



**GÜÇ SİSTEMLERİNDE OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ANALİZİ VE  
SİMÜLASYONU**

**Emin KARAMAN**

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2018**

Emin KARAMAN tarafından hazırlanan “GÜÇ SİSTEMLERİNDE OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ANALİZİ VE SİMÜLASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

**İkinci Danışman:** Yrd. Doç. Dr. İbrahim EKE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

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

**Başkan:** Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

**Üye:** Doç. Dr. Haluk GÖZDE

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Milli Savunma Üniversitesi

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

**Üye:** Doç. Dr. Nursel AKÇAM

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 24/01/2018

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

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.

Emin KARAMAN

24/01/2018

GÜÇ SİSTEMLERİNDE OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ANALİZİ VE SİMÜLASYONU  
(Yüksek Lisans Tezi)

Emin KARAMAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2018

ÖZET

Enerjiye olan ihtiyaç ve enerji verimliliğinin önemi günümüzde giderek artmaktadır. Bu devamlılık halindeki durumun sonucu olarak termik, hidroelektrik, doğalgaz ve yenilenebilir enerji santrallerinde üretilen enerjinin minimum kayıp ve maksimum verimlilikle kaliteli ve sürekli olarak tüketiciye iletilmesi sağlanan bir artı değerden ziyade gereksinim haline dönüşmüştür. Ayrıca, ülkemizde üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık olarak yarıdan fazlası doğalgaz ve ithal kömür gibi dışa bağımlı yakıt türleri ile elde edilmektedir. Bu nedenle, yakıt maliyetinin azaltılması ülke ekonomisi bakımından oldukça büyük öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında, düşük maliyetli ve kaliteli enerjinin temini için birbirinden bağımsız sekiz farklı durum için IEEE 30 baralı Alternatif Akım güç sisteminde kapasite limitleri dâhilinde Optimal Güç Akışı analizi gerçekleştirilmiştir. Üç farklı türdeki yakıt maliyeti, güç kaybı, gerilim profili, salınım ve kararlılık iyileştirmesi için hedef fonksiyonun çözümünde yeni nesil sezgisel ve aynı zamanda doğrusal olmayan fonksiyonlara uygulanabilir sürü zekâsı temelli Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması ile doğa olayına dayalı Su Döngüsü Algoritması kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, en uygun halde güç akışının gerçekleştirilmesi için gerek şartların ve işletme koşullarının bütün durumlar için sağlandığı ve hedef fonksiyon sonuçlarının hem literatür ile tutarlı hem de kıyaslama yapılan diğer optimizasyon algoritmalarından daha iyi olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 90513

Anahtar Kelimeler : Optimal güç akışı, Yük akışı, IEEE 30 bara sistemi, Parçacık sürü optimizasyonu, Su döngüsü algoritması, Hedef fonksiyon

Sayfa Adedi : 83

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

İkinci Danışman : Yrd. Doç. Dr. İbrahim EKE

## OPTIMAL POWER FLOW ANALYSIS AND SIMULATION IN POWER SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Emin KARAMAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2018

## ABSTRACT

Energy demand and efficiency is becoming more and more important nowadays. As a consequence of this continuity situation, transmission of energy produced in thermal, hydroelectric, natural gas and renewable power plants to consumer with minimum loss and maximum efficiency becomes a necessity rather than plus value. Furthermore, roughly more than half of total amount of electrical energy produced in our country is obtained through foreign-dependent fuel type such as natural gas and imported coal. Therefore, mitigation of fuel cost has pretty large importance with regards to national economy. In this thesis study, Optimal Power Flow analysis is performed on IEEE-30 bus Alternating Current power system within capacity constraints for eight different cases independent of each other to provide low-cost and quality energy. Objective functions are solved using new generation heuristic and as well applicable to non-linear functions swarm intelligence-based Particle Swarm Optimization Algorithm and nature event-based Water Cycle Algorithm for improvement of three different fuel cost, power loss, voltage profile, emission and stability. As a result of search, it is seen that necessary requirements and operating conditions to perform optimal power flow are ensured for all cases and outcome of each objective function is both consistent with the literature and better than the other optimization algorithms compared to ones employed in this study.

Science Code : 90513

Key Words : Optimal power flow, Load flow, IEEE 30 bus system, Particle swarm optimization, Water cycle algorithm, Objective function

Page Number : 83

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

Co-Supervisor : Asst. Prof. Dr. İbrahim EKE

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen değerli danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN ve Yrd. Doç. Dr. İbrahim EKE'ye, eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği olan bütün öğretmenlerime, öğretim görevlilerine ve her zaman yanımda olan sevgili aileme en içten duygularıyla teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ALTERNATİF AKIM GÜÇ SİSTEMLERİ .....	7
2.1. Güç Sistemlerinin Genel Tanımı.....	7
2.2. Birim Değer.....	9
2.3. İletim Hattı ve Parametreleri .....	9
2.4. Alternatif Akım Sistemlerinde Güç .....	11
2.5. Bara Admitans Matrisi .....	12
3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK AKIŞI.....	15
3.1. Ekonomik Dağıtım .....	15
3.2. Güç Akışı .....	16
3.3. Optimal Güç Akışı .....	17
3.4. OGA Problemi Hedef Fonksiyonunun Çözümü .....	20
3.5. IEEE 30 Barası .....	21
4. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI.....	25
4.1. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması .....	26
4.1.1. PSO algoritmasının çalışma prensibi .....	29

