

**ŞEBEKEYE BAĞLI ADA MODU ÇALIŞABİLEN TEK ŞAFTLI
KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALİNDE YUSUFÇUK ALGORİTMASI
İLE YÜK FREKANS KONTROLÜNÜN İYİLEŞTİRİLMESİ**

BÜLENT HOŞ

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ALİ ÖZTÜRK
EŞ DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ BEYTULLAH BOZALI**

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ŞEBEKEYE BAĞLI ADA MODU ÇALIŞABİLEN TEK ŞAFTLI
KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALİNDE YUSUFÇUK ALGORİTMASI
İLE YÜK FREKANS KONTROLÜNÜN İYİLEŞTİRİLMESİ

Bülent HOŞ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Beytullah BOZALI

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Salih TOSUN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Yılmaz UYAROĞLU

Sakarya Üniversitesi

Prof. Dr. Yunus BİÇEN

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Selçuk EMİROĞLU

Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 11/07/2025

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, dilbilgisi düzeltmeleri yapmak ve belirli grafiksel öğelerin iyileştirilmesine yardımcı olmak için yapay zeka tabanlı dil araçları kullanıldığını beyan ederim.

11 Temmuz 2025

Bülent HOŞ

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca bana yol gösteren ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği akademik bilgi, destek ve deneyimlerini sınırsızca paylaşarak yardım eden, öğrencisi olmaktan her zaman onur duyacağım çok değerli hocam Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK'e en içten dileklerle teşekkür ederim. Tez izleme süreçlerinde yer alarak yardımlarını esirgemeyen ve dikkat etmem gereken noktalarla ilgili bilgilerinden faydalandığım, tezdeki eksiklikleri gidererek tezin daha iyi olmasını sağlayan değerli jüri üyesi hocalarıma saygılarımı sunarım.

Akademik çalışmalarımızdaki süreçleri omuz omuza vererek yürüttüğümüz ve tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen, değerli katkılarıyla gelişimime büyük destek veren eş-danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Beytullah BOZALİ'ye sonsuz teşekkür ederim.

Bu zorlu akademik süreçte sabırla yanımda duran ve her zaman destekleyen olan sevgili eşim Dr. Öğr. Üyesi Candan AYDIN HOŞ'a, her zaman yanımda olan kızlarım Zeynep ve Zehra HOŞ'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

11 Temmuz 2025

Bülent HOŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
EXTENDED ABSTRACT	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. TEZİN KATKISI, YENİLİK VE ORGANİZASYON.....	17
2. YÜK FREKANS KONTROL YÖNTEMLERİ.....	19
2.1. BİRİNCİL FREKANS KONTROLÜ	26
2.2. İKİNCİL FREKANS KONTROLÜ	29
2.3. ÜÇÜNCÜL FREKANS KONTROLÜ	31
3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜ MODELLERİ	33
3.1. GENERATÖR MODELİ	33
3.2. YÜK MODELİ	36
3.3. TÜRBİN MODELİ	37
4. YÜK FREKANS KONTROLÜ İÇİN GAZ TÜRBİN MODELİ.38	
4.1. GAZ TÜRBİNİ ÇEVİRİMİ VE ENERJİ DÖNÜŞÜM SÜRECİ.....	38
4.2. FREKANS REGÜLASYONU VE KONTROL İHTİYACI.....	39
4.3. ROWEN GAZ TÜRBİNİ MODELİ VE DİNAMİK YAPISI.....	39
4.4. ROWEN GAZ TÜRBİNİ MODELİ KULLANIMI	42
4.5. GAZ TÜRBİNİNDE KONTROL BÖLÜMLERİ	43
4.5.1. Gaz Türbininde Hız Kontrolörü	43
4.5.2. Gaz Türbininde Sıcaklık Kontrolörü	44
4.5.3. Gaz Türbininde İvmelenme Kontrolörü	46
4.6. ADA MODUNDA GAZ TÜRBİNLİ SİSTEMLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI VE KONTROL STRATEJİLERİ.....	48
4.7. ROWEN'İN BASİTLEŞTİRİLMİŞ GAZ TÜRBİNİ MODELİ VE HİYERARŞİK KONTROL YAPISI.....	49
5. YÜK FREKANS KONTROLÜNDE PID KONTROLÜ VE PERFORMANS İNDEKSLERİ	52
5.1. PID DENETLEYİCİ.....	52
5.2. YÜK FREKANS KONTROLÜNDE KULLANILAN AMAÇ FONKSİYONLARI	54

5.2.1. Hata Karelerinin Toplamı.....	54
5.2.2. Zaman Ağırlıklı Hata Karelerinin Toplamı	55
5.2.3. Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı	55
5.2.4. Mutlak Hatanın Toplamı.....	55
6. YÜK FREKANS KONTROLÜNDE KULLANILAN META-SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ	57
6.1. GENETİK ALGORİTMA	57
6.1.1. Başlangıç Popülasyonu Oluşturma.....	60
6.1.2. Uygunluk Değerlendirmesi.....	60
6.1.3. Seçim.....	60
6.1.4. Çaprazlama.....	61
6.1.5. Mutasyon.....	61
6.1.6. Yeni Popülasyonun Oluşturulması.....	61
6.2. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI.....	62
6.3. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU	65
6.4. YUSUFÇUK ALGORİTMASI	69
6.5. META-SEZGİSEL ALGORİTMA TEMELLİ YÜK FREKANS KONTROLÜ	73
7. BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR	78
7.1. GAZ TÜRBİNİ MODELLEME VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	78
7.2. GAZ TÜRBİNİ PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN VE ISE PERFORMANS İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ	80
7.3. GAZ TÜRBİNİ PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN VE ITSE PERFORMANS İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ	82
7.4. GAZ TÜRBİNİ PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN VE ITAE PERFORMANS İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ	84
7.5. GAZ TÜRBİNİ PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN VE IAE PERFORMANS İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ	87
7.6. GAZ TÜRBİNİ YÜK FREKANS KONTROL PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	91
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	94
8.1. GENEL DEĞERLENDİRME	94
8.2. ELDE EDİLEN BAŞLICA BULGULAR	94
8.3. LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME.....	95
8.4. MÜHENDİSLİK PERSPEKTİFİNDEN ÖNERİLER	95
8.5. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER.....	95
8.6. SONUÇ	96
9. KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	107

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Rowen gaz türbini modeli.....	8
Şekil 1.2. IEEE GAST gaz türbin modeli.....	9
Şekil 1.3. IEEE GOV1 gaz türbin modeli.....	10
Şekil 1.4. CIGRE gaz türbin modeli.....	11
Şekil 1.5. Frekansa bağlı gaz türbin modeli.....	13
Şekil 2.1. Üretim ile tüketim arasındaki ilişki.....	19
Şekil 2.2. 24 saatlik yük eğrisi.....	21
Şekil 2.3. Sistem frekansı ile başlayan kontrol şeması ve eylemleri.....	22
Şekil 2.4. Basit frekans kontrol sistemi.....	23
Şekil 2.5. Ana frekans sapması ve ardından rezervlerin etkinleştirilmesi.....	24
Şekil 2.6. Normal frekans sapması.....	25
Şekil 2.7. Hız regülatörünün ideal hız ayar karakteristiği.....	27
Şekil 2.8. Birincil frekans kontrolü sonucu sistem frekansı ve sürekli durum hatası.....	28
Şekil 2.9. Frekans kontrolü uygulanan ve uygulanmayan sistemlerin karşılaştırmalı frekans tepkisi.....	28
Şekil 2.10. İkincil frekans kontrolü sonucu sistem frekansı.....	30
Şekil 3.1. Türbin-generatör modeli.....	33
Şekil 3.2. Mekaniksel ve elektriksel güç ile hız değişimi arasındaki ilişki.....	36
Şekil 3.3. Generatör-yük modeli.....	37
Şekil 3.4. Türbin modeli.....	37
Şekil 4.1. Gaz türbini genel şeması.....	38
Şekil 4.2. Rowen tarafından basitleştirilmiş gaz türbini MATLAB/Simulink™ modeli.....	40
Şekil 4.3. Hız kontrolörünün transfer fonksiyonu modeli.....	43
Şekil 4.4. Sıcaklık kontrolörünün transfer fonksiyonu modeli.....	45
Şekil 4.5. İvme kontrolörünün transfer fonksiyonu modeli.....	47
Şekil 4.6. AHGT basitleştirilmiş Rowen gaz türbin modeli.....	50
Şekil 5.1. PID denetleyici yapısı.....	53
Şekil 6.1. Genetik algoritma akış şeması.....	59
Şekil 6.2. Benzetilmiş tavlama algoritması akış şeması.....	63
Şekil 6.3. Yerel maksimumda sıkışmış bir yerel arama algoritması gösterimi.....	64
Şekil 6.4. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması akış şeması.....	69
Şekil 6.5. Sürü içerisinde bireyler arasındaki beş ana faktör gösterimi.....	70
Şekil 6.6. Yusufçuk algoritması akış şeması.....	72
Şekil 6.7. Güç sistemi modeli.....	74
Şekil 6.8. Algoritmaların m.file dosyasında oluşturulması.....	74
Şekil 6.9. Optimizasyon parametrelerinin belirlenmesi.....	75
Şekil 6.10. Değişkenlerin belirlenmesi.....	75
Şekil 6.11. a) ISE, b) ITSE, c) ITAE ve d) IAE amaç fonksiyonların blok diyagramları.....	77
Şekil 7.1. (a) ve (b) Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon simulink modeli.....	79
Şekil 7.2. YA optimizasyon ve ISE performansa göre amaç fonksiyon yakınsama grafiği.....	81
Şekil 7.3. Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon ve ISE performans grafiği.....	82
Şekil 7.4. YA optimizasyon ve ITSE performansa göre amaç fonksiyon yakınsama	

grafiği.	83
Şekil 7.5. Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon ve ITSE performans grafiği.	84
Şekil 7.6. YA optimizasyon ve ITAE performansına göre amaç fonksiyon yakınsama grafiği.	86
Şekil 7.7. Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon ve ITAE performans grafiği.	87
Şekil 7.8. YA optimizasyon ve IAE performansına göre amaç fonksiyon yakınsama grafiği.	89
Şekil 7.9. Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon ve IAE performans grafiği.	90
Şekil 7.10. Gaz türbini yük frekans kontrol a) ISE, b) ITSE, c) ITAE, d) IAE performanslarının değerlendirme grafikleri.	93



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1. Yük frekans kontrolü uygulamalarında kullanılan gaz türbini modellerinin karşılaştırmalı özellikler tablosu.	14
Çizelge 7.1. Gaz türbini PID parametreleri, zaman yanıtları, aşma değerleri ve ISE performans indeksi tablosu.....	80
Çizelge 7.2. Gaz türbini PID parametreleri, zaman yanıtları, aşma değerleri ve ITSE performans indeksi tablosu.....	83
Çizelge 7.3. Gaz türbini PID parametreleri, zaman yanıtları, aşma değerleri ve ITAE performans indeksi tablosu.....	85
Çizelge 7.4. Gaz türbini PID parametreleri, zaman yanıtları, aşma değerleri ve IAE performans indeksi tablosu.....	88



KISALTMALAR

AA	Ateşböceği algoritması
AHGT	Ağır hizmet gaz türbini
AKH	Alan kontrol hatası
BM	Bulanık mantık
BM-PID	Bulanık mantık PID
BPSO	İkili parçacık sürü optimizasyon
BTA	Benzetilmiş tavlama algoritması
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
DAA	Dinamik Ateşböceği Algoritması
DGÇS	Doğal gaz çevrim santralleri
DTFM	Doğrusallaştırılmış transfer fonksiyon modeli
ENTSO-E	Avrupa elektrik iletim sistemi operatörleri ağı
FBM	Frekansa bağlı model
FOPID	Ayarlanmış kesirli dereceli PID
GA	Genetik algoritma
GAST	Gaz türbini analizi ve simülasyon aracı
GGOV1	Gaz türbini regülatör modeli 1
GT	Gaz türbini
IAE	Mutlak hatanın toplamı
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISE	Hata karelerinin toplamı
ITAE	Zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı
ITSE	Zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı
MDS	Minimum değer seçimi
NBD	Nöro bulanık denetleyiciler
OÜK	Otomatik üretim kontrolü
PI	Oransal-integral
PID	Oransal-integral-türevsel
PSO	Parçacık sürü optimizasyonu
SÖO	Sosyal Örümcek Optimizasyonu
VCE	Yakıt talep değeri
WECC	Batı elektrik koordinasyon konseyi
WSCC	Batı sistemleri koordinasyon konseyi
YA	Yusufçuk algoritması
YFK	Yük frekans kontrolü
YSA	Yapay sinir ağı
YTM	Yük tevzi merkezleri
ZN	Ziegler-Nichols

SİMGELER

ΔE	Amaç fonksiyonu değerleri arasındaki fark
Δf	Frekanstaki değişim
ΔP	Güç çıkışındaki değişim
A	Hizalama
a, b, c	Valf konumlandırıcı katsayıları
A_i	Hizalama
c	Uyum
$c(t)$	Çıkış sinyali
c_1, c_2	Hızlanma Sabitleri
C_i	Uyum
CPR	Kompresör basınç oranı
D	Yük sönüm sabiti
D_b	Ölü bant aralığı
D_t	Türbin sönümleme katsayısı
D_{turb}	Türbin sönümlemesi
$D\Delta w$	Frekansa bağlı yük değişimi
E	Amaç fonksiyonu
E	Düşman
$e(t)$	Doğan hata sinyali
E_i	Düşmanın pozisyonu
f	Sistem frekansı
F	Besin
f'	Sistem yeni frekansı
f_1	Mekanik tork üretim fonksiyonu
f_2	Rotor ile türbin arasındaki tork farkı fonksiyonu
f_{ac}	İvme kontrolörü çıkış sinyali
f_{gc}	Hız kontrolörü çıkış sinyali
F_i	Besin kaynağına doğru çekim
F_m	Türbin frekans faktörü
f_{max}	Kontrol sinyali için tanımlanan maksimum sınır değeri
f_{min}	Kontrol sinyali için tanımlanan minimum sınır değeri
F_{ref}	Frekans referans değeri
f_{tc}	Sıcaklık kontrolörü çıkış sinyali
g_{best}	Parçacığın kişisel en iyi konumu
g_{best}	Sürünün en iyi konumu
Hz	Hertz
$\dot{I}$	İndeks
J	Performans indeksi
K_d	Türev kazanç
K_F	Yakıt sistemi kazancı
K_i	İntegral kazanç
K_{igov}	Hız kontrolü için integral kazançları
K_{mwf}, K_{mwp}	MW çıkışı için kazanç katsayıları
K_p	Oransal kazanç
K_{pgov}	Hız kontrolü için oransal kazançları
K_T	Kontrol kazancı
K_T	Sıcaklık kontrol döngüsü kazancı

K_t	Türbin kazancı
kV	Kilovolt
L_{dref}	Yük referansı değişim oranı
L_{MAX}	Yük sınırı
L_{ref}	Türbin tork referansı
max_{iter}	Maksimum iterasyon sayısı
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-saat
N	Türbin rotor hızı
N	Popülasyon büyüklüğü
N_{rated}	Referans hız
P	Güç
p.u	Birim değer
P'	Hız regülatörü çıkış gücü
P_a	Emme havası basıncı
P_e	Generatör çıkış gücü
P_m	Mekanik güç çıkışı
R	Hız regülatör sabiti
R	Rastgele bir sayı
R	Regülatör düşün değeri
r_1, r_2	Parçacık hareketine rastgelelik katan sayılar
r_{ij}	[0, 1] Arasında rastgele bir sayı
R_p, R_v	Referans yolu üzerindeki kazançlar
S	Ayrırma
$S(v_{ij})$	Sigmoid fonksiyonu
S_i	Ayrılma
T	Yakıt sistemi zaman sabiti
T	Tavlama sıcaklığı
T	Sıcaklık
T_1	Tavlama sıcaklığı
T_a	İvme momenti
T_a	Aktüatör zaman sabiti
T_a	Emme havası sıcaklığı
T_{CR}	Yanma odası süresi
T_e	Elektriksel moment
T_F	Yakıt sistemi zaman sabiti
T_{load}	Yük kontrolü zaman sabiti
T_m	Mekaniksel moment
$T_{m1}, T_{m2}, T_{d1},$	Türbin çıkış transfer fonksiyonuna ait ikinci mertebe
T_{d2}	zaman sabitleri
t_{max}	Optimizasyon sürecindeki maksimum tekrar sayısı
T_{max}	Türbin maksimum çıkış sınırı
T_{min}	Türbin minimum çıkış sınırı
T_n, T_{hccp}, T_h	Rotor ve ısı değişimi dinamiklerine ait zaman sabitleri
T_p	Elektriksel ölçüm filtresi zaman sabiti
T_{pelec}	Elektriksel gecikme zaman sabiti
T_R	Sıcaklık kontrolörü referans sıcaklığı
T_r	Sıcaklık kontrol zaman sabiti
T_s	Rotor atalet tork zaman sabiti
T_{servo}	Servo motor zaman sabiti

T_T	Sıcaklık kontrolörü zaman sabiti
T_{TD}	Türbin gecikme süresi
T_v	Giriş kılavuz kanadı zaman sabiti
T_X	Egzoz sıcaklığı
T_x, T_{xm}	Türbin çıkış sıcaklığı ve kontrol referansı
$u(t)$	Denetleyici çıkışı
$v_{ij}(t+1)$	Parçacığın hız vektörü
$V_{ij}^{(t+1)}$	Hız güncellemesi
V_j	j. Komşu bireyin hızı
V_{MAX}	Maksimum hız değeri
V_{MIN}	Minimum hız değeri
W	Eylemsizlik ağırlık değeri
W, X, Y, Z	Hız kontrolörü dinamik parametreleri
w_1	Maksimum eylemsizlik ağırlık değeri
w_2	Minimum eylemsizlik ağırlık değeri
W_d	Yakıt talebi
W_f	Yakıt akış sinyali
W_{f1}	Yakıt debisi
W_{f2}	Yakıt akış minimum sinyali
W_{fo}	Yakıt akış referansı
W_x	Türbin çıkış gücü
X	Daralma faktörü
X	Mevcut bireyin pozisyonu
X^-	Düşman
X^+	Besin kaynağı
X_1	İlk çözüm
$X_{ij}(t)$	(T) Zamanında J. boyuttaki İ. parçacığın konum vektörü
$X_{ij}(t+1)$	(T+1) Zamanında J. boyuttaki İ. parçacığın konum vektörü
X_j	j. Komşu bireyin konumu
X_{t+1}	Pozisyon vektör
$y(t)$	Sistemin girişine uygulanan yeni çıkış
ΔPe	Toplam aktif güçteki değişim
ΔP_L	Frekanstan bağımsız yük değişimi
Δw	Nominal hızdan sapma
ΔX	Adım
Φ	Sabit parametre
I	Atalet momenti
M	Açısal moment
P_a	İvme gücü
P_e	Elektriksel güç
P_m	Mekanik güç
T_a	İvme momenti
T_e	Elektriksel moment
T_m	Mekanik moment
e	Hata sinyali
r	Referans değer
γ	Gerçek çıkış değeri
α	Açısal ivme

δ	Generatör faz açısı
δ_0	Faz açısı
ω	Açısal hız
ω_0	Sistemin sabit açısal hızı



ÖZET

ŞEBEKEYE BAĞLI ADA MODU ÇALIŞABİLEN TEK ŞAFTLI KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALİNDE YUSUFÇUK ALGORİTMASI İLE YÜK FREKANS KONTROLÜNÜN İYİLEŞTİRİLMESİ

Bülent HOŞ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Beytullah BOZALI

Temmuz 2025, 106 sayfa

Elektrik enerjine olan talebin artması ile elektrik enerjisinin güvenli, kaliteli ve sürdürülebilir şekilde üretilmesi ve iletilmesi zorunlu bir hal almıştır. Elektrik sistemlerinin güvenilirliği, üretim-tüketim dengesinin korunmasına bağlıdır. Bu dengeyi sağlamak amacıyla, frekansın belirli sınırlar içinde tutulması kritik öneme sahiptir ve bu sürece Yük Frekans Kontrolü (YFK) adı verilir. Özellikle Gaz Türbini (GT) içeren elektrik santrallerinin şebekeye entegrasyonu ile birlikte, YFK daha karmaşık ve dinamik bir yapı kazanmıştır. GT içeren elektrik santrallerinin kolay kurulumları, hızlı devreye alma ve durdurma özellikleri ile ekonomik ve verimli enerji üretimi sağlamaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ada modunda da çalıştırılabilen kombine gaz çevrim santrallerinde, yük değişimlerine karşı frekans değerindeki sapmaları önlemek amacıyla hız ve sıcaklık değerleri, Oransal-İntegral-Türevsel (PID) denetleyici kullanılarak kontrol edilmektedir. Bu çalışmada, tek şaftlı Ağır Hizmet Gaz Türbini (AHGT) içeren Rowen GT modeli, bir gaz çevrim santralının (YFK) için basitleştirilmiş bir matematiksel modeli kullanılmıştır. Bu kontrol yöntemlerinin analizinde Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Benzetilmiş Tavlama Algoritması (BTA) gibi sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Ayrıca, aynı analizler bu çalışmada ilk kez önerilen Yusufçuk Algoritması (SA) kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, frekans değişimlerini ifade eden hata büyüklüklerinin değerlendirilmesi amacıyla Hata Karelerinin Toplamı (ISE), Mutlak Hatanın Toplamı (IAE), Zaman Ağırlıklı Hata Karelerinin Toplamı (ITSE) ve Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı (ITAE) gibi performans indeksleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin geçici rejim davranışlarını yansıtan maksimum aşım, yükselme süresi, tepe süresi ve yerleşme süresi gibi dinamik parametreler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, önerilen PID denetleyicinin YA algoritmasıyla ayarlanması, sistem frekansının aşım ve yerleşme süresi açısından diğer yaygın algoritmalara kıyasla daha iyi çözümler sunduğu belirlenmiştir. Böylece YA algoritmasıyla frekans salınımlarını daha kısa sürede etkin bir şekilde sönmüleyerek, gaz çevrim santrallerinde frekans kontrolü için güvenilir bir alternatif bir yöntem olarak bu çalışma ile önerilmektedir.

Anahtar Sözcükler: Ağır Hizmet Gaz Türbini, Yük Frekans Kontrolü, Performans İndeksleri, Sezgisel Algoritmalar, Yusufçuk Algoritması

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF LOAD FREQUENCY CONTROL IN A SINGLE SHAFT COMBINED CYCLE POWER PLANT THAT CAN OPERATE IN ISLAND MODE CONNECTED TO THE GRID WITH DRAGONFLY ALGORITHM

Bülent HOŞ

Düzce University

Graduate School, Department of Electrical-Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Co-Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Beytullah BOZALI

July 2025, 106 pages

With the increasing demand for electrical energy, it has become imperative to generate and transmit electrical energy in a safe, high quality and sustainable manner. The reliability of electricity systems depends on maintaining the balance between generation and consumption. In order to provide this balance, keeping the frequency within certain limits is of critical importance and this process is called Load Frequency Control (LFC). Especially with the integration of power plants containing Gas Turbines (GT) into the grid, LFC has gained a more complex and dynamic structure. Power plants containing GT are widely preferred due to their ease of installation, fast start-up and shutdown features and their economical and efficient energy generation. In combined gas cycle power plants, which can also be operated in island mode, the speed and temperature values are controlled using a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller to prevent deviations in the frequency value against load variations. In this study, a simplified mathematical model is used for the LFC of a Rowen GT model gas cycle plant containing a single-shaft Heavy Duty Gas Turbine (HDGT). Heuristic algorithms such as Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO) and Simulated Annealing Algorithm (SA) were used in the analysis of these control methods. In addition, the same analyses were also performed using the Dragonfly Algorithm (DA), which is proposed for the first time in this study. In the study, performance indexes such as Integral of Squared Error (ISE), Integral of Absolute Error (IAE), Integral of Time-weighted Squared Error (ITSE) and Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) were analyzed comparatively in order to evaluate the error magnitudes expressing the frequency changes. The obtained results were evaluated by considering dynamic parameters such as maximum overshoot, rise time, peak time and settling time, which reflect the transient regime behavior of the system. According to the analysis results, it was determined that the adjustment of the proposed PID controller with the DA algorithm provided better solutions in terms of overshoot and settling time of the system frequency compared to other common algorithms. Thus, by effectively damping frequency oscillations in a shorter time with the DA algorithm, it is suggested as a reliable alternative method for frequency control in gas cycle power plants with this study.

Keywords: Heavy Duty Gas Turbine, Load Frequency Control, Performance Indexes, Heuristic Algorithms, Dragonfly Algorithm

EXTENDED ABSTRACT

IMPROVEMENT OF LOAD FREQUENCY CONTROL IN A SINGLE SHAFT COMBINED CYCLE POWER PLANT THAT CAN OPERATE IN ISLAND MODE CONNECTED TO THE GRID WITH DRAGONFLY ALGORITHM

Bülent HOŞ

Düzce University

Graduate School, Department of Electrical-Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Co-Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Beytullah BOZALI

July 2025, 106 pages

1. INTRODUCTION

Today, increasing energy demand, resource diversity, supply security and environmental sustainability necessitate more flexible, reliable and efficient operation of electricity generation and transmission systems. LFC systems make the system sensitive to sudden load changes, ensuring continuity of synchronization and keeping the frequency within specified limits. Since permanent deviations in frequency can lead to serious consequences such as overloading, equipment failures and widespread system collapses in transmission systems, the dynamic performance of LFC has become one of the fundamental determining factors in terms of the reliability of modern power systems.

In this context, Gas Turbine (GT) based generation systems are widely preferred in power systems due to their simple design structures, low initial investment costs, short installation times and high operational flexibility. GTs' ability to respond quickly to sudden load demands and to be activated in a short time places them in a strategic position as both continuous and backup energy generation sources.

GT plants can operate both connected to the interconnected grid and independently in Island Mode. While the mechanical power applied to the turbine shaft is converted into electrical energy by the generator and transferred to the grid, the frequency stability of the system is of great importance in this conversion process. In electrical systems, frequency is directly related to the rotation speed of generators, and changes in load can significantly affect it. Disturbances in the active power balance cause the frequency to deviate from its nominal value; failure to keep these deviations under control negatively

affects the system performance. Therefore, keeping the frequency constant at the determined reference value within the framework of the generation-consumption balance is a basic requirement in terms of energy quality, system stability, and safety.

The primary control mechanism focuses on ensuring short-term stability by keeping frequency deviations at a minimum level against sudden load changes in the system. The secondary control process, on the other hand, provides economic operating conditions by optimizing load sharing between generation sources in the long term and aims to return the frequency to the nominal value. In order to successfully achieve these goals, feedback-based control strategies are applied in GT systems. PID controllers monitor the physical parameters of the turbine such as speed, temperature and pressure to ensure that the system operates close to the reference values. This structure plays an active role in both improving the transient behavior and increasing the performance of the system in a continuous steady state.

However, in addition to classical PID-based control strategies, it is aimed to further increase the performance of the LFC by using advanced optimization algorithms. Particularly in cases where the system parameters are uncertain, nonlinear and variable over time, these optimization-based approaches provide flexible, stable and effective control.

2. MATERIAL AND METHODS

In this thesis, an innovative and intuitive optimization approach, the Dragonfly Algorithm (DA), is proposed to provide effective LFC in a single-shaft Heavy Duty Gas Turbine (HDGT) system operating in Island Mode. DA aims to keep the frequency at the nominal value by producing a fast and stable response to sudden load changes and external disturbances occurring in the system. In this section, basic information about the structural features of the proposed algorithm, its implementation steps and comparative performance analysis with classical control methods are presented.

The DA was developed based on a biological modeling approach, inspired by the natural hunting and migration behaviors of dragonflies. Static swarm behavior represents the hunting process in which dragonflies perform short-distance and target-oriented flights in small groups. In this process, individuals react to the environment with high sensitivity; they exhibit forward-backward movements in local areas with sudden changes in direction. This behavior models the algorithm's capacity to search for local solutions in

the search space. On the other hand, dynamic swarm behavior refers to the long-distance migration movements of dragonflies in large groups. This behavior represents the global optimization capability in the search space and contributes to the algorithm's determination of the most suitable point in the general solution area.

Thus, the aim was to minimize both frequency deviations and the transient regime period.

The basic elements determining the success of the algorithm are the parametric components obtained by isolating the swarm behaviors in nature. The structural components of DA are: separation, alignment, cohesion, attraction to food, distraction from enemy and neighborhood relationship.

- Separation, is a mechanism that prevents individuals in the herd from colliding by getting too close to each other.
- Alignment, means that individuals adapt to the movement directions of their neighbors.
- Cohesion, encourages the swarm to converge by ensuring that the averages of its individuals' neighbors are directly getting closer; this behavior increases coordination among individuals.
- Attraction to food, ensures that the herd moves towards the individual representing the best solution.
- Distraction from enemy, allows individuals to shift their search orientation away from low-fitness regions or harmful solution spaces and towards more efficient regions.

Neighborhood relationships enable individuals to interact within a limited range, ensuring a balanced integration of local and global search information.

When all these parameters are evaluated together, the ability of DA to produce fast, stable and low-error PID parameters in a control problem with high dynamic characteristics such as LFC is clearly revealed. Thus, the proposed method not only increases the reliability of frequency regulation; it also strengthens the system's resilience to disruptive effects and its adaptive response ability.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this thesis, a simplified mathematical model created in MATLAB/Simulink™ environment was used for the purpose of LFC of a natural gas combined cycle power plant based on the Rowen GT model including a single shaft HDGT. By means of this

developed model, the dynamic behaviors of a single shaft HDGT system under different loading conditions were analyzed and simulation results were obtained to evaluate system performance.

A comprehensive analysis of control performance was performed using commonly used evaluation criteria such as Integral of Squared Error (ISE), Integral of Absolute Error (IAE), Integral of Time-weighted Squared Error (ITSE) and Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE). The performance indexes in question were evaluated together with dynamic parameters such as maximum overshoot, rise time, peak time and settling time, which reflect the transient behavior of the system.

Simulation results show that tuning the PID controller with the DA significantly improves system response, particularly by reducing the damping time of frequency deviations; it is determined that the DA-based tuning exhibits superior performance compared to other common optimization algorithms in terms of overshoot amounts and settling times.

As a result, the proposed DA-based PID controller approach offers a reliable solution alternative that is highly accurate, can respond quickly and increases system stability for frequency control in gas cycle power plants. In this context, DA also supports the sustainable and effective implementation of LFC.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

In this thesis, the DA proposed to increase the efficiency of LFC in single shaft HDGT system operating in Island Mode was tested on a simplified mathematical model developed based on the Rowen GT model in the MATLAB/Simulink™ environment. The simulations performed revealed that DA provides lower overshoot rates and shorter settling times when compared to the classical optimization methods like Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO) and Simulated Annealing Algorithm (SA).

The system responses of the PID controller optimized with DA were comparatively analyzed in line with the performance indexes like ISE, IAE, ITSE and ITAE, which evaluate error magnitudes. As a result of the analysis, it was determined that the DA-based controller dampens frequency fluctuations quickly and stably, significantly shortens the settling time and reduces overshoot.

The biologically based structure of the DA plays a decisive role in this success. Inspired by both static and dynamic swarming behaviors of dragonflies, the DA employs five

fundamental behavioral parameters like separation, alignment, cohesion, attraction to food sources, and distraction from enemies and utilizes neighborhood relationships to effectively balance local and global optimization processes within the search space. In dynamic systems such as LFC, this balancing ability increases the stability, adaptability and efficiency level of the algorithm.

In line with the findings obtained within the scope of the thesis, the following research suggestions are presented for future studies:

1. Testing on multi-region systems: This thesis study was carried out on a single-region system model. The performance of the DA-based controller can be tested by applying it to multi-region power systems and models containing connected transmission lines. Thus, the effectiveness of the algorithm in multi-region scenarios can be evaluated.
2. Renewable energy integration: The response of DA to uncertain and variable system conditions should be evaluated by examining it on systems that include renewable energy sources such as wind and solar.
3. Development of hybrid algorithms: In order to increase the convergence speed and search accuracy of the algorithm, hybrid algorithms (e.g. GA-YA, PSO-DA) can be developed with methods such as GA, PSO and their performances can be analyzed comparatively.
4. Real-time applications: In order to evaluate the practical validity of the developed control strategy, experimental verification can be performed by applying it on real-time hardware test platforms.

As a result, the DA stands out as a powerful optimization tool that can provide fast, flexible and stable solutions to complex control problems encountered in modern energy systems. The findings obtained in this thesis for frequency control in GT-based production systems reveal that DA has a wide potential for use in advanced control engineering applications and provide a solid basis for further research in this direction. In this context, the DA is considered as a promising method for the digitalization of energy systems and the development of intelligent control technologies.

1. GİRİŞ

Elektrik güç sistemlerinde kararlılığın ve sürekliliğin sağlanmasında temel unsurlardan biri, sistem frekansının nominal değerde tutulmasıdır. Tüketici talebindeki ani değişiklikler ya da sistemde meydana gelen dışsal bozucular, üretim ve tüketim arasında aktif güç dengesizliğine neden olarak frekansın saptmasına yol açar. Bu doğrultuda geliştirilen Yük Frekans Kontrolü (YFK) ile frekans saptmalarını hızlı bir biçimde bastırmak ve sistemi güvenli çalışma sınırları içerisinde tutmak üzere tasarlanmış dinamik bir kontrol mekanizmasıdır. Geniş ölçekli enterkonnekte güç sistemlerinde, farklı kontrol bölgeleri arasında güç alışverişinin düzenli bir şekilde sağlanması ve ani yük değişimlerine esnek yanıt verilmesi açısından YFK'nın rolü kritik düzeydedir. Yeterli frekans regülasyonu sağlanamaması hâlinde ise iletim hatlarında aşırı yüklenme, cihaz arızaları ya da senkronizasyon kaybı gibi ciddi sistemsel problemler meydana gelebilir. Frekansın regülasyonu kadar, bu regülasyonu gerçekleştirecek sistemlerin çeşitliliği ve kontrol karmaşıklığı da önemli bir mühendislik konusudur.

Enterkonnekte sistemlerin karmaşık yapısı, üretim kaynakları ve yük profilleri arasındaki farklılıklar nedeniyle YFK kontrol performansı doğrudan etkilenmektedir. Özellikle üretim birimlerinin yük değişimlerine verdiği tepkilerin zamansal farklılıklar göstermesi, sistem genelinde aktif güç/frekans oranının dengede tutulmasını önemli bir mühendislik sorunu hâline getirmektedir. Geleneksel güç sistemlerinde bu dengeleme, genellikle hidroelektrik santraller gibi hızlı tepki verebilen senkron generatörlerle sağlanmaktadır. Ancak günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın olarak şebekeye entegre edilmesi ve akıllı şebeke teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, klasik kontrol yaklaşımlarının yetersiz kaldığı durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, modern güç sistemlerinde dinamik yapıya uyum sağlayabilen yeni kontrol stratejilerine ihtiyaç vardır. Bu stratejilerin, değişken sistem koşullarında dahi güvenilir performans sunması beklenmektedir. Bu bağlamda, frekans kontrolüne doğrudan katkı sağlayabilecek sistemlerin belirlenmesi önemlidir. Bu sistemlerden biri de Doğal Gaz Çevrim Santralleri (DGÇS)'dir.

Bu doğrultuda DGÇS, günümüz enerji üretim altyapısında giderek daha fazla tercih edilen bir seçenek hâline gelmiştir. Bu tercih, söz konusu santrallerin bağımsız olarak

kısa sürede devreye alınabilmeleri, yüksek çevrim verimlilikleri, düşük yatırım ve işletme maliyetleri, hızlı kurulum avantajları ve çevre dostu emisyon profilleri gibi teknik ve ekonomik avantajlara dayanmaktadır. Bu sistemlerin özellikle %60'a ulaşabilen net elektrik verimliliği, modern kömür santrallerine kıyasla yaklaşık 2,5 kat daha düşük karbondioksit (CO_2) emisyonu üretmeleriyle birleştiğinde, sürdürülebilir enerji politikaları açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca türbin soğutma teknolojilerinde ve malzeme mühendisliğindeki ilerlemeler sayesinde Gaz Türbinlerinin (GT) türbin giriş sıcaklığı 1300-1500°C değerlerine ulaşmakta ve bu da verimliliği doğrudan artırmaktadır. GT'lerin performansını şekillendiren bir diğer önemli unsur ise çevresel koşullardır.

Bu yüksek verimliliğe ulaşmak ve sistem kararlılığını sağlamak için, GT'lerinin dinamik davranışlarını temsil eden doğru matematiksel modellerin oluşturulması büyük önem taşır [1]. MATLAB/Simulink™ ortamında geliştirilen DGÇS modeli ile gerçek işletme verilerini karşılaştırarak, türbin dinamiklerinin ve kontrol bloklarının modellenmesini içeren bir performans analizine odaklanmıştır [2]. Söz konusu çalışmada, gaz ve buhar türbini entegrasyonu ayrıntılı şekilde modellenmiş, türbin çıkış sıcaklıkları, egzoz gazı akışları ve hız kontrol blokları gibi önemli parametrelerin sistem üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Bu yönleriyle DGÇS'ler, yalnızca temel yük taleplerini karşılamakla kalmayıp aynı zamanda YFK gibi geçici rejim performansının kritik olduğu uygulamalarda da etkili bir çözüm sunmakta ve doğru regülatör parametrelerinin belirlenmesi açısından kritik rol oynar [3]. DGÇS üzerine yapılan bilimsel araştırmalar son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir. Elwardany ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen analizde, 2000-2022 yılları arasında yayımlanmış 4000'in üzerindeki akademik çalışma incelenmiş ve araştırma alanının giderek emisyon azaltımı, verimlilik optimizasyonu, meta-sezgisel temelli kontrol ve çevresel sürdürülebilirlik odaklı teknolojiler gibi konulara yöneldiği belirlenmiştir. Bu durum, DGÇS teknolojisinin hem akademik hem de endüstriyel çevrelerde stratejik önem kazandığını ve gelecekteki enerji dönüşüm politikalarında kilit rol oynayacağını vurdulamışlardır [4]. GT, elektrik enerjisine dönüştürülen mekanik enerjiyi üreten temel enerji dönüşüm ekipmanıdır ve modern enerji santrallerinin merkezinde yer almaktadır. Ancak GT performansı, sadece içsel termodinamik süreçlere değil, aynı zamanda dış çevresel koşullara da yüksek derecede bağlıdır. Özellikle çevresel sıcaklık, atmosferik basınç, nem oranı ve havadaki partikül yoğunluğu, türbinin

verimliliği ve egzoz gazı sıcaklığı üzerinde doğrudan etkilidir . Bu dışsal değişkenlerin etkisiyle GT kontrol sistemlerinde performans kayıpları meydana gelebilmekte; özellikle yük değişimlerinde ve mod geçişlerinde kontrol döngüsü kararlılığı bozulabilmektedir. Bu nedenle Minimum Değer Seçimi (MDS) stratejisi gibi geleneksel kontrol yöntemlerinde ortaya çıkan geçici performans kayıplarını telafi etmek üzere α , ζ ve ϵ gibi hata temelli yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, özellikle çevresel koşulların ani değiştiği durumlarda kontrol döngüsü geçişlerini yumuşatmak, aşırı sıcaklıkları önlemek ve yakıt kontrol valfleri üzerinde istenmeyen müdahaleleri azaltmak amacıyla tasarlanmıştır [5]. Ayrıca, türbinlerin hassasiyetini artıran bu dış koşulların, sistemdeki çıkış gücünün kontrollü artış oranlarını ve minimum yük kapasitesini de etkilediği gösterilmiştir. GT performansının dış koşullara duyarlılığı, yalnızca termal verimliliği değil; aynı zamanda kombine çevrim santrallerinde alt çevrim performansını da etkilemekte ve hem yakıt tüketimi hem de emisyon performansı açısından sistemin genel işletme stratejilerini şekillendirmektedir [6]. Bu bağlamda, GT davranışlarının doğru modellenmesi YFK sistemlerinin güvenilirliği açısından kritik hâle gelmiştir. Literatürde bu amaca yönelik çeşitli modelleme yaklaşımları geliştirilmiştir.

GT'li DGÇS'lerde, fosil yakıta dayalı enerji üretiminde yüksek verimlilik ve düşük emisyon gibi avantajlarıyla öne çıkan sistemlerdir. Bu sistemlerde GT, çevrimde elektrik üretimini sağlayan anahtar bileşen olup, performansı büyük oranda iç dinamiklere ve dış çevresel koşullara bağlıdır. Literatürde yapılan birçok çalışmada, GT performansının artırılması amacıyla malzeme mühendisliği, ileri kaplama teknolojileri, kompresör basınç oranlarının artırılması, sekansiyel yanma sistemleri ve gelişmiş soğutma tekniklerinin etkin biçimde kullanıldığı gösterilmiştir. Bu kapsamda, tarafından gerçekleştirilen enerji, ekserji ve parametre analizine dayalı çalışmada, üç basınç kademeli kombine çevrim santralinde GT'nin bileşen bazlı performansı analiz edilmiş ve %92'ye varan ekserjetik verimlilik, sistem düzeyinde ise %60'ın üzerinde toplam çevrim verimi elde edildiği bildirilmiştir [7]. Aynı çalışmada, ısı geri kazanım buhar generatörü içindeki en büyük ekserji yıkımının yüksek basınç buharlaştırıcısı ve bacadan kaynaklandığı, bu nedenle bu bileşenlerdeki termodinamik kayıpların azaltılmasının toplam verimlilik üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, türbin giriş sıcaklıklarının artırılmasıyla hem enerji dönüşüm kapasitesi hem de alt çevrim etkinliğinde iyileştirme sağlandığı görülmüştür. Benzer şekilde, frekans kontrol stratejilerinin geliştirilmesinin sistem kararlılığına olan katkısı incelenmiş ve rotor hızına duyarlı kontrol algoritmaları ile GT

performansının özellikle geçici yük değişimlerinde iyileştirilebildiği ortaya konmuştur [8].

