

**T. C.**  
**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE ANABİLİM DALI**  
**DOKTORA TEZİ**

**YAPAY SİNİR AĞLARININ,**  
**MODELLEMESİ YAPILAN**  
**TERMİK SANTRALDE UYGULANMASI**

**MURAT LÜY**

**ŞUBAT 2009**

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürünün onayı.

..../..../.....

Doç. Dr. Burak BİRGÖREN

\_\_\_\_\_  
Müdür

Bu tezin Doktora tezi olarak Makine Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN

\_\_\_\_\_  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve Doktora tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. İbrahim UZUN

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ali ERİŞEN

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. M. Sezai DİNÇER

\_\_\_\_\_

## ÖZET

### YAPAY SİNİR AĞLARININ, MODELLEMESİ YAPILAN TERMİK SANTRALDE UYGULANMASI

LÜY, MURAT

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman : Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN

ŞUBAT 2009, Sayfa 139

Günümüzde enerji insan yaşamının vazgeçilmez unsurlarından biri olmakla birlikte, gelecekte enerji ihtiyacı çok daha fazla artacaktır. Enerji kullananların beklentisi, enerjiyi istedikleri miktarda ve istedikleri anda kullanabilmektir. Bu yüzden enerjinin üretimi büyük önem taşımaktadır. Fosil türü yakıtların dünyada çok miktarda bulunmasından dolayı enerji üretiminde termik santrallerin payı büyüktür. Termik santrallerin dinamik davranışları bir çok parametreye bağlıdır. Yükte meydana gelen değişim, kömürün kalitesindeki değişimler, kazan ve bacada meydana gelen kirlenmeler gibi etkenler, santralin dinamik parametrelerinin değişmesine yol açmaktadır. Değişikliklerin etkilerinin en aza indirilebilmesi için santrallerde kullanılan

kontrol sistemleri büyük önem arz etmektedir. Klasik kontrol yöntemleri büyük santrallerdeki parametre değişiminde her zaman yeterli performansı verememektedir. Daha iyi bir kontrolör tasarlamak için modern kontrol yöntemlerinden olan bulanık mantık kontrolör ve yapay sinir ağları ile yapılan kontrolörler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez kapsamında modellemesi yapılan termik santralin klasik kontrol yöntemi olan PI ve PID kontrolör ile kontrolü Matlab 7.4-Simulink simülasyon programı ile incelenmiştir. Daha sonra termik santralin, gelişmiş kontrol yöntemlerinden olan yapay sinir ağları ile oluşturulmuş kontrolör ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, gelişmiş kontrol teknikleri ile klasik kontrol teknikleri karşılaştırılmış birbirlerine karşı üstünlükleri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Termik Güç Santrali, Santral Modelleme, PI Kontrolör, PID Kontrolör, Yapay Sinir Ağları

## **ABSTRACT**

# **APPLICATION of ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO A MODELLED THERMAL POWER PLANT**

LÜY, MURAT

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, PhD Thesis

Supervisor : Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN

February 2009, 139 pages

Energy has become an important issue for human life. The demand for energy increases everyday. The consumers expect energy sources to be safe and continuous. Therefore, generation of energy has become more important.

Since fossil fuels are abundant in the world, thermal power plants have been used for energy generation in a significant ratio. The dynamic behavior of thermal power plants is dependant on a number of parameters which can change due to load changing, quality of coal and contamination of the boiler heating surfaces or chimney. For these reasons, special care has to be taken when designing controllers of power plants. Conventional controllers' schemes will not attain sufficient control performance in every situation. To

improve this, various research studies have been performed on Artificial Neural Networks (ANN) and Fuzzy Logic Controllers (FLC).

In this thesis, the modeled thermal power plant was investigated with conventional PI and PID controllers in Matlab 7.4-Simulink simulation software. Later, an ANN controller designed for this study was applied to the power plant for controlling purposes. The simulation results obtained from the study were evaluated. Advanced control techniques and conventional control techniques were compared and their advantages over each other were also discussed in the thesis.

**Key Words:** Thermal Power Plant, Plant Modeling, PI Controller, PID Controller, Artificial Neural Network

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında her türlü yardımını esirgemeyen bilgi, tecrübe ve yönlendirmeleri ile daima desteklerini gördüğüm danışman hocam Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN'a, çalışmam sırasında her türlü desteğini ve yardımını gördüğüm sevgili arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM'a, araştırma ve kaynak taramalarında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Arş. Gör. Bilge AKBIYIK'a, sürekli destekleri ile bu çalışmayı yapmamda katkıları bulunan diğer mesai arkadaşlarıma, çalışmam süresince desteklerini, sabırlarını benden esirgemeyen ve sürekli yanımda olan sevgili eşime ve çocuklarıma, ayrıca hayatım boyunca sevgilerini ve desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime çok teşekkür ederim.

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\omega_r$	Açısal hız
$\alpha$	Öğrenme Katsayısı
$K_G$	Rotor hızı
$X$	Doğrusal yer değiştirme
$T_{SR}$	Hız rölesi zaman sabiti
$T_{SM}$	Servo motor zaman sabiti
$L_{C1}$	Kontrol vanası açma sınır
$L_{C2}$	Kontrol vanası kapama sınır
$L_{I1}$	Ara vana açma sınır
$L_{I2}$	Ara vana kapama sınır
$m_c, U_1$	Kömür besleme girişi
$m_w, U_2$	Besleme suyu girişi
$P_L, Y_1$	Elektriksel Güç çıkışı
$h, Y_2$	Entalpi çıkışı
$\Delta h$	Buhar entalpi düşümü
$m_D$	Buhar akışı
$m_{GT}$	Eksoz gazı
$K_P$	Oransal etki kazancı
$K_I$	İntegral etki kazancı
$T_I$	İntegral zaman sabiti
$K_D$	Türev etki kazancı
$T_S$	Sistemin zaman sabiti



$T_{\ddot{o}}$	Sistemin gecikme zamanı
$K_S$	Sistem kazancı
$W(i)$	Ağırlıklar matrisi
$X(i)$	Veri giriş matrisi
$T_{CH}$	Şarj olma zamanı
$T_{RH}$	Ara ısıtıcı zaman sabiti
$T_{CO}$	Bağlantı boruları zaman sabiti
$F_{HP}$	Yüksek basınç gücü
$F_{IP}$	Orta basınç gücü
$F_{LP}$	Düşük basınç gücü
MIMO	Çok girişli çok çıkışlı
SISO	Tek girişli tek çıkışlı
YSA	Yapay sinir ağı
PID	Oransal-İntegral-Türev
DBP	Dinamik geri yayılım
CC	Kombine çevrim
CHP	Kombine çevrim güç santrali
YB	Yüksek basınç
OB	Orta basınç
AB	Açak basınç
CV	Kontrol vanası
IV	Ara ısıtma vanası
MLP	Çok katmanlı Algılayıcılar
LVQ	Learning Vector Quantization

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### ŞEKİL

2. 1. Bir Buhar Güç Santralinin Akış Şeması.....	14
2. 2. Standart Kombine Çevrim Sistemi .....	16
2. 3. Bir Kojenerasyon (CHP) Sistemi .....	17
2. 4. Bir Kazanın Şematik Diyagramı .....	19
2. 5. Alev Borulu Kazan Şeması .....	21
2. 6. Su Borulu Kazan Şeması .....	23
2. 7. Doğal Sirkülasyon Kazanlarının Temel Şeması .....	24
2. 8. Zorlamalı Sirkülasyon Kazanlarının Temel Şeması.....	27
2. 9. Bir Buhar Türbininin Şematik Diyagramı .....	29
2. 10. Seri ve Çapraz Bağlı Türbinlerin Temel Şemaları .....	30
2. 11. Tek Ara Isıtıcılı Buhar Türbini Yapısı.....	32
2. 12. Buhar Türbini Blok Diyagramı .....	34
2. 13. Mekanik- Hidrolik Kontrollü Türbin Devir Sayısı Regülatörü Sisteminin Blok Diyagramı .....	37
2. 14. Mekanik Devir Sayısı Regülatörü.....	38
2. 15. Normal Hız/Yük Fonksiyonunu Gösteren Devir Sayısı Regülatörü Modeli .....	39
2. 16. Elektrohidrolik Kontrol Devir Sayısı Regülatörü Blok Diyagramı .....	40
2. 17. Çok Değişkenli Dinamik Bir Güç Santral Sistemi .....	41
2. 18. Şematik Diyagram, (a) Güç Santrali ve (b) Matematiksel Modeli .....	44

2. 19. İki Giriş ve Çıkış Değişkenli Prosesin Blok Diyagramı.....	45
2. 20. Kullanılan Santral Modelinin Blok Diyagramı .....	46
2. 21. Birinci Modele Ait $U_2(t)$ Su, $U_1(t)$ Yakıt Giriş Değişkenleri ve $y_2(t)$ Entalpi, $y_1(t)$ Güç, Çıkış Değişkenleri .....	47
2. 22. . İkinci Modele Ait $U_2(t)$ Su, $U_1(t)$ Yakıt Giriş Değişkenleri ve $y_2(t)$ Entalpi, $y_1(t)$ Güç, Çıkış Değişkenleri .....	48
2. 23. Üçüncü Modele Ait $U_2(t)$ Su, $U_1(t)$ Yakıt Giriş Değişkenleri ve $y_2(t)$ Entalpi, $y_1(t)$ Güç, Çıkış Değişkenleri .....	49
2. 24. Birinci Modele Uygulanan Birim Basamak Fonksiyon Cevapları .....	50
2. 25. İkinci Modele Uygulanan Birim Basamak Fonksiyon Cevapları .....	51
2. 26. Üçüncü Modele Uygulanan Birim Basamak Fonksiyon Cevapları .....	52
2. 27. Santral Modelinde Kullanılan Ayırma Sistemi .....	57
2. 28. PI Kontrol Sisteminin Birim Basamak Cevabı .....	61
2. 29. PID Tipi Kontrol Organının Blok Diyagramı Gösterimi.....	63
2. 30. Sistemin Birim Basamak Cevap Eğrisi .....	65
2. 31. Basit Bir Sinir Hücresi .....	68
2. 32. Sinir Sisteminde Bilgi Akışı .....	69
2. 33. Temel Yapay Sinir Ağı Hücresi .....	77
2. 34. Eşik Aktivasyon Fonksiyonu.....	78
2. 35. Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu .....	79
2. 36. Logaritma Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu.....	79
2. 37. İleri Beslemeli Yapı .....	81
2. 38. Geri beslemeli yapı .....	82
2. 39. İleri Beslemeli Çok Katmanlı Sinir Ağı.....	85

3. 1. Yapay Sinir Ağı Oluşturulmuş Doğrudan Kontrol Yöntemi .....	95
3. 2. Yapay Sinir Ağının Girişleri (Şimdiki ve Geçmiş Zaman Sinyalleri Bağlantıları) .....	97
3. 3. Modeli Alınan Sistemin Kontrol Blok Diyagramı .....	98
3. 4. Sisteme Uygulanan PID Kontrolörler, (a) Güç Çıkışı (b) Entalpi Çıkışı	99
3. 5. Şematik Diyagram (a) Güç Santrali (b) Matematiksel Modeli.....	100
3. 6. Güç Santralinin Decoupler Ayırıcılı Klasik Kontrol Sistemi Şeması....	101
3. 7. PI ve PID Kontrolörlerin Kontrol Çıkış Sinyali.....	102
3. 8. Birinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	103
3. 9. Birinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	104
3. 10. İkinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları.....	105
3. 11. İkinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları.....	106
3. 12. Üçüncü Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	107
3. 13. Üçüncü Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları.....	108
3. 14. Yapay Sinir Ağları ile Yapılmış Kontrolör .....	109
3. 15. Birinci Modelin YSA Öğrenme – İterasyon Değişim Grafiği.....	110
3. 16. Gelişmiş Kontrol Sistemlerinden YSA ile Güç Santrali Kontrol Şeması .....	111
3. 17. Birinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	112
3. 18. Birinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	113
3. 19. İkinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları.....	114
3. 20. İkinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları.....	115
3. 21. Üçüncü Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	116
3. 22. Üçüncü Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları.....	117

4. 1. Birinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	119
4. 2. Birinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	120
4. 3. İkinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	121
4. 4. İkinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları.....	122
4. 5. Üçüncü Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları .....	123
4. 6. Üçüncü Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları.....	124

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

2. 1. $G_{11m1}(z)$ Parametre Çizelgesi.....	53
2. 2. Birinci Model (Kazan Temiz, Santral Çalışma Kapasitesi % 95) Parametre Çizelgesi .....	54
2. 3. İkinci Model (Kazan Temiz, Santral Çalışma Kapasitesi %70) Parametre Çizelgesi .....	55
2. 4. Üçüncü Model (Kazan Kirli, Santral Çalışma Kapasitesi %70) Parametre Çizelgesi .....	56
2. 5. Ziegler-Nichols Yöntemine Göre Parametre Çizelgesi.....	66
2. 6. Chien - Hornes - Reswick Yöntemine Göre Parametre Çizelgesi.....	66
4. 1. Klasik Kontrol Yöntemleri İle YSA'nın Karşılaştırılması.....	125

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET .....	I
ABSTRACT .....	III
TEŞEKKÜR.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	XII
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Taraması .....	4
1.2 Çalışmanın Amacı .....	9
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
2.1. TERMİK SANTRALLER .....	10
2.1.1. Genel.....	10
2.1.1.1. Termik Santrallerin Tarihçesi ve Gelişimi .....	12
2.1.1.2. Termik Santrallerin Genel Yapısı .....	13
2.1.2. Kazan (Boiler).....	17
2.1.3. Yapılarına Göre Kazanlar .....	21
2.1.3.1. Alev borulu kazanlar .....	21
2.1.3.2. Su borulu kazanlar .....	23
2.1.3.2.1. Domlu kazanlar .....	24
2.1.3.2.2. Domsuz ( tek geçişli ) kazanlar.....	27
2.1.4. Çalışma Basıncına Göre Kazanlar .....	27
2.1.5. Buhar Türbini.....	28

2.1.5.1. Türbin Modeli .....	32
2.1.5.2. Türbin Kontrolü .....	34
2.1.5.2.1. Mekanik –Hidrolik Kontrol (MHK) .....	37
2.1.5.2.2. Elektrohidrolik kontrol (EHK) .....	39
2.2. TERMİK SANTRALİN MODELLENMESİ .....	40
2.2.1. Giriş .....	40
2.2.2. Güç Santrali.....	42
2.2.3. Çok Girişli-Çok Çıkışlı (MIMO) Sistemin Transfer Fonksiyonu .....	45
2.2.4. Kullanılan Üç Modele Ait Transfer Fonksiyonları .....	53
2.2.5. Ayırıcı ( Decoupler ) Sistemin Modellenmesi .....	57
2.3. KONTROL YÖNTEMLERİ .....	59
2.3.1. Giriş .....	59
2.3.2. Klasik Kontrol Yöntemleri .....	59
2.3.2.1. PI Kontrol Yöntemi .....	59
2.3.2.2. PID Kontrol Yöntemi .....	62
2.3.2.3 Klasik Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi .....	64
2.3.4 Yapay Sinir Ağları.....	66
2.3.4.1 Genel .....	66
2.3.4.2. YSA'ların Genel Özellikleri .....	70
2.3.4.3. YSA'ların Avantaj ve Dezavantajları.....	71
2.3.4.4 YSA'ların Kullanıldığı Alanlar .....	75
2.3.4.5. Yapay Sinir Ağı Hücresi .....	76
2.3.4.6. Aktivasyon Fonksiyonları .....	78
2.3.4.7. Yapay Sinir Ağları Modelleri.....	80
2.3.4.8. Yapay Sinir Ağlarının Eğitilmesi .....	82



2.3.4.9. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme Algoritmaları .....	83
2.3.4.9.1. Geri Yayınım Öğrenme Algoritması.....	85
2.3.4.9.2. Levenberg- Marquardt Algoritması .....	89
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	93
3.1. Giriş.....	93
3.2. PI ve PID Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi.....	93
3.3. YSA İle Doğrudan Kontrol Yöntemi.....	94
3.3.1 Kontrolör Dizaynı .....	95
3.3.2. Model Derecesi Seçimi.....	96
3.4. Tasarımı Yapılan Kontrolörlerin Güç Santralinin Modeline Uygulanması .....	98
3.5 Simülasyon Sonuçları .....	101
3.5.1 PI ve PID kontrolör .....	101
3.5.2 YSA kontrolör .....	109
4. SONUÇ .....	118
4.1. Giriş.....	118
4.2. Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	118
4.3. PI, PID ve YSA2'nin Karşılaştırılması .....	125
4.4. Sonuç.....	126
KAYNAKLAR .....	128

## 1. GİRİŞ

Herhangi bir hareketi (aksiyonu) yapan veya yapmaya hazır olan kabiliyete “enerji” denir. Kısaca “iş yapma yeteneği” olarak da tanımlanabilir. Başka bir ifadeyle ortaya iş çıkarma gücü, potansiyeli veya değişikliklere yol açan etken olarak da tanımlanabilir.

Bilim ve teknoloji alanındaki gelişmeler hızla artan bir enerji ihtiyacı doğurmaktadır. Günümüzde, ülkelerin gelişmişlik seviyeleri, enerji üretim ve tüketim miktarlarıyla belirlenmeye başlamıştır. Sanayileşme ve nüfus artış hızıyla birlikte, ülkelerin ihtiyaç duyduğu enerji talepleri de sürekli bir artış içerisindedir. Yaşam standartları ve tarzlarında büyük bir değişim gözlenmekte, mal ve hizmet üretim ve tüketim kalıpları, fiyatları, talep yapıları, pazar koşulları, çalışma şartları, verimlilik vb. konularında önemli değişiklikler meydana gelmekte, global ürün ve pazarlar, küresel dev organizasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu gelişme ve değişimin sürati ve yönü büyük ölçüde enerji arzı konusundaki gelişmelere bağlı bulunmakta, enerji konusu bilim ve teknoloji alanındaki çalışmaların odak noktalarından birini oluşturmaktadır<sup>(1)</sup>.

Dünyada kişi başına düşen enerji, sürekli bir artış içerisindedir. Enerji talepleri konusunda yapılan incelemelere göre, 2020 yılındaki enerji talebinin bugünkü enerji talebine göre %65, 2050 yılındaki enerji talebinin ise %250 daha fazla olacağı tahmin edilmektedir. 2020 yılına yönelik tahminler, enerji

retiminde fosil yakıtların ağırlıklarının devam edeceği yönündedir. <sup>(2)</sup>

Dünyadaki hızlı nüfus artışı ve sanayileşme, yüksek elektrik enerjisi talebini de beraberinde getirmektedir. Sürekli büyüme ve gelişmenin sağlanabilmesi için de ihtiyaç duyulan enerjinin ekonomik ve sosyal gelişimi destekleyecek, çevreyi en az düzeyde kirletecek, minimum maliyette, kesintisiz, güvenilir, zamanında sağlanması gerekmektedir. Bu açıdan, birincil enerji kaynaklarının mümkün olan en verimli şekilde kullanılabilmesi için, enerjinin yalnızca dönüşümünün değil, kullanılabilirliğinin de araştırılması gerekir. Elektrik enerjisini kullananların beklentisi, bu enerjiyi istedikleri miktarda ve istedikleri anda kullanabilmektir. Elektrik enerjisinin en büyük problemlerinden birisi, büyük miktarlarda depo edilememesidir. Bu durumda; tüketim miktarının tespit edilip anlık olarak üretim ihtiyaç miktarında yapılması gerekmektedir.

Dünyada, fosil yakıtların toplam enerji üretimindeki payı %80, katı biyokütle ve hayvansal atıklardan elde edilen enerji % 10.8, nükleer enerji %6.5, hidrolik enerji %2.2, ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (jeo-termal, rüzgar, güneş vb.) payı ise %0.5 seviyesindedir. Bilinen retilbilir fosil yakıt rezervleri 2004 yılı sonu itibariyle; petrolde 1.188 milyar varil olup, rezervlerin ömrü 41 yıl, doğalgazda 179 trilyon m<sup>3</sup>, ömrü 67 yıl, kömürde ise 909 trilyon ton olup, ömrü 164 yıl yetecek düzeydedir. Fosil yakıtlar açısından değerlendirme yapıldığında, bu yüzyıl içerisinde rezerv sorunu bulunmaktadır. <sup>(2)</sup>

Yukarıda belirtildiği gibi, fosil yakıtlar elektrik üretiminde oldukça önemli bir paya sahiptir. Hatta enerji üretiminde fosil yakıtların kullanımı 2020 yılına kadar 1.5 kat artacağı, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ise hemen hemen sabit kalacağı tahmin edilmektedir<sup>(3)</sup>

Termik santrallerde fosil türü yakıtlar birincil kimyasal enerji kaynağı olarak kullanılır. Sonra bu yakılarak ısı enerjisine dönüştürülür. Isı enerjisinden kazanda buhar elde edilerek termik enerjiye sonra mekanik enerjiye ve sonunda elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Üretimdeki süreklilik ve kalite elektrik güç santrallerinin önemini ortaya koymaktadır. Son yıllarda elektrik güç santrallerinin sayısı da hızla artmaktadır. Bu tesisler çok girişli-çok çıkışlı (Multi Input-Multi Output, MIMO) bir yapıya sahiptir. Kullanılan yakıtın kalitesine, iklime, tesisteki yıpranmaya, üretim ve tüketim miktarların değişimine göre santral parametreleri sürekli değişmektedir. Giriş ve çıkışa etki eden bu parametreler nedeniyle, elektrik güç santrallerinin kontrol edilmesi oldukça güç ve karmaşıktır.

Sistemlerin karmaşıklığı ve büyüklüğü arttıkça, kesin matematiksel modellerinin çıkarılması oldukça zorlaşmaktadır. Günümüzde sistemler genel olarak kararlı, lineer ve zamana bağımlı değişmeyen bir yapıda modellenir. Ancak bu özelliğin dışına çıktığında sistemlerin kontrol edilebilmesi, geleneksel kontrol yöntemleriyle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle yeni kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bilim adamları ve kontrol mühendisleri, insanın karar verme yeteneğinden esinlenerek, insan gibi düşünen ve karar veren kontrol sistemleri yapmaya yönelmişlerdir. Son

yıllarda modern kontrol yöntemleri olarak adlandırılan kontrol sistemleri geleneksel kontrol sistemlerinin yerini almaya başlamıştır.

## 1.1 Literatür Taraması

Kontrol alanında, istatistiksel model oluşturma fikrinin temelleri; Astrom, Bohlin (1965) ve Box, Jenkins (1970) tarafından atıldı denebilir<sup>(4,5)</sup>. Takip eden yıllarda, bir çok araştırmacı tek giriş-çıkışlı (Single Input- Single Output, SISO) sistemler için bilgisayar kodları geliştirdi<sup>(6,7)</sup>. 1970'ler ve ortalarında ise ilk olarak çok giriş-çıkış'lı (MIMO) sistem yapıları literatürde yer almaya başladı<sup>(8-12)</sup>. O yıllarda, optimum teorileri içeren en iyi sistem dizaynı 1976 yılında bir sempozyumda sunuldu<sup>(10)</sup>.

Yeni güç santral dizaynı ve çalışmaları için sistem modelleri geliştirmek üzere türbin-kazan alanında, birçok çalışma yapıldı<sup>(13-15)</sup>. Ardından kömür yakıtlı büyük güç santrallerinin modellenmesi ile ilgili çalışmalar devam etti<sup>(16-25)</sup>.

Modern kontrol yöntemlerinden kabul edilen bulanık mantık teorisi, ilk olarak 1965 yılında Zadeh<sup>(26)</sup> tarafından ileri sürülmüştür. Bulanık mantık teorisinin endüstriyel uygulamasını ilk olarak 1974 yılında Mamdani<sup>(27)</sup> bir dinamik santralin kontrolü için yapmıştır. Bir yıl sonra Mamdani ve Assilian<sup>(28)</sup>, ilk bulanık mantık kontrolörü tasarlayarak bir santraldeki buhar makinesini başarıyla kontrol etmişlerdir. Sonraki yıllarda, Mamdani ve Zadeh dışında Takagi ve Sugeno<sup>(29)</sup> da bulanık mantık kontrolörler için farklı

önerilerde bulunmuştur. Sonraki yıllarda Mamdani'nin ilk olarak kullandığı bulanık oransal – integral (proportional – integral, PI) kontrolör yapısı ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır<sup>(30-41)</sup>.

Bir güç santraline ait kazan kontrolü yapılan diğer bir çalışma olarak da Malki ve Chen'in yapmış oldukları uygulama gösterilebilir<sup>(42)</sup>. Houston'da bir güç santraline ait buhar kazan kontrolü için bulanık PI kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada yakıt, yanma gazı ve su gibi üç kontrol değişkenini ayarlayarak, kazan çıkışındaki buhar akışı, basıncı ve sıcaklığını düzenlemeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda santral kazanının ısı ve sıvı seviye kontrolünü başarıyla yapmışlar, klasik PI ile bulanık PI'ı karşılaştırmışlardır. Kullanılan bulanık PI ile maksimum aşmaların azaldığını, cevap sürelerinin kısaldığını ve kalıcı-hal hata osilasyonlarının azalttığını görmüşlerdir.

Klasik kontrolörler genellikle bir sistemin ve onun lineer yaklaşımının matematiksel modeline dayalı olarak dizayn edilirler. Lineer olmayan birçok pratik sistemin parametrelerinde belirsizlikleri vardır ve bunlar gürültülü ortamlarda meydana çıkarlar. Bu konularda kontrol alanında birçok çalışma yapılmıştır<sup>(43-45)</sup>. Lineer olmayan matematik<sup>(46-48)</sup> ve kararlı kontrol<sup>(49,50)</sup> alanları da bunlardandır. Bu geleneksel tekniklerin çoğu, sistem üzerine odaklanmıştır ve bilgi gerektirir. Parametre değişimleri sınırlıdır. Geleneksel kontrolörlerin bu sınırlamalarını yenmek için son yıllarda zeki kontrol tekniklerine olan ilgi artmaktadır. Uzman sistemlerinin uygulaması<sup>(51)</sup>, bulanık mantık<sup>(52,53)</sup> ve yapay sinir ağları<sup>(54)</sup> (YSA) gibi çalışmalar yapılmaktadır.

Bilinmeyen bir sistem için giriş-çıkış değişkenleri ve onların geçmiş değerlerini kullanarak, sistemin serbest bir modelinin oluşturulması fikri ortaya atılmıştır<sup>(55,56)</sup>. YSA tabanlı serbest model, referans modelli adaptif kontrol sistemine uygulandığında, yeterli bir takip performansı ve düzensizliklerin yok edilebileceğinin görüldüğü çalışmalar yapılmıştır.<sup>(57-61)</sup>

Yeterli nöron ve uygun yapının verilmesi ile çok katmanlı YSA ayırt edici olarak lineer olmayan fonksiyona istenen hassasiyette modellenebileceği gösterilmiştir<sup>(62)</sup>. Bu nedenle kontrolörler olarak YSA yüksek dereceli lineer olmayan sistemleri kontrol etmek ve yeterli performans elde etmek için uygulanabilir<sup>(63)</sup>. Bundan dolayı uygun sinir ağlarından birinin tanımlayıcı diğerinin kontrolör olarak seçilmesi ile sistemlerin geniş bir bölümünü kontrol etmek için iki ağ şeması uygulanmıştır<sup>(64-67)</sup>.

Lineer olmayan sistemlerin model referanslı adaptif kontrolünde uygulanan yapay sinir ağlarına odaklanmış bir çok araştırma yapılmıştır. Ancak çoğu yaklaşımlar bilinmeyen sistemden hakkında bazı bilgilere gereksinim duymaktadırlar. Sooner ve Passino, geleneksel bulanık sistem, yada bir YSA sınıfı olan Takagi-Sugeno bulanık sistemlerini kullanan, sabit, endirekt, adaptif kontrol şeması teklif etmişlerdir<sup>(68,69)</sup>. Ancak, sistemin değişkenlerinin bilindiğini ve sistemin lineer olmayan değişkenlerinin de bilinen temel fonksiyonlarla bilinmeyen çarpanların bir kombinasyonu olabileceğini varsaydılar. Jagannathan ve Lewis, ayırık zamanlı çevrim içi eğitilmiş sinir ağ üzerinde, direkt adaptif kontrolör üzerinde çalıştılar<sup>(70)</sup>. Kullandıkları YSA iki katmanlı bir yapıdadır. Jagannathan, YSA ile

parametreleri belirlenen adaptif bulanık mantık kontrolünü geliştirmiştir<sup>(71)</sup>. Ancak bu yeni yaklaşımdaki sistem, geri beslemeli, doğrusallaştırılabilir, ayrık zamanlı, lineer olmayan sistemlerle sınırlı kalmıştır.

Yapay sinir ağlarının, sistemin ters modeli üzerine uygulama çalışmaları yakın zamanda gerçekleştirildi. Kennedy ve Quintiana, yapay sinir ağlarını, çıkış geri beslemeli sistemde, bir ters kontrolör gibi davranması için geliştirdi<sup>(72)</sup>. Zhang, ters girdi çıktı eşlemeli yapay sinir ağlarını, güç sistem kararlayıcı dizaynı için önerdi<sup>(73)</sup>. Ancak, önerilen kontrolör sistemi, lineer olmayan sistemler için genelde çalışmamaktadır. Park ve diğerleri, kontrolör sistemini, minimum olamayan kararlı sistem durumlarını ortadan kaldırabilmesi için orijinal modele bir ek değişken uygulayarak değiştirdiler<sup>(74)</sup>. Ancak, araştırmaları lineer sistemlere odaklanmıştır. Belirsiz, lineer olmayan sistemler için bu değişkenlerin seçimi büyük bir uğraş olabilmektedir. Widrow ve Plett yapay sinir ağlarını, bir adaptif filtre gibi değerlendirdiler ve bununla adaptif ters kontrolörü, lineer olmayan sistemlere uyarlamaya çalıştılar<sup>(75)</sup>.

Lineer olmayan sistemlerin kontrolü alanındaki araştırmalarla elde edilen pek çok yeni gelişme, YSA'nı ilgi çekici bir saha haline getirmiştir. Bu tür çalışmalar, sınırlayıcı durumları azaltmayı ve lineer olmayan sistemlerin daha geniş alanlarına bu teknikleri genellemeyi hedefler. Lineer olmayan kontrol problemlerinin çözümüne katkıda bulunan YSA' nın temel avantajı, paralel yapısı ve tanımında var olan lineersizlik nedeniyle uygun olarak seçilen parametreler yardımıyla göreceli bir doğruluk derecesinde, dinamik lineer olmayan bir yapıyı modelleyebilme yeteneğine sahip olmasıdır. Lineer



olmayan sistemleri tanımlama ve kontrol problemlerinde tanımlayıcı haritalamalar için, ileri beslemeli (feed forward) YSA' nın uygunluğu kabul edilmiştir. Bazı araştırmacılar, tanımlama modeli ve kontrol yapıları içine YSA ilave ederek bu alana ait orijinal sonuçlar elde etmişlerdir<sup>(76-79)</sup>.

Güç generatörlerinin kontrol problemi konusunda bazı araştırmacılar YSA kullanarak gelişmeler kaydetmişlerdir<sup>(80)</sup>. Gelişmiş kontrol tekniklerinde, lineer olmayan sistem dinamiğini karakterize edici negatif geri beslemeli lineerleştirme metotları da kullanılmaktadır<sup>(81)</sup>. Bu teknikler laboratuvar ortamında test edilmesine rağmen, gerçek işletme şartlarında henüz uygulanmamıştır. YSA teknolojisi yardımıyla, güç santrallerinin kontrolünü içeren bir çalışmayla karşılaşılmamıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan santral modeli, Almanya'daki bir 750 MW'lık kombine güç santraline aittir<sup>(82-85)</sup>. Böyle bir santralin ölçme yöntemleri ile matematiksel parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra yapay sinir ağları ile yapılan kontrolör ile kontrolü sağlanmıştır. Sonuç olarak klasik PID kontrolöre göre çok iyi sonuçlar alınmıştır.

Güç sistemi kontrol çalışmalarında, Yük-frekans kontrol çalışması olarak bir başka makale ve doktora tez çalışmasında<sup>(86,87)</sup>, bulanık PI tasarlanmıştır. Bu çalışmada hata büyük olduğunda oransal kazancın ve integral kazancın büyük; tersi yani hatanın küçük olması durumunda oransal kazanç ve integral kazancın küçük olması gerektiği yaklaşımı kullanılmıştır.

Bir termik santrale ait güç-entalpi kontrolünü yapmak üzere modern kontrol tekniklerinin doktora ve yüksek lisans çalışması da bu tez çalışmasına bir referans olarak gösterilebilir<sup>(88,89)</sup>.

## 1.2 Çalışmanın Amacı

Klasik kontrol sistemlerinden oransal – integral – türev (Proportional-Integral – Derivative, PID) kontrolör ile kontrol edilen elektrik güç santralleri giriş ve çıkış parametrelerindeki değişime hızla uyum sağlayamamaktadır. Özellikle santralin modellemesinde kullanılan parametrelerin değişiminde (kazanın kirlenmesi, yakıt kalitesindeki düşüşler vb.) PID gibi klasik kontrol yöntemleri bu değişimlere hızlı bir şekilde karşılık verememektedir. Bu alanda adaptif kontrol yöntemi ile yapılan uygulamalar ile çok iyi sonuçlar alınmıştır. Bu çalışmalara dayanarak sorunlara çözüm olarak, parametrelerinin değişimini de hesaplamalara katan, parametre değişikliklerinden etkilenmeyen yeni ve modern kontrol yöntemleri bu tezde uygulanmaya çalışılmıştır. Yapay sinir ağları kullanılarak tasarlanan kontrolör ile modellemesi yapılan santralin güç ve entalpi çıkışlarının kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca önerilen kontrolörün üstünlüğünü ispatlamak amacıyla aynı santralin geleneksel kontrolörlerden olan PI ve PID kontrolör ile kontrol edilerek, performansları karşılaştırılmış ve modern kontrol yöntemlerinin geleneksel kontrol yöntemlerine üstünlükleri incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. TERMİK SANTRALLER

#### 2.1.1. Genel

Yüzyıllar önce ölen bitkilerin fosilleşmesi sonucunda, fosil yakıtlar olarak bildiğimiz kömür, petrol ve doğalgaz oluştu. İnsanoğlu, fosil yakıtları, ısınmada, ışığından yararlanmada ve diğer amaçları için yaklaşık 10000 yıldır kullanıyor. Teknoloji alanında kullanımı ise, yaklaşık 250 yıl önce, işlevsel buhar makinelerinin fosil yakıtlar kullanarak çalıştırılmasıyla başladı. Günümüzde ise fosil yakıtlardan daha çok elektrik enerjisi üretmek için büyük güçlü termik santraller yapılmaktadır.

Buhar ve elektrik, sanayi için en gerekli enerji kaynaklarıdır. Buhar tek boyutlu sistemlerde katı yakıt, fuel-oil veya gaz gibi yakıtların brülörlerde yakılması sonucu kazan ünitelerinde üretilmektedir. Elektrik ise, santralde üretilir<sup>(90)</sup>.

Termik santraller yanmayla ortaya çıkan ısı enerjisinden elektrik enerjisi üreten merkezlerdir. Yanma, bir kazan yada buhar üreticinde gerçekleştirilir ve suyun buhara dönüştürülmesini, daha sonrada bunun yüksek basınç altında, yüksek sıcaklıkta aşırı ısıtılmasını sağlar. Buhar önce türbinin yüksek basınçlı bölümünde ve daha sonra tekrar ısıtıldıktan sonra

orta ve alçak basınçlı bölümlerde genişler. Birbirini izleyen bu genişlemeler sırasında ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüşür. Yoğunlaştırıcıda soğutulan buhar tekrar sıvı haline döner; türbinden çektiği buharla çalışan besleme suyu ısıtma bölümüyse suyun sıcaklığını yükseltip kazana gönderir. Su, sıvı ve gaz fazında kapalı bir çevrim içerisinde sürekli dolaşır.

Duman, kazan çıkışında büyük oranda ısını yitirir ve elektro filtreden sonra havaya verilir; Böylece yanma olayı gerçekleşir. Kömürle çalışan santrallerde dumanın daha sonra elektrostatik düzenekler yardımıyla tozu alınır ve bacadan dışarı atılır. Bu arada türbinde yaratılan mekanik enerji bir alternatöre iletilir ve burada elektrik enerjisine dönüştürülür. Turbo-generator gurubunun uzunluğu 600 MW bir güç için bazen 50 m'yi aşar; verilen elektrik akımıysa 20.000 V'luk bir gerilim altında 19.200 A ulaşır. Modern bir termik santralın verimi %40 ile %50 arasındadır.

Termik santrallerde kullanılan yakıtlar mazot, doğal gaz ve kömürdür. Mazot için gerekli olan tesisler basit tesislerdir; mazot 30000-40000 m<sup>3</sup> hacimli, silindir biçiminde metalik depolarda saklanır. Depolardan alınıp ısıtılan mazot püskürtülerek brülörlere aktarılır. Gaz kullanımı için gerekli olan donanımlar çok az sayıdadır; Gaz brülörlere gönderilmeden önce yalnızca genişletilir, filtreden geçirilir ve ısıtılır.

Termik santrallerde kömür kullanımı; için gerekli olan tesisler gaz yada mazota oranla çok daha önemli ve büyüktür. Burada özellikle kömürün demiryolu, akarsu yada deniz yoluyla santrale getirilmesi, boşaltılması,

depolanması, santral alanı içinde dolaştırılması ve kazana verilmesi için gerekli tesisler yapılmalıdır. Kömür önce toz haline getirildikten sonra, önceden mazotla 500 C'a kadar ısıtılmış olan yanma odalarının brülörlerine kuvvetli bir hava akımıyla gönderilir. Bu odaların birkaç yüz m<sup>3</sup>'ü bulan bir hacmi ve birkaç bin m<sup>2</sup> büyüklüğünde bir ısıtma alanı vardır.

Termik santraller, kapalı devre halinde dolaşan suyu buharlaştıran bir kazan ve bir turbo generator (bir türbinle harekete geçirilen alternatör) grubundan oluşmaktadır. Bu tür klasik santrallerde buhar, kömür, fuel-oil ve nadiren doğalgaz veya yüksek fırın gazı yakılarak üretilir.

Termik santralleri büyük debili akarsu yakınında veya deniz kıyısına kurmak gerekiyor; böylece santralde üretilen ısının yarısını boşaltan yoğunlaştırıcının suyla soğutulması sağlanır. Sıcak su ırmağa doğrudan boşaltıldığı gibi (açık devre soğutma) büyük soğutma kulelerine de yollanabilir; burada havayla temas ederek kısmen buharlaştıktan sonra yoğunlaştırıcıya basılır (kapalı devre soğutma). Bu son çözüm daha pahalıdır, ama su alma işlemini ve ırmak sularının ısınmasına bağlı çevre sorunlarını azaltma olanağı sağlar<sup>(91)</sup>.

#### **2.1.1.1. Termik Santrallerin Tarihçesi ve Gelişimi**

Son yıllarda ülkelerin gelişmişliği kullandıkları elektrik miktarı ile ölçülmektedir. Teknolojik gelişmeler de sürekli bir enerji ihtiyacı doğurmaktadır. Ülkelerin endüstriyel olarak gelişebilmesi ve hayat

standartlarının yükselebilmesi için yeterli miktarda elektrik enerjisinin mümkün olan en düşük fiyatla halkın hizmetine sunulabilmesi gerekmektedir. İşte bu nedenle eski zamanlardaki küçük ve ilkel buhar santralleri, tekniğin ilerlemesine paralel olarak yerlerini daha güçlü, daha modern ve daha ekonomik santrallere bırakmışlardır.

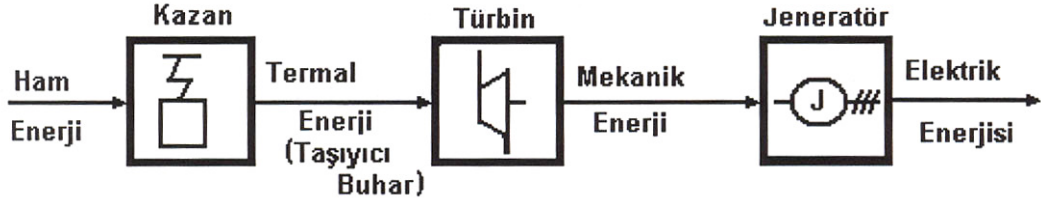
Sanayide, yüksek miktarda güç gerektiren işlerde, rüzgar, su, insan kuvveti ve ev hayvanları gibi ilkel kuvvetlerden faydalanılmakta iken, Thomas Newcomen adlı bir İngiliz tarafından 1712 yılında kömür ocaklarından su çekmek için yapılan işlevsel buhar makinesi ile sanayi büyük bir değişikliğe uğradı. Ardından yine bir İngiliz mühendis James Watt da 1769 yılında bir buhar makinesi yapmıştır. James Watt, aynı zamanda 1784 yılında ilk hız regülatörünü de bulan kisidir. 1799 yılında, Unna Knigsbom adında bir Alman, buhar makinesi yaparak bunu büyük bir pompanın alıtırılmasında kullanmıştır<sup>(90)</sup>.