	<b>Sayfa</b>
4.1.2. PSO algoritması akış şeması .....	30
4.1.3. PSO algoritması ile optimal güç akışı probleminin çözümü.....	31
4.2. Su Döngüsü Algoritması .....	31
4.2.1. Su döngüsü algoritmasının çalışma prensibi.....	32
4.2.2. SDA akış şeması .....	35
4.2.3. SDA ile optimal güç akışı probleminin çözümü .....	37
<b>5. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYON VE SU DÖNGÜSÜ ALGORİTMALARI İLE OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ANALİZİ .....</b>	<b>39</b>
5.1. Yakıt Maliyeti Optimizasyonu .....	41
5.2. Vana Nokta Etkili Yakıt Maliyeti Optimizasyonu.....	46
5.3. Birden Fazla Yakıt Türü ile Çalışan Generatörlerin Maliyet Optimizasyonu ....	49
5.4. Aktif Güç Kaybının En Aza İndirilmesi.....	52
5.5. Gerilim Profilinin İyileştirilmesi.....	54
5.6. Salınım Miktarının Azaltılması.....	56
5.7. Gerilim Kararlılık Seviyesinin Yükseltilmesi .....	58
5.8. Arıza Durumunda Gerilim Kararlılık Seviyesinin Yükseltilmesi.....	61
5.9. Optimize Edilen Hedef Fonksiyonların Durum Değişkenleri.....	63
5.9.1. Referans bara aktif güç çıkışları.....	63
5.9.2. Generatör baraları reaktif güç çıkışları .....	64
5.9.3. Yük baraları gerilimleri.....	66
5.9.4. İletim hatları görünür güç yüklenme değerleri.....	68
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>77</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>83</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. IEEE 30 baralı güç sisteminde aktif ve reaktif talep güçler .....	23
Çizelge 3.2. IEEE 30 baralı sistemde generatörlerin eniyileme öncesi işletme koşulları .....	23
Çizelge 3.3. IEEE 30 baralı güç sisteminin iletim hattı bilgileri .....	24
Çizelge 5.1. Yakıt maliyeti optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası ...	44
Çizelge 5.2. Vana-noktası etkili baraların yakıt maliyeti katsayıları.....	47
Çizelge 5.3. Vana-noktası etkili yakıt maliyeti optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası .....	48
Çizelge 5.4. Referans generatör baralarının aktif güç sınır değerleri ve maliyet katsayıları.....	50
Çizelge 5.5. Kademeli yakıt maliyeti optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası.....	51
Çizelge 5.6. Güç kaybı optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası. ....	53
Çizelge 5.7. Gerilim profili optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası...	55
Çizelge 5.8. IEEE 30 sistemindeki güç baraları salınım katsayıları .....	56
Çizelge 5.9. Salınım optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası.....	57
Çizelge 5.10. Gerilim kararlılık seviyesi optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası .....	60
Çizelge 5.11. Arıza durumunda gerilim kararlılık seviyesi optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası .....	62
Çizelge 5.12. PSO algoritmasında generatörlerin reaktif güç çıkış değerleri.....	64
Çizelge 5.13. SDA algoritmasında generatörlerin reaktif güç çıkış değerleri .....	65
Çizelge 5.14. PSO algoritmasında yük baraları gerilimleri .....	66
Çizelge 5.15. SDA algoritmasında yük baraları gerilimleri .....	68
Çizelge 5.16. PSO algoritmasında iletim hatlarının taşıdıkları görünür güçler.....	69
Çizelge 5.17. SDA algoritmasında iletim hatlarının taşıdıkları görünür güçler .....	71

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Örnek bir güç sisteminin şematik gösterimi .....	7
Şekil 2.2. Güç sistemi örnek tek hat diyagramı .....	8
Şekil 2.3. İletim hattı eşdeğer devresi .....	10
Şekil 2.4. Orta uzunluktaki iletim hattı $\pi$ eşdeğer devresi .....	10
Şekil 2.5. Güç üçgeni .....	11
Şekil 2.6. Dört baralı örnek güç sistemi.....	13
Şekil 3.1. IEEE 30 baralı güç sistemi .....	22
Şekil 4.1. Parçacık sürü optimizasyonunun vektör diyagramı .....	28
Şekil 4.2. Parçacık sürü algoritması akış şeması .....	30
Şekil 4.3. Su döngüsü algoritmasında akarsunun nehire doğru akışı .....	35
Şekil 4.4. Su döngüsü algoritmasında akarsu, nehir ve denizin şematik gösterimi.....	35
Şekil 4.5. Su döngüsü algoritması akış şeması .....	36
Şekil 5.1. SDA ile yakıt maliyeti optimizasyonunda $Y_{\text{hedef}}$ matrisinin başlangıç koşulundaki durumu.....	42
Şekil 5.2. PSO ile yakıt maliyeti optimizasyonunda parçacıkların başlangıç konumu ..	43
Şekil 5.3. PSO algoritmasında generatörlerin yakıt maliyetinin güç akışına göre değişimi .....	43
Şekil 5.4. PSO algoritmasında generatörlerin yakıt maliyeti.....	45
Şekil 5.5. Vana noktası etkisinin güç/maliyet grafiği .....	46
Şekil 5.6. SDA ile vana nokta etkili durumun optimizasyonunda generatörlerin yakıt maliyeti.....	49
Şekil 5.7. PSO algoritması ile kademeli durumun optimizasyonunda generatörlerin yakıt maliyeti.....	50
Şekil 5.8. Güç kaybının hedef fonksiyonlara göre SDA'da değişimi.....	52
Şekil 5.9. PSO algoritması ile gerilim profili iyileştirmesi.....	56