GT'lerinin elektrik üretim sistemine entegrasyonu sırasında, sistem frekansının belirlenen sınırlar içinde kalması, sistem kararlılığı açısından hayati öneme sahiptir. Özellikle ani yük değişimleri durumunda, üretim ve tüketim arasındaki denge bozulur ve bu dengesizlik türbin rotor hızını etkileyerek sistem frekansında sapmalara neden olur. Bu nedenle, frekansın nominal değerinde tutulabilmesi amacıyla türbinin sağladığı mekanik gücün, bir hız regülatörü aracılığıyla otomatik olarak kontrol edilmesine YFK adı verilmektedir. GT dinamik davranışlarının modellenmesiyle YFK sistemlerine katkı sağlanabileceği ve özellikle çok milli türbin sistemlerinde frekans kontrolünün doğrulukla simüle edilebilmesi için bu modellere sıcaklık sınırlayıcıları, hız regülatörleri ve hızlanma denetleyicilerinin entegre edilmesi gerektiği belirtilmiştir. YFK, sadece anlık frekans sapmalarını düzeltmeye değil; aynı zamanda sistemin kararlı ve ekonomik çalışmasını sürdürmeye de hizmet eder. Özellikle mikroşebeke ve yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışan sistemlerde, üretimdeki dalgalanmalar nedeniyle YFK sistemlerine duyulan ihtiyaç daha da artmıştır [9]. Mikroşebekelerdeki frekans değişimlerini azaltmak amacıyla dinamik geri beslemeli denetleyici tasarlanmış ve önerilen yöntemle frekans salınımlarının %80'in üzerinde azaltılabileceğini göstermiştir [10]. YFK'nin geleneksel enerji sistemlerinin ötesine geçerek yenilenebilir enerji entegrasyonu, enerji depolama sistemleri ve yumuşak hesaplama teknikleri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Özellikle dağıtık üretim sistemlerinde yük-frekans dengesinin korunması için YFK'nın esnek, hızlı ve kestirici kontrol sistemleriyle desteklenmesi gerektiği aktarılmıştır. Bu bağlamda, literatürde önerilen çeşitli denetleyici türleri Oransal-İntegral (PI), Oransal-İntegral-Türevsel (PID), Bulanık Mantık (BM), kayar kip kontrolü vb. ile optimizasyon temelli yöntemler Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Benzetilmiş Tavlama Algoritması (BTA) tabanlı modeller incelenmiştir. YFK sistemlerinin, hem teknik hem de siber güvenlik açısından dayanıklı hale getirilmesi gerektiği ortaya konmuştur [11]. YFK çalışmalarında simülasyon temelli analizler, sistem tasarımı ve kontrol stratejilerinin güvenliğini test edebilmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu analizlerin geçerliliği ise, kullanılan GT modellerinin gerçek sistem davranışını yeterli doğrulukla temsil edebilmesine bağlıdır. Bu bağlamda literatürde, GT'lerinin dinamik karakteristiklerini modellemek için hem fiziksel temelli hem de deneysel verilere dayalı çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. GT enerji üretim

sistemlerine yönelik modelleme tekniklerinin evrimini detaylı biçimde inceleyerek, fiziksel ilkelere dayalı modellerin sistem dinamiklerini en doğru şekilde temsil ettiğini, ancak uygulama açısından daha karmaşık ve zaman alıcı olduklarını belirtmiştir [12]. Bu nedenle, pratik mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan Rowen ve Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) modelleri, sadelikleri ve sistem kararlılığı çalışmaları için yeterli doğruluk sunmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir [13], [14]. Bununla birlikte, bu klasik modellerin yalınlaştırılmış yapılarının bazı kontrol detaylarını göz ardı ettiği de bilinmektedir. Özellikle GT'nin kontrol sistemlerindeki gecikmeler, valf pozisyonlayıcılarının etkileri ve sıcaklık sınırlayıcıları gibi detaylar, hassas frekans kontrol analizlerinde dikkate alınması gereken önemli unsurlardır. YFK çalışmalarında kullanılan söz konusu klasik PID denetleyicilerin yeterli esneklik sunmadığını ve bu nedenle Bulanık Mantık PID (BM-PID) denetleyiciler gibi zeki kontrol sistemlerinin, modellenmiş sistemlerde daha üstün geçici yanıtlar elde edilmesini sağladığını göstermiştir. Bu da, yalnızca doğru modellemeyi değil, aynı zamanda bu modellere entegre edilecek uygun denetleyici yapılarını da seçmenin önemini ortaya koymaktadır [15].

GT'li sistemlerin YFK ve kararlılık analizleri kapsamında doğruluğu yüksek, aynı zamanda hesaplama açısından pratik olan matematiksel modellere duyulan ihtiyaç, literatürde çeşitli modelleme yaklaşımlarının gelişmesini teşvik etmiştir. Bu kapsamda en yaygın kullanılan ve referans niteliği taşıyan model, ilk kez W.I. Rowen tarafından 1983 yılında sunulan basitleştirilmiş matematiksel GT modeli olmuştur. Bu model, özellikle tek şaftlı Ağır Hizmet Gaz Türbinleri (AHGT) için geliştirilmiş olup, sistem kararlılığı çalışmalarında türbin davranışlarını yalın bir şekilde temsil etmesiyle ön plana çıkmıştır [16]. Modelin temel yapısı; hız regülasyonu, sıcaklık kontrolü ve ivmelenme denetimi gibi üç temel kontrol döngüsünü içeren dinamik bloklardan oluşmaktadır. Hız kontrolü genellikle frekans değişimine izin vermeyen kontrol stratejisine dayalı olarak çalışmakta, sıcaklık kontrolü türbinin aşırı ısınmasını önlemekte ve ivmelenme kontrolü sağlamaktadır. “Model ise özellikle başlatma ve ani yük değişimlerinde rotorun korunmasını, 15 °C ortam sıcaklığı ve 101.325 kPa atmosferik basınç değerlerini referans kabul etmekte” ve türbin rotor hızı aralığını %95–107 arasında belirlemektedir. Bu koşullar, sistemin uluslararası standartlara uygun çalışmasını garanti altına almaktadır. Rowen'in 1988'de yayımladığı çalışmasında, modelin işletme karakteristikleri ve

özellikle şebeke frekansına karşı tepki performansı detaylandırılmıştır. Bu model, kontrol sisteminin senkronizasyon ve otomatik yük alma davranışlarını daha gerçekçi biçimde temsil etmektedir. MDS mantığı ile çalışan model yapısı, kontrol sinyalleri arasında minimum değeri seçerek türbinin güvenli ve dengeli bir çalışma bölgesinde kalmasını sağlamaktadır [17]. Daha sonra 1992 yılında Rowen, modelin uygulama kapsamını genişletmiş ve özellikle mekanik tahrik sistemleri için yeni bir model geliştirmiştir. Bu model, sabit hızla çalışan generatör tahrik uygulamalarının ötesinde, değişken hızlı GT uygulamaları için de uygun hale getirilmiştir. Yeni model, giriş kılavuz kanatlarının etkilerini, ortam sıcaklığı düzeltmelerini, egzoz sıcaklığı hesaplamalarını ve yakıt sistemi gecikmelerini içeren daha hassas denklemlerle desteklenmiştir. Ayrıca model, yük kompresörü gibi harici bileşenlerle olan dinamik etkileşimleri de simüle edebilmektedir [18]. Sadeliği ve sistem uyumluluğu nedeniyle sık tercih edilen bu modellerin, bazı kontrol detaylarını dışarıda bırakmaları önemli bir sınırlılık olarak öne çıkmaktadır.

Rowen GT modeli, YFK uygulamalarında ve GT temelli sistemlerin kararlılık analizlerinde bir standart olarak kabul edilmekte; gerek denetleyici tasarımlarında gerekse algoritma optimizasyon çalışmalarında temel yapı taşı olarak kullanılmaktadır. Sadelik ile doğruluk arasındaki dengeyi başarılı şekilde kuran bu model, halen birçok akademik ve endüstriyel çalışmada geçerliliğini korumaktadır. Ancak enerji üretim sistemlerinin çeşitlenmesi ve dinamik koşullara verilen tepkilerin daha ayrıntılı analiz edilme gereksinimi, alternatif model yapılarına olan ilgiyi artırmıştır.

Bu doğrultuda, IEEE'nin başlattığı standartlaştırma çalışmaları kapsamında geliştirilen Gaz Türbini Analizi ve Simülasyon Aracı (Gas Turbine Analysis and Simulation Tool, GAST) ve Gaz Türbini Regülatör Modeli 1 (Gas Turbine Governor Model 1, GGOV1) ile birlikte, Uluslararası Büyük Elektrik Şebekeleri Konseyi (Conseil International des Grands Réseaux Électriques, CIGRE) gibi organizasyonların önerdiği modeller, YFK kapsamında sistem davranışlarının gerçekçi biçimde temsil edilmesine olanak sağlamaktadır. 1991, 1992 ve 1994'te yayımlanan çalışmalar, daha çok buhar türbinleri, hidrolik türbinler ve kombine çevrim santrallerinde kullanılan geliştirilmiş dinamik modellerin standartlarını oluşturmayı amaçlamıştır. Bu modeller, YFK'ya özgü optimizasyon değil, sistem stabilitesi, küçük sinyal analizleri ve güç sistemleri bütünsel çalışmalarına yöneliktir. GT modellemesine dair temel yapılar bu çalışmalarda yer almakla birlikte, Rowen veya GGOV1 gibi özgün ve özel testlerle zenginleştirilmiş yapıların ayrıntılarına yer verilmemektedir.

Bu nedenle literatürde GAST, GGOV1, CIGRE ve Frekansa Bağlı Model (FBM) gibi daha özgün, güncel, saha testi ve detaylı kontrol blokları içeren modeller tercih edilmektedir [19], [20]. GGOV1 GT modeli, hem gaz hem de buhar türbini uygulamaları için genel geçer bir yapı sunmakta ve farklı türbin konfigürasyonlarına kolaylıkla uyarlanabilmektedir. Batı Elektrik Koordinasyon Konseyi (Western Electricity Coordinating Council, WECC) sisteminde yürütülen saha testleri ve simülasyonlar, GGOV1'in yük kontrol karakteristiklerini gerçek sistem yanıtlarıyla uyumlu biçimde temsil ettiğini ve özellikle frekans sapmalarına verilen tepkiler açısından başarılı olduğunu ortaya koymuştur [21].

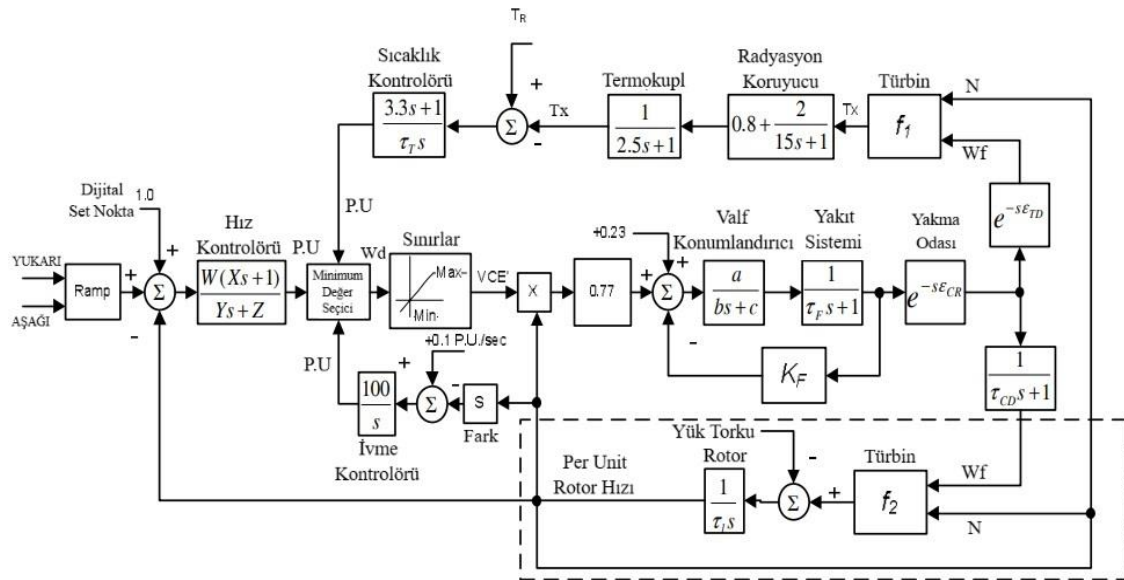
Benzer şekilde, GAST GT modeli, Batı Sistemleri Koordinasyon Konseyi (Western Systems Coordinating Council, WSCC) standartları çerçevesinde yaygın olarak kullanılmakta ve sistem dinamiklerinin temel düzeyde temsil edilmesini sağlayan sadeleştirilmiş bir yapı sunmaktadır [22]. CIGRE teknik çalışma grubu tarafından önerilen model yapısı ise, Rowen GT modeline benzer şekilde düşük karmaşıklık düzeyinde çalışmakla birlikte, türbin tork fonksiyonunun ikinci dereceden blok yapılarıyla modellenmesini sağlamaktadır. Baba ve arkadaşlarının aktardığı üzere, bu model özellikle kombine çevrim santrallerinde gaz ve buhar türbinlerinin dinamik etkileşimini senkron biçimde ele alabilecek esnekliktedir [23].

Fiziksel prensiplere dayalı modeller ise ortam sıcaklığı ve mil hızı gibi çevresel etkilerin çıkış gücü üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı biçimde analiz edebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen Frekansa Bağlı Model (FBM), sistem frekansındaki anormallikler altında GT çıkış gücünün çevresel değişkenlerle ilişkisini açıklayan matematiksel ifadeler sunmaktadır. Model, uzun süreli dinamik simülasyonlar ve hassas performans analizleri için uygun parametre yapısı ile dikkat çekmektedir [24].

Tüm bu modellerin ortak amacı, frekans sapmalarına karşı türbinlerin tepkilerini daha doğru ve sistematik biçimde temsil ederek YFK sistemlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaktır. Bu genel çerçevede, GT'lerin dinamik tepkilerinin doğru bir şekilde modellenmesi, frekans kararlılığının sağlanması ve denetleyici tasarımlarının başarısı açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde geliştirilen farklı modelleme yaklaşımları arasında Rowen GT modeli, IEEE GAST GT modeli, IEEE GGOV1 GT modeli, CIGRE GT modeli ve FBM GT modeli öne çıkmakta; her biri sadelik-doğruluk dengesi, parametre esnekliği ve uygulama alanına göre farklı avantajlar sunmaktadır. Uygulama amacına bağlı olarak en uygun modelin seçilmesi, sistem performansı

açısından kritik öneme sahiptir.

Bu modeller arasında en çok kabul gören ve tarihsel olarak öncülük eden yapılardan biri Rowen GT modelidir. İlk kez W.I. Rowen tarafından 1983 yılında sunulan bu model, tek şaftlı AHGT'ler için geliştirilmiş basitleştirilmiş bir dinamik yapı olarak literatüre girmiştir [16]. Modelin yapısı; hız kontrolörü, sıcaklık kontrolü ve ivmelenme kontrolörü olmak üzere üç temel kontrol bloğundan oluşmaktadır. Bu üç kontrolörün çıkışı, MDS bloğu girişini oluşturur. MDS bloğu çıkışı, üç kontrolörün çıkışının en küçük değerli olanını dikkate alır. Bu değer, Yakıt Talep Değeri (VCE) olarak isimlendirilir. Yakıt sistemi aktüatörü ve valf konumlandırıcı içeren yakıt sistemi dinamiğini fonksiyon bloğunun çalışma koşulları VCE değerine bağlıdır. Yanma odası gecikmesi ve tork fonksiyonu içeren türbin sistemin çalışması da VCE değerine bağlıdır. VCE, GT yakıt sistemi Yakıt Akış Sinyalini (W_f) üretir.

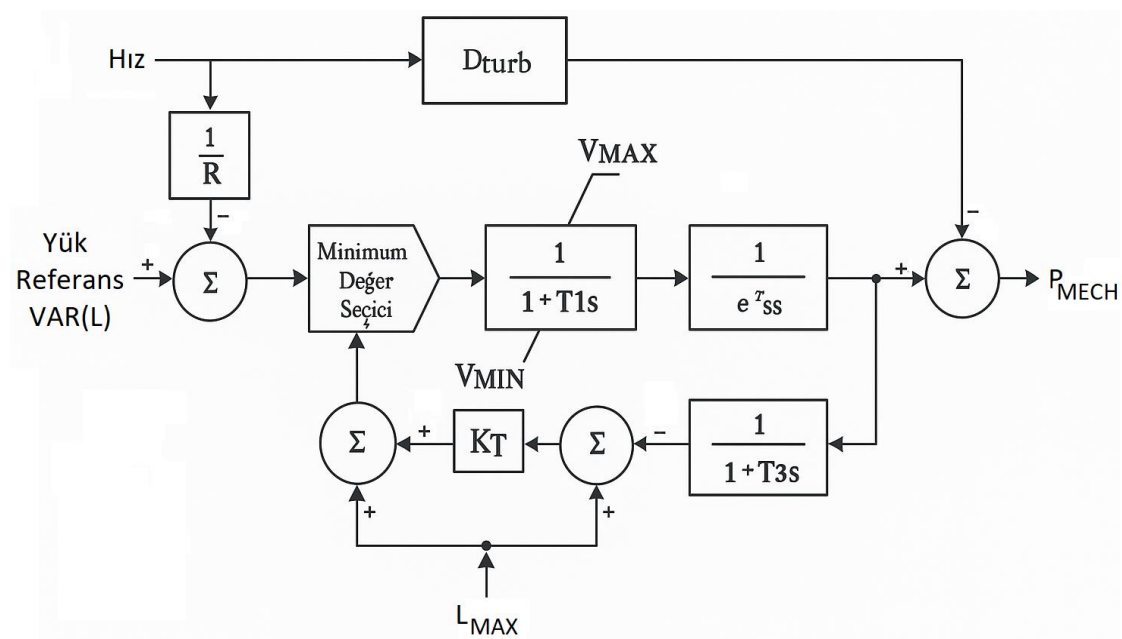


Şekil 1.1. Rowen gaz türbini modeli.

Şekil 1.1'de gösterilen Rowen GT modelinde; W , X , Y , ve Z hız kontrolörü parametrelerini; a , b ve c valf konumlandırıcı katsayılarını; T_F ve K_F sırasıyla yakıt sisteminin zaman sabiti ve kazancını; T_{CR} ve T_{TD} yanma odası ve türbin gecikme sürelerini; T_T ve T_R sıcaklık kontrolörü zaman sabiti ve referans sıcaklığı, T_x egsoz sıcaklığı ve T_r sıcaklık kontrol zaman sabitini; N türbin rotor hızını; T_s rotor atalet tork zaman sabitini; W_d yakıt talebini; f_1 mekanik tork üretim fonksiyonunu ve f_2 rotor ile türbin arasındaki tork farkı fonksiyonunu ifade etmektedir [16].

Rowen GT modelinde 1988 ve 1992 yıllarında yapılan güncellemelerle; yük alma

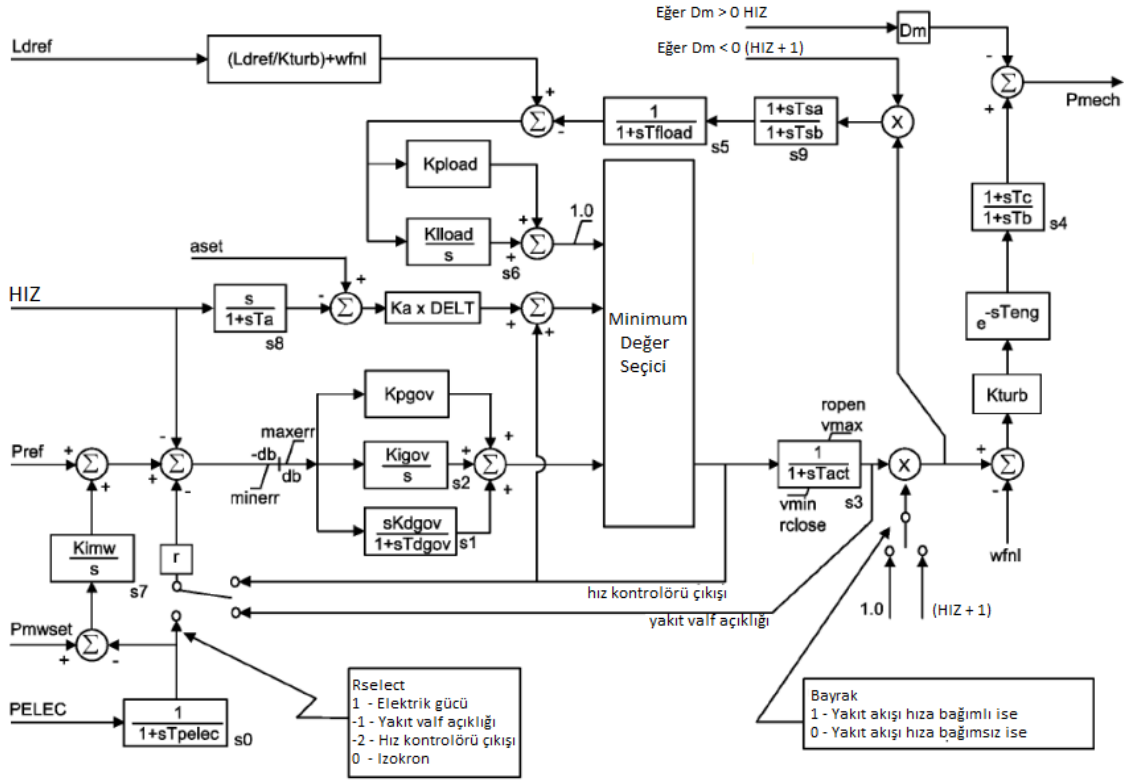
Bununla birlikte, enerji üretim sistemlerinin kontrol analizlerinde standardizasyonun sağlanması amacıyla IEEE tarafından geliştirilen GAST ve GGOV1 GT modelleri literatürde yerini almıştır. IEEE GAST GT modeli, gaz türbinlerinin dinamik performansını temsil etmek üzere geliştirilmiş standart bir modeldir ve özellikle WSCC bölgesi için sadeleştirilmiş kontrol yapıları ile temel tepki karakteristiklerini yansıtır. Bu model, hız kontrolü, yakıt akışı ve sıcaklık sınırlaması gibi temel kontrol döngülerini içermesi nedeniyle sistem kararlılık analizlerinde ve senkron generatör modelleriyle bütünlük çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [22].



Şekil 1.2’de IEEE GAST GT modeli gösterilmiştir. Gösterilen GAST GT modeline ait parametreler; R regülatör düşüm değeri olarak; T_1 , T_2 ve T_3 sırasıyla yakıt sistemi gecikme süresi sabitleri olarak; L_{MAX} yük sınırını; K_T sıcaklık kontrol döngüsü kazancını; V_{MAX} ve V_{MIN} ise sırasıyla maksimum ve minimum hız değerlerini ifade etmektedir. Ayrıca, D_{turb} parametresi türbin sönümlemesini ifade etmektedir [22].

9

sisteminde yapılan saha uygulamalarında, IEEE GGOV1 GT modelinin yük kontrol performansını yüksek doğrulukla yansıttığı belirlenmiştir. Ayrıca bu model, PID denetleyi döngüleri, sıcaklık sınırlayıcılar, yakıt akış valfleri ve rampa oranlarını içeren geniş bir parametre seti sunarak çok daha ayrıntılı bir analiz olanağı sağlamaktadır [21].

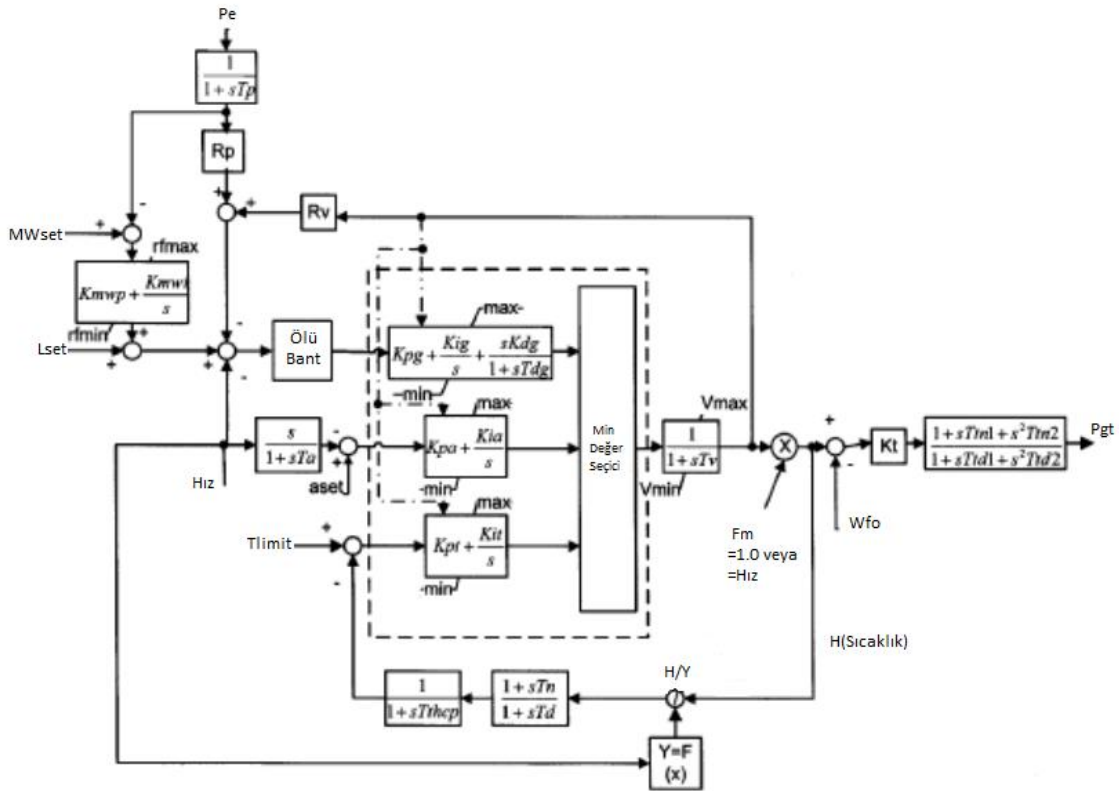


Şekil 1.3. IEEE GOV1 gaz türbin modeli.

Şekil 1.3'te IEEE GGOV1 GT modeli gösterilmiştir. IEEE GGOV1 GT modeline ait temel parametreler şu şekilde tanımlanmaktadır: R regülatör düşüm katsayısını; T_{pelec} elektriksel gecikme zaman sabitini; T_{load} yük kontrolü zaman sabitini; T_{servo} servo motor zaman sabitini; K_{pgov} ve K_{igov} hız kontrolü için oransal ve integral kazançları; T_{max} ve T_{min} sırasıyla türbinin maksimum ve minimum çıkış sınırlarını; D_t türbin sönümlleme katsayısını; L_{dref} yük referansı değişim oranını; F_{ref} frekans referans değerini ve D_b ölü bant aralığını ifade etmektedir [21].

IEEE GGOV1 GT modeli, gerçek bir GT kontrol sistemini tüm ayrıntılarıyla temsil etmek amacıyla değil; YFK, geçici kararlılık analizleri ve genel sistem dinamik simülasyonları için geliştirilmiş standartlaştırılmış bir yapıdır. Buna rağmen, GGOV1 hâlâ gelişmiş ve modüler bir yapı sunar; PID temelli kontrol kurgusu, özelleştirilebilir parametreleriyle hem gaz hem de hidro ve buhar türbinleri için esnek bir şekilde uygulanabilir. Model, dijital kontrol sistemlerinin özgün iç yapısını doğrudan temsil etmese de, bu sistemlerin

Diğer GT modelimiz, CIGRE teknik çalışma grubu tarafından önerilen bir yapıdır. Rowen GT modeline benzer düzeyde sadelik sunmakla birlikte, özellikle kombine çevrim santrallerinde gaz ve buhar türbinleri arasındaki etkileşimi daha gerçekçi şekilde temsil etmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu modelde türbin torku, birinci dereceden zaman sabitli bloklar yerine ikinci mertebeden yapılarla modellenmekte olup, bu sayede sistemin ivmelenme davranışları daha doğru şekilde yansıtılmaktadır. Ayrıca, giriş kılavuz kanatlarının etkileri, basınç düzeltmeleri ve egzoz sıcaklıkları gibi fiziksel değişkenler de model içerisine entegre edilebilmektedir [23].



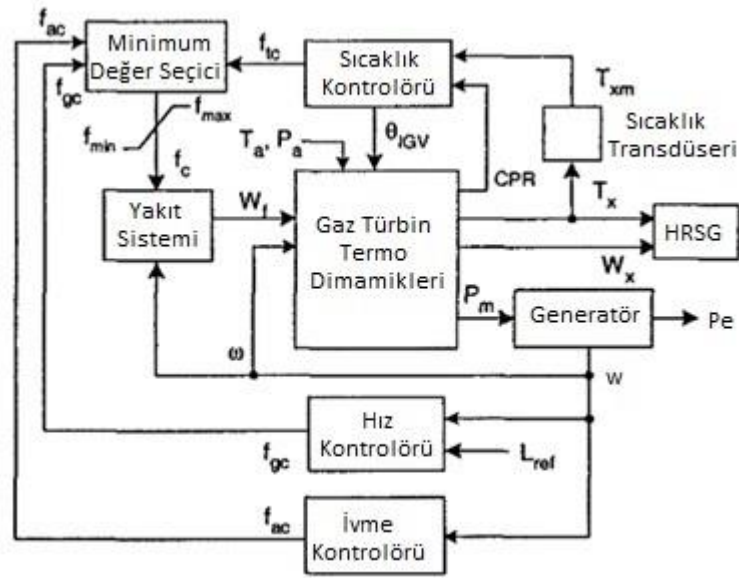
Şekil 1.4. CIGRE gaz türbin modeli.

Şekil 1.4'te gösterilen CIGRE GT modelinde; K_{mwf} ve K_{mwp} MW çıkışı için kazanç katsayılarını; T_p elektriksel ölçüm filtresi zaman sabitini; R_p ve R_v referans yolu üzerindeki kazançları; T_a aktüatör zaman sabitini; K_{pg} , K_{ig} , K_{dg} ile T_{dg} sırasıyla hız kontrol döngüsüne ait PID kazançlarını ve türev filtresi zaman sabitini; K_{pa} ve K_{ia} güç kontrol döngüsüne ait P ve I kazançlarını; K_{pr} ve K_{ir} referans kontrol döngüsü kazançlarını ifade etmektedir. Ayrıca; T_v giriş kılavuz kanadı zaman sabitini; V_{min} ve V_{max} bu sinyale ait alt

ve üst sınırları; K_t türbin kazancını; T_{m1} , T_{m2} , T_{d1} ve T_{d2} türbin çıkış transfer fonksiyonuna ait ikinci mertebe zaman sabitlerini; T_n , T_{hccp} ve T_h sırasıyla rotor ve ısı değişimi dinamiklerine ait zaman sabitlerini; W_{fo} yakıt akış referansını ve F_m türbin frekans faktörünü ifade etmektedir [23].

CIGRE GT modeli, ikinci mertebeden tork yapıları ve giriş kılavuz kanatlarıyla egzoz sıcaklığına ait fiziksel değişkenlerin modele entegre edilebilmesi sayesinde, özellikle kombine çevrim santrallerinde türbin davranışlarını daha gerçekçi biçimde temsil etme potansiyeline sahiptir. Ancak bu modelde kontrol mantığı, hâlâ büyük ölçüde referans sinyalleri üzerine kurulu olup, sistemin frekans gibi doğrudan ölçülebilen parametrelerine sınırlı düzeyde tepki verebilmektedir. Günümüz güç sistemlerinde, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla birlikte ani frekans değişimleri daha sık gözlemlenmekte ve bu değişimlerin türbin performansı üzerindeki etkilerini yüksek doğrulukla analiz edebilecek modellere ihtiyaç duyulmaktadır [23].

Bu ihtiyaç doğrultusunda geliştirilen FBM, türbin çıkış gücünü klasik kontrol modellerindeki referans tabanlı girişler yerine doğrudan sistem frekansı, frekansın türevi, mil hızı ve ortam sıcaklığı gibi fiziksel değişkenlerle ilişkilendirmeyi amaçlayan alternatif bir modelleme yaklaşımı sunmaktadır. Kunitomi ve arkadaşları tarafından önerilen bu model, özellikle frekans sapmalarının türbin çıkış gücü üzerindeki etkilerini ayrıntılı biçimde analiz etme yeteneğiyle öne çıkmakta; hem geçici hâl hem de uzun süreli simülasyonlarda klasik modellere kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamaktadır. Ancak bu gelişmiş yapının sağladığı duyarlılığa karşılık, modelin parametrik tanımlamasının daha karmaşık olduğu ve uygulama sürecinde daha dikkatli kalibrasyon gerektirdiği de literatürde vurgulanmaktadır [24].



Şekil 1.5. Frekansa bağlı gaz türbin modeli.

Şekil 1.5'te gösterilen FBM GT modelinde; f_{ac} , f_{gc} ve f_{tc} sırasıyla hız, ivme ve sıcaklık kontrolörlerinden gelen çıkış sinyallerini temsil etmektedir. L_{ref} türbin tork referansı; f_{min} ve f_{max} ise kontrol sinyali için tanımlanan minimum ve maksimum sınır değerlerini göstermektedir. Modeldeki Q_{GV} gaz valf kontrol sinyali olup, türbine gönderilen yakıt akışını yönlendirmektedir. Ayrıca, T_a emme havası sıcaklığını, P_a emme havası basıncını ve CPR kompresör basınç oranını ifade etmektedir. Türbin çıkış sıcaklığı ve kontrol referansı ise T_x ve T_{xm} ile temsil edilmekte; türbin rotor hızı ω sembolüyle gösterilmektedir. Yakıt debisi W_f , türbin çıkış gücü W_x , mekanik güç çıkışı P_m , generatör çıkış gücü ise P_e parametresiyle ifade etmektedir [24].

Bu bağlamda, YFK çalışmalarında kullanılabilecek farklı GT modelleri, dinamik doğruluk, kontrol kapsamı ve uygulama alanları açısından çeşitli avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır. Literatürde sıkça referans alınan Rowen, IEEE GAST, IEEE GGOV1, CIGRE ve FBM, bu farklılıkları en iyi şekilde yansıtan örneklerdir. Aşağıda sunulan karşılaştırmalı çizelge, söz konusu modellerin temel karakteristiklerini ortak bir çerçevede değerlendirerek, araştırmacıların sistem gereksinimlerine uygun model seçimlerini kolaylaştırmayı amaçlamaktadır.

Çizelge 1.1. Yük frekans kontrolü uygulamalarında kullanılan gaz türbini modellerinin karşılaştırmalı özellikler tablosu.

Model	Model Tipi	Kapsam	Kontrol Blokları	Uygulama Alanı
Rowen (1983) [16]	Basitleştirilmiş	Hız, sıcaklık, ivmelenme	3 ana blok, sabit parametreler	YFK, stabilite analizleri
GAST [22]	Standart (IEEE)	Temel gaz türbin davranışı	Basit PID + rampa	WSCC, temel simülasyonlar
GGOV1 [21]	Gelişmiş (IEEE)	Çok türbinli sistemler	PID, sınırlayıcı, yakıt kontrolü	WECC, detaylı frekans analizleri
CIGRE [23]	Yarı fiziksel	Kombine çevrim türbin etkileşimleri	İkinci merteye blok yapısı	DGÇS stabilite ve kontrol
FBM [24]	Fiziksel temelli	Ortam sıcaklığı ve rotor hızı etkileri	Doğrudan fiziksel bağıntılar	Hassas simülasyon, test

Çizelge 1.1’de, YFK analizlerinde yaygın biçimde kullanılan beş farklı GT modeli; model türü, kapsadığı dinamikler, kontrol bloklarının yapısı ve uygulama alanları temelinde karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir. Rowen GT modeli, sabit parametrelili basitleştirilmiş yapısıyla kararlılık analizlerinde uzun süredir referans alınmaktadır. IEEE GAST ve GGOV1 GT modelleri ise sırasıyla temel dinamiklerin temsili ve detaylı hız regülasyonu senaryoları için geliştirilmiş standart modellerdir. GGOV1 GT modeli özellikle sınırlayıcılar ve yakıt kontrolü gibi gelişmiş kontrol döngüleri içermesi bakımından çoklu türbin sistemleriyle uyumludur. CIGRE GT modeli, kombine çevrim santrallerindeki gaz ve buhar türbini etkileşimlerini ikinci merteye tork yapıları ve fiziksel değişkenler aracılığıyla daha gerçekçi biçimde temsil eder. FBM GT modeli ise, hız, ivme ve çevresel değişkenleri doğrudan giriş olarak kullanan fiziksel temelli yapısıyla geçici hâl ve uzun süreli dinamik analizlerde yüksek model doğruluğu sağlar. Bu karşılaştırma, GT modeli seçiminde yalnızca yapısal uygunluk değil, aynı zamanda uygulama senaryosuna özel ihtiyaçların da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

PID denetleyiciler, sade yapıları ve kolay uygulanabilir olmaları nedeniyle YFK sistemlerinde hâlen yaygın şekilde tercih edilmektedir. Ancak klasik denetleyicilerin yetersizlikleri, sistemin değişken dinamiklerine ve ani yük değişimlerine yanıt verememesi gibi sınırlamalar, sezgisel ve doğadan esinlenen kontrol yöntemlerine olan ilgiyi belirgin biçimde artırmıştır. Bu bağlamda, özellikle BM, Yapay Sinir Ağları (YSA) ve meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları gibi teknikler, tek şaftlı AHGT’nin kararlı

çalışmasını sağlamak ve PID parametrelerinin çevrimiçi olarak ayarlanmasında etkin biçimde değerlendirilmektedir. M. Mohamed Iqbal ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen araştırmalarda, bu eğilim açıkça ortaya konmuştur. İlgili çalışmalarda, tek şaftlı AHGT'ler için klasik yöntem olan Ziegler-Nichols (ZN) ve performans indekslerine dayalı sabit kazançlı PID denetleyicilerin performansları değerlendirilmiş, ardından bu yaklaşımlara alternatif olarak kendini ayarlayan bir BM-PID denetleyici önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, BM-PID denetleyicinin geçici ve kararlı durum performansında klasik yöntemlere göre üstünlük sağladığını göstermiştir [25]. Bu doğrultuda, 2016 yılında aynı araştırma grubu, General Elektrik türbin kontrol ünitesi Speedtronic valf kontrolüne sahip tek şaftlı AHGT'lerde frekans düşümü ayarlarının optimizasyonu için GA tabanlı bir yaklaşım geliştirmiştir. Yapılan karşılaştırmalı analizler, GA ile optimize edilen frekans düşümü parametrelerinin, daha önce önerilen manuel ve SYSTAT™ yazılımı temelli değerlerle kıyaslandığında daha düşük performans indeksleri Hata Karelerinin Toplamı (ISE), Mutlak Hatanın Toplamı (IAE), Zaman Ağırlıklı Hata Karelerinin Toplamı (ITSE) ve Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı (ITAE) ile daha kararlı çıkışlar sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca bu optimizasyon sonucunda elde edilen frekans düşümü katsayısının yaklaşık %4 civarında olması, sistem performansı açısından en uygun aralık olarak belirlenmiştir [26].

Bu kapsamda; Nöro Bulanık Denetleyiciler (NBD), Doğrusallaştırılmış Transfer Fonksiyon Modeli (DTFM) ve sezgisel optimizasyon algoritmaları olan GA, PSO, BTA, Dinamik Ateşböceği Algoritması (DAA) ve Sosyal Örümcek Optimizasyonu (SÖO) temelli çok sayıda YFK çalışması, tek şaftlı AHGT sistemlerine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. M. Mohamed Iqbal ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen bir NBD, şebeke bağlantılı tek şaftlı AHGT sistemlerinde yük dalgalanmalarına karşı kararlı bir frekans tepkisi sağlamak amacıyla önerilmiş; BM-PID ve YSA denetleyicilerle karşılaştırıldığında daha hızlı izleme yeteneği ve daha düşük kararlı durum hatası sunduğu tespit edilmiştir [27]. Benzer şekilde, sistemin matematiksel karmaşıklığını azaltmak amacıyla LTFM geliştirilmiş; bu modellerin gerçek zamanlı denetleyici tasarımı için uygun olduğu ve orijinal sistem özelliklerini koruduğu ortaya konmuştur [28].

Shumitha ve arkadaşları tarafından yürütülen bir başka çalışmada ise, BTA ile Ayarlanmış Kesirli Dereceli PID (Fractional Order, FOPID) denetleyicilerin, klasik yöntem olan ZN ayarlarına kıyasla hem geçici hem de kararlı durumda daha düşük performans indeksleri (ITAE, ISE) sağladığı belirtilmiştir [29]. Haji ve arkadaşları

tarafından önerilen Ateşböceği Algoritması (AA) tabanlı kesirli dereceli BM-PID denetleyici, yük değişimlerine ve frekans sapmalarına karşı sistem performansını iyileştirmek amacıyla geliştirilmiş; AA'ya kıyasla daha hızlı yakınsama ve gelişmiş dengeleme özellikleri gösterdiği rapor edilmiştir [30]. Ayrıca bir diğer çalışmada, klasik PID denetleyicilerin sınırlamalarını aşmak amacıyla Aralıklı Tip-2 BM-PID denetleyici önerilmiş ve denetleyici kazançları SÖO yöntemiyle optimize edilmiştir. Simülasyon sonuçları, bu yaklaşımın tek şaftlı AHGT sistemlerinde hem hız hem de egzoz sıcaklık kontrolünde PID tabanlı denetleyicilere kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir [31].

Tüm bu yaklaşımlar, modern enerji üretim sistemlerinin artan yapısal karmaşıklığı ve çevresel belirsizliklerle başa çıkma gerekliliği doğrultusunda, akıllı ve adaptif kontrol tekniklerinin YFK sistemlerine entegrasyonunun giderek daha kritik hâle geldiğine işaret etmektedir. Ayrıca çok değişkenli ve parametre yoğun tek şaftlı AHGT modelleri açısından, bu yöntemlerin sistem kararlılığı, yanıt doğruluğu ve kontrol güvenilirliği bakımından klasik yöntemlere kıyasla üstünlük sağladığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. YFK, üretim-tüketim dengesizliğinden kaynaklanan frekans sapmalarının bastırılmasına yönelik temel bir kontrol stratejisi olup, GT tabanlı sistemlerde çevresel koşullara duyarlılığın yüksek olması nedeniyle daha hassas bir kontrol gerektirir. Bu bağlamda, değişken sistem koşullarına adaptif yanıt verebilen meta-sezgisel temelli denetleyici yaklaşımları, son yıllarda literatürde ön plana çıkmaktadır.

