

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**


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

**Enterkonnekte Güç Sistemlerinde Rüzgâr Enerji Sistemlerinin Güç Akış  
Analizine Etkilerinin Modern Optimizasyon Teknikleri ile İncelenmesi**

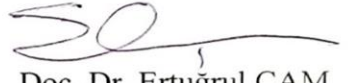
**Mehmet GÜÇYETMEZ**

**MART 2016**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında** Mehmet GÜÇYETMEZ tarafından hazırlanan ENTERKONNEKTE GÜÇ SİSTEMLERİNDE RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNİN GÜÇ AKIŞ ANALİZİNE ETKİLERİNİN MODERN OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.


  
Prof. Dr. Ediz POLAT  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

  
Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : (Prof. Dr. Ediz POLAT)  
Üye (Danışman) : (Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM)  
Üye : (Doç. Dr. Necaattin BARIŞCI)  
Üye : (Yrd. Doç. Dr. Hayati MAMUR)  
Üye : (Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY)



04/03/2016

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Aileme...**

## ÖZET

### ENTERKONNEKTE GÜÇ SİSTEMLERİNDE RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNİN GÜÇ AKIŞ ANALİZİNE ETKİLERİNİN MODERN OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ

GÜÇYETMEZ, Mehmet

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora tezi

Danışman: Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM

Mart 2016, 119 sayfa

Rüzgar Enerji Sistemlerinin (RES), diğer güç sistemlerine bağlantılarında, güç sisteminin kapasitesinin artması dolayısıyla güç akış analizinde kullanılan geleneksel optimizasyon teknikleri, verim ve etkinliklerini kaybetmektedir. Bu amaçla bu tezde, RES bağlantısı olan ve olmayan örnek güç sistemleri üzerinde, yakıt maliyeti, emisyon oranları ve algoritma zamanı gibi güç akış analizini belirleyen parametreler, yeniden tasarlanan Genetik-Öğretme Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (G-ÖÖTO) adlı modern bir hibrit algoritma ile incelenerek, optimize edilmiştir.

Tezde, 40 adet farklı termal enerji kaynağından oluşan Tayvan Termal Güç Sistemi (TTGS), 8 baralı termal güç sistemi ve yeni oluşturulan 19 baralı termal-rüzgâr güç sistemleri güç akışı yönünden analiz edilmiştir. Analizlerde, literatürde geçen, geleneksel Genetik Algoritma (GA), geleneksel Öğrenme-Öğretme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) Algoritması ve yeni önerilen Genetik ve ÖÖTO algoritmalarının üstün yönleri bir araya getirilerek oluşturulan G-ÖÖTO algoritma karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Bunların yanında, güç sistemlerinin yüklenme katsayıları değiştirilerek çeşitli senaryolar da denenmiştir.

Bu çalışma, çok sayıda rüzgâr barasının bağlı olduğu ana baraların enterkonnekte sisteme eklenmesiyle, güç sisteminin verimini arttırmakta kullanılabileceğini ispatlamıştır. Ayrıca, geliştirilen hibrit G-ÖÖTO algoritmasıyla bu sistemler için

etkin bir optimizasyon algoritması olduğu, yapılan simülasyon çalışmalarıyla doğrulanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Geleneksel Güç Sistemi, Rüzgâr-Termal Güç Sistemi, Optimum Güç Akış Analizi, Genetik-Öğretme Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması, Yakıt Maliyeti, Algoritma Çalışma Zamanı,  $CO_2$  salınımı



## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF WIND ENERGY SYSTEMS ON POWER FLOW ANALYSIS IN INTERCONNECTED POWER SYSTEMS BY MODERN OPTIMIZATION TECHNIQUES

GÜÇYETMEZ, Mehmet

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric and Electronics, Ph. D. Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM

March 2016, 119 pages

Conventional optimization techniques used in a power flow analysis have been losing their efficiency because of the increasing capacity of power systems in connections of the Wind Energy Systems (WES) into other power systems. For this purpose, in this thesis, the parameters which determines the power flow analysis such as fuel cost, emission rates and algorithm run time were analyzed and optimised by a redesigned hybrid Genetic-Teaching Learning Based Optimization (G-TLBO) Algorithm on the sample power systems with and without wind energy.

In the thesis, Taiwan thermal power system (TTPS) which was composed of 40 different thermal energy sources, 8 bus thermal power system and 19 bus thermal-wind power systems proposed here newly were analyzed in terms of the power flow analysis. In the analyses, conventional Genetic and Teaching-Learning Optimization (TLBO) algorithms studied in literature were researched comparatively with the G-TLBO algorithm which was proposed first here and was composed by taking the outstanding properties of conventional Genetic and TLBO algorithms. According to literature researches, conventional Genetic Algorithms (GAs), conventional Teaching Learning Based Optimization (TLBOs) and recently new recommended GAs and TLBOs were inspected in detail. Lastly, a new G-TLBO algorithm was suggested. The superior aspects of last algorithms were combined in the new suggested G-TLBO algorithm. The results of it were comparatively presented in the thesis.

The study shows that the addition of wind buses which are composed of many wind buses into interconnected system could be used to increase the power system efficiency and developed hybrid G-TLBO algorithm is an effective optimization algorithm that could be used in conventional and wind-thermal power systems.

**Key Words:** Conventional Power System, Wind-Thermal Power System, Optimum Power Flow Analysis, Genetic-Teaching Learning Based Optimization Algorithm, Fuel Cost, Algorithm Run Time,  $CO_2$  Emission



## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımcı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkânlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM'a, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocalarım Sayın Doç. Dr. Necaattin BARIŞCI'ya ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY'e teşekkür ederim.





## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Enerji Üretimi.....	5
1.2. Rüzgâr ve Rüzgâr Enerjisinin Durumu .....	7
1.3. Enterkonnekte Sistem ve Özellikleri.....	8
1.4. Dağıtık Üretim Kavramı .....	9
1.5. Rüzgâr Türbinlerinin Enterkonnekte Sisteme Etkileri.....	10
1.6. Güç Akış Analizi ve Optimizasyon.....	12
1.6.1. Güç Akış Analizi .....	12
1.6.1.1. Bara Admitans Matrisi .....	14
1.6.1.2. Güç Akış Eşitliğinin Hesabı.....	17
1.6.1.3. Aktif Güç Akış Analizi .....	18
1.6.1.4. Reaktif Güç Akış Analizi .....	20
1.6.2. Optimizasyon ve Optimizasyon Algoritmalarının Özellikleri .....	21
1.6.3. Rüzgâr Enerjili Sistemde Eşitlik ve Eşitsizlik Sınırlamaları.....	23
1.6.4. Optimizasyon Amaç Fonksiyonları.....	24
1.6.4.1. Yakıt Maliyeti Analizi ve Optimizasyonu .....	25
1.6.4.2. Algoritma Zamanı ve Optimizasyonu .....	25
1.6.4.3. Emisyon Analizi ve Optimizasyonu .....	26
1.6.4.4. Güç Kaybı ve Optimizasyonu ( $P_L$ ) .....	26
1.7. Rüzgâr Enerjisi ile Optimizasyon .....	27
1.7.1. Rüzgâr Enerjisinin Yakıt Maliyeti Etkisi.....	27

1.7.2. Rüzgâr Enerjisinin Algoritma Zamanı Etkisi.....	28
1.7.3. Rüzgâr Enerjisinin Emisyon ve Emisyon Maliyeti Etkisi.....	28
1.8. Literatür İnceleme .....	29
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>34</b>
2.1. Kullanılan Güç Sistemleri .....	34
2.1.1. IEEE 30 Baralı Güç Sistemi.....	34
2.1.2. Termal 8 Bara Türkiye Güç Sistemi .....	36
2.1.3. Termal 40 Bara Tayvan Güç Sistemi.....	36
2.2. Geliştirilen Hibrit Güç Sistemi.....	38
2.3. Çalışmalarda Kullanılan Geleneksel ve Modern Optimizasyon	
Algoritmaları.....	42
2.3.1. Geleneksel Optimizasyon Algoritmaları.....	42
2.3.1.1. Gauss-Seidel Algoritması (GS).....	42
2.3.1.2. Newton-Raphson Algoritması (NR) .....	43
2.3.1.3. Hızlı Çözümlemeli Güç Akış Algoritması.....	46
2.3.2. Modern Optimizasyon Algoritmaları.....	48
2.3.2.1. Eşit Gömülü Algoritma (EGA).....	49
2.3.2.2. Fark Gelişim Algoritması (FGA).....	50
2.3.2.3. Genetik Algoritma (GA).....	52
2.3.2.4. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO)	
Algoritması.....	56
2.4. Geliştirilen Optimizasyon Algoritmaları .....	59
2.4.1. Modifiye ÖÖTO Algoritması (M-ÖÖTO).....	59
2.4.2. Hibrit Genetik-ÖÖTO Algoritması (G-ÖÖTO).....	61
<b>3. OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ VE GÜÇ SİSTEMLERİ</b>	
<b>UYGULAMALARI.....</b>	<b>64</b>
3.1. ÖÖTO Algoritmasının 40 Baralı Güç Sistemine Uygulanması.....	64
3.2. M-ÖÖTO Algoritmasının 40 Baralı Güç Sistemine Uygulanması .....	65
3.3. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının 8 ve 40 Baralı Güç	
Sistemlerine Uygulanması .....	66
3.4. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının 19 Baralı Rüzgâr-Termal	
Güç Sistemine Uygulanması .....	67
3.5. Matlab Ortamında Yapılan Çalışmalar .....	68

3.5.1. Genetik Algoritma Kısmı.....	68
3.5.2. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) Algoritması Kısmı.....	69
<b>4. BULGULAR</b> .....	70
4.1. 40 Baralı Termal Güç Sistemi İçin Optimizasyon Algoritmalarının Sonuçları ve Karşılaştırma .....	71
4.1.1. Standart ÖÖTO Algoritmasının 40 baralı Güç Sistemindeki Sonuçları ve Karşılaştırma .....	71
4.1.2. Modifiye ÖÖTO Algoritmasının 40 Baralı Güç Sistemindeki Sonuçları ve Karşılaştırma .....	72
4.2. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının 8 ve 40 Baralı Güç Sistemlerindeki Sonuçları ve Karşılaştırma .....	76
4.2.1. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının 8 Baralı Güç Sistemindeki Sonuçları ve Karşılaştırma .....	76
4.2.2. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının 40 Baralı Güç Sistemindeki Sonuçları ve Karşılaştırma .....	80
4.3. 19 Baralı Rüzgâr-Termal Güç Sistemi İçin Optimizasyon Algoritmalarının Karşılaştırılması .....	84
4.4. Aynı Kurulu Güç İçin 8 Baralı Termal Güç Sisteminde Termal ve Rüzgâr Baralarının Yakıt Maliyeti ve Emisyon Açısından Karşılaştırılması.....	97
<b>5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b> .....	99
<b>KAYNAKLAR</b> .....	102
<b>EKLER</b> .....	111
<b>EK 1. GAUSS-SEIDEL ALGORİTMASI SÖZDE KODU</b> .....	111
<b>EK 2. NEWTON-RAPHSON ALGORİTMASI SÖZDE KODU</b> .....	112
<b>EK 3. HIZLI ÇÖZÜMLEMELİ GÜÇ AKIŞ ALGORİTMASI SÖZDE KODU</b> .....	113
<b>EK 4. EŞİT GÖMÜLÜ ALGORİTMA (EGA) SÖZDE KODU</b> .....	114
<b>EK 5. FARK GELİŞİM ALGORİTMASI (FGA) SÖZDE KODU</b> .....	115
<b>EK 6. G-ÖÖTO ALGORİTMASI SÖZDE KODU</b> .....	116
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	118

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı.....	6
1.2. Dünyada rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gelişimi.....	7
1.3. Türkiye’de rüzgâr enerjisi kurulu gücündeki değişim.....	8
1.4. Temel bir güç sistemi diyagramı.....	14
1.5. Güç sisteminin admitans diyagramı.....	15
1.6. n baralı bir güç sistemine ait bağlantı diyagramı.....	17
1.7. Termal bir santral için tipik yakıt maliyet eğrisi.....	19
2.1. IEEE 30 bara test sistemine ait bağlantı şeması.....	35
2.2. TTGS’ye ait 19 baralık tek hat şeması.....	38
2.3. Rüzgâr türbinine ait tipik bir güç eğrisi.....	39
2.4. EGA akış diyagramı.....	51
2.5. FGA akış diyagramı.....	53
2.6. GA akış diyagramı.....	55
2.7. ÖÖTO algoritması akış diyagramı.....	58
2.8. M-ÖÖTO algoritması akış diyagramı.....	60
2.9. G-ÖÖTO algoritması akış diyagramı.....	62
4.1. 20 iterasyon ve 50 öğrencili ÖÖTO algoritması ile elde edilen yakıt maliyeti.....	74
4.2. % 25 yüklenme durumunda GA ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	77
4.3. % 25 yüklenme durumunda ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	78
4.4. % 25 yüklenme durumunda G-ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	78
4.5. % 30 yüklenme durumunda GA ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	79
4.6. % 30 yüklenme durumunda ÖÖTO algoritması ile hesaplanan	

yakıt maliyeti.....	79
4.7. % 30 yüklenme durumunda G-ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	80
4.8. Geleneksel GA ile elde edilen yakıt maliyeti.....	81
4.9. Geleneksel ÖÖTO algoritması ile elde edilen yakıt maliyeti.....	82
4.10. Tasarlanan algoritmanın genetik algoritma tarafından hesaplanan yakıt maliyeti eğrisinin ilk 2500 iterasyonluk kısmı.....	83
4.11. Tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması tarafından hesaplanan yakıt maliyeti eğrisinin ikinci 2500 iterasyonluk kısmı.....	83
4.12. % 25 yüklenme faktörü ve 1.834 MW güç talebi için genetik algoritma ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	86
4.13. % 25 yüklenme faktörü ve 1.834 MW güç talebi için ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	87
4.14. % 25 yüklenme faktörü ve 1.834 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın genetik algoritma kısmı.....	87
4.15. % 25 yüklenme faktörü ve 1.834 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması kısmı.....	88
4.16. % 27,5 yüklenme faktörü ve 2.017 MW güç talebi için genetik algoritma ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	88
4.17. % 27,5 yüklenme faktörü ve 2.017 MW güç talebi için ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	89
4.18. % 27,5 yüklenme faktörü ve 2.017 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın genetik algoritma kısmı.....	89
4.19. % 27,5 yüklenme faktörü ve 2.017 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması kısmı.....	90
4.20. % 30 yüklenme faktörü ve 2.201 MW güç talebi için genetik algoritma ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	90
4.21. % 30 yüklenme faktörü ve 2.201 MW güç talebi için ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti.....	91
4.22. % 30 yüklenme faktörü ve 2.201 MW güç talebi için tasarlanan	

algoritmanın genetik algoritma kısmı.....	92
4.23. % 30 yüklenme faktörü ve 2.201 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması kısmı.....	92
4.24. Üç algoritmanın farklı yüklenme ve güç taleplerinde yakıt maliyeti.....	92
4.25. Farklı yüklenme ya da güç taleplerinde GA ve tasarlanan algoritma yakıt maliyeti.....	93
4.26. % 25 yüklenme ya da 1.834 MW güç talebinde ÖÖTO ve tasarlanan algoritmanın yakıt maliyeti.....	93
4.27. % 27,5 yüklenme ya da 2.017 MW güç talebinde ÖÖTO ve tasarlanan algoritmanın yakıt maliyeti.....	93
4.28. % 30 yüklenme ya da 2.201 MW güç talebinde ÖÖTO ve tasarlanan algoritmanın yakıt maliyeti.....	94
4.29. Farklı yüklenme ve güç taleplerinde ÖÖTO ve tasarlanan algoritmanın algoritma çalışma zamanı.....	94
4.30. Farklı yüklenmelerde tasarlanan algoritmanın GA'ya göre sağladığı saatlik tasarruf.....	95
4.31. Farklı yüklenmelerde tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritmasına göre sağladığı saatlik tasarruf.....	95
4.32. Farklı yüklenmelerde tasarlanan algoritmanın GA'ya göre sağladığı 40 yıllık tasarruf.....	96
4.33. Farklı yüklenmelerde tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritmasının göre sağladığı 40 yıllık tasarruf.....	96
4.34. Termal kaynaklarla elde edilen yakıt maliyeti eğrisi.....	97
4.35. Rüzgâr enerjisi ile elde edilen yakıt maliyeti eğrisi.....	98

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. IEEE 30 bara güç sistemi generatör verileri.....	35
2.2. 8 bara termal güç sistemi generatör verileri.....	36
2.3. 40 bara TTGS generatör verileri.....	37
2.4. 19 baralı rüzgâr-termal güç sistemi için yer ve güç üretim verisi	40
4.1. 10.500 MW güç talep değeri için optimum $P_i$ güç değerleri.....	71
4.2. Yakıt maliyeti ve CO <sub>2</sub> emisyonuna göre algoritmaların karşılaştırılması.....	72
4.3. İki güç sistemi için tasarlanan algoritmanın ekonomik ve çevreye katkı kazanımları açısından karşılaştırılması.....	72
4.4. Tasarlanan yöntem için 40 baralı güç sistemi için generatör üretim sınırları ve optimum $P_i$ değerleri.....	73
4.5. EGA, FGA ve tasarlanan algoritmanın karşılaştırılması.....	74
4.6. Yıllık ve 40 yıl için 10.500 MW ve 65.000 MW güç üretimi toplam yakıt maliyetleri.....	75
4.7. Tasarlanan ÖÖTO algoritmasının 10.500 MW ve 65.000 MW güç üretimi için sağladığı kazanç miktarları.....	75
4.8. GA, ÖÖTO ve G-ÖÖTO algoritmalarının 100 iterasyon için yakıt maliyeti ve algoritma çalışma zamanı açısından karşılaştırılması.....	77
4.9. Yakıt maliyeti açısından algoritmaların karşılaştırılması.....	80
4.10. Algoritma çalışma zamanı açısından algoritmaların karşılaştırılması.....	81
4.11. Farklı enterkonnekte güç sistemleri için tasarlanan algoritmanın tasarruf miktarları.....	84
4.12. 1.500 iterasyon için algoritma çalışma zamanı ve yakıt maliyeti açısından GA, ÖÖTO ve G-ÖÖTO algoritmalarının karşılaştırılması.....	86

4.13	Termal ve rüzgâr enerji sistemlerinin yakıt maliyeti açısından karşılaştırılması.....	98
4.14	Termal ve rüzgâr enerji sistemlerinin emisyon açısından karşılaştırılması.....	98





## SİMGELER DİZİNİ

$F_{cost}$	Yakıt maliyet fonksiyonu
$a_i, b_i, c_i$	$i$ generatörü için termal ısı maliyet katsayıları
$d_i$	$i$ generatörü için rüzgar maliyet katsayısı
R	Hat rezistansı
X	Hat reaktansı
G	Hat kondüktansı
B	Hat suseptansı
L	İndüktans
$P_{min}$	Generatörün çalıştığı minimum aktif güç
$P_{max}$	Generatörün çalıştığı maksimum aktif güç
$P_{load}$	Tüketilen aktif güç
$Q_{load}$	Tüketilen reaktif güç
$P_{g_i}$	$i$ generatörünün ürettiği aktif güç
$Q_{g_i}$	$i$ generatörünün ürettiği reaktif güç
$P_L$	Aktif güç kaybı
$Q_L$	Reaktif güç kaybı
$n_g$	Güç sistemendeki generatör sayısı
$CO_2$	Karbondioksit
$w_i$	Planlanan rüzgar gücü
$w_{r,i}$	Generatör anma rüzgar gücü

## KISALTMALAR DİZİNİ

TTGS	Tayvan Termal Güç Sistemi
RTGS	Rüzgâr Termal Güç Sistemi
GA	Genetik Algoritma
ÖÖTO	Öğretme- Öğrenme Temelli Algoritma
G-ÖÖTO	Genetik- Öğretme Öğrenme Temelli Algoritma
M-ÖÖTO	Modifiye Öğretme-Öğrenme Temelli Algoritma
GS	Gauss Seidel Algoritması
NR	Newton-Raphson Algoritması
EGA	Eşit Gömülü Algoritma
FGA	Fark Gelişim Algoritması
PPD	Hazırlanan Güç Talebi
MPPD	Modifiye Hazırlanan Güç Talebi
RMPPD	Azaltılmış Modifiye Hazırlanan Güç Talebi

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, tüm insanlık için önemi her geçen gün artan ve vazgeçilmez olan bir enerji kaynağıdır. Elektrik enerjisinin üretimi ağırlıklı olarak bir yakıtın ya da enerjiye dönüşen bir maddenin yakılması suretiyle buhar oluşturulması ve bu buharın buhar türbinlerine gönderilerek mekanik hareket sonucu elde edilmektedir. Nükleer, termik ve doğalgaz çevrim santrallerinden enerji üretimi bu teknoloji ile yapılmaktadır. Bu tür teknolojilerde, üretim miktarı yüksek olmasına karşın, maliyet, çevre kirliliği, kaynağın sınırlılığı, dışa bağımlılık gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır.

Dünyada, nüfusun ve tüketimin hızla artması, enerjiye olan talebin de hızla artmasını beraberinde getirmiş ve bu üretim tüketim zinciri küresel ısınma, çevrenin kirlenmesi gibi sorunların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Fosil yakıtların ısınma, sanayi ve ulaşım alanlarındaki kullanımına bağlı olarak ( $CO_2$ ) salınımının artması, küresel ısınmayı hızlandırmaktadır [1]. Bunun sonucunda, günümüzde geleneksel bir üretim anlayışı yerine, çevreye duyarlı üretim anlayışı da gelişmeye başlamıştır. Bütün bu sebeplerden dolayı, yenilenebilir enerji kaynakları gün geçtikçe önem kazanmıştır. Bunun önemli bir nedeni de, temiz enerji ile ilgili toplumsal bilincin oluşması ve bu kaynakların üretiminin belli seviyelere ulaşmasıdır.

Yenilenebilir enerji kaynakları olarak rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, hidrolik enerji, dalga (gel-git) enerjisi, hidrojen enerjisi örnek olarak verilebilir. Bu kaynaklar arasında rüzgâr enerjisi, teknolojisi ve üretim miktarının yanı sıra sürdürülebilir kalkınma açısından da çok önemli bir yere sahip olmuştur [2].

Elektrik enerjisinin, üretiminden tüketimine kadar santraller, iletim hatları, transformatörler gibi yapıların tümünün birbirine bağlı olması, enterkonnekte sistem olarak adlandırılmaktadır. Bu sistem, elektrik enerjisini yeterli, kesintisiz ve kaliteli olarak temin etmelidir. Enterkonnekte sisteme eklenen her bir üretim ve tüketim birimi, sistemin dengelerini değiştirecek, dolayısıyla elektrik enerjisinin iletiminde değişikliklere neden olacaktır. Alternatif teknolojilerin yaygınlaşması ile sisteme, farklı mesafe ve büyüklüklerde enerji kaynaklarının eklenmesi, maliyet, enerji

kalitesi gibi bazı güç akış analiz parametrelerinin yeniden analizlerinin yapılmasını gerektirmektedir.

Elektrik enerjisinin kaliteli ve ekonomik taşınması, üretim, iletim ve dağıtımdan oluşan üçlü mekanizmanın sürekli kontrolü ile mümkündür. Frekans, gerilim, akım, güç, güç kaybı gibi parametreler tüm enterkonnekte sistem içerisinde düzenli olarak değerlendirilmelidir. Güç akış analizleri, tüm bu parametrelerin kontrol edilmesi ve elektrik enerjisinin sağlıklı olarak iletilmesi amacıyla kullanılan analizlerdir ve çeşitli algoritmalar, hesaplamalar ve öngörülerden oluşarak hâlihazırda ve gelecekte enerjinin kaliteli iletiminin yapılabilmesini amaç edinmiştir.

Güç sistemlerinin yapısı, son yıllarda mevcut sisteme, rüzgâr enerjisi başta olmak üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan miktarlarda eklenmesi ile önemli oranda değişikliğe uğramaktadır. Eklenen her bir enerji üretim birimi, optimum yük dağılımı, en iyi yakıt maliyeti gibi sistem parametrelerini tespit etmeye çalışan optimizasyon algoritmalarının yükünü arttırmaktadır. Ayrıca, en iyi sonuçların bulunması, mevcut geleneksel ve modern optimizasyon algoritmaları ile zorlaşmaktadır. Dahası, optimizasyon süresi de oldukça uzamaktadır. Bu durum ve gereklilikler göz önüne alındığında, optimizasyon parametreleri ve zaman verimliliği açısından, daha etkin ve mevcut ve değişen güç sistemlerinin yapısını da göz önüne alan algoritmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda bu çalışmada, yeni bir hibrit güç akış algoritması bu gereksinimleri karşılamak için geliştirilmiştir.

Daha etkin ve verimli optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesinin yanı sıra, mevcut veriler ışığında yeni güç sistemlerinin oluşturulması da diğer önemli bir süreçtir. Nitekim, gelecekteki güç sistemlerinin çok sayıda farklı güç üretim kaynağı ve çok farklı ölçekte güç üretim birimlerinden oluşacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda bu tezde, rüzgâr baralarının da olduğu yeni hibrit bir rüzgâr-termal güç sistemi geliştirilerek bu güç sistemi üzerinde analizler yapılmıştır.

Tez kapsamında, literatürde olmayan ülkemizin enterkonnekte güç sistemlerinden örnekler ile, literatürdeki farklı güç sistemleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, aşağıdaki optimizasyon algoritmaları simülasyonlarda kullanılmıştır.

- ❖ Geleneksel optimizasyon algoritmaları
- ❖ Modern optimizasyon algoritmaları
- ❖ Hibrit optimizasyon algoritmaları

Bunlardan başlıcaları, geleneksel optimizasyon algoritması olarak Newton-Raphson [3], modern optimizasyon algoritmaları olarak Genetik Algoritma (GA) [4], Karınca Kolonisi Algoritması [5], Parçacık Sürü Algoritması [6], Öğrenme-Öğretme Temelli Optimizasyon Algoritması (ÖÖTO) [7-8] olarak sayılabilir. Bu algoritmalarından, Genetik Algoritma ve Öğrenme-Öğretme Temelli Optimizasyon (ÖÖTO) algoritmaları simülasyonlar esnasında denenmiştir.

Algoritmaların uygulanmasında ilk olarak Amerikan Elektrik Güç Servis Şirketi (AEPSC)'nin bir parçası olarak IEEE 30 bara [9] ve literatürde olan Tayvan [10] ve Cezayir [11] güç sistemleri incelenmiştir. Sonrasında ülkemizden termal güç sistemlerinin örnekleri [12] ile oluşturulan bir enterkonnekte güç sistemi ile daha sonrasında buna rüzgar türbinleri eklenerek oluşturulan güç sistemi üzerinde çeşitli simülasyonlar yapılmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan ve üretimi her geçen gün ciddi artışlar gösteren rüzgar türbinlerinin mevcut güç sistemlerine olan etkisi de böylece ele alınmış ve elektrik enerjisinin kaliteli ve verimli taşınması amacıyla kullanılan güç akış analizleri, modern optimizasyon teknikleri ile yapılmıştır. Ayrıca, güncel optimizasyon algoritmaları, karşılaştırmalı olarak ele alınmış ve rüzgar enerjisinin etkileri, optimizasyon algoritmalarından elde edilen hesaplamalar ışığında değerlendirilerek araştırılmıştır.

Geliştirilen hibrit optimizasyon algoritması ile geleneksel ve hibrit güç sistemlerinin güç akış analizlerinin çok daha kısa sürede yapılması sağlanmıştır. Ayrıca, yakıt maliyeti ve emisyon gibi güç sistem parametrelerinde daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Böylece, güç sistemlerinde kullanılan bara sayısı artsa dahi, optimizasyon süresi çok fazla artmamış, kapsamlı ve çok sayıda baranın analizine imkan veren yeni bir optimizasyon tekniği elde edilmiştir.

Tezin birinci bölümünde, ilk olarak enerji üretiminin mevcut durumu, enterkonnekte güç sistemi ve rüzgâr enerjisi, dağıtık üretim birimleri hakkında genel bilgiler verilmiş, ardından güç akış analizi, optimizasyon çeşitleri ve rüzgar enerjisinin geleneksel güç sistemlerine, amaç fonksiyonları açısından etkileri açıklanmıştır. Bu bölümün son kısmında, konu hakkında yapılan çalışmalar sunulmuştur.

İkinci bölümde, güç sistemlerinin yapısı, özellikleri ve optimizasyon algoritmaları hakkında bilgiler verilmiştir. İlk olarak, güç akış analizlerinde giriş çalışmalarında kullanılan IEEE 30 baralı test sistemi anlatılmış ardından tezde kullanılacak olan 8 ve 40 baralı termal ve geliştirilen 19 baralı rüzgâr-termal güç sistemlerinin parametreleri ve sınırlamalarından bahsedilmiştir. Optimizasyon algoritmaları kısmında, ilk olarak geleneksel algoritmalarından Gauss-Seidel (GS) ve Newton Raphson (NR) algoritmaları açıklanmıştır. İkinci olarak, çalışmalarda karşılaştırma amacıyla kullanılan Eşit Gömülü Algoritma (EGA), Fark Gelişim Algoritması (FGA) ve geliştirilen algoritmaların temeli olan Genetik Algoritma (GA) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) Algoritması anlatılmıştır. Bu bölümün sonunda da, tez kapsamında geliştirilen ve literatüre ilk defa sunulan Modifiye Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (M-ÖÖTO) ve hibrit Genetik-Öğretme Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (G-ÖÖTO) algoritmaları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, geleneksel ve geliştirilen algoritmaların geleneksel ve rüzgâr enerjili güç sistemleri üzerindeki uygulamaları açıklanmıştır. Bu kapsamda, Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) algoritması, M-ÖÖTO ve hibrit G- ÖÖTO algoritmalarının 8 ve 40 baralı termal güç sistemleriyle ve 19 baralı kendi oluşturduğumuz termal-rüzgâr güç sistemine uygulanış şekli ve analizlerde seçilen parametreler, yüklenme durumları gibi değişkenler açıklanmaktadır. Ayrıca bu bölümde, güç sistemlerinin, optimizasyon algoritmalarının ve analizlerin, Matlab ortamında nasıl yapıldığı ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, farklı geleneksel ve geliştirilen modern optimizasyon algoritmaları ile geleneksel ve geliştirilen güç sistemleri üzerinde elde edilen simülasyon sonuçları, çeşitli grafiklerle ve farklı yüklenme durumları için, ayrıntılı

şekilde verilmiş ve ayrıca daha önce literatürde o güç sistemi için kullanılan optimizasyon teknikleri ile karşılaştırılmıştır.

Beşinci ve son bölümde ise sonuçlar yorumlanmış, optimizasyon yöntemlerinin hangisinin neden üstün olduğu hakkında tartışmalar yapılmıştır. Son olarak kullanılan kaynaklar yazılarak tez sonlandırılmıştır.

## **1.1. Enerji Üretimi**

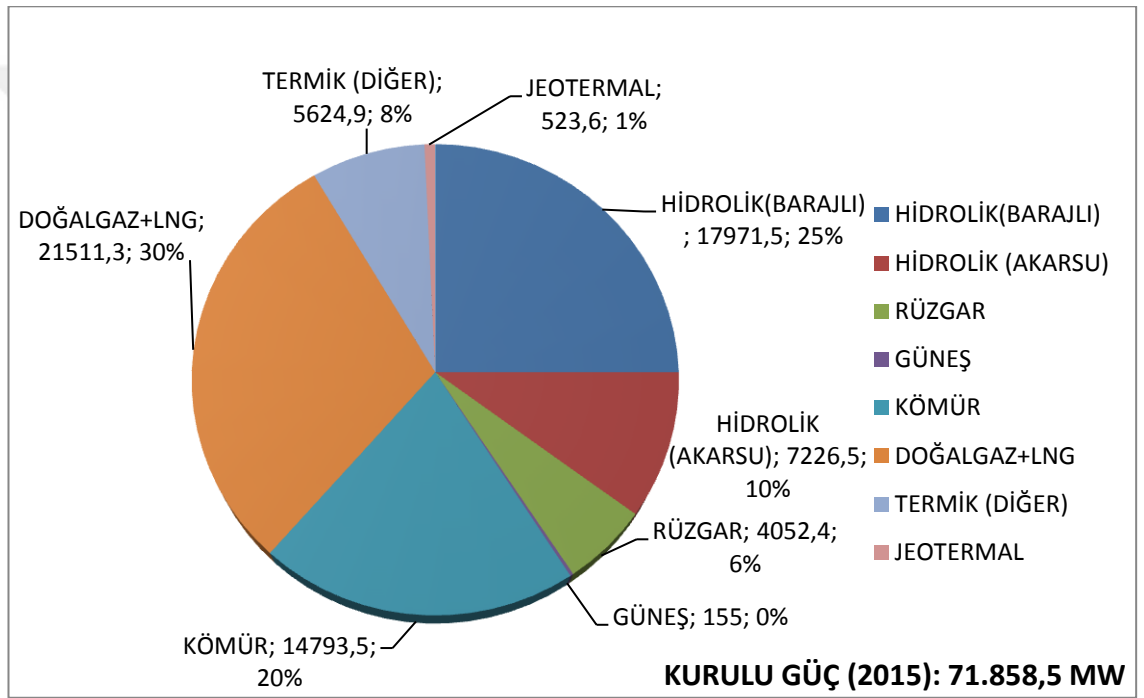
Elektrik enerjisi çok farklı enerji kaynaklarından üretilebilir. En çok bilinen elektrik enerjisi üretim şekilleri: Termik, hidrolik, doğalgaz, rüzgâr, güneş, jeotermal, nükleerdir. Bunların yanı sıra, üretim miktarları sınırlı dahi olsa, kayagazı, gel-git enerjisi, hidrojen enerjisi gibi yeni enerji türlerine ait teknolojiler de gelişme trendindedir.

Elektrik enerjisi üretiminde, hammadde olarak kullanılan nükleer elementler, kömür ve doğalgaz gibi kaynaklar sınırlıdır ve zamanla tükenme tehlikesi vardır. Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, hidrojen enerjisi gibi kaynaklar ise, yenilenebilir ve süreklidir. Çevrenin korunması, temiz enerji üretimi ve ekonomik bağımlılık gibi nedenlerden dolayı birçok dünya ülkesi, geleneksel enerji kaynaklarından, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretim içerisindeki payını artırarak enerji üretiminde çeşitliliği sağlamaya çalışmaktadırlar.

Enerji üretiminde birkaç temel mekanizma bulunmaktadır. Bunlardan ilki, enerji kaynağından ısı ve buhar üretilerek buhar türbinini çevirmektir. Nükleer, termik, doğalgaz ve jeotermal enerji üretimi bu esasa dayanmaktadır. İkincisi, elektrik makinaları kullanarak elektromekanik yolla enerji üretimidir. Hidrolik, rüzgâr, gelgit enerjisinin üretimi, bu dönüşüme dayanır. Üçüncü olarak, elektronların hareketlerinden faydalanılarak elde edilen güneş enerjisi ve dördüncü olarak da elektroliz sonucu oluşan hidrojen enerjisi bu temel mekanizmalar arasındadır. Güneş

ve hidrojen enerjisinin gelecekte yaygınlaşacağı kanaati güçlü olmakla beraber günümüzde üretim ve kullanım alanları sınırlıdır.

Bu bağlamda, Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü, 2015 Ağustos ayı itibarıyla 71.858 MW’a ulaşmıştır. Bu gücün %29,9’unu doğal gaz ve sıvılaştırılmış doğalgaza (LNG) dayalı, %28,4’ünü kömür ve katı yakıtı dayalı santraller oluşturmaktadır. Ağustos 2015 tarihi itibarıyla Türkiye’deki elektrik enerjisinin kurulu güç diyagramı Şekil 1.1’de verilmiştir [13].



**Şekil 1.1.** Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı [13]

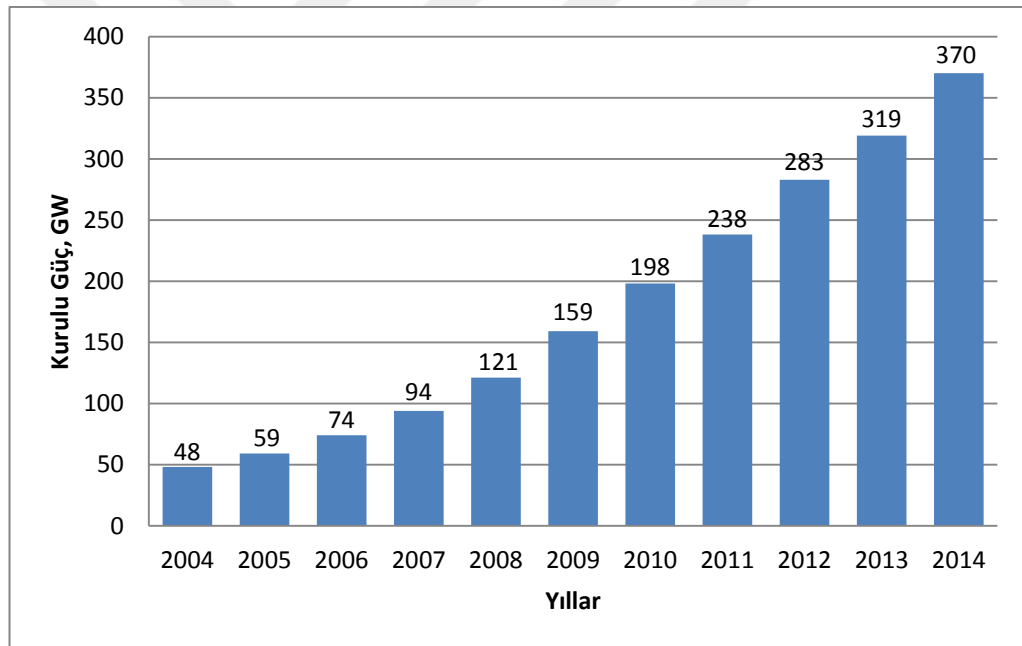
Şekil 1.1’de görüldüğü gibi Rüzgâr Enerjisi Santralleri (RES) yenilenebilir enerji kaynakları arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Dolayısıyla bu tezde, termik santrallerin yanında, RES’lerin sisteme etkileri incelenmiştir.