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.10. SDA algoritmasında yük baralarının kararlılık seviyeleri .....	61
Şekil 5.11. PSO algoritması ile hedef fonksiyonların optimizasyonunda salıncak bara aktif güçleri.....	63
Şekil 5.12. SDA ile hedef fonksiyonların optimizasyonunda salıncak bara aktif güçleri.....	64
Şekil 5.13. PSO algoritması ile hedef fonksiyonların optimizasyonunda generatör baraları reaktif güç değerleri .....	65
Şekil 5.14. SDA ile hedef fonksiyonların optimizasyonunda generatör baraları reaktif güç değerleri.....	65
Şekil 5.15. PSO algoritmasında yük baraları gerilimlerinin hedef fonksiyona göre değişimi .....	67
Şekil 5.16. SDA’da yük baraları gerilimlerinin hedef fonksiyona göre değişimi .....	67
Şekil 5.17. PSO algoritmasında iletim hatlarının hedef fonksiyon bazında taşıdığı görünür güçler .....	70
Şekil 5.18. SDA’da iletim hatlarının hedef fonksiyon bazında taşıdığı görünür güçler.	70

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>A</b>	Akım
<b>B</b>	Suseptans
<b>C</b>	Kapasitans
<b>Cos</b>	Kosinüs
<b>exp</b>	Eksponansiyel fonksiyon
<b>G</b>	Kondüktans
<b>I</b>	Akım
<b>k</b>	Kilo
<b>L</b>	Endüktans
<b>M</b>	Mega
<b>P</b>	Aktif Güç
<b>p.u.</b>	Per unit/birim değer
<b>Q</b>	Reaktif güç
<b>R</b>	Direnç
<b>S</b>	Görünür güç
<b>Sin</b>	Sinüs
<b>\$</b>	Dolar
<b>V</b>	Volt
<b>VA</b>	Volt amper
<b>VAR</b>	Volt amper reaktif
<b>W</b>	Watt
<b>X</b>	Reaktans
<b>Y</b>	Admitans
<b>Z</b>	Empedans
<b>*</b>	Eşlenik
<b><math>\Omega</math></b>	Ohm

**Kısaltmalar****Açıklamalar****AA**

Alternatif Akım

**ED**

Ekonomik Dağıtım

**GA**

Güç Akışı

**IEEE**

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü

**OGA**

Optimal Güç Akışı

**PSO**

Parçacık Sürü Optimizasyonu

**SDA**

Su Döngüsü Algoritması



## 1. GİRİŞ

Enerjiye olan ihtiyacın ve kaynakların etkin kullanılmasının öneminin giderek daha da arttığı günümüzde, termik, hidroelektrik, doğalgaz ve yenilenebilir enerji santrallerinde üretilen enerjinin minimum kayıp ve maksimum verimlilikle sürekli ve kaliteli olarak kullanıcıya iletilmesi sağlanan bir artı değerden ziyade gereksinim haline dönüşmüştür. Depolanamayan elektrik enerjisinin dengeli ve talep oranında anlık üretimi ve iletimi de bu bakımdan büyük önem taşımaktadır.

Enerjinin üretilmesi ve sonrasındaki aşama olan iletim sürecinde, arz talebe dayalı dengenin güç tesisinin kapasite değer aralığında sağlanması ve sınır değerlerin aşılmaması optimum düzeyde güç akışının sağlanabilmesinin gerek koşuludur. Aksi halde, kapasitelerinin üzerinde çalışmaya zorlanan generatörler hem yükü dengesiz paylaşacak ve güç sistemini çökme noktasına yaklaştıracak hem de durum değişkenlerinin izin verilen değerlerin dışına çıkması sonucunda uygulanacak ceza ile yakıt maliyetinin artmasına sebebiyet verecektir.

Güç sisteminin işletilmesi ve planlamasında istenmeyen bu durumdan kaçınmak amacıyla, başlangıçta güç (yük) akışının mümkün olan en düşük maliyetle sağlanabilmesi için maliyet odaklı Ekonomik Dağıtım (ED) probleminin çözümü için çalışmalar yapılmıştır. [1-3]. Generatör baralarının izin verilen sınır değerler arasında güç üretmesi ve talep güç ile kayıp güç toplamının üretilen toplam güce eşit olması ekonomik yük dağıtımının gerçekleşmesi için yeterli olmaktadır. Aktif güce bağlı iki koşulun yerine getirilmesi ile istenen gerekliliğin sağlanmış olması bakımından ED problemi oldukça yalın ve karmaşıklıktan uzak bir yapıdadır.

Bu süreçte, ED alanındaki çalışmaların yanı sıra yük dağıtımına etki eden değişkenlerin de hesaba katıldığı, Güç Akışı (GA) olarak tanımlanan, daha karmaşık ve doğrusal olmayan yapıdaki denklem çözümlenmiştir [4-6]. GA, birincil olarak yakıt maliyetinin en aza indirilmesi yerine güç sisteminin kapasite limitleri içerisinde çalışmasını amaç edinmiştir. Bu yaklaşım neticesinde, sistem kararlı hal koşullarında işletilebilir olmuştur. Devam eden süreçte hem yakıt sarfiyatının ve maliyetinin azaltılacağı hem de güç sisteminin belirlenen sınır işletme koşullarının sağlanacağı optimum bir çözüm hedeflenmiştir.