Klasik PID denetleyiciler, kazançlarının sabit tanımlanmış olması nedeniyle sistemin değişken dinamiklerine uyum sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlamaları gidermek amacıyla, son yıllarda sezgisel ve doğadan esinlenen algoritmalar yardımıyla PID parametrelerinin çevrimiçi veya otomatik ayarlanmasına yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve başarıyla uygulanmıştır.

YFK kontrolü, yalnızca klasik yöntemlerle açıklanamayacak kadar karmaşık hâle gelmiştir. Bununla birlikte tek şaftlı AHGT sistemleri gibi doğrusal olmayan, çok değişkenli ve çevresel etkilere duyarlı sistemlerde, akıllı, esnek ve kendini uyarlayabilen kontrol yapılarına olan ihtiyaç önemli bir gereklilik hâline gelmiştir. Sezgisel ve meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ise sadece PID parametre ayarlamaları için değil, aynı zamanda sistem modellemesi ve arıza toleransı gibi daha kapsamlı kontrol problemlerinin çözümünde de etkili biçimde kullanılmaktadır.

1.1. TEZİN KATKISI, YENİLİK VE ORGANİZASYON

Bu çalışmada ise, önerilen YA ile YFK gerçekleştirilmiş, sistem modeli olarak Rowen GT modeli kullanılmıştır. Kombine çevrimli tek şaftlı bir GT sistemi üzerinde yapılan simülasyonlarda; yük değişimleri ve farklı çalışma koşullarında, PID tabanlı kontrol stratejileri test edilmiştir. GA, BTA ve PSO algoritmalarıyla elde edilen parametre ayarlarıyla karşılaştırıldığında, YA algoritmasının sistem frekansını daha kısa sürede ve daha az salınım ile nominal değere ulaştırabildiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, YA algoritmasının geçici rejim ve kararlı hal performansı bakımından yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu ortaya koymakta; bu da söz konusu yöntemin YFK problemlerinde etkili ve rekabetçi bir optimizasyon yaklaşımı olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Bu tezde, GT'li DGÇS'lerinde frekans sapmalarının bastırılmasına yönelik olarak, klasik kontrol yöntemlerine alternatif, akıllı bir optimizasyon yaklaşımı olarak YA önerilmiştir. YFK sistemi tasarımı kapsamında, Rowen GT modeli esas alınarak oluşturulan tek şaftlı AHGT sisteminde, değişken yük koşulları altında YA tabanlı PID denetleyi stratejisi simülasyonlarla test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, YA'nın özellikle geçici rejimde daha düşük salınım ve daha kısa yerleşme süresi ile frekans sapmalarını etkili biçimde bastırabildiğini göstermektedir. Bu bulgular, YA'nın yalnızca PID parametre ayarı değil, aynı zamanda YFK performansının bütüncül iyileştirilmesi açısından da etkili bir araç olabileceğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın temel katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Kontrol Yaklaşımı: Literatürde ilk defa YA, YFK problemlerinde PID parametrelerinin optimizasyonu amacıyla sistematik biçimde uygulanmış ve benzer GA, BTA, PSO gibi meta-sezgisel algoritmalarla karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir.
- Modelleme: YFK analizlerinde referans kabul edilen Rowen GT modeli kullanılarak, türbinin hız, sıcaklık ve ivmelenme blokları dinamik olarak modellenmiş ve sistem performansının gerçek işletme koşullarına uyumlu olduğu doğrulanmıştır.
- Yenilik: YA'nın kontrollü frekans regülasyonu sağlayarak geçici ve kararlı hâl performansında klasik PID yapılarından daha üstün sonuçlar sunduğu deneysel olarak ortaya konmuştur.

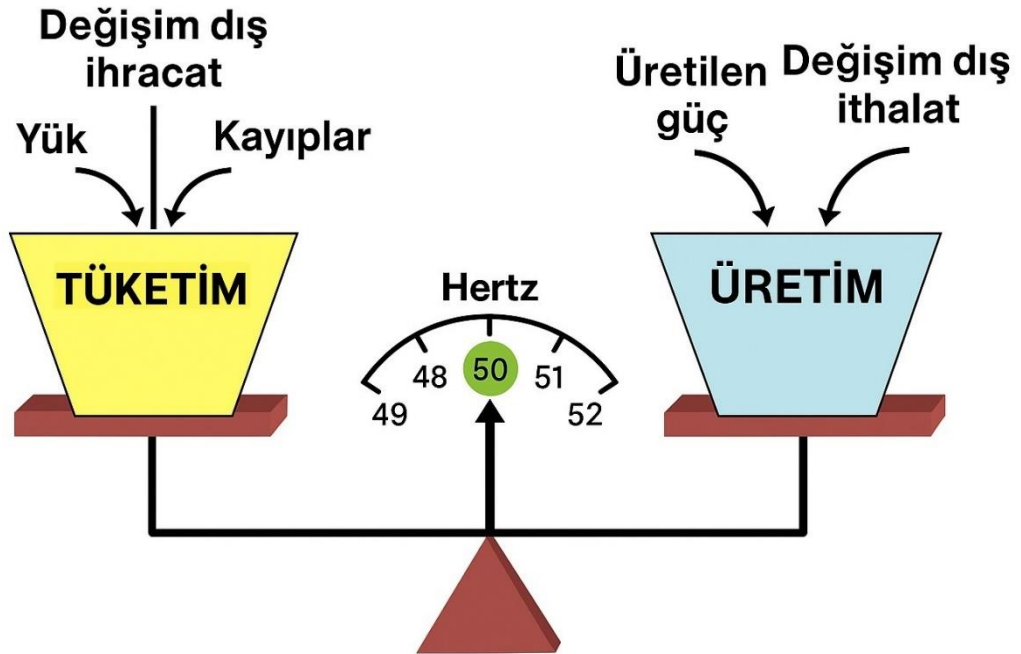
- Uygulama Kapsamı: DGÇS'lerinde enerji üretimi, çevresel etkiler ve kontrol esnekliği açısından DGÇS yapısının YFK'ya olan duyarlılığı göz önüne alınmış, modelin farklı çalışma senaryolarına olan adaptasyonu test edilmiştir.
- Literatür Katkısı: Bu tez, YFK kontrolünde klasik model yapılarını detaylandırmanın yanında, sezgisel optimizasyon temelli yaklaşımın sistem güvenilirliği ve verimliliği üzerindeki etkisini de derinlemesine incelemiştir.



2. YÜK FREKANS KONTROL YÖNTEMLERİ

Elektrik enerjisinin üretiminden başlayarak iletim ve dağıtım yoluyla son kullanıcıya ulaştırılmasına kadar geçen tüm süreçleri kapsayan altyapılar, genel anlamda güç sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler; üretim santralleri, trafo merkezleri, yüksek gerilim iletim hatları ve alçak gerilim dağıtım şebekeleri gibi birbirine entegre çok sayıda teknik bileşenden oluşur. Güç sistemlerinin nihai amacı, elektriğin kesintisiz, güvenilir ve ekonomik bir şekilde tüketiciye ulaştırılmasıdır [32], [33].

Bu kapsamlı sistemlerin sürdürülebilir bir biçimde işletilebilmesi, yalnızca fiziksel altyapıların yeterliliği ile değil, aynı zamanda çeşitli teknik zorlukların sürekli ve etkin şekilde yönetilmesiyle mümkündür. Özellikle frekans ve gerilim kararlılığı, arz-talep dengesinin sağlanması, ani yük değişimlerine hızlı tepki verme yeteneği ve sistem güvenliği, işletme açısından kritik öneme sahiptir. Arz-talep dengesi, üretim-tüketim arasındaki ilişkiye bağlıdır ve Şekil 2.1'deki gibidir [34]. Bu karmaşık süreçlerin yönetimi, yalnızca operasyonel uzmanlıkla değil, aynı zamanda ulusal ve uluslararası teknik normlara bağlılıkla mümkündür [35].



Şekil 2.1. Üretim ile tüketim arasındaki ilişki.

Bu bağlamda; Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission, IEC) ve Avrupa Elektrik İletim Sistemi Operatörleri Ağı (ENTSO-E) gibi

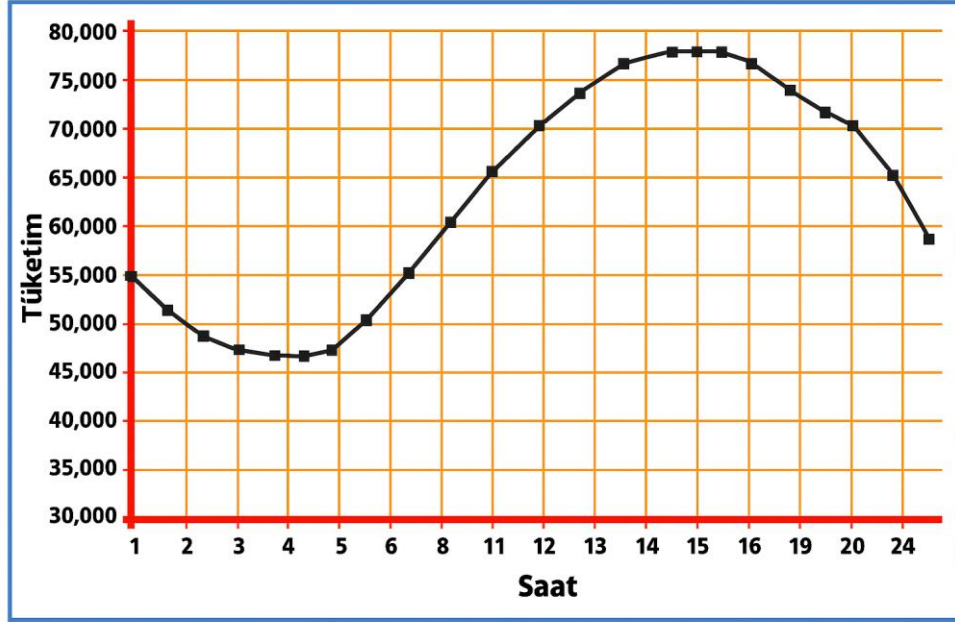
uluslararası kuruluşlar tarafından yayımlanan teknik standartlar, güç sistemlerinin tasarımı, güvenliği, verimliliği ve işletimi açısından referans niteliğindedir [36], [37], [38]. Bu standartlar sayesinde, ülkeler arası sistem uyumluluğu artırılmakta ve ortak operasyonel güvenlik kriterleri sağlanmaktadır [39].

Türkiye'nin Avrupa elektrik şebekesine entegrasyonu çerçevesinde, ülkemizde uygulanan güç sistemi yönetimi de bu standartlara paralel biçimde şekillenmektedir. ENTSO-E tarafından yayımlanan düzenlemeler ve senkronizasyon kriterleri, Türkiye'nin Avrupa Kıtası Senkron Bölgesi'ne uyumlu çalışmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, frekans kararlılığı için belirlenen sınırlar şu şekildedir:

- Hedeflenen işletme koşulları: $49,8 \text{ Hz} \leq f \leq 50,2 \text{ Hz}$
- Kabul edilebilir işletme koşulları: $49,5 \text{ Hz} \leq f < 49,8 \text{ Hz}$ ve $50,2 \text{ Hz} < f \leq 50,5 \text{ Hz}$
- Kritik işletme koşulları: $47,5 \text{ Hz} \leq f < 49,5 \text{ Hz}$ ve $50,5 \text{ Hz} < f \leq 52,5 \text{ Hz}$
- Kararsız işletme koşulları: $f < 47,5 \text{ Hz}$ ve $f > 52,5 \text{ Hz}$

Bu sınırlar, yalnızca teknik işletme koşullarını belirlemekle kalmamakta, aynı zamanda sistem operatörlerine yönelik koruyucu ve düzenleyici kontrol önlemlerinin zamanlaması açısından da temel teşkil etmektedir [37], [40].

Öte yandan, elektrik enerjisine olan talep zamanla değişen dinamik bir yapıya sahiptir. Gerek gün içerisindeki tüketim döngüleri gerekse mevsimsel farklılıklar, üretim ile talep arasında sürekli bir denge gereksinimi doğurmaktadır. Bu nedenle, enerji üretimi ile yük talebi arasındaki dengeyi sağlamak, güç sistemi operatörleri için dinamik ve sürekli bir sorumluluk alanı oluşturmaktadır [41].

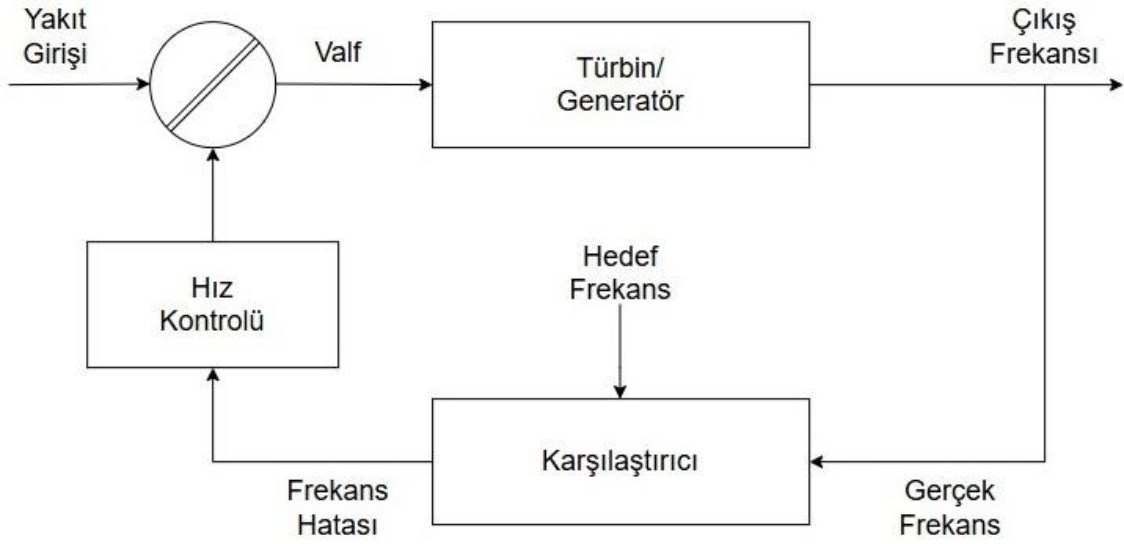


Şekil 2.2. 24 saatlik yük eğrisi.

Şekil 2.2’de yük eğrisi incelendiğinde görüleceği üzere, tüketim düzeyleri saatlik bazda önemli ölçüde değişmektedir. Bu durum da anlık sistem izleme, Otomatik Üretim Kontrolü (OÜK) ve hızlı tepki mekanizmalarının etkin şekilde uygulanmasını zorunlu kılmaktadır [37], [42].

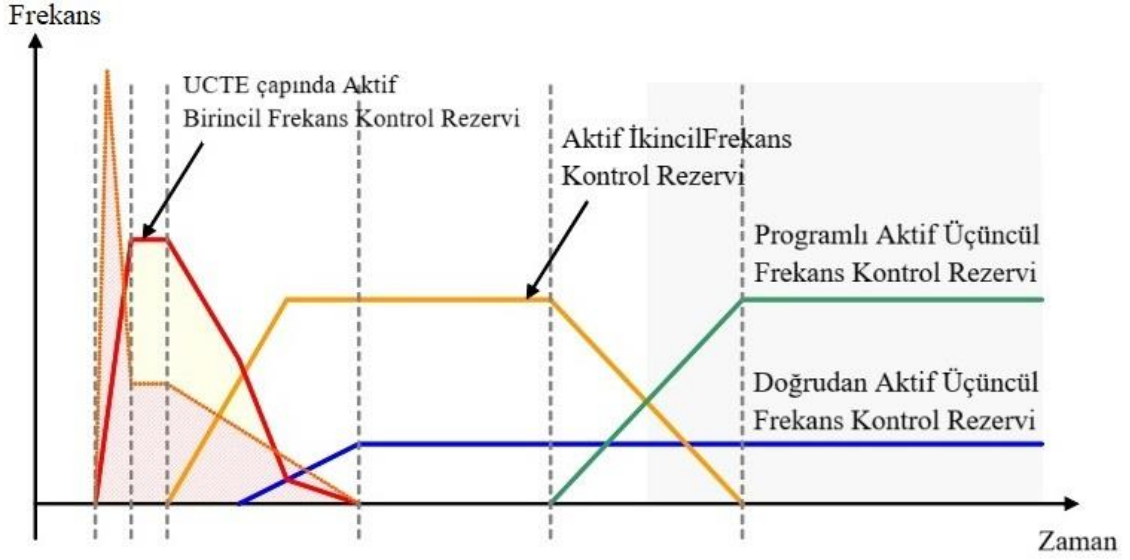
Güç sistemlerinin ilk dönemlerinde, enerji üretimi ile tüketim arasındaki denge büyük ölçüde manuel kontrol yöntemleri aracılığıyla sağlanmaktaydı. Bu dönemde santral operatörleri, sistem frekansındaki değişimleri izleyerek generatör çıkış gücünü elle ayarlamakta ve böylece üretim-tüketim dengesini manuel olarak kurmaya çalışmaktaydı. Ancak zamanla enerji sistemlerinin ölçeği büyümüş, tüketim profilleri çeşitlenmiş ve kullanıcı talepleri daha karmaşık bir hal almıştır. Bu gelişmeler, manuel kontrol yöntemlerinin yetersiz kalmasına yol açmış ve yerini otomatik ve ileri düzeyde kontrol sistemlerine bırakmasına neden olmuştur [32], [43].

Modern güç sistemlerinde, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki denge, otomatik üretim kontrol sistemleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu sistemler, generatör çıkışına ait frekans bilgisini gerçek zamanlı olarak izlemekte, bu değeri belirlenmiş hedef frekansla karşılaştırmakta ve oluşan sapma doğrultusunda geri besleme temelli düzeltici kontrol sinyalleri üretmektedir. Söz konusu düzeltici sinyaller, üretim miktarının dinamik olarak yeniden ayarlanmasını sağlamakta ve sistem frekansının nominal değerde tutulmasına katkı sunmaktadır [41].



Şekil 2.4. Basit frekans kontrol sistemi.

Şekil 2.4’te bir generatörün çıkış frekansını kontrol etmek için kullanılabilecek basit bir kontrol sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir [40]. Otomatik frekans kontrol sistemleri yalnızca anlık dengesizlikleri gidermekle kalmamakta, aynı zamanda sistem genelinde istikrarlı ve sürdürülebilir bir enerji yönetimi sağlamaktadır. Zira, üretimin talebi karşılamada yetersiz kaldığı durumlarda sistem frekansı 50 Hz’in altına düşerken, üretim fazlası durumlarında ise 50 Hz’in üzerine çıkmaktadır. Bu nedenle frekans kontrolü, yalnızca anlık üretim-tüketim dengesini sağlamak açısından değil, aynı zamanda sistem kararlılığı, ekipman güvenliği ve enerji arz güvenilirliği açısından da kritik bir rol oynamaktadır [35]. Özellikle enterkonnekte sistemlerde birden fazla ülkenin veya bölgesel sistem operatörünün senkronize şekilde entegre olduğu yapılar içinde frekansın oldukça dar bir bant aralığında korunması gerekmektedir. Bu tür sistemlerde, senkron çalışma bütünlüğünü koruyabilmek için ülkeler arasında koordineli frekans kontrol stratejileri uygulanmakta; frekans rezervleri ve yük atma sistemleri gibi mekanizmalar aktif biçimde devreye alınmaktadır. Bu stratejilerin temelinde, frekansın 50 Hz referans değeri etrafında sabit tutulması ilkesi yer almaktadır [37].



Şekil 2.5. Ana frekans sapması ve ardından rezervlerin etkinleştirilmesi.

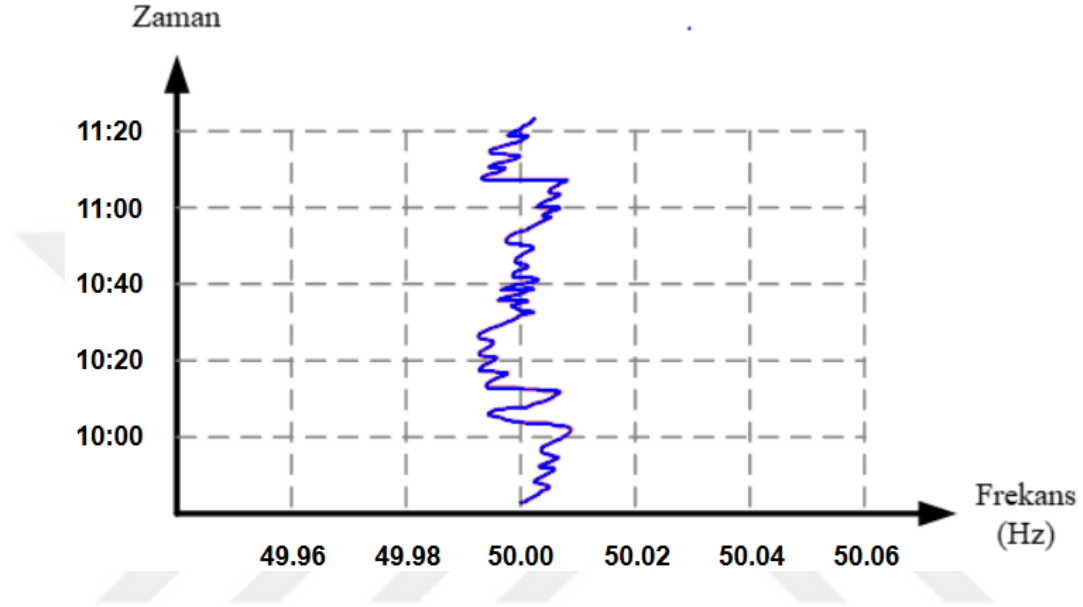
Şekil 2.5'te görüldüğü üzere, bir frekans sapması meydana geldiğinde, sistem ilk olarak birincil frekans kontrol rezervlerini hızlıca devreye alır. Sapma devam ettiği sürece, daha uzun vadeli düzeltme amacıyla ikincil ve üçüncül frekans kontrol rezervleri sırasıyla aktive edilir. Bu katmanlı yaklaşım, enterkonnekte sistemlerde frekansın nominal değere yakın tutulmasını sağlar [44].

Elektrik güç sistemlerinde planlanan frekans değeri 50 Hz sistem kararlılığı açısından temel bir referans kabul edilir. Bu hedef değerden meydana gelen sapmalar, sistemin denge durumunu etkileyen kritik göstergelerden biridir ve frekans sapması olarak adlandırılır. Örneğin, sistem frekansının 49.95 Hz olması, planlanan değerden -0.05 Hz'lik bir sapmaya işaret etmektedir [32], [33].

Özellikle büyük ölçekli enterkonnekte güç sistemlerinde yük değişimleri, üretim dalgalanmaları ve sistem içi arızalar gibi faktörler nedeniyle frekans değeri sürekli olarak küçük ölçekli dalgalanmalara maruz kalır. Ancak bu dalgalanmaların belirli sınırlar içinde tutulması kritik öneme sahiptir. Tipik olarak ± 0.03 Hz'lik bir sapma normal kabul edilmekte ve frekansın 49.97–50.03 Hz aralığında kalması hedeflenmektedir. Bu dar bant içindeki değişimler, sistemin doğal yük değişimlerine karşı verdiği tepkiler olarak değerlendirilir [45].

Frekansın bu sınırlar içinde kararlı bir şekilde tutulabilmesi için otomatik kontrol sistemleri, üretim birimlerinin çıkış güçlerini dinamik biçimde ayarlamakta ve bu sayede üretim-tüketim dengesini sürekli olarak sağlamaktadır. Bu mekanizmalar yalnızca sistem

kararlılığını temin etmekle kalmamakta, aynı zamanda ekipman ömrünü korumak ve güvenli işletme koşullarını sürdürebilmek açısından da belirleyici bir rol oynamaktadır [32], [35]. Şekil 2.6’da büyük bir enterkonnekte sistemde meydana gelen normal frekans sapmalarına ilişkin örnek bir zaman serisi gösterilmekte olup, bu sapmaların küçük tutulması ve frekansın 50 Hz’e mümkün olduğunca yakın kalmasının sağlanması, sistem güvenilirliğinin korunması adına esastır [32], [33], [44].



Şekil 2.6. Normal frekans sapması.

Bu süreçte yalnızca kontrol sistemlerinin değil, aynı zamanda sistemin fiziksel dinamiklerinin de büyük etkisi bulunmaktadır. Bu dinamiklerin başında, generatör ve türbin gibi dönen kütlelerde mekanik olarak depolanan eylemsizlik enerjisi gelir. Elektrik güç sistemlerinde eylemsizlik enerjisi, ani yük değişimlerine karşı sistemin frekans kararlılığını koruma açısından temel bir rol oynar [32]. Eylemsizlik, klasik anlamda bir cismin hareket durumunu koruma eğilimini ifade ederken, elektrik üretim sistemlerinde bu kavram, generatörlerin dönüş hızlarındaki değişimlere karşı gösterdikleri direnç olarak değerlendirilir. Büyük buhar türbinleri veya generatörler genellikle 3000 RPM gibi sabit bir hızda döner ve yüzlerce tonluk dönen kütleye sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, sistemin ani yük değişimlerine karşı yüksek frekans direnci göstermesi mümkün hale gelir [32], [33].

Bu sistemlerde meydana gelen frekans değişimleri, generatör milinin rotor hızını doğrudan etkileyerek, dönme enerjisinin kısa vadeli emilmesi veya salınması ile sonuçlanır. Bir generatörün dönme enerjisini değiştirmek, başlıca iki yolla mümkündür:

1. Mekanik giriş gücünün değiştirilmesi (örneğin türbine iletilen buhar veya su debisinin ayarlanması),
2. Bağlı yüklerin ani olarak artırılması veya azaltılması, bu da generatör hızında geçici sapmalara neden olur.

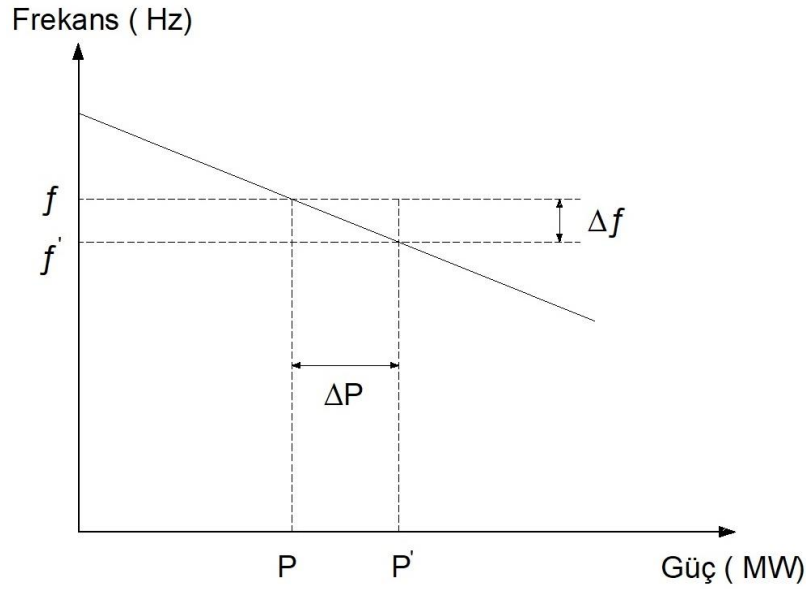
Tipik bir senaryoda, sisteme ani olarak büyük bir yük eklendiğinde generatörün rotor hızı azalır ve buna bağlı olarak sistem frekansı düşer. Bunun tersine, büyük bir üretim biriminin devre dışı kalması durumunda, sistemdeki diğer generatörler kendi eylemsizlik enerjilerini devreye sokarak geçici bir dengeleme sağlar [35], [45].

Türkiye gibi enterkonnekte sistem altyapısına sahip ülkelerde, bu eylemsizlik katkısı, sistemdeki tüm generatör ve senkron motorların toplam dinamik cevabını oluşturmaktadır. Sistemdeki dönen kütle miktarının fazla olması, ani dengesizlik durumlarında sistemin daha dirençli ve kararlı kalmasına doğrudan katkı sunar. Bu nedenle eylemsizlik, yalnızca ani frekans sapmalarına karşı ilk savunma hattı olmakla kalmaz; aynı zamanda sistemin arıza anındaki tepkisinin sürekliliği ve güvenliği açısından da kritik bir fiziksel parametre olarak kabul edilmektedir [32], [33].

2.1. BİRİNCİL FREKANS KONTROLÜ

Elektrik güç sistemlerinde frekans, üretim ve tüketim dengede olduğunda sabit kalır. Ancak bu denge, ani üretim veya tüketim değişimleriyle bozulduğunda sistem frekansında sapmalar meydana gelir. Frekans sapmalarının büyümesi, sistem kararlılığı ve ekipman güvenliği açısından ciddi riskler oluşturur. Bu nedenle, frekans değişimlerini sınırlamak ve sistem dengesini ilk aşamada korumak amacıyla birincil frekans kontrolü devreye girer [46].

Birincil frekans kontrolü, tamamen otomatik ve yerel olarak çalışan bir mekanizmadır. Merkezi bir komut gerektirmeksizin generatörün hız regülatörü aracılığıyla çalışır. Türbinin giriş vanasının açılıp kapanmasıyla generatörün çıkış gücü ayarlanır ve böylece frekansın aşırı sapması engellenir. Bu kontrol, sistem frekansındaki değişime karşı üretim biriminin tepki düzeyini belirleyen frekans düşüm karakteristiği adı verilen bir eğim parametresine dayanır.



Şekil 2.7. Hız regülatörünün ideal hız ayar karakteristiği.

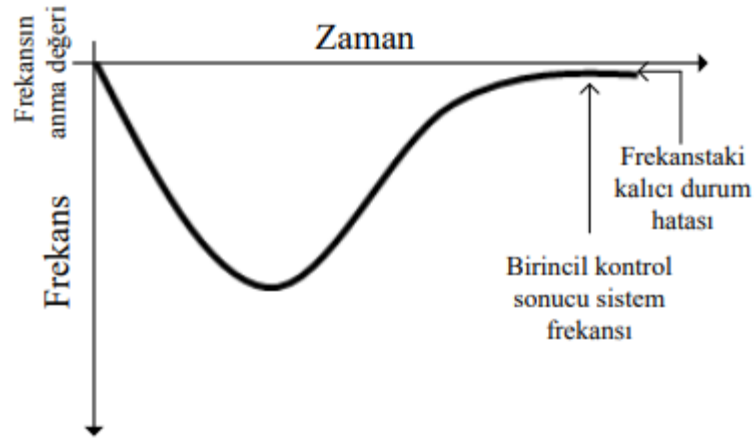
Şekil 2.7’de güç üretim ünitesine ait hız regülatörünün ideal karakteristiği gösterilmiştir. Güç çıkışı P (MW), sistem frekansı ise f (Hz) ile ifade edilir. Yük değişimi sonucu, hız regülatörü çıkış gücünü P' seviyesine ayarlayarak üretimde ΔP kadar artış sağlar ve üretim-tüketim dengesi yeniden kurulur. Yeni sistem frekansı bu durumda f' tanımlanır [47].

$$R = \frac{f' - f}{P' - P} = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)’de R , hız regülatör sabiti olarak adlandırılır ve frekanstaki değişimin (Δf) güç çıkışındaki değişime (ΔP) oranını ifade eder. Birimi Hz/MW’dır. Örneğin, R değeri %4 ise, frekansta %4’lük bir değişim, çıkış gücünde %100’lük bir değişime neden olur. Bu eğim sabitinin yüzde olarak ifadesi Denklem (3.12)’de gösterilmiştir.

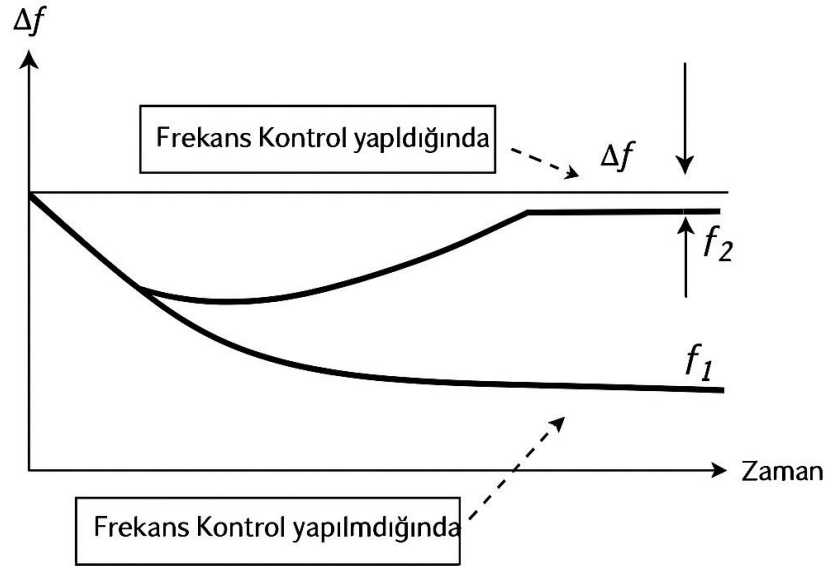
$$\%R = \frac{f_{\text{yüksüz}} - f_{\text{tamyük}}}{f} \cdot 100 \quad (3.12)$$

Denklemden (3.12)’de verilen $f_{\text{yüksüz}}$ yüksüz durumdaki frekansı, $f_{\text{tamyük}}$ tam yük durumundaki frekansı, f nominal sistem frekansını ifade etmektedir.



Şekil 2.8. Birincil frekans kontrolü sonucu sistem frekansı ve sürekli durum hatası.

Şekil 2.8’de görüldüğü üzere, birincil kontrol mekanizması aktif güç dengesini rotor hızındaki, dolayısıyla frekanstaki Δf değişimi yoluyla sağlar. Ancak bu dengeleme kalıcı bir durum hatası içerebilir [47].



Şekil 2.9. Frekans kontrolü uygulanan ve uygulanmayan sistemlerin karşılaştırmalı frekans tepkisi.

Şekil 2.9’da elektrik güç sistemlerinde frekans kontrolünün sistem davranışı üzerindeki etkisini açıklamak amacıyla kullanılmıştır. Grafikte, ani bir yük değişimi veya üretim kaybı gibi bir bozulma durumunun ardından frekansın zamanla nasıl değiştiği ve kontrol önlemlerinin bu değişime nasıl müdahale ettiği karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Frekans kontrolü yapılmayan durumda sistem frekansı sürekli olarak azalarak daha düşük bir kararlı duruma ulaşmakta (f_1), buna karşın birincil frekans kontrolünün uygulandığı

durumda sistem, daha sınırlı bir sapma ile yeni bir kararlı değerde (f_2) dengelenmektedir. Bu görsel, kontrol stratejilerinin sistem kararlılığı ve güvenliği açısından önemini görsel olarak ortaya koymaktadır [48].

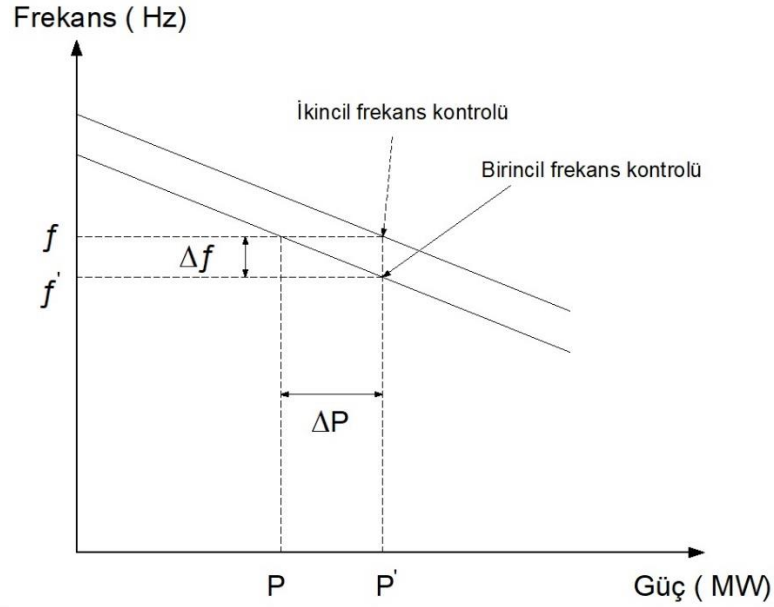
Birincil frekans kontrolü ENTSO-E kriterlerine göre, sistem frekansında ± 20 mHz'lik bir sapma oluştuğunda otomatik olarak devreye girer. Bu süreçte generatörlerin hız regülatörleri, tanımlı rezerv kapasiteleri sisteme dahil eder. Üretim birimleri, rezervin %50'sini 15 saniyede, tamamını ise 30 saniyede sağlayacak şekilde yapılandırılmalıdır. Bu hızlı yanıt, sistem kararlılığının korunması açısından kritiktir [37].

Ancak birincil frekans kontrol yalnızca frekans sapmasını sınırlamakla kalır, frekansı nominal değerine geri getirmez. Bu nedenle, birincil frekans kontrolün ardından ikincil frekans kontrol devreye girerek sistem frekansını nominal değerine döndürür ve uzun vadeli güç dengesini sağlar [49], [50].

Birincil kontrolün sürdürülebilirliği için üretim tesislerinin ENTSO-E kriterleri doğrultusunda rezerv güç tahsis etmesi zorunludur. Uygulamada, hidroelektrik santraller genellikle kapasitelerinin %10'u, termik santraller ise yaklaşık %5'i oranında birincil rezerv ayırmakla yükümlüdür. Bu rezervler, frekans sapmalarının yanı sıra ani üretim kayıplarına karşı da sistemin ilk savunma hattını oluşturur [37], [38].

2.2. İKİNCİL FREKANS KONTROLÜ

Elektrik güç sistemlerinde frekans regülasyonu, üretim ve tüketim arasındaki hassas dengenin korunmasına bağlıdır. Sistemde tüketim artışı veya üretim kaybı gibi dengesizlikler meydana geldiğinde, frekans sapar. Bu sapmayı düzeltmek amacıyla çok katmanlı bir kontrol stratejisi uygulanır. Bu yapının ikinci basamağını oluşturan ikincil frekans kontrolü, birincil kontrol sonrasında devreye alınarak kalıcı frekans hatasını ortadan kaldırmak ve kontrol bölgeleri arasındaki planlanan güç alışverişini sağlamak üzere işlev görür [46].



Şekil 2.10. İkincil frekans kontrolü sonucu sistem frekansı.

Şekil 2.10'da ikincil frekans kontrolü sonucu sistem frekansı grafiği verilmiştir. Uygulamada OÜK olarak adlandırılır ve sistem operatörleri veya bölgesel Yük Tevzi Merkezleri (YTM) tarafından merkezi olarak yürütülür. Birincil frekans kontrolünden farklı olarak ikincil frekans kontrolü, merkezi müdahaleye dayanır ve yalnızca frekans düzeltimiyle sınırlı kalmaz; aynı zamanda bölgeler arası güç akışlarının dengelenmesini de sağlar. Bu yönüyle, sistemin kararlılığı, sürekliliği ve senkronizasyonunun sağlanmasında kritik rol üstlenmektedir [47].

İkincil frekans kontrolü yapısının temelinde genellikle PID denetleyiciler yer alır. Bu denetleyiciler, sistemdeki Alan Kontrol Hatası (AKH) olarak tanımlanan hata sinyalini baz alarak çalışır. AKH, sistem frekansındaki sapma ile bağlantı hatlarındaki planlanan ve gerçek güç akışı arasındaki farktan oluşur. PID denetleyiciler, bu hata sinyaline göre üretim birimlerinin çıkışlarını otomatik olarak ayarlar ve hem frekansın 50 Hz'e geri dönmesini hem de bölgeler arası güç dengesinin sağlanmasını mümkün kılar. İkincil frekans kontrolü 30 saniye içinde tepki üretmeye başlaması ve yaklaşık 15 dakika içerisinde sistemi nominal frekans değerine döndürmesi beklenir [46], [47].

İkincil frekans kontrolü, önceden ayrılmış rezerv güç kapasiteleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Her kontrol bölgesinde ani yük değişimlerine ve sistematik sapmalara hızlı yanıt verebilecek düzeyde rezerv güç bulundurulması zorunludur. Bu rezervler, üretim birimlerinin nominal kapasitelerinin altında çalıştırılmasıyla elde edilir ve gerektiğinde frekans düzeltmesi için kullanılabilecek esnekliği sağlar. Böylece sistem

operatörleri hem frekans istikrarını sürdürür hem de ulusal ve bölgesel enerji alışverişlerini senkronize bir biçimde yürütebilir [40].

İkincil frekans kontrolünün en önemli avantajı, kalıcı bir dengeleme sağlamasıdır. Birincil frekans kontrolü, yalnızca ani frekans sapmalarını sınırlarken; ikincil frekans kontrolü, frekansın nominal değere dönmesini ve sistemin uzun vadeli kararlılığını garanti eder. Bu nedenle, özellikle enterkonnekte sistemlerde frekans güvenliğinin sürdürülebilirliği açısından ikincil frekans kontrolü vazgeçilmez bir yapı olarak kabul edilmektedir [40], [46].

2.3. ÜÇÜNCÜL FREKANS KONTROLÜ

Elektrik güç sistemlerinde frekans regülasyonu, üretim ve tüketim arasındaki dengesizliklerin giderilmesi amacıyla üç kademeli bir yapı içerisinde yürütülmektedir. Bu yapının son aşamasını oluşturan üçüncül frekans kontrolü, ikincil frekans kontrolü tarafından geçici olarak sağlanan frekans düzeltiminin ardından devreye alınır ve sistemde uzun vadeli denge ile ekonomik üretim planlamasını sağlamak üzere yapılandırılmıştır. Temel işlevi, ikincil frekans kontrolde kullanılan rezerv güçlerin serbest bırakılması ve sistem kaynaklarının yeniden optimum düzeyde tahsis edilmesidir [50], [51].

