



**GİRDAP ARAMA ALGORİTMASI KULLANARAK OPTİMAL GÜÇ AKIŞI
PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ**

Ömer AYDIN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2017

Ömer AYDIN tarafından hazırlanan “GİRDAP ARAMA ALGORİTMASI KULLANARAK OPTİMAL GÜÇ AKIŞI PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof.Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Doç.Dr. Murat Hüsnü SAZLI

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç.Dr. Hasan Şakir BİLGE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 26/05/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ömer AYDIN

26/05/2017

GİRDAP ARAMA ALGORİTMASI KULLANARAK OPTİMAL GÜÇ AKIŞI PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ömer AYDIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2017

ÖZET

Bu tez, güç sistemlerinde optimal güç akışı probleminin girdap arama algoritması ile çözümünü ele almaktadır. Yakıt maliyeti, gerilim profilinin geliştirilmesi, kuadratik yakıt maliyeti, valf etkili kuadratik yakıt maliyeti, gerilim kararlılık geliştirme, arıza kısıtlamaları durumunda gerilim kararlılık geliştirme, emisyon maliyeti, aktif güç kaybının minimizasyonu ve güç sistemlerine yenilenebilir enerji üretim santrallerinin eklenmesi durumunda yakıt maliyeti minimizasyonu amaç fonksiyonları optimize edilmiştir. Optimizasyon işlemleri yapılırken güç sisteminin kısıtları göz önünde bulundurulmuş ve sonuçlar bu kısıtlar dahilinde elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında kullanılan çözüm yönteminin yeterlilik, hız ve yakınsama açısından üstünlüğü gözlemlenmiştir. Günümüzde oldukça büyük çapta olan gerçek güç sistemlerinin planlama ve işletilmesinde bu yöntem kullanılarak maliyetler ve emisyon en aza indirgenebilir.

Bilim Kodu : 90515
Anahtar Kelimeler : Optimal güç akışı, sezgisel algoritmalar, güç sistem analizi
Sayfa Adedi : 83
Danışman : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

THE SOLUTION OF OPTIMAL POWER FLOW PROBLEM USING VORTEX SEARCH ALGORITHM

(M. Sc. Thesis)

Ömer AYDIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2017

ABSTRACT

This thesis deals with the solution of the optimal power flow problem in power systems by using vortex search algorithm. Objective functions consist of fuel cost, voltage profile enhancement, quadratic fuel cost, quadratic fuel cost including valve effects, voltage stability improvement, voltage stability improvement under contingency conditions, emission cost, active power loss and fuel cost minimization in power systems incorporating renewable energy are optimized. The constraints of the power system were taken into consideration while the optimization procedures were carried out and the results were obtained within these constraints. The obtained results clearly demonstrate the superiority of the solution method that we used when compared with the studies in the literature in terms of sufficiency, speed and convergence characteristic. By using this method in the planning and operation of real power systems, which are now quite large in size, the costs and emission can be minimized.

Science Code : 90515

Key Words : Optimal power flow, heuristic algorithms, power system analysis

Page Number : 83

Supervisor : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her safhasında değerli bilgi ve birikimi ile bana destek olan hocam, sayın Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na, çalışmamın başından beri beni yönlendiren sayın hocam Öğr. Gör. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN'a, yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. İbrahim EKE'ye ve Yrd. Doç. Dr. Serhat DUMAN'a saygı ve teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım boyunca manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜÇ AKIŞI	7
2.1. Güç Akışı Analizinin Tanımı	7
2.2. Güç Akışı Analizinin Matematiksel Tanımı	8
2.2.1. Bara admitans matrisi	8
2.2.2. Güç akışı denklemleri	11
2.2.3. Newton-Raphson çözüm yöntemi.....	13
3. OPTİMAL GÜÇ AKIŞI.....	17
3.1. Optimal Güç Akışı Probleminin Matematiksel Tanımı	18
3.1.1. Eşitlik kısıtları	18
3.1.2. Eşitsizlik kısıtları	18
4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE YENİLENEBİLİR ENERJİ.....	21
4.1. Rüzgar Enerjisi Santralleri.....	21
4.1.1. Rüzgar türbinleri	21
4.1.2. Rüzgar türbinlerinin güç hesaplamaları	22
4.1.3. Rüzgar istatistikleri ve Weibull dağılımı	24

	Sayfa
5. GİRDAP ARAMA ALGORİTMASI	27
5.1. Girdap Arama Algoritmasının Çalışma Yöntemi.....	27
5.1.1. Başlangıç girdabının merkezini oluşturma	27
5.1.2. Başlangıç girdabının yarıçapını oluşturma	28
5.1.3. Aday çözümler uzayını oluşturma	28
5.1.4. Girdap arama algoritmasının yakınsama mantığı	29
6. YÖNTEM VE SİMULASYON ÇALIŞMASI	33
6.1. IEEE 30 Baralı Test Sistemi	33
6.2. Optimal Güç Akışı Probleminde Minimize Edilen Amaç Fonksiyonları.....	38
6.2.1. Yakıt maliyetinin minimizasyonu	38
6.2.2. Gerilim profilinin geliştirilmesi	40
6.2.3. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu	41
6.2.4. Vana etkili yakıt maliyeti minimizasyonu	44
6.2.5. Gerilim kararlılığının geliştirilmesi	47
6.2.6. Kısıtlılık durumunda gerilim kararlılığının geliştirilmesi	50
6.2.7. Emisyon yakıt maliyeti minimizasyonu.....	52
6.2.8. Aktif güç kaybının minimizasyonu.....	54
6.3. Rüzgar Enerjisi Santralleri Kullanılması Durumunda Amaç Fonksiyonları	56
6.3.1. Bir adet rüzgar enerjisi santrali kullanımı durumu	56
6.3.2. Üç adet rüzgar enerjisi santrali kullanımı durumu.....	58
6.3.3. Beş adet rüzgar enerjisi santrali kullanımı durumu	60
6.3.4. Gerilim profilinin geliştirilmesi	62
6.3.5. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu.....	64
6.3.6. Vana etkili yakıt maliyeti minimizasyonu	66
	Sayfa

6.3.7. Gerilim kararlılığının geliştirilmesi	66
6.3.8. Emisyon yakıt maliyetinin minimizasyonu	66
6.4. Algoritmada Kullanılan Parçacık Sayısının Artırılması	72
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	83



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. Üretim üniteleri karakteristikleri	33
Çizelge 6.2. IEEE 30 baralı test sistemi hat parametreleri.....	35
Çizelge 6.3. Baraların aktif güç yüklenmeleri	36
Çizelge 6.4. Baraların Reaktif güç yüklenmeleri	36
Çizelge 6.5. Üretim baralarının aktif ve reaktif güç limitleri.....	37
Çizelge 6.6. Kontrol değişkenlerinin limitleri	37
Çizelge 6.7. Üretim baralarının yakıt maliyeti katsayıları	38
Çizelge 6.8. Yakıt maliyeti minimizasyonu sonuçları ve literatür karşılaştırması	40
Çizelge 6.9. ilk iki üretim ünitesi için parçalı kuadratik yakıt maliyeti katsayıları	42
Çizelge 6.10. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu sonuçları ve bu sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması	43
Çizelge 6.11. Vana etkisine sahip üretim ünitelerinin minimum ve maksimum limitleri ve maliyet katsayıları	45
Çizelge 6.12. Vana etkisinin göz önünde bulundurulduğu durumda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması	46
Çizelge 6.13. Gerilim kararlılığının artırılması durumunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların literatür örnekleri ile karşılaştırılması	49
Çizelge 6.14. Kısıtlılık altında gerilim kararlılığının artırılması durumunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların literatür örnekleri ile karşılaştırılması ..	51
Çizelge 6.15. Emisyon yakıt maliyeti amaç fonksiyonunun minimizasyonunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların literatür karşılaştırması.....	53
Çizelge 6.16. Aktif güç kaybı minimizasyonu sonucunda elde edilen sonuçlar ve literatür karşılaştırılması.....	55
Çizelge 6.17. OGA probleminin çözümünde bir adet rüzgar enerjisi santrali kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar	57
Çizelge 6.18. OGA probleminin çözümünde üç adet rüzgar santrali kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar	59

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.19. OGA probleminin çözümünde beş adet rüzgar enerjisi santrali kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar	61
Çizelge 6.20. Rüzgar enerjisi santrallerinin entegre edilmesi durumunda gerilim profilinin geliştirilmesi amaç fonksiyonuna ait sonuçlar.....	63
Çizelge 6.21. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonunda elde edilen sonuçlar	65
Çizelge 6.22. Vana etkili yakıt maliyeti optimizasyonu sonucunda elde edilen sonuçlar	67
Çizelge 6.23. Gerilim kararlılığının optimizasyonunda elde edilen sonuçlar	69
Çizelge 6.24. Emisyon değerinin minimizasyonunda elde edilen sonuçlar	71
Çizelge 6.25. Parçacık sayısının artırılması durumunda elde edilen sonuçlar	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Örnek 4 baralı güç sistemi tek hat şeması	9
Şekil 2.2. Örnek güç sistemi admitans şeması	9
Şekil 4.1. Bir rüzgar türbininin rüzgar hızına bağlı türbin gücü grafiği	23
Şekil 4.2. Rüzgar hızı frekans dağılımı.....	25
Şekil 5.1. GAA içerisinde oluşturulan çözüm çemberleri	30
Şekil 5.2. Girdap arama algoritması akış diyagramı.....	31
Şekil 6.1. IEEE 30 baralı test sistemi tek hat şeması	34
Şekil 6.2. Yakıt maliyeti minimizasyonu yakınsama grafiği	39
Şekil 6.3. Gerilim profilinin iki durum için karşılaştırılması.....	41
Şekil 6.4. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu yakınsama grafiği.....	43
Şekil 6.5. Vana etkisinin olduğu ve olmadığı durumlarda maliyet-üretilen güç grafiği.	44
Şekil 6.6. Vana etkili durum için toplam maliyetin yakınsama grafiği	45
Şekil 6.7. Kısıtlılık durumunda gerilim kararlılığının geliştirilmesi amaç fonksiyonu İçin yakıt maliyeti yakınsama grafiği	50
Şekil 6.8. Aktif güç kaybı minimizasyonu yakınsama grafiği	54
Şekil 6.9. Bir adet rüzgar santrali kullanılması durumunda yakınsama grafiği.....	58
Şekil 6.10. Üç adet rüzgar santrali kullanılması durumunda yakınsama grafiği	60
Şekil 6.11. Beş adet rüzgar santrali kullanılması durumunda yakınsama grafiği.....	62
Şekil 6.12. Gerilim profili geliştirme amaç fonksiyonu maliyet yakınsama grafiği.....	64
Şekil 6.13. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti fonksiyonu yakınsama grafiği	66
Şekil 6.14. Vana etkili yakıt maliyeti minimizasyonu yakınsama grafiği	68
Şekil 6.15. Emisyon değerinin yakınsama grafiği	70
Şekil 6.16. Parçacık sayısının artırılması durumunda yakınsama grafiği.....	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

\$	Dolar
sa	Saat
m ²	Metrekare
MVAR	Mega volt amper reaktif
MW	Mega Watt

Açıklamalar

Kısaltmalar

BS	Bara sayısı
FACTS	Değişken alternatif akım iletim sistemi
GAA	Girdap arama algoritması
HS	Hat sayısı
IEEE	Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü
NÜ	Üretim barası sayısı
NY	Yük barası sayısı
PÜ	Üretilen aktif güç
PRY	Rüzgar enerjisinden elde edilen yıllık güç
OGA	Optimal güç akışı
QC	Şönt kapasite
QÜ	Üretilen reaktif güç
SH	Hattaki görünür güç
ŞKS	Şönt kapasite sayısı
TN	Transformatör kademe ayarı
TS	Trafo sayısı
ÜBS	Üretim barası sayısı
WSCC	Western system coordinating council

Açıklamalar



1. GİRİŞ

Dünyada kurulan ilk güç sistemleri elektriğin kullanım oranı az olduğu için küçük çaptaydı. Gün geçtikçe elektrikli alet sayısı ve sanayileşmenin artması elektrik enerjisine olan ihtiyacı artırdı. Bu artış yıllar geçtikçe hiç durmadan devam etti ve günümüzde de devam etmektedir. Elektrik enerjisine olan bu yüksek ilgi neticesinde başlangıçta az sayıda yükten oluşan küçük çaptaki enerji şebekeleri, son yüzyıl içerisinde karmaşık ve çok sayıda yükten oluşan sistemler haline geldiler. Bu da üretim, iletim ve dağıtım konularında çok iyi çalışma gerektirmektedir. Bu gelişmeler neticesinde, güç sistemlerinin planlaması, işletilmesi ve mali olarak dengelenebilmesi zor hale geldi. Bilim insanları planlama, işletme, elektrik piyasasının ekonomik açıdan yönetimini kontrol edebilmek ve bu karmaşık güç sistemlerinde üretilen gücü tüketiciye ucuz ama sürekli olarak sunabilmek için çözüm aramaya başladı.

Tüm bu zorluklar ile baş etmenin en verimli yolunun güç akışının optimum şekilde sağlanması olduğunu öne süren Carpentier, 1962 yılında optimal güç akışı (OGA) problemini literatüre kazandırdı [1]. OGA probleminin amacı, sistemlerin fiziksel sınırlarını aşmadan ve güvenliğinden ödün vermeden sistemin çalışabileceği optimum durumu elde etmektir. OGA optimum durumu bulmanın yanı sıra sistem için farklı amaç fonksiyonlarını da minimize etmeye çalışmaktadır. Yıllar önce, araştırmacılar OGA problemini daha hızlı çözebilmek için doğru akım güç akışı kullanarak sistem tasarımı geliştirdiler [2]. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi neticesinde OGA'nı daha karmaşık ama daha doğru olan alternatif akım güç akışı ile çözmeye çalıştılar.

OGA'nda amaç fonksiyonları da zamanla değişime uğradı. Başlangıçta, bilim insanları sadece kayıpları minimize etmeyi amaç edinmişti [3]. Fakat, kayıpların az olması maliyetin de düşük olması anlamına gelmez çünkü elektrik üretiminde sadece tek bir kaynak kullanılmamaktadır ve kullanılan her kaynağın kendine özgü maliyeti, oranı ve verimliliği bulunmaktadır [4]. Günümüzde maliyet en büyük kaygı haline geldiği için en popüler amaç fonksiyonu maliyetin minimizasyonudur. Fakat farklı amaçlar doğrultusunda baralardaki gerilimlerin kararlılığını düzenleme, karbon emisyonunu azaltma gibi amaç fonksiyonları kullanılabilir. Farklı amaç fonksiyonlarına ağırlık verilmesi durumlarında amaçlanan minimizasyon sağlanabilir fakat maliyet sonuçlarında artış olabilir.

Başlangıçta, OGA probleminin çözümünü elde etmek için çeşitli matematiksel yöntemler kullanıldı. Bu yöntemlere örnek olarak; gradient yöntemi [4], kuadratik ve lineer programlama [5], powell metodu [6], lagrange çarpanı ve hessian matrisi [7], ardışık kısıtsız minimizasyon tekniği [8], lineer programlama [9], iç nokta yöntemi [10], Newton-Raphson [11] yöntemleri verilebilir. Fakat, nümerik analiz yöntemleri, lineer olmayan, kompleks ve büyük çaptaki problemlerde yeterince yakınsayamama, global optimumu bulmayı garanti edememeleri, başlangıç koşullarına bağımlılıkların fazla olması ve problemin formülasyonunda yapılacak olası değişikliklere uyarlanmalarının zor olması gibi nedenlerden dolayı günümüz karmaşık sistemlerinin çözümlerinde yetersiz olmaya başladılar. Bu problemlerin giderilememesi ve son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesi neticesinde OGA probleminin çözümü için klasik çözüm yöntemlerinin yerine sezgisel algoritmalar kullanılmaya başladı.

Sezgisel algoritmalar, genellikle doğadaki canlıların davranışları, biyolojik yapılarının özellikleri veya fizik kanunlarının doğadaki yansımalarından esinlenerek oluşturulmuştur. Bu algoritmaların birçoğu, OGA probleminin çözümünde de kullanılmıştır. Örnek verecek olursak 2002 yılında Abido, balık ve kuş sürülerinin yiyecek arama içgüdülerinden esinlenerek geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonunu kullanarak, IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde yakıt maliyeti, gerilim profil geliştirme ve gerilim kararlılık geliştirme fonksiyonlarını minimize etti [12]. 2003 yılında Roa-Sepulveda, demir tavlama işleminde parçacıkların ısıtılıp soğutulması işleminden esinlenerek geliştirilmiş benzetilmiş tavlama algoritmasını kullanarak IEEE 6 ve 30 baralı test sistemleri üzerinde yakıt maliyeti minimizasyonu gerçekleştirdi [13]. 2004 yılında ise, verilen ilgili referansta, evrimsel süreç ve genetik mutasyonların işleyişinden yola çıkarak geliştirilmiş genetik algoritma IEEE 6 baralı test sistemi üzerinde uygulanarak yakıt maliyeti minimize edildi [14]. 2005 yılında yapılan bir diğer çalışmada karıncaların yiyecek bulmada sergiledikleri davranışlardan yola çıkarak oluşturulmuş karınca kolonisi algoritmasından yararlanılarak, Cezayir 59 baralı güç sistemi üzerinde yakıt maliyeti minimize edildi [15]. 2010 yılına geldiğimizde, OGA problemi için yapılan bir çalışmada genetik algoritmaya benzeyen fakat genetik algoritmadan farklı olarak mutasyon ve klasik çaprazlamaların yerine özel diferansiyel operatörler kullanarak kromozomlardan yeni nesil elde eden diferansiyel gelişim algoritmasından yararlanılarak, IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde yakıt maliyeti, gerilim profil geliştirme ve gerilim kararlılık geliştirme fonksiyonları minimize edildi [16]. 2011 yılında Türkiye’de yapılan bir çalışmada Derviş Karaboğa tarafından geliştirilmiş, arıların

yiyecek bulmada birbirlerine yiyeceğin konumunu, değer seviyesini ve gidiş yolunu anlattıkları davranışlarına dayanan kaotik yapay arı kolonisi algoritması IEEE 30 baralı test sistemine uygulandı ve yakıt maliyeti minimize edildi [17]. 2011 yılında yayımlanan bir makalede, kurbağaların besin aramada evrimsel olarak gelişmesini taklit eden kurbağa algoritması kullanılarak, IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde yakıt maliyeti minimizasyonu, emisyon minimizasyonu ve yakıt maliyeti ile emisyon değerinin aynı anda minimizasyonu fonksiyonları gerçekleştirildi [18]. 2012 yılında Türkiye’de yapılan bir makalede, yer çekimi ve kütle çekim konularını içine alan Newton kanunlarına dayanarak geliştirilmiş yer çekimi arama algoritması kullanılarak, yakıt maliyeti, gerilim profilinin geliştirilmesi, gerilim kararlılığının geliştirilmesi, gerilim kararlılığının kısıtlılık durumunda geliştirilmesi, parçalı kuadratik yakıt maliyeti ve valf etkili kuadratik yakıt maliyeti fonksiyonları minimize edildi [19]. 2012 yılında, çözüm uzayındaki tam sayıların, tam sayılar kümesindeki en büyük ve en küçük değerlerin arasında kalan herhangi bir reel sayıyı alabilecek şekilde gevşetilmesine dayanan dal-sınır algoritması kullanılarak yakıt maliyeti minimizasyonu PowerWorld 6 baralı, MATPOWER caseww6 ve case9, New England 39 baralı, IEEE 14, 30, 57 ve 118 baralı test sistemleri üzerinde gerçekleştirildi [20]. 2014 yılında IEEE 30 ve 118 baralı test sistemleri üzerinde yakıt maliyeti, gerilim profili geliştirme, gerilim kararlılık geliştirme, kısıtlılık durumunda gerilim kararlılık geliştirme, parçalı kuadratik yakıt maliyeti ve valf etkili yakıt maliyeti fonksiyonlarını minimize etmek için kullanılmış öğretilme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması çözüm uzayındaki aday çözümleri birer öğrenci, en iyi çözüme sahip öğrenciyi ise öğretmen olarak görür ve öğrencilerin bilgi düzeyini artırarak optimum sonucu elde etmeye çalışır [21]. Yine 2014 yılında evrendeki kara deliklerin yer çekimi kanunlarına dayanarak geliştirilmiş kara delik tabanlı optimizasyon algoritması kullanılarak IEEE 30 baralı ve Cezayir 59 baralı güç sistemleri üzerinde yakıt maliyeti, gerilim profili geliştirme, gerilim kararlılık geliştirme, aktif güç kaybı ve reaktif güç kaybı fonksiyonları minimize edildi [22]. 2015 yılında yayımlanmış bir çalışmada kril sürülerinin yemek arayışlarında sergiledikleri davranışlardan esinlenerek literatüre kazandırılmış kril sürüsü algoritması kullanılarak IEEE 26 ve 30 baralı test sistemleri üzerinde yakıt maliyeti, aktif güç kaybı ve gerilim profili geliştirme fonksiyonları çalışılmış [23]. 2015 yılında Hindistan’da yapılan bir çalışmada ülkelerin jeopolitik etkileşimlerden yola çıkarak geliştirilmiş hibrid emperyalist rekabetçi algoritmadan yararlanılarak IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde yakıt maliyeti minimize edildi [24] ve hayvanların doğada grup olarak besin aramasına ve leşçillerin avcılarını takip etmesine dayanan grup besin arama algoritması, valf etkililerinin de göz önünde bulundurulduğu OGA problemine IEEE 26, 30

ve 118 baralı test sistemleri aracılığı ile 2015 yılında uygulandı [25]. 2016 yılında yapılan makalede ateşböceklerinin geceleri salgıladıkları lüsiferin maddesi sayesinde birbirlerini cezbetmelerini ve grup olarak iletişimlerini taklit ederek geliştirilmiş ateşböceği sürü algoritması, IEEE 30 baralı ve Hindistan 75 baralı test sistemleri üzerinde yakıt maliyetini ve emisyon değerini minimize etmek için kullanıldı [26]. 2016 yılında yapılan bir çalışmada çarpışan nesnelerin hareketlerinden yola çıkarak geliştirilmiş çarpışan parçacıklar algoritması, IEEE 30, 57 ve 118 baralı test sistemleri üzerinde OGA problemini çözmek için uygulandı [27]. El bombasının, patladığında etrafa saçtığı şarapnellerin hareketlerini simüle ederek oluşturulmuş bulanık mantıklı patlayan el bombası algoritması 2016 yılında, IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde yakıt maliyeti, gerilim profili geliştirme, gerilim kararlılık geliştirme, emisyon değerini azaltma, aktif güç kaybı ve reaktif güç kaybı amaç fonksiyonlarını minimize etmek için kullanıldı [28]. parçacık sürü optimizasyonuna, iterasyon süresince yaşanan, belli süre sonra yok olan, oluşan yeni liderlerle rekabet etmesini sağlayan lider parçacığı eklenmesiyle oluşturulmuş rekabetçi, yaşanan liderli parçacık sürü optimizasyonu, 2016 yılında IEEE 30 ve 118 baralı test sistemleri üzerinde yakıt maliyeti, aktif güç kaybı ve gerilim profili geliştirme amaç fonksiyonları için kullanıldı [29]. 2016 yılında yapılan OGA probleminin çözümünde sezgisel algoritmaların verimliliğinin geliştirilmesini konu edinen çalışmada, ilk çözüm yöntemi olarak, gelişmiş genetik algoritma ile lineer programlama metodu sentezlendi ve bu yaklaşım ile yakıt maliyetinin ve aktif güç kayıplarının minimizasyonu gerçekleştirildi. İkinci çözüm yöntemi olarak, güç sisteminin alt ve üst limitleri ekonomik dağıtım ve gradyan metodları ile belirlenerek genetik algoritmanın popülasyonu bu limitlere göre belirlendi böylece daha iyi sonuçlar elde edilmeye çalışıldı. İkinci çözüm yönteminde kuadratik yakıt maliyeti, valf etkili yakıt maliyeti ve yasaklanmış çalışma bölgelerindeki yakıt maliyeti etkisinin minimizasyonu fonksiyonları test edildi [30]. 2016 yılında Türkiye’de yapılan bir çalışmada, genetik algoritma gibi mutasyon, çaprazlama ve seleksiyon özellikleri olan fakat mutasyonu ve çaprazlamayı bir önceki nesillerden düzensiz bir rastgeleliğe dayandıran geri izleme algoritması, değiştirilmiş 5 baralı WSCC 9 baralı ve New England 39 baralı test sistemlerinde yüksek gerilim doğru akım OGA probleminde yakıt maliyeti minimizasyonu için kullanıldı [31]. 2016 yılında yapılan bir makalede, bulanık mantık arama algoritması kullanarak IEEE 30, 57 ve 118 baralı test sistemlerinde yakıt maliyeti minimize edildi [32]. 2017 yılında yapılan bir çalışmada, gece kelebeklerinin geceleri gökyüzündeki ışıkları referans alarak yollarını belirlemelerini taklit ederek geliştirilmiş gece kelebeği sürü

algoritması IEEE 30, 57 ve 118 baralı test sistemleri aracılığı ile OGA probleminin çözümü için kullanılmıştır [33].

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle doğru orantılı olarak fosil yakıt kullanımı her alanda arttı. Bu da insanoğlunun çevreye verdiği zararı gün geçtikçe artırdı. Verilen bu zararın önemli bir kısmı da fosil yakıt kullanarak elektrik üretimi yapan tesislerden kaynaklanmaktadır. Fakat bilim insanlarının yaptığı çalışmalar sayesinde elektrik üretimi için alternatif yöntemler geliştirildi. Elektrik üretimi için kullanılan bu yöntemlere örnek olarak; rüzgar, hidrolik, güneş, biyokütle ve jeotermal enerjileri verilebilir. Günümüzde emisyonu ve maliyeti daha fazla azaltmak için fosil yakıt kullanan üretim tesisleri ile yenilenebilir enerji kullanan üretim tesisleri entegre edilmektedir. Son yıllarda, bu entegrasyon işlemiyle oluşturulan sistemler üzerinde de OGA probleminin çözümü araştırılmaya başlandı. Literatürde bu tür çalışmalara örnek olarak, 2000 yılında yapılan çalışmada rüzgar ve hidrolik enerjilerinin konvansiyonel üretim tesisleri ile birlikte kullanımı öngörülmüş ve OGA problemi bu durum sırasında çözülmüş [34], 2013 yılında yapılan bir makalede Cezayir güç sistemine 3 adet rüzgar çiftliğinin bağlandığı varsayılmış ve OGA problemi parçacık sürü optimizasyonu ile yer çekimsel arama algoritmasının hibrid modeli ile çözülmüş [35]. 2015 yılında yapılan bir çalışmada insan bağırsağında yaşayan bakterilerin besin arama yeteneklerine göre doğada yok olmalarını ya da nesillerinin evrimle gelişmesine dayanan besin arayan bakteri algoritması, IEEE 30 baralı sistemine fosil yakıtlı üretim ünitelerinin yanı sıra rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi yapan ünitelerin de eklenmesiyle oluşan entegre bir güç sisteminde OGA problemi çözüldü [36]. 2016 yılında yapılan bir çalışmada besin arayan bakteri algoritmasına genetik algoritmadaki mutasyon stratejilerinin eklenmesiyle oluşturulan hibrid algoritma kullanılarak, rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi yapan ünitelerin de eklendiği IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde, yakıt maliyeti, emisyon maliyeti, aktif güç kaybı ve FACTS cihazlarının eklenmesi durumunda ortaya çıkan maliyet fonksiyonları minimize edildi [37]. 2016 yılında yapılan bir makalede, kuadratik programlama yaklaşımı kullanılarak, IEEE 14 baralı test sistemine rüzgar türbinleri eklenmiş ve rüzgar tahminlerindeki hatalar göz önünde bulundurularak OGA problemi çözüldü [38]. 2016 yılında yapılan bir diğer çalışmada, rüzgar ve güneş enerjisi ile üretim yapan ünitelerin de olduğu IEEE 30 baralı test sistemi kullanılarak, gerçek zamanlı, günlük ve yıllık periyotlar için OGA probleminin çözümü elde edildi [39].

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinin işletilmesini, planlanmasını kolaylaştırmak ve elektriğin tüketiciye en az maliyetle sürekli olarak optimum düzeyde sunulmasını sağlamak amacıyla, daha önce OGA problemine uygulanmamış olan girdap arama algoritması kullanılmıştır. Böylece daha az maliyetli ama kaliteli çözüm aranmıştır. IEEE 30 baralı test sistemindeki üretim birimi, trafo ve hat sayıları orantısı gerçek sistemler ile benzerlik gösterdiği için literatürde en çok kullanılan sistemdir. Bu çalışmada da IEEE 30 baralı test sistemi kullanılmış böylece kullanılan yöntemin güvenilirliği test edilmiş ve literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırma yapılmıştır. OGA probleminde yakıt maliyeti, gerilim profilinin geliştirilmesi, kuadratik yakıt maliyeti, valf etkili kuadratik yakıt maliyeti, gerilim kararlılık geliştirme, arıza kısıtlamaları durumunda gerilim kararlılık geliştirme, emisyon maliyeti, aktif güç kaybı ve rüzgar türbini tarlalarının sisteme entegre edilmesi durumunda yakıt maliyeti amaç fonksiyonları optimize edilmiştir. Optimizasyon işlemi sırasında güç sisteminin trafo, hat, bara gerilimleri ve güvenlik gibi kısıtları göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış ve girdap arama algoritmasının OGA çözümündeki üstünlüğü görülmüştür.

Tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. 2. Bölümde güç akışının çözüm mantığı ve çözümde kullanılan iteratif yöntemler anlatılmış, 3. Bölümde optimal güç akışı hakkında bilgi verilmiştir. 4. Bölümde OGA probleminin çözümünde kullanılan girdap arama algoritmasının çalışma yapısı anlatılmış, son olarak 5. bölümde elde edilen sonuçlar verilerek karşılaştırmalar yapılmış ve değerlendirmeler sunulmuştur.

2. GÜÇ AKIŞI

Teknolojinin hızla gelişmesi neticesinde, günümüz dünyasında elektriğin kullanımı ve elektriğin üretimden tüketiciye ulaştırılmasını sağlayan güç sistemlerinin büyüklüğü artmıştır. Buna ilave olarak, şebekelerde yük olarak görülen tüketicilerin, üretim tesisleriyle farklı yerlerde ve birbirinden uzak olması nedeniyle farklı güç sistemleri birbirine bağlanmıştır. Dünyanın globalleşmesinin sonucu olarak da şebekeler sadece ülke dahilinde değil ülkeler arasında da inşa edilmiş ve ülkelerin enterkonnekte sistemleri birbirine bağlanarak elektrik enerjisinin alışverişi sağlanmıştır. Karmaşık yapıda olan bu sistemler için gerekli hesaplamaların yapılabilmesi için Eş. 2.1’de olduğu gibi lineer olmayan denklem sisteminin çözümü gerekmektedir. Burada A , boyutu büyük olan bir kare matristir.

$$[A][x] = [b] \quad (2.1)$$

Eş. 2.1’den yola çıkarak geliştirilen güç akışı analizleri, güç sistemi çalışmaları için temel kabul edilir. Güç akışı analizleri, güç sistemlerinin çekirdeğini oluşturmaktadır. Bu analizler, şebekelerin planlanmasında, işletilmesinde ve geliştirilmesinde çok önemlidir.

2.1. Güç Akışı Analizinin Tanımı

Bir güç sisteminde, güçleri, gerilimlerin genlikleri, faz açısı veya gücün nasıl dağıtıldığı bilgilerinden en az ikisi kullanılarak sistemde bilinmeyen olarak tanımlanan sisteme ait verilerin bulunması genel olarak yük akışı analizi olarak adlandırılmaktadır. Güç akışı analizi yapılırken sistemlerde 3 tip bara tanımlanır, bunlar: gerilim kontrollü bara, gerilim kontrolü olmayan bara ve salınım barası. Gerilim kontrollü baralar üretim ünitelerinin olduğu baralardır, gerilim kontrolü olmayan baralar yüklerin bulunduğu baralar olarak kabul edilir, salınım barası olarak tanımlanan baralar üretimi, tüketimi ve kayıpları dengelemek için kullanılmaktadır.

Güç sisteminde bilinen veriler kullanılarak düğüm akım ve gerilimleri olan bir devre indirgenir ve çözüm elde edilir. Analiz yapılırken öncelikle, sistemin pasif devre elemanlarının değerleri elde edilir. Ardından, kompleks yüklerin değerleri ve bulunduğu baralar bulunur. Üretimin istenen özellikleri ve eğer varsa kısıtları göz önünde

bulundurularak sistemin matematiksel güç akışı modeli oluşturulur. Bu model baz alınarak güç akışları hesaplanır ve kayıplar dahilinde çözüm aranır. Son olarak elde edilen çözümün kısıtları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. OGA probleminin çözümü için öncelikle eşitliklerin elde edilmesi gereklidir. Ardından değişkenlerin bulunması için yük akışı analizi yapılmalıdır. Bu çalışmada yük akışı analizi yapabilmek için MATPOWER paket programından yararlanılmıştır [40].

2.2. Güç Akışı Analizinin Matematiksel Tanımı

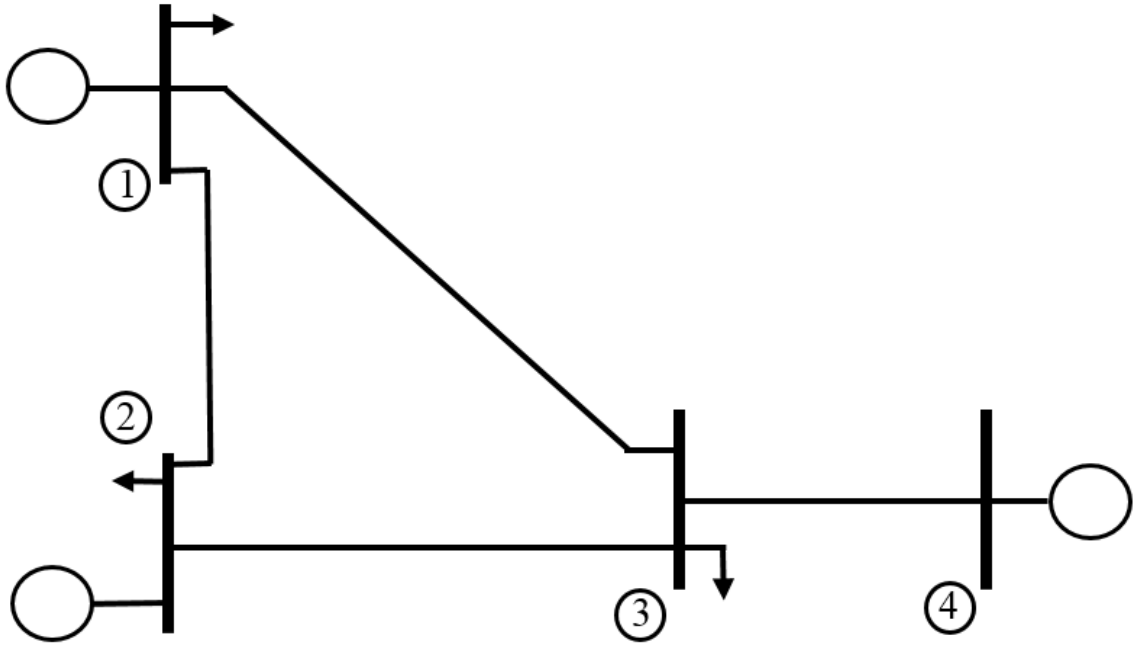
2.2.1. Bara admitans matrisi

Güç akışının matematiksel olarak ifade edilmesi için ilk yapılması gereken bara admitans ya da bara empedans matrisi oluşturmaktır. Bara empedans matrisi genel olarak karmaşıklığı daha az olan devrelerde tercih edilmektedir. Büyük çaptaki sistemler için de bara empedans matrisi tercih edilmektedir. Bara admitans matrisi, güç sisteminin eşdeğer devresindeki admitanslardan oluşturulan bir matristir. Eğer bara sayısına ‘n’ dersek, admitans matrisi $n \times n$ boyutunda bir matris olarak ifade edilir [41].

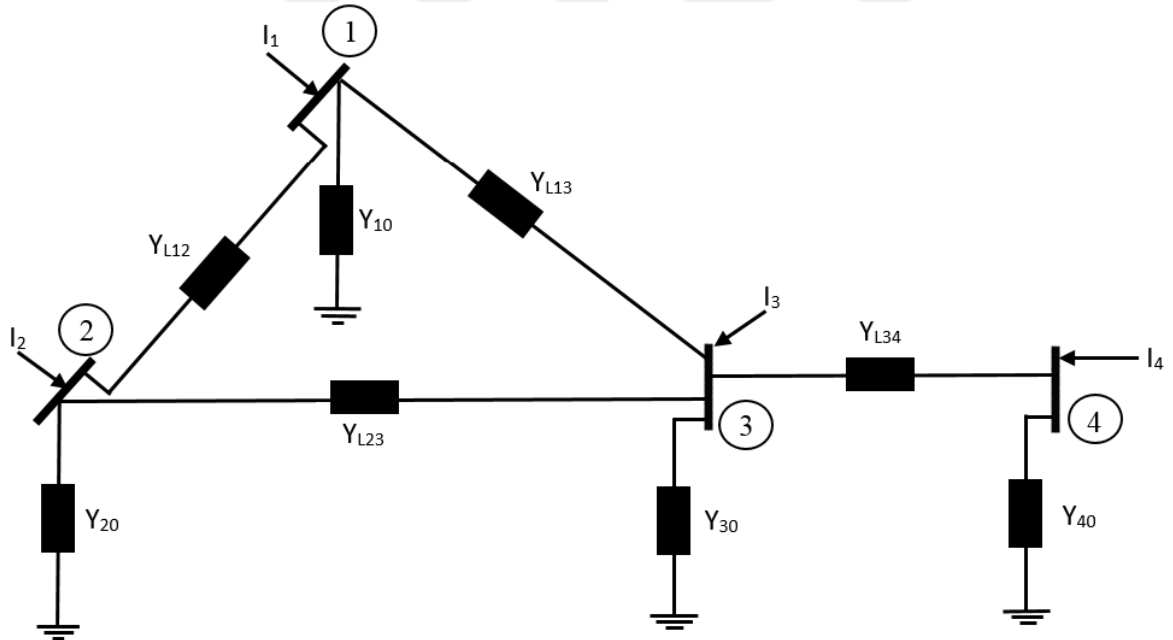
Bara admitans matrisinin oluşturulmasını açıklamak için Şekil 2.1’de verilen 4 baraya sahip bir güç sistemini ele alalım. Güç sistemlerindeki akım enjeksiyonları, güç enjeksiyonlarına benzer kabul edilir. Baraya giren akımlar pozitif, çıkan akımlar ise negatiftir.

Şekil 2.2’de, 4 baralı sistemimize ait baraları, bu baraları birbirine ve toprağa bağlayan kolları gösteren tek hat şeması verilmiştir. Baraları birbirine bağlayan kollar, sistemdeki hatları temsil etmektedir. Toprağa bağlanan hatlardaki admitanslar sistemdeki şönt unsurlarını ifade eder. Tüm hatlar admitans değerleri ile birlikte gösterilmiştir. Yani Y_{L12} ile gösterilen admitans değeri 1 ve 2. baralar arasındaki admitansı temsil etmektedir.

Düğüm gerilimleri yöntemine göre düğümlere giren akımların toplamı çıkan akımların toplamına eşit olmalıdır. 1. bara için bu kanunu uygularsak Eş. 2.2’deki denklem sayesinde baradaki akımı elde edebiliriz.



Şekil 2.1. Örnek 4 baralı güç sistemi tek hat şeması



Şekil 2.2. Örnek güç sistemi admitans şeması

$$I_1 = V_1 Y_{10} + (V_1 - V_2) Y_{L12} + (V_1 - V_3) Y_{L13} \quad (2.2)$$

Benzer şekilde, diğer baralardaki akımları elde etmek için de admitanslar ve gerilimler kullanılır. 2, 3 ve 4. baraların akım denklemleri Eş. 2.3, Eş. 2.4 ve Eş. 2.5’de verildiği gibidir.

$$I_2 = V_2 Y_{20} + (V_2 - V_1) Y_{L12} + (V_2 - V_3) Y_{L23} \quad (2.3)$$

$$I_3 = V_3 Y_{30} + (V_3 - V_1) Y_{L13} + (V_3 - V_4) Y_{L34} + (V_3 - V_2) Y_{L32} \quad (2.4)$$

$$I_4 = V_4 Y_{40} + (V_4 - V_3) Y_{L34} \quad (2.5)$$

İki bara arasındaki admitans akım enjeksiyonunun yönünden bağımsızdır. Eş. 2.3 ve Eş. 2.4’de görüldüğü üzere, 3. ve 4. Baraların arasındaki admitans, 3. bara tarafından da bakılsa 4. Bara tarafından da bakılsa aynıdır. Yani $Y_{L34}=Y_{L43}$ olarak değerlendirilir. Admitansların matematiksel gösterimi Eş. 2.6, Eş. 2.7, Eş. 2.8, Eş. 2.9, Eş. 2.10, Eş. 2.11, Eş. 2.12 ve Eş. 2.13’de verildiği gibidir.

$$Y_{11} = Y_{10} + Y_{L12} + Y_{L13} \quad (2.6)$$

$$Y_{22} = Y_{20} + Y_{L12} + Y_{L32} \quad (2.7)$$

$$Y_{33} = Y_{30} + Y_{L13} + Y_{L32} + Y_{L34} \quad (2.8)$$

$$Y_{44} = Y_{40} + Y_{L34} \quad (2.9)$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_{L12} \quad (2.10)$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -Y_{L13} \quad (2.11)$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -Y_{L23} \quad (2.12)$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -Y_{L34} \quad (2.13)$$

Akım denklemlerindeki admitans değerleri bu eşitliklere göre güncellenir. Güç sistemlerinde akımın genel formülasyonu Eş. 2.14'deki gibidir. Güncellenen akım denklemleri Eş. 2.14'deki formülasyona yerleştirilirse Eş. 2.15'deki genel formülasyon elde edilir.

$$I_{bara} = Y_{bara} V_{bara} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.2.2. Güç akışı denklemleri

Bu bölümde bir sistemdeki güç akışının matematiksel gösterimi yapılmaktadır. Bunun için önceki bölümde kullanılan admitans ve gerilim değerlerinden faydalanılır. k numaralı baradaki güç denklemini Eş. 2.16'daki yazılır.

$$S_k = V_k I_k^* \quad (2.16)$$

Eş. 2.8'den yararlanılarak k numaralı baradaki akım enjeksiyonu Eş. 2.17'deki gibi yazılabilir.

$$I_k = \sum_{j=1}^{BS} Y_{kj} V_j \quad (2.17)$$

Burada, Y_{kj} admitans değil admitans matrisi elemanıdır. Eş. 2.17'deki akım eşitliği Eş.

2.16’da yerine konulursa Eş. 2.18 elde edilir.

$$S_k = V_k \left(\sum_{j=1}^{BS} Y_{kj} V_j \right)^* = V_k \sum_{j=1}^{BS} Y_{kj}^* V_j^* \quad (2.18)$$

Burada V_k genliği ve açısı olan bir fazördür. Buna ilaveten, admitans matrisi elemanı olan Y_{kj} , admitansların bir fonksiyonu olduğundan reel ve imajiner parçalardan yani kondüktans ve süseptanstan oluşmaktadır. Euler bağıntısından da yararlanarak fazörler, sinüzoidallerin kompleks fonksiyonu olarak yazılır. Böylece, k barasındaki görünür güç Eş. 2.19’daki hale gelir.

$$\begin{aligned} S_k &= \sum_{j=1}^{BS} (|V_k| |V_j| \angle(\theta_k - \theta_j)) (G_{kj} - jB_{kj}) \\ &= \sum_{j=1}^{BS} |V_k| |V_j| (\cos(\theta_k - \theta_j) + j \sin(\theta_k - \theta_j)) (G_{kj} - jB_{kj}) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Eş. 2.19’da parantez çarpımı uygulanıp reel ve imajiner parçalar bir araya getirilebilir. Görünür gücün reel kısmı aktif güçten, imajiner kısmı da reaktif güçten oluşmaktadır. Görünür güç reel ve imajiner olarak ayrılırsa, reel kısmı Eş. 2.20’deki hale gelir ve aktif gücü temsil eder. İmajiner kısmı ise Eş. 2.21’de gösterildiği gibidir ve reaktif gücü temsil eder.

$$P_k = \sum_{j=1}^{BS} |V_k| |V_j| (G_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j) + B_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j)) \quad (2.20)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^{BS} |V_k| |V_j| (G_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j) + B_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j)) \quad (2.21)$$

Eş. 2.20 ve Eş. 2.21, gerilim, kondüktans ve süseptanslardan oluşan temel güç akışı denklemleridir. Güç akışı çözümünde başlanırken bu denklemler temel alınır ve çözüme başlanır. Burada G kondüktansı, B süseptansı, P aktif gücü, Q ise reaktif gücü temsil etmektedir.

Güç akışının çözümü için iki tip yöntem vardır, bunlar: doğrudan yöntem ve iteratif yöntemler. Doğrudan yöntemlerde bara admitans matrisinin tersi alınarak işlemler yapılır. Daha çok kullanılan iteratif yöntemlerde ise her bir iterasyonda çözüm bulunur. İterasyon sonunda bulunan çözümün bir önceki çözüme yakınlığı kontrol edilir. Yakınlık, önceden belirlenen değerin altına indiyse çözümün bulunduğu varsayılır ve iterasyon durdurulur. Çözümlerin yakınlığı olarak belirlenen değer iterasyon durdurma kriteri olarak adlandırılır. Güç akışında kullanılan en önemli iteratif yöntemler Newton-Raphson ve Gauss Seidel'dir.

2.2.3. Newton-Raphson çözüm yöntemi

Bu çalışmada kullanılan MATPOWER paket programı içerisinde güç akışı analizi yapılırken, Newton-Raphson yönteminden yararlanılmıştır. Bu nedenle, tezin bu bölümünde Newton-Raphson yöntemi hakkında bilgi verilmiştir.

Newton-Raphson yöntemi daha önce de belirtildiği üzere iteratif bir yöntemdir. Temel mantığı doğrusal linearizasyondur. Bu yöntemde problemimize bir başlangıç çözümü verilir ve her iterasyonda bulunan çözümler arası hata payına bakılır. Hata payı durdurmak için yeteri kadar küçük olduğunda çözüm bulunmuş varsayılır. OGA problemi non-lineer ve çok değişkene sahip bir problemdir. Bu yüzden, Newton-Raphson yönteminin tek değişkene değil de çok değişkenli problemlere nasıl uygulandığını anlamamız gerekmektedir.

Elimizde çok değişkene sahip n boyutlu bir x vektörü olduğunu ve $f(x)$ 'in de yine n boyutlu bir fonksiyon olduğu düşünülürse, x vektörü Eş. 2.22'de, $f(x)$ fonksiyonu ise Eş. 2.23'de verildiği gibi olur.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x_1) \\ f_2(x_2) \\ \vdots \\ f_n(x_n) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Başlangıç çözümünü x^* varsayalım. Bu durumda $f(x^*)=0$ ve $\Delta x = x^* - x$ olur. Ardından fonksiyon, her bir iterasyonda Eş. 2.24'deki gibi Taylor serisine açılır.

$$\begin{aligned} f_1(x^*) &= f_1(x) + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \Delta x_n + \dots \\ &\vdots \\ f_n(x^*) &= f_n(x) + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \Delta x_n + \dots \end{aligned} \quad (2.25)$$

Eş. 2.25'deki ifadeleri toplarsak Eş. 2.26'daki gibi matris haline getirilebilir.

$$f(x^*) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Eş. 2.26'da kısmi türevlerden oluşan kare matrise Jacobian matrisi denir ve $J(x)$ olarak tanımlanır.

Newton-Raphson yöntemi güç akışı çözümüne uygulanırken öncelikle, Eş. 2.16 ile Eş. 2.19 arasındaki çıkarımlar yapılarak kompleks güç denklemleri elde edilmelidir. Denklemleri elde ettikten sonra Eş. 2.20 ile Eş. 2.21'de gösterildiği gibi reel ve imajiner kısımlarına ayrılmalıdır.

Balans denklemleri oluşturularak, yani üretim ve talep dengesini gözeterek eşitlikler yazılarak, her bir baradaki gerilimin genliği ve açıları elde edilmelidir. Birinci bara salınım barası olarak seçilir, bu baranın geriliminin genliği ve açısı sabit kabul edilir. Ardından, diğer baralardaki gerilim genliklerini ve açılarını bulma işlemine geçilir. Bunun için Eş. 2.27'deki x vektörü ve Eş. 2.28'deki x' e bağlı $f(x)$ fonksiyonu oluşturulur.

$$x = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \\ |V_2| \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} P_2(x) - P_{G2} + P_{D2} \\ \vdots \\ P_n(x) - P_{Gn} + P_{Dn} \\ Q_2(x) - Q_{G2} + Q_{D2} \\ \vdots \\ Q_n(x) - Q_{Gn} + Q_{Dn} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Vektörü ve balans matrisini oluşturduktan sonra, $v=0$ kabulü ile $x^{(v)}$ başlangıç çözümü belirlenir. Ardından Eş. 2.29'daki denklem kullanılarak her iterasyonda bir çözüm elde edilir. Her iterasyondaki çözüm bir önceki çözüm ile karşılaştırılır. Eğer iki çözüm arasındaki hata payı durdurma kriterini sağlayacak kadar küçükse çözüm durdurulur, değil ise çözüme devam edilir. Çözüm işleminin en karmaşık kısmı ise Eş. 2.26'daki Jacobian matrisini oluşturmaktır. Jacobian matrisinin elemanları, değişkenlere bağımlı her bir $f(x)$ fonksiyonunun türevi alınarak bulunur. Örneğin, $f_i(x)$, Eş. 2.29'daki gibi i numaralı baranın aktif güç denklemi ise türevi alınarak Eş. 2.30'da verilen Jacobian matrisi elemanı bulunabilir.

$$f_i(x) = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{Gi} + P_{Di} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial f_i(x)}{\partial \theta_k} = |V_i| |V_k| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (k \neq i) \quad (2.30)$$



3. OPTİMAL GÜÇ AKIŞI

Optimal Güç Akışı (OGA), günümüz güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde çok önemli bir yere sahiptir. Güç akışında sistemin kararlı hal özellikleri bulunmaktadır yani, belirli üretim ve yük durumunda sistemin tüm baralarındaki gerilim genlikleri ve açıları elde edilir. Güç akışından farklı olarak sistemin, eşitlik ve eşitsizlik kısıtları olarak tanımlanan akış denklemleri, yük durumları, aktif ve reaktif güç üretim limitleri dahilinde çalışmasını ve bu çalışmayı optimum düzeyde sürdürmesini sağlar. Bu bölümde OGA'nın matematiksel tanımı detaylı olarak verilmiş ve OGA amaç fonksiyonları tanıtılmıştır.

OGA optimizasyon probleminin en önemli özellikleri lineer olmaması ve sınırları olmasıdır. OGA optimizasyonu ile sistemin ayarları optimum seviyede tutularak belirli bir amaç fonksiyonu minimize edilir. Sistemin kısıtları dahilinde bulunan bir sonuç uygun bir sonuç olarak nitelendirilir. Matematiksel ifadesi ise Eş. 3.1'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} f(x,u) \\ g(x,u) &= 0 \\ h(x,u) &\leq 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Eş. 3.1'e göre $f(x,u)$ amaç fonksiyonu, $g(x,u)$ eşitlik kısıtları ve $h(x,u)$ eşitsizlik kısıtları dahilinde minimize edilecektir [4]. Burada, x bağımsız başka bir deyişle kontrol değişkenleri; u ise bağımlı yani durum değişkenleri vektörünü ifade eder. Kontrol değişkenleri vektörü Eş. 3.2'de verilmiştir.

$$x^T = [V_{U1} \dots V_{UN_U}, P_{U2} \dots P_{UN_U}, T_1 \dots T_{N_T}, Q_{C1} \dots Q_{CN_C}] \tag{3.2}$$

Kontrol değişkenleri vektöründe: salınım barası aktif gücü, yük baralarının gerilimleri, generatör reaktif güçleri ve iletim hattı yüklenmeleri bulunmaktadır. Durum değişkenleri vektörü Eş. 3.3'de verilmiştir.

$$u^T = [P_{U1}, V_{Y1} \dots V_{YN_U}, Q_{U1} \dots Q_{UN_U}, S_h \dots S_{hnh}] \tag{3.3}$$

Durum değişkenleri vektöründe; generatör gerilimleri, salınım barası hariç aktif güç

üretimleri, transformatör kademe ayarları ve şönt kapasiteler bulunmaktadır. Durum değişkenleri, kontrol değişkenlerine bağımlıdır. Bağımlı değişkenler, kısıtlar dahilinde olmak kaydıyla çözüm algoritmasının belirlediği değerleri alır.

OGA çözümünün ana mantığı; kısıtlar dahilinde sonuç elde etmektir. Bu kısıtlar genel olarak eşitlik ve eşitsizlik kısıtları olarak ikiye ayrılmaktadır.

3.1. Optimal Güç Akışının Matematiksel Tanımı

3.1.1. Eşitlik kısıtları

Güç akışı, şebekedeki güç balansını elde etmek anlamına gelmektedir. Bu güç dengesi üretimin talep ve kayıpları karşılayabilmesi anlamına gelmektedir ve eşitlik kısıtı olarak adlandırılır. OGA eşitlik kısıtları güç akışı bölümünde verilen Eş. 2.20 ve Eş. 2.21 eşitliklerden gelmektedir. Eşitlik kısıtları, Eş. 3.4’de verilen aktif güç eşitliği ve Eş. 3.5’de verilen reaktif güç eşitliğinden oluşmaktadır.

$$P_{\dot{U}_i} = P_{T_i} + V_i \sum_{j=1}^{BS} V_j \left[G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \right] \quad (3.4)$$

$$Q_{\dot{U}_i} = Q_{T_i} + V_i \sum_{j=1}^{BS} V_j \left[G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \right] \quad (3.5)$$

Bu denklemlerden anlaşıldığı gibi sistemde üretilen aktif ve reaktif güçler talep edilen güçlere eşit olmak zorundadır. Aksi halde sistemde kararsızlıklar oluşabilir.

3.1.2. Eşitsizlik kısıtları

Güç sistemleri, birçok cihaz ve elamanın bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Bu cihaz ve elamanların kendilerine ait fiziksel çalışma limitleri vardır. Eşitsizlik kısıtları, bu fiziksel limitlerden oluşmaktadır. Cihazların fiziksel sınırlarının dışında çalıştırılması sisteme veya tüketici noktalarındaki elektrikli aletlere zarar verebilir. Bu nedenle, sistemin kesinlikle bu sınırlar içinde çalıştırılması gerekmektedir. Çalışmamızda da sonuçlar elde edilirken bu sınırlar içinde olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Eşitsizlik kısıtları genel olarak dört gruba ayrılır bunlar: üretim, trafo, şönt VAR kompanzatör ve güvenlik kısıtlamalarıdır. Üretim kısıtları, Eş. 3.6'da verilen üretim baralarındaki gerilim genliklerinin, Eş. 3.7'de verilen üretilen aktif güçlerin ve Eş. 3.8'de verilen reaktif güçlerin minimum ve maksimum limitlerinden oluşmaktadır.

$$V_{\tilde{U}i}^{min} \leq V_{\tilde{U}i} \leq V_{\tilde{U}i}^{max} \quad i=1...\tilde{U}BS \quad (3.6)$$

$$P_{\tilde{U}i}^{min} \leq P_{\tilde{U}i} \leq P_{\tilde{U}i}^{max} \quad i=1...\tilde{U}BS \quad (3.7)$$

$$Q_{\tilde{U}i}^{min} \leq Q_{\tilde{U}i} \leq Q_{\tilde{U}i}^{max} \quad i=1...\tilde{U}BS \quad (3.8)$$

Transformatör kısıtları, Eş. 3.9'da verilmiş kademe ayarlarının alt ve üst limitleridir.

$$T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max} \quad i=1...TS \quad (3.9)$$

Şönt kompanzatör kısıtları, Eş. 3.10'da verilmiş şönt kapasitelerin minimum ve maksimum limitlerinden oluşmaktadır.

$$Q_{ci}^{min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{max} \quad i=1...\$KS \quad (3.10)$$

Güvenlik kısıtları ise, Eş. 3.11'de verilen yük baralarının gerilim genliği limitleri, Eş. 3.12'de verilen faz açılarının limitleri ve Eş. 3.13'de verilen iletim hatları akış limitlerinden oluşmaktadır.

$$V_{Yi}^{min} \leq V_{Yi} \leq V_{Yi}^{max} \quad i=1...BS \quad (3.11)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max} \quad i=1...BS \quad (3.12)$$

$$S_{hi} \leq S_{hi}^{max} \quad i=1...BS \quad (3.13)$$

Bulunan sonucun, sistemin limitleri dahilinde olduğundan emin olmak için yukarıdaki eşitsizlikler ağırlık katsayıları ile çarpılarak, amaç fonksiyonuna Eş. 3.14’de gösterildiği gibi eklenmelidir.

$$f(x,u) = f + \lambda_p (P_{\tilde{U}i} - P_{\tilde{U}i}^{\lim})^2 + \lambda_v \sum_{i=1}^{YBS} (V_{Yi} - V_{Yi}^{\lim})^2 + \lambda_Q \sum_{i=1}^{SKS} (Q_{Yi} - Q_{Yi}^{\lim})^2 + \lambda_s \sum_{i=1}^{HS} (S_{hi} - S_{hi}^{\lim})^2 \quad (3.14)$$

Eş. 3.14’de görülen λ_p , λ_v , λ_Q ve λ_s kullanıcı tarafından seçilen ağırlık katsayılarıdır. Bu katsayıların büyük seçilmesi, elde edilen sonucun uygunluk derecesini artırmaktadır. Bu penaltı faktörleri, çalışmamızda optimize edilen tüm amaç fonksiyonlarına eklenmiştir.