Buhar santrallerinin gerçek anlamdaki gelişimi 1892'lerde türbinlerin gelişmesi ile başlamıştır. Böylece yalnızca i ihtiyaç için elektrik üretimi devri kapanmış ve önce bir binanın tümü, daha sonra da bir caddedeki binaların tümü için elektrik üreilmeye başlanmıştır<sup>(1)</sup>.

#### **2.1.1.2. Termik Santrallerin Genel Yapısı**

Termik güç santralinin ilk adımı, fosil yakıtlardan elde edilen ham (işlenmemiş) kimyasal enerjiyi termal enerjiye dönüştürmektir. Bu işlem için

kazanlardan (boiler) ya da buhar jeneratörlerinden yararlanılır. Ardından, termal enerji, mekanik enerjiye çevrilmek üzere, taşıyıcı buhar yardımı ile türbine taşınır. Son olarak generatörde mekanik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülür (Şekil 2.1)<sup>(92)</sup>.



**Şekil 2. 1.** Bir Buhar Güç Santralinin Akış Şeması

Enerjisi yüksek olan yüksek basınçlı kızgın buhar, türbinde enerji kaybeder ve çürük buhar olarak çıkar. Buhar türbinine aktarılan bu enerji, önce mekanik enerjiye daha sonra da alternatörle elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbinden çıkan ve enerjisi düşmüş olan çürük buhar yoğunlaştırıcıya verilerek kendi ısını soğutma suyuna aktarır ve sıvı olarak çıkar. Elde edilen su, temiz ve belirli bir sıcaklıktadır. Bu su pompa ile kazana verilir. Buhar üretim tesisi olan kazandan baca gazı ve yüksek basınçlı kızgın buhar çıkar. Yakıt enerjisinin % 18'i baca gazına, % 82'si yüksek basınçlı buhara verilir<sup>(93)</sup>.

Güç santralleri, elektrik enerjisi dışında termal enerjinin bazı temel formlarını üretmek için de tasarlanabilir. İşletmelerde kullanılacak proses buharı üretmek için kullanılan bir çok endüstriyel santraller (örneğin bir kimya endüstrisindeki güç santralleri) vardır. Bölgesel bir ısıtma için gerekli buharı

sağlamak üzere ısı ve güç santralleri kullanılabilir. Elektrik enerjisi termal enerji ürünlerinden biridir. Enerji üretimindeki bu değişiklikler, güç santrallerinin şu şekilde sınıflandırılmasına olanak verir;

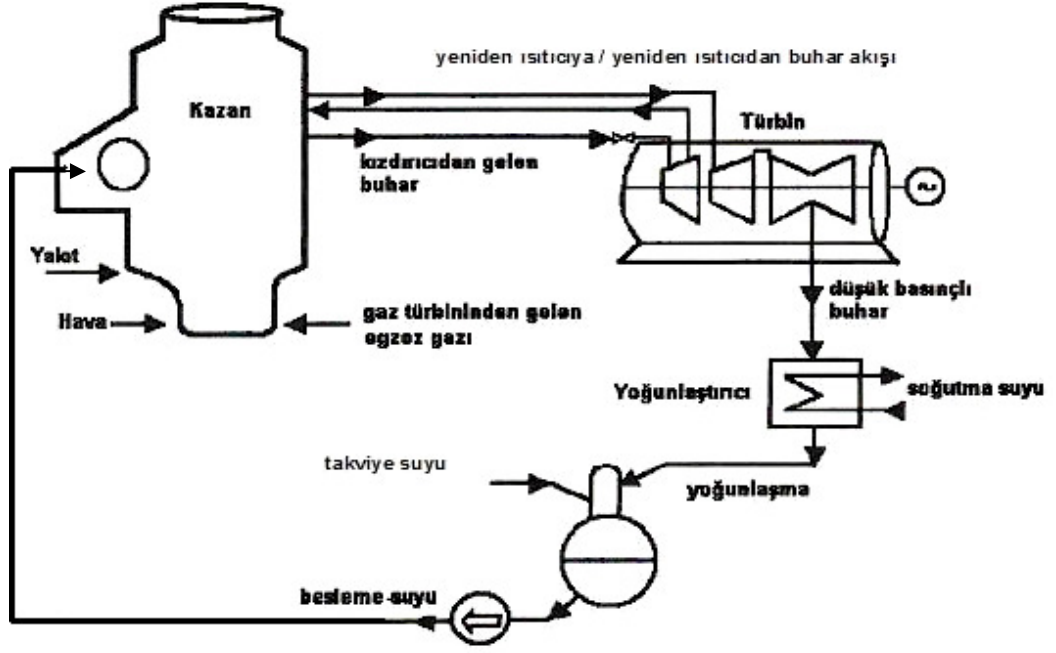
- Temel güç santralleri (sadece elektriksel enerji üretimi için)
- Isı ve güç santralleri (öncelikle ısı üretimi için)

Diğer bir sınıflandırma kriteri ise, kullanılan yakıta göredir. Ana olarak nükleer ve fosil yakıtlar olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Fosil yakıtlar ise; katı yakıtlar (kömür, kahverengi kömür, vb.), sıvı yakıtlar (petrol) ve gaz yakıtlar (patlayan ocak gazı, havagazı, doğal gaz, vb.) gibi sınıflandırılabilir<sup>(92)</sup>.

Şekil 2.2 de gösterilen kombine çevrim (Combined Cycle,CC) adı verilen gaz ve buhar türbin çevrimlerinden oluşan güç santral sistemleri sadece elektrik üretimi için kullanılır. Bu yapıda türbinler birbiri ile bağlantılı olduklarından enerji bir türbin tipinden diğerine transfer edilebilir<sup>(94)</sup>.

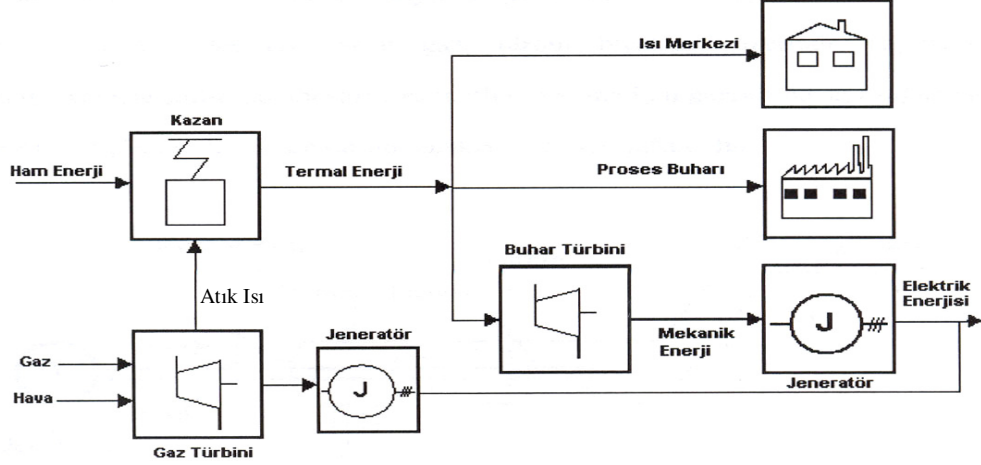
Şekil 2.2'deki gibi bir güç santralinde kazan, türbin, generator ve tüm diğer yardımcı birimler bir ünite şeklinde düzenlenmekle beraber her bir birim diğerlerinden bağımsız olarak da işletilebilir. 300 veya daha fazla MW'lı geniş ünitelerde, bir ünite tek bir türbini besleyen iki kazandan oluşabilir. Bu "Harmanlama Ünite Düzenlemesi" veya "İkiz-Kazan Harmanlama Sistemi" olarak adlandırılır<sup>(92)</sup>.





**Şekil 2. 2.** Standart Kombine Çevrim Sistemi

Kimyasal fabrika ve rafineriler gibi birçok büyük ölçekli endüstriyel işletmelerde elektrik enerjisi yanında çoğunlukla kimyasal reaksiyonlar ve ısınma amaçları için sıcak su ve/veya buhara da ihtiyaç duyulur. Yani, termal enerjinin doğru buhar sıcaklığı ve/veya buhar basıncında üretilmesi gerekir. Bu yapıyı yerel, bir yerdeki kombine edilmiş ısı ve güç istasyonu karşılar. Kombine çevrim Güç Santralleri (CHP) olarak adlandırılan bu sistemler, tüm güç ve termal işlem taleplerinin istendiği yer olan ticari ve endüstriyel uygulamalarda verimli olarak kullanılabilir. Kojenerasyon diye de adlandırılan bu Kombine Isı ve Güç Santrali gerekli elektrik ve ısıyı üretir (Şekil 2.3)<sup>(94)</sup>.



**Şekil 2. 3.** Bir Kojenerasyon (CHP) Sistemi

### 2.1.2. Kazan (Boiler)

Santralin dinamiği açısından önemli bir yere sahip olan kazanlar, bir güç santralının buhar üreten parçasıdır. Buhar kazanı; istenilen basınç, sıcaklık ve istenilen miktarda buhar üreten bir cihazdır. Buhar üretmek için, kimyasal enerjiden elde edilen ısı enerjisi kapalı bir kap içerisindeki sıvıya verilerek, sıvının buharlaştırılması sağlanır. Buhara verilen ısı enerjisi çeşitli yakıtların yakılmasından, elektrik enerjisinden, nükleer enerjiden veya eldeki artık bir ısının uygun şekilde değerlendirilmesinden elde edilebilse de, günümüzde bu ısı enerjisi çoğunlukla fosil yakıtlardan sağlanmaktadır<sup>(95)</sup>.

Yakıtın kimyasal enerjisi, kazanda meydana gelen yanma sonucu ısı enerjisine dönüşmektedir. Yanma sonucu meydana gelen gazlar (baca gazları), ısılarını konveksiyon ve radyasyon (ışınma) yolu ile kazan borularına

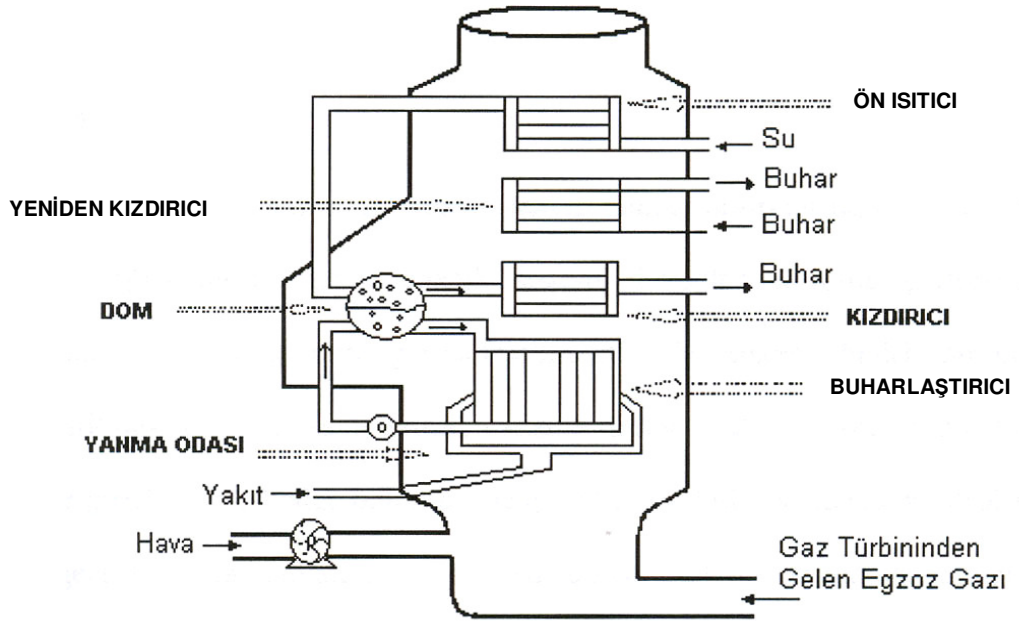
vererek boruların içerisinde geçmekte olan suyun sıcaklığının yükselmesini sağlar. Su sıcaklığı, kazan basıncının karşılığı olan buharlaşma sıcaklığına eriştiğinde buharlaşma başlar. Bu şekilde meydana gelen su-buhar karışımı genellikle "dom" denilen bir haznede doymuş buhar ve doymuş sıvı olmak üzere ikiye ayrılır. Doymuş buhar daha sonra yine baca gazları ile kızdırıcı tarafından kızdırılır. Su ise besleme suyu pompası yardımıyla tekrar çevrimin başlangıç noktasına gönderilerek yeniden ısıtılır. Kızdırıcılarda mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıklara erişmek, santral işletmeciliği yönünden arzu edilen bir durumdur. Yani, kızdırıcılardan geçen baca gazının sıcaklığı genellikle oldukça yüksektir. Bu nedenle baca gazları dışarı atılmadan önce besleme suyunun ve yanma havasının ön ısıtılmasında da kullanılabilir. Bu ön ısıtmayı yapan kısma ekonomizer adı verilir. Ayrıca kazan; yakıcılar, fanlar, emisyon kontrol ekipmanları ve baca gibi çeşitli yardımcı elemanlara sahip olabilir.

Buhar kazanlarında buhar üretilebilmesi için, yeterli sıcaklık seviyesinde bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Bu amaçla genellikle buhar kazanlarının ocaklarında fosil yakıtların yakılmasıyla ısı enerjisi temin edilir. İşte yakıt enerjisindeki yanabilir elemanların havanın oksijeni ile çok hızlı bir kimyasal reaksiyona girerek çevreye ısı ve ışık, yayması "yanma" olarak tanımlanır. Yanma elemanları yakıt ve havadaki oksijendir. Yanma ürünleri ise tam yanma için genellikle karbondioksit, su buharı ve ısı enerjisidir<sup>(95)</sup>.

Yakıtlar yakıldıkları zaman ortama kullanılabilir miktarda ısı veren maddelerdir. Fiziksel durumlarına göre katı yakıtlar (kömür vb.), sıvı yakıtlar

(benzin, gazyağı, motorin, vb. ) ve gaz yakıtlar (LPG-Sıvılaştırılmış Petrol Gazı, havagazi, doğalgaz, vb.) olarak sınıflandırılır<sup>(88)</sup>.

Şekil2.4'de bir kazanın iş şeması<sup>(94)</sup> görülmektedir;



**Şekil 2. 4.** Bir Kazanın Şematik Diyagramı

Buhar kazanlarını oluşturan temel elemanlar aşağıda belirtilmiştir.

- OCAK: Yakacakların yakılarak ısı enerjisinin elde edildiği kısımdır.
- ASIL ISITMA YÜZEYLERİ: Sıcak duman gazları ile buharlaşmakta olan suyun temasta olduğu yüzeyler.
- KIZDIRICI: Doymuş buharın sabit basınç altında ısıtılarak kızgın buhar haline getirilmesi işlemi kızdırıcılarda olur. Kızgın buhar iki önemli yarar

sağlar. Birincisi kızgın buharın aynı basınçtaki doymuş buhardan daha yüksek entalpili oluşu, ikincisi de kızgın buharın nemsiz oluşu nedeniyle türbin işletmesinde sağlanan kazançtır. .

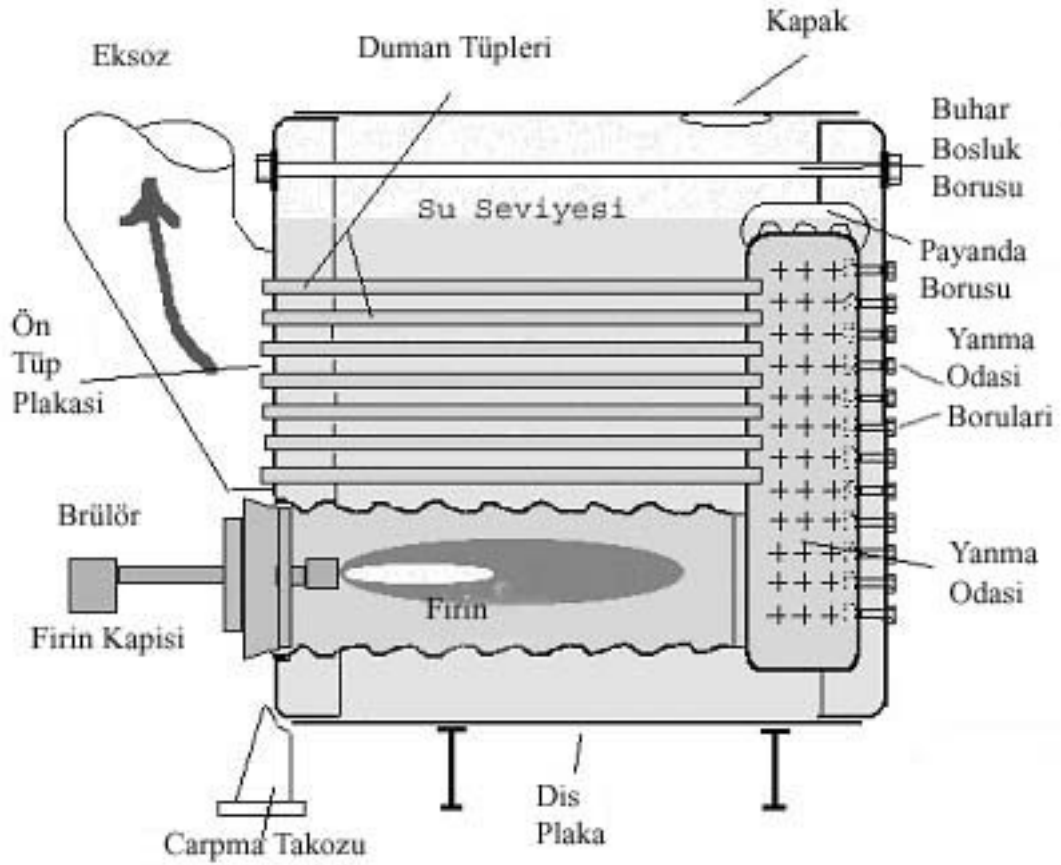
- d) SU ISITICILARI: Besleme suyunun asıl ısıtma yüzeyine girmeden önce bir miktar ısıtıldığı yüzeyler.
- e) EKONOMİZERLER ve HAVA ISITICILARI (Luvolar): Kazan besleme pompası ile kazana verilen dolaşım suyunun baca gazlarındaki artık ısıdan yararlanarak sıcaklığının yükseltildiği ısı değiştiricisine ekonomizer denilir. Hava Isıtıcıları ise yakma havasının duman gazları ile ısıtıldığı yüzeylerdir.
- f) KAZAN DOMLARI: Doymuş buharın su-buhar karışımından ayrılması domun üst kısmında olur. Kazan suyunda herhangi bir şartlandırma işlemi ve kazandan su atılması işlemi(blöf) domda yapılır.
- g) BACA: Duman gazlarını kazandan uzaklaştıran ve çekmeyi sağlayan elemandır<sup>(96)</sup>.

Kazanlar, nükleer ve fosil yakıtlı her iki güç santrallerinde de kullanılırlar. Modern kazanlar, düşük (70 bar) basınçlı doymuş buhar üreten basınçlı-su reaktörlü (Pressure Water Reaktor, PWR) buhar jeneratörleri hariç, yüksek basınçlı (65'den 240 bar'a) süper ısıtılmış buhar üretir<sup>(94)</sup>.

## 2.1.3. Yapılarına Göre Kazanlar

### 2.1.3.1. Alev borulu kazanlar

Yakıtın yanmasıyla oluşan kızgın gazların (alev) boru içinden, buharlaştırılacak suyun ise boru dışından geçtiği kazanlara denir. Kazanın 2/3 ü su, 1/3 ü ise buhar hacmi olarak düzenlenmiştir. Kazan içindeki su seviyesi sürekli olarak kontrol cihazlarıyla kontrol edilir. Şekil 2.5'de alev borulu kazan şeması görülmektedir.



Şekil 2. 5. Alev Borulu Kazan Şeması

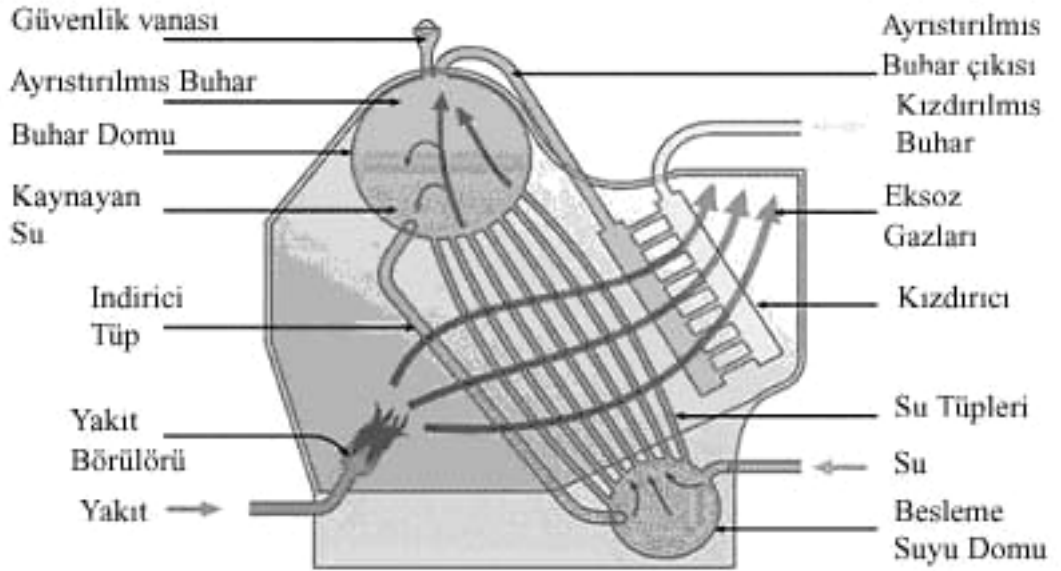
Katı veya sıvı yakıtlar, külhan yada ocak adı verilen bölümde yakılır. Oluşan kızgın gazlar yanmamış karbon partikülleri ile beraber cehennemlik veya yanma odasına gelirler. Burada karbon parçacıkları da yanar. Bu bakımdan cehennemlik külhandan sonra kazanın en sıcak yeridir. Külhan ve cehennemlik etrafı tamamen suyla çevrilidir. Isısını suya veren gazlar alev ve payanda borularından geçerek duman sandığına gelirler. Daha sonra baca yoluyla atmosfere atılırlar.

#### Alev Borulu Buhar Kazanlarının Avantajları:

- Çok miktarda suyu depo eder.
- Yakıtların yakıldığı külhan veya ocağın bir tarafı dışında tümü suyla çevrili olması nedeniyle ısı kayıpları az ve kazan verimi yüksek olur.
- Damıtık yada saf suya gereksinim göstermezler ve içilebilen her türlü suyla çalıştırılabilirler.
- Isıtma yüzeyleri küçük en fazla 250 m<sup>2</sup> dolaylarında ve saatte ürettikleri buhar miktarı 7,5 ton civarındadır.
- Kazana su alınıp, bir istim kazanının istim oluşturacak biçimdeki yanar durumuna geldikten sonra (fayrap), işletme basıncında buhar elde edilmesine kadar geçen süre olan buhar tutma süreleri çok uzundur. (10 - 20 saat)
- Ürettikleri buharın basınç ve sıcaklığı düşüktür. Bu basınç maksimum 20 bardır<sup>(96)</sup>.

### 2.1.3.2. Su borulu kazanlar

Modern kazanlar su borulu kazan tipindedir. Bu tip kazanların özelliği sanayide ilk uygulanmaya başladığından bu yana güvenilir ve operasyonel olmalarıdır. Su borulu kazanlarda, sıvı veya katı yakıtların yanmasıyla oluşan alev ve dumanın, kazan içine yerleştirilmiş, içinden su geçen borulara yüzeylerine dışardan temas ederek suyu buhar hale getirilir. Şekil 2.6'da su borulu kazan şeması görülmektedir.



**Şekil 2. 6.** Su Borulu Kazan Şeması

Su Borulu Kazanların; buhar elde etmek için fazla zamana ihtiyaç olmaması, yüksek basınç, sıcaklık ve yüke uygun olması, sürekli maksimum yükte çalışabilmesi gibi avantajları vardır. Ancak bakımı, temizliği ve işletmesinin zor olması, kirli su boru içlerinde sert tabakalar meydana getirmesinden dolayı arıtılmış, kaliteli besi suyunun kullanılmasının zorunlu



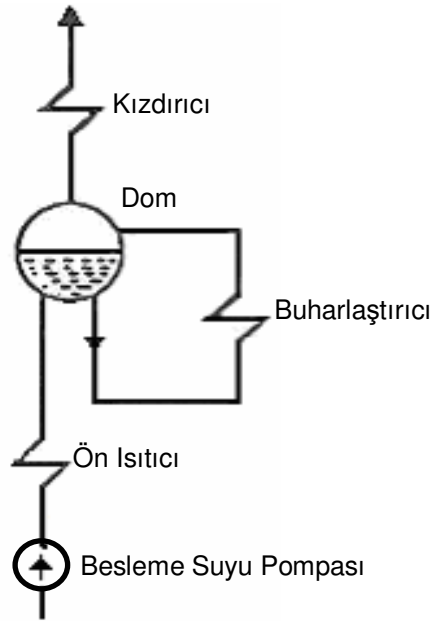
olması gibi dezavantajları vardır. Boru içerisinde oluşan sert tabakalar kazanın verimini düşürür, boru patlamaları meydana getirir. Kömür yakan kazanlarda buhar verimi yaklaşık % 80 civarındadır. Su borulu kazanlar genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

#### 2.1.3.2.1. Domlu kazanlar

Domlu kazanlar, doğal ve zorunlu dolaşimli olmak üzere iki tiptedirler.

##### a) Doğal dolaşimli domlu kazanlar:

Sanayi tesislerinde en yaygın tank kazanı olan doğal sirkülasyon kazanı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 2. 7.** Doğal Sirkülasyon Kazanlarının Temel Şeması

Burada geri besleme pompası, suyun ön ısıtıcının içinden tanka gitmesi için zorlar. Oradan da ocak duvarlarının altından sistemin içinden, genellikle ısıtılmadan, tüplere ulaşır. Su, ısı radyasyonuna maruz kalan ocak duvarındaki yükseltici tüplerin içinden yükselirken buhar üretilir. Su / buhar karışımı kazan tankına gönderilir. Düşüşlerdeki ve yükselmelerdeki yoğunluk farklarından dolayı sirkülasyon sağlanır ve bu sirkülasyona yerçekimi sebep olur. Bu bize neden kazanların doğal sirkülasyon kazanı olduğunu açıklar. Buhar, tank da ki buhar / su karışımından ayrılır ve kızdırıcıdan geçerek kazanı terk eder.

Kazanlarda buhar üretici borular yatay ve yataya yakınsa ve besleme suyu kazana alt domdan verilip ve buhar üst domdan alınıyorsa bu tip kazanlara Serbest doğal sirkülasyonlu kazanlar denir. Doğal hızlandırılmış kazanlarda ise buhar üretici borular dikeydir, besi suyu kazana üst domdan verilir, nispeten soğuk besleme suyu buhar üretici borular veya downconer adı verilen borularla dolaşımını tamamlar. Genelde günümüzde kullanılan kazan tipidir. Doğal dolaşımli domlu kazanlar 150 Atü basınca kadar olan aralıkta kullanılır.

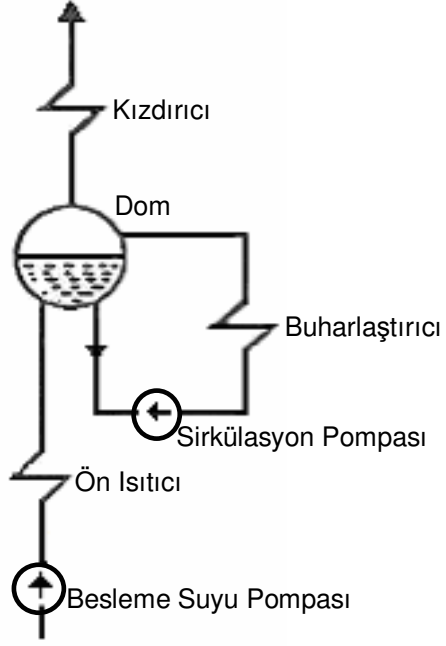
Kontrol teknolojisi açısından tank kazanlar için aşağıdaki özellikler söylenebilir:

- Tank içerisindeki su seviyesi kazana verilmesi gereken besleme suyunun bir ölçüsüdür.

- Tank kesin olarak buharlaştırıcıyı süper ısıtıcı bölgesinden ayırır. Bu buhar sıcaklığını kontrol etme açısından bir avantajdır. Besleme suyu akışındaki değişimler buhar sıcaklığına etki etmez.
- Depo kapasitesi tanka ve tekrar sirkülasyon tüplerine bağlı olup oldukça büyüktür öyle ki yük değişimlerinde ateşlemedeki tembellik başarıyla önlenir.
- Genel olarak, tank buharlaşma son noktasını sabitlediği için eğer yük maksimum oranının %40 ila %50'sinin altına düşerse aktif buhar sıcaklığını ayarlanan değerde tutmak mümkün olmaz<sup>(97)</sup>.

#### **b) Zorlanmış dolaşımli domlu kazanlar:**

Domlu doğal dolaşımli kazanlardaki kapasitenin yeterli olmaması durumunda, kazan kapasitesini artırmak için zorunlu bir dolaşım yapılması gerekmektedir. Burada amaç suya zorunlu bir dolaşım sağlamaktır. Dolaşım cebri olarak bir pompa ile sağlanmaktadır. Şekil 2.8'de zorlanmış dolaşımli domlu kazan şeması görülmektedir. Aynı zamanda buhara da bir sirkülasyon sağlanabilir. Zorlamalı dolaşımli domlu kazanlar 150-180 Atü basınç aralığında kullanılır. Bu kazan tipi Lamont kazanı olarak da bilinir. Bu kazanların avantajı suyun yoğunluğu doymuş buhar yoğunluğuna yaklaştığı zaman oluşan yüksek basınçlarda bile sirkülasyonu garanti etmesidir. Kontrol mühendisliği açısından Lamont ve doğal sirkülasyon kazanları arasında görünür bir fark yoktur<sup>(97)</sup>.



**Şekil 2. 8.** Zorlamalı Sirkülasyon Kazanlarının Temel Şeması

#### 2.1.3.2.2. Domsuz ( tek geçişli ) kazanlar

Domsuz tek geçişli kazanlarda kazan besleme suyu pompası ile basılan suyun tümü doğrudan buharlaşarak kızdırıcılara geçer. Domlu kazanlarda olduğu gibi doymuş buharın sudan ayrılarak tekrar buharlaştırıcıya gitmesi söz konusu değildir. Tek geçişli kazanlar 180 Atü basıncın üzerinde kullanılır.

#### 2.1.4. Çalışma Basıncına Göre Kazanlar

Alçak basınçlı kazanlar (20 bar' a kadar)

Orta basınçlı kazanlar (20-50 bar)

Yüksek basınçlı kazanlar (50 bar'dan büyük)

olarak 3'e ayrılır. Yüksek basınçlı kazanlarda yüksek sıcaklık ve basınçta ki buharın ısı enerjisi buhar türbinlerinde mekanik enerjiye dönüşür. Bu enerji generatorlerde fabrikanın ihtiyacı olan elektrik enerjisine çevrilir<sup>(96)</sup>.

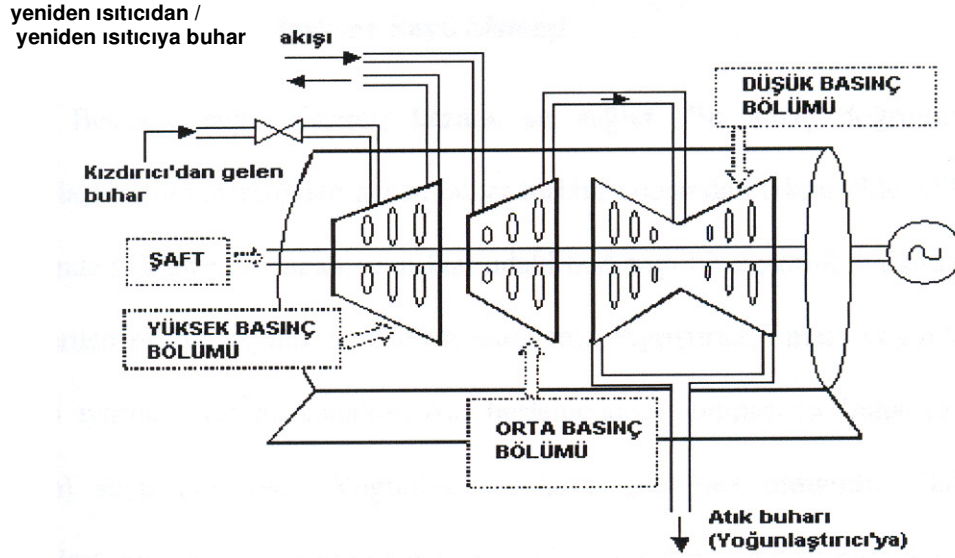
### **2.1.5. Buhar Türbini**

Bir buhar türbini yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı buharda depolanan enerjii, daha sonra generatör tarafından elektriksel enerjiye dönüştürülecek olan mekanik enerjisine dönüştürür. Buharı sağlayan kazan için ısı kaynağı bir reaktör veya fosil yakıtları (kömür, petrol veya gaz) yakan bir kazan olabilir.

Çeşitli yapılarda olan buhar türbinleri birimin boyutlarına ve buhar koşullarına bağlı olarak inşa edilirler. Normalde seri bağlı iki yada daha çok sayıda türbin bölümlerinden oluşur. Her türbin bölümü rotora tutturulmuş hareketli kanatlar grubu ve durağan kanatlar grubundan ibarettir. Hareketli kanatlar kepçe olarak isimlendirilir. Durağan kanatlar meme (sübab) bölümleri biçiminde düzenlenmiş olup, içinde buharın yüksek hızda ivmelendiği lüleleri yada geçitleri oluşturur. Bu yüksek hızlı buharın kinetik enerjisi kepçeler yardımıyla mil momentine dönüştürülür<sup>(98)</sup>.

Türbin içerisinde ana şaft boyunca türbin kanatları monte edilmiştir. Çok yüksek bir basınçla türbin içerisine püskürtülen kızgın buhar türbin kanatlarını çevirir. Ana şaft, turbo-generator sonundaki generator içerisine kadar devam eder. Sistemden maksimum verimlilikle faydalanmak için,

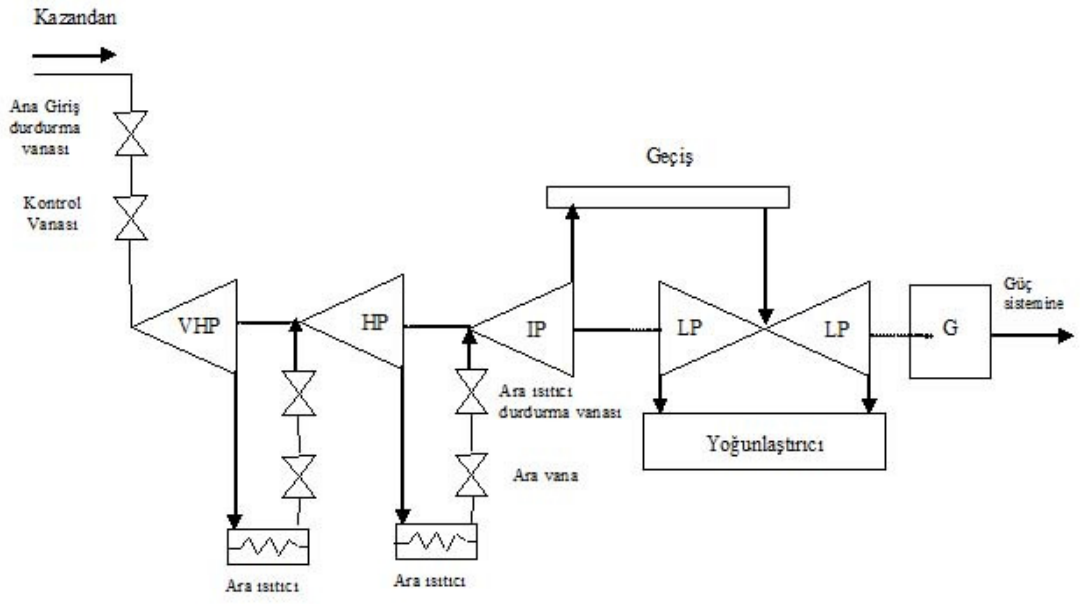
türbinin ilk kademesini (çap olarak en küçük kanatların olduğu yüksek basınçlı silindir) sürerken kısmen kaybolan buhar enerjisini kazanmak üzere, buhar kazanda tekrar ısıtılır. Buhar, daha sonra türbinin ikinci kademesini (büyük kanatlara sahip orta basınçlı silindir) da geçerek üçüncü aşamada (en büyük kanatların olduğu silindirler) geçişini tamamlar. (Şekil 2.9)



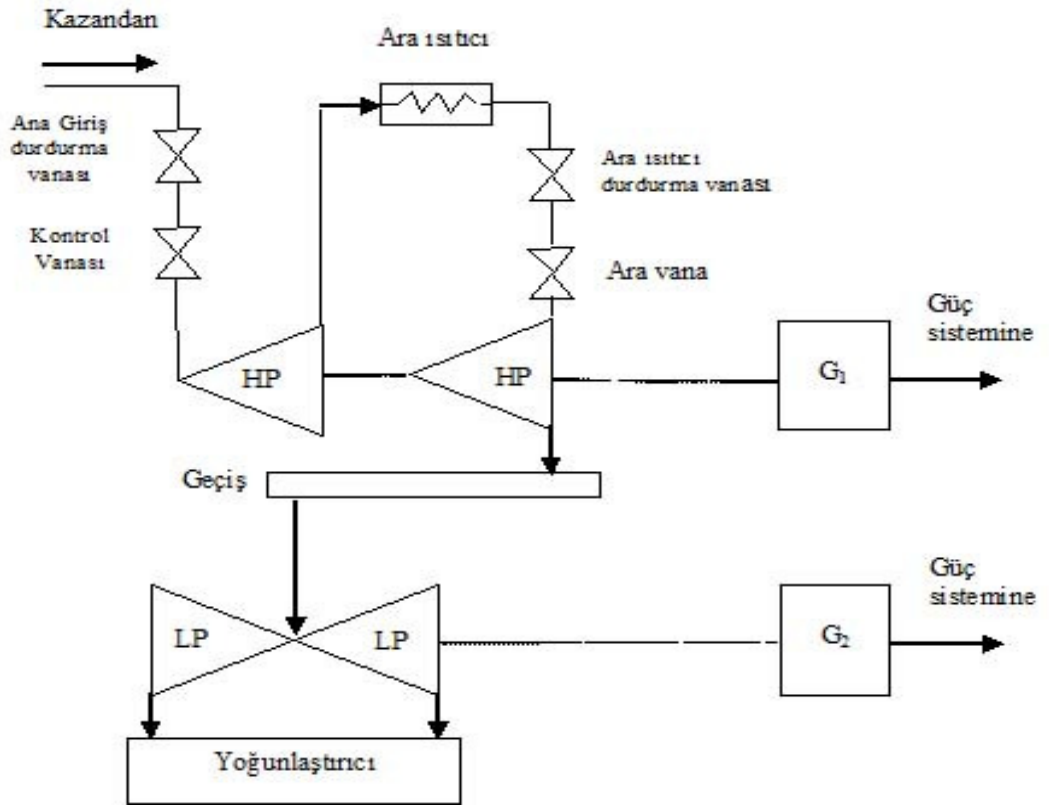
**Şekil 2. 9.** Bir Buhar Türbininin Şematik Diyagramı

Çevrim içerisinde kullanılan buhar tekrar kullanılmak üzere, soğutma su sisteminden sirkülasyon yapan soğuk su içerisinde bulunan bir dizi yoğunlaştırıcı tüp boyunca soğutulur ve sıvı haline getirilir. Buharı yoğunlaştırmak için ana neden, geri basınç büyüklüğünü azaltarak türbin verimliliğini artırmaktır<sup>(94)</sup>.

Çok kademeli bir türbin ya seri bağlı ya da çapraz bağlı olabilir. Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Seri bağlı türbinde, tek generatör ile bölümlerin hepsi bir mil üzerindedir.



(a)



(b)

**Şekil 2. 10.** Seri ve Çapraz Bağlı Türbinlerin Temel Şemaları (a) İki ara ısıtıcılı seri bağlı buhar santrali (b) Çapraz bağlı tek ara ısıtıcılı farklı mil hızlarına sahip buhar santrali

Tersine olarak, çapraz bağlı türbin her biri bir generatöre bağlı ve bir veya birçok sayıda türbin bölümü ile tahrik edilen iki milden oluşur. Bu türbin bir kontrol grubu ile tek bir birim olarak tasarlanır ve işletilir.çapraz bağlama daha büyük kapasite ve düzeltilmiş verim sağlar, fakat daha pahalıdır. Ancak az kullanılmakta olup, son yıllarda kullanıma giren yeni birimler seri bağlı tasarlanmaktadır. Fosil yakıtlı birimler, seri yada çapraz bağlı tasarlanmış olabilirler. Seri bağlı birimler 3600 dev/dk'lık hızla, çapraz bağlı birimler 3600 dev/dk hızla dönen iki mile, yada daha yaygın olarak, 3600 dev/dk hızında dönen bir mil ve 1800 dev/dk ile dönen ikinci bir mile sahip olabilirler.

