



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



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MODERN KONTROL YÖNTEMLERİ İLE DOĞALGAZ
KOMBİNE ÇEVİRİM VE RÜZGÂR SANTRALLERİNİN
KOORDİNASYONUNUN MODELLENMESİ**

İbrahim Berkay BULUT

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN

Aralık, 2013

İSTANBUL



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



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MODERN KONTROL YÖNTEMLERİ İLE DOĞALGAZ
KOMBİNE ÇEVİRİM VE RÜZGAR SANTRALLERİNİN
KOORDİNASYONUNUN MODELLENMESİ**

İbrahim Berkay BULUT

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN

Aralık, 2013

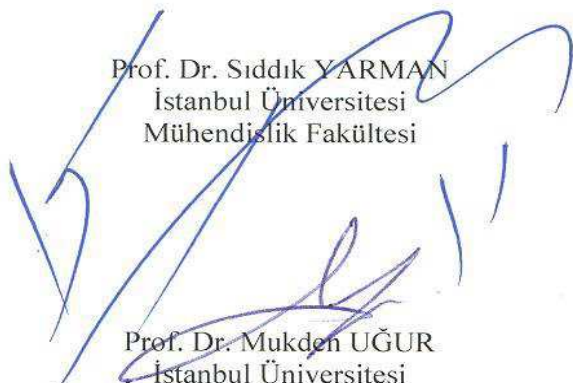
İSTANBUL

Bu çalışma 09/12/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi:



Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Sıddık YARMAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Halit PASTACI
Haliç Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Mukden UĞUR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Ayten KUNTMAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimimin tez ve ders aşamalarında, bana hem yurt içinde hem de yurtdışında sonsuz destek ve danışmanlık sağlamış, akademik hayatımda önemli bir yer edinmiş çok değerli hocam Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN'a sonsuz minnetlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım sırasında bana yol göstericiliği ve dostluğuyla destek olan Yük. Müh. Hasan TİRYAKİ'ye, Yüksek Lisans süresince arkadaşlığını ve yardımını hiçbir zaman esirgemeyen Yük. Müh. Emrah BAL'a ve diğer çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bana Yüksek Lisans yapmak için ilham olan, bu ve bundan önceki birçok çalışmamda hem akademik hem de manevi olarak desteğini benden asla esirgemeyen, sevgili eşim Yük. Müh. Dilara Bulut'a ve akademik hayatım boyunca ilkokuldan yüksek lisansa güvenleri ve destekleriyle bu noktada olmamı sağlayan ailem Ahmet, Havva ve İrem Bulut'a bana duydukları güven ve verdikleri destek için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık, 2013

İbrahim Berkay Bulut

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	vii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	ix
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	5
2.1. AKTİF GÜÇ VE REAKTİF GÜÇ KONTROLÜ	5
2.2. RÜZGÂR SANTRALLERİ	6
2.2.1. Rüzgâr Türbininin ve Jeneratörün Matematiksel Modeli	8
2.2.2. Rüzgâr Gücünün Kullanılması.....	12
2.2.2.1. Referans mekanik açısal hızı hesaplamak	13
2.2.3. Kinetik enerji farklarının oluşturduğu yük değerinin bulunması.....	14
2.3. KONTROL YÖNTEMLERİ	15
2.3.1. Klasik Kontrol Yöntemleri.....	16
2.3.1.1. Sistemin Cevap Eğrisi Yöntemi.....	16
2.3.1.2. PI Kontrolör.....	17
2.3.1.3. PID Kontrolör.....	18
2.3.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu	18
2.3.2.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması.....	19
2.3.2.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması Aşamaları	22
2.3.2.3. Klasik Kontrolör Parametrelerinin PSO ile Ayarlanması.....	24
2.3.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması	25
2.3.3.1. Algoritmanın Adımları.....	26
2.3.3.2. Başlangıç Yiyecek Kaynağı Bölgelerinin Üretilmesi.....	27
2.3.3.3. İşçi Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgelerine Gönderilmesi.....	28

2.3.3.4. Gözcü Arıların Olasılık Değerlerinin Hesaplanması (Dans Benzetimi).....	29
2.3.3.5. Gözcü Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgesi Seçmeleri.....	29
2.3.3.6. Kaynağı Bırakma Kriteri: Limit ve Kâşif Arı Üretimi.....	30
2.3.3.7. Seleksiyon Mekanizmaları	30
3. MALZEME VE YÖNTEM	31
3.1. MATEMATİKSEL MODELLER.....	31
3.1.1. Gaz Türbini Modeli.....	31
3.1.2. Fuel-Oil Türbini için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model	32
3.1.3. Atık Isı Kazanı için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model	33
3.1.4. Kazan için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model.....	35
3.1.5. Doğalgaz Kombine Çevrim Santrallerinde Kullanılan Buhar Türbini için Matematiksel Model.....	35
3.1.6. Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde Kullanılan Buhar Türbini için Matematiksel Model.....	37
3.1.7. Jeneratör için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model	39
3.1.8. Santral Modelleri.....	43
3.1.8.1. Gaz Türbini Santrali için Matematiksel Model	43
3.1.8.2. Fuel-Oil Türbini Santrali için Matematiksel Model	43
3.1.8.3. Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santrali için Matematiksel Model	44
3.1.8.4. Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali için Matematiksel Model.....	44
3.1.9. Benzetim Modeli.....	46
3.2. KONTROLÖRLERİN PARAMETRELERİ.....	47
3.2.1. Sistemin Cevap Eğrisi Yoluyla Bulunan Parametreler	47
3.2.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Yoluyla Bulunan Parametreler.....	48
3.2.3. Yapay Arı Kolonisi Yoluyla Bulunan Parametreler	49
4. BULGULAR	50
4.1. ÖRNEK YÜK TEVZİ MERKEZİ	50
4.2. OPTİMİZASYON YAZILIMI SONUÇLARI	53
4.2.1. Sanal Dünya Programı	53
4.2.2. Gün Öncesi Planlama Programı	56
4.2.3. Gerçek Zamanlı Planlama Programı	60
4.3. AKTİF GÜÇ-FREKANS KONTROLÜ SİMÜLASYONU SONUÇLARI ..	63
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	66
KAYNAKLAR	68

ÖZGEÇMİŞ.....	71
----------------------	-----------

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Mekanik açısal hızın fonksiyonu olarak rüzgâr jeneratör güç değişimleri [15].	7
Şekil 2.2: Rüzgâr için mekanik karakteristikler [15].	8
Şekil 2.3: Rüzgâr türbininin mekanik karakteristikleri [15].	9
Şekil 2.4: Senkron jeneratör ortogonal modeli [15].	12
Şekil 2.5: Rüzgar santrallerinin çalışma şeması [15].	13
Şekil 2.6: Örnek bir sistemin birim basamak cevap eğrisi.	17
Şekil 2.7: Parçacık Sürüşü Optimizasyonunda parçacığın hareketi.	20
Şekil 2.8: Parçacık sayısı algoritması akış diyagramı [25].	23
Şekil 2.9: SISO bir sistem için parametre tercihinde PSO kullanımı.	24
Şekil 3.1: Gaz Türbini modeli.	31
Şekil 3.2: Fuel-Oil Türbini modeli.	32
Şekil 3.3: Atık Isı Kazanı prensip şeması.	33
Şekil 3.4: Atık Isı Kazanı modeli.	35
Şekil 3.5: Kazan modeli.	35
Şekil 3.6: Doğalgaz Kombine Çevrim Santrallerinde kullanılan buhar türbini yapısı.	36
Şekil 3.7: Doğalgaz Kombine Çevrim Santrallerinde kullanılan buhar türbini modeli.	37
Şekil 3.8: Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde kullanılan buhar türbini yapısı.	38
Şekil 3.9: Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde kullanılan buhar türbini modeli.	38
Şekil 3.10: Türbin-jeneratör sistemi fiziksel modeli.	39
Şekil 3.11: Türbin-jeneratör sisteminin basite indirgenmiş blok diyagramı.	41
Şekil 3.12: Dönen kütle ve yükün indirgenmiş blok diyagramı.	41
Şekil 3.13: Frekans değişimi çıkışına sahip jeneratör modeli.	41
Şekil 3.14: Bir güç sisteminin genel gösterimi.	42

Şekil 3.15: Basitleştirilmiş Jeneratör modeli.	42
Şekil 3.16: Gaz Türbini Santrali için matematiksel model.	43
Şekil 3.17: Fuel-Oil Santrali için matematiksel model.	44
Şekil 3.18: Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santrali için matematiksel model.	44
Şekil 3.19: 2 Gaz Türbini ve 1 Buhar Türbininden oluşan Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali modeli.	45
Şekil 3.20: Benzetim genel modeli.	46
Şekil 3.21: Örnek yük tevzi merkezi modeli.	47
Şekil 4.1: Aktif güç dengesi.	63
Şekil 4.2: Frekans değişimi.	64
Şekil 4.3: En fazla yük düşüşü gerçekleşen zamanda frekans değişimi.	64
Şekil 4.4: En fazla yük artışı olan zamanda frekans değişimi.	65

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: PI ve PID Kontrolör parametre hesaplama tablosu.	17
Tablo 2.2: YAK algoritmasının temel adımları.	27
Tablo 3.1: Gaz Türbini parametre değerleri.....	31
Tablo 3.2: Fuel-Oil Türbini parametre değerleri [32].	32
Tablo 3.3: DGKÇS Buhar Türbini parametre değerleri.	37
Tablo 3.4: KYTS Buhar Türbini parametre değerleri.	39
Tablo 3.5: Basitleştirilmiş Jeneratör parametre değerleri.	43
Tablo 3.6: Örnek YTM’inde Sistem Cevap Eğrisine göre parametreler.....	48
Tablo 3.7: Örnek YTM’inde PSO’ya göre parametreler.	49
Tablo 3.8: Örnek YTM’inde YAK’a göre parametreler.	49
Tablo 4.1: Örnek YTM’inde santral bilgileri.	51
Tablo 4.2: YTM yük eğrileri.....	52
Tablo 4.3: Örnek YTM için sanal teklifler.....	53
Tablo 4.4: Örnek YTM için blok teklifler.....	54
Tablo 4.5: Örnek YTM için esnek teklifler.....	54
Tablo 4.6: Örnek YTM için YAL/YAT teklifleri.	55
Tablo 4.7: Örnek YTM için saatlik teklifler ile optimizasyon.	56
Tablo 4.8: Örnek YTM' için saatlik ve blok teklifler ile optimizasyon.	57
Tablo 4.9: Örnek YTM için saatlik, blok ve esnek teklifler ile optimizasyon.	58
Tablo 4.10: Örnek YTM üretim planının kısmi tekliflere göre değiştirilmesi.....	59
Tablo 4.11: Gün Öncesi girdileri.	59
Tablo 4.12: Örnek YTM için YAL/YAT teklif optimizasyonu.	59
Tablo 4.13: Toplam ünite üretim vektörleri.	61

Tablo 4.14: Örnek YTM için maliyetler.	61
Tablo 4.15: Örnek YTM için atmosfere salınan karbon miktarı.....	62
Tablo 4.16: Farklı kontrol sistemlerinin aşma değerleri ve oturma süreleri.	65

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
D	: Sönüm sabiti
f	: Frekans
f_1	: Nominal güç çıkışında frekans
f_2	: Yüksüz durumda frekans
$failure_i$	: i. kaynağın geliştirilememe sayısı
F_{HP}	: Yüksek basınç safhası katsayısı
f_i	: i. çözümün maliyet değeri
$fitness_i$	: i. kaynağın kalitesi
F_{LP}	: Alçak basınç safhası katsayısı
g_{best}	: Grubun en iyi değeri
g_{best_n}	: Bir boyuttaki en iyi performansı gösteren parçacık değeri
G_t	: Toplam saatlik tüketim
K_D	: Türev kazancı
K_d	: Hız regülatörü kazancı
K_I	: İntegral kazancı
K_P	: Oransal kazanç
K_s	: Sistem kazancı
M	: Jeneratör zaman (gecikme) sabiti
M_{TV}	: Rüzgar türbininin torku
P	: Kazandaki buharın basıncı
P_0	: Nominal basınç
p_{best}	: Her bireyin kendi en iyi değeri
$p_{best_{i,n}}$	: n boyutlu bir uzayda i. parçacığın daha önceki en iyi konumu
p_i	: i. kaynağın seçilme olasılığı
P_{jn}	: Jeneratör ünitesinin nominal aktif çıkış gücü
Q_0	: Kazandaki nominal buhar çıkış değeri
$Q_{çıkış}$	: Buhar debisi
$Q_{giriş}$	: Egzos gazı debisi
R	: Hız regülasyon sabiti veya kayması
s_i^0	: Parçacığın ilk konumu
$s_{i,n}$	: n boyutlu bir uzayda i. parçacığın o anki konumu
s^k	: Parçacığın geçerli konumu

s^{k+1}	: Parçacığın yeni konumu
SN	: Yiyecek kaynağı sayısı
t	: Zaman
T_{CH}	: Kontrol vanası zaman (gecikme) sabiti
T_{CO}	: Geçiş zaman (gecikme) sabiti
T_D	: Türev zaman sabiti
T_d	: Ölü zaman gecikmesi
T_e	: Elektriksel moment
T_{FOT}	: Fuel-Oil Türbini dinamik karakteristiklerine bağlı zaman sabiti
T_{GT}	: Gaz Türbini dinamik karakteristiklerine bağlı zaman sabiti
T_I	: İntegral zaman sabiti
T_K	: Kuvvetlendirme zaman (gecikme) sabiti
T_m	: Mekaniksel moment
T_{RH}	: Ara ısıtıcı zaman (gecikme) sabiti
T_s	: Sistemin zaman sabiti
T_U	: Uyarma zaman (gecikme) sabiti
T_V	: Atık ısı kazanı zaman (gecikme) sabiti
T_U	: Yanma odası zaman (gecikme) sabiti
V	: Atık ısı kazanının hacmi
v_i	: i. kaynak
$v_{g_{best}}$	: Parçacığın g_{best} konumuna göre hızı
v_i^0	: Parçacığın ilk hızı
$v_{i,n}$	: n. boyuttaki i. parçacığın hızı
v^k	: Parçacığın geçerli hızı
v^{k+1}	: Parçacığın yeni hızı
v_{max}	: Parçacığın ulaşabileceği en yüksek hız
$v_{p_{best}}$	: Parçacığın p_{best} konumuna göre hızı
v_x	: X eksenini boyunca parçacığın hızı
v_y	: Y eksenini boyunca parçacığın hızı
W	: Atık ısı kazanındaki buharın ağırlığı
w_0	: Açısal hızın ilk değeri
X	: Kısıtlama katsayısı
X	: Hız regülatörü birincil zaman (gecikme) sabiti
x_j^{max}	: Her bir parametrenin üst sınırı
x_j^{min}	: Her bir parametrenin alt sınırı
Y	: Hız regülatörü ikincil zaman (gecikme) sabiti
Δw	: Frekans veya açısal hız değişimi
ΔP_L	: Yükenin değişimi
δ_0	: Faz açısının ilk değeri
ρ	: Buharın yoğunluğu
ω	: Atalet katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
ANFIS	: Adaptive neuro-fuzzy inference systems
DGKÇS	: Doğalgaz kombine çevrim santralleri
Dii_Uj	: i. doğalgaz kombine çevrim santralının j. ünitesi
EAK	: Emre Amade Kapasitesi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FOTS	: Fuel-oil türbini santralleri
Fii_Uj	: i. fuel-oil türbini santralının j. ünitesi
FGPID	: Fuzzy Gain Scheduled PID Controller
GTS	: Gaz türbini santralleri
Gii_Uj	: i. gaz türbini santralının j. ünitesi
IAE	: Integral Absolute Error
ISE	: Integral Square Error
ITAE	: Integral Time Absolute Error
IV	: Ara ısıtma vanası
KGÜP	: Kesinleşmiş Günlük Üretim Programı
LFC	: Load-Frequency Control
MKÜD	: Minimum Kararlı Üretim Düzeyi
MW	: Mega Watt
MWh	: Mega Watt saat
PI	: Proportional-Integrator Controller
PID	: Proportional-Integrator-Derivative Controller
PSO	: Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
PSO-PI	: Parametreleri PSO yöntemi ile optimize edilmiş PI kontrolör
PSO-PID	: Parametreleri PSO yöntemi ile optimize edilmiş PID kontrolör
TL	: Türk Lirası
YAK	:Yapay Arı Kolonisi
YAK-PI	:Parametreleri YAK yöntemi ile optimize edilmiş PI kontrolör
YAK-PID	:Parametreleri YAK yöntemi ile optimize edilmiş PID kontrolör
YAL	: Yük Alma Talimatı
YAT	: Yük Atma Talimatı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MODERN KONTROL YÖNTEMLERİ ile DOĞALGAZ KOMBİNE ÇEVİRİM ve RÜZGAR SANTRALLERİNİN KOORDİNASYONUNUN MODELLENMESİ

İbrahim Berkay BULUT

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN

Günümüzde yükselen yakıt masrafları ve çevre kirliliği göz önüne alınınca, ucuz ve temiz enerji üretmek bilimin en önemli sorunlarından biri haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğa olaylarına bağlı olması ve kararlı olmamaları da bu kaynakların yanında sürekli enerji sağlayabilecek ve üretim miktarları kontrol edilebilir enerji kaynaklarına ihtiyacı arttırmaktadır.

Bu tez çalışmasında amaç, temiz ve ucuz enerjiyi üretmek için bir otomasyon sistemi kurmaktır. Bu amaçla üretilecek olan enerjinin ekonomik olması için bir optimizasyon uygulaması ve bu uygulamanın ürettiği enerjinin sistemde sorunsuz kullanılabilmesi amacıyla aktif güç ve frekans kontrolü yapan bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, rüzgâr santralının ürettiği enerji sabit varsayılmış geride kalan ihtiyaç fosil yakıtlı santrallerle tamamlanmaya çalışılmıştır.

Bu amaçla bir Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali, bir Gaz Türbini Santrali, bir Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santrali ile bir adet Fuel-Oil Türbini Santralinden oluşan 4 santralli ve 15 üniteli bir yük tevzi merkezi modellenmiş ve bu örnek yük tevzi merkezinde oluşturulan uygulamalar test edilmiştir.

Kontrol modelinde, söz konusu dört santral parçalar halinde modellenmiş, bu parçalar birleştirilerek üniteler, üniteler birleştirilerek santraller ve santraller birleştirilerek örnek bir yük tevzii merkezi modeli oluşturulmuştur. Yük tevzi merkezindeki her bir santral için altı farklı kontrolörün parametreleri hesaplanarak benzetimi yapılan aktif güç-frekans kontrolü sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla PI kontrolör, parametreleri

Parçacık Sürüşü Optimizasyonu yöntemi ile optimize edilmiş PI kontrolör (PSO-PI), parametreleri Yapay Arı Kolonisi optimizasyonu yöntemi ile optimize edilmiş PI kontrolör (YAK-PI), PID kontrolör, parametreleri Parçacık Sürüşü Optimizasyonu yöntemi ile optimize edilmiş PID kontrolör (PSO-PID) ve parametreleri Yapay Arı Kolonisi optimizasyonu yöntemi ile optimize edilmiş PID kontrolör (YAK-PID) kullanılmıştır.

Aralık 2013, 67Sayfa.

Anahtar kelimeler: Yük Tevzii Merkezleri, Elektrik Üretim Santrallerinin Modellenmesi, Aktif Güç-Frekans Kontrolü, Modern Kontrol ve Optimizasyon Yöntemleri.

SUMMARY

MASTERS THESIS

MODELLING OF COORDINATION OF WIND and COMBINED-CYCLE NATURAL GAS POWER PLANTS USING MODERN CONTROL SYSTEMS

İbrahim Berkay BULUT

İstanbul University

Graduate School of Science and Engineering

Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor : Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN

In today's world, due to the increasing fuel prices and environmental issues, producing clean and cheap energy becomes one of the major problems for the scientific minds of our world. Due to the instability of the energy from renewable sources, we always require a controllable and stable energy source to supplement the ever growing energy demand.

In this thesis, the purpose is to produce an automation system to control the production of this cheap and clean energy and a model to test the active load control and frequency issues. In this model, the renewable energy is considered non controllable and will be left outside of the control loop.

For this reason four types of power stations were used: One Combined cycle natural gas power plant, one natural gas power plant, one fuel-oil power plant and one coal powered power plant. This model with 4 plants and 15 units made up the test model for our optimization process.

The control model is made up of small parts for every power plant. These parts are combined to make units, which are combined to make the plants and at last the plants are combined to produce the system model. For each of these plants, 6 different types of controllers were tested with parameters set specifically for the plants. These controllers are, PI, particle Swarm Optimization optimized PI (PSO-PI), Artificial Bee Colony

optimized PI (YAK-PI), PID controller, Particle Swarm Optimization optimized PID (PSO-PID), Artificial Bee Colony optimized PID (YAK-PID).

December, 2013, 67 pages.

Keywords: Load Distribution Centers, Modelling of Power Plants, Active Power-Frequency Control, Modern Control and Optimization Methods.

1. GİRİŞ

Enerji; iş yapabilme ve değişikliklere yol açma yeteneği veya potansiyeli olarak tanımlanabilir. Günümüzde gelişen teknoloji ve artan insan nüfusu da göz önüne alınınca, enerji üretim ihtiyacı da bunu karşılamak için üretilen enerji miktarı da inanılmaz bir hızda artmaktadır. Bunun sonucu olarak enerjinin üretimi ve dağıtımı konusu, bilimin her dalında araştırılan ve geliştirilen konuların en başlarında yer almaktadır [1].

Kullanım ve dağıtım kolaylığı, diğer enerjilere kolay ve düşük kayıplarla dönüştürülebilmesi, üretim çeşitliliği nedenleriyle elektrik enerjisi tüketimi ve üretimi sürekli bir artış halindedir. Bu sebeple bir ülkenin endüstriyel kapasitesi, gelişmişliği ve nüfus yoğunluğunun en büyük temsilcilerinden birisi ülkedeki elektrik enerjisi üretimi ve tüketimi haline gelmiştir [2].

Artan elektrik tüketiminin karşılanması, sadece bir kaynak yönetimi meselesi olmanın dışında aynı anda üretilen enerjinin kaliteli ve kararlı olması amacıyla aynı zamanda bir kontrol problemidir. Burada kaliteden kasıt, üretilen elektrik enerjisinin gerilim ile frekans gibi değerlerinde dalgalanmalar olmaması ve yönetmeliklerde belirtilen sınırlar içinde kalmasıdır. Kararlıdan kasıt ise, elektrik enerjisinin büyük ölçeklerde depolanamamasından dolayı üretilen enerjinin ihtiyaca uygun ve yeterli olmasıdır. Bu durum, üretilen enerjinin sürekli izlenmesi ve kontrol edilmesini gerektirmektedir. Bu, kontrol dağıtım şebekesinde oluşan ihtiyaca yetecek enerjiyi üretmek için birçok santral ve ünitelerden oluşan bir üretim ağının oluşturulması ve bunların tek bir merkezden yönetilmesini gerektirmektedir [3].