## 1.2. Rüzgâr ve Rüzgâr Enerjisinin Durumu

Rüzgâr, güneş temelli bir kaynaktır. Yeryüzünde her noktada havanın sıcaklığı aynı değildir. Bu sıcaklık farklılıkları doğal olarak rüzgârı oluşturur. Yeryüzüne düşen güneş enerjisinin %2 kadarlık bir kısmı rüzgâra dönüşmektedir. Bu açıdan rüzgâr sürekli yenilenen bir enerji kaynağıdır.

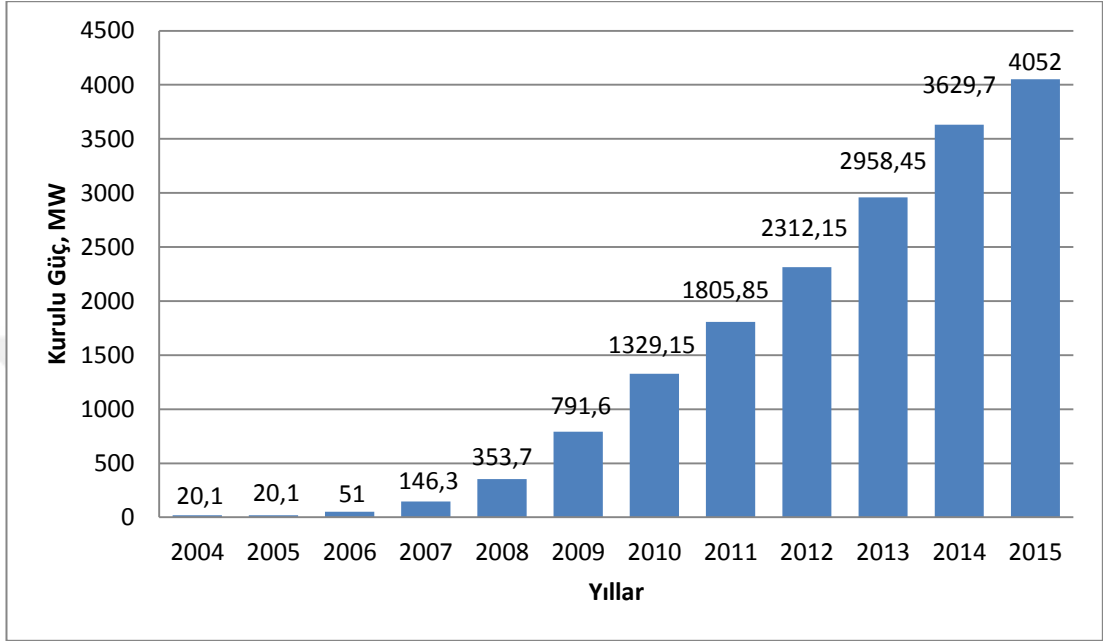
Elektrik enerjisinin üretildiği kaynaklar genel olarak değerlendirilecek olursa rüzgâr enerjisi, geleneksel enerji üretiminin yanında en hızlı büyüyen ve gelişen yenilenebilir enerji kaynağıdır. Şekil 1.2'de 2004-2014 yılları arasında Dünya'daki rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gelişimi verilmiştir [14].



Şekil 1.2. Dünyada rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gelişimi [14]

Çin, ABD, Almanya rüzgâr enerjisi kurulu gücünde ilk sıralarda yer alan ülkelerdir. Rüzgâr enerjisi kurulu gücünde Çin ve ABD'yi Almanya (39,2 GW) ve İspanya (23 GW) izlemektedir. Sadece 2014 yılı içerisinde toplam 51.473 MW'lık kurulu kapasite eklenmiş ve kümülatif küresel kurulu güç kapasitesi 369.597 MW'a

ulaşmıştır. Türkiye ise 2014 yılında yeni eklenen rüzgâr gücü sıralamasında dünyada 0.8 GW ile 10. olmuştur [14]. Şekil 1.3’de 2004-2015 yılları arasında Türkiye’de rüzgâr enerjisi kurulu gücündeki değişim verilmiştir.



**Şekil 1.3.** Türkiye’de rüzgâr enerjisi kurulu gücündeki değişim [14]

2012 Ocak ayında rüzgâr enerjisi kurulu gücü 2.312 MW, 2015 Eylül ayı itibarıyla da 4.052 MW’a ulaşmıştır. Şekil 1.3’de ülkemizdeki rüzgâr enerjisinin hızlı artışı görülmektedir. 2023 rüzgâr enerjisi kurulu güç hedefi ise 20.000 MW’dır [15].

### **1.3. Enterkonnekte Sistem ve Özellikleri**

Depolama maliyetinin çok yüksek olmasından dolayı, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımında, kullanılan birimlerin birbirlerine bir örümcek ağı gibi bağlı olduğu enterkonnekte sistem adı verilen bir yapı kullanılmaktadır. Elektrik üretim santralleri ile tüketim noktaları arasındaki bağlantılar ve elektrik enerjisinin iletimi bu sistem ile

sağlanır. Enterkonnekte sistem, enerji üretim merkezleri, şalt sahaları, gerilim ve güç ayarlayıcı trafolar, iletken hatlar, baralar gibi çok sayıda birimden oluşmaktadır.

Elektrik enerjisi santrallerde generatörler ile üretildikten sonra gerilim değeri düzenlenerek trafo ve iletim hatları ile yerleşim merkezlerine taşınmaktadır. Bu süreçte, elektrik enerjisi üretim ve tüketim birimlerinde bara adı verilen kalın bakır çubuklar ile toplanmakta ve dağıtılmaktadır. Baraların 3 çeşidi bulunmaktadır.

**Serbest (Slack-Referans) Bara:** Gerilim faz açısının ve büyüklüğünün referans olarak alındığı baralardır. Bu baralar, planlanmış yüklerle ağ üzerinde kayıplardan kaynaklanan güçler arasında farklar oluştururlar.

**Yük Baraları:** Bu baralarda aktif ve reaktif güçler belirlenmiştir. Bara geriliminin faz açısı ve büyüklüğü bilinmeyenlerdir. Bu baralar P-Q bara olarak da bilinir.

**Generatör Baraları:** Bu baralar voltaj kontrollü bara olarak bilinir. Bu baralarda aktif güç ve voltaj büyüklüğü belirlidir. Bu baralar P-V bara olarak da bilinir.

Türkiyede enerji iletim hatları 66 kV, 154 kV ve 380 kV'luk gerilimleri taşıyan yapılarıdır. Gerilim değeri yükseldikçe enerji daha verimli ve daha az kayıpla taşınır. Bu nedenle 66 kV'luk hatların kullanımı sınırlı kalmıştır. Hatların çoğu 154 ve 380 kV değerlerinde kurulmaktadır.

#### 1.4. Dağıtık Üretim Kavramı

Yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretiminin artması, elektrik enerjisi üretiminde dağıtık üretim modeli ve yapısını ortaya çıkarmıştır. Geleneksel enerji üretim kaynaklarına eklenen bu kaynaklar, bölgenin enerji potansiyeline bağlı olarak rüzgâr, güneş, jeotermal enerji gibi farklı enerji türleri olabilmektedir. Bu kaynakların yeri ve potansiyeli, rüzgâr hızı, sıcaklık gibi değişken parametrelere dayandığından, bu tür kaynaklar dağılmış ve fizibilitesi yerinde yapılması gereken kaynaklardır. Bu kaynakların avantajları; yerinde üretim, yerinde tüketim dolayısıyla

şebekeye yük oluşturmama ve şebeke yapısını basitleştirme, enerjinin batarya grupları vasıtasıyla depolanması böylece bir nevi kesintisiz enerjinin elde edilebilmesidir. Dezavantajları ise, daha az kayıp için enerjinin yüksek gerilimle taşınması ve bu gerilim seviyesine adaptasyon, çok fazla noktadan bağlantı sonucu şebeke frekans değerinde sapmalar ve harmonikler oluşturmalarıdır. Genel olarak bu tip kaynaklar, uygun teknolojik yapı ve bağlantı elemanları kullanılarak şebekeye daha az yük oluşturması ve temiz enerji üretiminin artırılması çabaları kapsamında, tüm dünyada teşvik edilen enerji üretim şekilleridir. Ülkemizde küçük ve orta ölçekli rüzgâr türbinlerinin kurulmasının artmasıyla, rüzgâr türbinleri dağıtık üretimde önemli bir yere sahip olmaya başlamıştır.

Son yıllarda rüzgâr hızı ölçüm teknolojisinin gelişmesi, bu alanda bir özel sektörün oluşmaya başlaması, trafo nakil hattı maliyetlerine nazaran belli bölgelerde türbin kurulmasının ekonomik olması gibi durumlardan dolayı, ülkemizde özellikle batı bölgeler ağırlıklı olmak üzere çok sayıda orta-küçük çaplı rüzgâr türbini kurulumu yapılmıştır. Şebeke bağlantılı (on-grid) ya da şebeke bağlantısız (off-grid) kurulan bu türbinlerin, güç akışı açısından analizinin yapılması enerji kalitesi ve verimliliği yönünden oldukça önemlidir. Dolayısıyla bu tezde, rüzgâr-termal hibrit güç sisteminde, farklı ölçeklerde güç üretim değerlerine sahip rüzgâr türbinlerinin de dâhil edildiği güç sistemi için rüzgâr türbinlerinin etkisi ele alınmıştır.

### **1.5. Rüzgâr Türbinlerinin Enterkonnekte Sisteme Etkileri**

Enterkonnekte sistemin kurulum amaçlarından en önemlisi, tüketicilere kesintisiz ve yeterli miktarda enerjiyi temin etmektir. Temin edilen bu enerji, belirli bir kalitede olmalıdır. Güç kalitesi mevcut elektrik şebekesinin frekansının, geriliminin ve gerilim dalga şeklinin standartlarda belirtilen değerler arasında kesintisiz olmasıdır [16]. Hidrolik enerji, termik enerji gibi elektrik enerjisi üretim yöntemlerinde kullanılan hammaddeler rezerv halde bulunduğu için, bu kaynaklarla generatörleri sabit devirle çalıştırarak kararlı ve istenilen miktarda elektrik enerjisi üretilebilir. Rüzgâr enerjisinin, sıcaklık, kule yüksekliği, rüzgâr hızı ve basınç gibi parametrelere bağımlı değişken üretim yapısı nedeniyle, geleneksel enerji üretim kaynakları için

geçerli sabit durumlu parametrelere, değişken durumlu parametreler de eklenmektedir. Kesintisiz ve kaliteli elektrik enerjisinin temini açısından bu değişken parametrelili enerji üretiminin, enterkonnekte güç sistemine olası etkilerinin, başta yakıt maliyeti olmak üzere, optimum güç değerleri, çevre emisyonları ve ayrıca kullanılan algoritmadaki hesaplama yöntemleri açısından analiz edilmesi gerekmektedir. Optimum güç değerlerinin elde edilmesi ve tespiti, rüzgâr türbininin bulunduğu hibrit bir güç sistemi için en uygun maliyetli enerji akışını sağlayacaktır.

Bir rüzgâr tarlasında yüzlerce türbin bulunabilmektedir. Her bir türbin, rüzgâr hızı gibi parametrelere bağlı olarak farklı gerilim, frekans ve güçte üretim yapmaktadır.

Bu güç üretim farklılıklarının temel nedenleri;

- ❖ Kullanılan güç elektroniği elemanlarının yarıiletken yapısı,
- ❖ Farklı rüzgâr hızları,
- ❖ Farklı türbin güç eğrisi karakteristikleri,
- ❖ Kullanılan generatör yapıları

olarak sayılabilir.

Rüzgâr türbinlerinin enterkonnekte sistem içerisinde düzgün çalışmaması durumunda;

- ❖ Sistem kayıpları artar,
- ❖ Üretici için devre dışı kalma durumu dolayısıyla maliyetler artar,
- ❖ Kararlılık ve güvenilirlik azalır,
- ❖ Hatlar arası yük ve güç dengesizliği oluşur.

Rüzgâr türbinlerinin enterkonnekte şebekeye bağlantısı bir dizi zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bunların en temeli gerilimdeki düşme ya da yükselme gibi değişkenlikler dolayısı ile gerilim seviyesinin bozulmasıdır. Gerilim seviyelerinin sürekli değişmesi, diğer hatlara ek yüklerin gelmesi ya da yükün anlık artıp azalması anlamına gelmektedir. Güç kalitesi problemleri, endüstride

fabrikaların çalışmasını olumsuz yönde etkilemekle beraber, güç sistemlerinde ekipman tahribatı gibi bir çok sorun oluşturmaktadır. Bu sorunlar, hem hat sonundaki kullanıcılara hem de güç sistemi elemanlarına ciddi boyutlarda maliyet ve işletim sorunları ortaya çıkarmaktadır [17].

Bu çalışmada, geliştirilen algoritma ile, rüzgâr türbinlerinin enterkonnekte güç sistemindeki analizi yapılmıştır. Hibrit güç sisteminde rüzgâr türbin baralarının çalışması gereken optimum güç değerleri tespit edilerek, her bir rüzgâr barası için en iyi yakıt maliyetleri elde edilmiştir. Yakıt maliyetindeki bu iyileşmeler santral ömrü, sistem kayıpları, bakım işçilik maliyetleri, emisyon maliyetleri, sistemdeki toplam kayıpların azalması gibi diğer güç çıktılarına da olumlu yönde etkilemektedir.

## **1.6. Güç Akış Analizi ve Optimizasyon**

Enterkonnekte sistem canlı bir mekanizma gibidir. Günün her anında, üretilen ve tüketilen güç ve talep edilen yük miktarları değişmektedir. Güç sistemine sürekli şekilde üretim birimleri eklenmekte ya da çıkmaktadır.

Güç akışının lineer olmayan bu değişken yapısı, ancak lineer olmayan denklemlerin çözümü ile gerçekleştirilebilir. Bu amaçla çeşitli güç akış algoritmaları geliştirilmiştir. Bu algoritmalar ile tekrarlı analizler yapılarak, talep edilen yüke göre gücün optimum olduğu değerler belirlenmekte ve güç kaybı, planlama, operasyon, ekonomik planlama gibi çeşitli analizler bilgisayar aracılığı ile yapılmaktadır. Aşağıda güç akış analizi ve optimizasyon ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir.

### **1.6.1. Güç Akış Analizi**

Pratik bir güç sisteminde, güç santralleri güç üretim merkezlerinden eşit uzaklıklarda değildir. Dolayısıyla, her birimin yakıt maliyeti farklıdır. Ayrıca, normal çalışma şartlarında üretim kapasitesi, toplam yük talebi ve kayıplardan daha fazladır. Bu sebeple, enerji üretim planlamasında çok sayıda seçenek ortaya çıkmaktadır [18].

Güç akış analizi, her bir hattaki aktif ve reaktif güç akışının ve her baradaki gerilimin faz açısı ve büyüklüğünün tanımlanmasıdır. 4 nicelik her bir barayla ilişkilidir. Bunlar, gerilimin büyüklüğü  $V$ , faz açısı  $\theta$ , aktif güç  $P$  ve reaktif güç  $Q$ 'dur.

Güç akış analizine, yükün sürekli değişimi dolayısıyla ihtiyaç duyulmuştur. Güç analizi sonucunda, baralara uygulanan ya da enjekte edilen güçlerle, baralardan çıkan güçlerin dengede olduğu durum belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu durum aynı zamanda gücün en verimli şekilde iletildiği, kayıpların da en az seviyede olduğu andır. Ekonomik dağıtım problemi ise, güç sisteminin ekonomik olarak çalışabileceği en düşük yakıt maliyetini bulma problemidir [19].

Yük ya da güç şu aşağıdaki sebeplerden dolayı sürekli değişim gösterir;

- 1- Üretim merkezlerinin zaman zaman bakıma ihtiyaç duymaları nedeniyle, üretim gruplarının tam zamanlı çalışmaması,
- 2- Günün her saatinde ve mevsimsel olarak tüketilen enerjideki değişkenlik,
- 3- Rüzgâr, güneş gibi enerji kaynaklarının düzensizliğinden dolayı güç çıkışının sabit olmaması,
- 4- Küçük, orta ve büyük güçte çok sayıda değişken ve uyumsuz kaynağın sisteme bağlanması ya da sistemden çıkması.

Güç akış analizine ise aşağıdaki nedenlerden dolayı ihtiyaç duyulmaktadır;

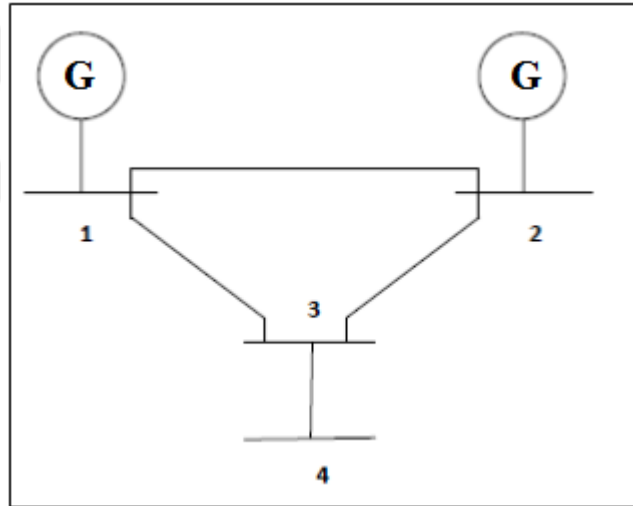
- 1- Elektrikli cihazların ihtiyaç duyduğu 50 Hz frekans değerini tolerans dâhilinde kararlı tutmak,
- 2- Her bir gerilim barasındaki gerilim değerlerini toleranslar dâhilinde tutmak,
- 3- İletimde hatlarda oluşan güç kayıplarını belirlemek ve bu kayıpları azaltıcı tedbirleri hesaplamak,
- 4- Üretim merkezlerinin birbirlerine olan mesafelerini en uygun şekilde tespit etmek,
- 5- Üretim merkezlerinin en uygun kapasitelerini belirlemek,
- 6- İletim hatlarındaki kondansatör değerlerini belirlemek,
- 7- Enerjinin ekonomik iletimini gerçekleştirmek,

8- Gelecekte güç sistemlerinde olabilecek gelişmeleri planlamak.

Enterkonekte sistem parametreleri, durgun haldeki (steady-state) eşitlikler ile tanımlanabilir. Bu sistemde akımlardan ziyade, güç eşitlikleri tanımlanır ve bilinir. Ancak admitans biçimindeki sistem düğüm denklemleri, lineer olarak çözülememektedir. Bu durumda güç akışı, tekrarlayan teknikleri içeren güç akış algoritmaları ile çözülmektedir.

### 1.6.1.1. Bara Admitans Matrisi

Dört baradan oluşan temel bir güç sisteminin diyagramı Şekil 1.4'de verilmektedir [18].



Şekil 1.4. Temel bir güç sistemi diyagramı [18]

Güç sisteminin çözümü için öncelikle empedanslar admitansa Eşitlik 1.1'deki gibi çevirilir [18].

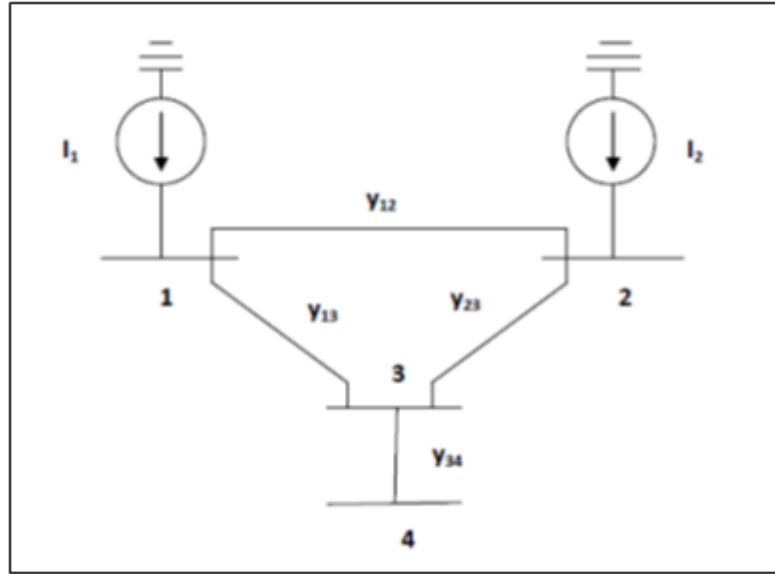
$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (1.1)$$

Admitans ve akım kaynakları ile birlikte güç sistemi Şekil 1.5'deki gibi gösterilir [18].



Güç sistemindeki 1-4 baralarına Kirchoff akım kanunu uygulanırsa Eşitlik 1.2'deki denklemler elde edilir [18].

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3) \\ I_2 &= y_{20}V_2 + y_{12}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3) \\ 0 &= y_{23}(V_3 - V_2) + y_{13}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4) \\ 0 &= y_{34}(V_4 - V_3) \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$



**Şekil 1.5.** Güç sisteminin admitans diyagramı [18]

Eşitlik 1.2'deki denklemler yeniden düzenlenerek Eşitlik 1.3'deki denklemler elde edilir [18].

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3 \\ I_2 &= -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23})V_2 - y_{23}V_3 \\ 0 &= -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4 \\ 0 &= -y_{34}V_3 + y_{34}V_4 \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Güç sisteminin admitans denklemleri ise, Eşitlik 1.4'de ki gibi elde edilir [18].

$$\left. \begin{aligned}
Y_{11} &= y_{10} + y_{12} + y_{13} \\
Y_{22} &= y_{20} + y_{12} + y_{23} \\
Y_{33} &= y_{13} + y_{23} + y_{34} \\
Y_{44} &= y_{34} \\
Y_{12} &= Y_{21} = -y_{12} \\
Y_{13} &= Y_{31} = -y_{13} \\
Y_{23} &= Y_{32} = -y_{23} \\
Y_{34} &= Y_{43} = -y_{34}
\end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

Eşitlik 1.4 kullanılarak Eşitlik 1.3'deki denklemler Eşitlik 1.5'deki denklemlere dönüştürülür [18].

$$\left. \begin{aligned}
I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \\
I_2 &= Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \\
I_3 &= Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 \\
I_4 &= Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4
\end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Eşitlik 1.5, n baralı bir sistem için yazılırsa, Eşitlik 1.6'daki matris eşitliği elde edilir [18].

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Eşitlik 1.6, sadeleştirilmiş şekilde Eşitlik 1.7'deki gibi yazılır [18].

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (1.7)$$

Eşitlik 1.7'de  $I_{bus}$ , bara içine giren akımların vektörüdür ve akım baraya giriyor ise pozitif, baradan çıkıyor ise negatif olarak kabul edilir.  $V_{bus}$ , bara gerilimlerinin vektörü,  $Y_{bus}$  ise bara admitans matrisidir. Bara admitans matrisinin köşegen olan elemanları, bu baraya bağlanan baraların admitanslarının toplamına eşittir ve Eşitlik 1.8'deki gibi ifade edilir. Bara admitans matrisinin köşegen olmayan elemanları ise baranın, bu baraya bağlı bara arasındaki admitansın negatif değeridir ve Eşitlik 1.9'daki gibi gösterilmektedir [18].

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i \quad (1.8)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (1.9)$$

Bara akımları bilindiği zaman Eşitlik 1.7, n baralı gerilimler için çözülebilir ve böylece Eşitlik 1.10 elde edilir [18].

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1} I_{bus} \quad (1.10)$$

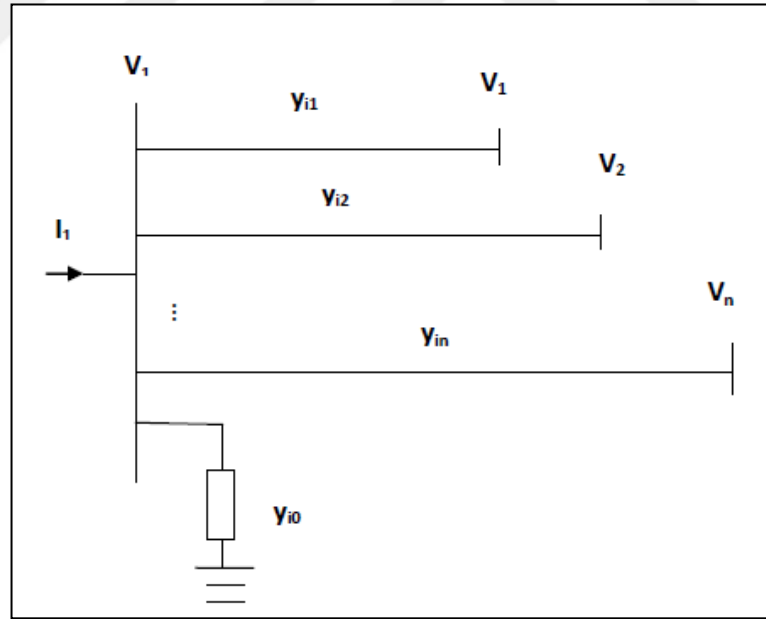
Bara admitans matrisinin tersi bara empedans matrisidir ve  $Z_{bus}$  ile gösterilir [18].

Eşitlik 1.10, Eşitlik 1.11 olarak da yazılabilir.

$$V_{bus} = Z_{bus} I_{bus} \quad (1.11)$$

### 1.6.1.2. Güç Akışı Eşitliğinin Hesabı

Bir güç sistemindeki bara bağlantı diyagramı Şekil 1.6' da gösterilmiştir. Bara sistemine Kirchoff akımlar kanunu uygulandığında Eşitlik 1.12 ve diğer bir gösterişle Eşitlik 1.13 elde edilir [18].



Şekil 1.6. n baralı bir güç sistemine ait bağlantı diyagramı [18]

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \quad (1.12)$$

veya

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (1.13)$$

i. baradaki aktif ve reaktif güç değerleri Eşitlik 1.14'de, akım formülü ise Eşitlik 1.15'de verilmiştir [18].

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (1.14)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (1.15)$$

Eşitlik 1.15'deki akım formülünü Eşitlik 1.13'de yerine konursa Eşitlik 1.16 elde edilir [18].

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (1.16)$$

Eşitlik 1.16'da elde edilen ve lineer olmayan matematiksel güç akışı ifadesinin, iteratif tekniklerle çözülmesi gerekmektedir ve ancak lineer olmayan çözüm yöntemleri ile çözülebilir.

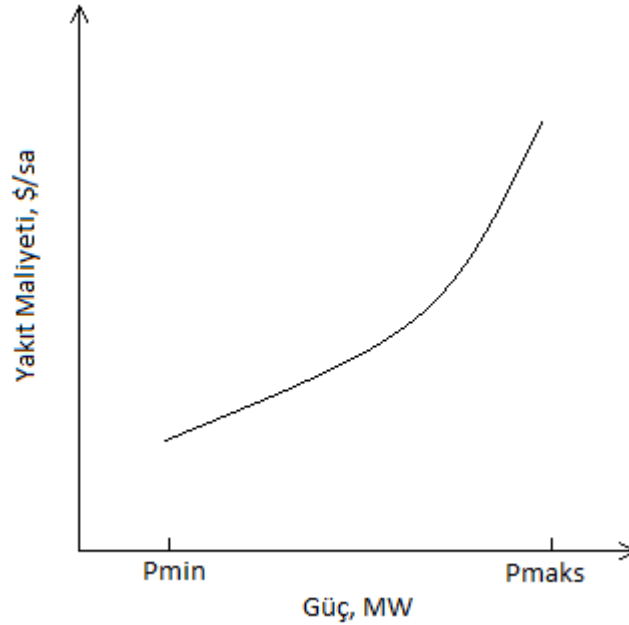
Güç akış analizi aktif güç akış analizi ve reaktif güç akış analizi olarak ikiye ayrılmaktadır. Aşağıda aktif ve reaktif güç akış analizi ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmektedir.

### 1.6.1.3. Aktif Güç Akış Analizi

Aktif güç akış analizinde, güç sistemi içerisinde bulunan referans (slack), güç ve yük baralarının, aktif güç değerlerinin, baraların minimum ve maksimum değerleri arasında hesaplanması, hattın aktif güç kaybı gibi işlemler yapılmaktadır. Aktif güç akış analizi yapılabilmesi için, generatör ve yük baralarına ait minimum ve maksimum aktif güç değerlerinin, her bir güç ünitesi için yakıt maliyet katsayılarının, elektrik enerjisinin hangi kaynaklardan elde edildiğinin ve bu enerji üretim şeklinin tipik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunların başında,  $P_{min}$  ve  $P_{max}$  olarak bilinen en büyük ve en küçük güç üretim sınırları bulunmaktadır.

Termik santraller gibi bazı santral türleri enerji verimliliğinden dolayı kapatılmazlar ve sürekli belirli bir minimum güçte çalıştırılmaları gerekir. Bunun yanı sıra hidroelektrik santraller de, genellikle iç ihtiyaçlarını kendileri karşılar ve dolayısıyla belirli bir minimum güç üretimi yaparlar. Rüzgar santralleri iç tüketimlerini enerji üretiminin olmadığı durumlarda enterkonnekte sistemden sağlayabilir bu nedenle rüzgar santralleri için minimum güç üretme zorunluluğu yoktur. Üretilen maksimum güç değerini santrallerin kurulumunda kullanılan generatör grupları, bunların verimlilikleri belirler, rüzgar santrallerinde ise üretilen maksimum güç değerleri rüzgar hızı ile bağlantılıdır. Tüm santraller, bu minimum ve maksimum değerler arasında bir güç değeri üreterek güç sistemini beslemektedir.

Diğer taraftan, güç sistemlerinde maliyet hesabı da önemli olmaktadır.  $a_i$ ,  $b_i$  ve  $c_i$  değerleri termal generatörler için geçerli olan ısı maliyet katsayılarıdır ve termal generatörün yakıt maliyet eğrisinden hesaplanmaktadır [18]. Tipik bir yakıt maliyet eğrisi Şekil 1.7’de görülmektedir.



**Şekil 1.7.** Termal bir santral için tipik yakıt maliyet eğrisi [18]

#### 1.6.1.4. Reaktif Güç Akış Analizi

Reaktif güç akış analizinde, güç sistemindeki hatların özelliğine bağlı olarak hatlar arasındaki kayıplar, reaktif gücün dengelenmesi gibi işlemler yapılmaktadır. Reaktif güç akış analizi yapılabilmesi için hatlara ait bazı değerler bilinmelidir.

Enterkonekte sistemde kullanılan iletkenlerin yapısından dolayı, baralar arasında rezistans ( $R$ ), reaktans ( $X$ ) ve bu değerlere bağlı olarak hesaplanan kondüktans ( $G$ ) ve suseptans ( $B$ ) değerleri analizde önemlidir.

$R$ , rezistans değeri, iletkenin kesit yapısına, iletkenin yapıldığı malzemeye bağlı olarak değişim göstermektedir ve Eşitlik 1.17 ile tanımlanır [18].

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1.17)$$

Burada,  $l$  iletken hattın km olarak uzunluğunu ve  $A$  iletken telin ( $\text{mm}^2$ ) olarak kesit alanını göstermektedir.

$X$  reaktans değeri, hattın indüktansı ve frekans değerlerine bağlıdır ve Eşitlik 1.18 ile tanımlanır.

$$X_L = 2\pi fL \quad (1.18)$$

Burada,  $f$  (Hz) olarak frekans değerini ve  $L$ , ( $H/m$ ) olarak indüktans değerini göstermektedir [18].

$R$  ve  $X$  değerlerinin hesaplanmasının ardından,  $G$  ve  $B$  değerleri hesaplanabilir.

$G$  kondüktans değeri, Eşitlik 1.19'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$G = Re \left\{ \frac{1}{R+jX} \right\} \quad (1.19)$$

ve  $B$  suseptans değeri, Eşitlik 1.20 ile verilir [18].

$$B = \text{Im} \left\{ \frac{1}{R+jX} \right\} \quad (1.20)$$

Bu değerler, gc akış analizinde reaktif gc akış analizi olarak, gc sistemindeki kayıpların optimizasyonunda kullanılmaktadır. Reaktif gc akış analizi gc sistemindeki reaktif gücün ve reaktif gc kayıplarının optimizasyonu amacıyla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, generatörlerin aktif gc değerler ve parametrelerinin optimizasyon hesaplamaları yapıldığından, gc akış analizinin aktif kısmı kullanılmıştır.

### 1.6.2. Optimizasyon ve Optimizasyon Algoritmalarının zellikleri

Optimizasyon, verilen sınırlamalar dâhilinde istenilen bir değerin en uygun değerini ya da değerlerini bulma işlemidir. Sistemin zelliklerine göre tek amaçlı ya da çok amaçlı (multiobjective) optimizasyon işlemleri olabilmektedir. Bir optimizasyon algoritmasından genel olarak aşağıdaki özellikler beklenmektedir;

- ❖ Hızlı zm sağlaması,
- ❖ Kararlı zm üretmesi,
- ❖ çözüm eşitliklerinin basit olması,
- ❖ Değişken durumlara karşı uyumlu olması-öğrenebilme,
- ❖ Lineer olmayan durumlara uyum sağlaması.

Gc akış optimizasyonunda, algoritmada, baraların aktif ve reaktif değerleri belirli sınırlar içerisinde tutulmalıdır. Eşitlik ve eşitsizlik sınırlamaları olarak verilen bu sınır değerler algoritma yapısı ve gc sistem özelliklerini yansıtması açısından önemlidir.

Gc sistemi içerisinde üretilen, tüketilen ve kayıp gc değerleri toplamı 0 olmalıdır. Dengeli bir gc sistemi için gereken bu durum Eşitlik 1.21 ve Eşitlik 1.22 ile verilmektedir.

$$P_{load} - \sum P_{g_i} - \sum P_L = 0 \quad (1.21)$$

$$Q_{load} - \sum Q_{g_i} - \sum Q_L = 0 \quad (1.22)$$

Burada,  $P_{load}$  ve  $Q_{load}$  sistem tarafından talep edilen aktif ve reaktif güç,  $\sum P_{g_i}$  ve  $\sum Q_{g_i}$  tüm generatörler tarafından üretilen toplam aktif ve reaktif güç,  $\sum P_L$  ve  $\sum Q_L$  toplam aktif ve reaktif hat kayıplarını göstermektedir. Tüm bu eşitlikler 'Eşitlik Sınırlamaları' olarak adlandırılmaktadır [20].

Eşitsizlik sınırlamaları ise, generatör sınırlamaları, transformatör sınırlamaları ve güvenlik sınırlamaları olarak sınıflandırılabilir. Generatör sınırlamaları, minimum ve maksimum generatör üretim değerleridir. Burada problem ve ayrıca çözüm, toplam yük talebi için minimum ve maksimum sınırlar arasında generatörlerin optimum güç üretim değerlerini tespit etmektir.

Generatör sınırlamaları generatör gerilimleri, generatör aktif ve reaktif güç üretim sınırlarından oluşmaktadır.

Generatör aktif güç sınırları Eşitlik 1.23'deki gibi tanımlanmaktadır,

$$P_{G_i}^{min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{max}, 1 \leq i \leq N_G \quad (1.23)$$

Burada,  $P_{G_i}^{min}$  ve  $P_{G_i}^{max}$  sırasıyla  $i$  generatörünün minimum ve maksimum aktif güç değerleridir.  $N_G$  generatör sayısıdır [20].

Generatör reaktif güç sınırları Eşitlik 1.24 ile verilmektedir,

$$Q_{G_i}^{min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{max}, 1 \leq i \leq N_G \quad (1.24)$$

Burada,  $Q_{G_i}^{min}$  ve  $Q_{G_i}^{max}$  sırasıyla  $i$  generatörünün minimum ve maksimum reaktif güç sınırlarıdır.  $N_G$  generatör sayısıdır [20].



