

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TERMİK SANTRAL KAZAN KONTROLÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HASAN YILDIRIM

HAZİRAN 2019

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TERMİK SANTRAL KAZAN KONTROLÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan YILDIRIM

DANIŞMAN : Prof. Dr. Zehra SARAÇ

İKİNCİ DANIŞMAN : Dr. Öğr. Üyesi Okan ERKAYMAZ

ZONGULDAK

Haziran 2019

KABUL:

Hasan YILDIRIM tarafından hazırlanan “Yapay Sinir Ağları ile Termik Santral Kazan Kontrolü” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 20/06/2019

Danışman: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rukiye UZUN ARSLAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye : Dr. Öğr. Üyesi A. Reşit KAVSAOĞLU

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

....../....../2019



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

Hasan YILDIRIM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TERMİK SANTRAL KAZAN KONTROLÜ

Hasan YILDIRIM

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Okan ERKAYMAZ

Haziran 2019, 83 sayfa

Ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin tüketilen enerji ölçekleri ile verildiği günümüz şartlarında, enerjinin üretilmesi kadar üretimin gerçekleştirildiği proseslerin dolayısı ile enerji üretim şekillerinin de önemi gün geçtikçe artmaktadır. Gerek iktisadi bakış açısıyla girdi maliyetlerinin düşürülerek sistemin sürdürülebilirliğinin sağlanması gerekse değişen çevre şartları ve toplumların değişen bakış açıları ile daha az kaynak tüketerek daha sürdürülebilir bir dünya düzeninin kurulması bu bağlamda büyük önem taşımaktadır.

Sanayi devrimi ile birlikte yükselen kömür tüketimi, diğer enerji kaynaklarının keşfi ile azalmakta ise de günümüz koşullarında özellikle ülkemiz açısından elektrik üretimi alanında kömür yakıtlı termik santraller ile elektrik enerjisi üretimi hala ilk sıralarda yer almaktadır. İnsanoğlu yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek çevresel sürdürülebilirliği sağlamaya çalışsa da bugünün teknolojileri ile henüz tüm ihtiyacı olan enerjiyi yalnız bu kaynaklarla karşılayabilecek teknoloji seviyesine ulaşamamıştır. Bu nedenle bir yandan alternatif kaynaklar üzerine çalışmalar devam ederken öte yandan mevcut üretim proseslerinin daima iyileştirilmesi önem arz etmektedir.

ÖZET (devam ediyor)

Ülkemizde de elektrik enerji üretimi faaliyetlerinde büyük ölçüde kullanılan ve dünyanın birçok ülkesinde halihazırda baz yükü tutan termik santrallerin de proseslerinde yapılabilecek iyileştirmeler önemlidir. Kontrol prosesinde yapılacak iyileştirmelerle daha ekonomik, daha verimli ve daha çevreci bir yapı oluşturulabilir.

Termik santrallerin tasarım aşamasında ki kontrol parametreleri, zamanla mekanik aksamlar da meydana gelen değişimler ile görülen bozulmalar, dinamik sistem yapısı ile tasarım aşamasından itibaren değişken çevre şartları, yakıt homojenliği olmayışı nedeniyle değişen ana girdi, yanma prosesi esnasında oluşan atıklardan meydana gelen etkenler, insan (operatör) bağımlılığı gibi bozucularla baş başa kalmaktadır. Bozucu etkenlerle baş edebilecek değişen şartlara adapte olabilen, öğrenebilen sistemler tarafından kontrol, çalışmaların odak noktasıdır.

Bu tezde 157 MW güçte, katı yakıtlı bir termik santralin MATLAB 2018 B’de YSA tabanlı modellemesi, YSA tabanlı adaptif kazan kontrolör tasarımı ve simülasyonu yapılmıştır. Yapılan modelleme ve kontrol tasarımı simülasyon sonuçları irdelenerek uygulanabilirlik ve fayda açısından incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, termik santral, yapay sinir ağları, kontrol, modelleme.

Bilim Kodu: 608.02.02.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

NEURAL NETWORK CONTROL FOR THERMAL POWER PLANT BOILER

Hasan YILDIRIM

Zonguldak Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical & Electronics Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

Co-Advisor: Assist Prof. Dr. Dr. Okan ERKAYMAZ

June 2019, 83 pages

In today's conditions where the development levels of the countries are determined with the energy scales consumed, not only energy production but also of which process and method being pick gained importance, these importance increasing day by day. In this context, it is of great importance to ensure the sustainability of the system by reducing fuel costs from an economic point of view and this improvment provides the establishment of a more sustainable world order by consuming less resources with changing environmental conditions and the perspectives of societies.

Although the consumption of coal, which increased with the industrial revolution, decreased with the discovery of other energy sources, espacialy coal fueled power plants still placed top of list in our country. Although human beings have turned to renewable energy resources to ensure environmental sustainability, today's technologies have not yet reached the level of technology that can meet all the energy they need only with these resources. while studies on resources are in progress on the other hand, it is important to always keep improving the existing production processes.

ABSTRACT (continued)

Improvements in the processes of thermal power plants, which are widely used in electrical energy production activities in our country and which already hold the base load in many countries of the world, are important. Improvements in the control process can create a more economical, more efficient and environmentally friendly structure.

The control parameters determined during the design phase of thermal power plants deterioration due to changes in mechanical equipment over time caused problems such as, dynamic system structure with changing environmental conditions from the design stage, main input changing due to lack of fuel homogeneity, factors resulting from waste generated during the combustion process, Human (operator) behaviors. Control by learning systems that can adapt to changing conditions to cope with disruptive factors is the focus of studies on the above-mentioned benefits.

In the scope of this thesis, ANN-based modeling, ANN-based adaptive boiler controller design and simulation of a 157 MW fossil fuel thermal power plant in MATLAB 2018 B have been made. The results of modeling and control design are examined in terms of applicability and utility.

Keywords: Energy, Thermal power plant, artificial neural network, control, modelling.

Science Code: 608.02.02.

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında her türlü bilgi, tecrübe, yönlendirmeleri ve sabrı ile daima desteklerini gördüğüm danışman hocam Prof. Dr. Zehra SARAÇ'a, yine tezimin hazırlanması aşamasında zamanından feragat ederek her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen ikinci danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Okan ERKAYMAZ'a, hayatımın her alanında her daim yanımda olan eğitim hayatımın temel direkleri annem ve babam başta olmak üzere sevgili aileme çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
 BÖLÜM 2 TERMİK SANTRAL.....	 7
 2.1 TARİHÇE.....	 7
2.2 GENEL ÇALIŞMA PRENSİBİ	8
2.2.1 Rankine Çevrimi	8
2.3 TERMİK SANTRALE AİT ANA EKİPMANLAR	10
2.3.1 Buhar Üretici/Kazan.....	11
2.3.1.1 Alev Borulu Kazanlar	15
2.3.1.2 Su Borulu Kazanlar.....	15
2.3.2 Buhar Türbini.....	18
2.3.2.1 Buhar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	20
2.3.2.2 Buhar Türbini Parçaları.....	22
2.3.3 Kondanser	23
2.3.4 Kazan Besleme Suyu Pompası.....	24
2.3.5 Generatör.....	25

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

2.3.5.1 Generatör Bileşenleri	27
BÖLÜM 3 YAPAY SİNİR AĞLARI	29
3.1 TARİHSEL GELİŞİM.....	29
3.2 GENEL	29
3.3 YAPAY SİNİR AĞLARI ANA ÖĞELERİ	31
3.3.1 Girdiler	31
3.3.2 Ağırlıklar	31
3.3.3 Toplama Fonksiyonu	32
3.3.4 Aktivasyon (Eşik) Fonksiyonu	32
3.3.5 Çıkış İşlevi	35
3.4 YAPAY SİNİR AĞLARININ TEMEL ÖZELLİKLERİ.....	35
3.4.1 Doğrusal olmama	36
3.4.2 Giriş Çıkış Eşleşmesi	36
3.4.3 Adaptasyon	36
3.4.4 Dağınık Bellek Mimarisi.....	37
3.4.5 Hata Toleransı	37
3.4.6 Paralel Çalışma Mimarisi.....	37
3.4.7 Eksik Bilgi İle Çalışabilme	37
3.4.8 Analiz ve Tasarım Bütünlüğü	37
3.5 YAPAY SİNİR AĞLARININ KULLANILDIĞI ALANLAR	38
3.5.1 Örüntü Tanıma	38
3.5.2 Sınıflandırma.....	38
3.5.3 Modelleme	38
3.5.4 Tahmin	38
3.5.5 Optimizasyon	39
3.5.6 Bütünleme	39
3.5.7 Kontrol	39
3.6 YAPAY SİNİR AĞLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	39
3.6.1 Hopfield Ağı	40

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.6.2 Uyarlanır Rezonans Ağları	41
3.6.3 Özörgütlemeli Harita (Kohonen) Ağı	42
3.6.4 Geri Yayılım Ağı	43
3.6.5 Geri Dönüşümlü Ağlar (Recurrent)	43
3.6.6 Karşı Yayma Ağı	45
3.6.7 Radyal Tabanlı Ağlar (RBFA).....	46
3.7 YAPAY SİNİR AĞLARINDA ÖĞRENME YÖNTEMLERİ	46
3.7.1 Levenberg-Marquardt (LM) Algoritması	48
3.7.2 Bayesian Regulazitions (BR) Algoritması.....	49
3.8 YAPAY SİNİR AĞLARININ TASARIMI	50
3.8.1 YSA Mimari Seçimi	50
3.8.2 Öğrenme Algoritmasının Seçimi	50
3.8.3 Nöron Sayısının Belirlenmesi	51
3.8.4 Giriş Çıkış Vektörlerinin Ağa Sunumu.....	51
3.8.5 Performans Fonksiyonun Seçimi	51
 BÖLÜM 4 YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TERMİK SANTRALİN MODELLENMESİ VE TERMİK SANTRAL KAZAN KONTROLÜ	 53
 4.1 YSA İLE TERMİK SANTRAL MODEL TASARIMI.....	 53
4.1.1 YSA Tabanlı Termik Santral Modelini Oluşturan Giriş Çıkışların Belirlenmesi....	54
4.1.2 MLP ile Termik Santral Modeli.....	55
4.1.3 RNN ile Termik Santral Modeli	59
4.2 YSA İLE TERMİK SANTRAL KAZAN KONTROLÜ	62
4.2.1 YSA Tabanlı Model Referans Adaptif Kontrol (MRAK)	63
4.2.1.1 NARX Ağ Yapısı	65
4.2.1.2 NARX temelli MRAK model	67
 BÖLÜM 5 SONUÇLAR.....	 73

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR.....	77
BİBLİYOGRAFYA	81
ÖZGEÇMİŞ	83



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 2017 yılı Türkiye elektrik enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı.....	3
Şekil 2.1 Organik Rankine Çevrimi ışığında termik santral temel prosesi	9
Şekil 2.2 Tekrar kızdırmalı Rejeneratif Rankine Çevrimi	10
Şekil 2.3 Akışkan yatak kazan kesit görünümü	14
Şekil 2.4 Alev borulu kazan	15
Şekil 2.5 Su borulu kazan.....	16
Şekil 2.6 Katı yakıtlı pulverize kömür yakıcılı termik santral kazanı.....	17
Şekil 2.7 Buhar Türbini	19
Şekil 2.8 Çeşitli form ve boyutta türbin kanatları	19
Şekil 2.9 Türbin sembolik gösterimi.	20
Şekil 2.10 Su soğutmalı kondanser	24
Şekil 2.11 Turbo generatör.....	25
Şekil 2.12 Temel generatör yapısı.....	26
Şekil 3.1 Biyolojik sinir hücresi	30
Şekil 3.2 YSA nöron modeli	30
Şekil 3.3 Sigmoid fonksiyonu	33
Şekil 3.4 Basamak fonksiyonu	33
Şekil 3.5 İşaret fonksiyonu.....	33
Şekil 3.6 İşaret fonksiyonu.....	33
Şekil 3.7 Parçalı doğrusal fonksiyon.....	34
Şekil 3.8 Hiperbolik Tanjant Fonksiyonu	34
Şekil 3.9 ReLU fonksiyonu	34
Şekil 3.10 Yumuşak ReLU fonksiyonu.....	34
Şekil 3.11 TKA yapısı.....	40
Şekil 3.12 Hopfield Ağı	40
Şekil 3.13 ART ağı.....	41
Şekil 3.14 İki boyutlu SOM ağı	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.15 Geri Yayılım Ağı	43
Şekil 3.16 Elman Geri Dönüşlü Ağ.....	44
Şekil 3.17 Karşı Yayım Ağı	45
Şekil 3.18 RBFA Ağı	46
Şekil 4.1 Termik Santral Model Giriş Ve Çıkışları.....	55
Şekil 4.2 Termik santral modelleme Geleneksel MLP mimarisi görünümü.	56
Şekil 4.3 En iyi MLP ağı birleşik performans çıktısı.....	57
Şekil 4.4 En iyi MLP ağı ayrık performans çıktısı.....	58
Şekil 4.5 Termik santral modelleme RNN Ağ mimarisi görünümü.	59
Şekil 4.6 En iyi RNN ağı birleşik performans çıktısı.....	60
Şekil 4.7 En iyi RNN ağı ayrık performans çıktısı	61
Şekil 4.8 Açık çevrim kontrol.	62
Şekil 4.9 Kapalı çevrim kontrol.	63
Şekil 4.10 MRAK sistem blok diyagramı	63
Şekil 4.11 YSA tabanlı MRAK mimarisi.....	65
Şekil 4.12 NARX ağ yapısı (Bektaş ve Jones 2016).....	66
Şekil 4.13 NARX temelli MRAK a) Giriş zaman gecikmesi=0, b) Giriş zaman gecikmesi=268	
Şekil 4.14 Giriş zaman gecikmesi=2 olan MRAK model sistem cevabı	69
Şekil 4.15 Giriş zaman gecikmesiz MRAK model sistem cevabı.....	70
Şekil 4.16 Yük seti ve yük çıkışı.....	71
Şekil 4.17 Sıcaklık seti ve sıcaklık çıkışı.	72
Şekil 4.18 Basınç seti ve basınç çıkışı.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Tahmini	2
Çizelge 4.1 MLP mimarili ağ modelleme eğitim sonuçları	56
Çizelge 4.2 MLP mimarili ağ modeli istatistiksel performans sonuçları.....	58
Çizelge 4.3 RNN mimarili ağ modelleme eğitim sonuçları	60
Çizelge 4.4 RNN mimarili ağ modeli istatistiksel performans sonuçları	61
Çizelge 4.5 Giriş zaman gecikmesi 2 olan MRAK bloğu istatistiksel performans sonuçları	69
Çizelge 4.6 Giriş zaman gecikmesiz MRAK bloğu istatistiksel performans sonuçları	70



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Btu	: İngiliz ısı birimi
MPa	: Mega Paskal
°C	: Santigrat Derece
Kw	: Kilowatt
Mw	: Megawatt
SO ₂	: Kükürt Dioksit
kg	: Kilogram
m ²	: Metrekare
dk	: dakika
NO _x	: Azot Oksit
°	: Derece
mm	: Milimetre
O ₂	: Oksijen
Xi	: Yapay sinir ağı girişleri
Wi	: Yapay sinir ağı ağırlıkları
n	: Üye sayısı
f	: Fonksiyon
T	: Eşik değer
e	: Epsilon
ln	: e tabanlı logaritma
b	: Bias
y	: Yapay sinir ağı çıkışı
ej	: Hata İşareti
C	: Yapay sinir ağı çıkış katmanı nöron sayısı
E	: Referans giriş
T	: Hedef vektörü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

SİMGELER

δ	: Türev
μ	: Marquardt parametresi
I	: Birim matris
J	: Jakobien matrisi
g	: Gradient
$\hat{y}$	: Regresyon çıkışı
k	: kazanç
p	: Parametre
u	: Kontrol fonksiyonu
U_t	: Giriş vektörü
Y_{sp}	: Çıkış vektörü regresyonu
R	: Korelasyon

KISALTMALAR

AA	: Alternatif akım
AB	: Alçak basınç
ART	: Uyarlanabilir rezonans ağı
ÇKA	: Çok katmanlı ağ
DA	: Doğru akım
deSO_x	: Kükürt oksit giderme ünitesi
deNO_x	: Azot oksit giderme ünitesi
DGKÇ	: Doğal gaz kombine çevrim santrali
EMK	: Elektro motor kuvveti
EIA	: Amerika enerji bilgi idaresi
MAE	: Ortalama mutlak hata
Max	: Maksimum
MIMO	: Çoklu giriş çoklu çıkış
MLP	: Multilayer perceptron

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

MRAK	: Model referans adaptif kontrol
MSE	: Ortalama karesel hata
NARX	: Nonlinear autoregressive exogenous ağ yapısı
OB	: Orta basınç
RMSE	: Ortalama hatanın karesinin karekökü
RNN	: Geri dönüşümlü ağ
SOM	: Öz örgütlemeli harita ağı
SSE	: Toplam karesel hata
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TKA	: Tek katmanlı ağ
YB	: Yüksek basınç
YSA	: Yapay sinir ağları



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çalışmanın amacı, katı yakıtlı termik santraller için, santral kazanında, yapay sinir ağı tabanlı adaptif kontrol sistemi tasarlanması ve simülasyonudur. Bu tezin sonucunda teorik olarak klasik kontrol yöntemlerine göre, daha verimli, daha etkin bir kontrol sistemi elde edilebilmiştir.

Enerji kısaca iş yapma yeteneği olarak tanımlanabilir. İşin fizik biliminde ki tanımına baktığımız da bir cismi harekete geçirmek için gerekli olan kuvvet ile kuvvet doğrultusunda ki yer değiştirme miktarının çarpımı işi verir. Yani bir cismi harekete geçirmek için öncelikle bir enerjiye ihtiyacımız bulunmaktadır. Günlük kullanımda ise iş dediğimizde, herhangi bir şeyi üretmek, sonuç elde etmek için yapılan çalışma, aktivite olarak tanımlanabilir. Bu tanım üzerinden hareketle de sonuç elde etmeye çalıştığımız tüm çalışma ve aktivitelerimiz için enerjiye ihtiyacımız bulunur.

Doğada enerjiyi farklı formasyonlarda görürüz. Potansiyel enerji, kinetik enerji, ısı enerjisi, ışıma enerjisi, elektrik enerjisi, kimyasal enerji, manyetik enerji bu formasyonlara örneklerdir. Enerji yoktan var edilemez ve yok olmaz, yalnızca başka bir enerji formuna dönüşür.

Gün geçtikçe teknolojiye yaşanan gelişmelerle birlikte konfor alanı büyüyen insanlığın enerji ihtiyacı ve enerjiye olan bağımlılığı devamlı olarak artış halindedir. Amerika enerji bilgi idaresi (EIA) tarafından yayınlanan 2018 yılı uluslararası enerji görünümü raporunda 2015 yılında 571 katrilyon BTU olan toplam dünya enerji tüketimi, 2020 yılında 610 katrilyon BTU, 2030 yılında ise 661 katrilyon BTU düzeyine yükselecektir. Yine aynı rapora göre 2015 yılında toplam ihtiyacın 150 katrilyon BTU'luk kısmı, kömürden elde edilmiş olup, 2020 ve 2030 yıllarında yaklaşık 150-160 katrilyon BTU'luk enerji ihtiyacı yine kömürden karşılanacaktır (Capuano 2018).

Ülkemiz için, elektrik enerjisi tüketim tahminleri 2018 yılında TEİAŞ tarafından hazırlanan Türkiye elektrik enerjisi 5 yıllık üretim ve kapasitesi projeksiyonu (2018-2022) raporunda yer

almıştır. Raporda 2018-2027 yılları arasında 10 yıllık talep tahmini, puant talep artış miktarı, puant talep artış yüzdesi, enerji talebi artış miktarı ve % enerji talep büyümesi olarak yapılmış ve çizelge 1.1’de görülmektedir.

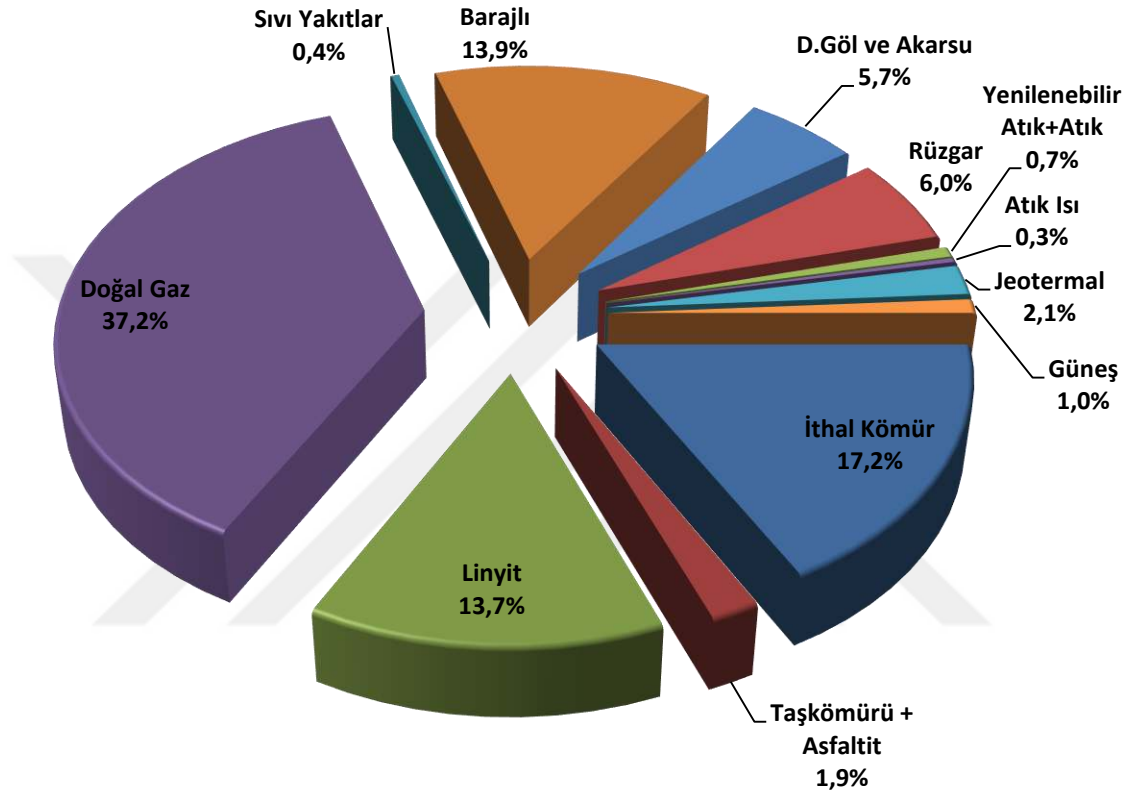
Çizelge 1.1 Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Tahmini (TEİAŞ 2018).

YIL	PUANT TALEP		ENERJİ TALEBİ	
	MW	Artış (%)	GWh	Artış (%)
2018	48.266	1,3	304.425	3,2
2019	50.650	4,9	319.457	4,9
2020	53.112	4,9	334.985	4,9
2021	55.602	4,7	350.696	4,7
2022	58.229	4,7	367.263	4,7
2023	60.984	4,7	384.638	4,7
2024	63.786	4,6	402.308	4,6
2025	66.671	4,5	420.509	4,5
2026	69.630	4,4	439.171	4,4
2027	72.596	4,3	457.876	4,3

Çizelgeden görüldüğü gibi ülkemizde beklenen tüketim artışı yıllık %5’ler civarında seyretmektedir. Her ne kadar 2018-2019 yılı içerisinde seyreden gelişmeler ile tüketim talep artışı tahmin edilen düzeyin altında kalmış olsa bile, enerji tüketim talep miktarının ülkemizde de yıllar bazında artacağı aşikardır. Günümüzde yoğunlaşan çevresel hassasiyetler, değişen toplumsal bakış açıları ile enerji üretimi içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı yükselmektedir. Bununla birlikte baz yük olarak adlandırılan gün içerisinde tahmin edilen temel elektrik enerjisi tüketim miktarı termik santraller tarafından üretilmektedir.

Termik santrallerin dünya üzerinde ki konumu ile ülkemizdeki durumu kaynaklar özelinde farklılıklar gösterebilmektedir. Ülkemizde 2017 yılı elektrik enerji üretimin miktarlarının kullanılan kaynaklara göre dağılımı şekil 1.1’de verilmiştir. 2017 yılı kaynaklar bazında üretim miktarları dağılımı grafiğine göre, toplam elektrik enerjisi üretim miktarının % 72,43’ü termik santraller tarafından karşılanmıştır. Termik santrallerin üretimi içerisinde katı yakıtlı

santrallerin payı % 32,8 olarak gerçekleşmiştir. Toplam enerji üretimi açısından bakıldığında gün geçtikçe artan yenilenebilir enerji üretim miktarına rağmen, termik santraller ile elektrik enerjisi üretimi özelinde katı yakıtlı termik santraller çok geniş bir paya sahiptir.



Şekil 1.1 2017 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (URL-1 2019).

Mevcut kullanımdaki katı yakıtlı termik santrallerle birlikte yeni termik santral yatırımları da devam etmektedir. Bu anlamda termik santrallere verimlilik ve kapasite kullanma alanında yapılacak olan her türlü katkı büyük önem taşır.

Tezde değinileceği üzere termik santral kontrol prosesinde birçok alt bölümlere ayrılmış parçalar bulunmaktadır. Genel yapı çok girişli ve çok çıkışlı olması nedeni ile tasarımı güçtür. Genel anlamda alışılmış proses kontrol sistemleri ile kontrol edilen termik santrallerde değişen dinamik yapı nedeni ile adaptif sistemlerin kullanılması ayrı bir önem taşımaktadır. Adaptif sistemler incelendiğinde kontrol sistemi dizaynı esnasında ihmal edilen bozucuların, çevresel bozucuların, değişen yapı nedeni ile sisteme eklenen bozucuların etkilerini bertaraf edebilme

yetenekleri ön plana çıkmaktadır. Günümüzde yoğun olarak araştırma alanı haline gelen derin öğrenme, makine öğrenmesinin bir parçası olan YSA da adaptif kontrol alanında kullanılan yöntemlerden biridir.

Yapılan çalışmada öncelikle 157 MW güçteki termik santrale ait modeli oluşturacak olan giriş ve çıkış parametrelerine dair ölçümleme yapılarak 444 adet giriş ve çıkış verisi elde edilmiştir. Alınan ölçüm sonuçlarına göre ilk olarak MATLAB 2018 B'de klasik çok katmanlı YSA yapısı ile ve geri dönüşlü YSA yapısı ile santrale dair iki model oluşturulmuştur. İkinci aşamada yine saha verileri kullanılarak, geri dönüşlü YSA yapısı NARX ile YSA tabanlı MRAK oluşturulmuştur. Simülasyon aşamasında eğitim esnasında verilmeyen 400 veri ile MRAK yapısı test edilmiştir.

Tez konusu yapay sinir ağları ile termik santral kazan kontrolü üzerine yapılan literatür incelemesinde birçok çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalardan önemli görülenler ve özellikle son yıllarda gerçekleştirilenler kronolojik sıralama ile aşağıda verilmiştir.

Narendra ve Parthasarathy tarafından 1990 yılında yapılan çalışmada, YSA doğrusal olmayan dinamik sistemlerin tanımlanmasına ve kontrolünde kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışması ile dinamik geri yayılım algoritmali, çok katmanlı, geri dönüşümlü yapay sinir ağı ile dinamik bir sistemin tanınması ve kontrolü başarı ile gerçekleştirilmiştir (Narendra and Parthasarathy 1990).

Bourguet ve Antsaklis tarafından 1994 yılında yapılan çalışma ile YSA'nın elektrik enerjisi endüstrisinde uygulama alanları incelenmiştir. Yapılan çalışma ile YSA üzerine satıcıların, üretim şirketlerinin ve araştırmacıların yoğun ilgileri ile birlikte, enerji alanında uygulanabilirliğine dikkat çekilmiştir. YSA'nın enerji alanındaki uygulamalarına genel bir bakış açısı yakalanması için temsili sayıda çalışma seçilmiş ve hangi alanda hangi YSA türlerinin daha etkin olacağı bir tablo halinde sunulmuştur (Bourguet and Antsaklis 1994).

Li, Ososanya ve Smoak tarafından 1996 yılında YSA ile termik santral modellemesi ve kontrolüne dair çalışma yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmasında iki adet sinir ağı kullanılmıştır. İlk aşamada tesis dinamiklerinin öğrenilmesi için bir yapay sinir ağı eğitilmiştir. İkinci aşamada geri yayılım algoritması kullanılarak tesis dinamikleri ile eğitilmiş yapay sinir ağı çıkış maliyet fonksiyonunu minimize edecek şekilde eğitilmiştir. Santral giriş ve çıkışlarına göre yapılan eğitim ve simülasyon neticesinde tekrar bir ayarlama işlemine gerek kalmadan sistemin kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. YSA'yı sağlayacak donanımın ucuzlaması ile YSA

tabanlı kontrolün, enerji santrallerinin verimli ve akıllı kontrolünün birinci seçeneği olacağı tezi ileri sürülmüştür (Li et al 2016).