Bu düzenin sağlanması için, her ülke kendi içinde ve gerektiği durumlarda komşularıyla ortak çalışabilecek bir yetki mekanizması oluşturmuştur. Bu kurum, ihtiyaç olunan enerjiyi tahmin etmek, gerçek zamanlı olarak bu tahminlerdeki sapmaları ve farklılıkları belirlemek ve en önemlisi de hem son kullanıcının hem de üreticinin yararına olacak şekilde üretim aşamasını da yönetmek zorundadır. Bu yönetim işlemi de, kontrol

edilecek sistemlerin ülke bazlı olacağı göz önüne alınınca, optimizasyon sistemleri ile sağlanmalıdır.

Ülkemizde şebeke gerilimi 220 V AC ve şebeke frekansı da 50 Hz olarak belirlenmiştir. Bir güç sisteminin kararlı çalışabilmesi için frekansın sabit kalması gerekmektedir. Bu da ancak güç dengesi ile mümkün olmaktadır. Burada bahsedilen güç dengesi üretilen aktif güç ile aktif yükler, kayıplar ve sistemin bağlantı hatları üzerinde akan aktif güçlerin toplamının birbirine eşit olması durumudur. Denge bozulduğu anda frekansta sapmalar oluşmaya başlar [4-6].

Genel olarak bir elektrik şebekesinin davranışı; bir motor ve yükünün birleşiminden oluşmuş bir makine davranışı ile karşılaştırılabilir. Motor güç üretir ve yük bu gücü harcar. Eğer üretilen güç yükün harcadığından fazlaysa hız artar, daha az ise hız azalır. Denge durumu ancak üretilen ve tüketilen gücün aynı olması durumunda sağlanabilir. Bu örnekten de anlaşılabileceği gibi, üretilen elektrik enerjisi miktarı da ancak tüketilen miktarla aynı olduğu durumlarda elektrik enerjisinin frekansı istenilen seviyelerde tutulabilir. Bu dengenin sağlanması amacıyla, frekans kontrolü yapılacak bölgedeki üretim yapan santrallerin aktif güç çıkışları incelenir. Bu değer, kontrolü yapılan bölgedeki aktif güç tüketimine denk düşürülmeye çalışılır. Bu kontrol uygulamasına, “Yük Frekans Kontrolü” (Load Frequency Control – LFC) denir [7].

Yük-frekans kontrolü konusunda yapılan başlıca çalışmalar şunlardır;

- 1994 yılında P. Kundur tarafından yapılan çalışmada güç sistemlerinin kararlılığı ve kontrolü bir kitapta toplanmıştır. [8]
- 2003 yılında G. Lalor ve M. O’Malley [9] tarafından yapılan çalışmada tek bölgesi güç sisteminde doğalgaz kombine çevrim santrallerinin payının arttırılması durumunda frekans kontrolünün değişimleri incelenmiştir.
- 2004 yılında D. Flynn, J. Horne ve T. Littler [10] tarafından yapılan çalışmada bölgelere ayrılmış güç sistemlerinde frekansın kararlılığı irdelenmiştir.
- 2004 yılında E. Çam [6] tarafından yapılan çalışmada çok bölgesi güç sistemlerinde yük-frekans kontrolünü sağlayabilmek için bulanık mantık kontrol yöntemi kullanılmıştır.

- 2005 yılında İ. Kocaarslan ve E. Çam [4] tarafından yapılan çalışmada çok bölgeli güç sistemlerinde yük-frekans kontrolünü sağlayabilmek için klasik kontrolörler ve bulanık mantık kontrolör karşılaştırılmıştır.
- 2008 yılında H. Gözde, M. C. Taplamacıoğlu, İ. Kocaarslan ve E. Çam [11] tarafından yapılan çalışmada tek bölgeli güç sistemlerinde yük-frekans kontrolü için klasik kontrolörlerin parametrelerinin optimizasyonunda Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) yöntemi kullanılmıştır.
- 2010 yılında E. Yalçın, E. Çam, T. Vardar ve M. Lüy [5] tarafından yapılan çalışmada PID kontrolör ile iki bölgeli güç sistemlerinde yük-frekans kontrolü incelenmiştir.
- 2012 yılında K. Gümüş [12] tarafından yapılan çalışmada tek bölgeli güç sistemlerinde yük frekans kontrolü için klasik kontrolörlerin parametrelerinin optimizasyonunda PSO ve Yapay Arı Kolonisi (YAK) yöntemleri kullanılarak literatürdeki kontrolörler ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında “Yük-Frekans Kontrolü” optimizasyonun incelenebilmesi amacıyla Rüzgâr Santrali, Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santrali, Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali, Gaz Türbini Santrali ve Fuel-Oil Türbini Santrali olmak üzere toplamda 5 adet elektrik üretim santrali barındıran örnek bir yük tevzii merkezi oluşturulmuştur. MATLAB ve Simulink [13] programları kullanılarak modellenmiş ve söz konusu santrallerinin her birinin üretim set değerleri bir doktora tezinden alınan optimizasyon yazılımından [14] yararlanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyonu yapılan üretim set değerleri kullanılarak gerçeğe yakın bir ortamda benzetim yapılmış ve modern kontrol yöntemlerinin yük-frekans kontrolüne olan etkileri net olarak gözlenebilmiştir. Sırasıyla PI kontrolör, parametreleri PSO yöntemi ile optimize edilmiş PI kontrolör (PSO-PI), parametreleri YAK yöntemi ile optimize edilmiş PI kontrolör (YAK-PI), PID kontrolör, parametreleri PSO yöntemi ile optimize edilmiş PID kontrolör (PSO-PID) ve parametreleri YAK yöntemi ile optimize edilmiş PID kontrolör (YAK-PID) olmak üzere 6 farklı kontrolör kullanılmıştır.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerde ele alınan konuların içerikleri aşağıdaki gibidir;

İkinci bölümde ilk olarak aktif güç ve reaktif güç kontrolüne değinilmiş, rüzgâr santrallerine ilişkin genel bir model incelenmiş ve benzetimde kullanılan kontrolörlerin parametre belirleme yöntemleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde benzetim modelinde kullanılan santrallerin modellenmesi incelenerek uygulanan kontrolörlerin parametreleri belirlenmiştir. Dördüncü bölümde kullanılan optimizasyon yazılımlarının ve aktif güç-frekans kontrolünün benzetim sonuçları irdelenmiştir. Beşinci ve son bölümde ise sonuçlar ve tez çalışmasının geneli hakkında yorumlar sunulmuştur.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. AKTİF GÜÇ VE REAKTİF GÜÇ KONTROLÜ

Günümüzde elektrik üretimi günden güne artan bir öneme sahiptir. Elektrik enerjisini kullanan tüketicilerin beklentisi, üreticinin kaliteli elektrik enerjisini hizmete sunmasıdır. Kaliteli elektrik enerjisinden kasıt; gerilim ve frekansta dalgalanmaların olmadığı kesintisiz elektrik enerjisidir. Bunun yanında, elektrik enerjisinin büyük ölçeklerde depolanamaması nedeniyle değişen tüketici taleplerinin karşılanması da zorlaşmıştır. Bu nedenden dolayı tüketicinin ihtiyacı olan enerjiyi, istenilen zamanda ve istenilen büyüklükte karşılamak elektriksel güç sistemlerinin başlıca problemlerinden biri haline gelmiştir.

Genel olarak bir elektrik şebekesinin davranışı; bir motor ve yükünün birleşiminden oluşmuş bir makine davranışı ile karşılaştırılabilir. Birleşik çalışan senkron jeneratörler normal şartlarda aynı hızda dönerler ve her birine türbin tarafından uygulanan mekanik tork, sistem tarafından uygulanan elektriksel torka eşittir. Motor güç üretir ve yük bu gücü harcar. Eğer üretilen güç harcanan güce eşitse; sistem dengededir ve motorun hızı sabittir. Eğer motor, yükün harcadığından daha çok veya daha az güç üretirse hız artar veya azalır. Benzer bir yaklaşımla, birleşik enerji sistemlerinde de tüketilen güç miktarı ile üretimi yapılan güç miktarı aynı seviyelerde tutulması gerekir.

Sistemin kararlı olarak çalışabilmesi için gerilim ve frekansın uygun limitler arasında kalması gerekir. Bunun için de kontrolünün sağlanması gerekmektedir. Reel güçteki değişiklikler genellikle sistem frekansını etkilerken, reaktif güçteki uyarma akımı üzerinden yapılan değişiklikler ise gerilimin genliğini etkiler. Yük-frekans kontrolü reel güç ve frekansı, otomatik gerilim regülatörü ise reaktif güç ve gerilim büyüklüğünü düzenler.

Bir elektrik enerjisi sistemi; nominal frekans, gerilim ve yük akışı ile nitelendirilen, istenilen çalışma seviyesinde korunmalıdır. Bu durum, sistemdeki kontrol edilebilen kaynaklarda üretilen aktif ve reaktif güç kontrolü ile olur. Toplam aktif ve reaktif güç isteği sürekli olarak değişir. Eğer nominal durumlar sağlanmalysa, yük farkı üretilen

güç farkını karşılamalıdır. Bununla birlikte, yük dalgalanmalarının istatistiklerine göre, bu hiçbir zaman oluşmaz. Kontrol sisteminden istenen ise sistemi yeterince küçük tolerans seviyesinde koruyabilmektir [8].

Bir güç sisteminin duyarlılık analizi ile şu önemli karakteristikleri ispat edilebilir:

- 1) Aktif güçteki ayarlamalar her şeyden önce sistem frekansını etkiler. Fakat baradaki voltaj genliğini etkilemez.
- 2) Reaktif güçteki ayarlamalar ise baradaki gerilim genliğini etkiler fakat sistem frekansını etkilemez.

Yukarıdaki gerçeklerden dolayı nominal süreklilik kontrol problemi iki bağımsız kontrol problemine bölünebilir;

- 1) Aktif Güç-Frekans kontrolü (P-f kontrol)
Frekans algılayıcısı yardımıyla, frekans hatası tespit edilir. Çünkü frekansın en hassas noktası, aktif güç dengesinin korunamamasıdır.
- 2) Reaktif Güç-Gerilim kontrolü (Q-V kontrol)
Gerilim algılayıcıları vasıtasıyla baradaki gerilim değerindeki sapmalar tespit edilir ki bunlar reaktif güç dengesizliğinin en hassas noktalarıdır.

2.2. RÜZGÂR SANTRALLERİ

Günümüzde yenilenebilir enerjiye yönelimin artması ile en çok öne çıkan üretim kaynaklarından biri rüzgâr santralleridir. Bu alanda yapılan çalışmalarda genellikle rüzgâr hızı ile üretilen gücün tahmini konuları üzerinde durulmaktadır. Çalışmalarda karşılaşılan temel zorluklar aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- 1) Rüzgârın zamana göre değişimi tahmin edilememektedir [15].
- 2) Belirlenen zaman aralığındaki rüzgâr hızlarının minimum ve maksimum değerleri çok farklı olabilir, bu nedenle ayar sahası çok büyüktür.
- 3) Rüzgâr enerjisi kullanımının maksimize edilmesi için özel teknik ve ekonomik çaba gerektirmektedir.
- 4) Yüksek atalet momentleri nedeni ile rüzgar gücünün optimum alanında çalışmak imkansızdır. Bu nedenle rüzgâr hızı çok hızlı değişmemeli ya da RT-SGS'nin

atalet momenti çok düşük olmalıdır. Şu anda ilk gereksinim karşılanamamaktadır

- 5) Çok yüksek rüzgâr hızlarında oluşabilen salınımlar güç sistemi kararlılığını etkilenmektedir.

Yukardaki durumlar göz önüne alındığında rüzgar gücü belirli değerlerin altına düşene kadar, rüzgar sisteminin saat, ay ve gün bazında; maksimum enerjiyi sağlamak için gerekli dönüş hızı belirlenmelidir.

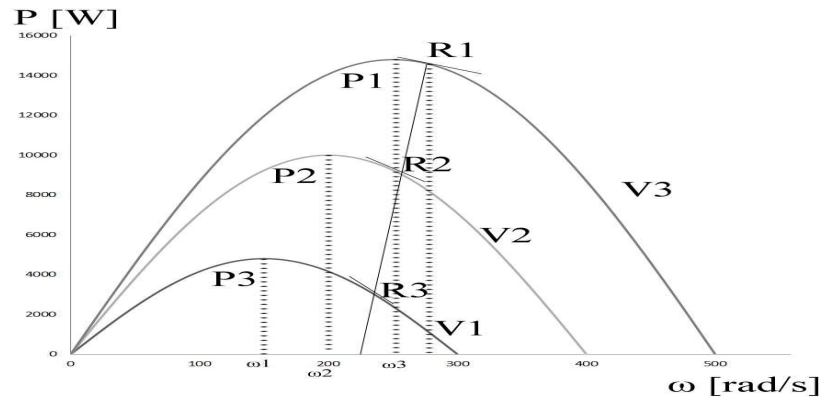
Günümüzde en çok kullanılan rüzgâr türbini HAWT'tır (horizontal axis wind turbine - yatay eksen rüzgâr türbini). Bu tip sistemlerde maksimum güç, rüzgâr hızıyla hesaplanmaktadır.

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho * A * V^3 = M_{TV} * \omega \quad (2.1)$$

Bu denklemde ω türbinin mekanik açısal hızı, ρ havanın yoğunluğu, A taranan alanı, M_{TV} ise rüzgâr türbininin torkudur.

Rüzgâr sistemi çalıştırma stratejisine göre, rüzgâr türbini maksimum güce uygun olarak P_k noktasında çalışmalıdır.

Şekil 2.1'de de görüldüğü üzere V hızındaki rüzgâr türbininin maksimum gücü; mekanik açısal hız ω 'nin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.1: Mekanik açısal hızın fonksiyonu olarak rüzgâr jeneratör güç değişimleri [15].

İdeal maksimum noktalar P_1 , P_2 , P_3 ile hız değerleri V_1 , V_2 , V_3 ve rotor açısal hızı ω_1^* , ω_2^* , ω_3^* uyumludur. İstikrarlı durumdaki gerçek çalışma noktaları R_1 , R_2 , R_3 'dür.

Aşağıda verilen denklemin sonucu olarak P_k noktasında V_k hızından P_{k+1} noktasında V_{k+1} hızına geçmek atalet momentumuna bağlı olarak Δt kadar sürmektedir.

$$J * \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{PMSG} \quad (2.2)$$

J yüksek değerlere sahip olduğundan, Δt zaman aralığı önemlidir. Bu zaman aralığının sonunda rüzgâr gücü artık V_k olmadığı için, maksimum güç noktasında işletme yüksek mekanik atalet ve rüzgâr hızlarındaki farklılıklar sebebiyle mümkün değildir. Bu önemli nokta çoğu çalışmada göz ardı edilmiştir [16].

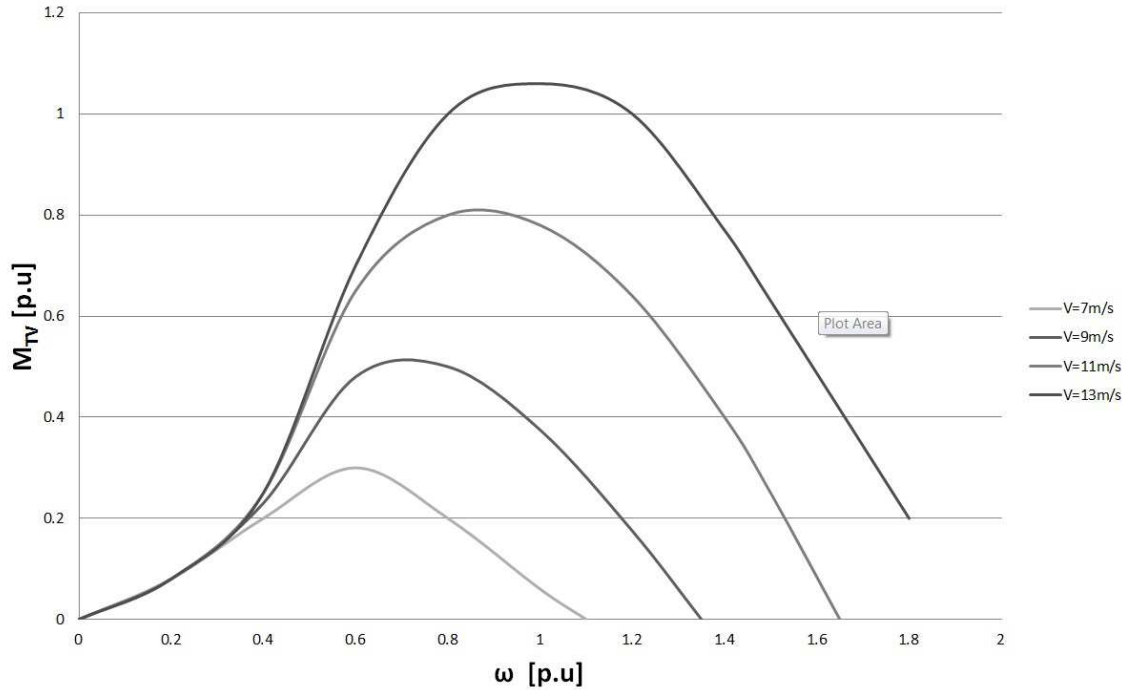
2.2.1. Rüzgâr Türbininin ve Jeneratörün Matematiksel Modeli

Aşağıda verilen matematiksel model, referans optimal açısal hız ω_{ref} 'i verebilmesi açısından önemli bir modeldir. Bu değer kullanılarak, jeneratör yükünün iki kısmı olan rüzgâr kısmı ve kinetik enerji değişimi kısmı hesaplanabilir. Kararlı çalışma sırasında mekanik karakteristiklerin lineer olduğu göz önüne alınırsa, tork ve rüzgâr hızı arasındaki ilişki şekildeki gibidir.

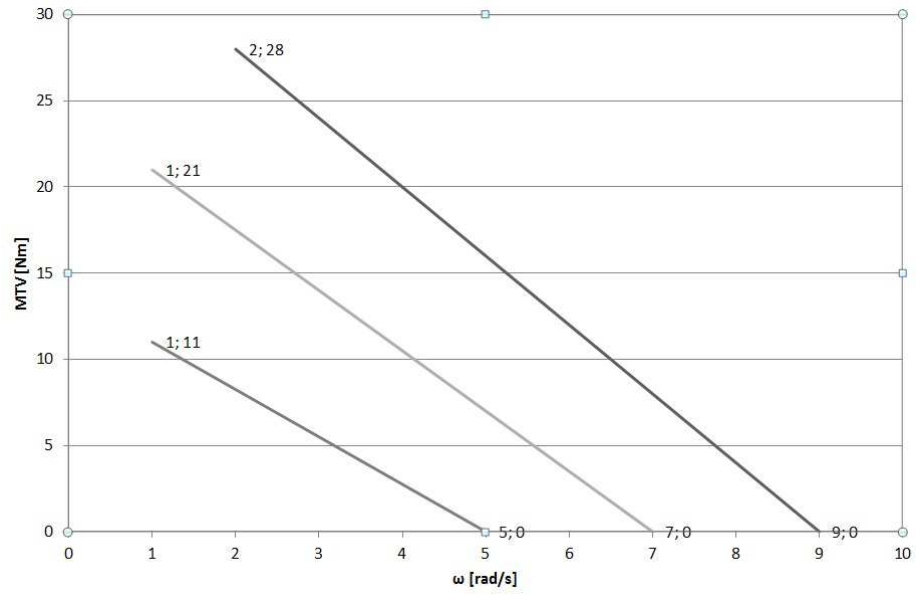
$$M_{TV} = aV^b \omega + cV^d \quad (2.3)$$

Bu denklemde a , b , c ve d türbin geometrisiyle alakalı olup, aşağıda gösterildiği gibi katalog değerler kullanılarak hesaplanmıştır.

Şekil 2.2'de bazı mekanik karakteristikler gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Rüzgâr için mekanik karakteristikler [15].



Şekil 2.3: Rüzgâr türbininin mekanik karakteristikleri [15].

Deneylerden elde edilen rüzgâr türbininin mekanik karakteristikleri incelenip, Şekil 2.3'e göre a, b, c ve d değerleri belirlenir [15]. 2.3 denklemi $V_1 = 5$ m/s hızı ve $A_1(2,28)$, $A_2(2,28)$ noktalarında, $V_2 = 4$ m/s hızı da $B_1(1,21)$ ve $B_2(7,0)$ noktalarında uygulandığında sonuçlar aşağıdaki gibidir.

$$\begin{cases} 28 = a * 5^b + c5^d \\ 0 = a * 5^b + c5^d \\ 21 = a * 4^b + c4^d \\ 0 = a * 4^b + c4^d \end{cases} \begin{cases} a = -1,5268 \\ b = 0,59841 \\ c = 2,243 \\ d = 1,7247 \end{cases} \quad (2.4)$$

Sonuç olarak rüzgâr türbininin mekanik karakteri;

$$M_{TV} = -1,5268 * V^{0,59841} * \omega + 2,243 * V^{1,7247} \quad (2.5)$$

Bulunan karakteristik $V=3$ m/s hızı ve $C_1(1,11)$, $C_2(5,0)$ noktalarında uygulandığında $C_1(1,11)$ noktası için daha önce belirlenmiş değer 11 N/m iken $M_{TV} = 11,0972$ N/m bulunur. Aynı şekilde $C_2(5,0)$ noktası içinde değer 0 olarak belirlenmişken $M_{TV} = 0,18616$ N/m bulunur. Yüksek hızlarda farkların daha küçük olması mekanik karakter olarak belirlenen modelin kullanılabileceğini göstermektedir. Modelin kısaltılmış hali ise aşağıda belirtilmiştir:

$$M_{TV} = -1,5 * V^{0,6} * \omega + 2,25 * V^{1,8} \quad (2.6)$$

M_{TV} torkunun jeneratör aksında 314/20 dönüştürme oranıyla düşürme işlemi şu şekilde yapılabilir:

$$\omega_{TV} \rightarrow \omega_G * \frac{20}{314} \quad (2.7)$$

Bu işlem uygulandığında jeneratör aksında M_{TV} torku 20/314 le çarpılır. Bu durumda eşitliğin son hali;

$$M_{TV} = \left(-9,5541 * 10^{-2} * V^{0,6} * \omega + 2,25 * V^{1,8} \right) + \frac{20}{314} \quad (2.8)$$

olmaktadır.