Bu kontrol düzeyi, merkezi bir müdahale gerektirir. Genellikle YTM tarafından zaman planlamasına dayalı komutlarla işletilir veya sistemde meydana gelebilecek büyük ölçekli generatör arızaları, yüksek hacimli yük atmaları gibi olağanüstü koşullara yanıt olarak devreye sokulur. Uygulama süresi genellikle 3 ila 20 dakika arasında değişmekte olup, bu süreç frekans istikrarını desteklemek ve sürdürülebilir üretim rezervlerini devreye almak açısından kritik öneme sahiptir. Bu aşamada üretim birimlerinin güç çıkışları otomatik ya da manuel olarak yeniden ayarlanabilir; gerekirse kontrollü yük atma uygulamaları ile talep azaltılarak sistemin kararlılığı korunur [52].

Üçüncül frekans kontrolü yalnızca teknik dengeleme aracı değil, aynı zamanda ekonomik yük dağılımının sağlanmasına yönelik bir araç olarak da işlev görür. Bu bağlamda, üretim birimleri arasında en düşük maliyetle enerji üretimi sağlayacak biçimde yük paylaşımı gerçekleştirilir. Böylece sistem, yalnızca teknik yeterlilik açısından değil, aynı zamanda ekonomik verimlilik açısından da optimize edilir [53], [54].

Üçüncül frekans kontrol mekanizmaları yalnızca frekans regülasyonuna değil, aynı

zamanda bölgesel sistemler arası koordinasyona, yedek güç yönetimine ve acil durum senaryolarına yönelik müdahale planlarının desteklenmesine de hizmet eder. Özellikle Avrupa Enterkonnekte Sistemi gibi çok bölgeli ağ yapılarında, frekans sapmalarının uluslararası düzeyde dengelenmesi açısından bu kontrol seviyesi hayati bir rol üstlenmektedir [40].



3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜ MODELLERİ

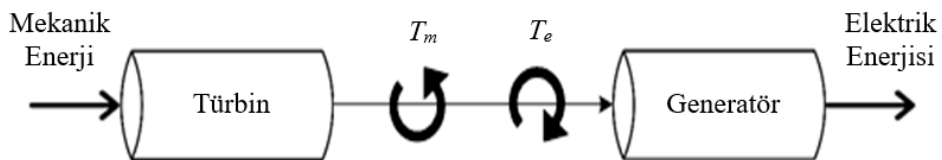
Güç sistemlerinde frekansın istikrarlı bir şekilde sürdürülmesi, sistem güvenilirliği ve işletme emniyeti açısından kritik bir gerekliliktir. Bu doğrultuda geliştirilen YFK mekanizmaları, ani yük değişimlerine ve dışsal bozunumlara karşı sistem tepkisini düzenlemek üzere tasarlanır.

Güç sistemlerinin doğası gereği doğrusal olmama ve zamanla değişen dinamik özellikler göstermesi, bu sistemler üzerinde geliştirilecek kontrol yaklaşımlarının matematiksel modellerle desteklenmesini zorunlu kılar. Dolayısıyla, kontrol sistemlerinin analiz ve tasarımında kullanılmak üzere, sistem bileşenlerine ait doğrusallaştırılmış ve sadeleştirilmiş modellerin oluşturulması büyük önem taşımaktadır.

Bu bölümde, YFK'nın sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlayan generatör, primer kontrol birimi, valf, regülatör ve kontrol döngüsü gibi temel bileşenlerin modellenmesine ilişkin yaklaşımlar ayrıntılı biçimde sunulacaktır.

3.1. GENERATÖR MODELİ

Elektrik üretiminde kullanılan senkron generatörler, türbin tarafından tahrik edilen ve birbirine karşıt yönlü etkiler oluşturan momentlere sahip döner kütleler olarak modellenebilir. Bu modellemede sistemin temelinin, mekanik momentin (T_m) dönme hareketini artırıcı etkisi ile elektriksel momentin (T_e) bu hızı azaltıcı etkisi oluşturur. Eğer T_m ile T_e büyüklük olarak birbirine eşitse, dönme hızı kararlı bir değere ulaşır ve bu hız genellikle senkron hız ($\omega = \omega_0$) olarak tanımlanır. Ancak, sistemde herhangi bir nedenle $T_e > T_m$ durumu oluşursa, dönme hızı azalır ve bu da sistemin yavaşlamasına yol açar. Bu gibi dengesizliklerin sürekli hale gelmesi durumunda sistem kararsız hâle gelebilir; bu nedenle mekanik momentin dinamik olarak artırılması ve frekansın kararlı değerde tutulması için bir kontrol mekanizması şarttır [32], [41], [50].



Şekil 3.1. Türbin-generatör modeli.

Şekil 3.1’de gösterilen türbin-generator modeli bu davranışı temsil etmektedir. Modelleme sürecinde kullanılan değişkenlerin açıklamaları aşağıda verilmiştir:

- ω : Açısal hız
- α : Açısal ivme
- δ : Generatörün faz açısı
- T_a : İvme momenti ($T_m - T_e$)
- T_m : Mekanik moment
- T_e : Elektriksel moment
- P_a : İvme gücü ($P_m - P_e$)
- P_m : Mekanik güç
- P_e : Elektriksel güç
- I : Atalet momenti
- M : Açısal moment ($M = \omega I$)

Modelde, faz açısı haricindeki tüm büyüklükler birim değer (per unit - pu) sistemiyle ifade edilir. “0” alt indisleri (ω_0 , P_{a0} , T_{a0} vb.), kararlı hâl durumlarını gösterirken, “ Δ ” sembolü (örneğin $\Delta\omega$), nominal değerlerden sapmaları ifade eder.

Modellemeye ait temel denklemler aşağıda verilmiştir [41], [50].

$$I\alpha = T_a \quad (3.1)$$

$$M = \omega I \quad (3.2)$$

$$P_a = \omega T_a = \omega(I\alpha) = M\alpha \quad (3.3)$$

Başlangıç koşulu olarak, sistemin sabit açısal hız (ω_0) ve faz açısı (δ_0) ile çalıştığı kabul edilir. Elektriksel veya mekaniksel dengesizliklerin ortaya çıkması, sistemde hız ve faz sapmalarına yol açar. Bu bağlamda, $\Delta\omega$ ve $\Delta\delta$ kavramları incelenerek sistemin zamana bağlı dinamik tepkisi analiz edilir. Bu sapmalar aşağıdaki şekilde hesaplanır [32], [41], [50].

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (3.4)$$

$$\Delta\delta = \int (\omega_0 + \alpha t) dt - \int \omega_0 dt = (\omega_0 t) + \left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right) - (\omega_0 t) = \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (3.5)$$

Denklem (3.6) nominal hızdan sapmayı ($\Delta\omega$) göstermektedir.

$$\Delta\omega = \alpha t = \frac{d}{dt}(\Delta\delta) \quad (3.6)$$

$$T_a = I\alpha = I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = I \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\delta) \quad (3.7)$$

Bu bağlamda Denklem (3.8)'de ivme gücü, mekanik ve elektrik güçleri arasındaki fark olarak ifade edilir:

$$P_a = P_m - P_e \quad (3.8)$$

İvme gücü, kalıcı durum değeri ve sapma terimlerinin toplamı olarak ifade edilirse Denklem (3.9) elde edilir.

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a \quad (3.9)$$

$$P_a = (P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (3.10)$$

Buna paralel olarak, moment Denklem (3.11) ile ifade edilir.

$$T_a = (T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (3.11)$$

Benzer biçimde Denklem (3.3) kullanılarak Denklem (3.12) elde edilir. Denklem (3.10) ve (3.11) yerine koyulursa Denklem (3.13) elde edilir.

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_{a0} + \Delta T_a) \quad (3.12)$$

$$(P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_m - \Delta P_e) = (\omega_0 + \Delta\omega)[(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e)] \quad (3.13)$$

Senkron çalışma anında $P_{m0} = P_{e0}$ ve $T_{m0} = T_{e0}$ olmaktadır ve ΔT_m , ΔT_e ve $\Delta\omega$ terimlerinin çarpımları ihmal edildiğinde Denklem (3.14) elde edilmektedir.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0(\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (3.14)$$

Aynı şekilde Denklem (3.15)'de moment ile hız değişimi arasındaki ilişki ile ifade edilir.

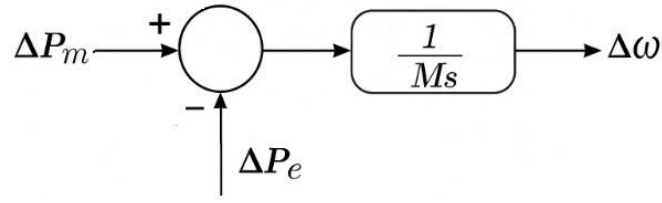
$$(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e) = I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) \quad (3.15)$$

$T_{m0} = T_{e0}$ olduğu için Denklem (3.14) ile (3.15) birleştirilirse Denklem (3.16) elde edilir.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = M \frac{d}{dt}(\Delta\omega) \quad (3.16)$$

Bu son Denklem (3.17) Laplace dönüşümüne sokulduğunda generatör modeline ait transfer fonksiyonu elde edilir:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = Ms(\Delta\omega) \quad (3.17)$$



Şekil 3.2. Mekaniksel ve elektriksel güç ile hız değişimi arasındaki ilişki.

Şekil 3.2'de sunulan transfer fonksiyonu, mekaniksel ve elektriksel güç bileşenleri ile rotor hızındaki değişim arasındaki dinamik ilişkiyi matematiksel olarak modellemektedir.

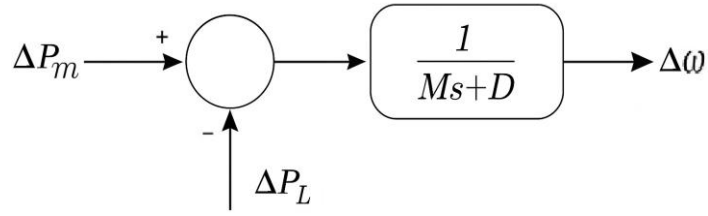
3.2. YÜK MODELİ

Güç sistemlerinde tüketici yükleri; konut, ticari ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan farklı türde elektrikli aygıtlardan oluşmaktadır. Bu yüklerin dinamik tepkileri, bağlı oldukları cihazların yapısal özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, aydınlatma ve ısıtma gibi omik karakterdeki yükler frekans değişimlerinden büyük ölçüde etkilenmezken; motor, fan ve pompa gibi döner makineler içeren endüktif yükler, sistem frekansındaki sapmalara karşı daha duyarlıdır [32].

Bu nedenle, sistem frekansındaki küçük değişimlerin yüke etkisini temsil eden bir matematiksel modele ihtiyaç duyulmaktadır. Frekans ile yük arasındaki bağıntı, özellikle motor tabanlı yüklerin baskın olduğu senaryolarda oldukça önemlidir. Bu ilişki Denklem (3.18) ile ifade edilmektedir [32].

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (3.18)$$

Bu denklemde; ΔP_e toplam aktif güçteki değişimi, ΔP_L frekanstan bağımsız yük değişimini, $D\Delta\omega$ ifadesi frekansa bağlı yük değişimini, D ise yük sönüm sabitini ifade etmektedir. Yük sönüm sabitini, frekansta oluşan yüzde değişimin yük üzerindeki yüzde etkisini sayısal olarak belirtir. Tipik olarak bu katsayının değeri %1 ila %2 arasında değişmektedir. Örneğin $D=2$ olarak alınırsa, %1'lik bir frekans artışı yükte yaklaşık %2 oranında azalmaya neden olur. Bu da yük-frekans ilişkisini dengelemek üzere geliştirilecek kontrol stratejilerinde bu katsayının dikkate alınmasını gerekli kılar.



Şekil 3.3. Generatör-yük modeli.

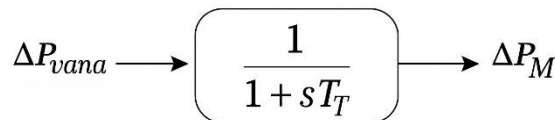
Şekil 3.3'te sunulan transfer fonksiyonu, yük sönümlleme etkisini içeren generatör-yük modelinin dinamik karakteristiğini tanımlamakta olup, sistemin frekans yanıtı ile yük değişimlerine karşı gösterdiği dinamik tepki arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak modellemektedir.

3.3. TÜRBİN MODELİ

Elektrik üretiminde generatöre mekaniksel enerji sağlayan temel bileşenlerden biri tahrik ünitesidir. Bu ünite genellikle buhar türbini ya da hidro türbin olarak karşımıza çıkar. Modelleme sürecinde, buhar türbini sistemlerinde buhar kaynağı ve ısıtma yapısının dinamik tepkileri; hidro türbin sistemlerinde ise cebri boru davranışı dikkate alınmalıdır. Türbinin matematiksel modeli, vana açıklığındaki değişim ile türbinin mekanik çıkış gücü arasındaki dinamik ilişki üzerinden tanımlanır. Özellikle ara ısıtmasız buhar türbinleri için bu ilişki, birinci dereceden ataletli sistem olarak modellenir ve bu modelin transfer fonksiyonu aşağıdaki Denklem (3.19) ile ifade edilir [40].

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_M(s)}{\Delta P_{vana}(s)} = \frac{1}{1 + sT_T} \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)'da T_T , türbinin zaman sabitidir ve sistem tipine göre yaklaşık 0.2 ile 2 saniye arasında değer alabilir.



Şekil 3.4. Türbin modeli.

Transfer fonksiyonu, türbinin ani giriş değişimlerine karşı sergilediği zamana bağlı gecikme ve atalet etkilerini matematiksel olarak modellemektedir. İlgili türbin dinamiği Şekil 3.4'te blok diyagram formunda gösterilmiştir.

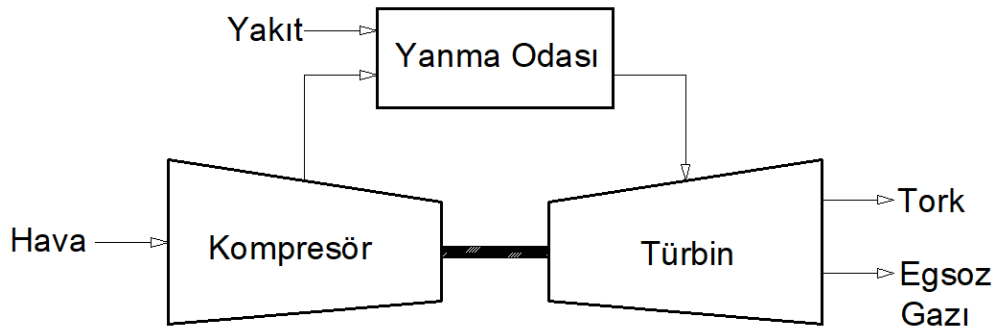
4. YÜK FREKANS KONTROLÜ İÇİN GAZ TÜRBİN MODELİ

GT'li enerji üretim sistemlerinin temel çalışma prensibi, enerji dönüşüm süreçleri ve frekans regülasyonundaki kontrol gereksinimleri ele alınmaktadır. Bu kapsamda öncelikle GT çevrimini oluşturan termodinamik süreçler, ardından şebeke frekans kararlılığı açısından türbin rotor hızı kontrolünün önemi vurgulanmıştır. Daha sonra bu sistemleri dinamik olarak temsil etmede yaygın olarak kullanılan Rowen GT modeli tanıtılmıştır. Modelin yapısal bileşenleri ile kontrol blokları detaylandırılmıştır. Son olarak, Rowen modeli üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiş ve sistemin matematiksel modellenmesinde kullanılan parametreler ile temel denklemler sunulmuştur.

4.1. GAZ TÜRBİNİ ÇEVİRİMİ VE ENERJİ DÖNÜŞÜM SÜRECİ

GT'li enerji üretim sistemleri temel olarak bir kompresör, yanma odası ve türbinden oluşan kapalı çevrimli bir termodinamik sistem olarak çalışmaktadır. Sisteme atmosferik koşullarda alınan hava, ilk olarak kompresör ünitesinde izentropik bir sıkıştırma sürecine tabi tutulur. Bu işlem sonucunda hava basıncı ve sıcaklığı önemli ölçüde artar. Ardından bu sıkıştırılmış hava, uygun kimyasal özelliklere sahip bir yakıt ile yanma odasında karıştırılarak yakılır. Kontrollü olarak gerçekleşen bu yanma süreci, hava-yakıt karışımının sıcaklığını ve entalpisini önemli ölçüde yükseltir.

Elde edilen yüksek enerjili gaz karışımı, türbin ünitesine yönlendirilir. Bu ünite, gazlar izentropik genişleme sürecine girerek türbin rotorunu döndürür ve bu sayede mekanik enerji elde edilir. Üretilen mekanik enerji, türbin miline akupile edilmiş bir senkron generatör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. GT çevriminde gerçekleşen bu enerji dönüşüm süreci, Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilmiştir [55].



Şekil 4.1. Gaz türbini genel şeması.

4.2. FREKANS REGÜLASYONU VE KONTROL İHTİYACI

Elektrik enerjisi üretiminde, şebeke frekansının kararlı bir seviyede tutulması, sistemin sürekliliği ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Şebeke frekansı, generatör rotorlarının senkron dönme hızına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, türbin rotor hızındaki değişimler, doğrudan şebeke frekansında sapmalara yol açar. Özellikle GT’li sistemlerde, ani yük değişimleri türbin miline uygulanan moment dengesini bozarak dönme hızında salınımlara neden olabilir. Bu durum, şebeke frekansında istenmeyen dalgalanmalara ve sistem kararsızlıklarına yol açar [32].

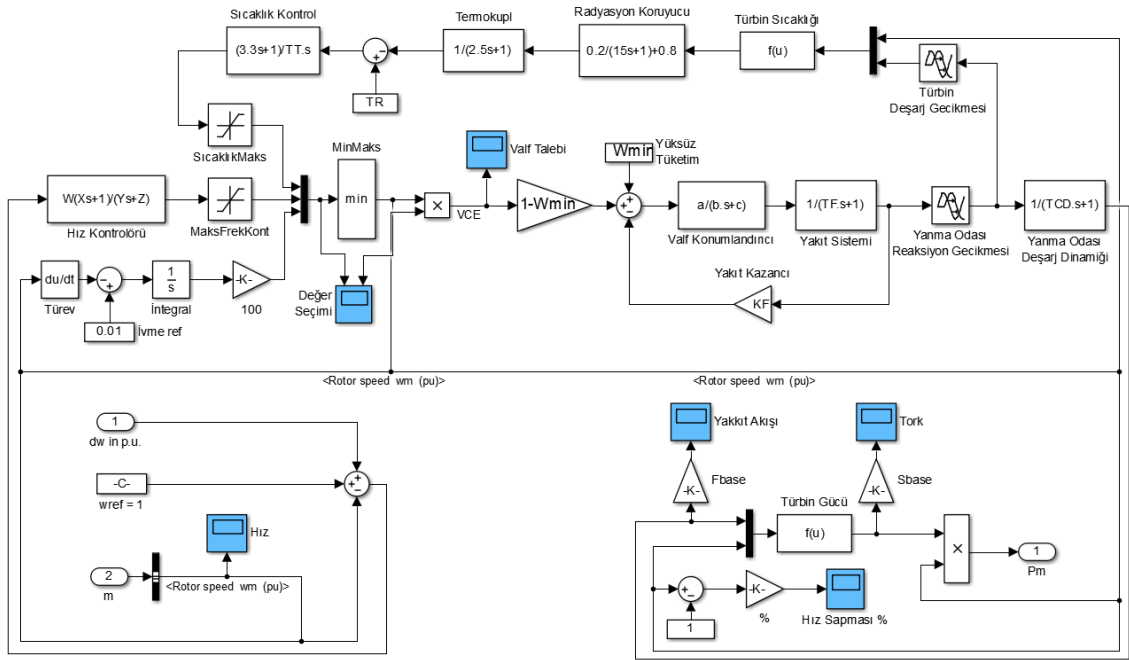
Frekans sapmalarının sınırlandırılması, enerji kalitesi, cihaz güvenliği ve senkron çalışma koşulları açısından zorunludur. Bu nedenle, türbin sistemlerinde hız regülasyonu ve YFK amacıyla etkili bir kontrol mekanizması uygulanması gereklidir. GT sistemlerinde kullanılan kontrolörler, genellikle yakıt akış oranını (W_f) değiştirerek türbin çıkış gücünü ayarlamakta ve böylece türbin rotor hızını sabit tutarak frekans regülasyonunu sağlamaktadır [16].

Modern GT’lerinde bu amaçla genellikle PID tabanlı hız ve yük kontrolörleri kullanılmakta olup, daha gelişmiş uygulamalarda bulanık mantık ve meta-sezgisel yöntemler başarıyla uygulanmıştır [56], [57], [58].

Yapılan çalışmalar, özellikle ani yük değişimlerine karşı hızlı ve kararlı bir geri besleme tepkisi veren kontrol sistemlerinin, hem frekans dalgalanmalarını sönümlemede hem de sistem kararlılığını korumada belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır [59].

4.3. ROWEN GAZ TÜRBİNİ MODELİ VE DİNAMİK YAPISI

GT’lerinin dinamik davranışlarını temsil etmek amacıyla geliştirilen matematiksel modeller, özellikle kontrol sistemlerinin tasarımı ve performans değerlendirmesi açısından büyük öneme sahiptir. Bu bağlamda yaygın olarak kullanılan modellerden birisi de Rowen tarafından geliştirilen tek şaftlı AHGT modelidir. Rowen modeli, hem sistem dinamiklerini hem de kontrol bileşenlerini basitleştirilmiş ama etkili bir yapı içerisinde temsil etmesi nedeniyle endüstride ve akademik çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir [1].



Şekil 4.2. Rowen tarafından basitleştirilmiş gaz türbini MATLAB/Simulink™ modeli.

Şekil 4.2’de Rowen tarafından basitleştirilmiş gaz türbini MATLAB/Simulink™ modelin blok diyagram gösterilmiştir [16], [18]. Rowen GT modeli hız kontrolü, sıcaklık kontrolü ve ivmelenme kontrolü olmak üzere üç ana kontrol döngüsünden oluşmaktadır. Bu kontrol döngüleri, türbinin yük değişimlerine karşı verdiği tepkileri optimize etmek amacıyla birlikte çalışmakta ve her biri sistemin farklı çalışma koşullarında devreye girmektedir. Ancak bu üç kontrol döngüsünün çıkışları doğrudan yakıt sistemine iletilmez. Bunun yerine, kontrol mantığının güvenliğini sağlayan bir karar bloğu olan MDS devreye girer. MDS bloğu hız, sıcaklık ve ivmelenme kontrolörlerinden gelen çıkış sinyalleri arasından en düşük değeri seçerek, yakıt sistemine bu bilgiyi yakıt talep sinyali olarak iletir. Bu yapı türbinin aşırı sıcaklık, yüksek hız veya ani ivmelenme durumlarına karşı korunmasını sağlamaktadır [27].

Rowen modelinde MDS bloğundan çıkan yakıt talep sinyali, türbinin yakıt sistemi üzerinden uygulanır. Yakıt sistemi, valf konumlandırıcı ve aktüatör olmak üzere iki temel bileşenden oluşur.

$$\frac{V_p(s)}{W_d(s)} = \frac{a}{bs+c} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)’de valf konumlandırıcı, kontrol sinyali VCE’ye bağlı olarak çalışmakta ve nihai olarak türbine iletilecek yakıt akış sinyalini (W_f) belirlenmektedir. Bu yapı, türbin çıkış gücünün kontrol edilmesinde temel rol oynamaktadır. a, b ve c valf konumlandırıcı

transfer fonksiyonunun katsayılarıdır. Bu yapı, yakıt valfi açılmasının dinamik gecikmesini modellemektedir [16], [25].

$$\frac{W_f(s)}{V_p(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de valf konumlandırıcı çıkış sinyali, fiziksel olarak yakıtın aktarılmasından sorumlu olan aktüatör ünitesi transfer fonksiyonuna girer. T , yakıt sisteminin zaman sabitidir ve geçici rejim yanıtını tanımlar. Aktüatörün geçici rejime verdiği tepkiyi belirler. Bu yapı, kontrol sinyaline karşılık gerçek yakıt debisinin (W_f) sisteme uygulanmasındaki zaman gecikmesini ve sönümlenme davranışını yansıtır [16], [25].

Rowen GT modelinde dinamik karakteristiklerini temsil eden basitleştirilmiş transfer fonksiyonları Denklem (4.3) ve Denklem (4.4) verilmektedir.

$$F_1 = T_x = T_R - 700(1 - W_f) + 550(1 - N) \quad (4.3)$$

Denklem (4.3) egzoz sıcaklığı (T_x) ile türbin sistem parametreleri arasındaki ilişki, Rowen tarafından önerilen GT modeli kapsamında aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [16]. Yakıt akış sinyali (W_f) ve türbin rotor hızı (N), egzoz sıcaklığının belirleyicisi olarak yer alır. Egzoz sıcaklığının yalnızca yakıt miktarına değil, aynı zamanda rotor hızındaki değişimlere de duyarlı olduğunu ortaya koyar. Özellikle düşük hız ve düşük yük koşullarında egzoz sıcaklığı artışının daha belirgin olması, sıcaklık kontrolünün sadece yüksek yüklerde değil, sistem düşük enerji üretiminde çalışırken de devrede olması gerektiğini göstermektedir.

$$F_2 = 1.3(W_f - W_{fl}) + 0.5(N_{rated} - N) \quad (4.4)$$

Denklem (4.4) türbinin ürettiği torkun sistem girdileri yakıt akış sinyali (W_f) ve türbin rotor hızı (N) olan duyarlılığı da dinamik modeli doğrudan etkilemektedir. Rowen GT modelinde, tork üretimi, nominal rotor hızı (N_{rated}) ve yakıt akış sinyalinin minimum sınırı (W_{fl}) dikkate alınarak doğrusal bir fonksiyon ile temsil edilir [16]. Bu ilişki, sistem kontrolünü sadeleştiren ama aynı zamanda yeterli doğruluk sağlayan bir yaklaşım olarak kabul edilir. Türbin torku hem yakıt artışı hem de hız sapması ile pozitif yönde artmaktadır. W_f 'nin artması daha fazla enerji girdisi sağladığı için torku artırırken, gerçek hızın nominal değerden düşük olması durumunda da sistem, hız kaybını telafi etmek

amacıyla tork üretimini artırır. Bu, kontrol sisteminin yük dengeleme ve frekans regülasyonundaki rolünü güçlendiren önemli bir geri besleme mekanizmasıdır [59].

Gaz türbininin gerçek hızı, rotor zaman sabiti (τ_1) tarafından belirlenir. Rotor hızındaki değişim, sistemin atalet karakteristiği ile doğrudan ilişkilidir. Bu dinamik davranış, rotor zaman sabiti ile modellenmekte olup, sistemin hız regülasyonundaki sönümleme karakteristiğini belirleyici bir rol oynar. Düşük τ_1 değerleri, hızlı fakat kararsız tepkilere neden olurken; yüksek τ_1 değerleri, daha yavaş ancak daha kararlı sistem yanıtları üretir. Bu nedenle, τ_1 parametresi, sistemin dinamik performansı açısından kritik bir tasarım değişkeni olarak dikkatle seçilmelidir [16].

4.4. ROWEN GAZ TÜRBİNİ MODELİ KULLANIMI

Rowen GT modeli, enerji sistemlerinde YFK, GT dinamik simülasyonları ve OÜK gibi birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelin basitleştirilmiş yapısı, hem gerçek zamanlı kontrol analizlerine olanak tanımakta hem de karmaşık sistem dinamiklerinin yeterli doğrulukla temsil edilmesini sağlamaktadır [16].

Özellikle yenilenebilir enerji entegrasyonunun arttığı modern güç sistemlerinde, GT'leri sistem esnekliği ve yedek kapasite açısından önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda, Rowen GT modeli, değişen şebeke koşullarına karşı türbin tepkisinin analizinde tercih edilmektedir. Bu çalışmalar, hem klasik PID denetleyicilerin hem de meta-sezgisel yöntemlerin performanslarının karşılaştırılmasında Rowen GT modelinin bir temel yapı olarak kullanılabileceğini göstermektedir [60], [61].

Ayrıca, bazı araştırmacılar modelin doğruluk sınırlarını inceleyerek model iyileştirmelerine gitmiştir. Rowen GT modeline türbin çıkış sıcaklığı kontrolü ve yakıt gecikmesi etkilerini ekleyerek modelin dinamik doğruluğunu artırmayı hedeflemiştir. Bu tür güncellemeler, özellikle geçici rejim analizlerinde sistem tepkilerinin daha gerçekçi temsil edilmesine olanak tanımaktadır [62].

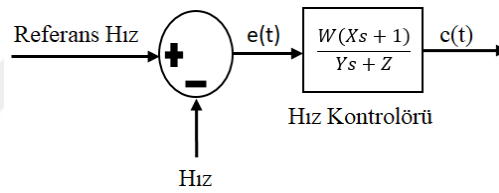
Rowen GT modeli, hem yapısal sadeliği hem de genişletilebilir yapısı sayesinde hem akademik çalışmalar hem de endüstriyel uygulamalar için güçlü ve güvenilir bir referans model olarak konumlanmaktadır.

4.5. GAZ TÜRİNİNDE KONTROL BÖLÜMLERİ

Bu bölümde GT'li enerji üretim sistemlerinde kullanılan üç temel kontrol katmanı olan hız, sıcaklık ve ivmelenme kontrolörlerinin işlevleri, matematiksel modelleri ve sistem üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Ayrıca, bu kontrol katmanlarının hiyerarşik entegrasyonu ve MDS karar mekanizmasının çalışma prensibi açıklanmıştır.

4.5.1. Gaz Türbininde Hız Kontrolörü

GT'li enerji üretim sistemleri, hızlı yük değişimlerine uyum sağlayabilme yetenekleri, yüksek güç yoğunlukları ve çevrim verimlilikleri sayesinde modern enerji altyapılarında kritik bir role sahiptir. Ancak bu sistemlerin şebeke frekans kararlılığına olan katkısı, doğrudan hız kontrol mekanizmasının performansına bağlıdır. Özellikle enterkonnekte olmayan ya da frekans desteği sınırlı üretim kaynaklarında, türbin rotor hızının belirlenen sınırlar içinde kalması, şebeke frekansının nominal değerden sapmaması açısından hayati öneme sahiptir.



Şekil 4.3. Hız kontrolörünün transfer fonksiyonu modeli.

Şekil 4.3'te hız kontrolörünün transfer fonksiyonu modeli verilmiştir. Transfer fonksiyonunda W,X,Y ve Z katsayıları kontrolörün dinamik parametrelerini tanımlar. Bu yapı bir öncül kontrol sistemi niteliğinde olup, sistemin frekans cevabını ve geçici rejim davranışlarını şekillendirmekte kullanılır. Özellikle X katsayısı öncül kontrol etkisini belirlerken, Y ve Z katsayıları zaman sabiti ve sönüm oranı gibi önemli dinamik büyüklükleri temsil eder.

$$\frac{c(s)}{e(s)} = \frac{W(Xs+1)}{Ys+Z} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'de GT'lerinde hız kontrolü, türbinin gerçek hızı ile referans hız arasındaki farktan doğan hata sinyali (e(t)) esas alınarak gerçekleştirilir. Bu hata sinyali, hız kontrolörünün girişini oluşturarak sistemde düzeltici bir kontrol sinyali üretir. Elde edilen çıkış sinyali (c(t)), türbinin yakıt sistemi üzerine etki ederek yakıt akış sinyalini ayarlar ve böylece türbinin mekanik gücü kontrol altına alınır.

GT'lerinin kendi kendine çalışmayı sürdürebilmesi için nominal yakıt akışının yalnızca yaklaşık %23'ü yeterlidir. Bu değer, sistemin yük çekmediği durumlarda bile kararlı çalışmasını sağlayan yakıt akış minimum sinyalidir ve bu açıdan kontrolör tasarımı için kritik bir sınır koşuludur. Bu değer, hız kontrolörünün başlangıç parametreleri belirlenirken dikkate alınan önemli bir fiziksel kısıttır [16].

Hız kontrolörünün etkili çalışabilmesi için yalnızca kontrol devresi değil, aynı zamanda yakıt sisteminin de dinamik karakteristiklerinin doğru şekilde modellenmesi gerekir. Yakıt sistemi, yakıt aktüatörü ve valf konumlandırıcı olmak üzere dinamik kontrol sürecinde yakıt akışını hassas biçimde düzenleyen iki temel alt bileşeni içermektedir. Denklem (4.1) yakıt aktüatörü ve Denklem (4.2)'de valf konumlandırıcı detaylı olarak anlatılmıştır [16].

Hız kontrolörlerinin tasarımı yalnızca sistemin geçici yanıtlarını düzenlemekle kalmaz, aynı zamanda kararlılığı güvence altına almak amacıyla da gerçekleştirilir. Bu kapsamda kontrolör parametreleri belirlenirken sistemin kutup yerleşimi, doğal frekansları, geçici rejim süresi, aşım miktarı ve kalıcı durum hatası gibi performans göstergeleri dikkate alınır. Bu analizler doğrultusunda kontrol sisteminin frekans cevabı detaylı biçimde değerlendirilir ve yeterli faz ve genlik marjları sağlanarak kararlılık koşulları yerine getirilir. Bu çerçevede geliştirilen modeller, PID gibi klasik denetleyicilerin yanı sıra, bulanık mantık, adaptif kontrol veya meta-sezgisel temelli kontrolörlerle de bütünleştirilmeye elverişli esnekliğe sahiptir.

GT hız kontrolü, yalnızca türbinin kendi iç kararlılığını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda enerji sistemlerinin frekans regülasyonu açısından merkezi bir bileşendir. Rowen GT modeli kontrol sisteminin doğruluğunu artırırken, aynı zamanda sistematik tasarım ve analiz süreçlerini de destekler. Aktüatör ve valf konumlandırıcı gibi bileşenlerin sistem modeli içine dahil edilmesiyle elde edilen bütüncül yapı, hem klasik kontrol kuramına uygunluk göstermekte hem de çağdaş denetim stratejilerine entegre edilebilir bir temel sunmaktadır.

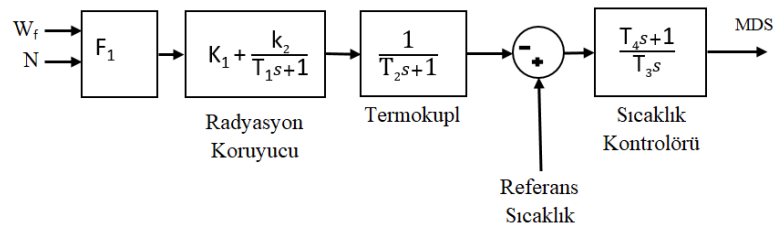
4.5.2. Gaz Türbininde Sıcaklık Kontrolörü

GT'li enerji üretim sistemlerinde sıcaklık kontrolü, yalnızca performans yönetimi değil, aynı zamanda türbinin yapısal bütünlüğü ve uzun ömürlü çalışmasının sağlanması açısından da kritik bir kontrol fonksiyonudur. Özellikle YFK kapsamında, sistemin şebekeye bağlı iken hızlı tepki vermesi gereken ani yük artışları sırasında, türbine

gönderilen yakıt akışı seviyelerinde ani yükselişlere yol açar. Bu artış, yanma tepkimelerini yoğunlaştırarak egzoz sıcaklığının kısa sürede sınır değerlere ulaşmasına neden olabilir. Bu durum, hem sistem kararlılığını hem de türbinin kanatları ve gövdesi gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan kritik bileşenlerin ömrünü kısaltabilir veya yapısal bozulmalara neden olabilir [16].

Egzoz sıcaklığında meydana gelen kontrolsüz yükselmeler, özellikle türbin kanatları ve gövde yapısı gibi yüksek sıcaklığa doğrudan maruz kalan bileşenlerin mekanik dayanımını zayıflatabilir. Sıcaklık limitlerinin aşılması durumunda, termal genleşme, gerilme birikimi, mikroyapısal bozulmalar, yorulma ve mikro çatlak oluşumu gibi geri dönüşü zor hasarlar ortaya çıkabilir. Bu etkiler yalnızca kısa vadeli performans kayıpları değil, aynı zamanda uzun vadeli bakım maliyetlerini ve arıza oranlarını da artırır. Dolayısıyla sıcaklık kontrolü, yalnızca bir kontrol mühendisliği konusu olmaktan öte; malzeme bilimi, termodinamik ve işletme güvenliği disiplinlerini kapsayan bütüncül bir mühendislik problemidir [16].

GT'lerinde sıcaklık kontrol sistemi, genellikle türbin egzoz sıcaklığının önceden belirlenmiş bir referans değerin altında tutulmasını hedefler. Referans değeri, türbinin tasarımına ve kullanılan malzemelerin sıcaklık toleransına göre üretici tarafından belirlenir. Gerçek egzoz sıcaklığı, egzoz kanalına yerleştirilen sıcaklık sensörlerinden ve termokupullardan alınan ölçüm verileriyle belirlenir. Ölçülen sıcaklık değeri ile referans değeri arasındaki farktan doğan hata sinyali, sıcaklık kontrolörünün girişini oluşturur ve kontrol döngüsünü kapalı çevrimde işler hale getirir. GT egzoz sıcaklığı ile türbin sistem parametreleri arasındaki ilişki Denklem (4.3)'de detaylı anlatılmıştır [16].



Şekil 4.4. Sıcaklık kontrolörünün transfer fonksiyonu modeli.

Şekil 4.4'te Rowen GT modeli sıcaklık kontrolörünün transfer fonksiyon modeli verilmiştir. Egzoz sıcaklığı ölçümleri sadece gazın kinetik sıcaklığından değil, aynı zamanda türbin yüzeylerinden yayılan kızılötesi radyasyonun etkilerinden de etkilenmektedir. Bu nedenle sıcaklık ölçüm sistemleri, doğrudan ölçüm sağlayan

termokupul verileriyle birlikte, radyasyon düzeltmesi yapan sinyal işleme bloklarıyla desteklenir. Bu çift yapılı ölçüm sistemi, kontrol döngüsünün hem doğruluğunu artırmakta hem de sıcaklık sapmalarına karşı gecikmesiz tepki verilmesini sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde hem yanlış müdahaleler engellenir hem de gerçek tehlike anlarında kontrol eylemi gecikmeden devreye girer. Sıcaklık kontrolörünün dinamik davranışı, referans sıcaklık ile termokupul tarafından ölçülen egzoz sıcaklığı arasındaki farkı temel alır ve bu fark üzerinden üretilen hata sinyali, birinci dereceden transfer fonksiyon modeli ile kontrol edilir. Kontrolörün çıkış sinyali, hız ve ivmelenme kontrolörlerinin çıkışlarıyla birlikte MDS bloğuna yönlendirilir. MDS bloğu, o anda sistem için en kritik sınırı temsil eden kontrol sinyalini seçerek yakıt sistemine uygular. Bu yapı, sistemin birden fazla sınıra aynı anda yaklaşması durumunda önceliklendirme yaparak aşırı sıcaklık artışları gibi potansiyel tehlikeleri etkin biçimde önler [16], [63].

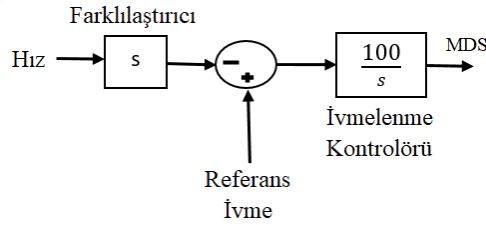
Türbin sıcaklık kontrolü, yalnızca anlık yük değişimlerine verilen tepkilerin düzenlenmesini değil, aynı zamanda türbinin uzun vadeli performansının ve yapısal ömrünün korunmasını da hedefler. Bu kontrol katmanı, aşırı ısınma risklerini minimize ederek sistemin arıza oranını düşürmekte, bakım aralıklarını uzatmakta ve genel işletme verimliliğini artırmaktadır. Özellikle yük geçişlerinin yoğun yaşandığı çalışma senaryolarında, sıcaklık kontrolörünün doğru çalışması sistem kararlılığı ve enerji güvenliği açısından belirleyici bir faktördür.

4.5.3. Gaz Türbininde İvmelenme Kontrolörü

GT'li enerji üretim sistemlerinde ivmelenme kontrolü, yalnızca performans düzeyinde optimizasyon sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda rotor ve generatör gibi mekanik-elektriksel sistem bileşenlerinin yapısal güvenliğini teminat altına almak için vazgeçilmez bir kontrol katmanıdır. Özellikle sistemin ilk çalıştırma aşamalarında ya da ani yük taleplerinin karşılanması sırasında rotorun ivmelenme oranında oluşan ani değişimler, türbin rotoruna bağlı generatörlerin sargılarında, bağlantı noktalarında ve mil-disk yapılarında elektromekanik stres ve rezonans risklerini doğurabilir. Ayrıca bu ani hızlanma, türbinin termomekanik dengesini bozarak sıcaklık kontrol sınırlarının aşılmasına ya da kontrolcü çıkışlarının doygunluğa ulaşmasına neden olabilir. Bu bağlamda, ivmelenme kontrolörleri, türbin rotorunun hız değişimini sınırlı ve güvenli bir ivme aralığında tutmak üzere tasarlanır [16].

Rowen tarafından geliştirilen klasik GT modelindeki ivmelenme kontrolörü, hız ve sıcaklık kontrolörleri ile entegre biçimde çalışır. Bu üçlü yapı, sistemin hem geçici hem de sürekli çalışma rejimlerinde kararlı ve emniyetli bir biçimde çalışmasını mümkün kılar. İvmelenme kontrolü, rotorun hız türevi olan ivme sinyalini sürekli olarak izler. Bu değer, belirlenen referans ivme limiti ile karşılaştırılarak hata sinyali oluşturur. Elde edilen hata, yakıt akış sinyalini sınırlayacak şekilde düzeltici bir çıkışa dönüştürülür. Bu sayede rotor, ani hızlanmalardan korunur ve türbinin mekanik güvenliği sağlanır.