Enterkonnekte güç sisteminde, bazı hatlarda gerilim düşümlerinin ayarlanması amacıyla ayar transformatörleri bulunabilir. Gerilim düşümü ayarı, transformatör kademe değerleri düzenlenerek yapılmaktadır. Transformatör kademe değerleri normalde 1 olarak alınmaktadır. Kademe değer sınırları Eşitlik 1.25'deki gibi ifade edilmektedir,

$$T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max}, 1 \leq i \leq N_T \quad (1.25)$$

Burada,  $T_i^{min}$  ve  $T_i^{max}$ , sırasıyla  $i$  transformatörünün minimum ve maksimum kademe değerleridir.  $N_T$  kademe transformatörlerinin sayısıdır [20].

Güvenlik sınırlamaları yük baralarındaki gerilim genlikleridir ve bu genlikler Eşitlik 1.26 ile tanımlanmaktadır,

$$V_{L_i}^{min} \leq V_{L_i} \leq V_{L_i}^{max}, 1 \leq i \leq N_{PQ} \quad (1.26)$$

Burada,  $V_{L_i}^{min}$  ve  $V_{L_i}^{max}$  sırasıyla  $i$  barasının minimum ve maksimum yük gerilimleridir.

$N_{PQ}$  aktif ve reaktif bara sayısıdır [20].

### 1.6.3. Rüzgâr Enerjili Sistemde Eşitlik ve Eşitsizlik Sınırlamaları

Güç sisteminde rüzgâr baralarının da olması durumunda bu baralar için eşitlik sınırlamaları aynı kalmak koşulu ile eşitsizlik sınırlamaları, Eşitlik 1.27 ve Eşitlik 1.28 ile verilebilir.

Rüzgâr güç sınırları; rüzgâr generatör sınırları ve  $i$ . rüzgâr enerjisi generatörünün anma (rated) rüzgâr gücü sınırlarıdır [21]. Rüzgâr generatör sınırları rüzgâr barasındaki güçlerdir ve Eşitlik 1.27 ile tanımlanırlar.

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (1.27)$$

Burada,  $P_{i,min}$  ve  $P_{i,max}$ ,  $i$ . rüzgâr türbininin ya da  $i$ . rüzgâr sahası barasının minimum ve maksimum üretilen güçleridir [21].

Anma (rated) rüzgâr güç sınırları,  $i$ . rüzgâr generatöründen elde edilen anma rüzgâr gücüdür ve Eşitlik 1.28 ile tanımlanır,

$$0 \leq w_i \leq w_{r,i} \quad (1.28)$$

Burada,  $w_i$  planlanan rüzgâr gücü ve  $w_{r,i}$   $i$ . rüzgâr generatöründen elde edilen anma rüzgâr gücüdür [21].

$V_i$  farklı konumlarda rüzgâr hızı ölçümleri gerçekleştirerek yıllık olarak tespit edilen ortalama rüzgâr hızıdır. Bu değere göre, gerçek üretilen rüzgâr hızı rüzgâr türbininin güç eğrisi kullanılarak hesaplanmaktadır. Rüzgâr hızı veri analizleri ülkemizde Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır [22].

#### 1.6.4. Optimizasyon Amaç Fonksiyonları

Güç akış analizinde belirli değerler, toleranslar dâhilinde kabul edilerek bu sınırlar içerisinde en az yakıt maliyeti, en iyi güç çözümü, en hızlı güç çözümü, en düşük güç kaybı ve en az adımda sonuca ulaşma gibi çözümlere ulaşılmaya çalışılmaktadır. Bu şekildeki yük akış çözümlerine güç akışının optimizasyonu adı verilmektedir.

Toplam yakıt maliyetinin, algoritma işletim zamanının, toplam güç kaybının, emisyon miktarının ve gerilim kararlılığının optimizasyonu, güç akış algoritmalarının temel amaçlarından birkaçıdır [23]. En temel amaç fonksiyonu yakıt maliyet fonksiyonu olmakla beraber kimyasal reaksiyon miktarı gibi farklı amaç fonksiyonları için de güç akış analizi yapılabilmektedir [24].

Bazı aktif ve reaktif güç hesaplamalarında, çalışılan algoritmanın sonuç ve zaman verimliliğini tespit edebilmek amacıyla hat kayıpları ihmal edilebilir ve yalnızca aktif ya da reaktif güç akış analizi yapılabilir [25-30].

Optimal güç akışı ister geleneksel isterse modern optimizasyon teknikleri ile yapılsın hedef, amaç fonksiyonunu belirlenen sınırlar dahilinde optimum çözüme ulaştırmaktır.

#### 1.6.4.1. Yakıt Maliyeti Analizi ve Optimizasyonu

Güç akış analizinde, amaç fonksiyonları arasında en çok çalışılanı ve en önemlisi yakıt maliyeti analizi ve optimizasyonudur. Yakıt maliyeti optimizasyonunda, tüketici tarafından talep edilen aktif gücün, minimum maliyetle üretileceği optimum generatör aktif güç üretim değerleri tespit edilmeye çalışılır. Geleneksel güç üretim birimlerinden oluşan bir güç sistemi için yakıt maliyeti, Eşitlik 1.29 ile hesaplanmaktadır.

$$F_{cost} = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \text{ \$/sa} \quad (1.29)$$

Burada  $a_i$ ,  $b_i$  ve  $c_i$  türbin üreticileri tarafından türbin verimi ve kullanılan yakıtın üreteceği ısı değerleri temel alınarak hesaplanan termal generatör yakıt maliyet katsayılarıdır.  $P_i$ ,  $i$  generatörünün ürettiği reel güç değeri,  $N_G$  sistemdeki generatörlerin toplam sayısıdır.  $P_i$  değerleri optimize edilerek  $F_{cost}$  fonksiyonu minimum yapılmaya çalışılmaktadır.

#### 1.6.4.2. Algoritma Zamanı ve Optimizasyonu

Güç sistemine yeni üretim ya da tüketim baralarının eklenmesi sistemin analiz zamanını da arttırmaktadır. Analiz çıktıları sürekli ve anlık olarak kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Bu durumda, her bir çevrim süresi olabildiğince kısa olmalıdır ve harcanan zaman minimuma indirilmelidir. Güç sistemlerindeki bara

sayısı arttıkça ve sistemin kapasitesi büyüdükçe algoritma zamanının optimizasyonu da önem kazanmaktadır.

#### 1.6.4.3. Emisyon Analizi ve Optimizasyonu

Elektrik enerjisinin çevreye en az zarar verecek şekilde üretilmesi son yıllarda önem kazanan bir konudur. Güç analiz algoritmaları ile enerji üretim kaynaklarının emisyon miktarları değerlendirilerek optimizasyon yapılabilmektedir. Böylece daha çevreci enerji üretim senaryoları oluşturulabilmektedir. Emisyon analizi optimizasyonunda amaç, en düşük emisyon miktarını verecek üretim değerlerini tespit etmektir.

Emisyon hesabı aynı zamanda yakıt maliyeti ve yakıt cinsi ile bağlantılı olduğundan oran-orantı şeklinde de hesaplanabilmektedir. Bu nedenle yakıt maliyetinde elde edilecek her iyileşme emisyon miktarının azalmasına da olumlu yönde etki edecektir.

#### 1.6.4.4. Güç Kaybı ve Optimizasyonu ( $P_L$ )

Enterkonnekte sistemde elektrik enerjisinin dağıtım ve iletiminde elektrik iletkenlerinin yapısına bağlı olarak güç kayıpları yaşanmaktadır. Güç kaybı aktif ve reaktif güç kaybı şeklinde olmaktadır. Güç kaybı optimizasyonunda amaç iletim hatlarındaki güç kaybını en aza indirecek güç ve gerilim değerlerini tespit etmektir.

İletim hatlarındaki aktif güç kaybı Eşitlik 1.30 ile verilir,

$$P_L = \sum_k n_l g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (1.30)$$

Burada,  $g_k$ ,  $i$ . ve  $j$ . baralar arasındaki iletim hattının kondüktansı,  $n_l$  iletim hatlarının toplam sayısı,  $V_i$ ,  $V_j$ ,  $\delta_i$ ,  $\delta_j$  sırasıyla  $i$ . ve  $j$ . baranın gerilim büyüklükleri ve faz açılarıdır. Burada  $V_i$ ,  $V_j$ ,  $\delta_i$ ,  $\delta_j$  değerleri optimize edilerek güç sistemi için en düşük güç kaybı tespit edilmeye çalışılmaktadır.

## 1.7. Rüzgâr Enerjisi ile Optimizasyon

Geleneksel bir güç sistemine rüzgâr enerjisi güç sisteminin eklenmesi ile yeni hibrit güç sistemleri ortaya çıkmaktadır. Eklenen bu yeni enerji üretim birimlerinin mevcut güç sistemine yakıt maliyeti, algoritma zamanı ve emisyon gibi açılardan etkileri analiz edilmelidir.

### 1.7.1. Rüzgâr Enerjisinin Yakıt Maliyeti Etkisi

Geleneksel bir güç sistemine rüzgâr üretim birimleri eklenirse yeni yakıt maliyeti Eşitlik 1.31'deki gibi hesaplanmaktadır [31].

$$\Sigma F_{cost} = F_{costconv} + (\Sigma_{i=1}^{n_w} C_{w_i}(w_i) + \Sigma_{i=1}^{n_w} C_{p,w_i}(W_{i,av} - w_i) + \Sigma_{i=1}^{n_w} C_{r,w,i}(w_i - W_{i,av})) \$/sa \quad (1.31)$$

Burada,  $F_{costconv}$  geleneksel güç sisteminin yakıt maliyeti,  $n_g$  geleneksel generatörlerin sayısı,  $n_w$  rüzgâr generatörlerinin sayısı,  $Pg_i$  i. generatörün aktif gücü,  $W_{i,av}$  i. rüzgâr generatöründen elde edilen rüzgâr gücü,  $C_{w_i}$  i. rüzgâr generatörünün maliyet fonksiyonu,  $C_{p,w_i}$  i. rüzgâr generatöründen elde edilen gücün tamamının kullanılmaması durumundaki ceza (penaltı) maliyet fonksiyonu,  $C_{r,w,i}$  rüzgâr gücündeki belirsizliklerle bağlantılı gerekli yedek (stok) maliyet fonksiyonudur [31].

Eğer rüzgâr türbinleri sistem işletmecisi tarafından satın alınmamışsa,  $C_{p,w_i}$  ve  $C_{r,w,i}$  ihmal edilebilir ve  $F_{cost}$ , Eşitlik 1.32 şeklinde tanımlanır [31],

$$F_{cost} = (\Sigma_{i=1}^{n_g} (a_i + b_i P g_i + c_i P g_i^2 + \Sigma_j^{n_w} (d_j w_j))) \$/sa \quad (1.32)$$

Burada,  $w_j$ , i. rüzgâr generatöründen elde edilmesi planlanan rüzgâr gücü ve  $n_w$  sistemdeki rüzgâr generatörlerinin sayısıdır.

$d_j$ , i. rüzgâr generatör için doğrudan maliyet katsayısıdır ve Eşitlik 1.33 ile tanımlanır [31],

$$d_j = \frac{P_{imax}}{P_{ianma}} \quad (1.33)$$

Burada,  $P_{imax}$ , rüzgâr türbininden elde edilebilecek en büyük güç üretim değeri,  $P_{ianma}$ , rüzgâr türbininin üreticisi tarafından belirlenen anma rüzgâr gücüdür [31].

### 1.7.2. Rüzgâr Enerjisinin Algoritma Zamanı Etkisi

Güç akış analiz programları ve algoritmaları optimum yakıt maliyeti hesabında her bir enerji barasının minimum ve maksimum değerleri arasında çalışmaktadırlar. Çok sayıda küçük güçlerden oluşan rüzgâr enerji sistemlerinin ana baralar üzerinden güç sistemine bağlandığı düşünüldüğünde, bara sayısının çok fazla arttığı aynı zamanda çok farklı güç üretim değerlerine sahip olacak bir güç sisteminde algoritma zamanı da artacaktır. Bu nedenle, rüzgâr enerjisi gibi enerji üretim kaynaklarının eklendiği kombine güç sistemlerinin analizlerinde yakıt maliyetinin yanı sıra algoritma çalışma zamanı da önemli bir analiz çıktısı haline gelmiştir.

### 1.7.3. Rüzgâr Enerjisinin Emisyon ve Emisyon Maliyeti Etkisi

Elektrik enerjisi üretim kaynakları göz önüne alındığında, ( $CO_2$ ) emisyon miktarları ortalama olarak kömür için 820 g/KWh, doğalgaz için (kombine) 490 g/KWh, rüzgâr için 11 g/KWh' dir [32-33]. Bu değerler rüzgâr enerjisinin en temiz enerji üretim yöntemlerinden biri olduğunu göstermektedir. Ancak enerji üretimi dışındaki inşaat maliyetleri gibi diğer maliyetler düşünüldüğünde rüzgâr enerjisi bazı durumlarda enerji üretimindeki avantajını kaybedebilir ve güç sisteminin şartlarına göre geleneksel enerji üretiminden daha yüksek maliyetler ortaya çıkabilir.

Rüzgâr enerjisinin emisyonla ilgili maliyetleri devlet teşvikleri ve güncel demir, çelik, beton üretim maliyetleri de dâhil çok sayıda bileşeni olan geniş bir araştırma alanıdır. Rüzgar enerjisi yalnızca enerji yakıt maliyeti düşünüldüğünde çok çevreci bir enerji üretim türüdür. Genel olarak, rüzgâr enerjisinin enerji üretimindeki çevreye olan katkısı, devlet ve özel sektörün teşvikleri ile kalıcı hale getirilebilir.

## 1.8. Literatür İnceleme

Güç sistemleri, güç akış analizinde kullanılan geleneksel, modern ve hibrit optimizasyon teknikleri ile analiz edilmektedir. Hatta her geçen gün yeni algoritmalarla güç akışı analizi çeşitli parametreler açısından analiz edilmeye çalışılmaktadır.

Optimizasyon algoritmaları ile ilgili teorik bilgi ve ispatlar Materyal ve Yöntem kısmında verilmiştir. Tüm optimizasyon algoritmalarının hepsinde temel amaç optimizasyon amaç fonksiyonlarını en iyi değerlerde gerçekleştirmektir.

Geleneksel güç akış algoritmaları Gauss, Newton-Raphson ve Hızlı Çözümlemeli Güç Akış algoritmalarıdır. Bunlardan ilki olan ve en temel algoritma Gauss-Eliminasyon algoritmasıdır.

Geleneksel algoritmaların güç sistemi büyüdükçe doğruluk ve verimleri düşmekte ve bazen de çözümü yakınsamaktadırlar. Yakınsama problemi, gerçek zamanlı büyük güç sistemlerinde sınırlı çözüm, sistemin büyümesi ile matematik işlemlerde karmaşıklık ve işlem yükünün çok artması geleneksel algoritmaların genel sorunlarıdır. Literatürde geleneksel algoritmalar ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları şu şekildedir:

1973 yılında, B. Stott ve O. Alsac yaptıkları çalışmada Hızlı Çözümlemeli Güç Akış analizi ile optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında geliştirdikleri yöntemin geleneksel güç akış çalışmaları içerisinde hâlihazırdaki Newton yöntemine

göre daha hızlı, daha güvenilir ve veri depolama kolaylığı ve hesaplama basitliği sağladığını ifade etmişlerdir [34].

2002 yılında, E. Chandrasekharan ve arkadaşları çalışmalarında, Stott'un geliştirdiği teknikten farklı olarak güç akışının reel ve reaktif bileşenlerini ayrı ayrı düşünmek yerine uygun şekilde tek olarak düşünerek Stott ve Alsac'ın güç akış analiz tekniğini geliştirmişlerdir. Yöntemlerini aktif ve reaktif bileşenler birleştirildiğinde bunun bara gerilim açılarına hassas olmaması dolayısıyla birleştirilmiş yöntemle lineerleştirme yapıldığında daha iyi sonuçların elde edilmesi olarak açıklamışlardır [35].

Güç akış algoritmalarının performansı, algoritmanın hesaplama yeteneklerinin yanı sıra analizin yapıldığı güç sisteminin yapısı ve karmaşıklığı ile de yakından ilgilidir. Örneğin küçük ölçekli bir güç sistemi için geleneksel algoritmalar çoğu zaman yeterli olmaktadır. Her algoritmanın kendine has bir yapı ve özellikleri bulunmaktadır. Bu nedenle, analizi yapılacak güç sistemine göre uygun algoritmaların kullanılması, çözümü ve algoritmadan beklenileni karşılamak açısından en uygundur.

Modern optimizasyon teknikleri ya da sezgisel algoritmalar doğa olaylarından esinlenerek geliştirilen algoritmalarlardır. Güç akış denklemlerinin lineer olmayan yapısı ve güç sistemlerinin dinamikliği, diğer mühendislik alanlarının çoğunda da kullanılan sezgisel modern optimizasyon algoritmalarının güç akış analizinde de kullanımını yaygınlaştırmıştır. Literatürde güç akış analizinde çok sayıda modern optimizasyon tekniği temel olarak ve bazı özellikleri geliştirilerek incelenmiştir. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir:

2008 yılında, K.S. Pandya ve S.K. Joshi 'Optimum Güç Akış Yöntemlerinin Araştırılması' adlı araştırma makalesi şeklindeki çalışmalarında çok sayıda geleneksel ve genetik algoritmanın güç akış analizindeki kullanımını ele almışlardır. Geleneksel algoritmaların dezavantajlı yönlerini belirterek modern optimizasyon tekniklerinin güçlü oldukları yönleri vurgulamışlardır [36].



2010 yılında, A.A. Abou El Ela ve arkadaşları çalışmalarında, IEEE 30 baralı güç sistemi üzerinde Fark Gelişim Algoritması kullanarak güç akış analizi yapmışlardır. Tasarladıkları Fark Gelişim Algoritması ile elde ettikleri yakıt maliyeti sonuçlarının gradyant temelli yaklaşım, geliştirilmiş genetik algoritma temelli yaklaşım ve parçacık sürü optimizasyonu temelli yaklaşımlara göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir [37].

2011 yılında, S. Sivasubramani ve S. K. Swarup çalışmalarında, pareto verimliliğini değiştirmeden farklı amaçlar ve değişik sınır değerleri için Harmoni Arama Algoritmasını güç akış analizine uygulamıştır. Elde ettikleri sonuçları, hızlı baskın olmayan sıralamalı genetik (NSGA-II) algoritma ile karşılaştırmışlardır [38].

2012 yılında, S. Duman ve arkadaşları çalışmalarında Yerçekimi Arama Algoritmasını güç akış analizine gerilim profilinin iyileştirilmesi, gerilim kararlılığının geliştirilmesi ve en iyi yakıt maliyetini elde etmek için uygulamışlardır. Çalışmalarında, IEEE 30 ve 57 baralı test sistemlerini kullanmışlardır [39].

2013 yılında, M.R. Adaryani ve A. Karami çalışmalarında, Yapay Arı Koloni algoritmasını güç akış analizine uygulamışlardır. Çalışmalarında sürekli ve ayrık değişkenler kullanmışlar ve yakıt maliyeti, toplam aktif güç kaybı, gerilim profilinin iyileştirilmesi ve emisyon gibi amaç fonksiyonlarında geliştirdikleri yöntemin uygun sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Geliştirdikleri algoritmayı IEEE'nin 9, 30 ve 57 baralı sistemlerine uygulamışlardır [40].

Hibrit algoritmalar, geleneksel yöntemlerle yapay zekâ algoritmalarının ya da iki ya da daha fazla sayıda modern optimizasyon algoritmasının birleşimi şeklinde oluşturulan algoritmalarlardır. Farklı algoritmaların güçlü yönlerini bir araya getirdiklerinden dolayı çok sayıda hibrit güç akış algoritması da literatürdeki yerlerini almaktadırlar. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

2003 yılında, L. Shengsong ve arkadaşları çalışmalarında, geleneksel güç akış optimizasyonu tekniklerinin yerel bir minimum çözüm noktası tarafından problemi yakınsamaya götürebileceğini belirterek geliştirdikleri hibrit yöntemin güç akış

çözümleri için daha etkin bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Geliştirdikleri hibrit yöntemde ilk kısımda kaos optimizasyon algoritmasını ardından ikinci kısımda başarılı lineer programlama tekniğini kullanmışlardır. IEEE 14, 30 ve 57 baralı sistemler için uyguladıkları analizlerinde yöntemlerinin nümerik açıdan etkinliğini ispatlamışlardır [41].

2011 yılında, H. R. Liang ve arkadaşları çalışmalarında, bulanık mantık tabanlı bir parçacık sürü optimizasyon yöntemi geliştirerek bu yöntemi IEEE 30 baralı test sistemi ve IEEE 118 baralı rüzgâr enerjisi de içeren bir test sistemine uygulamışlardır. Yük talebi ve rüzgâr hızındaki değişimlere göre geliştirdikleri algoritmanın iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir [42].

2013 yılında, Y. Li ve arkadaşları çalışmalarında, reaktif optimum güç akışı için Fark Gelişim, Yapay Arı Koloni algoritmalarını birleştirerek hibrit yapı bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında Fark Gelişim algoritmasının çok büyük popülasyon boyuna sahip olması nedeniyle Yapay Arı Koloni Algoritmasının global arama yeteneğinden faydalanmışlardır. Böylece geliştirdikleri hibrit yöntemle gerekli popülasyon boyutunu ve algoritma zamanını azaltmışlardır [43].

2014 yılında, M. Joorabian ve E. Afzalan çalışmalarında, normal ve arıza durumundaki güç sistemleri için parçacık sürü optimizasyonu ve Nelder-Mead algoritmasının birleştirildiği bir yöntem geliştirmişlerdir. Gradyant bilgisi olmaksızın sınır olmayan optimizasyon problemlerinin uygulaması için geliştirilmiş bir hesaplama yöntemi olan Nelder-Mead yöntemi ile Parçacık Süre Optimizasyonunu standart test sistemi olan IEEE güç sistemine uygulamışlardır [44].

2015 yılında, E. E. Elattar çalışmasında, genetik algoritma ve bakteri arama algoritmalarını birleştirerek elde ettiği hibrit optimizasyon yöntemini 5, 10 ve 30 baralı bir güç sistemine uygulayarak en az, en çok ve ortalama algoritma çalışma zamanı ve yakıt maliyetlerini hesaplamış ve diğer bazı optimizasyon yöntemlerinden daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmiştir [45].

Son yıllarda, rüzgâr enerjisinin de güç sistemine dâhil edildiği çalışmalar yapılmaktadır. Rüzgâr enerjisi ile güç akışını ele alan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

2000 yılında, A. Feijoo ve J. Cidraz, ‘Yük Akış Analizinde Rüzgâr Çiftliklerinin Modellenmesi’ adlı makalelerinde özellikle asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinin yük akışına 2 farklı yöntemle dâhil edilebileceğini belirtmişlerdir. *PQ* ve *PX* adını verdikleri bu yöntemleri algoritmik şekilde uygulamışlar ve rüzgâr türbin verileri ile yük akışının kontrolünü sağlamaya çalışmışlardır [46].

2012 yılında, W.C. Briceno Vicente ve arkadaşları çalışmalarında, rüzgâr enerjisinin enterkonnekte sisteme katkısını Weibull yoğunluk fonksiyonu ve rüzgâr parametreleri ile değerlendirmişler ve değişik tipte yük dağılımlarına rüzgâr yoğunluk fonksiyonunu 28 baralı bir sistem için uygulamışlardır [47].

2014 yılında, A. Panda ve M. Tripathy çalışmalarında, üç geleneksel güç kaynağı üretimli generatörü eş değer rüzgâr generatörleri ile değiştirerek IEEE 30 baralı güç sistemini modifiye etmişlerdir. Rüzgâr enerjisindeki değişimi uygun şekilde formülize edip genetik ve bakteri arama algoritması ile güç akışına uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçları geleneksel genetik algoritma ile gerilim sınırlarının ihlali ve algoritma çalışma zamanı açısından karşılaştırmışlar ve kullandıkları yöntemlerinin daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir [48].

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında, güç akış analizi için sık tercih edilen termik santrallerin yanına rüzgâr santralleri de eklenerek güç sistemi değiştirilmiş ve güç akış analizine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, geleneksel optimizasyon tekniklerinin yanında yeni bir teknik geliştirilerek sonuçlar irdelenmiştir.

### 2.1. Kullanılan Güç Sistemleri

Elektrik enerjisi üretim kaynaklarının çok çeşitli oluşu, güç sistemlerinin de farklı yapılarda olmasına yol açmaktadır. Burada, literatürde üzerinde yoğun çalışılan ulusal ve uluslararası kabul görmüş güç sistemleri hakkında bilgi verilecektir.

#### 2.1.1. IEEE 30 Baralı Güç Sistemi

Yük akış analizlerinin yapılabilmesi ve yük akış analiz algoritmalarının verimliliğinin karşılaştırılabilmesi amacıyla, Amerikan Elektrik Güç Servis Şirketi (AEPSC)'nin bir parçası olarak 30 baradan oluşan bir test sistemi temel alınmış, ilk olarak 1961 yılında oluşturulmuş ve uzun zamandır farklı algoritmalarda test verisi olarak kullanılmaktadır [9]. Bu sistem, IEEE 30 baralı test sistemi olarak adlandırılmaktadır. Sistemde, 1 nolu bara referans bara, 2, 5, 8, 11, 13 nolu baralar, generatör baraları olarak ve diğer baralar da yük baraları olarak alınmaktadır. 4-12, 6-9, 6-10 ve 28-27 nolu baralar arasında, transformatörler için kademe ayarlayıcı tap değerleri bulunmakta, diğer baralar için tap değeri 1 olarak alınmaktadır. Generatör baraları için maksimum ve minimum kapasite -40 ile 50 Mvar arasında değişmektedir. 10 ve 24 nolu baralarda ise, sisteme kondansatörler dolayısıyla sırasıyla 19 ve 4.3 Mvar uygulanmaktadır. Çizelge 2.1'de IEEE 30 bara güç sistemine ait generatör verileri [9], Şekil 2.1'de ise IEEE 30 baralı güç sisteminin bağlantı şeması verilmiştir. Çalışmada, IEEE 30 bara test sistemi Newton Raphson (NR) algoritmasının uygulamasında kullanılmıştır.



### 2.1.2. Termal 8 Bara Güç Sistemi

8 Baralı termal güç sistemi, Türkiye'deki en büyük termal enerji üretim birimlerinin olduğu bir güç sistemidir [12]. Batı Anadolu ve Marmara bölgelerinde bulunan ve enerji kaynağı olarak doğalgaz, fuel oil ve kömür kullanan termal santrallerden oluşmaktadır. Bu santrallerin toplam kurulu gücü 7.172 MW'dır. 8 baralı güç sistemine ait santral isimleri, yakıt çeşitleri, yakıt maliyet katsayıları ve üretilen minimum ve maksimum güç değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. 8 bara termal güç sistemi generatör verileri [12]

Gen. Nu.	Güç Santrali	Yakıt Tipi	$\alpha_i$ (\$)	$\beta_i$ (\$/MW)	$\gamma_i$ (\$/MW <sup>2</sup> )	$P_{i_{min}}$ (MW)	$P_{i_{maks}}$ (MW)
1	Hamitabat	D.gaz	6595.5	7.0663	0.0168	190	1120
2	Ambarlı	Fuel Oil	7290.6	7.2592	0.1270	245	1350
3	Dgaz	N. Gas	6780.5	5.6820	0.0106	318	1432
4	Seyitömer	Kömür	1564.4	3.1288	0.0139	150	600
5	SomaB	Kömür	5134.1	6.2232	0.0168	210	990
6	Yeniköy	Kömür	1159.5	3.3128	0.0210	110	420
7	Kemerköy	Kömür	1697.0	3.2324	0.0137	140	630
8	Yatağan	Kömür	1822.8	3.4720	0.0147	140	630

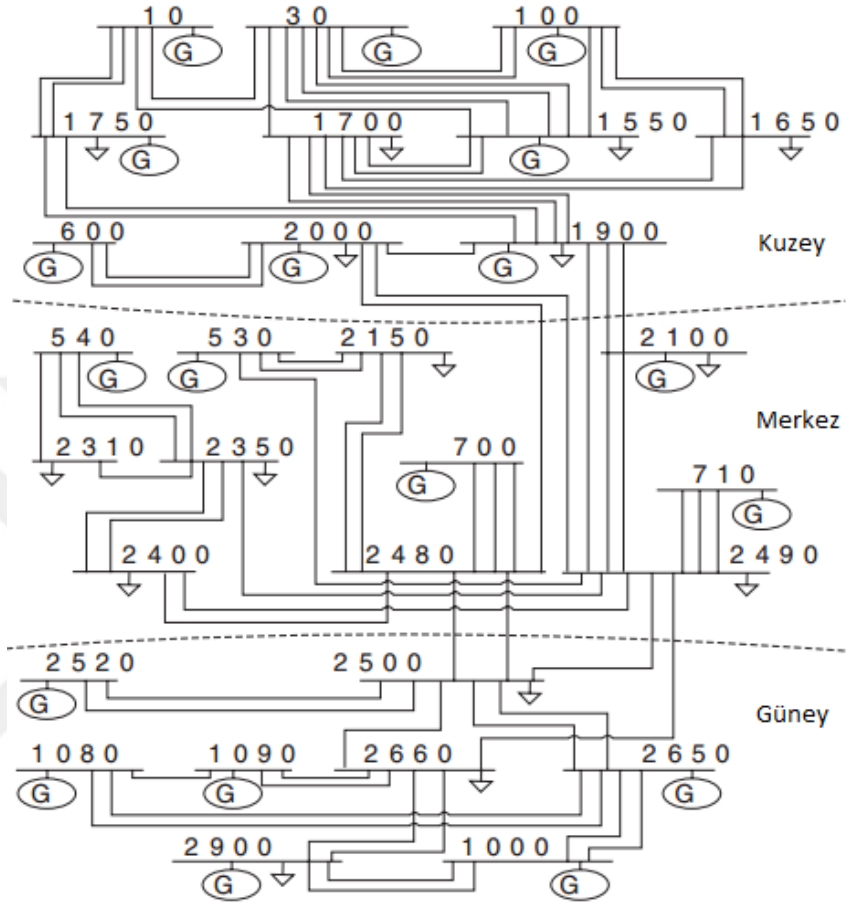
### 2.1.3. Termal 40 Bara Güç Sistemi (TTGS)

Tayvan termal güç sistemi (TTGS), Tayvan'da bulunan büyük ölçekli bir güç sistemidir [10]. Kömür, gaz, akaryakıt, dizel ve kombine çevrim güç üretim birimlerinden oluşmaktadır. Toplam kurulu güç 11.554 MW'dır. Sistem için toplam yük talebi 10.500 MW olarak alınmıştır. Sistem için generatör numaraları, termal yakıt katsayıları, minimum ve maksimum güç üretim değerleri Çizelge 2.3'de verilmiştir.

**Çizelge 2.3.** 40 Bara TTGS generatör verileri [10]

Gen. Nu.	$\alpha_i$ (\$)	$\beta_i$ (\$/MW)	$\gamma_i$ (\$/MW <sup>2</sup> )	$P_i^{min}$ (MW)	$P_i^{max}$ (MW)
1	170,44	8,336	0,03073	40	80
2	309,54	7,0706	0,02028	60	120
3	369,03	8,1817	0,00942	80	190
4	135,48	6,9467	0,08482	24	42
5	135,19	6,5595	0,09693	26	42
6	222,33	8,0543	0,01142	68	140
7	287,71	8,0323	0,00357	110	300
8	391,98	6,999	0,00492	135	300
9	455,76	6,602	0,00573	135	300
0	722,82	12,908	0,00605	130	300
11	635,2	12,986	0,00515	94	375
12	654,69	12,796	0,00569	94	375
13	913,4	12,501	0,00421	125	500
14	1760,4	8,8412	0,00752	125	500
15	1728,3	9,1575	0,00708	125	500
16	1728,3	9,1575	0,00708	125	500
17	1728,3	9,1575	0,00708	125	500
18	647,85	7,9691	0,00313	220	500
19	649,69	7,955	0,00313	220	500
20	647,83	7,9691	0,00313	242	550
21	647,81	7,9691	0,00313	242	550
22	785,96	6,6313	0,00298	254	550
23	785,96	6,6313	0,00298	254	550
24	794,53	6,6611	0,00284	254	550
25	794,53	6,6611	0,00284	254	550
26	801,32	7,1032	0,00277	254	550
27	801,32	7,1032	0,00277	254	550
28	1055,1	3,3353	0,52124	10	150
29	1055,1	3,3353	0,52124	10	150
30	1055,1	3,3353	0,52124	10	150
31	1207,8	13,052	0,25098	20	70
32	810,79	21,887	0,16766	20	70
33	1247,7	10,244	0,2635	20	70
34	1219,2	8,3707	0,30575	20	70
35	641,43	26,258	0,18362	18	60
36	1112,8	9,6956	0,32563	18	60
37	1044,4	7,1633	0,33722	20	60
38	832,24	16,339	0,23915	25	60
39	834,24	16,339	0,23915	25	60
40	1035,2	16,339	0,23915	25	60

Tüm şemanın kapsamlı olması nedeniyle, TTGS güç sisteminin 19 baralık bölümüne ait tek hat şeması Şekil 2.2’de verilmiştir [49].



Şekil 2.2. TTGS’ye ait 19 baralık tek hat şeması [49]

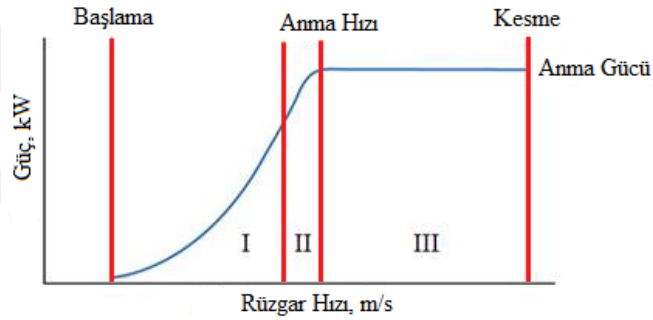
## 2.2. Geliştirilen Hibrit Güç Sistemi

Bu çalışmada, IEEE 30 bara test sisteminin ardından farklı bara sayısı ve güç üretim kapasitesine sahip termal güç sistemleri incelendikten sonra rüzgâr enerjisinin güç sistemine etkilerini araştırmak amacıyla, 8 adet termal güç üretim birimine, 2014 Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporundan alınan 11 rüzgâr santralının [50] eklenmesiyle hibrit bir rüzgâr-termal güç sistemi (RTGS) oluşturulmuştur.



Hibrit RTGS'nin geliştirilmesinde kullanılan rüzgâr santrallerinin hepsi, rüzgâr potansiyelinin en yüksek olduğu Marmara ve Ege bölgelerinde çalışmaktadır. RTGS'nin oluşturulmasında ilk olarak, rüzgâr türbinlerinin rüzgâr santralleri içerisindeki güç dağılımı ele alınmıştır. 12, 15, 16 ve 17 numaralı rüzgâr santralleri iki farklı güce sahip rüzgâr türbinlerinden oluşmaktadır. Toplam kurulu güç açısından bu türbinler, tek rüzgâr santrali olarak kabul edilmiştir. Bunun sonucunda toplam bara sayısı, RTGS için 19 olmuştur.

İkinci olarak, rüzgâr türbinlerinde yakıt maliyet katsayısı olarak kullanılan ve çıkış maksimum gücünün türbinin anma gücüne oranı şeklinde ifade edilen ve Eşitlik 1.33 ile gösterilen  $d$  kazanç katsayıları, türbin üreticilerine ait kataloglardan [51-52] ve Şekil 2.3'de verilen türbin güç eğrisi temel alınarak hesaplanmıştır.



**Şekil 2.3.** Rüzgar türbinine ait tipik bir güç eğrisi

Üçüncü olarak, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nden alınan illere göre rüzgâr haritası [22] değerleri ile, rüzgâr santrallerinin bulunduğu illere ait  $V_i$  rüzgâr hızları belirlenmiştir.

Dördüncü ve son olarak, planlanan rüzgâr gücü,  $P_{i_{max}}^{sch}$  güç değerleri, her bir rüzgâr santrali için Weibull parametrelerinden faydalanılarak elde edilen güç eğrileri kullanılarak hesaplanmış, RTGS'ye ait yakıt katsayıları, minimum ve maksimum güç üretim değerleri belirlenmiştir. 19 baralı RTGS'ye ait teknik veriler Çizelge 2.4'de verilmiştir.