Maksimum gücü elde etmek için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir;

$$\frac{dp}{d\omega} = \frac{d(M_{TV} * \omega)}{d\omega} = 2aV^b \omega + cV^d, \quad \omega^* = \frac{-c}{2a} * V^{d-b} \quad (2.9)$$

Bu eşitliğin sonucunda aşağıdaki denklem elde edilir:

$$M_{TV}^* = -1,5 * V^{0,6} * \frac{2,25}{3} * V^{1,2} + 2,25 + V^{1,8} \quad (2.10)$$

$$P_{max} = M_{TV}^* * \omega^* = \frac{2,25^2}{3} * 0,5 * V^3 \quad (2.11)$$

Bu sonuç, sunulan matematiksel modelde maksimum gücün rüzgâr hızının küpü ile bağlantılı olduğunu göstermektedir. Bu eşitlik, maksimum enerjiyi elde etmek için gereken optimum dönme değerinin hesaplanması için kullanılabilir.

Dinamik çalışma modunda, DC uyarımlı senkron jeneratörün ortogonal modelde karakterize edilmesinde aşağıdaki denklemlerden yararlanılır.

$$\left\{ \begin{array}{l} -U\sqrt{3} \sin \theta = R_d I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q + M_E \frac{dI_E}{dt} + M_D \frac{dI_D}{dt} - \omega M_Q I_Q \\ U\sqrt{3} \cos \theta = \omega L_d I_d + R_q I_q + L_d \frac{dI_q}{dt} + \omega M_E I_E + \omega M_D I_D + M_Q \frac{dI_Q}{dt} \\ U_E = M_E \frac{dI_d}{dt} + R_E I_E + L_E \frac{dI_E}{dt} + M_{ED} \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = M_D \frac{dI_d}{dt} + M_{ED} \frac{dI_E}{dt} + R_D I_D + L_D \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = M_Q \frac{dI_q}{dt} + R_Q I_Q + L_Q \frac{dI_Q}{dt} \\ J \frac{d\omega}{dt} = P_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + M_E I_q I_E - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D] - M_{motor} \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Bu denklem içerisinde

R_E = Uyarma sargısı direncini;

R_D = d aksı sönümlleme sargısı direncini;

R_Q = q aksı sönümlleme direncini;

L_D = d aksı sönümlleme sargısının kendi endüktansını

M_{ED} = uyarma sargısı ve D sargısının ortak endüktansını;

M_{Dd} = stator d sargısı ve D sargısının ortak endüktansını

L_Q = q aksının sönümlleme sargısının kendi endüktansını;

M_{Qq} = stator q sargısı ve Q sargısının ortak endüktansını;

R_1 = stator sargı direncini;

L_d = d aksının stator sargısının kendi endüktansını;

L_q = q aksının stator sargısının kendi endüktansını;

M_{ED} = uyarma sargısı ve d sargısının ortak endüktansını;

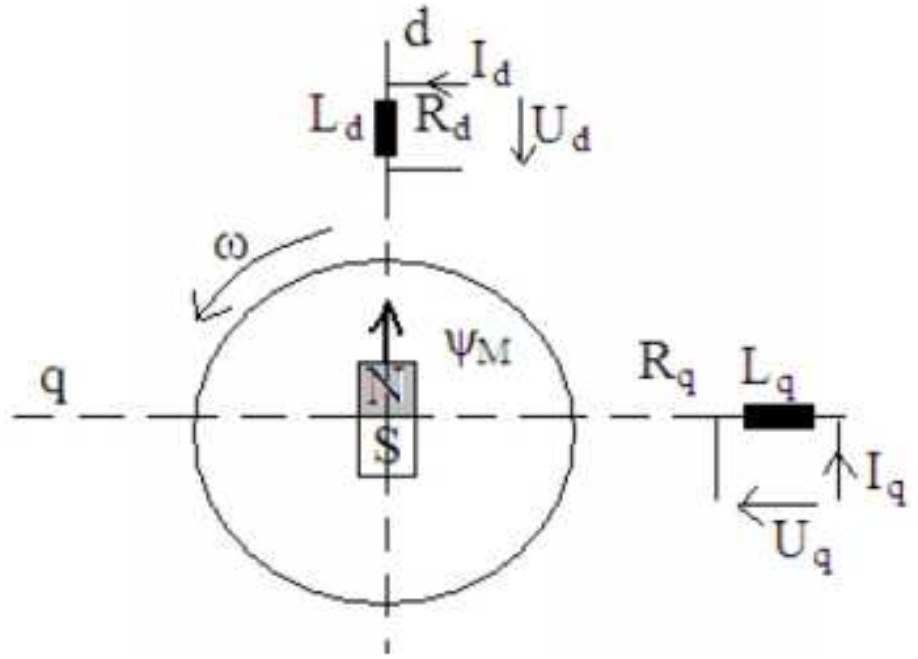
L_E = sönümlleme sargısının kendi endüktansını temsil etmektedir.

PMSG aşağıdaki denklemle karakterize edilmektedir.

$$\left\{ \begin{array}{l} -U\sqrt{3} \sin \theta = R_d I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q + M_D \frac{dI_D}{dt} - \omega M_Q I_Q \\ U\sqrt{3} \cos \theta = \omega L_d I_d + R_q I_q + L_d \frac{dI_q}{dt} + \omega M_D I_D + M_Q \frac{dI_Q}{dt} + \omega \psi_{MP} \\ 0 = M_D \frac{dI_d}{dt} + M_{ED} \frac{dI_E}{dt} + R_D I_D + L_D \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = M_Q \frac{dI_q}{dt} + R_Q I_Q + L_Q \frac{dI_Q}{dt} \\ J \frac{d\omega}{dt} = P_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + I_q \psi_{MP} - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D] - M_{motor} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Bu eşitliklerde ise ψ_{MP} kalıcı mıknatıs akısını temsil etmektedir.

Yüksek mekanik ataleti sebebiyle uzun süren işlemler yerine sadeleştirilmiş ortogonal model kullanılmaktadır.



Şekil 2.4: Senkron jeneratör ortogonal modeli [15].

Kararlı durum uygulamasında, aşağıdaki eşitlikler PMSG matematiksel modeli için kullanılabilir.

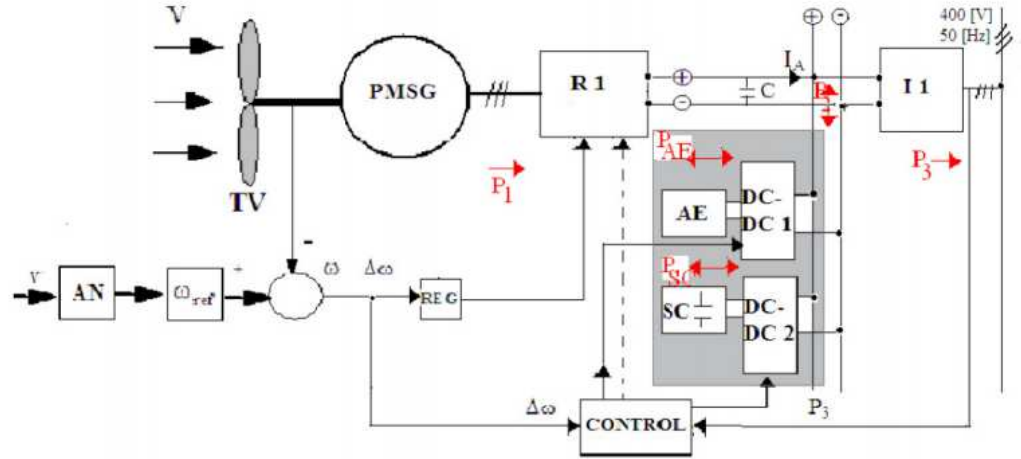
$$\begin{cases} -U\sqrt{3} \sin \theta = R_1 I_d + \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3} \sin \theta = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega \psi_M \\ M_{PMSG} = p_1 (L_d L_q) I_d I_q + I_q \psi_M \end{cases} \quad (2.14)$$

Bu eşitliklerde M_{PMSG} türbin torku M_{TV} 'ye eşittir.

2.2.2. Rüzgâr Gücünün Kullanılması

Rüzgâr gücünün bazı önemli özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir [16];

- Yüksek mekanik ataletten dolayı, simülasyonda, teorik ve pratik sonuçların hepsinde zaman periyodu en az bir kaç saat olarak alınmalıdır.
- Gelişmiş sistemler maksimum rüzgâr enerjisini uzun süre sunabilmelidir.
- Rüzgâr gücünün maksimum güçte kullanılması, kısa bir süre türbinin frenlemesine ve güçte sanal bir artışa neden olsa da, daha uzun süreler göz önüne alındığında enerji önceki durumlara göre azalmaktadır.



Şekil 2.5: Rüzgar santrallerinin çalışma şeması [15].

$V(t)$ rüzgâr hızında ve Δt zamanında maksimum rüzgâr enerjisi, referans dönme hızı ω_{ref} ve kinetik enerji farklılıklarının generatördeki yüke uygulanması ile bulunabilir. Bu durumda sistem optimum enerji parametrelerinde çalışmakta, ve rüzgar türbini maksimum enerjiyi üretmektedir.

2.2.2.1. Referans mekanik açısal hızı hesaplamak

Maksimum mekanik enerjinin üretilmesi için gereken rüzgar sisteminin optimum çalışma koşullarını belirleyen referans mekanik açısal hız (ω_{ref})'dir. Bu hızda rüzgar türbininin torku aşağıdaki gibidir;

$$M_{TV} = \left(-9,5541 * 10^{-2} * V^{0,6} * \omega + 2,25 * V^{1,8} \right) * \frac{20}{314} \quad (2.15)$$

ω_{ref} 'in değeri mekanik enerji W_m 'yi T zaman aralığında rüzgâr hızı farklılıklarına göre maksimize ederek bulunabilir.

$$W_m = \omega_{ref} \int_0^T M_{TV} dt \quad (2.16)$$

$\omega_{ref} = ct$ olduğu göz önüne alınırsa, $t=0+T$ zamanı için, $\frac{dW_m}{d\omega_{ref}} = 0$ 'ın sonuçları;

$$\omega_{ref} = \frac{\int_0^T (2,25 * V^{1,8}) * \frac{20}{314} dt}{2 * \int_0^T (9,5541 * 10^{-2} * V^{0,6}) * \frac{20}{314} dt} \quad (2.17)$$

olur.

Optimum açısal hızda çalışma, rüzgâr hızının anemometre ile ölçülmesi ve w_{ref} 'in hesaplanması ile olur. Regülatör, istenen açısal hızı sağlayabilmesine rağmen, ayarlanması rüzgâr hızının belirsizliği nedeni ile zordur. Bu nedenle, jeneratör yükünün w_{ref} ve kinetik rotasyon yük farklarının T zaman aralığında (T=600s) kullanılarak bulunması daha iyi sonuçlar vermektedir.

$I_A=I_{ref}$ ara devre akımında, yük direnci R_{ref} iken, rüzgar sistemi T=600 saniyelik zaman aralığında optimum parametrelerde çalışmakta, maksimum rüzgar enerjisini almakta ve $P_{TV}=M_{TV}*\omega_{ref}$ gücünü üretmektedir. Rüzgâr hızı değişimiyle, T zamanı ile birlikte P_{TV} 'nin değeri de değişmektedir. Eğer T zaman aralığı için ortalama rüzgâr hızı artıyorsa, şebekeye verilen P_3 gücü P_{TV} değerinde sabit kalmaktadır. Fazla üretilen güç, $\Delta P_{TV} = P_{TV}(t=T) - P_{TV}(t=0)$ akü ve kondansatör gruplarında saklanabilmektedir. Üretilen fazla gücün depolanması rüzgâr hızı düşene kadar devam etmekte, hız düştüğünde akülerde saklanan gücün bir kısmı şebekeye verilmektedir.

2.2.3. Kinetik enerji farklarının oluşturduğu yük değerinin bulunması

Bir t zamanında, optimal çalışma $\omega=\omega_{ref}$ de gerçekleşmektedir. Ancak $\omega_{gerçek} \neq \omega_{ref}$ ise; generatör kinetik enerji vasıtasıyla sarj ya da desaj edilmelidir.

$$\Delta W_2 = \frac{1}{2} * J * ((\omega_{ref})^2 - (\omega_{REAL})^2) \quad (2.18)$$

Açısal hız ω_{REAL} doğrudan ölçüm ile ya da hareket denklemi çözülerek bulunmaktadır.

Energiler arasındaki fark akü grubunda saklanan artık enerjidir. Bu PMSG deki mekanik gücün ΔW_G sinin artması ya da azalması ile bağlantılıdır.

$$\Delta W_G = \Delta M_G + \omega_{REAL} * 600 \quad (2.19)$$

İki enerjinin eşitlenmesi ($\Delta W_2 = \Delta W_G$) ile;

$$\frac{1}{2} * J * (((\omega_{ref})^2 - (\omega_{REAL})^2) = \Delta M_G + \omega_{REAL} * 600 \quad (2.20)$$

elde edilmektedir.

Eşit torkun ΔM_G 'den küçük olması ve $M_{TV-echiv}=M_{TV}-\Delta M_G$ nedeni ve jeneratör torkuyla aynı olması aşağıdaki eşitliği ortaya çıkarır.

$$\left\{ \begin{array}{l} -RI_d = 1.6 I_d - \omega * 0.08 I_q \\ -RI_q = 1.6 I_q + \omega * 0.07 I_d + \omega \psi_M \\ M_G = -0.01 I_d I_q + \omega \psi_M \\ RI_d^2 + RI_q^2 = 120 * I_a \\ \psi_M = 1.3 \\ M_G = -M_{TV-echiv} \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Sonuç olarak PMSG nin yükü $R_{ref}[\Omega]$ olarak hesaplanır.

Kontrol sistemi rüzgâr gücü sistemini zamanda değişken hızlar için maksimum rüzgâr gücü enerjisinde tutar. Bu işlemi yaparken türbin gücü rüzgâr farklarından etkilenmesine rağmen, şebekeye verilen güç sabittir ve güç farklılıkları depolama sistemi tarafından düzenlenmektedir. Kısaca rüzgâr santrallerinde kullanılan kontrol sistemleri sürekli rüzgâr hızını ölçmekte, türbin hızı ile jeneratör yükünü ölçüm sonuçlarına göre hesaplamaktadır.

2.3. KONTROL YÖNTEMLERİ

Kontrol sistemlerinin amacı, sistem değişkenlerinin ve durumunun belirli aralıklarla kontrol edilip, sistemi istenilen kriterlere uygun olarak yönlendirmektir. Kontrolörde, sisteme giren değişkenler ve durum sinyalleri işlenerek, sistemi kumanda etmek amacıyla çıkış olarak kontrol sinyali üretilmektedir.

Kontrolörler de çevremizdeki bütün teknolojik ve bilimsel olgular gibi gün geçtikçe gelişmekte ve kendini ilerletmektedir. Klasik olarak tabir edilen oransal (proportional P), oransal-integral (proportional-integral PI) ve oransal-integral-türevsel (proportional-integral-derivative PID) kontrolörlerin yanı sıra günümüzde sürü zekâsı temel alınarak geliştirilen kontrol sistemleri de sık sık sistemlerde kullanılmaktadır. Sürü zekâsı, kolektif davranış gösteren balık, kuş, böcek ve arı kolonileri gibi canlıların davranışlarından esinlenilerek tasarlanmıştır. Kuş sürülerinin uçuş biçimleri, bal arılarının bal toplama rotaları, balık sürülerinin kaçışmaları gibi davranışlar bunlara bir kaç örnektir. Hayvanların bu tip davranışları organize bir şekilde, her bireyin görevin sürü tarafından tamamen ve eksiksiz bitirilmesine izin verecek şekilde uygulaması, bilim adamlarına sürü zekâsı metodunun optimizasyon, robotik ve askeri uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.

Sürü zekâsında ortamdaki etmenlerin ortama müdahale ederek iletişim kurmaları ve birbirlerinin hareketlerini düzenlemeleri (stigmergy) ve kendinden organizasyon (self-organisation) şeklinde özetlenebilecek iki mekanizmadan ibarettir. Stigmergy, bireylerin çevredeki bireylerin yaptığı eylemlerden haberdar olarak kendi eylemlerine yön vermesi, kendinden organizasyon ise merkezi bir yönetim birimi olmadan, daha önceden plan program yapılmaksızın sürünün kendini yönetmesi olarak özetlenebilir [17].

Sürülerin bu özelliklerini ve yaptıkları işleri (yem bulma, taşımada yardımlaşma, kolektif kümelenme gibi) klasik yapay zekâ kavramına yeni bir soluk getirmiştir. Klasik yapay zekâ kavramında bulunan insan zekâsı modelleme odaklı, karmaşık, merkezî, planlı yaklaşımların aksine, sürü zekâsı basit yapılı, özerk, önceden planlama yapmayan dağınık ajanların karmaşık problemlerin çözümünde başarılı olduklarını göstermiştir.

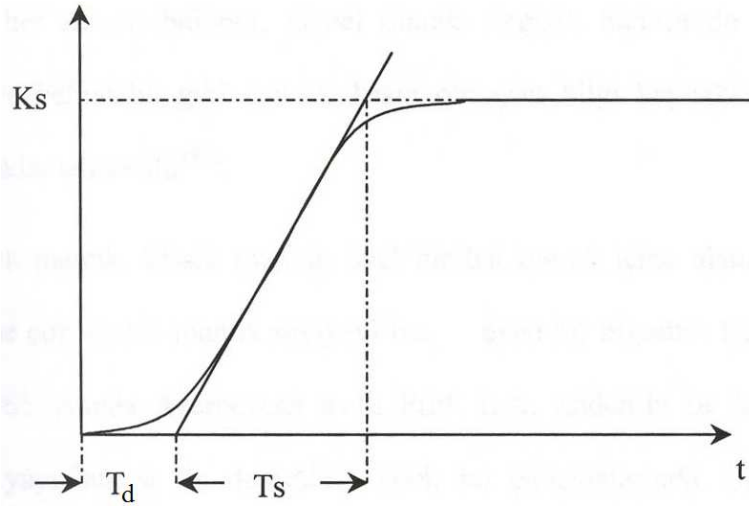
Bu çalışmada, klasik olarak tanımlanan kontrolörleri temsilen PI ve PID'nin yanında, parametreleri parçacık sürüsü ile belirlenmiş ile belirlenmiş PSO-PI, parametreleri yapay arı kolonisi ile belirlenmiş YAK-PI, parametreleri parçacık sürüsü ile belirlenmiş ile belirlenmiş PSO-PID, parametreleri yapay arı kolonisi ile belirlenmiş YAK-PID tercih edilmiştir.

2.3.1. Klasik Kontrol Yöntemleri

Bu çalışmada klasik kontrolörlerden PI (Proportional-Integrator) ve PID (Proportional-Integrator-Derivative) kontrolör kullanılmış ve bunların parametreleri Sistemin Cevap Eğrisi yöntemi ile belirlenerek optimize edilmiştir.

2.3.1.1. Sistemin Cevap Eğrisi Yöntemi

Kontrol problemlerinde kullanılan yöntemlerin parametrelerinin en iyi sonucu verecek şekilde tercih edilmesi önemli bir adımdır. Kontrol sisteminin tipine bağlı olarak analitik ve pratik metotlar geliştirilmiştir. Parametrelerin seçimindeki kıstas, sistemin kalıcı durum ve dinamik davranışına uyum sağlamaktır. Bu çalışmada analitik bir metot olan “Sistemin Cevap Eğrisi Yöntemi” tercih edilmiştir [18].



Şekil 2.6: Örnek bir sistemin birim basamak cevap eğrisi.

Sistemde kullanılacak parametrelerin seçiminde, sistemin zaman sabiti T_s , ölü zaman gecikmesi T_d ve sistem kazancı K_s 'dir. Sistemin cevap eğrisi yöntemine göre PI ve PID kontrolörlerin parametreleri aşağıdaki tablo yardımıyla hesaplanır;

Tablo 2.1: PI ve PID Kontrolör parametre hesaplama tablosu.

	K_p	T_I	T_D
PI	$\frac{0.9T_s}{K_s \cdot T_d}$	$3,33T_d$	-
PID	$\frac{1,2T_s}{K_s \cdot T_d}$	$2T_d$	$0,5T_d$

2.3.1.2. PI Kontrolör

PI kontrolörler, oransal kontrolör ve, integral kontrolörün tek bir ünite içinde birleştirilmesi ile oluşturulur. Oransal kontrolör (P) sistem çıkışındaki aşama değerini kontrol ederken, integral kontrolör ise sistemde oluşabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlar. Bu sayede PI kontrolörler sistemde sıfır kalıcı durum hatalı bir cevap sinyali ortaya çıkarır [19].

$$m(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) \cdot dt \right] \quad (2.22)$$

$\frac{K_p}{T_I} = K_I$ alınırsa ifade şu şekli alır;

$$m(t)=K_P \cdot e(t)+K_I \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad (2.23)$$

2.3.1.3. PID Kontrolör

PI kontrolörlerin geniş zaman aralıklarında büyük bozucu girişlere verdiği cevapların yetersiz olması nedeniyle, bu tip bozucu girişlerin olduğu durumlarda PID kontrolörler tercih edilir. PID kontrolörlerin türevsel kontrol ilavesi, oransal ayarını daha yüksek tutarak kontrol tepki süresini hızlandırır. Bu sayede PID kontrolör kalıcı durum hatasını sıfırlarken, aynı anda sistemin geçici durum davranışını iyileştirmektedir [19].

$$m(t)=K_P \left[e(t)+\frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) \cdot dt+T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.24)$$

$\frac{K_P}{T_I}=K_I$ ve $K_P \cdot T_D=K_D$ alınırsa ifade şu şekli alır;

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

2.3.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

Parçacık sürüsü ile optimizasyon ilk olarak Eberhart ve Kennedy tarafından öne sürülmüştür [17]. Reynolds 1987’de yayınladığı, kuş sürülerinin sosyal davranışlarını bilgisayar kullanarak modellediği çalışma Eberhart ve Kennedy’nin çalışmasının temelini oluşturmuştur [20]. Bu çalışma, kuşların tek bir merkezden yönetilmesine hareket ettiğini ortaya çıkarmıştır. Bu gözlem, Reynolds’a sürü davranışının modelini üç temel üzerinden özetlemesine yardımcı olmuştur. Bu temeller

- çarpışmalardan kaçınma
- hızları eşitleme
- sürü merkezine yakınlaşma

şeklinde özetlenebilir.

Bu kurallar çerçevesinde, Reynolds sürüdeki her bireyin davranışını vektörler kümesi olarak modellemiştir. Bu çalışmayı ilerleten, Boyd ve Recharson [21], bu temel

üzerinden insan karar mekanizmasını incelemişlerdir. Bu çalışmada insan karar verme mekanizmasının iki tip bilgi birikimi ile oluştuğunu göstermişlerdir. Bu birikimleri

- Kendi Deneyimleri: Kişinin daha önce deneyip sonuçlarını gördüğü eylemlerin oluşturduğu bilgi birikimi
- Diğer Kişilerin Deneyimleri: Diğer insanların deneyip sonuçlarını kişiye aktarması ile oluşan bilgi birikimi

şeklinde belirten Boyd ve Recharsonun çalışması PSO'nun temellerini ortaya koymuşlardır.