Türbin yapısına bağlı olarak, fosil yakıtlı birimler yüksek basınçlı (YB) (High Power, HP), orta basınçlı (OB) (Intermediate Power, IP) ve düşük basınçlı (AB)(Low Power, LP) türbin kademelerinden oluşur. Bunlar ya ara ısıtmalı tip yada ara ısıtmasız tip olabilir. Ara ısıtmalı tip türbinde, yüksek basınç kademesini terk eden buhar, orta basınç kademesine dönmeden önce, kazana döner ve burada ara ısıtıcıdan geçirilir. Ara ısıtma verimi iyileştirir.

Bazı birimler ne orta basınç türbin kademesine ne de ara ısıtıcıya sahiptir. Bu durumda buhar doğrudan düşük basınç kademesine geçer. Diğer taraftan, bazı birimler iki ara ısıtıcı bölümüne sahip olur.

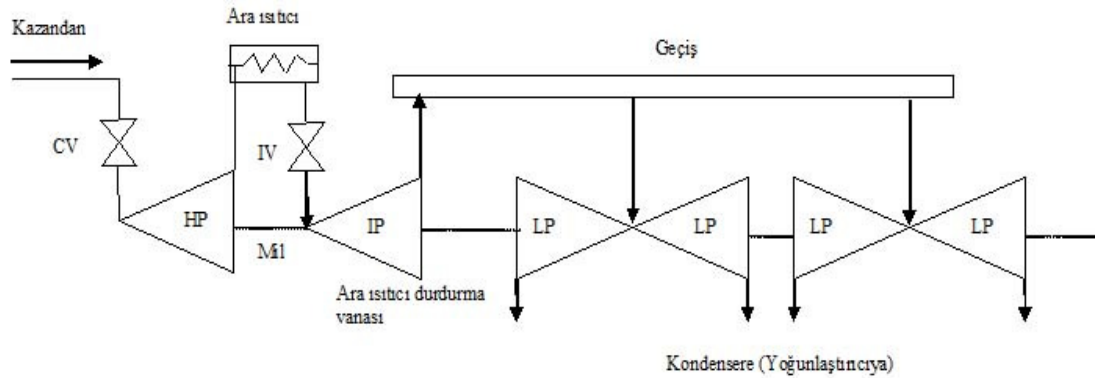
Fosil yakıtlı birimler için büyük buhar türbinleri dört grup vana ile donatılmıştır: Ana giriş kapama vanaları, kontrol vanaları, ara ısıtıcı kapama vanaları ve ara vanalar. Normalde bu vanaların her birinden en az iki tanesi



paralel bağlıdır. Hatta çoğu türbin ya paralel ya da seri olarak çalışan dört yada daha fazla sayıda kontrol vanasına sahiptir. Kapama vanaları öncelikle acil kesme vanalarıdır ve normal olarak hız ve yük kontrollü için kullanılmazlar. Ana giriş kontrol vanaları normal çalışma esnasında türbindeki buhar akışını düzeltir. Ara vanalar kadar kontrol vanaları da elektriksel yükün ani olarak kalkmasını takiben oluşan aşırı hıza duyarlıdır. Kontrol vanaları genellikle tıpa tipindedir, oysaki ara vanalar ya tıpa yada kelebek tipi olabilir<sup>(98)</sup>.

### 2.1.5.1. Türbin Modeli

Buhar türbini modeli için, yaygın olarak kullanılan, fosil yakıtlı tek ara ısıtıcılı, seri bağlı türbin incelenmiştir. Türbinin temel yapısı Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



**Şekil 2. 11.** Tek Ara Isıtıcılı Buhar Türbini Yapısı

Buhar yüksek basınç kademesine kontrol vanası ve giriş borusundan

geçerek girer. Kontrol vanalarının mahfazası istim kutusu olarak isimlendirilir. Büyük miktardaki buhar, buhar hücresinde ve yüksek basınç safhasına giriş borusunda depolanır. Yüksek basınç çıkış buharı ara ısıtıcıdan geçer. Ara ısıtıcıda ısıtılmış buhar, ara ısıtma bölümü vanası (IV) ve giriş borusundan geçerek orta basınç türbin safhasına gelir. Bağlantı borusu, orta basınç safhası çıkışından düşük basınç safhasının girişine gitmek için buhara yol sağlar.

Kontrol vanaları, normal çalışma esnasında yük/frekans kontrolü için, türbindeki buhar akışını düzenler. Kontrol vanası açıklığındaki bir değişme buhar akışının cevabı, buhar hücresinin ve yüksek basınç kademesine giriş borusunun dolma (yüklenme) zamanı nedeniyle, bir  $T_{CH}$  (charging time) zaman sabiti ile oluşur. Bu zaman sabiti 0.2 ile 0.3 s mertebesindedir.

Ara vana, sadece aşırı hız durumunda türbin mekanik gücünün hızlı kontrolü için kullanılır. Ara vana bu amaç için çok etkilidir, çünkü ara vana ısıtıcının ilerisindedir ve toplam türbin gücünün %70'ini üreten orta ve düşük basınç safhalarına buhar akışını kontrol eder. Orta basınç ve düşük basınç kademelerindeki buhar akışı, sadece ara ısıtıcı hacmindeki basıncın takviye edilmesi ile değiştirilebilir. Ara ısıtıcı büyük miktarda buhar tutar ve ona ilişkin zaman sabiti  $T_{RH}$  5 s ile 10 s arasındadır. Düşük basınç safhalarına buhar akışı, bağlama borusu ile ilgili ek bir zaman sabiti  $T_{CO}$  ile oluşturulur, bu zaman sabiti 0.5 s mertebesindedir.

Seri bağlı ara ısıtıcılı türbinin blok diyagramı Şekil 2.12'de

gösterilmiştir. Model, giriş buhar hücresi, ara ısıtıcı ile kontrol ve ara vanaların lineer olmayan karakteristiklerini de göstermektedir. Bu sistemde, kontrol vanasının konumu tamamen açık olduğunda 1 p.u. değerindedir. Çeşitli türbin safhalarındaki güç bölümlerinin toplamı ( $F_{HP} + F_{IP} + F_{LP}$ ) 1'e eşittir. Verilen modele ait tipik değerler aşağıdaki gibidir<sup>(98)</sup>.

$$F_{HP}=0.3$$

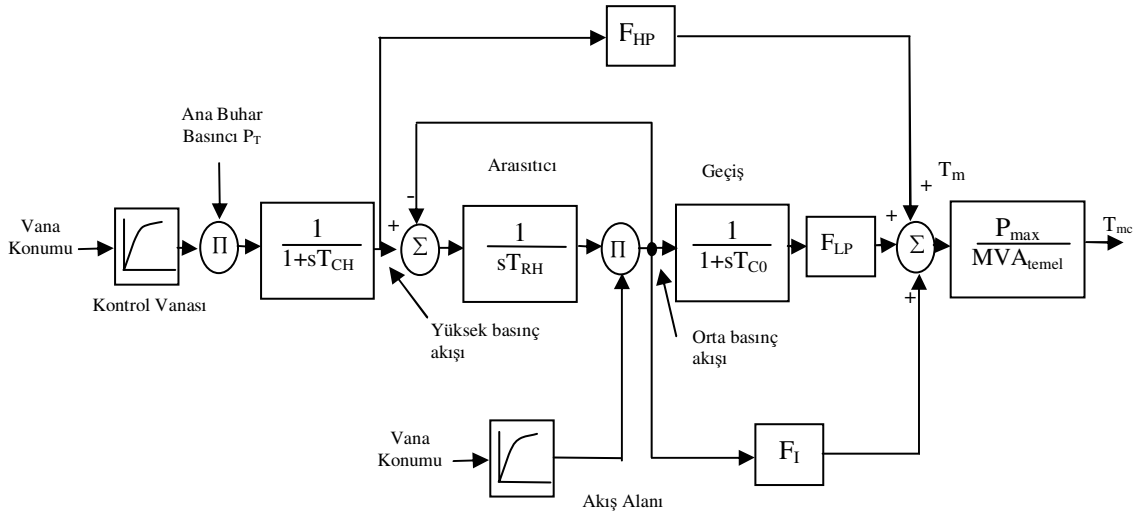
$$F_{IP}=0.3$$

$$F_{LP}=0.4$$

$$T_{CH}=0.3 \text{ s}$$

$$T_{RH}=7\text{s}$$

$$T_{CO}=0.5\text{s}$$



**Şekil 2. 12.** Buhar Türbini Blok Diyagramı

### 2.1.5.2. Türbin Kontrolü

Türbin kontrolünde kontrol edilen en önemli değişken, elektriksel güç ya da yük (megawatt-frekans kontrol kanalı) tarafından takip edilen hız ya da frekanstır; ikinci önemli olan şey ise buhar basıncıdır.

Türbin kontrolü uygulamasında Elektriksel güç, (P) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$P = m_D \Delta h \quad (2.1)$$

burada  $m_D$  = buhar debisi

$\Delta h$  = buhar entalpi düşümü

Denklem 2.1, bize türbin elektriksel gücünü değiştirmek için, iki olasılık olduğunu göstermektedir. Bu işlem, ya buhar akışını kontrol ederek (başka bir deyişle kısma yönlendiricisi) yapılabilir yada buhar entalpi değişimi olabilmektedir. Ancak buhar akışı, ve entalpi değişimleri her zaman birbiri ile bağlantılı olduğundan iki değeri birbirinden ayrı olarak kontrol etmek mümkün değildir.

Ayrıca buhar türbinlerinde normal hız/yük kontrolü dışında, aşırı hız kontrolü ve aşırı hız söndürme kontrol işlevleri de mevcuttur. Bunlardan başka başlatma/durdurma kontrolleri ve yardımcı basınç kontrolü gibi diğer işlevlerde mevcuttur.

Hız/yük kontrolü herhangi bir üretim birimi için temel gereksinimdir. Buhar türbinlerinde, bu işlem kontrol vanalarının kontrolü ile sağlanmaktadır. Hız kontrol işlevi devir sayısı regülatörlerine %4 ile %5'lik bir statiklik sağlar. Bu, üretim biriminin yükünün uygun paylaşılması ile diğer birimlerle uygun şekilde paralel çalışmayı mümkün kılar. Hız kontrol işlevi, hız/yük referansını

ayarlayarak elde edilir.

Aşırı hız koruması ve kontrolü buhar türbinlerine özgüdür. Bu türbinin güvenli çalışması için kritik bir öneme sahiptir. Türbinin çalışmasındaki bütünlük, türbin kontrollerinin elektriksel yükteki bir azalmayı takiben, rotor hızını, tasarım maksimum hızının (%120'lik) altına sınırlama yeteneğine dayandırılır. Ara ısıtılmalı tip buhar türbinleri, türbine verilen buhar enerjisinin hızlı kontrolü için kullanılabilen ve biri kontrol vanalarını ve diğeri ara vanaları içeren iki ayrı vanalama sistemine sahiptirler.

Aşırı hız kontrol sistemi, aşırı hıza karşı ilk savunma hattını oluşturur. Bu kontrolün işlevi kısmi ya da tam yüke çıkarılması durumunda oluşan aşırı hızı sınırlamak ve türbini yeniden yüklemeye hazır hale getirmektir. Amaç, yük kalkmasını takiben aşırı hız sönümünü önlemektir. Tipik olarak, aşırı hız sönümü nominal hızın %110 ile %115'ine ayarlanır. Aşırı hız kontrolü, aravanaları olduğu kadar kontrol vanalarının da hızlı kontrolünü içerir. Aravanaların kontrolü bu açıdan çok etkindir; çünkü ara vanalar toplam türbin gücünün %60 ile %80'inin oluşturan orta basınç ve düşük basınç türbin safhalarına buhar akışını kontrol ederler. Ara ısıtıcıda depo edilen büyük miktardaki buhar nedeniyle, kontrol vanalarının hızlı kapatılması tek başına aşırı hızın sınırlanması için yeterli olmamaktadır.

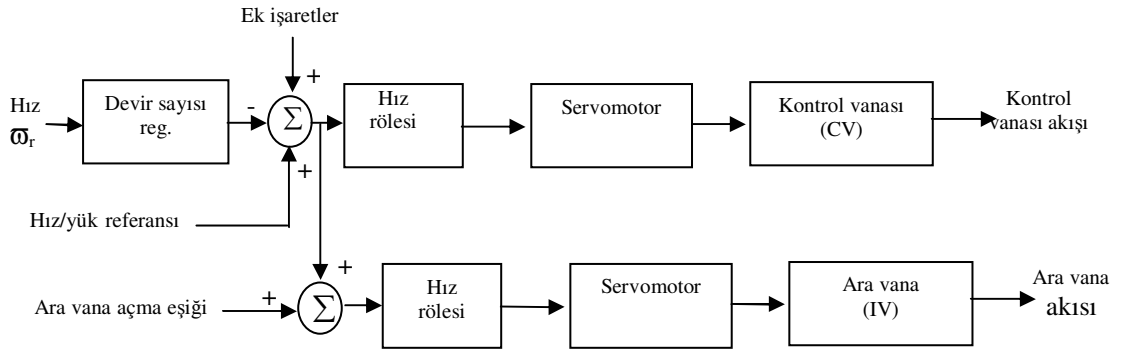
Aşırı hız sönümlenmesi ya da acil (yardımcı) durum koruması, normal ve aşırı hız kontrollerinin rotor hızını güvenli bir düzeyde sınırlamada başarısız olduğu durumlarda bir yedek korumadır. Aşırı hız sönümü aşırı hız

kontrollünden bağımsız olarak tasarlanır. Sönüm fonksiyonu, ana ve ara ısıtma vanalarını hızla kapatmaya ilave olarak kazanı da söndürür.

Türbin kontrol işlevleri için kullanılan sistemler ve bu sistemlerin modelleri aşağıda tanıtılmıştır<sup>(98)</sup>.

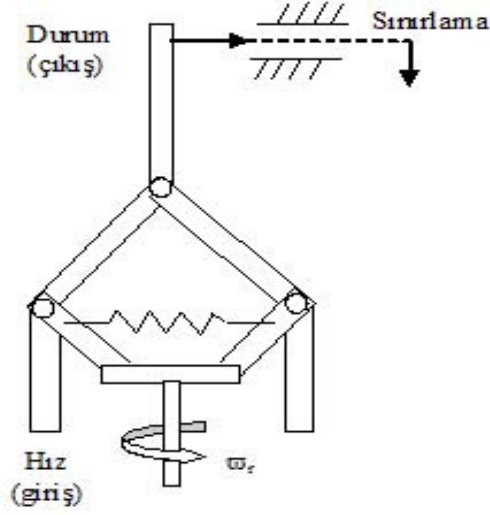
### 2.1.5.2.1. Mekanik –Hidrolik Kontrol (MHK)

Buhar türbini devir sayısını düzenlemek için kullanılan mekanik hidrolik kontrol sisteminin fonksiyonel blok diyagramı Şekil 2.13'de verilmiştir.



**Şekil 2. 13.** Mekanik- Hidrolik Kontrollü Türbin Devir Sayısı Regülatörü Sisteminin Blok Diyagramı

Devir sayısı regülatörü, esas olarak mil hızını bir çıkış durumuna dönüştüren Şekil 2.14'de gösterilmiş olan bir dönüştürücüdür.



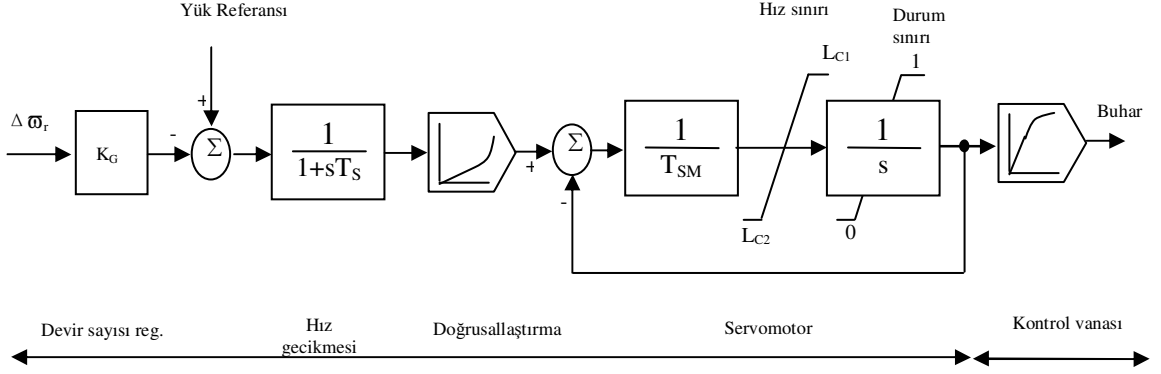
**Şekil 2. 14.** Mekanik Devir Sayısı Regülatörü

Burada rotor hız işareti, devir sayısı regülatör katsayısı ( $K_G$ ) yardımıyla doğrusal yer değiştirmeye dönüştürülür.

$$X = K_G \cdot \omega_r \quad (2.2)$$

Devir sayısı regülatörünün çıkışı, hız değiştirici durumu ile belirlenen hız/yük referans değeri ile karşılaştırılır. Elde edilen hata işareti ara vanaları olduğu kadar kontrol vanalarını da kontrol etmek için kullanılır. Yine de normal hız/yük kontrolü için kontrol vanaları çalışır. Ara vanalar bir baz (eşik) işareti ile tamamen açık tutulur. Aşırı hızda oluşan büyük hız hata işareti nedeniyle, eşik aşılar ve ara vanalar hızla kapatılır. Kontrol işareti eşik değerinden daha düşük bir seviyeye indiğinde, ara vanalar tam olarak açılır. Çok büyük türbinlerde, buhar vanalarını hareket ettirmek için gerekli olan enerji seviyelerine ilave kuvvetlendirme hidrolik servomotorlar kullanılarak elde edilir.

Şekil 2.15'de normal hız/yük fonksiyonunu gösteren devir sayısı regülatörünün modeli verilmiştir.



**Şekil 2. 15.** Normal Hız/Yük Fonksiyonunu Gösteren Devir Sayısı Regülatörü Modeli

Yukarıdaki modele ait tipik değerler şu şekildedir.

$$K_G=20 \text{ (%5 statik)}$$

$$T_{SR}=0.1s$$

$$T_{SM}=0.3s$$

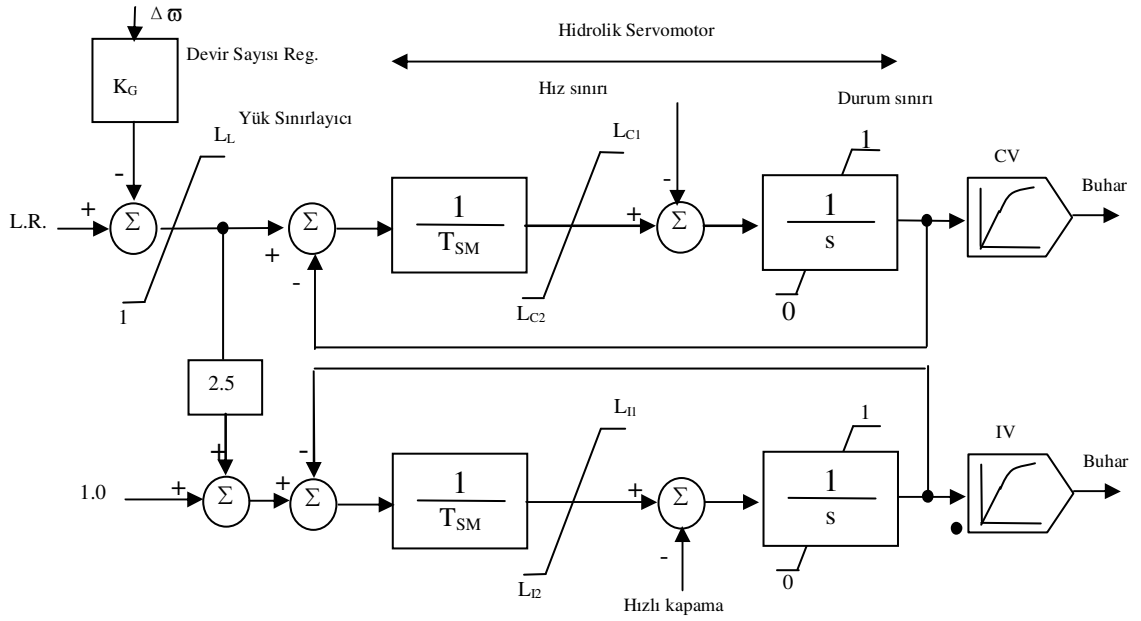
$$L_{C1}=0.1 \text{ (açma)}$$

$$L_{C2}=-1 \text{ (kapama)}$$

### 2.1.5.2.2. Elektrohidrolik kontrol (EHK)

Elektrohidrolik kontrol (EHK) sistemleri, düşük güç oranları söz konusu olduğunda, mekanik hidrolik kontrol ile birlikte, mekanik elemanlar yerine elektronik devreleri kullanır. Elektrohidrolik adaptasyon, esneklik gibi mekanik eldesi zor olan özellikleri sağlar. Bunu katkısı daha hızlı cevap ve düzeltilmiş doğrusallık sağlamasıdır. Şekil 2.16'da elektrohidrolik kontrol devir sayısı regülatörü modeli verilmiştir.





**Şekil 2. 16.** Elektrohidrolik Kontrol Devir Sayısı Regülatörü Blok Diyagramı

Yukarıdaki modele ait tipik değerler şu şekildedir<sup>(98)</sup>.

$$K_G=20$$

$$T_{S1}=0.1s$$

$$T_{SM}=0.1s$$

$$L_{C1}=0.1$$

$$L_{C2}=-0.2$$

$$L_{I1}=0.1$$

$$L_{I2}=-0.2$$

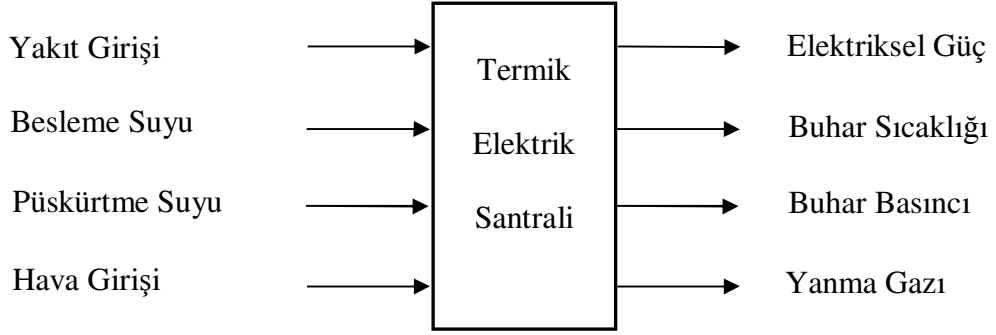
## 2.2. TERMİK SANTRALİN MODELLENMESİ

### 2.2.1. Giriş

Güç santrallerinin dinamik davranışı ağırlıklı olarak; giriş ve çıkış bozulmalarına, set noktalarındaki değişimlere bağlıdır. Bu durum özellikle büyük kömür yakıtlı güç santrallerinde görülür. Santralden, çok büyük ve ani yük değişimlerinde, devreye girip çıkmalarda, hızlı işletme şartlarına ayak uydurması istenir. Zamanla değişen ve lineer olmayan çok değişkenli prosesi

temsil eden bir santralin veya çok giriş/çıkışlı (MIMO, Multi Input Multi Output) bir sistemin kontrolü oldukça zordur.

Bir fosil yakıtlı güç santralinde ana giriş değişkenleri; yakıt, besleme suyu, püskürtme suyu ve havadır. Ana çıkış değişkenleri ise; elektriksel güç, buhar entalpi (evaporatör çıkışındaki buharın sıcaklık ve basınç fonksiyonu) ve yanma gazıdır (Şekil 2.17).



**Şekil 2. 17.** Çok Değişkenli Dinamik Bir Güç Santral Sistemi

Klasik PID, PI kontrolörler değişen tüketici güç taleplerinde, yük kalitesindeki değişimlerde ve kazan ısıtma yüzeyindeki kirlenmelerde yüksek kontrol performansını yakalayamamaktadırlar. Güç santral modeli, indirgenmiş matematiksel modelden oluşsa bile eğer dinamik davranışı lineer olmayan, zamanla değişen ve de birbirleriyle sıkı ilişkileri olan giriş değişkenleri tarafından yönetiliyorsa söz konusu kontrolörlerin dizaynı oldukça özen ister. Güç santrali mühendisleri bu problemleri çözmek için ayırıcı (decoupler) devreleri, değişik hata tipleri ve ileri besleme set noktası

düzenlemeleri ile kontrol algoritmalarındaki parametrik ve yapısal değişimleri düzeltmeye çalıştılar. Örneğin, pratikte kazan kontrolündeki entalpi değeri yavaş işleyen bir dinamik davranış sergiler. Diğer taraftan, çok büyük ve kompleks santrallerde optimum ve esnek işletme şartlarında çalışmak, önemli bir ihtiyaçtır. Sadece arızalar değil onun dışında ekonomik sebeplerden dolayı bu sistemlerde optimum kontrol gereklidir. Minimum enerji kaybı, yakıt tasarrufu, istenen elektriksel gücün anında karşılanması, istenen buhar miktarının karşılanması için modern kontrol yöntemleri uygulanmalıdır. Sistemin dinamik davranışları hakkında tam bir bilgiye sahip olmadan modern kontrol sistemlerinin uygulanması zordur. Sistem modellemede model oluşturmak için genelde şu üç metot kullanılır; fiziksel kurallar kullanılarak dinamik model elde etmek, giriş-çıkış sinyallerini ölçüp deneysel model elde etmek veya istatistik tahmin değerleri kullanarak model oluşturmak.

Modern kompleks santrallerde, fiziksel kanunlarla dinamik analiz yaparak fiziksel model elde etmek oldukça zordur, buna karşın deneysel sistem tanımlama metodu ile, giriş ve çıkış ölçümleri değerlendirilerek matematiksel modellerin elde edilmesi mümkündür<sup>(24,82-84)</sup>.

### **2.2.2. Güç Santrali**

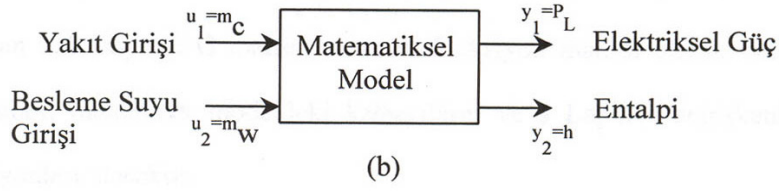
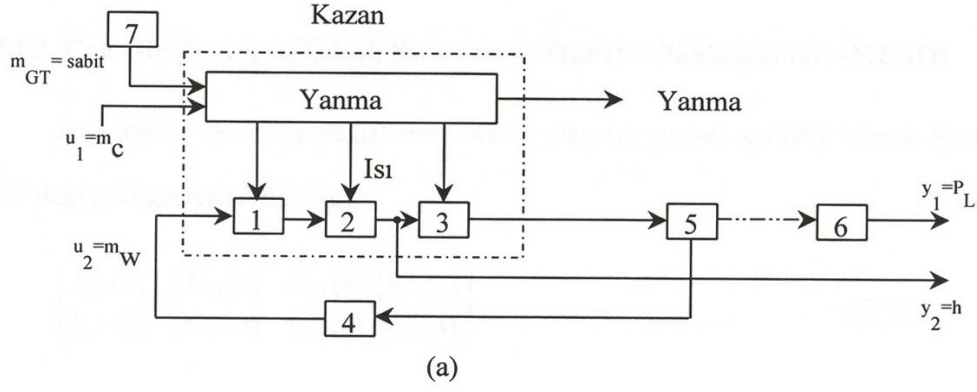
Güç santrali; kazan, buhar türbini ve generatordan oluşur. Kazan sıkı bir şekilde birbiriyle bağıntılı çok değişkenli bir sistemle modellenebilir. Bu, kazanı kontrol mühendisliği açısından oldukça ilginç kılar. Kazanda, kimyasal

enerji termal enerjiye (buhar) dönüştürülür. Bir kazanın dinamik davranışı ağırlıklı olarak aşağıdaki gibi bir çok farklı işletme koşuluna bağlıdır;

- Yakıtın ısı değeri ve kalitesinin değişmesi, entalpinin ve buhar basıncının değişmesine sebep olur, dolayısıyla generatordeki güç de değişir,
- Yakıt besleyicilerinin verimi zamanla azalır,
- Isıtma yüzeyleri, brülörler ve besleyicilerdeki kuruma, sistem dinamiğinde değişimlere neden olur,
- Set değerlerindeki ve yükteki değişimler, çalışma noktasında bozulmalara neden olur,
- İklimsel değişikliklerden dolayı, kombine güç istasyon bloğunda yer alan gaz türbininin çıkış sıcaklığındaki değişimler kazan dinamiğini oldukça etkileyebilir.

Verimli bir kontrol dizaynı için, sistemin dinamik ve statik özellikleri çok iyi bilinmelidir. Diğer bir taraftan, bu şekilde bir çok giriş ve çıkışlı bir kompleks sistemi ele almak oldukça güç ve karmaşıktır. Bu yüzden, Şekil 2.18'de görüldüğü gibi model dizaynında en önemli giriş ve çıkış değişkenleri kullanılır. İstenen proses davranışını tanımlamak üzere incelenen güç santrali için iki girişli ve iki çıkışlı değişkenler yeterlidir.

Şekil 2.18' de görüldüğü gibi, yakıt beslemesi ve besleme suyu akışı giriş değişkenleri olarak seçilmiştir. Çıkış değişkenleri ise elektriksel güç ve entalpidir.



1: Ön ısıtıcı, 2: Evaporatör, 3: Kızdırıcı, 4: Yoğunlaştırıcı, 5: Türbin,  
 6: Jeneratör, 7: Gaz türbini,  $m_c$ : Kömür Beslemesi,  
 $m_w$ : Besleme suyu akışı,  $m_{GT}$ : Gaz türbini'nden gelen egsoz gazı

**Şekil 2. 18.** Şematik Diyagram, (a) Güç Santrali ve (b) Matematiksel Modeli

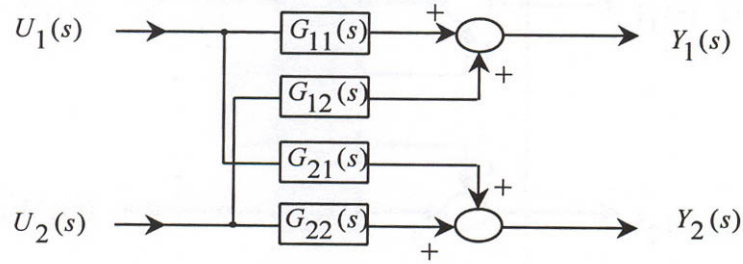
Güçteki değişim, sadece buhar generatorüne bağlı olduğundan, buhar üretimi üretilen elektriksel gücü anında etkiler. Isınmada ki sorunlara çok hızlı cevap verildiğinden, ayrıca kızdırıcılara uygulanan püskürtme suyundan etkilenmediğinden dolayı evaporatör çıkışındaki buharın entalpisi, buhar kalitesi için en iyi ölçüm yeri kabul edilir. Model için gerekli ölçümler yapılırken, her bir girişin elektriksel güç ve entalpi üzerinde etkisinin belirlenmesi gerektiği, yani bir girişe adım değişim uygulanırken diğer girişin sabit tutulduğu bilinmelidir. Örneklenerek yapılan ölçümler sonucunda, Eğri Uydurma (Curve Fitting) yöntemiyle giriş ve çıkış sinyallerinin fonksiyonları bulunmuş ve sistemin transfer fonksiyonu tespit edilmiştir<sup>(24, 82-84)</sup>.

### 2.2.3. Çok Girişli-Çok Çıkışlı (MIMO) Sistemin Transfer Fonksiyonu

İki giriş ve iki çıkış değişkenine sahip olan bir proses şematik olarak Şekil 2.19'daki gibi gösterilebilir. Veya,

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

şeklinde matrissel olarak ifade edilebilir. Buradaki bağımsız transfer fonksiyonlarını toplayan 2x2 boyutlu G matrisi, transfer fonksiyon matrisi olarak bilinir. Matrisin elemanları, matematik modeldeki katsayıların ve s Laplace değişkeninin cebirsel fonksiyonları olacaktır.



**Şekil 2. 19.** İki Giriş ve Çıkış Değişkenli Prosesin Blok Diyagramı

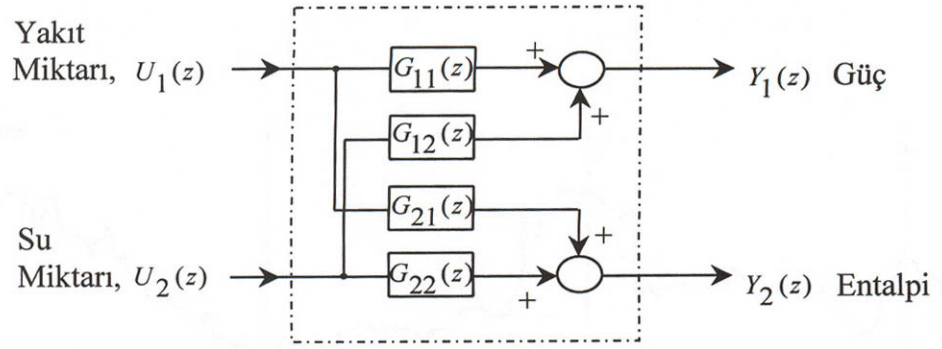
Transfer fonksiyonları sadece s domeninde değil, kesikli zaman sinyalleri kullanıyorsa z domeninde de oluşturulabilir. Laplace dönüşümleri ile elde edilmiş olan transfer fonksiyonları analog, z domenindeki transfer fonksiyonları ise digital transfer fonksiyonları olarak adlandırılırlar. Bu çalışmada kullanılan santral modeli z domeninde incelenmiş olup gerekli blok diyagramı Şekil 2.20'de gösterilmiştir.

İki giriş ve iki çıkışa sahip söz konusu santral modeli üç farklı işletme için incelenmiştir:

Model1: Kazan ısıtıcı boru yüzeyleri temiz ve santral %95 kapasitede

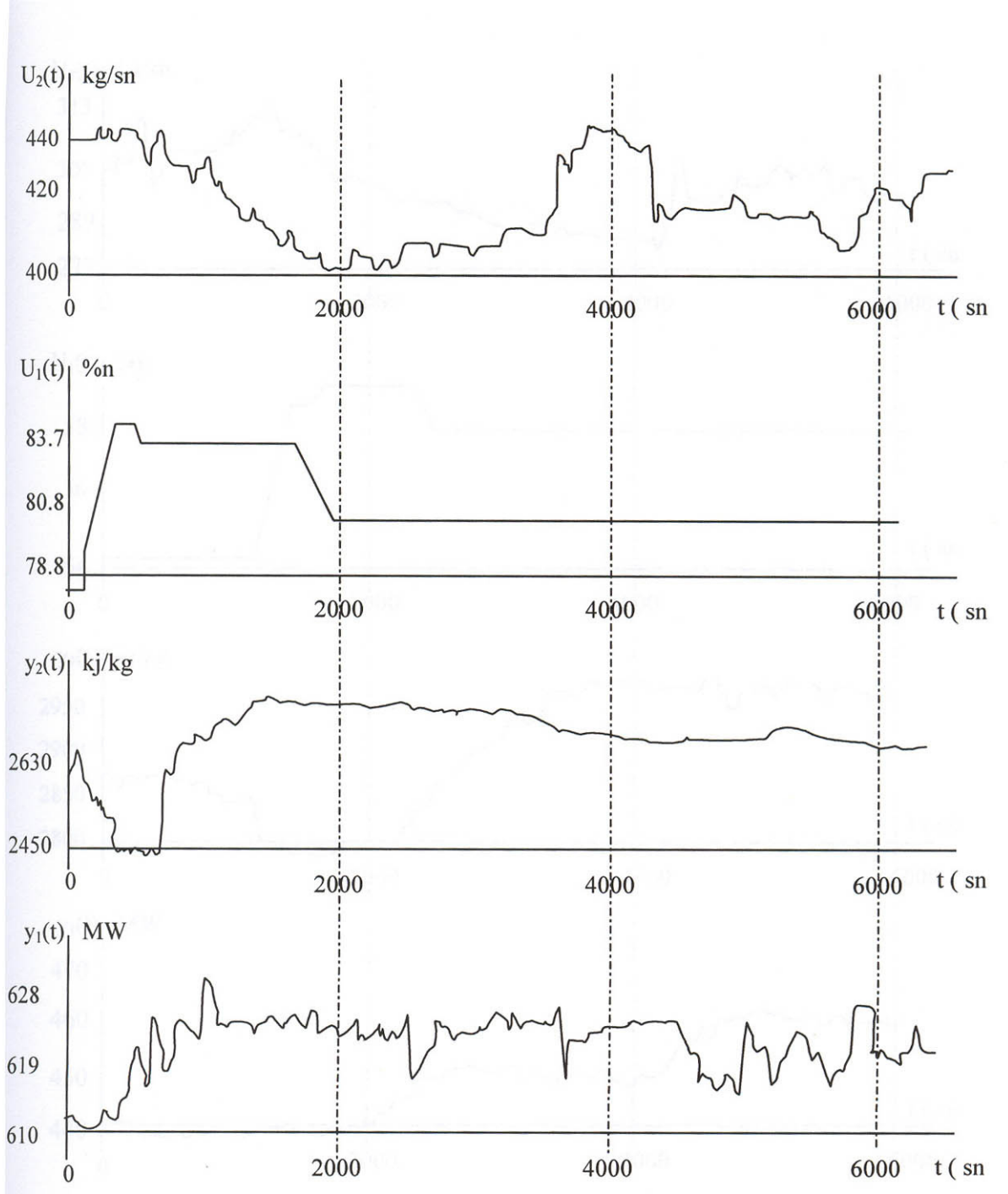
Model2: Kazan ısıtıcı boru yüzeyleri temiz ve santral %70 kapasitede

Model3: Kazan ısıtıcı boru yüzeyleri kirli ve santral %70 kapasitededir.



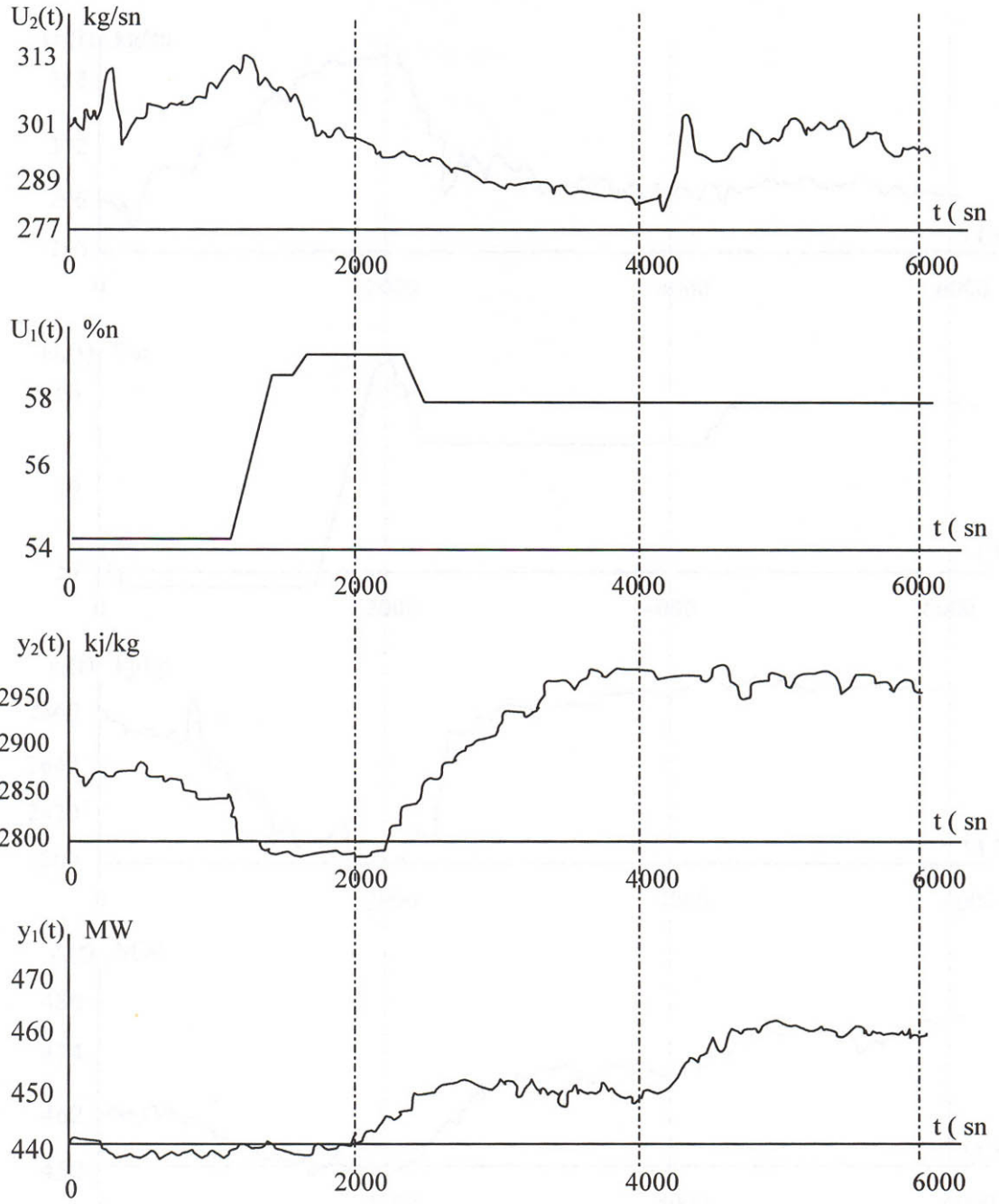
**Şekil 2. 20.** Kullanılan Santral Modelinin Blok Diyagramı

Söz konusu santrale ait kazanın dinamik davranışının işletme şartları ile yakından ilgili olduğunu da göz önüne alarak, bütün ölçümler için değerlendirilen üç modele ait  $U_1, U_2$  girişleri ve  $Y_1, Y_2$  çıkışları Şekil 2.21, Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'de gösterilmiştir. Bu üç sisteme ait birim basamak fonksiyon cevapları ise Şekil 2.24, Şekil 2.25, Şekil 2.26' dadır<sup>(82)</sup>.