Lüy, Kocaarslan ve Çam tarafından 2009 yılında yapılan çalışma ile 765 MW'lık katı yakıtlı bir termik santralin yapay sinir ağları ile kontrolünün etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada matematiksel modeli verilen termik santralde YSA ile güç ve entalpi çıkışları düzenlenmek maksatlı simülasyon çalıştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, YSA ile kontrol sisteminin gayet başarılı olarak gerçekleştirildiği, sisteme verilen bozucu etkiye yapay sinir ağları tarafından anında tepki verildiği ve aşma değerlerinin de çok küçük olarak simülasyon sonuçlarında görüldüğü belirtilmiştir (Lüy vd. 2009).

Manke ve Tembhurne tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada geri yayılım algoritmali yapay sinir ağları ile termik santral kazanı dom seviye kontrolü üzerine çalışma yapılmıştır. Yapılan kontrol sistemi simülasyon çalışması ile, dom seviye kontrolünde klasik PI kontrolcü yerine yapay sinir ağları ile yapılan kontrol sisteminin daha kararlı ve daha düşük hatalarla çalıştığı sonucuna ulaşılmıştır (Manke and Tembhurne 2012).

Mikulandric, Loncar, Cvetinovic ve Spiridon tarafından 2013 yılında Batı Balkan ülkelerinin mevcut kömür yakıtlı termik santrallerde kontrol sistemi modifikasyonu ile santral çıkış performansının yükseltilmesine dair çalışma yapılmıştır. Santral işletimi esnasında toplanılan proses verilerinden modelleme ve kontrol parametreleri belirlenmesi için adaptif nöro-bulanık algoritmalar çalışmada kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre yanma optimizasyonu için geliştirilen adaptif kontrol uygulamasının, santral kirletici çıkışlarında düşüş sağladığı belirtilmiştir (Mikulandric et al. 2013).

Sai ve Reddy tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada fosil yakıtlı 500 Mw'lık bir termik santralde kazan çıkış gaz sıcaklığının tahmin edilebilmesi için yapay sinir ağları tabanlı bir model simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yine aynı çalışmada YSA tabanlı farklı bir model ile santral kazanı çıkışları olan buhar basıncı, ana buhar sıcaklığı, tekrar kızdırılmış buhar sıcaklığı, kızdırıcı püskürtme suyu valf pozisyonu çıkışlı bir model oluşturularak, model öngörmeli kontrol sistemine entegre edilerek kontrolör tasarlanmıştır. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre YSA tabanlı model öngörülü kontrolcü ile yapılan ana buhar sıcaklığı kontrolünün santralde verim artışı sağlayacağı belirtilmiştir (Sai and Reddy 2015).

Bu tezde de yapılan çalışmada termik santralin enerji üretimi prosesindeki ana girişlerine karşı kontrol çıkışları belirlenerek önce gerçek sistemden alınan veriler ile termik santral

modellenmiş, model başarımı sonrasında da, termik santral kazan kontrolü, bilinen çalışmalar ışığında NARX YSA tabanlı adaptif MRAK modeli ile ilk defa simülasyonla uygulanmış ve sunulmuştur.



BÖLÜM 2

TERMİK SANTRAL

2.1 TARİHÇE

Fosil yakıtlı termik santrallerinin endüstriyel kullanımlar için elektrik üretimi yapmalarının başlangıcı tarihsel olarak 1880'lerin sonlarına dayanmaktadır. İlk olarak kömürle çalışan pistonlu buhar makinasına akuple edilmiş basit bir DA generatör kullanılmıştır. Bu dönemde daha çok sokak aydınlatmaları için, kısa mesafelerde elektriğin dağıtımı gerçekleştirilmiştir. İlk merkezi üretim istasyonu Thomas Edison tarafından Eylül 1882 tarihinde New York'ta açılmıştır. Yalnızca sokak aydınlatmaları için kullanılan bu üretim tesisleri ticari anlamda başarı sağlayamamış olup bu nedenle yeni kullanım alanlarının bulunmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır. 1880, 1890'ların sonunda elektrikli tramvayların popülerliğinin yükselmesi ve metroda elektrik kullanımı ile elektrik üretimi ekipmanlarının inşası yaygınlaşmıştır (Flynn 2003).

İlk santral kazanı kömür ya da kömür gazı ile beslenebilen 0,9 MPa'da 150 °C'de buhar üretebilen ve 30 Kw jeneratöre bağlanabilen bir dizayn olmuştur. İlerleyen süreçle birlikte termik santrallerin tasarımları oldukça karmaşık bir sisteme dönüşmüştür. Günümüzde süper kritik şartlarda 28,5 MPa 600 °C 1300 Mw elektrik üretimini mümkün kılan santraller inşa edilebilmektedir (Smith 1998).

Daha sonraları araştırmalar işletme maliyetlerini azaltma ve verimi arttırmaya yönelik olarak yoğunlaşmıştır. Genellikle %30-40 arasında verim sağlayan Rankine Çevrimi üzerine dizaynlar yapılmıştır. Günümüzde DGKÇ sistemlerinde gaz türbini santrallerine ısı geri kazanımlı buhar kazanlarının eklenmesi ile oluşturulan kombine çevrimlerle termik santrallerde %50-%60 verim seviyeleri yakalanmaktadır (Flynn 2003). Günümüz termik santrallerinde küresel iklim değişikliği tezi ile birlikte, ısı enerjisinin edinimi sırasında ortaya çıkan atıkların çevresel etkilerinin en aza indirilmesi için proseslere eklemeler yapılmakta ve ekipmanlar geliştirilmeye devam edilmektedir.

2.2 GENEL ÇALIŞMA PRENSİBİ

Buhar santralleri, gaz türbini santralleri, dizel santraller ve nükleer enerji santralleri ısı enerjisini elektrik enerjisine çevirdiklerinden dolayı termik santraller olarak tanımlanır (Raja vd 2006).

Termik santral prosesini kısaca özetlemek gerekirse; farklı kaynaklardan elde edilen termal enerjinin buhar santralleri ve nükleer santrallerde, su buhar çevriminde kızgın buhar elde edilmesi için kullanılması ve elde edilen buharda ki termal enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi, nihai olarak mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü ile üretim prosesinin tamamlanması olarak özetlenebilir. Gaz santrallerinde ve dizel santrallerde de ikincil sistem olarak atık ısıdan faydalanılarak buhar santrallerinde bahsedilen proses işlenip kombine sistemler inşa edilmekle birlikte, dizel santraller ve gaz türbini santralleri termal enerjinin su buhar çevrimine aktarılmadan birincil olarak mekanik enerjiye dönüştürüldüğü sistemlerdir.

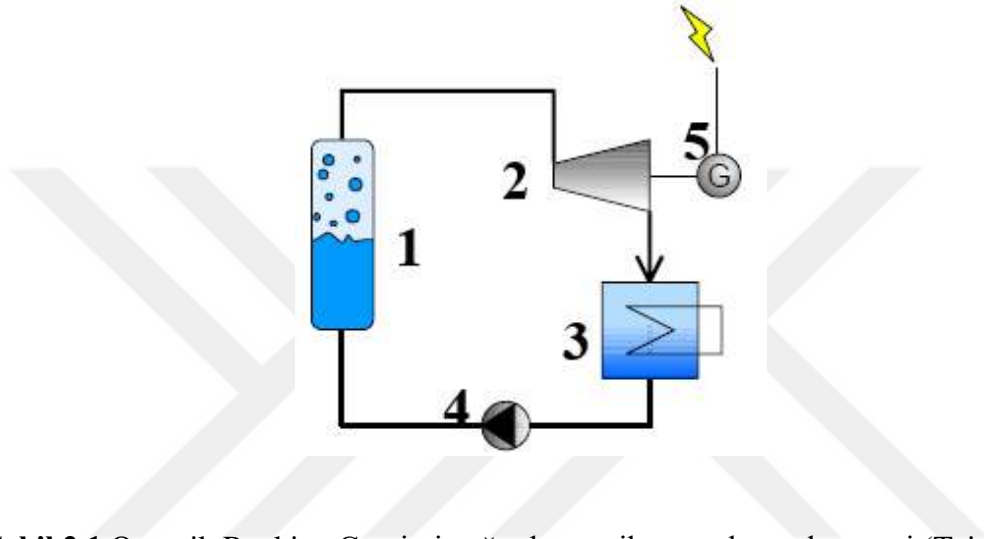
Tezde işlenecek olan Termik Santral yapısı katı yakıt kullanarak elektrik enerji üreten buharlı termik santrallerdir.

2.2.1 Rankine Çevrimi

Buhar kazanları ısı tüketici bir motora güç vermek için buhar sağlar. Bir termik santralde ısı tüketici olarak türbin kullanılır. Türbinler buharda bulunan termal enerjiyi dönme hareketi ile mekanik enerjiye çeviren ekipmanlardır. Elde edilen dönme hareketini işe dönüştürerek elektrik enerjisi elde etmek için türbin elektrik üretici genaratöre bağlanır. Türbin tarafından enerjisi alınmış buhar kondenseye gelerek yoğunlaştırıldıktan sonra, tekrar kazan besleme pompası ile kazana gönderilir. Buharın yoğunlaştırıldığı kondanser termik santralin yakınında bulunan soğutucu akışkan kaynağından beslenerek çalışan tipik bir ısı değiştiricidir. Soğutma suyu kaynağı deniz, nehir ya da soğutma kuleleri tarafından soğutulan kapalı çevrim bir soğutma sistemi olabilir. Enerji santrallerinde üretilen buharın basıncı oldukça yüksektir fakat türbinde basınç sert bir şekilde düşer. Bu nedenle sistemde basıncı tekrar elde etmek için pompa gereklidir. Bir akışkanı sıkıştırmak için gereken iş, akışkan gaz halinde iken sıvı halinin yaklaşık yüz katı kadar fazla olduğundan, pompa kondanserden sonraya yerleştirilir. Bahsedilen bu çevrime Rankine Çevrimi adı verilir ve çoğu modern buharlı termik santrallerin çalışma temelidir (Teir 2003). Şekil 2.1’de Organik Rankine Çevrimi, ana ekipmanlar ile yer almaktadır.

Termik santrale ait temel ekipmanların yer aldığı şekil 2.1 üzerinde, buhar elde edilmesi güç çıkışı ve sistemin tekrar buhar elde edilmesi aşamasına dönüşü kısaca özetlenmiş olup başlıca ekipmanlar;

- 1 . Buhar üretici/Kazan
- 2 Türbin
- 3 Kondanser
- 4 Besleme Suyu Pompası 'dır.



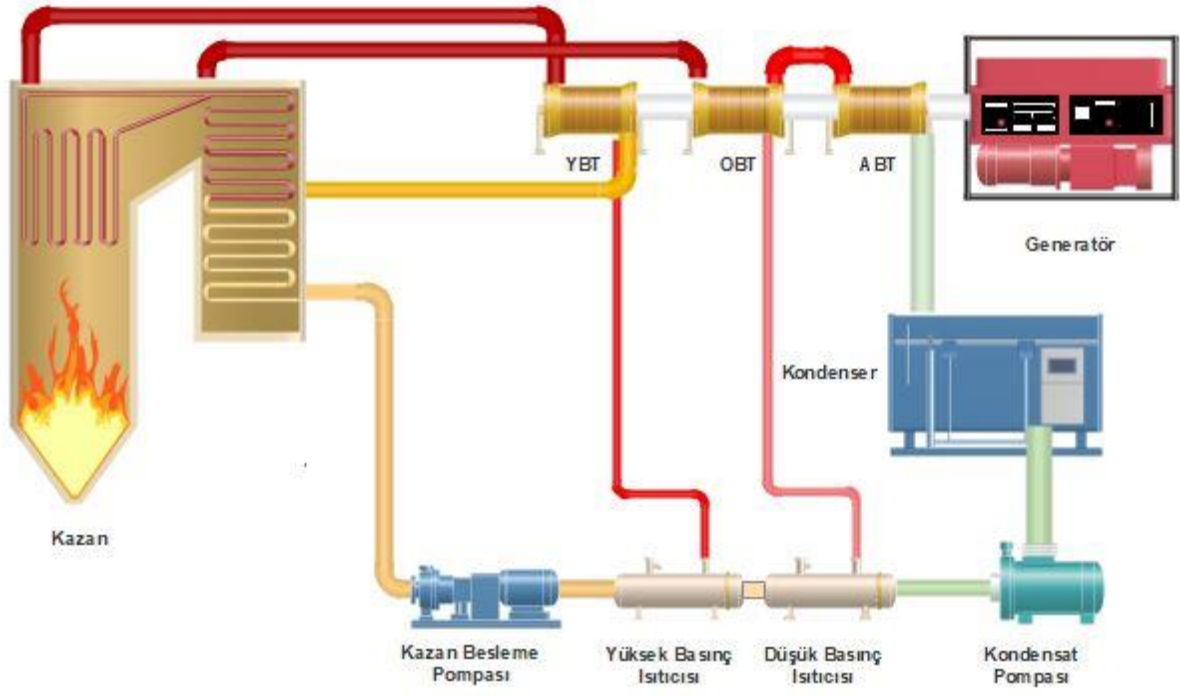
Şekil 2.1 Organik Rankine Çevrimi ışığında termik santral temel prosesi (Teir 2003).

İdeal Rankine Çevrimi içerisinde türbinin nihai olarak gücü aktardığı iş elemanı yer almamakla birlikte, yukarıda yer alan ve 5 numara ile tanımlanan generatör termik santral enerji üretimi iş elemanıdır.

Verimliliğin sanayinin her alanında olduğu gibi termik santral proseslerinde de yüksek önemi vardır. Gerek maliyetlerin düşürülmesi gerekse kaynak kullanımının azalarak çevre emisyonlarının azaltılması ve ürün başı maliyelerin düşürülerek talep büyümesi, ölçek ekonomisinin sağlanması maksadı ile termik santral üretim proseslerinde de verimlilik için çeşitli değişiklikler yapılmıştır.

Termik santrallerde Rankine Çevrimi'nin verimini artırmak için yapılan çalışmalarda çevrime bir tekrar kızdırma işlemi eklenmiştir. Yaklaşık olarak doyma basıncına kadar genişletilen su buharı tekrar kazana gönderilerek yeniden sabit basınç altında dizayn sıcaklığına kadar kızdırma işlemine tabi tutulur. Yine Şekil 2.2 'de görünen Rankine Çevrimi'nde yapılan rejenerasyon ile türbin kademelerinden alınan buhar, kazan giriş suyunu ısıtmakta kullanılarak

çevrim verimi yükseltilir. Türbin kademesinden alınan ara buharlar ile ısı değıştiriciler aracılığıyla kazan giriş suyu ısıtılarak sistem verimi yükseltilmiştir (Genceli 1998).



Şekil 2.2 Tekrar kızdırmalı Rejeneratif Rankine Çevrimi

2.3 TERMİK SANTRALE AİT ANA EKİPMANLAR

Modern Termik Santraller yıllarca süren araştırmalar, edinilen tecrübeler ve son teknolojiler ile birlikte gelişim gösterdi. Ana ekipmanlar hemen hemen aynı kalmış olmasına rağmen teknolojik gelişmeler, araştırmalar neticesinde verimlilik yükselişini sağlandı (Basu and Debnath 2015).

Katı yakıtlı termik santrale ait ana ekipmanlar;

- 1 . Buhar üretici/Kazan
- 2 Buhar Türbini
- 3 Kondanser
- 4 Besleme Suyu Pompası
- 5 Generatör' dür.

Yukarıda belirtilen ana ekipmanlar ile birlikte baca gazı SO₂ giderim üniteleri, baca gazı toz tutma üniteleri, soğutma suyu sistemleri, yatak-kontrol yağı sistemleri, kömür hazırlama ekipmanları, saf su üretim sistemi gibi büyük sistemlerde termik santral prosesinde yer almaktadır (Basu and Debnath 2015).

2.3.1 Buhar Üreteci/Kazan

Endüstriyel buhar üreteçleri yüksek basınç ve büyük debilerde buhar sağlayabilen büyük ve karmaşık ısı alışverişi ekipmanlarıdır (Souza 2012).

Genellikle termik santrallerde kullanılan kazanlar su borulu kazan tipinde olup su ve buhar, çapı küçük boru demetlerinin içerisinde hareket eder. Bunun nedeni ısı transfer yüzeyini artırılmasını sağlamaktır (Souza 2012).

Kazanların ana işlevi yanma prosesi neticesinde ortaya çıkan termal enerjiyi Rankine Çevrimi'nde bahsedilen ve sistemde kapalı çevrim içerisinde bulunan su ve buhara aktarmaktır. Yakıt olarak genelde katı yakıtlar kullanılmakla birlikte, yardımcı yakıt olarak ya da ana yakıt olarak sıvı yakıtlar kullanan kazanlarda mevcuttur.

Su için kritik basınç ve kritik sıcaklık sırasıyla 22,064 MPa kritik sıcaklık 374 °C'ye eşittir (Souza 2012). Su buhar çevriminde bu noktanın üzerine çıkıldığı taktirde su ıslak buhar fazına geçmeden doğrudan kuru buhar fazına geçmekte ayrıca çevrim verimi de yükselmektedir. Bu nedenle günümüz teknolojik koşullarında ultra süper kritik olarak adlandırılan 340 bar basınç ve 800 °C sıcaklıkta çalışabilen termik santraller inşa edilmektedir.

Bir kazan aşağıdaki şartları yerine getirmelidir

Güvenlik. Kazan çalıştığı esnada emniyetli olarak üretimi sürdürebilmelidir.

Erişilebilirlik. Kazan dizaynı bakım ve onarım çalışmalarının yapılabilmesine imkan vermelidir.

Kapasite. Kazan, ihtiyaç olan buharı üretebilmelidir.

Verimlilik. Kazan yanma prosesi sonucu açığa çıkan ısıyı maksimum düzeyde emerek akışkana aktarabilmelidir.

İlk yatırım maliyetleri ve bakım maliyetleri düşük olmalı inşası basit olmalıdır.

Herhangi bir şekilde alevlenebilen bir derz, alan bulunmamalıdır.

Hızlı bir şekilde üretime başlayabilmelidir.

İstenilen üretim seviyesine hızla çıkabilmelidir.

Bir kazanın performansı, kazanın gücü olarak da adlandırılan buharlaştırma kapasitesi yani buharlaştırılan su veya saatte üretilen buhar miktarı olarak tanımlanır. Aynı zamanda, yanan kg yakıt başına kg veya kg / saat / m² ısıtma yüzeyi olarak da ifade edilebilir (Raja vd 2006).

Kazanlar genel olarak aşağıda belirtilen ekipmanlardan meydana gelirler.

Ocak: Kazan içerisinde yanma prosesinin gerçekleştiği ısı enerjisinin elde edildiği alana ocak adı verilir.

Asıl ısıtma yüzeyleri: Yanma prosesi sonucu açığa çıkan sıcak gazlar ile buharlaşan suyun ısı transferini gerçekleştiren yüzeylere asıl ısıtma yüzeyleri adı verilir.

Kızdırıcı: Asıl ısıtma yüzeylerinde gerçekleşen ısı transferi ile oluşmuş buharı, sabit basınç altında sıcaklığını yükselterek proses sıcaklığına kadar kızdıran ekipmanlardır.

Su ısıtıcıları: Kazanda buhar üretimi için asıl ısıtma yüzeylerine verilen suyun sıcaklığını, çevrim verimini yükseltme maksatlı olarak arttıran ekipmanlardır.

Hava ısıtıcıları: Yanma prosesi sonucunda oluşan gazın bacadan atılmadan önce, kazana alınan taze havanın sıcaklığını arttırarak kazan verimi arttırmakta kullanılan ekipmanlardır.

Baca: Kazanda oluşan yanma gazlarının nihai olarak atmosfere salınımı için kazandan çekişi sağlayan ekipmanlardır (Genceli 1998).

Yukarıda sayılan ekipmanlar dışında büyük endüstriyel kazanlarda yeterli oksijenin sağlanabilmesi için taze hava besleme fanları, yanma prosesi öncesi kömür kurutma, kırma öğütme değirmen sistemleri, kazanda oluşan atık gazların uzaklaştırılması için cebri çekme fanları, yanma sonucu oluşan atık gazda bulunan kirleticilerin tutulması için SO₂ ve toz tutma üniteleri, asıl ısıtma yüzeylerinde buharlaşan sudan buharı ayırmak için dom emniyet ekipmanları, püskürtme sistemleri, kazanın devreye alınmasında ve yanmada bozulma meydana gelmesi halinde kullanılmak üzere fuel oil, motorin yakma sistemleri gibi farklı ekipmanlarda bulunmaktadır. Şekil 2.3 de akışkan yataklı çalışma prensibine sahip örnek bir kazan kesit görüntüsü verilmiştir.



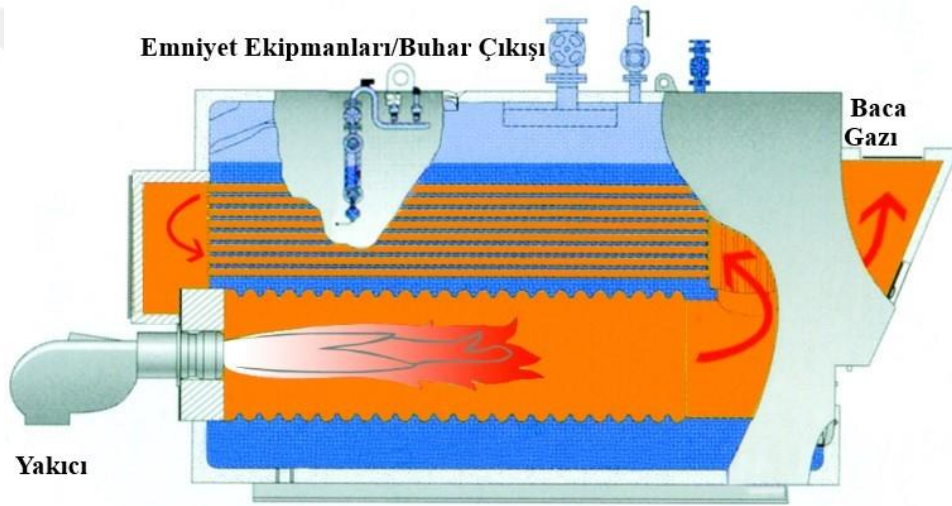


Şekil 2.3 Akışkan yatak kazan kesit görünümü (Teir 2003).

Kazanlar çeşitli sınıflandırma yapılarına sahiptirler; yanma odası yapısı ve suyun bulunduğu alana göre alev borulu kazanlar ve su borulu kazanlar olarak ayrılırlar.

2.3.1.1 Alev Borulu Kazanlar

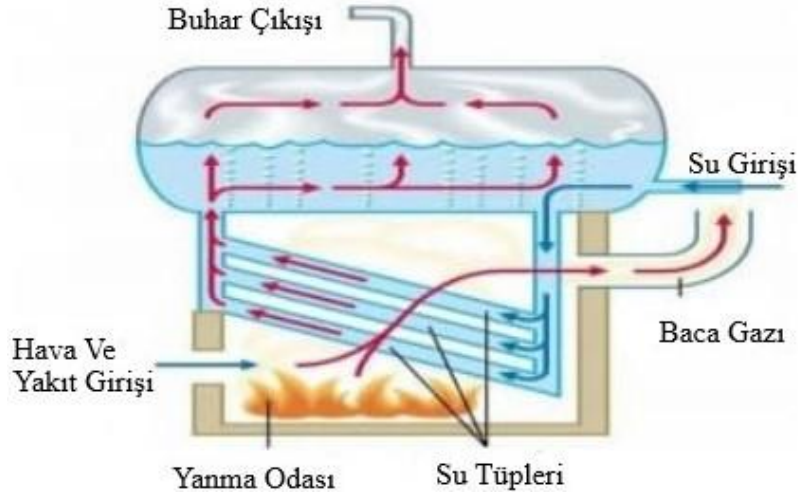
Alev borulu kazanlarda yanma sonucu oluşan sıcak gazlar boru demetlerinin içerisinde geçerek, kazan gövdesi ile boru demetleri arasında bulunan suyu buharlaştırırlar. Günümüzde bina ısıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Yakıt olarak katı yakıt, gaz, ya da sıvı yakıt kullanabilirler. Genellikle silindirik yapıda inşa edilmişlerdir (Sarkar 2015). Alev borulu kazana ait basit şema şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Alev borulu kazan (URL-2 2019).

2.3.1.2 Su Borulu Kazanlar

Yüksek buhar basınçları ve yüksek debilerin istendiği sistemlerde alev borulu kazanların inşasının zorlukları ve sistemlerin yavaş kalması nedeni ile su borulu kazanlar imal edilmiştir (Sarkar 2015). Günümüz termik santrallerinde ve endüstriyel kazanlarında genellikle kullanılan yapı su borulu kazan yapısıdır. Genel çalışma prensibi yanma odasında açığa çıkan sıcak gazların, içlerinde su veya buhar dolaşan boru demetleri arasından geçirilerek termal enerjinin su ve buhara aktarılmasıdır. Tipik su borulu kazan şekil 2.5’de gösterilmiştir.

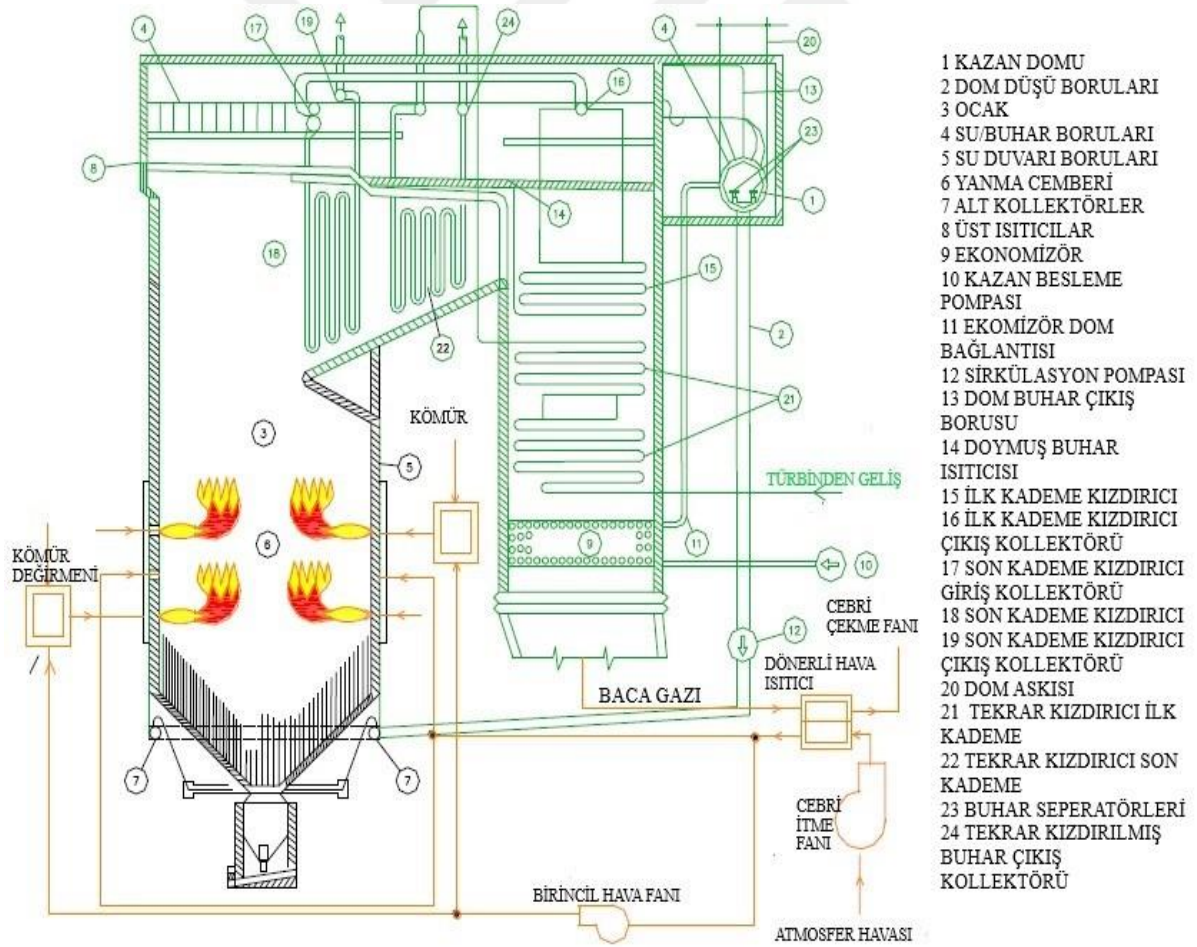


Şekil 2.5 Su borulu kazan (URL-3 2019).