**Çizelge 2.4.** 19 baralı rüzgâr-termal güç sistemi için yer ve güç üretim verisi [12], [22], [51-52].

Gen. Nu.	Güç Santrali	Yakıt Tipi	$\alpha_i$ (\$)	$\beta_i$ (\$/MW)	$\gamma_i$ (\$/MW <sup>2</sup> )	$d$	$V_i$ (m/s)	$P_{i_{min}}$ (MW)	$P_{i_{max}}$ (MW)	$p_{i_{max}}^{sch}$ (MW)
1	Hamitabat	D. Gaz	6.595,5	7,0663	0,0168	0	0	190	1.120	1.120
2	Ambarlı	Fuel Oil	7.290,6	7,2592	0,1270	0	0	245	1.350	1.350
3	Dgaz	D. Gaz	6.780,5	5,6820	0,0106	0	0	318	1.432	1.432
4	Seyitömer	Kömür	1.564,4	3,1288	0,0139	0	0	150	600	600
5	SomaB	Kömür	5.134,1	6,2232	0,0168	0	0	210	990	990
6	Yeniköy	Kömür	1.159,5	3,3128	0,0210	0	0	110	420	420
7	Kemerköy	Kömür	1.697,0	3,2324	0,0137	0	0	140	630	630
8	Yatağan	Kömür	1.822,8	3,4720	0,0147	0	0	140	630	630
9	Akres	Rüzgar	0	0	0	1	8	0	45	14,4
10	Çanta	Rüzgar	0	0	0	1	6	0	35	6,27
11	Çatalca	Rüzgar	0	0	0	1	7	0	60	10,4
12	Dares Datça	Rüzgar	0	0	0	1,012	7	0	22,4	5,04
		8*0,9 MW	0	0	0	1,011	7	0	7,2	1,248
						Toplam		0	29,6	6,288
13	Karakurt	Rüzgar	0	0	0	1	8	0	10,8	6

Çizelge 2.4. (devam)

Gen. Nu.	Güç Santrali	Yakıt Tipi	$\alpha_i$ (\$)	$\beta_i$ (\$/MW)	$\gamma_i$ (\$/MW <sup>2</sup> )	$d$	$V_i$ (m/s)	$P_{i_{min}}$ (MW)	$P_{i_{max}}$ (MW)	$P_{i_{max}}^{sch}$ (MW)
14	K.Burgaz	Rüzgar	0	0	0	1,025	7	0	24	6,384
15	Kuyucak	Rüzgar 2MW	0	0	0	1,025	8	0	24	9,78
		0,9MW	0	0	0	1,012	8	0	1.8	0,476
						Toplam		0	25,8	10,256
16	Sayalar	Rüzgar 0,9MW	0	0	0	1,011	8	0	34.2	9,044
		2MW	0	0	0	1,025	8	0	20	8,150
						Toplam		0	54,2	17,194
17	Soma	Rüzgar 0,9MW	0	0	0	1,011	8	0	80.1	21,182
		2MW	0	0	0	1	8	0	160	65,2
						Toplam		0	240,1	86,382
18	Sünjüt	Rüzgar	0	0	0	1	7	0	1,2	0,2716
19	Tepe	Rüzgar	0	0	0	1	7	0	0,85	0,225
MW olarak Toplam Güç								1.503	7.689	7.336

## 2.3. Çalışmalarda Kullanılan Geleneksel ve Modern Optimizasyon Algoritmaları

### 2.3.1. Geleneksel Optimizasyon Algoritmaları

#### 2.3.1.1. Gauss-Seidel Algoritması (GS)

Gauss-Eliminasyon ya da GS algoritması, güç akış analizinde kullanılan en temel algoritmadır. Bu metotta, istenilen doğruluk için çok fazla iterasyon gerekmektedir olup, algoritmanın yakınsama garantisi de yoktur. Sistem verilerinin sayısı arttıkça, GS metodu yakınsayamamakta ve hassas sonuç vermemektedir. 8-10 bara gibi az sayıda bara ve onlara ait veriden oluşan sistemlerde, hızlı ve işlem basitliği olan bir algoritma olarak tercih edilmektedir.

Güç akış analizinde, Eşitlik 1.16'da gösterilen lineer olmayan denklem kümesini, her bir düğümdeki iki bilinmeyen değişkeni bulmak için çözmek gerekmektedir. Gauss-Seidel metodunda,  $V_i$  değerini bulmak Eşitlik 1.16 çözülür ve iteratif dizi olarak Eşitlik 2.1 elde edilir [18].

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} + \sum y_{ij}V_j^{(k)}}{\sum y_{ij}} \quad j \neq i \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'de,  $y_{ij}$  gerçek admitansı,  $P_i^{sch}$  ve  $Q_i^{sch}$  ise sırasıyla net aktif ve reaktif güçleri birim (per unit) cinsinden ifade etmektedir. Kirchoff akımlar kanuna göre,  $i$ . baraya giren akım pozitif olarak kabul edilir. Dolayısıyla, generatör baraları gibi baraya gerçek ve reaktif güçlerin girdiği baralarda  $P_i^{sch}$  ve  $Q_i^{sch}$ , pozitif değerlere sahip olur. Gerçek ve reaktif güçlerin baradan çıktığı yük baralarında ise  $P_i^{sch}$  ve  $Q_i^{sch}$ , negatif değerlere sahip olur. Eşitlik 1.16,  $P_i$  ve  $Q_i$  değerlerini bulmak için çözüldüğünde, Eşitlik 2.2 ve Eşitlik 2.3 elde edilir [18].

$$P_i^{(k+1)} = \Re \left\{ V_i^{*(k)} \left[ V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad (2.2)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im \left\{ V_i^{*(k)} \left[ V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad (2.3)$$

Güç akışı eşitliği, genelde bara admitans matrisi elemanları cinsinden ifade edilir.  $Y_{bus}$  bara admitans matrisinin köşegen olmayan elemanları  $Y_{ij} = -y_{ij}$ , köşegen olan elemanları ise  $Y_{ij} = \sum y_{ij}$  olacağından, Eşitlik 2.1, Eşitlik 2.4 olarak ifade edilir [18].

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} + \sum_{j \neq i} Y_{ij} V_j^{(k)}}{Y_{ii}} \quad j \neq i \quad (2.4)$$

Aktif ve reaktif güçler ise sırasıyla Eşitlik 2.5 ve Eşitlik 2.6'da ifade edilir [18].

$$P_i^{(k+1)} = \Re \left\{ V_i^{*(k)} \left[ V_i^{(k)} Y_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad (2.5)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im \left\{ V_i^{*(k)} \left[ V_i^{(k)} Y_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad (2.6)$$

GS algoritmasına ait sözde kod dizilimi (pseudo-code) EK 1'de verilmiştir.

### 2.3.1.2. Newton-Raphson Algoritması (NR)

Geleneksel algoritmalar içerisinde, lineer olmayan denklemlerin çözümünde en çok kullanılan güç akış analiz algoritması, Newton-Raphson (NR) algoritmasıdır. NR metodu, Taylor serisi kullanarak ve bilinmeyenler için başlangıç değeri kullanarak başarılı bir yaklaşım prosedürü geliştirmiştir.

NR metodu, GS'ye göre büyük güç sistemlerinde daha pratik ve verimli sonuçlar vermektedir. Çözüme ulaşmak için gereken iterasyon sayısı, sistemin büyüklüğünden bağımsızdır. Fakat her bir iterasyonda daha fazla işlem gerekmektedir. Güç sistemi probleminde generatör baraları için aktif güç ve bara gerilim genliği belirtildiğinden, güç akışı eşitliği kutupsal formda formüle edilmiştir.

Eşitlik 1.13'de verilen  $i$ . baraya giren akım formülü, bara admitans matrisi cinsinden Eşitlik 2.7'deki gibi yeniden yazılabilir [18].

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7'de j, i. barayı içermektedir. Bu eşitliği kutupsal formda yazacak olursak Eşitlik 2.8 elde edilir [18].

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \Theta_{ij} + \delta_j \quad (2.8)$$

i. baradaki kompleks güç formülü Eşitlik 2.9'da gösterilmektedir [18].

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.8, Eşitlik 2.9'de yerine konulduğunda Eşitlik 2.10 elde edilir [18].

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \Theta_{ij} + \delta_j \quad (2.10)$$

Gerçek ve sanal kısımlar ayrılarak, sırasıyla Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.12 elde edilir [18].

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\Theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.11)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\Theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.12, gerilim genliği ve faz açısı olmak üzere bağımsız değişkenlerden oluşan, lineer olmayan cebirsel denklemler içermektedir. Bu eşitlikleri ilk tahmini değer etrafında Taylor serisi ile genişletir ve yüksek dereceli terimleri ihmal edersek, Eşitlik 2.13'de elde edilir [18].

$$(2.13) \quad \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & | & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$

Eşitlik 2.13'de bara 1, salınım barası yani referans bara olarak kabul edilir. Jacobian matrisi, gerilim açısı küçük değişikliği  $\Delta \delta_i^{(k)}$  ve gerilim genliği küçük değişikliği  $\Delta |V_i^{(k)}|$  arasında, aktif güç küçük değişikliği  $\Delta P_i^{(k)}$  ve reaktif güç küçük değişikliği  $\Delta Q_i^{(k)}$  ile doğrusallaştırılmış ilişkiyi verir. Jacobian matrisinin elemanları,  $\Delta \delta_i^{(k)}$  ve

$\Delta|V_i^{(k)}|$  üzerinde değerlendirilen, Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.12'nin kısmi türevlerinden oluşmaktadır. Kısa formda Eşitlik 2.14'deki gibi yazılır [18].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |v| \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Generatör baralarında gerilim genlikleri bilinmektedir. Bu yüzden, n baralı bir sistemde m tane generatör barası varsa,  $\Delta P$  ve  $\Delta Q$  içeren m tane eşitlik ve Jacobian matrisinin karşılık gelen sütunları çıkarılır. Buna göre, n-1 tane gerçek güç sınırlamaları, n-1-m tane reaktif güç sınırlamaları olur. Jacobian matrisi  $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$  boyutunda,  $J_1$   $(n-1) \times (n-1)$  boyutunda,  $J_2$   $(n-1) \times (n-1-m)$  boyutunda,  $J_3$   $(n-1-m) \times (n-1)$  boyutunda,  $J_4$  ise  $(n-1-m) \times (n-1-m)$  boyutunda olur [18].

$J_1$ 'in köşegen ve köşegen olmayan elemanları Eşitlik 2.15 ve Eşitlik 2.16'da gösterilmektedir [18].

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\Theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\Theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.16)$$

$J_2$ 'nin köşegen ve köşegen olmayan elemanları Eşitlik 2.17 ve Eşitlik 2.18'de gösterilmektedir [18].

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \Theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\Theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\Theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.18)$$

$J_3$ 'ün köşegen ve köşegen olmayan elemanları Eşitlik 2.19 ve Eşitlik 2.20'da gösterilmektedir [18].

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\Theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\Theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.20)$$

$J_4$ 'ün köşegen ve köşegen olmayan elemanları Eşitlik 2.21 ve Eşitlik 2.22'de gösterilmektedir [18].

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.22)$$

$\Delta P_i^{(k)}$  ve  $\Delta Q_i^{(k)}$  terimleri, planlanan ve hesaplanan değerler arasındaki farklardır ve güç kalanları olarak bilinir [18]. Eşitlik 2.23 ve Eşitlik 2.24'de formülleri gösterilmektedir [18].

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.23)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.24)$$

Bara gerilimleri için yeni değerler ise Eşitlik 2.25 ve Eşitlik 2.26'da gösterildiği gibi bulunur [18].

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.25)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.26)$$

NR algoritmasına ait sözde kod dizilimi (pseudo-code) EK 2'de verilmiştir.

### 2.3.1.3. Hızlı Çözümlemeli Güç Akış Algoritması

Güç sistemi iletim hatları çok yüksek bir  $X/R$  oranına sahiptir. Bu nedenle, aktif güç değişimi,  $\Delta P$ , voltaj değerindeki değişimlere hassastır. Ancak, faz açısındaki  $\Delta \delta$  değişimlere ise daha fazla hassastır. Benzer şekilde reaktif güç, açıdaki değişimlere daha az hassas iken, gerilimdeki değişimlerden ise fazlaca etkilenir. Bu nedenle, Her iterasyonda 0 olan bileşenlerin tekrardan hesaplanmasına gerek olmadığından, işlem daha basit hale gelmiş olur. Bu çözüm Stott ve Alsac tarafından geliştirilmiştir [34]. Bu şekilde NR yöntemine göre daha hızlı ve matematiksel olarak basitleştirilmiş bir çözüm elde edilmektedir. Hızlı çözümlemeli güç akış algoritmasına ait eşitlikler aşağıda verilmiştir.



Jacobian matrisindeki  $J_2$  ve  $J_3$  elemanları sıfır olarak alınır ve Eşitlik 2.14, Eşitlik 2.27 olarak elde edilir [18].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |v| \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\Delta P = J_1 \Delta \delta = \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \Delta \delta \quad (2.28)$$

$$\Delta Q = J_4 \Delta |V| = \left[ \frac{\partial Q}{\partial |V|} \right] \Delta |V| \quad (2.29)$$

Matris eşitliği, Eşitlik 2.28 ve Eşitlik 2.29'de görüldüğü gibi iki ayrışık eşitliğe ayrılmıştır. Böylece, Eşitlik 2.14'ü çözmek için daha az zamana gerek duyulduğunu gösterir. Her bir iterasyonda  $J_1$  ve  $J_4$  elemanlarını yeniden hesaplama gereği ortadan kaldırılarak önemli bir basitleştirme yapılmaktadır. Eşitlik 2.15'de belirtilen  $J_1$ 'in köşegen olan elemanları Eşitlik 2.30'daki gibi yeniden yazılabilir [18].

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) - |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} \quad (2.30)$$

Eşitlik 2.30'un ilk terimini Eşitlik 2.12'de verildiği üzere  $-Q_i$  ile değiştirdiğimizde Eşitlik 2.31 elde edilir [18].

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} = -Q_i |V_i|^2 B_{ii} \quad (2.31)$$

Eşitlik 2.31'de  $B_{ii} = |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$ 'dir ve bara admitans matrisinin köşegen olan elemanlarının sanal kısmını ifade eder.  $B_{ii} \gg Q_i$  olduğundan  $Q_i$  ihmal edilebilir.  $|V_i|^2 \approx |V_i|$  olarak alındığında, Eşitlik 2.31, Eşitlik 2.32 olarak elde edilir [18].

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| B_{ii} \quad (2.32)$$

Normal olarak  $\delta_j - \delta_i$  değeri çok küçüktür. Bu yüzden Eşitlik 2.19'da  $\theta_{ii} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ii}$  olarak ve  $|V_j| \approx 1$  olarak alınırsa  $J_1$ 'in köşegen olmayan elemanları Eşitlik 2.33'de gösterildiği gibi olur [18].

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| B_{ij} \quad (2.33)$$

Aynı işlemler yapılırsa, Eşitlik 2.21'de belirtilen  $J_4$ 'ün köşegen olan elemanları Eşitlik 2.34'de gösterildiği gibi hesaplanır [18].

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| B_{ii} \quad (2.34)$$

Eşitlik 2.22'de belirtilen  $J_4$ 'ün köşegen olmayan elemanları ise Eşitlik 2.35'de gösterildiği gibi hesaplanır [18].

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| B_{ij} \quad (2.35)$$

Bu işlemlerle beraber, Eşitlik 2.28 ve Eşitlik 2.29, Eşitlik 2.36 ve Eşitlik 2.37'deki gibi oluşur [18].

$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = -B' \Delta \delta \quad (2.36)$$

$$\frac{\Delta Q}{|V_i|} = -B'' |V| \quad (2.37)$$

$B'$  ve  $B''$ , bara admitans matrisinin sanal kısımları olup, gerilim genliği ve faz açısı değişimleri Eşitlik 2.38 ve Eşitlik 2.39'da verilmektedir [18].

$$\Delta \delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V|} \quad (2.38)$$

$$\Delta |V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V|} \quad (2.39)$$

Hızlı ayrışık güç akışında NR metoduna göre iterasyon sayısı fazla ancak her iterasyonda daha az zaman gerektiğinden güç akış çözümü daha hızlıdır [18]. Hızlı güç akış algoritmasına ait sözde kod dizilimi (pseudo-code) EK 3'de verilmiştir.

### 2.3.2. Modern Optimizasyon Algoritmaları

Bu kısımda, tez çalışması kapsamında çeşitli güç sistemlerinde kullanılan; Eşit Gömülü Algoritma (EGA), Fark Gelişim Algoritması (FGA), Genetik Algoritma (GA), Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (ÖÖTO) algoritması hakkında bilgi ve matematiksel eşitlikler verilmektedir.

### 2.3.2.1. Eşit Gömülü Algoritma (EGA)

Eşit Gömülü Algoritma, Chandram, Subrahmanyam ve Sydulu [53] tarafından 2007 yılında geliştirilmiş bir algoritmadır. EGA’da, öncelikle optimum çözüm değerine yaklaşan üç ayrı kök olası çözüm olarak kabul edilir. Ardından bu kök değerlerden interpolasyon katsayıları adı verilen A, B katsayıları hesaplanır. A ve B katsayıları tüm generatörler için farklı yük talepleri altında, minimum ve maksimum değerler arasında değişen  $\lambda$  değerleri olarak hesaplanarak kaydedilir.

Seçilen güç talebi için, tüm değerler arasında lambdanın bir değeri optimum çözümü sağlamak için seçilmektedir.

Tüm lambda değerleri optimum bir değere gömülmektedir. Bundan dolayı, tasarlanan algoritma ‘Eşit Gömülü Algoritma’ olarak adlandırılmaktadır [53].

EGA, Muller yöntemi olarak da bilinir ve iteratif bir yöntemdir [54]. Bu yöntemde, belirlenen üç ayrı kök, lineer olmayan amaç fonksiyonu için fonksiyon değerinin yaklaşık olarak 0’a eşit olduğu kabul edilerek iteratif olarak çözülür [55].  $x_{i-2}$ ,  $x_{i-1}$ ,  $x_i$  değerleri  $f(x)=0$  amaç fonksiyonunun optimum çözüm noktasına ulaşmak için kabul edilen üç değerdir ve  $y_{i-2}$ ,  $y_{i-1}$  ve  $y_i$  ise,  $y = f(x)$ ’in ilgili değerleridir [55].

y ve x arasındaki ilişki Eşitlik 2.40 ile verilir,

$$y = A. (x - x_i)^2 + B. (x - x_i) + y_i \quad (2.40)$$

Burada A ve B interpolasyon katsayılarıdır ve Eşitlik 2.41 ve Eşitlik 2.42’deki, bir sonraki kök çözümü Eşitlik 2.43’deki gibi hesaplanır [55].

$$A = \frac{(x_{i-2}-x_{i-1}).(y_{i-1}-y_i)-(x_{i-1}-x_i).(y_{i-2}-y_i)}{(x_{i-1}-x_{i-2}).(x_{i-1}-x_i).(x_{i-2}-x_i)} \quad (2.41)$$

$$B = \frac{(x_{i-2}-x_i)^2.(y_{i-1}-y_i)-(x_{i-1}-x_i)^2.(y_{i-2}-y_i)}{(x_{i-1}-x_{i-2}).(x_{i-1}-x_i).(x_{i-2}-x_i)} \quad (2.42)$$

$$x_{i-1}^{(1)} = x_{i-1}^{(0)} - \frac{2y_i}{B \pm \sqrt{B^2 - 4Ay_i}} \quad (2.43)$$

Algoritma, uygun lambda değerlerini seçerek başlar ve önceden hazırlanan güç talebi (PPD), Modifiye güç talebi (MPPD) ve azaltılmış önceden hazırlanmış güç talebi çizelgeleri (RMPPD) düzenlenir [55].

Uygun lambda değerleri Eşitlik 2.44'de gösterildiği gibi seçilir.

$$\lambda_i = \frac{b_i + 2c_i P_i}{1 - 2 \sum_{j=1}^{n_g} B_{ij} P_j + B_{i0}} \quad (2.44)$$

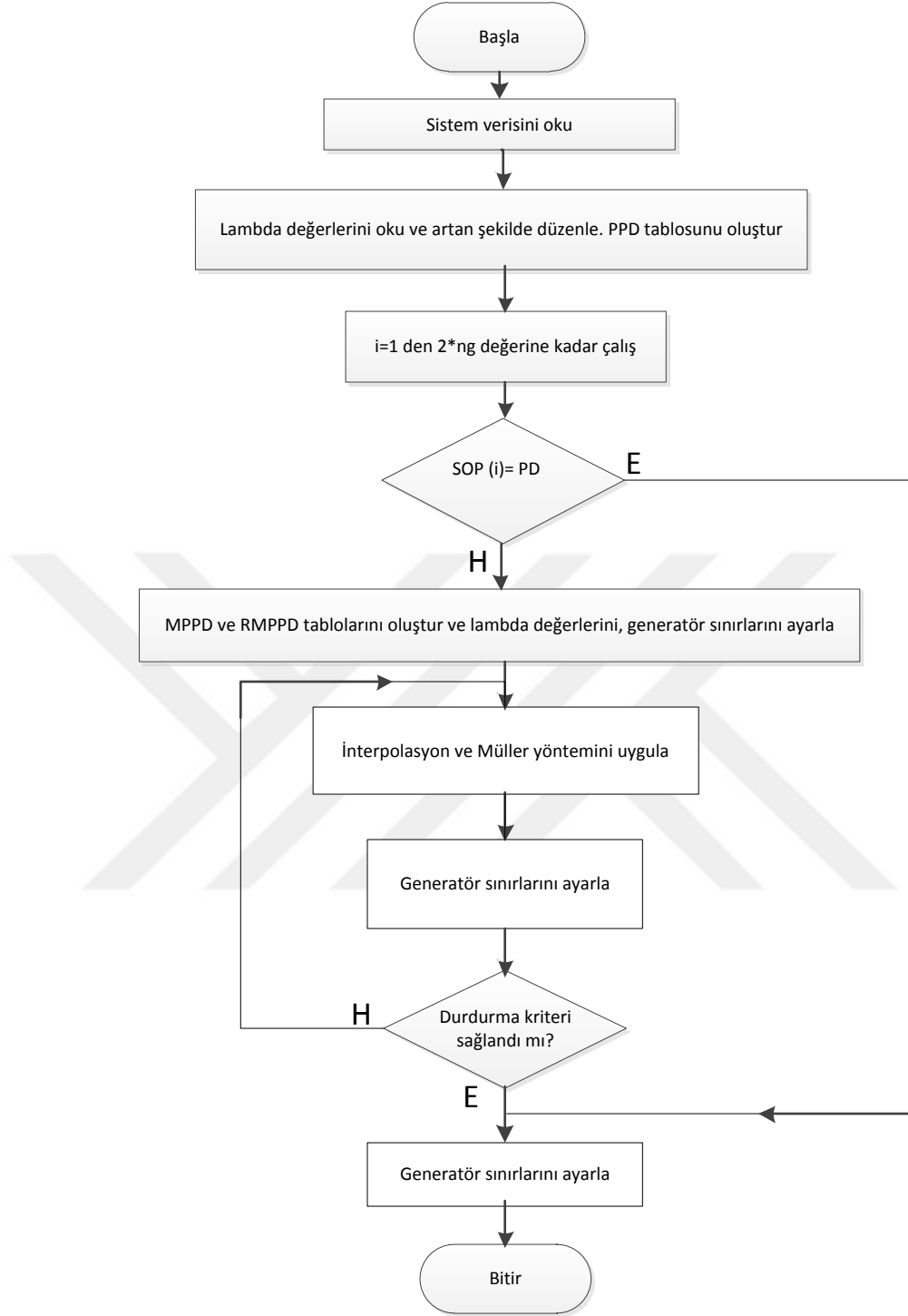
Burada  $P_i = P_i^{min}$  de  $\lambda_i = \lambda_i^{min}$  dir ve  $P_i = P_i^{max}$  de  $\lambda_i = \lambda_i^{max}$  dir.

Tüm lambda değerleri, çıkış güçleri, iletim kayıpları, çıkış gücü toplamı, iletim kaybı önceden hazırlanan güç talebi çizelgesinde hesaplanmaktadır [55]. EGA'ya ait akış diyagramı Şekil 2.4'de, sözde kod dizilimi (pseudo-code) ise EK 4'de verilmiştir.

### 2.3.2.2. Fark Gelişim Algoritması (FGA)

Fark gelişim algoritması 1994-1996 yılları boyunca Storn ve Price tarafından geliştirilmiştir [56]. Algoritma güç akışına ilk kez Abou El Ela AA ve arkadaşları tarafından uygulanmıştır [37]. FGA, doğal gelişim temelli bir algoritmadır ve optimal çözüme ulaşmak için  $N_p$  bireylerini kullanır [56].

İlk aşamada,  $X_i$  karar değişkenleri cevabı oluşturulur. Sonra  $N_p$  setleri seçilir ve her bir cevabın amaç fonksiyonu hesaplanır [56].



**Şekil 2.4.** EGA akış diyagramı [55]

Mutasyon aşamasında ise,  $N_p$  setlerinin tanjant vektörleri ile Eşitlik 2.45 kullanılarak, mutasyon gerçekleştirilir [56].

$$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad (2.45)$$

Burada  $X_{i,G}$  değişkenler,  $V_{i,G+1}$  mutasyon,  $F$ , ağırlıklandırma faktörüdür [56].

Çaprazlama aşamasında, Eşitlik 2.46 ve Eşitlik 2.47 hesaplanmaktadır [56],

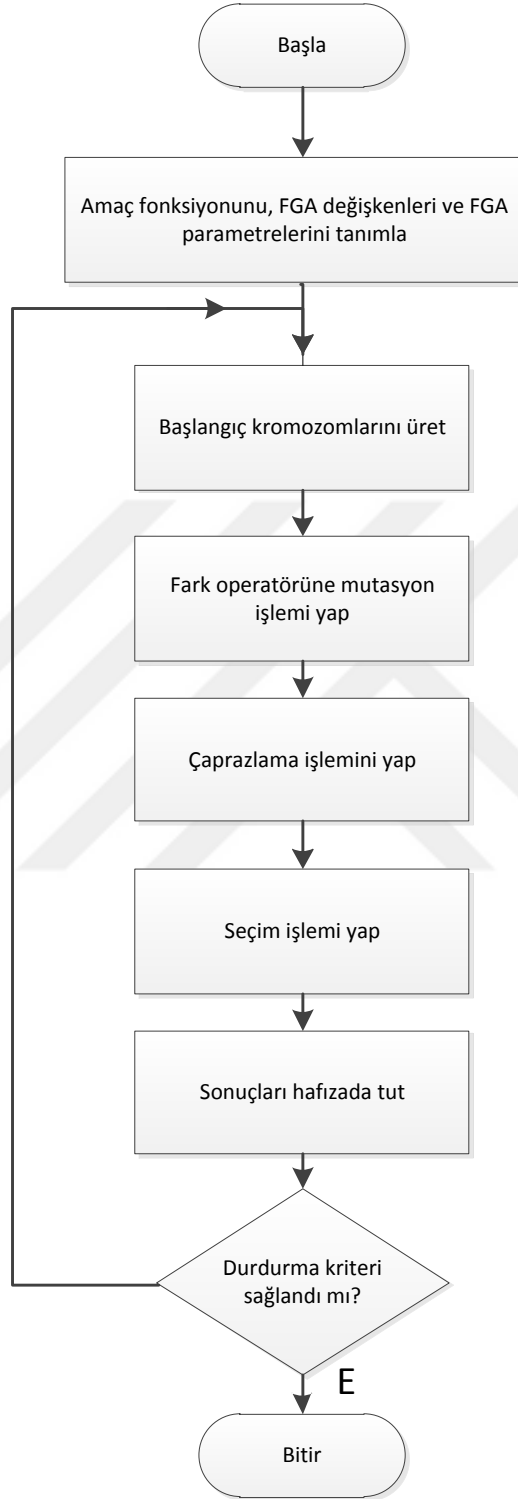
$$U_{ji,G+1} = (U_{1i,G+1}, U_{2i,G+1}, U_{3i,G+1}, \dots, U_{Di,G+1}) \quad (2.46)$$

$$U_{ji,G+1} = \begin{cases} V_{ji,G+1} & \text{if } (randb(j) \leq CR \text{ or } j = rnbr(i)) \\ X_{ji,G} & \text{if } (randb(j) > CR \text{ or } j \neq rnbr(i)) \end{cases} \quad (2.47)$$

Burada,  $U_{ji,G+1}$  deneme vektörü,  $X_{ji,G+1}$  mutant vektörü,  $V_{ji,G}$  hedef vektörü,  $randb(j)$  0 ve 1 arasındaki olasılık vektörü, CR çaprazlama sabiti,  $rnbr(i)$  0-(D-1) arasında rastgele tamsayı değeri indeksidir. Seçim aşamasında, amaç fonksiyonu değerleri deneme vektörü ve hedef vektöründen seçilirler ve bu değerler daha iyi çözüm noktalarına ulaşır [56]. FGA'nın GA'dan temel farkı, mutasyon vektörü üzerindeki yapılan vektör ve ağırlıklandırma işlemleridir. FGA'ya ait akış diyagramı Şekil 2.5'de, sözde kod dizilimi (pseudo-code) ise EK 5'de verilmiştir.

### 2.3.2.3. Genetik Algoritma (GA)

Genetik algoritma, çözüm uzayında özellikle global minimum noktalarını tespit etmekte verimli, evrimsel ve etkili bir algoritmadır. İlk olarak Holland tarafından 1970'lerin başlarında geliştirilmiştir [57]. GA, hızlı ve güçlü bir yenilenebilir kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, GA, evrimsel algoritmaların genel bir özelliği olarak [58-59] muhtemel çözümleri global minimum bölgesinde aramaktadır. Dolayısıyla, optimum çözüm bölgelerini hızla bulmasına karşın bazı yakınsama sorunları olmaktadır.



Şekil 2.5. FGA akış diyagramı [37]

GA'daki temel fikir, doğal seçim ve doğal genetik değişimden ortaya çıkan operatörleri kullanarak verilen bir problem için aday çözüm popülasyonunu geliştirmektir [60]. Tanımlanmış bir problem için, aday çözümlerin bir bitlik gösteriminde, basit bir GA işleyişi şu şekildedir:

**Adım 1.** Kromozomların rastgele üretilmiş popülasyonu ile başla (problem aday çözümler).

**Adım 2.** Popülasyondaki her bir  $x$  kromozomunun fitness  $f(x)$  değerini hesapla.

**Adım 3.**  $n$  adet çocuk kromozom üretilene kadar aşağıdaki adımları tekrar et.

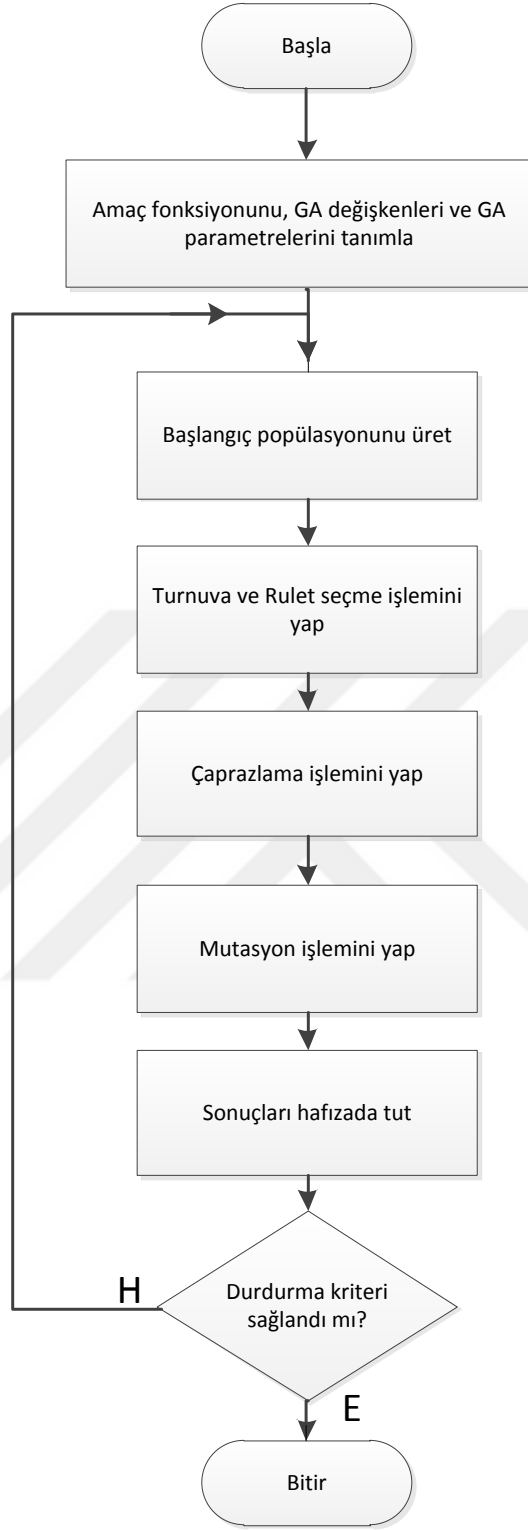
- a. Mevcut popülasyondan artan uygunluk fonksiyonu ihtimaline göre bir çift ebeveyn kromozom seç. Yer değiştirme ile seçim işlemi yap.
- b.  $p_c$  (çaprazlama olasılığı ya da çaprazlama oranı) olasılığı ile rastgele seçilen noktada iki nesil oluşturmak için çiftleri çaprazla. Eğer hiçbir çaprazlama meydana gelmiyorsa, ilgili ebeveynlerle aynı olacak şekilde iki nesil oluştur.
- c.  $p_m$  olasılığı (mutasyon olasılığı ya da mutasyon oranı) ile her bir yerde iki nesli değiştir (mutasyona uğrat) ve yeni popülasyonda oluşan kromozomları yerleştir.

**Adım 4.** Yeni popülasyon ile mevcut popülasyonu yer değiştir.

**Adım 5.** Adım 2'ye git [60].

GA'ya ait akış diyagramı Şekil 2.6'da, sözde kod dizilimi (pseudo-code) ise EK 6'nın GA kısmında verilmiştir.





Şekil 2.6. GA akış diyagramı [60]

### 2.3.2.4. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) Algoritması

ÖÖTO algoritması, birçok optimizasyon algoritmasına göre, yeni bir optimizasyon tekniğidir ve 2011-2012 yıllarında Rao ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [61-62].

ÖÖTO algoritması, literatürde, sınırlı ve sınırsız, lineer olmayan yapıdaki optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan bir sezgisel algoritma tekniğidir. Çok sayıda kullanım alanı olmasına karşın bunlardan bazıları düz yüzeyli solar ısıtıcılar [63], makina elemanlarının optimum toleransları [64], çelik yapılar ve çelik imalatı [65] olarak sayılabilir.

ÖÖTO algoritması, bir sınıftaki öğrenci ve öğretmenler arasındaki etkileşime dayanan sosyal tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır. Algoritmanın her adımında, başarılı öğrenciler ve en iyi öğrenciler tespit edilir [62].

Algoritma, öğrenci sayısı, sınıf sayısı ve iterasyon sayısı olmak üzere üç parametre ve öğretmen ve öğrenci aşaması olmak üzere iki aşamaya sahiptir. Öğretmen aşamasında, öğrenciler öğretmeni taklit ederek öğrenirler. Öğretmen, en bilgili kişidir. Bu nedenle, en iyi öğrenci ancak öğretmen kadar öğrenebilir [62].

Öğretmen ve öğrencinin öğrenme kapasitesi arasında, fark ortalaması denilen, bir ortalama fark değeri vardır ve Eşitlik 2.48 ile verilir.

$$Fark\_Ortalaması_{j,i} = r_i(X_{j,k,eniye,i} - T_f M_{j,i}) \quad (2.48)$$

Burada,  $r_i$ , 0 ve 1 arasında rastgele sayı,  $X_{j,k,eniye,i}$ , öğretmenin sonucu (en iyi sonuç) ve  $T_f$ , 1 ile 2 arasında olan öğretim faktörüdür [62].

$T_f$ , Eşitlik 2.49'deki gibi tanımlanır,

$$T_f = round[1 + rand(0,1) \{1,2\}] \quad (2.49)$$

Eğer fark ortalaması var olan sonuçtan daha iyi ise yukarıdaki Eşitlik 2.49, Eşitlik 2.50 şeklinde düzenlenir. En iyi fonksiyon sonucu Eşitlik 2.52 olarak elde edilir. Burada,  $X'_{j,k,i}$ , kabul edilen en iyi fonksiyon sonucudur.

Öğretmen aşamasından sonra, tüm en iyi fonksiyon değerleri, öğrenci aşamasında kullanılmak üzere kaydedilir. Bu aşamada, öğrenciler bilgiyi birbirleri ile etkileşime girerek ve tartışarak öğrenirler. Eğer bir öğrenci daha bilgili ise, diğeri kendisini etkileşim yolu ile günceller [62].

P ve Q aşağıdaki Eşitlik 2.50 ile verilen rastgele öğrencilerdir.

$$X'_{total-P,i} \neq X'_{total-Q,i} \quad (2.50)$$

Burada,  $X'_{total-P,i}$  ve  $X'_{total-Q,i}$ ,  $X_{total-P,i}$  ve  $X_{total-Q,i}$ 'nin güncellenmiş değerleridir.

Eğer  $X'_{total-P,i} > X'_{total-Q,i}$  ise  $X''_{j,P,i}$  Eşitlik 2.51'deki gibi elde edilir [62].