İvme kontrolörünün işleyiş süreci, türbin rotor hızının zamana göre türevinin alınmasıyla başlar. Bu türev, kontrol sisteminde genellikle bir diferansiyel blok veya türevleyici yapı kullanılarak elde edilir. Ortaya çıkan ivme sinyali, daha önceden belirlenmiş bir referans ivme değeri ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda elde edilen hata sinyali, PI yapıda modellenmiş ivmelenme kontrolörüne iletilir ve burada üretilen çıkış sinyali, yakıt sistemine sınırlayıcı bir müdahale olarak uygulanır. Bu sinyal daha sonra MDS bloğuna gönderilir ve diğer kontrolörlerle birlikte değerlendirilir. Bu yapının amacı, sistemin ani yük geçişleri ve başlatma senaryolarında kararlı kalmasını sağlamak ve yakıt sisteminin aktüatör ve valf bileşenlerinin aşırı tepkilere maruz kalmasını önlemektir [16].



Şekil 4.5. İvme kontrolörünün transfer fonksiyonu modeli.

Şekil 4.5'te ivmelenme kontrolörünün transfer fonksiyonel modelidir. Genellikle PI yapıda tanımlanır. Bu model, hem hata büyüklüğüne göre anlık müdahale, hem de zaman içinde oluşan hataların birikimine karşı bütünsel bir düzeltme sunar. Bu yapı, rotorun hızlanma davranışını kontrol altına almakla birlikte, sistemde yakıt tepkisinin kontrol doygunluğuna ulaşmasını da engelleyerek geçici rejimlerde güvenli bir yanıt sağlar [63].

Söz konusu kontrol yapısı, sistemin genel kontrol mimarisi içinde MDS ile entegre biçimde çalışır. Hız, sıcaklık ve ivmelenme kontrolörleri ayrı ayrı çalışan sistemler olsa da, ürettikleri kontrol sinyalleri MDS bloğuna aktarılır. Bu blok, sistemin o andaki en kritik sınır koşuluna karşılık gelen en düşük kontrol sinyalini seçerek yakıt sistemine uygular. Örneğin yük artışı söz konusuysa hız kontrolörü öncelikli olurken, egzoz

sıcaklığı belirlenen eşiği aşarsa sıcaklık kontrolü devreye girer. Ani başlatma veya kontrolsüz hızlanma tespit edilirse, ivmelenme kontrolörü sistemin öncelikli kontrolörü haline gelir. Bu esnek ve hiyerarşik yaklaşım sayesinde, sistem hem teknik güvenlik açısından hem de enerji verimliliği açısından optimum düzeyde çalışır [16].

İvmelenme kontrolörünün endüstriyel uygulamaları, Rowen'in (1983) geliştirdiği GT modeli temelinde şekillenmiştir ve özellikle General Elektrik markalı GT sistemlerinde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Günümüzde bu ivmelenme kontrolörü, yalnızca GT ilk devreye alma prosedürlerinde değil; aynı zamanda anlık frekans dengesizliklerine yanıt veren hızlı yanıt sistemlerinde, mikro şebeke yönetimi, senkronizasyon öncesi hız sınırlamaları ve karanlık başlatma gibi özel uygulama alanlarında da etkin biçimde kullanılmaktadır. Ayrıca kestirimci bakım algoritmaları çerçevesinde sistemdeki ivmelenme sinyalleri, mekanik yorgunluk ve zorlanma tespiti açısından da önemli veri kaynaklarıdır [16].

İvmelenme kontrolü, yalnızca rotor hızını sınırlamakla kalmaz; aynı zamanda sistemin dinamik kararlılığını ve yapısal bütünlüğünü koruyarak, modern enerji sistemlerinde güvenli ve verimli bir işletim ortamı sunar.

4.6. ADA MODUNDA GAZ TÜRBİNLİ SİSTEMLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI VE KONTROL STRATEJİLERİ

GT generatörleri yalnızca enterkonnekte sistemlere bağlı olarak değil, aynı zamanda şebekeden izole “Ada Modu” koşullarında da kesintisiz enerji sağlamak üzere tasarlanmış esnek üretim kaynaklarıdır. Şebekeye bağlı paralel modda, GT’ler sabit güç faktörüyle çalışmakta ve frekans regülasyonu için hız düşümüne dayalı kontrol stratejileri uygulanmaktadır. Bu yapı, güçlü enterkonnekte sistemler içinde yük paylaşımının istikrarlı biçimde yürütülmesini mümkün kılar.

Ancak sistemin şebekeden izole edildiği ada modunda, frekans ve gerilim regülasyonu doğrudan GT tarafından ayarlanır. Bu durumda generatör, sabit frekans moduna geçer ve sistem frekansı nominal değerde sabit tutulur. Aynı anda otomatik gerilim regülatörleri devreye girerek, gerilim seviyesini sabit tutar [64]. Bu çift yönlü kontrol yapısı yalnızca enerji arzının sürekliliğini değil, aynı zamanda gerilim dengesizlikleri, harmonik bozulmalar ve yük profilinin değişkenliğine karşı da sistem kararlılığını sağlar [65].

Ada moduna geçişin kontrol stratejileri açısından güvenli şekilde yürütülmesi, şebekeden

ayırılma ya da tekrar bağlanma durumunun zamanında ve doğru şekilde algılanmasını gerektirir. Bu bağlamda geliştirilen hibrit ada tespit algoritmaları, hem aktif hem de pasif yöntemleri bir arada kullanarak algılanamayan bölge sorununu minimize eder [65].

Özellikle IEEE 1547.4 standardı, bu tür sistemlerde yeniden senkronizasyon, yük ayrıştırma ve yumuşak başlatma gibi işlevlerin uygulanmasını önererek işletme emniyetini artırmayı hedeflemektedir. İstemli ada çalışmasının planlanması ve uygulanmasına yönelik detaylı teknik düzenlemeler bu standartta tanımlanmıştır [64].

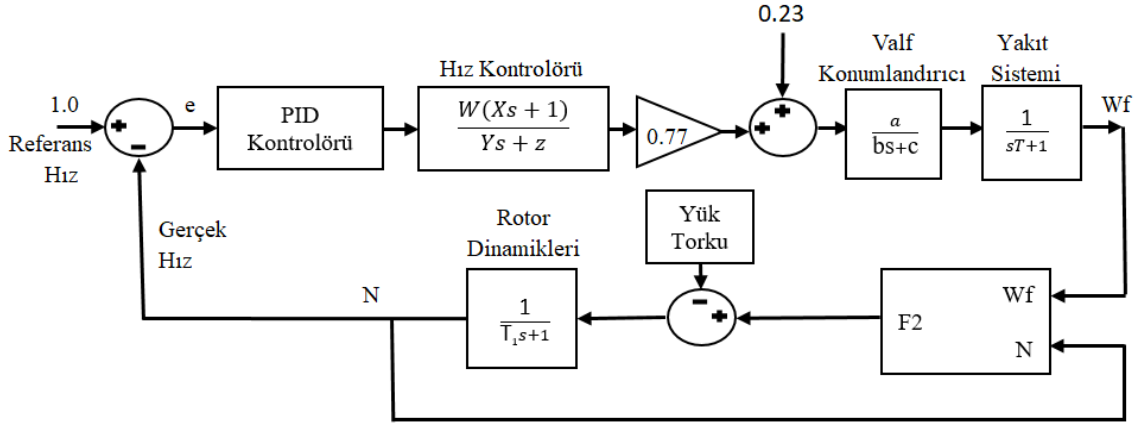
GT'lerin ada modundaki performansı; yük geçişlerine yanıt süresi, yedek güç rezerv kapasitesi ve rotor ataletine bağlı frekans kararlılığı gibi faktörlere doğrudan bağlıdır. Kritik yüklerin beslendiği uygulamalarda, generatörlerin kısa süreli gerilim veya frekans sapmalarına karşı kararlı ve hızlı yanıt verebilmesi, sistem güvenliği ve enerji kalitesi açısından zorunludur [64].

Ada modunda çalışan GT sistemleri yalnızca acil durum çözümleri değil, aynı zamanda mikro şebekeler, adacıklaştırılmış enerji adaları ve kojenerasyon tesislerinde yüksek güvenilirlikli birincil üretim kaynakları olarak öne çıkmaktadır. Bu tür sistemlerde kullanılan PID tabanlı hız ve frekans kontrol stratejileri, Rowen GT modeli ile entegre edildiğinde, sistemin geçici rejimlerde kararlılığını ve sürekliliğini önemli ölçüde artırmaktadır [65].

4.7. ROWEN'İN BASİTLEŞTİRİLMİŞ GAZ TÜRBİNİ MODELİ VE HİYERARŞİK KONTROL YAPISI

Rowen'in (1983) yılında önerdiği basitleştirilmiş tek şaftlı AHGT modeli, özellikle hız, sıcaklık ve ivmelenme gibi temel kontrol katmanlarını kapsayan yapısıyla endüstriyel ölçekte dinamik modelleme ve kontrol uygulamaları açısından önemli bir referans sunmaktadır. Bu yarı-ampirik model hem geçici hem de sürekli rejim koşullarında GT sisteminin temel davranışlarını yüksek doğrulukla temsil edebilmekte ve kontrolör tasarımı için analitik bir temel sağlamaktadır. Söz konusu model, türbinin referans hız değerine göre sapmasını gösteren hata sinyali üzerine kuruludur ve bu hata sinyali, özellikle YFK bağlamında sistemin frekans kararlılığına ulaşma sürecini temsil eder. Modelin merkezinde yer alan hız kontrolörü, sistemin ana düzenleyici katmanıdır; sıcaklık ve ivmelenme kontrolörleri ise yalnızca özel koşullar altında aktif hâle gelmektedir. Egzoz sıcaklığı sınır aşımalarında sıcaklık kontrolörü, aşırı ivmelenme

durumlarında ise ivmelenme kontrolörü devreye girerek sistem güvenliğini temin eder. Rowen'in önerdiği bu yapı, Şekil 4.6'da gösterilen formda basitleştirilmiş blok diyagram olarak da uygulanabilmektedir [16], [63].



Şekil 4.6. AHGT basitleştirilmiş Rowen gaz türbin modeli.

Şekil 4.6'da verilen F_2 türbin torkunun değeri, Denklem (4.4) kapsamında yakıt akış sinyali (W_f), minimum yakıt akışı sınırı (W_{fl}), türbin rotor hızı (N) ve nominal rotor hızı (N_{rated}) gibi sistem değişkenlerine duyarlılığını göstermektedir. Bu ilişki Rowen modeli temel alınarak doğrusal bir yapı ile ifade edilmiştir. Şekil 4.6'da hız kontrolörünün başlangıç parametreleri, yakıt akış sinyali (W_f) 0.77 p.u. ve minimum yakıt akışı sınırı (W_{fl}) 0.23 p.u. olarak tanımlanmıştır [16].

Bu üç kontrol katmanından gelen sinyaller, MDS olarak adlandırılan karar bloğunda birleştirilir ve en düşük değeri taşıyan sinyal türbinin yakıt sistemine uygulanır. Böylece sistem, hangi sınır daha kritikse onu önceliklendirerek güvenli ve istikrarlı bir şekilde çalışmasını sürdürür. Bu hiyerarşik kontrol yapısı, önleyici bir mantıkla çalışmakta ve yalnızca kontrol sınırları aşıldığında ilgili kontrolörün etkin hâle gelmesini sağlamaktadır. GT sistemlerinde bu yapı, başta ani yük değişimleri olmak üzere tüm dinamik rejimlerde sistemin kararlılığını destekleyen etkili bir strateji olarak öne çıkar.

Sistemin frekans kararlılığı üzerindeki etkisini en üst düzeye çıkarmak amacıyla, bu model çerçevesinde PID denetleyici parametrelerinin optimizasyonu büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada önerilen yaklaşımla, oransal (K_p), integral (K_i) ve türev (K_d) kazanç PID parametreleri iki aşamalı bir optimizasyon süreciyle belirlenmiştir. İlk aşamada, literatürde yaygın olarak kullanılan sezgisel algoritmalar olan GA, BTA ve PSO teknikleri kullanılmıştır. Bu algoritmalar, çok boyutlu çözüm uzaylarında yerel minimumlara takılmadan global optimum çözüme ulaşmayı hedefler. İkinci aşamada ise,

literatüre katkı sağlaması amacıyla geliştirilen yenilikçi bir algoritma olan YA optimizasyon yöntemi devreye alınmıştır. Bu algoritma, dinamik adım büyüklüğü güncellemeleri, uyarlanabilir öğrenme katsayıları ve yerel/evrensel arama fazlarının dengeli kullanımı gibi üstün stratejilerle PID performansını artırmak üzere tasarlanmıştır [66].

Elde edilen bulgular, YA algoritmasıyla optimize edilen PID parametrelerinin klasik sezgisel algoritmalara kıyasla daha hızlı yakınsama, daha düşük hata oranı ve daha kararlı frekans regülasyon performansı sunduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma kapsamında kullanılan Rowen GT modeli hem kontrol mühendisliği hem de enerji sistemlerinin dinamik analizine yönelik yeterli doğrulukta sonuçlar sunması nedeniyle, DGÇS içinde GT'li yapıların modellenmesinde sıkça tercih edilen referans modellerden biri olmaya devam etmektedir.

5. YÜK FREKANS KONTROLÜNDE PID KONTROLÜ VE PERFORMANS İNDEKSLERİ

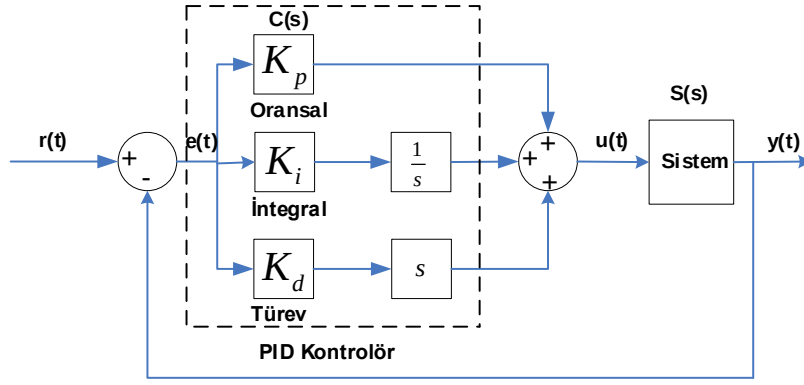
Bu çalışmada kullanılan GT'li güç sistemlerinde meydana gelen frekans dalgalanmalarının bastırılması ve sistem kararlılığının sağlanması amacıyla, geleneksel PID denetleyici yapısı tercih edilmiştir. PID denetleyiciler, sahip oldukları oransal (K_p), integral (K_i) ve türev (K_d) kazanç PID parametreleri sayesinde sistemin hem hızlı hem de kararlı bir şekilde yanıt vermesini mümkün kılmaktadır. Matematiksel olarak sade bir yapıya sahip olmaları ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılıyor olmaları, PID denetleyicileri güç sistemlerinde etkili bir kontrol çözümü haline getirmektedir.

Bu çalışmada, PID denetleyicinin kazanç parametreleri; GA, PSO, BTA ve YA meta-sezgisel optimizasyon yöntemleriyle ayarlanmış ve bu sayede kontrol performansı iyileştirilmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucunda, optimizasyon destekli PID denetleyicinin maksimum aşım, yükselme süresi, tepe süresi ve yerleşme süresine ilişkin performans indeksleri ISE, IAE, ITAE, ITSE açısından sistem performansını anlamlı ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, geleneksel PID denetleyici yapısının meta-sezgisel algoritmalarıyla desteklenmesi durumunda GT'li güç sistemlerinde frekans kontrolü açısından hem etkili hem de güvenilir bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır.

5.1. PID DENETLEYİCİ

PID denetleyici yapısı, GT'li güç sistemlerinde frekans kararlılığının sağlanmasında temel bir rol üstlenmektedir. Meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarıyla birlikte kullanıldığında daha etkili ve kararlı bir kontrol performansı sunmakta; endüstriyel uygulamalarda ise yaygın ve güvenilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

GT sistemlerinde frekans dalgalanmalarının kontrolü amacıyla bu çalışmada geleneksel PID denetleyici yapısı tercih edilmiştir. PID denetleyicinin temel yapısı ve bileşenleri Şekil 5.1'de gösterilmekte olup, sistem K_p , K_i ve K_d olmak üzere üç temel parametreye sahiptir [67], [68], [69], [70].



Şekil 5.1. PID denetleyici yapısı.

Şekil 5.1’de sunulan kapalı çevrim yapısında PID denetleyici, sistemin çıkışının istenen referans değere (r) ulaşmasını sağlamak amacıyla hata sinyalini (e) kullanmaktadır. Bu hata sinyali, referans değer ile sistemin gerçek çıkış değeri (y) arasındaki fark olarak tanımlanmakta olup, Denklem (5.1) ile ifade edilmektedir.

$$e(t) = R(t) - Y(t) \quad (5.1)$$

PID denetleyici, hata sinyalinin oransal, integral ve türevsel bileşenlerini dikkate alarak kontrol sinyalini üretir. Bu bileşenlerin matematiksel ifadesi Denklem (5.2) ile verilmektedir.

$$G_{PID}(S) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5.2)$$

Denetleyici çıkışı $u(t)$, oransal, integral ve türevsel bileşenlerin toplamı olarak tanımlanır ve bu ilişki Denklem (5.3)’te ifade edilir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.3)$$

Kontrol sinyali $u(t)$, sistemin girişine uygulanarak yeni çıkış $y(t)$ elde edilir. Bu çıkış, algılayıcılar aracılığıyla ölçülür, geri besleme döngüsüne dahil edilerek referans değer ile karşılaştırılır ve hata sinyali güncellenir. Bu döngüsel süreç, sistemin dinamik tepkisinin sürekli izlenmesini ve istenen performans indekslerine uygun şekilde kontrol edilmesini sağlar [67]

5.2. YÜK FREKANS KONTROLÜNDE KULLANILAN AMAÇ FONKSİYONLARI

GT sistemlerinde YFK'nın iyileştirilmesi, kontrol sistemlerinin başarımını ölçen performans indekslerine dayalı amaç fonksiyonları oluşturulması esastır. Bu bağlamda, zaman integrali temelli performans indeksleri kontrol sistemlerinin etkinliğini nicel olarak değerlendirmek amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Literatürde en sık kullanılan performans indeksleri arasında ITAE, IAE, ITSE ve ISE öne çıkmakta olup, bu indekslere dayalı anlamlı bir amaç fonksiyonları oluşturmak, kontrol parametresi optimizasyon yaklaşımlarının etkinliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada da literatürde frekans hata davranışını ölçmek amacıyla kullanılan bu performans indeksleri yeniden düzenlenmiş ve GT sistemlerinde YFK'nın iyileştirilmesi sürecinde değerlendirilmiştir. İlgili indeksler, kontrol sistemlerinin dinamik performansını ölçme ve iyileştirme süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle sistemin hata değerlerini zaman içinde minimize etmeye yönelik olarak, denetleyici verimliliğini artırmada temel değerlendirme ölçütleri olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca, tek şaftlı AHGT'lerinin geçici ve kararlı durum davranışını iyileştirmek amacıyla, PID denetleyici kazançlarının belirlenmesinde bu performans indekslerinden yararlanılmıştır. ISE, IAE, ITSE ve ITAE gibi indeksler sayesinde PID kazançları optimize edilerek sistemin dinamik yanıtı iyileştirilmiştir.

Sonuç olarak, performans indeksleri GT sistemlerinde YFK iyileştirme sürecinde hem enerji verimliliği hem de kararlı sistem davranışı açısından büyük önem arz etmektedir [24], [25], [29], [30], [71]. Çalışmamızda kullanılan amaç fonksiyonları performans indeksi (J) ayarlama indeksleri Denklem (5.4)-(5.7)'de verilmektedir. Denklem (5.4)-(5.7) arasında tanımlanan e hata fonksiyonu, türbin rotor hızı ile referans hız arasındaki hatayı ifade ederken, t değerlendirme süresini göstermektedir.

5.2.1. Hata Karelerinin Toplamı

ISE, hata sinyalinin karesinin zaman boyunca integralinin alınmasıyla tanımlanan bir performans indeksidir. Bu indeks, büyük hata değerlerine daha yüksek ağırlık tanınmasıyla öne çıkar ve sistemin büyük hatalara karşı duyarlılığını yansıtır. ISE, hata genliğinin büyüklüğüne duyarlıdır ve özellikle büyük hata değerlerini minimize etmeye odaklanır. Denklem (5.4)'te ISE formülü verilmektedir.

$$J_{ISE} = \int e^2 dt \quad (5.4)$$

5.2.2. Zaman Ağırlıklı Hata Karelerinin Toplamı

ITSE, hata sinyalinin karesi ile zaman çarpımının zamana göre süreklilik içinde toplandığı bir performans indeksidir. Bu indeks, hata bileşenlerini zamanla orantılı olarak değerlendirerek, geç meydana gelen hatalara daha yüksek düzeyde önem verir. Böylece sistemin erken dönemdeki hatalara karşı daha duyarlı olması sağlanır ve hızlı bir dinamik yanıt ortaya çıkarılır. Denklem (5.5)'te ITSE formülü verilmektedir.

$$J_{ITSE} = \int (e^2) t dt \quad (5.5)$$

5.2.3. Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı

ITAE, hata sinyalinin mutlak değeri ile zaman çarpımının zamana göre sürekli toplandığı bir performans indeksidir. Bu indeks, hata büyüklüklerini zaman ilerledikçe artan bir önemle değerlendirir ve büyük hata değerlerinin erken safhalarda azaltılmasına yönelik bir sistem tepkisi oluşturmayı amaçlar. Denklem (5.6)'de ITAE formülü verilmektedir.

$$J_{ITAE} = \int |e| t dt \quad (5.6)$$

5.2.4. Mutlak Hatanın Toplamı

IAE, hata sinyalinin mutlak değerinin zamana göre sürekli toplandığı bir performans indeksidir. Bu indeks, hata sinyalinin büyüklüğünü temel alarak değerlendirme yapar ve hata süresince herhangi bir zamansal ağırlıklandırma veya büyük hata değerlerine ayrıcalıklı bir vurgu uygulamaz. IAE, kontrol sisteminin toplam hata miktarını azaltmaya odaklanır. Denklem (5.7)'de IAE formülü verilmektedir.

$$J_{IAE} = \int |e| dt \quad (5.7)$$

Bu performans indeksleri, kontrol sistemlerinin etkinliğini değerlendirmek ve iyileştirmek amacıyla kullanılan sayısal kriterlerdir. ISE, büyük genlikli hata bileşenlerine daha yüksek ağırlık vererek özellikle büyük sapmaların etkisini azaltmayı hedeflerken; IAE, toplam hata miktarını temel alır ve sistemin genel doğruluğunu yansıtır. ITSE ve ITAE ise hata davranışının zaman içerisindeki evrimine odaklanarak, erken dönemdeki hata bileşenlerinin sisteme olan etkisini artırır ve bu yolla kontrol sistemlerinin dinamik performansını iyileştirmeyi amaçlar. Söz konusu indeksler, PID denetleyici kazançlarının ayarlanması sürecinde ve kontrol sistemlerinin genel performansının optimizasyonunda kritik rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, GT sistemlerinde yer alan YFK'nın iyileştirilmesinde, PID denetleyici kazançlarının doğru şekilde belirlenmesinde performans indeksleri stratejik bir öneme sahiptir. Bu indeksler, sistem performansını artırarak hem enerji verimliliğinin yükseltilmesine hem de kararlı ve güvenilir bir çalışma koşulunun sağlanması katkı sunmaktadır.

6. YÜK FREKANS KONTROLÜNDE KULLANILAN META-SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, akıllı şebeke teknolojilerinin yaygınlaşması ve yük profillerindeki belirsizliklerin artmasıyla birlikte, modern güç sistemleri giderek daha karmaşık ve dinamik bir yapıya kavuşmuştur. Bu karmaşıklık, özellikle YFK gibi temel dengeleme mekanizmalarının, klasik yöntemlerle etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini güçleştirmektedir. YFK sistemlerinde kararlı, güvenilir ve hızlı tepki verebilen bir kontrol yapısının oluşturulabilmesi için, denetleyici parametrelerinin hassas bir şekilde optimize edilmesi kritik bir gereksinimdir.

Bu bağlamda, meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, geleneksel matematiksel yöntemlere kıyasla daha esnek ve güçlü çözümler sunmaktadır. Literatürde yapılan güncel araştırmalar, bu algoritmaların doğrusal olmayan, çok kısıtlı ve çoklu yerel minimum içeren arama alanlarında yüksek başarı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, global optimuma yakın çözümlere hızlı erişebilme kabiliyetleri, GT'lerinin YFK uygulamalarında bu yöntemlerin tercih edilmesinin temel nedenlerinden biridir [26], [72], [73], [74], [75], [76], [77].

Ayrıca son yıllarda, GT'lerinin YFK uygulamalarında geleneksel sezgisel algoritmalara alternatif olarak YSA [78], [79], [80] ve makine öğrenmesi (ML) [81], [82] tabanlı yaklaşımlar da artan bir ilgi görmektedir.

Bu çalışmada, tek şaftlı AHGT'ne sahip klasik Rowen GT modeli temel alınarak, bir gaz çevrim santralinin YFK performansı değerlendirilmiştir. Sistem modeli, dinamik davranışları yeterli düzeyde temsil edebilecek şekilde basitleştirilmiş matematiksel bir yapı ile oluşturulmuştur. Deneysel analizlerde kontrol parametrelerinin optimizasyonu için GA, BTA ve PSO gibi klasik sezgisel teknikler uygulanmış; ayrıca güncel literatürde öne çıkan yeni nesil bir sezgisel yöntem olan YA algoritması da karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

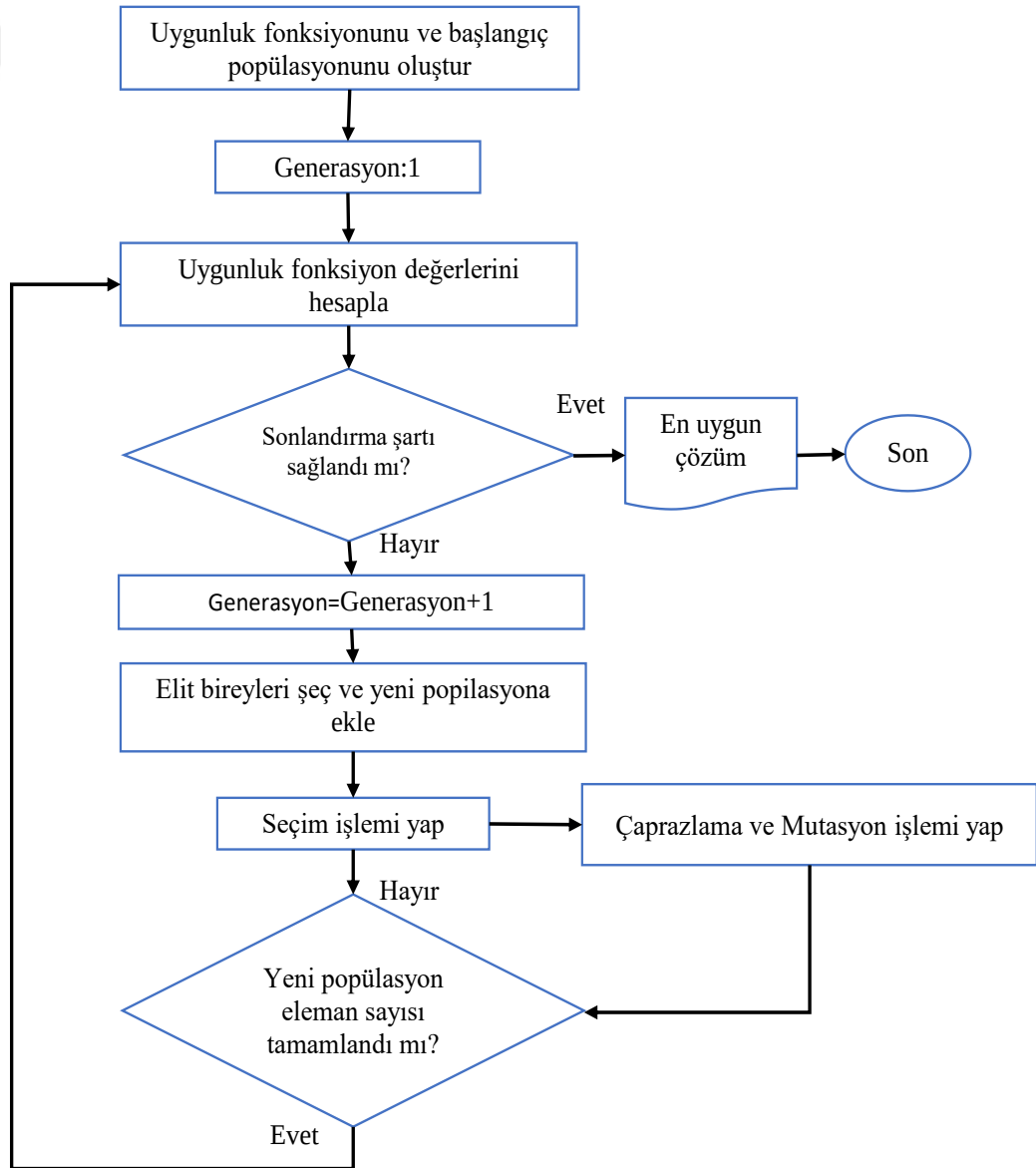
6.1. GENETİK ALGORİTMA

GA, evrimsel süreçleri modelleyen bir araştırma algoritmasıdır. Bu yöntem, doğal seçim ilkesini taklit eder ve problem çözme sürecinde genetik çeşitlilik kullanır [67]. GA, evrimsel biyoloji prensiplerini temel alarak tasarlanmış bir optimizasyon algoritmasıdır.

Darwinist "en uygun olanın hayatta kalma" teorisinden ilham alarak, çevrim içi evrim operatörleriyle zor problemlerin optimal veya yaklaşık optimal çözümlerini bulma amacını taşır. Bu algoritma, kesin çözüm bilgisi olmadan başlar ve evrim operatörleri aracılığıyla çevre sinyallerine yanıt vererek, iteratif bir süreçle en uygun çözümleri elde etmeyi amaçlar. Bu sayede, GA, geniş arama uzaylarındaki karmaşık problemleri ele almak için güçlü bir araştırma aracı olarak öne çıkar [66]. GA'da optimize edilmiş çözüm, başlangıç popülasyon setinden türetilir; bu popülasyon, çaprazlama ve mutasyon operatörleri aracılığıyla yeniden üretilerek yeni nesiller oluşturur. Her bireyin uygunluk değeri, amaç fonksiyonuna dayanarak değerlendirilir. Bu evrimsel süreç, problem uzayında genetik çeşitliliği artırarak, zaman içinde daha uygun çözümlere yaklaşan bir popülasyon oluşturmayı amaçlar [63]. Klasik sezgisel algoritmalar, önerilen çözümleri temsil etmek için genellikle ikili ya da gerçek sayı dizilerine kodlama yaparak başlar. Bu kodlama, genetik operatörlerin (çaprazlama ve mutasyon) uygulanabilirliğini sağlayarak, popülasyon içinde genetik çeşitliliği artırmak ve optimal veya yaklaşık optimal çözümleri bulmak amacını destekler. Bu sayede GA, çeşitli problemleri ele almak için geniş bir uygulama yelpazesine sahip etkili bir optimizasyon aracı olarak öne çıkar [83]. GA'da dikkate değer olan nokta, rastgele seçimin basit bir tesadüfi seçim olmamasıdır; aksine, bu rastgele seçim yönlendirilmiş bir seçimdir. Bu şekilde, GA, rastgele seçimi bir arama işlemi yönlendirmek için bir araç olarak kullanır ve her tekrarda geçmiş bilgiyi kullanarak hedef fonksiyonu iyileştirir. Bu yaklaşım, GA'ların, problem uzayındaki çeşitli bölgelere odaklanarak daha etkili bir optimizasyon gerçekleştirmesini sağlar [74]. GA, bir dize popülasyonu üzerinde çalışan bir algoritmadır. GA, çoklu zirve noktalarını arayarak aynı anda birçok olası çözümü değerlendirir, bu da yerel minimuma sıkışma olasılığını azaltır. Parametrelerin kodlanması, parametrelerin doğrudan kullanılması yerine genetik operatörler aracılığıyla manipüle edilmesi sayesinde, minimum hesaplamalarla bir sonraki durumun geliştirilmesine yardımcı olur. Son olarak, her dizinin uygunluğu, aramanın yönünü belirlemek için değerlendirilir ve bu değerlendirme süreci için türev hesaplamalarına veya ek yardımcı bilgilere ihtiyaç duyulmaz. Bu, GA'ların geniş bir uygulama alanında etkili bir şekilde kullanılmasına olanak tanır [73]. GA, optimizasyona yönelik algoritmik adımlar, Şekil 6.1'de verilmektedir [84].

GA, herhangi bir optimizasyon problemini geniş durum uzayında veya boyutlu bir arama uzayında rastgele arama yaparak çözmek amacıyla kullanılır. Başlangıçta, optimizasyon değişkenleri tanımlanarak rastgele başlatılan bir popülasyon oluşturulur. Her bir

kromozomun uygunluk değeri hesaplanır ve çoğaltma aşamasında, seçim işlemi ile daha iyi performans gösteren bireyler belirlenir. Daha uygun bireylerin seçilmesinden sonra, çaprazlama işlemi sırasında seçilen iki dizinin belirli kısımları değiştirilerek yeni bireyler oluşturulur. Bu, genetik çeşitliliği artırarak potansiyel olarak daha iyi çözümleri keşfetmeyi sağlar. Mutasyon aşamasında ise bireyin bir veya daha fazla unsurunun rastgele olarak değiştirilmesiyle popülasyona yeni bilgiler eklenir. Bu prosedürler, belirli bir nesil sayısına veya bir uygunluk değeri koşuluna ulaşıncaya kadar tekrarlanır. Bu süreç, popülasyonun evrimleşmesini ve problem uzayında daha iyi çözümlere yaklaşmasını sağlar. GA, geniş uygulama alanlarına sahip olan etkili bir optimizasyon aracı olarak kabul edilir [26].



Şekil 6.1. Genetik algoritma akış şeması.

GA, doğal seleksiyon, çaprazlama (crossover), mutasyon ve popülasyon tabanlı bir yaklaşım gibi genetik süreçleri taklit eder. Temel prensip, olası çözüm adaylarını temsil eden bir popülasyon oluşturmak, bu popülasyon içindeki bireyleri çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanarak evrimleştirmek, ardından bu bireyleri bir uygunluk fonksiyonu kullanarak değerlendirmektir. GA, işleyişi genellikle aşağıdaki adımları içermektedir [66], [73].

6.1.1. Başlangıç Popülasyonu Oluşturma

Başlangıç aşamasında, çözüm adaylarını temsil eden bir popülasyon oluşturulur. Bu popülasyon, çözüm adaylarını rastgele seçilen genlerden veya parametrelerden oluşturan bireyleri içerir. Her bir birey, gen adı verilen bir dizi parametre tarafından belirlenir ve genler, bir kromozom oluşturmak üzere birleştirilir. Bu genellikle ikili değerlerin kullanıldığı bir temsil biçimini içerir. Bireylerin oluşturulmasında rastgele sayı üretici kullanılır ve her bir bireyin kromozom uzunluğu, optimize edilecek parametre sayısına eşittir.

6.1.2. Uygunluk Değerlendirmesi

Her birey, problemle ilgili bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak değerlendirilir. Bu fonksiyon, bireylerin probleme ne kadar iyi uyduğunu ölçer. Uygunluk fonksiyonu, bir bireyin diğer bireylerle rekabet edebilme yeteneğini belirler, her bir bireye son bir uygunluk puanı atar ve üreme için seçilme olasılığını belirler. Bu mekanizma, GA'nın evrimsel sürecinde daha iyi uygunluğa sahip bireylerin seçilme eğilimini yansıtarak popülasyonun adaptasyonunu artırır. Bu çalışmada uygunluk fonksiyonları olarak, frekans değişimindeki hatayı ifade eden ISE, IAE , ITSE, ITAE kullanılmıştır

6.1.3. Seçim

Uygunluk değerlerini dikkate alarak, daha uygun bireylerin seçilmesi işlemi, doğal seleksiyonun bir benzeridir. Biyolojik evrimde, yalnızca en uygun üyeler hayatta kalır ve gen havuzları bir sonraki neslin oluşturulmasına katkıda bulunur. GA'da, seçim de benzer bir sürece dayanır. Burada, bireylerin kalifikasyonu için temel bir ön koşul olan uygunluk fonksiyonu göz önüne alınır. Her bireyin iyi biri olarak seçilme olasılığı, uygunluk değeriyle orantılıdır. Bu işlem, rulet çarkının dönüşüne benzer. Rulet seçim algoritması, bireylerin hesaplanan uygunluğuna dayanarak uygulanır. Birkaç kez döndürülen rulet çarkıyla yeni bir nüfus havuzu oluşturulabilir. Bireysel uygunlukla orantılı hale

getirildiğinden, seçilen bireylerin çoğu yeni popülasyon havuzuna daha yüksek uygunlukla katılır. Yeni havuzun ortalama uygunluğu, orijinal havuzdakinden daha yüksektir. Daha sonra bu yeni havuzdan bir çift ebeveyn seçilerek ileri bir genetik operasyona hazır hale getirilir.

6.1.4. Çaprazlama

Seçilen bireyler arasında gen alışverişi yaparak yeni bireyler oluşturma işlemi, genetik çeşitliliği artırmak amacıyla gerçekleştirilir. Çaprazlama süreci, iki farklı bireyden gelen kromozomların birleştirilerek bir sonraki nesil için kromozom oluşturduğu yapay çiftleşme olarak kabul edilir. Her iki kromozomda rastgele bir geçiş noktası belirlenir ve kromozomlar bu noktadan bölünerek değiştirilir. Bu çaprazlama süreci, dilimlenmiş parçaların değiştirilmesiyle sağlanır. Kromozom boyunca rastgele seçilen bir geçiş noktası, çocuğun genlerinin bir kısmını bir ebeveynin bir kısmıyla değiştirir. Çocuğun geri kalan genleri ise diğer ebeveyn tarafından sağlanır. Çaprazlama işlemi, genellikle belirli bir olasılıkla, örneğin %70 olasılıkla gerçekleştirilir.

6.1.5. Mutasyon

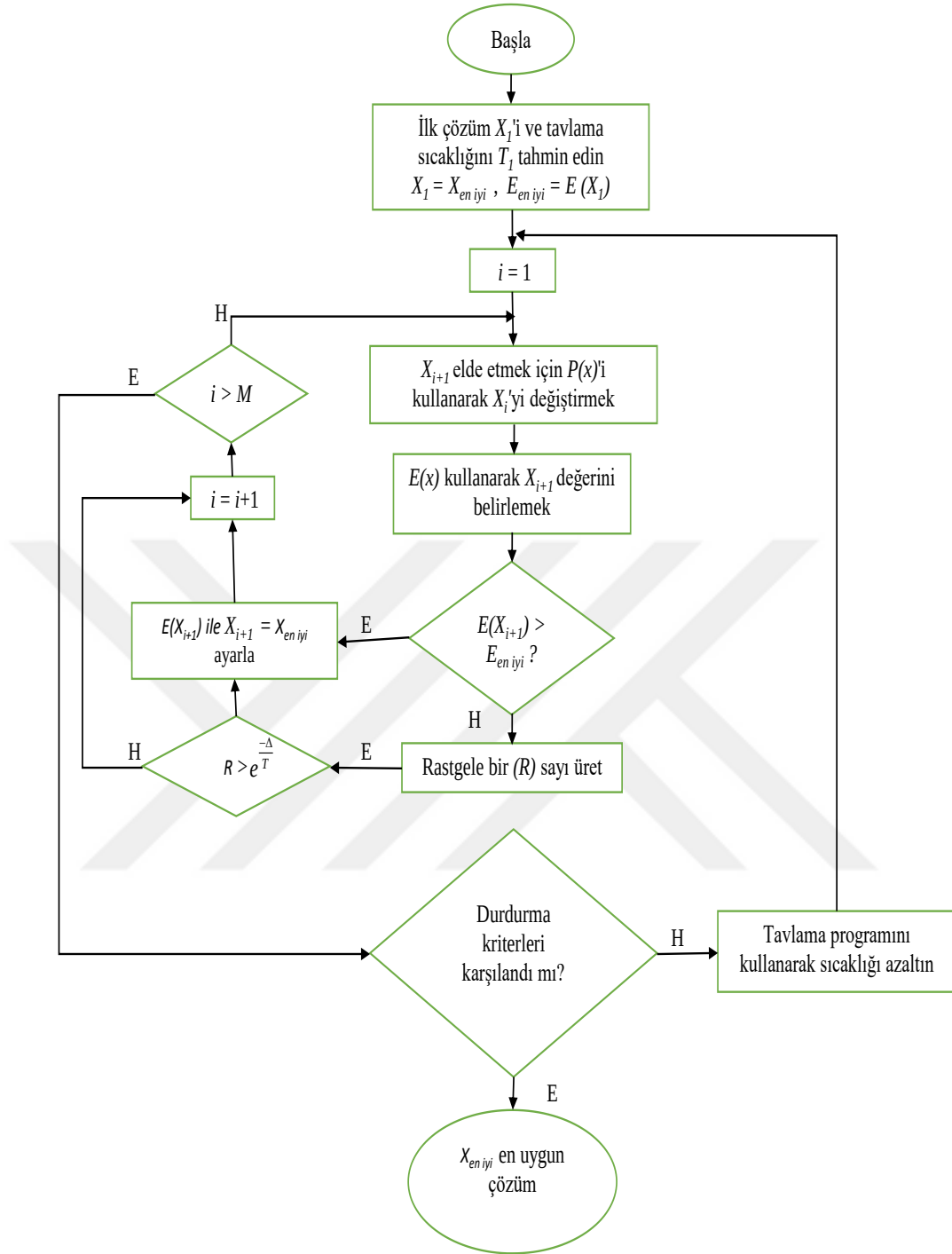
Popülasyon içinde rastgele seçilen bireylerde genlerin rastgele değiştirilmesi işlemi, mutasyon olarak adlandırılır. Bu süreç, popülasyona yeni özelliklerin eklenmesine yardımcı olur. Seçilen bir bireyin genetik yapısının bir veya daha fazla bileşeninin keyfi olarak değiştirilmesini sağlayan mutasyon operatörü, popülasyona yeni bilgi eklenmesinde önemli bir rol oynar. Mutasyonun varlığı, arama uzayında herhangi bir noktaya ulaşma olasılığının sıfır olmamasını sağlar. Bu operasyon, genellikle düşük bir olasılıkla, örneğin %5 (0,05) gibi bir değerle rastgele uygulanır. Mutasyon, bir kromozomun genetik bileşimini değiştirme süreci olarak kabul edilir. Bu süreç, yeni özelliklerin popülasyona dahil edilmesini sağlar. Salt çaprazlama ile mevcut özelliklerin sadece yeniden düzenlenmesi yeterli olmayabilir; bu nedenle mutasyon, GA'nın çeşitliliği artırarak ve yeni kombinasyonlar oluşturarak evrimini destekler.