Eberhart ve Kennedy bu iki temel fikri birleştirerek kendilerine ait hız ve pozisyon bilgisinden oluşan parçacık sürüsü optimizasyonunu ortaya çıkarmışlardır. Parçacık sürüsü optimizasyonunu rasgele seçilmiş bir grup “parçacık”, çözüm uzayında gezinerek en uygun çözümü aramaktadır. Her parçacık kendi en iyi pozisyonlarını ve sürünün ortak en iyi pozisyonunu hafızasında tutmakta bir sonraki hamlesini ona göre planlamaktadır.

2.3.2.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması

Parçacık sürüsü optimizasyonunda sürüdeki her parçacık çözüm uzayında gezinmektedir. Her parçacık optimizasyon probleminde bir aday çözümü temsil etmektedir. Parçacık her hareketini, hem kendi deneyiminden hem de sürünün ortak deneyim havuzundaki en iyi pozisyondan faydalananarak yapmaktadır. Sürünün ortak deneyim havuzundaki bu en iyi pozisyon, *global en iyi* olarak adlandırılmaktadır. Parçacıkların performansı global en iyi'ye olan uzaklığı olarak özetlenebilmektedir. Bu performans uyumluluk (fitness) fonksiyonu vasıtasıyla hesaplanabilmektedir.

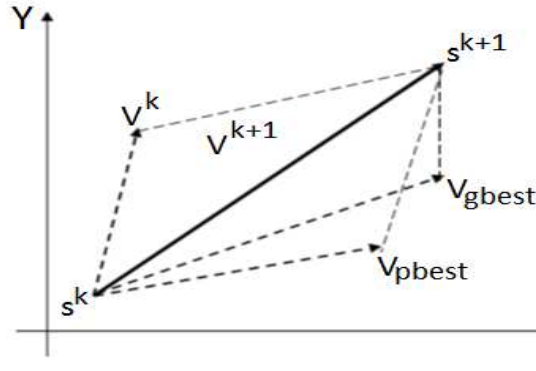
XY iki boyutlu çözüm uzayında her parçacık en iyi çözümü aramakta iken parçacığın hızı v_x ve v_y olarak tanımlanmaktadır. Bu arama sırasında her parçacığın kendi en iyi değeri (p_{best}), sürünün global en iyi'si ise (g_{best}) olarak tanımlanmaktadır. Her parçacık bir sonraki pozisyonunu kendi pozisyonu (x, y), hızı (v_x, v_y) ile p_{best} ve g_{best} konumları ile arasında olan mesafeyi kullanarak tercih etmektedir.

Parçacıkların pozisyon ve hızları aşağıda verilen ve denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır [17].

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 \text{rand}_1 \cdot (p_{\text{best}_i} - s_i^k) + c_2 \text{rand}_2 \cdot (g_{\text{best}} - s_i^k) \quad (2.26)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.27)$$

Şekil 2.7 örnek parçacık sürüsü optimizasyonu süresince arama noktasının hareketini gösterilmektedir [22]. s^k ve s^{k+1} parçacık konumlarını, v^k ve v^{k+1} hızları, v_{pbest} ve v_{gbest} , p_{best} ve g_{best} konumlarına göre hızları göstermektedir. Bu vektörlerin parçacığın konumunu değiştirmeleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Parçacık Sürüsü Optimizasyonunda parçacığın hareketi.

Parçacık sürüsü optimizasyonunun kullanılan ilk versiyonlarında, optimizasyonun osilasyona doğru gitmeye meyilli olması bir problem oluşturmuştur. Osilasyonların limit dâhilinde tutulması ve hızın sönümlenmesi amacıyla Kennedy [22] $v_{\max}$ parametresinin kullanılmasını öngörmüştür.

Kennedy'nin geliştirdiği kod gibi olmuştur;

$$\text{If } v^{k+1} > v_{\max} \text{ then } v^{k+1} = v_{\max}$$

$$\text{Elseif } v^{k+1} < -v_{\max} \text{ then } v^{k+1} = -v_{\max}$$

şeklindedir.

Kennedy bu kısıtlaması ile bir noktaya yakınsayamayan parçacığın, ancak belirli bir bant aralığında osilasyon yapmasına izin verilmiştir. Hızı sönümlmek ve kontrol edilemeyen osilasyonları limitlemek için ise aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$v_{\max}^j = (x_{\max} - x_{\min}) \quad (2.28)$$

$$v_{\min}^j = -v_{\max}^j \quad (2.29)$$

Parçacık sürüsünün geliştirilmesi Kennedy ile son bulmamıştır. Shi ve Eberhart'ın 1998' de geliştirdiği *atalet katsayısı* (ω) tanımı parçacık sürüsü optimizasyonunun bir sonraki evriminin ilk adımı olmuştur [23].

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \cdot \text{iter} \quad (2.30)$$

Atalet katsayısı ile parçacığın bir önceki hızının, yeni hızını etkilemesi kontrol edilmektedir. Zamanla azalan bu katsayı arama uzayını zamanla daraltmakta ve bulanık çözümlerin iyileştirmesini sağlamaktadır. Atalet katsayısının da eklenmesiyle parçacık sürüsü denklemi aşağıdaki hali almıştır.

$$v_i^{k+1} = \omega \cdot v_i^k + c_1 \text{rand}_1 \cdot (p_{\text{best}_i} - s_i^k) + c_2 \text{rand}_2 \cdot (g_{\text{best}} - s_i^k) \quad (2.31)$$

Clerc'in [24] geliştirdiği parçacık sürüsü algoritması, kısıtlama sayısı X'in kullanılması ile parçacıkların belirli değerler arasında tutulmasını öngörmektedir. Bu kısıtlama, parçacığın tanımlı değerlerden uzaklaşmasını engelleyecek, arama uzayının verimini arttıracaktır. Buna göre yeni hız güncelleme denklemi

$$v_i^{k+1} = X \cdot \left[v_i^k + c_1 \text{rand}_1 \cdot (p_{\text{best}_i} - s_i^k) + c_2 \text{rand}_2 \cdot (g_{\text{best}} - s_i^k) \right] \quad (2.32)$$

şeklinde oluşmuştur.

X kısıtlama katsayısıdır ve aşağıdaki gibidir;

$$X = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (2.33)$$

$$\varphi = c_1 + c_2, \varphi > 4 \quad (2.34)$$

Kısıtlama katsayısı, optimizasyonda parçacıkların zamanla tek bir noktaya yaklaşmasını sağlamaktadır.

2.3.2.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması Aşamaları

Aşama 1: Parçacıkların ilk değerlerinin verilmesi

Her bir parçacık rasgele olarak s_i^0 konumu ve v_i^0 hızı değerlerini alır. Parçacıkların s_i^0 konumları p_{best} olarak atanır. Bütün parçacıkların arasındaki en uygun değeri veren p_{best} değeri ise g_{best} olarak belirlenir.

Aşama 2: Parçacıkların amaç fonksiyonunda denenmesi

Her parçacık amaç fonksiyonunda denenerek ortaya çıkan değerler p_{best} değerinden daha iyi olduğu durumlarda, değer yeni p_{best} değeri olarak atanır. Eğer bu değer g_{best} değerinden de iyi ise g_{best} değeri de yeni değerle değiştirilir.

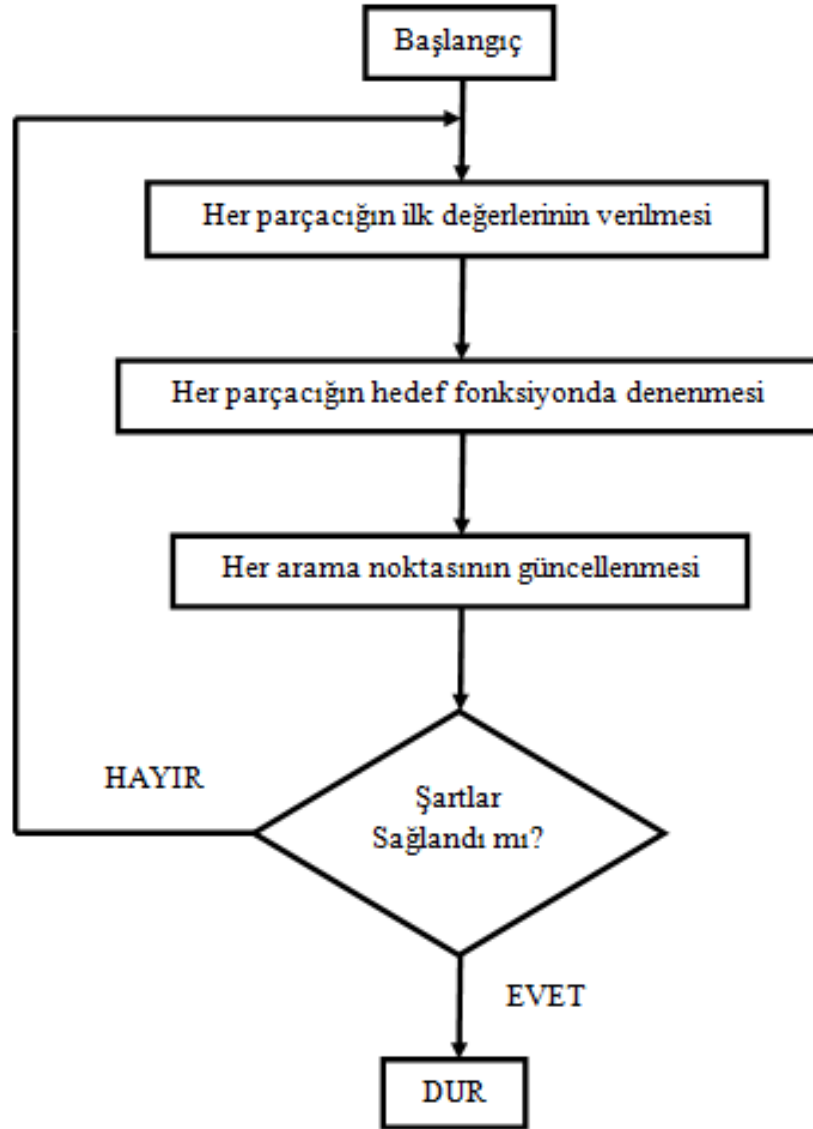
Aşama 3: Parçacıkların arama noktalarının yenilenmesi

Parçacıkların konumları atalet katsayısı kullanılmadığı durumda (2.26) ve (2.27) denklemleri ile, kullanılması durumunda ise (2.31) veya (2.32) denklemleri ile belirlenir.

Aşama 4: Sonlandırma şartlarının kabulü

Sonlandırma şartları karşılandıysa optimizasyon durdurulur, karşılanmadıysa optimizasyon Aşama 1'den devam eder. Bu döngü şartlar sağlanana kadar sürer.

Yukarıda belirtilen adımları içerecek şekilde PSO algoritmasının akış diyagramı aşağıdaki şekilde verilmiştir;



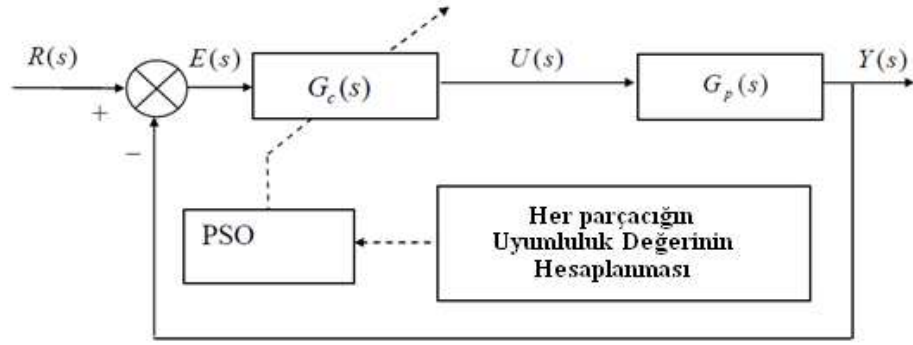
Şekil 2.8: Parçacık sayısı algoritması akış diyagramı [25].

Parçacık sürüsündeki parçacık sayısı ve ilk hızlar, optimizasyonun performansını önemli ölçüde etkiler. Parçacıkların sayısı her ne kadar çözümün daha az iterasyonda bulunmasını ve bulunan cevapların doğruluğunu arttırsa da, yapılan hesap sayısını arttırdığından her iterasyonun süresini arttırmaktadır.

Sürüdeki parçacıkların maksimum hızını belirleyen $v_{\max}$ değeri ise arttırıldığında optimizasyondaki osilasyonu arttıracak, çok düşük tutulması ise her parçanın kendi çevresinde kalmasına neden olup çözümü zorlaştıracaktır. Ayrıca sürüdeki her bir parçacığın sürüdeki en iyi çözüm bölgesine hızlıca ulaşması için, $v_{\max}$ değerinin yüksek olması tercih edilmektedir.

2.3.2.3. Klasik Kontrolör Parametrelerinin PSO ile Ayarlanması

Kontrolörlerin giriş ve çıkışları incelenerek belirlenen kontrolör parametrelerinin düzenlenmesi, kontrolörlerin doğru çalışması için en önemli adımlardan biridir. Klasik metotta kullanıcının tecrübesine ve uzmanlığına bırakılan parametreler hem verimsiz hem de bilimsellikten uzaktır. Bu sebeple, parçacık sürüsü optimizasyonu gibi metotlar verimi arttırmak amacıyla parametrelerin bulunmasında kullanılmaktadır. Aşağıda tek giriş ve tek çıkışlı (SISO) bir sistemde PSO'nun klasik kontrolöre etkisi gösterilmektedir [26, 27];



Şekil 2.9: SISO bir sistem için parametre tercihinde PSO kullanımı.

Parçacık sürüsü algoritması, Eberhart ve Kennedy [17] tarafından P kontrolörün parametresi (K_p) bulunması amacıyla bir boyutlu çözüm uzayında kullanılmıştır. Buradan yola çıkılarak PI kontrolör parametrelerinin (K_p ve K_I) bulunması için iki boyutlu çözüm uzayı, PID kontrolör parametrelerinin (K_p , K_I ve K_D) bulunması için de üç boyutlu çözüm uzayı kullanılması gerektiği görülebilir.

n boyutlu bir uzayda;

- i. parçacığının konumunu : $s_{i,n}$
- parçacığın daha önceki en iyi konumunun $p_{best_{i,n}}$
- bütün parçacıkların ortak en iyi konumunun g_{best_n}
- i. parçacığın hızı $v_{i,n}$

olarak tanımlanmıştır. Bu durumda n boyuttaki her bir parçacığın bir sonraki hızları ve konumları aşağıdaki denklemler vasıtasıyla hesaplanabilir.

$$v_{i,n}^{(k+1)} = X \cdot \left[v_{i,n}^k + c_1 \text{rand}_1 \cdot (p_{\text{best}_{i,n}} - s_{i,n}^k) + c_2 \text{rand}_2 \cdot (g_{\text{best}_n} - s_{i,n}^k) \right] \quad (2.35)$$

$$s_{i,n}^{k+1} = s_{i,n}^k + v_{i,n}^{k+1} \quad (2.36)$$

PSO tarafından kullanılabilir olan uyumluluk fonksiyonu örnekleri aşağıda gösterilmiştir:

$$F = \int |e(t)| \cdot dt \quad (\text{IAE}) \quad (2.37)$$

$$F = \int e(t)^2 \cdot dt \quad (\text{ISE}) \quad (2.38)$$

$$F = \int t \cdot |e(t)| \cdot dt \quad (\text{ITAE}) \quad (2.39)$$

Birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunan bu uyumluluk fonksiyonlarından hangisinin seçileceğine kullanıcı tarafından karar verilir.

2.3.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Bir arı kolonisinde, arılar çeşitli görevlerde çalışmaktadırlar. Her arı kendi görevini eksiksiz yerine getirmektedir. Bu görev dağılımı bir karar mekanizması tarafından değil, kendi içinde yönetilmektedir. İş bölümü ve kendi kendine organizasyon sürü zekasının en önemli iki bileşenidir.

Tereshko'nun minimal yiyecek arama modeline temel üç nokta bulunur [28]. Bu noktalar

- Yiyecek kaynağı
- Görevi belli arılar (Taşıyıcı Arılar)
- Görevi belirsiz arılar (Gözcü Arılar, Kâşif Arılar)

şeklinde belirtilebilir. Bu modelde çalıştığı iki durum ise;

- Yiyecek kaynağına yönlendirme
- Kaynağı bırakma

şeklinde tanımlanmıştır.

Bu durumda arılardaki organizasyonu şekildedir. Kâşif arılar, rastgele bir şekilde etrafta gezinip yiyecek kaynağı aramaktadırlar. Buldukları anda, nektarı toplayıp yuvaya geri dönmektedirler. Bir kâşif arı nektar bulduğu anda artık taşıyıcı arı olarak nitelendirilmektedir.

Gözcü arılar ise yuvada bekleyerek, yuvaya nektar ile gelen arıları takip ederek nektar bulmakta ve onlarda bu şekilde taşıyıcı arıya dönüşmektedirler. Bir taşıyıcı arı ise nektar kaynağı tükendiğinde gözcü ve ya kâşiften birini tercih edip döngüyü sürdürmektedir.

Arıların bu sistemini optimizasyon yöntemi olarak modellemek istediğimizde ise,

- *Pozitif geri besleme:* kaynağın nektar miktarı arttıkça bu kaynağı seçen gözcü arı sayısı da artmaktadır.
- *Negatif geri besleme:* tükenen kaynak bırakılmaktadır.
- *Salınımlar:* kâşif arılar yiyecek kaynağı bulabilmek için rastgele arama yapmaktadır.
- *Çoklu etkileşimler:* arılar yiyecek kaynakları ile ilgili olarak dans alanında bilgi paylaşımı gerçekleştirilirler.

Yiyecek arayan arılarda görülen zeki davranış ile bu davranışa benzetilen optimizasyon metodu “Yapay Arı Kolonisi” olarak adlandırılmaktadır [29].

2.3.3.1. Algoritmanın Adımları

Karaboğa’nın [30] YAK algoritmasının adımları aşağıdaki şekildedir.

1. Kâşif arılar rastgele olarak çevrede yiyecek arar
2. Yiyecek kaynakları bulunduktan sonra, kâşif arılar artık taşıyıcı arı olur ve buldukları kaynaklardan kovana nektar taşımaya başlar. Eğer kaynak devam

ediyorsa kovana döndüğünde gözcü arılara kaynak iletilir, kaynak tükendiyse kâşif arı olur.

3. Gözcü arı dansları izler ve nektarın kalitesine göre bir tercih yaparak oraya yönelir.

YAK algoritmasının bu süreçleri Tablo 2.2’de verilmektedir;

Tablo 2.2: YAK algoritmasının temel adımları.

1:	Başlangıç yiyecek kaynağı bölgelerinin üretilmesi
2:	repeat
3:	İşçi arıların yiyecek kaynağı bölgelerine gönderilmesi
4:	Olasılıksal seleksiyonda kullanılacak olasılık değerlerinin görevli arılardan gelen bilgiye göre hesaplanması
5:	Gözcü arıların olasılık değerlerine göre yiyecek kaynağı bölgesi seçmesi
6:	Kaynağı bırakma kriteri: limit ve kâşif arı üretimi
7:	until çevrim sayısı = Maksimum çevrim sayısı

2.3.3.2. Başlangıç Yiyecek Kaynağı Bölgelerinin Üretilmesi

Arama uzayın çözümlere karşılık gelen rastgele yiyecek kaynakları üretilir. Rastgele üretime her bir parametrenin alt ve üst sınırları arasında rastgele değer üreterek aşağıdaki denklemle gerçekleşir.

$$x_{ij} = x_j^{\min} + \text{rand}(0,1) \cdot (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (2.40)$$

Burada;

- $i=1 \dots SN$
- $j=1 \dots D$
- SN = kaynağı sayısı
- D = optimize edilecek parametre sayısı
- $x_j^{\min}$ = j parametrenin alt sınırı

- $x_j^{\max}$ ise j. parametrenin üst sınırı

şeklinde tanımlanmıştır.

Aynı zamanda başlangıç aşamasında her kaynağın geliştirilememe sayısını ifade eden $failure_i$ (i. kaynağın geliştirilememe sayısı) sayaçları da sıfırlanmaktadır.

Başlangıç aşamasından sonra yiyecek kaynaklarının görevli arı, gözcü arı ve kâşif arı süreçlerinden geçilerek, daha iyisi bulunmaya çalışılır. YAK algoritması için durdurma kriteri olarak maksimum çevrim sayısı ve kabul edilebilir bir hata değeri veya diğer optimizasyon algoritmaları için kullanılan standart bir durdurma kriteri tanımlanabilir.

2.3.3.3. İşçi Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgelerine Gönderilmesi

Her bir kaynağın bir görevli arısı vardır. Görevli arı çalıştığı kaynak komşuluğunda yeni bir yiyecek kaynağı belirler ve bunun kalitesini değerlendirir. Yeni kaynak daha iyi ise bu yeni kaynağı hafızasına alır. Yeni kaynağın mevcut kaynak komşuluğunda belirlenmesinin benzetimi aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır.

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} \cdot (x_{ij} - x_{kj}) \quad (2.41)$$

x_i ile çözümün tek bir parametresi (rastgele seçilen parametresi, j) değiştirilerek, v_i kaynağı bulunur. Rastgele seçilen j parametresi değiştirilirken, yine rastgele seçilen x_k komşu çözümünün ($k \in \{1, 2, \dots, SN\}$) j. parametresi ile mevcut kaynağın j. parametresinin farkları alınıp $[-1, 1]$ arasında rastgele değer alan ϕ_{ij} sayısı ile ağırlandırıldıktan sonra mevcut kaynağın j. parametresine eklenmektedir.

Bu işlem sonucunda üretilen v_{ij} 'nin daha önceden belli olan parametre sınırlarını aşması durumunda j. parametreye ait olan alt veya üst sınır değerlerine ötelenmektedir.

$$v_{ij} = \begin{cases} x_j^{\min} & , \quad v_{ij} < x_j^{\min} \\ v_{ij} & , \quad x_j^{\min} \leq v_{ij} \leq x_j^{\max} \\ x_j^{\max} & , \quad v_{ij} > x_j^{\max} \end{cases} \quad (2.42)$$

Sınırlar dâhilinde üretilen v_i parametre vektörü yeni bir kaynağı temsil etmekte ve bunun kalitesi hesaplanarak bir uygunluk değeri atanmaktadır.

$$fitness_i = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i} & f_i \geq 0 \\ 1+abs(f_i) & f_i < 0 \end{cases} \quad (2.43)$$

Burada f_i , v_i kaynağının yani çözümün maliyet değeridir. x_i ile v_i arasında nektar miktarına yani uygunluk değerlerine göre bir aç gözlü (greedy) seçme işlemi uygulanır. Yeni bulunan v_i çözümü daha iyiye görevli arı hafızasından eski kaynağın yerini silerek v_i kaynağının yerini hafızaya alır. Aksi takdirde görevli arı x_i kaynağına gitmeye devam eder ve x_i çözümü geliştiremediği için x_i kaynağıyla ilgili geliştirememeye sayacı $failure_i$ bir artar, geliştirdiği durumda ise sayaç sıfırlanır.