Yukarıda bahsedilen sınıflandırma dışında kazanlar, su buhar çevriminde asıl ısıtma yüzeyinden gerçekleşen buharlaşma sonrası çevrimin devamlılığının doğal olarak gerçekleştiği, doğal sirkülasyonlu kazanlar ya da çevrim basıncını artırmak için sistemde pompa bulunan cebri sirkülasyonlu kazanlar olarak ayrılabilirler. Ayrıca asıl ısıtma yüzeylerinde gerçekleşen buharlaşma sonrası su ve buharın ayrıştırılması için kullanılan drama sahip domlu kazanlar ya da dram ekipmanının bulunmadığı tek geçişli kazanlar olarak da sınıflandırma yapılabilir. Teknolojide elde edilen gelişmeler ile birlikte kazan sınıflandırmalarına dolaşım sisteminde ki buhar basıncına göre sınıflandırmada eklenmiştir. Bu sınıflandırma tipinde çevrim basıncına göre kazanlar kritik altı basınç kazanı, süper kritik kazanlar, ultra süper kritik kazanlar olarak sınıflandırılır (Genceli 1998). Belirtilen sınıflandırma tiplerinin dışında katı yakıtlı santrallerde yakıtın yanma şekline göre sınıflandırma mevcuttur. Kömürün pulverize edilerek yakıldığı kazan sistemlerine pulverize kömür yakma sistemli kazan, bir yataklama ile askıda yakıldığı sistemlere de akışkan yakıtlı kazan sistemleri adı verilmektedir.

Ülkemizde kurulu linyit kömürü ile çalışan termik santrallerin ve ithal kömüre dayalı üretimi esas edinmiş termik santrallerin yakma sistemleri incelendiğinde, genellikle pulverize yakıtlı kazanlar, termik santral kazan sistemlerinde ilk sırada yer almaktadır. Bununla birlikte gelişen teknoloji ile beraber kritik altı basınç sistemli kazanlardan, ultra süper kritik kazanlı termik santrallere doğru bir evrilme mevcuttur. Bazı alanlarda aşırı kükürtlü kömürün çevreye vereceği zarardan korunma maksadı ile akışkan yataklı kazan kurulumları da gerçekleştirilmiştir.

Katı yakıtlı pulverize kömür yakma sistemli termik santrale ait genel kazan yapısı şekil 2.6’da görülmektedir. Değirmen olarak belirtilen, kömürün nemini alarak kurutan ve pulverize hale getiren sistemler, öğüttükleri bu kömürü birincil hava kuvveti ile ya da değirmen fanlarının etkisi ile kazan üzerinde görülen yakıcılara gönderirler. Pulverize hale gelmiş olan kömür, kömür yakıcıları ile yanma çemberi olarak ifade edilen alana püskürtülerek alev topu oluşumu sağlanır. Sıcaklığın etkisi ile su duvarı boruları olarak belirtilen yan duvarlarda dolaşan su buharlaşmaya başlar ve doyma sıcaklığına ulaşır. Doyma sıcaklığına ulaşan buharlı su karışımından doymuş buhar, domda yer alan seperatörler ile ayrılarak kızdırıcı kademelerine gönderilir. Kızdırıcı kademelerinde yanma sonrası oluşan gazlar ile doymuş buhar sabit basınç altında kızgın buhar haline getirilir. Kızgın buhar ana buhar hattı ile türbin YB kademesine bağlanır. Türbin YB çıkışından tekrar kazana gönderilen buhar yeniden sıcaklığı yükselttilerek kazandan türbin orta basınç kademe girişine gönderilir. Cebri itme ve cebri çekme fanları kazan içerisinde yeterli miktarda yanma havasını sağlamak için kullanılır.



Şekil 2.6 Katı yakıtlı pulverize kömür yakıcılı termik santral kazanı (Souza 2012).

Pulverize yakma sistemli kazanlar %99'un üzerinde bir yanma verimi elde edebilirler. Gelişmiş modern öğütücü değirmen teknolojilerinde tane pulverize kömür boyutu daha düşüktür ve daha az enerji tüketimi vardır. Yük cevap hızları çok iyidir öyle ki gaz yakıtlı ve sıvı yakıtlı kazanlarla karşılaştırılabilirler. Tüm kömür tiplerinde kullanılabilir olmaları da ekstra avantajlarındandır. Düşük NO_x yakıcılar, deSO_x ve deNO_x üniteleri kazanlara eklenerek çevreyle uyumlu hale getirilmişlerdir. Tüm bu avantajları ile birlikte son yıllarda dolaşımli akışkan yataklı yanma kazanları pulverize sistemin iyi cevap veremediği alanlarda, düzgün çalışma sergileyerek alternatif olmaya başlamıştır.

Tasarım ve işletme mühendisleri özellikle kazan tarafında uçucu kül ve cüruftaki yanmamış karbon miktarını azaltarak kazan verimini yükseltmeyi hedeflemişlerdir. Tüm çevrim verimini artırma yöntemleri ile birlikte, yanma verimi toplam termal verim açısından önemli bir yere sahiptir. Termal verimi artırılmasının yanında kazanlarda, güvenilirliğin artırılması ve arıza süresinin en aza indirilmesi de önemli tasarım ve işletme hedeflerindendir.

2.3.2 Buhar Türbini

Buhar türbinleri elektrik üretimi aşamasında en önemli güç aktarıcı organlardır. Türbin çalışması esnasında akışkanın enerji seviyesi akış hattı boyunca düşmeye devam ederek termal enerjinin mekanik enerjiye dönüşümü sağlanır. Tek bir türbin 1 MW ile 1000 MW arasında değişen güçlere sahip olabilir. Modern buhar santrallerinin 120 MW üzerinde termal verimliliği %38 ila %40 arasında değişebilir. Türbin teknolojisinde amaç akışkandan maksimum enerjiyi maksimum güvenilirlikte, en az maliyet, en az bakım ile en hızlı şekilde elde etmektir (Raja vd 2006).

Kazanda kızgın buhar haline gelmiş ve yüksek basınçta elde edilen buhar türbin girişin de bulunan dağıtım nozulları üzerinden bıçak olarak adlandırılan ve türbin rotoru boyunca sıralanmış kanatlara püskürtülür. Akışkan yani buhardan maksimum enerjiyi alabilmek için giriş aşamasındaki ilk bıçaklardan son aşamadaki bıçaklara doğru kanatlar giderek büyür ve formları değişkenlik gösterir. Elde edilmesi istenen güce göre türbin kademe sayısı değişkenlik göstermektedir. Günümüzde yüksek güçlü termik santrallerde genellikle kanatlar üç kademe şeklinde sıralanmıştır. İlk kademe yüksek basınç kademesi, ikinci kademe orta basınç kademesi, üçüncü kademe alçak basınç kademesi olarak adlandırılır. Tekrar kızdırmalı rejenatif Rankine Çevrimi uyarınca yüksek basınç kademesinden çıkan buhar tekrar kazana gönderilerek

sıcaklığı yükseltildikten sonra orta basınç kademesine geçiş yapar ve türbinden çevrim suyunun ön ısıtmasına ara kademe buharlar alınır. Çevrim açıklanırken bahsedildiği gibi tekrar kazana göndermenin amacı verimi yükselmektir. Şekil 2.7’de bir buhar türbini görülmektedir.



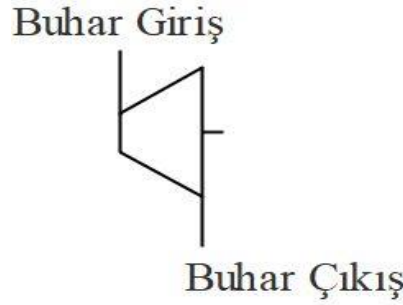
Şekil 2.7 Buhar Türbini (URL-4 2019).

Newton’un ikinci yasası olan hareket yasasına göre kuvvet, momentumun değişim oranı ($\text{kütle} \times \text{hız}$) ile orantılıdır. Yüksek hızlı jet buharı türbin bıçaklarına çarparak ilerlerken momentumu değişir bunun neticesinde buhar bıçaklara kuvvet uygular. Uygulanan bu kuvvet rotor şaftını döndürür böylelikle türbin çalışır (Flynn 2003). Şekil 2.8’de çeşitli form ve boyutta türbin kanatları görülmektedir.



Şekil 2.8 Çeşitli form ve boyutta türbin kanatları (URL-5 2019).

Buhar türbinlerinin eşdeğer kapasitede pistonlu buhar makinaları ile karşılaştırıldığında, daha az yer kaplama, daha basit temel konstrüksiyonuna sahip olma, daha az denetim isteme, daha düşük yağlama yağı tüketimi, yağsız egzoz buharı, piston titreşimi olmayışı, düşük bakım maliyeti, aşırı yük kapasitesi, yüksek güvenilirlik gibi üstün yönleri vardır (Basu ve Debnath 2015). Türbinin sembolik gösterimi Şekil 2.9 de verilmiştir.



Şekil 2.9 Türbin sembolik gösterimi.

2.3.2.1 Buhar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Bir buhar türbinin giriş ve çıkış basınçları ile türbin giriş buhar sıcaklığı türbinden alınabilecek teorik enerji miktarını belirler. Türbin buhar üzerindeki enerjiyi alırken, buhar sabit ve hareketli kanatların arasından akarak basıncı düşer ve genişler. Bir türbin kademesinde, gövdede sabit kanatlar (nozullar), rotor üzerinde ise hareketli kanatlar bulunur. Bu iki farklı kanat tipi buhardaki termal enerjinin mekanik enerjiye dönüşümü sağlarlar. Sabit kanatlar ya da nozullar buhardaki potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye dönüştürürler. Hareketli kanatlar ise Newton hareket yasası uyarınca enerjiyi mekanik enerjiye çevirirler (Sarkar 2015).

Bir buhar türbinin sınıflandırılması dört başlık altında yapılabilir.

Çalışma Şekillerine Göre

Buhar türbinleri çalışma şekillerine göre sınıflandırıldıklarında temelde aksiyon ve reaksiyon türbini olmak üzere iki çeşit türbinle karşılaşılmaktadır.

Aksiyon türbini: Bu türbin tipinde basınç değişimi yalnız sabit kanatlarda ya da nozullarda meydana gelir. Hareketli kanatların buhar giriş ve çıkış basıncı eşittir. Bu türbin tipinde

hareketli kanatlar kova şeklini anımsatır. Buhar genleşmesi ve kinetik enerjisinin yükselmesi nozullarda veya sabit kanatlarda meydana gelir, hareketli kanatlar bu kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürerek şaftı döndürür. Buhar türbin şaftı boyunca akarken basıncı düşerek çıkışta tasarımcının tasarlamış olduğu kondanser basıncı ya da başka tasarım basıncına ulaşır (Sarkar 2015).

Aksiyon türbinlerinden hareketli kanatlarda herhangi bir akış değişimi yaşanmaması nedeni ile daha düşük kademe verimliliği elde edilir (Raja vd 2006).

Reaksiyon Türbini: Reaksiyon türbinlerinin hareketli kanatlarını aksiyon türbinlerinden ayırt etmek oldukça kolaydır. Aksiyon türbinlerindeki simetrik yapının tersine reaksiyon türbinlerinde hareketli kanatlar, sabit kanat yapılarına benzer şekilde olup tam tersi olarak yerleştirilmişlerdir. Bu türbin tipinde basınç değişimi hem sabit kanatlarda hem de hareketli kanatlarda meydana gelmektedir. Hareketli kanatlarda buharın akışı esnasında meydana gelen basınç düşümü, hareketli kanatlarda da kinetik enerji dönüşümüne neden olmaktadır. Bu sayede rotor kanatları hem enerji dönüşümünü hem de enerji transferini sağlamış olur. Hareketli kanatlarda da akış hızının artması nedeni ile akışta değişkenlik az olduğundan kademe verimleri daha yüksektir (Raja vd 2006).

Buhar Akış Doğrultusuna Göre

Buhar türbinlerinde jet buharın türbin içerisinde ki akış doğrultusuna göre de sınıflandırma yapılabilmektedir.

Eksenel Akışlı Buhar Türbini: Buharın akışının rotor mili boyunca mile paralel olduğu türbin tipidir. Akış şekli açısından büyük turbo türbin generatör grupları için uygundur, bu nedenle günümüz türbinlerinde yaygın olarak kullanılır (Raja vd 2006).

Radyal Akışlı Buhar Türbini: Buharın türbin rotor miline dik akışla yol aldığı türbin tipidir. Bu türbinlerin düşük basınçlı bazı kademeleri eksenel olarak yapılır (Sarkar 2015).

Karışık Akışlı Buhar Türbini: Bu türbin tipinde buhar rotor miline paralel ve dik şekillerde karışık olarak hareket eder. Fiziksel yapı olarak çok sağlam olmakla birlikte, verimlilikleri

düşüktür. Daha çok termik santrallerin yardımcı ekipmanlarını çalıştırmak maksadı ile kullanılırlar (Raja vd 2006).

Basınç Kademeli Sayısına Göre

Basınç kademe sayısına göre türbinler tek kademeli buhar türbini ya da çok kademeli buhar türbinleri olarak sınıflandırılırlar. Genel anlamda basınç düşümü ihtiyacına ve türbin performans ihtiyacına göre seçilirler. Tek kademeli türbinlerin maliyetleri daha düşük iken, verimleri ve güçleri de düşüktür. Çok kademeli türbinlerde maliyetlerle beraber verim ve güç aralıkları da yükselir.

Egzoz Basıncı ve Sıcaklığına Göre

Buhar türbininin egzoz bağlantısının bir yoğunlaştırma ünitesine ya da başka bir çevrim veya makineye bağlanması neticesinde sınıflandırma yapılabilir. Egzoz buharının bir kondeserde yoğunlaştırılarak tekrar besleme suyu olarak kazana verildiği türbin yapısına kondenserli türbin adı verilir. Termik santrallerin genel yapısı bu türbin tipindedir. Türbin egzoz buharının yoğunlaştırılmadan doğrudan atmosfere atıldığı türbinlere kondensersiz buhar türbini adı verilir (Sarkar 2015). Geri basınçlı buhar türbini ise buhar basıncını bir ısıtma sistemi için en uygun seviyeye düşürdükten sonra reddeder, bu türbin türü gücün yanı sıra ısı enerjisi sağlar (Raja vd 2006).

Yukarıda bahsedilen sınıflandırmaların yanı sıra buhar türbinleri, giriş valflerinin kontrol yöntemlerine göre, türbin giriş buhar basınç aralığına göre, endüstrideki kullanımlarına göre, rotor shaftı bağlantı şekillerine göre, AB kademesi sayısına göre de sınıflandırılırlar.

2.3.2.2 Buhar Türbini Parçaları

Bir buhar türbinini meydana getiren temel parçalar, türbin rotoru, türbin gövdesi (kasa), yataklar ve döndürme dişlisidir.

Rotor mil üzerine monte edilmiş farklı sayıda disklerden meydana gelir. Küçük çaplı rotorlar tek parça katı dövme olarak imal edilirler. Hareketli kanatlar rotor üzerine monte edilir.

Türbin gövdesi türbinin hızla devreye alınmasına ve hızlı yük alıp atmaya müsaade edecek şekilde namlu tipinde imal edilmektedir. Kasa tek, iki ya da üç katmandan oluşabilir. Kasa eksenini boyunca sabit kanatların yerleşebileceği alanlar oluşturulur. Alt ve üst kasa olmak üzere iki ayrı kısımdan meydana gelirler. İki ya da üç katmandan meydana gelen kasa yapılarında termal genişleme ile oluşabilecek zararı minimize etmek için kasa aralarında daha düşük sıcaklıkta buhar dolaştırılır.

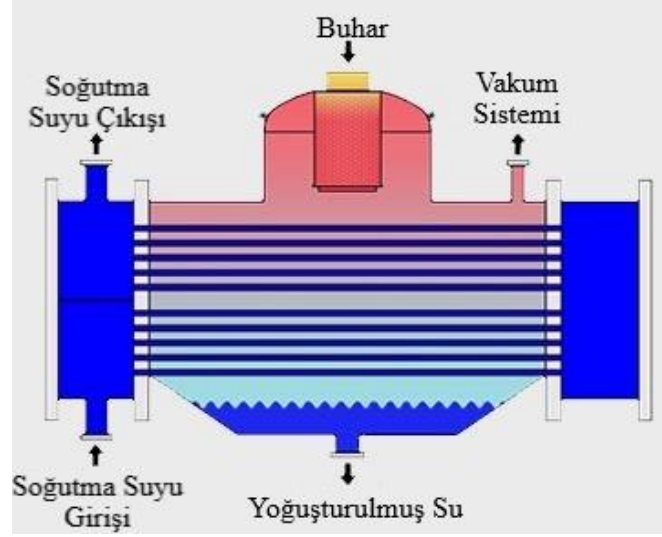
Yataklar türbin rotorunu taşımak ve yağlama sistemleri ile neredeyse sürtünmesiz dönmelerine izin vermek için kullanılır. Türbin yatakları eksenel ve radyal yönde konumlandırılabilirler.

Döndürme dişlisinin görevi türbinin durdurulduğunda, rotorun soğuması esnasında devamlı aynı pozisyonda kalması ile oluşabilecek sehimlerin önüne geçmektir. Operasyonlar sonrası türbin rotor sıcaklığı üretici tarafından belirlenen sıcaklığa düşene kadar düşük devirlerde döndürülür. Tahrik için genelde elektrik motorları kullanılmaktadır. Döndürme dişlisi türbin OB, AB kademeleri arasına yerleştirilebileceği gibi AB ile generatör arasına da yerleştirilebilir.

Yukarıda sayılan ana parçaların dışında buhar türbinlerinde, türbin hız-yük kontrol için türbin valf sistemleri, valflerin açma, kapama işlemlerini gerçekleştirmek üzere yüksek basınç yağı ve kontrol yağı sistemleri, ani vakum bozulmalarından korumak üzere kurşun emniyet basınç boşaltma yapıları, yüksek hız koruma sistemleri, yatak yağlama sistemleri, buhar sızdırmazlık yapıları, farklı basınç kademeleri ile imal edilmiş türbinlerde bağlantı kaplini gibi alt ekipmanlar ve bölümler bulunur.

2.3.3 Kondanser

Kondanser türbin içerisinde kanatlar arasından ilerleyerek enerjisini bırakmış olan buharın son kademedan sonra sisteme yeniden gönderilmesi için yoğunlaştırulmasını sağlayan ekipmandır. Kondanserler vakum altında çalıştırılarak türbine giren buharın iş yapma yeteneğinin yükseltilmesi ve türbin veriminin maksimum orana çıkarılması sağlanır (Basu ve Debnath 2015). Şekil 2.10 da su soğutmalı vakumlu bir kondanser görülmektedir.



Şekil 2.10 Su soğutmalı kondanser (URL-6 2019).

Türbin son kademesinde çıkan buhar şekil 9 da görülen buhar girişinden kondansere giriş yapar. Soğutma suyunun içerisinden geçirildiği boru demetlerinde ısınıp kaybeden buhar yoğunlaşarak kondanserin su çıkışından sisteme tekrar beslenmek üzere alınır. Vakum sistemi daimi olarak kondanser basıncını negatif tutarak verimlilik artışı sağlar. Soğutma suyu olarak deniz suyu, nehirlerden alınan su ya da kapalı çevrim soğutma suyu sistemleri kullanılabilir.

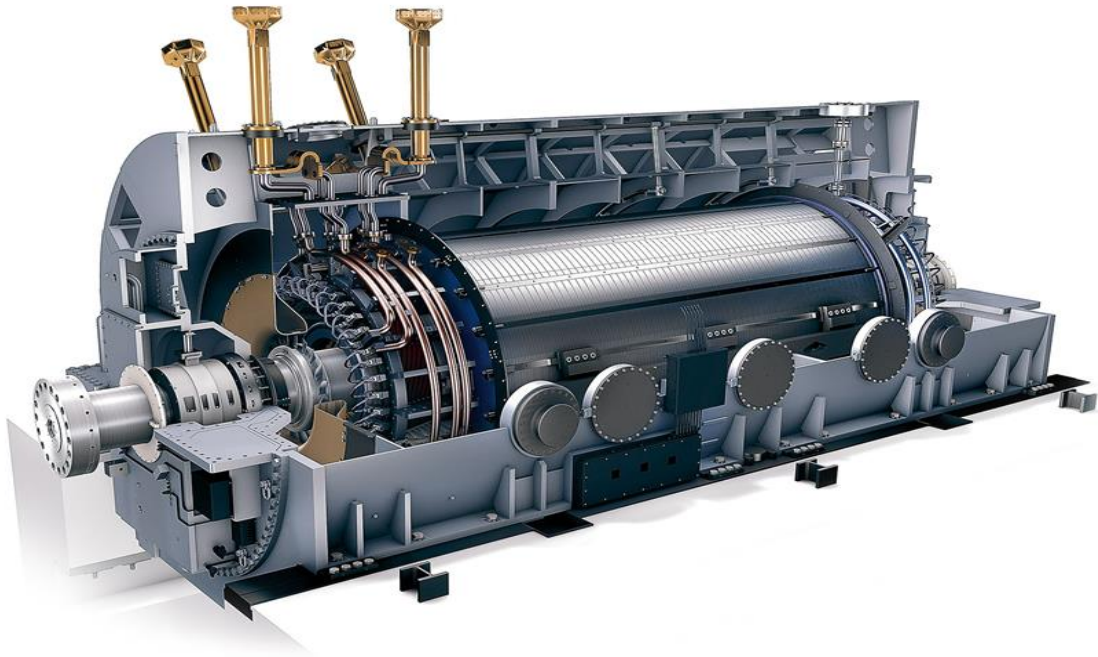
2.3.4 Kazan Besleme Suyu Pompası

Su buhar çevrimi besleme suyunun tankından itibaren başlar. Tank sonrasına yerleştirilmiş olan besleme suyu pompasının görevi besleme suyu basıncını kazan için istenilen seviyeye çıkararak besleme suyunun sisteme gönderilmesini sağlamaktır (Teir 2003).

Besleme suyunun debisi, işletmenin müsaade edilen maksimum buhar tüketiminin 1,25 katı, işletme basıncının ise 1,1 katına kadar suyu besleyecek büyüklüğe sahip olmalıdır (Genceli 1998). Besleme pompalarından tahrik sistemi olarak elektrikli motorlar kullanılabildiği gibi, küçük buhar türbinleri tarafından tahrik edilen besleme suyu pompalı sistemlerde bulunmaktadır.

2.3.5 Generatör

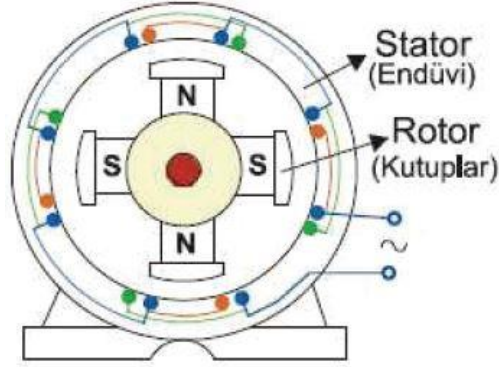
Termik santrallerde generatör en önemli ekipmanlardan biridir. Buhar türbini tarafından tahrik edilerek, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Generatörler ana olarak iki parçadan meydana gelirler dönen kısım olan rotor ve sabit kısım olan stator. Rotor bir DA besleme ile manyetik alan oluşturacak şekilde bobinlerle sarılır ve statorun iç çevresi boyunca dönecek şekilde tasarlanır (Warne 2000). Şekil 2.11 de bir generatörün kesit resmi görülmektedir.



Şekil 2.11 Turbo generatör (URL-7 2019)

Senkron generatörler manyetik alan dönme hızının rotor dönme hızına eşit olması sebebiyle senkron olarak adlandırılırlar. Ayrıca dönme hızları ve şebeke frekansına bağlı olarak iki ya da dört kutuplu olarak imal edilmektedirler. Rotor iki kutuplu imalatlarda 3000 devir/dk hızla dönmesine karşılık 4 kutuplu makinalarda bu 1500 devir/dk olarak dizayn edilmiştir (Raja vd 2006). Dizayn edildikleri bu yüksek hız nedeni ile turbo makinalar sınıfına girerek turbo generatör olarak adlandırılırlar. Generatörler doğrudan türbin miline bağlı olarak türbin hızı ile aynı hızda dönerler. Generatörün dizayn edilmiş olduğu hızı türbin hızını belirlemektedir. Buhar türbini tarafından tahrik edilen generatör rotoru dönmeye başlar, şekil 2.12’de temel çizimi görülen generatörde rotora ikazlanma akımı verilir. Verilen bu ikazlanma akımı ile generatör rotoru üzerinde ki sargılarda manyetik alan indüklenir. İndüklenen bu manyetik alan

çizgileri stator sargılarını keser. Dönme hareketi ile birlikte stator sargılarından geçen manyetik alanın yoğunluğu zamanın bir fonksiyonu olarak değişecektir. Bu nedenle rotora enerji verildiğinde stator sargılarında EMK indüklenir. İndüklenen bu EMK harici yüke elektrik çıkışı verebilecektir ve çıkış voltajının frekansı rotor hızı ile orantılıdır (Basu ve Debnath 2015).



Şekil 2.12 Temel generatör yapısı (URL-8 2019).

Generatör şebekeye bağlandığında rotor şebekenin senkron torkuna kilitlenir ve rotor hızı şebeke frekansı tarafından yönetilir. Stator bobinleri stator çevresi boyunca çeşitli kombinasyonlarla (seri, paralel, seri paralel) üç ayrı bobin demeti şeklinde yerleştirilir. Dizilim neticesinde stator çıkışında birbirinden 120° farklı üç ayrı frekansta AA stator gerilimi elde edilmiş olur (Basu ve Debnath 2015).

Rotor ikazlama akımı rotor miline akuple edilmiş ve rotor sargısı uçlarına bağlanmış iki izole bilezik tarafından DA olarak verilir. DA besleme geriliminin pozitif ucu bileziklerden birine negatif ucu ise diğerine bağlanılır. Bu sayede rotorun açısıl konum ve hızından bağımsız olarak rotora aynı ikaz akımı verilmiş olur. Bileziklere pozitif ve negatif uçların aktarılmasını sağlamada fırçalar kullanılmaktadır. Fırçalar yumuşak yapısı ile bileziklere zarar vermemesi ve yüksek iletkenlik katsayısı nedeni ile karbondan imal edilirler (Kiameh 2002). Rotora verilecek olan ikaz akımı generatör yüküne, gerilim seviyesine ve çalışma şekline göre (endüktif veya kapasitif) farklılık gösterdiğinden, değişken ikaz akımı sağlamak için günümüzde tristör tetiklemeli ikaz sistemleri kullanılmaktadır. Generatörler kutup şekillerine göre yuvarlak rotorlu ya da çıkık kutuplu senkron generatörler olarak sınıflandırılabilirler gibi, sargıların soğutma şekillerine göre, hidrojen soğutmalı, hava soğutmalı ya da su soğutmalı generatör olarak da sınıflandırılabilirler.

2.3.5.1 Generatör Bileşenleri

Bir generatörü meydana getiren temel parçalar, rotor ve statordur.

Rotorlar, yüksek hızlı dönen elemanlardır. Elektromanyetik ve termal yüklerin yanı sıra ciddi dinamik, mekanik yüklemeye maruz kalırlar. Generatördeki en kritik bileşenler rotor üzerine monte edilmiş tutma halkalarıdır (kep). Bu bileşenler yüksek gerilimli işlemler için çok dikkatli bir şekilde tasarlanmışlardır. Stator, terimden de anlaşılacağı gibi durağandır, ancak titreşim ve burulma yükleri açısından, ayrıca elektromanyetik, termal ve yüksek voltaj yüklemesi açısından da önemli dinamik kuvvetler görür. Statorun en kritik bileşeni tartışmasız stator sargısıdır, çünkü çok yüksek maliyetli bir maddedir ve yukarıda açıklanan tüm sert etkilerin üstesinden gelmek için tasarlanmalıdır. Stator problemlerinin çoğu sargılar da oluşur (Klemper and Kerszenbaum 2008).

Senkron generatörün rotoru, standartlara ve ihtiyaçlara uygun olarak, sürekli yüksek senkron hızda dönme kabiliyetine sahip, yüksek derecede mühendislikle işlenmiş bir birimdir. Ana mil, rotor rulman ya da yataklarını yerleştirmek için boşluklara sahiptir. Rotor milinin aksel olarak orta bölümü manyetik kutuplara sahip rotor çekirdeğidir. Çıkık kutuplu ve yuvarlak rotorlu olmak üzere iki tip olarak imal edilen rotorda, çıkık kutuplar gözle rahatlıkla görülebilirken, yuvarlak rotorlu imalatlarda ise yalnız çap büyümesi göze çarpar. Rotor aksel merkezinde sargıların yerleştirilmesi için oluklar açılmıştır (Grigsby 2008).

Genel olarak rotor alaşımlı çelikten dövülerek imal edilir. Yaklaşık olarak gövdenin üçte ikilik bölümü sargıların yerleştirileceği oluklardan, geri kalan kısmı ise sargı desteklerinden meydana gelir. Rotor sargılarından bobin kesitlerini düşürmek için dikdörtgen kesitli teller sargı malzemesi olarak kullanılır. Bobinler rotor tam hızla döndüklerinde büyük bir merkezkaç kuvveti altındadır, bu nedenle her iki rotor başında bobinleri sabitlemek için bu merkezkaç kuvvetine dayanım sağlayabilecek tutma halkaları kullanılır (Basu ve Debnath 2015). Kullanılan tutma halkaları mangan içeren özel alaşımlardan imal edilir ve ısıtılarak sıkı geçme şeklinde rotor başlarına sabitlenirler. Rotorların üzerinde soğutma havası ya da akışkan olarak soğutulmuş hidrojenin ilerleyebilmesi için soğutma delikleri bulunabilir. Ayrıca mil üzerinde her iki tarafta rotorun soğutulmasında soğutucu akışkanın akışının sağlanması için fanlar yer alır. Bununla birlikte yine rotor üzerinde oluşabilecek titreşimlerin giderilmesi için balans delikleri de bulunmaktadır.