Bu doğrultuda, maliyet odaklı ekonomik dağıtım problemine, kararlı halde güç akışı için sağlanması şart olan eşitsizlik denklemlerin de ilave edilmesiyle sade bir yük dağıtımından en iyi koşullarda yük akışının yapılabilmesine evrilen problem, Carpentier tarafından Optimal Güç Akışı (OGA) olarak tanımlanmıştır [7].

OGA probleminin giriş parametreleri olan generatör baraları aktif güçleri ve gerilimleri, şönt kompanzasyon baraları, trafo kademe ayarları ile problemin çıkış bileşenleri olan referans bara aktif gücü, generatör baraları reaktif güçleri, yük barası gerilimleri ve iletim hatları yük değerlerinin belli limitler dâhilinde olması gereken ve yakınsama ile sonuca ulaşma açısından oldukça karmaşık yapıda olan güç akışı probleminin çözümü, ilgi çeken ve üzerinde çok sayıda çalışma yapılan bir alandır.

OGA, hedef fonksiyon olarak nitelenen yük akışı probleminin belirlenen koşul denklemleri altında amaca yönelik olarak çözülmesi ve yükün dağıtımında gerek şartların sağlanmasıyla yapılmaktadır. Problemin sabit olmayıp basit veya birkaç koşulun aynı anda optimize edildiği bileşik fonksiyon olarak tanımlanabilmesi ve çözümde tercih edilen algoritmaların farklı olması sebebiyle, optimum çözümün bulunması için yapılan çalışmalar ve araştırma konusu güncelliğini halen korumaktadır. Böylelikle, tezin konusu araştırılmaya ve geliştirilmeye açık bir akademik alan olarak ortaya çıkmaktadır.

Daha önceleri OGA problemi hedef fonksiyonunun çözülmesine yönelik çalışmalarda Newton [8], Hızlı Ayrılma [9], İndirgenmiş Gradient [10], P-Q Ayrışması [11], Genişletilmiş Lagrangian [12], Lineer Programlama [13] ile Kuadratik Yakınsama Metodu [14] vb. geleneksel yaklaşım ve yöntemler sıklıkla kullanılmaktaydı. Ancak yakınsama, hız, doğrusal olmayan fonksiyonlara uygulamadaki zorluklar ve optimizasyon algoritmalarının ortaya çıkışı ile OGA probleminin çözümünde anılan metotların kullanımı neredeyse sonlanmıştır.

Klasik yöntemler çözüme giden adımlarda çözülecek problemde bağımsız olarak çoğunlukla seriler, dönüşümler, kısmi türevler vb. kullandığından bu modelleme türlerindeki matematiksel ifadeler, evrimsel algoritmalar ile yapılan çözümlere nazaran işlem yoğunluğu bakımından daha komplike ve hesaplama süreleri yönünden daha uzun olmaktadır.

İteratif yöntemlerden olan ve lineer olmayan fonksiyonların çözümünde yaygın olarak kullanılan diğer geleneksel yöntemlere kıyasla hızlı yakınsama avantajına sahip Newton-Raphson metodu geçmiş dönemlerde güç sistemi analizi ve güç akışı denkleminin çözümünde sıklıkla tercih edilmekteydi.

1990'lı yılların başlarından itibaren ise alışılmış yaklaşım yerini yeni nesil çözüm tekniklerine bırakmaya başlamıştır. 1991 yılında gücün üretimi ve yüke dağıtımının sağlanarak optimal yük akışının gerçekleşmesinde yük ve üretimdeki kararsızlıkları belirsizlik olarak değerlendiren, Bulanık Modelleme güç sistemine uygulanmıştır [15].

Bulanık küme teorisi ile hedef fonksiyon modellenerek 1994 yılında reaktif güç kontrolü ve iyileştirmesi için 6 ve 14 baralı sistemlerde çalışma gerçekleştirilmiştir [16].

Sonrasında, Geliştirilmiş Genetik Algoritma [17] 1997'de, Evrimsel Programlama [18] 1999 yılında OGA probleminin çözümünde kullanılmıştır. Takip eden süreçte Pareto Evrimsel Algoritması ile güç sisteminin gerilim kararlılık ve yakıt giderini en uygun seviyeye düşürmek için çalışma yapılmıştır [19].

Günümüzde ise, bilimin farklı alanlarında da yararlanılan hızlı yakınsama, çok değişkenli problem çözümlerine uygulanabilme, geniş araştırma uzayı, karmaşık ve doğrusal olmayan formdaki problemlere kolaylıkla uygulanabilme ve bilgisayar desteği ile saniyeler mertebesinde sonuca erişme gibi üstelik ve avantajlarıyla yapay zeka, sürü zekası, doğa olayları, evrim teorileri ve kuram bazlı sezgisel optimizasyon algoritmaları OGA probleminin hedef fonksiyonunun çözümünde farklı kabuller, modellemeler, uyarılma ve değişiklikler yapılarak çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Literatürde mevcut olan ve yük akışı probleminin çözümünde kullanılan bazı optimizasyon algoritmaları, çalışma prensipleriyle birlikte sonraki paragraflarda örneklenmiş ve tez konusunun geldiği nokta irdelenmiştir.