2.3.3.4. Gözcü Arıların Olasılık Değerlerinin Hesaplanması (Dans Benzetimi)

Görevli arılar her döngüde, kaynaklarını kovandaki gözcü arılarla paylaşırlar. Gözcü arı kaynaktaki nektar miktarı göre bir kaynak seçer. Basit YAK algoritmasında bu seçim rulet tekerleği kullanılarak yapılmıştır. Tekerlekteki her bir dilimin açısı uygunluk değeri ile orantılıdır.

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^{SN} fitness_i} \quad (2.44)$$

Burada $fitness_i$, i. kaynağın kalitesini, SN ise görevli arı sayısını göstermektedir. Bu olasılık hesaplama işlemine göre bir kaynağın nektar miktarı arttıkça (uygunluk değeri arttıkça) bu kaynak bölgesini seçecek gözcü arı sayısı da artacaktır. Bu özellik YAK'ın pozitif geri besleme özelliğine karşılık gelmektedir.

2.3.3.5. Gözcü Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgesi Seçmeleri

Rulet tekeri kullanılarak her kaynak için 0-1 arasında bir sayı üretilir. Eğer P_i değeri bu üretilen sayıdan büyükse gözcü arıda yukarıdaki denklem vasıtasıyla bu değerle yeni bir çözüm üretir. Eski çözüm ve yeni çözüm aç gözlü seleksiyona tabi tutulur, yeni

çözüm daha iyiye bu çözüm tercih edilip çözüm geliştirememe sayacı sıfırlanır. Bu süreç bütün gözcü arılar için tekrarlanır.

2.3.3.6. Kaynağı Bırakma Kriteri: Limit ve Kâşif Arı Üretimi

Bir döngü sonunda tüm görevli ve gözcü arılar için çözüm geliştirememe sayaçları kontrol edilir. Çözüm geliştirememe sayacı belirli bir eşiğin üstündeyse, bu çözüm bırakılıp arı tekrar kâşif arıya dönüştürülür. Kâşif arı tekrar rastgele bir kaynak arama sürecine girer. Temel yapay arı kolonisi algoritmasında her döngüde yalnızca bir kâşif arı üretilir.

2.3.3.7. Seleksiyon Mekanizmaları

Yapay arı kolonisi algoritmasında dört adet seleksiyon yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar;

- 1) Olasılık değerlerinin hesaplandığı global olasılık temelli seleksiyon
- 2) Olasılık tabanlı seleksiyon işlemi
- 3) Açgözlü seleksiyon
- 4) Rastgele seleksiyon

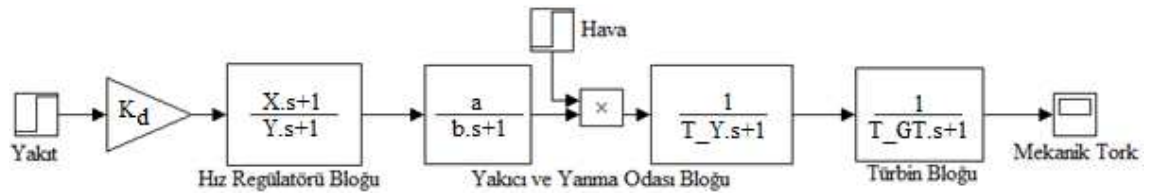
Bu seleksiyon metotlarının hepsinin bir arada kullanılması yapay arı kolonisini hem global hem de lokal olarak başarılı hale getirmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. MATEMATİKSEL MODELLER

3.1.1. Gaz Türbini Modeli

Genelleştirilmiş gaz türbini modeli aşağıdaki gibi düzenlenmiştir [31];



Şekil 3.1: Gaz Türbini modeli.

Burada;

K_d : Hız regülatörü kazancı

X : Hız regülatörü birincil zaman (gecikme) sabiti (saniye)

Y : Hız regülatörü ikincil zaman (gecikme) sabiti (saniye)

a : Yakıcı sistemi kazanç sabiti

b : Yakıcı sistemi zaman (gecikme) sabiti (saniye)

T_Y : Yanma odası zaman (gecikme) sabiti (saniye)

T_{GT} : Türbin dinamik karakteristiklerine bağlı zaman (gecikme) sabiti (saniye)

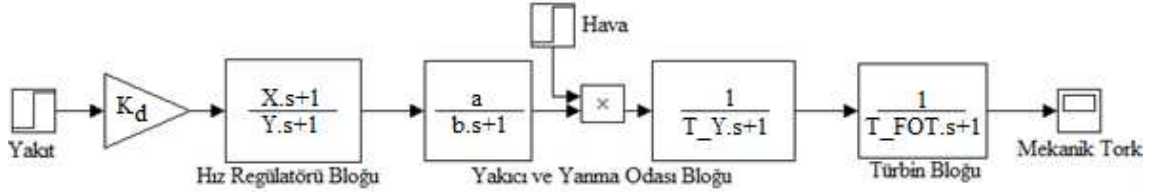
olarak tanımlanabilir. Söz konusu parametrelerin hesaplanmış değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir;

Tablo 3.1: Gaz Türbini parametre değerleri.

Parametre	K_d	X	Y	a	b	T_Y	T_{GT}
Değer	1	0.65	0.1	1	0.05	0.4	0.1

3.1.2. Fuel-Oil Türbini için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model

Örnek modelde kullanılan silo tipi yanma odaları gaz yakıtın dışında likit yakıtta da kullanabildiğinden, modelin katsayıları değiştirilerek fuel-oil türbini içinde kullanılmıştır. Buna göre genelleştirilmiş fuel-oil türbini basitleştirilmiş modeli aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Fuel-Oil Türbini modeli.

Burada;

K_d : Hız regülatörü kazancı

X : Hız regülatörü birincil zaman (gecikme) sabiti (saniye)

Y : Hız regülatörü ikincil zaman (gecikme) sabiti (saniye)

a : Yakıcı sistemi kazanç sabiti

b : Yakıcı sistemi zaman (gecikme) sabiti (saniye)

T_Y : Yanma odası zaman (gecikme) sabiti (saniye)

T_{FOT} : Türbin dinamik karakteristiklerine bağlı zaman (gecikme) sabiti (saniye)

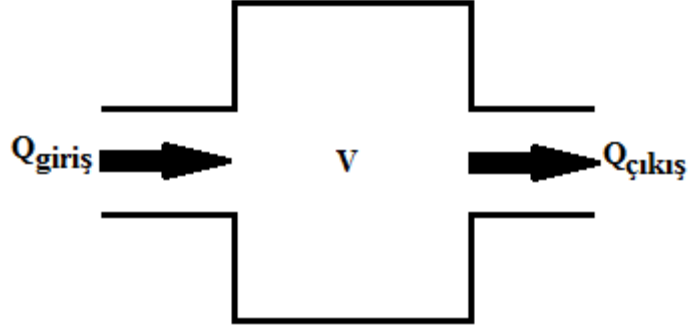
olarak tanımlanabilir. Söz konusu parametrelerin hesaplanmış değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir;

Tablo 3.2: Fuel-Oil Türbini parametre değerleri [32].

Parametre	K_d	X	Y	a	b	T_Y	T_{FOT}
Değer	1	0,73	0,01	1	0,15	0,45	0,1

3.1.3. Atık Isı Kazanı için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model

Gaz türbini egzoz gazının giriş olarak kullanıldığı atık ısı kazanlarının prensip şeması aşağıda gösterilmektedir [33].



Şekil 3.3: Atık Isı Kazanı prensip şeması.

Yukarıdaki şekle göre atık ısı kazanı için süreklilik denklemi;

$$\frac{dW}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} = Q_{giriş} - Q_{çıkış} \quad (3.1)$$

biçimindedir. Burada;

W : atık ısı kazanındaki buharın ağırlığı (kg)

V : atık ısı kazanının hacmi (m³)

ρ : buharın yoğunluğu (kg/m³)

$Q_{giriş}$: egzoz gazı debisi (kg/s)

$Q_{çıkış}$: buhar debisi (kg/s)

t : zaman (s)

dır. Kazandaki dışarı buhar akışının kazandaki basınç ile doğru orantılı olduğu varsayımıyla,

$$Q_{çıkış} = P \frac{Q_0}{P_0} \quad (3.2)$$

olur. Burada;

P : kazandaki buharın basıncı (kPa)

P_0 : nominal basınç

Q_0 : kazandaki nominal buhar çıkış değeri

dir. Kazanda sabit sıcaklık olduğunda,

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt} \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (3.3)$$

olur. Basınca göre buhar yoğunluğundaki değişim $(\frac{\partial \rho}{\partial P})$, belirli bir sıcaklıkta, buhar cetvellerinden belirlenebilir.

Son üç eşitlikten;

$$Q_{giriş} - Q_{çıkış} = V \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{dP}{dt} = V \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{P_0}{Q_0} \frac{dQ_{çıkış}}{dt} = T_V \frac{dQ_{çıkış}}{dt} \quad (3.4)$$

bulunur. Burada,

$$T_V = \frac{P_0}{Q_0} V \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (3.5)$$

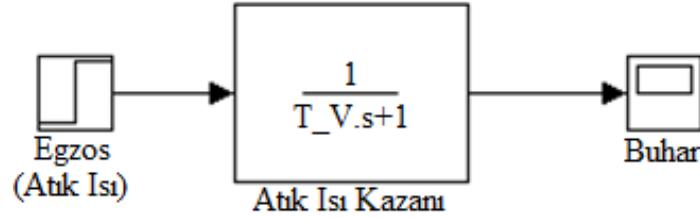
dir. Bir üstteki eşitlik Laplace formunda düzenlendiğinde;

$$Q_{giriş} - Q_{çıkış} = T_V s Q_{çıkış} \quad (3.6)$$

ya da;

$$\frac{Q_{çıkış}}{Q_{giriş}} = \frac{1}{T_V s + 1} \quad (3.7)$$

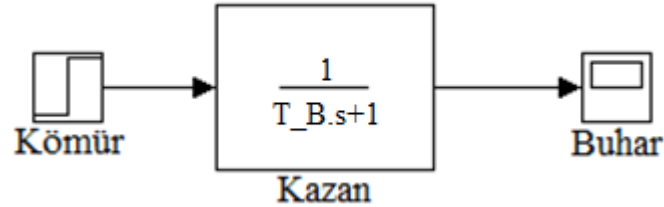
olarak yazılabilir. Bu eşitlik atık ısı kazanının transfer fonksiyonunu gösterir ve kazanın zaman sabitidir (gecikmesi). Genel olarak bu değer 5 saniye alınmıştır. Bu koşullar altında atık ısı kazanının matematiksel modeli Şekil 3.4’de gösterilmiştir;



Şekil 3.4: Atık Isı Kazanı modeli.

3.1.4. Kazan için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model

Kömür yakıtlı termik elektrik santrallerinde kullanılan kazanlarda giriş olarak kömürün içerisinde barındırdığı kimyasal enerjiden yanma ile ortaya çıkan sıcaklık ve çıkış olarak buhar kullanılır [32]. Atık ısı kazanındakine benzer biçimde T_B kazanın zaman sabitidir (gecikmesi). Genel olarak bu değer 7.25 saniye alınmıştır. Bu koşullar altında kazanın matematiksel modeli Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

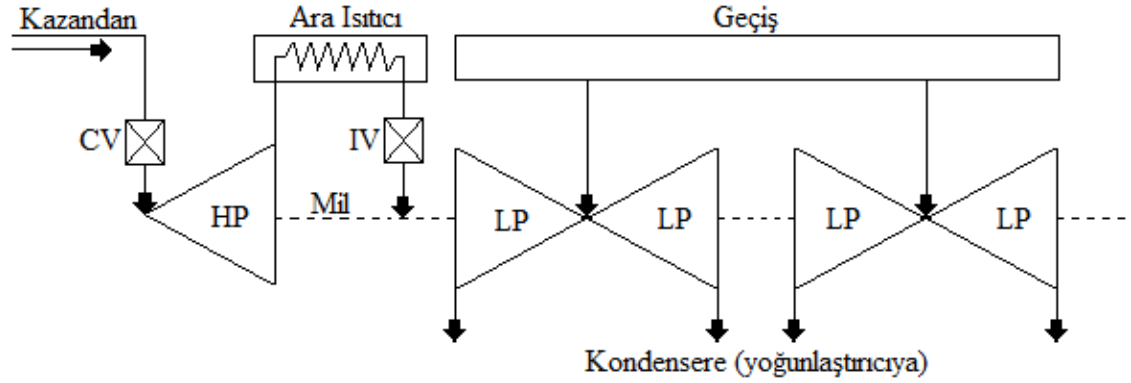


Şekil 3.5: Kazan modeli.

3.1.5. Doğalgaz Kombine Çevrim Santrallerinde Kullanılan Buhar Türbini için Matematiksel Model

Gaz veya fuel-oil türbinlerinin aksine buhar türbinlerinde akışkanın fazı değişir. Faz değişimi akışkanın duyumsanan ısıtmaya göre daha fazla enerji depolamasını sağlar. Akışkan buhar fazında genişlediği ve sıvı fazında sıkıştırıldığı için, elde edilen işin çok az bir kısmı sıkıştırma için kullanılır. Doğalgaz kombine çevrim santrallerinde kullanılan buhar türbinleri genel olarak yüksek basınç ve düşük basınç safhalarına sahiptirler. Buhar türbinlerinin modellenmesi amacıyla göz önüne alınması gereken

türbin elemanlarını gösteren temel yapı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir;



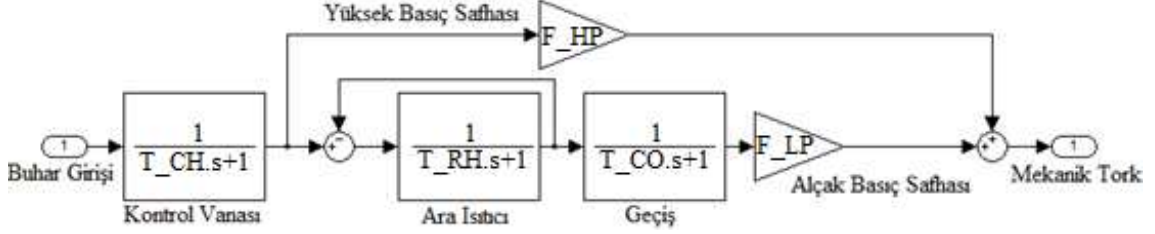
Şekil 3.6: Doğalgaz Kombine Çevrim Santrallerinde kullanılan buhar türbini yapısı.

Şekilde görüldüğü üzere buhar yüksek basınç safhasına kontrol vanası ve giriş borusundan geçerek girer. Kontrol vanalarının mahfazası istim kutusu olarak isimlendirilir. Büyük miktarda buhar, buhar hücresinde ve yüksek basınç safhasına giriş borusunda depolanır. Yüksek basınç çıkış buharı ara ısıtıcıdan geçer. Ara ısıtılmış buhar, ara ısıtma vanası (IV) ve giriş borusundan geçerek düşük basınç türbin safhasına akar. Durdurma vanaları adeta buhar akışını durdurmak için yedek cihazlar oldukları için, sistem incelemelerinde bunların modellenmesine gerek yoktur ve yukarıdaki şekilde gösterilmemiştir.

Kontrol vanaları normal çalışma esnasında yük/frekans kontrolü için, türbindeki buhar akışını düzenlerler. Kontrol vanası açıklığındaki bir değişime buhar akışının cevabı, buhar hücresinin ve yüksek basınç safhasına giriş borusunun dolma (yüklenme) zamanı nedeniyle, bir TCH (charging time) zaman sabiti ile oluşur. Bu zaman sabiti 0.2 ila 0.3 saniye mertebesindedir.

Ara vana, normalde, sadece aşırı hız durumunda türbin mekanik gücünün hızlı kontrolü için kullanılır. Ara vana bu amaç için çok etkilidir, çünkü ara vana ısıtıcının ilerisindedir ve toplam türbin gücünün %70'ini üreten düşük basınç safhasına buhar akışını kontrol eder. Düşük basınç safhasındaki buhar akışı, sadece ara ısıtıcı hacmindeki basıncın takviye edilmesi ile değiştirilebilir. Ara ısıtıcı büyük miktarda buhar tutar ve ona ilişkin zaman sabiti TRH 5 ile 10 saniye arasındadır. Düşük basınç safhalarına buhar akışı, bağlama borusu ile ilgili ek bir zaman sabiti TCO ile oluşturulur ve bu zaman sabiti 0,5 saniye mertebesindedir [33].

Yukarıda verilen bilgiler ışığında elde edilen genelleştirilmiş iki kademeli buhar türbini modeli basitleştirilerek aşağıdaki gibi düzenlenmiştir;



Şekil 3.7: Doğalgaz Kombine Çevrim Santrallerinde kullanılan buhar türbini modeli.

Burada;

T_CH: Kontrol vanası zaman (gecikme) sabiti (saniye)

T_RH: Ara ısıtıcı zaman (gecikme) sabiti (saniye)

T_CO: Geçiş zaman (gecikme) sabiti (saniye)

F_HP: Yüksek basınç safhası katsayısı

F_LP: Alçak basınç safhası katsayısı

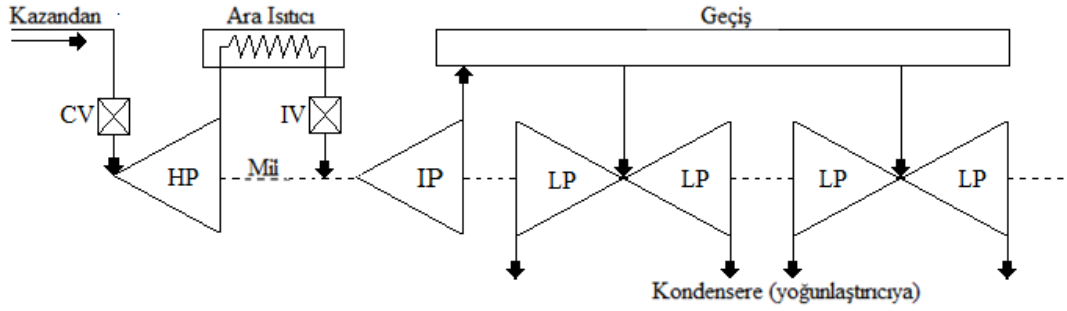
olarak tanımlanabilir. Söz konusu parametrelerin hesaplanmış tipik değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir;

Tablo 3.3: DGKÇS Buhar Türbini parametre değerleri.

Parametre	T_CH	T_RH	T_CO	F_HP	F_LP
Değer	0,3	7	0,5	0,3	0.7

3.1.6.Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde Kullanılan Buhar Türbini için Matematiksel Model

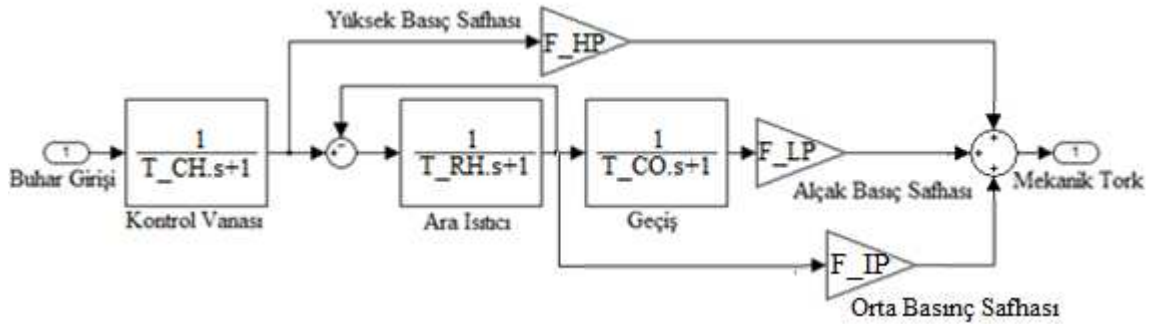
Kömür yakıtlı termik elektrik santrallerinde kullanılan buhar türbinleri genel olarak yüksek basınç, orta basınç ve düşük basınç safhalarına sahiptirler. Buhar türbinlerinin modellenmesi amacıyla göz önüne alınması gereken türbin elemanlarını gösteren temel yapı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir;



Şekil 3.8: Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde kullanılan buhar türbini yapısı.

Bu tip buhar türbinlerinin çalışma prensibi iki kademeli buhar türbinindeki ile benzerdir. Aradaki tek fark olarak toplam türbin gücünün %30'u yüksek basınç safhasında, %30'u orta basınç safhasında ve %40'nın da alçak basınç safhasında üretildiği gerçeğidir. Bu durum kayıpların azalmasına sebep olurken diğer buhar türbinine zaman gecikmesi yaşanmasına sebep olur [33].

Yukarıda verilen bilgiler ışığında elde edilen geliştirilmiş üç kademeli buhar türbini modeli basitleştirilerek aşağıdaki gibi düzenlenmiştir;



Şekil 3.9: Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde kullanılan buhar türbini modeli.

Burada;

T_CH: Kontrol vanası zaman (gecikme) sabiti (saniye)

T_RH: Ara ısıtıcı zaman (gecikme) sabiti (saniye)

T_CO: Geçiş zaman (gecikme) sabiti (saniye)

F_HP: Yüksek basınç safhası katsayısı

F_IP: Orta basınç safhası katsayısı

F_LP: Alçak basınç safhası katsayısı

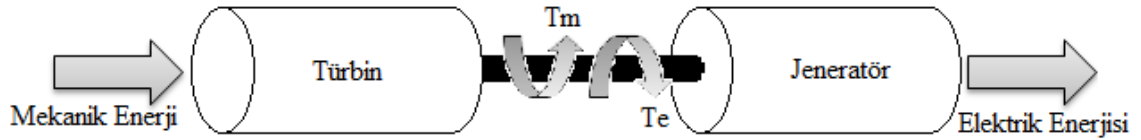
olarak tanımlanabilir. Söz konusu parametrelerin hesaplanmış tipik değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir;

Tablo 3.4: KYTS Buhar Türbini parametre değerleri.

Parametre	T_CH	T_RH	T_CO	F_HP	F_IP	F_LP
Değer	0.3	7	0.5	0.3	0.3	0.4

3.1.7. Jeneratör için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model

Güç sistemlerindeki jeneratörler, iki zıt momente sahip kütle olarak tasavvur edilebilir.



Şekil 3.10: Türbin-jeneratör sistemi fiziksel modeli.

