. O. Pantula, S. G. Dickey, D. A. (2001). Applied regression analysis: a research tool. *Springer Science & Business Media*.
- Rees, N. W. Lu, C. X. (2002). Some thoughts on the advanced control of electric power plants. *Trans. Inst. Meas. Control.* **24(2)**, 87–106.
- Sariyildiz, E. Yu, H. Ohnishi, K. (2015). A Practical Tuning Method for the Robust PID Controller with Velocity Feed-Back. *Machines.* **3**, 208-222
- Sheikhtaheri, A., Sadoughi, F., Dehaghi, Z. H. (2014). Developing and using expert systems and neural networks in medicine: a review on benefits and challenges. *Journal of medical systems.* **38(9)**, 110.
- Shinskey, F. G. (1998). Process Control Systems-Application, Design, and Tuning. McGraw-Hill, New York.
- Sujatha, K. Venmathi, M. Pappa, N. (2012). Flame monitoring in power station boilers using image processing. *ICTACT Journal on Image and Video Processing.* **2**, 427-434.
- Sulochana, S., Vidhya, R. (2013). Texture based image retrieval using framelet transform-gray level co-occurrence matrix (GLCM). *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence.* **2(2)**, 68-73.
- Talu, M. F., Onat, C., Daskin, M. (2017). Prediction of Excess Air Factor in Automatic Feed Coal Burners by Processing of Flame Images. *Chinese Journal of Mechanical Engineering,* **30(3)**, 722-731.
- Tan, N., & Özyetkin, M. M. (2007). Kesirli Dereceli Belirsiz Polinomların Dayanıklı Kararlılık Analizi. *TOK'07.* Sep 5-7, Istanbul.
- The MathWorks. (2017). Simulink Getting Started Guide. *The MathWorks, Inc. Natick.* USA, 2 p.
- Torkul, O., Uyaroğlu, Y., Çağıl, G., Uçar, M.K. (2017). Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları. *Sakarya Üniversitesi Kütüphanesi Yayınevi.*
- Toth P. Zhan, Z. Fu, Z. Palotas, A. B. Eddings, E. G. Ring, T. A. (2014). The potential of on-line optical flow measurement in the control and monitoring of pilot-scale oxy-coal flames. *Experiments in Fluids.* **55**, 1727.
- Wojcik, W. Gromazsek, K. Kotyra, A. Lawicki, T. (2012). Pulverized coal combustion boiler efficient control. *Przegląd Elektrotechniczny.* **11**, 316-319.
- Yamaguchi, T., Grattan, K. T. V. Uchiyama, H. Yamada, T. (1997). A practical fiber optic air-ratio sensor operating by flame color detection. *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 197–202.
- Yang, J. H. Kim, J.E. A. Hong, J. Kim, M. Ryu, C. Kim, Y. Park, H.Y. Baek, S. H. (2014). Effects of detailed operating parameters on combustion in two 500-MWe coal-fired boilers of an identical design. *Fuel.* **144**, 145–156.

- Yılmaz, Z. Türkiye'nin Mevcut Enerji Durumu, *Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas*.
- Yu, C.C. (2006). Autotuning of PID Controllers (2. Basım). London, UK, Springer-Verlag.
- Yüksel, İ. (2006). Otomatik Kontrol: Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri. Nobel Yayın Dağıtım. Ankara, Türkiye.
- Zhang, J. Chen, J. (2013). Neural PID Control Strategy for Networked Process Control. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Zhou, H. Lou, X. Yin, H. Deng, Y. Gu, Y. Sun, G. (1996). Modeling and simulink research of boiler combustion based on radiantenergy. *Proceedings of the CSEE*. **16**, 226-229.



7. EKLER

Ek-1

İlgili verilerin hesaplanması için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$CO_2 \text{ değeri} : CO_2 = \frac{CO_{2maks} \times (\%21 - \%O_2)}{\%21}$$

CO_{2maks} : Yakıtta özgü maksimum CO_2 değeri
 $\%21$: Havada bulunan yüzdelerik oksijen miktarı
 $\%O_2$: Yüzdelerik ölçülen oksijen miktarı

$$\text{Baca gazı kaybı} : qA = \left[(FT - AT) \left[\frac{A2}{(21 - O_2)} + B \right] \right] - KK$$

FT : Baca gazı sıcaklığı
AT : Ortam sıcaklığı
A2/B : Yakıtta özgü çarpanlar
21 : Havadaki oksijen miktarı
O₂ : Ölçülen oksijen miktarı
KK : Sıcaklık eksikliklerinde qA'yı negatif bir değere dönüştüren bir katsayıdır. Yoğuşmalı kazanlardaki ölçümlerde ihtiyaç duyulur.

Eğer yakıtta özgü katsayılar A2 ve B sıfır ise, Siegert denklemi f katsayısı uygulanarak kullanılır

$$qA = f \times \frac{(FT - AT)}{CO_2}$$

FT : Baca gazı sıcaklığı
AT : Ortam sıcaklığı
CO₂ : Hesaplanan CO₂ değeri
f : Yakıtta özgü katsayı

$$\text{Yanma verimi} : \eta = 100 - qA$$

Burada eğer qA sıfırdan küçük ise, η %100'den büyük olur.

Hava fazlalık

$$\text{Katsayısı } \lambda : \lambda = \frac{CO_{2maks}}{CO_2} \text{ veya } 1 + \frac{O_2}{21 - O_2}$$

Verimler :

$$Eff_g = 100 - \left[\frac{K_{gr} \times (FT - AT)}{CO_2} \right] + \left[\frac{X \times (2488 + 2.1 \times FT - 4.2 \times AT)}{Q_{gr} \times 1000} \right] + \left[\frac{K_1 \times CO}{CO_2 + CO} \right]$$

$$Eff_n = 100 - \left[\frac{K_{net} \times (FT - AT)}{CO_2} \right] + \left[\frac{X \times (210 + 2.1 \times FT - 4.2 \times AT)}{Q_{gr} \times 1000} \right] + \left[\frac{K_1 \times Q_{gr} \times CO}{Q_{net} \times CO_2 + CO} \right]$$

$$X = MH_2O + 9 \times H$$

FT : Baca gazı sıcaklığı

AT : Ortam sıcaklığı

K_{gr} , K_{net} , K_1 , yakıtın hidrojen içeriği H , yakıtın nem oranı MH_2O , Q_{gr} , Q_{net} değerlerinin tümü yakıtı özgü katsayılarıdır.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Mahmut DAŞKIN

Doğum Yeri: Malatya

Doğum Tarihi: 12.06.1987

Lisans: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü(2010)

Yüksek Lisans: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilimdalı (2013)

Doktora: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilimdalı (2019)