6.1.6. Yeni Popülasyonun Oluşturulması

Çaprazlama ve mutasyon sonucu elde edilen yeni bireylerle bir sonraki popülasyon oluşturulur. Bu altı adım, belirli bir duruma veya belirli bir probleme özgü olarak uyarlanabilir. GA, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir ve özellikle karmaşık, çok-boyutlu ve karmaşık arama uzaylarına sahip problemleri çözmek için kullanılabilir.

6.2. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI

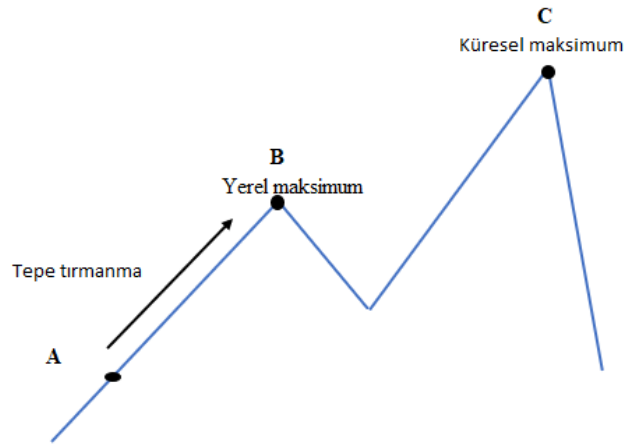
BTA, 1953 yılında Metropolis tarafından geliştirilmiştir. Bu algoritma, mevcut bir çözümün rastgele varyasyonlarını deneyerek, bir optimizasyon problemi için etkili bir çözüm bulan bir tekniktir. Yeni bir çözüm, hesaplama ilerledikçe azalan bir olasılıkla daha kötü bir değişim olarak kabul edilir. Soğutma programı veya yavaşlama hızı ne kadar yavaşsa, algoritma o kadar optimal veya en yakın çözümü bulma eğilimindedir. Bu yaklaşım, sistemdeki enerji seviyelerinin yavaş bir şekilde düşürülmesi ile, çözüm alanında geniş bir arama yaparak daha iyi sonuçlara ulaşmayı amaçlamaktadır [85]. BTA, geniş bir arama uzayında global optimizasyonuna yaklaştıran bir meta-sezgisel yaklaşımdır. Bu yöntemde, metalürjideki tavlama sürecini simüle etmek için kullanılan Metropolis Algoritması, bir malzemenin kontrol edilmiş bir şekilde ısıtılması ve soğutulması sürecini içeren bir tekniktir. Bu süreç, malzemenin kristal boyutunu artırarak ve kusurlarını azaltarak iyileştirmeyi amaçlar. Metropolis kabul kuralını tekrarlayarak, bir dizi yapılandırma oluşturan ve bir Markov zinciri oluşturan bir algoritma kullanılarak, arama uzayındaki potansiyel çözümleri keşfeder [86]. BTA algoritmasının sonlu zamanlı uygulaması, sıcaklığın (T) azalan değerlerinin sonlu bir dizisi için sonlu uzunluktaki (M) homojen Markov zincirleri üretilerek gerçekleştirilebilir. BTA algoritmasının her bir iterasyonu, mevcut çözümü (X_i) rastgele bir çözümle (X_{i+1}) değiştirmeye çalışır; bu yeni çözüm, mevcut çözümün komşuluk alanından seçilir. Yeni çözüm, amaç fonksiyonunu (E) iyileştiriyorsa veya amaç fonksiyonu değerleri arasındaki fark (ΔE) ile tavlama sıcaklığına (T) bağlı belirli bir olasılık (e) tarafından kabul edilir. Bu olasılık, tavlama programına dayanarak gradyan şeklinde azalan bir şekilde değişen tavlama sıcaklığına bağlıdır [86], [87].. Şekil 6.2’de, bu optimizasyon algoritmasının prensiplerini (BTA akış şeması) verilmektedir [86].



Şekil 6.2. Benzetilmiş tavlama algoritması akış şeması.

BTA, skolastik bir yerel arama stratejisine dayanan bir algoritmadır. Tepe tırmanma araması, yerel arama stratejilerinden biri olup, bir çözüm uzayında gezinirken mevcut çözümü iyileştirmeye çalışan bir algoritmadır. Temel amacı, mevcut çözümden daha iyi bir çözüm bulmak üzere iteratif adımlarla ilerlemektir. Ancak, bu stratejinin karşılaştığı temel sorun, yerel maksimumlarda takılıp kalmaktır, bu da küresel optimuma ulaşmayı engelleyebilir.

Yerel arama genel olarak, mevcut çözümü başlangıç olarak alır ve çevresindeki komşu çözümleri değerlendirir. Eğer bir komşu çözüm, mevcut çözümünden daha iyi bir değere sahipse, algoritma bu yeni çözümü kabul eder ve bu çözümü başlangıç noktası olarak belirler. Ancak, yerel arama sadece bulunduğu bölgedeki en iyi çözümleri göz önüne alır ve genellikle global optimuma ulaşma garantisi vermez. Tepe tırmanma aramasının zorluğu, yerel maksimumda takılı kalarak küresel optimumu kaçırma riskidir. Bu, özellikle çözüm uzayının karmaşık topolojilere sahip olduğu durumlarda daha belirgin olabilir. Şekil 6.3'te gösterilen örnek, A noktasından başlayarak B noktasına kadar ilerleyen bir tepe tırmanma aramasını temsil eder. Ancak, bu örnekte, B noktası yerel maksimumdur, ancak aslında küresel maksimum C noktasında bulunmaktadır. Bu durum, tepe tırmanma aramasının yerel optimal noktalarda sıkışma eğiliminde olduğunu ve bu nedenle küresel optimumu göz ardı edebileceğini gösterir. Yerel maksimumda sıkışmış bir yerel arama algoritması gösterimi Şekil 6.3'te verilmektedir [88].



Şekil 6.3. Yerel maksimumda sıkışmış bir yerel arama algoritması gösterimi.

BTA, metalürjide tavlama sürecinde atomların termal hareketlerini taklit ederek işlemi simüle eden bir algoritmadır. Arama sırasında, eğer daha iyi bir çözüm bulunamazsa, BTA araması belirli bir olasılıkla daha düşük performans gösteren bir çözümü de kabul edebilir. Böylece, BTA araştırması, yerel optimal çözümlerin sınırlamalarından kaçınıp, bazı durumlarda yerel optimumlardan sıçrayarak küresel optimuma yaklaşabilme yeteneğiyle dikkat çeker [88], [89].

Aşağıda BTA'nın sözde kodu verilmektedir [86];

1. Fonksiyon Benzetilmiş Tavlama ()

2. $i=1$ olarak ayarlanır

-
3. Başlangıç tasarım değişken vektörü X_i 'yi tahmin et, bu vektörü E amaç fonksiyonunu kullanarak değerlendir, X_i 'yi X_{best} ve $E(X_i)$ 'yi E_{best} olarak belirlenir
 4. Simüle edilmiş tavlama algoritması için başlangıç sıcaklığını seçin ve tavlama programını ana hatlarıyla tanımlayın
 5. **Perturb**, X_i , Bitişik bir tasarım vektörü (X_{i+1}) oluşturmak için $P(x)$ 'i kullanılır
 6. Amaç fonksiyonunu kullanarak $E(X_{i+1})$ 'i değerlendirilir
 7. Eğer $E(X_{i+1}) > E_{best}$ ise, X_{i+1} yeni çözümdür ve $E(X_{i+1})$ 'in E_{best} olarak ayarlanmalıdır
 8. Eğer $E(X_{i+1}) < E_{best}$ ise, X_{i+1} , $e(X_{i+1}) = e^{\frac{-\Delta}{T}}$ olasılığıyla yeni çözüm olarak kabul edin; burada $\Delta E = E(X_{i+1}) - E(X_i)$ dir
 9. $i=i+1$ olarak ayarlayın ve $M < i$ ise 5 ila 9 arasındaki adımları tekrarlanır
 10. Tavlama programını kullanarak T azaltılır
 11. Durdurma kriteri yerine getirilene kadar 4'ten 11'e kadar olan adımlar tekrarlanır
-

6.3. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU

PSO, 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından önerilen, literatürde geniş bir tanınırlığa sahip olan, sürü halinde yaşayan hayvanların sosyal davranışlarından ilham alarak geliştirilen bir popülasyon tabanlı algoritmadır [90]. Literatürde, sürü tabanlı algoritmalar üzerine yapılan çalışmalarda bir karşılaştırma yapılmış ve bu değerlendirme sonucunda PSO ve İkili Parçacık Sürü Optimizasyon (Binary Particle Swarm Optimization, BPSO) algoritmalarının, sürü tabanlı algoritmalar arasında en yoğun şekilde çalışılan yöntemler olduğu belirtilmiştir [58]. Diğer bir çalışmada, tek shaftlı AHGT tesisleri için optimal bir indirgenmiş dereceli model elde etmek amacıyla evrimsel teknikler kullanılarak etkili bir azaltılmış sıralı modelin katsayıları PSO algoritması ile optimize edilmektedir [91]. PSO'da her parçacığın hız değerleri üzerinden sigmoid fonksiyon değerleri hesaplanır ve bu değerler kullanılarak parçacıkların konumları güncellenir [92]. PSO'da, hız güncellemesi Denklem (6.1)'de belirtilen formülle gerçekleştirilmektedir.

$$v_{ij}^{(t+1)} = wv_{ij}^{(t)} + c_1r_1(pbest_{ij}^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) + c_2r_2(gbest^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) \quad (6.1)$$

Denklem (6.1)'de, c_1 ve c_2 sırasıyla parçacığın kendi en iyi konumuna yakınsama oranını ve global en iyi konuma yakınsama oranını temsil eder. Bu katsayılar genellikle literatürde [0.2, 2] aralığında değerler alır. Bu çalışmada ise c_1 ve c_2 değerle [0.2, 1] aralığında belirlenmiştir. c_1 , parçacığın kendi en iyi konumuna yönelmesini sağlarken, c_2 ise parçacığın sürünün en iyi konuma doğru yönelmesini sağlar. $c_1 = c_2$ sıfıra eşit ise, sürü mevcut hızlarıyla arama uzayının sınırlarına ulaşana kadar eylemlerine devam eder. r_1 ve r_2 katsayıları, [0, 1] aralığında normal dağılım ile binary olarak rastgele üretilen sayılardır. Bu sayı değerleri her iterasyonda güncellenir ve sürünün hareketlerine rastgelelik katmaktadır [84], [88], [92], [93].

Bu çalışmada kullanılan w değeri eylemsizlik ağırlık değerini temsil eder. Eylemsizlik ağırlığı, önceki hızın yeni hız üzerinde etkisini ifade eder. w değeri, parçacıkların bir önceki hızına bağlı kalmasını sağlayarak hız güncellemesini gerçekleştirir ve çözüm anında ani hız değişimlerini önler. Her yineleme için doğrusal olarak azaltılan w değeri, yerel ve küresel arama arasında bir denge kurmak üzere kullanılır. Bu değer, PSO'da daha az iterasyon ile optimum çözüme ulaşmak için global ve yerel arama arasındaki dengeyi sağlar. w büyük bir değere sahipse, daha fazla global arama yapılmasına olanak tanırken, küçük bir değerle daha fazla yerel arama yapılabilmesine izin verir. Bu değer, PSO'nun çeşitli aşamalarda daha etkili bir performans sergilemesini sağlar. Bu nedenle, w değeri uygun bir seviyede belirlenmelidir [84], [88], [92]. Denklem (6.2)'de w değerini hesaplamak için kullanılan denklem şu şekildedir:

$$w = (w_1 - w_2) \times \frac{(t_{\max} - t)}{t_{\max}} + w_2 \quad (6.2)$$

w_1 ve w_2 sırasıyla 0,9 ve 0,4 olarak belirlenen maksimum ve minimum eylemsizlik ağırlık değerlerini alacaktır. $t_{\max}$, optimizasyon sürecindeki maksimum tekrar sayısını temsil ederken t , ise mevcut tekrarı belirtir. Denklem (6.2)'de, optimizasyon sürecinin global arama ile başlamasını ve zamanla yerel aramaya geçmesini sağlayan bir yapıya sahiptir. Grubun bireyleri, belirli bir problem için en uygun çözümü bulmak amacıyla arama uzayında hareket ederler. Parçacıklar, kendi geçmiş deneyimleri ile komşu parçacıkların deneyimlerine dayanarak konumlarını ayarlarlar. Her parçacığın deneyimi, daha iyi bir konuma geçmeden önceki konumu ve hızıyla bağlantılıdır.

Her parçacık, sürekli PSO’da konumlarını değiştirmek için Denklem (6.3) ile ilişkilendirilmiş bir mekanizma kullanır.

$$X_{ij}^{(t+1)} = X_{ij}^{(t)} + V_{ij}^{(t+1)} \quad (6.3)$$

Denklem (6.3)’te $x_{ij}(t)$ ve $x_{ij}(t+1)$ sırasıyla (t) ve $(t+1)$ zamanında j . boyuttaki i . parçacığın konum vektörler iken $v_{ij}(t+1)$ ise parçacığın hız vektörünü göstermektedir. Denklem (6.3)’te hız vektörü, bireysel parçacıkların ve sürü içindeki diğer parçacıkların deneyimine dayanarak hesaplanmaktadır [84].

PSO’da Sigmoid fonksiyonu yardımıyla, her iterasyon için her parçacığın hız vektörünün değerine göre karar verecek olan konum vektörü x ’i güncellemek için Denklem (6.4) kullanılmaktadır.

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } r_{ij} < S(v_{ij}) \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (6.4)$$

Denklem (6.4)’te r_{ij} $[0, 1]$ arasında rastgele bir sayı almaktadır. Daha etkili bir yakınsama performansı elde etmek amacıyla bir daraltma faktörü de önerilmiştir. Diğer evrimsel hesaplama tekniklerinden farklı olarak, Kısıtlama Faktörü Yaklaşımı, PSO özgüdür ve arama prosedürlerinin yakınsamasını arttırmayı hedefler. Bu yaklaşım, her parçacığın salınım genliğini, önceki en iyi noktaya odaklandıkça azaltarak sağlar. $S(v_{ij})$ ise bir Sigmoid fonksiyonudur. Parçacıkların konumu binary (0-1) sayı değerlerini alacağından, hız değerleri $[0,1]$ aralığında oluşmakta ve her x_{ij} ’nin 1 değerini alma olasılığını belirlemek amacıyla Denklem (6.5) ile verilmekte olan Sigmoid fonksiyonu olarak ifade edilir [84], [92].

$$S(v_{ij}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}}} \quad (6.5)$$

Hız güncelleme denklemi Denklem (6.6)’da, değiştirilmiş bir formülle sunulmaktadır [77]:

$$v_i^{(k+1)} = X \left[v_i^{(k)} + c_1 rand_1 * (pbest_i - s_i^{(k)}) + c_2 rand_2 * (gbest - s_i^{(k)}) \right] \quad (6.6)$$

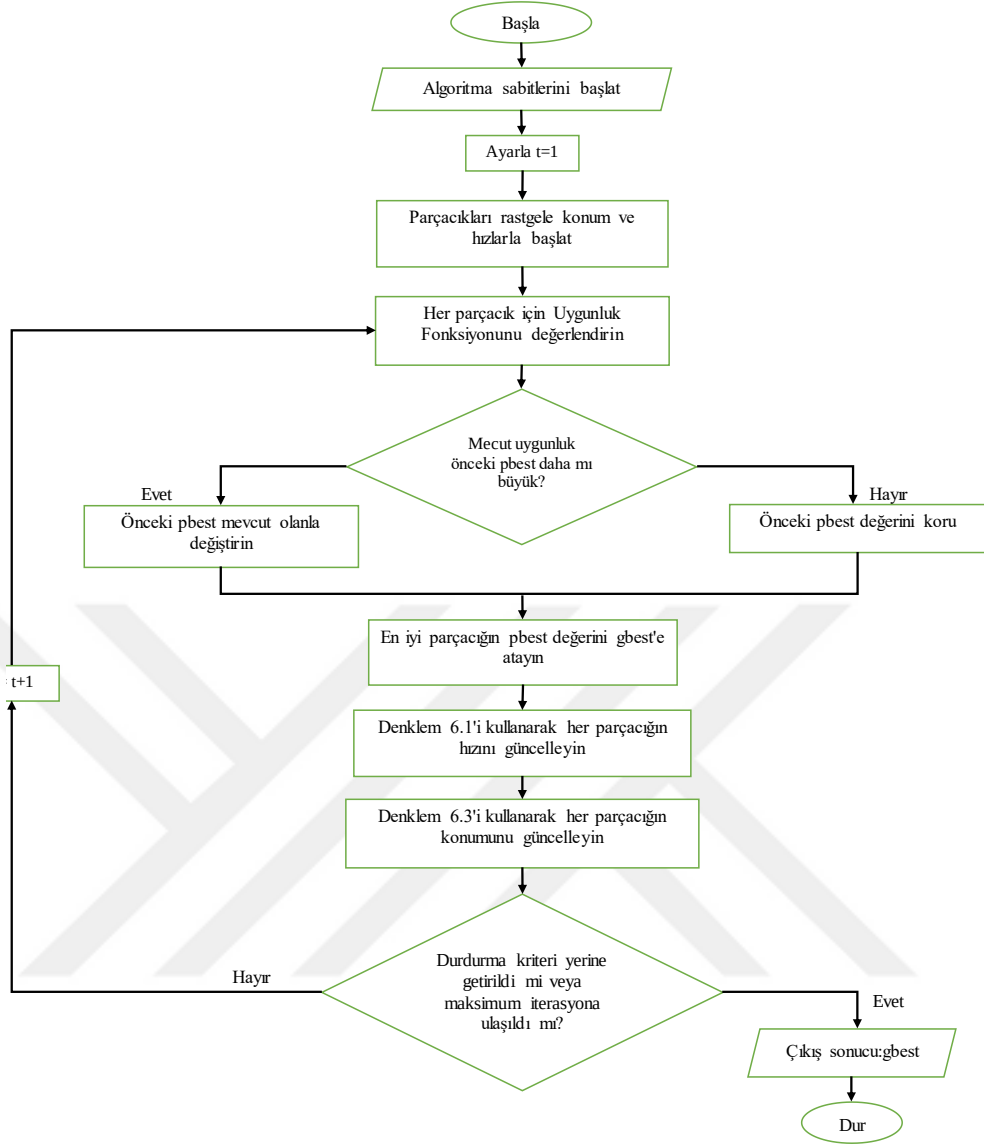
Burada X daralma faktörünü temsil eder ve Denklem (6.7) tanımlandığı gibi:

$$X = \frac{2}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|} \quad (6.7)$$

Denklem (6.7)'deki sabit parametre φ , Denklem (6.8)'de tanımlanmaktadır [77]:

$$\varphi = c_1 + c_2, \varphi > 4 \quad (6.8)$$

PSO, diğer optimizasyon yöntemlerinden üstünlüğünü, problem boyutu ve doğrusallığına karşı gösterdiği dirençte bulmaktadır. Bu avantajın temel kaynağı, PSO'nun evrimsel bir hesaplama yöntemi olarak öne çıkmasıdır. PSO, diğer evrimsel algoritmalar gibi, biyolojik evrimi değil, sosyal tepkiyi ön planda tutarak yönlendirilir. PSO algoritmasının akış şeması, Şekil 6.4'te verilmektedir [94]. Şekil 6.4'te PSO algoritması akış şeması, algoritmanın iteratif bir şekilde çalışma prensiplerini temsil eder. Her bir parçacığın durumunu güncelleyerek ve en iyi çözümleri paylaşarak, popülasyon genelinde bir bilgi paylaşımı sağlanır. Akış şeması, PSO'nun problem çözüm sürecini adım adım ve bilimsel bir şekilde anlamamıza yardımcı olur [95].

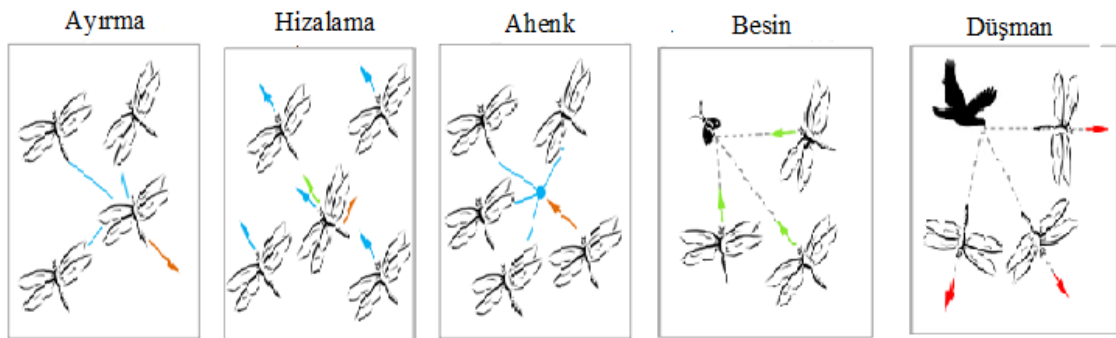


Şekil 6.4. Parçacık sürü optimizasyonu algoritması akış şeması.

6.4. YUSUFÇUK ALGORİTMASI

Son yıllarda geliştirilen ve yüksek arama kapasitesiyle öne çıkan YA, gaz çevrim santrallerinde karşılaşılan YFK problemlerine etkin bir çözüm sunmak amacıyla başarıyla uygulanmıştır. Bu sezgisel optimizasyon yöntemi, dünya genelinde farklı türleri bulunan Yusufçuk sineğinin biyolojik ve davranışsal özelliklerinden esinlenerek geliştirilmiştir. Yusufçuk sinekleri; büyük bileşik gözleri, saydam ve güçlü kanatları, uzun gövdeleri ve dikkat çekici renk yapıları ile tanınmakta olup, yaşam döngüleri larva ve erişkin olmak üzere iki temel evreden oluşmaktadır. Yusufçukların özellikle avlanma esnasında sergiledikleri hareketler, ileri-geri yönlü yüksek manevra kabiliyeti ve hedef takibi

sırasında gösterdikleri stratejik davranışlarla dikkat çekmektedir [88]. Bu canlılar, avlanma sırasında genellikle statik sürüler içinde küçük gruplar hâlinde uçarak yerel hareketler ve ani yön değişimleri gerçekleştirirken; göç gibi uzun mesafeli hareketlerde ise dinamik sürüler oluşturarak büyük gruplar hâlinde organize olabilmektedir [96]. Reynolds'un sürü davranışı üzerine geliştirdiği modelde, bu kolektif hareketler üç temel ilkeye dayandırılmaktadır: ayırma, bireylerin çarpışmayı önlemek amacıyla birbirlerinden belirli bir mesafeyi koruması; hizalanma, bireylerin hareket yönü ve hızlarının çevresindekilerle uyumlu hâle gelmesi; ahenk ise bireylerin grubun kütle merkezine doğru yönelme eğilimidir [97]. Sürünün genel amacı, hayatta kalma güdüsüyle birlikte gıda kaynaklarına yönelmek ve dış tehditlere karşı birlikte hareket ederek savunma sağlamaktır. YA'da, bireylerin konum güncellemeleri bu davranış ilkelerine göre modellenmiş olup, algoritmanın temel hareket bileşenleri Şekil 6.5'te özetlenmiştir [88], [98]. YA, farklı optimizasyon problemleri için çeşitli meta-sezgisel yöntemlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, YA'nın global optimuma yakınsama yeteneği açısından etkileyici sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Özellikle karmaşık ve çok boyutlu problemlerde sağladığı etkinlik, bu yöntemin farklı mühendislik uygulamalarında tercih edilme nedenlerinden biri olmuştur. Ayrıca, kıyaslama fonksiyonları üzerindeki analizler, YA'nın basit ve orta düzey karmaşıklıkta problemlerde yüksek doğruluk ve hızlı yakınsama kabiliyeti sunduğunu göstermektedir [99]. Algoritmanın sade yapısı ve kolay uygulanabilirliği, araştırmacıların YA'yı çeşitli mühendislik problemlerinde çözüm aracı olarak tercih etmelerinde belirleyici olmuştur. Buna ek olarak, algoritmanın genel performansı; yakınsama hızı, arama uzayının verimli taranması ve yerel minimumlara takılmadan çözüm üretebilme kapasitesi gibi açılardan değerlendirildiğinde, YA'nın küçük ve orta ölçekli sistemlerde oldukça başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [54].



Şekil 6.5. Sürü içerisinde bireyler arasındaki beş ana faktör gösterimi.

Şekil 6.5'te sürü içindeki bireyler arasındaki ilişkiyi açıklayan beş ana faktör sunulmuştur. Bu beş davranışın her biri için matematiksel modeller şu şekildedir [88], [97], [98] [98], [100].

Ayırma, aşağıdaki matematiksel formül ile hesaplanır:

$$S_i = -\sum_{j=1}^N X - X_j \quad (6.9)$$

Denklem (6.9)'daki X , mevcut bireyin pozisyonunu ve X_j , j . komşu bireyin pozisyonunu temsil etmektedir, burada N komşu bireylerin sayısını ifade etmektedir.

Hızalama, aşağıdaki matematiksel ifade ile hesaplanır:

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^N V_j}{N} \quad (6.10)$$

Denklem (6.10)'da bulunan V_j terimi, j . komşu bireyin hızını ifade etmektedir.

Ahenk, Denklem (6.11)'deki matematiksel ifade ile hesaplanır:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} - X \quad (6.11)$$

Besin kaynağına doğru çekim, Denklem (6.12)'deki matematiksel ifade ile hesaplanmaktadır:

$$F_i = X^+ - X \quad (6.12)$$

Eşitlik (6.12)'deki X^+ terimi, besin kaynağının pozisyonunu ifade etmektedir. Dışa doğru davranış, tehdit eden düşmanın pozisyonunu gösteren X^- ifadesi ile Denklem (6.13) ile hesaplanmaktadır.

$$E_i = X^- + X \quad (6.13)$$

Yapay yusufçuk sineklerinin pozisyonlarını güncellemek ve hareketlerini simüle etmek için ΔX adım vektörü ve X pozisyon vektörü kullanılmıştır.

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\Delta X_t \quad (6.14)$$

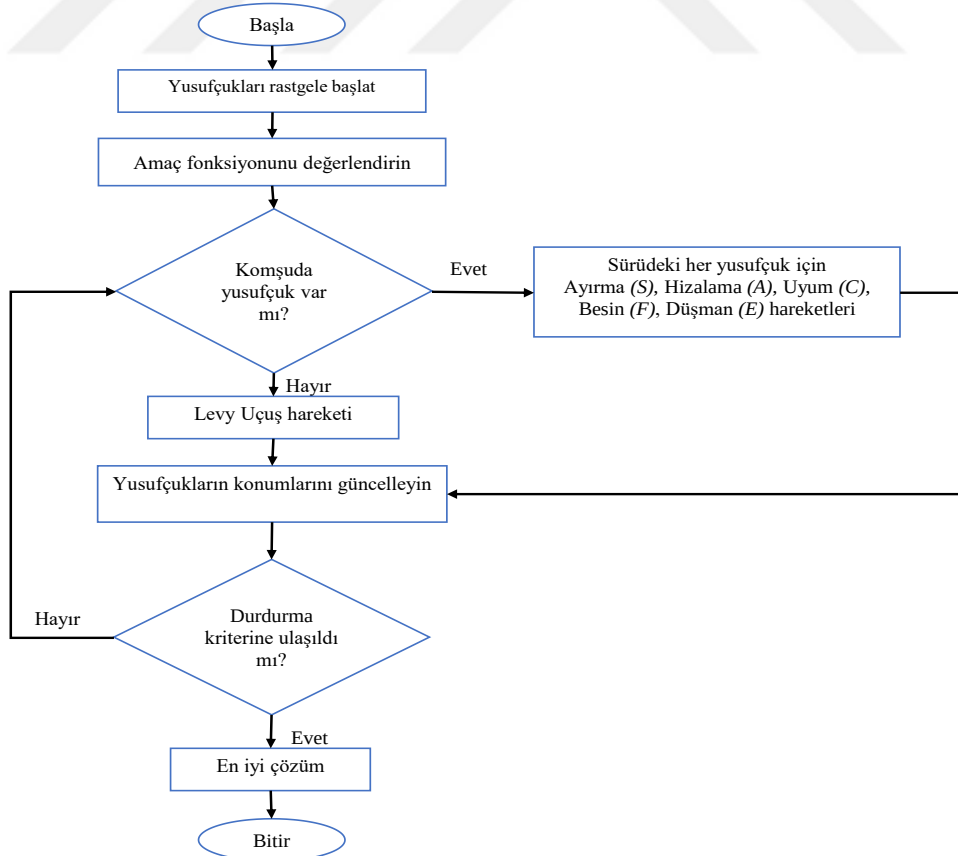
Denklem (6.14)'de s, a, c, f, e faktörlerinin ağırlık değerlerini ifade eder. Ayrıca, w değeri t . döngüdeki atalet ağırlığını temsil eder. Adım vektörü hesaplandıktan sonra, Denklem (6.15)'de pozisyon vektörü hesaplanır.

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_{t+1} \quad (6.15)$$

Stokastik davranışı, Rassallığı ve yapay yusufçukların keşif yeteneklerini artırmak için rastgele yürüyüş (Le'vy uçuşu) yöntemi kullanılmıştır. Bu durumda, yusufçukların pozisyonları Denklem (6.16)'daki matematiksel eşitlikle güncellenmiştir.

$$X_{t+1} = X_t + Le'vy(d) * X_t \quad (6.16)$$

Eşitlik (6.16)'da t , mevcut döngüyü temsil ederken, d pozisyon vektörünün boyutunu ifade etmektedir[88], [98]. YA'nın akış şeması Şekil 6.6'da verilmektedir [101].



Şekil 6.6. Yusufoğuk algoritması akış şeması.

YA'nın sözde kod aşamaları, aşağıda ifade edilmiştir [88],[98].

```
Yusufçuk popülasyonu  $X_i$ 'yi başlat ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Adım vektörlerini  $\Delta X_i$  başlat ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
while son koşul sağlanmadı
    Tüm yusufçukların objektif değerlerini hesaplayın
    Besin kaynağını ve düşmanı güncelleyin
     $w, s, a, c, f$  ve  $e$ 'yi güncelleyin
     $S, A, C, F$  ve  $E$ 'yi denklem (6.9) ile (6.13) kullanarak hesaplayın
    Komşu yarıçapı güncelle
    if bir yusufçukta en az bir komşu yusufçuk vardır
        Denklemi (6.14) kullanarak hız vektörünü güncelleyin
        Denklemi (6.15) kullanarak konum vektörünü güncelleyin
    else
        Denklemi (6.16) kullanarak konum vektörünü güncelleyin
    end if
    Yeni konumları aşağıdakilere göre kontrol edin ve düzeltin değişkenlerin sınırları
end while
```

6.5. META-SEZGİSEL ALGORİTMA TEMELLİ YÜK FREKANS KONTROLÜ

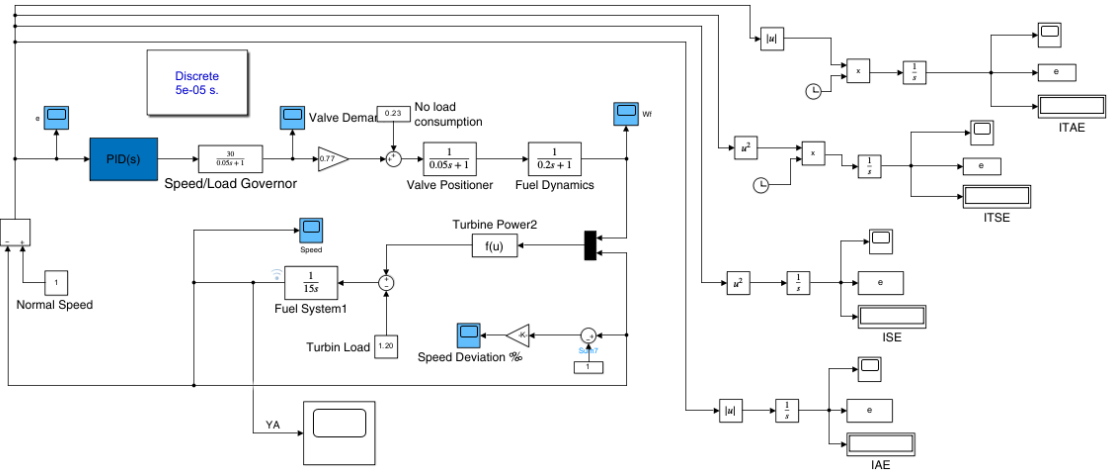
GT santrallerinin elektrik şebekesine entegrasyonu, YFK süreçlerinin daha karmaşık ve dinamik bir yapıya evrilmesine neden olmuştur. Hızlı devreye girme, kolay kurulum ve yüksek verimlilik gibi avantajları sayesinde GT santralleri, modern güç sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ada modunda çalışabilen kombine çevrim santrallerinde ise, ani yük değişimlerinden kaynaklanan frekans sapmalarının önlenmesi amacıyla genellikle PID denetleyiciler kullanılmaktadır. YFK'nın etkinliği, sistemdeki bölgesel frekans salınımlarının ve hat güç değişimlerinin uygun denetim stratejileri ile sönümlenmesine bağlıdır.

PID denetleyici; oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) bileşenlerden oluşan klasik bir

kontrol yapısı olup, sıcaklık, hız ve basınç gibi süreç değişkenlerinin kararlı bir biçimde düzenlenmesini sağlamaktadır. Endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip olmasına rağmen, geleneksel PID yapısı, doğrusal olmayan ve zamanla değişen sistem dinamiklerine sahip karmaşık yapılar karşısında istenen kontrol performansını her zaman sağlayamayabilir.

GT santrallerinde YFK sağlanmasına yönelik sezgisel algoritma tabanlı denetim süreci aşağıdaki adımlar doğrultusunda gerçekleştirilir:

Adım 1: YFK sürecinin uygulanacağı güç sistemi modeli, Şekil 6.7’de gösterildiği üzere MATLAB/Simulink™ ortamında oluşturulmuş; optimizasyon algoritmaları ise Şekil 6.8’de sunulan MATLAB m-file yapısı içerisinde tanımlanmıştır. Model ve algoritmalar entegre biçimde çalıştırılarak, optimizasyon süreci senkronize şekilde başlatılmıştır.



Şekil 6.7. Güç sistemi modeli.

```

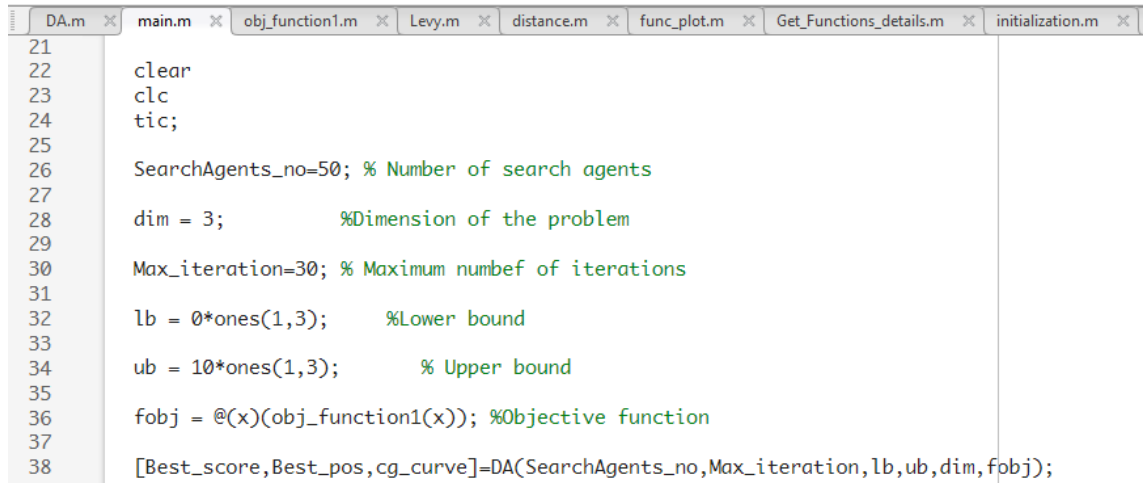
1  % ----- %
2  % Dragonfly Algorithm (DA) source codes demo version 1.0 %
3  % You can simply define your cost in a separate file and load its handle to fobj
4  % The initial parameters that you need are:
5  % -----
6  % fobj = @YourCostFunction
7  % dim = number of your variables
8  % Max_iteration = maximum number of generations
9  % SearchAgents_no = number of search agents
10 % lb=[lb1,lb2,...,lbn] where lbn is the lower bound of variable n
11 % ub=[ub1,ub2,...,ubn] where ubn is the upper bound of variable n
12 % If all the variables have equal lower bound you can just
13 % define lb and ub as two single number numbers
14
15 % To run DA: [Best_score,Best_pos,cg_curve]=DA(SearchAgents_no,Max_iteration,lb,ub,dim,fobj)

```

Şekil 6.8. Algoritmaların m.file dosyasında oluşturulması.

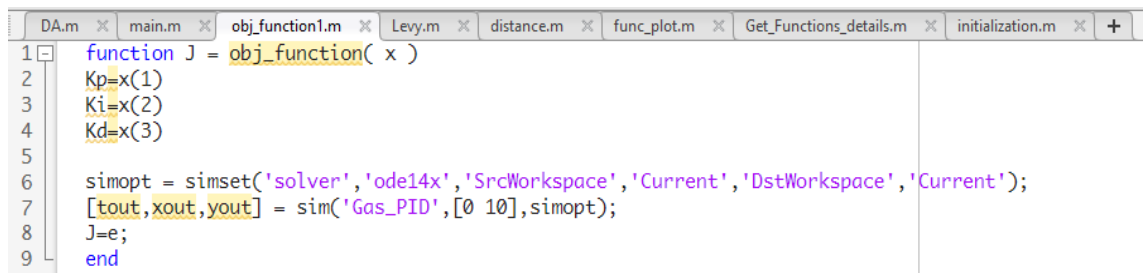
Adım 2: Popülasyon büyüklüğü,

Optimizasyon sürecine ilişkin temel parametreler; popülasyon büyüklüğü, maksimum iterasyon sayısı, değişken sayısı ve kontrolör kazançlarının alt-üst sınırları olmak üzere Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da gösterildiği şekilde tanımlanmıştır. Bu çalışmada, YFK probleminin çözümünde kullanılan değişken sayısı, optimize edilmesi gereken kontrolör parametreleri olan K_p , K_i , K_d değerlerini ifade etmektedir. Optimizasyon algoritması kapsamında popülasyon, her biri farklı kontrolör kazanç kombinasyonlarını temsil eden aday çözüm setlerinden oluşmaktadır. Popülasyon büyüklüğü 50 veya daha fazla olarak belirlenmiş olup, her bir birey üç farklı kontrolör kazancı içermektedir. Böylece optimizasyon süreci, toplamda 50'den fazla farklı aday çözüm üzerinden yürütülmektedir. Ayrıca, maksimum iterasyon sayısı en az 30 olarak tanımlanmıştır. Kontrolör kazançlarının alt ve üst sınırları ise [0–10] aralığında seçilmiştir. Değişkenlerin parametre düzeyinde gösterimi Şekil 6.9'da detaylandırılmıştır.



```
21 clear
22 clc
23 tic;
24
25 SearchAgents_no=50; % Number of search agents
26
27 dim = 3; %Dimension of the problem
28
29 Max_iteration=30; % Maximum numbef of iterations
30
31 lb = 0*ones(1,3); %Lower bound
32
33 ub = 10*ones(1,3); % Upper bound
34
35 fobj = @(x)(obj_function1(x)); %Objective function
36
37 [Best_score,Best_pos,cg_curve]=DA(SearchAgents_no,Max_iteration,lb,ub,dim,fobj);
38
```

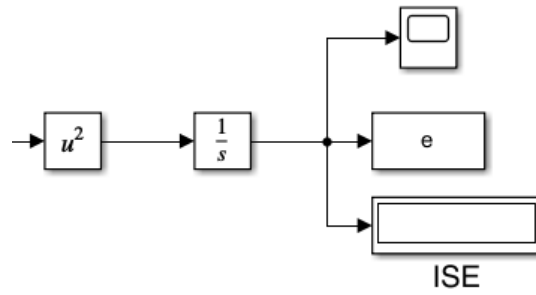
Şekil 6.9. Optimizasyon parametrelerinin belirlenmesi.



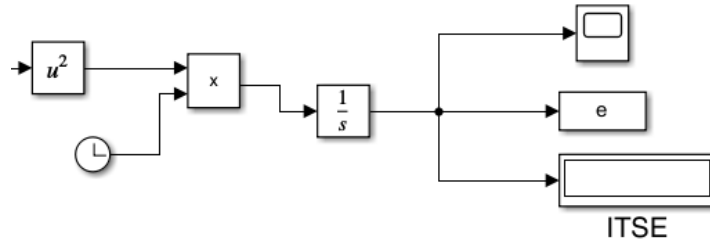
```
1 function J = obj_function( x )
2 Kp=x(1)
3 Ki=x(2)
4 Kd=x(3)
5
6 simopt = simset('solver','ode14x','SrcWorkspace','Current','DstWorkspace','Current');
7 [tout,xout,yout] = sim('Gas_PID',[0 10],simopt);
8 J=e;
9 end
```

Şekil 6.10. Değişkenlerin belirlenmesi.