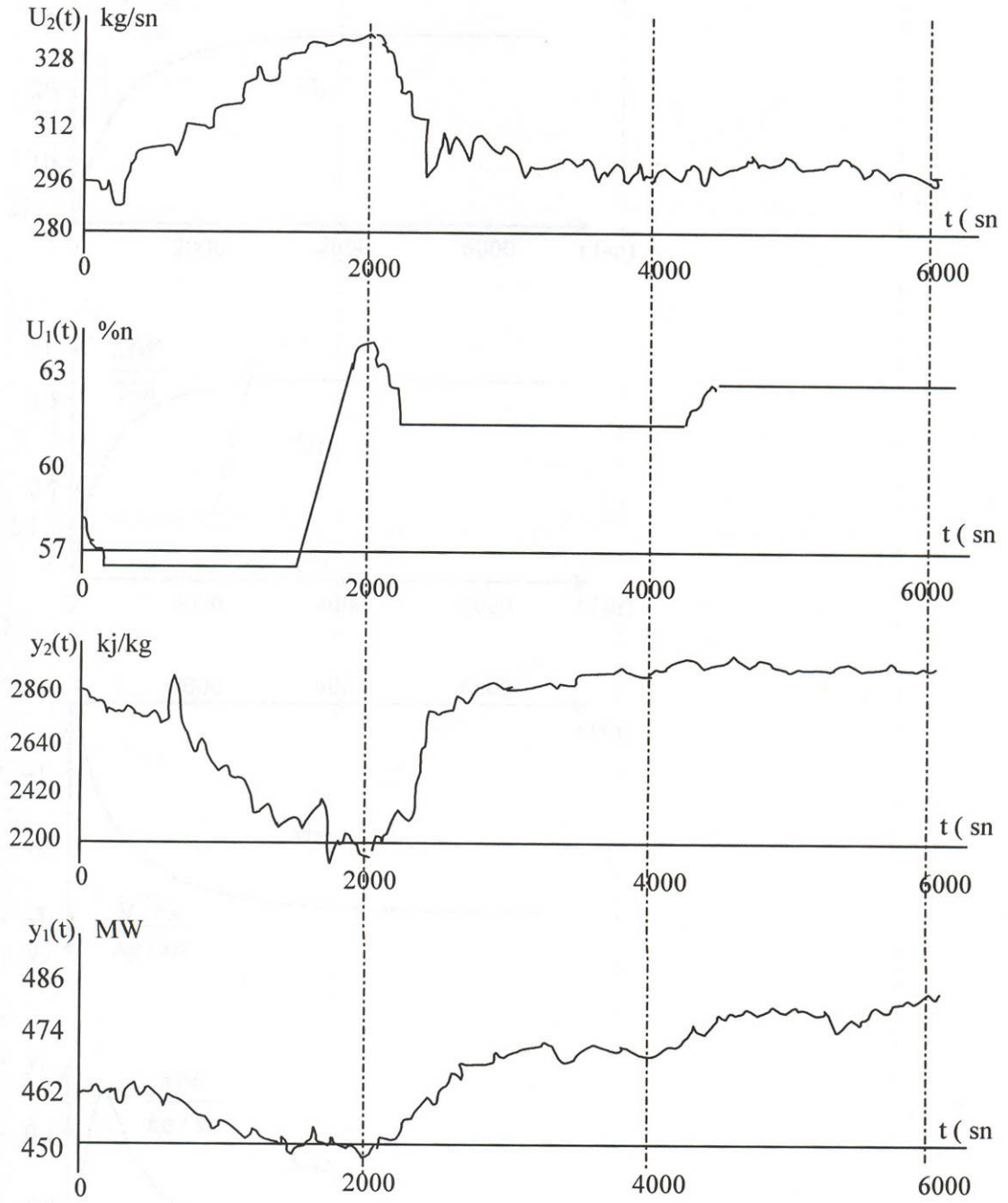


**Şekil 2. 21.** Birinci Modele Ait  $U_2(t)$  Su,  $U_1(t)$  Yakıt Giriş Değişkenleri ve  $y_2(t)$  Entalpi,  $y_1(t)$  Güç, Çıkış Değişkenleri

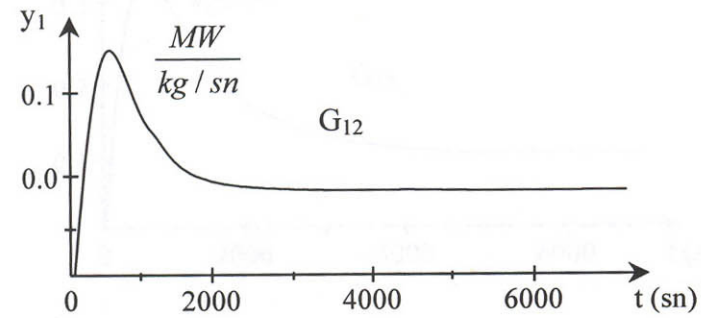
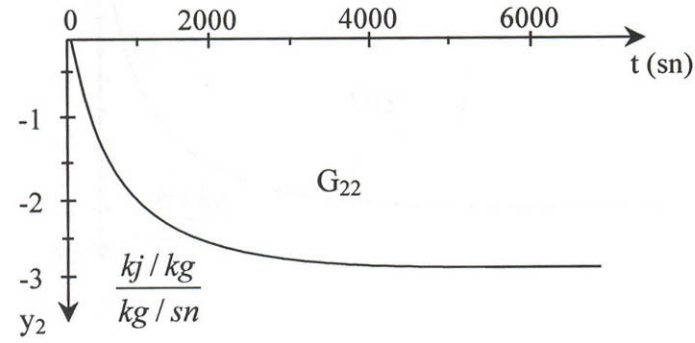
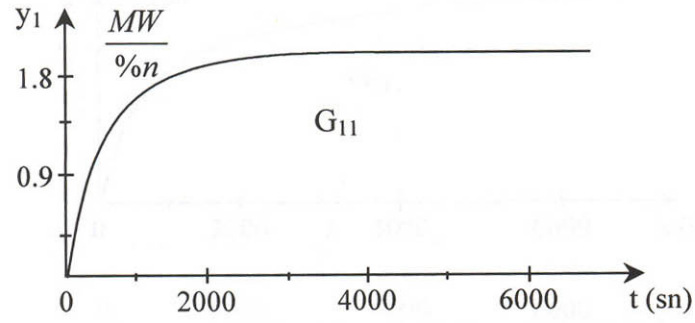
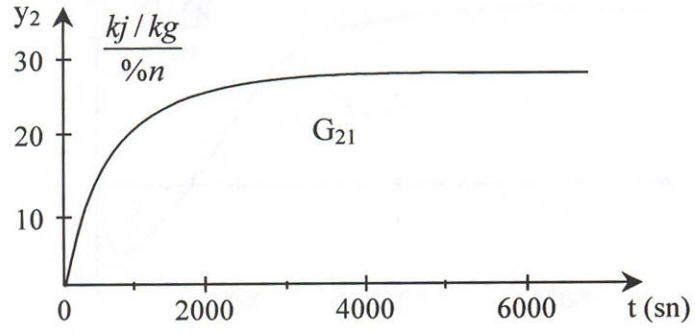




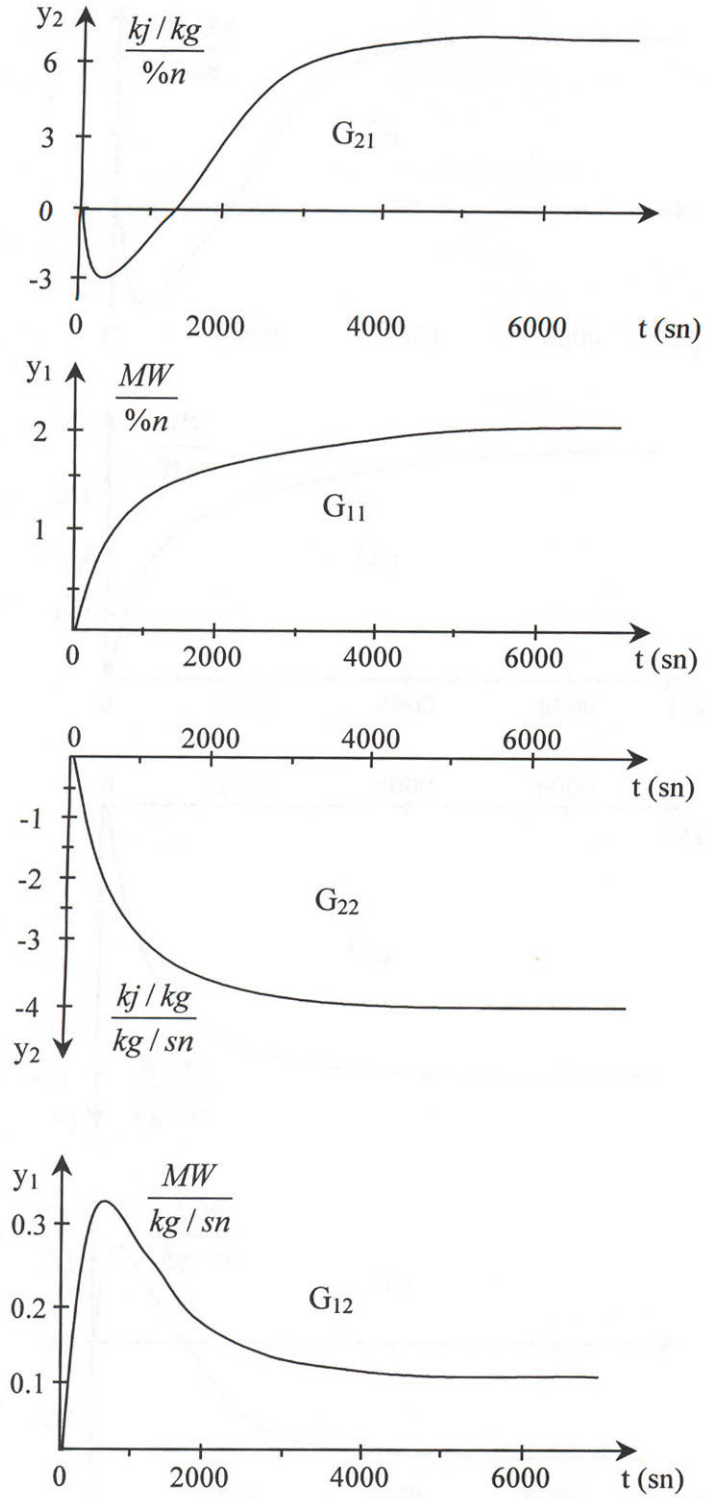
**Şekil 2. 22.** . İkinci Modele Ait  $U_2(t)$  Su,  $U_1(t)$  Yakıt Giriş Değişkenleri ve  $y_2(t)$  Entalpi,  $y_1(t)$  Güç, Çıkış Değişkenleri



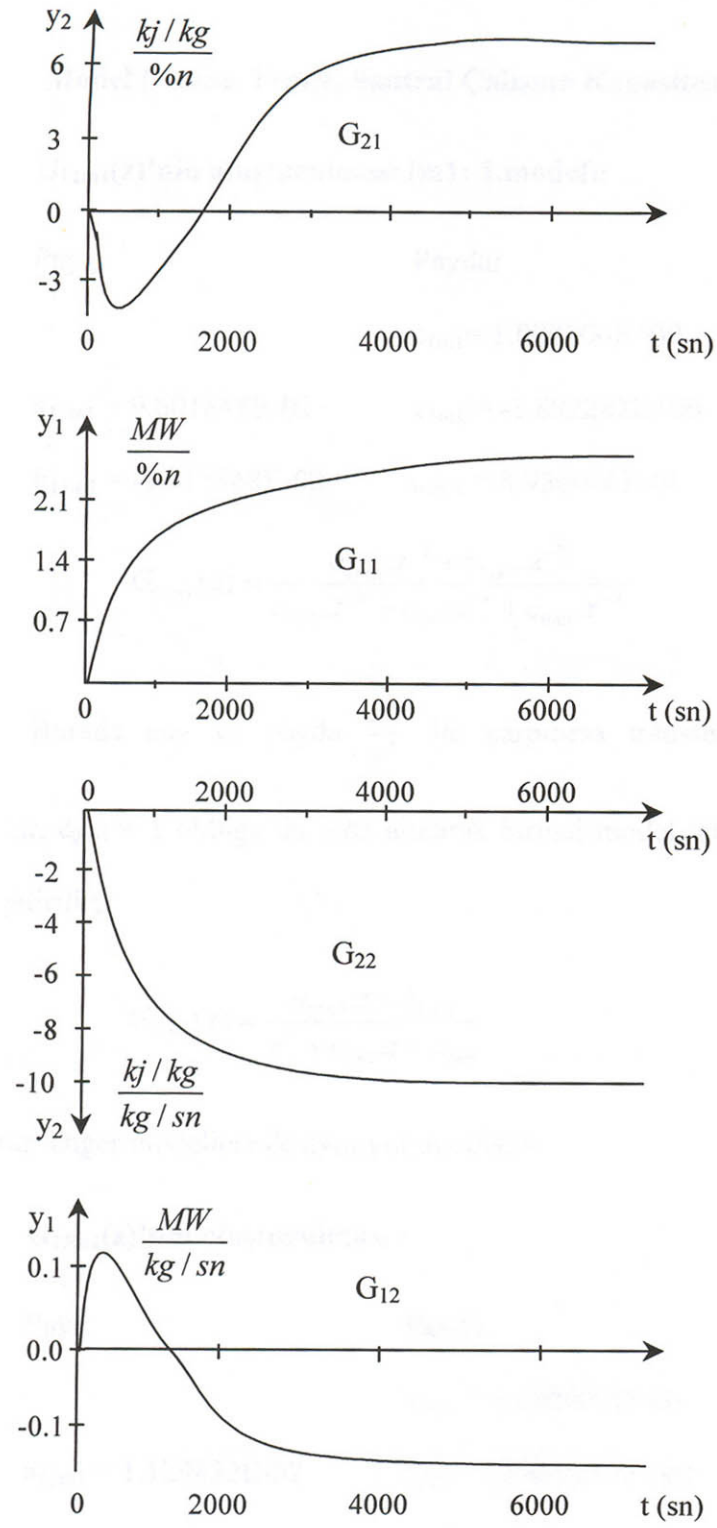
**Şekil 2. 23.** Üçüncü Modele Ait  $U_2(t)$  Su,  $U_1(t)$  Yakıt Giriş Değişkenleri ve  $y_2(t)$  Entalpi,  $y_1(t)$  Güç, Çıkış Değişkenleri



**Şekil 2. 24.** Birinci Modele Uygulanan Birim Basamak Fonksiyon Cevapları



**Şekil 2. 25.** İkinci Modele Uygulanan Birim Basamak Fonksiyon Cevapları



**Şekil 2. 26.** Üçüncü Modele Uygulanan Birim Basamak Fonksiyon Cevapları

## 2.2.4. Kullanılan Üç Modele Ait Transfer Fonksiyonları

### Birinci Model (Kazan Temiz, Santral Çalışma Kapasitesi % 95):

Santralin girişlerinden bir tanesi sabit tutulmuş ve diğer girişe adım sinyali uygulanmıştır. Daha sonra bu işlemin tersi yapılmıştır. Santralin çıkışları ölçülmüş ve çıkışların girişlere oranlanması ile sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonlarının çizelgesi aşağıda verilmiştir<sup>(82)</sup>.

### $G_{11m1}(z)$ 'in oluşturulması (m1: 1. model):

$$G_{11m1}(z) = \frac{a_{11m1} \cdot z^{-1} + b_{11m1} \cdot z^{-2}}{c_{2m1} \cdot z^{-0} + c_{1m1} \cdot z^{-1} + c_{0m1} \cdot z^{-2}} \quad (2.3)$$

**Çizelge 2. 1.**  $G_{11m1}(z)$  Parametre Çizelgesi

	Pay	Payda
$Z^{-0}$		$c_{2m1} = 1.000000E+00$
$Z^{-1}$	$a_{11m1} = 9.601848E-02$	$c_{1m1} = -1.892282E+00$
$Z^{-2}$	$b_{11m1} = -9.315868E-02$	$c_{0m1} = 8.936006E-01$

Burada pay ve payda;  $\frac{z^2}{z^2}$  ile çarpılırsa transfer fonksiyonu eksilikten

kurtulur.  $c_{2m1} = 1$  olduğu da göz alınarak birinci model için transfer fonksiyonu şu hale getirilir;

$$G_{11m1}(z) = \frac{a_{11m1} \cdot z + b_{11m1}}{z^2 + c_{1m1} \cdot z + c_{0m1}} \quad (2.4)$$

bulunur. Diğer modellere de aynı yöntem uygulanır.

$$G_{12m1}(z) = \frac{a_{12m1} \cdot z + b_{12m1}}{z^2 + c_{1m1} \cdot z + c_{0m1}} \quad (2.5)$$

$$G_{21m1}(z) = \frac{a_{21m1} \cdot z + b_{21m1}}{z^2 + c_{1m1} \cdot z + c_{0m1}} \quad (2.6)$$

$$G_{22m1}(z) = \frac{a_{22m1} \cdot z + b_{22m1}}{z^2 + c_{1m1} \cdot z + c_{0m1}} \quad (2.7)$$

**Çizelge 2. 2.** Birinci Model (Kazan Temiz, Santral Çalışma Kapasitesi % 95)  
Parametre Çizelgesi

		Pay	Payda
<b>G<sub>12m1</sub>(z)</b>	Z <sup>0</sup>		C <sub>2m1</sub> = 1.000000E+00
	Z <sup>-1</sup>	a <sub>12m1</sub> = 1.129832E-02	C <sub>1m1</sub> = -1.892282E+00
	Z <sup>-2</sup>	b <sub>12m1</sub> = -1.125633E-02	C <sub>0m1</sub> = 8.936006E-01
<b>G<sub>21m1</sub>(z)</b>	Z <sup>0</sup>		C <sub>2m1</sub> = 1.000000E+00
	Z <sup>-1</sup>	a <sub>21m1</sub> = 7.947573E-03	C <sub>1m1</sub> = -1.892282E+00
	Z <sup>-2</sup>	b <sub>21m1</sub> = 3.004573E-02	C <sub>0m1</sub> = 8.936006E-01
<b>G<sub>22m1</sub>(z)</b>	Z <sup>0</sup>		C <sub>2m1</sub> = 1.000000E+00
	Z <sup>-1</sup>	a <sub>22m1</sub> = -1.145612E-01	C <sub>1m1</sub> = -1.892282E+00
	Z <sup>-2</sup>	b <sub>22m1</sub> = 1.100063E-01	C <sub>0m1</sub> = 8.936006E-01

**İkinci Model ( Kazan Temiz, Santral Çalışma Kapasitesi %70 ) :**

G<sub>11m2</sub>(z), G<sub>12m2</sub>(z), G<sub>21m2</sub>(z) ve G<sub>22m2</sub>(z)'in formülleri sırası ile (2.8), (2.9), (2.10), (2.11)'de, değerleri ise Çizelge 2.3'de verilmiştir.

$$G_{11m2}(z) = \frac{a_{11m2} \cdot z + b_{11m2}}{z^2 + c_{1m2} \cdot z + c_{0m2}} \quad (2.8)$$

$$G_{12m2}(z) = \frac{a_{12m2} \cdot z + b_{12m2}}{z^2 + c_{1m2} \cdot z + c_{0m2}} \quad (2.9)$$

$$G_{21m2}(z) = \frac{a_{21m2} \cdot z + b_{21m2}}{z^2 + c_{1m2} \cdot z + c_{0m2}} \quad (2.10)$$

$$G_{22m2}(z) = \frac{a_{22m2} \cdot z + b_{22m2}}{z^2 + c_{1m2} \cdot z + c_{0m2}} \quad (2.11)$$

**Çizelge 2. 3.** İkinci Model (Kazan Temiz, Santral Çalışma Kapasitesi %70)  
Parametre Çizelgesi

		Pay	Payda
<b>G<sub>11m2</sub>(z)</b>	Z <sup>-0</sup>		C <sub>2m2</sub> = 1.000000E+00
	Z <sup>-1</sup>	a <sub>11m2</sub> = 6.989528E-02	C <sub>1m2</sub> = -1.945386E+00
	Z <sup>-2</sup>	b <sub>11m2</sub> = -6.923485E-02	C <sub>0m2</sub> = 9.456278E-01
<b>G<sub>12m2</sub>(z)</b>	Z <sup>-0</sup>		C <sub>2m2</sub> = 1.000000E+00
	Z <sup>-1</sup>	a <sub>12m2</sub> = 1.824086E-02	C <sub>1m2</sub> = -1.945386E+00
	Z <sup>-2</sup>	b <sub>12m2</sub> = -1.821590E-02	C <sub>0m2</sub> = 9.456278E-01
<b>G<sub>21m2</sub>(z)</b>	Z <sup>-0</sup>		C <sub>2m2</sub> = 1.000000E+00
	Z <sup>-1</sup>	a <sub>21m2</sub> = -2.513340E-01	C <sub>1m2</sub> = -1.945386E+00
	Z <sup>-2</sup>	b <sub>21m2</sub> = 2.528715E-02	C <sub>0m2</sub> = 9.456278E-01
<b>G<sub>22m2</sub>(z)</b>	Z <sup>-0</sup>		C <sub>2m2</sub> = 1.000000E+00
	Z <sup>-1</sup>	a <sub>22m2</sub> = -1.101989E-01	C <sub>1m2</sub> = -1.945386E+00
	Z <sup>-2</sup>	b <sub>22m2</sub> = 1.091155E-02	C <sub>0m2</sub> = 9.456278E-01



**Üçüncü Model ( Kazan Kirli, Santral Çalışma Kapasitesi %70 ) :**

$G_{11m3}(z)$ ,  $G_{12m3}(z)$ ,  $G_{21m3}(z)$  ve  $G_{22m3}(z)$ 'in formülleri sırası ile (2.12), (2.13), (2.14), (2.15)'de, değerleri ise Çizelge 2.4'de verilmiştir.

$$G_{11m3}(z) = \frac{a_{11m3} \cdot z + b_{11m3}}{z^2 + c_{1m3} \cdot z + c_{0m3}} \quad (2.12)$$

$$G_{12m3}(z) = \frac{a_{12m3} \cdot z + b_{12m3}}{z^2 + c_{1m3} \cdot z + c_{0m3}} \quad (2.13)$$

$$G_{21m3}(z) = \frac{a_{21m3} \cdot z + b_{21m3}}{z^2 + c_{1m3} \cdot z + c_{0m3}} \quad (2.14)$$

$$G_{22m3}(z) = \frac{a_{22m3} \cdot z + b_{22m3}}{z^2 + c_{1m3} \cdot z + c_{0m3}} \quad (2.15)$$

**Çizelge 2. 4. Üçüncü Model (Kazan Kirli, Santral Çalışma Kapasitesi %70) Parametre Çizelgesi**

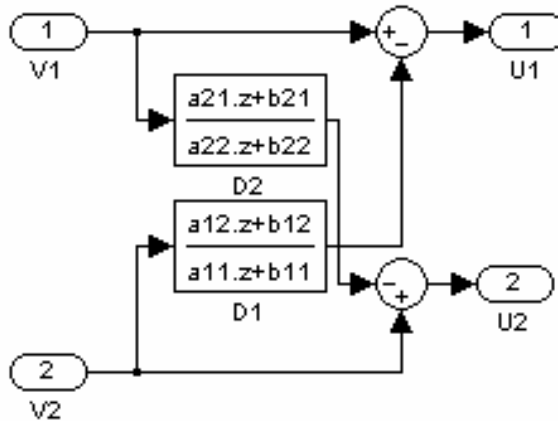
		<b>Pay</b>	<b>Payda</b>
<b>G<sub>11m3</sub>(z)</b>	$Z^0$		$C_{2m3} = 1.000000E+00$
	$Z^{-1}$	$a_{11m3} = 4.400440E-02$	$C_{1m3} = -1.957293E+00$
	$Z^{-2}$	$b_{11m3} = -4.339584E-02$	$C_{0m3} = 9.575405E-01$
<b>G<sub>12m3</sub>(z)</b>	$Z^0$		$C_{2m3} = 1.000000E+00$
	$Z^{-1}$	$a_{12m3} = 7.342118E-03$	$C_{1m3} = -1.957293E+00$
	$Z^{-2}$	$b_{12m3} = -7.382319E-03$	$C_{0m3} = 9.575405E-01$
<b>G<sub>21m3</sub>(z)</b>	$Z^0$		$C_{2m3} = 1.000000E+00$
	$Z^{-1}$	$a_{21m3} = -3.305585E-01$	$C_{1m3} = -1.957293E+00$
	$Z^{-2}$	$b_{21m3} = 3.324640E-01$	$C_{0m3} = 9.575405E-01$
<b>G<sub>22m3</sub>(z)</b>	$Z^0$		$C_{2m3} = 1.000000E+00$
	$Z^{-1}$	$a_{22m3} = -1.928523E-01$	$C_{1m3} = -1.957293E+00$
	$Z^{-2}$	$b_{22m3} = 1.902623E-01$	$C_{0m3} = 9.575405E-01$

## 2.2.5. Ayırıcı ( Decoupler ) Sistemin Modellenmesi

Kullanılan santral modelinin matris biçimindeki ifadesi;

$$\begin{bmatrix} Y_1(z) \\ Y_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(z) & G_{12}(z) \\ G_{21}(z) & G_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(z) \\ U_2(z) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Yukarıdaki kazan modelinin daha kolay kontrol edilebilmesi için, oluşturduğumuz modele ayırıcı sistem eklenmelidir. Yani,  $Y_1(z)$  çıkışı sadece bir girişten,  $Y_2(z)$  çıkışı ise sadece diğer girişten etkilenmelidir. Oysa yukarıdaki eşitlikten de anlaşıldığı gibi  $Y_1(z)$  ve  $Y_2(z)$  çıkışları hem  $U_1(z)$  hem de  $U_2(z)$  girişlerinden etkilenirler. Giriş ve çıkışlar arasında doğrusallık kurabilmek için bir ayırma sistemi kullanılmıştır. Kullanılan ayırma sistemi, özellikle çok giriş ve çok çıkışlı sistemlerde kullanılan, kontrol edilecek sistemin öz değerlerini değiştirmeden girişler ve çıkışlar arasında doğrusallık kuran bir sistemdir. Bu ayırma sisteminin, içinde bulunan birimler ile birlikte gösterimi ise Şekil 2.27'de sunulmuştur;



Şekil 2. 27. Santral Modelinde Kullanılan Ayırma Sistemi

Yukarıda blok diyagram şeklinde gösterilen ayırma sisteminin vektör-matris şeklinde gösterimi de eşitlik 2.17'da sunulmuştur;

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -G_{12}/G_{11} \\ -G_{21}/G_{22} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Burada V1 ve V2 ayırıcının girişleri, U1 ve U2 ayırıcının çıkışları ve aynı zamanda boilerin girişleridir. G12, G21, G11, G22 değerleri de eşitlik 2.16'de kullanılan değerlerin aynılarıdır.

Eşitlik 2.16'de görülen [U] matrisinin yerine eşitlik 2.17'daki [U] matrisi konulduğunda eşitlik 2.18 elde edilir;

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} - \frac{G_{12} \cdot G_{21}}{G_{22}} & 0 \\ 0 & G_{22} - \frac{G_{12} \cdot G_{21}}{G_{11}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Giriş ve çıkış ilişkilerinin doğrusallaştığı, vektör-matris gösteriminden daha rahat bir şekilde algılanabilmektedir. Vektör-matris gösterimi açıldığında Y<sub>1</sub> çıkışının sadece V<sub>1</sub> girişine, Y<sub>2</sub> çıkışının da sadece V<sub>2</sub> girişine bağlı olduğu görülmektedir<sup>(99)</sup>.

## **2.3. KONTROL YÖNTEMLERİ**

### **2.3.1. Giriş**

Otomatik kontrol sistemleri günümüzde ileri toplumlarda hemen hemen her alanda kullanılmaya başlamıştır. Kontrol sistemleri, enerji, malzeme veya diğer kaynakların akışını düzenleyen sistemler olarak tanımlanır. Bunların düzenlenmeleri, karmaşıklığı, görünüşü, kullanım amaçları ve işlevlerine göre değişir. Kontrol sistemleri denetlenen niceliklerin değerlerini sabit tutar veya bu değerlerin, önceden belirlenmiş biçimde değişmesini sağlar.

Kontrol sistemleri, kapalı-döngü geri beslemeli kontrol sistemleri ve açık döngü kontrol sistemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Endüstride kullanılan kontrol sistemlerinin çoğu kapalı-döngü kontrol sistemidir. Bu sistemlerin amacı, en kısa zaman diliminde, sistemin değişkenlerini takip ederek, istenilen seviyelere gelmesini sağlamaktır. Bir sistem, belirli bir görevin yerine getirilmesi için bir araya gelmiş çalışma ünitelerinden oluşmaktadır. Kontrol sisteminde girişler ve çıkışlar bulunur. Girişler kontrolörde işlenerek kontrol edilen sisteme gerekli çıkış sağlanmaktadır. Bu çıkış, sistemi kumanda etmek için kullanılan bir kontrol sinyalidir.

### **2.3.2. Klasik Kontrol Yöntemleri**

#### **2.3.2.1. PI Kontrol Yöntemi**

Oransal etkide kontrol elemanının çıkışı, bir oransal sabit yoluyla

kontrol elemanının girişine uygulanır. Kontrol elemanı çıkışı  $m(t)$  ile giriş hata sinyali  $e(t)$  arasındaki bağıntı;

$$m(t) = K_p e(t) \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir.

Sadece oransal etki (P) kullanılan kontrol sisteminde kalıcı durum hatası oluşmaktadır. Bu hatanın giderilebilmesi için kontrol sistemine integral (I) etki ilave edilmekte, böylece PI kontrol sistemi oluşturulmaktadır. İntegral kontrol sisteminin transfer fonksiyonu;

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \text{ veya } \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{1}{T_i s} \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

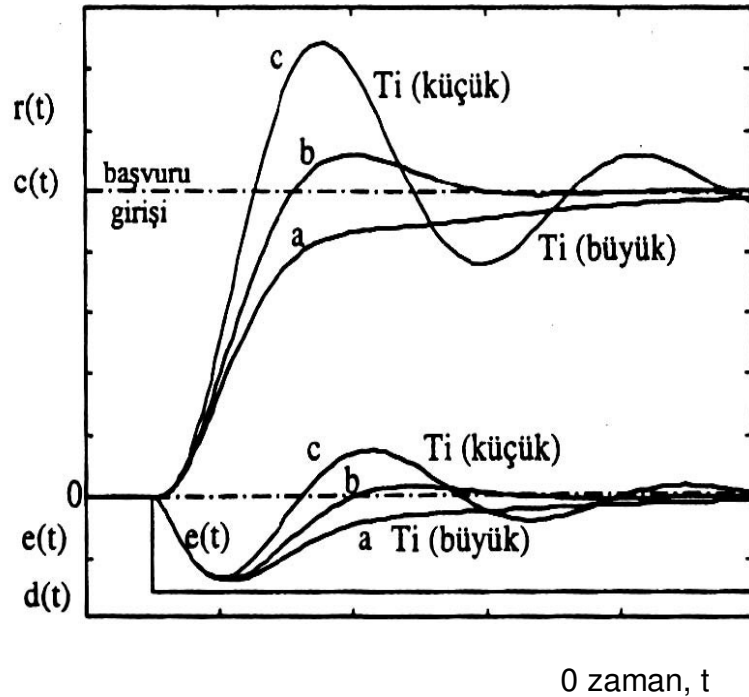
Burada  $K_i$  integral etki kazancı,  $T_i$  integral zaman sabiti adını almaktadır.  $K_i=1/T_i$  olarak bilinmektedir. İntegral etki bir kontrol sisteminde tek başına kullanılmamaktadır. Genel olarak Oransal etki ile veya Oransal etkiye ilave olarak türevsel etki ile beraber kullanılmaktadır.

PI kontrol sisteminin transfer fonksiyonu ise;

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $K_p/K_i=T_i$  integral etki zamanıdır.

Şekil 2.28.'de değişik integral etki zamanı için, bir sistemin basamak giriş cevabı eğrileri verilmiştir. İntegral etkinin kalıcı-durum hatasını ortadan kaldıracı etkisi gayet açık bir biçimde görülmektedir. 'a' eğrisinde integral etki zamanı en yüksek değerde olup hatanın sıfırlama işlemi çok uzun zaman almaktadır. Buna karşılık 'c' eğrisinde integral etki zamanı en düşük değerde olup cevabın olması gerektiği değere ilk defa ulaşması çok kısa zamanda olmakla beraber, eğri ulaşması gerektiği değere ulaşmadan önce biraz salınım yapmaktadır. Hem az salınım ve hem de hızlı cevap açısından en iyi durumun 'b' eğrisi ile olduğu görülmektedir<sup>(100)</sup>.



Şekil 2. 28. PI Kontrol Sisteminin Birim Basamak Cevabı

### 2.3.2.2. PID Kontrol Yöntemi

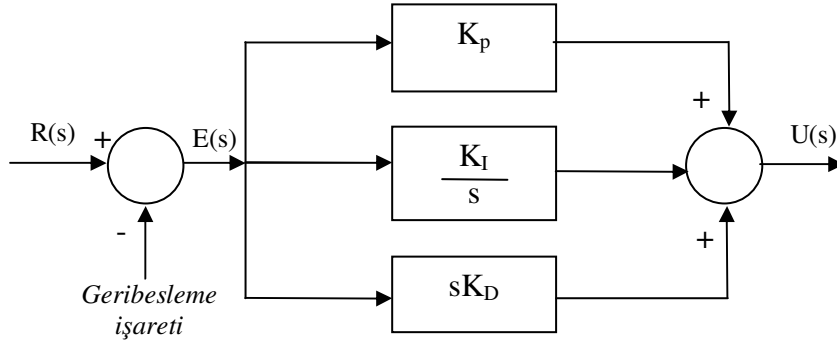
Üç temel kontrol etkisinin üstünlüklerini tek bir birim içerisinde birleştiren bir kontrol etkidir. İntegral (I) etki, sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlarken, türev (D) etki ise yalnızca PI kontrol etkinin kullanılması haline göre sistemin aynı bağıl kararlılığı için cevap hızını artırır.

Türev etkinin transfer fonksiyonu;

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_d s \text{ veya } \frac{M(s)}{E(s)} = T_d s \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $K_d$  türev denetim organı kazancı veya  $T_d$  türev etki zamanı adını alır. Türev etki aynı zamanda oran etki adını da alır. Türev etkinin en önemli üstünlüğü; hatanın büyümesini önceden kestirmesi ve büyük bir hata ortaya çıkmadan bir düzeltme etkisi sağlamasıdır. Türev etki daha hata değişmeye başlar başlamaz harekete geçtiği için “önceden sezmiş etkisi” olarak da bilinir. Bir sabitin türevi sıfır olduğundan türev etkinin zamanla değişmeyen sabit hata üzerinde etkisi yoktur. Türev etki yalnızca hatanın zamana göre değişimi karşısında etkili olduğundan denetim organlarında yalnız başına kullanılmaz ve ancak diğer denetim etkileri ile birleştirilerek kullanılabilir.

Buna göre PID kontrolör, sistemde sıfır kalıcı durum hatası olan hızlı bir cevap sağlar.



**Şekil 2. 29.** PID Tipi Kontrol Organının Blok Diyagramı Gösterimi

$$m(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t).dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.23)$$

$$\frac{K_p}{T_i} = K_i \text{ ve } K_p.T_D = K_D \quad (2.24)$$

alınırsa ifade şu şekli alır;

$$m(t) = K_p.e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t).dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.25)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s \right) = K_p \left( 1 + \frac{K_i}{K_p s} + \frac{K_D}{K_p} s \right) \quad (2.26)$$

PI kontrolü ile ayarlanan bir sisteme geniş zaman aralıkları içinde büyük şiddetli bozucu girişler etki edecek olursa PI etki tek başına hatada meydana gelen değişimleri izlemeye ve düzeltmeye yeterli olamaz. Bu durumda bir türev etki ilavesi, orantı ayarının daha yüksek tutulmasını sağlayarak kontrolörün tepki süresini hızlandıracaktır. Böylece PID kontrolör



ile bir taraftan kalıcı durum hatası sıfırlanırken, diğer taraftan sistemin geçici durum davranışı iyileştirilmiş olur.

Ani ve büyük salınımlara duyarlı bir işletmede, gecikmelerin söz konusu olduğu montajlarda, aşırı yakın takipli bir kontrol kullanılması gerektiğinde PID kontrolör kullanılır. Ayrıca; sıcaklık, ph, yoğunluk, karışım vb. ölçümlerinde ortaya çıkan zaman gecikmeleri, PID tipi kontrolör kullanılarak telafi edilebilir<sup>(88,101)</sup>.

### **2.3.2.3 Klasik Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi**

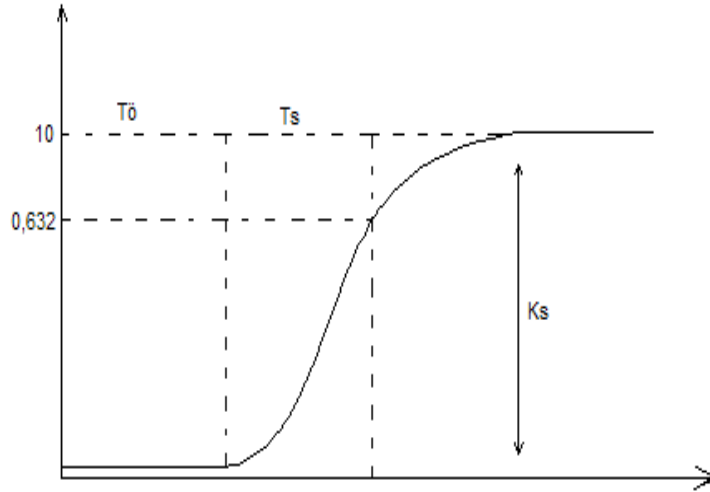
Uygulamada kullanılan kontrol parametrelerinin iyi sonuç verecek şekilde (optimum) ayarlanması önemli bir kontrol problemidir. Kontrol organının tipine bağlı olarak, oransal kazancı  $K_p$ 'nin, integral kazancı  $K_i$ 'nin ve türevsel kazanç  $K_D$ 'nin optimum ayarı için deneysel ve hesaba dayanan metotlar geliştirilmiştir. Bu parametrelerin nihai değerlerinin ayarı sistemin kalıcı durum ve dinamik davranışı arasında bir uyum sağlanacak şekilde saptanır. Kontrol parametrelerinin ayarında, genellikle pratik, ve analitik yöntem kullanılır. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda verilmiştir.

- Pratik Yöntem
- Sistem Cevap Eğrisi Yöntemi
  - a)Ziegler-Nichols Yöntemi
  - b)Chien-Hornes-Reswick Yöntemi

- Titreşim Yöntem

### Ziegler-Nichols Yöntemi

Bu çalışmada, Sistem Cevap Eğrisi Yöntemi kullanılmıştır. Ziegler – Nichols ve Chien-Hornes-Reswick'e ait çizelgelerden faydalanılarak en uygun parametreler seçilmeye çalışılmıştır. Bu yöntemlerde sisteme birim basamak giriş uygulanmakta ve çıkışın değişimi izlenmektedir. (Şekil 2.30). Sistemin bir basamak giriş karşısında gösterdiği cevap eğrisinden ortaya çıkan zaman gecikmesi veya tüm sistemin zaman sabiti  $T_s$ , ölü zaman gecikmesi  $T_ö$ , sistem kazancı  $K_s$  'dir



$$q = \frac{T_s}{T_ö K_s}$$

$$\alpha = \frac{T_s}{T_ö}$$

**Şekil 2. 30.** Sistemin Birim Basamak Cevap Eğrisi

Analitik yöntemle göre PID kontrolör parametreleri, aşağıdaki Çizelgelerden bulunur<sup>(101,102)</sup>.