Türbinin ürettiği mekanik moment (T_m) dönüş hızını arttırmakta, yükün oluşturduğu elektriksel moment (T_e) ise hızı azaltmaktadır. İki momentin eşit olması sistemi sabit hız ve frekansa getirmektedir. Elektriksel yük arttığında, sistem yavaşlayacağından ve bu frekansı düşüren istenmeyen bir etki olduğundan jeneratör hızı türbin momentini artırılarak arttırılmaya çalışılır. Buna ilişkin denklemler aşağıda verilmiştir.

$$T_T = I \cdot \alpha \quad (3.8)$$

$$M = I \cdot \omega \quad (3.9)$$

$$P_T = \omega \cdot T_T = \omega \cdot (I \cdot \alpha) = M \cdot \alpha \quad (3.10)$$

İlk durumda tek bir döner makine olduğu ve hızının ω_0 , faz açısının δ_0 olduğu kabul edilirse, talep edilen yükün artması durumunda mekanik ve elektriksel moment farklılaşacaktır. Bu durumda jeneratör hızı artacak ya da azalacaktır. Bu moment değişiminin matematiksel ifadesi;

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (3.11)$$

ise, hız değişimin matematiksel ifadesi

$$\Delta\delta = \int (\omega_0 + \alpha t) dt - \int \omega_0 dt = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 - \omega_0 t = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (3.12)$$

olur. Frekans değişimi ise,

$$\Delta\omega = \alpha t = \left(\frac{d}{dt} \right) (\Delta\delta) \quad (3.13)$$

Faz açısı sapması, hız sapması ve net ivmelendirme momenti arasındaki ilişki ise,

$$T_T = I \cdot \alpha = I \left(\frac{d}{dt} \right) (\Delta\omega) = I \left(\frac{d^2}{dt^2} \right) (\Delta\delta) \quad (3.14)$$

olur. Böylelikle;

$$P_T = P_m - P_e \quad (3.15)$$

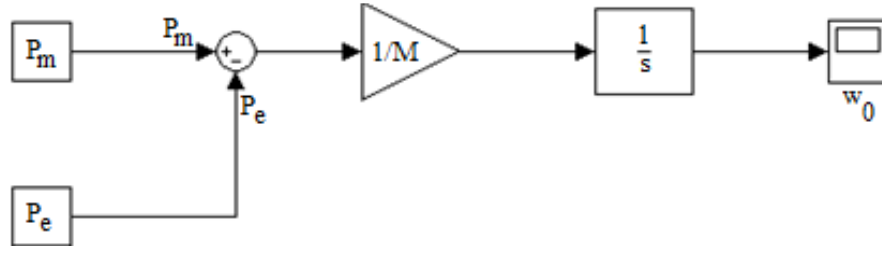
olarak sürekli durumdaki toplam net gücü buluruz. Net güç ile frekans değişimi arasındaki ilişki,

$$P_T = \omega_0 \cdot I \frac{d\Delta\omega_0}{dt} = M \frac{d\Delta\omega_0}{dt} \quad (3.16)$$

olur. Bu eşitlik Laplace formunda düzenlenirse;

$$\omega_0 = \frac{1}{M_s} P_T = \frac{1}{M_s} (P_m - P_e) \quad (3.17)$$

halini alır. Bu eşitliğin blok diyagramı ile gösterimi aşağıdadır;

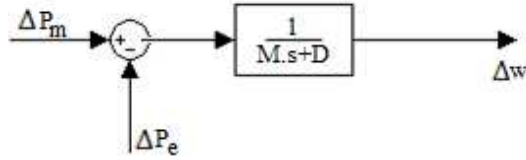


Şekil 3.11: Türbin-jeneratör sisteminin basite indirgenmiş blok diyagramı.

Frekans değişikliğine ($\Delta\omega$) bağlı olarak yükün değişmesi (ΔP_L) aşağıdaki gibi modellenir;

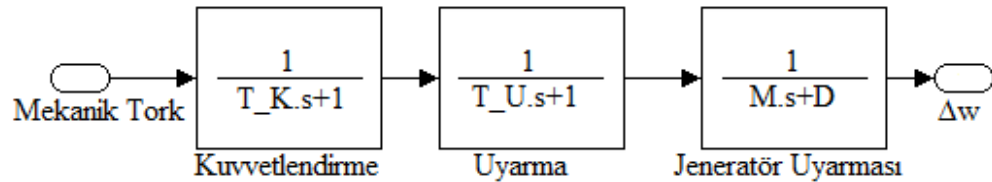
$$\Delta P_e = \Delta P_L + \Delta P_D \rightarrow \Delta P_L = D \cdot \Delta\omega \rightarrow D = \frac{\Delta P_L}{\Delta\omega} \quad (3.18)$$

Sönüm sabiti (D), verilen yüzdesel yük değişimi için frekansta oluşan yüzdesel değişimdir. Tipik değeri %1-2 civarındadır. Örneğin %1'lik bir yük değişiminde %1'lik bir frekans değişimi varsa $D=1/1=1$ olur. Yük sönüm etkisi ile sistemin yeni hali aşağıdaki şekilde gösterilmiştir;



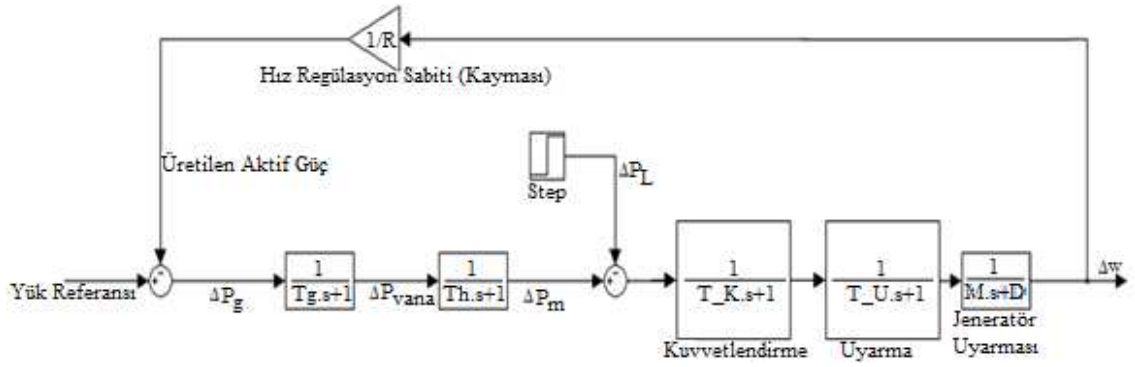
Şekil 3.12: Dönen kütle ve yükün indirgenmiş blok diyagramı.

Böylelikle jeneratör uyarması yukarıdaki şekilde özetlenmiş olur. Ancak jeneratör uyarmasının öncesinde otomatik gerilim regülatörünün kuvvetlendirici ve uyarma blokları da eklenirse yukarıdaki şekil aşağıdaki gibi olur;



Şekil 3.13: Frekans değişimi çıkışına sahip jeneratör modeli.

Çıkışı frekans değişimi olan bir jeneratör modeli yukarıda özetlendiğine göre güç sistemlerinin genel gösterimi incelenebilir;



Şekil 3.14: Bir güç sisteminin genel gösterimi.

Şekilde görülen R değeri, üretim ünitesinin hız çıkış gücü karakteristiğini belirler. R ; hız ($\Delta\omega$) veya frekans bozulmasının (Δf), valf pozisyonu (ΔP_{vana}) veya güç değişimi (ΔP_g) oranına eşittir. R , hız regülasyon sabiti veya kayması olarak tanımlanmaktadır.

$$R = \frac{\Delta\omega}{P_{jn}} = \frac{\Delta f}{P_{jn}} = \frac{f_2 - f_1}{P_{jn}} \quad (3.19)$$

Yukarıdaki eşitlikte;

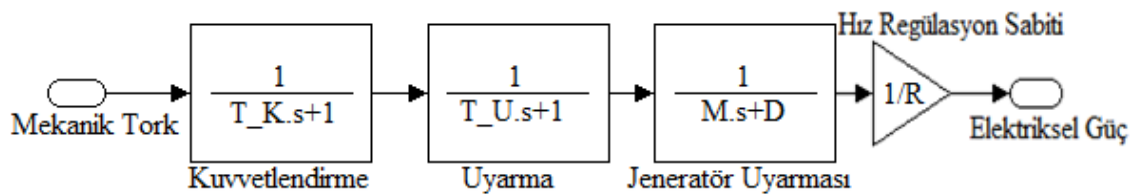
P_{jn} : Jeneratör ünitesinin nominal aktif çıkış gücü (MW)

f_2 : Yüksüz durumda frekans (Hz)

f_1 : Nominal güç çıkışında frekans (Hz)

R : Hız regülasyon sabiti veya kayması (Hz/MW)

dır. Bu durumda hız regülasyon sabiti de sisteme eklenerek çıkışı aktif güç olan bir jeneratör modeli elde edilebilir [12, 33], ;



Şekil 3.15: Basitleştirilmiş Jeneratör modeli.

Burada;

T_K: Kuvvetlendirme zaman (gecikme) sabiti (saniye)

T_U: Uyarma zaman (gecikme) sabiti (saniye)

M: Jeneratör zaman (gecikme) sabiti (saniye)

D: Sönüm Sabiti

R: Hız regülasyon sabiti veya kayması (Hz/MW)

olarak tanımlanabilir. Söz konusu parametrelerin hesaplanmış tipik değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir;

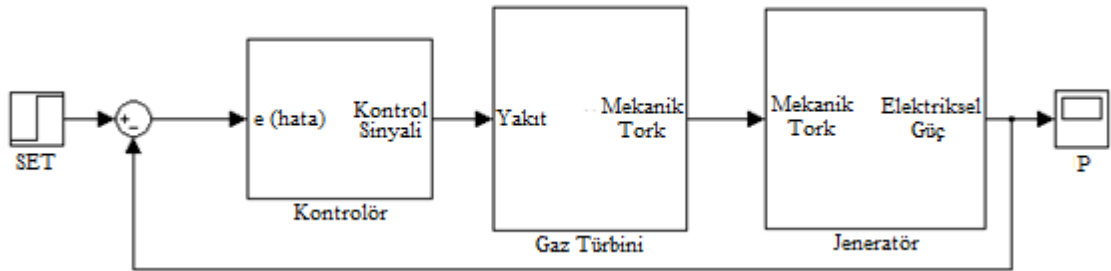
Tablo 3.5: Basitleştirilmiş Jeneratör parametre değerleri.

Parametre	T_K	T_U	M	D	R
Değer	0,25	1	0,1	1	1

3.1.8. Santral Modelleri

3.1.8.1. Gaz Türbini Santrali için Matematiksel Model

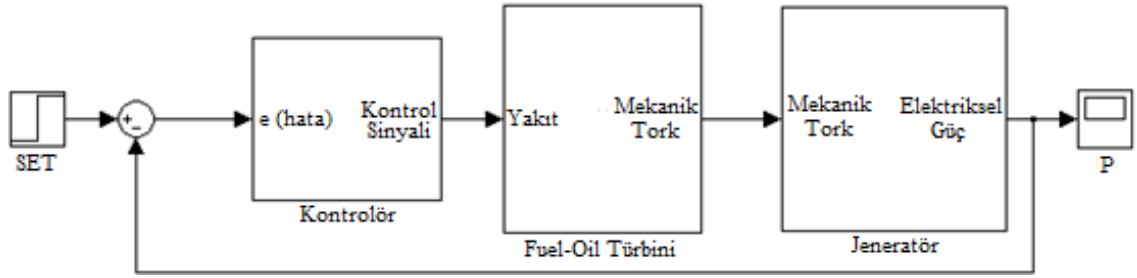
Yukarıda üretilen gaz türbini ve jeneratör modeli birleştirilerek aşağıdaki gaz türbini santrali modeli oluşturulabilir.



Şekil 3.16: Gaz Türbini Santrali için matematiksel model.

3.1.8.2. Fuel-Oil Türbini Santrali için Matematiksel Model

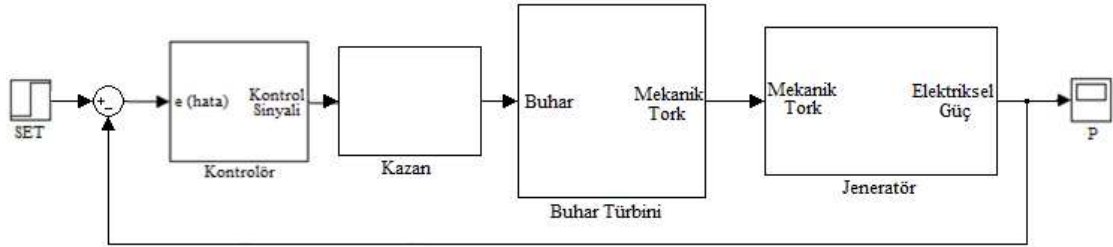
Yukarıda üretilen fuel-oil türbini ve jeneratör modeli birleştirilerek aşağıdaki gaz türbini santrali modeli oluşturulabilir.



Şekil 3.17: Fuel-Oil Santrali için matematiksel model.

3.1.8.3. Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santrali için Matematiksel Model

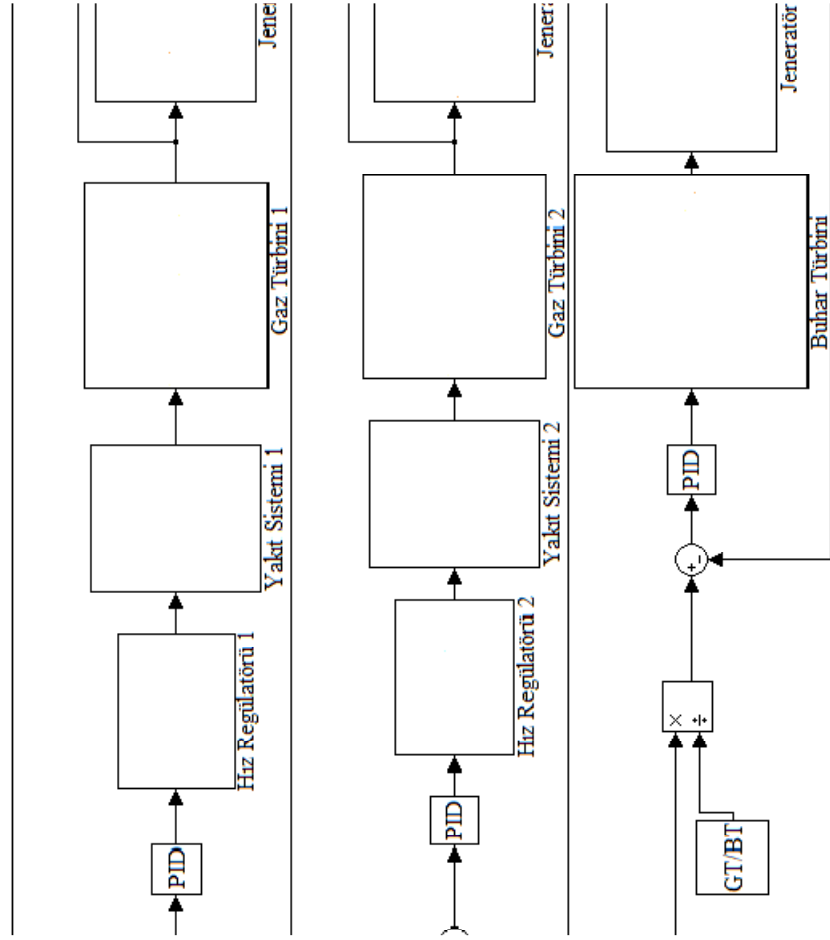
Yukarıda üretilen kazan, buhar türbini ve jeneratör modeli birleştirilerek aşağıdaki kömür yakıtlı termik elektrik santrali modeli oluşturulabilir.



Şekil 3.18: Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santrali için matematiksel model.

3.1.8.4. Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali için Matematiksel Model

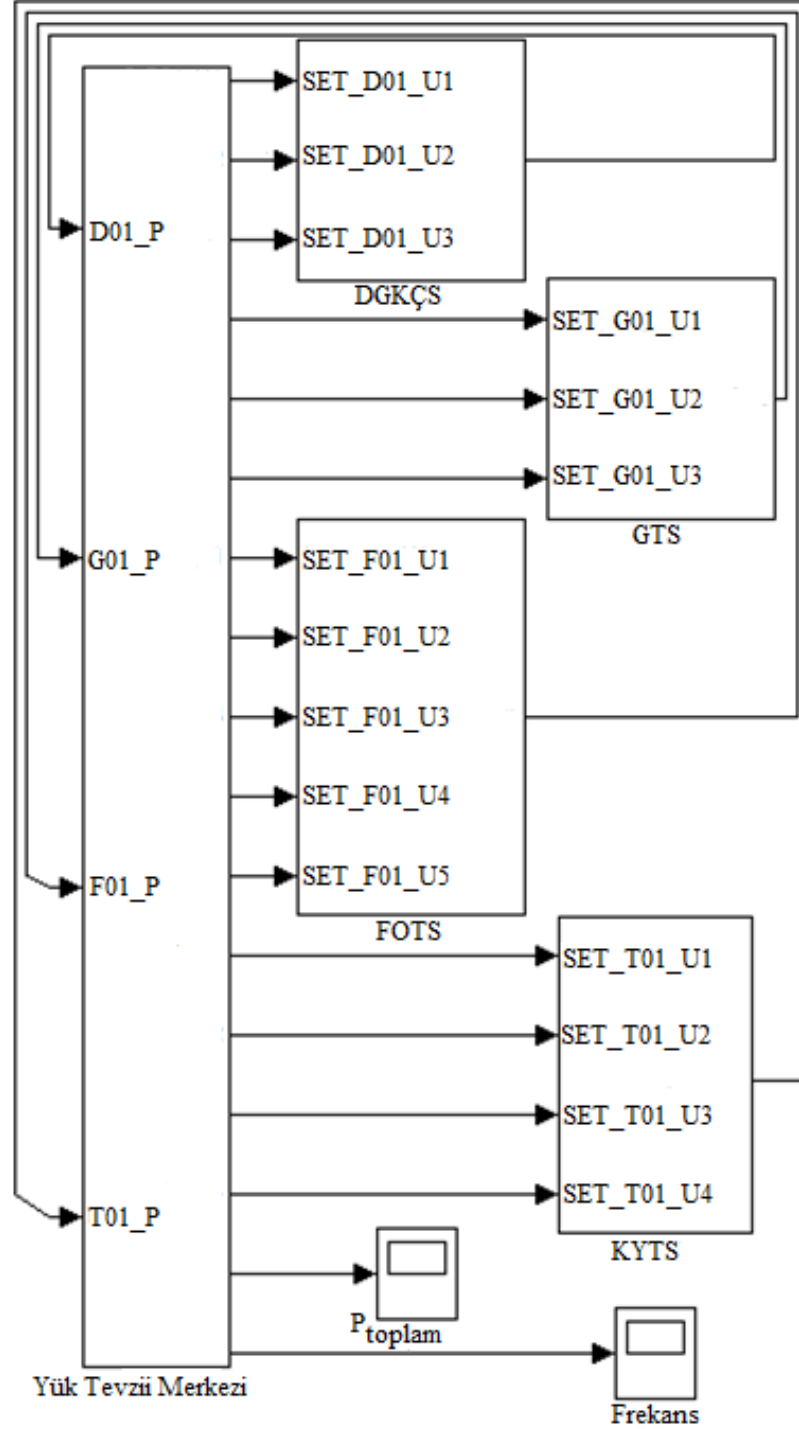
Yukarıda üretilen gaz türbini, atık ısı kazanı, buhar türbini ve jeneratör modeli birleştirilerek aşağıdaki doğalgaz kombine çevrim santrali modeli oluşturulabilir;



Şekil 3.19: 2 Gaz Türbini ve 1 Buhar Türbininden oluşan Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali modeli.

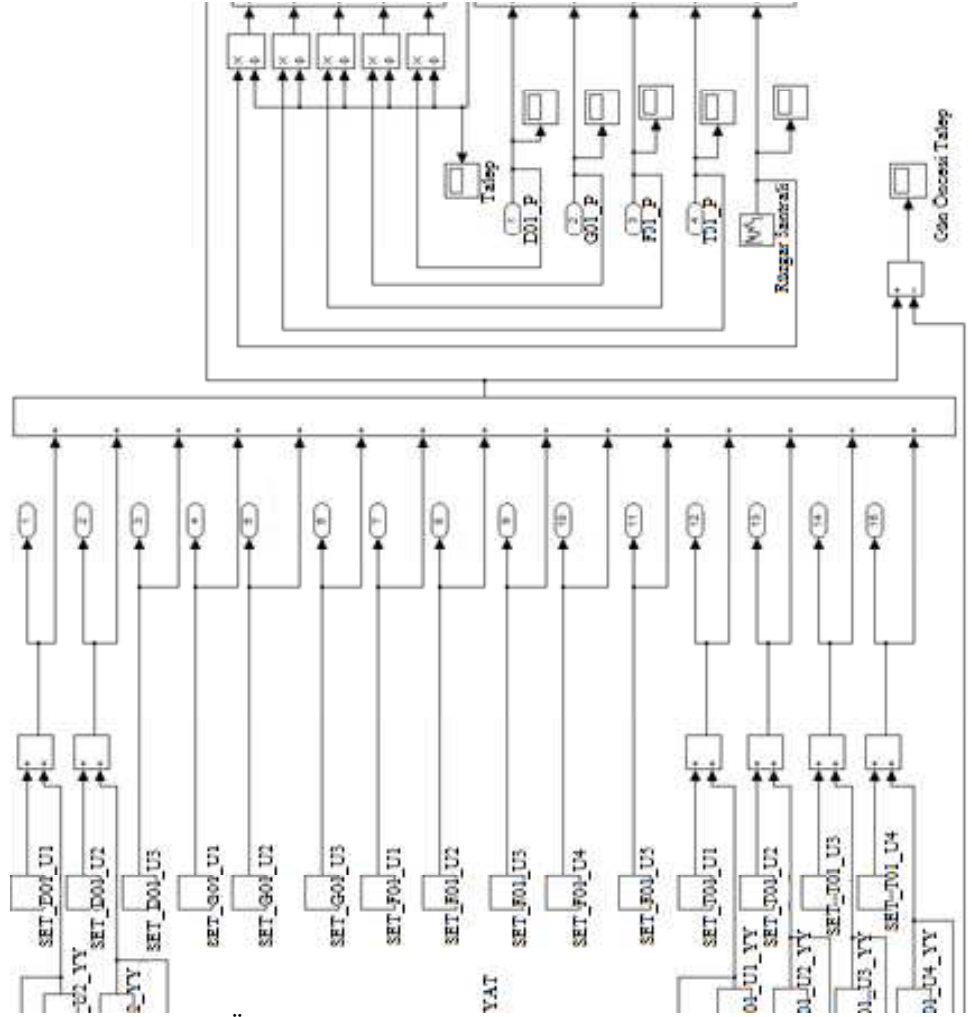
3.1.9. Benzetim Modeli

Bu tez çalışmasında kullanılan örnek yük merkezinin benzetiminde kullanılacak modelin şekli aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.20: Benzetim genel modeli.