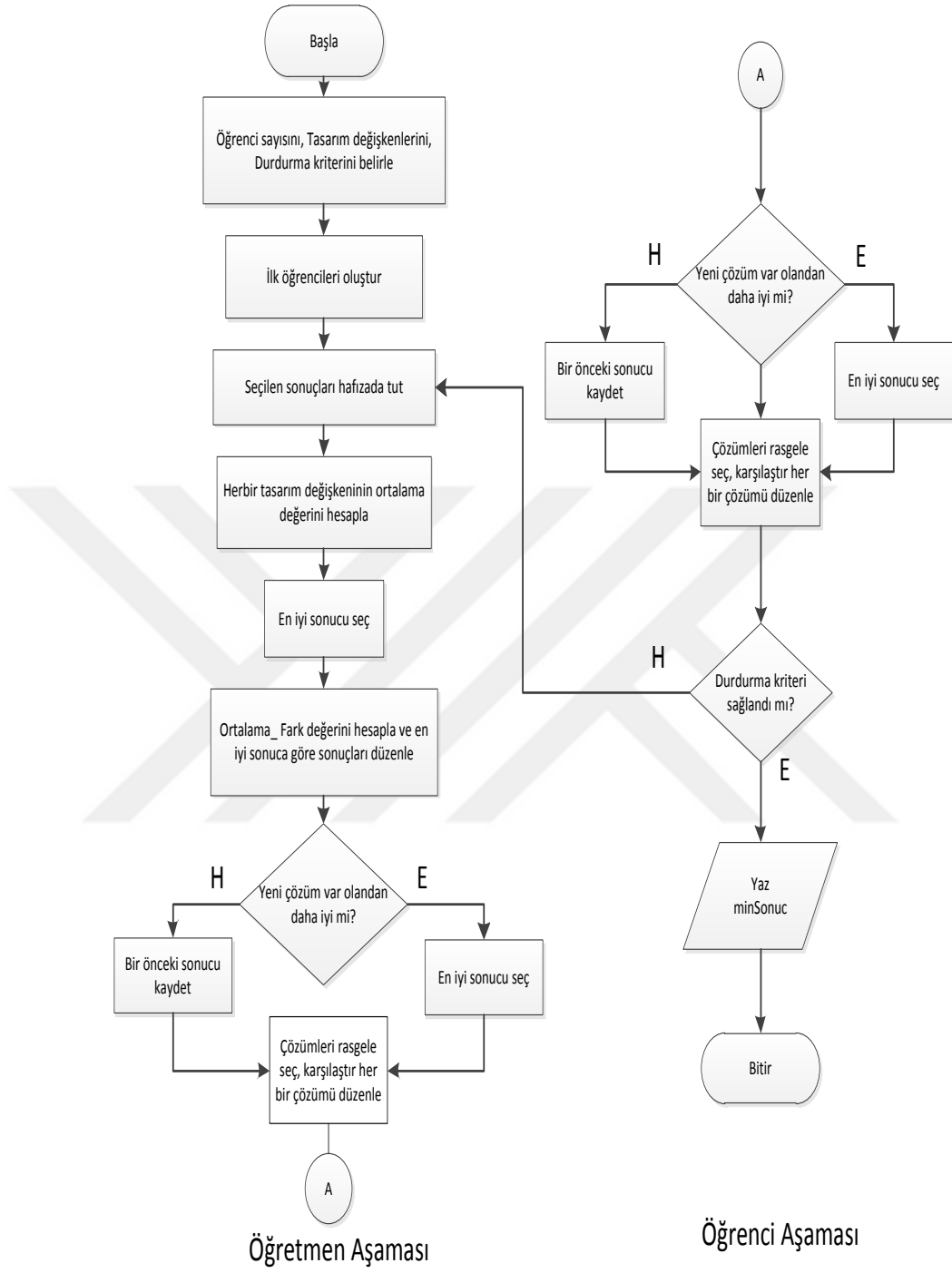
$$X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i(X'_{j,P,i} - X'_{j,Q,i}) \quad (2.51)$$

ve eğer  $X'_{total-Q,i} > X'_{total-P,i}$  ise  $X''_{j,P,i}$  Eşitlik 2.52'deki gibi elde edilmektedir.

$$X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i(X'_{j,Q,i} - X'_{j,P,i}) \quad (2.52)$$

Burada,  $X''_{j,P,i}$ , en iyi fonksiyon değeri olarak kabul edilir [62].

ÖÖTO algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 2.7'de, sözde kod dizilimi (pseudo-code) ise EK 6'nın ÖÖTO algoritması kısmında verilmiştir.



Şekil 2.7. ÖÖTO algoritması akış diyagramı [62]

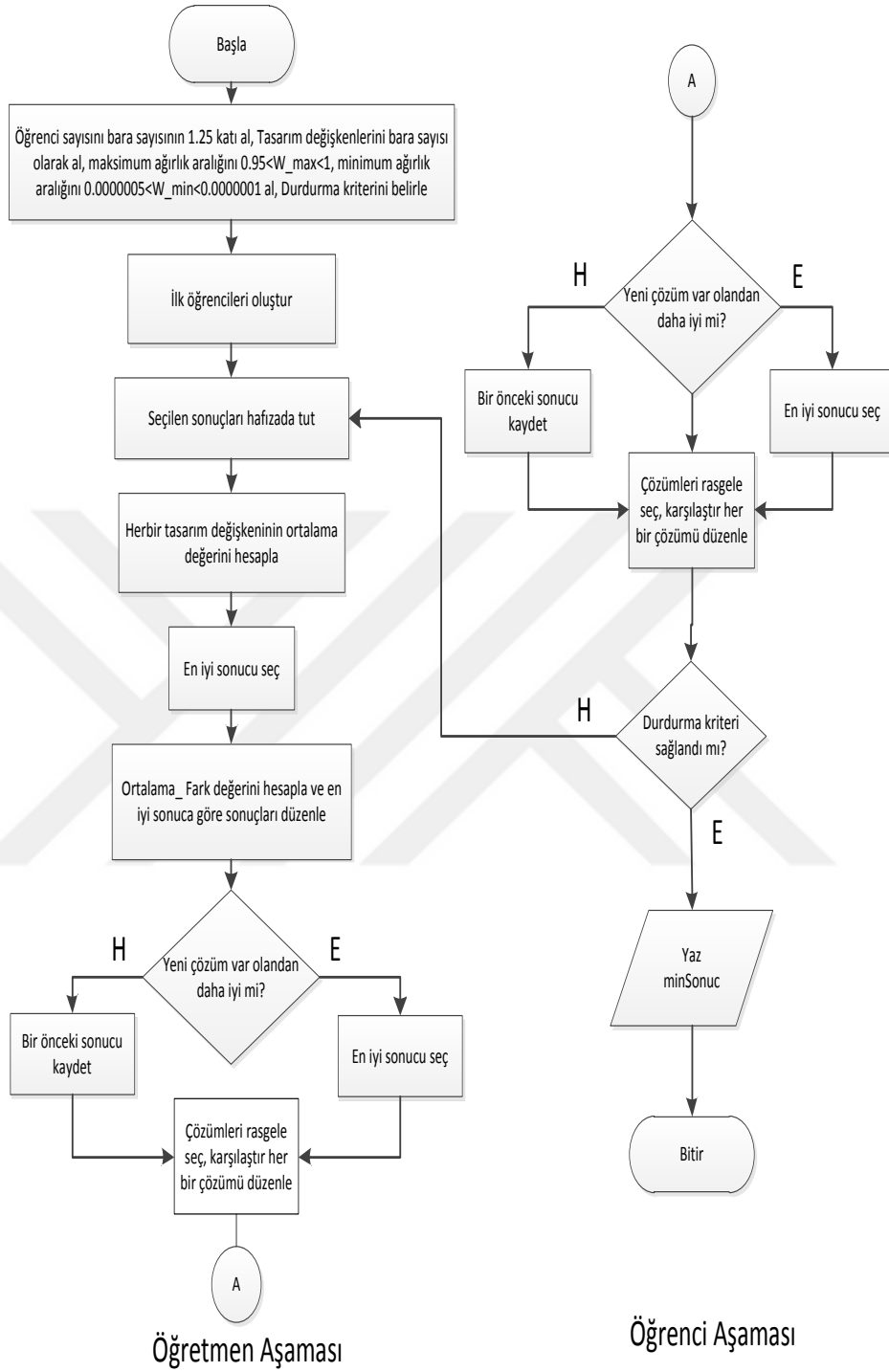
## 2.4. Geliştirilen Optimizasyon Algoritmaları

Bu kısımda, tez çalışması kapsamında geliştirilen ve literatürde güç sistemleri üzerine ilk defa uygulanan modifiye ÖÖTO ve hibrit yapılı G- ÖÖTO algoritmaları ile ilgili bilgi ve matematik eşitlikleri verilmektedir.

### 2.4.1. Modifiye ÖÖTO Algoritması (M-ÖÖTO)

Bu tezde, geleneksel ÖÖTO algoritmasının yakıt maliyet ve iterasyon sayısını azaltmak amacıyla, maksimum ve minimum ağırlık değerlerinin, öğrenci sayısının, iterasyon sayısının elektrik güç sistemi yapısına göre yeniden düzenlendiği bir ÖÖTO algoritması oluşturularak 'Modifiye ÖÖTO (M-ÖÖTO)' algoritması adı verilmiştir. Tasarlanan algoritma, termal 40 bara güç sistemine (TTGS) uygulanmış ve yakıt maliyeti ve iterasyon sayısı açısından literatürdeki EGA ve FGA yöntemlerine göre daha iyi yakıt maliyeti sonuçları elde edilmiştir.

Geleneksel ÖÖTO algoritması, öğretmen ve öğrenci seçimini rasgele yapmakta ve iterasyonlar ilerledikçe bulduğu yakıt maliyeti sonucuna göre öğretmen ve öğrenci değerlerini ağırlık katsayılarını kullanarak değiştirmektedir. M-ÖÖTO algoritmasında, geleneksel ÖÖTO algoritmasının en iyi optimizasyon sonuçlarına, daha az iterasyonla ve daha iyi değerlerde ulaşması için, ağırlıkların en başta tespit edildiği bir yöntem oluşturulmuştur. Diğer yandan, geleneksel ÖÖTO algoritmasında öğrenci sayısı önemli bir değişkendir ve az ya da çok olması durumunda algoritma çalışma zamanı bu değerden etkilenmektedir. Öğrenci sayısının az olması durumunda, algoritmanın her iterasyonunda geçen işlem süresi çok artmakta, öğrenci sayısının artması durumunda ise hesaplama süresi çok kısalmakta ve bazı iterasyonlarda optimum sonuçlardan uzaklaşmaktadır. Bu değer için, yapılan çok sayıda iterasyonlar neticesinde öğrenci sayısının güç sistemindeki bara sayısının 1,25 katı alınmasının termal güç sistemlerinde çözümü hızlandırdığı görülmüştür. Şekil 2.8'de M- ÖÖTO algoritmasına ait akış diyagramı verilmiştir.



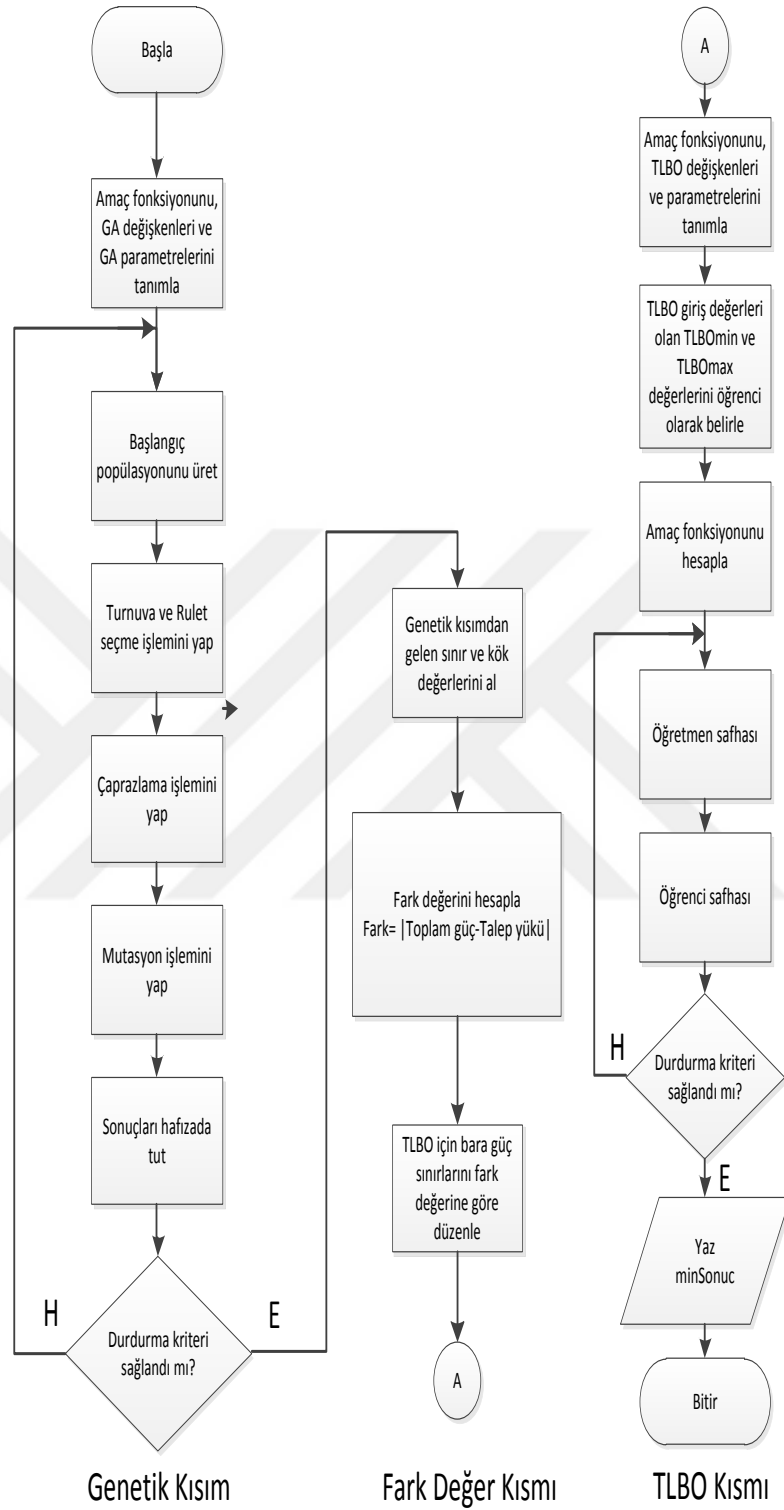
Şekil 2.8. M-ÖÖTO algoritması akış diyagramı

## 2.4.2. Hibrit Genetik-ÖÖTO Algoritması (G-ÖÖTO)

Geleneksel termal güç sistemleri büyük kurulu güce ve az sayıda baraya sahip olan güç sistemleridir. Rüzgâr enerjili güç sistemleri ise termal güç sistemlerine göre daha küçük kurulu güce ve çok daha fazla baraya sahip olan güç sistemleridir. Termal güç sistemine rüzgâr güç sisteminin eklenmesi sonucu farklı ölçekte ve termal güç sistemine göre çok daha fazla baraya sahip hibrit güç sistemleri elde edilmektedir. Bu güç sisteminin de geleneksel güç akış yöntemleri ile analizi hem yakıt maliyeti açısından verimli olmamakta hem de güç akış analizi için gereken algoritma çalışma zamanı çok uzamaktadır. Güç sistemlerindeki bütün bu değişim ve ihtiyaçlar göz önüne alınarak hibrit bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir.

Hibrit Genetik-ÖÖTO Algoritması, geleneksel genetik ve ÖÖTO algoritmalarının birleşimi şeklinde hibrit bir yapıya sahiptir. Optimizasyon algoritmaları, en iyi sonuçları global minimum ya da yerel minimum olarak adlandırılan çözüm bölgeleri içerisinde aramaktadır. Çözüm uzayı olarak global minimum bölgesinde arama yapan bir sezgisel algoritma muhtemel en yakın çözümleri çok az zaman aralıklarında elde ederken çoğu zaman en iyi çözümlerin uzağında kalmakta ve yerel minimumda arama yapan sezgisel algoritmaların ulaştığı en iyi çözümlere ulaşamamaktadır. Diğer yandan yerel minimumda arama yapan sezgisel algoritmalar muhtemel en iyi çözümlere ulaşmada global minimum bölgesinde arama yapan algoritmalara göre daha iyi sonuçlar elde etmelerine karşın, yerel minimumdaki çözümlere ulaşmaları çok uzun algoritma çalışma zamanı ve iterasyon sayısı gerektirmektedir. Her iki yöntemin biraraya getirilmesiyle oluşturulan ve hem global hem de yerel minimum bölgelerinde arama yapan hibrit yapılı bir algoritma ile geleneksel yöntemlere göre çok daha az bir çalışma zamanında daha iyi yakıt maliyetinin elde edildiği bir algoritma yapısı oluşturulmuş olmaktadır.

Tasarlanan algoritmanın iki seçici özelliği; GA ile özel bir fark değeri,  $d_v$ , tespit edilerek en iyi öğrencilerin global minimum bölgesinde hızlı bir şekilde seçilmesi ardından bu değerlerin bir fark değeri kullanılarak yerel minimumda çalışan ÖÖTO algoritmasına aktarılmasıdır. Tasarlanan hibrit algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 2.9'da, sözde kod dizilimi (pseudo-code) ise EK 6'da verilmiştir.



Şekil 2.9. G-ÖÖTO algoritması akış diyagramı



Geleneksel ÖÖTO algoritması her bir iterasyonda algoritmanın başlangıcında en iyi öğrencilere ihtiyaç duyar. GA ve fark kısım, ÖÖTO algoritması için en iyi öğrencileri seçme, kodlama, çaprazlama, penaltı ve turnuva aşamalarını işletip bir  $d_v$  fark değerini kullanarak oluşturur.

GA, global minimum noktalarına ulaşmaktaki etkinliği nedeniyle en iyi öğrencilerin seçiminde ÖÖTO algoritmasından daha hızlıdır. Tasarlanan algoritmada GA kullanılmasının temel nedeni, ÖÖTO algoritması için mümkün olduğunca hızla ara güç değerlerini tespit etmektir. Böylece, toplam algoritma çalışma zamanı önemli ölçüde azalmaktadır.

Tasarlanan algoritma, minimum ve maksimum güç değerleri arasındaki en iyi güç değerlerini elde etmek için,  $d_v$  fark değeri kullanır. Bu değer, toplam güç ve talep edilen yük arasındaki mutlak fark değeridir ve Eşitlik 2.53'deki gibi hesaplanır.

$$d_v = \text{mutlak değer}(\text{Toplam güç} - \text{yük}) \quad (2.53)$$

GA aşamasının ardından,  $d_v$  değeri her baranın minimum ve maksimum güç değerlerine eklenir ya da çıkarılır. Böylece, ÖÖTO algoritmasına göre oldukça hızlı şekilde en iyi ara optimum güç değerine ulaşılır. GA ve  $d_v$  fark değeri kullanılarak elde edilen  $G_{best}$  değerleri, ÖÖTO algoritmasının ilk öğrencilerini oluşturmaktadır.

$d_v$ , fark değerinin belirlenmesi, Eşitlik 2.54 ve Eşitlik 2.55'deki gibidir,

$$\text{Eğer } d_v, P_{max} - P_{min} \text{ değerinden büyükse, } d_v = P_{max} - P_{min} \quad (2.54)$$

$$\text{Eğer } d_v, P_{max} \text{ değerinden küçükse, } d_v = m_v * P_{min} \quad (2.55)$$

Burada,  $m_v$ , çarpan değeridir ve deneyimlerle 1-50 arasındadır.  $d_v$ , fark değeri, GA'nın bulduğu değerlerine göre otomatik olarak seçilir ve ÖÖTO kısmının işletilmesinin ardından en iyi  $F_{cost}$  maliyet sonuçlarını veren kökler elde edilmiş olur.

### 3. OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ VE GÜÇ SİSTEMLERİ UYGULAMALARI

Bu bölümde, geleneksel ve geliştirilen algoritmaların geleneksel ve rüzgâr enerjili güç sistemleri üzerinde uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir. Bu kapsamda, ÖÖTO algoritması, modifiye ÖÖTO ve hibrit G-ÖÖTO algoritmalarının 8 ve 40 baralı termal güç sistemleriyle ve 19 baralı kendi oluşturduğumuz termal-rüzgâr güç sistemine uygulanış şekli ve analizlerde seçilen parametreler, yüklenme durumları gibi değişkenler açıklanmaktadır. Ayrıca, Matlab programında güç akış analizlerinin gerçekleştirilmesi esnasında yapılan çalışmalar hakkında da bilgi verilmektedir.

#### 3.1. ÖÖTO Algoritmasının 40 Baralı Güç Sistemine Uygulanması

40 baralı sistemde ÖÖTO algoritması 20 öğrenci, 40 değişken ve 100.000 iterasyon alınarak, yakıt maliyeti ve (CO<sub>2</sub>) emisyonu açısından uygulanmıştır. Güç sistemi toplam yük kapasitesi, 10.500 MW olarak alınmıştır. Geleneksel ÖÖTO algoritmasından farklı olarak, en uygun öğrenci sayıları ve ağırlık değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Optimizasyonda algoritma çalışma zamanı göz önüne alınmamış, en iyi yakıt maliyeti değerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu nedenle, iterasyon sayısı yüksek seçilerek öğrenci ve ağırlık değerlerinde değişimler ele alınmıştır.

Öğrenci sayısının artması, algoritmanın her adımında bir sonraki iterasyona geçiş hesaplama işlem yükünü, en iyi öğrencinin tespitinin daha da zorlaşması nedeniyle arttırırken, öğrenci sayısının azaltılmasının ise, en iyi öğrencilerin seçimini zorlaştırdığı, bunun neticesinde ise, algoritmanın en iyi yakıt maliyeti değerlerini verecek kök değerlerine ulaşamadığı görülmüştür.

Ağırlık faktörü başarılı öğrencilerin seçimi için önemli bir faktördür. Çalışmada, maksimum ve minimum ağırlık değerleri değiştirilerek yakıt maliyetindeki

değişimler gözlenmiş ve bu kısımda yapılan denemelerde maksimum ve minimum ağırlık faktörlerinin birbirlerine yakın olması durumunda, algoritmaya öğrenci olarak verilen değişkenlerin yeterince iyi ayrıştırılmadığı sonucundan hareketle en son durumda maksimum ağırlık faktörünün 0,999, minimum ağırlık faktörünün ise 0,0000001 olarak alınması ile en uygun yakıt maliyeti değerine ulaşılacağı sonucu elde edilmiştir.

40 baralı güç sisteminin her barası için, minimum ve maksimum güç sınırları,  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  olmak üzere üç farklı yakıt maliyeti katsayısı ilgili matrislere girilmiştir. Ard arda yapılan denemeler ve gerçekleştirilen iterasyonların neticesinde, en iyi yakıt maliyeti ve bu maliyetteki azalmalar temel alınarak, (CO<sub>2</sub>) emisyonu değerindeki azalma tespit edilmiştir.

### **3.2. M- ÖÖTO Algoritmasının 40 Baralı Güç Sistemine Uygulanması**

En iyi yakıt maliyetini elde edebilmek için en uygun öğrenci, sınıf sayısı ve ağırlıkların belirlendiği bir algoritma oluşturulmuştur. 40 bara termal güç sisteminde, iterasyon sayısının azaltılması ve güç sistemine uygun bir algoritma yapısı tasarlanmıştır. Burada, standart ÖÖTO algoritmasına ek olarak amaç fonksiyonu ile uyumlu şekilde öğrenci sayısı artırılıp iterasyon sayısı azaltılarak her bir iterasyon için hesaplama adım zamanı arttırılmıştır. Çok sayıda deneme sonucunda, 20 iterasyon için istenen yük talep değeri olan 10.500 MW için optimum sonuç elde edilmiştir. Ağırlık değerleri maksimum ve minimum olarak sırasıyla 1 ve 0'a çok yakın değerler seçilmiştir. Böylece, ÖÖTO algoritmasının başarılı öğrencileri daha keskin şekilde ayırması sağlanmıştır. Maksimum ağırlık değerinin en optimum sonucu 1 değeri civarındadır. Bu değer in yükselmesi, algoritmanın optimum sonuçtan uzaklaşmasına neden olmuştur.

### 3.3. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının 8 ve 40 Baralı Güç Sistemlerine Uygulanması

Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritması termal güç sisteminin yapısı değiştiği zaman vereceği cevapları analiz edebilmek açısından 8 ve 40 baralı termal güç sistemlerine uygulanmıştır.

Gün içerisinde tüketiciler tarafından talep edilen güç miktarı sürekli değişim gösterdiğinden, analizlerde farklı güç talep miktarlarını gösteren yüklenme durumları % değer olarak kullanılmıştır.

Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının genetik kısımdaki çaprazlama olasılığı  $p_c=0,9$ , mutasyon olasılığı  $p_m=0,2$ , minimum ağırlık değeri 0,001, maksimum ağırlık değeri 0,002, sınıf sayısı 10,  $d_v$  fark değeri 10 ile 1.100 arasında olmak üzere 8 ve 40 baralı termal sistemler için aynı değerler olarak alınmış, ancak 40 baralı termal sistem için zaman verimliliğini de değerlendirmek amacıyla algoritma 5.000 iterasyon çalıştırılmıştır.

8 baralı tamamen termal enerji üretim birimlerinden oluşan bir güç sistemi için geliştirilen G-ÖÖTO Algoritması %25 ve %30 yüklenme durumları için uygulanmıştır. Analiz, yakıt maliyeti ve algoritma işletme zamanı açısından yapılmıştır.

8 baralı termal güç sisteminde, GA, ÖÖTO ve G- ÖÖTO olmak üzere üç algoritma, %25 ve %30 yüklenme şartlarında ve 100 iterasyon için çalıştırılmaktadır. Tasarlanan algoritmanın GA ve ÖÖTO algoritması kısmı ayrı ayrı 50 iterasyona sahiptir. G-ÖÖTO algoritmasının uygulanmasında, ilk olarak GA 50 iterasyon ve ardından ÖÖTO algoritması da 50 iterasyon daha çalışmaktadır.

Geliştirilen G-ÖÖTO algoritmasının yakıt maliyetinin yanı sıra, termal büyük ölçekli sistemlerde algoritma işletme zamanı açısından verimliliğini de tespit etmek amacıyla, G-ÖÖTO algoritması 40 baralı güç sistemine uygulanmıştır. Bu analizde, iterasyon sayısı ve 10.500 MW talep gücünün optimize edilmesi yaklaşımı yerine,

geliştirilen algoritmanın zaman verimliliğini de tespit etmek amacıyla yakıt maliyeti- algoritma işletme zamanı parametreleri optimize edilmeye çalışılmıştır. 40 baralı güç sistemi için, tasarlanan algoritmanın GA ve ÖÖTO algoritması kısmı ayrı ayrı 2.500 iterasyona sahiptir. G-ÖÖTO algoritmasının uygulanmasında, ilk olarak GA 2.500 iterasyon ve ardından ÖÖTO algoritması da 2.500 iterasyon daha çalışmaktadır.

### **3.4. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının Oluşturulan 19 Baralı Rüzgâr-Termal Güç Sistemine Uygulanması**

Hibrit bir modern optimizasyon algoritmasının, hibrit bir güç sistemi üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla geliştirilen G-ÖÖTO algoritması, 8'i termal sistem barası [12] ve 11'i Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB) Rüzgâr Enerjisi Raporundan [50] alınan verilerle oluşturulan 19 baralı rüzgâr-termal güç sistemi üzerinde analiz edilmiştir.

Simülasyonlar algoritma çalışma zamanı ve yakıt maliyeti açısından geleneksel genetik, ÖÖTO algoritmaları ve tasarlanan algoritma kullanılarak yapılmıştır. Tüm algoritmalarda, aynı güç sistemi parametreleri, karşılaştırma yapabilmek için kullanılmıştır.

ÖÖTO algoritması, 10 öğrenci, 23 değişken (23 ayrı bara) ve 1.500 iterasyon için uygulanmıştır. Genetik kısmında, çaprazlama olasılık faktörü,  $p_c=0,9$ , mutasyon olasılık faktörü,  $p_m=0,2$ , çözünürlük, 2, ve  $m_v=44$  olarak alınmıştır. Tasarlanan algoritma 1.500 iterasyona sahiptir. Tasarlanan yöntem içerisinde optimum  $F_{cost}$  değerlerine ulaşılabilmesi için, geleneksel GA 500 ve geleneksel ÖÖTO algoritması 1.000 iterasyona sahiptir. Toplam iterasyon sayısı, tasarlanan algoritma ve diğer algoritmaların karşılaştırılmasında, algoritmaların zaman ve maliyet verimliliğini yeterince değerlendirmek için 1.500 olarak seçilmiştir.

Önceki simülasyonlardan farklı olarak, bu uygulamada üç yüklenme durumu göz önüne alınmıştır. Bunlar sırasıyla, %25, %27,5 ve %30 yüklenme durumlarıdır. Geleneksel GA, ÖÖTO ve tasarlanan algoritmalar her bir yüklenme durumu için 1.500 iterasyon çalıştırılmıştır.

Yakıt maliyet grafikleri Matlab 2011b-Simulink yazılımı ile çizilmiş ve yakıt maliyeti-iterasyon sayısı grafikleri algoritmalar arasında karşılaştırma yapmak amacıyla oluşturulmuştur.

### **3.5. Matlab Ortamında Yapılan Çalışmalar**

Genetik Algoritma (GA), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) algoritması ve Genetik ÖÖTO (G-ÖÖTO) algoritmalarının analizleri için ayrı ayrı dosyalar oluşturulmuştur. Modifiye ÖÖTO (M-ÖÖTO) algoritmasının analizinde ise ÖÖTO algoritması içerisinde öğrenci sayısı, ağırlık değerlerinde gerekli değişiklikler yapılmıştır.

#### **3.5.1. Genetik Algoritma Kısmı**

GA analizinde a, b, c yakıt maliyeti katsayılarını belirten a\_deger, b\_deger ve c\_deger olmak üzere üç farklı mat dosyası oluşturuldu. Yakıt maliyet katsayıları bu mat dosyalarına hesaplamalar esnasında kullanılmak üzere kaydedildi.

GA'da, m dosyaları olarak genetic, crossover, mutation, obj\_func, penalty, rulet, tournament dosyaları oluşturuldu. genetic.m dosyasında, fonksiyon boyutu olarak 1 alındı. Generatörlerin minimum ve maksimum güç sınırları bu dosyada between\_a ve between\_u adlı iki matrisle kaydedildi. Genetik çözünürlük değeri olarak 4 alındı. Parçacık değeri olarak bara sayısı alınmış ardından çaprazlama ve mutasyon katsayıları girildi.

Başlangıç giriş değerleri ve parametrelerinin girişi tamamlandıktan sonra algoritmanın obj\_func dosyasındaki amaç fonksiyonunu alması sağlanarak algoritma çalıştırıldı, sınır değerleri aşan bir değer oluşuyorsa bu değer de penalty fonksiyonu ile önlendi. Tournament, crossover ve mutation fonksiyonları ile GA'daki seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri yapıldı. Her bir baraya ait en iyi değerler gbs

fonksiyonuyla en iyi değer matrisi oluşturuldu. sum fonksiyonuyla da her bir baranın yakıt maliyetleri ayrı ayrı toplanarak toplam yakıt maliyeti hesaplandı ve plot fonksiyonuyla da çizdirildi.

obj\_func dosyasında, ilk toplam değeri 0 olarak alınmakta ve load komutu ile yakıt maliyet katsayıları a\_deger, b\_deger ve c\_deger olarak programa yüklendi. Satır matrisi şeklinde olan bu değerler daha sonra sütun matrisine çevrilerek a\_kat, b\_kat ve c\_kat adlarıyla bara sayısı kadar for döngüsüne tabi tutuldu.

### **3.5.2. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) Algoritması Kısmı**

ÖÖTO kısmında, PGmin, PGmax, min\_result, mark, a\_deger, b\_deger, c\_deger mat dosyaları oluşturuldu. PGmin ve PGmax, sırasıyla generatör minimum ve maksimum sınırlarının, a\_deger, b\_deger ve c\_deger baralara ait yakıt maliyet katsayılarının kaydedildiği matris dosyalarıdır.

ÖÖTO algoritmasında, m dosyaları olarak ÖÖTO, sortstudents, run\_tlbo, result\_avg, remove\_duplicate, out\_put, objective, initialize, implement program dosyaları oluşturuldu. ÖÖTO dosyası, wmin, wmax ağırlık değerlerinin girildiği ve algoritmanın diğer işlemlerinden gelen ana akışın bulunduğu dosyadır. Ayrıca, toc algoritma çalışma zaman komutu da da bu kısımda girildi. run\_tlbo dosyası ile algoritma ilk iterasyondan itibaren çalıştırıldı. Algoritma çalışmayı tamamladığında ÖÖTO dosyasına yönlendirildi. Objective dosyası, a,b,c yakıt maliyeti katsayılarının matrislerden çekilerek amaç fonksiyonunun hesaplandığı kısımdır. Initialize dosyası ile sınıf, öğrenci ve iterasyon sayıları m dosyası olarak girildi. Üst ve alt generatör değerleri implement dosyasında işlendi. Mark dosyasında analiz sonucunda oluşan en iyi kök değerlerini, min\_result dosyası ise her bir iterasyon sonucu elde edilen minimum optimizasyon sonucu matris formunda kaydedildi.

#### 4. BULGULAR

Bu tezde termal ve hibrit rüzgâr-termal güç sistemlerinin çeşitli modern optimizasyon teknikleri ile güç akış analizi incelenmiştir. Bu amaçla güç sistemlerinin optimizasyonunda, geleneksel ve hibrit yapıda farklı güç sistemleri ile yine geleneksel ve hibrit yapıda optimizasyon tekniklerinin birbirlerine karşılıklı olarak verecekleri cevaplar tespit edilmiştir. Optimizasyon tekniklerini uygulamak için kullanılan güç sistemleri, 8 ve 40 bara termal güç sistemleri ile 19 bara hibrit rüzgâr-termal güç sistemidir. Bu güç sistemlerinde kullanılan optimizasyon algoritmaları ise, Genetik Algoritma, Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyon (ÖÖTO) algoritması, geliştirilen modifiye ÖÖTO (M-ÖÖTO) algoritması ve geliştirilen Genetik-ÖÖTO (G-ÖÖTO) algoritmasıdır. Önerilen algoritmaların üstünlüklerinin gösterilmesi amacıyla ilk olarak, geleneksel ÖÖTO algoritması 40 baralı sisteme uygulanmış [66] ve yakıt maliyeti ve emisyon miktarı açısından [53] referansı ile, ikinci olarak M-ÖÖTO algoritması 40 baralı sisteme uygulanarak [53] ve [67] referansları ile üçüncü olarak G-ÖÖTO algoritması 8 ve 40 bara termal güç sistemlerine ve 19 bara hibrit rüzgâr-termal güç sistemine uygulanarak [68], geleneksel GA ve ÖÖTO algoritması yöntemleri ile son olarak da aynı kurulu güce sahip termal ve rüzgâr güç sistemleri yakıt maliyeti ve emisyon miktarı açısından [69] karşılaştırılmıştır. Böylece tezde, hem geleneksel genetik ve ÖÖTO algoritmalarının farklı güç sistemleri üzerindeki etkileri hesaplanırken, ayrıca hibrit analiz yöntemlerinin geleneksel ve rüzgâr enerjili hibrit güç sistemleri üzerindeki etkileri de görülmüştür. Ayrıca, güç sistem analizlerinde hibrit yapıli algoritma kullanmanın, optimizasyon amaç fonksiyonları açısından getirdiği avantajlar ve diğer geleneksel yöntemlerden farkı da ortaya konmuştur. Farklı güç sistemleri ve güç akış algoritmaları ile gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen simülasyon sonuçları, aşağıdaki şekillerde ve çizelgelerde verilmektedir.



#### 4.1. 40 Baralı Termal Güç Sistemi İçin Optimizasyon Algoritmalarının Sonuçları ve Karşılaştırma

40 baralı termal güç sistemi, çok sayıda ve küçük, orta ve büyük güç üretimine sahip güç üretim birimlerinden oluşmaktadır ve güç sisteminin minimum üretim değeri 4.310 MW iken, maksimum güç üretim kapasitesi 11.554 MW'dır. Bara sayısının çok olduğu ve farklı güç üretim değerlerine sahip termal güç sistemlerinin analizlerinin yapılması açısından örnek bir güç sistemidir.

##### 4.1.1. Standart ÖÖTO Algoritmasının 40 Baralı Termal Güç Sistemindeki Sonuçları ve Karşılaştırma

40 baralı termal güç sisteminde 10.500 MW güç talep değeri için optimum  $P_i$  güç değerleri, Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** 10.500 MW güç talep değeri için optimum  $P_i$  güç değerleri [66]

Generatör Nu.	$P_i^{optimum}$ (MW)	Generatör Nu.	$P_i^{optimum}$ (MW)	Generatör Nu.	$P_i^{optimum}$ (MW)
1	79,99998	12	304,2838	27	550
2	119,9999	13	446,9049	28	12,36451
3	190	14	492,6107	29	12,43234
4	42	15	499,9992	30	12,3433
5	41,99989	16	499,8636	31	20,00011
6	140	17-18-19	500	32-33-34	20
7	299,9998	20-21	550	35	18
8-9	300	22-23	549,9999	36	18,0001
10	276,5169	24-25	550	37	20
11	317,6815	26	549,9999	38-39-40	25

Çalışma sonucunda, EGA ile 143.934,67 \$/sa olarak bulunan yakıt maliyeti ÖÖTO algoritması ile 143.926,44 \$/sa olarak bulunmuştur [66]. Emisyon miktarındaki iyileşme ve yakıt maliyet değerleri Çizelge 4.2'de verilmektedir.