4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE YENİLENEBİLİR ENERJİ

Son yüzyılda teknoloji, tarihin hiçbir döneminde olmadığı kadar hızlı bir şekilde gelişti. Bu hızlı ilerleme, çevresel faktörler üzerinde olumsuz etkilere yol açtı. Çevreye verilen zararın en önemli sebeplerinden biri de fosil yakıtlardan yararlanılarak elektrik üretimidir. Bu nedenlerden dolayı son yıllarda güç sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları olarak nitelendirilen rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi kaynaklara yöneldi. Bu kaynaklar kullanılarak çevreye verilen zarar en aza indirilmiş aynı zamanda da maliyetlerde düşüş elde edilmiştir. Bu tez kapsamında, rüzgar enerjisi santrallerinin güç sistemine etkisi de incelendiğinden, rüzgar enerjisi santralleri detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

4.1. Rüzgar Enerjisi Santralleri

Rüzgar enerjisi, doğaya zararı olmayan ve hiç kesilmeyen bir enerjidir. Isınan hava atmosferin yüksek kesimlerine doğru hareket eder, bu sırada, soğuk hava kütleleri yükselen havanın yerini doldurmak için hareket eder. Yüksek basınç bölgelerinden alçak basınç bölgelerine, bu şekilde hava akımı hareketi oluşması neticesinde rüzgarlar oluşur. Rüzgarların hızı, sürekliliği ve yüksekliği ise bulundukları bölgenin coğrafi yapısı, iklim durumu ve zamana göre değişiklik gösterir. Rüzgarların bu gibi etmenlere bağlı olması neticesinde rüzgar tahmini yapılması zorlaşmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için rüzgar santrali kurulacak bölgelere bir veya daha fazla yıl ölçüm yapacak rüzgar ölçüm istasyonları kurulmaktadır. Bu istasyonlardan alınan rüzgar verilerine göre santral kurulup kurulmayacağı, eğer kurulacaksa türbinin yüksekliği, rotor çapı, generatör tipi gibi parametreler belirlenir.

4.1.1. Rüzgar türbinleri

Rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisi ile elektrik üretimi yapan santrallerin en önemli bileşenleridir. Hareket halindeki havanın, türbinin kanatlarını döndürmesi aracılığı ile havanın kinetik enerjisi motor mili yardımıyla önce mekanik enerjiye ardından da generatörde elektrik enerjisine dönüştürülür. Yatay ya da düşey eksenli olarak kullanılırlar. Günümüzde en çok yatay eksenli türbinler kullanılmaktadır. Yatay eksenli türbinler, 1 ile 6 MW arasında güç üretebilmektedir. Genelde üç kanatlı olarak imal edilirler. Çevredeki

engeller rüzgar hızını keser ve yükseklerde rüzgar hızı daha fazladır. Bu nedenlerden ötürü; rüzgar türbinleri yüksek direkler üzerine inşa edilirler. Yüksek direklere kurulum yapılması ve kanat çaplarının günümüzde büyük olması nedeniyle güçlü ama hafif malzemelerden imal edilirler.

Türbinlerin rotor gövdesi ve kanatçıkları gerektiğinde dönebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Kanatların rüzgar yönüne dik olması durumunda daha çok verim alınır Bu nedenle rotor gövdesi rüzgarı dik karşılayabilmek için rüzgarın geldiği yöne dönmektedir. Aynı şekilde rüzgarın, kanatları daha hızlı ya da daha yavaş döndürmesini sağlamak için kanatçıkları rüzgar ile yaptığı açı rüzgar hızına göre değiştirilmektedir. Daha yüksek verim alabilmek ve sistem güvenliğini sağlamak amacıyla frenleme ve kontrol mekanizmaları ile birlikte kurulurlar.

4.1.2. Rüzgar türbinleri güç hesaplamaları

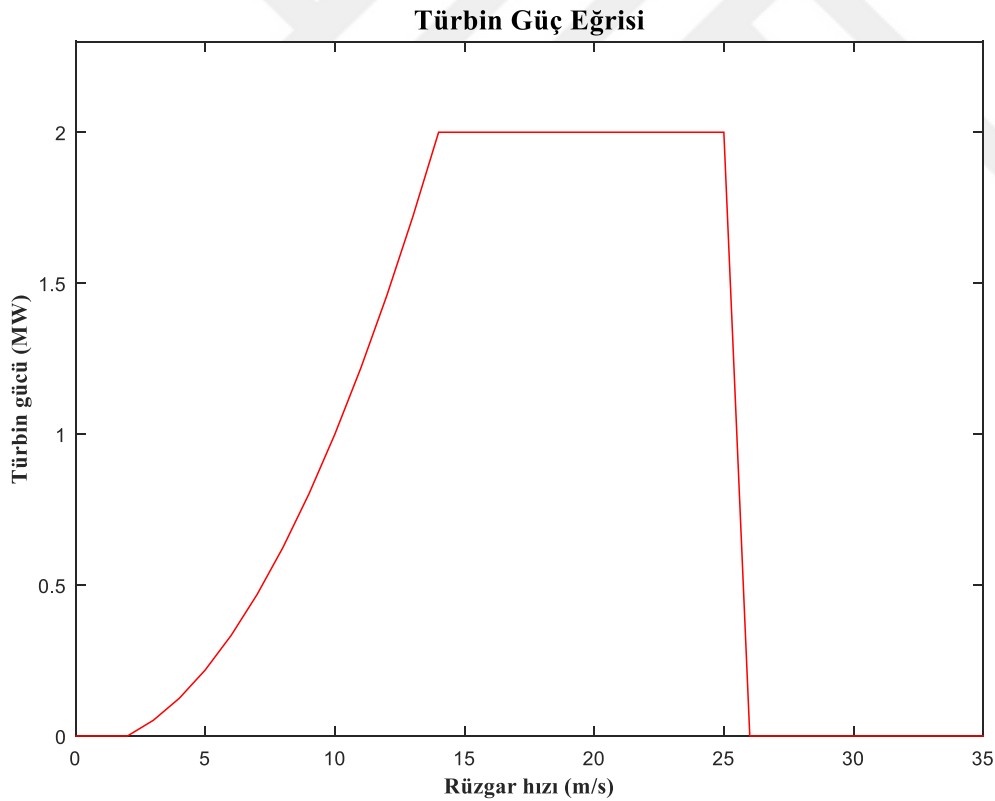
Önceki bölümde anlatıldığı gibi hava kütlelerinin yer değiştirmesiyle oluşan kinetik enerji sayesinde rüzgar oluşmaktadır. Rüzgar enerjisi santrallerindeki amaç ise bu kinetik enerjiden bir güç elde etmektir. Eş. 4.1’de rüzgardan elde edilen teorik gücün formülü verilmiştir.

$$P_{hava} = 0,5 \rho A V^3 C_p \quad (4.1)$$

Burada, ρ havanın yoğunluğunu, A türbin kanatlarının havada taradığı alanı, V rüzgarın hızını, C_p ise güç faktörünü ifade eder. Güç faktörü, elde edilen mekanik gücün türbine gelen rüzgar gücüne oranıdır. C_p , en fazla %59,3 olabilir ve bu oran Beltz limiti olarak adlandırılır. Günümüzde elde edilebilen en iyi oran ise %40 düzeylerindedir. Bu oranı maksimum seviyede tutabilmek için, rotor gövdesi sürekli rüzgar yönüne dik olacak şekilde tutulur ve kanat açıları optimum dereceye ayarlanır.

Rüzgar türbinleri verimli üretim yapabilmek için sadece belirli rüzgar limitleri dahilinde çalışabilmektedir. Üretimde öncelikli şart, rüzgar hızının belirli bir seviyenin üzerinde olmasıdır. Bu hız sınırına “cut-in” yani devreye girme hızı denilir. Rüzgar hızı bu sınırın üstüne çıktıktan sonra türbin artık devreye girip üretime geçebilmektedir. Rüzgar hızı arttıkça Şekil 4.1’de görüldüğü gibi üretilen güç de artmaktadır. Fakat, her generatörün

belirli bir anma gücü (rated power) vardır. Rüzgar türbinlerinde de rüzgar hızı bu anma gücünü elde edecek seviyeye ulaştığında kanat açıları ayarlanarak elde edilen güç bu seviyede tutulmaktadır. Rüzgar hızı artmaya devam etse de kanat açıları sayesinde elde edilen güç anma seviyesinde tutulmaya devam eder. Hız artmaya devam edip sistemin güvenli çalışma limitlerini aşarsa artık bu seviyeden sonra sistem bünyesindeki frenler devreye girer ve üretim durdurulur. Sistemin devreye girme ve devreden çıkma hızları ölçülürken anlık yükselme veya alçalmalara göre sistem çalışmasına karar verilmez. Çünkü rüzgar, doğası gereği değişkendir. Rüzgarın o seviyede seyredeceğinden emin olununcaya kadar bir süre ölçüme devam edilir. Aksi halde her değişimde devreye girilirse türbin, elektrik üretmek yerine elektrik tüketir zira türbinler devreye girmek için öncelikle elektrik tüketirler. Bu nedenle, eğer hız hala aynı seviyelerde ise sistem için en doğru karar verilmelidir. Şekil 4.1’de 2 MW anma gücüne sahip örnek bir rüzgar türbinin devreye girme, anma gücü ve devreden çıkma aralıkları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bir rüzgar türbininin rüzgar hızına bağlı türbin gücü grafiği

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere rüzgar türbini, rüzgarın yaklaşık olarak 2,5 m/s hızda olduğu durumda devreye girmiş ve 13 m/s hıza kadar üretim sürekli artmıştır. Fakat anma gücü olan 2 MW’a ulaştığında artık üretimde artış yaşanmamıştır. Türbinin devreden çıkması gereken 25 m/s hıza ulaştıktan sonra türbin, güvenlik nedeniyle üretimi durdurmuş ve devreden

çıkıştır. Eş. 4.2’de bir rüzgar santrali için sınır hızlarına göre çıkış gücünün hesaplanması formüle edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P_{RES} &= 0 & v < v_i \quad \text{ve} \quad v > v_o \\
 P_{RES} &= w_r \frac{v - v_i}{v_r - v_i} & v_i \leq v \leq v_r \\
 P_{RES} &= w_r & v_r \leq v \leq v_o
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Burada P_{RES} , rüzgar enerjisi santralinde elde edilen gücü, v_i devreye girmek için gerekli rüzgar hızını, v_r anma gücüne karşılık gelen hızı, w_r anma gücünü ve v_o devreden çıkma hızını ifade eder.

4.1.3. Rüzgar istatistiği ve Weibull dağılımı

Rüzgarın doğası gereği çok değişken olması, üretim yapmadan önce kurulacak türbin özelliklerini ve kurulum yerini belirlemede zorluklar ortaya çıkarır. Bu nedenle kurulum planlanan bölgelerde uzun süreli rüzgar ölçümleri yapılır ve ortalama hızlar elde edilir. Böylece o bölgedeki rüzgar hızı dağılım frekansı belirlenir. Şekil 4.2’de İngiltere’nin Plymouth şehrinde 2005 ve 2007 yılları arasında ölçülen rüzgar hızları ve bu hızların ölçüm sayıları verilmiştir [42].

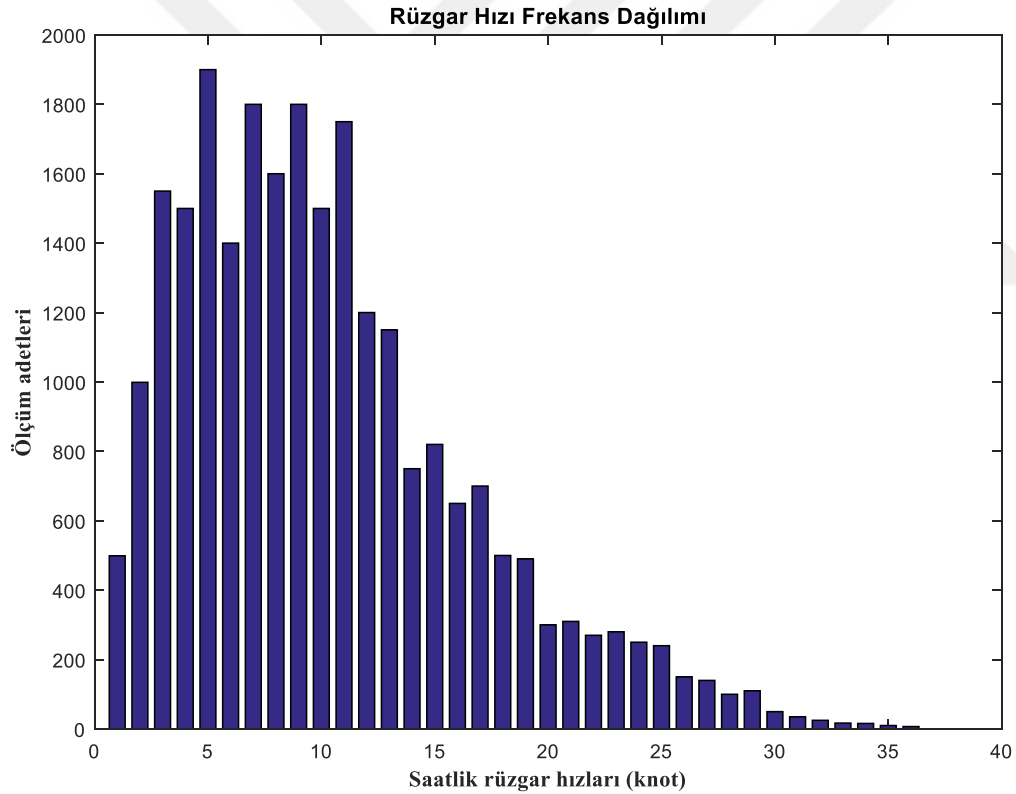
Şekil 4.2’de verilen grafikte 2 yıl içerisinde ölçülen hızların ortalaması 10,2 knot yani 5,26 m/s olarak hesaplanmıştır. Rüzgarın kararsızlığını ölçmek için standart sapma değeri hesaplanmalıdır. Şekil 4.2’deki verilerde standart sapma değeri 6,28 knot yani 3,24 m/s olarak hesaplanmıştır. Yani standart sapmanın ortalama hıza oranının 0,62 olduğu görülmüştür. Rüzgar türbinlerinin enerji üretim kapasitelerinin hesabı için iki veri girdisine ihtiyaç duyulur. Bunlardan biri Şekil 4.2’deki gibi arazide belli süreler içinde toplanan rüzgar verileridir. Diğer girdi ise kullanılacak türbinin tasarımına ve kullandığı teçhizatlara göre değişiklik gösteren güç eğrisi verileridir. Bu Eş 4.3’de gösterildiği gibi bu iki veri kullanılarak yıllık üretilebilecek güç elde edilebilir.

$$P_{RY} = \int_{v_i}^{v_o} P_U f(v) 8760 dv \tag{4.3}$$

Eş. 4.3’de $f(v)$ ile gösterilen rüzgar hızı olasılık fonksiyonudur. Bu olasılık fonksiyonu için genel olarak literatürde Weibull ve Rayleigh fonksiyonları kullanılmaktadır.

Weibull dağılımı

Rüzgar hızı frekans dağılımı sayesinde bir bölgedeki rüzgarların esme sıklıkları elde edilebilmektedir. Fakat, bunun için çok sayıda veri toplanması gerekmektedir. Veri saklamada tasarruf etmek için dağılım fonksiyonları kullanılabilir. Bu fonksiyonlardan en önemlisi ve en çok kullanılanı Weibull dağılım fonksiyonudur. Weibull dağılımı sayesinde rüzgar hız frekans dağılımını yüksek doğrulukta temsil eden hız veri grafiği elde edilebilmektedir [43].



Şekil 4.2. Rüzgar hızı frekans dağılımı [42]

Weibull dağılım fonksiyonu, rüzgar enerjisi analizlerinde rüzgar hızı olasılık yoğunluğunu hesaplamak için kullanılmaktadır. Eş. 4.4’de yenilenebilir enerji kaynaklarında istatistiksel analiz için kullanılan Weibull dağılım fonksiyonunun matematiksel gösterimi verilmiştir.

$$W(v) = \left(\frac{k}{a}\right) \left(\frac{v}{a}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{a}\right)^k\right] \quad (4.4)$$

Burada, a ile belirtilen ölçek parametresidir. Ölçek parametresinin birimi rüzgar hızı ile aynı olup m/s cinsindendir. Bu parametrenin büyük ya da küçük olması rüzgarın ortalama hızının yüksek ya da düşük olmasıyla doğru orantılıdır. Eş. 4.4'de a ile gösterilen şekil parametresidir. Bu parametre, rüzgar hızının değişiklik gösterip göstermediğine bağlıdır. Yani rüzgar hızı sabit sayılabilecek şekilde az değişiyorsa bu parametrenin değeri büyüktür. Aynı eşitlikte, v ile gösterilen ise rüzgarın hızıdır [44].

Rüzgar ölçüm sonuçlarından elde edilen verilerin frekans dağılımına Weibull fonksiyonu uygulanarak üzerinde çalışılan rüzgar santrali için en uygun a ve k parametreleri elde edilir. Elde edilen parametreler doğrultusunda santral kurulması planlanan arazi için ortalama hız ve güç yoğunluğu elde edilir. Ortalama hız formülü Eş. 4.5'de, güç yoğunluğu formülü Eş. 4.6'da verilmiştir.

$$v_{ort} = A \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.5)$$

$$P_{yog} = 0,5 \rho A^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4.6)$$

Eş. 4.6'da Γ ile gösterilen ifade faktöriyel fonksiyonunun karmaşık sayılar ve reel sayılar için genellemesi olan gamma fonksiyonudur. P_{yog} ile hesaplanan güç yoğunluğunun birimi watt/m²'dir.

5. GİRDAP ARAMA ALGORİTMASI

Tek çözüme sahip sezgisel algoritmalar, başlangıç çözümünden itibaren yeni çözümler üretme ve yeni çözümü eski çözümün yerine koyma mantığı ile çalışmaktadır. Bu işlemler, durdurma koşulları sağlanana kadar devam etmekte ve koşul sağlanınca bulunan en son çözüm nihai çözüm olarak kabul edilmektedir.

Aday çözüm kümeleri üretilirken, aday parçacıkların komşuluk bağlantıları çok önemlidir. Sonuç aranırken, bir önceki iterasyona göre çok fazla değişim gözlenmiyorsa yani çözümler komşuluklar etrafından öteye gitmiyorsa çözümde yüksek yerellik olduğu anlaşılır. Bu durumda da optimizasyon gerektiği kadar yakınsama yapmayabilir. Fakat düşük yerelliğe sahip algoritmalarda, aranan çözüm daha fazla değişikliğe uğrar ve komşu parçacıklardan daha uzak ama daha iyi sonuca doğru ilerleyebilir. Bir optimizasyon algoritmasının ideal bir şekilde çalışması için başlangıçta zayıf yerellik özelliğinin olması, sonuç optimum seviyeye yaklaştığında ise yüksek yerellik özelliği göstermesi gerekmektedir. 2015 yılında Doğan ve Ölmez tarafından geliştirilen yapay zeka tabanlı bir sezgisel algoritma olan girdap arama algoritması (GAA), yerellik için beklenen bu özellikleri göz önünde bulundurarak çalışmaktadır [45]. GAA, literatürde destek vektör makineleri ile diyabet tespiti [46] ve protein katlanma probleminin çözümü [47] çalışmalarında kullanılmıştır.

5.1. Girdap Arama Algoritmasının Çalışma Yöntemi

GAA, doğada oluşan girdaplardan esinlenerek geliştirilmiştir. Optimizasyon için başlangıç parçacıklardan oluşan çözüm uzayı ve algoritmanın temel mantığını oluşturan girdap oluşturulur. Bu girdabın, merkez noktası ve yarıçapı her iterasyonda uygunluk kriterlerine göre güncellenerek çözüm aranır. Yani, elde edilen parçacıkların girdap statüsüne alınıp alınmayacağı kontrol edilir, kriterleri sağlamayan parçacıklar yok olur.

5.1.1. Başlangıç merkezini oluşturma

GAA, iç içe geçmiş çemberlerden yani girdaplardan oluşur. Programın başlangıcında ilk girdabın merkez noktası ve yarıçapı oluşturulmalıdır. Eş. 5.1’de verilen matematiksel ifade

kullanılarak arama uzayında oluşturulacak ilk girdabın başlangıç merkezi (μ_0) hesaplanabilir. Hesaplama problemin minimum ve maksimum limitlerinden yararlanılır.

$$\mu_0 = \frac{\text{üst limit} + \text{alt limit}}{2} \quad (5.1)$$

5.1.2. Başlangıç girdabının yarıçapını oluşturma

Algoritmada kullanılacak başlangıç girdabının merkezi gibi yarıçapının da hesaplanması gerekmektedir. Fakat, başlangıçta kullanılacak yarıçap olabildiğince büyük seçilmelidir. Çünkü başlangıçta, algoritmanın zayıf yerelliğe sahip olması istenmektedir. Yarıçapın büyük olması sayesinde arama uzayı büyütülmüş olur ve en iyi çözümü bulma olasılığımız artar. Başlangıç yarıçapını hesaplamak için kullanılan matematiksel ifade Eş. 5.2’de verilmiştir.

$$r_0 = \frac{\max(\text{üst limit}) + \min(\text{alt limit})}{2} \quad (5.2)$$

5.1.3. Aday çözümler uzayını oluşturma

GAA diğer çoğu sezgisel algoritma gibi iteratif bir algoritmadır. İlk iterasyonda, öncelikli işlemlerden biri de aday çözümlerin $C(s)$ üretilmesidir. Aday çözümler üretilirken Gaussian dağılımı uygulanır. Bu nedenle, çözümler problemin sınırları dışında da üretilmiş olabilir. Bunu engellemek için Eş. 5.3’deki matematiksel ifadeden de anlaşılacağı üzere üretilen çözümler, problemin sınırların içine çekilmelidir.

$$C_i(s) = \text{rand}(\text{üst sınır} - \text{alt sınır}) + \text{alt sınır} \quad (5.3)$$

Eş. 5.3’de t ifadesi iterasyon sayısını, rand ifadesi rastgele üretilen bir sayıyı, S ise aday çözümleri temsil etmektedir.

5.1.4. Girdap arama algoritmasının yakınsama mantığı

Başlangıçta aday çözümlerden oluşan çözüm uzayı, ilk girdabın merkez noktası ve yarıçap değerleri hesaplanır. İlk iterasyondan itibaren elde edilen sonuçlara göre yeni merkez noktaları ve yarıçaplar hesaplanmaya başlanır. Seçim aşamalarında, çözüm uzayından elde edilen daha iyi çözüm en iyi çözüm olarak kaydedilir ve mevcut çemberin merkezinin yerini alır. Bir sonraki iterasyonlarda elde edilen çözümler eğer mevcut en iyi değerden daha iyiye, mevcut girdabın merkez noktası olarak atanır. Bütün aşamalarda merkez noktanın atanması ile birlikte Eş. 5.4’de verilen formülasyondaki gibi gama fonksiyonunun tersi kullanılarak girdabın yarıçapı azaltılır ve optimal çözüme yaklaşması sağlanır.

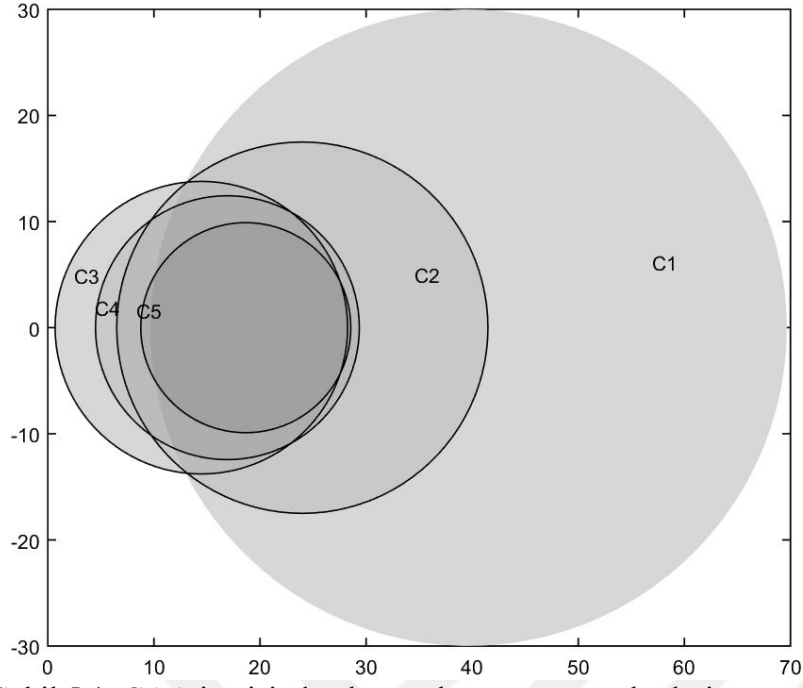
$$r_i = \sigma_0 \left(\frac{1}{x} \right) \text{gammaincinv}(x, a_i) \quad (5.4)$$

Buradaki, x rastgele bir değişken, a_i ise şekil parametresidir ve her iterasyonda değiştirilir, gammaincinv ise gamma fonksiyonunun tersidir. Bu değişim, Eş. 5.5’deki eşitlik kullanılarak yapılır.

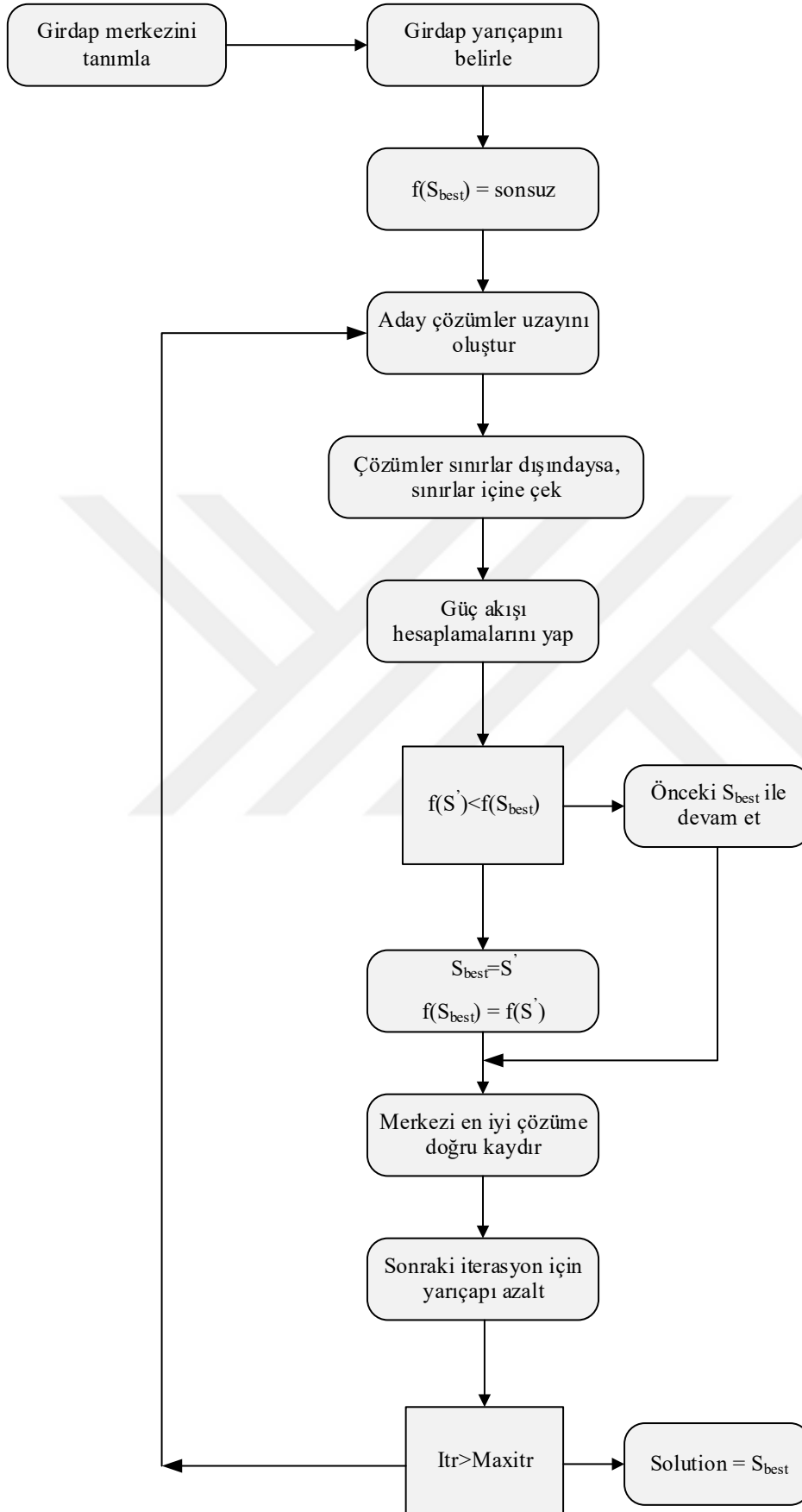
$$a_i = a_0 - \frac{t}{\text{MaxItr}} \quad (5.5)$$

Ardından bu merkez noktası etrafındaki komşu çözümler arasında en iyi sonuç aranır. Bu adımlar, durdurma kriteri sağlanana kadar aynı şekilde devam eder.