**Çizelge 2. 5.** Ziegler-Nichols Yöntemine Göre Parametre Çizelgesi

Kontrolör	$K_R$	$T_I$	$T_D$
P	$q$	-	-
PI	$0.9q$	$3.33T_o$	-
PID	$1.2q$	$2T_o$	$0.5T_o$
PD	$1.2q$	-	$(0.25-0.5) T_o$

$T_U = T_o$        $K_P = K_R$        $T_E = T_s$

**Çizelge 2. 6.** Chien - Hornes - Reswick Yöntemine Göre Parametre Çizelgesi

Kontrolör Parametresi		İstenen Değer		Bozucu Davranış	
P	$K_R$	$0.3q$	$0.7q$	$0.3q$	$0.7q$
PI	$K_R$	$0.35q$	$0.6q$	$0.6q$	$0.7q$
	$T_I$	$1.2T_s$	$1T_s$	$4T_o$	$2.3T_o$
PID	$K_R$	$0.6q$	$0.95q$	$0.95q$	$1.2q$
	$T_I$	$1T_s$	$1.35T_s$	$2.4T_o$	$2T_o$
	$T_D$	$0.5T_o$	$0.47T_o$	$0.42T_o$	$0.42T_o$

Taşma ve dalgalanma yok

%20 Dalgalanma var

Taşma ve dalgalanma yok

%20 Dalgalanma var

## 2.3.4 Yapay Sinir Ağları

### 2.3.4.1 Genel

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin özelliklerinden olan öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri, herhangi bir yardım almadan otomatik olarak gerçekleştirebilmek amacı ile geliştirilen bilgisayar yazılım sistemleridir<sup>(103)</sup>.

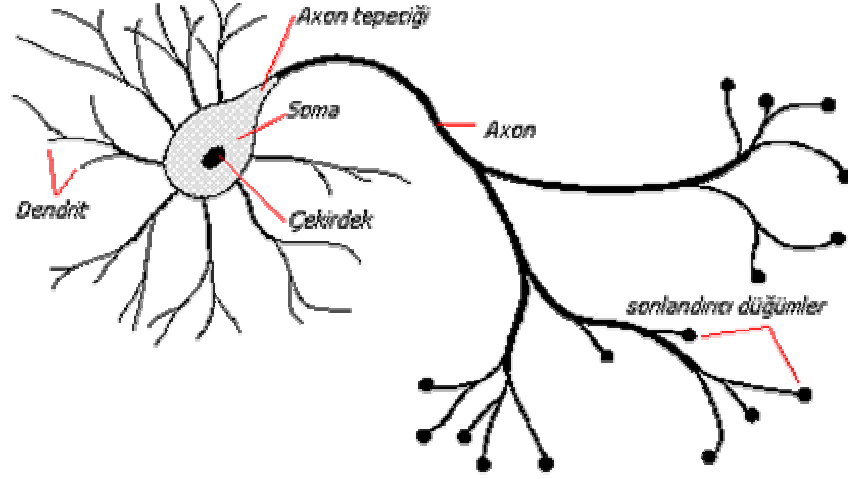
Yapay sinir ağları; insan beyninden esinlenerek, öğrenme sürecinin matematiksel olarak modellenmesi uğraşı sonucu ortaya çıkmıştır. Bu nedendir ki, bu konu üzerindeki çalışmalar ilk olarak beyni oluşturan biyolojik üniteler olan nöronların modellenmesi ve bilgisayar sistemlerinde uygulanması ile başlamış, daha sonraları bilgisayar sistemlerinin gelişimine de paralel olarak bir çok alanda kullanılır hale gelmiştir.

İnsan beyninin çalışma prensibini taklit ederek çalışan bu sistemler, her ne kadar bilgisayar teknolojisi hızlı bir gelişim göstermiş, işlem hızları nano saniyeler mertebesine inmiş olsa da, bırakalım insan beynini, ilkel bir canlı beyninin fonksiyonları dahi baz alındığında, böyle bir organizmanın yanında çok ilkel kalmaktadır. Nano saniyeler bazındaki işlem hızları ile YSA'lar, mili saniyeler mertebesindeki işlem hızları ile işlem yapan insan beyninin işlevselliğinin henüz çok uzağındadır.

YSA, bilgiyi depolamak için doğal eğilimi olan basit birimlerden oluşan paralel dağıtılmış bir işlemci olarak tanımlanmıştır. Bilgi, öğrenme işlemi yoluyla ağ tarafından elde edilir. Sinaptik ağırlıklar olarak bilinen nöronlar arası bağlantı kuvvetleri, bilgiyi depolamak için kullanılır<sup>(104)</sup>.

Biyolojik sinir ağının temel inşa bloğu olan basit bir sinir hücresi nöron olarak adlandırılır<sup>(105)</sup>. Aşağıdaki şekilde şematik diyagramı verilen tipik sinir hücresi, soma olarak adlandırılan hücre gövdesi, akson ve dendritler olmak üzere üç ana bölümden oluşur.. Dendritler dendritik ağaç biçimindedir, nöron gövdesi civarında uzun çalılar görünümündedirler. Dendritler üzerinden

girişler alınır, soma tarafından girişler işlenir. Nörondaki sinyalleri taşıyan uzun bir sinirsel bağlantı halindeki akson ise, işlenen girişleri çıkışa aktarır. Akson dendrit bağlantısı ise synapse olarak adlandırılır. Synapse nöronlar arasında elektro kimyasal bağlantıyı sağlamaktadır.

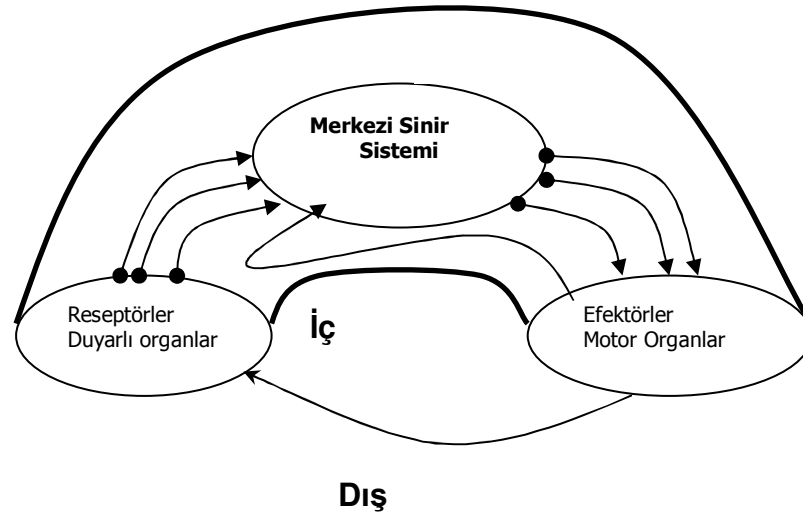


**Şekil 2. 31.** Basit Bir Sinir Hücresi

Bir insanın beyin korteksinde yaklaşık 10 milyar nöron ve yaklaşık 60 trilyon synapse veya bağlantının bulunduğu tahmin edilmektedir. Sonuçta beyin son derece verimli bir yapıdır. Özellikle beyin enerjik verimliliği, her saniyede her bir işlem için yaklaşık  $10^{-16}$  joule'dur, bu değer bugünün en iyi bilgisayarlarında yaklaşık  $10^{-6}$  joule'dur. Beynin nöronları organize etme yeteneği böylece kesin hesaplamaları gerçekleştirmesi (örüntü tanıma, algılama gibi) bugünün en hızlı sayısal bilgisayarlarından daha hızlıdır<sup>(109)</sup>. Diğer taraftan bir sinir hücresinin tepki hızı günümüzün bilgisayarlarına göre oldukça yavaş olmakla birlikte duyusal bilgileri son derecede hızlı değerlendirebilmektedir. Bu nedenle insan beyni; öğrenme, birleştirme, uyarılma ve genelleştirme yeteneği nedeniyle son derece karmaşık,

doğrusal olmayan ve paralel dağılmış bir bilgi işleme sistemi olarak tanımlanabilir.

Bir hipoteze göre nöronlar birbirleriyle elektriksel sinyaller aracılığıyla haberleşmektedir. Ayrıca, nöronlar kimyasal bir ortamda çok yoğun beyinsel faaliyetleri yerine getirmektedirler. Böylece beyni, biyokimyasal işlemlerin gerçekleştiği son derece yoğun bir elektriksel ağ gibi düşünebilir. Çok büyük sinir ağı çok karmaşık ve ayrıntılı bir yapıyla bir birine bağlıdır. Ağa giriş duyarlı algılayıcılar (reseptörler) ile sağlanır. Reseptörler uyarıyı gövdeye götürürler. Uyarım elektriksel sinyaller biçimindedir. Nöron ağının içine bilgi taşınması ve merkezi sinir sisteminde bilginin işlenmesi sonucu efektörler kontrol edilir. Bundan sonra insan cevabını çeşitli eylemler şeklinde verir. Yukarıda belirtildiği gibi sinir sisteminde bilgi akışı üç ana kısımda oluşmaktadır: Duyarlı Organlar, sinir ağı ve motor organlar. (Şekil 2.32)



**Şekil 2. 32.** Sinir Sisteminde Bilgi Akışı

Şekilde görüldüğü gibi bilgi işlenmekte, değerlendirilmekte ve merkezi sinir sisteminde depolanan bilgiyle karşılaştırılmaktadır. Gerekli olduğunda komutlar o yerde üretilir ve motor organlara iletilir. Motor organlar eylemi doğrulayan geri beslemeli bağlantılarla merkezi sinir sistemini yönetir ve denetlerler. İç ve dış geri beslemeli kontrolün ikisi de komutlarla gerçekleştirilir. Görüldüğü gibi tüm sinir sisteminin yapısı kapalı-çevrim bir kontrol sistemini andırmaktadır.

#### **2.3.4.2. YSA'ların Genel Özellikleri**

YSA'lar, uygulanan ağ modeline göre değişik karakteristik özellikler göstermelerine karşın temel birkaç ortak özelliğe sahiptirler.

Birinci özellik; YSA'larda sistemin paralelliği ve toplamsal işlevin yapısal olarak dağılımlılığıdır<sup>(104)</sup>. YSA lar bir çok nörondan meydana gelir ve bu nöronlar eş zamanlı olarak çalışarak karmaşık işlevleri yerine getirir. Diğer bir deyişle karmaşık işlevler bir çok nöronun eş zamanlı çalışması ile yerine getirilir. Süreç içerisinde bu nöronlardan her hangi biri işlevini yitirse dahi sistem güven sınırları içerisinde çalışmasına devam edebilir.

İkinci özellik ise genelleme yeteneği, diğer bir deyişle ağ yapısının, eğitim esnasında kullanılan nümerik bilgilerden eşleştirmeyi betimleyen kaba özellikleri çıkarsaması ve böylelikle eğitim sırasında kullanılmayan girdiler için de, anlamlı yanıtlar üretebilmesidir<sup>(105)</sup>.

Üçüncü olarak; ağ fonksiyonları non-lineer olabilmektedir. Yapı üzerinde dağılmış belli tipteki non-lineer alt birimler, özellikle, istenen eşleştirmenin denetim ya da tanımlama işlemlerinde olduğu gibi non-lineer olması durumunda işlevin doğru biçimde yerine getirilebilmesini matematiksel olarak olası kılarlar.

Dördüncü özellik ise; sayısal ortamda tasarlanan YSA'ların, donanımsal olarak gerçekleştirilebilir olmasıdır. Bu özellik YSA'ların günlük hayatta daha da fazla yaşamımızın içine gireceğinin (girebileceğinin) göstergesidir.

#### **2.3.4.3. YSA'ların Avantaj ve Dezavantajları**

Yapay sinir ağlarının klasik sistemlere göre sağladıkları avantajlar; doğrusal olmama, öğrenme, genelleme yapma, adaptasyon, veri işleme, hataya ve gürültüye karşı duyarlılık ve tolerans olarak belirtilebilir<sup>(106)</sup>

**YSA'lar makine öğrenmesi gerçekleştirebilirler.** Yapay sinir ağlarının temel işlevi zaten bilgisayarın öğrenmesini sağlamaktır. Olayları öğrenerek benzer olaylar karşısında mantıklı kararlar verebilirler.

**Bilgi işleme yöntemleri geleneksel programlamadan farklıdır.** Bu nedenle geleneksel programlamanın getirdiği bir çok olumsuzluk ortadan kaldırılabılır



**Bilgiler ağın tamamında saklanır.** Geleneksel programlamada olduğu gibi bilgiler veri tabanları yada dosyalarda belli bir düzende tutulmaz, ağın tamamına yayılarak değerler ile ölçülen ağ bağlantılarında saklanmaktadır. Nöronlardan bazılarının işlevini yitirmesi, anlamlı bilginin kaybolmasına neden olmaz.

**Örnekleri kullanarak öğrenirler.** YSA'nın öğrenebilmesi için örneklerin belirlenmesi, bu örneklerin ağa gösterilerek istenen çıktılara göre ağın eğitilmesi gerekmektedir. Ağın başarısı, seçilen örnekler ile doğru orantılıdır, ağa olay bütün yönleri ile gösterilemezse ağ yanlış çıktılar üretebilir.

**Daha önce görülmemiş örnekler hakkında bilgi üretebilirler.** YSA'lar eğitimleri sırasında kendilerine verilen örneklerden genellemeler çıkarırlar ve bu genellemeler ile yeni örnekler hakkında bilgi üretebilirler.

**Algılamaya yönelik olaylarda kullanılabilirler.** YSA'ların en başarılı oldukları alanlar, algılamaya yönelik uygulama alanlarıdır. Bu alanlarda başarıları kanıtlanmıştır.

**Örüntü (pattern) ilişkilendirme ve sınıflandırma yapabilirler.** YSA'lar kendilerine örnekler halinde verilen örüntüleri kendisi veya diğerleri ile ilişkilendirebilir. Ayrıca kendisine verilen örneklerin kümelenmesi ile, bir sonraki verinin hangi kümeye dahil olacağına karar verilmesi konusunda kullanılabilirler.

**Örüntü tamamlama yapabilirler.** Ağa eksik bilgileri içeren örüntüler verildiğinde eksik bilgilerin tamamlanması konusunda başarılıdırlar.

**Kendi kendine öğrenebilme ve organize etme yetenekleri vardır.** YSA'lar online olarak öğrenebilirler ve kendi kendilerini eğitebilirler.

**Eksik bilgi ile çalışabilmektedirler.** Geleneksel sistemlerin aksine YSA'lar eğitildikten sonra veriler eksik bilgi içerse dahi, çıktı üretebilirler. Bu durum bir performans kaybı yaratmaz, performans kaybı eksik bilginin önemine bağlıdır. Burada bilgilerin önem dereceleri eğitim sırasında öğrenilir.

**Hata toleransına sahiptirler.** YSA'ların eksik bilgilerle çalışabilmeleri ve bazı hücreleri bozulsa dahi çalışabilmeleri, onları hatalara karşı toleranslı yapar.

**Dereceli bozulma (Graceful degradation) gösterirler.** Bir ağ, zaman içerisinde yavaş ve göreceli bir bozulmaya uğrar. Ağlar problemin ortaya çıktığı anda hemen bozulmazlar.

**Dağıtık belleğe sahiptirler.** YSA'larda bilgi ağa dağılmış bir şekilde tutulur. Hücrelerin bağlantı ve ağırlık dereceleri, ağın bilgisini gösterir. Bu nedenle tek bir bağlantının kendi başına anlamı yoktur.

Burada çok temel bazı avantajlardan bahsedilmekle beraber,

YSA'ların daha pek çok avantajı vardır.

YSA'ların, pek çok avantajın yanında bazı dezavantajları da vardır.

Belli başlı dezavantajları;

**Donanım bağımlıdır.** YSA'ların en önemli sorunu donanım bağımlı olmalarıdır. YSA'ların en önemli özellikleri ve var oluş nedenlerinden birisi olan paralel işlem yapabilme yeteneği, paralel çalışan işlemciler ile performans gösterir.

**Uygun ağ yapısının belirlenmesinde belli bir kural yoktur.** YSA'larda probleme uygun ağ yapısının belirlenmesi için geliştirilmiş bir kural yoktur. Uygun ağ yapısı deneyim ve deneme yanılma yolu ile belirlenmektedir.

**Ağın parametre değerlerinin belirlenmesinde belli bir kural yoktur.** YSA'larda öğrenme katsayısı, hücre sayısı, katman sayısı gibi parametrelerin belirlenmesinde belirli bir kural yoktur. Bu değerlerin belirlenmesi için belirli bir standart olmamakla birlikte her problem için farklı bir yaklaşım söz konusu olabilmektedir.

**Öğrenilecek problemin ağa gösterimi önemli bir problemdir.** YSA'lar nümerik bilgiler ile çalışabilmektedirler. Problemler YSA'lara tanıtılmadan önce nümerik değerlere çevrilmek zorundadırlar. Burada

belirlenecek gösterim mekanizması ağın performansını doğrudan etkileyecektir. Bu da kullanıcının yeteneğine bağlıdır.

**Ağın eğitiminin ne zaman bitirilmesi gerektiğine ilişkin belli bir yöntem yoktur.** Ağın örnekler üzerindeki hatasının belirli bir değerin altına indirilmesi eğitimin tamamlandığı anlamına gelmektedir. Burada optimum neticeler veren bir mekanizma henüz yoktur ve YSA ile ilgili araştırmaların önemli bir kolunu oluşturmaktadır.

#### **2.3.4.4 YSA'ların Kullanıldığı Alanlar**

Yapay sinir ağları başlıca; Sınıflandırma, Modelleme Tahmin ve Kontrol uygulamaları olmak üzere, pek çok alanda kullanılmaktadır. Başarılı uygulamalar incelendiğinde, YSA'ların çok boyutlu, gürültülü, karmaşık, kesin olmayan, eksik, kusurlu, hata olasılığı yüksek sensör verilerinin olması ve problemi çözmek için matematiksel modelin ve algoritmaların bulunmadığı, sadece örneklerin var olduğu durumlarda yaygın olarak kullanıldıkları görülmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş ağlar genellikle şu fonksiyonları gerçekleştirmektedirler<sup>(103)</sup>;

Muhtemel fonksiyon kestirimleri

Sınıflandırma

Kümeleme

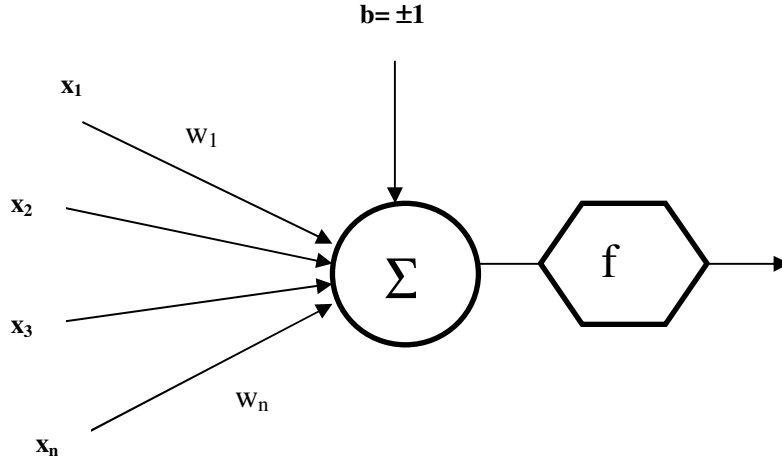
Vektör Sayısallaştırılması

Desen uygunluğu  
Fonksiyon yaklaşımı  
Tahmin yapmak  
Kontrol sorunları  
Optimizasyon  
İlişkilendirme veya örüntü eşleştirme  
Zaman serileri analizleri  
Sinyal filtreleme  
Veri sıkıştırma  
Örüntü tanıma  
Doğrusal olmayan sinyal işleme  
Doğrusal olmayan sistem modelleme <sup>(107)</sup>

#### **2.3.4.5. Yapay Sinir Ağı Hücresi**

Temel bir yapay sinir ağı hücresi biyolojik sinir hücrelerine göre çok daha basit bir yapıya sahiptir. En temel nöron modeli aşağıdaki şekilde görölmektedir. Yapay sinir ağı hücrelerinde temel olarak dış ortamdaki ya da diğer nöronlardan alınan veriler yani girişler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıkışlar bulunmaktadır<sup>(108)</sup>. Dış ortamdaki alınan veri ağırlıklar aracılığıyla nörona bağlanır ve bu ağırlıklar ilgili girişin etkisini belirler. Toplam fonksiyonu ise net giriş hesaplar, net giriş, girişlerle bu girişlerle ilgili ağırlıkların çarpımının bir sonucudur. Aktivasyon fonksiyonu

işlem süresince net çıkışını hesaplar ve bu işlem aynı zamanda nöron çıkışını verir. Genelde aktivasyon fonksiyonu doğrusal olmayan (nonlineer) bir fonksiyondur. Şekilde görülen **b** bir sabittir, bias veya aktivasyon fonksiyonunun eşik değeri olarak adlandırılır. Nöronun matematiksel modeli şöyledir.



**Şekil 2. 33.** Temel Yapay Sinir Ağı Hücresi

Çıkış,

$$o = f (W.X + b) \quad (2.27)$$

şeklinde nöron çıkışı hesaplanır. Buradaki  $W$  ağırlıklar matrisi,  $X$  ise girişler matrisidir.  $n$  giriş sayısı olmak üzere;

$$W = w_1, w_2, w_3, \dots, w_n \quad (2.28)$$

$$X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \quad (2.29)$$

şeklinde yazılabilir. Formülleştirecek olursak;

$$net = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b \text{ ve } o = f (net) \quad (2.30)$$

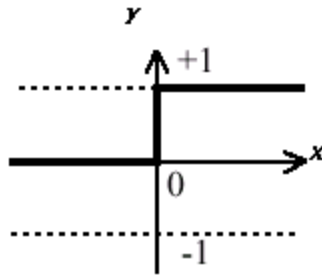
$$o = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \quad (2.31)$$

şeklinde de yazılabilir.

Yukarıdaki formülde görülen **f** aktivasyon fonksiyonudur. Genelde nonlineer olan aktivasyon fonksiyonunun çeşitli tipleri vardır.

#### 2.3.4.6. Aktivasyon Fonksiyonları

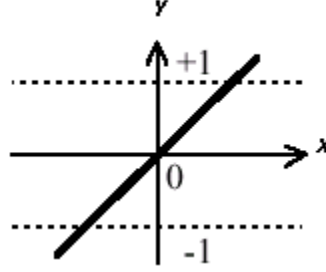
Aşağıdaki şekilde eşik aktivasyon fonksiyonunun grafiği görülmektedir. Eşik aktivasyon fonksiyonu eğer net değeri sıfırdan küçükse sıfır, sıfırdan daha büyük bir değer ise net çıkışında +1 değeri verir. Eşik aktivasyon fonksiyonunun -1 ile +1 arasında değişeni ise signum aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılır. Signum aktivasyon fonksiyonu, net giriş değeri sıfırdan büyükse +1, sıfırdan küçükse -1, sıfıra eşitse sıfır değerini verir<sup>(109)</sup>.



**Şekil 2. 34.** Eşik Aktivasyon Fonksiyonu

Aşağıdaki şekilde doğrusal aktivasyon fonksiyonu görülmektedir. Lineer aktivasyon fonksiyonunun çıkışı girişine eşittir. Sürekli çıkışlar

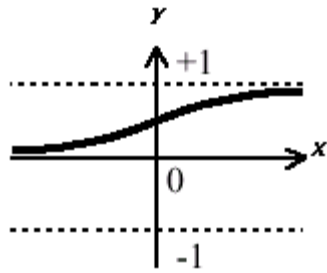
gerektiği zaman çıkış katmanındaki aktivasyon fonksiyonunun lineer aktivasyon fonksiyonu olabildiğine dikkat edilmelidir.



**şekil 2. 35.** Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu

$f(x) = x$  şeklinde ifade edilir.

Aşağıdaki şekilde logaritma sigmoid transfer fonksiyonu görölmektedir. Lojistik fonksiyon olarak da adlandırılmaktadır. Bu fonksiyonunun lineer olmamasından dolayı türevi alınabilmektedir böylece daha sonraki bölümlerde görölecek olan geri yayınlı ağlarda kullanmak mümkün olabilmektedir.



7

**şekil 2. 36.** Logaritma Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu

Lojistik fonksiyonu,

$$f(x) = \text{lojistik}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta x)} \quad (2.32)$$



şeklinde ifade edilir. Buradaki  $\beta$  eğim sabiti olup genelde bir olarak seçilmektedir. Diğer bir aktivasyon fonksiyonu olan hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu da lineer olmayan türevi alınabilir bir fonksiyondur. +1 ile -1 arasında çıkış değerleri üreten bu fonksiyon lojistik fonksiyona benzemektedir. Denklemini aşağıda görüldüğü gibidir.

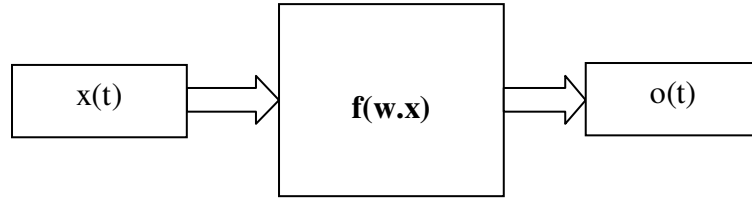
$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (2.33)$$

Bu aktivasyon fonksiyonlarından başka fonksiyonlar da vardır. Yapay sinir ağında hangi aktivasyon fonksiyonunun kullanılacağı probleme bağlı olarak değişmektedir. Yukarıda verilen fonksiyonlar en genel aktivasyon fonksiyonlarıdır<sup>(109)</sup>.

#### **2.3.4.7. Yapay Sinir Ağları Modelleri**

İleri beslemeli bir ağda proses elemanlar genellikle katmanlara ayrılmışlardır. İşaretler, giriş katmanından çıkış katmanına doğru tek yönlü bağlantılarla iletilir. Proses elemanlar bir katmandan diğer bir katmana bağlantı kurarlarken, aynı katman içerisinde bağlantıları bulunmaz. İleri beslemeli ağlara örnek olarak çok katmanlı perseptronlar ('multilayered perceptrons-MLP') ve LVQ ('Learning Vector Quantization') ağları verilebilir. Bu ağlar statik ağlar olarak da bilinirler<sup>(110)</sup>.

En basit ve en genel yapay sinir ağı tek yönlü sinyal akışını kullanırlar. Yapay sinir ağı modelleri temel olarak iki grupta toplanmaktadır. İleri beslemeli yapay sinir ağı ve geri beslemeli yapay sinir ağı. İleri beslemeli yapay sinir ağılarında gecikmeler yoktur, işlem girişlerden çıkışlara doğru ilerler. Çıkış değerleri öğreticiden alınan istenen çıkış değeriyle karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilerek ağı ağırlıkları güncellenir.



**Şekil 2. 37.** İleri Beslemeli Yapı

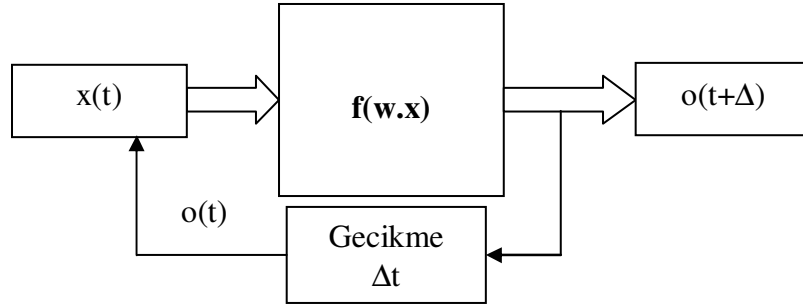
Bir geri beslemeli sinir ağı, çıkış ve ara katman çıkışların, giriş birimlerine veya önceki ara katmanlara geri beslendiği bir ağı yapısıdır. Böylece, girişler hem ileri yönde hem de geri yönde aktarılmış olur. Bu çeşit sinir ağlarının dinamik hafızaları vardır ve bir andaki çıkış hem o andaki hem de önceki girişleri yansıtır. Bundan dolayı, özellikle önceden tahmin uygulamaları için uygundur. Bu ağılar çeşitli tipteki zaman-serilerinin tahmininde oldukça başarı sağlamışlardır. Bu ağılara örnek olarak Hopfield, Elman ve Jordan ağı verilebilir<sup>(110)</sup>.

Geri beslemeli yapay sinir ağılarında tıpkı kontrol uygulamalarında olduğu gibi gecikmeler söz konusudur. Geri beslemeli nöral ağı, çıkışlar girişlere bağlanarak ileri beslemeli bir ağıdan elde edilir. Ağıın  $t$  anındaki çıkışı  $o(t)$  ise,  $t + \Delta t$  anındaki çıkışı ise  $o(t + \Delta t)$ 'dir. Buradaki  $\Delta t$  sabiti sembolik

anlamda gecikme süresidir. İleri beslemeli yapay sinir ağı notasyonu kullanılarak  $o(t+\Delta t)$  şöyle yazılabilir.

$$o(t+\Delta t) = f [W.o(t)] \quad (2.34)$$

bu formül aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir. Dikkat edilmesi gereken nokta başlangıç anında  $x(t)$ 'ye ihtiyaç duyulmasıdır. Başlangıç anında  $o(0) = x(0)$ 'dir.



**Şekil 2. 38.** Geri beslemeli yapı

#### 2.3.4.8. Yapay Sinir Ağlarının Eğitilmesi

İnsan beyni doğumdan sonraki gelişme sürecinde çevresinden duyu organlarıyla algıladığı davranışları yorumlar ve bu bilgileri diğer davranışlarında kullanır. Yaşadıkça beyin gelişir ve tecrübelenir. Artık olaylar karşısında nasıl tepki göstereceğini çoğu zaman bilmektedir. Fakat hiç karşılaşmadığı bir olay karşısında yine tecrübesiz kalabilir. Yapay sinir ağlarının öğrenme sürecinde de, tıpkı dış ortamdan gözle veya vücudun diğer organlarıyla uyarıların alınması gibi dış ortamdan girişler alınır, bu girişlerin beyin merkezine iletilerek burada değerlendirilip tepki verilmesi gibi

yapay sinir ağında da aktivasyon fonksiyonundan geerilerek bir tepki çıkışı üretilir. Bu ıkış yine tecrübeyle verilen çıkışla karşılaştırılarak hata bulunur. Çeşitli ğrenme algoritmalarıyla hata azaltılıp gerçek çıkışa yaklaşılmaya çalışılır. Bu alışma süresince yenilenen yapay sinir ağının ağırlıklarındır. Ağırlıklar her bir çevrimde yenilenerak amaca ulaşılmaya çalışılır. Amaca ulaşmanın veya yaklaşmanın ölçüsü de yine dışarıdan verilen bir değerdir. Eğer yapay sinir ağı verilen giriş-çıkış çiftleriyle amaca ulaşmış ise ağırlık değerleri saklanır. Ağırlıkların sürekli yenilenip istenilen sonuca ulaşılan kadar geçen zamana öğrenme adı verilir. Yapay sinir ağı öğrendikten sonra daha önce verilmeyen girişler verilir, sinir ağı çıkışıyla gerçek çıkışı yaklaşımı incelenir. Eğer yeni verilen rnelere de doğru yaklaşıyorsa sinir ağı işi öğrenmiş demektir. Sinir ağına verilen örnek sayısı optimum değerden fazla ise sinir ağı işi öğrenmemiş ezberlemiştir. Genelde eldeki örneklerin yüzde sekseni ağa verilir ağ eğitilir, daha sonra geri kalan yüzde yirmilik kısım verilir ağın davranışı incelenir diğer bir deyişle ağ böylece test edilir.

#### **2.3.4.9. Yapay Sinir Ağlarında ğrenme Algoritmaları**

1990'lı yıllardan bugüne gelinceye kadar birçok öğrenme algoritması geliştirilmiştir. ğrenme algoritmaları temelde üç grupta toplanmaktadır. Eğiticili ğrenme, eğitici-siz öğrenme ve takviyeli öğrenme algoritmaları.

Eğiticili (supervised) ğrenmede, her bir örnekleme zamanında giriş uygulandığında sistemin arzu edilen cevabı y eğitici tarafından sağlanır. Arzu edilen çıkış y ile sinir ağı çıkışı o arasındaki fark hata ölçüsüdür ve ağ

parametrelerini güncellemekte kullanılır. Ağırlıkların güncellenmesi süresince eğitici ödüllendirme-cezalendirme Őemasını ağa uygulayarak hatayı azaltır. Bu ğrenme modelinde giriş ve çıkış örnekleri kümesi eğitim kümesi olarak adlandırılır.

Eğitici-siz öğrenmede, eğitici-li öğrenmedeki gibi arzu edilen y ıkıŐları bilinmemektedir. Bu yüzden kesin bir hata bilgisini ağın davranışını deđiŐtirmekte kullanmak mümkün değildir. Cevabın doğruluğu veya yanlıŐlıđı hakkında bilgi sahibi olunmadığı için öğrenme, girişlerin verdiği cevaplar gözlenerek baŐarıya ulaŐılır. Aslında eğitici-siz öğrenme demek doğru değildir, çünkü eğitici-siz öğrenme gerçekte mümkün değildir. Eğitici her öğrenme adımımda dahil olmamasına rağmen, amaçları ayarlamaktadır.

Takviyeli ğrenmede, ağın davranışının uygun olup olmadığını belirten bir öz yetenek bilgisine ihtiyaç duyulur. Bu bilgiye göre ağırlıklar ayarlanır. Gerçek zamanda öğrenme yöntemi olup deneme-yanılma esasına göre sinir ağı eğitilmektedir.

Birçok ğrenme algoritmasının bulunmasından dolayı bu kısımda sadece en popüler öğrenme algoritması olan Geri Yayınım Algoritması ve Levenberg-Marquardt ğrenme algoritmaları<sup>(108)</sup> anlatılacaktır.

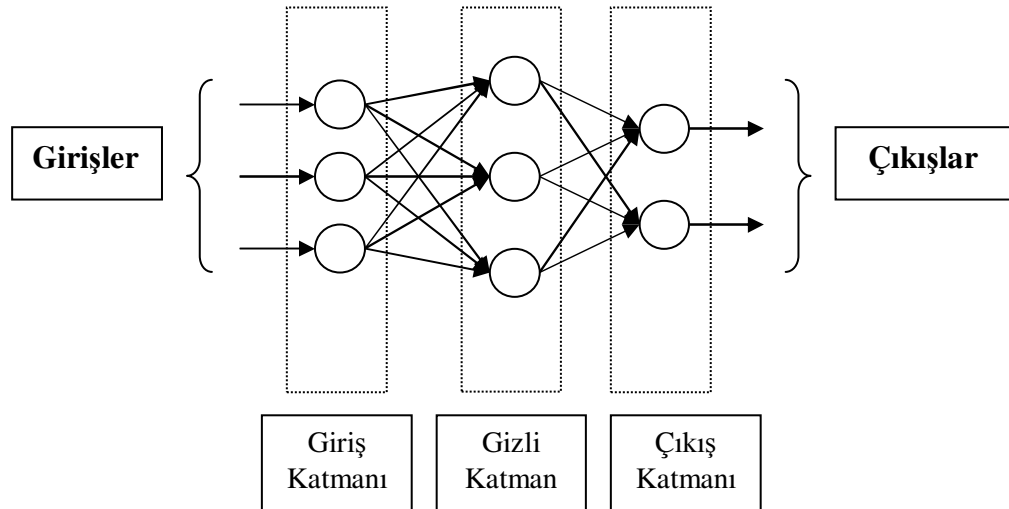
Geri yayınım algoritması eğitici-li öğrenmede kullanılan en genel algoritmadır. Basit olması ve iyi bir öğrenme kapasitesine sahip olması birçok alana uygulanmasını sađlamıŐtır.

### 2.3.4.9.1. Geri Yayınım Öğrenme Algoritması

Geri yayılım algoritması, sinir ağının eğitici sınıfına giren genel bir algoritmadır. Daha öncede belirtildiği gibi girişlerle çıkışlar arasındaki hata sinyali bulunarak, ağırlıklar bu hata sinyaliyle güncellenmektedir. Hata yani  $e(k)$ , arzu edilen çıkış (gerçek çıkış -  $y(k)$ ) ile sinir ağının çıkışı ( $o(k)$ ) arasındaki farktır.

$$e(k) = y(k) - o(k)$$

Aşağıdaki şekilde birçok sinir hücresinin bir birine bağlandığı ileri yönlü çok katmanlı bir yapay sinir ağı görülmektedir. Giriş katmanı ile çıkış katmanı arasındaki katman veya katmanlar gizli katman olarak adlandırılır. Sinir ağlarında kaç tane gizli katman kullanılacağı ve her bir gizli katmanda kaç nöron olacağı bugüne kadar belirlenememiştir, probleme göre değişen bu nitelikler deneme-yanılma yoluyla bulunur.



Şekil 2. 39. İleri Beslemeli Çok Katmanlı Sinir Ağı

Şekildeki çok katmanlı ağı düşünürsek;

$k+1$ . katmanda  $i$ . birime net giriş;

$$n^{k+1}(i) = \sum_{j=1}^k w^{k+1}(i, j) o^k(j) + b^{k+1}(i) \quad (2.35)$$

Birim  $i$ 'nin çıkışı şöyle olacaktır.

$$o^{k+1}(i) = f^{k+1}(n^{k+1}(i)) \quad (2.36)$$

$M$  katmanlı bir ağı matris biçiminde ifade edilirse;

$$\underline{o}^0 = \underline{x} \quad (2.37)$$

$$\underline{o}^{k+1} = f^{k+1}(W^{k+1} \underline{o}^k + \underline{b}^{k+1})$$

$$k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2.38)$$

Ağın temel görevi giriş-çıkış çiftleri arasındaki ilişkiyi öğrenmektir.

$$\{(\underline{x}_1, \underline{y}_1), (\underline{x}_2, \underline{y}_2), \dots, (\underline{x}_Q, \underline{y}_Q)\}$$

Ağın performansı şöyledir;

$$E = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q (\underline{y}_q - \underline{o}_q^M)^T (\underline{y}_q - \underline{o}_q^M) = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \underline{e}_q^T \underline{e}_q \quad (2.39)$$

Buradaki  $\underline{o}_q^M$ , q. giriş ( $\underline{x}_q$ ) olduğunda ağın çıkışıdır,  $\underline{e}_q = \underline{y}_q - \underline{o}_q^M$  ise q.girişin hatasıdır. Standart geri yayılım algoritması için yaklaşık adım düşümü algoritması kullanılır. Performans indeksiyle yaklaşım ise;

$$E = \frac{1}{2} \underline{e}_q^T \underline{e}_q \quad (2.40)$$

burada toplam karelerin toplamı tek giriş-çıkış çifti için karesel hatayla yer değiştirilir. Yaklaşık adım (eğim) düşümü algoritması,

$$\Delta w^k(i, j) = -\alpha \frac{\partial E}{\partial w^k(i, j)} \quad (2.41)$$

$$\Delta b^k(i) = -\alpha \frac{\partial E}{\partial b^k(i)} \quad (2.42)$$

olur. Burada  $\alpha$  öğrenme katsayısıdır. Ağın hassaslık yeterliği ise Denklem 2.43' te tanımlanmıştır.

$$\delta^k(i) \equiv \frac{\partial E}{\partial n^k(i)} \quad (2.43)$$

performans indeksinin duyarlılığı k.katmanda i. birimin net girişinde değiştirilir. Şimdi (2.35),(2.40) ve (2.43) kullanılarak,

$$\frac{\partial E}{\partial w^k(i, j)} = \frac{\partial E}{\partial n^k(i)} \frac{\partial n^k(i)}{\partial w^k(i, j)} = \delta^k(i) o^{k-1}(j) \quad (2.44)$$



$$\frac{\partial E}{\partial b^k(i)} = \frac{\partial E}{\partial n^k(i)} \frac{\partial n^k(i)}{\partial b^k(i)} = \delta^k(i) \quad (2.45)$$

Hassaslık yeterliği aşağıdaki yinelemeli ilişkiyle de gösterilebilir.

$$\underline{\delta}^k = \dot{F}^k(n^k) W^{k+1} \underline{\delta}^{k+1} \quad (2.46)$$

burada;

$$\dot{F}^k(n^k) = \begin{bmatrix} \dot{f}^k(n^k(1)) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dot{f}^k(n^k(2)) & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & \dot{f}^k(n^k(Sk)) \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

ve

$$f^k(n) = \frac{df^k(n)}{dn} \quad (2.48)$$

$$\underline{\delta}^M = -\dot{F}^M(n^M)(y_q - o_q) \quad (2.49)$$

Tüm öğrenme algoritmalarında şu adımlar izlenir. İlk önce (2.37)-(2.38) kullanılarak giriş ileri yönde yayılır, sonra (2.49) ve (2.46) kullanılarak geri yayılır ve son olarak ağırlıklar ve denge (2.41), (2.42), (2.43), (2.44) ve (2.45) kullanılarak güncellenir<sup>(108)</sup>.