Örnek yük tevzii merkezi bloğunun içeriği aşağıdaki gibidir. Bu blokta optimizasyon yazılımı tarafından her bir ünite için üretilen set değerler benzetim ortamına anlık olarak aktarılmaktadır. Ayrıca ünitelere yazılım tarafından gönderilen üretim set değerleri bölgenin talebi olarak frekans bloğuna aktarılmaktadır.



Şekil 3.21: Örnek yük tevzi merkezi modeli.

3.2. KONTROLÖRLERİN PARAMETRELERİ

3.2.1. Sistemin Cevap Eğrisi Yoluyla Bulunan Parametreler

PI kontrolörlerin parametreleri her bir santral için Sistemin Cevap Eğrisi metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre kontrolörlerin parametreleri aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

Tablo 3.6: Örnek YTM’inde Sistem Cevap Eğrisine göre parametreler.

Santral Tipi	Parametreler				
	PI		PID		
	K _P	K _I	K _P	K _I	K _D
Gaz Türbini Santrali	0,7100	0,6800	2,3000	1,4500	0,9500
Fuel-Oil Türbini Santrali	0,4900	0,5900	2,9000	1,1500	0,8300
Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali Buhar Türbini	1,9000	0,2800	5,2020	0,9950	0,5625
Kömür Yakıtlı Termik Santral Buhar Türbini	1,9900	0,1650	3,1300	0,2500	0,8400

3.2.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Yoluyla Bulunan Parametreler

Parçacık Sürüsü Optimizasyonunun uygulanabilmesi amacıyla Matlab’da bir yazılım oluşturularak her santral modeli üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Simulink’te oluşturulan modelde hata miktarları kaydedilmiş ve amaç fonksiyonu olarak hatanın mutlak değeri sıfıra ulaştırılmaya çalışılmıştır.

PSO uygulanırken Clerc’in denklemi X katsayısı ile kullanılarak c_1 ve c_2 katsayıları 2.05 alınmış, parçacık sayısı 5 ve iterasyon sayısı ise 20 olarak belirlenmiştir. Bu işlemlerin ardından elde edilen optimum parametreler aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 3.7: Örnek YTM’inde PSO’ya göre parametreler.

Santral Tipi	Kontrolör	Parametreler		
		K _P	K _I	K _D
Gaz Türbini Santrali	PSO-PI	0,7889	0,6204	-
	PSO-PID	3,0108	1,5445	1,0226
Fuel-Oil Türbini Santrali	PSO-PI	0,5266	0,6272	-
	PSO-PID	3,2843	1,5432	1,0226
Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali Buhar Türbini	PSO-PI	1,9990	0,2943	-
	PSO-PID	2,7433	0,8434	0,0160

Kömür Yakıtlı Termik Santral Buhar Türbini	PSO-PI	1,6727	0,1412	-
	PSO-PID	2,6403	0,2176	0,4353

3.2.3. Yapay Arı Kolonisi Yoluyla Bulunan Parametreler

Yapay Arı Kolonisi optimizasyonunun uygulanabilmesi amacıyla Matlab’da bir yazılım oluşturularak her santral modeli üzerinde optimizasyon yapılmıştır. Simulink’te oluşturulan modelde hata miktarları kaydedilmiş ve amaç fonksiyonu olarak hatanın mutlak değeri sıfıra ulaştırılmaya çalışılmıştır.

Benzetimde görevli arı sayısı 5, iterasyon sayısı 20 ve amaç fonksiyonu da hatanın mutlak değer toplamı tercih edilmiştir. Yazılım sonucunda elde edilen her bir santralin parametreleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.8: Örnek YTM’inde YAK’a göre parametreler.

Santral Tipi	Kontrolör	Parametreler		
		K_p	K_I	K_D
Gaz Türbini Santrali	YAK-PI	0,5752	0,7000	-
	YAK-PID	2,8211	1,4499	0,7863
Fuel-Oil Türbini Santrali	YAK-PI	0,5431	0,6500	-
	YAK-PID	2,5190	0,7382	0,9028
Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali Buhar Türbini	YAK-PI	2,0000	0,2976	-
	YAK-PID	5,2500	0,6310	0,1226
Kömür Yakıtlı Termik Santral Buhar Türbini	YAK-PI	1,5760	0,1661	-
	YAK-PID	2,3957	0,2099	0,2139

4. BULGULAR

4.1. ÖRNEK YÜK TEVZİ MERKEZİ

Bu çalışmada kullanmak amacıyla 4 santralden oluşan bir bölge tasarlanmış, saatlik bazda bölgenin toplam tüketim eğrileri ve santrallerin üretim kapasiteleri gibi veriler bilgisayar ortamında örnek senaryo oluşturmak üzere üretilmiştir. Bu çalışmada 19.09.2013 tarihinde yapılan üretimler ele alınacaktır. Bu sebeple o tarihe ait döviz kurları, yakıt fiyatları gibi bilgiler gerekli yerlerden alınıp programa girdi olarak sunulmuştur.

Benzetimi yapılacak olan gün için; toplam kurulu güçleri 1351.2 MW olan 3 adet üniteden oluşan Ambarlı Doğalgaz Kombine Çevrim Santraline benzetilen bir adet Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali, toplam kurulu güçleri 98 MW olan 3 adet üniteden oluşan Ak Enerji Santraline benzetilen bir adet Gaz Türbini Santrali, toplam kurulu güçleri 640.9071 MW olan 5 adet üniteden oluşan Ambarlı Fuel-Oil Santraline benzetilen bir adet Fuel-Oil Türbini Santrali ve toplam kurulu güçleri 1440 MW olan 4 adet üniteden oluşan Afşin Elbistan Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santraline benzetilen bir adet Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santrali modellenmiştir. Bu santrallerde toplam kurulu gücü 3530.1071 MW olan 15 ünite bulunmaktadır.

Örnek yük tevzi merkezinin detayları şu Tablo 4.1’de görülmektedir.;

Tablo 4.1: Örnek YTM’inde santral bilgileri.

Santral		Sistem	Ünite Kodu	Ünite Kurulu Gücü
1	Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali	3x(2 GT + 1 BT)	D01_U1	450.4 MW
			D01_U2	450.4 MW
			D01_U3	450.4 MW
2	Gaz Türbini Santrali	1 GT + 1 GT + 1GT	G01_U1	43.5 MW
			G01_U2	33 MW
			G01_U3	21.5 MW
3	Fuel-Oil Santrali	3 FOT + 2 FOT	F01_U1	150 MW
			F01_U2	150 MW
			F01_U3	113.6357 MW
			F01_U4	113.6357 MW
			F01_U5	113.6357 MW
4	Kömür Yakıtlı Termik Santral	4 BT	T01_U1	360 MW
			T01_U2	360 MW
			T01_U3	360 MW
			T01_U4	360 MW

Ayrıca bu santrallerin enerjisini karşılamakla yükümlü olduğu bir zaman dilimi yaratılmış, burada da günün farklı saatlerindeki ihtiyaç farklılaştırılarak günün her bir saatinin kendi içinde ve toplam olarak bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür.

Bu yük eğrisi aşağıda verilmiştir;

Tablo 4.2: YTM yük eğrileri.

Saat Aralığı:	Yük (MW)
00-01	1208
01-02	1241
02-03	1289
03-04	1311
04-05	1358
05-06	1389
06-07	1462
07-08	1487
08-09	1435
09-10	1361
10-11	1295
11-12	1353
12-13	1400
13-14	1670
14-15	1723
15-16	1717
16-17	1725
17-18	2018
18-19	1956
19-20	1969
20-21	1960
21-22	1960
22-23	1584
23-00	1588

Gerçek zamana yakın bir benzetim yapılabilmesi için bir doktora tezinden alınan üç adet optimizasyon yazılımı (Sanal Dünya, Gün Öncesi Planlama ve Gerçek Zamanlı Planlama) [14] oluşturulan örnek yük tevzii merkezine göre uyarlanarak her bir ünite için farklı set değerler belirlenmiştir.

4.2. OPTİMİZASYON YAZILIMI SONUÇLARI

4.2.1. Sanal Dünya Programı

Yukarıda verilen yük tevzi merkezine ve yük eğrisine ait bilgiler ile, seçilen 19.09.2013 tarihine ait kur, yakıt fiyatları gibi bilgiler Sanal Dünya Programına girilmiş, program verileri işleyerek rastgele olarak aşağıdaki sonuçları çıkarmıştır. Sanal dünyaya ait bütün çıktılar, okuma ve karşılaştırma kolaylığı açısından daraltılmış, her saat bölümünden birer örnek alınarak tablolar oluşturulmuştur.

Tablo 4.3: Örnek YTM için sanal teklifler.

	Karbon Emisyonlu			Karbon Emisyonlu		
	Gece	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant
	01-02	11-12	21-22	01-02	11-12	21-22
D01_U1	265.3347	277.3953	289.456	271.4793	283.8192	296.1592
D01_U2	265.3347	277.3953	289.456	271.4793	283.8192	296.1592
D01_U3	265.3347	277.3953	289.456	271.4793	283.8192	296.1592
G01_U1	443.613	463.7772	483.9415	452.8299	473.4131	493.9963
G01_U2	443.613	463.7772	483.9415	452.8299	473.4131	493.9963
G01_U3	443.613	463.7772	483.9415	452.8299	473.4131	493.9963
F01_U1	635.6592	664.5528	693.4464	648.3422	677.8123	707.2824
F01_U2	635.6592	664.5528	693.4464	648.3422	677.8123	707.2824
F01_U3	635.6592	664.5528	693.4464	648.3422	677.8123	707.2824
F01_U4	635.6592	664.5528	693.4464	648.3422	677.8123	707.2824
F01_U5	635.6592	664.5528	693.4464	648.3422	677.8123	707.2824
T01_U1	263.7336	275.7215	287.7094	280.2336	292.9715	305.7094
T01_U2	263.7336	275.7215	287.7094	280.2336	292.9715	305.7094
T01_U3	263.7336	275.7215	287.7094	280.2336	292.9715	305.7094
T01_U4	263.7336	275.7215	287.7094	280.2336	292.9715	305.7094

Karbon emisyonu masrafları hariç tekliflerde, kömür santralleri en ucuz teklifleri vermiş, karbon emisyonu masrafları dâhil edildiğinde doğalgaz kombine çevrim santrallerinin teklifi en düşük kalmıştır.

Tablo 4.4: Örnek YTM için blok teklifler.

Ünite Kodu	Karbon Emisyonlu				Karbon Emisyonlu			
	Blok Teklif	Blok Teklif	Blok Teklif	Blok Teklif	Blok Teklif	Blok Teklif	Blok Teklif	Blok Teklif
D01_U1	0	0	0	0	0	0	0	0
D01_U2	0	0	0	0	0	0	0	0
D01_U3	0	0	0	0	0	0	0	0
G01_U1	0	0	0	0	0	0	0	0
G01_U2	0	0	0	0	0	0	0	0
G01_U3	0	0	0	0	0	0	0	0
F01_U1	650.124	35	10	12	663.978	35	10	12
F01_U2	650.124	35	10	12	663.978	35	10	12
F01_U3	650.124	35	10	12	663.978	35	10	12
F01_U4	650.124	35	10	12	663.978	35	10	12
F01_U5	650.124	35	10	12	663.978	35	10	12
T01_U1	0	0	0	0	0	0	0	0
T01_U2	0	0	0	0	0	0	0	0
T01_U3	0	0	0	0	0	0	0	0
T01_U4	0	0	0	0	0	0	0	0

Yukarıdaki tablodan da anlaşılacağı üzere sadece Fuel-Oil Türbini Santrali üniteleri blok teklif vermiştir.

Tablo 4.5: Örnek YTM için esnek teklifler.

Ünite Kodu	Karbon Emisyonlu		Karbon Emisyonlu	
	Esnek Teklif	Esnek Teklif	Esnek Teklif	Esnek Teklif
D01_U1	0	0	0	0
D01_U2	0	0	0	0
D01_U3	0	0	0	0
G01_U1	0	0	0	0
G01_U2	0	0	0	0
G01_U3	0	0	0	0
F01_U1	0	0	0	0
F01_U2	0	0	0	0
F01_U3	0	0	0	0
F01_U4	0	0	0	0
F01_U5	0	0	0	0
T01_U1	0	0	0	0
T01_U2	0	0	0	0
T01_U3	0	0	0	0
T01_U4	0	0	0	0

Yukarıdaki tablodan da anlaşılacağı üzere santrallerden hiç biri esnek teklif vermemiştir.

Tablo 4.6: Örnek YTM için YAL/YAT teklifleri.

	Karbon Emisyonu				Karbon Emisyonlu			
	YAL1	YAL2	YAT1	YAT2	YAL1	YAL2	YAT1	YAT2
	D01_U1							
01-02	289.456	277.3953	192.9707	205.0313	296.1592	283.8192	197.4395	209.7794
11-12	301.5167	289.456	180.91	192.9707	308.4992	296.1592	185.0995	197.4395
21-22	313.5773	301.5167	168.8493	180.91	320.8391	308.4992	172.7595	185.0995
	G01_U1							
01-02	0	0	0	0	0	0	0	0
11-12	0	0	0	0	0	0	0	0
21-22	0	0	0	0	0	0	0	0
	F01_U1							
01-02	693.4464	664.5528	462.2976	491.1912	707.2824	677.8123	471.5216	500.9917
11-12	722.34	693.4464	433.404	462.2976	736.7525	707.2824	442.0515	471.5216
21-22	751.2336	722.34	404.5104	433.404	766.2226	736.7525	412.5814	442.0515
	T01_U1							
01-02	287.7094	275.7215	191.8063	203.7941	305.7094	292.9715	203.8063	216.5441
11-12	299.6973	287.7094	179.8184	191.8063	318.4473	305.7094	191.0684	203.8063
21-22	311.6852	299.6973	167.8305	179.8184	331.1852	318.4473	178.3305	191.0684

Dört santralden sadece gaz türbini santralinin toplam emre amade kapasitesi 100MWh'ın altında kaldığından söz konusu santral YAL/YAT teklifi vermemiştir.

4.2.2. Gün Öncesi Planlama Programı

Sanal dünyanın çıktılarını kullanarak optimizasyon yapan Gün Öncesi Planlama Programının çıktıları aşağıdadır.

Tablo 4.7: Örnek YTM için saatlik teklifler ile optimizasyon.

	Saatlik Teklifler İle Optimizasyon					
	Karbon Emisyonuz			Karbon Emisyonlu		
	Gece	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant
	01-02	11-12	21-22	01-02	11-12	21-22
D01_U1	0	57	405	405	405	405
D01_U2	0	0	259	405	405	405
D01_U3	0	0	0	405	405	405
G01_U1	0	0	0	0	0	0
G01_U2	0	0	0	0	0	0
G01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U1	0	0	0	0	0	0
F01_U2	0	0	0	0	0	0
F01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U4	0	0	0	0	0	0
F01_U5	0	0	0	0	0	0
T01_U1	324	324	324	26	138	324
T01_U2	324	324	324	0	0	324
T01_U3	324	324	324	0	0	97
T01_U4	269	324	324	0	0	0

Saatlik tekliflerden de görülebileceği gibi, karbon emisyonuz tekliflerde en düşük teklifi veren kömür yakıtlı termik elektrik santrali üniteleri, emisyon maliyetleri hesaba katıldığında Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali ünitelerinin gerisinde kalmış ve bu durum da üretim planlarını etkilemiştir.

Tablo 4.8: Örnek YTM' için saatlik ve blok teklifler ile optimizasyon.

	Saatlik ve Blok Teklifler İle Optimizasyon					
	Karbon Emisyonlu			Karbon Emisyonlu		
	Gece	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant
	01-02	11-12	21-22	01-02	11-12	21-22
D01_U1	0	57	405	405	405	405
D01_U2	0	0	259	405	405	405
D01_U3	0	0	0	405	405	405
G01_U1	0	0	0	0	0	0
G01_U2	0	0	0	0	0	0
G01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U1	0	0	0	0	0	0
F01_U2	0	0	0	0	0	0
F01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U4	0	0	0	0	0	0
F01_U5	0	0	0	0	0	0
T01_U1	324	324	324	26	138	324
T01_U2	324	324	324	0	0	324
T01_U3	324	324	324	0	0	97
T01_U4	269	324	324	0	0	0

Fuel-Oil Santrali ünitelerinin verdiği blok teklif her ne kadar saatlik teklifine göre düşük de olsa, toplama bakıldığında yüksek kalmakta ve bu sebeple tercih edilmemektedir.

Tablo 4.9: Örnek YTM için saatlik, blok ve esnek teklifler ile optimizasyon.

	Saatlik, Blok ve Esnek Teklifler İle Optimizasyon					
	Karbon Emisyonu			Karbon Emisyonlu		
	Gece	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant
	01-02	11-12	21-22	01-02	11-12	21-22
D01_U1	0	57	405	405	405	405
D01_U2	0	0	259	405	405	405
D01_U3	0	0	0	405	405	405
G01_U1	0	0	0	0	0	0
G01_U2	0	0	0	0	0	0
G01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U1	0	0	0	0	0	0
F01_U2	0	0	0	0	0	0
F01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U4	0	0	0	0	0	0
F01_U5	0	0	0	0	0	0
T01_U1	324	324	324	26	138	324
T01_U2	324	324	324	0	0	324
T01_U3	324	324	324	0	0	97
T01_U4	269	324	324	0	0	0

Sistemde esnek teklif olmadığından, esnek teklifler üretim planında herhangi bir değişikliğe neden olmamıştır.

Tablo 4.10: Örnek YTM üretim planının kısmi tekliflere göre değiştirilmesi.

	Tekliflerin Kısmi Kabul Durumu İle Optimizasyon					
	Karbon Emisyonlu			Karbon Emisyonlu		
	Gece	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant
	01-02	11-12	21-22	01-02	11-12	21-22
D01_U1	0	57	405	405	405	405
D01_U2	0	0	259	405	405	405
D01_U3	0	0	0	405	405	405
G01_U1	0	0	0	0	43	43
G01_U2	0	0	0	0	32	32
G01_U3	0	0	0	21	21	21
F01_U1	0	0	0	0	0	0
F01_U2	0	0	0	0	0	0
F01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U4	0	0	0	0	0	0
F01_U5	0	0	0	0	0	0
T01_U1	324	324	324	0	0	324
T01_U2	324	324	324	0	0	324
T01_U3	324	324	324	0	0	0
T01_U4	269	324	324	0	0	0

Karbon emisyonlu tekliflerin optimizasyonunda, doğalgaz kombine çevrim santrali üniteleri kısmi teklifleri kabul ettiğinden bir değişiklik olmasa da, karbon emisyonlu optimizasyonda kısmi teklif kabul etmeyen kömür yakıtlı buhar santralinin son ünitesi yerine doğalgaz türbini santrali ünitelerinin teklifleri tercih edilmiştir. Bu adımdaki optimizasyon işlemlerinden sadece kısmi kabul durumu maliyeti arttırabilmekte, kalanlar her zaman alıcının lehine sonuçlanmaktadır.

4.2.3. Gerçek Zamanlı Planlama Programı

Gün Öncesi Planlamasının ardından enerji üretim durumları, ve gerçek zamanlı yük durumları aşağıdaki gibidir.

Tablo 4.11: Gün Öncesi girdileri.

	Karbon Emisyonlu			Karbon Emisyonlu		
	Gece	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant
	01-02	11-12	21-22	01-02	11-12	21-22
Gün Öncesi Tahmin Edilen Yük	1241	1353	1960	1241	1353	1960
Gerçek Zamanlı İhtiyaç Olan Yük	1152	1230	2077	1152	1230	2077
Tahmin Edilen ve Üretilen Enerji Farkı	-89	-123	117	-84	-81	118
Gün Öncesi Üretilen Enerji	1241	1353	1960	1236	1311	1959

Karbon emisyonlu tekliflerde son üretimi yapan kömür yakıtlı termik elektrik santrali ünitelerinin kısmi teklifleri kabul etmemesi, bu noktada maliyetin yanında bir başka soruna daha yol açmaktadır. Bu sorun sistemdeki yüke tam olarak cevap verilememesidir. Bu sorun ancak Gerçek Zamanlı Optimizasyon adımıyla çözülebilecektir.

Tablo 4.12: Örnek YTM için YAL/YAT teklif optimizasyonu.

	YAL/YAT Optimizasyonu					
	Karbon Emisyonlu			Karbon Emisyonlu		
	Gece	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant
	01-02	11-12	21-22	01-02	11-12	21-22
D01_U1	-44	-57	0	-84	-81	45
D01_U2	0	0	0	0	0	45
D01_U3	0	0	0	0	0	28
G01_U1	0	0	0	0	0	0
G01_U2	0	0	0	0	0	0
G01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U1	0	0	0	0	0	0
F01_U2	0	0	0	0	0	0
F01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U4	0	0	0	0	0	0
F01_U5	0	0	0	0	0	0
T01_U1	-45	-66	36	0	0	0
T01_U2	0	0	36	0	0	0
T01_U3	0	0	36	0	0	0
T01_U4	0	0	9	0	0	0

Gün öncesinde yük tahminlerine göre üretilen enerji ile gerçekte ihtiyaç olan enerji arasındaki fark bu adımda yük alma ve yük atma işlemleri ile kapatılacaktır. YAL/YAT işlemleri de göz önüne alındığından toplam üretim vektörleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

Tablo 4.13: Toplam ünite üretim vektörleri.

	Toplam Ünite Üretim Vektörleri					
	Karbon Emisyonlu			Karbon Emisyonlu		
	Gece	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant
	01-02	11-12	21-22	01-02	11-12	21-22
D01_U1	225	0	405	321	324	450
D01_U2	0	0	259	405	405	450
D01_U3	0	0	0	405	405	433
G01_U1	0	0	0	21	21	21
G01_U2	0	0	0	0	43	43
G01_U3	0	0	0	0	32	32
F01_U1	0	0	0	0	0	0
F01_U2	0	0	0	0	0	0
F01_U3	0	0	0	0	0	0
F01_U4	0	0	0	0	0	0
F01_U5	0	0	0	0	0	0
T01_U1	279	258	360	0	0	324
T01_U2	324	324	360	0	0	324
T01_U3	324	324	360	0	0	0
T01_U4	0	324	333	0	0	0

Son olarak sistemin optimizasyonunun sağlanması ile oluşan maliyetler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir;

Tablo 4.14: Örnek YTM için maliyetler.