Sonuçta elde edilen tüm çemberlere bakıldığında Şekil 5.1’deki gibi iç içe geçmiş ve şekli girdaba benzeyen çemberler görülür. Şekil 5.1’de görüldüğü üzere algoritma, ilk çemberi (C1) arama uzayının büyük çoğunluğunu kapsayacak şekilde büyük tutmuştur. Bir sonraki iterasyonda, çemberin yarıçapını azaltıp merkezini en iyi sonuca doğru kaydırmıştır (C2). Bu işlem 5. iterasyona kadar devam etmiş ve 5. İterasyonda sonuç bulunarak program sonlandırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, iterasyon arttıkça çemberin yeri değişmiş ve yarıçapı azalmıştır. Şekil 5.2’de ise GAA’nın çalışma mantığı akış olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1. GAA içerisinde oluşturulan çözüm çemberleri



Şekil 5.2. Girdap arama algoritması akış diyagramı



6. YÖNTEM VE SİMULASYON ÇALIŞMASI

OGA problemini gerçek güç sistemlerine uygulamadan önce, amaçlanan yöntemin simülasyon ortamlarında test edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, simülasyon programlarında kullanılabilecek çeşitli özelliklerde test sistemleri mevcuttur [48]. Elde edilen sonuçları literatürdeki sonuçlar ile daha dengeli bir şekilde karşılaştırabilmek için bu test sistemleri üzerinde araştırmalar yapıldı. Literatür taraması neticesinde, yapılan çalışmalarda daha çok IEEE 30 baralı test sisteminin kullanıldığı saptandı. Bu tez çalışmasında da IEEE 30 baralı test sistemi kullanılarak elde edilen sonuçların yeterliliği literatürdeki sonuçlarla daha doğru bir şekilde karşılaştırıldı.

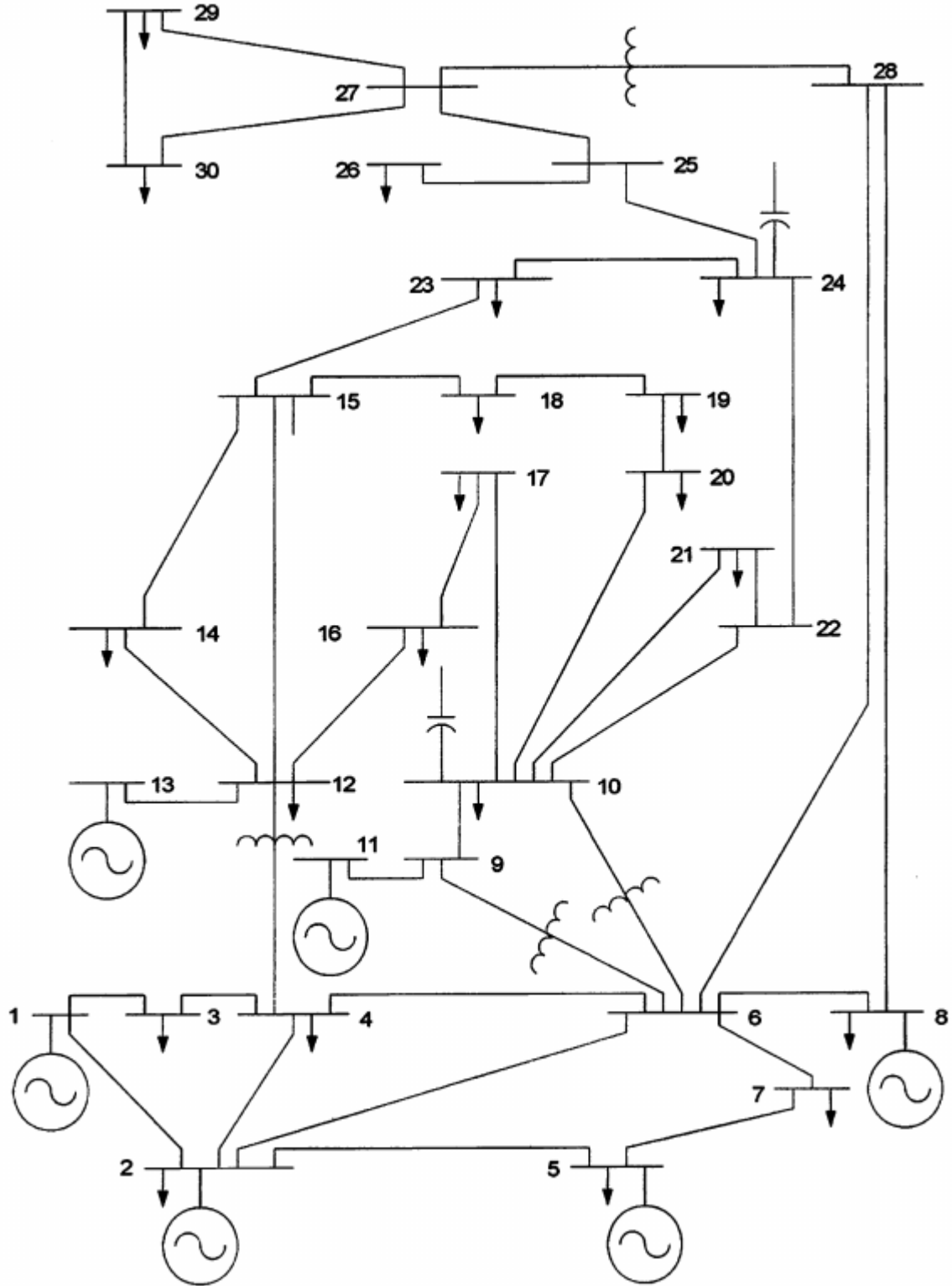
6.1. IEEE 30 Baralı Test Sistemi

Tezde kullanılan IEEE 30 baralı test sisteminin 6 barası üretim barası olup bu baralar 1, 2, 3, 5, 8, 11 ve 13. baralardır. 21 bara ise yük barasıdır. 41 adet hatta sahiptir ve 4 hat transformatör hattıdır. Kademe transformatörlerinin bulunduğu hatlar 4-12, 6-9, 6-10 ve 27-28'dir. Şönt kompanzasyon baraları ise 10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24 ve 29. baralardır. Bu test sisteminde talep edilen aktif güç 2,834 p.u., talep edilen reaktif güç ise 1,262 p.u. olarak belirlenmiştir [49]. 6 üretim biriminin, 100 MVA baz değer kabulü ile per unit cinsinden karakteristikleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Üretim üniteleri karakteristikleri [50]

Bara Numarası	Gerilim [kV]	δ [derece]	P [pu]	Q [pu]
1	139,9200	98,4316	2,6095	-0,1679
2	137,6932	93,0798	0,4000	0,5000
5	133,4520	84,2658	0,0000	0,3685
8	133,3200	86,6183	0,0000	0,3714
11	35,7060	84,3227	0,0000	0,1617
13	35,3430	83,4883	0,0000	0,1062

IEEE 30 baralı test sisteminin yapısını ve bağlantıları gösteren tek hat şeması Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. IEEE 30 baralı test sistemi tek hat şeması [50]

Test sistemindeki 41 hattın yeri ve hat parametreleri Çizelge 6.2’de, 30 baranın aktif güç yüklenmeleri Çizelge 6.3’de ve reaktif güç limitleri Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. IEEE 30 baralı test sistemi hat parametreleri [50]

Hat	Başlangıç barası	Bitiş barası	R (p.u.)	X (p.u.)	Kademe oranı	Güç
1	1	2	0,0192	0,0575		0,300
2	1	3	0,0452	0,1852	0,9610	0,300
3	2	4	0,0570	0,1737	0,9650	0,300
4	3	4	0,0132	0,0379		0,300
5	2	5	0,0472	0,1983		0,300
6	2	6	0,0581	0,1763		0,300
7	4	6	0,0119	0,0414		0,300
8	5	7	0,0460	0,1160		0,300
9	6	7	0,0267	0,0820		0,300
10	6	8	0,0120	0,0420		0,300
11	6	9	0,0000	0,2080		0,300
12	6	10	0,0000	0,5560		0,300
13	9	11	0,0000	0,2080		0,300
14	9	10	0,0000	0,1100	0,9700	0,300
15	4	12	0,0000	0,2560	0,9650	0,650
16	12	13	0,0000	0,1400	0,9635	0,650
17	12	14	0,1231	0,2559		0,320
18	12	15	0,0662	0,1304		0,320
19	12	16	0,0945	0,1987		0,320
20	14	15	0,2210	0,1997		0,160
21	16	17	0,0824	0,1932		0,160
22	15	18	0,1070	0,2185		0,160
23	18	19	0,0639	0,1292	0,9590	0,160
24	19	20	0,0340	0,0680		0,320
25	10	20	0,0936	0,2090		0,320
26	10	17	0,0324	0,0845	0,9850	0,320
27	10	21	0,0348	0,0749		0,300
28	10	22	0,0727	0,1499		0,300
29	21	22	0,0116	0,0236		0,300
30	15	23	0,1000	0,2020		0,160
31	22	24	0,1150	0,1790		0,300
32	23	24	0,1320	0,2700	0,9655	0,160
33	24	25	0,1885	0,3292		0,300
34	25	26	0,2544	0,3800		0,300
35	25	27	0,1093	0,2087		0,300
36	28	27	0,0000	0,3960		0,300
37	27	29	0,2198	0,4153	0,9810	0,300
38	27	30	0,3202	0,6027		0,300
39	29	30	0,2399	0,4533		0,300
40	8	28	0,0636	0,2000	0,9530	0,300
41	6	28	0,0169	0,0599		0,300

Çizelge 6.3. Baraların aktif güç yüklenmeleri [50]

Bara	Yük (MW)	Bara	Yük (MW)
1	0,0	16	3,5
2	21,7	17	9,0
3	2,4	18	3,2
4	67,6	19	9,5
5	34,2	20	2,2
6	0,0	21	17,5
7	22,8	22	0,0
8	30,0	23	3,2
9	0,0	24	8,7
10	5,8	25	0,0
11	0,0	26	3,5
12	11,2	27	0,0
13	0,0	28	0,0
14	6,2	29	2,4
15	8,2	30	10,6

Çizelge 6.4. Baraların Reaktif güç yüklenmeleri [50]

Bara	Qmin (p.u.)	Qmax (p.u.)	Bara	Qmin (p.u.)	Qmax (p.u.)
1	-0,2	0,0	16		
2	-0,2	0,2	17	-0,05	0,05
3			18	0,0	0,055
4			19		
5	-0,15	0,15	20		
6			21		
7			22		
8	-0,15	0,15	23	-0,05	0,055
9			24		
10			25		
11	-0,1	0,1	26		
12			27	-0,055	0,055
13	-0,15	0,15	28		
14			29		
15			30		

Test sisteminde kullanılan, 6 üretim barasının aktif ve reaktif güç limitleri Çizelge 6.5’de verilmiştir. OGA problemi çözülürken üretim değerlerinin bu aralıklar içinde olması gerekliliği göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 6.5. Üretim baralarının aktif ve reaktif güç limitleri [50]

Bara Numarası	$P_{\bar{u}}^{\min}$ (MW)	$P_{\bar{u}}^{\max}$ (MW)	$Q_{\bar{u}}^{\min}$ (MVar)	$Q_{\bar{u}}^{\max}$ (MVar)
1	50	200	-20	200
2	20	80	-20	100
5	15	50	-15	80
8	10	35	-15	60
11	10	30	-10	50
13	12	40	-15	60

OGA probleminde kontrol değişkeni olarak kullanılan üretim barası gerilimlerinin, transformatör kademe ayarlarının ve şönt kapasitelerin limitleri Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Kontrol değişkenlerinin limitleri [49]

Kontrol değişkenleri	Minimum limit (p.u.)	Maksimum limit (p.u.)
V_1	0,95	1,1
V_2	0,95	1,1
V_5	0,95	1,1
V_8	0,95	1,1
V_{11}	0,95	1,1
V_{13}	0,95	1,1
T_{11}	0,90	1,1
T_{12}	0,90	1,1
T_{15}	0,90	1,1
T_{36}	0,90	1,1
Q_{c10}	0,0	5,0
Q_{c12}	0,0	5,0
Q_{c15}	0,0	5,0
Q_{c17}	0,0	5,0
Q_{c20}	0,0	5,0
Q_{c21}	0,0	5,0
Q_{c23}	0,0	5,0
Q_{c24}	0,0	5,0
Q_{c29}	0,0	5,0

OGA probleminin çözümü için geliştirilen GAA yazılımı, kişisel bilgisayarda MATLAB 2015a programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Güç akışı denklemleri, MATPOWER paket programından yararlanılarak çözülmüştür. GAA’nda iterasyon sayısı literatüre bağlı kalmak ve yakınsamayı daha iyi görebilmek için 100, parçacık sayısı ise literatür ile karşılaştırma yapabilmek için 50 olarak belirlenmiştir. Parçacık sayısının artırılması durumu 6.4 başlığı altında araştırılmıştır.

6.2. Optimal Güç Akışı Probleminde Minimize Edilen Amaç Fonksiyonları

OGA problemi, birçok amaç fonksiyonunu minimize ederek çözülebilmektedir. Bu fonksiyonlar sistemin çalışma şartlarını geliştirmek, maliyeti azaltmak, kayıpları azaltmak ve çevreye verilen zararı azaltmak gibi amaçlar için optimize edilir. Bu tez çalışmasında, birden çok amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Kullandığımız fonksiyonların detaylı açıklamaları bölümler halinde verilmiştir.

6.2.1. Yakıt maliyetinin minimizasyonu

Güç sistemleri üretim, iletim, dağıtım ve tüketim birimlerinden oluşmaktadır. Üretim birimleri farklı kaynaklar kullanarak üretim yapmaktadır. Bu kaynaklardan fosil yakıt kaynaklı olanlar üretim için belli bir maliyete sahiptir. Bu başlık altındaki fonksiyonu amacı, Eş. 6.1'deki formülasyonu kullanarak bu maliyeti minimize etmektir.

$$F_{ym_i} = P_{\tilde{U}_i}^2 a_i + P_{\tilde{U}_i} b_i + c_i \quad i = 1 \dots \tilde{U}BS \quad (6.1)$$

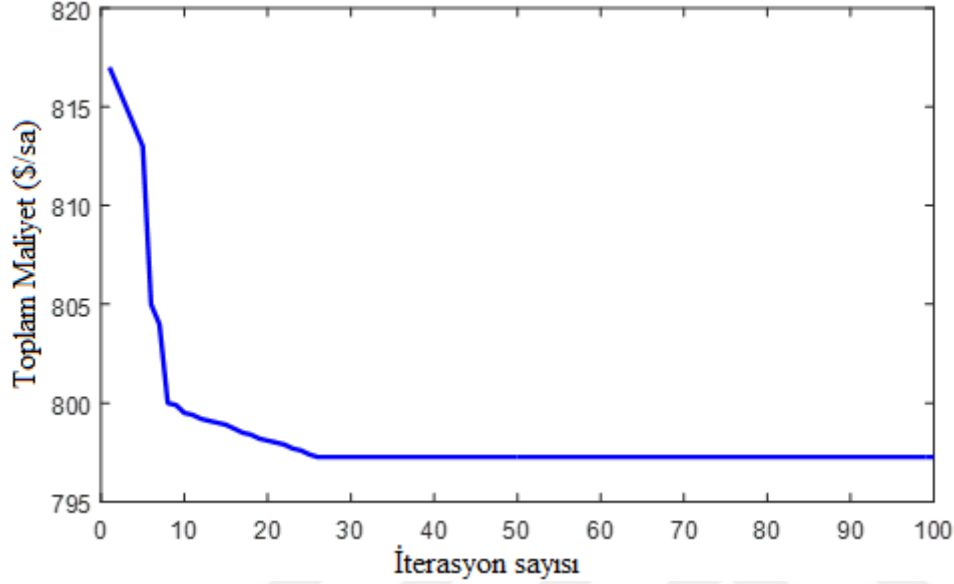
Bu formülasyon kullanılarak i numaralı baranın üretim maliyeti hesaplanabilir. Burada kullanılan a, b ve c katsayıları, i numaralı üretim barasının maliyet katsayıları olarak literatürde kullanılmaktadır [51]. IEEE 30 baralı test sisteminde her bir üretim barası için literatürde verilen katsayılar Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Üretim baralarının yakıt maliyeti katsayıları [20]

Üretim Barası Numarası	a katsayısı	b katsayısı	c katsayısı
1	0,00375	2	0
2	0,0175	1,75	0
3	0,0625	1	0
4	0,083	3,25	0
5	0,025	3	0
6	0,025	3	0

GAA kullanılarak yakıt maliyeti minimizasyonu gerçekleştirilirken, program 100 kere çalıştırılmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen maksimum değer 799,623 \$/sa, minimum değer 797,270 \$/sa olarak elde edilmiştir. 100 çalışmanın ortalaması alındığında ise 798,812 \$/sa

bulunmuştur. Elde edilen minimum maliyet sırasında programın belirlediği parametreler ile sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması Çizelge 6.8’de verilmiştir. Minimum sonuca yakınsama grafiği ise Şekil 6.2’de verilmiştir [52].



Şekil 6.2. Yakıt maliyeti minimizasyonu yakınsama grafiği [52]

Şekil 6.2’de görüldüğü üzere elde edilen minimum maliyete 26. iterasyonda ulaşılmıştır. Bu da GAA’nın başlangıçta global optimuma ağırlık vermesinin ne kadar başarılı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.8’de, yakıt maliyeti minimizasyonunun sonucunda elde edilen parametrelerin ve maliyetin değerleri verilmiştir. Bunun yanı sıra, gelişmiş genetik algoritma (GGA) [53], biyojeografi tabanlı optimizasyon (BO) [54], ateşböceği sürü optimizasyonu (ASO) [26] ve harmonik arama algoritması (HAA) [55] çözüm teknikleri ile elde edilmiş sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, GAA kullanılarak OGA probleminin çözümünün, literatürde kullanılmış yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Programın çalışması 58,54 saniye sürmüştür.

Çizelge 6.8. Yakıt maliyeti minimizasyonu sonuçları ve literatür karşılaştırması

Parametreler	GGA[53]	BO[54]	ASO [26]	HAA[55]	GAA
P _{Ü1} (MW)	177,594	177,0177	174,92	177,196	186,100
P _{Ü2} (MW)	48,722	48,641	44,15	48,2275	45,5253
P _{Ü5} (MW)	21,954	21,239	21,76	21,2792	23,4028
P _{Ü8} (MW)	20,954	21,136	25,73	21,2049	11,4255
P _{Ü11} (MW)	11,768	11,944	11,12	11,6715	10,4083
P _{Ü13} (MW)	12,0520	12,054	13,81	12,3595	14,8094
V ₁ (p.u.)	1,0810	1,1	1,0924	1,0997	1,0785
V ₂ (p.u.)	1,063	1,0876	1,0735	1,0829	1,0650
V ₅ (p.u.)	1,034	1,0614	1,0429	1,0505	1,0210
V ₈ (p.u.)	1,038	1,0695	1,0676	1,0558	1,0410
V ₁₁ (p.u.)	1,1	1,0982	1,0765	1,0972	0,9919
V ₁₃ (p.u.)	1,055	1,0998	1,0829	1,0978	1,0825
T _{6,9} (p.u.)	1,0	1,05	1,075	1,0194	0,9780
T _{6,10} (p.u.)	0,975	0,9	0,9125	0,9015	0,9690
T _{6,12} (p.u.)	0,975	0,99	1,0	0,9857	0,9320
T _{28,27} (p.u.)	1,0	0,97	0,9875	0,9558	0,9680
Maliyet (\$/sa)	800,805	799,1116	799,06	798,8000	797,27
P _{kayıp} (MW)	-	8,63	8,48	8,6541	8,27

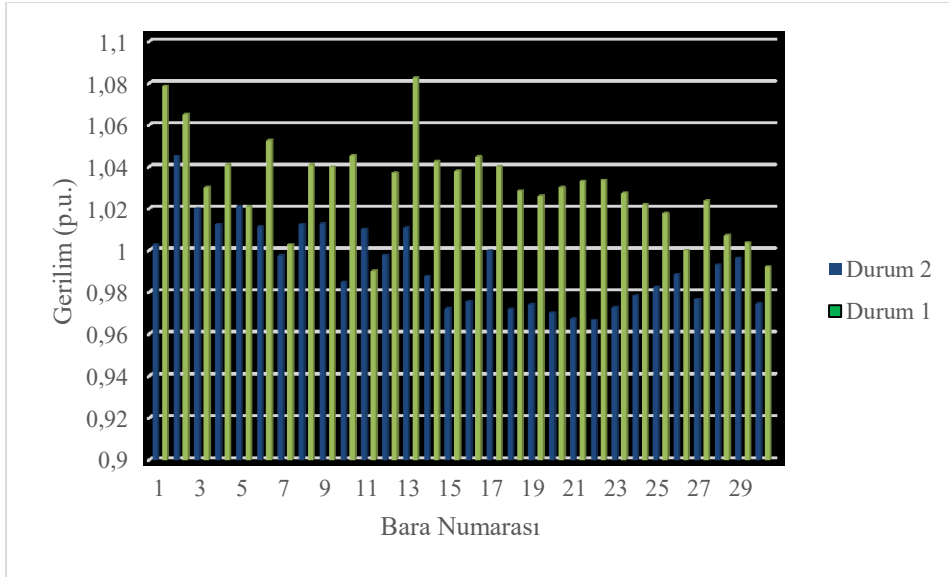
6.2.2. Gerilim profilinin geliştirilmesi

Bara gerilimleri, güç sistemlerinde işletme kalitesi ve güvenlik açısından çok önemli bir yere sahiptir. Yakıt maliyeti minimize edilirken, maliyet istenilen değere inebilir fakat baralardaki gerilim sapmaları sistem güvenliğini tehlikeye atacak değerlere gelebilir. Bu nedenle, gerilim profilinin de geliştirilmesi önemli bir amaç fonksiyonudur. Bu durumda, baralardaki gerilim sapmaları, 1 per unit değerine olabildiğince yaklaştırılmaya çalışılmaktadır. Gerilim profilinin geliştirilmesi amaç fonksiyonu Eş. 6.2’de verilmiştir.

$$f_i = f_{ym_i} + w \cdot VD = \sum_{i=1}^{ÜBS} f_i(P_{Üi}) + w \sum_{i=1}^{YBS} |V_i - 1.0| \quad (6.2)$$

Eş. 6.2’de w ile gösterilen değer ağırlık denge katsayısıdır. Bu katsayı kullanılarak yakıt maliyeti ve gerilim profili fonksiyonlarının birbiri üzerinde baskınlık kurması engellenir. Böylece, gerilim profili geliştirilirken yakıt maliyetinin çok fazla artması engellenir.

Elde edilen sonuçlara baktığımızda, yakıt maliyeti minimizasyonu gerçekleştirilirken gerilim profili 0,88 p.u. olarak bulunmuştur. Gerilim profilinin geliştirildiği bu durumda ise elde ettiğimiz sonuç 0,081 p.u. olmuştur. Gerilim profilinin 1 p.u. değerine yaklaştırmaya çalışılan bu durumda algoritma, yakıt maliyetinin minimizasyonuna ağırlık vermez. Bu nedenle ilk durumda 797,270 \$/sa olan maliyet değeri bu durumda 803,490 \$/sa değerine çıkmıştır. Geliştirilmiş gerilim profilinin, yakıt maliyetinin minimizasyonu durumundaki gerilim profili ile karşılaştırıldığı grafik Şekil 6.3’de verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere, durum 2 yani gerilim profilinin geliştirilmesi durumunda gerilimler 1 p.u. değerine oldukça yaklaştırılmıştır. Program 63,67 saniye içerisinde yakınsamıştır.



Şekil 6.3. Gerilim profilinin iki durum için karşılaştırılması

6.2.3. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu

Güç sistemlerinde, elektrik sadece tek bir kaynak kullanılarak üretilmez. Doğalgaz, kömür ve yağ gibi farklı kaynaklar kullanılarak üretim yapılır ve aynı sisteme bağlanır. Farklı kaynaklar göz önünde bulundurularak yapılan yakıt maliyeti minimizasyon işlemi parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu olarak adlandırılır. Bu durumda, ilk iki üretim biriminin farklı kaynaklarla üretim yaptığı, diğer üretim birimlerinin ise aynı kaynaklar ile üretim yaptığı varsayılır. İlk iki üretim birimi için kullanılan amaç fonksiyonu Eş. 6.3’de verilmiştir. Diğer üretim birimleri için ilk durumdaki yakıt maliyeti fonksiyonu kullanılır.

$$F_{KYi}(P_{Ui}) = \begin{cases} c_{i1} + b_{i1}P_{Ui} + a_{i1}P_{Ui}^2 \\ c_{i2} + b_{i2}P_{Ui} + a_{i2}P_{Ui}^2 \\ \dots \\ c_{ik} + b_{ik}P_{Ui} + a_{ik}P_{Ui}^2 \end{cases} \quad (6.3)$$

İki üretim birimi için kullanılan Eş. 6.2'nin yanında diğer kaynaklar için kullanılan fonksiyon da bulunmalıdır. Böylece Eş. 6.4'de verilen parçalı kuadratik yakıt maliyeti fonksiyonu ortaya çıkar.

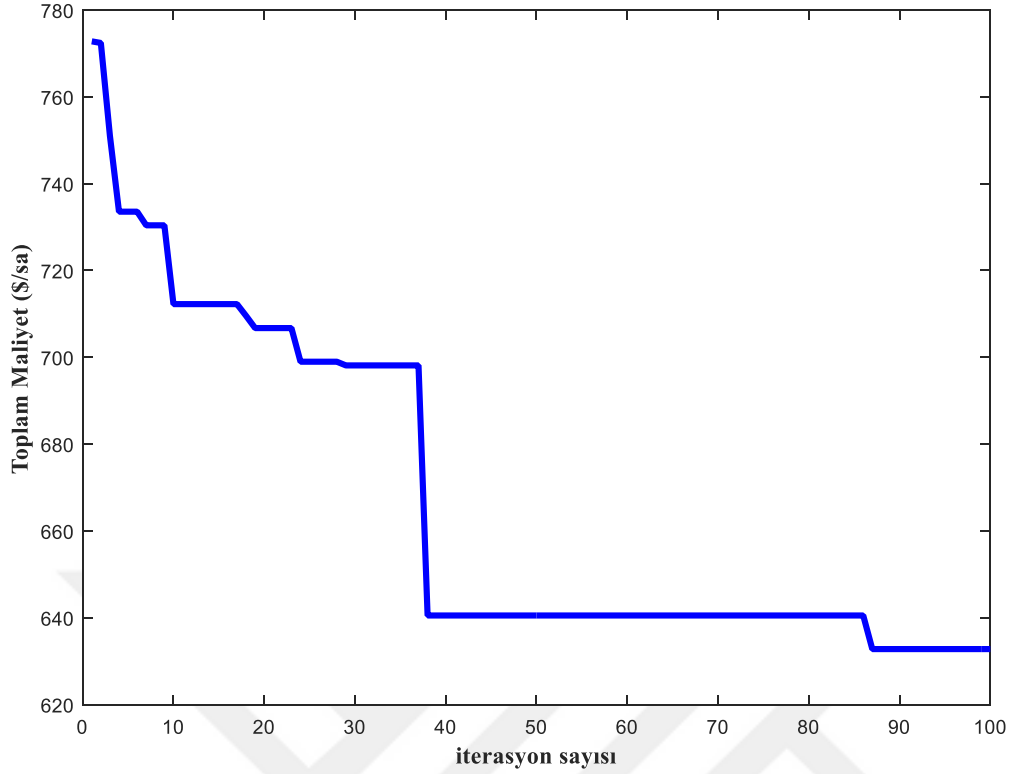
$$J = \left(\sum_{i=1}^2 a_{ik} + b_{ik}P_{Ui} + c_{ik}P_{Ui}^2 \right) + \left(\sum_{i=3}^{N_0} a_i + b_iP_{Ui} + c_iP_{Ui}^2 \right) \quad (6.4)$$

Bu durumda, ilk iki kaynak için kullanılan a, b ve c katsayıları Çizelge 6.9'de verilmiştir. Bu iki üretim birimi dışında kalan birimler için kullanılan katsayılar ise Çizelge 6.7'de verilen katsayılardır.

Çizelge 6.9. ilk iki üretim ünitesi için parçalı kuadratik yakıt maliyeti katsayıları [33]

Bara Numarası	Üretilebilecek Minimum Güç	Üretilebilecek Maksimum Güç	a katsayısı	b katsayısı	c katsayısı
1	50	140	0,0050	0,70	55
	140	200	0,0075	1,05	82,5
2	20	55	0,0100	0,30	40
	55	80	0,0200	0,60	80

Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonunun en iyi sonuca yakınsama grafiği Şekil 6.4'de verilmiştir. Elde edilen minimum sonuç 632,7738 \$/sa olarak bulunmuştur. Programın 100 kere çalıştırılması neticesinde ortalama maliyet 632,987 \$/sa, maksimum maliyet ise 633,143 \$/sa olarak elde edilmiştir. En iyi sonuç ve bu sonuca ait parametreler Çizelge 6.10'da verildiği gibidir. Programın minimum sonucu elde etmek için çalışma süresi 58,39 saniyedir. Elde edilen sonuçlar, yine aynı çizelgede verilen literatürdeki gece kelebeği sürü algoritması (GSA) [33], yerçekimsel arama algoritması (YAA) [19] ve arı kolonisi algoritması (AKO) [56] çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çizelgeden de görüldüğü üzere GAA tabanlı optimizasyon tekniği ile alınan sonuçlar daha umut verici çıkmıştır.