**Çizelge 4.2.** Yakıt maliyeti ve CO<sub>2</sub> emisyonuna göre algoritmaların karşılaştırılması [66]

Optimizasyon Yöntemi	Yakıt Maliyeti (\$/sa)
Eşit Gömülü Algoritma (EGA) [54]	143.934,67
Öğretme Öğrenme Temelli Optimizasyon (ÖÖTO) Algoritması	143.926,44
Yaklaşık olarak azaltılan CO <sub>2</sub> emisyon miktarı	0,0274 ton/sa

Aynı zamanda termal santrallerin ekonomik ömrü 40 yıl alınarak 72.000 MW Türkiye kurulu gücü için ÖÖTO algoritması kullanılması durumunda EGA'ya göre toplam tasarruf miktarı hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.3'de verilmektedir.

**Çizelge 4.3.** İki güç sistemi için tasarlanan algoritmanın ekonomik ve çevreye katkı kazanımları açısından karşılaştırılması [66]

Kurulu Güç	Yıllık Tasarruf (\$)	40 yıllık toplam tasarruf (\$)	40 yıllık toplam CO <sub>2</sub> Miktarındaki Düşüş (ton)
10.500 MW Tai-Güç Sistemi	72.094,8	2.883.792	9.600,96
72.000 MW Türkiye Güç Sistemi	31.2407,3	17.852.045,71	59.434,51

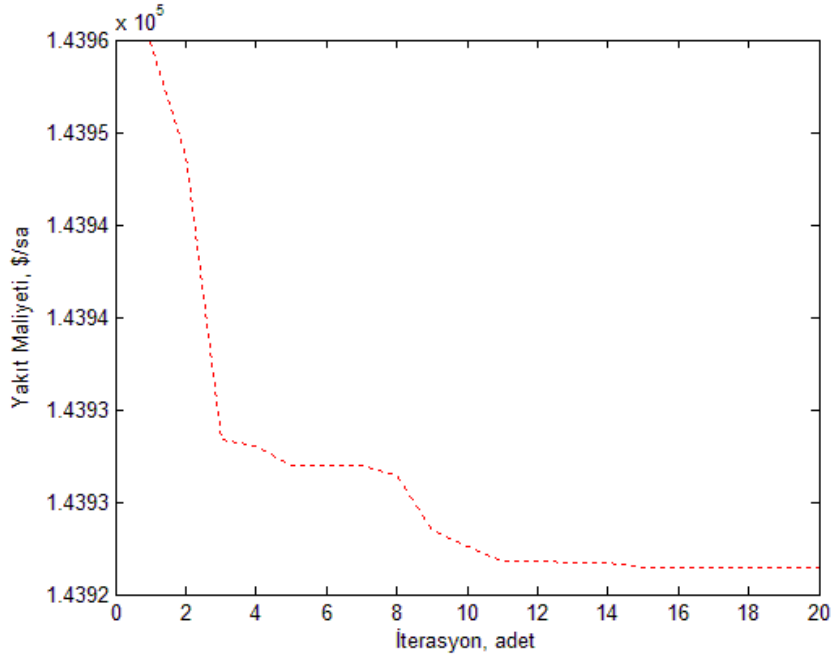
#### 4.1.2. M-ÖÖTO Algoritmasının 40 Baralı Güç Sistemindeki Sonuçları ve Karşılaştırma

Şekil 2.8'de akış diyagramı verilen M-ÖÖTO algoritması 40 baralı güç sistemine uygulanmış ve yapılan analiz sonucunda elde edilen optimum  $P_i$  güç değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Tasarlanan yöntem için 40 baralı güç sistemi için generatör üretim sınırları ve optimum  $P_i$  değerleri

Generatör Numarası	$P_i^{min}$ (MW)	$P_i^{maks}$ (MW)	$P_i^{optimum}$ (MW)
1	40	80	79,9999939679
2	60	120	119,9999989329
3	80	190	189,9999995224
4	24	42	42,0000000000
5	26	42	41,9999989170
6	68	140	139,9999981400
7	110	300	300,0000000000
8	135	300	299,9999996103
9	135	300	299,9999991562
10	130	300	276,7872542894
11	94	375	317,5946408713
12	94	375	304,2126048766
13	125	500	446,2178281760
14	125	500	492,9999865523
15	125	500	499,9998888053
16	125	500	500,0000000000
17	125	500	500,0000000000
18	220	500	499,9999981666
19	220	500	499,9999997758
20	242	550	549,9999992635
21	242	550	549,9999997142
22	254	550	549,9999999231
23	254	550	550,0000000000
24	254	550	549,9999995755
25	254	550	550,0000000000
26	254	550	549,9999994607
27	254	550	549,9999980776
28	10	150	12,3990944796
29	10	150	12,3952679886
30	10	150	12,3934468004
31	20	70	20,0000003747
32	20	70	20,0000009831
33	20	70	20,0000014266
34	20	70	19,9999995298
35	18	60	18,0000002236
36	18	60	18,0000003879
37	20	60	20,0000000000
38	25	60	25,0000012992
39	25	60	25,0000001957
40	25	60	25,0000005363
Toplam Talep Edilen Güç (MW)			10.500,0000000000
Toplam Yakıt Maliyeti (\$/sa)			143.926,4242

Çalışma sonucu M-ÖÖTO Algoritması ile elde edilen yakıt maliyeti-iterasyon grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.



**Şekil 4.1.** 20 iterasyon ve 50 öğrencili M-ÖÖTO algoritması ile elde edilen yakıt maliyeti

Çalışma sonucunda, yakıt maliyeti 143.926,42 \$/sa olarak bulunmuştur. İleride yapılacak karşılaştırmalarda tasarruf miktarlarının hesaplanmasında bu yakıt maliyeti kullanılacaktır. Çizelge 4,5’de, EGA, FGA ve ÖÖTO algoritmalarının yakıt maliyeti sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** EGA, FGA ve tasarlanan algoritmanın karşılaştırılması

Optimizasyon Yöntemi	Yakıt Maliyeti (\$/sa)
Eşit Gömülü Algoritma (EGA) [54]	143.934,67
Fark Gelişim Algoritması (FGA) [66]	143.926,51
Tasarlanan M-ÖÖTO Algoritması	143.926,42

Çizelge 4.6’da EGA, FGA ve ÖÖTO algoritmalarının yıllık ve 40 yıl için 10.500 MW ve 72.000 MW güç üretimi toplam yakıt maliyetleri verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** Yıllık ve 40 yıl için 10.500 MW ve 72.000 MW güç üretimi toplam yakıt maliyetleri

Optimizasyon Yöntemi	Yıllık Toplam Maliyet (\$) (10.500 MW)
Eşit Gömülü Algoritma (EGA) [54]	1.260.867.709,5
Fark Gelişim Algoritması (FGA) [67]	1.260.796.228,3
Tasarlanan M-ÖÖTO Algoritması	1.260.795.475,8
Optimizasyon Yöntemi	40 Yıllık Toplam Maliyet (\$) (10.500 MW)
Eşit Gömülü Algoritma (EGA) [54]	50.434.708.380
Fark Gelişim Algoritması (FGA) [67]	50.431.849.132
Tasarlanan M-ÖÖTO Algoritması	50.431.819.032
Optimizasyon Yöntemi	Yıllık Toplam Maliyet (\$) (72.000 MW)
Eşit Gömülü Algoritma (EGA) [54]	8.645.950.008
Fark Gelişim Algoritması (FGA) [67]	8.645.459.850
Tasarlanan M-ÖÖTO Algoritması	8.645.454.691
Optimizasyon Yöntemi	40 Yıllık Toplam Maliyet (\$) (72.000 MW)
Eşit Gömülü Algoritma (EGA) [54]	345.838.000.320
Fark Gelişim Algoritması (FGA) [67]	345.818.394.033
Tasarlanan M-ÖÖTO Algoritması	345.818.187.648

Çizelge 4.7’de M-ÖÖTO algoritmasının diğer EGA ve FGA algoritmalarına göre sağladığı kazanç miktarları verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Tasarlanan M-ÖÖTO algoritmasının 10.500 MW ve 65.000 MW güç üretimi için sağladığı kazanç miktarları

Optimizasyon Yöntemi	Yıllık Tasarruf (\$) (10.500 MW)	40 Yıllık Tasarruf (\$) (10.500 MW)	Yıllık Tasarruf (\$) (72.000 MW)	40 Yıllık Tasarruf (\$) (72.000 MW)
EGA [54]	72.233	2.889.320	495.317	19.812.672
FGA [67]	749	29.960	5.160	206.400

## **4.2. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının 8 ve 40 Baralı Güç Sistemindeki Sonuçları ve Karşılaştırma**

Şekil 2.9’da akış diyagramı verilen G-ÖÖTO algoritması 8 ve 40 baralı termal güç sistemine uygulanmış ve analiz sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda 4.2.1. ve 4.2.2. başlıklarında açıklanmıştır.

### **4.2.1. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının 8 Baralı Güç Sistemindeki Sonuçları ve Karşılaştırma**

8 baralı termal güç sistemi Batı Anadolu ve Marmara bölgelerinde bulunan ve ülkemizdeki doğalgaz, fuel-oil ve kömür kaynaklı en büyük termal üretim santrallerden oluşan bir güç sistemidir. Sistemin minimum güç üretimi 1.503 MW, maksimum güç üretim kapasitesi 7.172 MW’dır. Az bara sayısına sahip ve büyük güçlü güç sistemlerinin analizlerinin yapılması açısından örnek bir güç sistemidir.

GA, ÖÖTO ve G-ÖÖTO olmak üzere üç algoritma, %25 ve %30 yüklenme şartlarında 100 iterasyon için simüle edilmiştir. Tasarlanan algoritmanın GA ve ÖÖTO algoritması kısımları, ayrı ayrı 50 iterasyona sahiptir. GA, ÖÖTO algoritması için en iyi öğrencileri tespit ettiğinden, G-ÖÖTO algoritmasının Şekil 4.4 ve Şekil 4.7’de yalnızca ikinci kısmı verilmiştir. Çizelge 4.8’de üç algoritmanın yakıt maliyeti ve algoritma çalışma zamanı açısından karşılaştırılması verilmiştir.

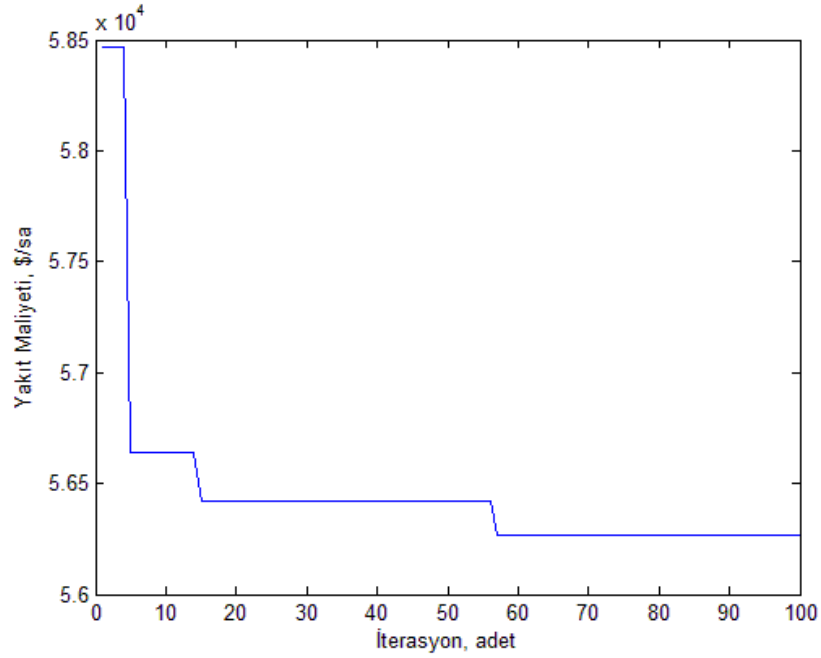
%25 ve %30 yüklenme durumlarına ait GA, ÖÖTO algoritması ve geliştirilen G-ÖÖTO algoritmalarının yakıt maliyeti-iterasyon grafikleri Şekil 4.2-4.7’de verilmiştir.

%25 yüklenme şartında, elde edilen sonuçlar GA, ÖÖTO ve G-ÖÖTO algoritmalarına göre sırasıyla Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de gösterilmiştir. %30 yüklenme şartında elde edilen yakıt maliyeti-iterasyon grafikleri ise GA, ÖÖTO ve

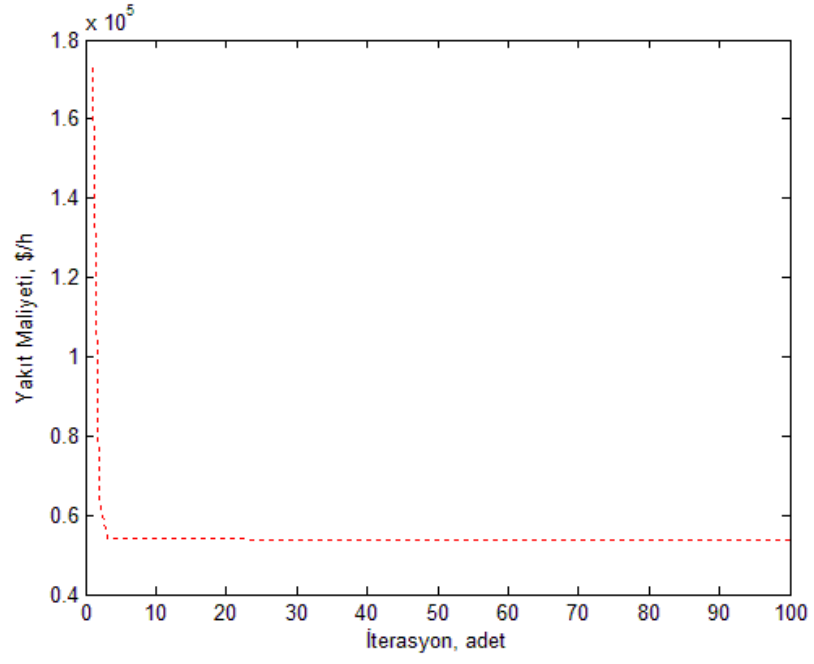
G-ÖÖTO algoritmalarına göre sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** GA, ÖÖTO ve G-ÖÖTO algoritmalarının 100 iterasyon için yakıt maliyeti ve algoritma çalışma zamanı açısından karşılaştırılması

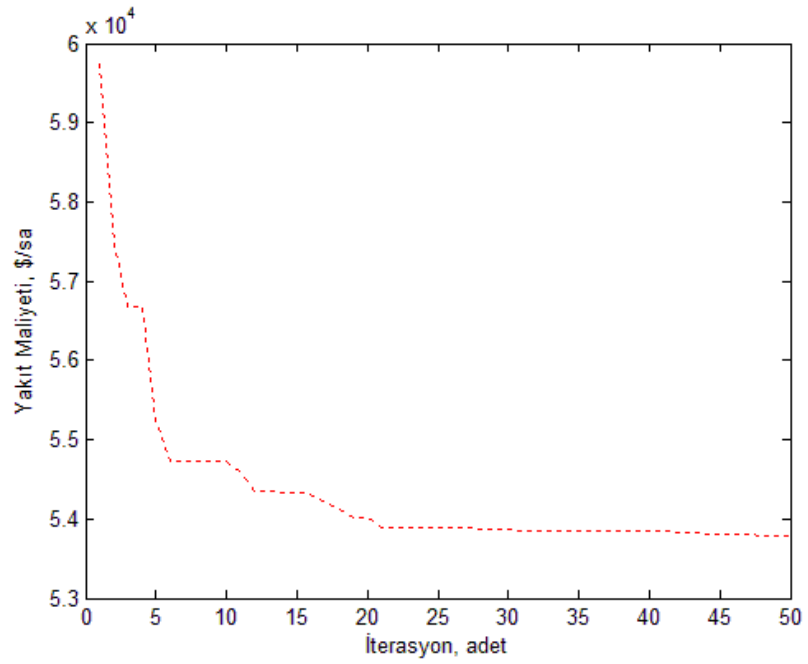
Yüklenme-Talep Edilen Güç (MW)	Optimizasyon Yöntemi	Yakıt Maliyeti (\$/sa)	Algoritma Çalışma Zamanı (s)
% 25-1.793	GA	56.267,21	0,52
	ÖÖTO Algoritması	53.836,66	10,01
	G-ÖÖTO algoritması	53.795,39	5,59
% 30-2.152	GA	61.859,10	0,76
	ÖÖTO Algoritması	57.935,47	9,98
	G- ÖÖTO algoritması	57.879,17	5,73



**Şekil 4.2.** % 25 yüklenme durumunda GA ile hesaplanan yakıt maliyeti

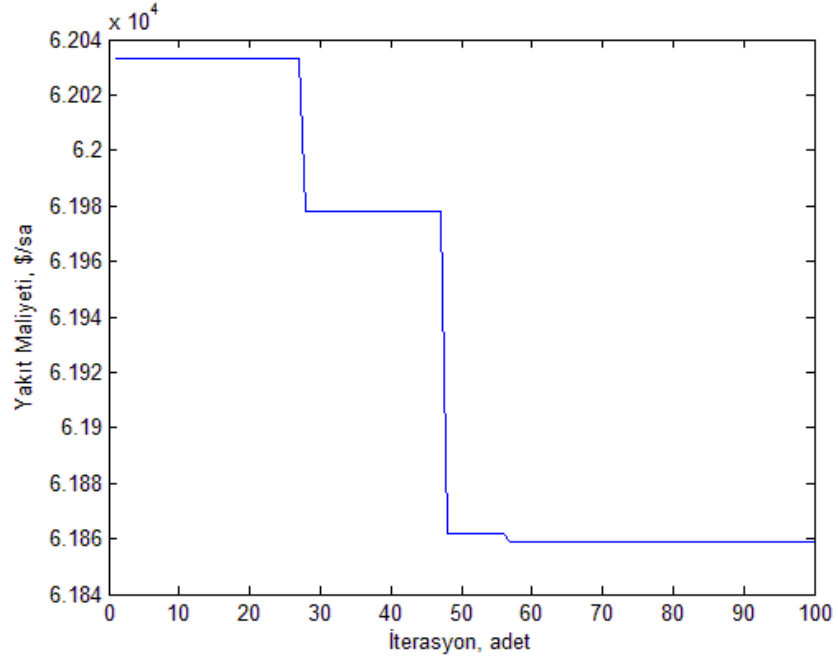


Şekil 4.3. %25 yüklenme durumunda ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti

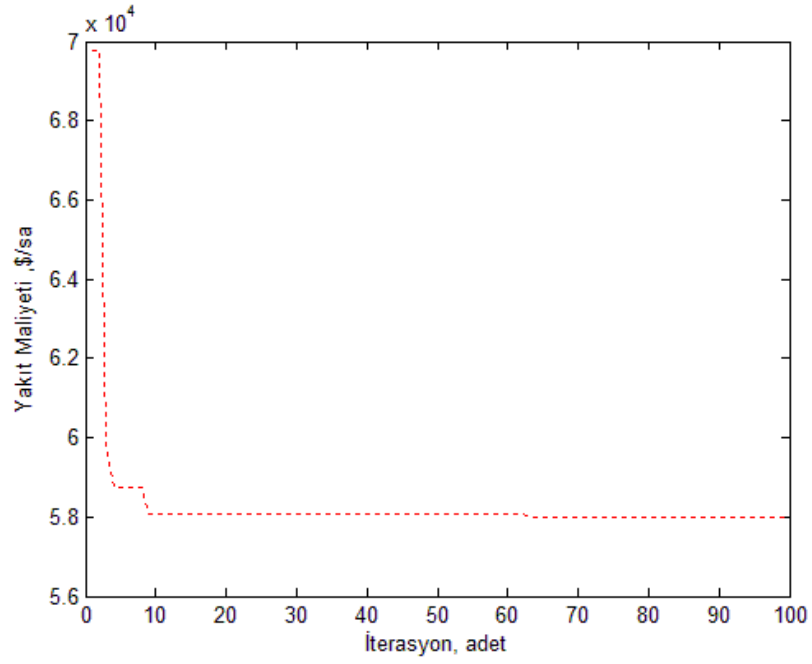


Şekil 4.4. %25 yüklenme durumunda G-ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti

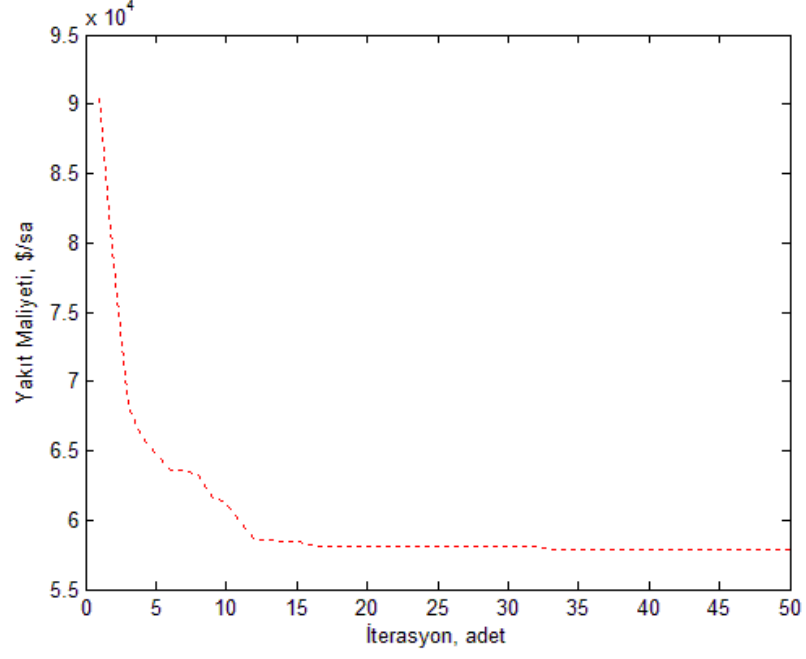




Şekil 4.5. % 30 yüklenme durumunda GA ile hesaplanan yakıt maliyeti



Şekil 4.6. % 30 yüklenme durumunda ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti



**Şekil 4.7.** % 30 yüklenme durumunda G-ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti

#### 4.2.2. Geliştirilen G-ÖÖTO Algoritmasının 40 Baralı Güç Sistemindeki Sonuçları ve Karşılaştırma

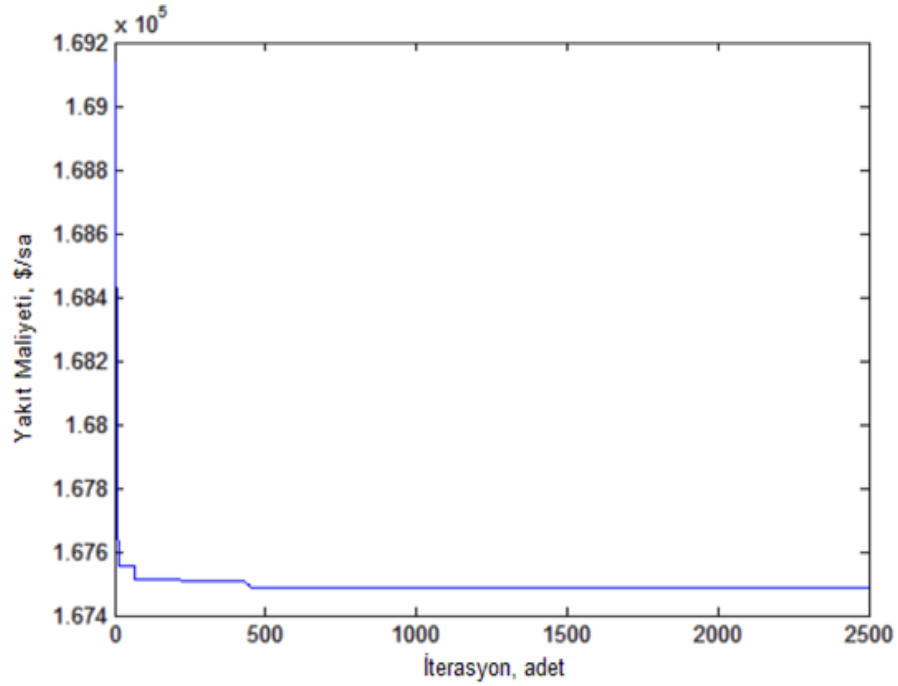
Bara sayısının çok olduğu ve farklı güç üretim değerlerine sahip termal güç sistemlerinin analizlerinin yapılması açısından örnek bir güç sistemi olduğundan geliştirilen G-ÖÖTO algoritması 40 baralı güç sistemine uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, Çizelge 4.9’da GA, ÖÖTO algoritması ve G-ÖÖTO algoritmasının yakıt maliyeti açısından, Çizelge 4.10’da ise bu üç algoritmanın çalışma zamanı açısından karşılaştırılması verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** Yakıt maliyeti açısından algoritmaların karşılaştırılması

Optimizasyon Yöntemi	Yakıt Maliyeti (\$/sa)
Genetik Algoritma (GA)	167.484,72
ÖÖTO Algoritması	143.945,25
G-ÖÖTO Algoritması	143.931,31

**Çizelge 4.10.** Algoritma çalışma zamanı açısından algoritmaların karşılaştırılması

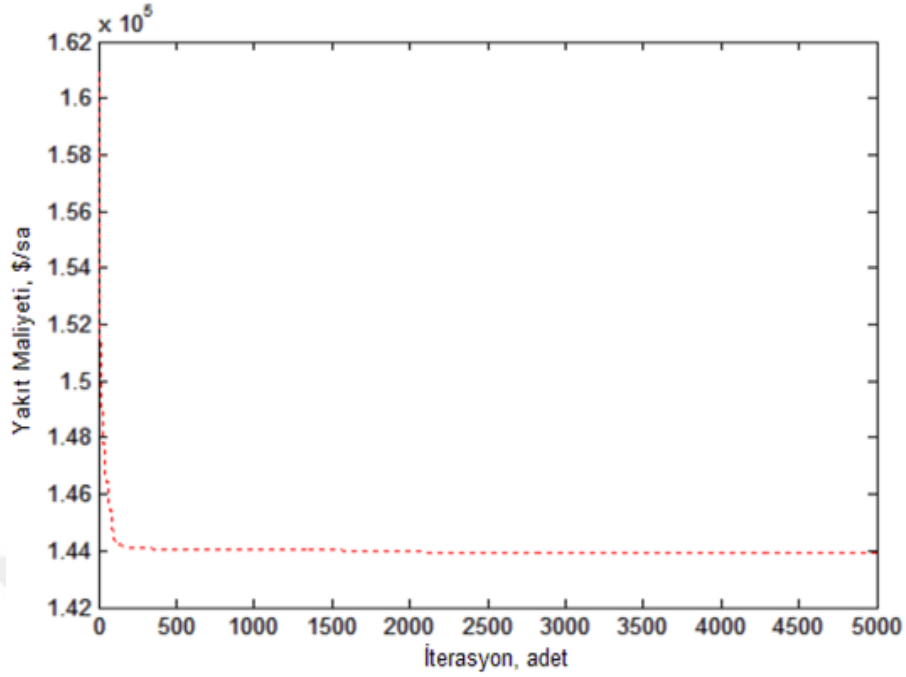
Optimizasyon Yöntemi	Algoritma çalışma zamanı (s)
ÖÖTO Algoritması	2.285,66
G-ÖÖTO Algoritması	1.276,25



**Şekil 4.8.** Geleneksel GA ile elde edilen yakıt maliyeti

Geleneksel GA sonucu Şekil 4.8’de verilirken, geleneksel ÖÖTO algoritmasının sonucu Şekil 4.9’da verilmiştir.

Geleneksel ÖÖTO ve geliştirilen G-ÖÖTO algoritmasının Tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması tarafından hesaplanan kısımları incelendiğinde ÖÖTO algoritmasının ilk 150-200 iterasyon içerisinde optimum değerlere önemli ölçüde yakınlığı görülmektedir.

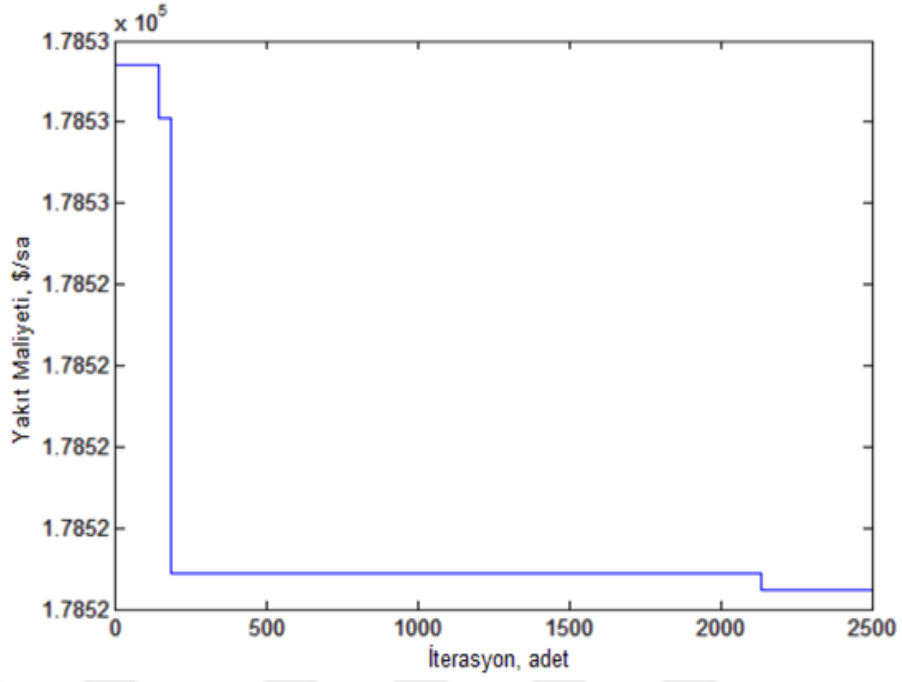


**Şekil 4.9.** Geleneksel ÖÖTO algoritması ile elde edilen yakıt maliyeti

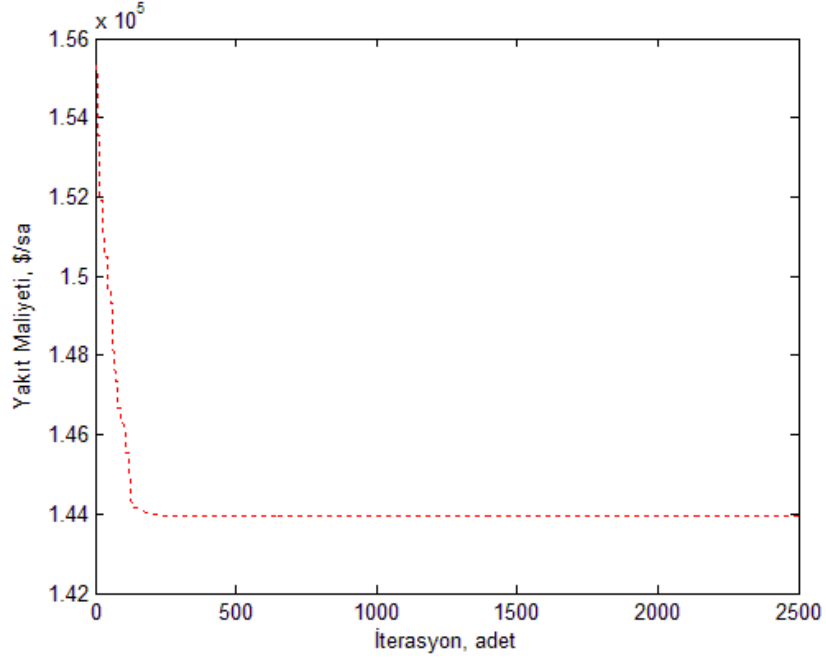
Tasarlanan algoritmada, çıkış Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir. Karşılaştırılan algoritmaların yakıt maliyeti ve zaman verimliliğini değerlendirmek açısından iterasyon sayısı 5.000 olarak seçilmiştir.

Genetik ve ÖÖTO algoritmalarının her biri 2.500 iterasyona sahiptir. Tasarlanan algoritmanın 2.500 iterasyonluk GA kısmı Şekil 4.10’da görülmektedir. Yakıt maliyeti 178.516 \$/sa’dır.

GA, ÖÖTO algoritmasının başlangıcında ÖÖTO algoritmasına iyi öğrencileri temin etmek için kullanılmıştır. İkinci 2.500 iterasyonluk tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması kısmı Şekil 4.11’de görülmektedir.



**Şekil 4.10.** Tasarlanan algoritmanın genetik algoritma tarafından hesaplanan yakıt maliyeti eğrisinin ilk 2.500 iterasyonluk kısmı



**Şekil 4.11.** Tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması tarafından hesaplanan yakıt maliyeti eğrisinin ikinci 2.500 iterasyonluk kısmı

Ayrıca Türkiye termal kurulu gücü 41,8 GW alınarak 40 baralı sistem, Türkiye sistemi ve Avrupa Güç sistemi için geliştirilen G-ÖÖTO algoritmasının sağladığı tasarruf miktarı hesaplanmıştır. Çizelge 4.11’de Farklı enterkonnekte güç sistemleri için önerilen yöntemin sağladığı 40 yıllık ekonomik tasarruf miktarı (\$) olarak verilmiştir.

**Çizelge 4.11.** Farklı enterkonnekte güç sistemleri için tasarlanan algoritmanın tasarruf miktarları

Enterkonnekte Sistem	Kurulu Termal Elektrik Üretimi (GW)	Önerilen yöntemin sağladığı 40 yıllık ekonomik tasarruf miktarı (\$)
TTPS	10,5	4.884.576
Türkiye	41,8	19.445.264
Avrupa Birliği	420	195.383.035

#### **4.3. 19 Baralı Rüzgâr-Termal Güç Sistemi İçin Optimizasyon Algoritmalarının Sonuçları ve Karşılaştırılması**

19 baralı rüzgâr-termal güç sistemi 8 baralı termal güç sistemine Batı Anadolu ve Marmara bölgelerinde bulunan ve 11 adet farklı ölçeklerde üretim yapan rüzgâr santrallerinin eklenmesi ile oluşturulmuştur. Sistemin minimum güç üretimi 1.503 MW iken maksimum güç üretim kapasitesi 7.689 MW’dır. Rüzgâr-termal güç sistemlerinin analizlerinin yapılması açısından örnek bir güç sistemidir.

Hibrit bir modern optimizasyon algoritmasının hibrit bir güç sistemi üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla geliştirilen G-ÖÖTO algoritması 19 baralı rüzgar-termal güç sistemi üzerinde analiz edilmiştir.

Simülasyonlar algoritma çalışma zamanı ve yakıt maliyeti açısından geleneksel genetik ve geleneksel ÖÖTO algoritmaları ve tasarlanan algoritma kullanılarak yapılmıştır. Algoritmalar 19 baralı termal-rüzgar hibrit enerji üretim sistemine

uygulanmıştır. Aynı güç sistemi parametreleri, tüm algoritmalarda doğru karşılaştırma için kullanılmıştır.

ÖÖTO algoritması 10 öğrenci, 23 değişken (23 ayrı bara) ve 1.500 iterasyon ile uygulanmıştır. Genetik kısımda, çaprazlama olasılık faktörü  $p_c=0,9$ , mutasyon olasılık faktörü  $p_m=0,2$ , çözünürlük 2 ve fark değer kısmında çarpan değeri  $m_v=44$ 'dür. Optimum Tasarlanan algoritma 1.500 iterasyondur. Tasarlanan algortmada optimum  $F_{cost}$  değerlerine ulaştığı için geleneksel GA 500 ve geleneksel ÖÖTO algoritması 1.000 iterasyona sahiptir. Tasarlanan algoritma için toplam iterasyon sayısı karşılaştırılan algoritmaların zaman ve maliyet verimliliğini yeterince değerlendirebilmek için 1.500 olarak seçilmektedir.