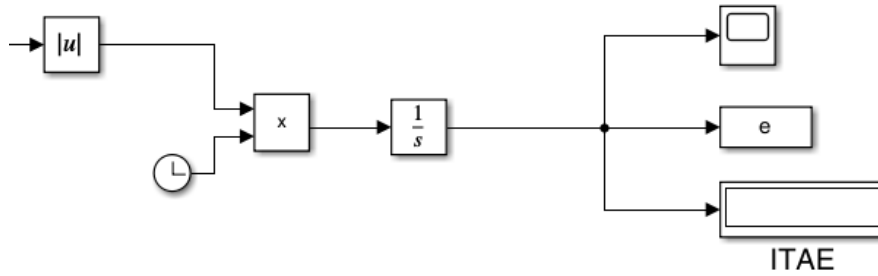
Adım 3: Şekil 6.11’de gösterildiği üzere, frekans ve bağlantı hattı güç değişimlerinde meydana gelen salınımların toplamının sıfıra yaklaştırılması optimizasyonun temel hedefidir. Bu doğrultuda, amaç fonksiyonları olarak kullanılan performans indeksleri ISE, ITSE, ITAE, IAE esas alınmıştır. Popülasyonda yer alan tüm aday çözümlerin uygunluk (fitness) değerleri, sırasıyla Denklem (5.4), Denklem (5.5), Denklem (5.6) ve Denklem (5.7)’de tanımlanan bu performans indekslerine göre hesaplanmaktadır. Elde edilen uygunluk değerlerine bağlı olarak çözümler sıralanmakta ve sistem frekansındaki iletim hattı güç değişimlerinde oluşan salınımları en düşük seviyeye indirgeyen kontrolör parametre seti 'en iyi çözüm' olarak belirlenmektedir.



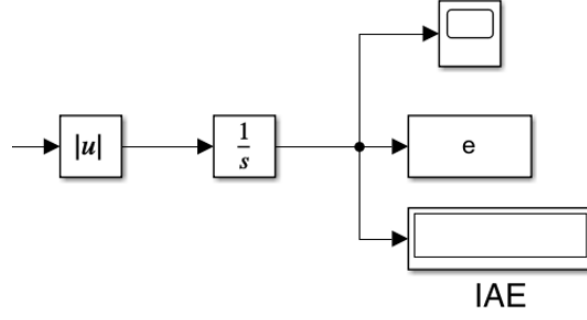
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.11. a) ISE, b) ITSE, c) ITAE ve d) IAE amaç fonksiyonların blok diyagramları.

Adım 4: GTnin YFK kapsamında, PID denetleyici kullanılmıştır. PID denetleyicinin kazanç parametrelerinin optimal biçimde belirlenmesi amacıyla; BTA, GA, PSO ve YA gibi farklı sezgisel optimizasyon yöntemleri uygulanmıştır. Her bir algoritmanın iteratif çözüm adımları doğrultusunda, her iterasyonda en iyi performansı sağlayan PID kazançları belirlenmiş; elde edilen uygunluk değerleri bir önceki nesil ile karşılaştırılarak çözüm iyileştirilmiştir. Bu süreç, sistem performans indekslerini en üst düzeye taşıyacak optimal kontrol parametrelerinin elde edilmesini amaçlanmıştır.

Adım 5: BTA, GA, PSO ve YA gibi farklı sezgisel optimizasyon yöntemlerin çözüm süreci, belirlenen maksimum iterasyon sayısına ulaşılması veya tanımlanan durdurma kriterinin sağlanması durumunda sonlandırılmaktadır. Bu koşullar sağlandığında, ilgili algoritma tarafından elde edilen PID kazançları, optimize edilmiş nihai kontrol parametreleri olarak kabul edilmekte ve optimizasyon süreci tamamlanmaktadır.

7. BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR

Tez çalışmasının bu bölümünde, tek şaftlı AHGT sistemlerinde YFK, farklı kontrol yöntemleri, çeşitli performans indeksleri ve sezgisel optimizasyon teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Söz konusu sistem, MATLAB/Simulink™ ortamında modellenmiş ve PID temelli kontrol stratejileri çerçevesinde analiz edilmiştir. YFK performansının değerlendirilmesinde, sistemin frekans ve bağlantı hattı güç değişkenleri dikkate alınmış, bu değişkenler üzerindeki salınımların etkin bir şekilde sönümlenmesi hedeflenmiştir.

Çalışmada, PID denetleyici kazançlarının optimizasyonu için GA, PSO, BTA ve YA olmak üzere dört farklı sezgisel algoritma kullanılmıştır. Her bir algoritma, belirli popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı ve kontrol parametrelerinin alt/üst sınırları dâhilinde bağımsız olarak çalıştırılmıştır. Optimizasyon sürecinde amaç, belirlenen performans indeksleri ISE, IAE, ITSE ve ITAE göre hata büyüklüklerini en aza indirgeyerek, sistemin dinamik cevabını iyileştirmek hedeflenmiştir.

7.1. GAZ TÜRBİNİ MODELLEME VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, GTne ait YFK için geliştirilen PID tabanlı denetim yapısı ve optimizasyon sonuçları verilmektedir. PID denetleyici kazançları; BTA, GA, PSO ve YA gibi sezgisel yöntemlerle optimize edilmiştir.

Gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde tüm algoritmalarda üç değişken optimize edilmiş olup, her bir değişken için alt sınır 0 ve üst sınır 10 olarak belirlenmiştir. Kullanılan algoritmalara ait parametreler aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

GA : Popülasyon büyüklüğü 30, nesil sayısı 100 olarak kullanılmıştır.

BTA : Başlangıç sıcaklığı $T_0=0.1$, sıcaklık azalma katsayısı $\alpha=0.99$, popülasyon büyüklüğü $nPop=100$, her birey için komşu sayısı $nMove=5$, mutasyon oranı $\mu = 0.5$, maksimum iterasyon sayısı $MaxIt=20$ olarak kullanılmıştır.

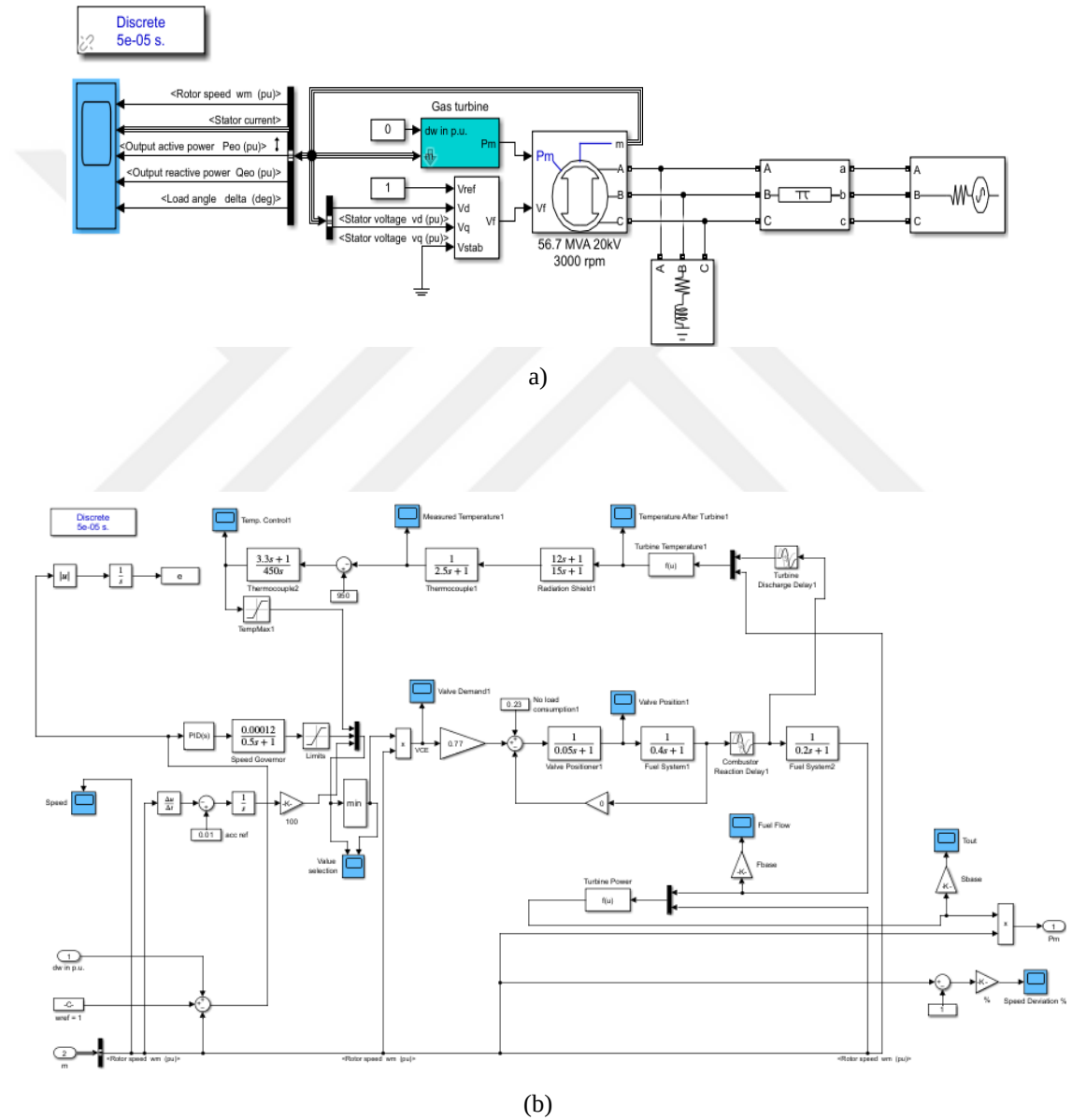
PSO: Popülasyon büyüklüğü 30, maksimum iterasyon sayısı 100, ataletsel ağırlık $w=1$, ataletsel ağırlık sönümleme katsayısı $w_{damp}=0.99$, $c1=1.5$, $c2=2.0$ olarak kullanılmıştır.

YA : Arama ajanı sayısı 30, maksimum iterasyon sayısı 100, Lévy uçuş parametresi $\beta=1.5$

olarak kullanılmıştır.

Bu parametreler altında her bir algoritma, sistemin yük-frekans kararlılığını sağlamak amacıyla PID denetleyici parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmiştir.

Modelleme süreci MATLAB/Simulink™ ortamında gerçekleştirilmiş olup, sistem yapısı Şekil 7.1’de verilmiştir. Performans değerlendirmesinde amaç fonksiyonları olarak ISE, ITSE, ITAE ve IAE indeksleri kullanılmış; her bir yönteme ait sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 7.1. (a) ve (b) Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon simulink modeli.

7.2. GAZ TÜRBİNİ PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN VE ISE PERFORMANS İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ

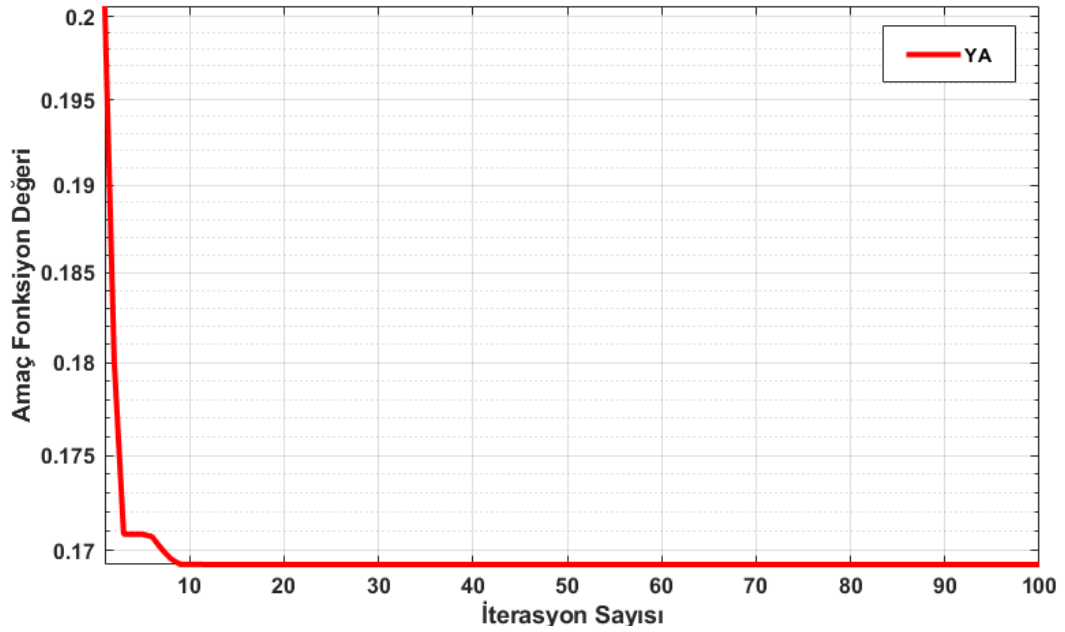
Çizelge 7.1’de, çeşitli yöntemlerle elde edilen PID parametreleri ve bu parametrelerin zaman yanıtları ve ISE performans indeksleri verilmiştir. Özellikle YA yönteminin performansı diğer yöntemlere kıyasla daha avantajlı görünmektedir. Her bir yöntemi zaman yanıtları, aşma değerleri ve ISE performansı açısından değerlendirildiğinde, yükselme süresi (t_r) ve tepe süresi (t_p): YA yöntemi ile elde edilen yükselme süresi (140.811 ms) ve tepe süresi (0.322 s) değerleri, diğer yöntemlerle kıyaslandığında oldukça rekabetçidir ve hızlı bir sistem yanıtı sağlar. Yerleşme Süresi (t_s): YA yöntemi, en düşük yerleşme süresi (4 s) değeriyle en hızlı yerleşme süresini sağlar. Bu, sistemin en kısa sürede kararlı duruma ulaştığını gösterir. Aşım (%): YA yöntemi, sadece %9.341 aşma değeri ile en düşük aşma oranını sağlar. Bu, sistemin istenmeyen dalgalanmalar olmadan kararlı duruma ulaştığını gösterir. ISE performans indeksi: YA yöntemi, 0.1206 ISE değeriyle en düşük hata performans indeksine sahiptir. Bu, sistemin doğruluğunu ve stabilitesini artırır.

Sonuç olarak YA yöntemi, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında GT kontrolünde en iyi performansı sağlar. Düşük yükselme süresi ve tepe süresi değerleriyle hızlı tepki verirken, en düşük yerleşme süresi ve aşım değerleriyle de kararlı ve hassas bir kontrol sunar. Ayrıca, ISE performans indeksinin düşük olması, sistemin hassasiyetini ve doğruluğunu artırmaktadır. Dolayısıyla, YA yöntemi GT sistemlerinde PID denetleyici kazançlarının optimizasyonu açısından en etkin çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 7.1. Gaz türbini PID parametreleri, zaman yanıtları, aşma değerleri ve ISE performans indeksi tablosu.

Yöntem	PID Kazanç			Zaman Tepkileri			Aşım (%)	ISE
	K _p	K _i	K _d	t_r (ms)	t_p (s)	t_s (s)		
[ZN_25]	5.3600	0.1540	0.92	132.981	0.350	70	34.459	0.1372
BTA	4.5063	0.9346	0.9351	140.535	0.350	25	25.949	0.1306
GA	3.629	0.552	0.924	151.678	0.350	34	17.069	0.1271
PSO	3.1602	0.2250	0.9879	151.259	0.350	45	13.068	0.1242
YA	2.4231	0.2298	1.1947	140.811	0.322	4	9.341	0.1206

Şekil 7.2’de YA optimizasyon ve ISE performansa göre, amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı amaç fonksiyon yakınsama grafiği verilmiştir.



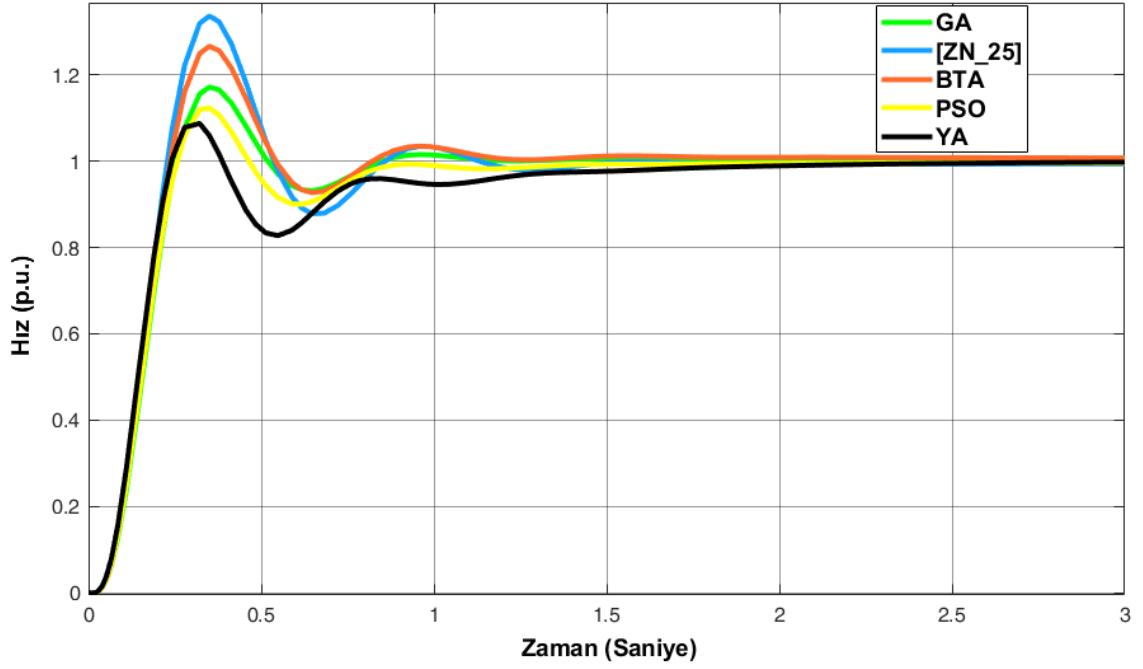
Şekil 7.2. YA optimizasyon ve ISE performansa göre amaç fonksiyon yakınsama grafiği.

Şekil 7.3’te verilen GT YFK’sında PID optimizasyonu ve ISE performans grafiği incelendiğinde YA yönteminin en üstün performansı sergilediği görülmektedir. YA düşük aşma, hızlı yerleşme süresi ve düşük ISE performans indeksi ile en iyi sonucu vermektedir. Bu nedenle, GT kontrol sistemlerinde YA yönteminin tercih edilmesi, sistemin performansını optimize etmek için en etkili yaklaşım olacaktır.

YA yöntemi hariç tutulduğunda, PSO yöntemi, GA, SA ve literatürdeki benzer yapılan çalışma referas [ZN_25] yöntemlerine göre en iyi performansı sergilemektedir. PSO, en düşük aşma değeri ve en düşük ISE performans indeksi ile öne çıkmaktadır. Yerleşme süresi bakımından BTA daha hızlı olsa da genel performans değerlendirmesi yapıldığında PSO, doğruluk ve hassasiyet açısından en uygun yöntem olarak belirlenmiştir.

Şekil 7.3’e göre, GT YFK’sında PID optimizasyonu ve ISE performansı açısından YA yöntemi, hızlı tepki, düşük aşım, hızlı kararlılık ve düşük hata oranı ile en üstün yöntemdir. Grafikte siyah çizgi ile temsil edilen YA yöntemi, tüm performans indeksleri açısından diğer yöntemlere kıyasla daha düşük hata değerleri ve hızlı sistem yanıtı sağlayarak üstün bir kontrol performansı sergilemiştir. Bu nedenle, GT kontrol sistemlerinde YA yönteminin kullanılması, sistem performansını önemli ölçüde

artırabilir.



Şekil 7.3. Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon ve ISE performans grafiği.

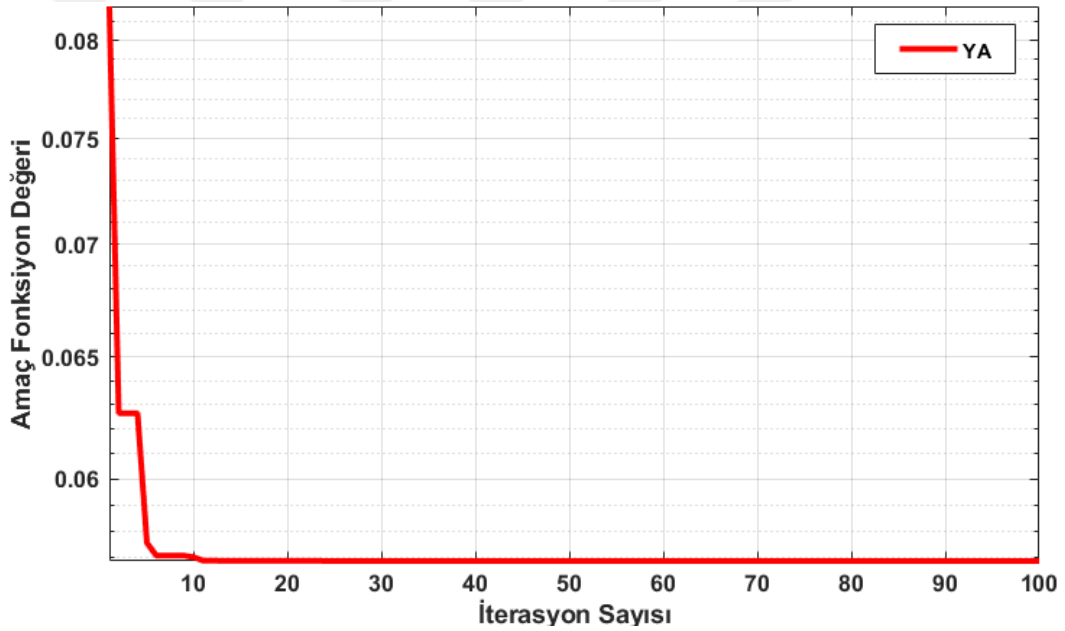
7.3. GAZ TÜRBİNİ PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN VE ITSE PERFORMANS İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ

Çizelge 7.2'de bulunan verilere göre, GT için PID denetleyici ayarlarında YA yönteminin diğer yöntemlere kıyasla belirgin avantajları bulunmaktadır. Örneğin YA yöntemi en düşük aşma değerine sahip olmasıyla bilinir, bu da istenmeyen aşırı değerlenmelerin ve stabilite sorunlarının önlenmesine katkı sağlar. Ayrıca YA yöntemi ITSE performans indeksi açısından diğer yöntemlere göre daha düşük bir değere sahiptir, bu da kontrol hassasiyetinin arttığını ve istenen set noktasına daha hızlı yakınsamanın mümkün olduğunu göstermektedir. BTA yöntemi en düşük yükselme süresine sahip olmasına rağmen, aşma değeri ve ITSE performansı YA yöntemine göre geride kalmaktadır. GA ise en düşük sönüm süresine sahip olabilir ancak aşma değeri ve ITSE performansı YA yönteminden daha düşüktür. Bu değerlendirme YA yönteminin GT için PID denetleyici ayarlarında genel sistem performansını belirgin şekilde iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.2. Gaz türbini PID parametreleri, zaman yanıtları, aşma değerleri ve ITSE performans indeksi tablosu.

Yöntem	PID Kazanç			Zaman Tepkileri			Aşım (%)	ITSE
	K _p	K _i	K _d	t _r (ms)	t _p (s)	t _s (s)		
[ZN_25]	4.14	0.13	0.78	155.726	0.377	30	22.840	0.01378
BTA	3.8881	0.9391	1.2391	126.777	0.321	11	21.341	0.01129
GA	3.601	0.413	0.832	161.378	0.377	4	15.698	0.01123
PSO	3.2159	0.6859	1.1206	140.366	0.320	10	14.368	0.01092
YA	2.9016	0.2867	1.1068	144.317	0.320	2	11.798	0.01028

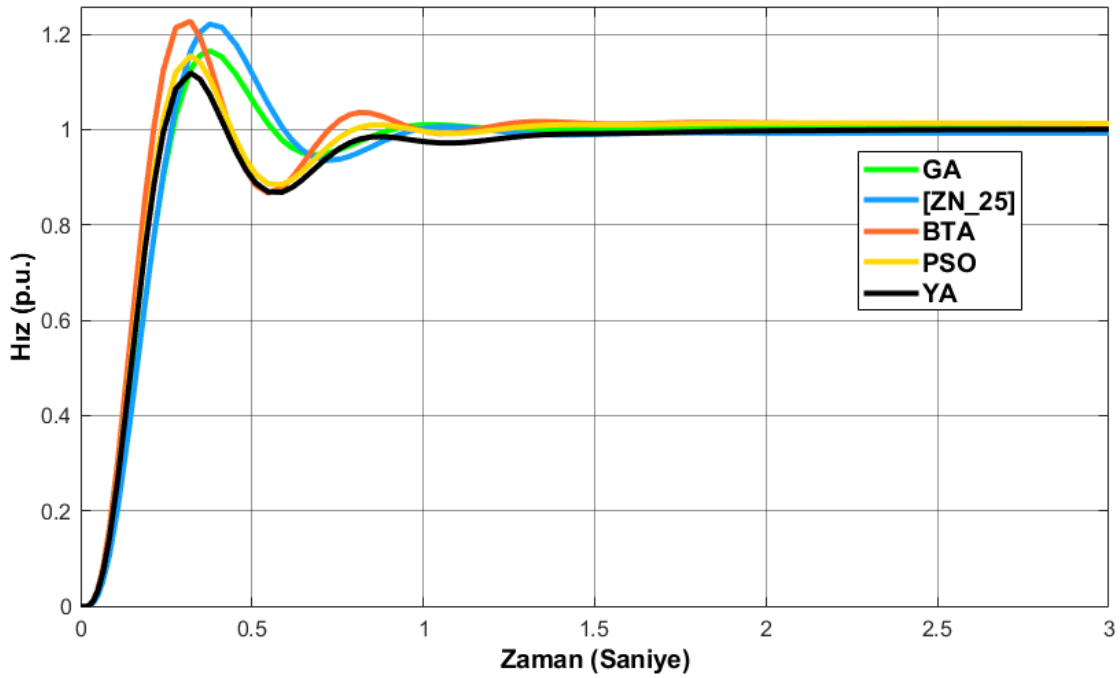
Şekil 7.4'te YA optimizasyon ve ITSE performansına göre, amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı amaç fonksiyon yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 7.4. YA optimizasyon ve ITSE performansına göre amaç fonksiyon yakınsama grafiği.

Şekil 7.5'te verilen GT YFK'sında PID optimizasyonu ve ITSE performans grafiği analizinde YA yönteminin diğer yöntemlere üstün performans sergilediğini göstermektedir. YA yöntemi, düşük aşımıyla sistemin istenilen hız seviyesini aşmadan daha hızlı bir şekilde stabil hale gelmesini sağlar. Ayrıca, en hızlı yerleşim süresine sahip olarak sistemin istenilen hız seviyesine daha hızlı ve stabil bir şekilde ulaşmasını mümkün kılar. YA yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla daha az salınım göstererek sistemin daha

stabil ve güvenilir bir şekilde çalıştığı bulunmuştur. Diğer yöntemleri karşılaştırdığında, GA makul düzeyde performans gösterirken, BTA ve PSO yöntemleri aşım ve yerleşim süresi açısından YA'nın gerisinde kalmaktadır. Ayrıca, referans yöntemi diğerlerine kıyasla performansı daha düşük olup, yüksek aşım ve uzun yerleşim süresi ile dikkat çekmektedir. GT YFK'sında PID optimizasyonunda YA'nın tercih edilmesi, enerji sistemlerinde verimliliği artırır, maliyetleri düşürür ve sistem güvenilirliğini sağlar, bu da enerji yönetiminde önemli bir avantaj sağlamakta olduğu Şekil 7.5'ten anlaşılmaktadır.



Şekil 7.5. Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon ve ITSE performans grafiği.

7.4. GAZ TÜRBİNİ PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN VE ITAE PERFORMANS İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ

Çizelge 7.3'te sunulan PID parametreleri, zaman yanıtları, aşma değerleri ve ITAE performans indeksleri, çeşitli optimizasyon yöntemleriyle elde edilmiştir. Analizimize göre, [ZN_25] yöntemi en yüksek aşma ve yerleşme zamanına sahip olup, performans indeksi de görece yüksektir. BTA yöntemi YA 'ya kıyasla daha iyi performans gösterse de aşma ve yerleşme zamanı açısından geride kalmaktadır. GA yöntemi orta düzeyde bir performans sergilerken, PSO yöntemi genel olarak iyi performans göstermekle birlikte aşma ve yerleşme zamanı YA'dan daha yüksektir.

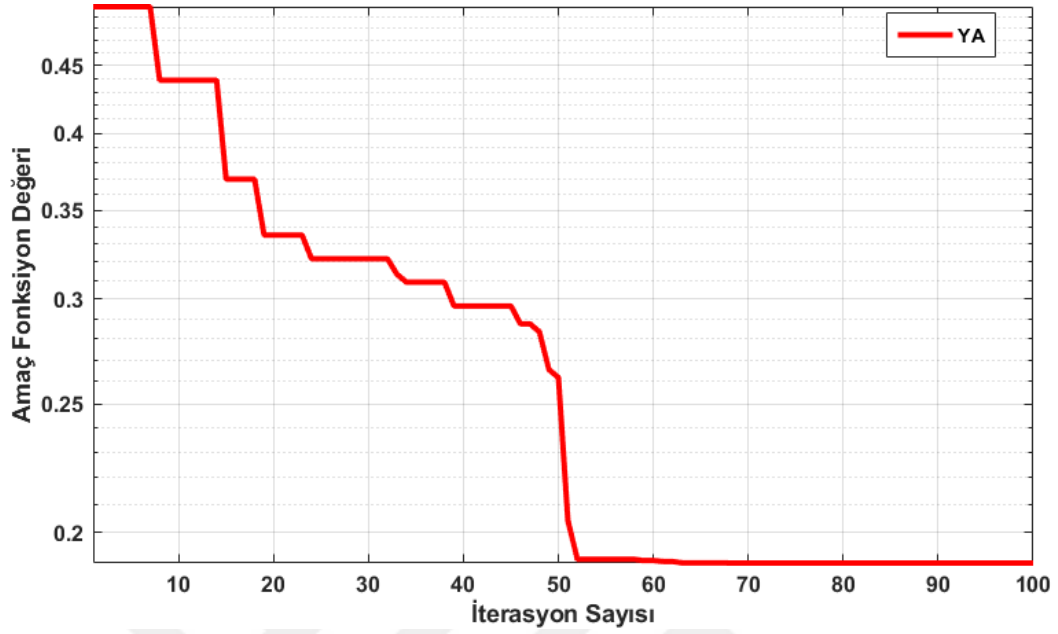
Çizelge 7.3'e göre YA yönteminin önemli üstünlükleri şunlardır: %13.068 'lük düşük aşma değeri, hızlı 3 saniyelik yerleşme süresi ve 0.05351 ITAE performans indeksi ile en düşük değeri sunması. Bu özellikler, sistem stabilizasyonunu istenen hız seviyelerini aşmadan hızlandırır ve daha düşük hata ile daha yüksek kontrol performansı sağlar. Ayrıca, yükselme zamanı (t_r) ve Tepe zamanı (t_p) açısından diğer yöntemlerle rekabet ederken yerleşme süresinde üstün performans gösterir.

YA yönteminin GT YFK'sında PID denetleyicisi optimizasyonunda kullanılması, enerji sistemlerinde verimliliği artırır, maliyetleri düşürür ve sistem güvenilirliğini sağlar. Bu nedenle, YA'nın tercih edilmesi, sistem performansının önemli ölçüde iyileştirilmesine ve enerji yönetiminde kritik avantajlar sağlanmasına yardımcı olur.

Çizelge 7.3. Gaz türbini PID parametreleri, zaman yanıtları, aşma değerleri ve ITAE performans indeksi tablosu.

Yöntem	PID Kazanç			Zaman Tepkileri			Aşım (%)	ITAE
	K _p	K _i	K _d	t_r (ms)	t_p (s)	t_s (s)		
[ZN_25]	5.48	0.336	0.8	139.176	0.3664	20	36.301	0.1073
BTA	4.2219	1.7004	1.3830	115.674	0.290	12	27.564	0.2003
GA	3.7563	0.5582	0.9109	149.984	0.3664	15	18.452	0.0928
PSO	3.6273	0.4204	0.9327	149.602	0.3664	7	17.059	0.05945
YA	3.3094	0.3669	0.9024	157.869	0.3664	3	13.068	0.05351

Şekil 7.6'da YA optimizasyon ve ITAE performansa göre, amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı amaç fonksiyon yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 7.6. YA optimizasyon ve ITAE performansa göre amaç fonksiyon yakınsama grafiği.

GT YFK'sında PID denetleyicisinin performansını optimize etmek için farklı yöntemlerin karşılaştırıldığı Şekil 7.7'de YA yönteminin üstün performansı belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Grafik, zaman ekseninde hız tepkilerinin değişimini (p.u.) cinsinden göstererek farklı optimizasyon algoritmalarının kontrol performansları arasında karşılaştırmalı bir analiz yapılmasına olanak tanımaktadır.

Şekil 7.7'teki analizlere göre, GA, makul düzeyde ilk aşım ve yerleşim süresi sunmasına rağmen YA kadar etkili değildir. BTA, yüksek aşım ve daha uzun yerleşim süresi ile YA'nın gerisinde kalmaktadır. PSO yöntemi iyi performans gösterse de aşım ve yerleşim süresi açısından YA'nın gerisindedir. [ZN_25] numaralı referans yöntemi ise yüksek aşım ve daha uzun yerleşim süresi ile diğerlerine kıyasla daha düşük bir performans sergilemektedir.

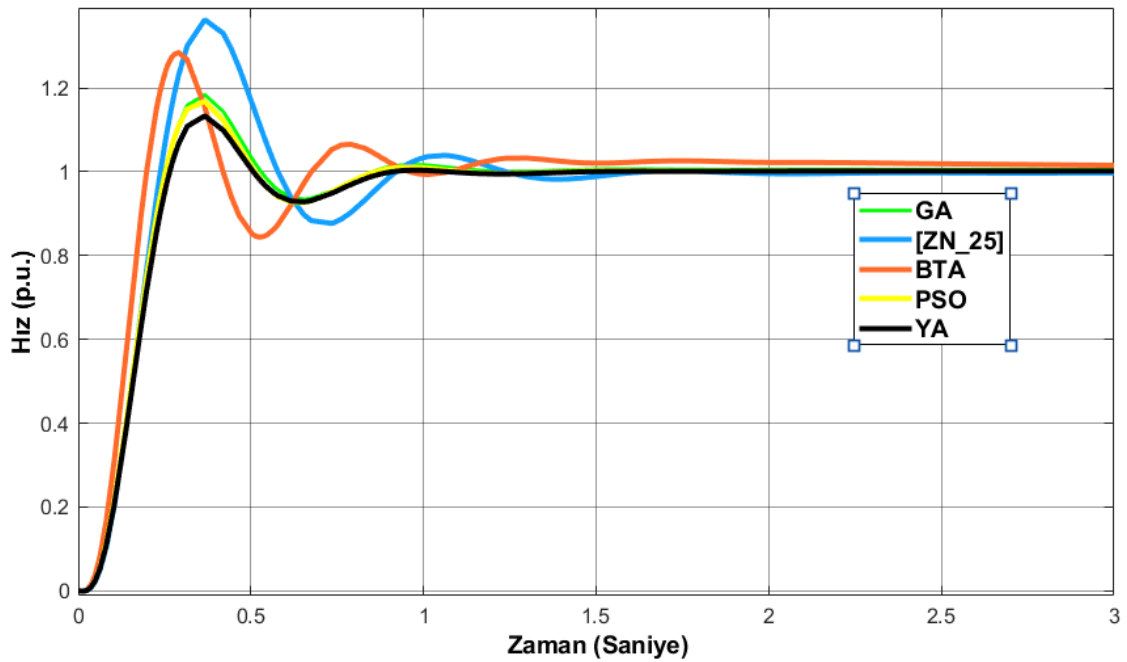
Şekil 7.7'de YA yönteminin belirgin üstünlükleri şunlardır:

- **Düşük Aşım:** YA diğer yöntemlere göre en düşük aşımı sunar, bu da sistemin istenilen hız seviyesini aşmadan daha hızlı stabil hale gelmesini sağlar.
- **Hızlı Yerleşim Süresi:** YA en hızlı yerleşim süresine sahiptir, bu da sistemin

istenilen hız seviyesine daha hızlı bir şekilde ulaşmasını ve stabilize olmasını sağlar.

- Daha Az Salınım: YA diğer yöntemlere kıyasla daha az salınım gösterir, bu da sistemin daha stabil ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar.

Sonuç olarak, YA'nın üstün performansı, GT YFK'sında PID denetleyicisinin optimizasyonunda önemli bir rol oynar. Düşük aşma, hızlı yerleşim süresi ve daha düşük ITAE performans indeksi ile YA enerji sistemlerinde verimliliği artırır, maliyetleri düşürür ve sistem güvenilirliğini sağlar. Bu nedenle, GT YFK'sında PID denetleyicisinin optimizasyonunda YA'nın kullanılması, sistem performansını önemli ölçüde iyileştirir ve enerji yönetiminde kritik bir avantaj sağlar.



Şekil 7.7. Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon ve ITAE performans grafiği.

7.5. GAZ TÜRBİNİ PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN VE IAE PERFORMANS İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ

GT YFK'sında PID denetleyicisinin performansını optimize eden farklı yöntemlerin karşılaştırıldığı Çizelge 7.4'te verilmiştir. Çizelge 7.4 incelendiğinde, BTA yöntemi yüksek aşım (%17.059) ve uzun yerleşme süresi (20 saniye) ile YA yönteminin gerisinde kalmaktadır. GA yöntemi ise makul bir aşım (%11.798) ve yerleşme süresi (24 saniye) sunmasına rağmen YA kadar etkili değildir. PSO yöntemi iyi performans göstermesine

rağmen, aşım (%10.556) ve yerleşme süresi (3.5 saniye) açısından YA'nın gerisinde kalmaktadır.

Çizelge 7.4'e göre YA yönteminin performansı diğer yöntemlere kıyasla şu açılardan öne çıkmaktadır.

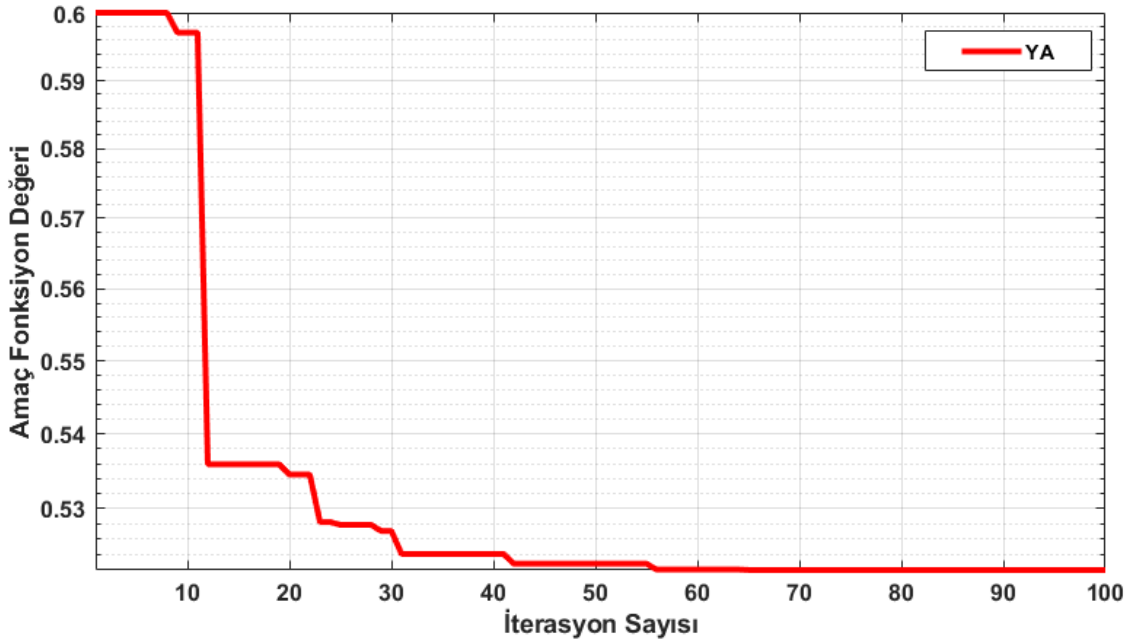
1. **Düşük Aşma (%2.904):** YA diğer yöntemlere göre en düşük aşma değerine sahiptir. Bu, sistemin istenilen hız seviyesini aşmadan daha hızlı stabil hale gelmesini sağlar.
2. **Hızlı Yerleşme Süresi (3 saniye):** YA en hızlı yerleşme süresine sahip yöntemdir. Bu, sistemin istenilen hız seviyesine daha hızlı bir şekilde ulaşmasını ve stabilize olmasını sağlar. Özellikle PSO (3,5 saniye), GA (24 saniye) ve BTA (20 saniye) ile karşılaştırıldığında, YA'nın hızlı tepki verdiği görülmektedir.
3. **Düşük IAE Performans İndeksi (0.2022):** YA en düşük IAE performans indeksine sahiptir, bu da sistemin toplam hata performansının en iyi seviyede olduğunu gösterir. Bu değer, YA'nın optimize edilmiş kontrol sağlayarak sistemin daha verimli çalışmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak YA yöntemi, GT YFK'sında PID denetleyicisinin optimizasyonunda üstün performans sergilemektedir. Düşük aşma, hızlı yerleşme süresi ve düşük IAE performans indeksi ile YA enerji sistemlerinde verimliliği artırır, maliyetleri düşürür ve sistem güvenilirliğini sağlar. Bu nedenle, GT YFK'sında PID denetleyicisinin optimizasyonunda YA'nın kullanılması, sistem performansını önemli ölçüde iyileştirir ve enerji yönetiminde kritik bir avantaj sağlar.

Çizelge 7.4. Gaz türbini PID parametreleri, zaman yanıtları, aşma değerleri ve IAE performans indeksi tablosu.