Stator çekirdekleri her biri ince bir vernik kaplama ya da ısıl işlemle üretilen oksit tabakası ile elektriksel olarak izole edilmiş ince alaşımlı çelik veya lamine sac yapılardan meydana gelir. Kullanılan çelik içerisinde küçük miktarda silikon, çeliğin direncini artırarak girdap akımlarından kaynaklanan kayıpların azalmasına sağlar. Statorda oluşan histerisiz kayıplarını azaltmak için çelik çok dikkatli bir şekilde işlenir (Warne 2000). Lamine sac plakalar 0,35 mm veya 0,5 mm kalınlığındadır. Sıcaklık ölçüm elemanları çekirdeğin en sıcak bölgelerine monte edilir (Kiameh 2002). Birleştirilmiş lamine plakaların montaj sırasında ve sonrasında düzgün sıkıştırılması ve doğru bir şekilde yerleştirilmesi büyük önem taşır. Generatörde meydana gelebilecek anormal operasyon durumlarında, çekirdekten akacak olan aşırı akımlar çekirdeğin bozulmasına neden olabilir.

Stator sargıları stator çekirdeğini oluşturan lameller ile belirlenen yarıklara yerleştirilir. Yarıklar sert bir yalıtım malzemesi ile kaplandıkları gibi, sargılar da generatörde üretilen gerilim seviyesine göre kalınlığı belirlenen yalıtkan izolasyon malzemeleri ile kaplanırlar (Warne 2000).

Stator ana çekirdek ve sargılarda soğutma dizaynı büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle dizayn yapılırken girdap akımlarının oluşturacağı ısı hesaplamalar yapılarak buna göre soğutma yöntem ve büyüklüğü seçilir. Hidrojen soğutmalı sistemlerde hidrojen için gerekli olan basınçlı kap vazifesi stator çerçevesi (kasası) tarafından görülür. Ayrıca çekirdek ve sargılar için gerekli olan mekanik destek stator çerçevesi tarafından sağlanır. Hidrojen soğutmalı sistemlerde hidrojenin soğutulması için kullanılan ısı değiştiriciler de stator çerçevesi içerisine yerleştirilmiştir. Çerçeve yapısı güç sistemlerinde meydana gelebilecek olan ani olaylara veya generatörde meydana gelebilecek arızalar neticesinde oluşabilecek yüksek gerilimlere dayanabilmelidir (Klemper and Kerszenbaum 2008).

BÖLÜM 3

YAPAY SİNİR AĞLARI

3.1 TARİHSEL GELİŞİM

Yapay sinir ağlarının tarihsel gelişimi incelendiğinde ilk doğuş aşamalarında çok fazla itibar görmeden birkaç inceleme ile geçildiği görülmektedir. Nitekim ilk olarak Warren McCulloch, ve Walter Pitts 1943 yılında yapay sinir ağı fikrini ortaya atmışlardır. Fakat öğrenme ile ilgili olarak herhangi bir yöntemleri bulunmaması ve kullanıcıların ağırlık matrislerini elle ayarlamak zorunda olmaları nedeniyle YSA'lar kullanıcılar tarafından arka sıralara doğru itilmek zorunda kalmıştır.

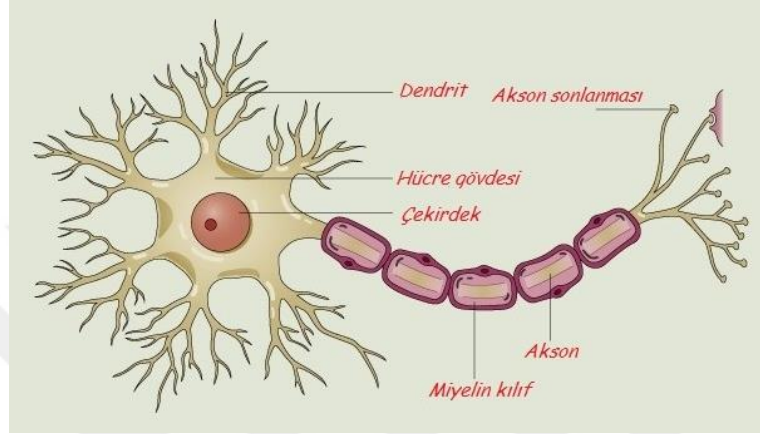
1958 yılına gelindiğinde Frank Rosenblatt tarafından sinir ağlarının eğitimi noktasında günümüzde de kullanılan geri yayılım algoritması fikri ortaya atılarak yeni bir atılım başlatılmıştır. Geri yayılım algoritmasının beynin bir taklidi olarak geliştirilmekle birlikte, YSA katmanları ve nöron sayıları yükseldikçe algoritma yavaşlamakta olduğundan yaygın bir kullanım alanı bulamamıştır. Bununla birlikte 1980'ler 1990'ların başında YSA'lar ile ilgili olarak eklenen hesaplama yöntemleri ile geri yayılım algoritması daha da kullanılır hale gelmiştir. Yine de o dönem kullanılan işlemcilerin hızları dolayısı ile hesaplama yetenekleri nedeni ile çok yaygın uygulama alanları bulunamamıştır.

2006 yılına gelindiğinde Hinton tarafından bulunan YSA'ları eğitme yönetimi ve işlemcilerde ki gelişmelerin etkisi ile YSA için yaygın bir kullanım alanı bulmuştur (Heaton 2015).

3.2 GENEL

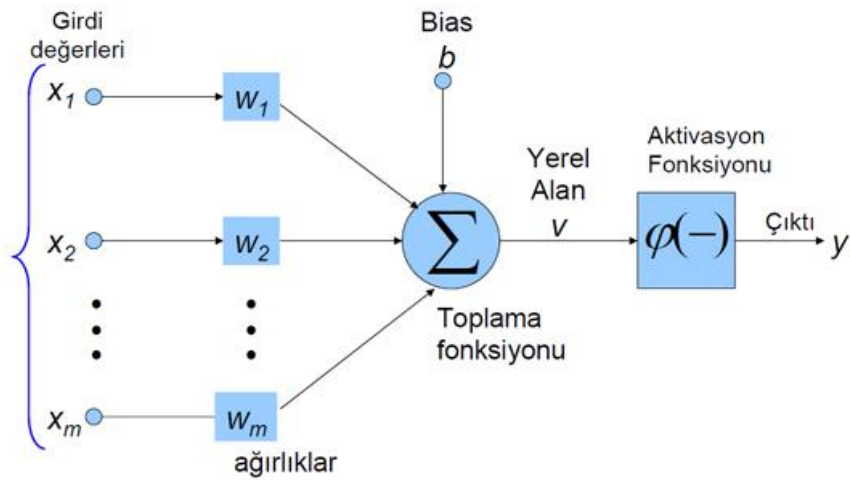
YSA'ların temeli insan beyninde ki hücre yapılanmasına dayanması nedeni ile öncelikle sinir hücrelerinin genel yapısını incelemek gerekir. Sinir sistemi oluşturan temel yapı birimi sinir

hücreline nöron adı verilmektedir. Bir nöron yapısı, sinyalleri diğer hücrelerden dendritler ile alır, hücrede gerçekleştirilen fonksiyonla başka hücelere iletmek üzere aksonlara gönderir. Genel nöron yapısı Şekil 3.1’de verilmektedir. Bir nöron dendritler, hücre gövdesi, hücre çekirdeği, miyelin kılıf ve aksonlardan meydana gelmektedir. YSA temel yapısı oluşturulmasında da tıpkı sinir hücreleri gibi sinyallerin girişi, belirli bir eşik fonksiyondan geçirilmesi daha sonrada diğer hücelere iletilmesi kurgulanmıştır.



Şekil 3.1 Biyolojik sinir hücresi (URL-9 2019).

YSA nöron yapısında dendrit işlevi girdi değerleri ve girdi ağırlıkları ile tanımlanmaktadır, hücre yapısı toplama fonksiyonu ve aktivasyon yapısı ile tamamlanarak, oluşturulan çıktılar ile temel bir YSA düğümü şekil 3.2’de meydana gelmiş olur.



Şekil 3.2 YSA nöron modeli (URL-10 2019).

İnsanoğlunun doğumu itibari ile devamlı olarak gelişen öğrenme yeteneği karşısından bugün saniyeler içerisinde gerçekleştirmiş olduğumuz işlemlerin bilgisayarlar tarafından taklit edilebilmesi çok uzun kodlama ve çok uzun zamanlar alabilmektedir. Örneğin bir günün sabahında tanıştığımız bir kişiyi öğleden sonra tekrar gördüğümüzde beynimiz tarafından saniyeler içerisinde gerçekleştirilen bir tanılama işlemi bilgisayarlar tarafından genel kodlama mantığı üzerinden gidildiği takdirde çok büyük zamanlar ve işlem yığınları gerektirmektedir. En basit şekliyle YSA beynin belirli bir görevi veya işlevi yerine getirmek için kullandığı sistematığı modellemek amacı ile tasarlanmış bir makinedir.

YSA öğrenilen bilgiyi saklama ve daha sonra kullanım için uygun hale getirme özelliğine sahip paralel yapılardan oluşan bir işlemcidir. İnsan beyni ile karşılaştırıldığında, bilgiyi bir öğrenme süreci sonrası edinmesi ve ağırlıklar yolu ile bunu saklaması açısından benzerlik göstermektedir (Haykin 2010).

3.3 YAPAY SİNİR AĞLARI ANA ÖĞELERİ

Bir YSA nöronu şekil 3.2’de görüldüğü gibi temelde 5 öğeye sahiptir. Düğüm olarak da adlandırılan nöronların farklı öğrenme teknikleri kullanılması ya da farklı sayılardan oluşmaları, farklı şekillerde bir araya gelmeleri ile farklı YSA türetilmiş olur.

3.3.1 Girdiler

YSA’ya gelen bilgiyi temsil etmektedirler. Tıpkı insan temel beş duyu organından beyine iletilen dış ortam bilgileri gibi YSA için de dış ortamdan aktarılan bilgileri temsil ederler. Aynı zamanda farklı nöronlar tarafından ağı oluşturan yapı içerisinde birbirlerine iletilen bilgiler de o nörona ait girdileri temsil eder. Girişler X ile gösterilerek giriş sayısına göre alt indis ile temsil edilirler ($X_1, X_2, \dots, X_i$).

3.3.2 Ağırlıklar

Ağırlıklar yapay sinir ağı hücresine gelen bilgilerin yani X ’lerin yapay sinir ağı hücresi üzerindeki etkisini belirleyen katsayılardır. Katsayısı büyük olan girişin YSA hücresi üzerinde ki etkisi, katsayısı küçük olan hücreye göre daha fazla olup, YSA tarafından katsayısı büyük

olan girdi daha önemli olarak belirlenmiş demektir (Öztemel 2006). Ağırlıklar W ile gösterilerek, her bir ağırlık sahip olduğu giriş indisi ile temsil edilir ($W_1, W_2, \dots, W_i$).

3.3.3 Toplama Fonksiyonu

Hücreye gelen tüm girdilerin hücre üzerinde ki net etkisini belirlemek için toplama fonksiyonu kullanılır. Bazı hücrelerde gelen bilgilerin ağırlıklar ile çarpımlarının toplanması yerine, en büyüğü, en küçüğü, en sık tekrarlananı gibi farklı seçim yöntemleri de kullanılabilir. Toplama işlemi matematiksel ifadesi 2.1 de gösterilmiştir.

$$NET = \sum_{n=i}^{\infty} X_i \cdot W_i \quad (3.1)$$

3.3.4 Aktivasyon (Eşik) Fonksiyonu

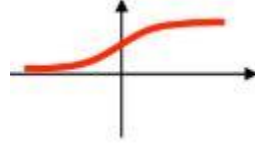
Hücreye gelen NET girdilere karşılık olarak hücrenin vereceği tepkiyi ve bu tepki sonucunda üreteceği çıkışı belirleyen fonksiyonlardır. Aktivasyon fonksiyonlarının seçimine dair herhangi bir kural bulunmayıp, tasarımcı tarafından yapılacak olan deneme yanılmalara göre seçim yapılabilir. ÇKA'lar da yoğunluklu olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonu sigmoid fonksiyonudur. Aktivasyon fonksiyonlarının yapmış olduğu işlem neticesinde vermiş oldukları çıktılar genel olarak;

$$f(NET) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } W_1.X_1 + W_2.X_2 + \dots + W_i.X_i \geq T \\ 0 & \text{eğer } W_1.X_1 + W_2.X_2 + \dots + W_i.X_i < T \end{cases} \quad (3.2)$$

ile özetlenebilir.

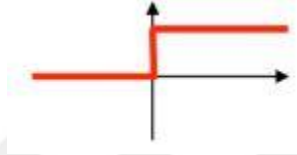
Eşik fonksiyonların çoğunlukla kullanılan Sigmoid Fonksiyonu şekil 3.3'de, Basamak Fonksiyonu şekil 3.4'de, İşaret Fonksiyonu şekil 3.5'de, Doğrusal Fonksiyon şekil 3.6'da, Parçalı Doğrusal Fonksiyon şekil 3.7'de, Hiperbolik Tanjant Fonksiyonu şekil 3.8'de, ReLU Fonksiyonu şekil 3.9'da, Yumuşak ReLU Fonksiyonu şekil 3.10'da verilmiş olup, fonksiyonların denklemleri ile birlikte aşağıda yer almaktadır.

Sigmoid Fonksiyonu: $f(NE T) = \frac{1}{1+e^{-NE T}}$ (3.3)



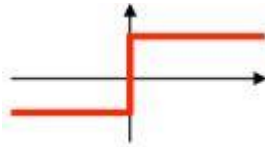
Şekil 3.3 Sigmoid fonksiyonu (URL-11 2019).

Basamak Fonksiyonu: $f(NE T) = \begin{cases} 0 & NE T < 0 \\ 0,5 & NE T = 0 \\ 1 & NE T > 0 \end{cases}$ (3.4)



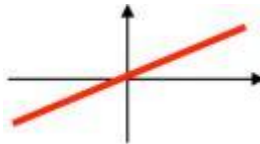
Şekil 3.4 Basamak fonksiyonu (URL-11 2019).

İşaret Fonksiyonu : $f(NE T) = \begin{cases} -1 & NE T < 0 \\ 0 & NE T = 0 \\ 1 & NE T > 0 \end{cases}$ (3.5)



Şekil 3.5 İşaret fonksiyonu (URL-11 2019).

Doğrusal Fonksiyon: $f(NE T) = NE T$ (3.6)



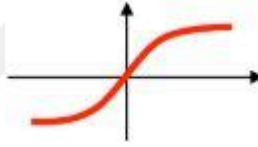
Şekil 3.6 İşaret fonksiyonu (URL-11 2019).

$$\text{Parçalı Doğrusal Fonksiyon : } f(NE T)=\begin{cases} 1 & NET > \frac{1}{2} \\ NET + \frac{1}{2}, & -\frac{1}{2} < NET < \frac{1}{2} \\ 0 & NET < -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (3.7)$$



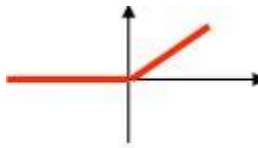
Şekil 3.7 Parçalı doğrusal fonksiyon (URL-11 2019).

$$\text{Hiperbolik Tanjant Fonksiyonu: } f(NE T) = \frac{e^{NE T} - e^{-NE T}}{e^{NE T} + e^{-NE T}} \quad (3.8)$$



Şekil 3.8 Hiperbolik Tanjant Fonksiyonu (URL-11 2019).

$$\text{ReLU Fonksiyonu: } f(NE T) = \max(0, NE T) \quad (3.9)$$



Şekil 3.9 ReLU fonksiyonu (URL-11 2019).

$$\text{Yumuşak ReLU Fonksiyonu: } f(NE T) = \ln(1 + e^{NE T}) \quad (3.10)$$



Şekil 3.10 Yumuşak ReLU fonksiyonu (URL-11 2019).

3.3.5 Çıkış İşlevi

YSA girişlerinin ağırlıklar ile çarpımı sonucu toplama fonksiyonunun uygulanmasının ardından eşik fonksiyonu sonucu oluşan birim çıktıları bu birim üzerinden diğer nöronların girişlerine ya da YSA çıkışına yönlendirilir. Bir nöronun birçok girdisi olabilmekle birlikte tek bir çıktısı bulunur ve bu çıktı istenilen sayıda çoğaltılarak ilgili birimlerin girdisi olarak kullanılabilir. Biyolojik sinirlerden esinlenerek düzenlenen bu durum tıpkı biyolojik sinirler gibi çok giriş tek çıkış olarak özetlenebilir.

YSA'nın gerçekleştirmiş olduğu fonksiyonlar ve almış aldığı ağırlıklar göz önüne alındığında katmanlar arasında gerçekleşen işlemler ve bu işlemler neticesinde üretilen çıktının net bir matematiksel ifadesi olmadığından YSA mühendislik açısından kara kutu olarak nitelendirilir. YSA katmanlarında gerçekleşen işlemlerin matematiksel net ifade edilemiyor olması kara kutu diye tabir edilen bu alan işlemlerine güveni azaltsa da gerçekleştirilen uygulamalar neticesinde yakalanan başarımlar gün geçtikçe uygulamalarda ki kullanımını artırmaktadır (Öztemel 2006).

YSA'nın kullanımı için üç aşama izlenilmektedir. İlk olarak kullanılacak ağa dair tasarım gerçekleştirilir. Tasarımlanan ağa, öğrenmenin gerçekleşmesi amacıyla daha önceden hazırlanmış olan örnekler vektör halinde sunularak eğitim başlatılır. Zamanla değişen örnekler neticesinde ağ tasarım aşamasında seçilen öğrenme yöntemine göre YSA tahmin ettiği çıktı ile öğrenme amaçlı verilen örneklerin çıktıları arasında ki hatalar hesaplanarak ağa ait ağırlıklar yeniden belirlenerek eğitim gerçekleştirilmiş olur. Son aşamada verilen örneklerden ayrılmış olan test seti, eğitimi tamamlanmış olan YSA'ya sunularak YSA tarafından daha önce görülmemiş bu örnekler ile YSA çıktıları karşılaştırılır. İstenilen hata toleransı yakalanması halinde YSA kullanıcı amacı doğrultusunda uygulama için hazır olur.

3.4 YAPAY SINİR AĞLARININ TEMEL ÖZELLİKLERİ

Yapay sinir ağları gücünü, insan beynini taklit ederek oluşturulmuş olan büyük ölçüde paralel dağınık yapı neticesinde karmaşık problemler karşısında öğrenme ve genelleme yapabilmesinden almaktadır. İyi bir mühendislik yaklaşımı ile karmaşık problemler basit alt görevlere ayrılarak yapay sinir ağlarına sunulması, ağın başarısını artırmaktadır (Haykin 2010). Genel olarak yapay sinir ağlarının fayda ve özelliklerini sıralayacak olur isek:

3.4.1 Doğrusal olmama

Yapay sinir ağlarının nöron yapısı doğrusal değildir. Doğrusal olmayan nöronlardan oluşan bir YSA'da doğrusal değildir. Bu özellik nedeni ile doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi YSA'da başarımla gerçekleştirilebilmektedir.

3.4.2 Giriş Çıkış Eşleşmesi

Yapay sinir ağının eğitimi esnasında girişlere uygulanan örneklere karşın belirlenen ağırlıklarla bir çıkış oluşturduğu daha önce söylenmişti. Burada yapılan eşleşmede dışarıdan verilen örnekler yapay sinir ağı eğitim modeline göre değerlendirmeye alınarak hedef çıkışlar ile giriş arasında ki bağıntı oluşturulmakta idi. Böyle bir yaklaşımla modellenemeyen bir problem doğrudan tanılanmış ve çözümlenmiş olmaktadır. Bu özellik YSA'yı birçok sınıflandırma problemlerinin çözümlenmesinde benzersiz kılmıştır. Yine modellenemeyen ya da karmaşık denklemler içeren problemler, YSA'nın öğrenebilen ve genelleyeabilen yapıları ile çözümlenme imkanı bulmaktadır (Haykin 2010).

3.4.3 Adaptasyon

YSA eğitimleri sonrasında çevrelerinde meydana gelen değişikliklere kendilerini adapte edebilme yeteneklerine sahiptir. Belirli bir ortamda çalışmak üzere eğitilmiş yapay sinir ağları, çevrede meydana gelen küçük değişimlere göre ağırlıkları yeniden belirleyerek kendilerini kolayca adapte edebilirler. Bununla birlikte YSA'lar dinamik sistemler ve değişen çevre koşullarına göre kendilerini devamlı olarak adapte edecek şekilde tasarlanabilirler. Bu çevre değişikliklerinin devamlı olarak takip edilerek modellenmesi üzerinde değişen şartlara uyumlu bir model ve beraberinde sınıflandırma, kontrol vb. uygulamalar için avantaj sağlayabilir. Bununla birlikte yüksek adaptasyon yeteneği üzerine tasarlanan bir sistem, aynı zamanda sistemde meydana gelen ani bozulmalara da adapte olması nedeni ile tasarım kriterlerinden yüksek sapmalar gösterebilir (Chow ve Cho 2007).

3.4.4 Dağınık Bellek Mimarisi

Yapay sinir ağlarında bir bilgi bir sinir ağının yapısı ve aktivasyon durumu ile temsil edilir. Ağdaki her nöron ağ mimarisinde ki diğer tüm nöronların aktivitesinden etkilenir (Öztemel 2006).

3.4.5 Hata Toleransı

Yapay sinir ağları uygunsuz çalışma koşulları altında çalıştıklarında meydana gelen hatalar genel sistem de çok küçük bozulmalara neden olurlar. Dağınık mimari yapısı sayesinde örneğin bir düğümde meydana gelen bozulma diğer düğümlerde saklanan bilgiler ile tolere edilebilir seviyelerde kalmaktadır. Hatanın çok büyümesi için mimari yapının büyük bir bölümünde bozulma olması gereklidir. Bu nedenle bir YSA hata oluştuğunda çıktıda büyük başarısızlıklar değil, performansta zarif bir bozulma sergiler (Haykin 2010, Kerlirzen'den 1993).

3.4.6 Paralel Çalışma Mimarisi

YSA'nın büyük ölçüde paralel çalışması belirli görevlerin yerine getirilebilmesi için hızlı olma potansiyeli sağlar.

3.4.7 Eksik Bilgi İle Çalışabilme

YSA tasarım aşaması ve eğitim aşaması sonrasında kendisine sunulan eksik bilgi ile de çalışabilme özelliğine sahiptir. YSA'nın eksik bilgi ile çalışma performansında sunulan dizi içerisinde eksik bilginin YSA tarafından verilmiş olan ağırlığı önem arz eder. Düşük ağırlıklı eksik bilgi çalışmalarında YSA'nın performansında önemli bir kayıp yaşanmaz (Öztemel 2006).

3.4.8 Analiz ve Tasarım Bütünlüğü

Temelde YSA'lar bilgi işlemede evrensel bir bütünlük gösterirler. YSA uygulamalarında kullanılan yapı temelde aynı olduğundan hepsi aynı prosesler için kullanılabilir. Nöronlar tüm YSA'lar için ortak bileşeni temsil ettiklerinden dolayı, farklı uygulamalar ve öğrenme algoritmalarının tüm YSA'larda kullanılması mümkün olur (Haykin 2010).

3.5 YAPAY SİNİR AĞLARININ KULLANILDIĞI ALANLAR

YSA'lar genel olarak aşağıda belirtilen yedi kategoride klasik yöntemlerden daha iyi sonuç verirler.

3.5.1 Örüntü Tanıma

Örüntülere ait belirli bir veya birkaç özelliği verilen girişlerin verilen özelliklere göre örüntü sınıflarına ayrılması işlemi kolaylıkla gerçekleştirilebilirler. Örneğin içeriğinde ki karbon miktarına göre çeliklerin sınıflandırılması işlemi YSA'larca kolaylıkla gerçekleştirilebilir (Basheer ve Hajmeer 2010).

3.5.2 Sınıflandırma

Sınıflandırma, girdilerin birbiri ile aralarındaki korelasyon ya da farklılıkları inceleyerek YSA'larca danışmansız şekilde gerçekleştirilebilir.

3.5.3 Modelleme

Girdiler ile çıktılar arasında temel bağlantıyı oluşturacak şekilde ilişkilendirme işlemi olan modelleme YSA'lar tarafından başarı ile gerçekleştirilebilir.

3.5.4 Tahmin

Sistemlerin gelecekteki davranışları hakkında tahminde bulunmak için YSA'lar yaygın bir şekilde kullanılır. Sistemle ilgili değişkenler ve sistemin bu değişkenler sonucunda verdiği tepkiler YSA'ya sunulduğunda, aynı değişkenlerle farklı kombinasyonlar içerisinde çıktılar YSA'larca tahmin edilebilir. Finansal piyasalar ve sosyal davranışların tahmini örnek kullanım alanlarıdır.

3.5.5 Optimizasyon

Optimizasyon bazı kısıtlar altında bir işlevi minimize ya da maksimize etme işlemidir. YSA'lar çıktı maksimizasyonu yanı sıra belirli bir maliyet fonksiyonunu en küçüklemek için kullanılabilir (Peretto 2004).

3.5.6 Bütünleme

YSA'lar gürültüsüz ve eksiksiz verilerden oluşan eğitim seti ile eğitimleri sonrasında, eksik verili ya da gürültülü veri setlerini düzenleyebilirler.

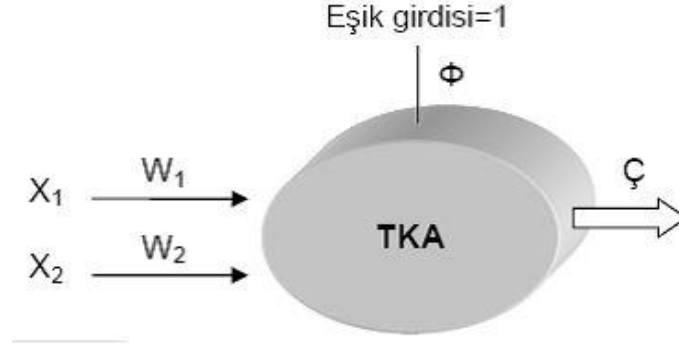
3.5.7 Kontrol

YSA ile dinamik sistemler modellenemediği gibi bu sistemlere ait olan aynı zamanda çevre ile adaptasyona sahip kontrolcüler oluşturulabilir. Bu tip kontrolün en büyük avantajı değişen çevre koşulları neticesinde değişim göstermesi gereken kontrol parametrelerinin YSA adaptasyon özelliği ile sağlanabilir olmasıdır.

Bunun dışında özellikle veri madenciliği ve data analizinin öneminin giderek arttığı günümüz koşullarında YSA'ların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. YSA'ların kullanım alanları, teknolojik gelişmelerinde sunmuş olduğu çeşitli yöntemlerle harmanlanarak ihtiyaçlar doğrultusunda artış göstermekte ve doğrusal olmayan, karmaşık, eksik kusurlu veriler ile problem çözümü için matematik modelinin inşasının güç olduğu durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Öztemel 2006).

3.6 YAPAY SİNİR AĞLARININ SINIFLANDIRILMASI

Yapay sinir ağları farklı şekillerde sınıflandırmaya tabi tutulurlar. YSA'ların yapılarına ve öğrenme şekillerine göre sınıflandırılmaları yapılmaktadır. İlk olarak TKA ve ÇKA olarak sınıflandırmaya başlanması doğru gözükmemektedir. YSA'ların ilk kullanıldığı dönemlerdeki TKA yapısı günümüzde pek kullanım alanı bulamamaktadır. Yalnızca giriş katmanı ve çıkış katmanı yapısına sahip olan bu ağ yapısı, doğrusal problemleri çözme yeteneğine sahip olmasında rağmen, doğrusal olmayan ve karmaşık ağ yapılarında çözüm üretememiştir. Şekil 3.11'de TKA genel yapısı görülmektedir.

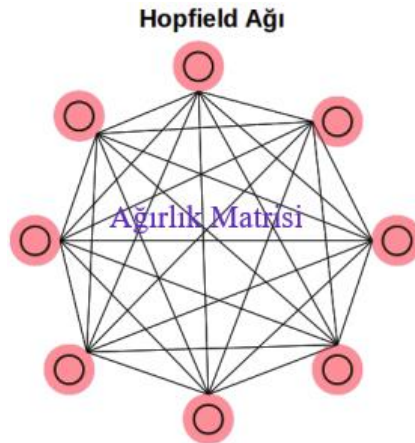


Şekil 3.11 TKA yapısı.