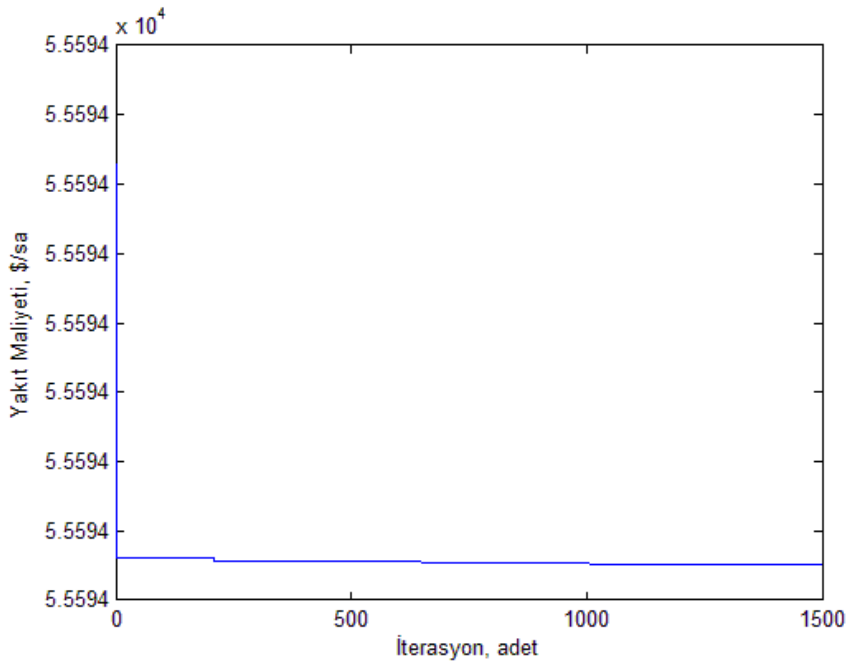
%25, %27,5 ve %30 olmak üzere üç yüklenme şartı dikkate alınmıştır. Geleneksel GA, geleneksel ÖÖTO algoritması ve tasarlanan algoritma toplam 1.500 iterasyon için her bir yüklenme şartında çalıştırılmıştır.

Simülasyonlarda iki performans kriteri seçilmiştir. Yakıt maliyet grafikleri ilk olarak Matlab 2011b yazılımı ile çizilmiştir. Burada, yakıt maliyeti iterasyon sayısı birbiri ile karşılaştırılmıştır. Farklı yüklenme durumları için yakıt maliyetleri geleneksel GA, geleneksel ÖÖTO algoritması ve tasarlanan algoritmanın GA ve ÖÖTO algoritması bölümleri Şekiller 4.12-4.23'de görülmektedir. İkinci olarak, algoritma çalışma zamanları ile iterasyon sayısı farklı yüklenme şartları için ayrıca hesaplanmıştır.

GA süreci çok kısa zaman içerisinde tamamlamaktadır ancak geleneksel ÖÖTO algoritması ve tasarlanan algortmadan daha kötü yakıt maliyeti sonucuna sahiptir. Bundan dolayı, tasarlanan algortmada, GA yalnızca ÖÖTO algoritmasına daha iyi güç değerlerini sağlamak için kullanılmaktadır. GA tasarlanan algortmaya küresel minimum noktalarındaki etkinliği ile hız sağlamaktadır. Çizelge 4.12'de 1.500 iterasyon için algoritma çalışma zamanı ve yakıt maliyeti açısından üç algoritmanın karşılaştırılması verilmiştir.

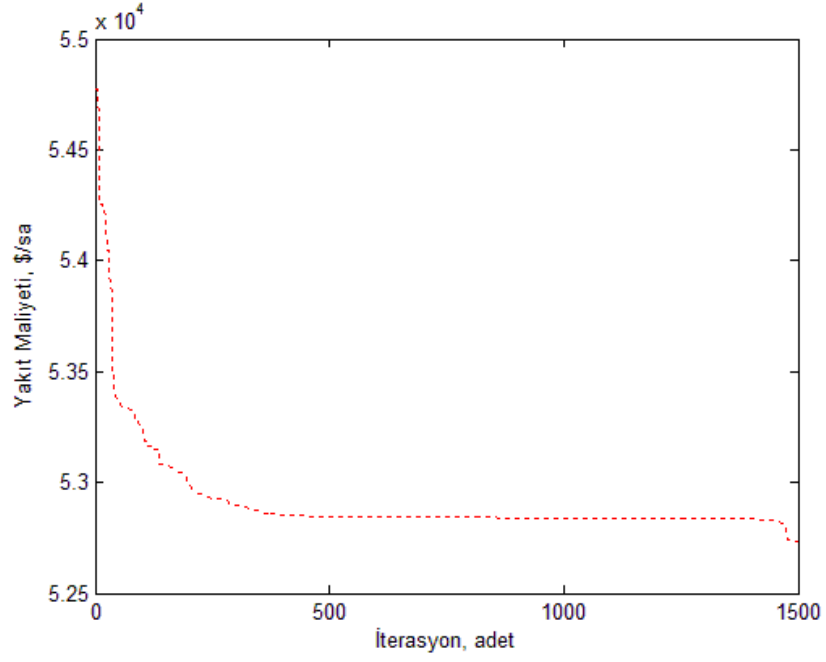
**Çizelge 4.12.** 1.500 iterasyon için algoritma çalışma zamanı ve yakıt maliyeti açısından GA, ÖÖTO ve G-ÖÖTO algoritmalarının karşılaştırılması [68]

Yüklenme Faktörü- Talep Gücü (MW)	Optimizasyon Yöntemi	Yakıt Maliyeti (\$/sa)	Algoritma Çalışma Zamanı (s)
% 25-1.834	Genetik Algoritma	55.593,51	11,77
	ÖÖTO Algoritması	52.732,66	206,75
	G-ÖÖTO Algoritması	52.728,25	138,00
% 27.5-2.017	Genetik Algoritma	57.850,98	12,37
	ÖÖTO Algoritması	54.473,89	211,95
	G-ÖÖTO Algoritması	54.464,87	141,86
% 30-2.201	Genetik Algoritma	61.686,24	12,04
	ÖÖTO Algoritması	56.447,31	211,12
	G-ÖÖTO Algoritması	56.446,49	138,38

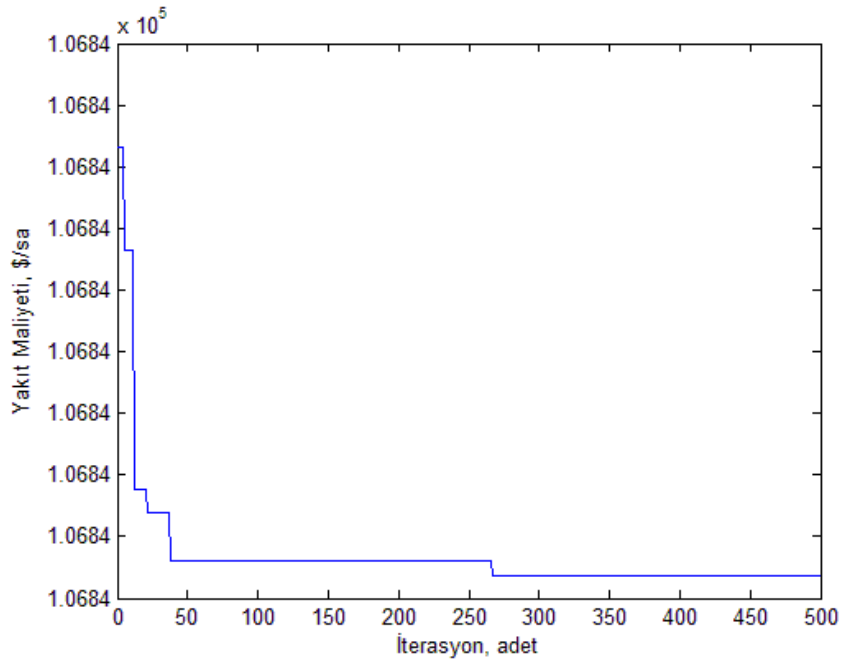


**Şekil 4.12.** %25 yüklenme faktörü ve 1.834 MW güç talebi için genetik algoritma ile hesaplanan yakıt maliyeti [68]

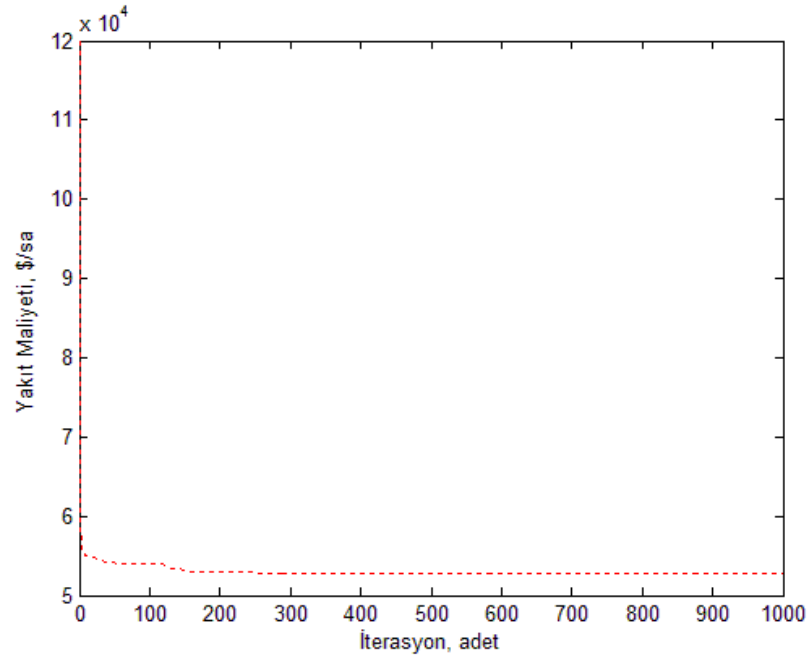




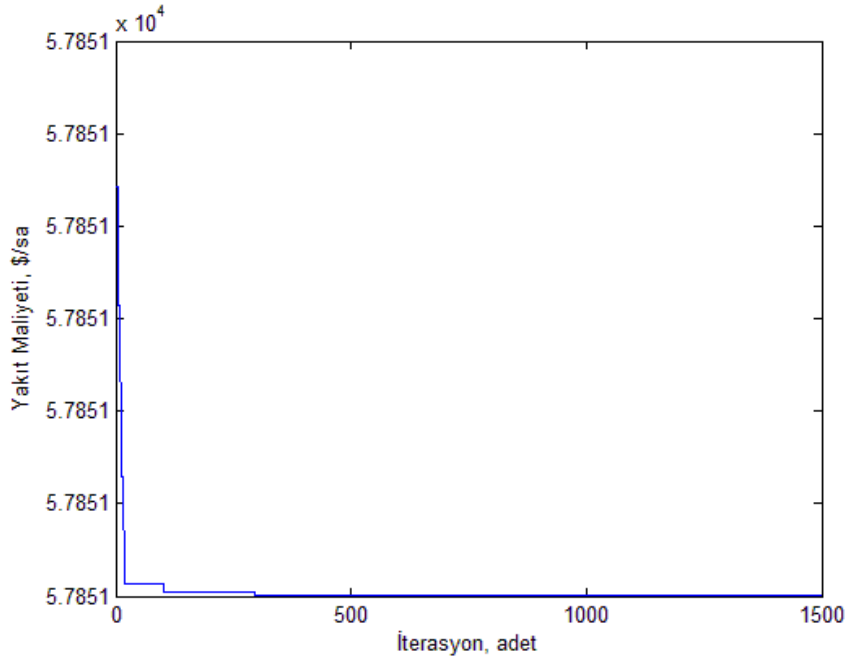
**Şekil 4.13.** %25 yüklenme faktörü ve 1.834 MW güç talebi için ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti [68]



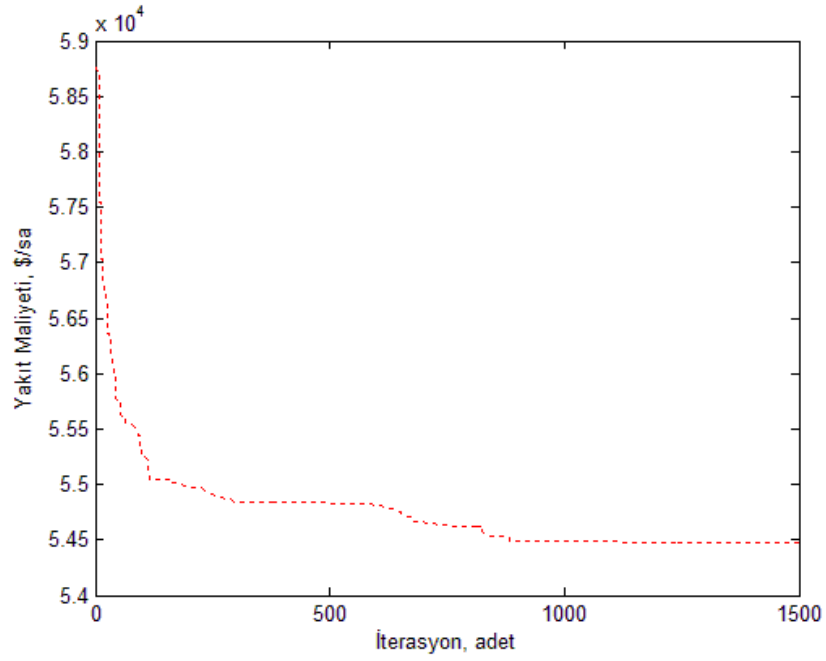
**Şekil 4.14.** %25 yüklenme faktörü ve 1.834 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın genetik algoritma kısmı [68]



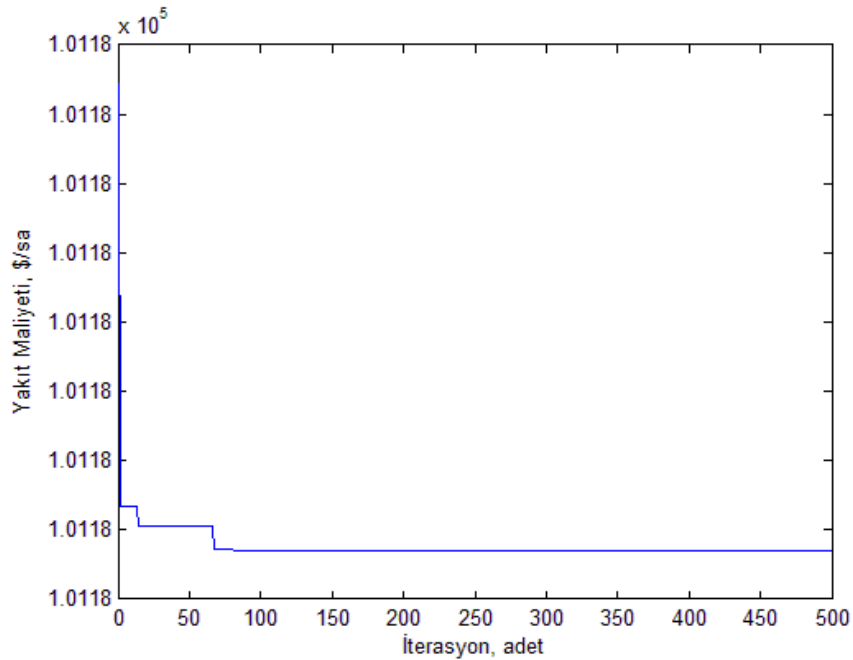
**Şekil 4.15.** %25 yüklenme faktörü ve 1.834 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması kısmı [68]



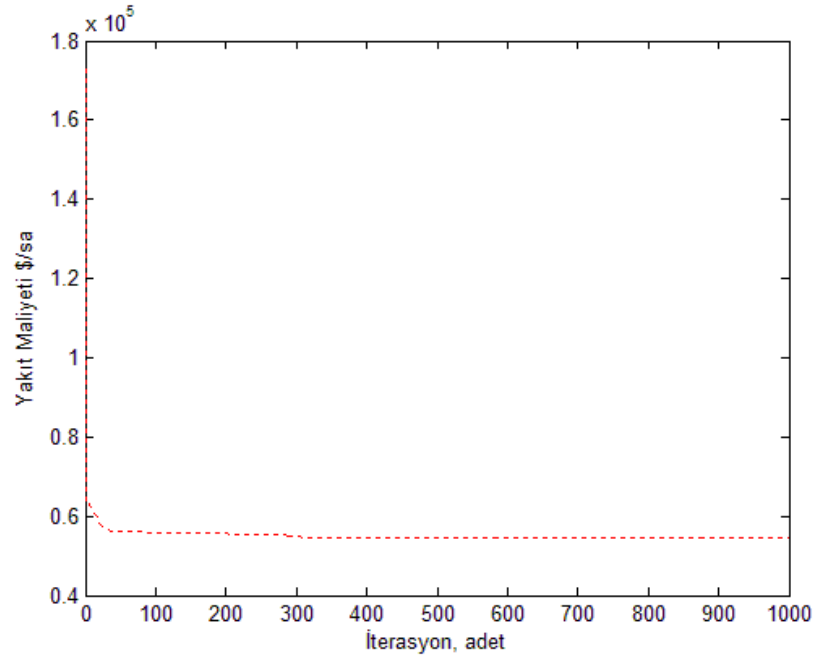
**Şekil 4.16.** %27,5 yüklenme faktörü ve 2.017 MW güç talebi için genetik algoritma ile hesaplanan yakıt maliyeti [68]



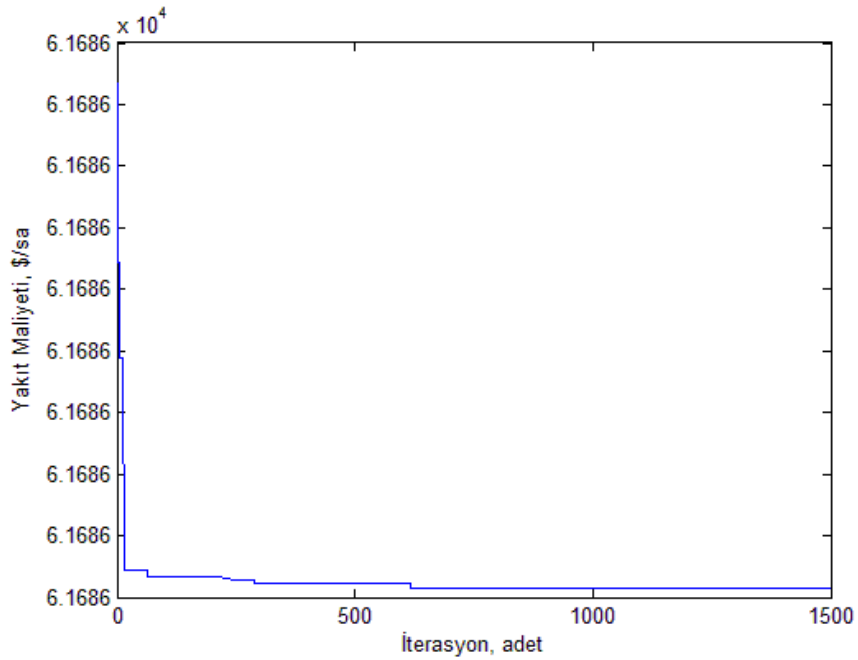
Şekil 4.17. %27,5 yüklenme faktörü ve 2.017 MW güç talebi için ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti [68]



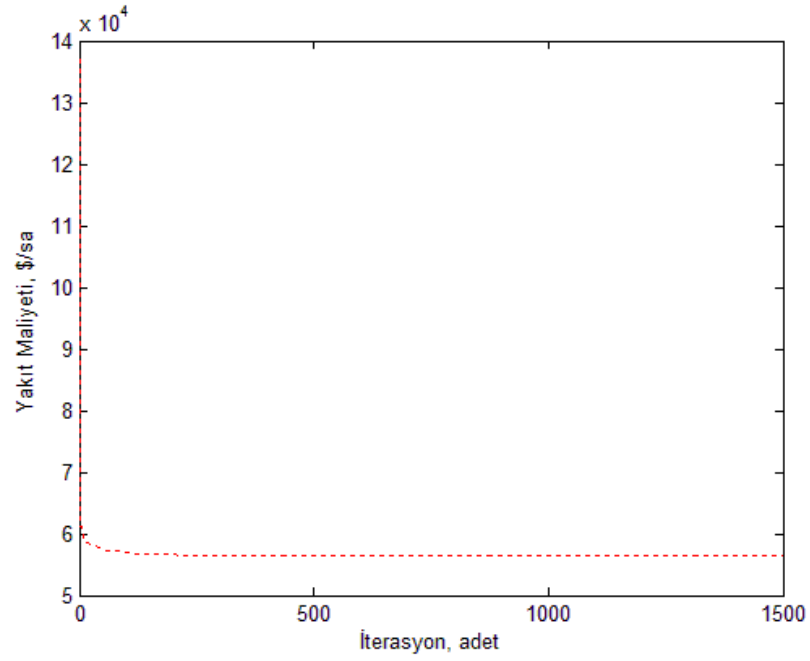
Şekil 4.18. %27,5 yüklenme faktörü ve 2.017 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın genetik algoritma kısmı [68]



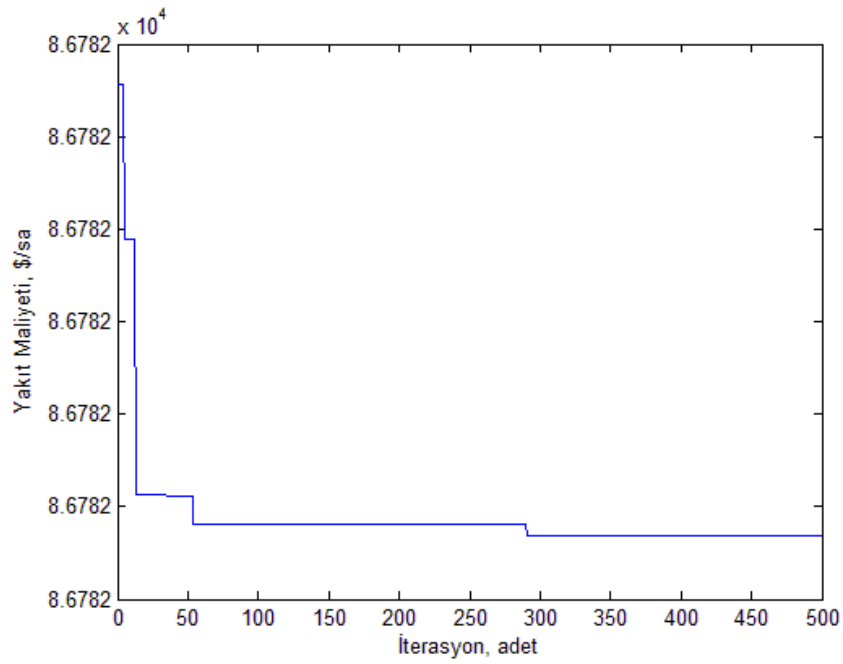
**Şekil 4.19.** %27,5 yüklenme faktörü ve 2.017 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması kısmı [68]



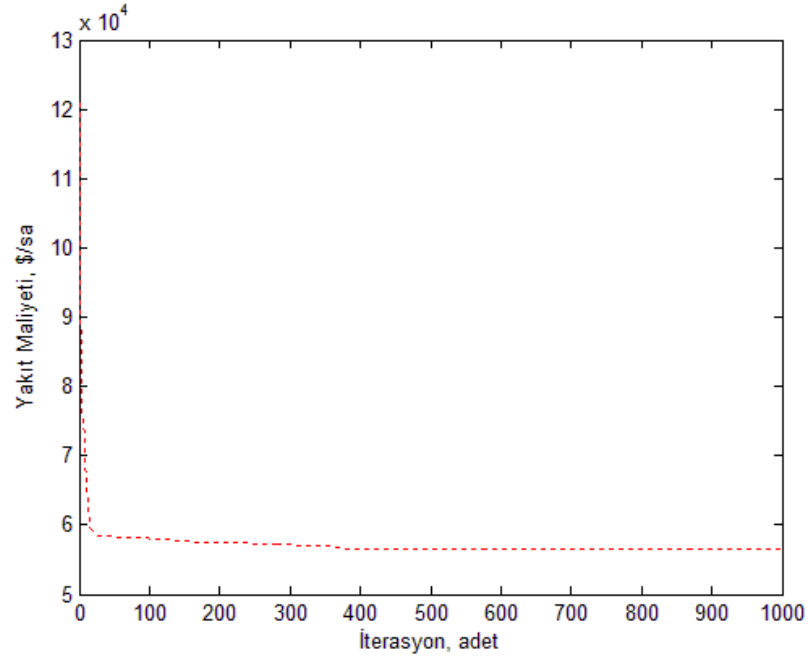
**Şekil 4.20.** %30 yüklenme faktörü ve 2.201 MW güç talebi için genetik algoritma ile hesaplanan yakıt maliyeti [68]



**Şekil 4.21.** %30 yüklenme faktörü ve 2.201 MW güç talebi için ÖÖTO algoritması ile hesaplanan yakıt maliyeti [68]

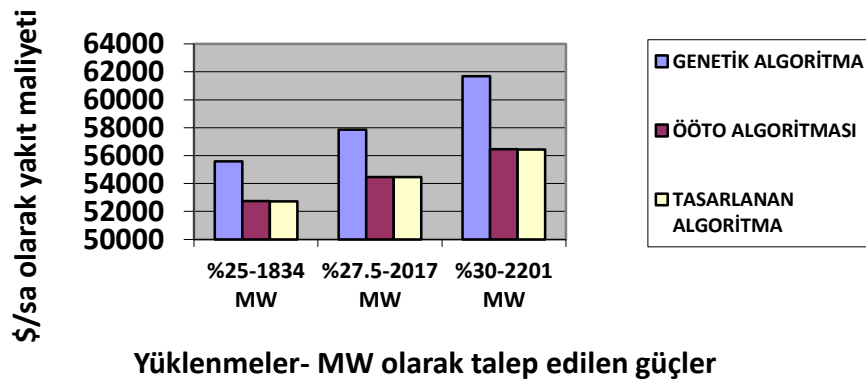


**Şekil 4.22.** %30 yüklenme faktörü ve 2.201 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın genetik algoritma kısmı [68]

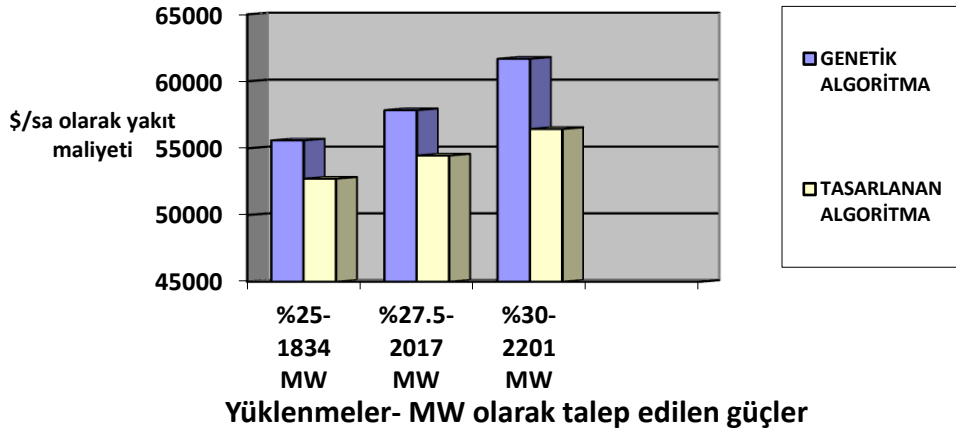


**Şekil 4.23.** %30 yüklenme faktörü ve 2.201 MW güç talebi için tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritması kısmı [68]

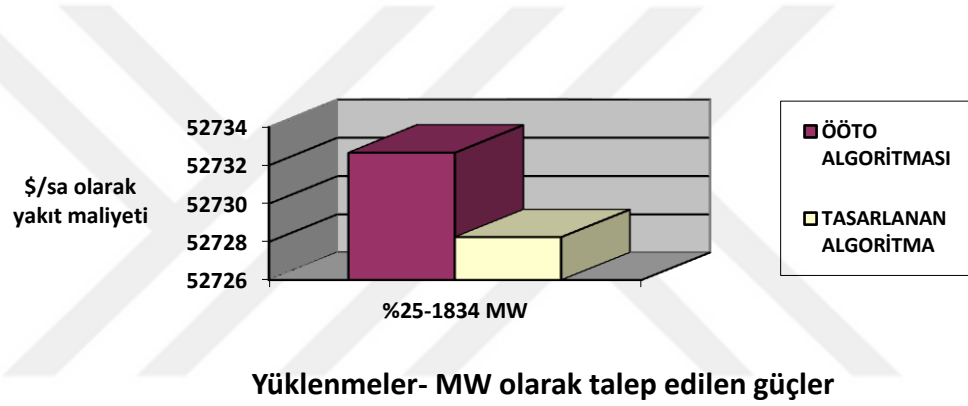
Şekil 4.24'de, ÖÖTO ve tasarlanan algoritma arasında bir skala etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle, Şekil 4.25'de GA ile tasarlanan algoritma, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de ise sırasıyla %25, %27,5 ve %30 yüklenme durumlarında tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritmasına göre yakıt maliyeti grafikleri ayrıca çizilmiştir.



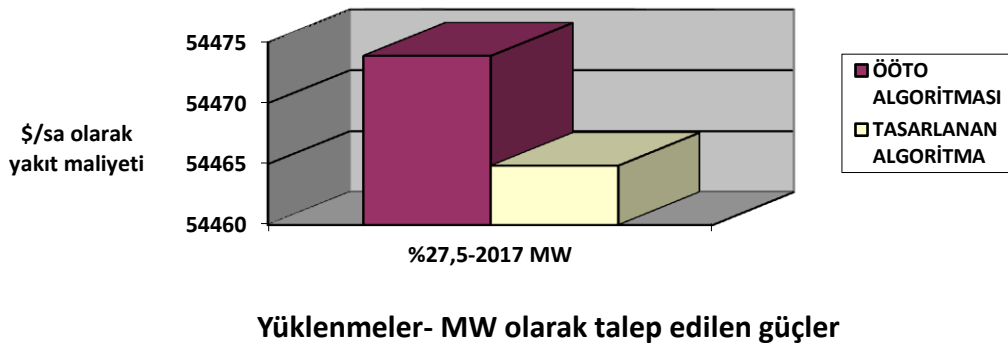
**Şekil 4.24.** Üç algoritmanın farklı yüklenme ve güç taleplerinde yakıt maliyeti [68]



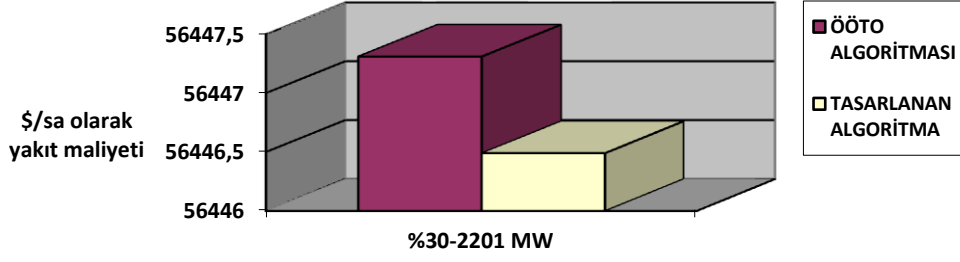
Şekil 4.25. Farklı yüklenmeler için GA ve tasarlanan algoritma yakıt maliyeti [68]



Şekil 4.26. % 25 yüklenme ya da 1.834 MW güç talebinde ÖÖTO ve tasarlanan algoritmanın yakıt maliyeti [68]



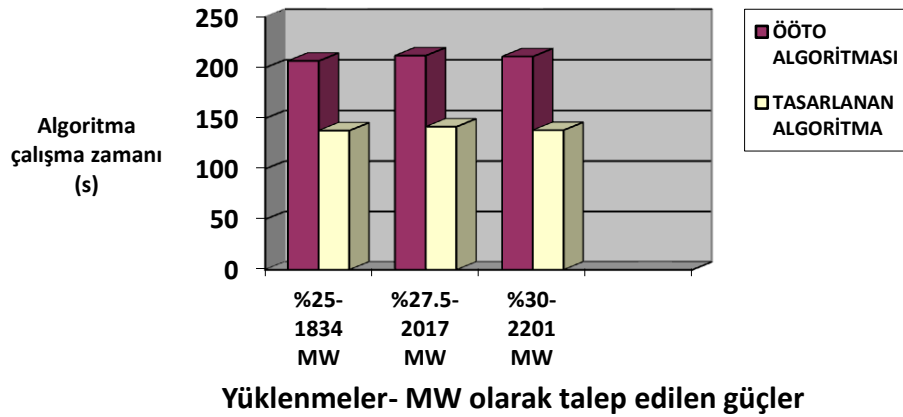
Şekil 4.27. % 27,5 yüklenme ya da 2.017 MW güç talebinde ÖÖTO ve tasarlanan algoritmanın yakıt maliyeti [68]



#### Yüklenmeler- MW olarak talep edilen güçler

**Şekil 4.28.** % 30 yüklenme ya da 2.201 MW güç talebinde ÖÖTO ve tasarlanan algoritmanın yakıt maliyeti [68]

Şekil 4.29'da, ÖÖTO ve tasarlanan algoritmaya ait algoritma çalışma zamanı sonuçları verilmektedir. Burada, GA'ya ait çalışma zamanı, GA'nın yakıt maliyeti optimizasyon hedeflerinin dışında ve ekonomik olarak kabul edilebilir olmayan bir sonuç olmasından dolayı dikkate alınmamıştır. Şekil 4.29'da, tasarlanan algoritma ÖÖTO algoritmasına göre sırasıyla %25, %27,5, %30 yüklenme durumları için 68,75 s, 70,09 s, 72,74 s zaman tasarrufu sağlamaktadır.

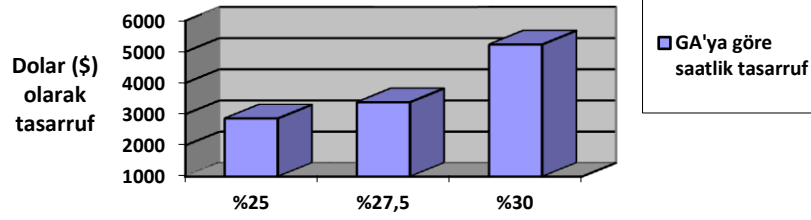


#### Yüklenmeler- MW olarak talep edilen güçler

**Şekil 4.29.** Farklı yüklenme ve güç taleplerinde ÖÖTO ve tasarlanan algoritmanın algoritma çalışma zamanı [68]



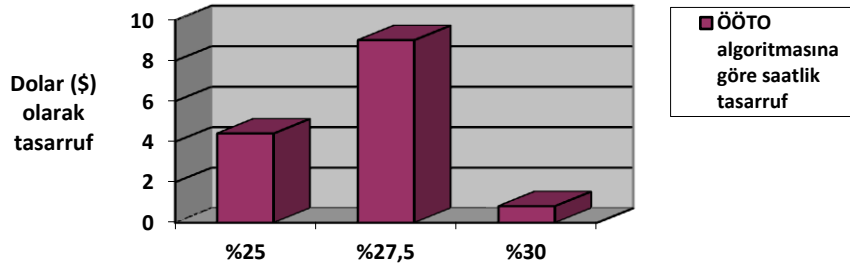
Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33, tasarlanan algoritma ile elde edilen saatlik ve 40 yıllık tasarruf miktarları karşılaştırma yapmak amacıyla verilmiştir. Şekil 4.30'da tasarlanan algoritma GA'ya göre %25, %27,5, %30 yüklenme durumlarında sırasıyla 2.865,26 \$, 3.386,11 \$, 5.239,75 \$/sa'lik tasarruf sağlamaktadır.



#### Yüklenmeler

**Şekil 4.30.** Farklı yüklenmelerde tasarlanan algoritmanın GA'ya göre sağladığı saatlik tasarruf [68]

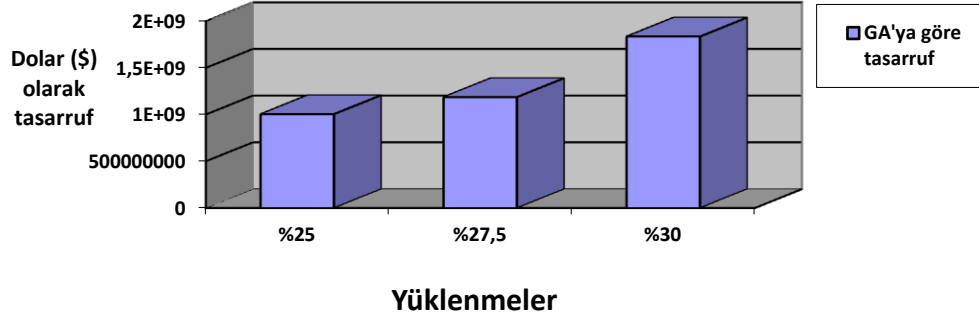
Şekil 4.31'de tasarlanan algoritma %25, %27,5, %30 yüklenme durumlarında sırasıyla ÖÖTO algoritmasına göre 4,41 \$, 9,02 \$, 0,82 \$ saatlik tasarruf sağlamaktadır.