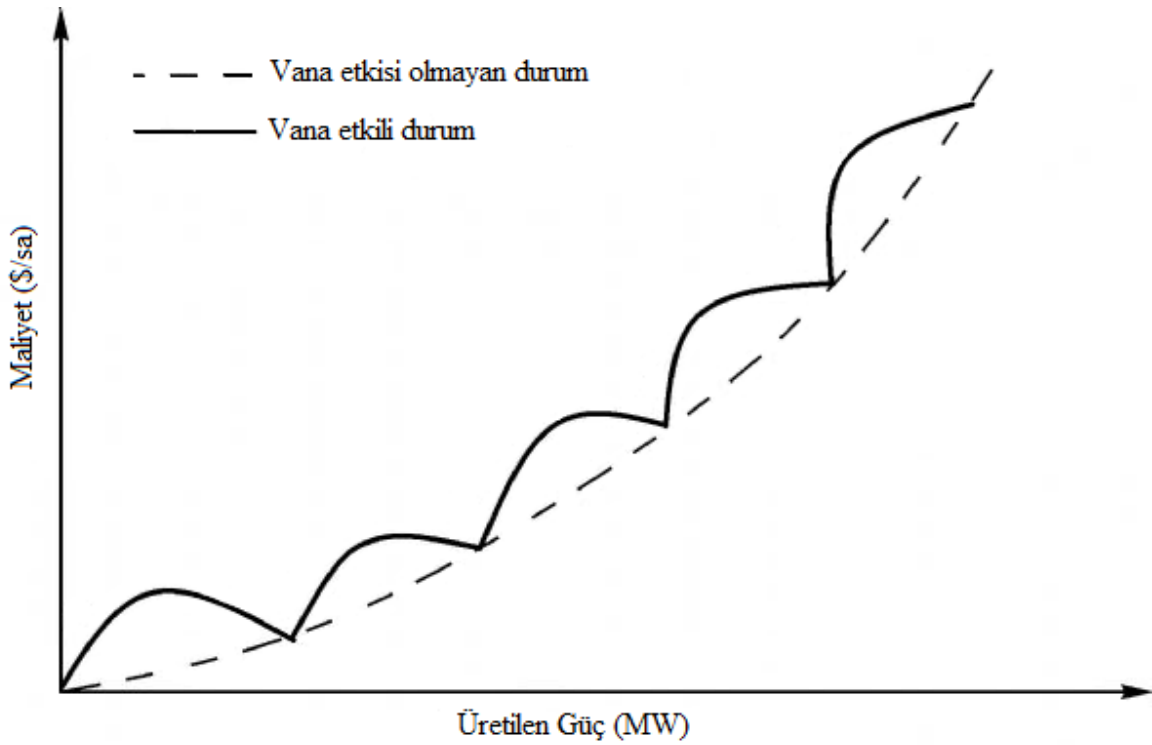
Şekil 6.4. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu yakınsama grafiği

Çizelge 6.10. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu sonuçları ve bu sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırması

Parametreler	GSA	YAA	AKO	GAA
P _{Ü1} (MW)	139,99	139,99	139,94	117,58
P _{Ü2} (MW)	54,99	54,92	54,98	52,12
P _{Ü5} (MW)	24,09	24,99	23,01	41,13
P _{Ü8} (MW)	35	30,24	33,05	30,13
P _{Ü11} (MW)	19,50	19,58	17,84	19,13
P _{Ü13} (MW)	16,61	20,21	21,80	28,85
V ₁ (p.u.)	1,075	1,049	1,050	1,0145
V ₂ (p.u.)	1,056	1,009	1,039	0,9599
V ₅ (p.u.)	1,026	1,014	1,013	1,0129
V ₈ (p.u.)	1,035	1,034	1,024	1,0041
V ₁₁ (p.u.)	1,068	0,950	1,100	1,0149
V ₁₃ (p.u.)	1,077	1,003	1,086	0,9874
T _{6,9} (p.u.)	0,992	1,100	1,000	0,9087
T _{6,10} (p.u.)	0,958	1,099	0,900	0,9147
T _{6,12} (p.u.)	1,024	1,099	1,000	1,0436
T _{28,27} (p.u.)	0,968	1,079	0,923	0,9097
Maliyet (\$/sa)	646,83	646,84	649,08	632,7738
P _{kayıp} (MW)	6,80	6,57	7,25	5,57

6.2.4. Vana etkili yakıt maliyeti minimizasyonu

Geleneksel ekonomik dağıtımda işlemleri kolaylaştırmak amacıyla, güç sisteminin verimliliğinin kuadratik olarak, parçalı lineer şekilde veya düz bir eğri şeklinde arttığı varsayılmaktadır. Fakat pratik hayatta, türbine verilen buharlar vanalar vasıtasıyla kontrol edilir ve farklı çıkış birimlerine gönderilir. Her bir çıkış ağzı, tam kapasite ile çalıştığı zaman en yüksek verime ulaşabilmektedir. Bu nedenle, çıkış gücü arttıkça vanalar sıra sıra açılarak çıkışta yüksek verim elde edilmeye çalışılmaktadır. Şekil 6.5’de, vana etkisinin olduğu ve olmadığı durumlarda maliyete karşılık üretilen gücü gösteren örnek bir grafik verilmiştir.



Şekil 6.5. Vana etkisinin olduğu ve olmadığı durumlarda maliyet-üretilen güç grafiği

Optimizasyonu yapılan bu durumda, birinci ve ikinci üretim ünitelerinin vana etkisine sahip olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Bu iki üretim ünitesinin maliyet fonksiyonuna, vana etkisini modellemek amacıyla sinüsoidal bir fonksiyon eklenmiştir. Bu maliyet fonksiyonu Eş. 6.5’de verilmiştir.

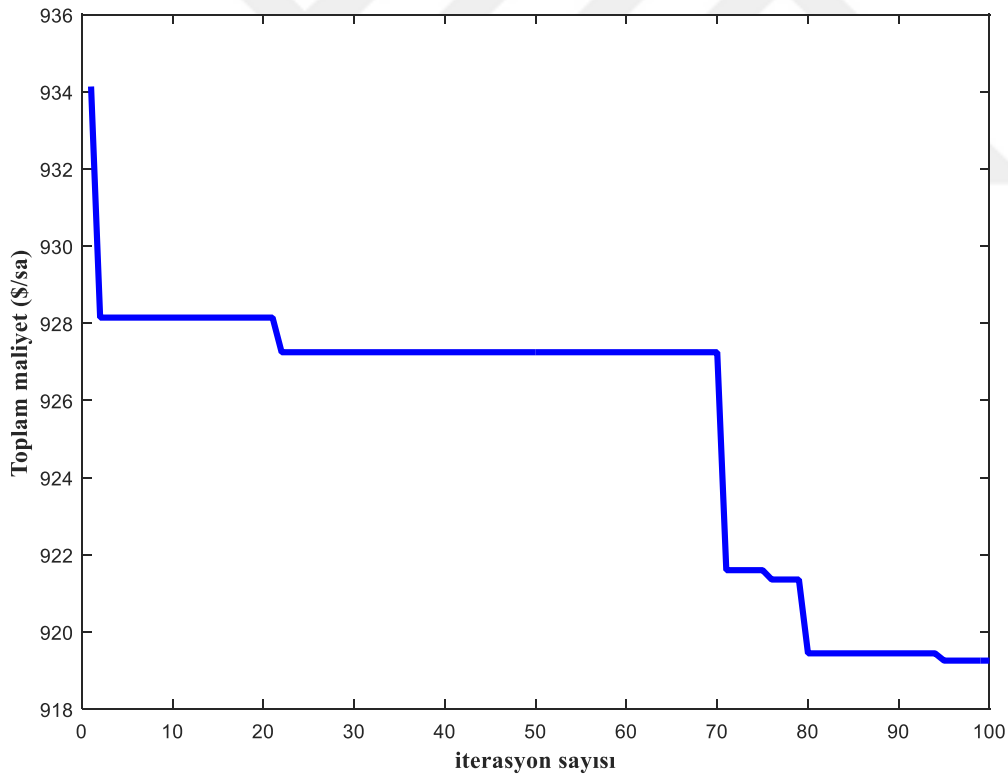
$$F_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + \left| d_i \sin \left(e_i (P_{Gi}^{\min} - P_{Gi}) \right) \right| \quad (6.5)$$

Eş. 6.5’da görülen a, b, c, d, e katsayıları vana etkisine sahip iki üretim ünitesi için kullanılmaktadır. Bu ünitelerin, minimum ve maksimum üretim limitleri ile maliyet katsayıları Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11. Vana etkisine sahip üretim ünitelerinin minimum ve maksimum limitleri ve maliyet katsayıları [33]

Bara Numarası	$P_{\bar{U}}^{\min}$	$P_{\bar{U}}^{\max}$	a	b	c	d	e
1	50	200	150	2	0,0016	50	0,0630
2	20	80	25	2,5	0,0100	40	0,0980

Vana etkisine sahip iki ünitenin Eş. 6.5’de verilen maliyet fonksiyonu, geriye kalan ünitelerin maliyet fonksiyonlarına eklenerek Eş. 6.6’da verilen sistemin toplam maliyet fonksiyonu elde edilir.



Şekil 6.6. Vana etkili durum için toplam maliyetin yakınsama grafiği

$$F_i(P_{\bar{U}i}) = a_i + b_i P_{\bar{U}i} + c_i P_{\bar{U}i}^2 + \left| d_i \sin(e_i (P_{\bar{U}i}^{\min} - P_{\bar{U}i})) \right| + \left(\sum_{i=3}^{N_U} a_i + b_i P_{\bar{U}i} + c_i P_{\bar{U}i}^2 \right) \quad (6.6)$$

Eş. 6.6’da diğer üretim birimleri için gösterilen a, b, c katsayıları Çizelge 6.7’de verilen katsayılardır.

Vana etkisinin göz önünde bulundurulduğu bu durum için GAA 100 kere çalıştırılmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen minimum maliyet değeri 918,790 \$/sa, maksimum değer 944,451 \$/sa ve bu 100 çalışmanın ortalaması ise 927,660 \$/sa olarak elde edilmiştir. Minimum sonuca yakınsama grafiği Şekil 6.6'da verilmiştir. Elde edilen en iyi sonuç ve bu sonuca ait parametreler Çizelge 6.12'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki gece kelebeği sürü algoritması (GSA) [33], yerçekimsel arama algoritması (YAA) [19] ve arı kolonisi algoritması (AKO) [56] çalışmalarındaki sonuçlarla yine aynı çizelgede karşılaştırılmıştır. Minimum sonuç 59,39 saniyede elde edilmiştir.

Çizelge 6.12. Vana etkisinin göz önünde bulundurulduğu durumda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması

Parametreler	GSA	YAA	AKO	GAA
P _{Ü1} (MW)	197,56	199,59	194,84	199,59
P _{Ü2} (MW)	51,96	51,94	51,99	51,82
P _{Ü5} (MW)	15	15	15	14,22
P _{Ü8} (MW)	10	10	10	9,12
P _{Ü11} (MW)	10	10	10	9,22
P _{Ü13} (MW)	12	12	15,65	11,13
V ₁ (p.u.)	1,033	1,099	1,022	0,970
V ₂ (p.u.)	1,011	1,018	1,003	1,005
V ₅ (p.u.)	0,971	1,052	1,025	0,952
V ₈ (p.u.)	1,034	0,950	1,007	0,958
V ₁₁ (p.u.)	1,099	0,963	0,982	1,006
V ₁₃ (p.u.)	1,099	0,950	1,100	1,003
T _{6,9} (p.u.)	1,1	0,909	1,050	0,987
T _{6,10} (p.u.)	1,053	0,918	1,100	1,049
T _{6,12} (p.u.)	1,069	0,925	0,962	0,962
T _{28,27} (p.u.)	1,065	0,945	0,900	1,071
Maliyet (\$/sa)	930,74	929,72	945,44	918,79
P _{kayıp} (MW)	13,13	15,14	14,09	11,73

Çizelge 6.12'de, GAA'nın başlangıçta global optimuma yönelmesinin getirdiği avantaj sayesinde literatürdeki sonuçlardan çok daha iyi bir sonuç elde ettiği gözükmemektedir.

6.2.5. Gerilim kararlılığının artırılması

Güç sistemlerinin dengeli ve ekonomik çalışabilmesi için gereken en önemli şartlardan biri gerilimdeki salınımların en aza indirilmesidir. Gerilimdeki salınımlar ile elektrik enerjisinin kalitesi arasında doğru orantı vardır. Yani gerilimdeki kararlılık arttıkça, tüketiciye sağlanan elektriğin kalitesi de artmaktadır. Gerilim kararlılığını sağlamak için bir güç sistemindeki baraların gerilimlerinin, sürekli olarak uygun sınırlar içinde tutulmalıdır.

Bir güç sistemi çalıştığı sırada, sistemin kurulumunun değişmesi, yük talebinin artması veya azalması gerilim kararlılığını etkileyen en önemli etmenlerdir. Bu değişimler, gerilimde büyük düşüslere sebep olabilmektedir. Bu nedenle, gerilim kararlılığını ifade eden, her baradaki L indeksi değerini minimize etmek yani gerilim kararlılığını yükseltmek OGA'nın en önemli amaç fonksiyonlarından biridir. Bu indeks normal güç akışından alınan verileri kullanmaktadır. L indeksin değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. İndeks değeri 1'e yaklaştıkça gerilimdeki kararsızlıkta artmaktadır. Gerilim kararlılığını artırmak için kullanılan L indeks amaç fonksiyonu Eş. 6.7'de verilmiştir.

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{N_{\bar{U}}} F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \right| \quad (6.7)$$

Bu eşitlikte, j harfi gerilim kararlılığı minimize edilecek olan baranın numarasını ifade etmektedir. F_{ji} ifadesinin açılımı ise Eş. 6.8'de verilmiştir.

$$F_{ji} = -[Y_1]^{-1} [Y_2] \quad (6.8)$$

Eş. 6.8'de Y_1 ve Y_2 olarak ifade edilen matrisler, sistemin bara admitans matrisinin alt matrisleridir. Alt matrisler başka bir şekilde daha ifade edilebilir. Baralardaki gerilim ve akımlar Eş. 2.14'de gösterildiği gibi birbirine bağlıdır. Bu denklemleri üretim ve yükler olarak ayırırsak Eş. 6.9'daki ifade karşımıza çıkar.

$$\begin{bmatrix} V_Y \\ I_{\bar{U}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{YY} & F_{Y\bar{U}} \\ K_{\bar{U}Y} & M_{\bar{U}\bar{U}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_Y \\ V_{\bar{U}} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Eş. 6.9'daki Z_{YY} , $F_{YÜ}$, $K_{ÜY}$, ve $M_{ÜÜ}$ ile belirtilenler, bara admitans matrisinin alt matrislerinin yük ve üretim olarak gösterimleridir. Tüm sistemin gerilim kararlılığını ifade eden L indeks amaç fonksiyonu Eş. 6.10'da verilmiştir.

$$L = \max(L_j) \quad j = 1, 2, \dots, N_Y \quad (6.10)$$

Eş. 6.10'daki ifadeye göre elde edilen maksimum L indeks değeri sistemin en kararsız noktasını ifade eder ve bu da tüm sistemin kararlılık durumunu gösterir.

Gerilim kararlılığı minimize edilirken yakıt maliyeti de minimize edilmelidir. Bu sayede hem sistemin baralarındaki gerilimler istenilen sınırlarda olur hem de maliyetlerin yükselmesi engellenir. Bunu sağlamak için Eş. 6.10'daki ifade bir ceza katsayısı ile çarpılarak Eş. 6.1'deki ifadeye eklenmelidir. Tüm sistemin gerilim kararlılık ve maliyet minimizasyon fonksiyonu Eş. 6.11'de verilmiştir.

$$F_i = \left(\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}^2 a_i + P_{Gi} b_i + c_i \right) + \lambda_Y (L_j) \quad (6.11)$$

Eş. 6.11'de görülen λ_Y , maliyet ve gerilim kararlılık fonksiyonlarının birbiri üzerinde baskınlık sağlamasına engel olan ceza katsayısını ifade etmektedir. λ_Y katsayısı, bu çalışmada 100 olarak alınmıştır.

GAA ile yapılan Gerilim kararlılığı minimizasyonundan elde edilen sonuçlar Çizelge 6.13'de verilmiştir. Yine aynı çizelgede, elde ettiğimiz sonuçlar bu amaç fonksiyonu için literatürde bulunan en iyi sonuçlara sahip gece kelebeği sürü algoritması (GSA) [33], arı kolonisi algoritması (AKA) [57] ve diferansiyel gelişim algoritması (DGA) [16] çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Algoritma 100 kere çalıştırılmıştır. Bu 100 çalışmada, elde edilen en iyi L indeks sonucu 0,1107, maksimum sonuç 0,1178 ve tüm sonuçların ortalaması 0,1134 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar 71,23 saniyede elde edilmiştir.

Çizelge 6.13. Gerilim kararlılığının artırılması durumunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların literatür örnekleri ile karşılaştırılması

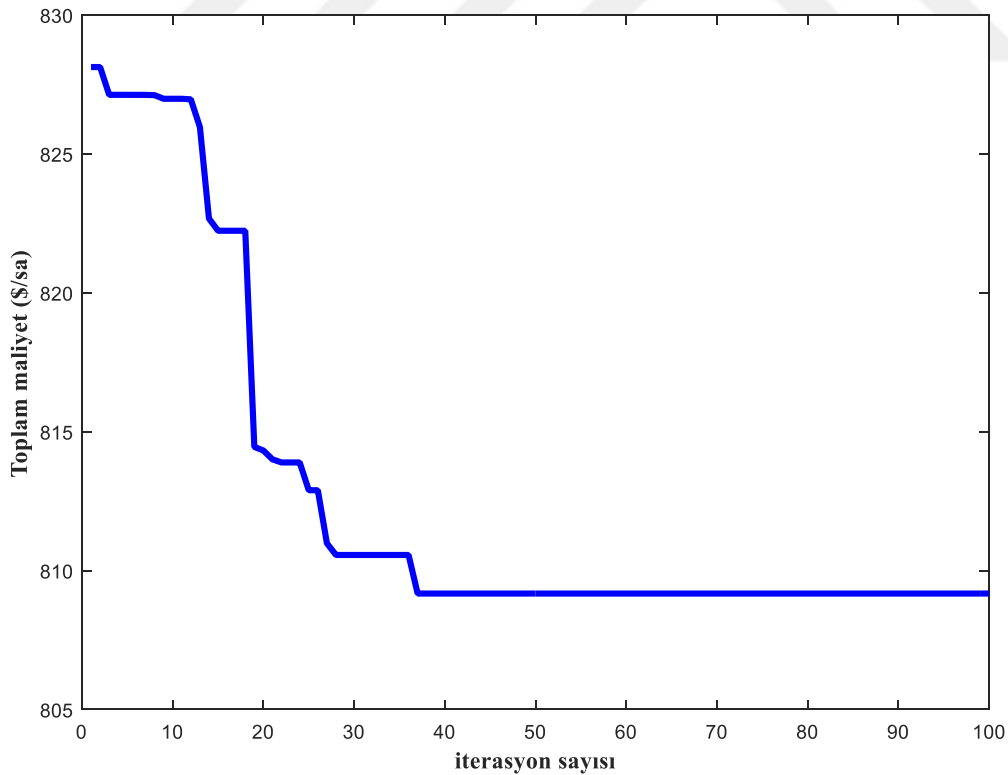
Parametreler	Min.	Maks.	GSA	AKA	DGA	GAA
P _{Ü1} (MW)	50	200	175,641	176,480	171,655	178,750
P _{Ü2} (MW)	20	80	47,066	48,859	48,993	36,742
P _{Ü5} (MW)	15	50	21,545	21,762	22,289	24,766
P _{Ü8} (MW)	10	35	21,043	21,431	21,011	16,975
P _{Ü11} (MW)	10	30	14,762	12,161	17,325	15,580
P _{Ü13} (MW)	12	40	12,317	12	12,438	19,813
V ₁ (p.u.)	0,95	1,1	1,077	1,072	1,077	1,047
V ₂ (p.u.)	0,95	1,1	1,061	1,062	1,066	0,958
V ₅ (p.u.)	0,95	1,1	1,033	1,056	1,082	0,992
V ₈ (p.u.)	0,95	1,1	1,048	1,043	1,087	0,971
V ₁₁ (p.u.)	0,95	1,1	1,099	1,028	1,059	0,962
V ₁₃ (p.u.)	0,95	1,1	1,050	1,049	1,019	1,027
T ₁₁ (p.u.)	0,90	1,1	1,042	1,012	0,903	0,999
T ₁₂ (p.u.)	0,90	1,1	0,905	0,90	0,965	1,026
T ₁₅ (p.u.)	0,90	1,1	0,974	1	0,918	0,995
T ₃₆ (p.u.)	0,90	1,1	0,971	0,975	0,914	1,010
Q _{C10} (MVAR)	0,00	5	3,389	0,05	1,791	1,012
Q _{C12} (MVAR)	0,00	5	1,831	0,05	4,584	1,018
Q _{C15} (MVAR)	0,00	5	2,985	0,03	1,979	0,9515
Q _{C17} (MVAR)	0,00	5	1,090	0,05	1,199	0,990
Q _{C20} (MVAR)	0,00	5	0,673	0,05	4,364	1
Q _{C21} (MVAR)	0,00	5	3,741	0,04	4,802	1,014
Q _{C23} (MVAR)	0,00	5	2,455	0,04	2,249	0,983
Q _{C24} (MVAR)	0,00	5	2,346	0,05	1,219	1,035
Q _{C29} (MVAR)	0,00	5	2,383	0,03	0,893	0,984
Maliyet (\$/sa)			801,224	801,665	807,527	807,9913
Güç Kaybı (MW)			8,976	9,295	10,314	9,22
L-indeks			0,137	0,137	0,1219	0,1107
Emisyon (ton/sa)			0,361	0,364	-	0,5846

Çizelge 6.13’de, GAA tabanlı optimizasyon tekniği ile elde edilen gerilim kararlılığının, literatürde bulunan sonuçlara göre daha iyi olduğu ortaya konmuştur. Bu da, GAA’nın daha güvenli ve kararlı olduğunu göstermektedir. Bu durumda L indeksinin minimize edilmesi ana amaç olduğu için maliyette hafif bir artış gözlenmiştir.

6.2.6. Kısıtlılık durumunda gerilim kararlılığının artırılması

Güç sistemleri, her zaman planlanan şekilde çalışmayabilir. Sistemleri oluşturan çok sayıda cihaz ve ekipman vardır. Bu cihazlar da her zaman istenilen şekilde çalışmaz veya arıza durumuna geçebilir. Aynı zamanda, yüklerin durumları da kararlılık göstermeyebilir. Bu tür durumlarda gerilim kararlılığının düzenlenmesi daha da zor hale gelir. Bu nedenle, hatlarda oluşabilecek kaçakların simüle edildiği kısıtlılık durumunda gerilim kararlılığının artırılması, OGA'daki en önemli amaç fonksiyonlarından biridir.

Güç sistemlerindeki en önemli kısıtlılık koşullarından biri, n adet hatta sahip olduğu bilinen bir sistemin $n-1$ koşulunda çalışma durumudur. Bu koşuldan yola çıkarak, gerilim kararlılığının kısıtlılık durumunda geliştirilmesi için IEEE 30 baralı test sistemi üzerindeki 2 ve 6 numaralı baralar arasındaki hatta kaçak olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım göz önünde bulundurularak sistemin gerilim kararlılığı düzenlenmeye çalışılmıştır. Bu kararlılığı sağlayabilmek için 6.11'de verilen amaç fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 6.7. Kısıtlılık durumunda gerilim kararlılığının geliştirilmesi amaç fonksiyonu için yakıt maliyeti yakınsama grafiği

Şekil 6.7’de kısıtlılık durumunda L indeks minimizasyonu yapıldığı sırada ortaya çıkan maliyet değerinin yakınsama grafiği verilmiştir. Bu durumda, bulunan toplam yakıt maliyeti 809,172 \$/sa bulunmuştur. GAA, bu durum için 100 kere çalıştırılmış olup bulunan en iyi L indeks değeri 0,1170, en yüksek L indeks 0,1189 ve tüm çalışmalarda elde edilen sonuçların ortalaması 0,1178 olarak bulunmuştur. Programın çalışması 76,22 saniye sürmüştür. Elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların gece kelebeği sürü algoritması (GSA) [33], arı kolonisi algoritması (AKA) [57] ve diferansiyel gelişim algoritması (DGA) [16] çalışmalarında elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılması Çizelge 6.14’de verilmiştir.

Çizelge 6.14. Kısıtlılık altında gerilim kararlılığının artırılması durumunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların literatür örnekleri ile karşılaştırılması

Parametreler	GSA	AKA	DGA	GAA
P _{Ü1} (MW)	175,486	175,503	185.562	177.635
P _{Ü2} (MW)	47,924	49,219	38.576	37.114
P _{Ü5} (MW)	21,374	19,033	18.356	24.983
P _{Ü8} (MW)	23,920	25,712	26.125	17.130
P _{Ü11} (MW)	12,643	13,105	10.104	15.704
P _{Ü13} (MW)	12	12	15.783	19.986
V ₁ (p.u.)	1,087	1,057	1.095	0.9962
V ₂ (p.u.)	1,070	1,044	1.089	1.033
V ₅ (p.u.)	1,034	1,062	1,087	1,024
V ₈ (p.u.)	1,027	1,046	1,099	0,968
V ₁₁ (p.u.)	1,091	1,070	1,096	0,986
V ₁₃ (p.u.)	1,062	1,071	1,055	1,039
T ₁₁ (p.u.)	1,025	0,95	0,968	0,974
T ₁₂ (p.u.)	0,936	1,062	1,022	0,963
T ₁₅ (p.u.)	1,012	1	0,937	1,059
T ₃₆ (p.u.)	0,959	0,937	0,914	0,960
Q _{C10} (MVAR)	1,837	0,05	3,458	3,414
Q _{C12} (MVAR)	5	0,05	1,040	2,309
Q _{C15} (MVAR)	5	0,05	3,866	1,463
Q _{C17} (MVAR)	5	0,05	0,801	4,162
Q _{C20} (MVAR)	2,837	0,05	2,314	2,852
Q _{C21} (MVAR)	5	0,05	4,313	0,352
Q _{C23} (MVAR)	5	0,05	4,546	1,331
Q _{C24} (MVAR)	5	0,05	1,106	0,854
Q _{C29} (MVAR)	1,486	0,05	1,833	2,801
Maliyet (\$/sa)	804,483	809,011	810,266	809,172
Güç Kaybı (MW)	9,948	11,175	11,109	9,191
L-indeks	0,13917	0,147	0,134	0,117
Emisyon (ton/sa)	0,361	0,361	-	0,59

Çizelge 6.14’de verilen sonuçlara bakıldığında GAA tabanlı OGA çözümünde optimize edilen kısıtlılık durumundaki gerilim kararlılığı, literatürde elde edilmiş sonuçlara göre daha iyi çıkmıştır. Yani, L indeks değeri 0,1170’e çekilerek sistemin gerilim kararlılığı artırılmıştır.

6.2.7. Emisyon yakıt maliyeti minimizasyonu

Son yüzyılda teknoloji çok hızlı bir ilerleme sağladı. Bu gelişmeye paralel olarak, sanayileşme ve elektrik talebi gün geçtikçe arttı. Bu artışların sonucu olarak günümüzde, insanoğlunun doğaya verdiği zararı ifade eden karbon ayak izi tarihin hiçbir döneminde olmadığı kadar yüksek seviyelere ulaştı. Artık, maliyetlerin düşürülmesi kadar doğaya verdiğimiz zararı da azaltmak ve gelecek nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakmak en önemli amaçlarımızdan biri haline gelmiştir.

Güç sistemlerinde fosil yakıt kullanımına bağlı olarak sülfür oksit (SOX) ve nitrojen oksit (NOX) gibi atmosfere zarar veren gazlar ortaya çıkmaktadır. Bu zararlı gaz salınımlarını azaltmayı amaç edinen fonksiyon Eş. 6.12’de verilmiştir.

$$E = \sum_{i=1}^{N_G} 10^{-2} (P_{\tilde{U}_i}^2 \gamma_i + P_{\tilde{U}_i} \beta_i + \alpha_i) + (w_i e^{(\mu_i P_{\tilde{U}_i})}) \quad (6.12)$$

Eş. 6.12’de E ile gösterilen fonksiyon sonucunda ton/sa cinsinden emisyon değeri elde edilir. Formülasyonda görülen α , β , γ , w ve μ katsayıları ilgili referans ile aynı seçilmiştir [58]. Bulunan emisyon değeri (E), λ_E ağırlık katsayısı ile çarpılır ve yakıt maliyeti amaç fonksiyonuna eklenir. Bu sayede, emisyon ve yakıt maliyeti amaç fonksiyonlarının birbirinin önüne geçmesi engellenir. Bu çalışmada ağırlık faktörü 1000 alınmıştır [58]. Yakıt maliyeti ve emisyon fonksiyonlarının entegre edildiği emisyon yakıt maliyeti amaç fonksiyonu Eş. 6.13’de verilmiştir.

$$F_i(E) = \left(\sum_{i=1}^{N_G} P_{\tilde{U}_i}^2 a_i + P_{\tilde{U}_i} b_i + c_i \right) + \lambda_E(E) \quad (6.13)$$

Eş. 6.13’de a, b, c olarak verilen katsayılar Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, emisyon maliyeti minimizasyonu için GAA 100 kere çalıştırılmıştır. Programın çalışması 77,03 saniye sürmüştür. Bu çalışmalarda, elde edilen minimum emisyon değeri 0,1931 ton/sa, maksimum emisyon değeri 0,2134 ton/sa olarak bulunmuştur. 100 çalışmasının ortalaması ise 0,2023 ton/sa olarak elde edilmiştir. Emisyonun minimizasyonu sırasında minimum maliyet ise 922,287 \$/sa olarak elde edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 6.14’de verilmiştir. Elde edilen sonuçların gece kelebeği sürü algoritması (GSA) [33], arı kolonisi algoritması (AKA) [57] ve diferansiyel gelişim algoritması (DGA) [16] çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırması da yine Çizelge 6.15’de verilmiştir.