### 2.3.4.9.2. Levenberg- Marquardt Algoritması

Geri yayılım algoritması (GYA) çok kullanılmasına rağmen sonuca çok yavaş olarak yaklaşması bir dezavantajdır. Ayrıca lokal minimuma yakalanma riski de vardır. Geri yayılım, bir adım düşme algoritmasıyken, Levenberg -Marquardt (LM) algoritması aşağıda da gösterilmiş olan Newton metoduna bir yaklaşımdır. LM algoritması, Newton metodunun hızıyla, adım düşme metodunun sağlamlığının bileşkesidir.

LM öğrenme algoritması minimumu araştırma metotlarının ikincisidir. Her bir iterasyon adımında hata yüzeyine parabolik yaklaşımla yaklaşılar ve parabolün minimumu o adım için çözümü oluşturur.  $E(x)$  fonksiyonuna sahip olduğumuzu ve  $\underline{x}$  parametresine göre minimize etmek istediğimizi düşünelim. Newton metodunda formül 2.50 verildiği gibi olacaktır.

$$\Delta \underline{x} = -[\nabla^2 E(\underline{x})]^{-1} \nabla E(\underline{x}) \quad (2.50)$$

burada  $\nabla^2 E(\underline{x})$  ifadesi Hessian matrisidir ve  $\nabla E(\underline{x})$  ise eğimdir.  $E(\underline{x})$ 'in karelerin toplamı fonksiyonu olduğunu farz edelim.

$$E(\underline{x}) = \sum_{i=1}^N e_i^2(\underline{x}) \quad (2.51)$$

bundan sonra şöyle gösterilebilir.

$$\nabla E(\underline{x}) = J^T(\underline{x}) \underline{e}(\underline{x}) \quad (2.52)$$

$$\nabla^2 E(x) = J^T(x)J(x) + S(x) \quad (2.53)$$

burada  $J(x)$  Jacobian matristir.

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial e_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_2(x)}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_N(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial e_N(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial e_N(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

ve

$$S(x) = \sum_{i=1}^N e_i(x) \nabla^2 e_i(x) \quad (2.55)$$

Gauss-Newton metodu için  $S(x) \approx 0$  kabul edilir ve (2.50) güncellenerek şu hale gelir.

$$\Delta x = [J^T(x)J(x)]^{-1} J^T(x)e(x) \quad (2.56)$$

Levenberg-Marquardt modifikasyonu ile Gauss-Newton metodu şöyle olur.

$$\Delta x = [J^T(x)J(x) + \mu I]^{-1} J^T(x)e(x) \quad (2.57)$$

$\mu$  parametresi, bir adımda  $E(x)$  artımı sonucunda bir faktörle ( $\beta$ ) ile çarpılır, bir adım  $E(x)$  azaltışında,  $\mu$  parametresi  $\beta$ ya bölünür.  $\mu$  büyükse algoritma

adım düşümü ( $1/\mu$  adımı ile) olur, küçük  $\mu$  parametresi için algoritma Gauss-Newton olur.

Bu algoritmadaki anahtar adım Jacobian matrisinin hesaplanmasıdır. Yapay sinir ağı tasarım probleminde Jacobian matrisindeki terimler geri yayılım algoritmasının basitçe değiştirilmesiyle hesaplanabilir. (2.51)'deki eşitlikte  $\underline{x} = [w^1(1,1)w^1(1,2)...w^1(S1,R)b^1(S1)w^2(1,1)..b^M(SM)]^T$  ve  $N=Q \times SM$  dir. Bu eşitlikten faydalanarak standart geri yayılım algoritması terimleri şöyle hesaplanır;

$$\frac{\partial E}{\partial w^k(i, j)} = \frac{\partial \sum_{m=1}^{SM} e_q^2(m)}{\partial w^k(i, j)} \quad (2.58)$$

Levenberg-Marquardt algoritması için Jacobian matrisin elemanları şöyle hesaplanabilir.

$$\frac{\partial e_q(m)}{\partial w^k(i, j)} \quad (2.59)$$

bu terimler standart geri yayılım algoritması kullanılarak son katmanda bir değişiklik hesaplanabilir.

$$\Delta^M = -\dot{F}^M (n^M) \quad (2.60)$$

(2.42)'daki matrisin her bir kolonu bir vektördür, Jacobianın bir satırını üretmek için ağ geri yayınılmalıdır.

Sonuç olarak Levenberg-Marquardt algoritması çok hızlı olarak çözüme ulaşmasına rağmen çok fazla bellek gerektirmektedir. Geri yayılım algoritması ise sonuca yavaş ulaşmakta ve daha az bellek gerektirmektedir<sup>(108)</sup>.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

#### 3.1. Giriş

Bu tez çalışmasında; klasik kontrol yöntemleri ile modern kontrol yöntemleri karşılaştırılacak ve birbirlerine göre üstünlükleri incelenecektir. Bölüm 2'de, 765 MW'lık termik santralin modeli oluşturulmuştur. Modeli oluşturulan termik santral sistemine kontrolörlerin montajı yapılarak sonuçlar elde edilecektir. PI ve PID klasik kontrolörlerin tasarımı yapılacak ve parametreleri, termik santralin giriş ve çıkış dataları incelenerek Ziegler – Nichols ve Chien-Hornes-Reswick yöntemlerine göre belirlenecektir. Yapay sinir ağları ile yapılan kontrolör tasarımı yapılarak eğitimi gerçekleştirilecektir. Matlab programı ile simülasyon sonuçları bu bölümde elde edilecektir.

#### 3.2. PI ve PID Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi

Daha önceden belirtildiği gibi PID kontrol parametrelerinin belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada " Chien-Hornes-Reswick ", kullanılmıştır<sup>(16,101)</sup>. Buna göre sistemin basamak giriş karşısında gösterdiği cevap eğrisinden ortaya çıkan zaman gecikmesi veya ölü zaman gecikmesi  $T_D$  ve tüm sistemin zaman sabiti  $T_S$  belirlenmelidir. Her bir model için gerekli olan  $K_P$ ,  $K_I$  ve  $K_D$  parametreleri; ikinci bölümde, Çizelge 2.1 ve 2.2 de gösterilen eşitliklerde gösterildiği gibi hesaplanmalı ve optimize edilmelidir. Buna göre, her bir model için hesaplanan optimum parametreler

aşağıda gösterilmiştir;

Model 1 :

Güç çıkışı	$K_P = 7.00$	$K_I = 0.200$	$K_D = 51.06$
Entalpi çıkışı	$K_P = 5.00$	$K_I = 0.150$	$K_D = 61.60$

Model 2 :

Güç çıkışı	$K_P = 13.96$	$K_I = 0.168$	$K_D = 51.06$
Entalpi çıkışı	$K_P = 15.506$	$K_I = 0.228$	$K_D = 61.60$

Model 3 :

Güç çıkışı	$K_P = 13.96$	$K_I = 0.168$	$K_D = 51.06$
Entalpi çıkışı	$K_P = 5.506$	$K_I = 0.368$	$K_D = 61.60$

### 3.3. YSA İle Doğrudan Kontrol Yöntemi

Bu kontrolör modeli, YSA kontrolörlerin temelini oluşturmaktadır. Kontrolör modeli Şekil 3.1 de görülmektedir. Kontrolörün merkezinde, sınır ağları ile yapışmış çıkış geri beslemeli bir kontrolör mevcuttur. Kontrolörün fonksiyonu (f) ise;

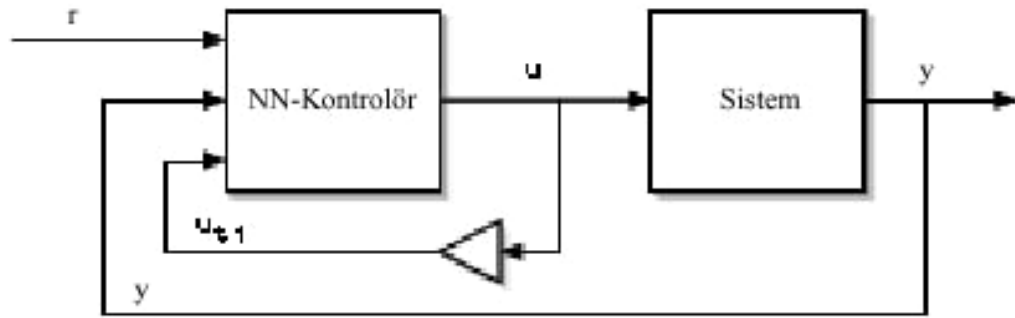
$$u_t = f(r_t, r_{t-1}, \dots, y_t, y_{t-1}, \dots, u_{t-1}, u_{t-2}, \dots) \quad (3.1)$$

Burada r referans girişi, y sistem çıkışı, u ise kontrolör çıkışıdır. Kontrolör girişlerine referans giriş ve onun geçmişteki değerleri, çıkış ve onun geçmişteki değerleri ve kontrolör çıkışının geçmişteki değerleri

uygulanmaktadır<sup>(111)</sup>.

### 3.3.1 Kontrolör Dizaynı

Yapay sinir ağları ile yapılan doğrudan kontrolör fonksiyonunun (Denklem 3.1) modeli Şekil 3.1'de verilmiştir. Kaydedici fonksiyon hafızada tutulacak bilgileri, belirli boyuttaki hafızaya atmaktadır:



**Şekil 3. 1.** Yapay Sinir Ağı Oluşturulmuş Doğrudan Kontrol Yöntemi

Hafıza sabiti  $\varphi_t$  sinir ağının girişi olarak çalışmaktadır, sinir ağının çıkışı ise kontrol sinyali olarak çalışmaktadır. Hafıza sabiti, sistemin bütün bilinen bilgilerden işe yarayan bilgiler çıkarmak zorundadır. Sistemin geçmişteki değerlerini hafızada saklayarak, gerektiğinde kullanmak üzere girişlere vermektedir. Hafıza sabiti fonksiyonu;

$$\begin{aligned}\varphi_t &= \varphi (u_{t-1}, u_{t-2}, \dots, y_t, y_{t-1}, r_t, \dots) \\ &= [u_{t-1}, y_t, r_t]^T\end{aligned}\quad (3.2)$$

Daha kompleks bir yaklaşım; daha düşük parça ile sinirsel şebeke girişlerinin bir setine, bilinen daha geniş bir seti yeniden eşleştirmek için

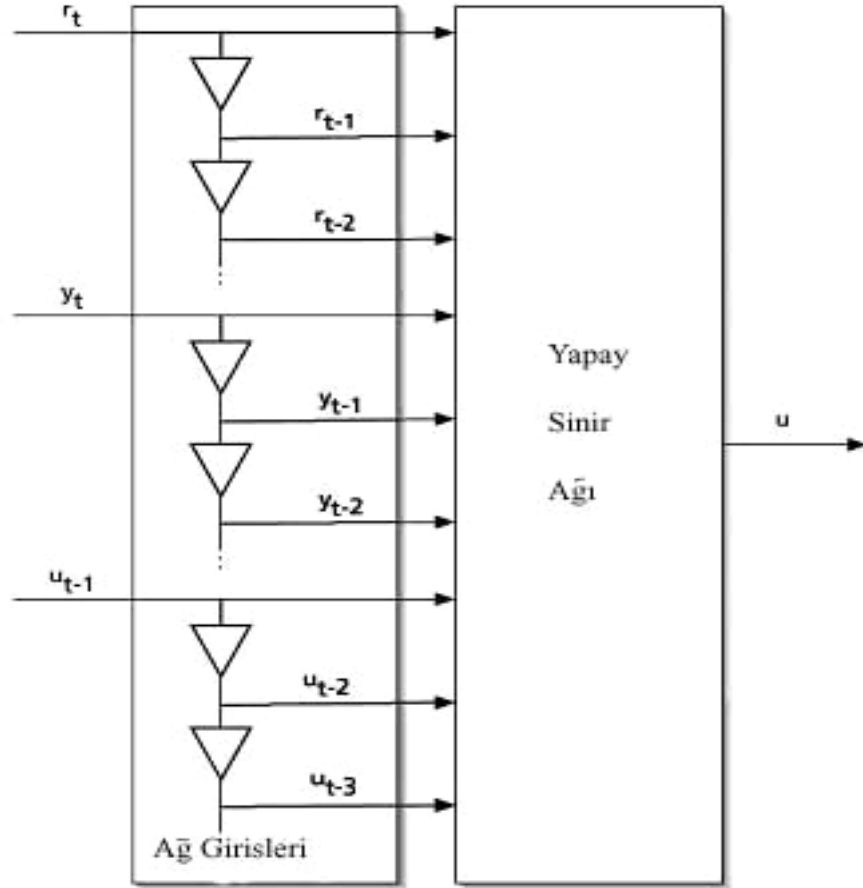


başlıca bileşenleri ayrıştırma gibi bazı doğrusal eşleştirmeleri kullanmaktır<sup>(112)</sup>.

### **3.3.2. Model Derecesi Seçimi**

Sinir ağ çıkışlarının sayısı, kontrolör için, kontrol edilecek değişkenlerin sayısı ile sabitlenmiştir. Gizli katmandaki nörön sayısı ve giriş üniteleri ayarlanabilen parametrelerdir.

Kullanacağımız yapay sinir ağ kontrolörü şekil 3.2 de gösterilmiştir. Girişler ve girişlerin ve geri beslemelerin geçmiş zaman değerleri yapay sinir ağına verilmiştir. Geçmiş zaman değerlerini hafıza sabiti  $\varphi_t$  den yukarda belirtildiği şekilde kullanıyoruz.

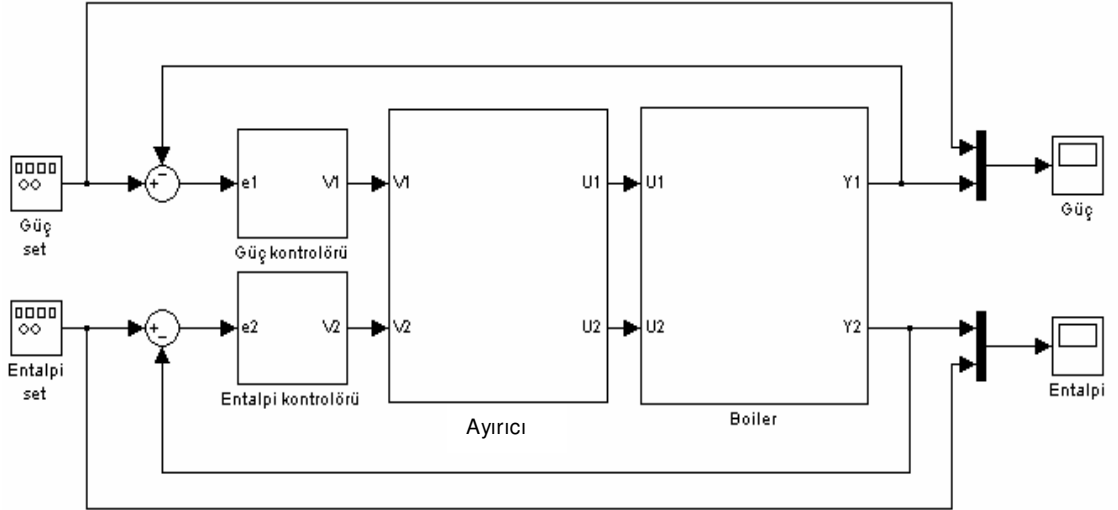


**Şekil 3. 2.** Yapay Sinir Ağı'nın Girişleri (Şimdiki ve Geçmiş Zaman Sinyalleri Bağlantıları)

Giriş ünitelerinin sayısı üç farklı parametreye bölündüğü için; referans sinyallerden, sistem çıkışlarından ve kontrol sinyallerinden ayrı ayrı girişlerin sayısını ayarlayabiliriz.. Sinyal girişlerinin sayısını tespit etmek için uzman görüşü gereklidir. Sistemin girişi  $u$  ve çıkışı  $y$  dir. İki parametre sistem üzerinden ilişkilidir ve geçmiş zaman değerleri  $u$  girişine göre  $y$  çıkışının yönünü tayin etmekte, belirlemekte kullanılmaktadır. Referans girişi çıkışın takip edebilmesi için yapay sinir ağı'nın sistemi çok iyi tanması gerekmektedir. Sistemin kontrollünün tam olarak sağlanabilmesi için giriş sinyallerinin geçmiş zaman değerlerinin sayısı çok önemlidir.

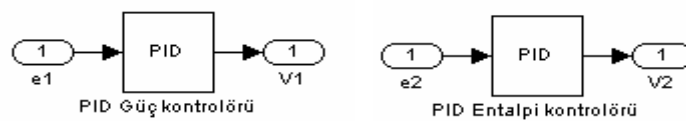
### 3.4. Tasarımı Yapılan Kontrolörlerin Güç Santralının Modeline Uygulanması

Bir önceki bölümde PI, PID ve Yapay sinir ağları ile yapılmış kontrolör tasarımları gösterilmişti. Tasarımı yapılan kontrolörlerin sisteme uygulanabilmesi için Şekil 3.3'de görülen blok diyagram kullanılmıştır. Simülasyon aşamasında buradaki kontrolörlerin yerine sırasıyla PID kontrolörler, YSA kontrolör kullanılmıştır. Tüm simülasyonlar, MATLAB R2007a-Simulink yazılımı ile yapılmıştır.



Şekil 3. 3. Modeli Alınan Sistemin Kontrol Blok Diyagramı

Şekil 3.3'de görülen kontrolörlerin yerine kullanılan PID kontrolörlerin blok diyagramları Şekil 3.4'de görülmektedir;



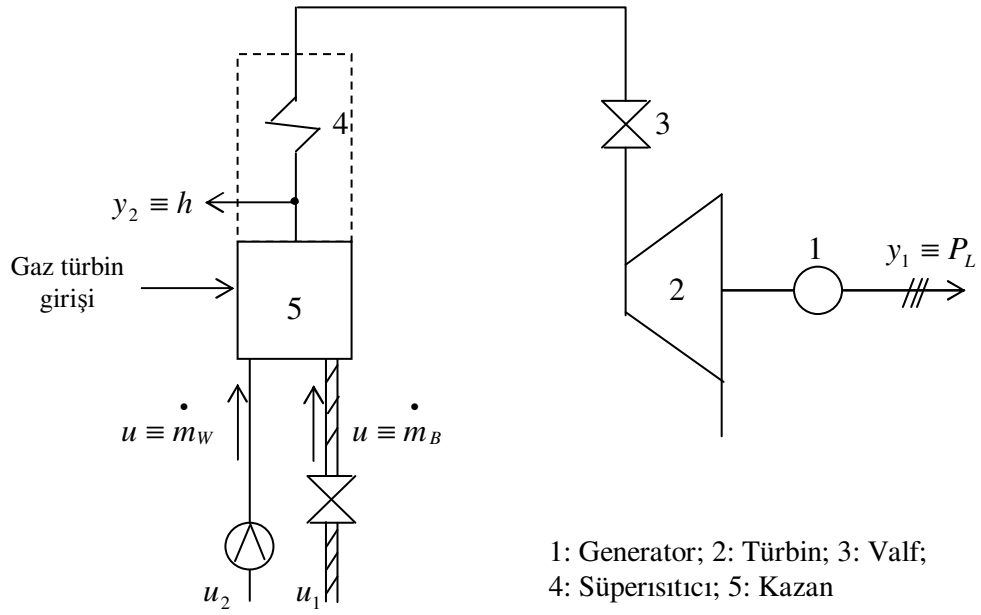
(a)

(b)

**Şekil 3. 4.** Sisteme Uygulanan PID Kontrolörler, **(a)** Güç Çıkışı **(b)** Entalpi Çıkışı

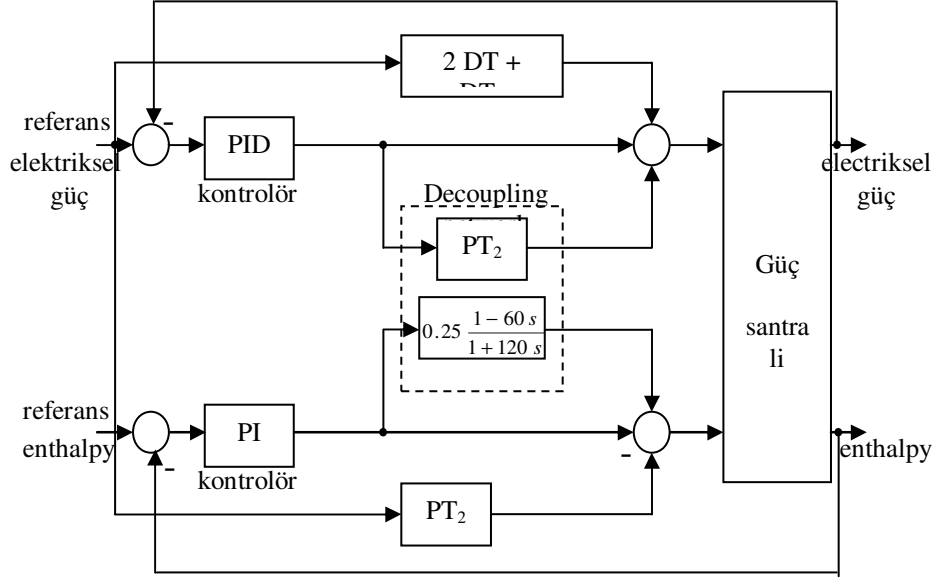
Bu çalışmada referans alınan elektriksel güç santrali<sup>(82)</sup>, 195 bar ve 535 0C canlı buhara sahip bir kömür yakıtlı zorlamalı kazandan beslenen, 652.5 MW elektriksel güç sağlayan bir generator/buhar türbin ünitesi ve diğer 112.5 MW elektriksel güç sağlayan jeneratör/gaz türbini ünitelerinden oluşan bir 765 MW'lık kombine bloktur. Kömür tozu 4 katta sıralanmış 32 brülör tarafından beslenmektedir. Yanma için gerekli hava vantilatörlerden sağlanmakta, türbin çıkışındaki gazlar buhar kazanının verimini artırmak için ısı ve oksijen taşıyıcı olarak kullanılmaktadır.

Güç santralinin şematik diyagramı ve matematiksel modeli Şekil 3.5' de görülmektedir. Giriş olarak kömür ve besleme suyu olarak alınmıştır. Çıkış ise elektriksel güç ve entalpidir.



**Şekil 3. 5.** Şematik Diyagram (a) Güç Santrali (b) Matematiksel Modeli

Güç santralinin klasik kontrolörler ile kontrol diyagramı Şekil 3.6' da verilmiştir. Bu kontrol sisteminde elektriksel güç PID kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Bu kontrolör kömür beslemesi üzerinde etkilidir. Aynı zamanda besleme suyu üzerinde, PT2 geciktirme elemanı üzerinden etkili olmaktadır. Bu bir decoupler elemanıdır. Elektriksel gücün ayar noktası ileri beslemeli  $2 DT + DT^2$  elemanı üzerinden yakıt beslemesi üzerinde etkilidir. Bu elemanlar kontrol sistemini optimize etmek için kullanılmaktadır. Entalpi ise PI kontrolör tarafından kontrol edilmektedir.



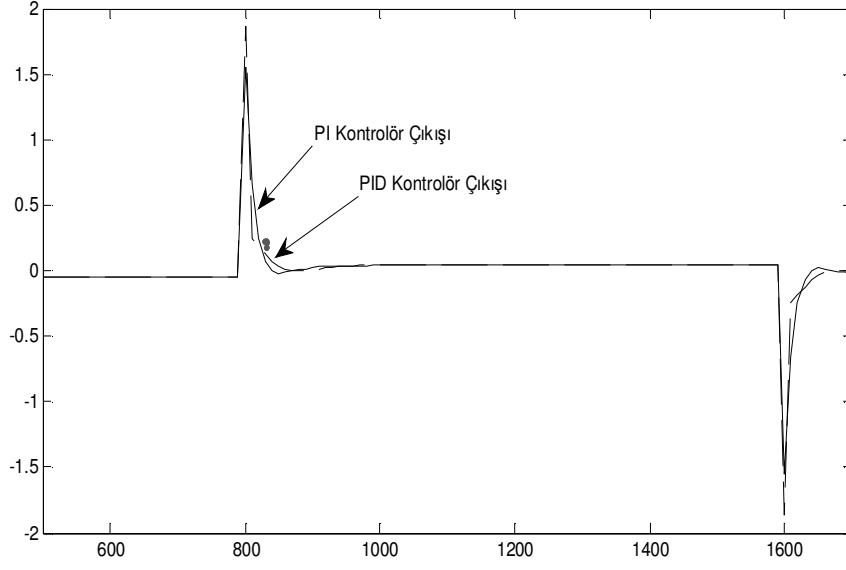
**Şekil 3. 6.** Güç Santralinin Decoupler Ayırıcılı Klasik Kontrol Sistemi Şeması

### 3.5 Simülasyon Sonuçları

#### 3.5.1 PI ve PID kontrolör

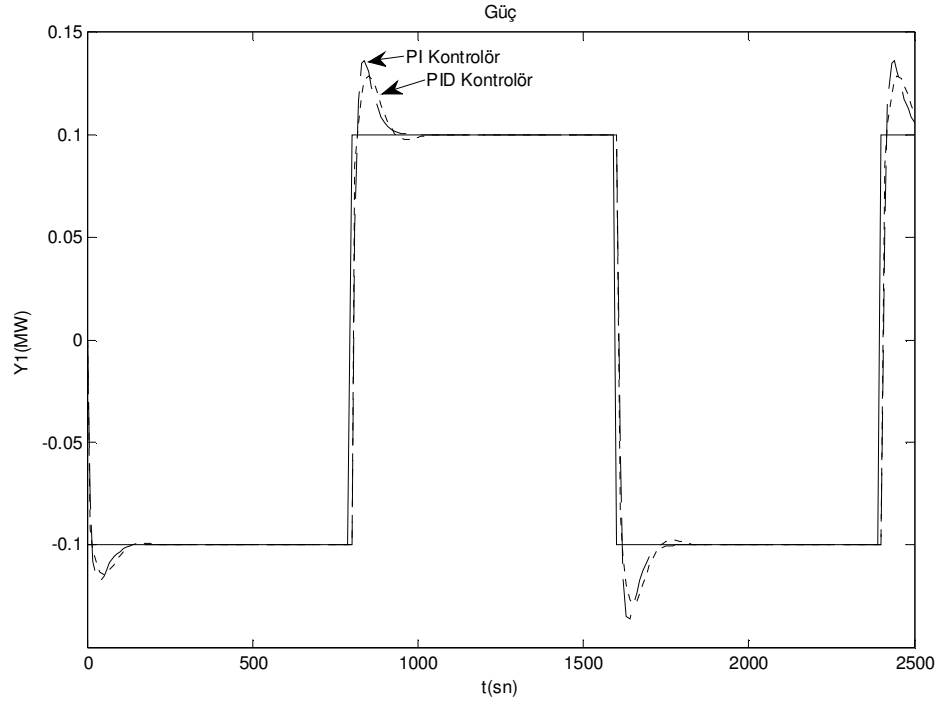
Sisteme uygulanan adım girişine göre, sistemin vermiş olduğu tepki neticesinde elde edilen PI ve PID kontrol parametrelerinin uygulanması ile elde edilen simülasyon sonuçları bu bölümde gösterilmiştir.

Şekil 3.7’de PI ve PID kontrolörlerin çıkış sinyal şekilleri görülmektedir. Referans giriş olarak uygulanan sinyal ile çıkış sinyali arasındaki hatanın düzeltilmesi için kontrolörlerin vermiş olduğu bu tepkiler sonucunda hatanın giderilmesi hedeflenmiştir.

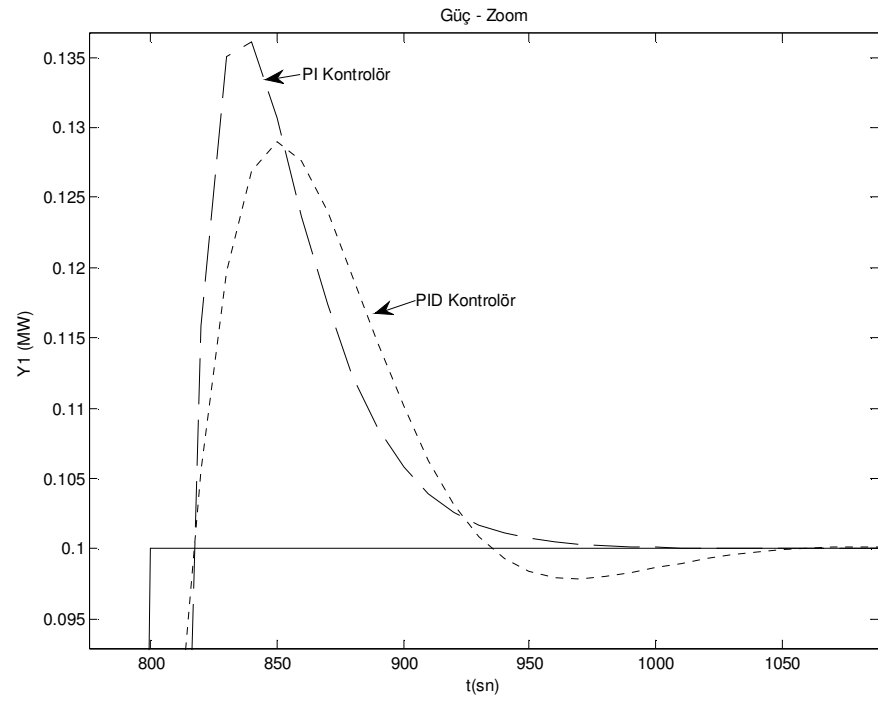


**Şekil 3. 7.** PI ve PID Kontrolörlerin Kontrol Çıkış Sinyali

Tasarımı yapılan ve sisteme en uygun parametreleri belirlenen PI ve PID kontrolörler ile yapılan kontrol işlemi ile elde edilen güç ve entalpi çıkışlarına ait sonuçlar aşağıda gösterilmiştir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9, Model 1'e ait güç ve entalpi çıkışlarıdır. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11, Model 2'ye ait güç ve entalpi çıkışlarıdır. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13, Model 3'e ait güç ve entalpi çıkışlarıdır.



(a)

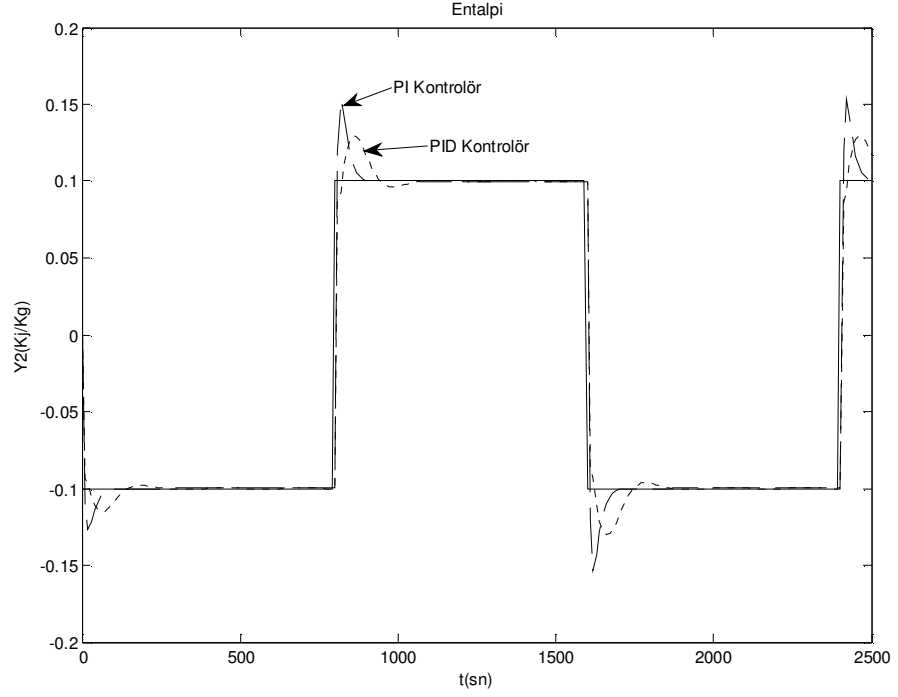


(b)

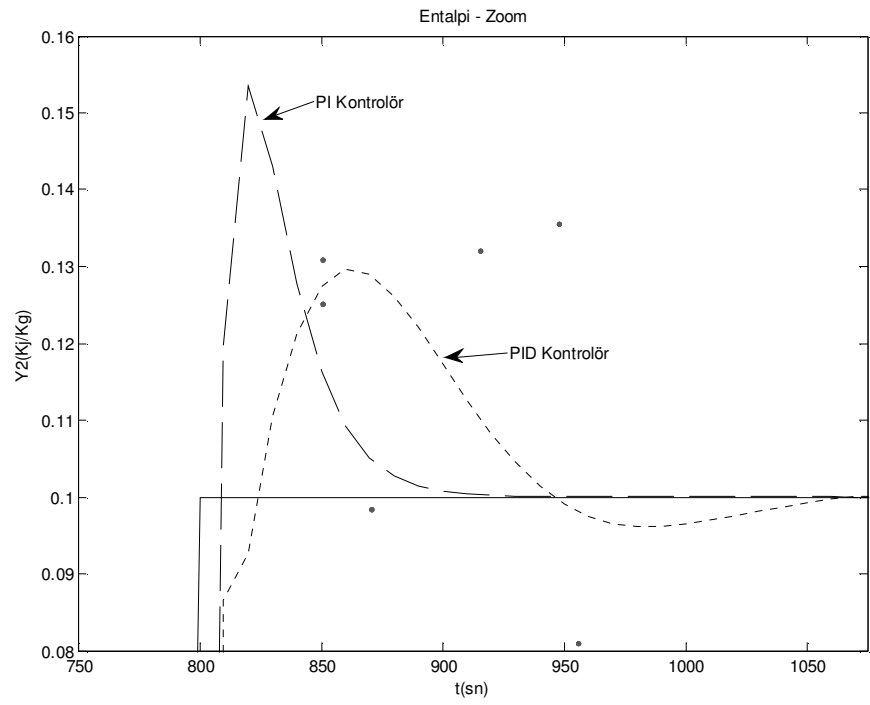
**Şekil 3. 8.** Birinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları

**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali



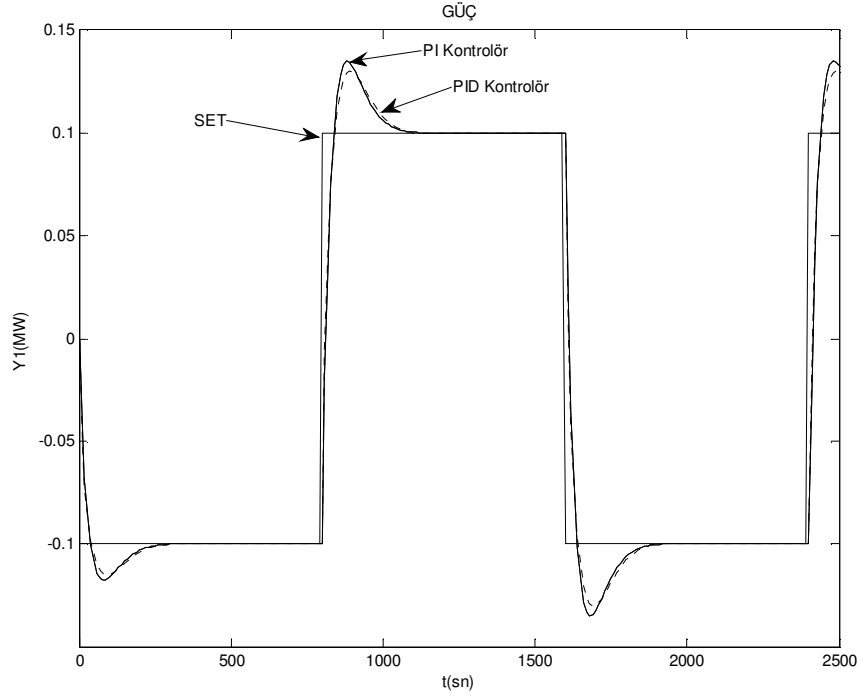


(a)

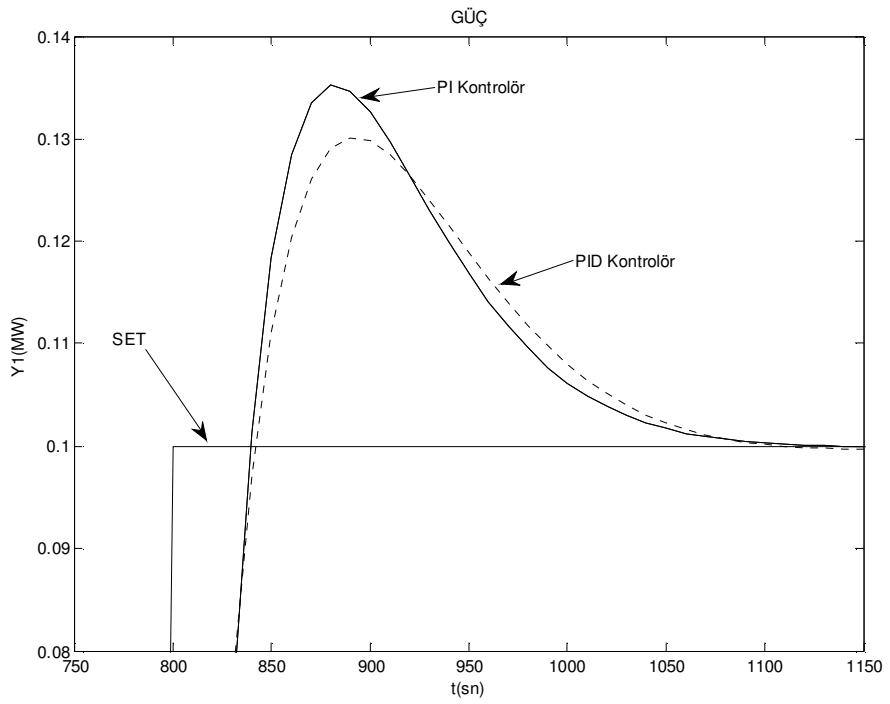


(b)

**Şekil 3. 9.** Birinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali



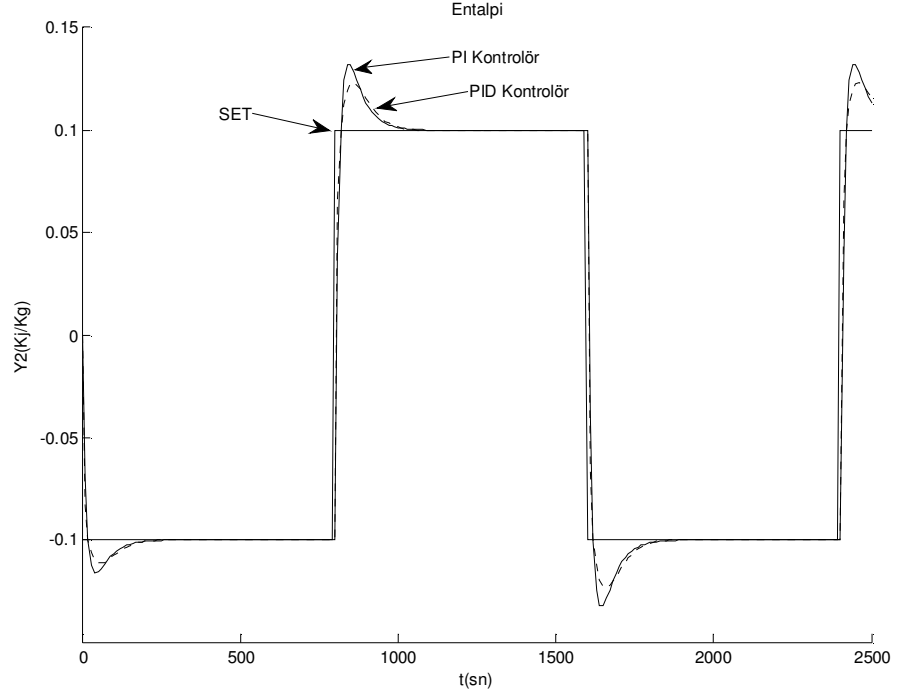
(a)