Sürü temeline ve yiyecek kaynağı arama güdüsüne dayalı, grup içindeki en iyi sonuç odaklı Yapay Arı Kolonisi (YAK) [20-22] ve Bakteri Yiyecek Arama Algoritmaları [23] ile OGA eniyilemesi yapılmıştır.

Toplu halde yaşayan fiziki olarak küçük boyutlu hayvanların yaşam koşulları ve içgüdüsel hareketlerinin incelenmesiyle ortaya çıkan optimizasyon teknikleri de bulunmaktadır.

Bunlar arasında, ateş böceklerinin gece vakti yaydıkları ışıtan madde (luciferin) miktarı tabanlı Ateş Böceği Sürüsü Optimizasyon Algoritması [24], yarasaların yankı ile yer belirleme davranışından ilham alan Yarasa Optimizasyon Algoritması [25] ve sanal karıncaların hedefe giden en kısa yolu bulmak için feromon etkisinden faydalandıkları Karınca Kolonisi Algoritması [26] kullanılarak standart IEEE (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) baraları ve ulusal güç sistemleri benzetiminde yük akışını en uygun değerlerde sağlamaya yönelik uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Küme düzeninde hareket eden canlıların hareketlerinin gözlenmesine dayalı yaklaşımların dışında fiziki ve somut bir kavram olan kütle çekim esaslı Yerçekimsel Arama Algoritması [27] ve etkileşimden esinlenerek ortaya çıkan Öğretme-Öğrenme Tabanlı Algoritma [28] yardımıyla gerçekleştirilen çalışmalarda da yük akışı optimize edilmiştir.

Bütünüyle, farklı müzik aletlerinden çıkan notalar arasında ahengin sağlanabilmesi düşüncesinden esinlenen Armoni Arama Algoritması (AAA) ile reaktif güç akışı optimizasyonu üzerine bir çalışma yapılmıştır [29].

Evrin teorilerinden olan aynı zamanda Erol ve Eksin tarafından literatüre kazandırılan Büyük Patlama Büyük Çatırtı Algoritması [30] ile 5 generatör 35 iletim hattından oluşan IEEE 25 bara sisteminin vana etkili yakıt maliyetinin optimum seviyeye çekilmesini amaçlayan simülasyonu gerçekleştirilmiştir [31].

Kendi yumurtasını başka bir kuş türü yuvasında bulunan yumurtaların yanına bırakan guguk kuşunun davranışlarından esinlenen Öz Öğrenimli Guguk Kuşu Algoritması ile yakıt masrafını minimuma indirmek için üç ayrı koşulda maliyet iyileştirmesi yapılmıştır [32].

Zıtlık Tabanlı Değiştirilmiş Diferansiyel Evrim Algoritması kullanılarak 10 tanesi generatör toplamda 39 baralı new-England bara sisteminde OGA problemi maliyetin aşağı seviyelere çekilebilmesi için çözümlenmiştir [33].

Tez çalışmasında, 2000-2016 yılları arasında üretilen elektrik enerjisinin %54,8 [34] oranına karşılık gelen miktarını dışa bağımlı kaynaklarla sağlayabilen ülkemizde son yıllarda önem kazanmaya başlayan OGA problemi, sekiz farklı ve birbirinden tamamen ayırık durum için standart IEEE 30 baralı güç sistemi üzerinde optimize edilmiştir.

Hedef fonksiyonlar, sürü halinde yaşayan ve yiyecek arayan kuş ve balıkların davranışlarının gözlemine ve modellenmesine dayanan sürü zekası temelli sezgisel Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) Algoritması [35-37] ve suyun tabiattaki çevrimi temelli Su Döngüsü Algoritması (SDA) [38-40] ile MATLAB ve güç problemlerinin çözümü için geliştirilen MATPOWER [41-42] programları kullanılarak çözülmüştür.

Böylelikle, standart, vana-nokta etkili ve kademeli yakıt maliyetinin düşürülmesi için her üç çalışma koşulu için maliyet optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma durumlarının yanında, gerilim profili iyileştirme, gerilim kararlılığının artırılması, arıza durumunda gerilim kararlılığının artırılması, aktif güç kaybının minimize edilmesi ve salınım değerinin en aza indirilmesi durumları için de hedef fonksiyonun çözümlenmesi yapılmıştır.

Her durum için hedef fonksiyon, karar ve durum değişkenleri için izin verilen aralıkta sonuçlanmış ve bu durum çizelgelerde gösterilmiş olup, sınır değerlerin aşılmaması neticesinde hem yakıt maliyetini ceza katsayısı oranında artıracak ceza maliyetinden kaçınılmış hem de OGA gereksinimleri yerine getirilmiştir.