Çizelge 6.15. Emisyon yakıt maliyeti amaç fonksiyonunun minimizasyonunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması

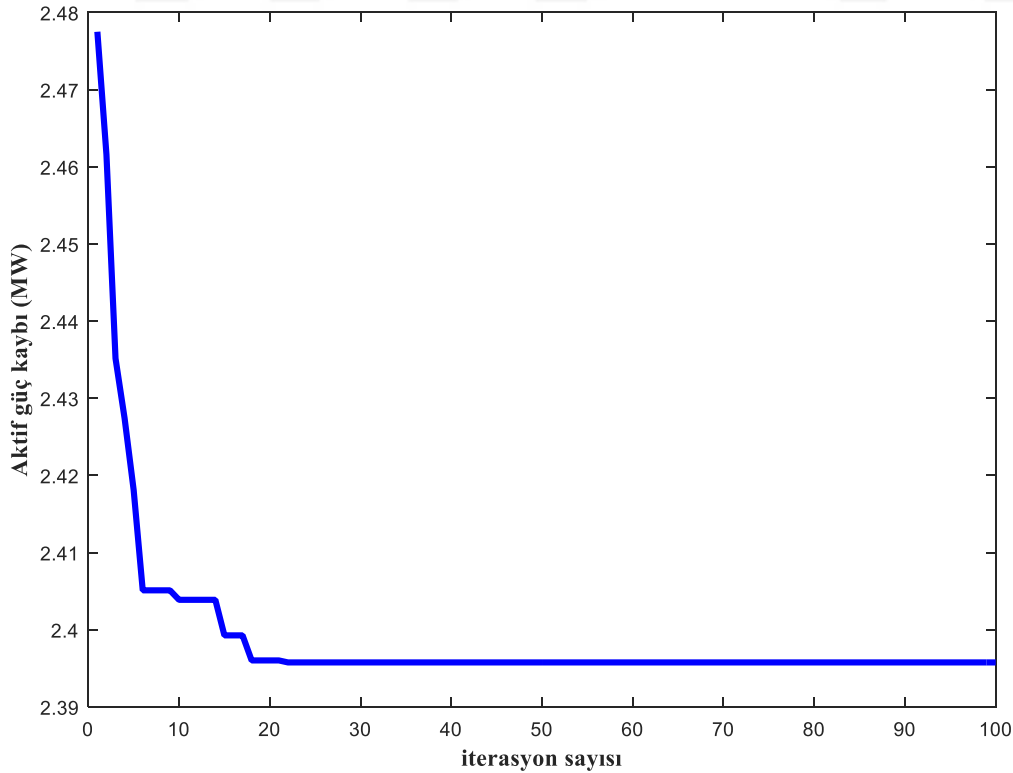
Parametreler	GSA	AKA	DGA	GAA
P _{Ü1} (MW)	64,996	64,062	64,072	70,554
P _{Ü2} (MW)	67,639	67,584	67,571	70,163
P _{Ü5} (MW)	50	50	50	46,465
P _{Ü8} (MW)	35	35	35	32,633
P _{Ü11} (MW)	30	30	30	29,95
P _{Ü13} (MW)	40	40	40	37,618
V ₁ (p.u.)	1,062	1,061	1,060	1,0364
V ₂ (p.u.)	1,056	1,055	1,054	1,0023
V ₅ (p.u.)	1,037	1,035	1,031	0,984
V ₈ (p.u.)	1,043	1,043	1,039	1,024
V ₁₁ (p.u.)	1,075	1,087	1,077	1,002
V ₁₃ (p.u.)	1,053	1,053	1,070	1,003
T ₁₁ (p.u.)	1,099	1,012	0,998	1,003
T ₁₂ (p.u.)	0,900	1,012	1,004	0,970
T ₁₅ (p.u.)	0,996	1	1,036	1,006
T ₃₆ (p.u.)	0,976	0,987	0,979	0,946
Q _{C10} (MVAR)	4,996	0,05	0,039	4,528
Q _{C12} (MVAR)	4,997	0,05	0,05	0,526
Q _{C15} (MVAR)	3,339	0,05	0,05	1,363
Q _{C17} (MVAR)	4,998	0,05	0,05	4,815
Q _{C20} (MVAR)	4,999	0,04	0,05	4,507
Q _{C21} (MVAR)	4,998	0,05	0,05	4,434
Q _{C23} (MVAR)	2,952	0,03	0,0406	0,574
Q _{C24} (MVAR)	4,998	0,05	0,05	4,630
Q _{C29} (MVAR)	2,231	0,03	0,028	0,014
Maliyet (\$/sa)	944,500	944,439	944,408	922,387
Güç Kaybı (MW)	3,235	3,247	3,243	3,984
L-indeks	0,1388	0,1402	0,1273	0,1335
Emisyon (ton/sa)	0,204	0,2048	0,2058	0,1931

6.2.8. Aktif güç kaybının minimizasyonu

Güç sistemlerinde, üretilen enerjinin tüketim noktalarına iletilmesi en önemli parametrelerden biridir. Elektrik kullanımının oldukça yaygınlaşması neticesinde günümüz enerji sistemleri devasa büyüklüklere ulaşmıştır. Bu nedenle, üretim yapan birimler ile tüketim noktaları arası uzaklıklar fazladır. İletim hatlarının uzunluğunun artması neticesinde üretilen enerjinin iletim kayıpları da gittikçe artmıştır. Bu kayıpların artışı, güç sistemlerindeki en önemli sorunlardan biri haline geldiği için OGA probleminin de en önemli amaç fonksiyonlarından biri olmasına neden olmuştur. Aktif güç kaybının minimizasyonunu hedefleyen amaç fonksiyonu Eş. 6.13’de verilmiştir.

$$P_{kayıp} = \sum_{i=1}^{N_{BS}} \sum_{j \neq i}^{N_{BS}} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij}) \quad (6.13)$$

Eş. 6.13’deki i ve j harfleri iletim hattının başlangıç barası ve bitiş barasının numaralarını ifade etmektedir. Şekil 6.8’de aktif güç kaybının yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 6.8. Aktif güç kaybı minimizasyonu yakınsama grafiği

GAA, aktif güç kaybı minimizasyonu için 100 kere çalıştırılmış ve bulunan minimum değer 2,3958 MW olmuştur. Bulunan en büyük değer 2,4211 MW, tüm çalışmalarının ortalaması ise 2,4087 MW olarak elde edilmiştir. Yakınsama süresi ise 71,13 saniyedir. Elde edilen en iyi sonuçlar ve bu sonuçların literatürdeki gece kelebeği sürü algoritması (GSA) [33], arı kolonisi algoritması (AKA) [57] ve diferansiyel gelişim algoritması (DGA) [16] çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması Çizelge 6.16’da verilmiştir.

Çizelge 6.16. Aktif güç kaybı minimizasyonu sonucunda elde edilen sonuçlar ve literatür karşılaştırması

Parametreler	GSA	AKA	DGA	GAA
P _{Ü1} (MW)	51.500	51.507	51.094	109.266
P _{Ü2} (MW)	80	80	80	67.553
P _{Ü5} (MW)	50	50	50	25.30
P _{Ü8} (MW)	35	35	35	34.258
P _{Ü11} (MW)	30	30	30	26.152
P _{Ü13} (MW)	40	40	40	26.775
V ₁ (p.u.)	1.061	1.062	1.060	1.040
V ₂ (p.u.)	1.057	1.057	1.056	0.994
V ₅ (p.u.)	1.038	1.038	1.037	1.014
V ₈ (p.u.)	1.044	1.044	1.045	0.957
V ₁₁ (p.u.)	1.072	1.073	1.100	1.035
V ₁₃ (p.u.)	1.059	1.046	1.047	0.979
T ₁₁ (p.u.)	1.090	1.05	1.032	0.905
T ₁₂ (p.u.)	0.900	0.937	0.999	0.909
T ₁₅ (p.u.)	0.997	0.987	0.991	1.091
T ₃₆ (p.u.)	0.976	0.975	0.978	1.079
QC ₁₀ (MVAR)	4.999	0.05	0.05	4.923
QC ₁₂ (MVAR)	0.767	0.05	0.05	1.090
QC ₁₅ (MVAR)	4.229	0.05	0.05	3.400
QC ₁₇ (MVAR)	5	0.05	0.05	4.732
QC ₂₀ (MVAR)	3.967	0.04	0.05	2.743
QC ₂₁ (MVAR)	5	0.05	0.05	4.160
QC ₂₃ (MVAR)	3.013	0.03	0.0422	1.333
QC ₂₄ (MVAR)	4.999	0.05	0.05	1.941
QC ₂₉ (MVAR)	2.327	0.02	0.03	2.689
Maliyet (\$/sa)	967.663	967.681	967.64	841.822
Güç Kaybı (MW)	3.100	3.107	3.094	2.3958
L-indeks	0.13858	0.1386	0.126	0.1341
Emisyon (ton/sa)	0.207	0.2072	0.208	0.2514

Elde edilen sonuçlara bakıldığında GAA tabanlı optimizasyon tekniği ile yapılan minimizasyon sonucunda, literatürdeki algoritmalarla nazaran daha düşük kayıplar ve

maliyet elde edilmiştir. Bu da, GAA'nın optimali bulmadaki başarısını gözler önüne sermektedir.

6.3. Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Kullanılması Durumunda Amaç Fonksiyonları

Günümüzde elektriğin yaygın olarak kullanılması elektrik piyasasının değerini yükseltmiştir. Elektrik piyasalarına birçok şirketin girmesiyle beraber piyasadaki rekabet kızışmıştır. Rekabetin artması ve müşterilerin seçim yapma şansının artması neticesinde mali kaygılar öne çıkmış ve şirketler en az maliyetle müşterinin karşısına çıkmaya çalışmıştır. Öte yandan, son yıllarda küresel ısınmanın etkileri ortaya çıktıkça doğaya verilen zarar da azaltılmaya çalışılmıştır.

Maliyet endişelerinin artması ve fosil yakıt kullanımının doğaya verdiği zararın anlaşılması neticesinde bilim insanları çözüm, aramaya başlamıştır. Hem maliyeti azaltacak hem de doğaya verilen zararı en aza indirecek çözüm yenilenebilir enerji kaynaklarında bulunmuştur. Bu nedenle, son yıllarda elektrik üretiminde rüzgar, güneş ve hidrolik gibi yenilenebilir enerjilerin kullanım oranı artış göstermiştir. Bu tez çalışmasında da OGA problemi içerisinde rüzgar enerjisi santralleri kullanılmış ve bu santrallerin maliyet ile emisyonu olan etkileri incelenmiştir. Bunun için, ilk durumda, toplam 6 üretim biriminin yarısı rüzgar enerjisi ile üretim yapan santrallere çevrilmiştir. İkinci durumda, 5 adet fosil yakıt ile çalışan, bir adet de rüzgar enerjisi ile çalışan üretim birimi kullanılmıştır. Üçüncü durumda, 5 adet rüzgar enerjisi santrali ve 1 adet fosil yakıtlı üretim birimi kullanılmıştır. Ardından daha önce optimizasyonunu yaptığımız gerilim profilinin iyileştirilmesi, parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu, vana etkili yakıt maliyetinin minimizasyonu, gerilim kararlılığının geliştirilmesi ve emisyon yakıt maliyeti minimizasyonu amaç fonksiyonları rüzgar santrallerinin eklenmesi durumu için de optimize edilmiştir.

6.3.1. Bir adet rüzgar enerjisi santrali kullanımı durumu

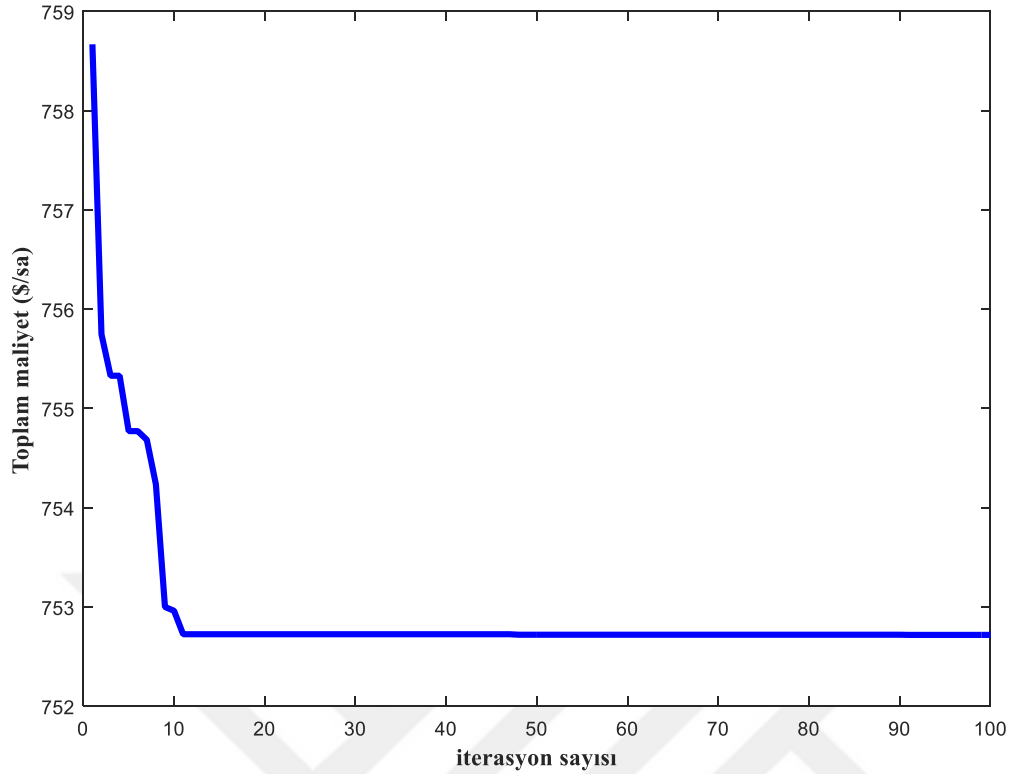
Bu durumda, 6 üretim biriminden 5'i fosil yakıt ile geriye kalan tek üretim birimi ise rüzgar enerjisi ile üretim yapmaktadır. Rüzgar enerjisi santralinde nominal gücü 2 MW olan 35,25 metre kanat uzunluğuna sahip 15 adet türbin bulunmaktadır. Rüzgar enerjisi santrali tarafından üretilebilecek maksimum güç 30 MW'dır.

GAA bu durum için 100 kere çalıştırılmıştır. En düşük yakıt maliyeti sonucu 752,7190 \$/sa olarak bulunmuştur. Bulunan maksimum sonuç 757,315 \$/sa, tüm çalışmaların ortalaması 755,899 \$/sa olarak elde edilmiştir. Program 74,54 saniye çalışmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.17’de verilmiştir. Toplam maliyetin yakınsama grafiği ise Şekil 6.9’da verilmiştir.

Çizelge 6.17. OGA probleminin çözümünde bir adet rüzgar enerjisi santrali kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar

Parametreler	Durum 6.2.1 Sonuçları	Parametreler	Yeni Sonuçlar
P _{Ü1} (MW)	186,100	P _{Ü1} (MW)	161,2804
P _{Ü2} (MW)	45,5253	P _{Ü2} (MW)	31,51695
P _{Ü5} (MW)	23,4028	P _{Ü5} (MW)	34,2404
P _{Ü8} (MW)	11,4255	P _{Ü8} (MW)	14,8497
P _{Ü11} (MW)	10,4083	P _{Ü11} (MW)	23,5175
P _{Ü13} (MW)	14,8094	P _{RES} (MW)	25,6682
V ₁ (p.u.)	1,0785	V ₁ (p.u.)	1,0481
V ₂ (p.u.)	1,0650	V ₂ (p.u.)	1,0324
V ₅ (p.u.)	1,0210	V ₅ (p.u.)	0,9857
V ₈ (p.u.)	1,0410	V ₈ (p.u.)	1,0000
V ₁₁ (p.u.)	0,9919	V ₁₁ (p.u.)	1,0232
V ₁₃ (p.u.)	1,0825	V _{RES} (p.u.)	1,0375
T ₁₁ (p.u.)	0,9780	T ₁₁ (p.u.)	0,9974
T ₁₂ (p.u.)	0,9690	T ₁₂ (p.u.)	0,9307
T ₁₅ (p.u.)	0,9320	T ₁₅ (p.u.)	1,0814
T ₃₆ (p.u.)	0,9680	T ₃₆ (p.u.)	0,9728
QC ₁₀ (MVAR)	3,6100	QC ₁₀ (MVAR)	2,6883
QC ₁₂ (MVAR)	4,3802	QC ₁₂ (MVAR)	3,3933
QC ₁₅ (MVAR)	3,3980	QC ₁₅ (MVAR)	1,0076
QC ₁₇ (MVAR)	0,9704	QC ₁₇ (MVAR)	4,2544
QC ₂₀ (MVAR)	3,2985	QC ₂₀ (MVAR)	3,3052
QC ₂₁ (MVAR)	3,1698	QC ₂₁ (MVAR)	3,1431
QC ₂₃ (MVAR)	3,5689	QC ₂₃ (MVAR)	4,9681
QC ₂₄ (MVAR)	3,4384	QC ₂₄ (MVAR)	4,7898
QC ₂₉ (MVAR)	1,2942	QC ₂₉ (MVAR)	3,2283
Maliyet (\$/sa)	797,27	Maliyet (\$/sa)	752,7190
Güç Kaybı (MW)	8,27	Güç Kaybı (MW)	7,6734
Emisyon (ton/sa)	0.5767	Emisyon (ton/sa)	0.2079

Çizelge 6.17’de verilen sonuçlara bakıldığında, toplam maliyetin, 6.2.1’de verilen sonuca göre düştüğü görülmektedir. Aynı şekilde aktif güç kaybı ve emisyon değerlerinde de düşüş olduğu açıktır. Bu sonuçlar, rüzgar enerjisi santrallerinin daha verimli olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.9. Bir adet rüzgar santrali kullanılması durumunda yakınsama grafiği

6.3.2. Üç adet rüzgar enerjisi santrali kullanımı durumu

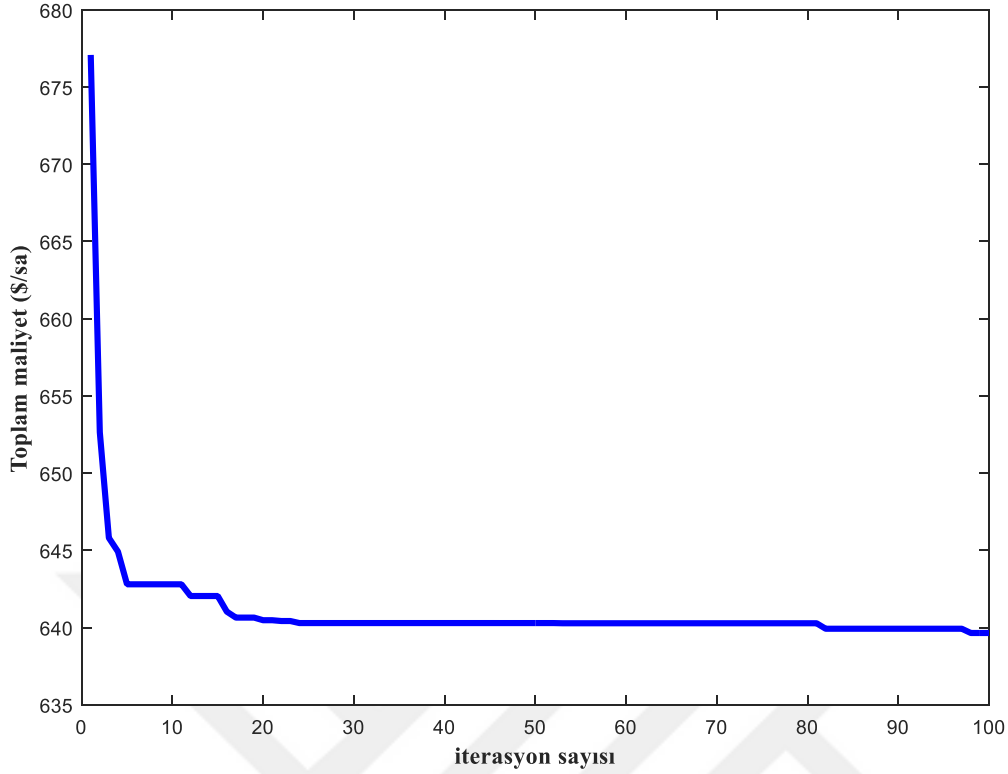
IEEE 30 baralı test sisteminde 6 adet üretim birimi bulunmaktadır. Bu 6 üretim birimi normal şartlar altında fosil yakıt kullanarak elektrik üretimi yapmaktadır. İlk durumda, fosil yakıt kullanan 3 santral yerine, rüzgar enerjisi ile üretim yapan santraller kullanılmıştır. Her bir rüzgar santralinde nominal gücü 2 MW olan 35,25 metre kanat uzunluğuna sahip 15 adet rüzgar türbini bulunmaktadır. Bu türbinlerin üretim kapasiteleri Eş. 4.1’de verilen formülasyon kullanılarak hesaplanmaktadır. 3 rüzgar enerjisi santralinde toplamda 45 adet rüzgar türbini bulunmaktadır. Bu türbinlerin üretilebilecekleri maksimum güç 90 MW’dır.

GAA bu durum için 100 kere çalıştırılmış ve en düşük maliyet sonucu 639,644 \$/sa olarak bulunmuştur. Bulunan maksimum sonuç 653,746 \$/sa, tüm çalışmaların ortalaması 645,732 \$/sa olarak elde edilmiştir. Yakınsama süresi 76,75 saniyedir. Minimizasyon sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 6.18’de verilmiştir. Çizelge 6.18 içerisinde Çizelge 6.8’deki sonuçlar tekrar verilerek karşılaştırmaların görselliği sağlanmıştır.

Çizelge 6.18. OGA probleminin çözümünde üç adet rüzgar santrali kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar

Parametreler	Durum 6.2.1 Sonuçları	Parametreler	Yeni Sonuçlar
P _{Ü1} (MW)	186,100	P _{Ü1} (MW)	147,667
P _{Ü2} (MW)	45,5253	P _{Ü2} (MW)	45,3038
P _{Ü5} (MW)	23,4028	P _{Ü5} (MW)	28,1768
P _{Ü8} (MW)	11,4255	P _{RES1} (MW)	23,4438
P _{Ü11} (MW)	10,4083	P _{RES2} (MW)	24,0432
P _{Ü13} (MW)	14,8094	P _{RES3} (MW)	22,0532
V ₁ (p.u.)	1,0785	V ₁ (p.u.)	1,0478
V ₂ (p.u.)	1,0650	V ₂ (p.u.)	0,9936
V ₅ (p.u.)	1,0210	V ₅ (p.u.)	1,0063
V ₈ (p.u.)	1,0410	V _{RES1} (p.u.)	0,9973
V ₁₁ (p.u.)	0,9919	V _{RES2} (p.u.)	1,0294
V ₁₃ (p.u.)	1,0825	V _{RES3} (p.u.)	0,9906
T ₁₁ (p.u.)	0,9780	T ₁₁ (p.u.)	0,9892
T ₁₂ (p.u.)	0,9690	T ₁₂ (p.u.)	1,0723
T ₁₅ (p.u.)	0,9320	T ₁₅ (p.u.)	1,0252
T ₃₆ (p.u.)	0,9680	T ₃₆ (p.u.)	1,0945
Q _{C10} (MVAR)	3,6100	Q _{C10} (MVAR)	3,4547
Q _{C12} (MVAR)	4,3802	Q _{C12} (MVAR)	2,0507
Q _{C15} (MVAR)	3,3980	Q _{C15} (MVAR)	2,1171
Q _{C17} (MVAR)	0,9704	Q _{C17} (MVAR)	2,8284
Q _{C20} (MVAR)	3,2985	Q _{C20} (MVAR)	3,6913
Q _{C21} (MVAR)	3,1698	Q _{C21} (MVAR)	1,6689
Q _{C23} (MVAR)	3,5689	Q _{C23} (MVAR)	3,4433
Q _{C24} (MVAR)	3,4384	Q _{C24} (MVAR)	1,9993
Q _{C29} (MVAR)	1,2942	Q _{C29} (MVAR)	3,3277
Maliyet (\$/sa)	797,27	Maliyet (\$/sa)	639,6443
Güç Kaybı (MW)	8,27	Güç Kaybı (MW)	7,2887
Emisyon (ton/sa)	0.5767	Emisyon (ton/sa)	0,1724

Çizelge 6.8’de üretim birimlerinin tümünün fosil yakıt kullanması durumunda ortaya çıkan maliyet ve parametrelerin sonuçları görülmektedir. Çizelge 6.18’de ise ünitelerden yarısının rüzgar santraline dönüştürülmesi durumundaki sonuçlar verilmiştir. Çizelgelerden anlaşılacağı üzere rüzgar türbinlerinin kullanılması sayesinde yakıt maliyeti ve güç kaybında düşüş gözlenmiştir. Aynı zamanda, emisyon değeri 0,1724 ton/sa seviyesine çekilmiştir. Böylece, rüzgar santralleri kullanılarak çevreye verilen zarar azaltılmıştır. GAA’nın yakınsama grafiği Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.10. Üç adet rüzgar santrali kullanılması durumunda yakınsama grafiği

6.3.3. Beş adet rüzgar enerjisi santrali kullanımı durumu

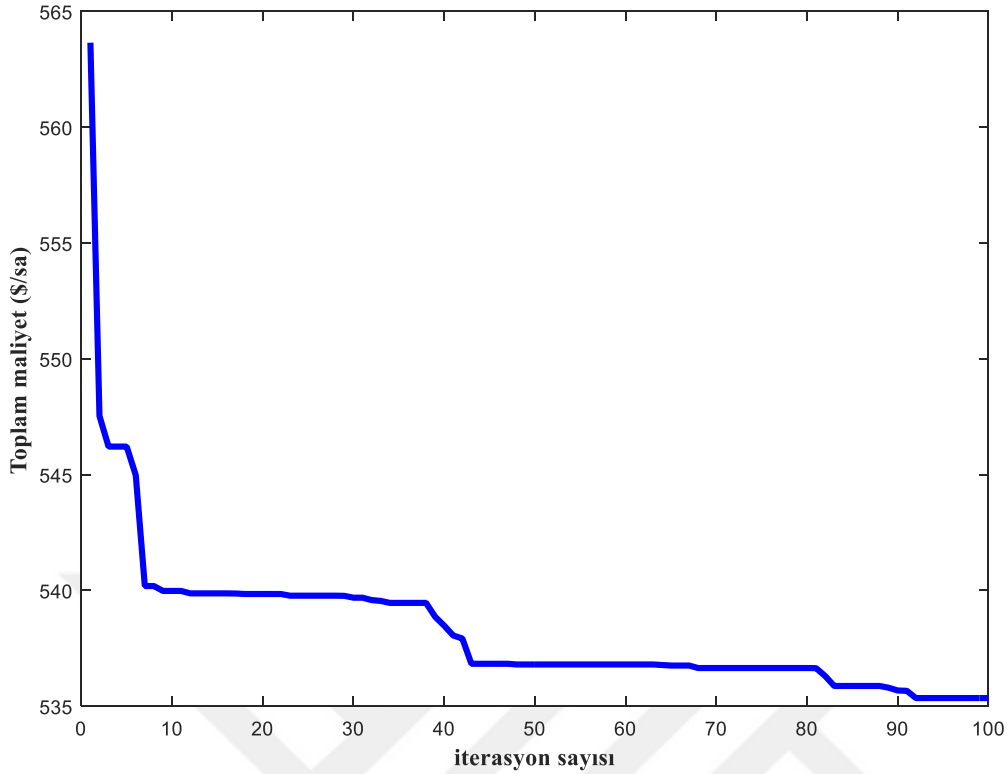
Rüzgar enerjisi ile üretim yapan santral sayısı bu durum için artırılmış ve 5 yapılmıştır. Geriye kalan üretim birimi fosil yakıt kullanmaya devam etmiştir. Her bir rüzgar enerjisi santralinde, nominal gücü 2 MW olan 35,25 metre kanat uzunluğuna sahip 15 adet türbin bulunmaktadır. Toplam türbin sayısı bu durum için 75 olup üretilebilecek maksimum güç 150 MW'dır.