#### Yüklenmeler

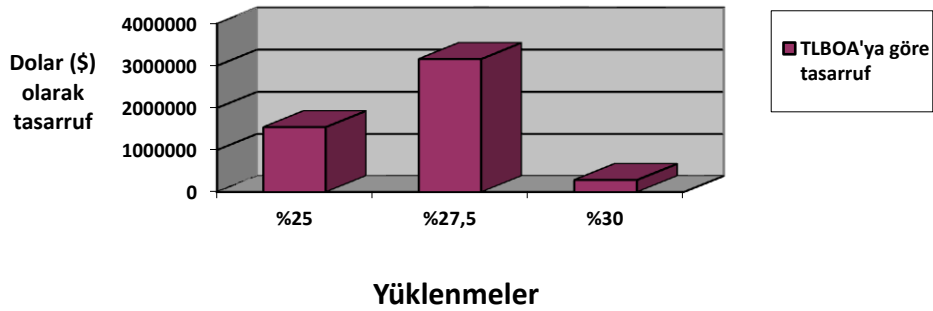
**Şekil 4.31.** Farklı yüklenmelerde tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritmasına göre sağladığı saatlik tasarruf [68]

Şekil 4.32’de, tasarlanan algoritma 40 yılda GA’ya göre %25, %27,5, %30 yüklenme durumlarında sırasıyla 1.003.987.104 \$, 1.186.492.944 \$, 1.836.008.400 \$ tasarruf sağlamaktadır.



Şekil 4.32. Farklı yüklenmelerde tasarlanan algoritmanın GA’ya göre sağladığı 40 yıllık tasarruf [68]

Şekil 4.33’de tasarlanan algoritma ÖÖTO algoritmasına göre %25, %27,5, %30 yüklenme durumlarında sırasıyla 1.545.264 \$, 3.160.608 \$, 287.328 \$ tasarruf sağlamaktadır.



Şekil 4.33. Farklı yüklenmelerde tasarlanan algoritmanın ÖÖTO algoritmasına göre sağladığı 40 yıllık tasarruf [68]

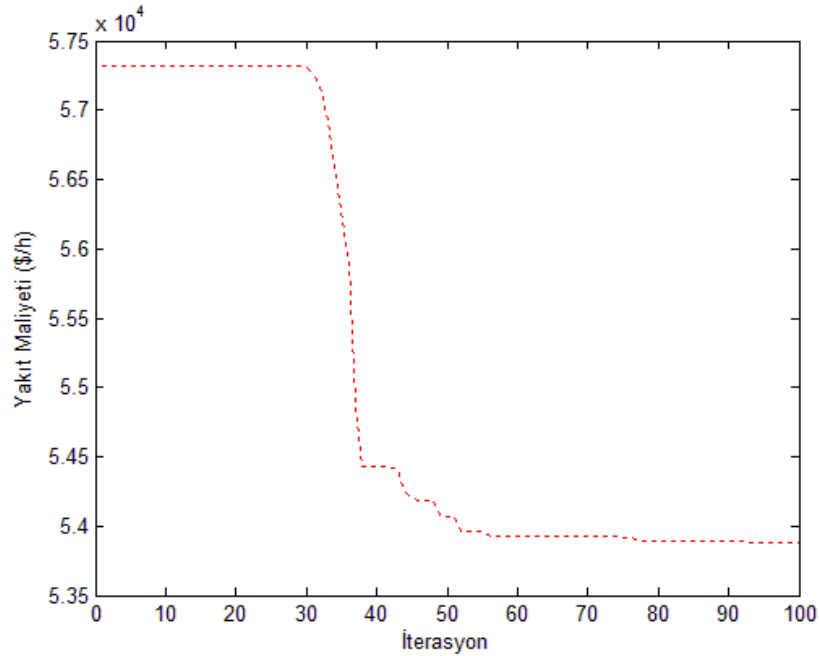
Tasarlanan algoritma ile diğer algoritmaların performansları karşılaştırıldığında, tasarlanan algoritma ile harcanan zamanın çok daha az olduğunu ve daha iyi yakıt maliyeti sonuçları elde edildiğini göstermektedir. Simülasyonlar çok sayıda deneme

için tekrarlanmış ve tüm denemelerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. İterasyon sayısı kademe kademe arttırıldıkça, yakıt maliyeti sonuçları algoritmalar tarafından birbirine yakınsanmaktadır ancak tasarlanan algoritma, çalışma zamanı açısından da büyük bir performans göstermiştir.

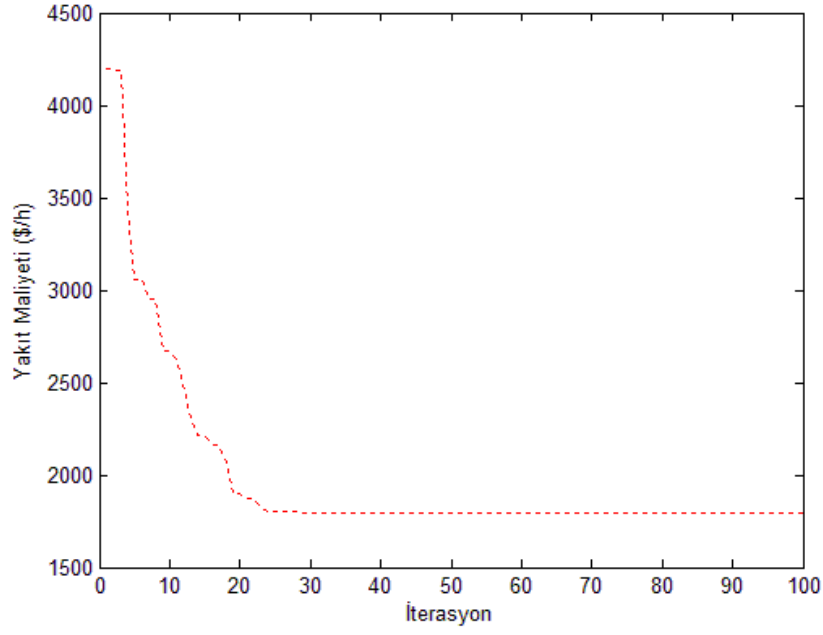
Tasarlanan algoritmanın diğerlerinden 19 baralı termal-rüzgar güç kaynaklı hibrit enerji üretim sistemi için taleplerin yerine getirilmesinde daha avantajlı olacağı görülmektedir.

#### 4.4. Aynı Kurulu Güç İçin 8 Baralı Termal Güç Sisteminde Termal ve Rüzgâr Baralarının Yakıt Maliyeti ve Emisyon Açısından Karşılaştırılması

8 baralı 7.172 MW kurulu güce sahip güç sisteminin yakıt maliyeti ve emisyon miktarı ile aynı bara sayısına sahip rüzgâr güç sisteminin yakıt maliyeti ve emisyon miktarı ÖÖTO algoritması kullanılarak karşılaştırılmıştır [69]. Yakıt maliyeti sonuçları, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de verilmiştir.



Şekil 4.34. Termal kaynaklarla elde edilen yakıt maliyeti eğrisi [69]



**Şekil 4.35.** Rüzgâr enerjisi ile elde edilen yakıt maliyeti eğrisi [69]

Elde edilen yakıt maliyeti sonuçları Çizelge 4.13’de, termal ve rüzgâr enerji sistemlerinin emisyon açısından karşılaştırılması Çizelge 4.14’de verilmiştir [67-68].

**Çizelge 4.13.** Termal ve rüzgâr enerji sistemlerinin yakıt maliyeti açısından karşılaştırılması

Enerji Sistemi (7.172 MW)	En İyi Yakıt Maliyeti (\$/h)
Termal Enerji Sistemi	53.882,97
Rüzgâr Enerji Sistemi	1.793,02
Yakıt Maliyetindeki Tasarruf	52.089,95

**Çizelge 4.14.** Termal ve rüzgâr enerji sistemlerinin emisyon açısından karşılaştırılması [70-71]

Enerji Sistemi (7.172 MW)	Emisyon Miktarı (ton)
Termal Enerji Sistemi (Kömür ve Doğalgaz)	4.801,94
Rüzgâr Enerji Sistemi	78,9
Emisyon Miktarındaki Azalma	4.723,04

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, elektrik enerjisinin mevcut durumuna ve bu enerji çeşitliliği içerisinde önemi gün geçtikçe artan rüzgâr enerjisine genel bir bakış yaptıktan sonra elektrik enerjisinin güvenli ve kaliteli olarak üretilmesi, iletilmesi, dağıtılması ve tüketimi için gerekli olan güç akış optimizasyonu ve güç sistemleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, 2 yeni modern optimizasyon tekniği ve yeni bir rüzgar-termal güç sistemi tasarlanarak geliştirilmiştir. Öncelikle literatürde olan güç sistemlerine, geleneksel algoritmalarından, daha önce uygulanmamış olan yöntemler uygulanmıştır. Ardından tasarlanan güç sistemine geleneksel teknikler ve geliştirilen optimizasyon teknikleri uygulanmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Değişen enerji üretim yapısı ve rüzgâr enerjisinin artarak güç sistemindeki payının artması geleneksel elektrik enerjisi kaynakları ile rüzgâr enerjisi üretiminin birlikte ele alınmasını gerekli kılmıştır.

İlk geliştirilen birkaç geleneksel algoritmanın güç sistemlerinin yapısının zamanla karmaşıklaşması ve kapasitesinin artması sonucunda optimum çözümleri yakınsayamadığı, belirli bara sayısının üzerinde çözüm veremediği, uzun çözüm süresine ve karmaşık denklemlere ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra modern optimizasyon teknikleri ile çözülen güç akış çözümünde çok daha hızlı çözüme ulaşıldığı, bara sınırının olmadığı ve daha az maliyetle güç akış çözümü yaptığı görülmüştür. Bunun sonucunda M-ÖÖTO ve G-ÖÖTO olmak üzere ÖÖTO algoritması temelli iki yeni algoritma geliştirilmiştir.

M-ÖÖTO algoritmasının güç sistemlerine uygulanması sırasında, M-ÖÖTO algoritmasının Eşit Gömülü Algoritma (EGA) ve Fark Gelişim Algoritmalarına (FGA) göre daha iyi yakıt maliyeti sonuçları elde ettiği görülmüştür. M-ÖÖTO algoritması, EGA ve FGA'ya göre 72 GW Türkiye Kurulu gücü için yıllık olarak sırasıyla 495.317 \$ ve 5.160 \$ tasarruf sağlamıştır. Termal santrallerin ömrü 40 yıl olarak alındığında ise, M-ÖÖTO algoritmasının sağladığı tasarruf miktarı EGA'ya göre 19.812.672 \$, FGA'ya göre 206.400 \$ olmuştur.

Genetik algoritmanın global minimum bölgesinde hesaplama yapması ve sonuçları çok hızlı bulması, ÖÖTO algoritmasının ise yerel minimum noktasında hesaplama yaparak yavaş ancak sonuçları çok iyi değerlerde bulunduğu yapılan 8 ve 40 bara termal ve 19 bara hibrit rüzgâr -termal güç sistemleri üzerindeki çalışmalardan tespit edilmiştir. Bunun sonucunda hem algoritma zamanının çok az olduğu hızlı çalışan hem de en iyi sonuçlara ulaşabilen bir güç akış tekniğinin hibrit bir yapı ile başarılacağı görülmüş ve Genetik ve ÖÖTO algoritmalarının güçlü yönlerini birleştiren hibrit bir G-ÖÖTO algoritması oluşturulmuştur. Oluşturulan bu algoritma ilk kez geleneksel ve geliştirilen rüzgâr-termal güç sistemine uygulanmıştır.

8 baralı termal güç sisteminde % 25 yüklenme durumunda, geleneksel GA ile bulunan 56.267,21 \$/sa, geleneksel ÖÖTO algoritması ile bulunan 53.836,66 \$/sa'lık yakıt maliyeti G-ÖÖTO algoritması ile 53.795,39 \$/sa olarak hesaplanmış ayrıca geleneksel ÖÖTO algoritmasının 10,01 s'de yapmış olduğu yakıt maliyeti hesabını G-ÖÖTO algoritması 5,59 s'de yaparak güç akış analizinin her bir hesaplama döngüsü için 4,42 s zaman tasarrufu sağlamıştır. Benzer olarak, 8 baralı sistemin %30 yüklenme durumunda da daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Geliştirilen G-ÖÖTO algoritmasının 40 baralı termal sisteme uygulanması sonucunda GA ile bulunan 167.484,72 \$/sa'lık, ÖÖTO ile bulunan 143.945,25 \$/sa'lık en iyi yakıt maliyeti G-ÖÖTO ile 143.931,31 \$/sa olarak elde edilmiş ayrıca bu hesaplamayı ÖÖTO algoritması 2.285,66 s'de yaparken G-ÖÖTO algoritması 1.276,25 s'de yapmıştır. G-ÖÖTO algoritmasının GA'ya göre sağladığı yakıt maliyeti tasarruf miktarı 41,8 GW olarak alınan Türkiye termal güç sistemi için 40 yılda 19.445.264 \$'a ulaşmaktadır.

19 baralı rüzgâr-termal güç sisteminin analizlerinde geliştirilen G-ÖÖTO algoritması, geleneksel ÖÖTO algoritmasına göre sırasıyla %25, %27.5 ve %30 yüklenme durumları için 68,75 s, 70,09 s ve 72,74 s zaman tasarrufu, 4,41 \$, 9,02 \$, 0,82 \$ saatlik yakıt maliyeti tasarrufu sağlarken GA'ya göre ise tasarruf miktarı 2.865,26 \$, 3.386,11 \$, 5.239,75 \$/sa olarak hesaplanmıştır.

Sonuçlar gerek M-ÖÖTO gerekse G-ÖÖTO algoritmalarının güç sistemlerinin analizlerinde olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Çalışmalardan yalnızca yakıt maliyeti ele alınarak, geleneksel termal güç sistemlerine rüzgâr güç sistemlerinin eklenmesinin aynı güç üretimi için yakıt maliyetini ve yakıt maliyeti ele alınarak hesaplanan emisyon miktarı, işçilik ve bakım maliyeti gibi enerji üretim giderlerini azalttığı görülmüştür.

8 baralı güç sisteminde termal güç sistemi yerine aynı kurulu güç için rüzgâr güç sistemi ile enerji üretildiğinde yakıt maliyetinde 52.089,95 \$/sa tasarruf elde edilmektedir. Bu tasarrufa bağlı olarak ayrıca rüzgâr enerjisi güç sistemi 4.723,04 ton daha az (CO<sub>2</sub>) emisyonu üretmektedir. Bu sonuçlardan da, termal güç sistemleri yerine rüzgâr güç sistemleri ile enerji üretiminin maliyet açısından ekonomiye ve emisyon miktarı açısından çevreye önemli katkı sunduğu görülmüştür.

Geliştirilen rüzgâr-termal güç sisteminin gelecekte diğer araştırmacıların çalışmalarında kullanabileceği bir güç sistemi olacağı ve yine geliştirilen modifiye ve hibrit yapılı güç akış algoritmalarının da var olan ve zamanla değişen güç sistemlerine uygulanabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Bayraç, N. H., Enerji kullanımının küresel ısınmaya etkisi ve önleyici politikalar. ESOGÜ Sosyal Bilimler Dergisi, 11(2): 229-261, Aralık 2010.
- [2] Oskay, C., Sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde rüzgar enerjisinin önemi ve Türkiye’de rüzgar enerjisi yatırımlarına yönelik teşvikler. Niğde Üniversitesi İİBF Dergisi, 7(1): 76-94, 2014.
- [3] William, F.T., Clifford E. H., Power flow solution by Newton's method. IEEE Trans on Power Apparatus and Syst 11: 1449-1460, 1967.
- [4] Bouktir, T., Slimani, L., Belkacemi, M., A Genetic algorithm for solving the optimal power flow problem. Leonardo Journal of Sciences, 44-58, 2004.
- [5] Soares, J., Sousa, T., Vale, Z.A., *Ant colony search algorithm for the optimal power flow problem*. IEEE Güç ve Enerji Genel Toplantısı, Temmuz 2011, San Diego-Kanada, s. 1-8, 2011.
- [6] Abido, M.A., Optimal power flow using particle swarm optimization. Electric Power and Energy Syst, 24: 563-571, 2002.
- [7] Bouchekara, H.E.R.H., Abido, A. M., Boucherma, M., Optimal power flow using teaching-learning-based optimization technique. Electric Power Syst. Research 114: 49–59, 2014.
- [8] Nayak, R. M., Nayak, K.C., Rout, K. P., Application of multi-objective teaching learning based optimization algorithm to optimal power flow problem. Procedia Technol 6: 255 – 264, 2012.
- [9] Rich Christie, Washington University, [http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm), (Erişim Tarihi: 18.01.2016)



- [10] Chen, P., Chang, H.. Large-scale economic dispatch by genetic algorithm. IEEE Trans on Power Syst 10: 1919-1926, 1995.
- [11] Boucekara, H.R.E.H., Abido, M.A., Chaib A.E., Mehasni, R., Optimal power flow using the league championship algorithm: A case study of the Algerian power system. Energy Conv and Manag 87: 58–70, 2014.
- [12] Ü. Başaran, Türkiye’deki 380 kV’luk Enterkonnekte Güç Sisteminde Çeşitli Güç Akışı ve Ekonomik Dağıtım Analizleri. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Ağustos 2004.
- [13] Anonim, TEİAŞ Yük Tevzi Dairesi, [www.teias.gov.tr/YukTevziRaporlari.aspx](http://www.teias.gov.tr/YukTevziRaporlari.aspx), (Erişim Tarihi: 18.01.2016)
- [14] Anonim, Yenilenebilir Enerji Küresel Durum Raporu 2015, [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-SR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-SR2015_Onlinebook_low1.pdf), (Erişim Tarihi: 18.01.2016)
- [15] Anonim, TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2014 Türkiye Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı, (Erişim Tarihi: 18.01.2016)
- [16] Anonim, Güç Kalitesi Milli Projesi, [www.guckalitesi.gen.tr](http://www.guckalitesi.gen.tr), (Erişim Tarihi: 19.01.2016)
- [17] Erişti, H., Demir, Y., *Gerçek zamanlı güç kalitesi izleme sistemleri ile elektrik dağıtım sistemlerindeki güç kalitesinin incelenmesi*. Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 251-356, 2011.
- [18] Saadat H., Power Systems Analysis, McGraw Hill, Boston, 1999.

- [19] Chopra, L., Kaur, R., Economic load dispatch using simple and refined Genetic algorithm. *International J of Advances in Engineering & Technol (IJAET)*, 5: 584-590, 2012.
- [20] Haghghi, S. A., Seifi, R. A., Niknam, T., A modified teaching–learning based optimization for multi-objective optimal power flow problem. *Energy Convers. and Manag* 77: 597-607, 2012.
- [21] He, ZHU., Jianyuan, X., Xiaoyu, W., *Active power output calculation of wind farms connected to power grids based on fuzzy chance-constrained programming*. 4. IEEE Endüstriyel Elektronik ve Uygulamaları Konferansı, Singapur, s. 2141 – 2144, 25-27 Mayıs 2009.
- [22] Anonim, Elektrik İşleri Etüt İdaresi, [http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar\\_rgi.html](http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_rgi.html), (Erişim Tarihi: 20.01.2016)
- [23] He, X. ve Wang, W., Fuzzy multiobjective optimal power flow based on modified artificial bee colony algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014(961069): 1-12, 2014.
- [24] Sun, Y, Lam, A.Y.S, Li., VOK, Xu, J., Yu, J.J.Q., *Chemical reaction optimization for the optimal power flow problem*. 2012 IEEE Gelişimsel Hesaplama Kongresi (CEC2012), Brisbane, Australya, s.10-15, 10-15 Haziran.
- [25] Farahmand, H., Warland, L., Hernando, H. D., The impact of active power losses on the wind energy exploitation of the North Sea. *Energy Procedia* 53:70 – 85, 2014.
- [26] Huang, M. C., Huang. C. Y., Combined differential evolution algorithm and ant system for optimal reactive power dispatch. *Energy Procedia* 14:1238 – 1243, 2012.

- [27] Zhu, T.X., A new approach to active power calculation using wavelet coefficients. IEEE Trans on Power Syst, 21: 435-437, 2006.
- [28] Smita, P., Vaidya, B.N., *Optimal power flow by particle swarm optimization for reactive loss optimization*. 2012 IEEE Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Bilimleri Öğrenci Konferansı, 1-2 Mart 2012, s. 1-4, Bhopal, Hindistan.
- [29] El Ela, A.A.A., Abido, M.A. ve Spea, S.R., Differential evolution algorithm for optimal reactive power dispatch”, Electric Power Systems Research (EPSR), Cilt 81, No 2, 458-464, 2011.
- [30] Fernandes, R.A., Optimal reactive power flow for improved system operations. International J of Elect Power & Energy Syst 2: 133–139, 1980.
- [31] Hetzer, J., Yu, C. D., Bhattarai, K., An economic dispatch model incorporating wind power. IEEE Trans. on Energy Convers 23: 603-611, 2008.
- [32] Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., Roy, J., Schaeffer, R., Sims, R., Smith, P., Wisner, R., İklim Değişikliği 2014: İklim Değişikliğinin Azaltılması 5. Değerlendirme Raporu, 2014. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf), (Erişim Tarihi: 21.01.2016).
- [33] Krey, V., O, Masera., Blanford, G., Bruckner, T., Cooke, R., Fisher-Vanden, K., Haberl H., Hertwich, E., Kriegler, E., Mueller, D., Paltsev, S., Price, L., Schlömer, S., Ürge-Vorsatz, D., Van Vuuren, D., Zwickel T., İklim Değişikliği 2014: İklim Değişikliğinin Azaltılması 5. Değerlendirme Raporu, Ek:2 Ölçüm ve Metodoloji, 2014. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf), (Erişim Tarihi: 21.01.2016).
- [34] Stott, B., Alsac, O., Fast decoupled load flow. IEEE Trans on Power Apparatus and Syst 93: 859-869, 1974.

- [35] Chandrasekharan, E., Potti, M.S.N., Sreeramakumar, R., Mohandas, K. P., Improved general purpose fast decoupled load flow. *Electrical Power and Energy Syst* 24: 481-488, 2002.
- [36] Pandya, K.S., Joshi, S.K. Survey of optimal power flow methods. *J of Theoretical and Applied Information Technol*, 4(5): 450-458, 2008.
- [37] Abou, El Ela A.A., Abido, M.A., Spea, S.R., Optimal power flow using differential evolution algorithm. *Electric Power Syst Res* 80: 878–885, 2010..
- [38] Sivasubramani, S., Swarup, S. K., Multi-objective harmony search algorithm for optimal power flow problem. *Int. J. of Elect. Power & Energy Syst* 33(3): 745–752, 2011.
- [39] Duman, S., Güvenç, U., Sönmez, Y., Yörükeren, N., Optimal power flow using gravitational search algorithm. *Energy Convers. and Manag* 59: 86–95, 2012.
- [40] Adaryani, M.R. Karami, A., Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem., *International J. of Elect. Power & Energy Syst.* 53:219-230, 2013.
- [41] Shengsong, L., Min, W., Zhijian, H., Hybrid algorithm of chaos optimisation and SLP for optimal power flow problems with multimodal characteristic. *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.* 150:543-547, 2003.
- [42] Liang, H. R., Tsai, R. S., Chen, T. Y., Tseng, T. W., Optimal power flow by a fuzzy based hybrid particle swarm optimization approach. *Electric Power Syst.* 81:1466–1474, 2011.
- [43] Li, Y., Wang, Y., Li, B., A hybrid artificial bee colony assisted differential evolution algorithm for optimal reactive power flow. *Int. J. of Elect. Power & Energy Syst* 52:25–33, 2013.

- [44] Joorabian, M., Afzalan, E., Optimal power flow under both normal and contingent operation conditions using the hybrid fuzzy particle swarm optimisation and Nelder–Mead algorithm (HFPSO–NM). *Applied Soft Comput* 14:623–633, 2014.
- [45] Elattar, E. E., A hybrid genetic algorithm and bacterial foraging approach for dynamic economic dispatch problem. *Int. J. of Elect. Power & Energy Syst* 69:18–26, 2015.
- [46] Feijoo, A.E., Cidris, J., Modeling of wind farms in the load flow analysis. *IEEE Transact. on Power Syst.* 15(1):110-115, 2000.
- [47] Vicente Briceno, W.C., Caire, R. Hadjsaid, N., Probabilistic load flow for voltage assessment in radial systems with wind power. *International J. of Electrical Power & Energy Syst.*, 41(1):27–33, 2012.
- [48] Panda, A., Tripathy, M., Optimal power flow solution of wind integrated power system using modified bacteria foraging algorithm. *International J. of Electrical Power & Energy Syst.* 54:306-314, 2014.
- [49] Hsu, C. T., Kang, M. S., Chen, C. S., Design of adaptive load shedding by artificial neural networks. *Generation, Transmission and Distribution IEE Proceedings*, 152(3):415-421, 2005.
- [50] Anonim, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, 2014, [//www.tureb.com.tr/attachments/article/169/Turkiye\\_Ruzgar\\_Enerjisi\\_istatistik\\_Raporu\\_Ocak\\_2014.pdf](http://www.tureb.com.tr/attachments/article/169/Turkiye_Ruzgar_Enerjisi_istatistik_Raporu_Ocak_2014.pdf) (Erişim Tarihi: 24.02.2015)
- [51] Anonim, Vestas Rüzgar Türbinleri, [http://www.vestas.com/Files/Filer/EN/Brochures/Vestas\\_V\\_90-3MW-11-2009-EN.pdf](http://www.vestas.com/Files/Filer/EN/Brochures/Vestas_V_90-3MW-11-2009-EN.pdf) (Erişim Tarihi: 24.02.2015)
- [52] Anonim, Nordex Rüzgar Türbinleri, [http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Gamma/Nordex\\_Gamma\\_N100\\_en.pdf](http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Gamma/Nordex_Gamma_N100_en.pdf) (Erişim Tarihi: 24.02.2015)

- [53] Chandram, K., Subrahmayam, N., Sydulu, M., Equal embedded algorithm for economic dispatch with generator constraints. J of Elect and Electronics Eng, Istanbul University, 9(1):833-840, 2009.
- [54] Mathews, J. H., Fink, K.D., Numerical Methods Using MATLAB. Prentice Hall, New Jersey, 2004.
- [55] Chandram, K., Subrahmanyam, N., Sydulu, M., Equal embedded algorithm for economic load dispatch problem with transmission losses. International J. of Electrical Power & Energy Syst.33(3):500-507, 2011.
- [56] Storn, R., Price, K., Differential Evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. J. of Global Optimization. 11(4):341-359, 1997.
- [57] Holland J. H., Genetic algorithms. Scientific American J. 267:66-72, 1992.
- [58] Michalewicz, Z., Schoenauer, M., Evolutionary computation for constrained parameter optimization problems. Evolutionary Comput., 4:1-32, 1996.
- [59] Koziel, S., Michalewicz, Z., *A decoder-based evolutionary algorithm for constrained parameter optimization problems*. Doğadan 5. Paralel Problem Çözme Bildirileri, Amsterdam, Hollanda, 27-30 Eylül 1998.
- [60] Melanie, M., An introduction to genetic algorithms. Genetic algorithms in problem solving. MIT University Press, London, England, 1998.
- [61] Rao, V. R., Patel, V., An elitist teaching-learning-based optimization algorithm for solving complex constrained optimization problems. International J. of Ind. Eng. Comput. 3:535-560, 2012.

- [62] Rao, R.V., Savsani, V.J., Vakharia, D.P., Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer Aided Design*, 43:303–315, 2011.
- [63] Rao, R.V., Gajanan, W., Optimization of thermal performance of a smooth flat-plate solar air heater using teaching–learning-based optimization algorithm. *Cogent Engineering* 2(1):1-28, 2015.
- [64] Rao, R.V., More, K.C., Advanced optimal tolerance design of machine elements using teaching-learning-based optimization algorithm. *Production & Manufacturing Research*. 2(1):71-94, 2014.
- [65] Dede, T., Optimum design of grillage structures to LRFD-AISC with teaching-learning based optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 48(5), 955-964, 2013.
- [66] Güçyetmez, M., Çam, E., Lüy, M., Barışçi, N., *Application of TLBOA Algorithm for Environmental-Friendly Power Flow Studies*. 2nd International Symposium On Environment and Morality ISEM'14, Adıyaman-Turkey, pp. 127-134, 24-26 Oct 2014.
- [67] Çetin, E., Daldaban, F., *Minimum maliyet için güç santrallerinin kontrolü*. TOK2012 Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı. Niğde-Türkiye, s.11-13, 11-13 Ekim 2012.
- [68] Güçyetmez, M., Çam, E., A New Hybrid Algorithm with Genetic-Teaching Learning Optimization (G-TLBO) Technique for Optimizing of Power Flow in Wind-Thermal Power Systems, *Electrical Engineering*, Springer, 1-13, 2015.
- [69] Güçyetmez, M., Çam, E., *Aynı Güç Üretimi İçin Termal ve Rüzgar Baralarının Yakıt Maliyeti ve Emisyon Açısından Karşılaştırılması*. 3. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, İzmir, Türkiye, s. 49-56, 8-10 Ekim 2015.

- [70] Leung, Dennis Y.C., Caramanna, G., Valer Maroto, Mercedes M., An Overview of Current Status of Carbondioxide Capture and Storage Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 426–443, 2014.
- [71] Kherfane, N., Kherfane, R.L., Younes, M., Khodja, F., Economic and Emission Dispatch with Renewable Energy Using HSA. *Energy Procedia, Proc. of TMREES14*. 50: 970–979, 2014.





## EKLER

### EK 1. GAUSS-SEIDEL ALGORİTMASI SÖZDE KODU (PSEUDO KODU)

Gauss-Seidel algoritmasına ait sözde kod dizilimi (Pseudo Kod) aşağıdaki şekildedir.

- 1.Adım: Başla
- 2.Adım: Bara giriş değerlerini hesapla
- 3.Adım: while (tolerans $>10^{-5}$ )
4. Adım: for (I=2:nbus)
  - Toplam akımı hesapla
  - Yük değerini hesapla
  - Bara gerilimini hesapla
  - end
5. Adım: end
- 6.Adım: Yaz, Analiz Sonuçları

## EK 2. NEWTON-RAPHSON ALGORİTMASI SÖZDE KODU

Newton-Raphson algoritmasına ait sözde kod dizilimi (Pseudo Kod) aşağıdaki şekildedir.

1. Adım: Bara değerlerini gir. IEEE 30 bus

2. Adım: while (Tol>1e-5)

3. Adım: Aktif ve Reaktif Güç Hesapla

for i=1:nbus

P(i) aktif güç hesapla

Q(i) reaktif güç hesapla

end

4. Adım: Jacobian matrisini hesapla

for i=1:nbus-1

RealPowAngles

J1=Aktif Güç Açıları

RealPowVoltages

J2=Aktif Güç Gerilimleri

ReactivePowAngles

J3=Reaktif Güç Açıları

ReactivePowVoltages

J4=Reaktif Güç Gerilimleri

end

5. Adım

Bara akım giriş değerleri

Hat akım çıkışı

Hat güç çıkışı

Hat kayıpları

Bara güç girişleri

End

6. Adım: Yaz, Analiz Sonuçları

### EK 3. HIZLI ÇÖZÜMLEMELİ GÜÇ AKIŞ ALGORİTMASI SÖZDE KODU

1. Adım: Başla
2. Adım: Başlangıç değerlerini belirle
3. Adım:
  - for (I=1:nbus)
  - Bara admitans matrisini bul
  - end
4. Adım for (I=1:nbus)
  - Diagonal elemanlar için Bara admitans matrisini hesapla
  - End
5. Adım Bara admitans matrisini yeniden oluştur
6. Adım while (flag==1)
7. Adım for (I=1:nbus)
  - Aktif güç hesapla
  - Reaktif güç hesapla
  - end
  - for (I=1:nbus-1)
  - gerilim ve güç açısı hesapla
  - end
8. Adım if flag==1 ise 6. Adım
  - flag==0
9. Adım Yaz, gerilim, bara açısı
10. Adım Son

## EK 4. EŞİT GÖMÜLÜ ALGORİTMA SÖZDE KODU

1. Adım: Giriş değerlerini oku

Generatörlerin yakıt maliyet verisi

BLoss Katsayıları

Güç Talebi

2. Adım: Tüm generatörler için maksimum ve minimum güçlerinde lambda değerlerini hesapla ve çıkış güçlerini artan sırada düzenle.

3. Adım: Tüm lambda değerlerini kullanarak çıkış güçleri ve iletim kayıplarını hesapla. Tüm lambda değerleri, çıkış güçleri ve iletim kayıplarını PPD tablosunda formüle et. Eğer güç talebi SOP ile uyuőuyorsa bunu optimum çözüm olarak kabul et. Aksi taktirde Adım 4'e git.

4. Adım: Modifiye önceden hazırlanmış güç talebi tablosunu (MPPD) elde et.

5. Adım: Gerekli güç talebinde azaltılmış MPPD (RMPPD) tablosunu elde et.

6. Adım: Newton ileri interpolasyon yöntemi ile RMPPD tablosundan Çıkış gücünün lambdaya göre Pay ve payda ifadelerini bul.

7. Adım: Gerekli güç talebinde güç denge eőitlięinden Müller yöntemini kullanarak lambdayı hesapla.

8. Adım: Çözümü elde et.

## EK 5. FARK GELİŞİM ALGORİTMASI SÖZDE KODU

Fark Gelişim Algoritması (FGA) için sözde kod dizilimi (Pseudo Kod) aşağıdaki şekildedir.

1. Adım: Başla
2. Adım: Amaç fonksiyonu, FGA değişkenleri ve FGA parametrelerini tanımla
3. Adım: Başlangıç kromozomlarını üret
4. Adım: while (Durdurma kriteri=H)
5. Adım: Fark operatörlerine mutasyon işlemi yap
6. Adım: Çaprazlama işlemi yap
7. Adım: Seçim işlemi yap
8. Adım: Sonuçları hafızada tut
9. Adım: Durdurma kriteri sağlanmadıysa Adım 4'e git.
10. Adım: Sonuçları yaz
11. Adım: Son

## EK 6. TASARLANAN G-ÖÖTO ALGORİTMASI SÖZDE KOD DİZİLİMİ

### **/\*Tasarlanan Algoritmanın Genetik Kısmı\*/**

1. Adım: Amaç fonksiyonu, GA değişkenleri ve GA parametrelerini gir

2. Adım: for i=1:iterasyon sayısı

```
        turnuva fonk ();  
        rulet fonk ();  
        çaprazlama fonk ();  
        gbest=amacfonk ();  
        if (sonuc<gbest)  
            gbest=sonuc;  
        end  
    end
```

### **/\*Tasarlanan Algoritmanın Fark Değer Kısmı\*/**

3. Adım: Toplam guc= sum (sonuc);

4. Adım: fark= |Toplam guc-talep edilen yuk|;

5. Adım: for i= 1:40;

```
        if fark(i)>(Pmax-Pmin)(i);  
            farkPmax(i)=(Pmax-Pmin)(i);  
        end  
        if fark(i)<min(Pmax)(i)  
            farkPmin(i)=a*Pmin;  
        end  
    end
```

### **/\*Tasarlanan Algoritmanın ÖÖTO Kısmı\*/**

6. Adım: Amaç fonksiyonu, ÖÖTO değişkenleri ve ÖÖTO parametrelerini tanımla

7. Adım: for i=1:40;

```
    TLBOmin=farkPmin(i);
```

```
    TLBOmax=farkPmax(i);
```

```
end for
```

8. Adım: Amaç fonksiyonu fmaliyet hesapla

```
minsonuc=amacfonk();
```

9. Adım: for

```
    ogretmen belirle();
```

```
    öğrenci belirle();
```

```
    sonuc=amacfonk();
```

```
    if (sonuc<minsonuc)
```

```
        minsonuc=sonuc;
```

```
    end
```

```
end for
```

10. Adım: 'minsonuc' yazdır

11. Adım: Bitir

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet GÜÇYETMEZ  
Doğum Tarihi : 20/03/1980  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu : (Kurum ve Yıl)  
Lisans : Erciyes Üniversitesi, 2003  
Yüksek Lisans : Erciyes Üniversitesi, 2005

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi – 2006-2009  
Ahi Evran Üniversitesi – 2009-

Yayınları (SCI) :

\* Güçyetmez, M., Çam, E., A New Hybrid Algorithm with Genetic-Teaching Learning Optimization (G-TLBO) Technique for Optimizing of Power Flow in Wind-Thermal Power Systems, *Electrical Engineering*, Springer, 1-13, 2015.

Yayınları (Diğer):

\*Güçyetmez, M., Çam, E., Lüy, M., Barışçı, N., *Application of TLBOA Algorithm for Environmental-Friendly Power Flow Studies*. 2nd International Symposium On Environment and Morality ISEM'14, Adıyaman-Turkey, pp. 127-134, 24-26 Oct 2014.

\*Güçyetmez, M., Çam, E., *Aynı Güç Üretimi İçin Termal ve Rüzgar Baralarının Yakıt Maliyeti ve Emisyon Açısından Karşılaştırılması*. 3. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, İzmir, Türkiye, s. 49-56, 8-10 Ekim 2015.

\* Güçyetmez, M., Çam, E., 'Küçük Rüzgâr Türbinleri ve Bir Örnek Uygulama', Elektrik-Elektronik Mühendisliği Günleri (EEMG), Odtü Kongre ve Seminer Salonu-Ankara, 29-30 Eylül-01 Ekim 2011, 12-15.



Araştırma Alanları : Güç Akış Analizi, Rüzgâr Enerjisi, Optimizasyon,  
Yenilenebilir Enerji Sistemleri, Elektrik Makinaları.