Yöntem	PID Kazanç			Zaman Tepkileri			Aşım (%)	IAE
	Kp	Ki	Kd	t _r (ms)	t _p (s)	t _s (s)		
BTA	3.6674	0.8502	1.0682	140.980	0.346	20	17.059	0.2379
GA	3.1712	0.4188	0.9519	156.112	0.346	24	11.798	0.208
PSO	2.9823	0.2785	0.9384	159.138	0.313	3.5	10.556	0.2027
YA	2.904	0.2821	0.8904	168.160	0.346	3	8.152	0.2022

Şekil 7.8’de YA optimizasyon ve IAE performansa göre, amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı amaç fonksiyon yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 7.8. YA optimizasyon ve IAE performansa göre amaç fonksiyon yakınsama grafiği.

Şekil 7.9’daki grafikte, GT YFK’ında PID denetleyicisinin performansını optimize eden farklı yöntemlerin zaman tepkileri gösterilmektedir. Grafik, hızın p.u. (per unit) cinsinden zamanla değişimini göstererek, GA, YA, BTA ve PSO olmak üzere dört farklı optimizasyon algoritmasının sistem üzerindeki kontrol performanslarını karşılaştırmalı olarak analiz etmektedir.

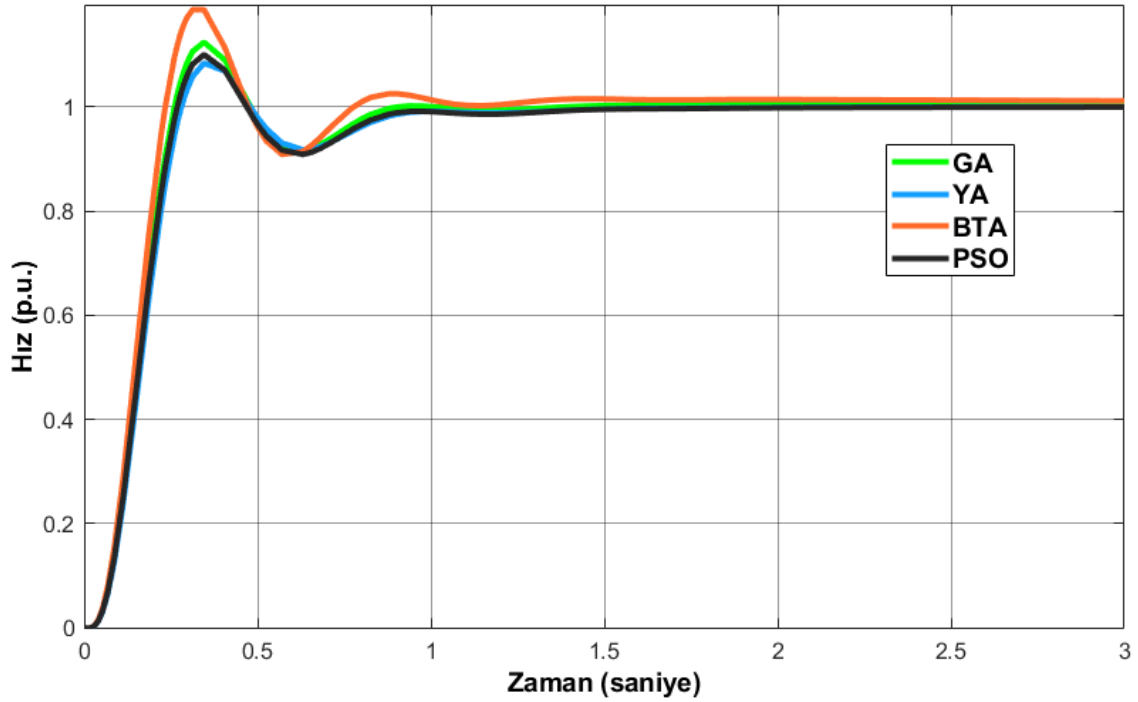
Şekil 7.9’a göre, GA yöntemi makul bir aşım ve yerleşme süresi sunmasına rağmen YA kadar etkili değildir. GA yöntemi, daha yüksek aşım ve yerleşme süresine sahiptir. BTA yöntemi, en yüksek aşım ve en uzun yerleşme süresine sahip olup, bu da sistemin stabil hale gelmesi için daha fazla zaman almasına ve daha fazla salınım göstermesine neden olmaktadır. PSO yöntemi ise iyi bir performans göstermesine rağmen, aşım ve yerleşme süresi açısından YA’nın gerisinde kalmaktadır.

YA yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla belirgin bir üstünlük sergilemektedir. Grafikten de görülebileceği gibi YA yöntemi:

1. **Düşük Aşım:** En düşük aşım değerine sahiptir. Bu, sistemin hız seviyesini aşmadan daha hızlı stabil hale gelmesini sağlar.

2. **Hızlı Yerleşme Süresi:** En kısa yerleşme süresine sahiptir. Bu, sistemin istenilen hız seviyesine daha hızlı bir şekilde ulaşmasını ve stabilize olmasını sağlar.
3. **Düşük Salınım:** Diğer yöntemlere kıyasla daha az salınım göstermektedir, bu da daha stabil bir sistem performansı sağlar.

Sonuç olarak, Şekil 7.9'a göre YA yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla üstün performans sergilemektedir. Düşük aşma, hızlı yerleşme süresi ve düşük salınım ile YA GT YFK'sında PID denetleyicisinin optimizasyonunda en etkili yöntemdir. YA'nın enerji sistemlerinde verimliliği artırarak maliyetleri düşürdüğü ve sistem güvenilirliğini sağladığı görülmektedir. Dolayısıyla, GT YFK'sında PID denetleyicisinin optimizasyonunda YA'nın kullanılması, sistem performansını önemli ölçüde iyileştirir ve enerji yönetiminde kritik bir avantaj sağlar.



Şekil 7.9. Gaz türbini yük frekans kontrolünde PID optimizasyon ve IAE performans grafiği.

7.6. GAZ TÜRBİNİ YÜK FREKANS KONTROL PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 7.10'da GT yük frekans kontrol performanslarının değerlendirilmesi dört farklı performans indeksini (ISE, ITSE, ITAE ve IAE) karşılaştırılmıştır. Her bir grafikte, farklı yöntemlerin performans indeksleri gösterilmektedir. Hangi yöntemin en iyi performansı gösterdiğini belirlemek için her bir indeks değerini karşılaştırılmıştır.

1. ISE Performans İndeksi:

- En düşük değer (en iyi performans): YA (0.1206)
- Diğer yöntemlerle kıyaslandığında YA yöntemi en iyi ISE performansını göstermektedir.

2. ITSE Performans İndeksi:

- En düşük değer (en iyi performans): YA (0.01028)
- Diğer yöntemlerle kıyaslandığında YA yöntemi en iyi ITSE performansını göstermektedir.

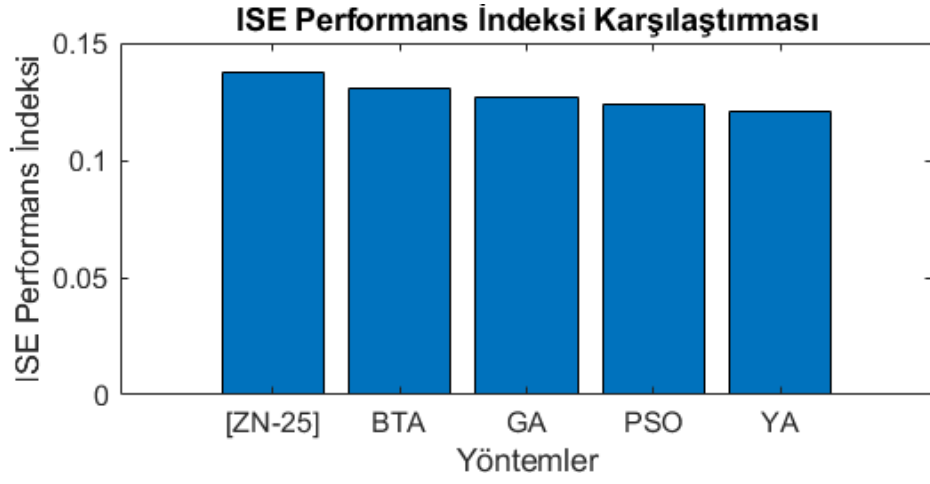
3. ITAE Performans İndeksi:

- En düşük değer (en iyi performans): YA (0.05351)
- Diğer yöntemlerle kıyaslandığında YA yöntemi en iyi ITAE performansını göstermektedir.

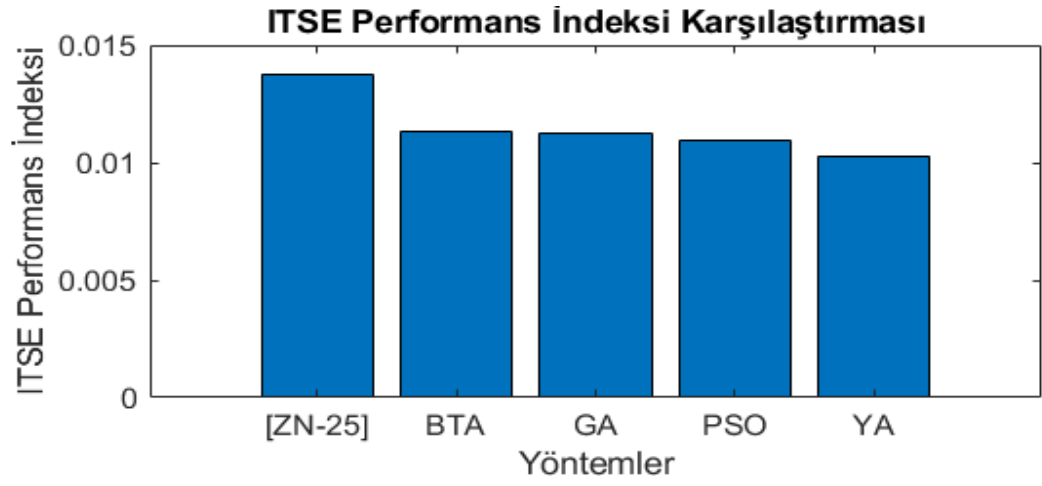
4. IAE Performans İndeksi:

- En düşük değer (en iyi performans): YA (0.2022)
- Diğer yöntemlerle kıyaslandığında YA yöntemi en iyi IAE performansını göstermektedir.

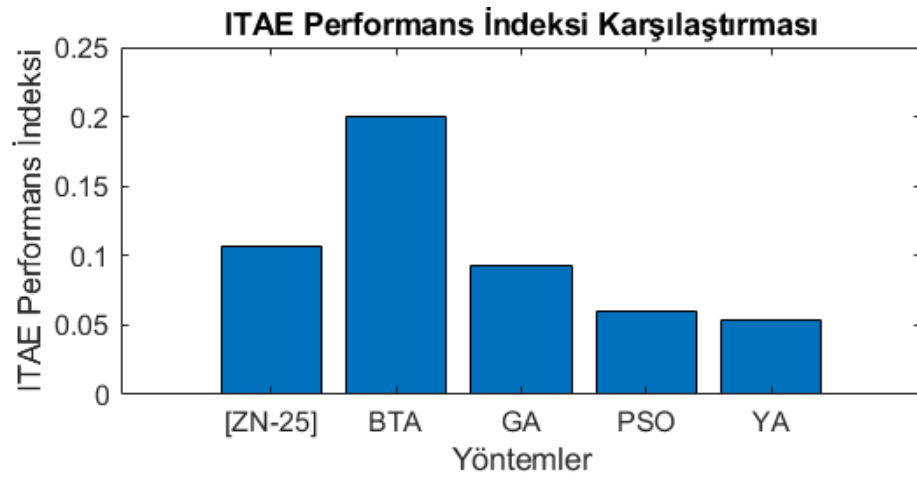
Şekil 7.10'da , dört performans indeksinin tamamında YA yöntemi en iyi performansı göstermektedir. Buda YA yönteminin diğer yöntemlere göre daha etkili ve verimli olduğunu göstermektedir.



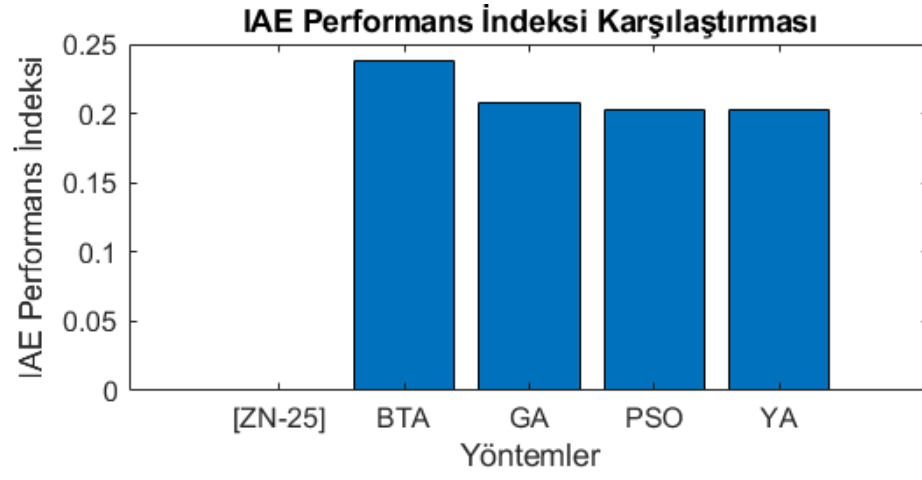
a)



b)



c)



d)

Şekil 7.10. Gaz türbini yük frekans kontrol a) ISE, b) ITSE, c) ITAE, d) IAE performanslarının değerlendirme grafikleri.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu doktora çalışmasında, tek şaftlı ağır hizmet tipi gaz türbini (AHGT) sistemlerinde yük frekans kontrolünün (YFK) etkin bir şekilde sağlanabilmesi amacıyla PID denetleyicisi, çeşitli meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma boyunca sistemin hem geçici hem de kararlı hal performansları detaylı şekilde incelenmiş; frekans sapmalarının en aza indirilmesi, sistem kararlılığının artırılması ve hızlı dinamik yanıt elde edilmesi hedeflenmiştir. MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen modelleme ve benzetim altyapısı, teorik altyapı ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmış, parametrik analizler ışığında farklı kontrol senaryoları karşılaştırılmıştır.

8.2. ELDE EDİLEN BAŞLICA BULGULAR

- Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, Yusufçuk Algoritması (YA), diğer algoritmalara (GA, PSO, BTA) kıyasla daha üstün performans göstermiştir. YA ile elde edilen PID kazançları, sistemin daha düşük aşma oranı, daha hızlı yerleşme süresi ve daha düşük hata performans indeksleri ile çalışmasını sağlamıştır.
- YA algoritması, dört farklı zaman-integralli performans indeksine (ISE, ITSE, ITAE, IAE) göre yapılan değerlendirmelerde her bir metrikte en düşük hata değerlerini sağlamıştır. Bu sonuç, YA'nın hem geçici hem de kararlı durum tepkilerinde sistem performansını en iyi şekilde optimize ettiğini göstermektedir.
- Özellikle ada modunda çalışan GT sistemlerinin frekans ve gerilim regülasyonuna doğrudan yanıt verebilmesi açısından, PID tabanlı kontrol yapılarının optimizasyonu büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, YA algoritması ile optimize edilen PID kontrolörlerin, mikro şebekeler ve adacıklaştırılmış enerji sistemleri gibi izole işletim senaryolarında uygulanabilirliği oldukça yüksektir.
- Denetleyici kazançlarının performans indekslerine göre belirlenmesi, klasik kontrol yöntemlerinin sabit parametreliliğinden kaynaklanan sınırlılıkların üstesinden gelinmesini sağlamaktadır. Özellikle GT sistemlerinde yük değişimlerine karşı hızlı ve kararlı yanıt elde edilmesi, sistemin dinamik performansına doğrudan katkı sağlamaktadır.

8.3. LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME

- Literatürde GA ve PSO algoritmalarının PID kazanç optimizasyonunda sıklıkla tercih edildiği gözlemlenmektedir. Ancak bu çalışmada YA algoritmasının da etkili bir optimizasyon yaklaşımı olarak kullanılabileceği ve hatta bazı durumlarda geleneksel yöntemlerin önüne geçebileceği gösterilmiştir.
- Özellikle GA ve PSO yöntemleri, çoğu zaman lokal minimumlara takılabilmekte ve sistem performansını sınırlamaktadır. Buna karşın YA'nın geniş arama yeteneği sayesinde, daha dengeli ve kararlı bir çözüm uzayına ulaşılabilmektedir.
- ADA modunda yük frekans kontrolü üzerine yapılan çalışmalar çoğunlukla klasik modellemelere dayansa da, bu tezde Rowen GT modeli kullanılarak detaylı bir kontrol yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu durum, sistemin fiziksel doğruluğunu artırmakta ve endüstriyel uygulamalara geçiş için önemli bir temel oluşturmaktadır.

8.4. MÜHENDİSLİK PERSPEKTİFİNDEN ÖNERİLER

- GT sistemlerinde frekans sapmalarına karşı etkin kontrol sağlanması amacıyla PID kontrolörlerin parametrik olarak optimize edilmesi, yalnızca sistem performansını artırmakla kalmamakta, aynı zamanda enerji kalitesini ve sistem güvenilirliğini de yükseltmektedir.
- YA algoritması gibi yeni nesil sezgisel yaklaşımlar, klasik yöntemlerin ötesine geçerek GT sistemlerinin gerçek zamanlı kontrol ihtiyaçlarına daha hızlı ve hassas çözümler sunabilmektedir. Bu nedenle, mühendislik uygulamalarında bu algoritmaların yazılım ve donanım entegrasyonu yönünde çalışmalar yapılması önerilmektedir.
- PID kontrolünün ötesinde FOPID (Fractional Order PID), bulanık mantık, yapay sinir ağları gibi gelişmiş kontrol tekniklerinin de bu yapıya entegre edilerek, hibrit kontrol sistemleri geliştirilmesi mümkündür.

8.5. GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

- Bu çalışmada yalnızca tek şaftlı GT modeli ele alınmış olup, çoklu şaft yapılar veya kombine çevrim sistemleri gibi daha karmaşık modellerin benzer analizlerle değerlendirilmesi önerilmektedir.

- ADA modu senaryolarında yalnızca frekans kontrolüne odaklanılmıştır. Gerilim regülasyonu, harmonik bozulmalar, ani yük değişimleri gibi diğer güç kalitesi faktörlerinin de dahil edileceği bütüncül bir kontrol stratejisi geliştirilebilir.
- Mevcut çalışmada kullanılan meta-sezgisel algoritmalar statik parametrelerle çalıştırılmıştır. Dinamik parametre ayarlama, adaptif öğrenme mekanizmaları ve yapay zekâ destekli hibrit algoritmaların entegrasyonu, performansı daha da ileri taşıyabilir.
- Gerçek zamanlı kontrol sistemlerinde YA algoritmasının uygulanabilirliği deneysel olarak test edilmelidir. Özellikle dijital kontrol kartları ve mikrodenetleyici tabanlı platformlar üzerinde gerçek yüklerle yapılacak testler, uygulama geçerliliğini artıracaktır.

8.6. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen PID tabanlı kontrol yapısının, meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile desteklenmesi sonucunda GT sistemlerinde önemli ölçüde performans artışı sağlandığı ortaya konmuştur. Özellikle YA algoritması, performans indekslerine göre yapılan değerlendirmelerde diğer yöntemlere kıyasla daha üstün sonuçlar sunarak, yük frekans kontrol problemlerinin çözümünde güçlü bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Çalışma sonuçları hem akademik alanda hem de endüstriyel uygulamalarda referans teşkil edecek niteliktedir. Bu bağlamda, PID kontrol stratejilerinin yeni nesil algoritmalarla desteklenerek güç sistemlerinin daha kararlı, güvenilir ve verimli hale getirilmesi mümkün kılınmıştır.

9. KAYNAKLAR

- [1] J. Kotowicz ve M. Brzęczek, “Analysis of increasing efficiency of modern combined cycle power plant: A case study”, *Energy*, c. 153, ss. 90–99, 2018.
- [2] The MathWorks, Inc. (01 Ocak 2023). *MATLAB version: 9.13.0 (R2022a)*, Erişim: <https://www.mathworks.com>
- [3] N. Hasan, J. N. Rai, ve B. B. Arora, “Optimization of CCGT power plant and performance analysis using MATLAB/Simulink with actual operational data”, *Springerplus*, c. 3, sayı 1, ss. 1–9, 2014.
- [4] M. Elwardany, A. M. Nassib, ve H. A. Mohamed, “Analyzing global research trends in combined cycle power plants: A bibliometric study”, *Energy Nexus*, c. 13, sayı September 2023, ss. 1–18, 2024.
- [5] M. Eslami ve A. Banazadeh, “Control performance enhancement of gas turbines in the minimum command selection strategy.pdf”, *ISA Trans. J.*, c. 112, ss. 186–198, 2021.
- [6] K. Abudu, U. Igie, I. Roumeliotis, ve R. Hamilton, “Impact of gas turbine flexibility improvements on combined cycle gas turbine performance”, *Appl. Therm. Eng.*, c. 189, sayı January, s. 116703, 2021.
- [7] M. Aliyu, A. B. AlQudaihi, S. A. M. Said, ve M. A. Habib, “Energy, exergy and parametric analysis of a combined cycle power plant”, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, c. 15, sayı November 2019, s. 100450, 2020.
- [8] D. Talah ve H. Bentarzi, “Frequency Control System Effectiveness in a Combined Cycle Gas Turbine Plant”, içinde *Engineering Proceedings*, 2022, ss. 1–7.
- [9] S. St. Iliescu, I. Făgărășan, V. Popescu, ve C. Soare, “Gas turbine modeling for load-frequency control”, *UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng.*, c. 70, sayı 4, ss. 13–20, 2008.
- [10] H. Javanmardi, M. Dehghani, M. Mohammadi, S. Siamak, ve M. R. Hesamzadeh, “BMI-Based Load Frequency Control in Microgrids under False Data Injection Attacks”, *IEEE Syst. J.*, c. 16, sayı 1, ss. 1021–1031, 2022.

- [11] M. Ranjan ve R. Shankar, “A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects”, *J. Energy Storage*, c. 45, sayı May 2021, s. 103717, 2022.
- [12] O. Mohamed ve A. Khalil, “Progress in Modeling and Control of Gas Turbine Power Generation Systems: A Survey”, *Energies*, c. 13, sayı 9, 2020.
- [13] S. K. Yee, J. V. Milanović, ve F. M. Hughes, “Overview and comparative analysis of gas turbine models for system stability studies”, *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 23, sayı 1, ss. 108–118, 2008.
- [14] S. K. Yee, F. M. Hughes, ve J. V. Milanovic, “Comparative analysis and reconciliation of gas turbine models for stability studies”, *2007 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. PES*, 2007.
- [15] M. Gheisarnejad, “An effective hybrid harmony search and cuckoo optimization algorithm based fuzzy PID controller for load frequency control”, *Appl. Soft Comput. J.*, c. 65, ss. 121–138, 2018.
- [16] W. I. Rowen, “Simplified Mathematical Representations of Heavy-Duty Gas Turbines”, *Am. Soc. Mech. Eng.*, c. 105, sayı 4, ss. 865–869, 1983.
- [17] W. I. Rowen, “Operating characteristics of heavy-duty gas turbines in utility service”, *Gas Turbine Aeroengine Congr.*, c. 5, ss. 1–13, 1988.
- [18] W. I. Rowen, “Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service”, *ASME 1992 Int. Gas Turbine Aeroengine Congr. Expo. GT 1992*, c. 5, 1992.
- [19] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models, “Hydraulic Turbine And Turbine Control Models For System Dynamic Studies”, *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 7, sayı 1, ss. 167–179, 1992.
- [20] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models, “Dynamic Models for Combined Cycle Plants in Power System Studies”, *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 9, sayı 3, ss. 1698–1708, 1994.
- [21] L. Pereira, J. Undrill, D. Kosterev, D. Davies, ve S. Patterson, “A new thermal governor modeling approach in the WECC”, *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 18, sayı 2, ss. 819–829, 2003.

- [22] M. Nagpal, A. Moshref, G. K. Morison, ve P. Kundur, “Experience with testing and modeling of gas turbines”, içinde *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 2001, ss. 652–656.
- [23] Z. Baba, W. Hung, R. Boyer, T. Inoue, ve Z. Bozic, “Modeling of Gas Turbines and Steam Turbines in Combined Cycle Power Plants”, içinde *CIGRE Technical Brochure*, sayı December, 2003, ss. 1–119.
- [24] K. Kunitomi vd., “Modeling frequency dependency of gas turbine output”, *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, c. 2, sayı Winter Meeting, ss. 678–683, 2001.
- [25] M. Mohamed Iqbal ve R. Joseph Xavier, “Fuzzy self-tuning PID controller for speedtronic governor controlled heavy duty gas turbine power plants”, *Electr. Power Components Syst.*, c. 42, sayı 14, ss. 1485–1494, 2014.
- [26] M. M. Iqbal, R. J. Xavier, ve J. Kanakaraj, “Optimization of droop setting using Genetic Algorithm for Speedtronic Governor controlled Heavy Duty Gas Turbine Power Plants”, *WSEAS Trans. POWER Syst.*, c. 11, ss. 117–124, 2016.
- [27] M. M. Mohamed Iqbal, R. Joseph Xavier, ve J. Kanakaraj, “A neuro-fuzzy controller for grid-connected heavy-duty gas turbine power plants”, *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, c. 25, sayı 3, ss. 2375–2387, 2017.
- [28] V. V Sarumathi S, Mohamed Iqbal M, “Linearized Transfer Function Model of Industrial Heavy Duty Gas Turbine Plants”, içinde *2016 International Conference on Innovations in information Embedded and Communication Systems (ICIECS'16)*, 2016.
- [29] A. Shumitha, S. Prasaanth, K. Suthesh, S. Balamurugan, ve K. R. M. V. Chandrakala, “Simulated annealing based fractional order PID controller for a heavy duty gas turbine plant”, *2018 3rd IEEE Int. Conf. Recent Trends Electron. Inf. Commun. Technol. RTEICT 2018 - Proc.*, sayı 1, ss. 315–318, 2018.
- [30] V. H. Haji, A. Fekih, ve C. A. Monje, “A dynamic firefly algorithm-based fractional order fuzzy-PID approach for the control of a heavy-duty gas turbine”, *IFAC-PapersOnLine*, c. 53, sayı 2, ss. 11913–11919, 2020.
- [31] A. A. Oglah ve A. J. Mohammed, “Design of an Interval Fuzzy Type-2- PID Controller for a Gas Turbine Power Plant”, *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci.*, c. 44, sayı 1, ss. 155–169, 2018.

- [32] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, 1. baskı, McGraw-Hill, New York, A.B.D., ss. 601-620, 1994.
- [33] T. J. Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, *Power System Analysis and Design*. 2012.
- [34] H. H. Coban ve W. Lewicki, “Flexibility in Power Systems of Integrating Variable Renewable Energy Sources”, *J. Adv. Res. Nat. Appl. Sci.*, c. 9, sayı 1, ss. 190–204, 2023.
- [35] J. R. Machowski, J., Bialek, J. W., & Bumby, *Power System Dynamics Stability and Control*. 2008.
- [36] IEC-60092-303, “International Standard Part 303: Equipment – Power transformers and reactors”, *IEC*, c. 8, s. 137, 2023.
- [37] ENTSO-E, “ENTSO-E. (2009) Load-Frequency Control”, *Eur. Networks Transm. Syst. Oper. Electr. Rep.*, ss. 1–33, 2009.
- [38] ENTSO-E, “ENTSO-E. (2020) Load-Frequency Control”, *Eur. Networks Transm. Syst. Oper. Electr. Rep.*, sayı September, 2020.
- [39] C. Andiç, “Güç Sistemlerindeki Durum Tahmininin Karga Arama Algoritması İle İncelenmesi”, Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2024.
- [40] S. Özümcan, “Çok Bölgeli Güç Sisteminde Sezgisel Algoritmalar İle Sekonder Frekans Kontrolü”, Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2024.
- [41] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, ve G. Sheblé, *Power Generation, Operation and Control*. 2013.
- [42] H. Jiang, Y. Zhang, ve E. Muljadi, *New Technologies for Power System Operation and Analysis*, 1. baskı, Acad. Press, 2020.
- [43] P. M. Anderson ve A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, c. 67, sayı 8. 2003.

- [44] G. Zhang, “EPRI Power Systems Dynamics Tutorial”, *Electr. Power Res. Inst.*, 2009.
- [45] P. M. Anderson ve M. Mirheydar, “An Adaptive Method for Setting Underfrequency Load Shedding Relays”, *IEEE Trans. Power Syst.*, c. 7, sayı 2, ss. 647–655, 1992.
- [46] G. Görel, “Güneş Enerji Sistemli İki Bölge Enterkonnekte Şebekede Modern Kontrol Teknikleri İle Yük-Frekans Kontrolü”, Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 2017.
- [47] O. Alıç, “Güç Sistemlerinde Optimizasyon Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici İle Yük Frekans Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Karadeniz Tek. Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2014.
- [48] M. M. Yıldırım, “Elektrik Güç Sistemlerinde Yapay Zekâ İle Yük Frekans Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İskenderun Tek. Üniversitesi, Hatay, Türkiye, 2017.
- [49] İ. Eke, “Frequency Control in Microgrid Power System with Thermal Unit Using PID Controller Based on Artificial Bee Colony Algorithm”, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Derg.*, c. 12, sayı 3, ss. 11–23, 2020.
- [50] H. Saadat, *Power System Analysis*, 1. baskı, New York McGraw-Hill, 1999.
- [51] Z. Y. Yılmaz, “Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolünde PID Denetleyici Ve Parametrelerinin Simbiyotik Organizmalar Arama Algoritması ile Ayarı”, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2020.
- [52] K. K. Gümüş, “Güç Santrallerinde Primer Frekans ve Yük Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [53] Ö. Can ve A. Öztürk, “Tek Bölge Bir Güç Sisteminde Bulanık Mantık Tabanlı Yük Frekans Kontrolü (YFK)”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, c. 9, sayı 1, ss. 405–417, 2021.
- [54] C. M. Rahman, T. A. Rashid, A. Alsadoon, N. Bacanin, P. Fattah, ve S. Mirjalili, “A survey on dragonfly algorithm and its applications in engineering”, *Evol. Intell.*, c. 16, sayı 1, ss. 1–21, 2023.

- [55] A. M. Mansourabad, M. T. H. Beheshti, ve M. Simab, “A hybrid PSO_Fuzzy_PID controller for gas turbine speed control”, *Int. J. Control Autom.*, c. 6, sayı 1, ss. 13–24, 2013.
- [56] V. H. Haji, A. Fekih, C. A. Monje, ve R. Fakhri Asfestani, “Adaptive model predictive control design for the speed and temperature control of a V94.2 gas turbine unit in a combined cycle power plant”, *Energy*, c. 207, 2020.
- [57] M. K. Debnath, T. Jena, ve S. K. Sanyal, “Frequency control analysis with PID-fuzzy-PID hybrid controller tuned by modified GWO technique”, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, c. 29, sayı 10, ss. 1–21, 2019.
- [58] M. MacEdo vd., “Overview on Binary Optimization Using Swarm-Inspired Algorithms”, *IEEE Access*, c. 9, ss. 149814–149858, 2021.
- [59] H. Bevrani, *Robust Power System Frequency Control*, 1. baskı, Springer, New York, 2009.
- [60] A. Safari, F. Babaei, ve M. Farrokhifar, “A load frequency control using a PSO-based ANN for micro-grids in the presence of electric vehicles”, *Int. J. Ambient Energy*, c. 42, sayı 6, ss. 688–700, 2021.
- [61] M. Montazeri-Gh ve A. Nekoonam, “Gas path component fault diagnosis of an industrial gas turbine under different load condition using online sequential extreme learning machine”, *Eng. Fail. Anal.*, c. 135, sayı October 2021, s. 106115, 2022.
- [62] S. S. A. Tavakoli, “Multivariable PID Control with Application to Gas Turbine Engines Thesis submitted for candidature for the degree of PhD”, 2005.
- [63] Kunal ve S. K. Jha, “Optimal Model Order Reduction of Heavy-Duty Gas Turbine Power Plants”, içinde *2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking, ICSCAN 2021*, IEEE, 2021.
- [64] M. Cansever ve A. B. Arsoy, “Intentional Islanding with Distributed Generation”, *Eleco 2014 Elektr. – Elektron. – Bilgi. ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, ss. 29–33, 2014.
- [65] G. Bayrak, “Dağıtık Güç Üretim Tesislerinin Şebeke ile Entegrasyonu i çin Uygun Ada Mod Çalışma Tespit Yönteminin Seçimi”, *EEB 2016 Elektr. ve Bilgi.*

Sempozyumu, ss. 127–131, 2016.

- [66] P. Praveena, H. S. Shubhanka, V. Neha, P. Prasath, ve G. S. Veda, “Optimal Design of Load Frequency Control of Single Area System Using Ziegler-Nichols and Genetic Algorithm”, *Asian J. Electr. Sci.*, c. 8, sayı June, ss. 62–64, 2019.
- [67] B. Bozali, “Elektrik Güç Sistemlerinde Kararlılık Problemlerinin Yerçekimi Algoritması ile İncelenmesi”, *Düzce Üniversitesi, Fen Bilim. Enstitüsü, Elektr. Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Düzce, Türkiye*, ss. 1–118, 2012.
- [68] B. Bozali, N. B. N. Al-Saremi, ve A. Öztrük, “Enhancing DC Motor Speed Control Performance Using Heuristic Optimization and Comparative Analysis of Control Methods”, *Düzce Univ. J. Sci. Technol.*, c. 12, ss. 2220–2244, 2024.
- [69] B. Bozali ve H. Karabaş, “PID Denetleyici Tasarımı İçin Çita Optimizasyonu Algoritması Kullanarak Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrol Optimizasyonu”, içinde *BIDGE Yayınları, Mekatronik Mühendisliğinde Yük Frekans Kontrolü ve Stabilizasyon*, 2024, ss. 6–38.
- [70] Ö. Can, H. Eroğlu, ve A. Öztürk, “Automatic generation controller based on whale optimization algorithm in PV-thermal power systems”, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, c. 38, sayı 2, ss. 915–926, 2023.
- [71] M. B. Omar, R. Ibrahim, M. F. Abdullah, ve M. H. M. Tarik, “Modelling of Dry-Low Emission Gas Turbine Fuel System using First Principle Data-Driven Method”, *J. Power Technol.*, c. 100, sayı 1, ss. 1–13, 2020.
- [72] H. Fang, L. Chen, ve Z. Shen, “Application of an improved PSO algorithm to optimal tuning of PID gains for water turbine governor”, *Energy Convers. Manag.*, c. 52, sayı 4, ss. 1763–1770, 2011.
- [73] S. Balamurugan, R. J. Xavier, ve A. Ebenezer, “Application of Genetic Algorithm in Optimal PID Gain Tuning for Heavy Duty Gas Turbine Plant”, *Journal of Electrical Systems*, c. 4, sayı 4, ss. 1–10, 2008.
- [74] M. Eslami, M. R. Shayesteh, ve M. Pourahmadi, “Optimal Design of PID-Based Low-Pass Filter for Gas Turbine Using Intelligent Method”, *IEEE Access*, c. 6, ss. 15335–15345, 2018.
- [75] H. F. S. Abu-Seada, M. M. M. Slama, M. A. M. Hassan, ve M. A. Ebrahim, “Grey Wolf Optimization Approach-Based Exhaust Temperature Control For Gas Turbine Power System”, *JES Assiut Univ. Fac. Eng.*, c. 48, sayı 4, ss. 596–612,

2020.

- [76] L. C. Saikia ve S. K. Sahu, “Automatic generation control of a combined cycle gas turbine plant with classical controllers using Firefly Algorithm”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, c. 53, sayı 1, ss. 27–33, 2013.
- [77] A. Marzoughi, H. Selamat, M. F. R. And, ve H. A. Rahim, “Optimized proportional integral derivative (PID) controller for the exhaust temperature control of a gas turbine system using particle swarm optimization”, *Int. J. Phys. Sci.*, c. 7, sayı 5, ss. 720–729, 2012.
- [78] A. Lazzaretto ve A. Toffolo, “Analytical and neural network models for gas turbine design and off-design simulation”, *Int. J. Appl. Thermodyn.*, c. 4, sayı 4, ss. 173–182, 2001.
- [79] T. Baklacioglu, O. Turan, ve H. Aydin, “Dynamic modeling of exergy efficiency of turboprop engine components using hybrid genetic algorithm-artificial neural networks”, *Energy*, c. 86, ss. 709–721, 2015.
- [80] H. Asgari, “Modelling, Simulation and Control of Gas Turbines Using Artificial Neural Networks”, Doktora Tezi, Makina Mühendisliği, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2014.
- [81] W. Muhammad Ashraf ve V. Dua, “Driving towards net-zero from the energy sector: Leveraging machine intelligence for robust optimization of coal and combined cycle gas power stations”, *Energy Convers. Manag.*, c. 314, sayı March, ss. 1–15, 2024.
- [82] M. H. Amiri, N. M. Hashjin, M. K. Najafabadi, A. Beheshti, ve N. Khodadadi, “An innovative data-driven AI approach for detecting and isolating faults in gas turbines at power plants”, *Expert Syst. Appl.*, c. 263, sayı November 2024, ss. 1–18, 2025.
- [83] D. Sáez, F. Milla, ve L. S. Vargas, “Fuzzy predictive supervisory control based on genetic algorithms for gas turbines of combined cycle power plants”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, c. 22, sayı 3, ss. 689–696, 2007.
- [84] N. H. A. Rahman, A. F. Zobaa, ve M. Theodoridis, “Improved BPSO for optimal PMU placement”, *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 2015.
- [85] N. M. Manousakis, G. N. Korres, S. Member, P. S. Georgilakis, ve S. Member, “Optimal Placement of Phasor Measurement Units : A Literature Review”, 2011

16th Int. Conf. Intell. Syst. Appl. to Power Syst., ss. 1–6, 2011.

- [86] M. Tahan, A. L. Tamiru, ve M. Muhammad, “Design optimization of industrial gas turbines using simulated annealing algorithms”, *MATEC Web Conf.* 225, 02018, c. 02018, ss. 1–10, 2018.
- [87] C. Wang, D. Mu, F. Zhao, ve J. W. Sutherland, “A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup – delivery and time windows”, *Comput. Ind. Eng.*, c. 83, ss. 111–122, 2015.
- [88] B. Bozali, “Türkiye 400 kV’luk Güç Sistemi İçin Sezgisel Yöntemler Kullanılarak Optimal Fazör Ölçüm Birimlerinin Yerleşim Noktalarının Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2022.
- [89] A. Y. Abdelaziz, A. M. Ibrahim, ve R. H. Salem, “Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement”, *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, c. 5, sayı 3, ss. 1–18, 2013.
- [90] K. James ve Eberhart Russell, “Particle Swarm Optimization”, *IEEE ICNN*, c. 4., ss. 1942–1948, 1995.
- [91] M. M. Iqbal ve R. J. Xavier, “Development of optimal reduced-order model for gas turbine power plants using particle swarm optimization technique”, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, c. 30, sayı 4, ss. 1–17, 2020.
- [92] S. Nilay, “Sürekli/İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Destek Vektör Makinelerinin Hibrit Kullanımı ile Özellik Seçimi”, Yüksek Lisans Tezi, İstatistik Anabilim Dalı, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [93] H. Gözde, M. C. Taplamacioğlu, I. Kocaarslan, ve M. A. Ve Şenol, “İki Bölge Ara-Isıtmalı Termal Güç Sisteminin Yük-Frekans Kontrolü İçin Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Tabanlı PI-Kontrolör”, *İsi Bilim. Ve Tek. Dergisi/ J. Therm. Sci. Technol.*, c. 30, sayı 1, ss. 13–21, 2010.
- [94] Baeldung. (25 Aralık 2024). “ How Does Particle Swarm Optimization Work?”, Erişim: <https://www.baeldung.com/cs/pso>.
- [95] H. Jagtap, A. Bewoor, R. Kumar, M. H. Ahmadi, ve G. Lorenzini, “Markov-based performance evaluation and availability optimization of the boiler–furnace system in coal-fired thermal power plant using PSO”, *Energy Reports*, c. 6, ss. 1124–1134, 2020.

- [96] F. Katircioğlu, “Renkli Görüntüler İçin Yusufçuk Algoritması Kullanılarak Benzerlik Görüntüsüne Dayalı Eşikleme”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 5, ss. 506–523, 2017.
- [97] C. W. Reynolds, “Flocks, Herds, and Schools: a Distributed Behavioral Model.”, *Comput. Graph.*, c. 21, sayı 4, ss. 25–34, 1987.
- [98] S. Mirjalili, “Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems”, *Neural Comput. Appl.*, c. 27, sayı 4, ss. 1053–1073, 2016.
- [99] C. M. Rahman ve T. A. Rashid, “Dragonfly algorithm and its applications in applied science survey”, *Comput. Intell. Neurosci.*, c. 2019, 2019.
- [100] B. Bozali, A. Oztürk, S. Tosun, ve B. Hoş, “Optimal PMU Placement for Türkiye 400 kV Interconnected Power System Observability with Dragonfly Algorithm”, *Teh. Vjesn.*, c. 30, sayı 3, ss. 733–741, 2023.
- [101] J. Singh ve M. Rani, “Optimization using Dragonfly Algorithm : Review and Applications”, *Int. J. Comput. Sci. Commun.*, c. 13, sayı 2, ss. 33–37, 2022.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Bülent HOŞ

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2025
Y. Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2002
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	1998
Lise		Fatih Vatan Lisesi	1993

YAYINLAR

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR

B. Hoş, B. Bozali, A. Öztürk ve S. Tosun, “Improvement of Load Frequency Control with Dragonfly Algorithm in Single Shaft Combined Cycle Power Plant,” *Tehnički vjesnik*, Hırvatistan, c. 32:No. 6, ss. XX-XX, 2025.

DİĞER YAYINLAR

B. Hoş, A. Öztürk ve S. Tosun, “Genetik Algoritma Kullanılarak Doğal Gaz Çevrim Santrallerinde Yük Frekans Kontrolü,” *VI. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi - Bahar (IMASCON21)*, Kocaeli, Türkiye, c.1, ss. 435-442, 2021.

B. Bozali, A. Öztürk, S. Tosun ve **B. Hoş**, “Optimal PMU Placement for Türkiye 400 kV Interconnected Power System Observability with Dragonfly Algorithm,” *Tehnički vjesnik*, Hırvatistan, c. 30:3, ss. 733-741, 2023.