Bahsedildiği üzere TKA'ların doğrusal olmayan problemler için genel bir çözüm üretemiyor olması nedeni ile çok katmanlı ağ yapısı kullanılmaya başlanmıştır. Tek katmanlı ağ yapısına eklenen ara gizli katmanla oluşturulan ÇKA'lar ileri beslemeli, geri beslemeli, danışmanlı, danışmansız öğrenmeli vb. gibi alt sınıflara ayrılmaktadır. Tezde popüler YSA'lardan bahsedilecektir.

3.6.1 Hopfield Ağı

John Hopfield tarafından 1982 yılında geliştirilen bu ağ, diğer ağ yapılarından farklı olarak hem ileri besleme hem de geri beslemeyi kullanmaktadır. Hopfield ağı temel olarak bir TKA yapısına benzemekle birlikte, giriş (süzme) katmanı, Hopfield katmanı ve bir çıkış katmanı içerir. Hopfield ağı bu yapı sayesinde TKA olmasına rağmen geri bildirim ile ÇKA'ya benzer davranış sergiler. Ağ yapısı ilk çıktığında YSA'yı rehabilite eden geçerli ve titiz bir çalışma olarak görülmüştür. Şekil 3.12'de Hopfield ağı yapısı görülmektedir.



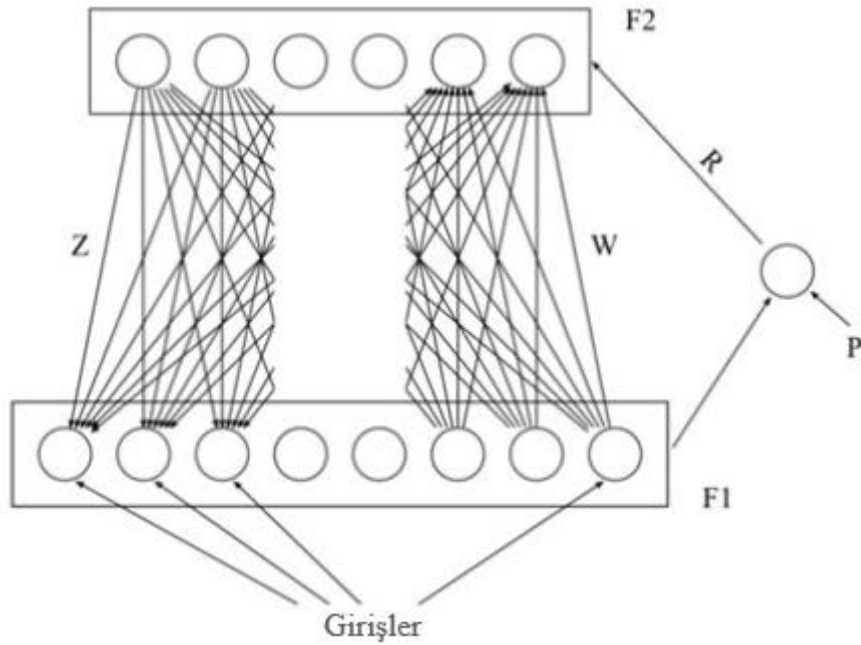
Şekil 3.12 Hopfield Ağı (URL-12 2019)

Hopfield ağıının eğitimi geri yayımlı ağ yapısı gibi eğitilemediğinden, örnek desen grupları üzerinden eğitim gerçekleştirilir. Ağ yapısı üzerinden de görüldüğü üzere ağ bağlantıları çift yönlüdür (Elmas 2003).

3.6.2 Uyarlanır Rezonans Ağları

Bu ağın yaygın kullanımı biyolojik modelleme uygulamaları olup, mühendislik alanında da kullanıma sahiptir. Ağın öğrenme yapısı danışmansız öğrenme tipindedir. Ağ yapısında en büyük sınırlama, giriş vektöründe bulunan küçük gürültülere bile yüksek hassasiyet göstermesidir. 1970'lerde Stephen Grossberg tarafından geliştirilen ağ, Boston üniversite tarafından patentlenmiştir (Elmas 2003).

YSA'lar için ortaya atılan teorilerden biri adaptif ağların ağırlıklarının her bir giriş ve çıkış sürecinde devamlı olarak değişim göstermesi nedeni kararlılık sergileyemeyecekleri idi. ART için yapılan temel iddialardan biri ağın bu problemin üstesinden doğal olarak gelebildiği ve bu sayede devamlı olarak bir eğitim havuzu içerisine daldırılabilceği yönünde olmuştur. Şekil 3.13'de ART ağı mimarisi görülmektedir.



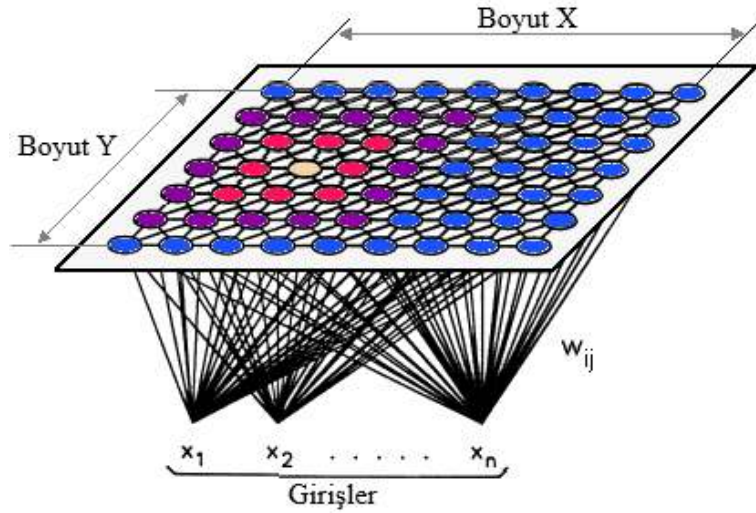
Şekil 3.13 ART ağı (Miljkovic 2010)

İlk katman ART tasarımında F1 olarak adlandırılır ve dış ortamdan girişleri alarak onları ikinci katman F2'ye iletir. W F1'den F2'ye doğru ağırlıkları Z F2'den F1'e doğru ağırlıkları temsil eder. Rekabetçi eğitim tekniği kullanılarak eğitilen ART'lerde, kazanan ağırlıklar ağırlık öğrenmesi sonucunda belirlenerek, ağırlık eğitilir.

3.6.3 Özörgütlemeli Harita (Kohonen) Ağı

Özörgütlemeli ağlar diğer adıyla Kohonen ağı 1982 yılında Kohonen tarafından geliştirilmiştir. Danışmansız öğrenme yöntemi ile eğitilen Kohonen ağı çıktıları gruplar halinde düzenlenmiştir. Yüksek boyutlu verilerin kümelmesi için oldukça yararlıdır.

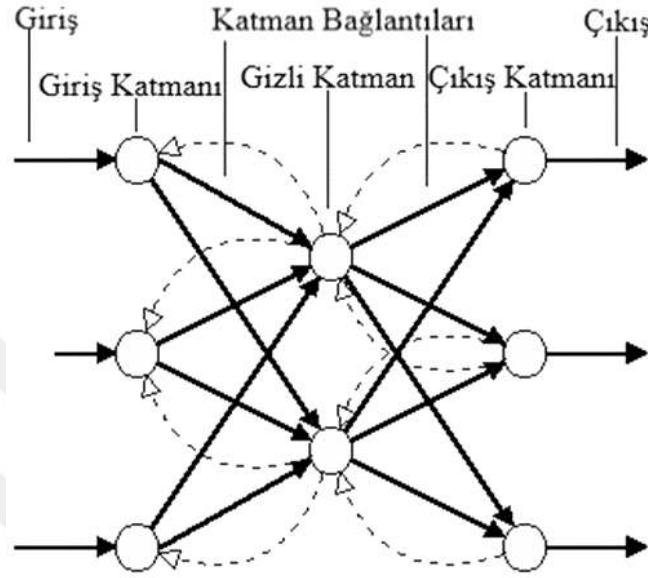
Genellikle bir ya da iki boyutlu bir düzlemde kendi kendini düzenlemiş bir dizi nöron yapısından oluşur. Rekabetçi öğrenme yöntemi ile nöronların girdi ağırlıkları çıktı haritasında ki düzene göre belirlenir. Şekil 3.14'de iki boyutlu bir SOM ağı mimarisi görülmektedir. SOM yapısında giriş verileri giriş katmanları aracılığı ile sunulur, iki boyutlu çıkış katmanında ki nöronlar giriş katmanı ile ağırlıklar üzerinden bağıntılıdır. Eğitim sonucunda belirlenen ağırlık yapılarına göre girişler üzerinden verilen vektöre ait bilginin ağırlık tanıtılması sağlanmış olur (Chow ve Cho 2007).



Şekil 3.14 İki boyutlu SOM ağı (URL-13 2019)

3.6.4 Geri Yayılım Ağı

Geri yayılım ağı en çok kullanılan YSA çeşididir. Giriş katmanı, en az bir gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmandan meydana gelmiştir şekil 3.15.



Şekil 3.15 Geri Yayılım Ağı (URL-14 2019)

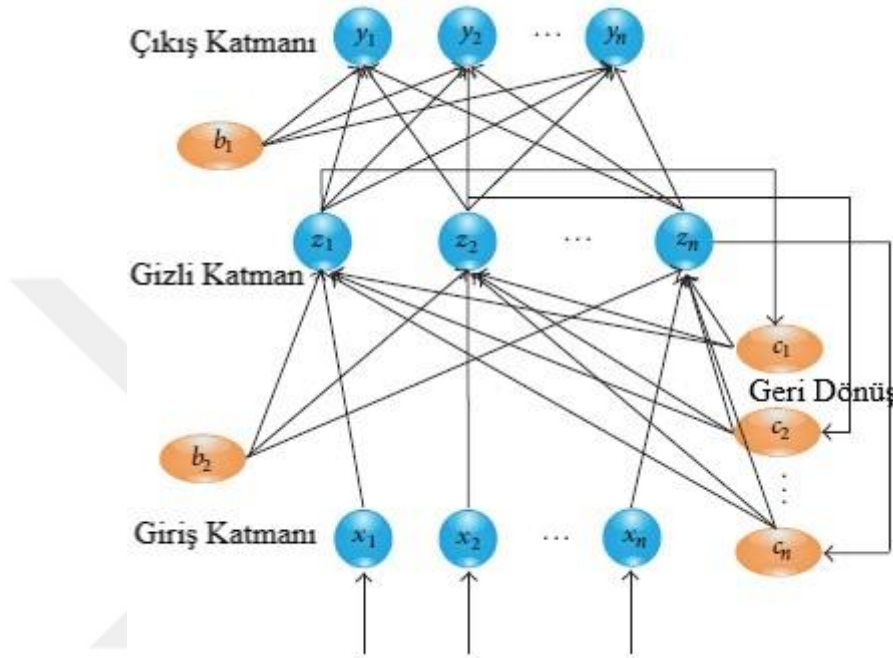
Gizli katman doğrusal olmayan modellerin oluşturulmasında ana etmendir. Geri yayılım ağları danışmanlı öğrenme yöntemi ile eğitilir. Geri yayılım terimi çıktı katmanı tarafından hesaplanan hatanın çıktı katmanından itibaren, geriye doğru yayılarak gizli katmana ve son olarak girdi katmanına doğru ağırlıkları değiştirmek amacı ile kullanılmasından dolayı verilmiştir. Geri yayılım ağlarında veriler geri besleme olmadan bir sonraki katmana iletilir. Aynı katmanlar içerisinde nöronlar arasında bağlantılar yoktur. Veri sınıflandırma, tahmin, kontrol vb. birçok uygulamada kullanım alanına sahiptirler (Basheer ve Hajmeer 2010, Hasson'dan 1995).

3.6.5 Geri Dönüşümlü Ağlar (Recurrent)

Yukarıda bahsedilen ağlar ileri yönlü olarak çalışmakta yani herhangi bir katmanda üretilen bir bilgi diğer katmanın girişi ya da sonuç çıktıyı oluşturmaktadır. Geri dönüşümlü ağlar herhangi bir katmanın çıktısı yine girdi katmanına gönderilerek ağda bir geri besleme yapısı oluşturularak tasarlanmıştır. Dinamik proseslerin modellenmesi aşamasında zaman

gecikmelerinin işlenmesini sağlayan bu yapı, dinamik sistem modellemesi açısından daha başarılı sonuçlar doğurmaktadır (Öztemel 2006).

Geri dönüşümlü ağlar içerisinde en çok kullanılan ağ yapısı şekil 3.16’da gösterilen Elman ağıdır.



Şekil 3.16 Elman Geri Dönüşlü Ağ (Jiang et al. 2015)

Elman ağında herhangi bir t zamanında ki girdi ile $t-1$ zamanında ki girdi ağı giriş olarak verilir. Ağı eğitimi geri yayımlı ağ ile aynı şekilde gerçekleşmekle birlikte, yalnızca $t-1$ zamanında oluşan çıktılar da girdi tarafında yer almaktadır. İleri yönlü yapısı ve eğitim için geri yayılım algoritması kullanan bu ağ yapısında doğrusal olmayan dinamik sistemler daha başarılı bir şekilde eğitilebilmektedir.

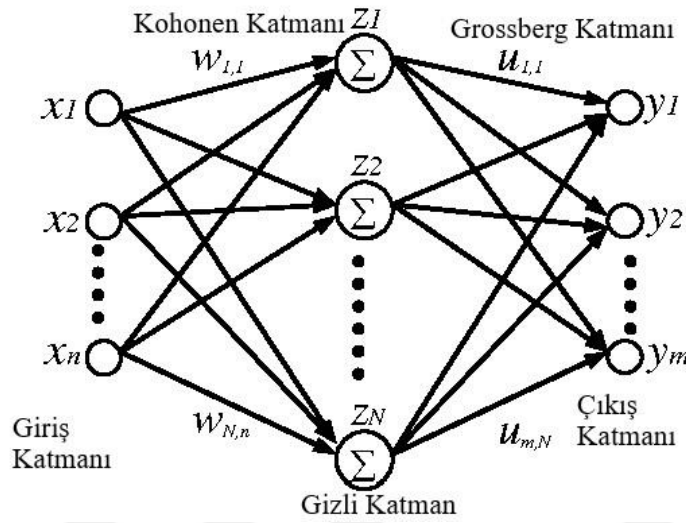
Geri dönüşümlü ağların kullanımında kullanılacak olan geri beslemenin hangi katmanlar arasında gerçekleştirileceği ve geri besleme zaman gecikmesinin seçimi tasarımcı tarafından gerçekleştirilir.

Tasarımcının modelleme, tahmin ya da başka bir işlev için toplamış olduğu girdi ve çıktıların ilişkisel olarak aralarındaki zaman gecikmelerine hakimiyet düzeyi bu ağ tasarımında önem taşımaktadır.

3.6.6 Karşı Yayma Ağı

Karşı yayma ağı Robert Hecht-Nilsen tarafından Kohonen katmanı ile öğretilebilir bir çıktı katmanını birleştirmek maksadı ile geliştirilmiştir (Öztemel 2006).

İlk tasarım girdi ve çıktılar arasında iki yönlü haritalama şeklinde gelişmiştir. Şekil 3.17’de karşı yayım ağı mimarisi görülmektedir.



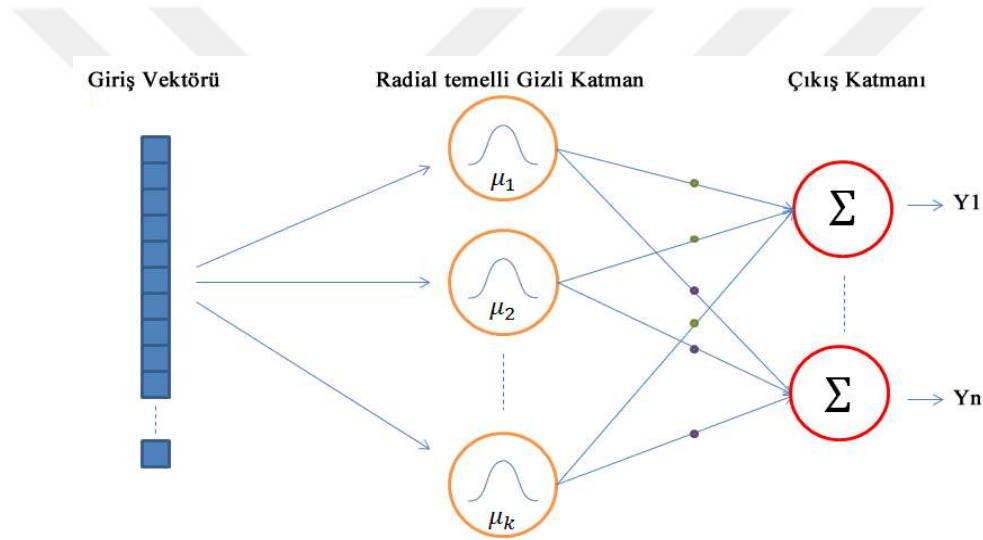
Şekil 3.17 Karşı Yayım Ağı (Chang and Shen 2006)

Giriş verileri ağı sunulurken giriş verilerinin bir Kohonen haritası oluşturması aşamasında danışmansız öğrenme gerçekleşir. Aynı zamanda çıkışlar için danışmanlı öğrenme metodu ile belirlenen ağırlıklar Kohonen haritasında ki her noktayla çıkış vektörünü eşleştirir.

Kohonen katmanında daha önce de belirtildiği gibi rekabetçi öğrenme işlenir. Ağın her örnekle eğitimi esnasında proses elemanları birbirleri ile yarışır ve yarışı kazanan proses elemanı 1 değerini alırken diğerleri 0 değerini alır. Kohonen katmanında oluşan bu çıktı daha sonra Grossberg katmanına iletilir. Bu aşamada devreye giren danışman ile çıktı değerleri ile girdi değeri olan Kohonen katmanı çıktısı sonucu oluşturulan çıktı değerleri karşılaştırılarak Grossberg katmanı ağırlıkları belirlenir (Chang and Shen 2006).

3.6.7 Radyal Tabanlı Ağlar (RBFA)

Radyal tabanlı ağlar ileri beslemeli ve danışmanlı öğrenme yöntemi ile eğitilen bir YSA türüdür. Radyal temelli fonksiyonlar aktivasyon fonksiyonları olarak kullanıldığından ötürü radyal tabanlı ağ adını almıştır. Temelde ileri beslemeli bir ağ türü olan RBFA'lar klasik MLP'lere göre daha hızlı bir şekilde ilerler. Bunun nedeni girdi katmanında herhangi bir ağırlık belirlemesi yapılmadan tüm girdi ağırlıklarının 1 olarak kabul edilmesinden kaynaklanır. Çıktı katmanı da klasik YSA'daki toplama fonksiyonu ile ilerler. Eşik fonksiyonları için birçok radyal tabanlı fonksiyon kullanılmakla birlikte başlıca, Gauss, Cauchy, Çoklu Kuadratik, fonksiyon kullanılabilir. Yalnız tek gizli katmanları bulunur ve gizli katmanda ki nöron sayısı tasarımcı tarafından belirlenen en önemli parametredir (Öztemel 2006).



Şekil 3.18 RBFA Ağı (URL-15 2019)

Şekil 3.18'de tek giriş iki çıkış mimari ile tasarlanmış RBFA'da giriş katmanı ve gizli katman arasında ağırlıklar 1 olarak hesaplanıp gizli katmanda tasarımcı tarafından belirlenen eşik fonksiyonuna iletilen bilgiler, çıkış kademesine eğitim sırasında hesaplanan ağırlıklar ile çarpılarak çıkışlar oluşturulur.

3.7 YAPAY SİNİR AĞLARINDA ÖĞRENME YÖNTEMLERİ

Yapay sinir ağlarının başlangıçta yer alan temel öğrenme problemine çözüm Donald Hebb tarafından getirilmiştir. The Organization of Behavior isimli kitabında Hebb kuralı adı verilen bir kuralla, insan beyninde ki sinapslardan esinlenen Hebb, şartlara uyum sağlama yetenekleri

ile iki sinir bağlantısı arasında belirlenecek olan kuvvetler aracılığı ile sinirlerin etkileşim düzeylerinin ve faaliyetlerinin öğrenilebileceği ilkesini getirmiştir (Elmas 2003).

Bir YSA'nın öğrenme süreci kısaca ağırlıkların belirlenme süreci olup, buna göre sinirler arasında ki ağırlıkların değiştirilmesine dair getirilecek belli kurallar ile YSA'lar öğrenmiş olur.

Öğrenme kuramları temel olarak üç ana başlık altında örgütlenmektedir. Bunlar danışmanlı öğrenme, danışmansız öğrenme ve takviyeli öğrenmedir.

Danışmanlı öğrenme kuramında bir eğiticiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu öğrenme kuramında Hebb, Hopfield, Delta, Eğimli iniş ve Kohonen öğrenme kuralları çoğunlukla kullanılmaktadır (Öztemel 2006). Öğrenme yöntemine bakıldığında ağ girdi vektörü sonucu belirlenen ağırlıklar ile oluşturulan çıktıların ağa verilen çıktı vektörü ile karşılaştırılması esas alınmaktadır. Ağ çıktısı ile tasarımcı tarafından verilen çıktı arasında hesaplanan hatalar neticesinde ağ ağırlıkları güncellenerek tasarımcı tarafından istenilen hata seviyesi yakalandığında öğrenme sonlandırılır.

Danışmansız öğrenme yönteminde yine bir giriş vektörü YSA'ya sunulur fakat bu girişlere bağlı çıkış vektörü YSA'ya sunulmaz. Sistem girişler içerisinde en çok birbirine benzeyenleri gruplandırarak çıktı vektörlerini oluşturur. Burada çıkış vektörü olmaması nedeni ile sistem de herhangi bir hatadan ve buna göre ağırlıkların belirlenmesinden söz etmek mümkün değildir.

Takviyeli öğrenme yönteminde ağırlık eğitimi için yine çıktı vektörü sunulmamaktadır. Bununla birlikte çıktı vektörünün verilen girişe göre doğrulunun ölçeklenebileceği bir kriter ağa uygulanır. Takviyeli öğrenme aynı zamanda yarı danışmanlı öğrenme olarak adlandırılır.

Bir YSA eğitilirken girdi ve/ veya çıktı vektörünün belirli bir kısmı test aşaması için kullanılır. Test aşaması YSA'nın daha önce verilmeyen girişlere karşı genelleme yeteneğini ölçerek öğrenmenin başarımını denetlemek amacı ile oluşturulmuştur.

Yaygın olarak kullanılan ve tez deney aşamasında da kullanılmış olan karma eğitim algoritmalarından Levenberg-Marquardt Algoritması, Bayesian Regularization Algoritması işlenecektir.

3.7.1 Levenberg-Marquardt (LM) Algoritması

LM eğitim algoritması gradient-descent eğitim algoritması ve Gauss-Newton algoritmasından türetilmiş bir eğitim algoritmasıdır (Aşkın vd. 2011).

İleri beslemeli ve hatayı geri yaymalı ağlarda, girdi vektörü giriş katmanına sunulur ve bir sonraki katman girdilerini yani giriş katmanı çıktıları oluşturur. İleri yönlü olarak devam eden bu besleme işlemi çıktı katmanına ulaşarak çıktı katmanında alınan sonuç ile hedef karşılaştırılarak hata hesaplanır. Hesaplanan hataya göre belirlenen ağırlık düzeltmeleri son katmandan yani çıkış katmanından başlanılarak geriye doğru tüm katman ağırlıkları yeniden düzenlenir.

En basit geriye yayılım algoritması standart gradyen azalması algoritması olup, algoritmanın ana problemlerinden biri yavaş kalmasıdır. Standart gradyen azalması algoritmasından daha hızlı algoritmalar iki kategoride incelenmekle birlikte, ilk kategoride algoritmalar deneme yanılma yöntemini ikinci kategoride ki algoritmalar ise standart sayısal optimizasyon algoritmalarını kullanmaktadır. LM algoritması ikinci kategoride yer alan Newton algoritmasını ve gradyen azalması algoritmasının temel almıştır (Etike 2009, Bolat ve Kalenderli'den 2003).

Newton algoritmasında temel adım Hessien matrisinin elde edilmesidir. Hessien matrisinin elde edilmesi içinde performans matrisinin hesaplanması gerekir. Hessien matrisi performans matrisinin ağırlıklara göre ikinci derece türevi ile bulunur. Performans matrisi tasarımcının seçimine bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle ileri beslemeli ağ yapısında;

$$E(n) = E_{ort}(n) = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^n \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (3.11)$$

Verilen 3.11 denkleminde E ortalama karesel hatayı, N eğitim çıktı vektöründe ki toplam örnek sayısını, e_j hata işaretini, C çıkış katmanı nöronlarını temsil eder.

$$e_j = t_j(n) - y_j(n) \quad (3.12)$$

olmak üzere t eğitim için verilen çıktı vektörünü, y YSA çıkışlarını temsil eder.

Denklem 3.12'ye göre Hessien matrisi;

$$H(n) = \frac{\partial^2 E(n)}{\partial w^2(n-1)} \quad (3.13)$$

Levenberg-Marquardt algoritması için Hessien matrisi;

$$H(n) = j^T(n).j(n) + \mu I \quad (3.14)$$

Denklem 3.14’de μ Marquardt parametresi, I ise birim matristir. J matrisi jakobien matrisi olarak tanımlanır ve ağ hatalarının ağırlıklarına göre türevlerinden hesaplanır.

$$J(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial w(n-1)} \quad (3.15)$$

Denklem 3.15 ağ hataları vektörüdür. Ağın gradyeni;

$$g(n) = J^T(n).e(n) \quad (3.16)$$

Denklem 3.16’ya ağırlıklar yerleştirildiğinde denklem 3.17 elde edilir.

$$w(n+1) = w(n) - [H(n)]^{-1}.g(n) \quad (3.17)$$

μ Marquardt parametresi skaler bir sayıdır. Eğer μ büyük ise LM dik iniş metodu gibi eğer μ çok küçük ise Newton metodu gibi davranır.

Başarılı her adımın ardından yani performansın her iyileşmesinde μ azaltılır performans fonksiyonun değerinin yükselmesinde yani her başarısız adımda μ artırılır. Bu yöntemle performans fonksiyonunu en küçük yapacak ağırlık değerleri bulunmaya çalışılır.

3.7.2 Bayesian Regulazitions (BR) Algoritması

BR eğitim algoritması ağ ağırlıklarını belirlerken LM algoritması yöntemini esas alır. Temelde hata hesaplama da ve ağırlıkları oluşturma da aynı algoritmaları kullanan bu iki eğitim yöntemi arasındaki fark 1991 yılında David J.C. Mackay tarafından tanımlanan Bayesian Regulazitions’la ağ parametrelerinin boyutunu sınırlayan önermenin BR eğitim algoritması tarafından kullanılıyor olmasıdır (Aşkın vd. 2011). Bu sayede ağırlıklar daha küçük değerlerde

kalmayı için zorlanır, bu doğrultuda ağın cevabı yumuşar, gürültüler yakalanır ve ağda ezberleme (overfitting) oluşma olasılığı aşağı düşer. Bayesin, ağırlıkları ve gürültü seviyesi değerlerini etkileme açısından veri seti içerisinde yer alan etkin değerleri ince bir yorumlama yeteneği ile belirleme becerisine sahiptir (Mackay 1992).

3.8 YAPAY SİNİR AĞLARININ TASARIMI

Bir YSA uygulamasında elde edilecek olan başarı seviyesi uygulanacak olan yöntem, problem özelinde kullanılacak olan ağ yapısı ve deneyimlerle yakından ilintilidir.

Kullanılacak olan ağ mimarisinin seçilmesi ve mimariye göre tasarımcıya bırakılmış nöron sayısı başta olmak üzere parametrelerin belirlenmesi, nöron için belirlenen eşik fonksiyonu, öğrenme algoritmasının secimi ile birlikte veri setinin sunum şekli ve usulleri de ağın başarısını doğrudan etkilemektedir (Asiltürk 2007) .

Uygun parametrelerin belirlenmesi halinde YSA genelleme yeteneği ile sonraki kullanım amacına uygun olarak düzgün çıktılar vererek, ihtiyaç duyulan alanda kullanılabilir.

3.8.1 YSA Mimari Seçimi

Her ne kadar YSA'lar için mimari seçimi açısından tablolar oluşturularak çeşitli önermelerde bulunuluyor ise de temel olarak tablolardaki alternatifler arasında ki secim tasarımcının tecrübesi ve bilgi birikimi ile doğrudan ilintilidir. Ayrıca tasarımcı tarafından modellenmesi, kontrolü, tahmini, sınıflandırılması yapılacak olan sistem ne kadar iyi tanınıyorsa YSA mimarisinin seçimi de o derece etkin ve düzgün şekilde gerçekleştirilebilir olacaktır.

3.8.2 Öğrenme Algoritmasının Seçimi

Genel olarak YSA öğrenme algoritmasının secimi ağ mimarisinin seçimine doğrudan bağlı olsa da aynı mimari için kullanılabilecek olan farklı algoritmalar tasarımcı tarafından belirlenmektedir. Aynı zamanda aynı ağ yapısı içerisinde farklı öğrenme algoritmaları farklı tür kullanımlar için daha uygun olabilmektedir (Asiltürk 2007). Özellikle günümüzde farklı tip eğitim algoritmalarının uygulamalara göre farklı özelliklerini temel alarak geliştirilen karma

öğrenme algoritmalarının kullanılması YSA’larda algoritma seçiminin önemini bir adım daha yukarıya taşımıştır.