Güç sistemlerinde verimliliğin, en uygun işletme şartlarının sağlanmasının ve yakıt ekonomisinin öneminin vurgulanmaya çalışıldığı tez çalışmasında, farklı çalışma koşulları ve isterler için amaca uyarlanan hedef fonksiyonların çözümünde elde edilen sonuçlar birbiriyle ve bu alanda yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırılmış ve analiz edilerek yorumlanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, yük akışının sağlandığı Alternatif Akım (AA) güç sistemleri, OGA probleminin çözümünde kullanılan bara admitans matrisinin oluşumu ve hesaplamalarda kullanılan per unit (birim değer) kavramına ilişkin bilgi verilmektedir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde ekonomik yük dağıtımı, güç akışı ve optimal güç akışı tanıtılmaktadır. Ayrıca, OGA hedef fonksiyonu, eşitlik ve eşitsizlik denklemleri bu bölümde yer almaktadır. Yine bu bölümde tüm durumlar için hedef fonksiyonun benzetim yöntemiyle çözümlendiği IEEE 30 bara sistemi tanıtılmakta, güç sisteminin başlangıçtaki işletme koşulları verilmektedir.

Takip eden dördüncü bölümde Parçacık Sürü Optimizasyon ve Su Döngüsü Algoritmaları, çalışma prensipleri, akış şemaları ve bu sezgisel yaklaşımların Optimal Güç Akışına uygulanmaları ele alınmaktadır.

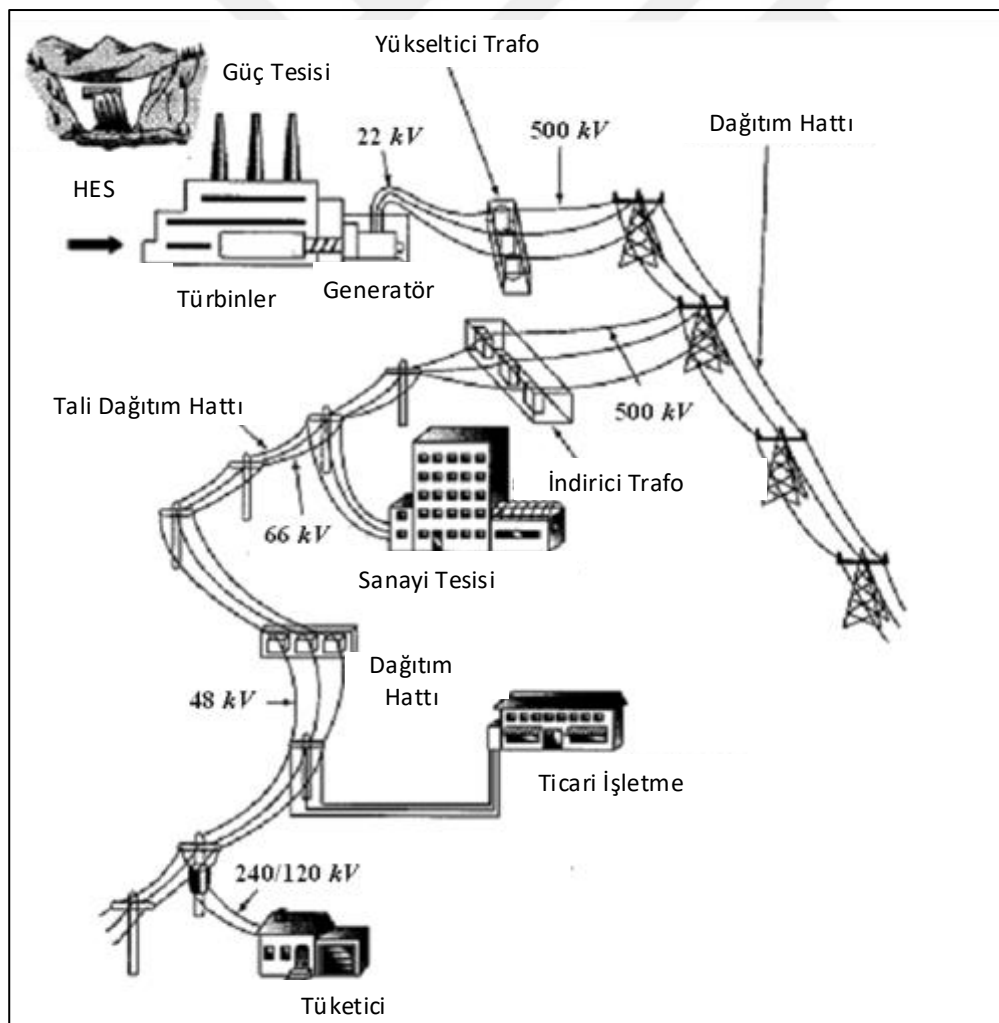
Tezin beşinci bölümde ise hedef fonksiyonların tüm durumlar için çözümü, sonuçların değerlendirilmesi, yorumlanması ve diğer akademik çalışmalar ile mukayese edilmesi yer almakta ve sonuç kısmıyla tez çalışması tamamlanmaktadır.