	Maliyetler							
	Karbon Emisyonlu				Karbon Emisyonlu			
	Gece	Gündüz	Puant	Toplam	Gece	Gündüz	Puant	Toplam
	01-02	11-12	21-22	00-24	01-02	11-12	21-22	00-24
Saatlik Tekliflerle Maliyet	327293.4	373146.6	565070.1	10326086	337133.4	385270.4	587586.9	10694975
Saatlik Ve Blok Tekliflerle Maliyet	327293.4	373146.6	565070.1	10326086	337133.4	385270.4	587586.9	10694975
Saatlik, Blok ve Esnek Tekliflerle Maliyet	327293.4	373146.6	565070.1	10326086	337133.4	385270.4	587586.9	10694975
Kısmi Kabul Edilebilirlik Durumuyla Maliyet	327724.1	373146.6	565070.1	10327943	339356.7	390288	605356.7	11300734
YAL/YAT Durumlarıyla Maliyet	309532	349488	600134.7	10362967	321735.2	374295.4	641759.6	11321874

Sistemin optimizasyonu sırasında oluşan maliyetlerde en büyük etkiyi optimizasyonu yapılan saat dilimi oluşturmaktadır. Saat dilimi oluşan sistemdeki yük durumunu belirlediği gibi aynı zamanda, alınan enerjinin fiyatını da belirlemektedir. Saatlik tekliflerde oluşan maliyet, blok ve esnek tekliflerin ikisinin de kabul edilmemesi sebebiyle değişmemiş kısmi kabul edilebilirlik durumunda ise daha pahalı enerji alınmaya mecbur bırakılması sebebiyle artmıştır. YAL/YAT durumlarında ise maliyet, yükün alma yönünde olduğu durumlarda her zaman artar, yük atma durumlarında ise pahalıya alınan enerjinin ucuza geri satılması sebebiyle maliyette düşme görülse de, zarara neden olmaktadır.

Son olarak, karbon emisyonlu optimizasyon işlemi maliyeti arttırsa da atmosfere salınan karbon miktarını oldukça azaltmaktadır. Atmosfere salınan karbon miktarları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.15: Örnek YTM için atmosfere salınan karbon miktarı.

	Atmosfere Salınan Karbon Miktarları			
	Karbon Emisyonlu		Karbon Emisyonlu	
	Günlük Üretim (MWh)	Karbon Salınımı (gr/MWh)	Günlük Üretim (MWh)	Karbon Salınımı (gr/MWh)
D01_U1	5363	647.357.004	9861	1.190.301.588
D01_U2	1421	171.526.068	9994	1.206.355.752
D01_U3	0	0	9854	1.189.456.632
G01_U1	0	0	483	58.301.964
G01_U2	0	0	912	110.085.696
G01_U3	0	0	573	69.165.684
F01_U1	0	0	506	84.048.624
F01_U2	0	0	57	9.467.928
F01_U3	0	0	0	0
F01_U4	0	0	0	0
F01_U5	0	0	0	0
T01_U1	7943	1.761.153.732	3380	749.427.120
T01_U2	7995	1.772.683.380	1628	360.966.672
T01_U3	7965	1.766.031.660	0	0
T01_U4	6561	1.454.731.164	0	0
	TOPLAM (gr):	7.573.483.008	TOPLAM (gr):	5.027.577.660

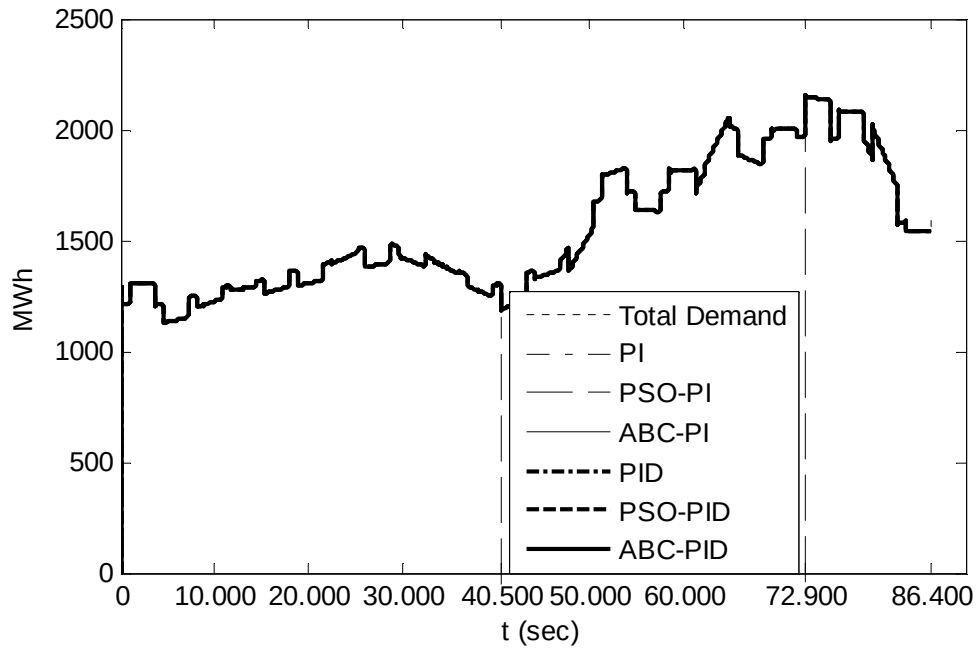
4.3. AKTİF GÜÇ-FREKANS KONTROLÜ SİMÜLASYONU SONUÇLARI

Daha önceki bölümde açıklanan aktif güç-frekans kontrolü simülasyonunda altı farklı kontrolör kullanılmış, bu kontrolörlerin parametreleri Sistemin Cevap Eğrisi, Parçacık Sürüşü Optimizasyonu ve Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu yöntemleri ile oluşturulmuştur.

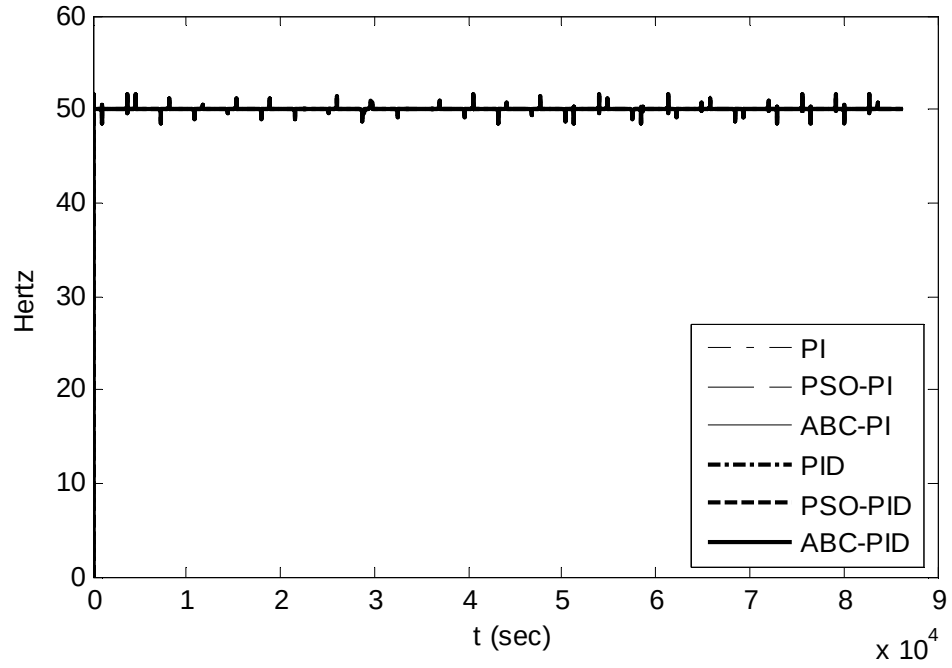
Bu kontrolörlerin kumanda ettiği simülasyonda, sistemin aktif güç dengeleri ve frekansı izlenmiştir. Frekans aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$f = \left[\frac{P_{K\check{C}DG} + P_{DG} + P_{FO} + P_{KY}}{\text{Toplam Y\"{u}k}} \right] * 50 \text{ (Hz)} \quad (4.1)$$

Aktif güç dengesinin ve frekansın değişimi aşağıdaki şekillerde sırasıyla gösterilmiştir;

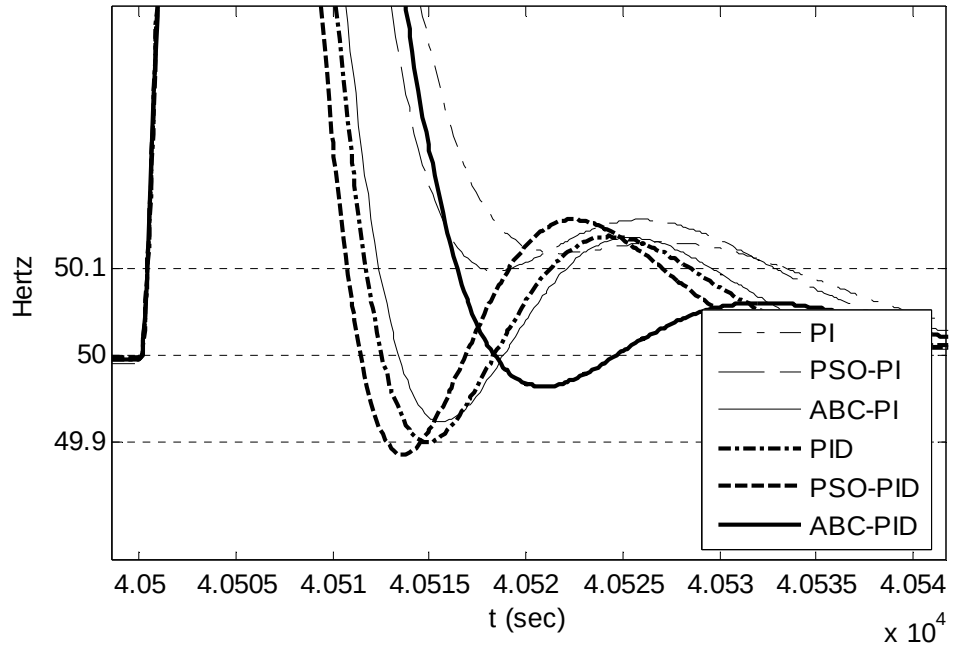


Şekil 4.1: Aktif güç dengesi.

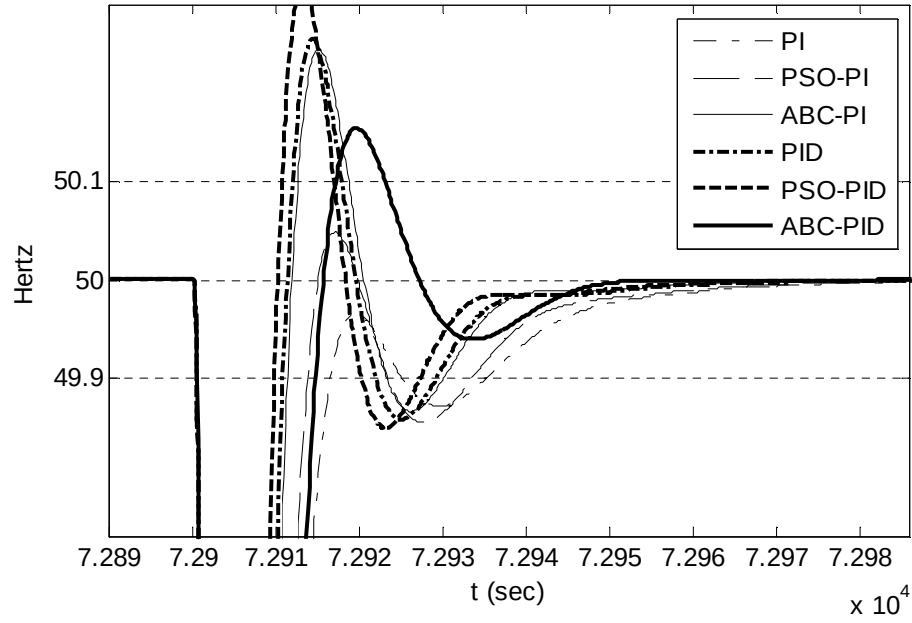


Şekil 4.2: Frekans değişimi.

Yukarıda görülen tablolarda en büyük farklılıkların oluştuğu anlar, en fazla yük artışı ve en fazla yük düşüşü durumlarının oluştuğu 40.500 ve 72.900'üncü saniyelerde ortaya çıkmıştır. Aşağıda bu anların detaylı şekilleri görülmektedir.



Şekil 4.3: En fazla yük düşüşü gerçekleşen zamanda frekans değişimi.



Şekil 4.4: En fazla yük artışı olan zamanda frekans değişimi.

Sonuç grafiklerinden de görülebileceği üzere, kontrolörlerin peformansı aşma değerleri ve oturma süreçlerini etkilemektedir. Simülasyonda kullanılan kontrolörlerin aşma miktarları ve oturma süreleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.16: Farklı kontrol sistemlerinin aşma değerleri ve oturma süreleri.

		PI	PSO-PI	YAK-PI	PID	PSO-PID	YAK-PID
Aşma Değerleri (%)	Yük Düşümü	0.24	0.20	0.13	0.20	0.24	0.08
	Yük Artışı	0.08	0.10	0.46	0.48	0.62	0.32
Oturma Süresi (sec)	Yük Düşümü	32.95	32.90	29.70	28.50	27.00	15.50
	Yük Artışı	35.50	33.50	30.10	29.10	27.00	23.00

Tablodan ve grafiklerden anlaşılacağı üzere tüm koşullar altında YAK-PID kontrolör diğer kontrolörlere nazaran çok daha iyi performanslar vermektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, oluşturulan optimizasyon yazılımı ve simülasyon modeli, 19.09.2013 tarihindeki mali veriler kullanılarak yaratılan sanal bir dünya üzerinden test edilmiş ve ulaşılan sonuçlar sunulmuştur.

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde üretilen optimizasyon uygulamaların hali hazırda bulunan yazılımlara göre avantajları bulunmaktadır. Bunlar;

- Dünyada bir çok noktada uygulanan ve Türkiye’de de 2014 yılından itibaren uygulanması düşünülen Kyoto sözleşmesine bağlı emisyon borsası oluşumunun enerji üretimi ve dağıtım maliyetlerine etkisi izlenebilmektedir.
- Santral bazlı planlama yerine ünite bazlı planlama algoritması tercihiyle, santrallerdeki üretimin MKÜD ve EAK değerleri arasında tutularak santral verimi yükseltilmekte, bakım-onarım ve arıza masrafları azaltılmaktadır.
- Program girdi ve çıktıları kolaylıkla düzenlenebilir ve değişebilir olduğu için, bir çok farklı bölgede değişikliğe gerek kalmadan uygulanabilir.
- Yeni inşası düşünülen ve projelendirilen santraller için maliyet analizleri ve karlılık hesapları için kullanılabilir.

olarak özetlenebilir.

Kyoto protokolünün maliyetlere olan etkisi yaklaşık %4 ile %7 arasında değişmektedir. Her ne kadar bu sayı enerji sektörü gibi rekabetin çok ve toplam maliyetlerin astronomik seviyelerde olduğu bir sektörde çok görünse de, emisyon gazlarının yaklaşık %34’lük düşüşü için kabul edilebilir bir derecededir. Bu durum göz önüne alındığında, Avrupa’da da olduğu gibi adım adım bu protokolün şartlarının ülkemizde de uygulanması çevre ve gelecek adına önem göstermektedir. İlk aşamada yeni kurulan santrallerde sistemin uygulanması durumunda, çevreye zarar veren kömür yakıtlı santrallerin rekabet şansı ortadan kalkacaktır. Yeni yapılan santrallerle temiz enerji ihtiyacı karşılanmaya başlandıkça, uygulama eski santrallerde de geçerli olmaya başlamalı ve bu sayede çevreye zararlı santraller yavaş yavaş devreden çıkarılmalıdır.

Uygulamanın son adımı, Avrupa'da da daha uygulanmayan ama uygulanması planlanan, karbon emisyonlarının yanı sıra diğer zararlı gazlarında ücretlendirilmesi adımıdır. Bu sayede sektörde rekabet daha temiz enerjiyi daha ucuza üretmek ve daha çok kazanç elde etmeye dönüşecektir.

Aktif güç ve frekans kontrol modeli incelendiğinde ise Yapay Arı Kolonisi metodunun üstünlüğü göze çarpmaktadır. Günümüzde pek çok santralin kontrol sistemlerinde kullanılan klasik PI ve PID kontrolörlerle karşılaştırıldıklarında Yapay Arı Kolonisi sadece yük artışlarında aşma değerlerinde diğer kontrolörlerin gerisinde kalmakta, diğer bütün değerlendirmelerde rakiplerinden kat kat üstünde performans göstermektedir.

Ülkemizde de ilerleyen zamanlarda yeni inşa edilen santrallerde, yapay arı kolonisi veya parçacık sürü optimizasyonu gibi modern kontrol yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bir santralin ortalama ömrünün 20 sene olduğu göz önüne alınırsa, santralin inşası sırasında hesaplanan parametrelerin 20 sene boyunca her saniye değişmekte olan bir sistem için sürekli kullanılması imkansız olduğundan, parametreler göz kararı ayarlanmakta ve istenilen yüksek verimlere ulaşılamamaktadır. Modern kontrolörler hem insana olan bağımlılığı ortadan kaldıracak, hem de santral ekipmanlarının verim ve ömürlerini arttıracaktır.

Ayrıca gelişen teknoloji ile ortaya çıkan Fuzzy Gain Scheduled PID ve Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems(ANFIS) gibi kontrolör uygulamaları da incelenmeli ve bir elektrik üretim santrali gibi %1'lik verim artışlarının bile büyük kazançlara izin verdiği bir sektörde gerektiğinde faydalanılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1]. Bilen, H., 2000, *Kombine Çevrimli Santral Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- [2]. Başaran, Ü., 2004, *Türkiyede'ki 380kV'luk Enterkonnekte Güç Sisteminde Çeşitli Güç Akışı ve Ekonomik Dağıtım Analizleri*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi.
- [3]. Tiryaki, H., 2005, *Bulanık Mantık Kontrolörler İle PID Kontrolörün Bir Elektriksel Termik Santralde Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi.
- [4]. Kocaarslan, İ., Çam, E., 2005, Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 27(8), 542-549.
- [5]. Yalçın, E., Çam, E., Vardar, T., Lüy, M., 2010, PID Kontrolör ile İki Bölgeli Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolünün İncelenmesi, *Int.J.Eng.Research & Development*, 1 (2), 67-71.
- [6]. Çam, E., 2004, *Güç Sistemlerinde Yeni Kontrol Sistemlerinin Uygulanması*, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi.
- [7]. Darçın, O., 2004, *Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolü ve Sinir Ağı Kontrol Uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi.
- [8]. Kundur, P., 1994, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill. Inc., New York, ISBN: 0-07-035958-X.
- [9]. Lalor, G., O'Malley, M., 2003, Frequency Control on an Island Power System with Increasing Proportions of Combined Cycle Gas Turbines, *IEEE Powertech Conference*, June 2003 Bologna.
- [10]. Flynn, D., Home, J., ve Littler, T., 2004, Frequency Stability Issues hor Islanded Power Systems, *Proc. IEEE PES Power Syst. Conf. Expo.*, 10–13 October 2004, vol. 1, pp. 299–306.
- [11]. Gözde, H., Taplamacıoğlu, M.C., Kocaarslan, İ., Çam, E., 2008, Particle swarm optimization based load frequency control in a single area power system, *University of Pitesti, Electronics and Computers Science, Scientific Bulletin*, 2(8), 106-110.
- [12]. Gümüş, K., 2012, *Güç Santrallerinde Primer Frekans Yük Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [13]. Matlab R2011b, Reference Manual, 2011.

- [14]. Tiryaki, H., 2013, *Modern Kontrol Yöntemlerinin Yük Dağıtım Sistemlerinde Uygulanması*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [15]. Alepuz S., Calle A., Busquets M., Bordonau J., Kouro S., Wu B., 2005, "Control Scheme for Low Voltage Ride-Through Compliance in Back-to-back NPC Converter Based Wind Power Systems", 978-1-4244-6391-6/10 ©2010 IEEE, pp. 2357-2362.
- [16]. Yuan X., Chai J., Li Y., "Control of Variable Pitch, 2001, Variable Speed Wind Turbine in Weak Grid Systems", 978-1-4244-5287-3/10.
- [17]. Kennedy, J., Eberhart, R., 1995, Particle swarm optimization, 9. *Neural Networks, 1995. Proceeding IEEE Conference* , Nov/Dec, 1942-1948.
- [18]. Yüksel, İ., 2001, *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri*, 4. baskı, VİPAŞ, Bursa, ISBN: 975-564-111-4.
- [19]. Kocaarslan, İ., Çam, E., Tiryaki, H., 2006, A Fuzzy Logic Controller Application For A Thermal Power Plants, *Energy Conversion and Management*, 47(4), 442-458.
- [20]. Reynolds, C., 1987, Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model, *Computer Graphics*, 14(21), 25-34.
- [21]. Boyd, R., Recharson, P., 1985, *Culture and the evolutionary process*, University of Chicago Press.
- [22]. Kennedy, J., Russel, R.C., Shi, Y., 2001, *Swarm Intelligence*, The Morgan Kaufmann Series Evolutionary Computation.
- [23]. Shi, Y., Eberhart, R.C., 1998, A modified particle swarm optimizer, *Proceeding of the IEEE Internation Conference on Evolutionary Computation*, 69-73.
- [24]. Clerck, M., 1999, The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization, *Proceedings of the Conference on Evolutionary Computation*, 1951-1957.
- [25]. Bal, E., 2012, *Gerilim Kontrolünde Güç Sistemleri Kararlı Kılıcısı (GSKK) Uygulamaları ve Alternatifleri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [26]. Oi, A., Nakazawa, C., Matsui, T., Fujiwara, H., Matsumoto, K., Nishida, H., 2008, PID Optimal tuning method by Particle Swarm Optimization, *SICE Annual Conference*, 3470-3473.
- [27]. Knospe, C., 2006, PID Control, *IEEE Control Magazine*, 30-31.
- [28]. V., T., 2000, Reaction-Diffusion Model of a Honeybee Colony's Foraging Behaviour, *PPSN VI: Proceedings of the 6th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, Springer-Verlag, London

- [29]. Lucic, P., 2002, *Modeling Transportation Problems Using Concepts Of Swarm Intelligence And Soft Computing*, Ph.D. Thesis, Virginia Polytecnic Institute And State University.
- [30]. Karaboğa, D., 2005, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, *Technical Report TR06 Erciyes University Engineering Faculty*.
- [31]. Çiftkaya, B., 2010, *Elektrik Üretiminde Kullanılan Gaz Türbinlerinin İncelenmesi ve Benzetimi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [32]. Rowen W.I., 1995, Dynamic Response Characterstic Of Heavy Duty Gas Turbines And Combined Cycle System In Frequency Regulating Duty, *IEEE*, 1061-1073.
- [33]. Demirören A., Zeynelgil L., 2004, *Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması*, Birsen Yayınevi, İstanbul, ISBN: 975-511-376-2.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	İbrahim Berkay Bulut
Uyruğu	T. C.
Doğum tarihi, Yeri	08.09.1984/İstanbul
Telefon	0 532 322 68 27
e-mail	berkaybulut@gmail.com

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Yüksek Lisans	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2008-2013
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği Fakültesi / Elektrik Mühendisliği	2002-2008
Lise	Koç Özel Lisesi	1995-2002