3.8.3 Nöron Sayısının Belirlenmesi

YSA’nın tasarım aşamasında belirlenen temel özelliklerinden biriside ağda kullanılan nöron sayısıdır. Öncelikle giriş ve çıkış katmanında nöron sayısı, giriş ve çıkış katmanında yer alan giriş çıkış sayısından az olamaz. Gizli katman için böyle bir alt sınırlama verilmemekle birlikte katmanlar içerisinde yer alan nöron sayısı artırıldığı taktirde ağ performansında yükselme beklenmelidir. Buna rağmen YSA’da bir katmandaki nöron sayısının belirlenmesi aşamasında, olabildiğince az sayıda nöron seçilmelidir. Nöron sayısının artışı kullanılan işlemci performansında düşme, işlem süresinde uzama ile birlikte ağ için ezberleme (overfitting) ihtimalini arttırmaktadır (Asiltürk 2007).

3.8.4 Giriş Çıkış Vektörlerinin Ağa Sunumu

YSA’larda kullanılan eşik fonksiyonları genel anlamda ikili sistem çıkış üretecek şekilde dizayn edilmeleri nedeni ile YSA’lara sunulacak olan verilerin normalizasyonu büyük önem taşır. Normalizasyon, YSA proses elemanlarının, verileri, kümülatif toplamlarla koruma eğilimleri nedeniyle mutlaka yapılmalıdır. Verilerin normalizasyonunda genellikle verilerin [0,1] veya [-1,+1] aralıklarından birine ölçeklendirilmesi önerilmektedir. Normalizasyon işlemi, verileri belirli bir ölçek arasına sıkıştırmasından dolayı hassasiyetin ondalık basamaklarla değiştiği, reel büyük verilerde modelin olumsuz olarak etkilenmesine neden olabilir (Asiltürk 2007).

3.8.5 Performans Fonksiyonunun Seçimi

Öğrenme performansını etkileyen önemli hususlardan bir de performans fonksiyonudur. İleri beslemeli ağlarda performans fonksiyonu, ortalama karesel hata MSE, toplam karesel hata SSE, ya da ortalama hataların karesinin kara köküdür RMSE.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j^2 \quad (3.18)$$

Temel olarak MSE ađ çıktılarının hedef vektöre ne kadar uzaklıkta olduklarını belirler.

$$SSE = \sum_{j=1}^n e_j^2 \quad (3.19)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j^2} \quad (3.20)$$

RMSE tahminleyicinin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki uzaklığın bulunmasında kullanılan kuadrik bir metriktir.

BÖLÜM 4

YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TERMİK SANTRALİN MODELLENMESİ VE TERMİK SANTRAL KAZAN KONTROLÜ

4.1 YSA İLE TERMİK SANTRAL MODEL TASARIMI

Doğrusal olmayan dinamik sistemlerin modellenmesi özel bilgi birikimi ile birlikte karmaşık matematiksel hesaplamaların yapılmasını içeren özel uzmanlık gerektiren bir alandır. Termik Santral prosesi incelendiğinde dinamik yapı, devamlı değişen giriş ve çıkış bozulmalarına, set değeri değişimlerine, çevresel etkenlere bağlıdır. Özellikle kömür yakıtlı büyük enerji üretim tesislerinde, yanma prosesinin gerçekleşmiş olduğu kazan katında çevresel faktörler ve ısı enerjisi elde etmekte kullanılan kömürün doğal değişkenlikleri sistem dinamiklerini etkilemektedir. Çok giriş ve çok çıkışlı (MIMO) yapıda yer alan doğrusal olamayan termik santral prosesinin modellenmesi ve kontrolü, mühendislik açısından zor bir problemidir (Kocaarslan ve Tiryaki 2007). Günümüzde sistem modelinin çıkarılmasında Teorik Modelleme, Deneysel Modelleme ve İstatiksel Modelleme olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmaktadır.

Teorik modellemede sistemin kimyasal ve fiziksel yapısının bilindiği durumlarda, yapının matematiksel olarak bütün halinde ya da alt parçalara bölünerek, türevsel denklemler ya da kısmi türevli denklemlerle ifade edilme şeklidir (Güllü 2010).

Deneysel modellemede var olan sistemin giriş ve çıkış parametreleri üzerinden sistem fonksiyonu belirlenerek sistemin modellenmesi gerçekleştirilir. Genellikle kara kutu yönteminin kullanıldığı bu modelleme metodunda doğrusal sistemlerin modellenmesinde transfer fonksiyonları ve zaman serileri kullanılabilir, doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde ise değişkenlerin üstel kuvvetleri ya da ağırlıkların çarpımını kullanılır. Yapay sinir ağları bu tarz sistemlerin modellenmesinde uzun zamandır kullanılmaktadır (Güllü 2010).

İstatiksel modelleme tekniğinde süreç istatistiksel terimler ile ifade edilir ve istatistiksel tabanlı zaman serileri analizi bu modelleme çeşidinde en çok kullanılan yöntemdir. Yöntemin temeli istatistiksel veri analizi, oyun, bilgi ve istatistiksel karar verme teorileridir (Güllü 2010).

4.1.1 YSA Tabanlı Termik Santral Modelini Oluşturan Giriş Çıkışların Belirlenmesi

YSA ile termik santral modelleme deneysel modelleme yöntemi olup, modeli oluşturacak olan parametrelerin belirlenmesi aşamasında, giriş ve çıkış sayıları, sistemin temsil yeteneğini artıracak şekilde mümkün olduğunca fazla, YSA'nın sistem modelini oluşturmada farklı parametrelerle işlem zamanını düşürecek, hassasiyeti arttıracak kadar az sayıda, optimum noktada seçilmelidir.

YSA ile termik santral modellemesi veya termik santral kazan modellemesi üzerine yapılan çeşitli çalışmalarda, farklı sayıda giriş çıkışlar, modelin oluşturulması ve eğitimi için belirlenmiştir.

Kocaarslan ve Tiryaki tarafından yapılan çalışmada sistem modeli 4 giriş 4 çıkış olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada girişler, yakıt, besleme suyu, püskürtme suyu ve taze hava, çıkışlar ise elektriksel güç, buhar sıcaklığı, buhar basıncı ve yanma gazları olarak alınmıştır (Kocaarslan ve Tiryaki 2007).

Sai ve Reddy Tarafından yapılan çalışmada, model girişleri olarak, besleme suyu debisi, kömür debisi, hava debisi, ikincil hava debisi, birincil hava debisinin kömür debisine oranı, yakıcı pozisyonları, baca gazı % O₂ miktarı, değirmen bakım kombinasyonları ve temizlik faktörü alınmış, çıkış olarak da kazan çıkış gazı sıcaklığı alınmıştır (Sai and Reddy 2015).

Dixit, Kumar ve Soota tarafından yapılan çalışmada ise model girişleri olarak yakıt debisi, besleme suyu debisi ve üretilen elektriksel güç alınır iken model çıkışı olarak ana buhar hattı kızdırılmış buhar sıcaklığı alınmıştır (Dixit et al 2015).

Haq, Rahman, Ahad, Ali ve Ijaz tarafından yapılan endüstriyel kazanların modellenmesi ve simülasyonu çalışmasında, sistem, enerji balansı, kütle balansı ve momentum balansı

açılarından matematiksel olarak modellenerek, simülasyon aşamasında girişler ısı ve besleme suyu debisi, çıkışlar ise dom basıncı, buhar debisi ve buhar hacmi olarak alınmıştır (Haq et al 2016).

Li, Ososanya ve Smoake tarafından yapılan termik santral modelleme ve kontrol çalışmasında ise girişler yakıt yanma oranı ve türbin valf pozisyonu olarak seçilmiş, çıkışlar ise üretilen elektriksel güç ve türbin throttle valf basıncı (kazan çıkış-türbin giriş basıncı) olarak belirlenmiştir (Li et al 2016).

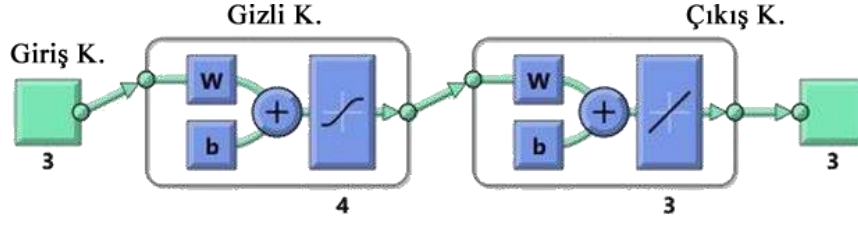
Görüldüğü üzere modellemenin yapılış amacına uygun olarak modele dair giriş ve çıkış parametreleri değişkenlik göstermektedir. Tezde kullanılacak olan santral modellemesinde ana amaç kazan kontrolü olup, bu kontrolcüye ait ana tasarım parametreleri olan çıktılar, şekil 4.1’de görülen ana buhar basıncı, ana buhar sıcaklığı ve üretilen güçtür. Bu parametrelerin üzerinde etken olarak kazan kısmında üretilen ısı enerjisini değiştiren ana girdiler olarak, toplam fider hızı (ana yakıt kömür miktarı), kazan besleme suyu debisi (buhar üretiminde kullanılan) ve yanmanın bileşenlerinden O₂ kaynağı toplam hava debisi kullanılacaktır.



Şekil 4.1 Termik Santral Model Giriş Ve Çıkışları

4.1.2 MLP ile Termik Santral Modeli

Santral modelleme aşamasında, ilk olarak geleneksel Çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağı (MLP) kullanılmıştır. Ağ yapısı, 3 giriş 3 çıkışlı olarak MİMO temelli oluşturulmuştur. Örnek olarak MİMO formdaki ağ modeli şekil 4.2’de gösterilmiştir.



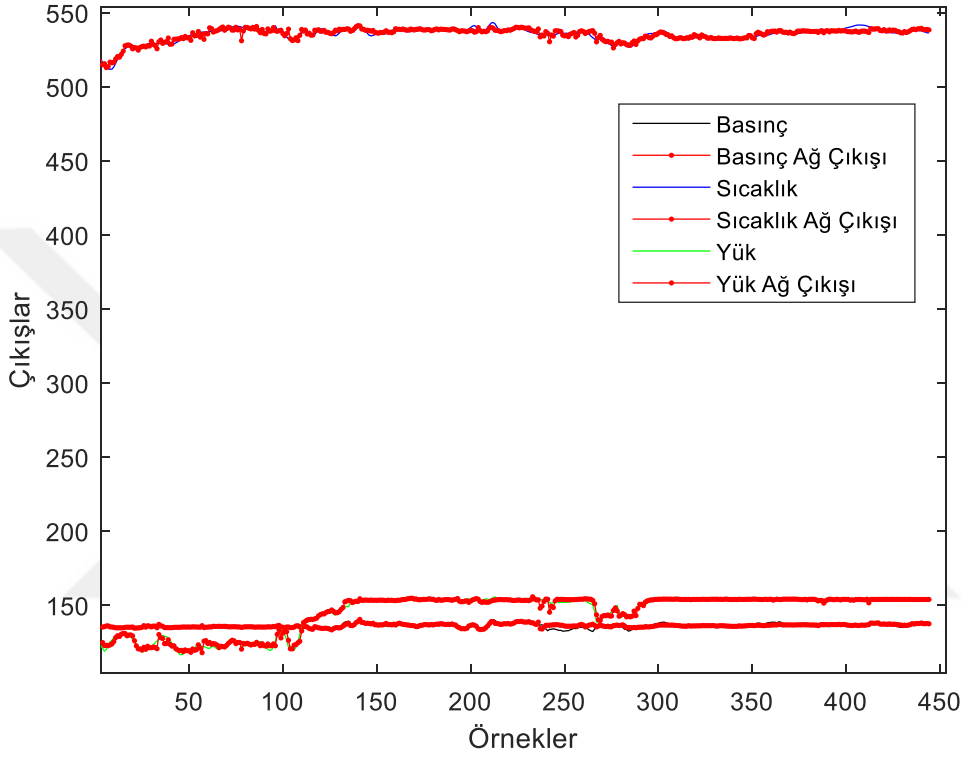
Şekil 4.2 Termik santral modelleme Geleneksel MLP mimarisi görünümü.

En iyi ağ modelini belirlemek için farklı kurgulanmış benzetim süreci gerçekleştirilmiştir. Benzetim sürecinde, MATLAB 2018 b yazılım platformu kullanılmıştır. MLP ağları için eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt algoritması, maliyet fonksiyonu olarak ise MSE kullanılmıştır. Saha ölçümlerinden alınan veri seti, % (eğitim, test) olacak şekilde sırasıyla, % (60,40), % (65,35), % (70,30), % (75,25), % (80,20), % (85,15) ve % (90,10) olarak düzenlenmiştir. Düzenlenen her bir veri seti, Ara katman sayıları 4 ile 15 arasında değişen MLP ağlarının eğitimde kullanılmıştır. Her bir MLP ağ modeli eğitim süreci 100 deneme ile tekrarlanmış ve en iyi performansa sahip ağ modeli seçilmiştir. Eğitim sürecinde, MLP mimarisi tabanlı sistem modellerine ait performans sonuçları çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 MLP mimarili ağ modelleme eğitim sonuçları

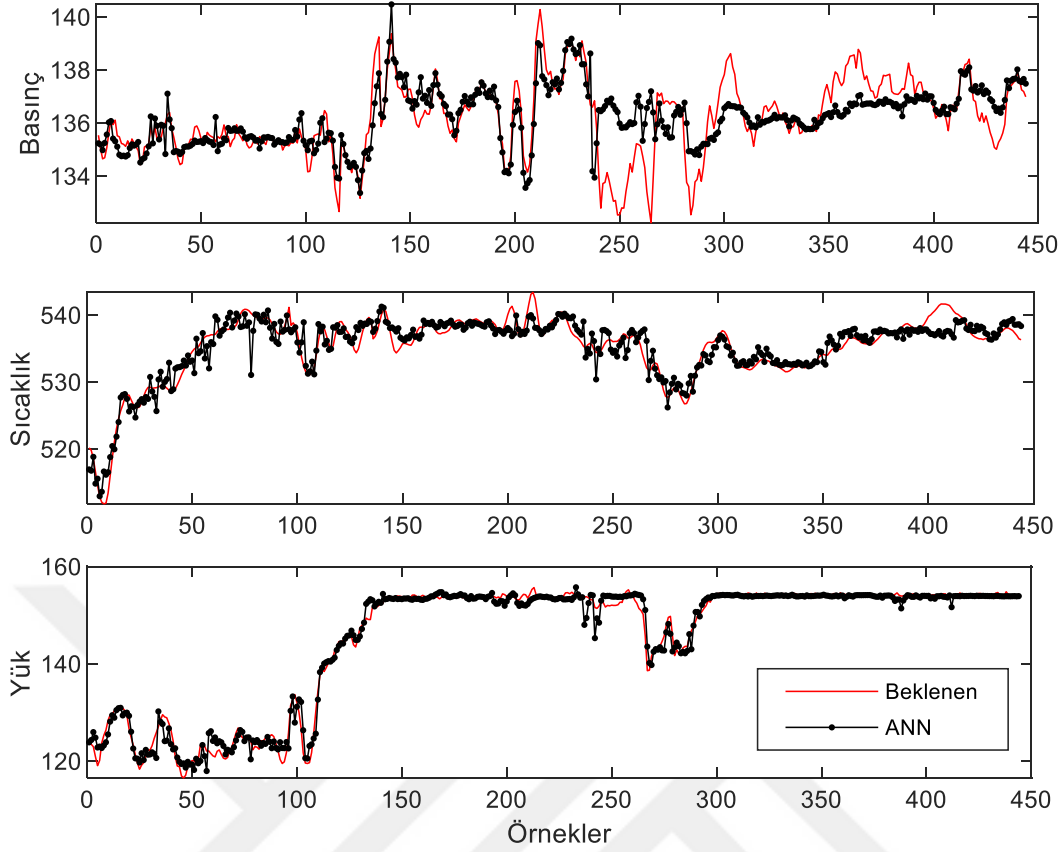
Mimari		%60- %40	%65- %35	%70- %30	%75- %25	%80- %20	%85- %15	%90- %10
Gizli Katman Nöron sayısı	4	1.1836E-05	1.5900E-05	1.2061E-05	1.2111E-05	1.1742E-05	1.1676E-05	1.1477E-05
	5	0.00001139	1.1013E-05	1.0570E-05	1.0799E-05	1.0697E-05	1.0770E-05	1.0464E-05
	6	1.0577E-05	1.0084E-05	1.0347E-05	1.0101E-05	1.0002E-05	1.0179E-05	9.9813E-06
	7	1.02E-05	9.7606E-06	9.9171E-06	9.8517E-06	1.0002E-05	9.6625E-06	9.3595E-06
	8	9.543E-06	9.5855E-06	9.9171E-06	9.3339E-06	9.4406E-06	8.9995E-06	9.0885E-06
	9	9.332E-06	9.2703E-06	9.2431E-06	9.1686E-06	8.9741E-06	8.5922E-06	8.7463E-06
	10	8.9915E-06	9.0429E-06	9.2431E-06	8.5679E-06	8.6770E-06	8.3798E-06	8.4435E-06
	11	8.9915E-06	8.3611E-06	9.2431E-06	8.5492E-06	8.3988E-06	8.2659E-06	8.1548E-06
	12	7.9452E-06	8.3611E-06	9.2431E-06	8.1751E-06	8.0859E-06	7.9891E-06	7.7756E-06
	13	7.9452E-06	8.3611E-06	9.2431E-06	7.8948E-06	8.0859E-06	7.5376E-06	7.6292E-06
	14	7.9452E-06	7.7464E-06	9.2431E-06	7.7242E-06	7.9291E-06	7.5376E-06	7.3081E-06
	15	7.9452E-06	7.7464E-06	9.2431E-06	7.7242E-06	7.7474E-06	7.0349E-06	7.1763E-06

Çizelgede görülen model sonuçlarına göre %85-%15 oranında ayrılmış veri seti ile eğitilen, 15 ara katman nöronlu ağ modelin en iyi hata sonucuna sahip olduğu gözlemlenmiştir (MSE=7.0349E-06). En iyi ağ modeli seçildikten sonra tüm veri setiyle bu ağ modeli test edilmiştir. Test sonucu, ağın basınç, sıcaklık ve yük çıktıları elde edilmiştir. Ağın 3 çıkışı ile saha gözlem sonuçları toplu görünümde karşılaştırmalı olarak Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 En iyi MLP ağı birleşik performans çıktısı

Şekilde görüldüğü gibi, modelin her bir çıktısının hedef ölçümleri iyi bir şekilde takip ettiği gözlemlenmiştir. Beklenen sonuçlar ile ağ sonuçları arasında ortalama korelasyon değeri $R=0.8797$ olarak elde edilmiştir. Buradan hareketle ağın beklenen çıktıları yüksek oranda tahmin edebildiği gözlemlenmiştir. Ek olarak Tüm çıktıları ayrı ayrı çizilmiş ve şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 En iyi MLP ağı ayırık performans çıktısı

Şekil 4.4’te, Tasarlanan ağ modelinin yük ve sıcaklık çıkışlarının hedeflere yakınsandığı, ancak basınç değerlerinde sapmanın fazla olduğu görülmüştür. Tüm çıkışların ayrı ayrı istatistiksel analizleri MSE, MAE VE R (korelasyon) kriterleri kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

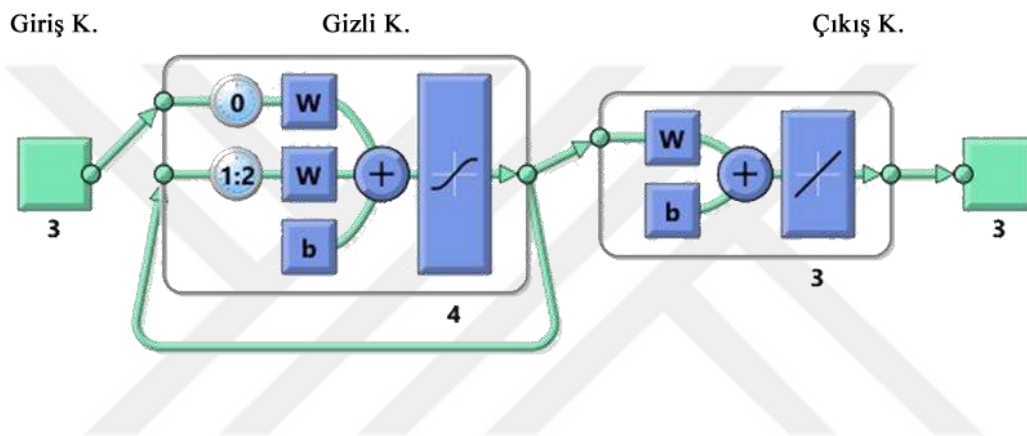
Çizelge 4.2 MLP mimarili ağ modellenli istatistiksel performans sonuçları

Çıktılar	MSE(%)	MAE(%)	R
Basınç	0.010024	0.006672	0.7062
Sıcaklık	0.028617	0.012625	0.9403
Yük	0.023675	0.010086	0.9928

Çizelge analiz edildiğinde, basınç değeri istatistiksel olarak en düşük hataya sahip olsa da, diğer çıktılardan daha düşük korelasyon katsayısına sahiptir. Bu nedenle modelin basınç değişimlerini izlemede sıcaklık ve yük kadar başarılı olmadığı gözlemlenmiştir. Toplamda, elde edilen sonuç şekil 4.4 ile tutarlılık göstermektedir.

4.1.3 RNN ile Termik Santral Modeli

Modelleme aşamasında ikinci olarak gecikme zamanlı geri besleme eklenen ve dinamik sistem modellemesinde daha başarılı olduğu belirtilen geri dönüşlü Elman ağ yapısı (RNN) kullanılmıştır. Girişler için herhangi bir zaman gecikmesi belirlenmemiş, dinamik sisteme yakınlıktırma amacı ile geri besleme katında 1:2 zaman gecikmesi kullanılmıştır. Yine eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt eğitim algoritması seçilmiş, oluşturulan ağ yapısı MATLAB 2018 b üzerinde çalıştırılmıştır. Oluşturulan ağ yapısı 3 giriş 3 çıkışlı (MIMO) ağ yapısı olup, yapı şekil 4.5'te görülmektedir.



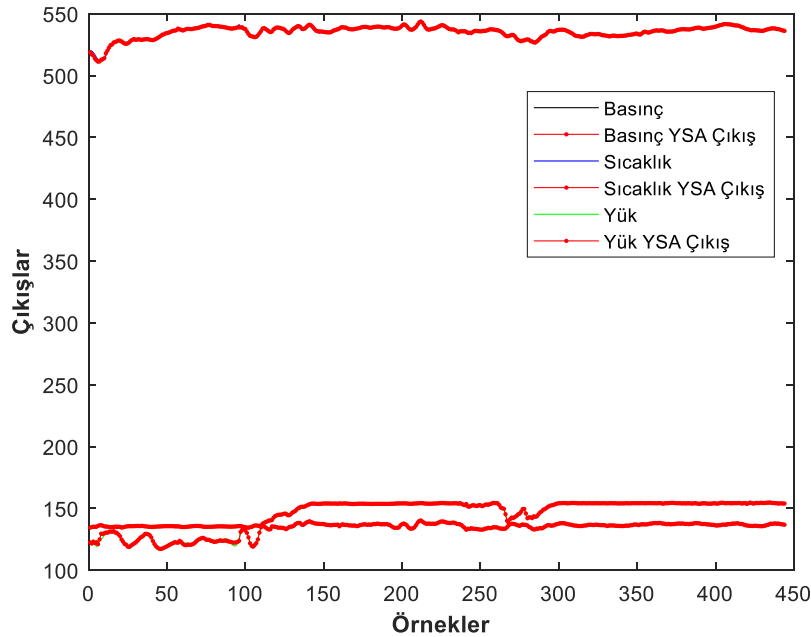
Şekil 4.5 Termik santral modelleme RNN Ağ mimarisi görünümü.

Hata fonksiyonu olarak MSE kullanılmıştır. İlk olarak eğitim esnasında veri seti, eğitim seti ve test seti olarak iki bölüme ayrılmış, % (eğitim, test) olacak şekilde sırasıyla, % (60,40), % (65,35), % (70,30), % (75,25), % (80,20), % (85,15) ve % (90,10) olarak düzenlenmiştir. Düzenlenen her bir veri seti için mimaride gizli katmanda 4 nöronlu yapı ile eğitime başlanılmış olup sırasıyla gizli katman nöron sayısı 15'e kadar yükseltilmiştir. Her bir gizli katman nöron sayısı için 100 deneme yapılmıştır. Yapılan denemeler esnasında en düşük MSE değeri kaydedilmiş ve bu değer bölümlere ayrılan eğitim seti için, mimaride oluşturulan gizli katman nöron sayısı özelinde en iyi performans sonucu olarak ağ ile birlikte ayrı ayrı kaydedilmiştir. RNN ağ mimarisi tabanlı sistem modeli eğitim sonuçları elde edilen MSE hesaplamalı performanslar çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 RNN mimarili ağ modelleme eğitim sonuçları

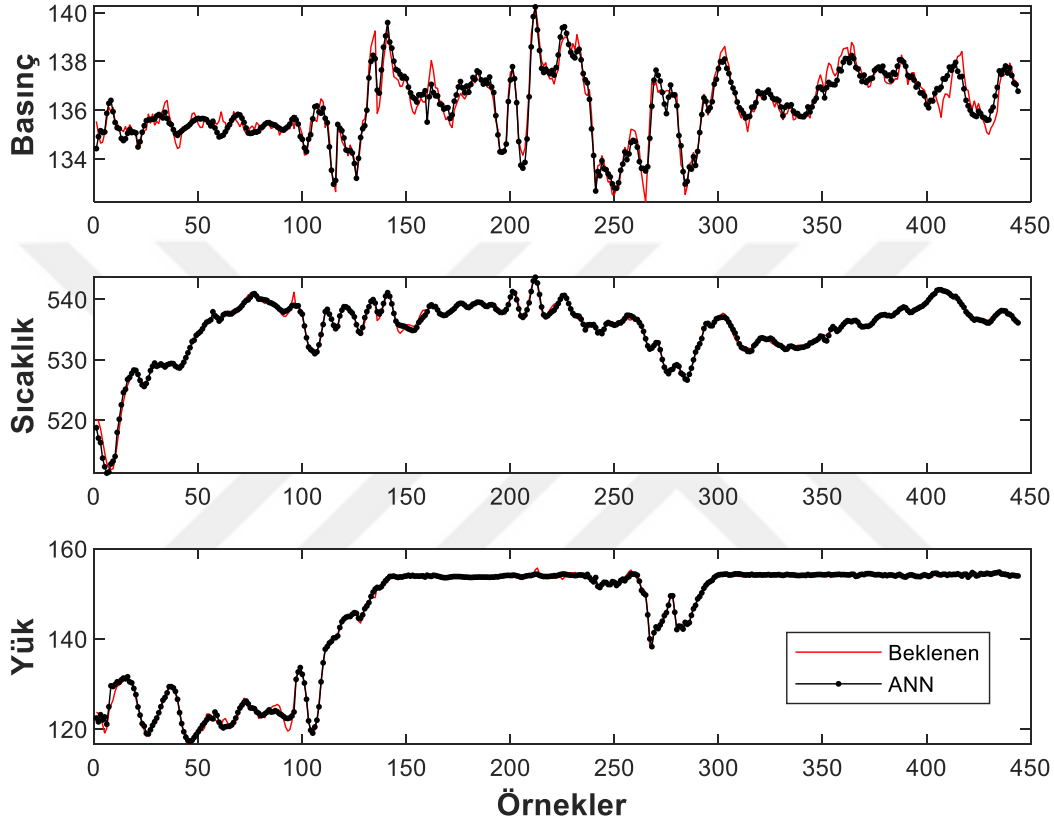
Mimari		%60- %40	%65-%35	%70- %30	%75-%25	%80- %20	%85- %15	%90- %10
Gizli Katman Nöron sayısı	4	6.84E-06	1.095E-05	7.37E-06	8.175E-06	8.08E-06	6.95E-06	6.67E-06
	5	4.74E-06	6.209E-06	7.17E-06	4.496E-06	7.29E-06	7.03E-06	4.8E-06
	6	6.71E-06	5.087E-06	4.42E-06	6.25E-06	3.94E-06	3.99E-06	3.38E-06
	7	1.43E-05	3.084E-06	5.34E-06	4.133E-06	6.21E-06	4.13E-06	2.85E-06
	8	3.4E-06	4.008E-06	4.94E-06	2.666E-06	5.53E-06	3.93E-06	3.96E-06
	9	2.47E-06	4.972E-06	2.67E-06	2.514E-06	2.77E-06	3.72E-06	7.53E-06
	10	5.74E-06	1.143E-05	3.61E-06	3.857E-06	5.31E-06	2.59E-06	2.67E-06
	11	2.64E-06	3.249E-06	3.12E-06	1.179E-05	2.04E-06	4.53E-06	6.07E-06
	12	5.81E-06	4.697E-06	7.22E-06	1.94E-06	2.38E-06	2.64E-06	2.38E-06
	13	4E-06	1.83E-06	2.54E-06	2.061E-06	1.07E-05	2.17E-06	1.84E-06
	14	2.5E-06	3.708E-06	2.53E-06	3.782E-06	1.87E-06	8.05E-06	3.34E-06
	15	3.33E-06	3.965E-06	4.35E-06	2.541E-06	2.32E-06	2.22E-06	8.55E-07

Çizelgede görülen model sonuçlarına göre %90-%10 oranında ayrılmış veri seti ile eğitilen, 15 ara katman nöronlu ağ modelinin en iyi hata sonucuna sahip olduğu gözlemlenmiştir (MSE=8.55E-07). En iyi ağ modeli seçildikten sonra tüm veri setiyle bu ağ modeli test edilmiştir. Test sonucu, ağın basınç, sıcaklık ve yük çıktıları elde edilmiştir. Ağın 3 çıkışı ile saha gözlem sonuçları toplu görünümde karşılaştırmalı olarak Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 En iyi RNN ağı birleşik performans çıktısı

Şekilde görüldüğü gibi, modelin her bir çıktısının hedef ölçümleri iyi bir şekilde takip ettiği gözlemlenmiştir. Beklenen sonuçlar ile ağ sonuçları arasında ortalama korelasyon değeri $R=0.9856$ olarak elde edilmiştir. Buradan hareketle ağın beklenen çıkışları yüksek oranda tahmin edebildiği gözlemlenmiştir. Ek olarak tüm çıkışlar ayrı olarak çizilmiş ve şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 En iyi RNN ağı ayırık performans çıktısı

Şekil 4.7’de, Tasarlanan ağ modelinin yük ve sıcaklık çıkışlarının hedeflere çok iyi yakınsandığı, ancak basınç değerlerinde bir miktar sapma olduğu görülmüştür. Tüm çıkışların ayrı ayrı istatistiksel analizleri MSE, MAE VE R kriterleri kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4 RNN mimarili ağ modeli istatistiksel performans sonuçları

Çıktılar	MSE(%)	MAE(%)	R
Basınç	0.001462	0.002974	0.9626
Sıcaklık	0.002327	0.003155	0.9954
Yük	0.003788	0.003889	0.9989

Çizelge analiz edildiğinde, basınç değeri istatistiksel olarak en düşük hataya sahip olsa da, diğer çıktılarından daha düşük korelasyon katsayısına sahiptir. Bu nedenle modelin basınç değişimlerini izlemede sıcaklık ve yük kadar başarılı olmadığı gözlemlenmiştir. Toplamda, elde edilen sonuç şekil 4.7 ile tutarlılık göstermektedir.