## 2. ALTERNATİF AKIM GÜÇ SİSTEMLERİ

### 2.1. Güç Sistemlerinin Genel Tanımı

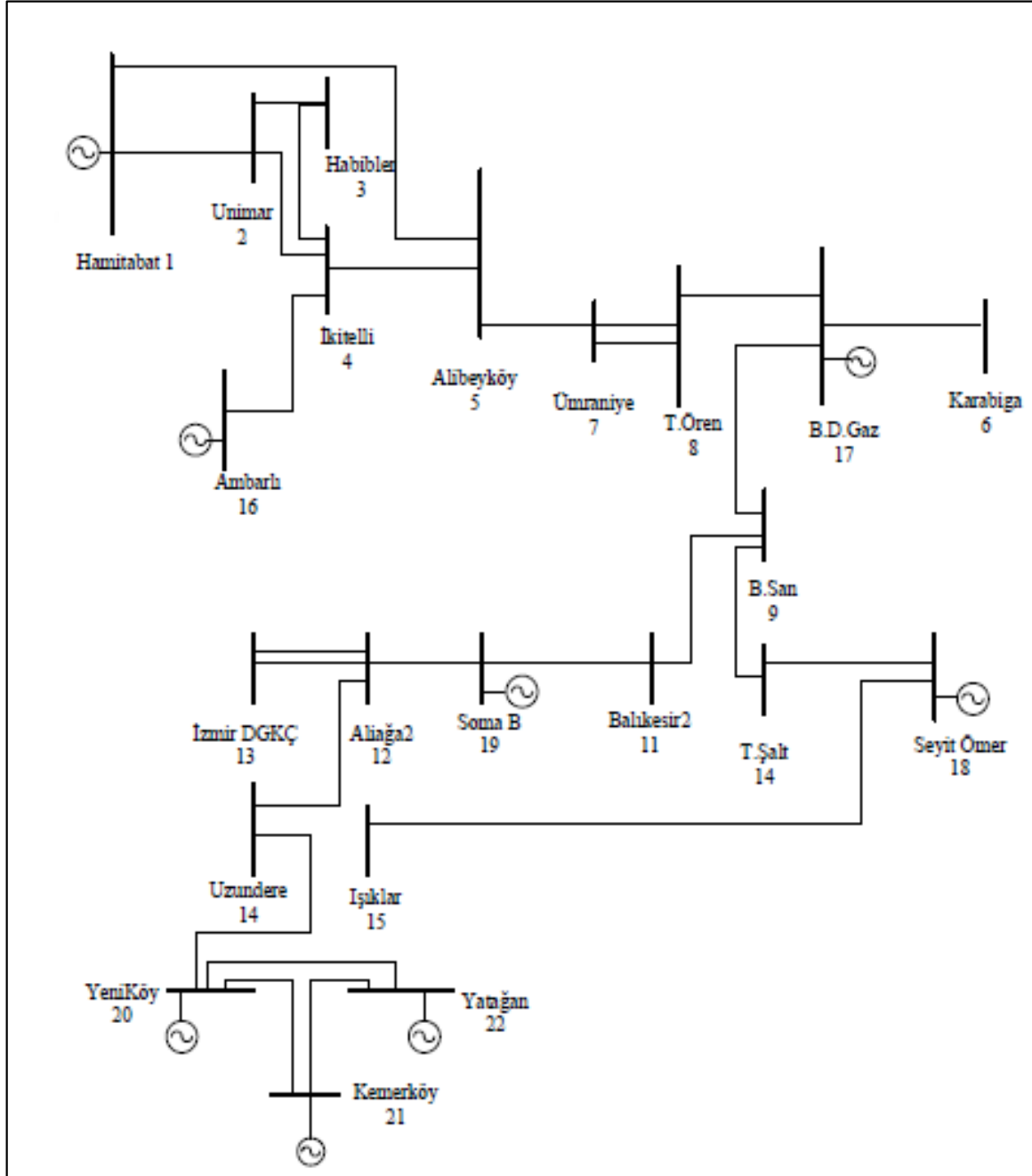
Elektrik enerjisinin üretildiği santraller, üretilen enerjinin yüksek gerilim ile taşındığı iletim hatları, son kullanıcı ile enerjiyi buluşturan dağıtım hatları ve yükler Güç Sistemleri olarak nitelendirilmektedir [43-44].

Generatörler, yükler, güç ve yük baraları, yükseltici ve indirici transformatörler, kompanzasyon sistemleri, enerji nakil hatları, dağıtım tesisleri ve sistemdeki diğer bileşenler bütün halinde güç sistemlerini oluşturmaktadır. Şekil 2.1'de temsili olarak enerjinin üretimi ve tüketiciye ulaşması gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Örnek bir güç sisteminin şematik gösterimi [45]

Güç sistemlerinin modellenmesinde ve sistemdeki değişkenlerin değerlerinin hesaplanmasında tek hat diyagramından faydalanılmaktadır. Ülkelerin kullandığı güç sistemleri çeşitli olmakla birlikte, toplam bara sayısı ile adlandırılmaktadır ve aşağıdaki Şekil 2.2’de ülkemizde kullanılan 8 gerilim kontrollü bara ve 14 yük barasından oluşan Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) 22 baralı güç sisteminin tek hat diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.2. EÜAŞ 22 baralı güç sistemi tek hat diyagramı [46]

## 2.2. Birim Değer

Güç sistemlerinin modellenmesi, değişken değerlerinin belirlenmesi ve problem çözümünde sıklıkla birim değere karşılık gelen per unit tanımlaması ile karşılaşilmektedir. MegaVoltAmper (MVA) seviyelerinde güç akışının olduğu bir sistemde hesaplamaları kolaylaştırmak ve akıcılığı sağlamak amacıyla referans birim ve büyüklükler belirlenmektedir.

İletim Hatları parametreleri olan akım, gerilim, kompleks güç ve empedans değişkenlerinden ikisi referans olarak seçildiğinde diğer iki değişkenin baz değerleri belirlenmektedir. Güç Sistemlerinde çoğunlukla gerilim ve güç için baz değer seçilmekte, akım ile empedans değerleri baz alınan büyüklük değerine göre devre denklemleri ile bulunmakta ve birim değer (p.u.) cinsinden ifade edilmektedir. [47].