GAA bu durum için 100 kere çalıştırılmıştır. En düşük yakıt maliyeti sonucu 535,3509 \$/sa olarak bulunmuştur. Bulunan maksimum sonuç 547,6394 \$/sa, tüm çalışmaların ortalaması 542,1443 \$/sa olarak elde edilmiştir. Programın yakınsama süresi 71,57 saniyedir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.19'da verilmiştir. Bu durumda, elde edilen minimum yakıt maliyetinin yakınsama grafiği Şekil 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.19. OGA probleminin çözümünde beş adet rüzgar enerji santrali kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar

Parametreler	Durum 6.2.1 Sonuçları	Parametreler	Yeni Sonuçlar
P _{Ü1} (MW)	186,100	P _{Ü1} (MW)	154,8224
P _{Ü2} (MW)	45,5253	P _{RES1} (MW)	26,7678
P _{Ü5} (MW)	23,4028	P _{RES2} (MW)	28,0511
P _{Ü8} (MW)	11,4255	P _{RES3} (MW)	27,0752
P _{Ü11} (MW)	10,4083	P _{RES4} (MW)	27,5179
P _{Ü13} (MW)	14,8094	P _{RES5} (MW)	26,4063
V ₁ (p.u.)	1,0785	V ₁ (p.u.)	1,0222
V ₂ (p.u.)	1,0650	V _{RES1} (p.u.)	0,9814
V ₅ (p.u.)	1,0210	V _{RES2} (p.u.)	0,9709
V ₈ (p.u.)	1,0410	V _{RES3} (p.u.)	0,9892
V ₁₁ (p.u.)	0,9919	V _{RES4} (p.u.)	1,0315
V ₁₃ (p.u.)	1,0825	V _{RES5} (p.u.)	0,9622
T ₁₁ (p.u.)	0,9780	T ₁₁ (p.u.)	0,9990
T ₁₂ (p.u.)	0,9690	T ₁₂ (p.u.)	0,9621
T ₁₅ (p.u.)	0,9320	T ₁₅ (p.u.)	0,9774
T ₃₆ (p.u.)	0,9680	T ₃₆ (p.u.)	1,0109
Q _{C10} (MVAR)	3,6100	Q _{C10} (MVAR)	0,8687
Q _{C12} (MVAR)	4,3802	Q _{C12} (MVAR)	4,7841
Q _{C15} (MVAR)	3,3980	Q _{C15} (MVAR)	2,7585
Q _{C17} (MVAR)	0,9704	Q _{C17} (MVAR)	4,9703
Q _{C20} (MVAR)	3,2985	Q _{C20} (MVAR)	4,2993
Q _{C21} (MVAR)	3,1698	Q _{C21} (MVAR)	3,9555
Q _{C23} (MVAR)	3,5689	Q _{C23} (MVAR)	1,7221
Q _{C24} (MVAR)	3,4384	Q _{C24} (MVAR)	3,2254
Q _{C29} (MVAR)	1,2942	Q _{C29} (MVAR)	4,7312
Maliyet (\$/sa)	797,27	Maliyet (\$/sa)	535,3509
Güç Kaybı (MW)	8,27	Güç Kaybı (MW)	7,2410
Emisyon (ton/sa)	0.5767	Emisyon (ton/sa)	0,1718

Elde edilen sonuçlara bakıldığında sadece 1 adet fosil yakıt kullanan üretim birimi kullanılmasına bağlı olarak yakıt maliyeti Çizelge 6.8’de verilen yakıt maliyetine göre oldukça düşmüştür. Bu sonuçlardan anlaşılabileceği üzere, üretim maliyetlerinin azaltılabilmesi için rüzgar türbinlerinin sayısı artırılmalıdır.



Şekil 6.11. Beş adet rüzgar santrali kullanılması durumunda yakınsama grafiği

6.3.4. Gerilim profilinin geliştirilmesi

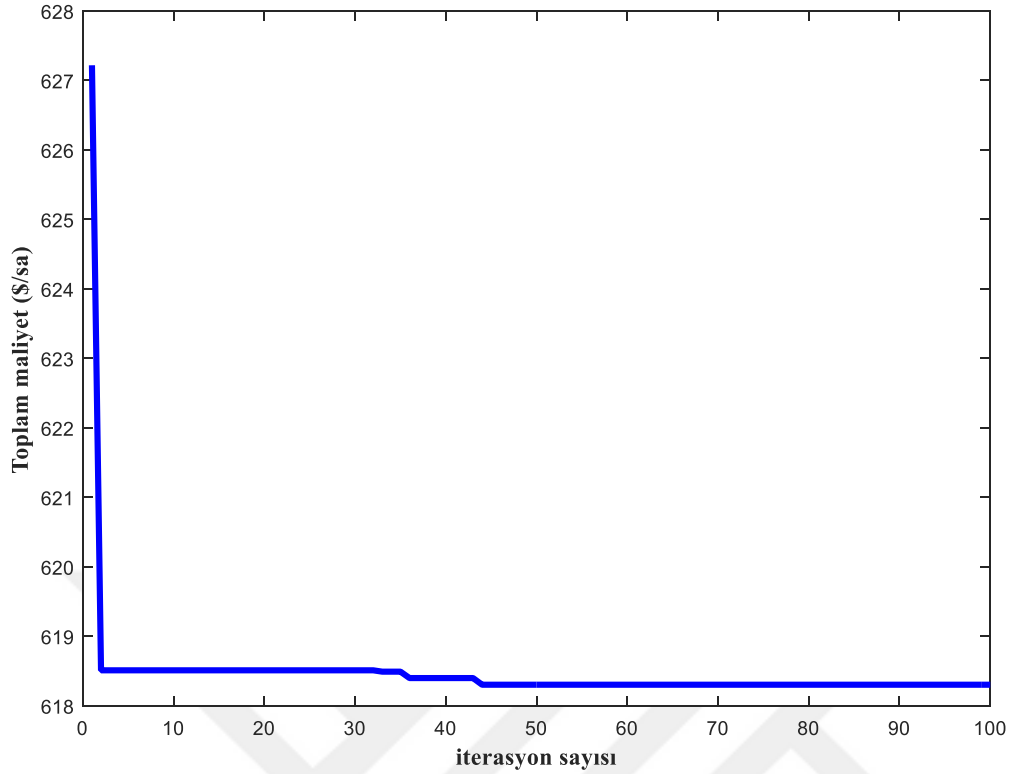
Enerji üretiminde kullanılan yöntem ne olursa olsun, baralardaki gerilimlerin kararlılığı çok önemlidir. Gerilimlerdeki salınımlar ne kadar az ise, tüketicilere iletilen elektrik o kadar kaliteli ve güvenli olur. Bu nedenle, bölüm 6.2.2’de sadece fosil yakıtlar ile üretim yapılan durumda optimizasyonunu gerçekleştirdiğimiz amaç fonksiyonunu, üretim birimlerinin yarısının rüzgar türbinlerinden oluşması durumu için de ele aldık. Bunun için, kullandığımız amaç fonksiyonu Eş. 6.2’de verilmiştir.

GAA, bu durum için, 100 kez çalıştırılmış ve elde edilen minimum gerilim profili değeri 0,08795 olarak bulunmuştur. Elde edilen maksimum değer 0,0895 ve tüm çalışmaların ortalaması 0,0881 olarak elde edilmiştir. Minimum yakıt maliyeti bu durum için artmış ve 771,4426 \$/sa olmuştur. Programın yakınsaması için geçen süre 69,43 saniyedir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.20’de verilmiştir. Minimum maliyetin yakınsama grafiği ise Şekil 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.20. Rüzgar enerjisi santrallerinin entegre edilmesi durumunda gerilim profilinin geliştirilmesi amaç fonksiyonuna ait sonuçlar

Parametreler	Sonuçlar
$P_{Ü1}$ (MW)	186,3802
$P_{Ü2}$ (MW)	51,2722
$P_{Ü5}$ (MW)	20,8333
P_{RES1} (MW)	9,6366
P_{RES2} (MW)	12,7340
P_{RES3} (MW)	12,9917
V_1 (p.u.)	0,9862
V_2 (p.u.)	0,9800
V_5 (p.u.)	1,0295
V_{RES1} (p.u.)	1,0149
V_{RES2} (p.u.)	1,0262
V_{RES3} (p.u.)	1,0245
T_{11} (p.u.)	1,0564
T_{12} (p.u.)	1,0129
T_{15} (p.u.)	1,0661
T_{36} (p.u.)	0,9419
Q_{C10} (MVAR)	4,7284
Q_{C12} (MVAR)	4,287
Q_{C15} (MVAR)	4,5981
Q_{C17} (MVAR)	1,2829
Q_{C20} (MVAR)	2,8937
Q_{C21} (MVAR)	0,0272
Q_{C23} (MVAR)	1,2349
Q_{C24} (MVAR)	0,6093
Q_{C29} (MVAR)	3,8332
Maliyet (\$/sa)	771,4426
Güç Kaybı (MW)	10,4480

Elde edilen sonuçlara baktığımızda, rüzgar türbinlerinin kullanılması sayesinde maliyetlerin önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra asıl amaç olan, gerilim profilinin 1 per unit sınırına daha fazla yaklaştığı görülmektedir. Yani sistemin bu şekilde planlanması durumunda elde edilen güç sisteminde daha az gerilim salınımları görülür. Bu da rüzgar enerjisi santrallerinin maliyet yanı sıra sistem güvenliği ve kalitesi için çok daha iyi bir tercih olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.12. Gerilim profili geliştirme amaç fonksiyonu maliyet yakınsama grafiği

6.3.5. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu

Gerçek güç sistemlerinde üretim birimlerinin hepsi aynı kaynakları kullanarak üretim yapmazlar. Günümüzde büyük çapta olan bu sistemler doğa veya ekonomik şartlara göre farklı kaynaklardan üretim yapan ünitelerden faydalanır. Bu amaç fonksiyonunda da bu gerçek göz önünde bulundurularak optimizasyon işlemi gerçekleştirilir. Bölüm 6.2.3’de parçalı kuadratik yakıt maliyetini simüle edebilmek için toplam 6 adet olan generatörlerden ikisinin farklı kaynakları kullandığı, geriye kalan 4 ünitenin ise aynı fosil yakıttan yararlandığı varsayılmıştır. Bu durumu rüzgar enerjisi santrallerini de sisteme ekleyerek yapmak mümkündür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edildiği yeni durumda sonuçları elde edebilmek için ilk iki üretim biriminin birbirinden farklı fosil yakıt kullandığı, geriye kalan 4 üretim biriminin rüzgar enerjisi santralleri olduğu varsayılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak Eş. 6.4’de verilen denklem kullanılmıştır. Bu eşitlikte yer alan katsayılar Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.9’da verilmiştir.

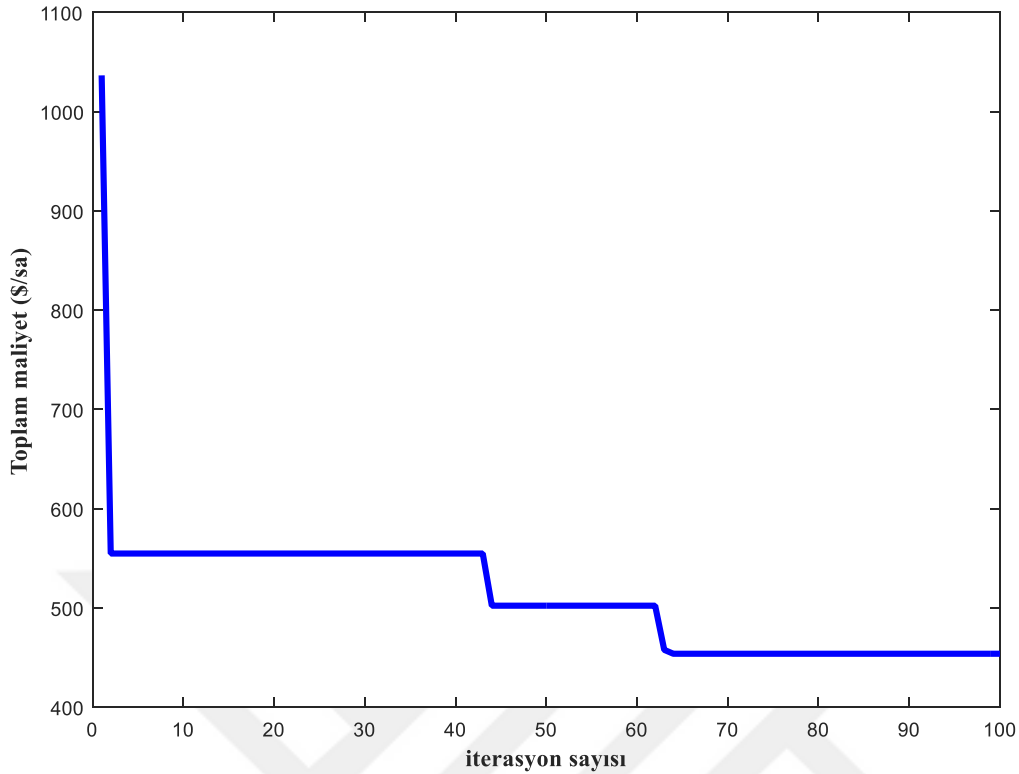
Algoritma toplamda 100 kere çalıştırılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda elde edilen en iyi maliyet sonucu 458,8743 \$/sa, en kötü sonuç ise 465,5472 \$/sa’dır. 100 çalışmanın

ortalaması ise 463,9622 \$/sa olarak elde edilmiştir. Programın çalışma süresi 75,87 saniyedir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.21’de verilmiştir.

Çizelge 6.21. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonunda elde edilen sonuçlar

Parametreler	Durum 6.2.3 Sonuçları	Parametreler	Yeni Sonuçlar
P _{Ü1} (MW)	117,58	P _{Ü1} (MW)	179,2139
P _{Ü2} (MW)	52,12	P _{Ü2} (MW)	65,1654
P _{Ü5} (MW)	41,13	P _{RES1} (MW)	22,0304
P _{Ü8} (MW)	30,13	P _{RES2} (MW)	9,9764
P _{Ü11} (MW)	19,13	P _{RES3} (MW)	8,5934
P _{Ü13} (MW)	28,85	P _{RES4} (MW)	8,8290
V ₁ (p.u.)	1,0145	V ₁ (p.u.)	1,0162
V ₂ (p.u.)	0,9599	V ₂ (p.u.)	1,0067
V ₅ (p.u.)	1,0129	V _{RES1} (p.u.)	1,0331
V ₈ (p.u.)	1,0041	V _{RES2} (p.u.)	0,9910
V ₁₁ (p.u.)	1,0149	V _{RES3} (p.u.)	1,0041
V ₁₃ (p.u.)	0,9874	V _{RES4} (p.u.)	1,0153
T ₁₁ (p.u.)	0,9087	T ₁₁ (p.u.)	1,0104
T ₁₂ (p.u.)	0,9147	T ₁₂ (p.u.)	0,9835
T ₁₅ (p.u.)	1,0436	T ₁₅ (p.u.)	0,9734
T ₃₆ (p.u.)	0,9097	T ₃₆ (p.u.)	0,9568
Q _{C10} (MVAR)	1,6381	Q _{C10} (MVAR)	2,8109
Q _{C12} (MVAR)	1,0760	Q _{C12} (MVAR)	3,3438
Q _{C15} (MVAR)	1,4156	Q _{C15} (MVAR)	4,7528
Q _{C17} (MVAR)	2,4803	Q _{C17} (MVAR)	1,4376
Q _{C20} (MVAR)	3,3489	Q _{C20} (MVAR)	1,8904
Q _{C21} (MVAR)	4,4743	Q _{C21} (MVAR)	1,8700
Q _{C23} (MVAR)	3,2850	Q _{C23} (MVAR)	3,0758
Q _{C24} (MVAR)	4,9563	Q _{C24} (MVAR)	3,0808
Q _{C29} (MVAR)	2,0621	Q _{C29} (MVAR)	2,5719
Maliyet (\$/sa)	632,7738	Maliyet (\$/sa)	458,8743
Güç Kaybı (MW)	5,57	Güç Kaybı (MW)	10,4089

Çizelge 6.21’de görüldüğü üzere rüzgar enerjisi santrallerinin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar bütün santrallerin fosil yakıt çeşitlerini kullandığı duruma göre iyidir. Maliyetler büyük oranda azaltılmış ve parametreler sınırlar içerisinde kalmıştır. Şekil 6.13’de toplam maliyetin yakınsama grafiği verilmiştir.



Şekil 6.13. Parçalı kuadratik yakıt maliyeti fonksiyonu yakıt maliyeti yakınsama grafiği

6.3.6. Vana etkili yakıt maliyeti minimizasyonu

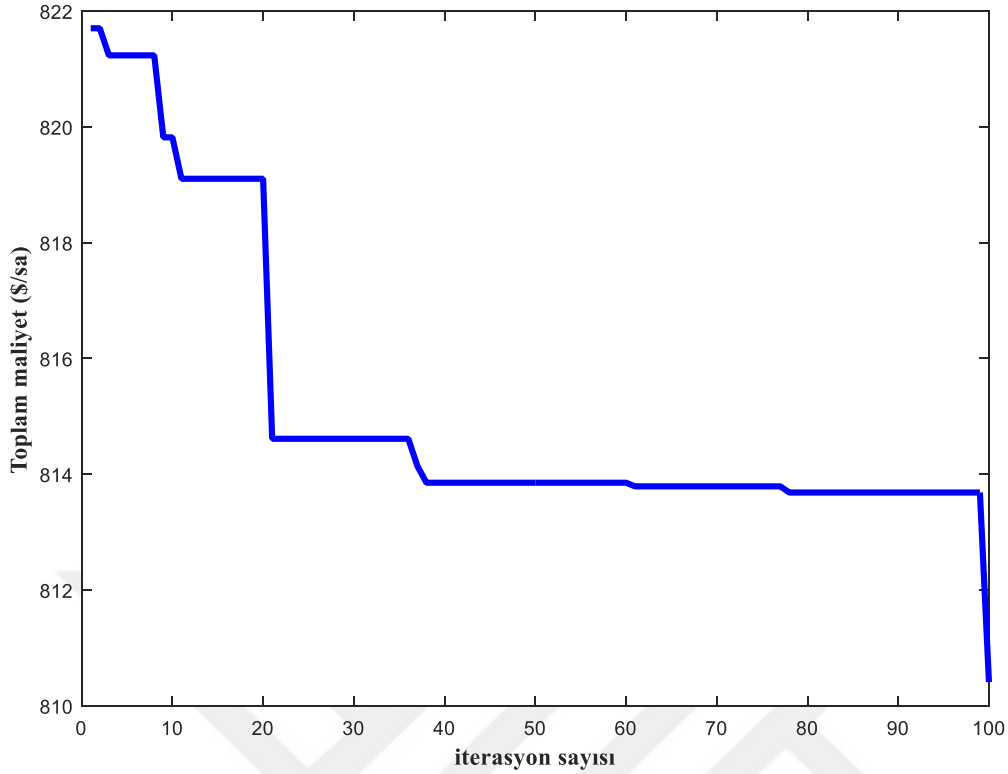
Ekonomik dağıtım problemlerinde hesaplamaları daha hızlı yapabilmek için bazı kabuller yapılır. Bunlardan biri de güç sistemlerinin verimliliğinin lineer şekilde arttığı varsayımdır. Fakat pratikte bu mümkün değildir. Çünkü türbinlerin çalışmasını sağlayan buhar girişleri vanalar yardımıyla kontrol edilir. Bu durum Şekil 6.5’de görüldüğü gibi lineerliğin önüne geçmektedir. 6.2.4 başlığı altında vana etkilerinin etkisi çalışılırken sistemdeki bütün üretim birimlerinin fosil yakıt kullandığı varsayılmıştır. Bu başlık altında vana etkisi araştırılırken sistemdeki üç üretim biriminin rüzgar enerjisi santrali olduğu düşünülmüştür. Amaç fonksiyonu olarak Eş. 6.5’de verilen denklem kullanılmıştır. Bu eşitlikte kullanılan katsayılar Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Algoritma bu amaç fonksiyonu için 100 kere çalıştırılmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen minimum maliyet 810,4084 \$/sa’dır. Maksimum maliyet 821,617 \$/sa ve tüm sonuçların ortalaması 813,549 \$/sa olarak elde edilmiştir. Çalışma süresi 74,45 saniyedir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.22’de verilmiştir.

Çizelge 6.22. Vana etkili yakıt maliyeti optimizasyonu sonucunda elde edilen sonuçlar

Parametreler	Durum 6.2.4 Sonuçları	Parametreler	Yeni Sonuçlar
P _{Ü1} (MW)	199,59	P _{Ü1} (MW)	198,6937
P _{Ü2} (MW)	51,82	P _{Ü2} (MW)	20,4032
P _{Ü5} (MW)	14,22	P _{Ü5} (MW)	25,5714
P _{Ü8} (MW)	9,12	P _{RES1} (MW)	20,6937
P _{Ü11} (MW)	9,22	P _{RES2} (MW)	14,7939
P _{Ü13} (MW)	11,13	P _{RES3} (MW)	13,3224
V ₁ (p.u.)	0,970	V ₁ (p.u.)	1,0466
V ₂ (p.u.)	1,005	V ₂ (p.u.)	0,9970
V ₅ (p.u.)	0,952	V ₅ (p.u.)	0,9860
V ₈ (p.u.)	0,958	V _{RES1} (p.u.)	0,9684
V ₁₁ (p.u.)	1,006	V _{RES2} (p.u.)	1,0128
V ₁₃ (p.u.)	1,003	V _{RES3} (p.u.)	1,0499
T ₁₁ (p.u.)	0,987	T ₁₁ (p.u.)	1,0512
T ₁₂ (p.u.)	1,049	T ₁₂ (p.u.)	0,9702
T ₁₅ (p.u.)	0,962	T ₁₅ (p.u.)	1,0388
T ₃₆ (p.u.)	1,071	T ₃₆ (p.u.)	0,9113
Q _{C10} (MVAR)	1,9029	Q _{C10} (MVAR)	3,4941
Q _{C12} (MVAR)	2,1580	Q _{C12} (MVAR)	4,4422
Q _{C15} (MVAR)	4,8508	Q _{C15} (MVAR)	3,8515
Q _{C17} (MVAR)	2,8507	Q _{C17} (MVAR)	0,9180
Q _{C20} (MVAR)	3,5262	Q _{C20} (MVAR)	0,4339
Q _{C21} (MVAR)	1,4617	Q _{C21} (MVAR)	1,2330
Q _{C23} (MVAR)	4,6154	Q _{C23} (MVAR)	3,2688
Q _{C24} (MVAR)	1,1307	Q _{C24} (MVAR)	3,5807
Q _{C29} (MVAR)	2,9164	Q _{C29} (MVAR)	1,4958
Maliyet (\$/sa)	918,79	Maliyet (\$/sa)	810,4084
Güç Kaybı (MW)	11,73	Güç Kaybı (MW)	10,0787

Çizelge 6.22 ve Çizelge 6.12’de verilen sonuçları incelediğimizde, rüzgar türbinlerinin kullanımının fosil yakıtlı üretim üniteleri kullanımına göre daha verimli olduğunu görürüz. Maliyet sonuçlarına baktığımızda, toplam yakıt maliyeti 108,3816 \$/sa kadar düşmüştür. Yılda 8760 saat olduğunu düşündüğümüzde çok büyük bir kar elde edilmiştir. Aynı zamanda 11,73 MW olan aktif güç kaybı bu durumda 10,0787 MW değerine inmiştir. En düşük yakıt maliyetinin yakınsama grafiği Şekil 6.14’deki gibidir.



Şekil 6.14. Vana etkili yakıt maliyeti minimizasyonu yakınsama grafiği

6.3.7. Gerilim kararlılığının geliştirilmesi

Gerilim kararlılığı güç sistemlerindeki en önemli konulardan biridir. Çünkü, baralardaki gerilimlerin salınım oranları elektrik kalitesini ve sistemin güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Sistemin kurulum yapısının değişmesi ve yüklerde oluşabilecek ani değişimler gerilim düşmelerine sebebiyet verebilir. 6.2.5 başlığı altında gerilim kararlılığı optimize edilirken, sistemdeki tüm üretim birimlerinin fosil yakıtlar ile çalıştığı varsayılmıştı. Fakat, bu başlık altında sistemdeki 6 üniteden üçünün rüzgar enerjisi santrali olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım üzerinden, sistemin gerilim kararlılığını ifade eden L-indeks değeri minimize edilmeye çalışılmaktadır. Bunun için Eş. 6.11'de verilen amaç fonksiyonu kullanılmaktadır.

Bu durum için 100 çalışma yapılmıştır. Bu sonuçlar içerisinde, elde edilen en düşük L-indeks değeri 0,0802'dir. Elde edilen maksimum değer 0,09165 ve tüm çalışmaların ortalaması 0,0850'dir. Minimum maliyet 697,3610 \$/sa olarak elde edilmiştir. 76,12 saniyede yakınsama sağlanmıştır. Elde edilen en iyi sonuçlar Çizelge 6.23'de verilmiştir.

Çizelge 6.23. Gerilim kararlılığının optimizasyonunda elde edilen sonuçlar

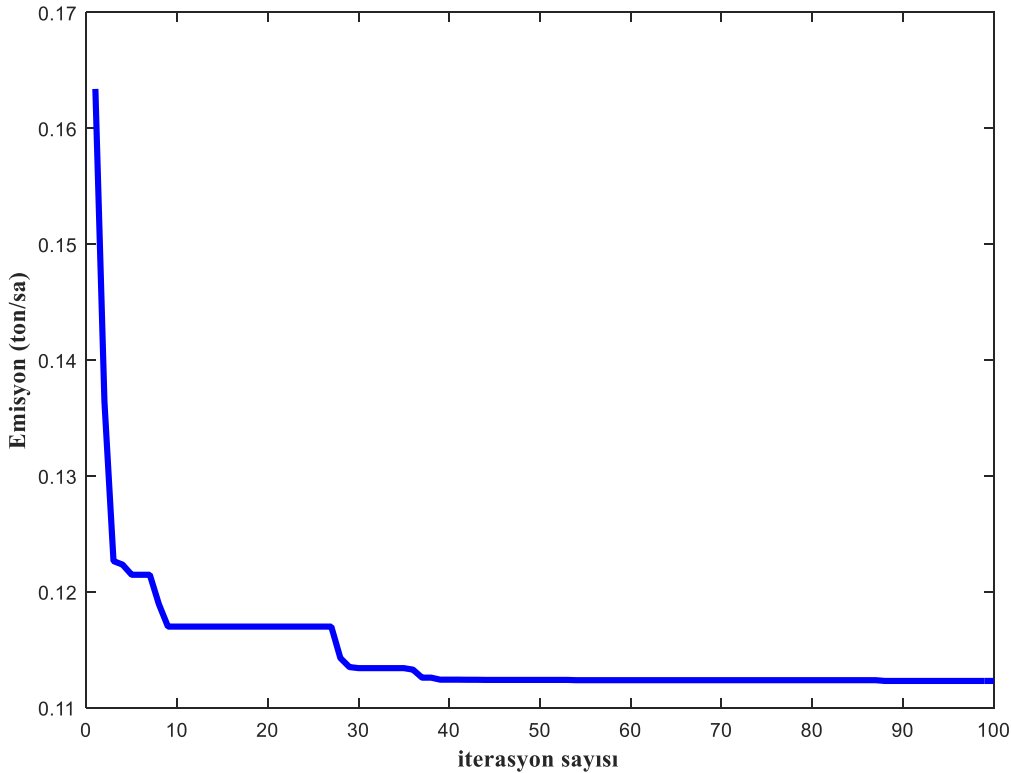
Parametreler	Durum 6.2.5 Sonuçları	Parametreler	Yeni Sonuçlar
P _{Ü1} (MW)	178,750	P _{Ü1} (MW)	116,0708
P _{Ü2} (MW)	36,742	P _{Ü2} (MW)	65,5104
P _{Ü5} (MW)	24,766	P _{Ü5} (MW)	43,2815
P _{Ü8} (MW)	16,975	P _{RES1} (MW)	20,5714
P _{Ü11} (MW)	15,580	P _{RES2} (MW)	21,1367
P _{Ü13} (MW)	19,813	P _{RES3} (MW)	22,6361
V ₁ (p.u.)	1,047	V ₁ (p.u.)	1,0095
V ₂ (p.u.)	0,958	V ₂ (p.u.)	1,0463
V ₅ (p.u.)	0,992	V ₅ (p.u.)	0,9897
V ₈ (p.u.)	0,971	V _{RES1} (p.u.)	1,0308
V ₁₁ (p.u.)	0,962	V _{RES2} (p.u.)	1,0279
V ₁₃ (p.u.)	1,027	V _{RES3} (p.u.)	1,0294
T ₁₁ (p.u.)	0,999	T ₁₁ (p.u.)	1,0137
T ₁₂ (p.u.)	1,026	T ₁₂ (p.u.)	1,0786
T ₁₅ (p.u.)	0,995	T ₁₅ (p.u.)	1,0456
T ₃₆ (p.u.)	1,010	T ₃₆ (p.u.)	1,0006
QC ₁₀ (MVAR)	1,012	QC ₁₀ (MVAR)	2,8303
QC ₁₂ (MVAR)	1,018	QC ₁₂ (MVAR)	3,2830
QC ₁₅ (MVAR)	0,9515	QC ₁₅ (MVAR)	2,2316
QC ₁₇ (MVAR)	0,990	QC ₁₇ (MVAR)	2,9110
QC ₂₀ (MVAR)	1	QC ₂₀ (MVAR)	4,1400
QC ₂₁ (MVAR)	1,014	QC ₂₁ (MVAR)	2,8917
QC ₂₃ (MVAR)	0,983	QC ₂₃ (MVAR)	1,5411
QC ₂₄ (MVAR)	1,035	QC ₂₄ (MVAR)	1,5685
QC ₂₉ (MVAR)	0,984	QC ₂₉ (MVAR)	3,8036
Maliyet (\$/sa)	807,9913	Maliyet (\$/sa)	697,3610
Güç Kaybı (MW)	9,22	Güç Kaybı (MW)	5,8072
L-indeks	0,1107	L-indeks	0,0802

Çizelge 6.23’de verilen sonuçlara bakıldığında, yenilenebilir enerji kullanılmasının ne kadar akılcı bir çözüm olduğu anlaşılmaktadır. Tüm üretim ünitelerinin fosil yakıtlar ile çalışan türbinlerden seçilmesi durumunda elde edilen yakıt maliyeti Çizelge 6.13’de görülebileceği üzere 807,9913 \$/sa’dır. Yine Çizelge 6.13’de verilen sonuçlarda L-indeks değeri 0,1107 olarak görülmektedir. Rüzgar enerjisi santralleri kullanılması durumunda yakıt maliyeti 697,3610 \$/sa değerine düşürülmüştür. Gerilim kararlılığını ifade eden L-indeks değeri ise 0,0802 değerine çekilmiştir. Yani sistemin gerilim kararlılığı oldukça artırılmıştır.