4.2 YSA İLE TERMİK SANTRAL KAZAN KONTROLÜ

Günümüz sistemlerinin karmaşıklığı mevcut geri beslemeli kontrol sistemlerinin tasarım teknikleri üzerine ciddi baskılar getirmiştir. Birçok kontrol tasarımı sistem modeline gereksinim duymakla birlikte, tasarım aşamasında ki karmaşayı azaltmak maksadı ile ihmal edilen parametreler, sistem hayata geçirildiğinde istenmeyen kontrol hatalarına sebep olur. Bununla birlikte tasarlanan birçok kontrol yapısı, sistem üzerinde zamanla meydana gelen değişiklikleri algılayamaz ve öğrenemez. Oluşan değişimler neticesinde sistemlerin yeniden optimize edilmesi ve kontrol parametrelerinin yeniden belirlenmesi gerekir. YSA sistemleri ise bahsedilen kontrol sistemlerinin bu eksikliklerinden muaftır. YSA, sistem davranışlarında ki değişimleri, çevresel koşulları, belirsizlikleri öğrenme ve bunlara uyum sağlama yeteneğine sahiptir (Lewis et al 1999).

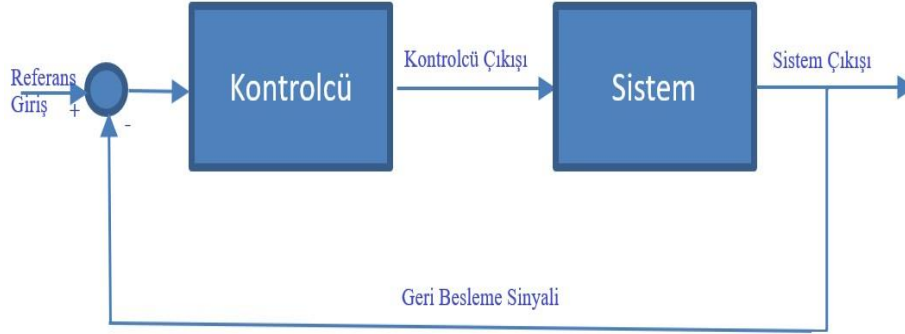
Kontrol, sistemin gereken bir ya da birçok değişkeninin önceden belirlenmiş koşullara uyumunu sağlamaya yönelik yapılan işlemlerin tümüdür. Kontrol sistemleri temelde açık çevrim kontrol ve kapalı çevrim kontrol olmak üzere iki kısımda incelenebilir (Güllü 2010) .

Açık çevrim kontrol yapısında kontrolcü doğrudan sistem parametrelerini arzu edilen noktaya ulaştırmak için çalışırken, sistemin buna karşı vermiş olduğu cevapları izlemez. Şekil 4.8’de açık çevrim kontrol sistemi blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.8 Açık çevrim kontrol.

Kapalı çevrim kontrol yapısında ise kontrolcü tarafından üretilen kontrol sinyallerine karşılık sistemde oluşan çıkış, kontrolcü girişine de gönderilerek, referans değeriyle sistem çıkışı arasında oluşan hata izlenir. Şekil 4.9’da kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı görülmektedir.

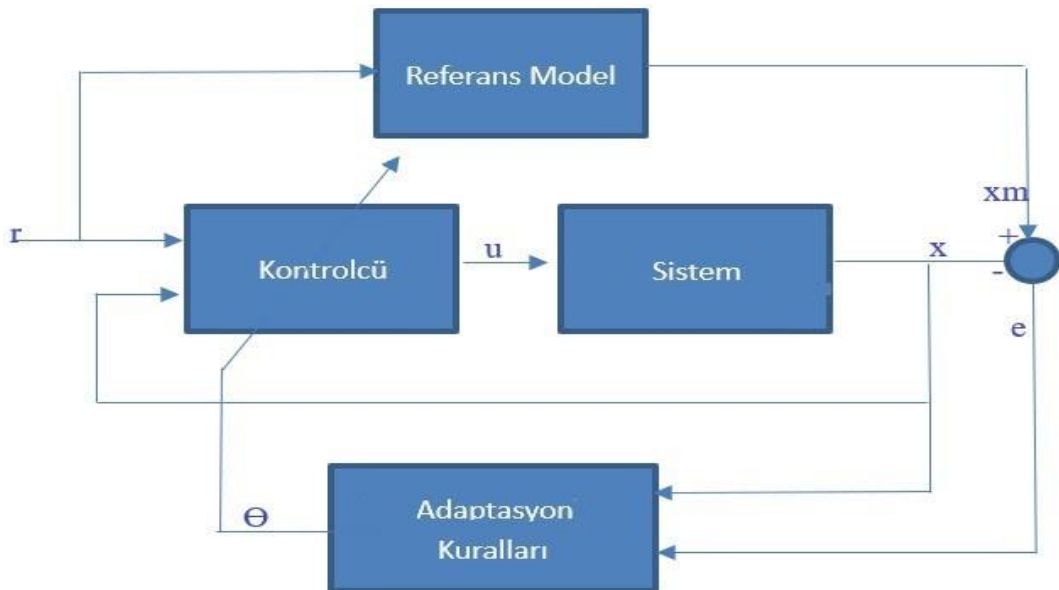


Şekil 4.9 Kapalı çevrim kontrol.

4.2.1 YSA Tabanlı Model Referans Adaptif Kontrol (MRAK)

Sistem belirsizliklerinin bir kontrolcünün performansını önemli ölçüde etkileyebileceği istenen performansı sağlamada önemli ölçüde kayıplara neden olabileceği sistemlerde adaptif denetim sistem belirsizliklerinin etkisini önemli ölçüde azaltabilir.

Tipik model referans adaptif kontrol sistem blok diyagramı Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10 MRAK sistem blok diyagramı

Doğrudan uyarlamalı ve dolaylı uyarlamalı olmak üzere iki tip adaptif kontrol bulunur. Her iki tip kontrolün kullanıldığı hibrit sistemlerde bulunmaktadır. Tipik bir doğrudan uyarlamalı kontrol şu şekilde ifade edilebilir.

$$u = k_x(t)x + k_r(t)r \quad (4.1)$$

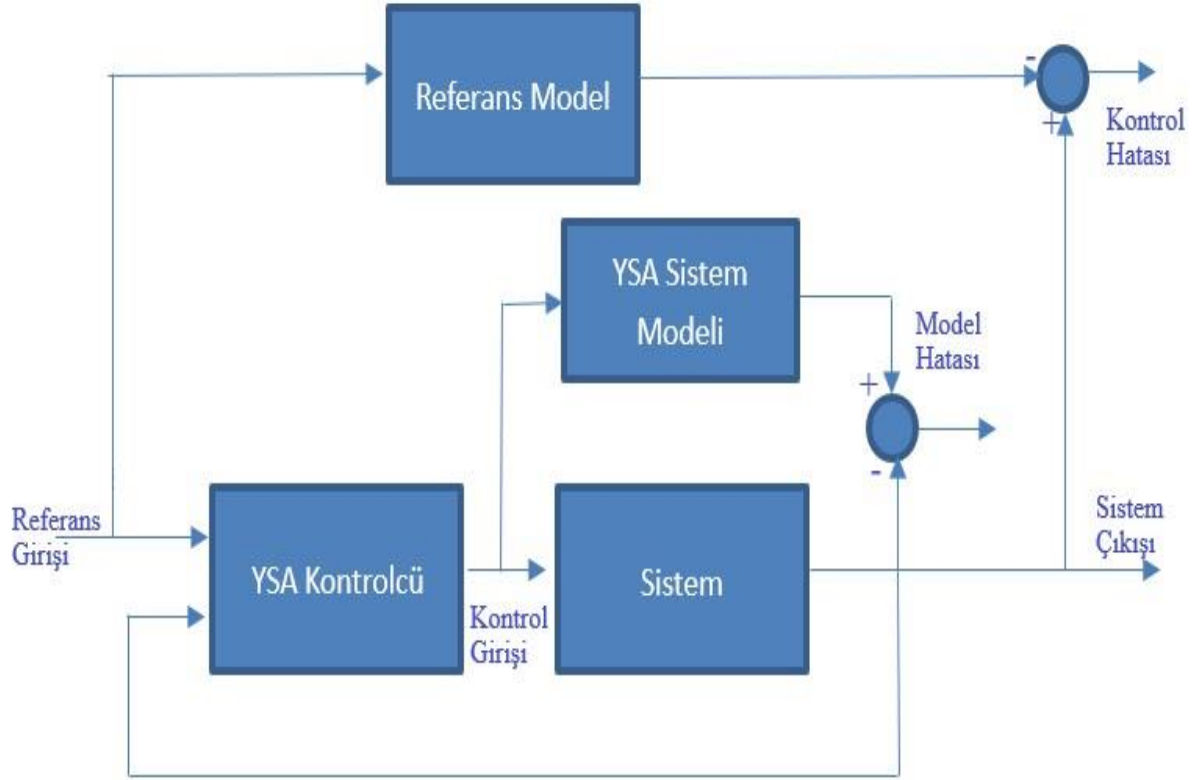
Denklem 4.1 de ifade edilen $k_x(t)$ ve $k_r(t)$ sistem kazancıdır. Kazançlar sistem mimarisinde bulunan geri bildirim tarafından ayarlanabilir, böylece doğrudan uyarlanabilir bir kontrol, sistem belirsizliklerini ortadan kaldırabilir. Dolaylı uyarlanabilir kontrol sistemlerinde ise kazançların ayarlanması, dolaylı olarak gerçekleştirilir ve aynı hedefe ulaşılmış olur. Dolaylı uyarlamalı kontrol mekanizması;

$$u = k_x(p(t))x + k_r(p(t))r \quad (4.2)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Sistem parametrelerinden $p(t)$ çevrimiçi olarak tahmin edilen bir parametre olup kontrol kazancını ayarlar (Nguyen 2018).

Adaptif kontrol sistemlerdeki çeşitli belirsizliklerle başa çıkabilir. Bunlar yapısal belirsizlikler, yapılandırılmamış belirsizlikler (ihmaller, çevre şartlarında değişim vb.) ya da modellenmemiş parametreler olabilir. Referans model, adaptif kontrol sistemi tarafından, belirtilen sistem cevabına ulaşmak için giriş parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır. Adaptasyon mekanizması sistem çıkışı ile referans model çıkışı arasında oluşan hatayı izleyerek çalışır. Adaptasyon kuralları, hatayı mümkün olabildiği kadar küçük tutabilmek için, kontrolcü kazançlarının ayar kurallarının belirlendiği bloktur. Birçok farklı uyarlama (adaptasyon) kuralları getirilmekle birlikte her birinin birbirleri üzerinde farklı üstünlükleri bulunmaktadır (Nguyen 2018).

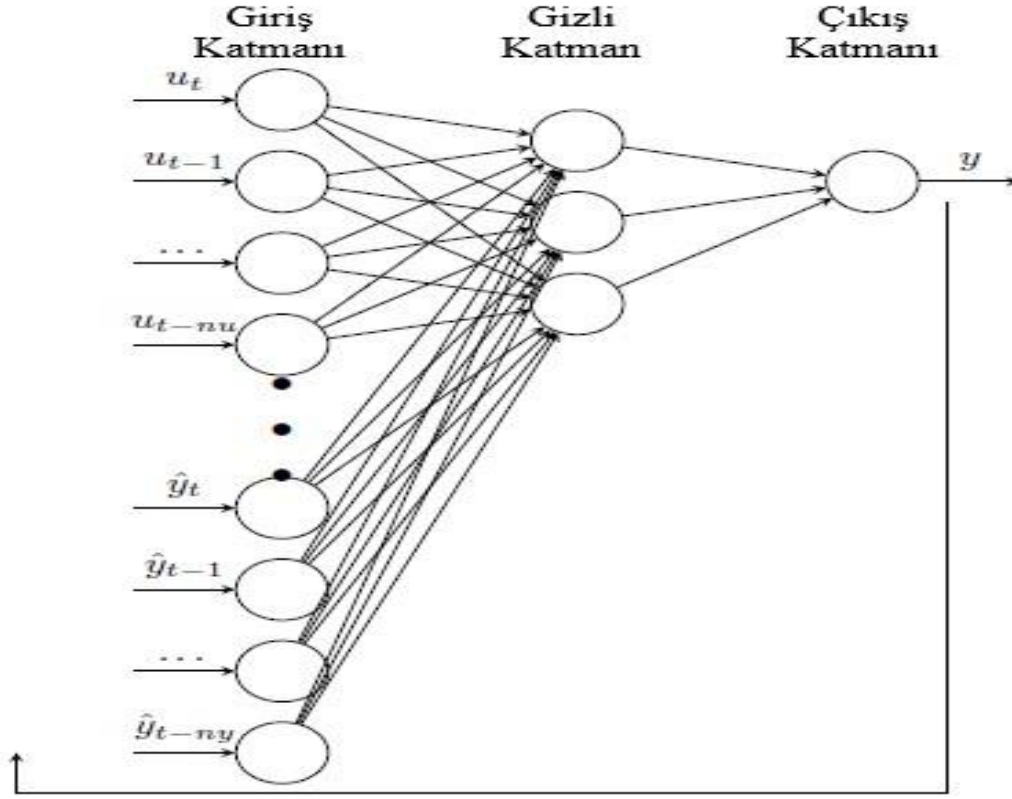
Yapay sinir ağı tabanlı model referans kontrol mimarisi iki adet sinir ağı kullanır. Bunlardan ilki kontrolcü ikincisi ise sistem modelidir. YSA temelli MRAK'ta öncelikli olarak sistem modellenir daha sonra kontrolcü sistem modelini izleyecek şekilde eğitilir. Şekil 4.11'de YSA tabanlı MRAK mimarisi verilmiştir.



Şekil 4.11 YSA tabanlı MRAK mimarisi.

4.2.1.1 NARX Ağ Yapısı

NARX (Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input) ağ yapısında modelin çıkışının geçmiş değerleri tasarımcı tarafından belirlenen gecikme zamanı ile ağ yapısı girişine uygulanmaktadır. Bu anlamda RNN ile benzer özellik göstermekle birlikte, Elman RNN yapısında gizli katmanda alınan geri besleme NARX ağ yapısında modelin cevaplarından alınmaktadır. Bu haliyle geri dönüşümlü ağ yapısına sahip NARX ağı seri paralel, paralel yapıda kullanılabilir. Şekil 4.12’de seri paralel, paralel düğümlere sahip NARX ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 4.12 NARX ağ yapısı (Bektaş ve Jones 2016).

NARX yapısının çalışmasını tanımlayıcı denklem:

$$y(t+1) = f(y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-n_y}, u_{t-1}, u_{t-2}, u_{t-n_u}) \quad (4.3)$$

Denklem 4.3’de y_t model tarafından üretilen ve geri beslenen girişleri, u_t ise dış giriş vektörünü temsil etmektedir. Kısaca denklem;

$$y_{t+1} = f(y_{(t)}; u_{(t)}) \quad (4.4)$$

Şeklinde tanımlanabilir. Seri paralel yapı açık cevrim olarak da adlandırılır ve NARX model ağın eğitimi için kullanılır. Girişlere hedef vektörünün regresyonu denklem 4.6 da belirtildiği şekilde ağa uygulanır (Bektaş ve Jones 2016).

$$\hat{y}(t+1) = f(y_{sp(t)}; u_t) \quad (4.5)$$

$$\hat{y}(t + 1) = f(y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-n}, u_{t-1}, u_{t-2}, \dots, u_{t-n}) \quad (4.6)$$

Paralel mimari kapalı çevrim model olarak da adlandırılır ve eğitim sonrasında çevrim kapatılarak model denklem 4.8'deki halini alır (Bektaş ve Jones 2016).

$$\hat{y}(t + 1) = f(y_{sp(t)}; u_t) \quad (4.7)$$

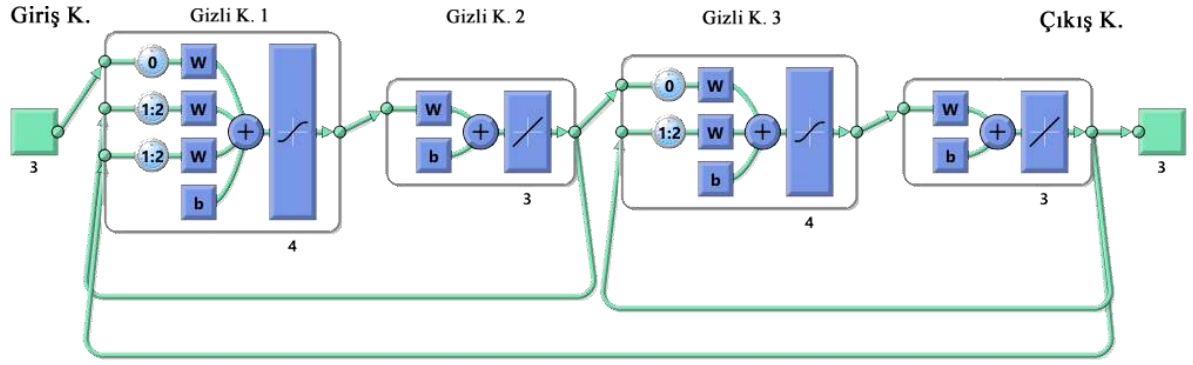
$$\hat{y}(t + 1) = f(\hat{y}_{t-1}, \hat{y}_{t-2}, \dots, \hat{y}_{t-n}, u_{t-1}, u_{t-2}, \dots, u_{t-n}) \quad (4.8)$$

Narx model uygulamada, zaman serisine bağlı tahminlerde serinin bir sonraki adımının tahmininde bir önceki adımının da bilinmesinin daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Örneğin yarın oluşacak olan elektrik tüketimi tahminin de bugün ki tüketim verilerinin de tahminciye girilmesini daha iyi tahmin sonucu sağlamıştır (Diaconescu 2016) .

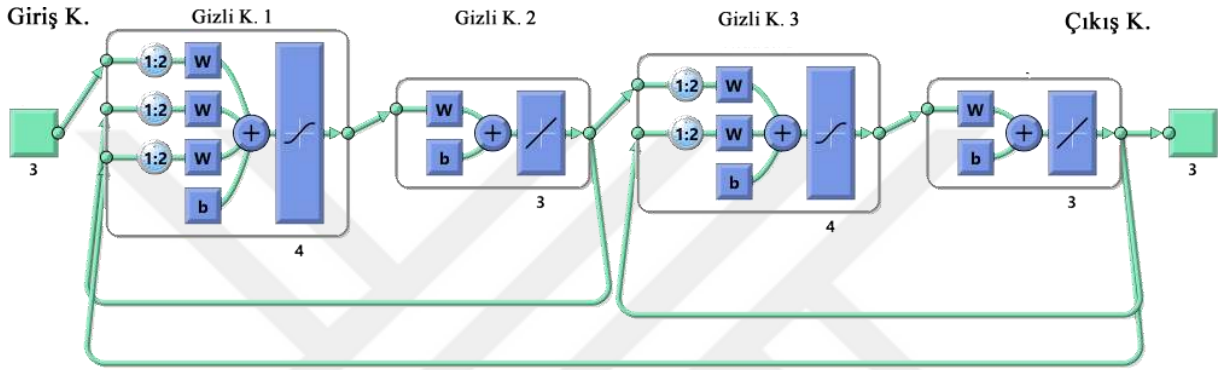
Ayrıca kontrol yapılarında modelin sağlamış olduğu çıkış geri besleme düzeneği ile, sistemin bir sonraki adımına yönelimi sağlanırken mevcut durum değişkenlerinin de sistemde işlenmesinin kontrol keskinliğini arttıracakları aşikardır.

4.2.1.2 NARX temelli MRAK model

Çalışmada, MRAK kontrolcüsünde, NARX YSA kullanılmış, modeli eğitmek için veri setinin %80'i eğitim, %10 doğrulama, %10 test için seçilmiştir. Seçilen veri seti ile gizli katman sayısı 4 ile 15 arasında değişen NARX mimarisi için eğitim süreci işlenmiştir. Eğitim için NARX sistem modelinde Levenberg-Marquardt algoritması, MRAK eğitimi aşamasında Bayesian Regularization eğitim algoritması kullanılmıştır. Eğitim süreci her bir nöron sayısı için 100'er kez tekrar edilmiş ve en düşük hata sonucu yakalanmaya çalışılmıştır. NARX mimarisi oluşturulurken giriş vektörü için zaman gecikmesi 2 ve 0 alınarak benzetimler giriş vektöründe iki ayrı zaman gecikmesi modeli ile gerçekleştirilmiştir. Gecikme zamanına dair gerçekleştirilen seçimlerle 2 farklı NARX mimarisi elde edilmiştir. Her iki modelde de yapılan denemeler sonucunda sistem referansına en yakın çıkışı veren ara katman nöron sayısı 4 olarak tespit edilmiştir. Zaman gecikmeli ve zaman gecikmesiz giriş vektörü tasarımlı MRAK kontrolcüsüne ait ağ mimarileri şekil 4.13'de görülmektedir.



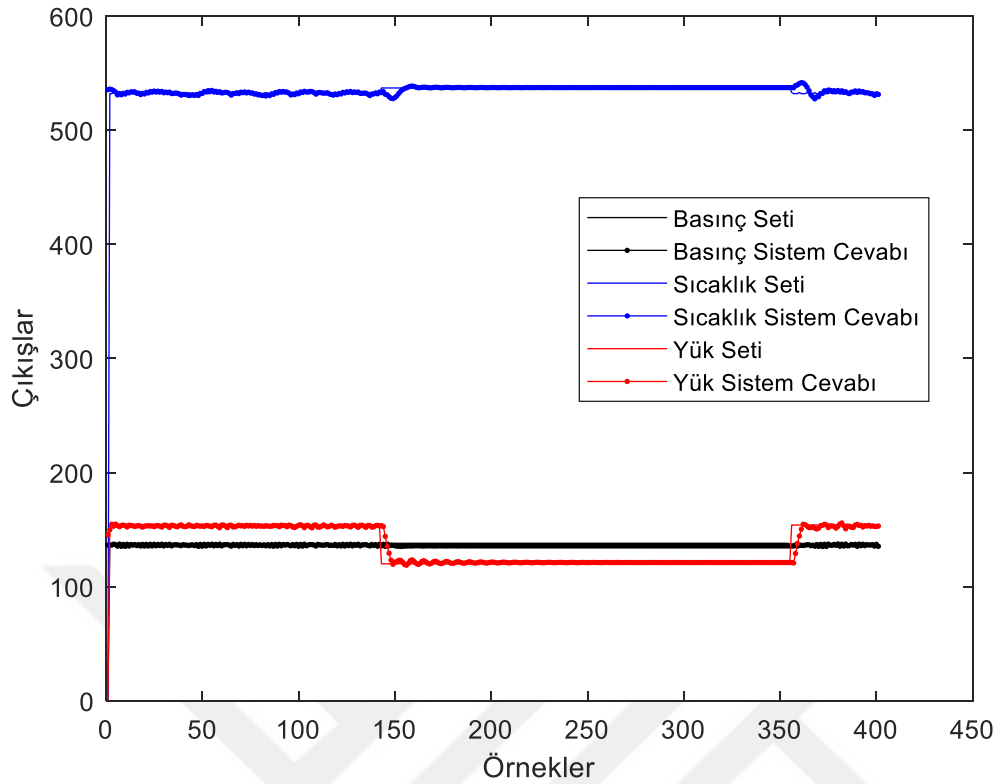
(a)



(b)

Şekil 4.13 NARX temelli MRAK a) Giriş zaman gecikmesi=0, b) Giriş zaman gecikmesi=2

Eğitim sonrası referans giriş vektörü ile çıkış vektörü arasında en düşük hataya sahip olan her iki tasarıma ait MRAK modelin kontrolcü performansı gözlemleyebilmek için 400 örneğe sahip referans set değerleri, her iki tasarımda ki kontrolcüye sunulmuş ve kontrolcünün sistem cevabı ölçülmüştür. Dış giriş vektörü zaman gecikmeli kontrolcü için ölçüm sonucunda elde edilen, giriş referans set değerleri olan basınç, sıcaklık ve yük verileri, tasarlanan kontrolcü ile birlikte şekil 4.13’de verilen YSA sistem modeli olarak çalışacak NARX modele sunulurken, model çıktıların, referans değerlere göre aldığı değerler belirlenmiştir. Kontrolcünün sistem cevabı Şekil 4.14’da gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Giriş zaman gecikmesi=2 olan MRAK model sistem cevabı

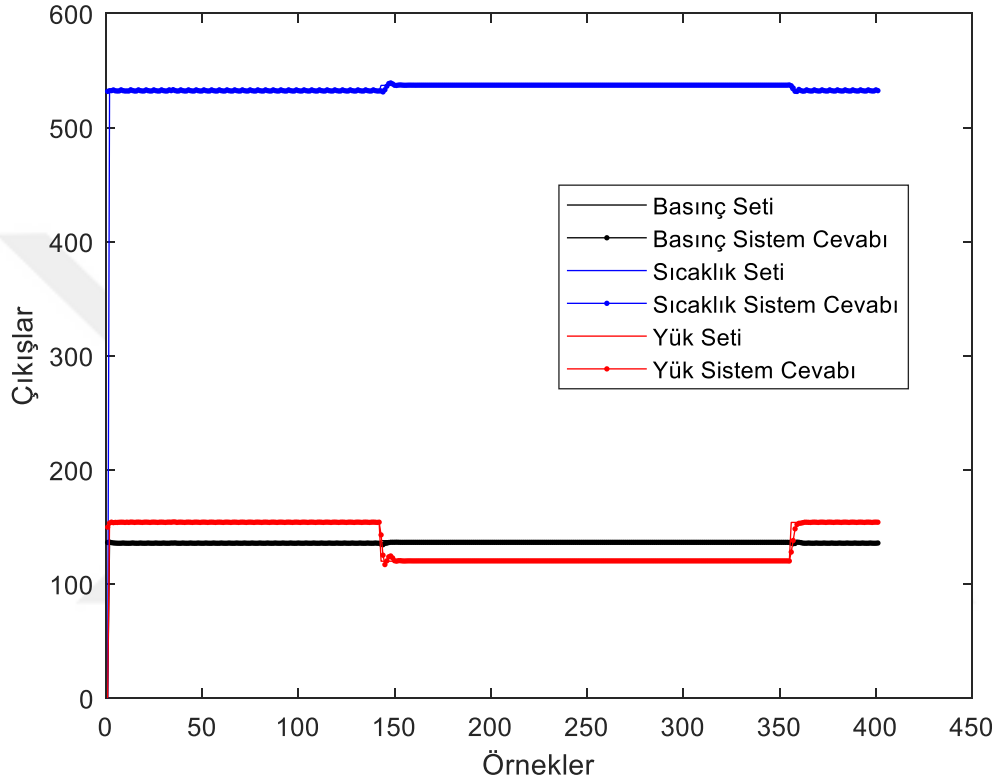
Şekilde görüldüğü gibi, tasarlanan kontrolcü tarafından referans değerlere uyumlu sistem cevapları üretildiği gözlemlenmiştir. Tüm referans girişlerin ayrı ayrı istatistiksel analizleri MSE, MAE ve R kriterleri kullanılarak hesaplanmış olup, elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 Giriş zaman gecikmesi 2 olan MRAK bloğu istatistiksel performans sonuçları

Çıktılar	MSE(%)	MAE(%)	R
Basınç	0.030122	0.015008	-0.5994
Sıcaklık	0.033393	0.010086	0.7553
Yük	0.171560	0.016437	0.9705

Çizelge analiz edildiğinde, basınç değerinin, istatistiksel olarak düşük hataya sahip olsa da, korelasyon katsayısının aldığı negatif değer ile ters korelasyonda kaldığı görülmektedir. Basınç ve sıcaklık set çıkışlarında düşük MAE ve MSE değerleri yakalanmış olmakla birlikte en yüksek korelasyona sahip yük değerinin en yüksek MSE değerine sahip olduğu görülmektedir.