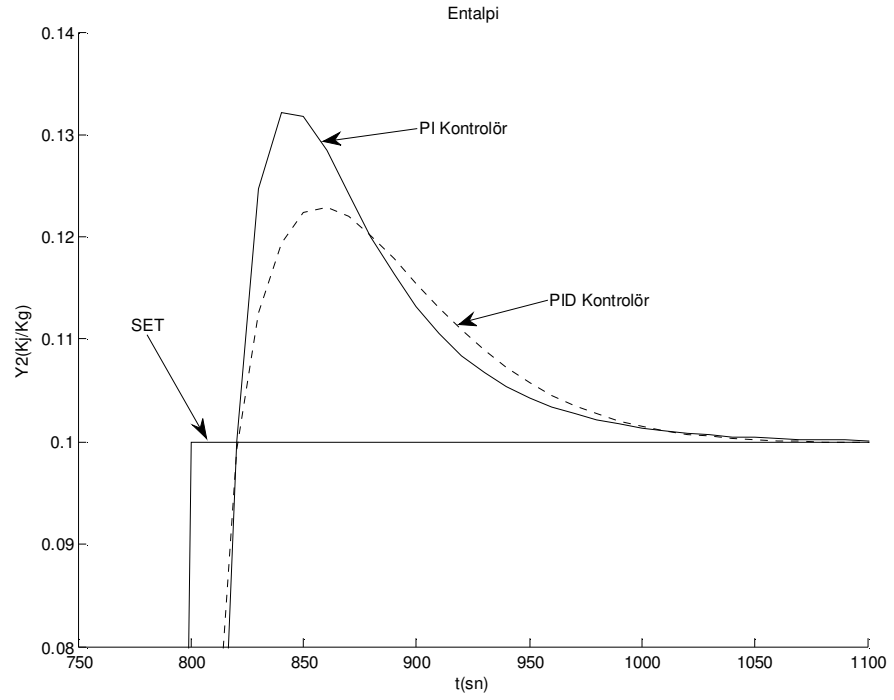
(b)

**Şekil 3. 10.** İkinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları

**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

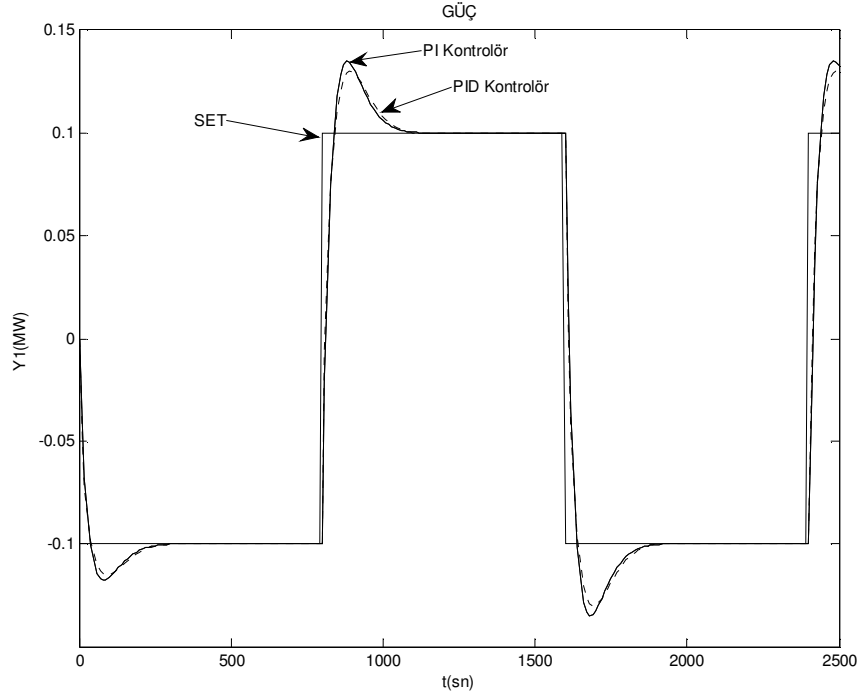


(a)

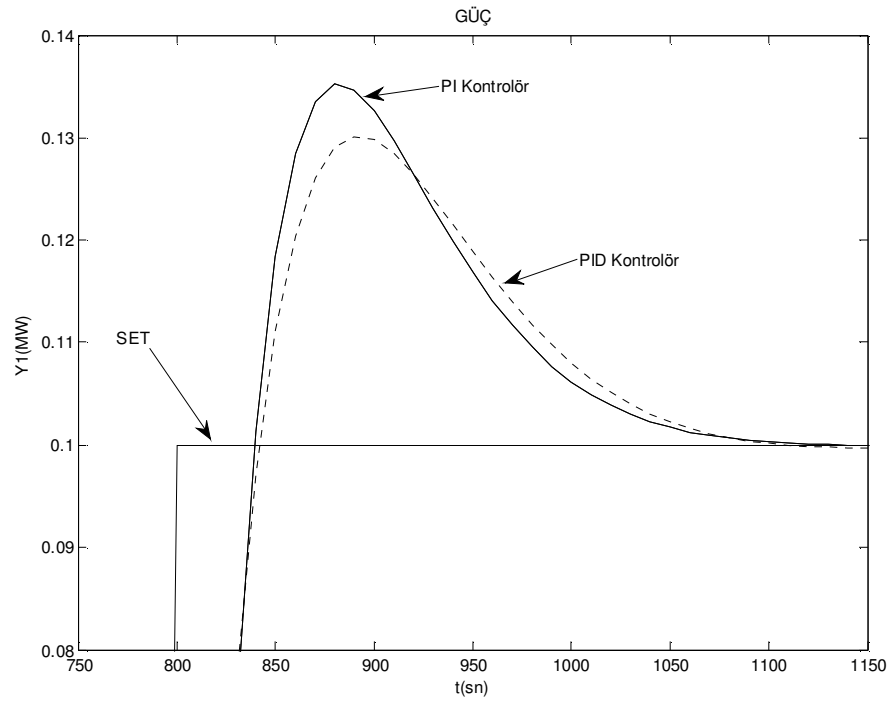


(b)

**Şekil 3. 11.** İkinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

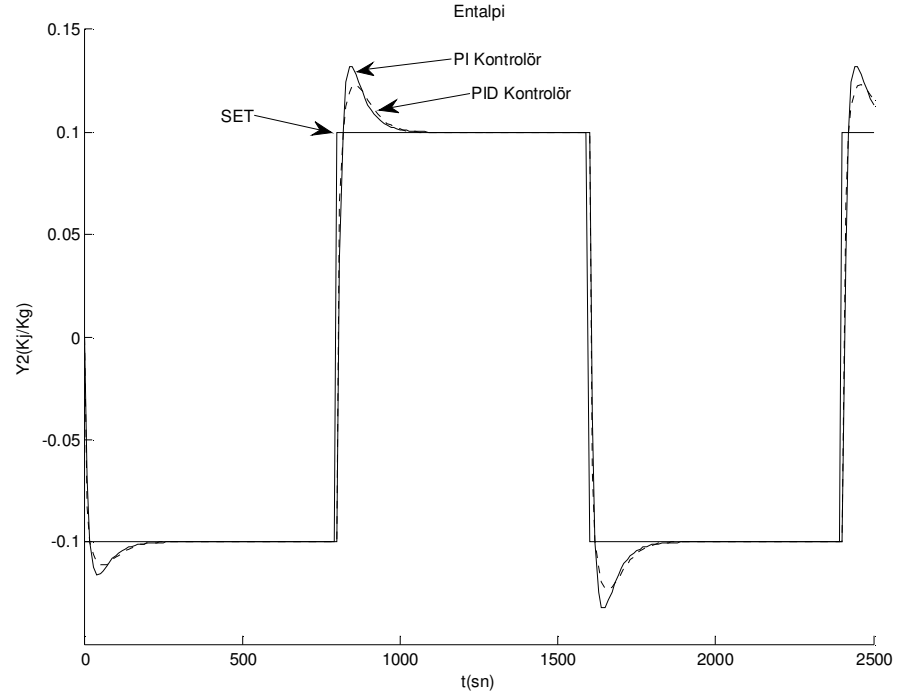


(a)

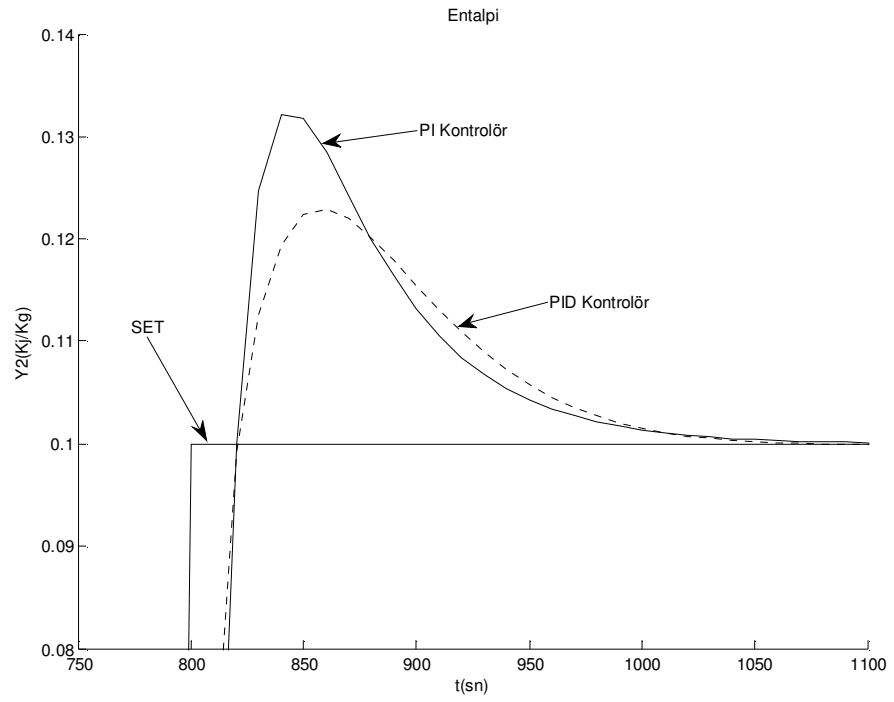


(b)

**Şekil 3. 12.** Üçüncü Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali



(a)

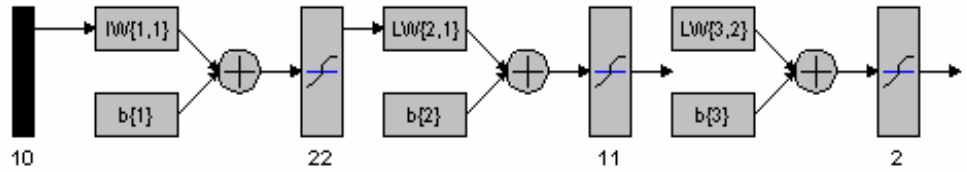


(b)

**Şekil 3. 13.** Üçüncü Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
(a) Normal Görünüm (b) Yakınlaştırılmış Hali

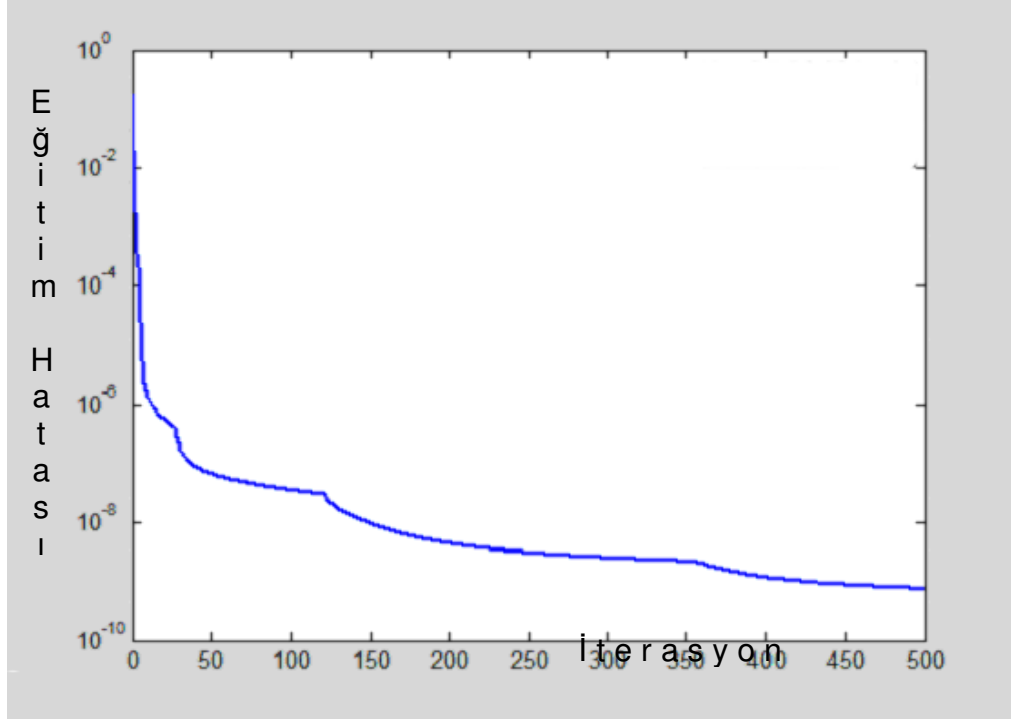
### 3.5.2 YSA kontrolör

PID kontrolörlerin yerine kullanılan yapay sinir ağları ile yapılmış kontrolör Şekil 3.14 de gösterilmektedir. Kontrolör tipi ileri beslemeli ağ yapısındadır. Giriş katmanında 10 adet nöron bulunmaktadır. Bu nöronlar su ve kömür referans girişleri ve onların geçmişleri, güç ve entalpi çıkışları ve onların geçmişteki değerleri ve kontrolör çıkışlarının geçmişlerinden oluşmaktadır. İki adet gizli katman bulunmaktadır. İlk gizli katmandaki nöron sayısı 22 ve ikinci gizli katmandaki nöron sayısı 11 dir. Kontrolör çıkışı ise sistemi kontrol etmek için iki adet çıkış nöronu vardır.



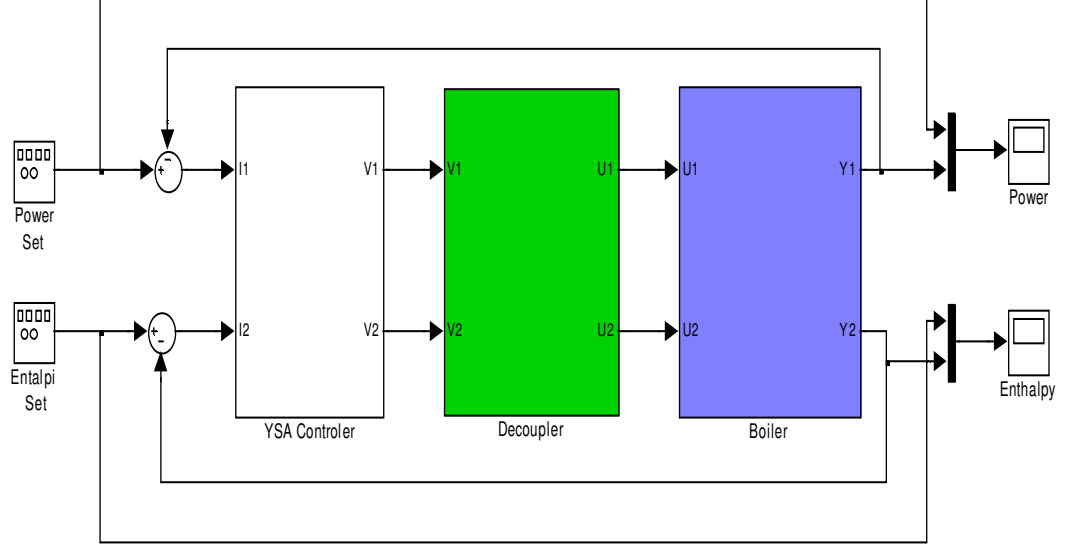
Şekil 3. 14. Yapay Sinir Ağları ile Yapılmış Kontrolör

Kontrolör eğitimi için, Levenberg-Marquardt backpropagation eğitim fonksiyonu kullanılmıştır. Eğitim işlemi off-line olarak yapılmıştır. Sisteme uygulanan sinyal girişlerine karşılık sistemin vermiş olduğu tepkiler kaydedilmiş ve bu değerler kullanılarak eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir. Performans fonksiyonu olarak ortalama karesel hata fonksiyonu kullanılmıştır. Transfer fonksiyonu olarak sigmoid transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Birinci modelin eğitim işleminde oluşan Eğitim Hatası – İterasyon grafiği Şekil 3.15’de verilmiştir.



**Şekil 3. 15.** Birinci Modelin YSA Öğrenme – İterasyon Değişim Grafiği

Doğrudan kontrol yöntemi uygulanarak elde edilen YSA kontrolör ile termik santral kontrolü yapılmıştır. Kontrolörün santrale uygulandığı sistemin blok diyagramı Şekil 3.16'da görülmektedir. Girişler olarak kömür ve su girişleri, çıkışlar olarak ise Güç ve entalpi çıkışları modelde gösterilmiştir. Kontrolör yapı olarak çok girişli ve çok çıkışlı bir yapıdadır.

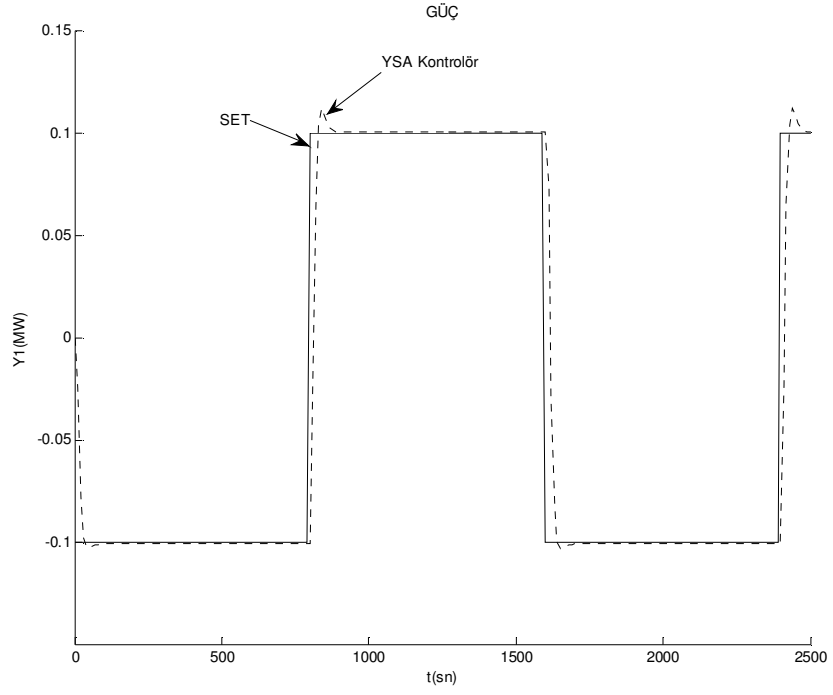


**Şekil 3. 16.**Gelişmiş Kontrol Sistemlerinden YSA ile Güç Santrali Kontrol Şeması

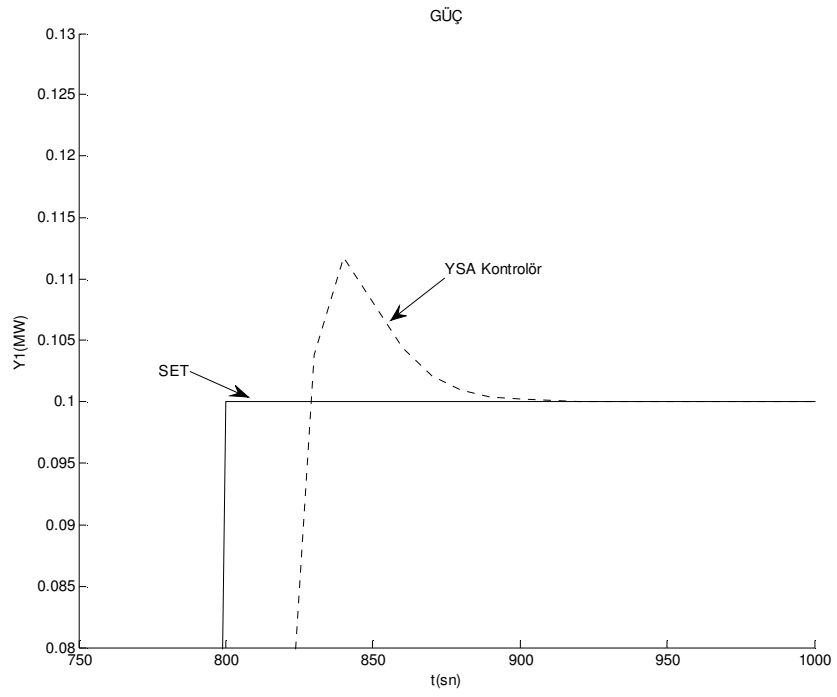
Burada tek bir kontrolör kullanılmıştır. Geliştirilen YSA kontrolör ile girişten verilen set değerleri ve hafızada tutulan set değerlerinin geçmişleri aynı zamanda çıkış ile onların hafızada tutulan geçmiş değerlerinden faydalanarak elektriksel güç ve entalpinin kontrolü sağlanmıştır.

Güç santralinin 3 değişik modeli için elde edilen veriler ile her model için ayrı ayrı eğitim yapılmış, elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20, Şekil 3.21, Şekil 3.22 de gösterilmiştir.



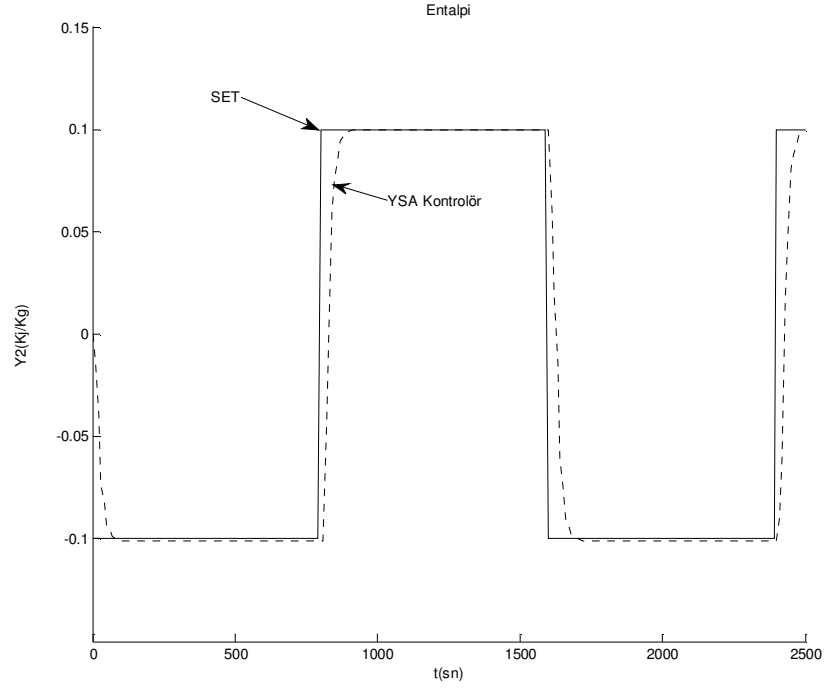


(a)

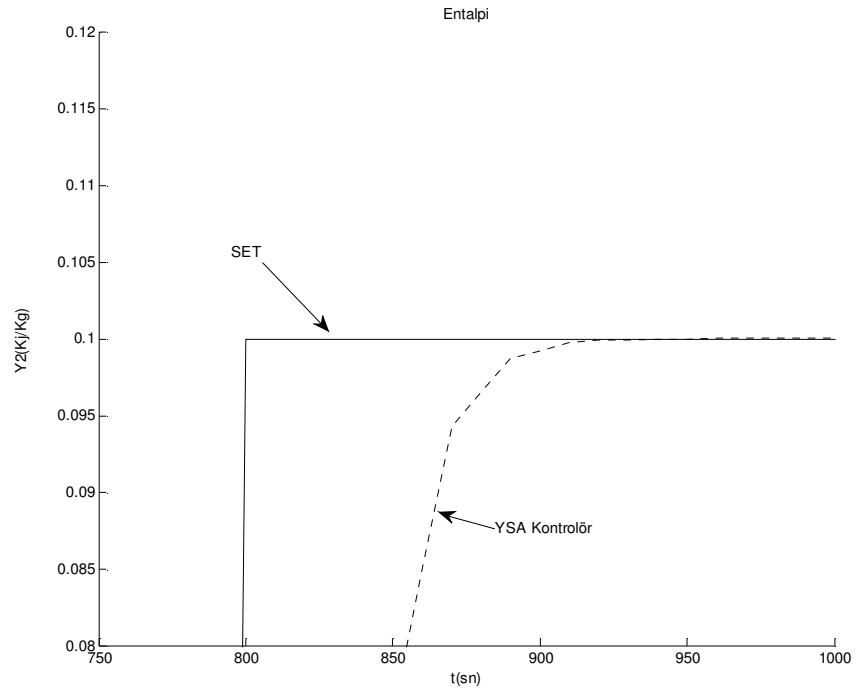


(b)

**Şekil 3. 17.** Birinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

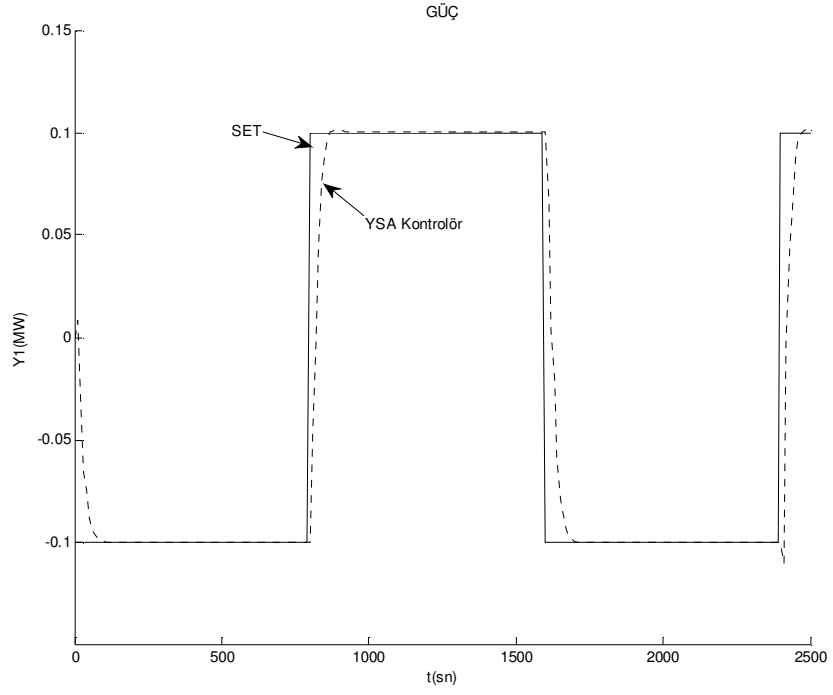


(a)

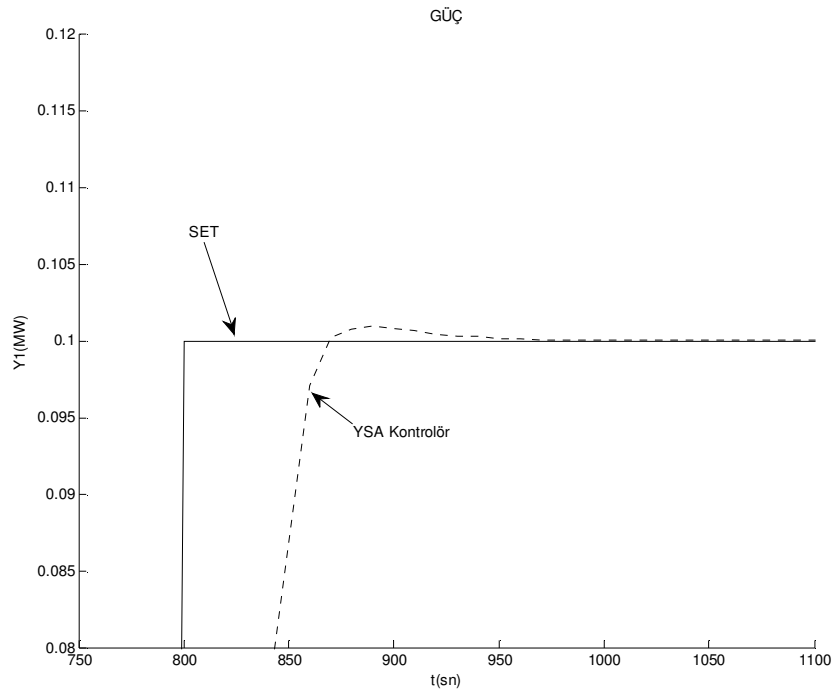


(b)

**Şekil 3. 18.** Birinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

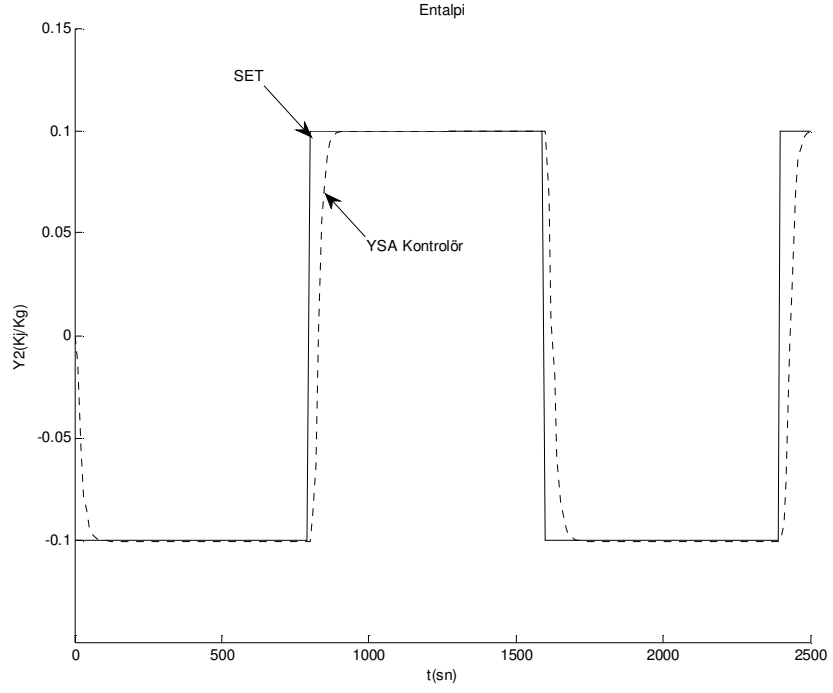


(a)

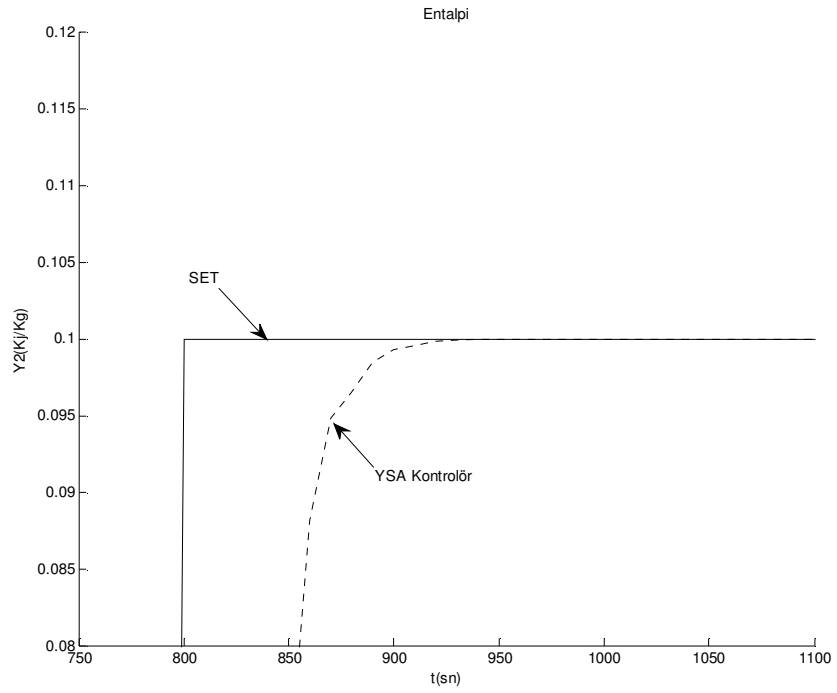


(b)

**Şekil 3. 19.** İkinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

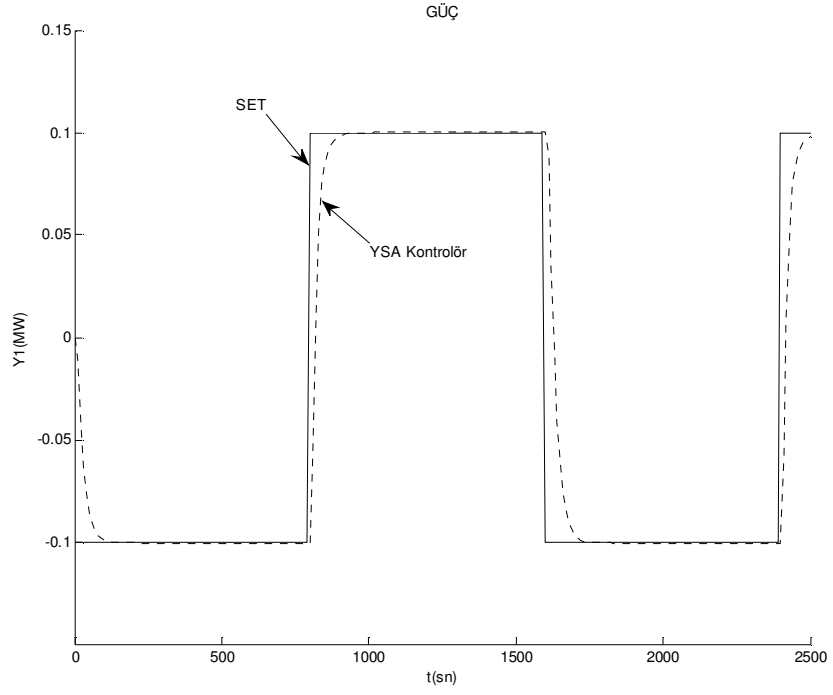


(a)

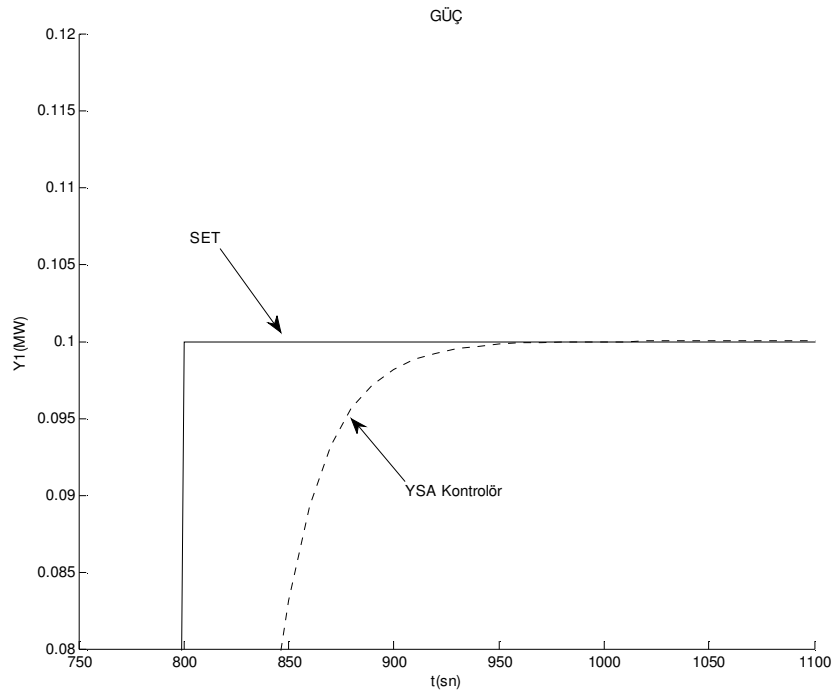


(b)

**Şekil 3. 20.** İkinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

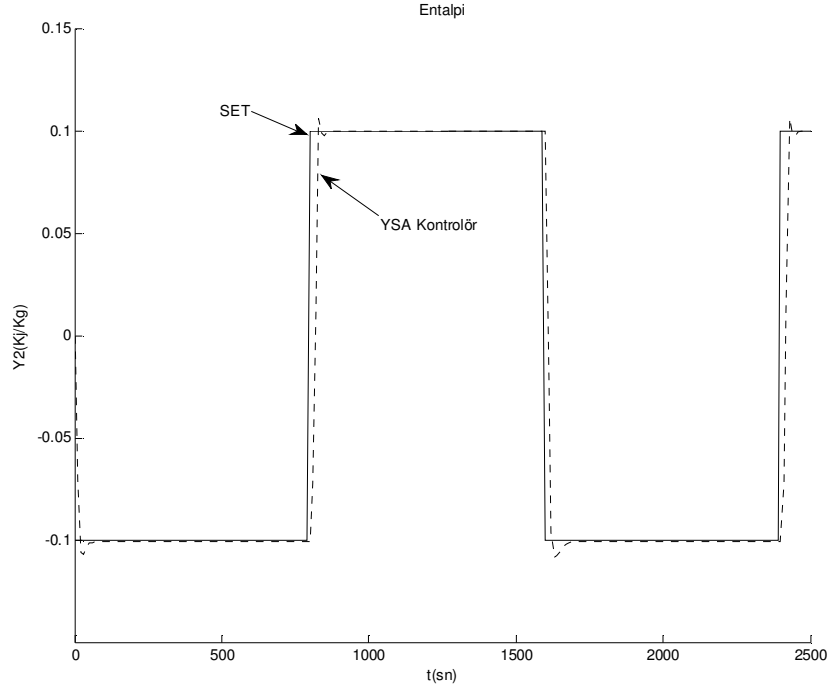


(a)

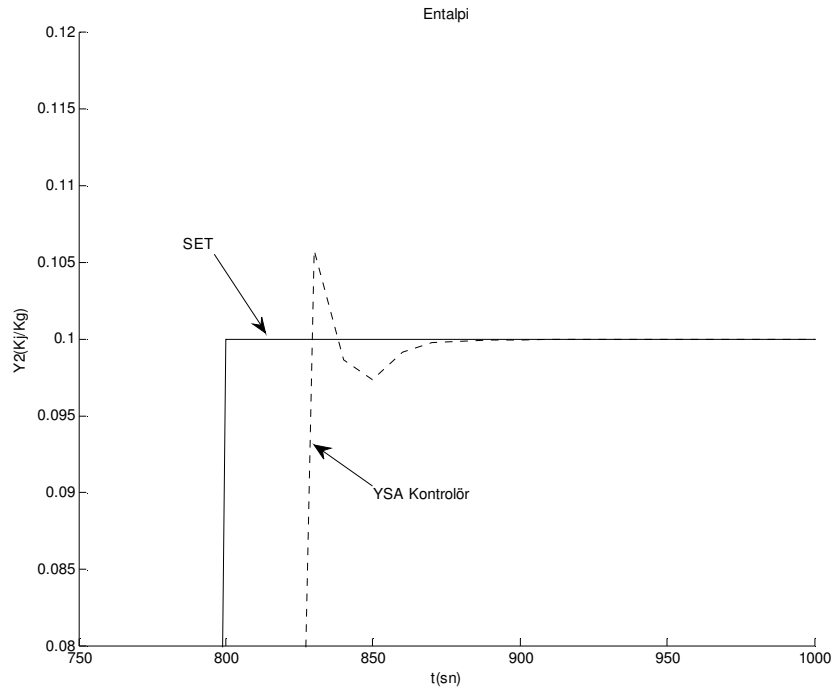


(b)

**Şekil 3. 21.** Üçüncü Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali



(a)



(b)

**Şekil 3. 22.** Üçüncü Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

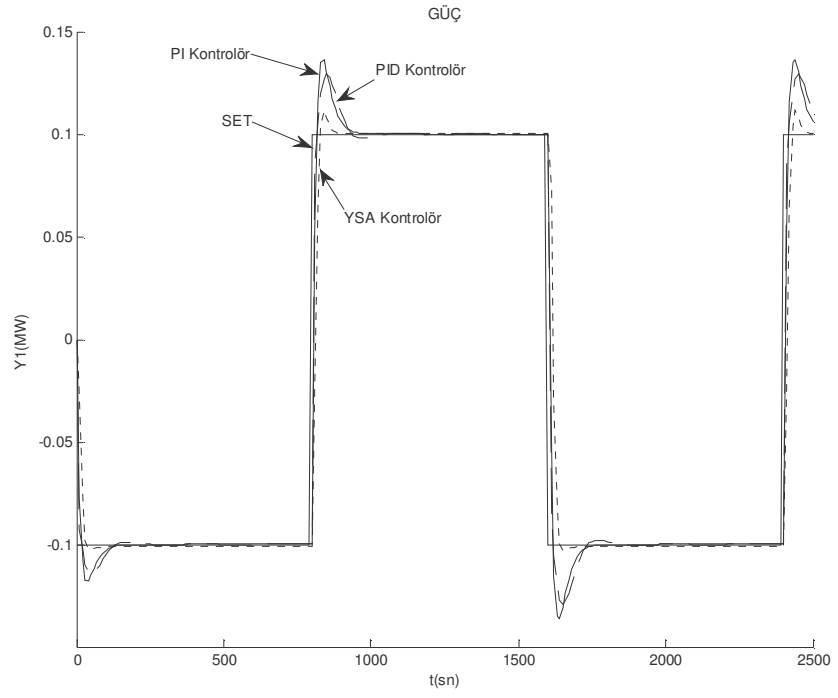
## 4. SONUÇ

### 4.1. Giriş

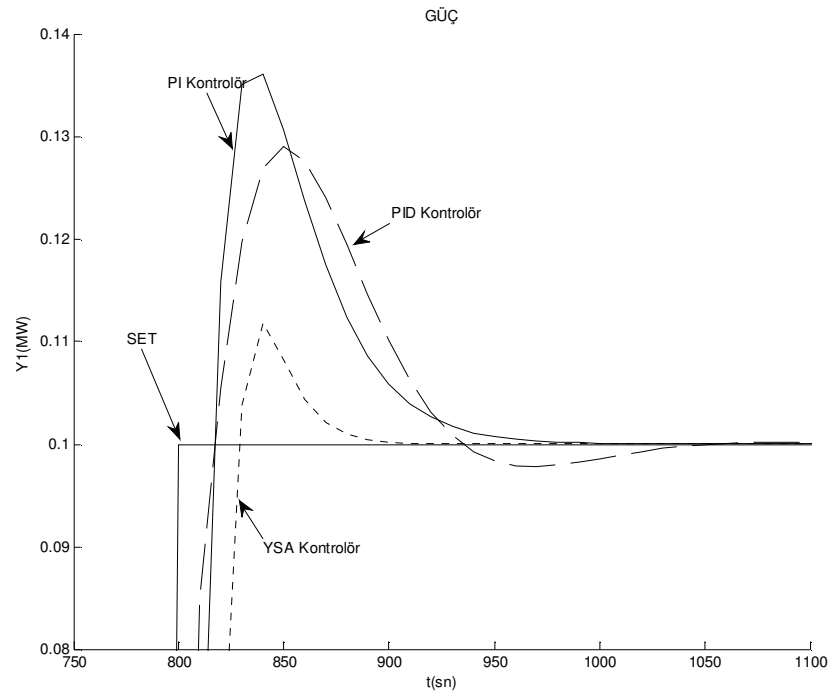
Bu bölümde PI, PID ve YSA kontrolörleri ile yapılmış kontrol işlemlerinin sonucunda elde edilen simülasyonlar karşılaştırılmıştır. Her modele ait simülasyonlar birbirleri ile karşılaştırılmış ve en uygun kontrol yönteminin belirlenmesine çalışılmıştır.