6.3.8. Emisyon yakıt maliyetinin minimizasyonu

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte insanoğlunun doğaya verdiği zarar gün geçtikçe arttı. Doğaya zarar veren en önemli etkenlerden biri de güç sistemleridir. Elektrik üretimi sırasında kullanılan fosil yakıtlar neticesinde doğaya zararlı gaz salınımı olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda elektrik üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artışa geçmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması sayesinde hem maliyetlerden kazanç sağlanmakta hem de doğaya zarar en aza indirilmektedir. Emisyonun minimizasyonu için kullanılan amaç fonksiyonu Eş. 6.12’de verilmiştir. Emisyon ve yakıtın minimizasyonunu ifade eden amaç fonksiyonu Eş. 6.13’de verilmiştir.

Tez çalışmasının bu bölümü için algoritma 100 kere çalıştırılmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen minimum maliyet 738,5251 \$/sa, maksimum maliyet 762,2981 \$/sa ve ortalama maliyet 744,7161 \$/sa’dır. Emisyonun minimum değeri 0,1123 ton/sa, maksimum değeri 0,1390 ton/sa ve ortalama değeri 0,1512 ton/sa olarak elde edilmiştir. Çalışma süresi 72,14 saniyedir. Elde edilen veriler Çizelge 6.24’de verilmiştir. Emisyon değerinin yakınsama grafiği Şekil 6.15’de görüldüğü gibidir.



Şekil 6.15. Emisyon değerinin yakınsama grafiği

Çizelge 6.24. Emisyon değerinin minimizasyonunda elde edilen sonuçlar

Parametreler	Durum 6.2.7 Sonuçları	Parametreler	Yeni Sonuçlar
P _{Ü1} (MW)	70,554	P _{Ü1} (MW)	92,4201
P _{Ü2} (MW)	70,163	P _{Ü2} (MW)	79,4909
P _{Ü5} (MW)	46,465	P _{Ü5} (MW)	49,9966
P _{Ü8} (MW)	32,633	P _{RES1} (MW)	21,1292
P _{Ü11} (MW)	29,95	P _{RES2} (MW)	23,0890
P _{Ü13} (MW)	37,618	P _{RES3} (MW)	22,2303
V ₁ (p.u.)	1,0364	V ₁ (p.u.)	1,0042
V ₂ (p.u.)	1,0023	V ₂ (p.u.)	1,0437
V ₅ (p.u.)	0,984	V ₅ (p.u.)	1,0223
V ₈ (p.u.)	1,024	V _{RES1} (p.u.)	0,9980
V ₁₁ (p.u.)	1,002	V _{RES2} (p.u.)	1,0338
V ₁₃ (p.u.)	1,003	V _{RES3} (p.u.)	1,0374
T ₁₁ (p.u.)	1,003	T ₁₁ (p.u.)	1,0368
T ₁₂ (p.u.)	0,970	T ₁₂ (p.u.)	1,0753
T ₁₅ (p.u.)	1,006	T ₁₅ (p.u.)	0,9085
T ₃₆ (p.u.)	0,946	T ₃₆ (p.u.)	0,9927
Q _{C10} (MVAR)	4,528	Q _{C10} (MVAR)	3,7472
Q _{C12} (MVAR)	0,526	Q _{C12} (MVAR)	2,0023
Q _{C15} (MVAR)	1,363	Q _{C15} (MVAR)	2,5277
Q _{C17} (MVAR)	4,815	Q _{C17} (MVAR)	4,9958
Q _{C20} (MVAR)	4,507	Q _{C20} (MVAR)	4,0920
Q _{C21} (MVAR)	4,434	Q _{C21} (MVAR)	1,5546
Q _{C23} (MVAR)	0,574	Q _{C23} (MVAR)	3,9481
Q _{C24} (MVAR)	4,630	Q _{C24} (MVAR)	2,5381
Q _{C29} (MVAR)	0,014	Q _{C29} (MVAR)	2,9960
Maliyet (\$/sa)	922,387	Maliyet (\$/sa)	738,5251
Güç Kaybı (MW)	3,984	Güç Kaybı (MW)	4,9565
Emisyon (ton/sa)	0,1931	Emisyon (ton/sa)	0,1123

Elde edilen verilere baktığımızda, rüzgar enerjisi santralleri kullanılması durumunda elde edilen maliyet 922,387 \$/sa seviyesinden 738,5251 \$/sa değerine düşmüştür. Buna ilaveten asıl amaç olan saatlik emisyon değeri 0,1931 tondan, 0,1123 tona inmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, yenilenebilir enerji santrallerinin çevreye verilen zararı azaltmak ve maliyetleri düşürmek açısından ne kadar iyi bir tercih olduğu anlaşılabilmektedir.

6.4. Algoritmada Kullanılan Parçacık Sayısının Artırılması

Sezgisel algoritmalar, optimizasyon yaparken çözüm uzayı üzerinde çalışırlar. Çözüm uzayları minimize edilecek fonksiyonun olası çözümlerinden oluşmaktadır. Bu uzayın büyüklüğünün artması ya da azalması elde edilecek çözümün değerini büyük oranda etkilemektedir. Aynı zamanda programın çalışma hızı da bu uzayın büyüklüğüne bağlıdır.

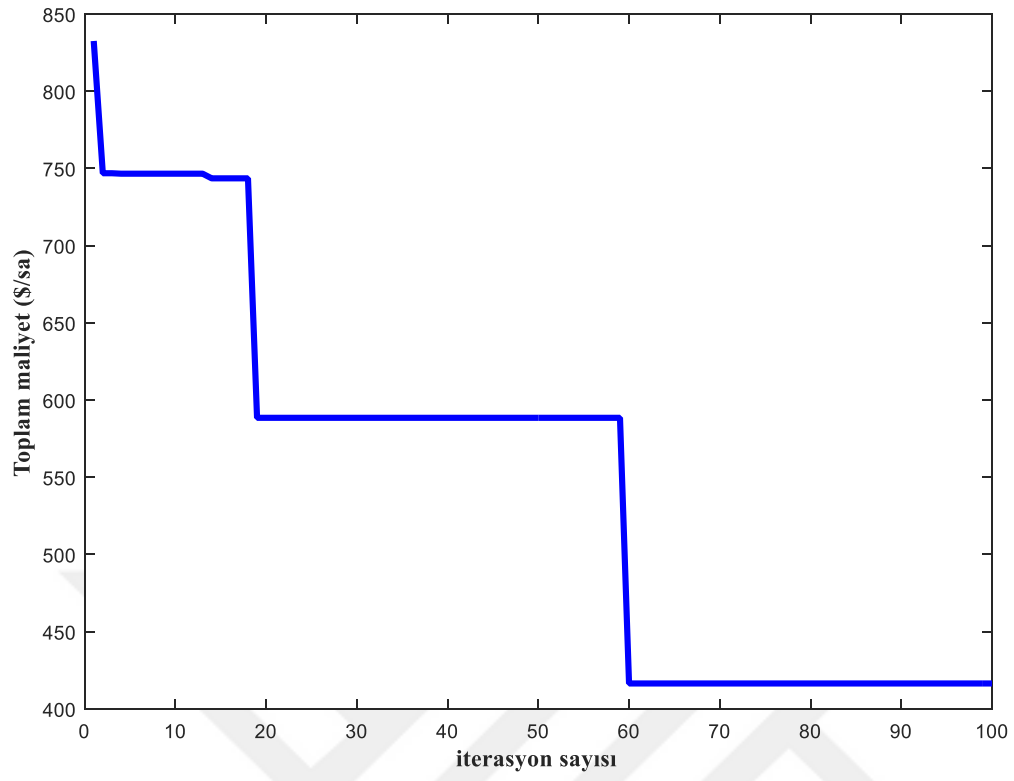
GAA'nın çalışma mantığına baktığımızda, ilk iterasyonda çözüm uzayı üzerinde başlangıç girdabı oluşur. Bu girdap daha çok çözüme ulaşabilmek için olabilecek en büyük yarıçapa sahip olur. Bu sayede en iyi çözüme ulaşma olasılığı artırılabilir. Bu nedenle parçacık sayısının artırılması genel olarak daha iyi çözümlere ulaşılabilmesini sağlar.

Literatürde yapılan çalışmalarda genel olarak parçacık sayıları 50 alındığı için bu tez çalışmasında da amaç fonksiyonları optimize edilirken parçacık sayısı 50 alınmıştır. Bu başlık altında, parçacık sayısının artırılmasının sonucu nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bunun için, 6.3.5 başlığı altında optimizasyonu gerçekleştirilen parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu amaç fonksiyonu tekrar optimize edilmeye çalışılmıştır. Tekrar edilen bu optimizasyon için kullanılan parçacık sayısı normalin iki katına çıkarılarak 100 yapılmıştır. Bu durumda elde edilen yakıt maliyetinin yakınsama grafiği Şekil 6.16'da verilmiştir. Parçacık sayısının 50 olduğu durumda minimum yakıt maliyeti 458,8743 \$/sa iken, parçacık sayısının 100 yapılması durumunda 416,4402 \$/sa seviyesine inmiştir. Parametrelerin bu durumdaki sonuçları ile durum 6.3.5'de elde edilen sonuçlar Çizelge 6.25'de verilmiştir. Böylece iki sonucun karşılaştırması kolaylaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, parçacık sayısının artırılması durumunda optimizasyonun daha iyi sonuçlara vardığı görülmektedir. Yani daha büyük çözüm uzayında oluşan büyük bir girdap optimizasyon için daha uygundur. Parçacık sayısının artırılmasının avantajı olduğu gibi dezavantajı da vardır. Parçacık sayısının artması nedeniyle daha büyük bir alanda çözüm aranmakta, bu da algoritmanın çalışma zamanını artırmaktadır. Parçacık sayısının az olduğu durumda algoritmanın yakınsama süresi 75,87 saniye iken parçacık sayısının 100 yapılması sonucunda bu süre 139,19 saniyeye çıkmıştır.

Çizelge 6.25. Parçacık sayısının artırılması durumunda elde edilen sonuçlar

Parametreler	Durum 6.3.5 Sonuçları	Parametreler	Yeni Sonuçlar
P _{Ü1} (MW)	179,2139	P _{Ü1} (MW)	174,9646
P _{Ü2} (MW)	65,1654	P _{Ü2} (MW)	53,1565
P _{RES1} (MW)	22,0304	P _{RES1} (MW)	27,2744
P _{RES2} (MW)	9,9764	P _{RES2} (MW)	13,1843
P _{RES3} (MW)	8,5934	P _{RES3} (MW)	13,8831
P _{RES4} (MW)	8,8290	P _{RES4} (MW)	10,3712
V ₁ (p.u.)	1,0162	V ₁ (p.u.)	0,9978
V ₂ (p.u.)	1,0067	V ₂ (p.u.)	0,9984
V _{RES1} (p.u.)	1,0331	V _{RES1} (p.u.)	0,9834
V _{RES2} (p.u.)	0,9910	V _{RES2} (p.u.)	0,9954
V _{RES3} (p.u.)	1,0041	V _{RES3} (p.u.)	1,0067
V _{RES4} (p.u.)	1,0153	V _{RES4} (p.u.)	1,0256
T ₁₁ (p.u.)	1,0104	T ₁₁ (p.u.)	1,0663
T ₁₂ (p.u.)	0,9835	T ₁₂ (p.u.)	0,9858
T ₁₅ (p.u.)	0,9734	T ₁₅ (p.u.)	1,0778
T ₃₆ (p.u.)	0,9568	T ₃₆ (p.u.)	0,9492
Q _{C10} (MVAR)	2,8109	Q _{C10} (MVAR)	3,4037
Q _{C12} (MVAR)	3,3438	Q _{C12} (MVAR)	2,7691
Q _{C15} (MVAR)	4,7528	Q _{C15} (MVAR)	3,1571
Q _{C17} (MVAR)	1,4376	Q _{C17} (MVAR)	4,4285
Q _{C20} (MVAR)	1,8904	Q _{C20} (MVAR)	3,7882
Q _{C21} (MVAR)	1,8700	Q _{C21} (MVAR)	3,2352
Q _{C23} (MVAR)	3,0758	Q _{C23} (MVAR)	3,3636
Q _{C24} (MVAR)	3,0808	Q _{C24} (MVAR)	4,8483
Q _{C29} (MVAR)	2,5719	Q _{C29} (MVAR)	4,4606
Maliyet (\$/sa)	458,8743	Maliyet (\$/sa)	416,4402
Güç Kaybı (MW)	10,4089	Güç Kaybı (MW)	9,4394
Parçacık (Adet)	50	Parçacık (Adet)	100



Şekil 6.16. Parçacık sayısının artırılması durumunda yakıt maliyeti yakınsama grafiği

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, girdap arama algoritması kullanılarak optimal güç akışı probleminin çözümü elde edilmiştir. Bu çözüm, IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Toplam yakıt maliyetinin minimizasyonu, gerilim profilinin geliştirilmesi, parçalı kuadratik yakıt maliyetinin minimizasyonu, vana etkisinin göz önünde bulundurulduğu durumda yakıt maliyetinin minimizasyonu, gerilim kararlılığının artırılması, kısıtlılık durumunda gerilim kararlılığının artırılması, emisyon yakıt maliyetinin minimizasyonu, aktif güç kaybının minimizasyonu amaç fonksiyonları optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde verilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve girdap arama algoritması ile yapılan çözümün üstünlüğü gösterilmiştir. Bu optimizasyonlar sırasında, test sistemindeki altı generatörün tamamının fosil yakıt ile çalıştığı varsayılmıştır.

Artık güç sistemleri sadece fosil yakıtlar ile üretim yapan generatörlerden oluşmamaktadır. Son yıllarda maliyetleri düşürmek ve doğaya verilen zararı en aza indirebilmek en önemli amaçlar haline gelmiştir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı oldukça artmıştır. Günümüzde bu artışları göz önünde bulundurmak gerektiği için, tez çalışması içerisinde, rüzgar enerjisi santrallerinin entegre edildiği durumlar için de optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bunun için, test sistemindeki altı üretim birimi farklı oranlarda rüzgar enerjisi ile çalışan santrallere dönüştürüldü. Sırasıyla bir, üç ve beş bara rüzgar enerjisi ile üretim yapan generatörlere dönüştürülerek sonuçlar elde edildi. Ardından, gerilim profilinin geliştirilmesi, parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu, vana etkili yakıt maliyeti minimizasyonu, gerilim kararlılığının geliştirilmesi ve emisyon yakıt maliyetinin minimizasyonu amaç fonksiyonları rüzgar enerjisi santrallerinin sisteme entegre edildiği durumlar için optimize edildi. Bu sonuçlar neticesinde, rüzgar enerjisi santrallerinin güç sistemlerine entegre edilmesi durumunun hem maliyet hem de emisyon açısından daha mantıklı olduğu gösterilmiştir.

Sezgisel algoritmalar, optimizasyon işlemlerini gerçekleştirirken başlangıçta oluşturdukları çözüm uzayı içerisinde çalışırlar. Çözüm uzayı ne kadar büyük olursa elde edilen çözümün optimuma yaklaşma olasılığı da o kadar yüksek olur. Bu nedenle, tezin son bölümünde parçacık sayısı iki katına çıkarılarak optimizasyon gerçekleştirildi. Parçacık sayısının artması durumunun etkilerini görebilmek için, rüzgar enerjisi santrallerinin entegre edildiği

durumda, parçalı kuadratik yakıt maliyeti minimizasyonu optimize edildi. Ortaya çıkan sonuçlara göre, parçacık sayısındaki artış algoritmayı daha iyi yakınsattığı fakat programın çalışma süresini uzattığı görülmüştür.

Elde edilen tüm sonuçlar ışığında; girdap arama algoritmasının diğer sezgisel algoritmalara göre daha iyi yakınsama karakterine sahip olduğu gösterilmiştir. Bu karakteristiği sayesinde, lineer olmayan büyük çaptaki optimizasyon problemlerinde rahatlıkla kullanılabileceği ispatlanmıştır. Gerçek güç sistemlerinin işletilmesi ve planlanmasında bu tür sezgisel algoritmalar kullanılarak maliyet ve zaman açısından kazançlar elde edilir. Bunun yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynakları ile üretim yapan generatörlerin güç sistemlere entegrasyonunun, maliyetlerde kazancı artırdığı ve zararlı gaz salınımını azaltarak doğayı korumaya yardımcı olduğu ortaya konmuştur. Son olarak, sezgisel algoritmalarda kullanılan parçacık sayılarının artırılmasının maliyetleri büyük oranda düşürdüğü gözlemlenmiştir fakat, bu durum çözüm arama zamanını artırmaktadır. Anlık hesaplama gerektiren durumlarda daha küçük arama uzayları kullanılmalıdır ancak, optimizasyon için yeterince zaman olduğu durumlarda büyük arama uzayının kullanılması işletme ve planlama açısından daha verimlidir.

KAYNAKLAR

1. Carpentier, J. (1962). Contribution to the economic dispatch problem. *Bulletin de la Societe Francoise des Electriciens*, 3(8), 431-447.
2. Rau, N. S. (2003). Issues in the path toward an RTO and standard markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(2), 435-443.
3. Sasson, A. M. (1969). Nonlinear programming solutions for load-flow, minimum-loss, and economic dispatching problems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (4), 399-409.
4. Dommel, H. W., Tinney, W. F. (1968). Optimal power flow solutions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (10), 1866-1876.
5. Nabona, N., Freris, L. L. (1973, May). Optimisation of economic dispatch through quadratic and linear programming. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 120(5), 574-580.
6. Billiton, R., Sachdeva, S. S. (1972). Optimal real and operation in a hydro-thermal system. *IEEE Transactions on Apparatus and Power Systems*, 91(4), 1405-1411.
7. Rashed, A. M. H., Kelly, D. H. (1974). Optimal load flow solution using Lagrangian multipliers and the Hessian matrix. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (5), 1292-1297.
8. Shoults, R. R., Sun, D. T. (1982). Optimal power flow based upon PQ decomposition. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (2), 397-405.
9. Mukherjee, S. K., Recio, A., Douligeris, C. (1992, April). Optimal power flow by linear programming based optimization. In *Southeastcon'92, Proceedings., IEEE*, (2), 527-529.
10. Torres, G. L., Quintana, V. H. (1998). An interior-point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(4), 1211-1218.
11. Tognola, G., Bacher, R. (1999). Unlimited point algorithm for OPF problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(3), 1046-1054.
12. Abido, M. A. (2002). Optimal power flow using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 24(7), 563-571.

13. Roa-Sepulveda, C. A., Pavez-Lazo, B. J. (2003). A solution to the optimal power flow using simulated annealing. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(1), 47-57.
14. Osman, M. S., Abo-Sinna, M. A., Mousa, A. A. (2004). A solution to the optimal power flow using genetic algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 155(2), 391-405.
15. Bouktir, T., Slimani, L. (2005). Optimal power flow of the algerian electrical network using an ant colony optimization method. *Leonardo Journal of Sciences*, 6, 43-57.
16. El Ela, A. A., Abido, M. A., Spea, S. R. (2010). Optimal power flow using differential evolution algorithm. *Electric Power Systems Research*, 80(7), 878-885.
17. Ayan, K., Kılıç, U. (2011). Optimal reaktif güç akışının kaotik yapay arı kolonisi ile çözümü. In *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11) 2011*, 6(1), 20-24.
18. Niknam, T., rasoul Narimani, M., Jabbari, M., Malekpour, A. R. (2011). A modified shuffle frog leaping algorithm for multi-objective optimal power flow. *Energy*, 36(11), 6420-6432.
19. Duman, S., Güvenç, U., Sönmez, Y., Yörükeren, N. (2012). Optimal power flow using gravitational search algorithm. *Energy Conversion and Management*, 59, 86-95.
20. Gopalakrishnan, A., Raghunathan, A. U., Nikovski, D., Biegler, L. T. (2012, October). Global optimization of optimal power flow using a branch & bound algorithm. In *Communication, Control, and Computing (Allerton), 2012 50th Annual Allerton Conference on IEEE*, 12(2), 609-616.
21. Boucekara, H. R. E. H., Abido, M. A., Boucherma, M. (2014). Optimal power flow using teaching-learning-based optimization technique. *Electric Power Systems Research*, 114, 49-59.
22. Boucekara, H. R. E. H. (2014). Optimal power flow using black-hole-based optimization approach. *Applied Soft Computing*, 24, 879-888.
23. Mukherjee, A., Mukherjee, V. (2015). Solution of optimal power flow using chaotic krill herd algorithm. *Chaos, Solitons & Fractals*, 78, 10-21.
24. Suganthi, V. K., Meenakumari, R. (2015, Mart). Hybrid imperialist competitive algorithm—A meta-heuristic approach to solve security constrained optimal power flow. In *Cognitive Computing and Information Processing (CCIP), 2015 International Conference on IEEE*, (8)5, 1-6.

25. Tan, Y., Li, C., Cao, Y., Lee, K. Y., Li, L., Tang, S., Zhou, L. (2015). Improved group search optimization method for optimal power flow problem considering valve-point loading effects. *Neurocomputing*, 148, 229-239.
26. Reddy, S. S., Rathnam, C. S. (2016). Optimal power flow using glowworm swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 80, 128-139.
27. Boucekara, H. R. E. H., Chaib, A. E., Abido, M. A., El-Sehiemy, R. A. (2016). Optimal power flow using an Improved Colliding Bodies Optimization algorithm. *Applied Soft Computing*, 42, 119-131.
28. Boucekara, H. R. E. H., Chaib, A. E., Abido, M. A. (2016). Multiobjective optimal power flow using a fuzzy based grenade explosion method. *Energy Systems*, 7(4), 699-721.
29. Singh, R. P., Mukherjee, V., Ghoshal, S. P. (2016). Particle swarm optimization with an aging leader and challengers algorithm for the solution of optimal power flow problem. *Applied Soft Computing*, 40, 161-177.
30. Reddy, S. S., Bijwe, P. R. (2016). Efficiency improvements in meta-heuristic algorithms to solve the optimal power flow problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 82, 288-302.
31. Ayan, K., Kılıç, U. (2016). Optimal power flow of two-terminal HVDC systems using backtracking search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 326-335.
32. Pandiarajan, K., Babulal, C. K. (2016). Fuzzy harmony search algorithm based optimal power flow for power system security enhancement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 72-79.
33. Mohamed, A. A. A., Mohamed, Y. S., El-Gaafary, A. A., Hemeida, A. M. (2017). Optimal power flow using moth swarm algorithm. *Electric Power Systems Research*, 142, 190-206.
34. Contaxis, G., Vlachos, A. (2000, January). Optimal power flow considering operation of wind parks and pump storage hydro units under large scale integration of renewable energy sources. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, 6(3), 1745-1750.
35. Makhloufi, S., Mekhaldi, A., Tegar, M., Saheb-Koussa, D., Djoudi, A. (2013). Optimal power flow solution including wind power generation into isolated Adrar power system using PSOGSA. *Revue des Energies Renouvelables*, 16(4), 721-732.

36. Panda, A., Tripathy, M. (2015). Security constrained optimal power flow solution of wind-thermal generation system using modified bacteria foraging algorithm. *Energy*, 93, 816-827.
37. Panda, A., Tripathy, M. (2016). Solution of wind integrated thermal generation system for environmental optimal power flow using hybrid algorithm. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 3(2), 151-160.
38. Marley, J. F., Vrakopoulou, M., Hiskens, I. A. (2016, November). An AC-QP optimal power flow algorithm considering wind forecast uncertainty. In *Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia), 2016 IEEE*, 3(6), 317-323.
39. Reddy, S. S., Bijwe, P. R. (2016). Day-Ahead and Real Time Optimal Power Flow considering Renewable Energy Resources. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 82, 400-408.
40. İnternet: Zimmerman, R. D., Murillo-Sanchez, E. C. MATLAB Power System Simulation Package. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.pserc.cornell.edu%2Fmatpower%2F&date=2017-04-26>. Son Erişim Tarihi: 26.04.2017.
41. Rao, P. N. (2006). Computation of the bus admittance matrix of networks having mutually coupled elements. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 28(5), 306-308.
42. İnternet: The WindPower and UK wind speed database programs. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.wind-power-program.com%2Fwind_statistics.htm&date=2017-04-26. Son Erişim Tarihi: 26.04.2017.
43. Justus, C. G., Hargraves, W. R., Yalcin, A. (1976). Nationwide assessment of potential output from wind-powered generators. *Journal of Applied Meteorology*, 15(7), 673-678.
44. Seguro, J. V., Lambert, T. W. (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75-84.
45. Doğan, B., Ölmez, T. (2015). A new metaheuristic for numerical function optimization: Vortex Search algorithm. *Information Sciences*, 293, 125-145.
46. Köse, U., Güraksın, G. E., Deperlioğlu, Ö. (2015). Girdap Optimizasyon Algoritması Tabanlı Destek Vektör Makineleri ile Diyabet Tespiti Diabetes Determination via Vortex Optimization Algorithm Based Support Vector Machines. *Vogue*, 15(18), 2-15.

47. Dogan, B., Ölmez, T. (2015). Modified Off-lattice AB model for protein folding problem using the vortex search algorithm. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 5(4), 329.
48. Demetriou, P., Asprou, M., Quiros-Tortos, J., Kyriakides, E. (2015). Dynamic IEEE test systems for transient analysis. *IEEE Systems Journal*, 81(4), 1-10.
49. Lee, K. Y., Park, Y. M., Ortiz, J. L. (1985). A united approach to optimal real and reactive power dispatch. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (5), 1147-1153.
50. Shahidehpour, M., Wang, Y. (2004). *Communication and control in electric power systems: applications of parallel and distributed processing (third edition)*. NewYork: John Wiley & Sons.
51. Alsac, O., Stott, B. (1974). Optimal load flow with steady-state security. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (3), 745-751.
52. Aydın Ö., Tezcan, S. S., Eke, İ., Taplamacıoğlu, M.C. (2016). Optimal power flow using vortex search algorithm. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, (1), 3254-3260.
53. Lai, L. L., Ma, J. T., Yokoyama, R., Zhao, M. (1997). Improved genetic algorithms for optimal power flow under both normal and contingent operation states. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 19(5), 287-292.
54. Bhattacharya, A., Chattopadhyay, P. K. (2011). Application of biogeography-based optimisation to solve different optimal power flow problems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(1), 70-80.
55. Sivasubramani, S., Swarup, K. S. (2011). Multi-objective harmony search algorithm for optimal power flow problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(3), 745-752.
56. Sumpavakup, C., Srikun, I., Chusanapiputt, S. (2010, October). A solution to the optimal power flow using artificial bee colony algorithm. In *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on IEEE*, 10(7), 1-5.
57. Adaryani, M. R., Karami, A. (2013). Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 219-230.
58. Ghasemi, M., Ghavidel, S., Ghanbarian, M. M., Gharibzadeh, M., Vahed, A. A. (2014). Multi-objective optimal power flow considering the cost, emission, voltage deviation

and power losses using multi-objective modified imperialist competitive algorithm. *Energy*, 78, 276-289.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AYDIN, Ömer
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.07.1989, Kayseri
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 582 33 06
 Faks : 0 (312) 230 84 34
 e-mail : omer.aydin89@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Elk. Elt. Müh.	2017
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi /Elk. Elt. Müh.	2014
Lise	Nermin-Mehmet Çekiç Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Aydın Ö., Tezcan, S. S., Eke, İ., Taplamacıoğlu, M.C. (2016). Optimal power flow using vortex search algorithm. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, (1), 3254-3260.

Hobiler

Havacılık



GAZİ GELECEKTİR..