Giriş vektörü zaman gecikmesiz kontrolcü tasarımı için ölçüm sonucunda elde edilen, giriş referans set değerleri olan basınç, sıcaklık ve yük verileri, tasarlanan kontrolcü ile birlikte şekil 4.13’de verilen YSA sistem modeli olarak çalışan NARX modele sunularak, model çıktılarının, referans değerlere göre aldığı değerler belirlenmiştir. Kontrolcünün sistem cevabı Şekil 4.15’da gösterilmiştir.



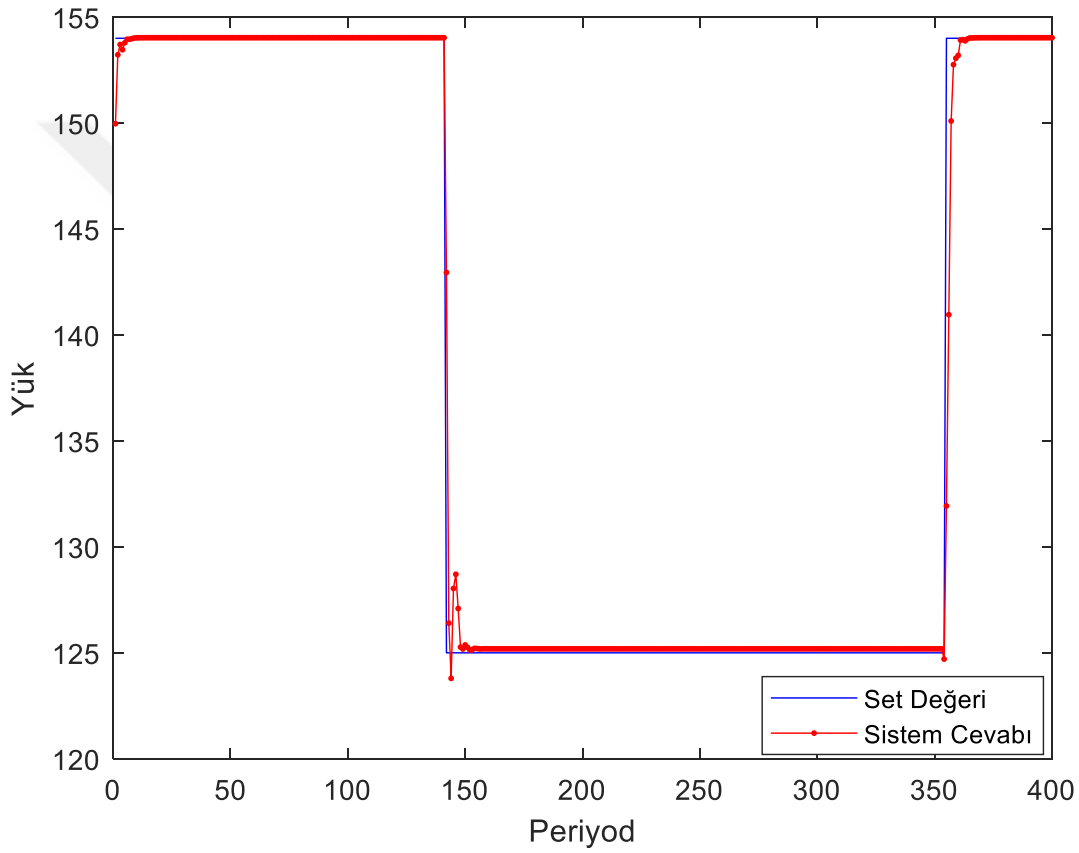
Şekil 4.15 Giriş zaman gecikmesiz MRAK model sistem cevabı

Şekilde görüldüğü gibi, tasarlanan kontrolcü tarafından referans değerlere uyumlu sistem cevapları üretildiği gözlemlenmiştir. Tüm referans girişlerin ayrı ayrı istatistiksel analizleri MSE, MAE ve R kriterleri kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6’te verilmiştir.

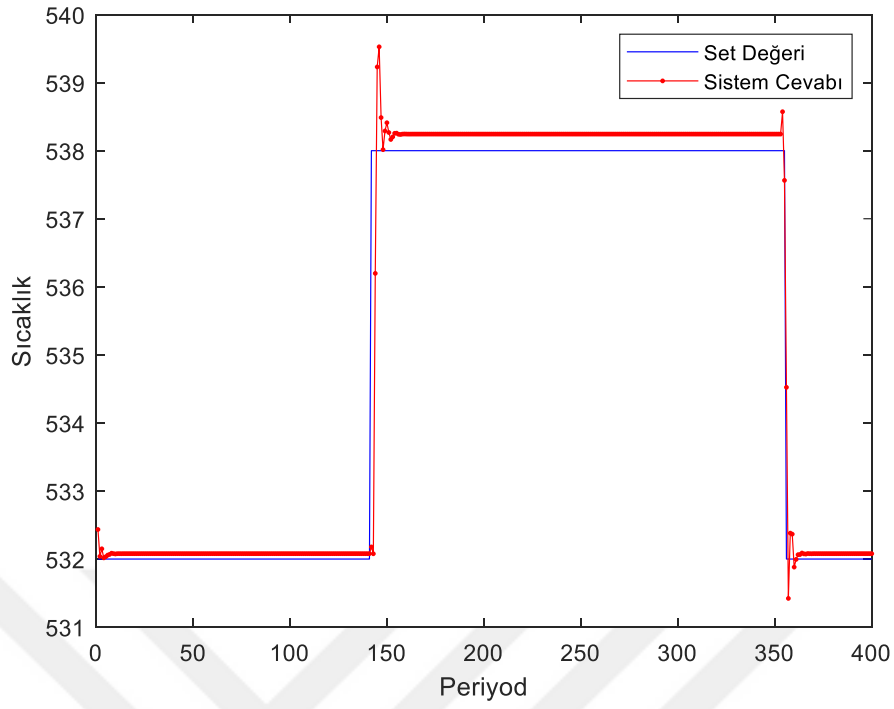
Çizelge 4.6 Giriş zaman gecikmesiz MRAK bloğu istatistiksel performans sonuçları

Çıktılar	MSE(%)	MAE(%)	R
Basınç	0.011821	0.008704	0.8930
Sıcaklık	0.002899	0.002347	0.9769
Yük	0.039906	0.004457	0.9931

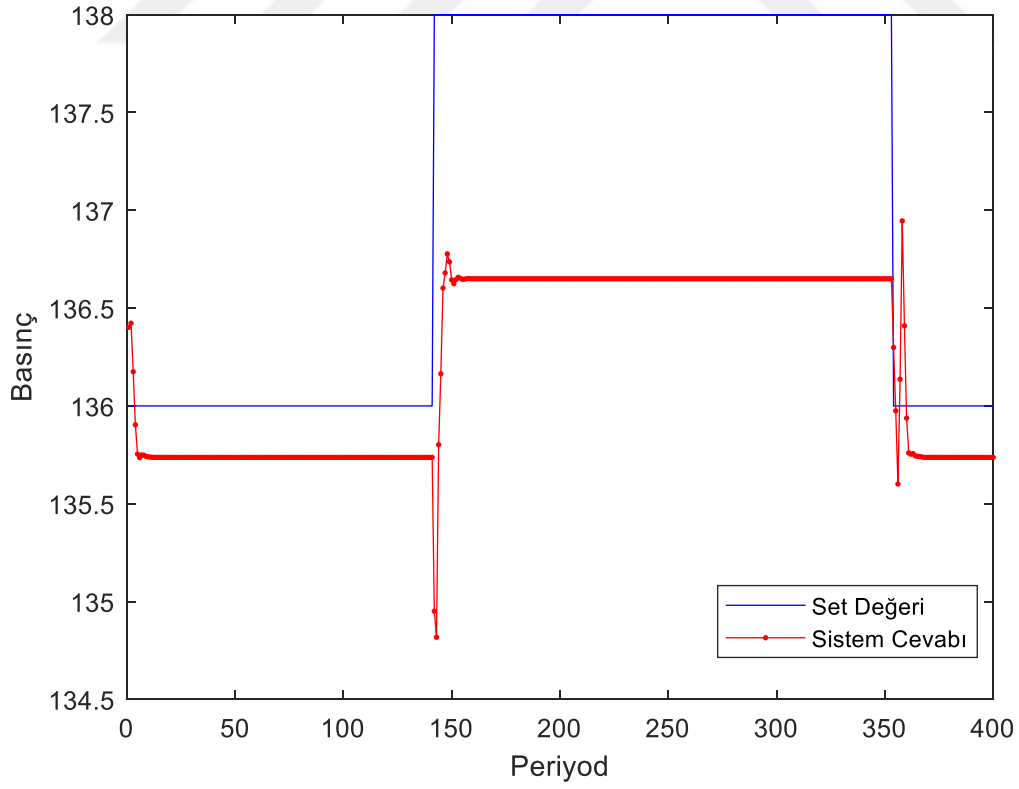
Çizelge analiz edildiğinde, basınç değerinin istatistiksel olarak en düşük korelasyona sahip olmasına rağmen %80'in üzerinden bir değer olarak yüksek korelasyon sınıfında değerlendirilebileceği görülmektedir. Tüm % MSE ve % MAE hatalarının düşük seviyelerde seyrettiği en yüksek %MSE hatasına yük çıkışının sahip olduğu, en yüksek % MAE hatasına ise basınç çıkışının sahip olduğu görülmektedir. Tüm çıkış verilerine ait grafikler ayrı ayrı elde edilmiş olup, şekil 4.16'da yük seti ve sistem yük çıkış grafiği, şekil 4.17'de sıcaklık seti ve sistem sıcaklık çıkış grafiği, şekil 4.18'de basınç seti ve sistem basınç çıkış grafiği verilmiştir.



Şekil 4.16 Yük seti ve yük çıkışı.



Şekil 4.17 Sıcaklık seti ve sıcaklık çıkışı.



Şekil 4.18 Basınç seti ve basınç çıkışı.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Bu çalışmada yakıt olarak katı yakıtlı, kömürle çalışan 157 MW güçte bir termik santralin YSA tabanlı modellemesi yapılmış ve YSA tabanlı kontrol modeli tasarlanmıştır. Günümüz koşullarında elektrik enerjisi üretiminin sürdürülebilir toplumsal faydayı ön planda tutarak, çevre şartları ile barışık, ekonomik şekilde devam etmesi diğer tüm üretim proseslerinde ki kadar önemlidir. Buda bir yandan makina alanında yapılan yeni araştırmalar ile birlikte kontrol uygulamalarında da yeni araştırmalarla yeni yöntemlerin kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Günümüz kontrol sistemleri klasik alışlagelmiş yapısı ile sistem kontrollerini başarı bir şekilde yürütmekle birlikte, dış bozucu etkenlere karşı herhangi bir direnç gösterememekte ve uyum sağlayamamaktadır. Bu nedenle günümüzde değişen çevre şartlarına uyum sağlayabilen kontrol yöntemleri önem kazanmıştır.

Bu çalışmada öncelikli olarak klasik modelleme teknikleri ile çevre şartları ve tasarım parametrelerinde ki değişiklik nedeni ile tam anlamıyla modellemesi yapılması zorluk taşıyacak kömür yakıtlı bir termik santralin YSA tabanlı MLP ve RNN mimarisi ile MATLAB 8 B üzerinde modellemesi gerçekleştirilmiştir. Modellemelere dair performans ölçümü maliyet fonksiyonu MSE ile yapılmıştır. Yapılan modelleme çalışmasında MLP ile modellemede en düşük hata değeri $MSE=7.0349E-06$, RNN ile modellemede en düşük hata değeri $MSE=8.55E-07$ olarak elde edilmiştir. Modelleme sonuçları irdelendiğinde her iki teknikle de santralin başarıyla modellenbildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte modele ait tüm çıktılar ayrık olarak incelenmiştir. MLP ile modelleme de basınç çıktısı korelasyon düzeyi $R=0.7062$ değeri ile yüksek seviye de iken, RNN ile modelleme de basınç korelasyonu $R=0.9626$ değeri ile çok yüksek olarak gerçeklemiştir. MLP ile modelleme sıcaklık korelasyonu $R=0.9403$ olarak, yük (güç) korelasyonu değerleri $R=0.9928$ olarak gerçekleşmiştir. RNN ile modelleme sıcaklık korelasyonu $R=0.9954$ olarak, yük (güç) korelasyonu değeri $R=0.9928$ olarak gerçekleşmiştir. Ortalama korelasyon MLP ile modellemede $R=0.8797$ değerinde iken, RNN ile modellemede $R=0.9856$ değeri elde edilmiştir. Ayrı ayrı çıkışların % MSE ve % MAE değerlerine

bakıldığında da RNN ile modellemenin MLP ile modelleme karşısında üstün olduğu gözükmemektedir. Tüm veriler ışığında RNN ile modellemede teoriye uygun olarak başarıyı daha yüksek bir termik santral YSA modeli elde edilmiştir.

Kontrolcü tasarımı MRAC yöntemi ile adaptif bir kontrolcü tasarlanmıştır. Ölçüm sonucu elde edilen 444 adet veri içeren veri seti ile santral modeli ve kontrolcü eğitilmiştir. Tasarım aşamasında aynı model üzerinde iki farklı uygulama ile sonuçlar irdelenmiştir. İlk olarak giriş vektörü dahil olmak üzere tüm giriş ve geri beslemelere zaman gecikmesi uygulanmış 444 adetlik veri seti ile eğitilmiş MSE'ye göre en iyi performansı sunan ağ 400 adetlik test verisi setine tabi tutulmuştur. Aynı işlemler giriş sinyalinde zaman gecikmesi olmayan geri beslemelerde zaman gecikmeli sisteme uygulanmıştır. Test veri seti referans noktası (termik santral modeli çıkış set değerleri) ile tasarlanan MRAC çıkışları karşılaştırılmıştır. Kontrolör tasarımına dair yapılan simülasyonlar sonucunda giriş işareti zaman gecikmeli MRAC'ta giriş işareti ile sistem cevabı arasında ki korelasyon değeri basınç için $R=-0.5994$, sıcaklık için $R=0.7553$, yük için $R=0.9705$ olarak elde edilmiştir. Basınç korelasyonuna dair ters işaret, basınç değerinde giriş zaman gecikmeli MRAC modelin giriş işaretine uygun çıkış üretmediğini göstermektedir. Giriş vektörü zaman gecikmesiz geri besleme zaman gecikmeli uygulama simülasyonunda giriş işareti ile sistem cevabı arasında, basınç için korelasyon değeri $R=0.8930$ sıcaklık korelasyon değeri $R=0.9769$, yük için korelasyon değeri $R=0.9931$ olarak elde edilmiştir. Giriş zaman gecikmesiz MRAC simülasyonu sonucunda tüm model çıkışları için çok yüksek korelasyon yakalanmıştır. Ayrıca yüzde ortalama mutlak hata değeri % MAE basınç, sıcaklık ve yük için maksimum % 0.008704 olarak, yüzde ortalama karesel hata değeri % MSE ise maksimum % 0.039906 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara ışığında giriş sinyaline göre geri besleme zaman gecikmesi eklenmesinin önemi ortaya çıkmıştır. Kontrol mühendisliği açısından YSA tabanlı kontrolcülerin uygulanabilirliği yüksek korelasyon ve düşük yüzdesel hatalar ile gözlemlenmiştir. Özellikle zaman gecikmesinin tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan olduğu sonucuna ulaşılmıştır. YSA tabanlı kontrolcü tasarımı set noktası aşımalarının ve offsetin yaşanabildiği grafiksel olarak gözlemlenmiştir.

Çok giriş çok çıkışa sahip dinamik bir sistem olan katı yakıtlı termik santralin YSA ile modellenmesi ve kontrolü, bilgisayar ortamında yapılan simülasyon ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Modern kontrol sistemlerinden MRAK'ın adaptif yapısı ile katı yakıtlı termik santral kontrolünde uygulanması halinde değişen şartlara uyum sağlaması sonucunda bozucularla baş etmesi, termik santralde genel verim artışı ve emre amadelik artışı sağlaması söz konusudur. Bilinen çalışmalar ışığında bu tez ile çok giriş çok çıkış (MIMO) yapılı dinamik bir sistem YSA tabanlı MRAK yapısına ilk kez aktararak başarımlı sağlanmıştır. Literatür açısından bu anlamda önemlidir. Bu çalışmadan hareketle tüm enerji üretim tesislerinde ve üretim tesisleri alt birimlerinde YSA tabanlı MRAK yapısı irdelenerek uygulama alanları incelenebilir.





KAYNAKLAR

- Asiltürk İ** (2007) Testere İle Kesme İşleminde Yapay Zeka Tabanlı Adaptif Kontrol Uygulaması. *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisli Anabilim Dalı, Konya, 184 s.
- Aşkın D ve İskender İ ve Mamızadeh A** (2011) Farklı Yapay Sinir Ağları Yöntemleri Kullanarak Kuru Tip Transformatör Sargısının Termal Analizi. *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Der.*, 46 (4): 905-913.
- Basheer I A and Hajmeer M** (2010) Artificial neural networks: fundamental, compitin,design, and application. *Journal of Microbiological Methods Elseiver*, (43): 3-31.
- Basu S and Debnath A K** (2015) *Power Plant Instrumentation and Control Handbook*, ISBN: 978-0-12-800940-6, Elsevier, UK, 916 pp.
- Bektaş O and Jones J A** (2016) NARX Time Series Model for Remaining Useful Life Estimation of Gas Turbine Engines, *European Conference Of The Prognostics And Health Management Sociesty*, 5–8 July 2016, Bizkaia, Spain, 1-16.
- Bourguet R E and Antsaklis P J** (1994) Artificial Neural Networks In Electric Power Industry. *Technical Report of The ISIS Group at the University of Notre Dame*, April 1994.
- Capuano L** (2018) International Energy Outlook 2018 (IEO2018), Energy Information Administration, 24 july 2018, Washington, DC, U.S.
- Chang C and Shen W** (2006) Using Counter-propagation Neural Network for Digital Audio Watermarking in DWT domain. *IEEE Int Conf Syst Man Cybern*, 8-11 Oct. 2006, Taiwan, 2: 1214–1219.
- Chow T W S and Cho S** (2007) *Neural Networks and Computing*, ISBN: 978-1-86094-758-2, Imperial College Press., London, 322 pp.
- Demir T** (2001) Yapay Sinir Ağları İle Modelleme ve Aktif Manyetik Yataklamalı Bir sistem Uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Kumadan Anabilim Dalı, İstanbul, 80 s.
- Diaconescu E** (2008) The use of NARX Neural Network to predict Chaotic Time Series. *Wseas Transactions on Vomputer Research*, 3 (3): 182-191.
- Dixit R and Kumar J and Soota T** (2015) Modeling of a Thermal Power Plant Using Neural Network and Regression Technique. *Journal of Scientific Research and Advances*, 2 (4): 166-174.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Elmas Ç** (2003) *Yapay Sinir Ağları*, 2. baskı, ISBN: 9789753476126, Seçkin Yayınları, Ankara, 192 s.
- Etike E** (2009) Yapay Sinir Ağı Temelli Model Esaslı Kontrol Algoritmasının Bir Polimer Reaktörüne Uygulanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , Kimya Mühendisli Anabilim Dalı, Ankara, 80 s.
- Flynn D** (Ed.) (2003) *Thermal Power Plant Similation and Control*. 1st edition, ISBN: 0 85296 419 6, The Institution of Electrical Engineers, London (e-book), 433.
- Genceli O F** (1998) *Buhar Kazanları Konstrüksüyon ve Yardımcı Elemanlar*. ISBN: 975-511-068-2, Birsen Yayınevi, İstanbul, 339 s.
- Grigsby L** (Ed.) (2001) *The Electric Power Engineering Handbook*, ISBN: 0-8493-8578-4, CRC Press and IEEE Press, Florida , 949 pp.
- Güllü A** (2010) Kontrolör Arayüzü Tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Anabilim Dalı, İstanbul, 54 s.
- Haq E U and Rahman T U and Ahad A and Ali F and Ijaz M** (2016) Modeling and Simulation of an Industrial Steam Boiler. *International Journal of Computer Engineering and Information Research and Advances*, 2 (4): 166-174.
- Haykin S** (2010) *Neural Networks and Learning Machines*, 3st edition, ISBN: 978-0-13-147139-9, Pearson Prentice Hall., Canada, 937 pp.
- Heaton J** (2015) *Artificial Intelligence For Humans Volume 3: Deep Learning and Neural Networks*, 1st edition, ISBN: 978-1505714340, Heaton Research, Inc., Chesterfield (e-book), 268 pp.
- Jiang P and Qin S and Wu J and Sun B** (2015) Time Series Analysis and Forecasting for Wind Speeds Using Support Vector Regression Coupled with Artificial Intelligent Algorithms, *Hindawi Publishing Corporaiton*, Article ID 939305, Lanzhou, China:1-14.
- Kiamah D F** (2002) *Power Generation Handbook*, 1st edition, ISBN :0071396047, McGraw-Hill Professional, USA, 494 pp.
- Klempner G and Kerszenbaum I** (2008) *Handbook of Laarge Turbo-Generator Operation And Maintenance*, ISBN: 978-0470-16767-0, IEEE Press, Piscataway, 879 pp.
- Kocaarslan İ ve Tiryaki H** (2013) PSO-PID ve FGPI Kontrolörlerin Bir Termik Santralde Karşılaştırması. *International Journal of Engineering Research and Development*, Cilt (5-2): 1-6.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Lewis F L, Jagannathan S and Yeşilipek A** (1999) *Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems*, ISBN: 0-7484-0596-8, Taylor & Francis Ltd., London, 433 pp.
- Li J and Ososanya E T and Smoak R A** (1996) The Neural Network Control Application In a Power Boiler. 0-7803-3088-9/96: 521-524.
- Lüy M, Kocaarslan İ ve Çam E** (2009) Bir Termik Elektrik Santralinde Yapay Sinir Ağları Kontrolörün Etkilerinin İncelenmesi. *International Journal Enginnering Research & Development*, 1(1): 42-46.
- Mackay D J C** (1992) Bayesian interpolation. *Neural Computation*, ISBN: 0899-7667, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 415-447.
- Manke P and Tembhurne S** (2012) Application of Back Propagation Neural Network to Drum Level Control in Thermal Power Plant. *International Journal of Computer Science Issues*, 9 (1): 520-526.
- Mikulandric R, Loncar D, Cvetinovic D and Spiridon G** (2013) Improvement of existing coal fired thermal power plants performance by control systems modifications. The *International Journal Energy Elseiver*, Vol 57: 55-65.
- Miljkovic D** (2010) Review of novelty detection methods, *Proceedings of the 33rd International Convention (MIPRO)*, 593–598.
- Narendra K S and Parthasarathy K** (1990) Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Netwrok, *IEEE Transactions On Neural Networks*, March 1990, 1:4-27
- Nguyen N T** (2018) *Model Reference Adaptive Control*, ISBN 978-3-319-56393-0, Springer International Publishing, Switzerland (e-book), 443 pp.
- Öztemel E** (2006) *Yapay Sinir Ağları*, 2. Basım, ISBN: 975-67-91-39-8, Papatya Yayınevi, İstanbul, 231 s.
- Peretto P** (2004) *An Introduction to the Modeling of Neural Network*, 2st edition, ISBN: 0 521 4151 2, Cambridge University Press, USA, 492 pp.
- Raja A K, Srivastava A P and Dwivedi M** (2006) *Power Plant Enginnering*, ISBN (10): 81-224-2333-7, New Age International (P) Ltd. Publisher, New Delhi, 491 pp.
- Sai T K and Reddy K A** (2015) Neural Network Applications in a Power Station. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 4 (6): 112-120.
- Sarkar D K** (2015) *Thermal Power Plant Design and Operation*, ISBN: 978-0-12-801575-9, Elsevier, Netherland, 592 pp.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Smith J.W.** (1998) *Company Supercritical (Once Through) Boiler Technology*. Babcock& Wilcox, Ohio, BR 1658, 8.
- Souza G F M** (2012) *Thermal Power Plant Performance Analysis*. ISBN: 978-1-4471-2309-5, Springer, London (e-kitap), 296 pp.
- TEİAŞ** (2018) Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim ve Kapasite Projeksiyonu. Mayıs 2018, Ankara, (www.teias.gov.tr).
- Teir S** (2003) *Steam Boiler Technology*. 2st edition, ISBN: 951-22-6759-4, Helsinki Univesity of Technology, Helsinki (e-book), 218 pp.
- Warne D F** (2000) *Newnes Eletrical Engineer's Handbook*, 1st edition, ISBN :0 7506 4879 1, A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd., Heinemann, 438 pp.
- URL 1** < <https://www.teias.gov.tr/tr/sektor-raporlari> >, Ziyaret tarihi: 15.04.2019
- URL 2** < <http://gucsanmakina.com.tr> >, Ziyaret tarihi: 15.04.2019
- URL 3** < <https://www.tesisat.org> >, Ziyaret tarihi: 15.04.2019
- URL 4** < <https://www.enerjisistemlerimuhendisligi.com> >, Ziyaret tarihi: 10.05.2019
- URL 5** < <https://www.power-technology.com> >, Ziyaret tarihi: 10.05.2019
- URL 6** < <http://www.glaunach.com> >, Ziyaret tarihi: 10.05.2019
- URL 7** < <https://new.siemens.com> >, Ziyaret tarihi: 17.05.2019
- URL 8** < <http://hbogm.meb.gov.tr/MTAO/1ElektrikMakLab> >, Ziyaret tarihi: 17.05.2019
- URL 9** < <http://www.elektrik.gen.tr/2017/05/yapay-zeka-teknikleri-ve-yapay-sinir-aglari-kullanilarak-web-sayfalarinin-siniflandirilmesi/6175> >, Ziyaret tarihi 26.05.2019
- URL 10** < <http://www.biyolojidefteri.com/index.php/insanda-sinir-hucresi> >, Ziyaret tarihi 26.05.2019
- URL 11** < http://rasbt.github.io/mlxtend/user_guide >, Ziyaret tarihi: 19.05.2019
- URL 12** < <https://veribilimcisi.com/2017/09/26/hopfield-agi-hopfield-network> >, Ziyaret tarihi: 19.05.2019
- URL 13** < <http://www.pitt.edu/~is2470pb/Spring05/FinalProjects/Group1a/tutorial/som.html> > Ziyaret tarihi: 19.05.2019
- URL 14** < <https://www.computerhope.com/jargon/b/bnn.htm> > , Ziyaret tarihi: 22.05.2019
- URL 15** < <https://mccormickml.com/2013/08/15/radial-basis-function-network-rbfn-tutorial/> > Ziyaret tarihi: 22.05.2019

BİBLİYOGRAFYA

Bolat S ve Kalenderli Ö (2003) Levenberg-Marquardt Algoritması Kullanılan Yapay Sinir Ağı ile Elektrot Biçim Optimizasyonu. *International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks – TAINN.*, 2-3 Temmuz 2003, Çanakkale, *Proceedings of the International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks TAINN-2003* , Tübitak, Ankara.

Hasson M H (1995) *Fundamentals of Artificial Neural Networks*, ISBN 978- 0262514675, MIT press, 511 pp.

Kerlirzin P and Vallet F (1993) *Robustness in multilayer perceptrons*, *Neural Computation*, 5: 473–482.



ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Karabük ilinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Karabük'te tamamlamasının ardından 1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Müh. Bölümüne başlayarak 2003 yılında mezun oldu. 2005 yılında Zonguldak İli Çatalağzı Beldesinde kurulu olan termik santralde çalışma hayatına başladı. Halen termik santralde görev almaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres: Toki Küme Evler Yeşilmahalle/ZONGULDAK.

Tel: (+90) 372 256 32 54

E-posta: hasan_yildirim_@hotmail.com