### 4.2. Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Simülasyon aşamasında, santrale ait 3 ayrı durum için 3 ayrı model kurulmuştur. Bu modeller için istenen değer olarak, genliği 0.1 MW, periyodu 1600 sn olan bir kare dalga kullanılmıştır<sup>(60)</sup>. Nesnel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla, simülasyon sonuçlarında her 3 kontrolöre ait sinyaller üst üste bindirilerek karşılaştırmalı gösterime gidilmiştir. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.1-4.6) 3 modelin ayrı ayrı güç ve entalpi çıkışlarına ait eğriler verilmiştir. Şekillerin (a) kısmında elde edilen eğri olduğu gibi verilerek sistemin kararlı hale geçişi gösterilmiştir. Şekillerin (b) kısmında ise, büyütülmüş halleri ile kontrolörlerin birbirlerine göre durumları, hangi kontrolörün uygulanması ile sistemin ne kadar aşma değerine sahip olduğu ve oturma zamanlarının kaç saniye olduğu yakından birebir gösterilmiştir. Şekillerden elde edilen değerler Çizelge haline getirilerek bir sonraki bölümde Çizelge 4.1'de verilmiştir.



(a)

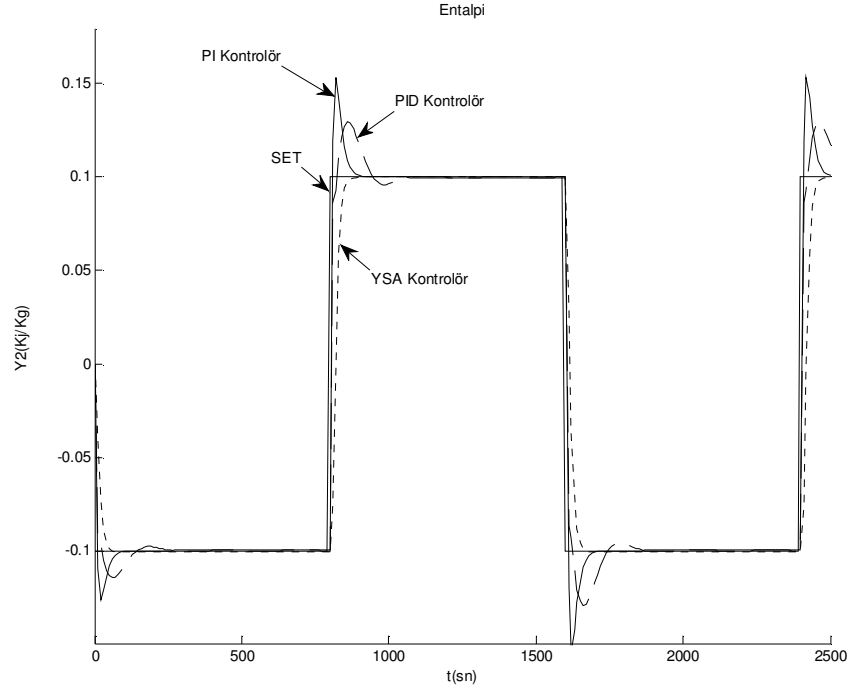


(b)

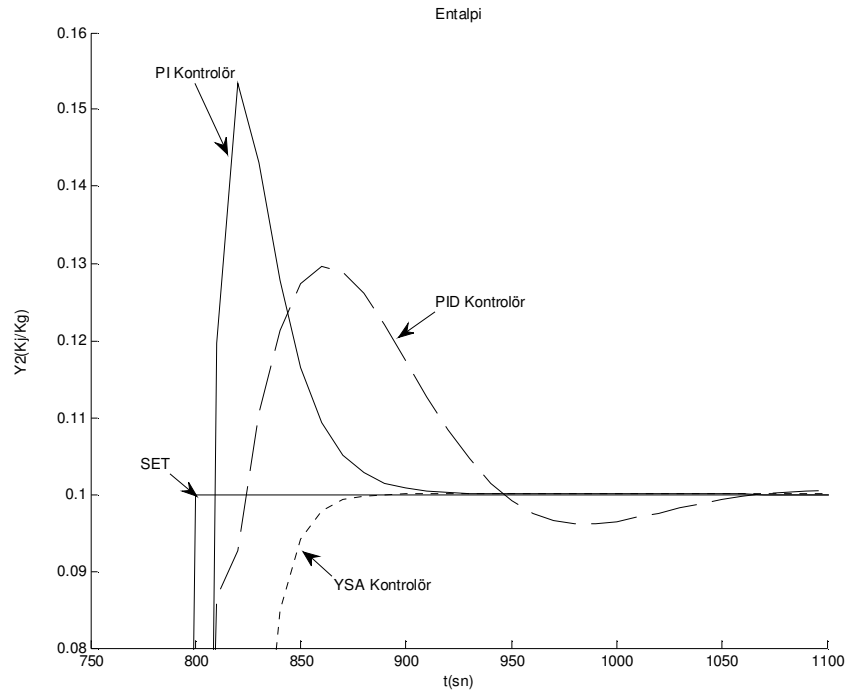
**Şekil 4. 1.** Birinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları

**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali



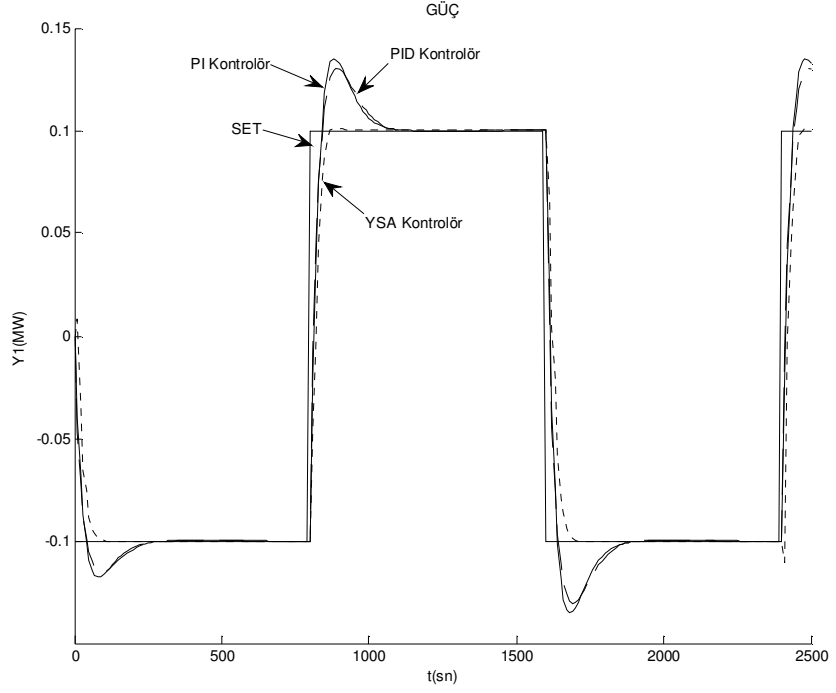


(a)

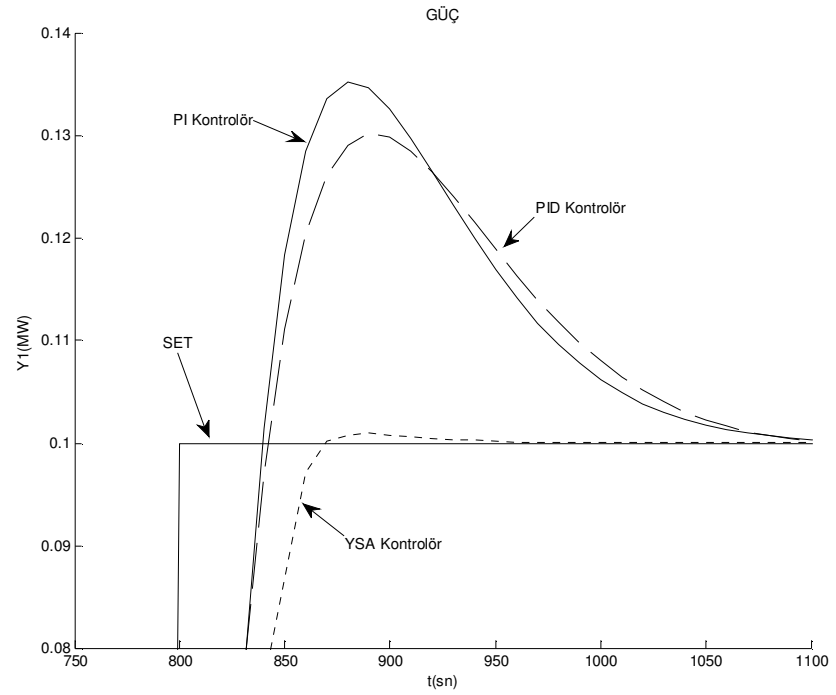


(b)

**Şekil 4. 2.** Birinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

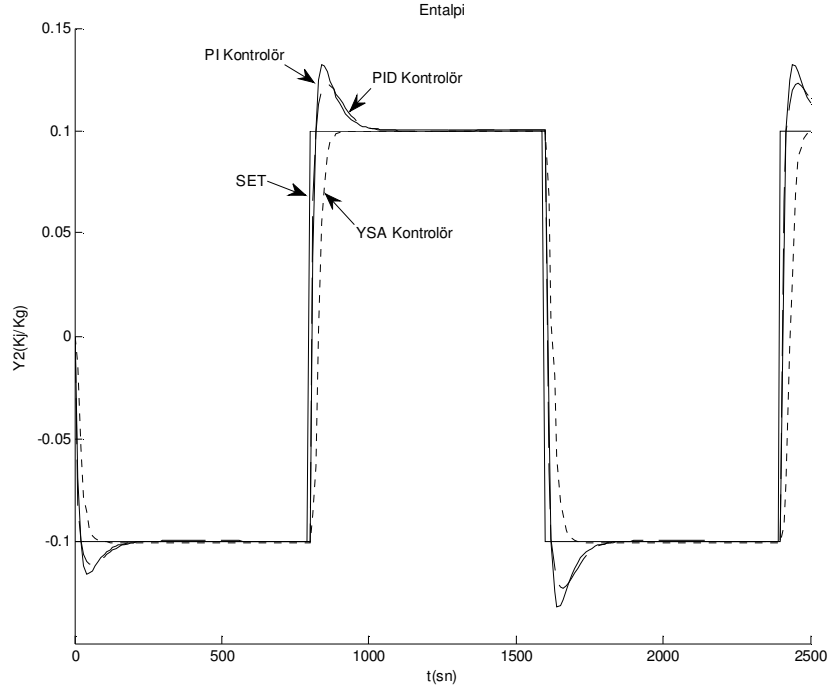


(a)

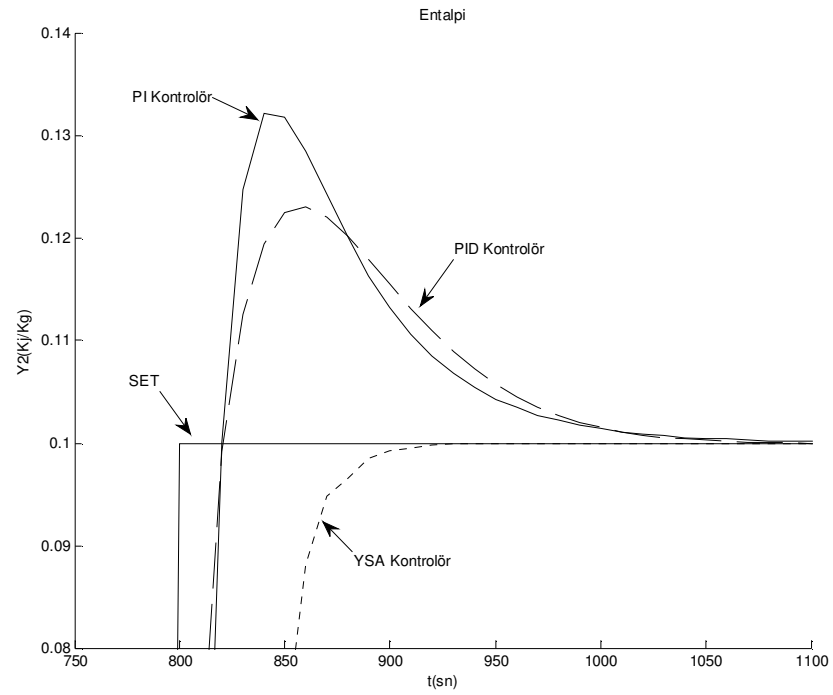


(b)

**Şekil 4. 3.** İkinci Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

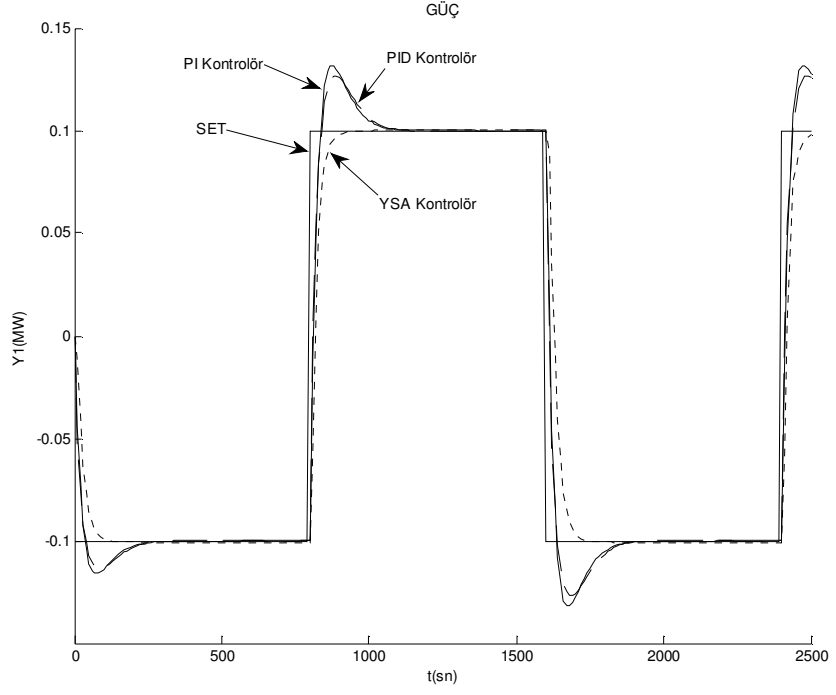


(a)

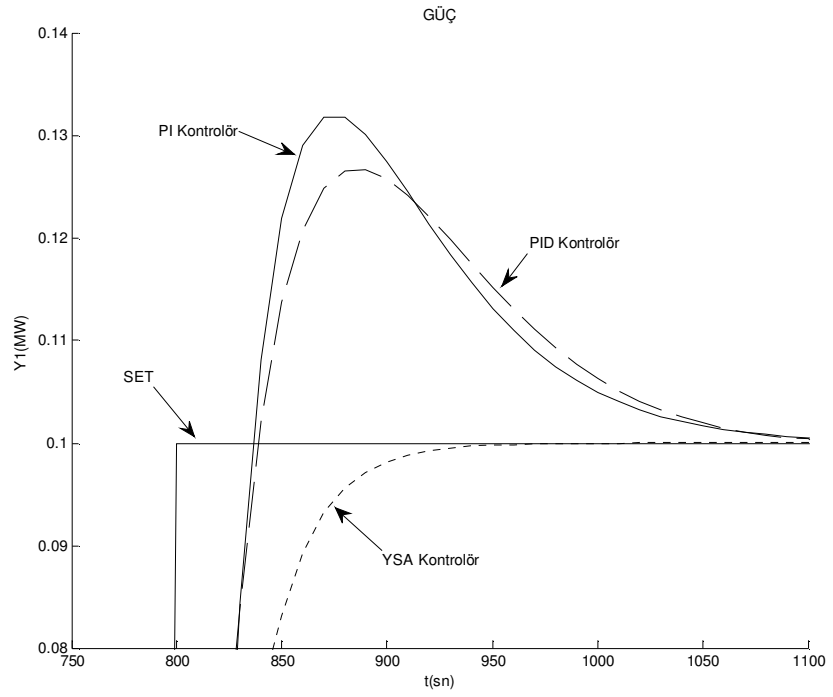


(b)

**Şekil 4. 4.** İkinci Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

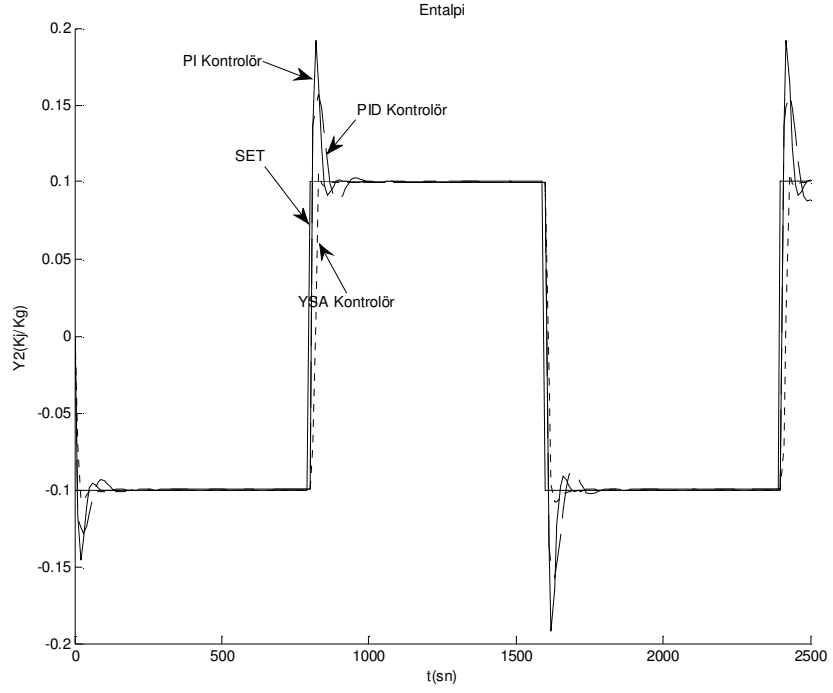


(a)

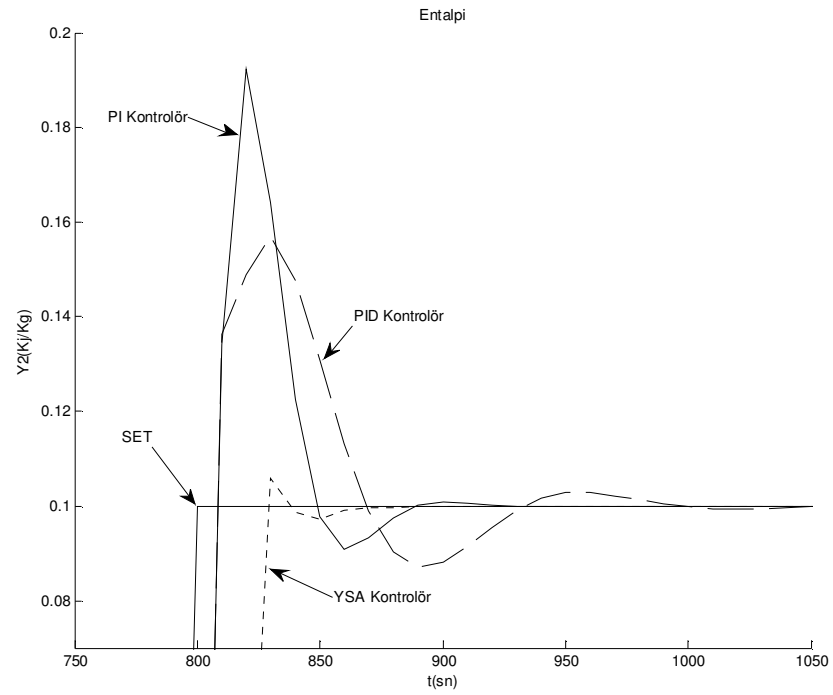


(b)

**Şekil 4. 5.** Üçüncü Modelin Güç Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali



(a)



(b)

**Şekil 4. 6.** Üçüncü Modelin Entalpi Çıkışına Ait Simülasyon Sonuçları  
**(a)** Normal Görünüm **(b)** Yakınlaştırılmış Hali

### 4.3. PI, PID ve YSA2'nin Karşılaştırılması

Çizelge 4.1'de kontrol yöntemlerinden elde edilen sonuçlar çizelge halinde gösterilmiştir.

**Çizelge 4. 1.** Klasik Kontrol Yöntemleri ile YSA'nın Karşılaştırılması

		PI		PID		YSA	
		Güç	Entalpi	Güç	Entalpi	Güç	Entalpi
MODEL 1	Aşma değeri (%)	13.6	15.3	12.9	12.9	11.2	-
	Oturma zamanı (sn)	205	134	250	273	120	90
MODEL 2	Aşma değeri (%)	13.5	13.2	13	12.3	10	-
	Oturma zamanı (sn)	340	300	460	280	180	140
MODEL 3	Aşma değeri (%)	13.2	19.2	12.6	15.7	-	10.5
	Oturma zamanı (sn)	380	128	330	250	180	95

Başlangıçta toplam elektriksel güç çıkışının %95'lik verimiyle çalışan temiz kazana sahip bir santral sistemi düşünülmüştür, daha sonra sistem %70 temiz kazan ve %70 kirli kazan moduna geçirilmiştir.

Kullanılan kontrolörlerin parametreleri her model için ayrı ayrı saptanmış ve en iyi sonuçları alabilmek amacıyla optimize edilmiştir.

Çizelge 4.1'de verilen 3 durum incelendiğinde, geleneksel PI ve PID kontrolörlere göre önerilen kontrolörün %10 ila %30 arasında aşma değerlerinde, %50 civarında da oturma zamanlarında daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca 3. modelde, sistemin kirlendiği durumda, geleneksel kontrolörlerin oturma zamanları çok uzarken, önerilen kontrolörle oturma zamanının görece çok daha kısa tutulduğu da gözlenmiştir. Bu durum YSA gibi modern ve sisteme kolay adapte olabilen kontrolörlerin, termik güç santrali gibi büyük, karmaşık sistemlere rahatlıkla uygulanabileceğinin de bir göstergesidir. Ayrıca bilindiği gibi, oturma zamanının ve aşma değerinin küçülmesi üretilen elektrik enerjisinin maliyetinde azalmalara neden olmaktadır. Dahası, makinelerin korozyon ile aşınmaları ve ömürlerinin azalması da önlenmektedir. Böylece, önerilen kontrolör yardımı ile uzun ömürlü ve maliyeti düşük santral kontrolü sağlanmış olmaktadır.

#### **4.4. Sonuç**

Bu çalışmada, elektrik üretiminde vazgeçilmez bir öneme sahip olan fosil yakıtlı termik santrallere genel bir bakış yapılmış, kontrol sistemleri incelenmiştir. Günümüz koşullarında enerjinin kesintisiz, düzenli ve harmoniksiz verilmesinin yanında depolanamaması sebebiyle tüketildiği kadar üretilmesi gerekmektedir. Bu da santrallerdeki kontrol sistemlerini çok önemli hale getirmektedir. Günümüzde bu santraller klasik kontrol sistemleri ile kontrol edilmektedir. Bu sebeple öncelikle modellemesi yapılan termik santralin kontrolü, klasik kontrol sistemlerinden PI ve PID kontrolör ile gerçekleştirilmiştir. Termik santralin modellemesi yapılmış ve buna uygun PI

ve PID kontrolörün parametreleri Chien-Hornes-Reswick Yöntemi ile belirlenmiştir ve optimum değerlere getirilmiş, sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra yapay sinir ağları ile aynı santralin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Yapay sinir ağlarının özelliği sistemin giriş ve çıkış datalarından faydalanarak sistemi öğrenmesi ve bunu kontrol edecek kontrol sinyallerini üretebilmesidir. Aynı zamanda santralin sonradan değişen parametrelerine göre yeni kontrol sinyalleri üretebilmesi yani değişen şartlara kendini adapte edebilmesidir. Klasik kontrol sistemleri bu özelliğe sahip değildir. Santral dinamiğinde oluşacak şartlara göre yeniden uzman kişiler tarafından ayarlanması gerekmektedir. Yapay sinir ağları ile oluşturulan kontrolör ile yapılan kontrol işleminde santralin her modelinde de daha az aşma değeri ve daha hızlı oturma zamanları elde edilmiştir. Yukarıda da bahsedildiği üzere, oturma zamanının ve aşma değerinin küçülmesi üretilen elektrik enerjisinin maliyetinde azalmaların yanında, makinelerin korozyon ile aşınmaları ve ömürlerinin azalmasını da önlemektedir. Bu özellikleri sebebiyle modern kontrol yöntemleri ile üretilen enerji hem daha düzenli hem de daha verimli olacaktır. Böylece, önerilen kontrolör yardımı ile uzun ömürlü ve maliyeti düşük santral kontrolü sağlanmış olmaktadır.

Sonuçta modern kontrol yöntemlerinden YSA kontrolör, termik santral kontrolünde kontrolör olarak önerilmiştir.



## KAYNAKLAR

1. H. Bilen, Kombine Çevrimli Santral Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2000.
2. S. İskender, Asrın Çözülemeyen Problemi Enerji, Tütev Yayınları, Ankara, 2007
3. S. İskender, Türkiye'de ve Dünyada Enerji ve Nükleer Enerji Gerçeği, Tütev Yayınları, Ankara, 2005
4. K. J. Astrom, T. Bohlin, Theory of Self Adaptive Control Systems, P. H. Hammond (Ed.) Plenum Press, 1965.
5. G. E. P. Box, G. M. Jenkins, Time Series Analysis, Forecasting and Control, Holden Day, San Francisco, 1970.
6. K. R. Godfrey, Measurement & Control, 65(1969).
7. R. C. Fair, Econometrica, **38**, 507(1974).
8. H. C. Akaike, IEEE Trans. Auto Cont., **19**, 716(1974).
9. G. E. P. Box, J. F. MacGregor, Technometrics, **16**, 1(1974).
10. G. C. Goodwin, R. L. Payne, Dynamic System Identification, Experiment Design and Data Analysis. Academic Press, 4th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, Tibilisi, 1976.

11. T. Soderstrom, Int. J. Control, **26**, 1(1977).
12. N. J. Mass, P. M. Senge, IEEE Trans. on Syst., Man and Cybernetics, SMC,**8**, 6(1978).
13. H. Nicholson, Dynamic Optimization of a Boiler, Proc. IEE, **11**, 8,(1964).
14. J. H. Anderson, Dynamic Control of a Power Boiler, Proc. IEE, 116, **7**, (1969).
15. J. P. McDonald, H. G. Kwatny, J. H. Spare, A Nolineer Model for Reheat Boiler-Turbine Generation Systems, Proc. JACC, July 1971.
16. H. W. Kwan, J. H. Anderson, International Journal of Control, 12, **6**, 977(1970)
17. F. Laubli, F. H. Fenton, The Flexibility of the Supercritical Boiler as a Partner in Power System Design and Operation, IEEE Winter Power Meeting,1971.
18. N. W. Rees, R. D. Bell, K. B. Lee, Modelling and Control Studies on a 500 MW Coal-Fired Steam Generating Plant, :School of E. E. Report, Univ. of N. S. W., 1974.
19. R.D. Bell, N. W. Rees, K. B. Lee, Models of Large Boiler-Turbine Plant, IFAC Symp. Auto Cont. & Protection of Electrical Power Systems, Melbourne, 1977.
20. N. W. Rees, R. D. Bell, K.B. Lee, Statistical Models of Industrial Plant, 1st Australian Conf. on Control Engineering, Melbourne, June 1979.

21. R. D. Bell, N. W. Rees, T. Done, Nonlinear and Linear Models of a 500 MW Boiler-Turbine System, 1st Australian Conf. on Control Engineering, Melbourne, June 1979.
22. G. Lausterer, J. Franke, E. Eitelberg, Modular Modelling Applied to a Benson-Boiler, 1st IFAC Workshop on Modelling and Control of Electric Power Plants, Como / Italy, 1983.
23. C. G. Maffezzoni, G. Magnani, L. Marcocci, Computer Aided Modelling of Large Power Plants, 1st IFAC Workshop on Modelling and Control of Electric Power Plants, Como / Italy, 1983.
24. H. Unbeauen, I. Kocaarslan, European Simulation Multiconference, Erlangen-Nuremberg / Germany, 474(1990).
25. T. Zhou, , IEEE Trans. On Auto. Control, **43**, 1(1998).
26. L. A. Zadeh, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., **SMC-3**, 28(1973).
27. E. H. Mamdani, Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci., **121**, 1585(1974).
28. E. H. Mamdani and S. Assilian, Int. J. Man-Mach. Stud., **7**,1(1975).
29. T. Takagi, M. Sugeno, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., **SMC-15**, 116(1985).
30. W. J. M. Kickert, H. R. Van Nauta Lemke, Automatica, **12**, 301(1976).
31. M. Braae and D. A. Rutherford, Fuzzy Sets Syst., **2**, 185(1979).
32. T. J. Procyk, E. H. Mamdani, Automatica, **15**, 15(1979).

33. Y. F. Li, C. C. Lau, IEEE Contr. Syst. Mag., 65(1989).
34. H. Ying, W. Siler, J. J. Buckley, Automatica, **26**, 513(1990).
35. F. Matia, A. Jimenez, R. Galan, R. Sanz,, Fuzzy Sets Syst., **52**, 113(1992).
36. H. Ying, Automatica, **29**, 1579(1993).
37. J. Ambuel, L. Steenhoek, R. Smith, T. Colvin, Amer. Soc. Agric. Eng., **36**, 1057(1993).
38. S. Sugawara, T. Suzuki, J. Therm. Biol., **18**, 465(1993).
39. S. J. Qin, G. Borders, IEEE Trans. Fuzzy Syst., **2**, 74(1994).
40. S. Sheoni, K. Ashenayi, M. Timmerman, IEEE Contr. Syst. Mag., 73(1995).
41. B. Armstrong, IEEE Trans. Fuzzy Syst., **4**, 72(1996).
42. H. A. Malki, G. Chen, IEEE Trans. Fuzzy Syst., 653(1996).
43. K. J. Aström, B. Wittenmark, Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
44. K. S. Narendra, A. M. Annaswamy, Stable Adaptive Systems, Prentice-Hall, New Jersey, 1989
45. S. Sastry, M. Bodson, Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness, Prentice-Hall, New Jersey, 1989

46. M. Vidyasagar, Nonlinear Systems Analysis, , Prentice-Hall, New Jersey, 1993
47. R. Marino, P. Tomei, Nonlinear control desing: Geometric, Adaptive and Robust, , Prentice-Hall, New Jersey, 1995
48. H. K. Khalil, Nonlinear Systems, , Prentice-Hall, New Jersey, 1996
49. J. C. Doyle, B. Francis, A. Tannenbaum, Feedback Control Therory, Macmillan Publishing Co., New York, 1992
50. S. P. Bhattacharyya, H. Chapellat, L. H. Keel, Robust Control, the Parametric Approach, Prentice – Hall New Jersey, 1995
51. S. L. Tanimoto, The Elements of Artificial Intelligence Using Common LISP, Computer Science Pres New York , 1990)
52. B. Kosko, Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence, Prentice – Hall, New Jersey, 1992
53. K. M. Passino, S. Yurkovich, Fuzzy Control, Addison- Wesley, California,1998
54. W. T. Miller, S. Sutton, P. J. Werbos, Neural Network for Control, MIT Pres, Cambridge,1990
55. C. L. M. Harnold, K. Y. Lee, J. H. Lee, American Control Conference, 4, 2819(1999)
56. C. L. M. Harnold, K. Y. Lee, American Control Conference, 5, 3214(2000)

57. C. L. M. Harnold, K. Y. Lee, Proc. IEEE Conference on Decision and Control, **1**, 507(1998)
58. C. L. M. Harnold, K. Y. Lee, Proc. Of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, **2**, 1140(2000)
59. C. L. M. Harnold, K. Y. Lee, American Control Conference, **3**, 1664(2000)
60. C. L. M. Harnold, K. Y. Lee, Proc. Of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, **1**, 212(2000)
61. C. L. M. Harnold, K. Y. Lee, J. H. Lee, Y. M. Park, American Control Conference, **2**, 1208(1999)
62. K. Funahashi, Neural Network, **2**, 183(1989)
63. D. Nguyen, B. Widrow, IEEE Control System Magazine, 18(1990)
64. C. C. Ku, K. Y. Lee, IEEE Trans. on Neural Networks, **6**, 144(1995)
65. A. Delgado, C. Kambhampati, K. Warwick, IEE Proc. Control Theory Appl., **142**, 4(1995);
66. Y. M. Park, M. S. Choi, K. Y. Lee, IEEE Trans. on Neural Networks, **7**, 1099(1996)
67. K. S. Narendra, S. Mukhopadhyay, IEEE Trans. on Neural Networks , **8**, 475(1997)

68. J. T. Spooner, K. M. Passino, Proc. IEEE Conference on Decision and Control, **2**, 1135(1995)
69. J. T. Spooner, K. M. Passino, Proc. IEEE Conference on Decision and Control, **1**, 243(1995)
70. S. Jagannathan, F. L. Lewis, American Control Conference, **2**, 3334(1996 ).
71. S. Jagannathan, Automatica, **34**, 1295(1998)
72. D. C. Kennedy, V. H. Quintiana, 12th World Congress, **5**, 131(1993).
73. Y. Zhang, O. P. Malik, G. S. Hope, G. P. Chen, IEEE Trans. on Energy Conversion, **9**, 433(1994).
74. Y. M. Park, S. H. Hyun, K. Y. Lee, IEEE Trans. on Neural Networks, **7**, 1099(1996)
75. B. Widrow, G. L. Platt, Proc. IEEE Conference on Decision and Control, **2**, 1032(1997)
76. L., B., Almeida, Proc. Of IEEE, 1st Conf. On Neural Net. II, 609(1987)
77. H. YOUSEF, A. SIMAAN, IEE Proc.-D, **138**, 321(1991)
78. K. .J. ASTROM, Automatica ,**19**, 5(1983)
79. N. ABULAFYA, Neural Networks for System Identification and Control, Msc thesis, University of London, 1995

80. T. RUCHTI, Identification of Nonlinear Systems Using Artificial Neural Networks With Electromechanical Applications PhD Thesis, Marquette University, May'95
81. KUNDUR, P., "Power System Stability and Control" EPRI PSE Series, McGraw-Hill, New York, 1994
82. I. Kocaarslan, Modellbildung und Identifikation für einen 750 MW-Kombi-Block, Internal Report ESR-8904, Ruhr University, Bochum, 1989.
83. H. Unbehauen, I. Kocaarslan, .Experimental Modelling and Adaptive Power Control of 750 MW Once-Through Boiler, 11<sup>th</sup> World Congress, Tallinn, 13-17 Aug. 1991.
84. H. Unbeauen, I. Kocaarslan, U. Keuchel, Real-Time Adaptive Control of Electrical Power and Enthalpy for a 750 MW Once-Through Boiler, Edinburg onference Centre, Edinburg, 25-28 March 1991.
85. İlhan Kocaarslan, Einsatz Adaptiver Regelkonzepte in Einem Dampfkraftwerk, Doktora Tezi, Bochum, Almanya, 1991.
86. G. Akalın, İ. Kocaarslan, İ. N. Yörükeren, T. Erfidan, TOK'98 Otomatik Kontrol Bilimsel Toplantısı, 133(1998)
87. Gül Akalın Kurt, Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolü, Kocaeli F. B. E. Doktora Tezi, Kocaeli, Şubat 2000.
88. E. M. Yeğın, Bir Termik Santralin Modelinin Oluşturulması ve Bu Model Üzerinde Klasik PID ve Fuzzy Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Doktora Tezi, Kocaeli F. B. E., Kocaeli, 1999.



89. H. Tiryaki, Bulanık Mantık Kontrolörler ile PID Kontrolörün Bir Elektriksel Termik Santralde Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2005
90. M. M. El-Wakil, Power Plant Technology, Mac Graw Hill, USA, 1984.
91. (<http://www.catestermik.com/index/teknikbilgi/tersantnedir.html>)
92. G. Klefenz, F. T. Vladimir, Automatic Control of Steam Power Plants, Germany, 1986.
93. U. Sill, W. Zörner, Steam Turbine Generators Process Control and Diagnostics, Siemens, München, 1996.
94. A. W. Ordys, M. J. Grimble, İ. Kocaarslan, Combined Cycle and Combined Heat and Power Processes, In Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2002.
95. K. Onat, Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları, İTÜ, Makina Fakültesi, İstanbul, 1988.
96. <http://www.mak.etu.edu.tr/dersler/mak480/docs/sunumlar/BUHAR%20KAZANLARI.pdf>
97. M. H. Yıldırım, Kazanların İncelenmesi ve Kontrol Tipleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1994
98. A. Demirören, L. Zeynelgil, Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2004

99. M. Waller, J. B. Waller and K. V. Waller, "Decoupling Revisited", Ind. Eng. Chem. Res., 2003
100. D. Çolakoğlu, Süreç Kontrol, Mersin Üniversitesi, Mersin, 2006
101. İ. Yüksel, Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri, Bursa, 1997.
102. H. Unbeauchen, Regelungstechnick 2, Germany, 1983.
103. E. Öztemel, Yapay Sinir Ağları,, Papatya Yayıncılık, İstanbul, 2006
104. S. Haykin, Neural Networks, Macmillan Collage Printing Company, New Jersey 1994
105. Efe M. Ö., Kaynak O. Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul 2004
106. Ç. Elmas, Yapay Sinir Ağları Kuram, Mimari, Eğitim, Uygulama, Seçkin Yayıncılık, Ankara 2003
107. S. Haykin, Neural networks a comprehensive foundation (2th edition). Prentice Hall publishing, New Jersey, 1999
108. Ş. Sağıroğlu, E. Besdok, M. Erler,. Mühendislikte yapay zeka uygulamaları-1: Yapay Sinir Ağları,Ufuk Yayıncılık, Kayseri, 2003
109. Z. Şen, Yapay sinir ağları ilkeleri, Su vakfı yayınları, İstanbul, 2004
110. V. V. Nabyev, Yapay Zeka Problemler-Yöntemler-Algorithm, Seçkin Yayınevi, Ankara,2005

111. B. Dandil, Yapay Sinir Ağları ile Sistem Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 1998
112. D. Anderson, G. McNeill, Artificial Neural Networks Tecnoogy, Rome Laboratory RL/C3C, 1992
113. C. L. LIN, H. W. SU, Intelligent Control Theory in Guidance and control System Design: an Overview, Proc. Natl. Sci, Counc. **24**, 15(2000)
114. D. Eggert, Neural Network Control, Tecnical University of Denmark, Denmark, 2003

## ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Kırıkkale'de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kırıkkale'de tamamladı. 1988 yılında girdiği Selçuk Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümünden 1992 yılında mezun oldu. 1993 yılında Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1998 yılında Yüksek Lisansını tamamladı. 1998 yılında aynı bölümde Öğretim Görevlisi kadrosuna atandı. 2009 yılında Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalında Doktora öğrenimini tamamladı. Evli ve 2 çocuk babasıdır.