Görünür güç baz değeri tek faz için MVA, gerilim baz değeri faz-nötr için kV mertebesinde tanımlandığında ve akım için Amper (A), empedans için Ohm ( $\Omega$ ) birimi kullanıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilmektedir [47].

$$\text{Baz akım} = \frac{\text{Baz güç (kVA)}}{\text{Baz gerilim (kV)}} \text{ A} \quad (2.1)$$

$$\text{Baz empedans} = \frac{\text{Baz gerilim (V)}}{\text{Baz akım (A)}} = \frac{(\text{Baz gerilim kV})^2 \times 1000}{\text{Baz güç (kVA)}} = \frac{(\text{Baz gerilim kV})^2}{\text{Baz güç (MVA)}} \Omega \quad (2.2)$$

$$\text{Birim değer empedans} = \frac{\text{Gerçek empedans}}{\text{Baz empedans}} \text{ p. u.} \quad (2.3)$$

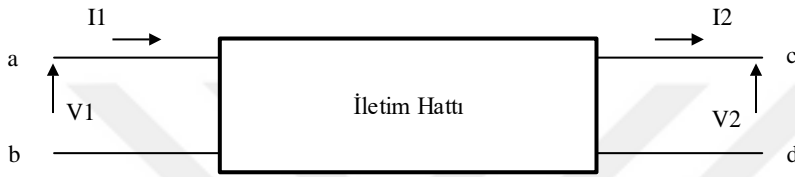
## 2.3. İletim Hattı ve Parametreleri

Santrallerde üretilen gücün yükseltici trafolar ile birkaç yüz kV'luk yüksek gerilim değeri ile taşındığı ve indirici trafolar ile dağıtım sistemlerine aktarıldığı güç sistemi kısmı İletim Hattı olarak tanımlanmaktadır.

İletim hattı karakteristiğini ve verimliliğini etkileyen dört ana unsur rezistans, endüktans, kapasitans ve çoğunlukla ihmal edilen kondüktans'tır. Seri empedans, iletim hattı

kayıplarının en büyük nedeni olan rezistans ve indüklenen gerilimin akıma göre türevi olan endüktanstan oluşmaktadır [44]. İletkenler arasındaki potansiyel farkından kaynaklanan kapasitans ile izolatörler üzerindeki kaçak akım sebebiyle ortaya çıkan ve ihmal edilebilir etki düzeyinde olan kondüktans ise hattın şönt empedansını sağlamaktadır [47].

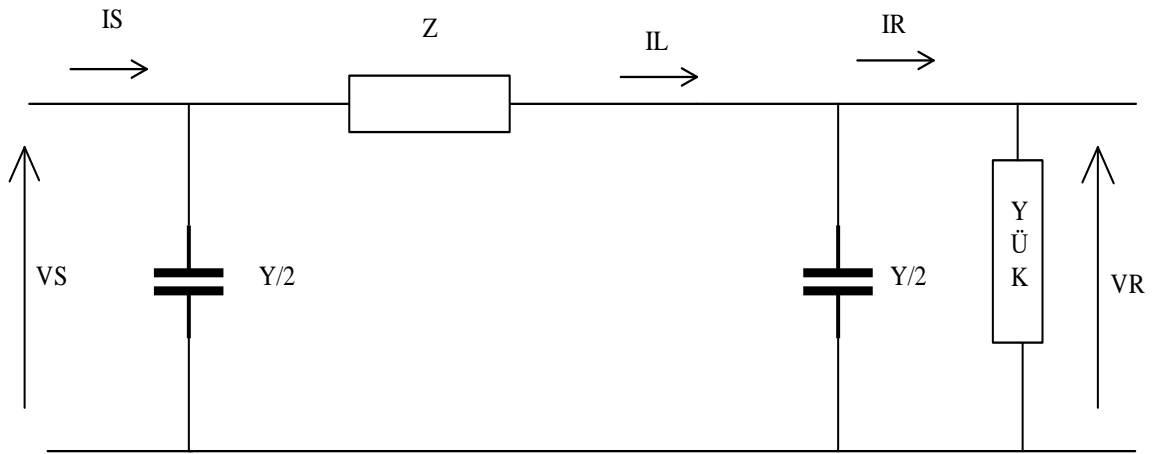
Hat parametrelerini etkileyen faktörler ise gerilim düzeyi, mesafe, iletken türü ve sayısı olarak sıralanabilir. Bir iletim hattı iki uçlu devre olarak düşünüldüğünde Şekil 2.3’de yer aldığı gibi gösterilmektedir.



Şekil 2.3. İletim hattı eşdeğer devresi

Hat uzunluğuna göre kısa, orta ve uzun mesafeli iletim hatları ile enerjinin transferi gerçekleşmektedir. Problem çözümü ve hesaplamalar iletim hattının  $\pi$  (pi) ya da T eşdeğer devresine göre yapılmaktadır.

Güç sistemleri uygulamalarında kullanılan orta mesafeli bir iletim hattının  $\pi$  eşdeğer devresi Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Orta uzunluktaki iletim hattı  $\pi$  eşdeğer devresi [44]

## 2.4. Alternatif Akım Sistemlerinde Güç

Güç, birim zamandaki enerjidir ve değeri gerilim ile akımın çarpımıdır [48]. Bu tanımlama formül ile ifade edildiğinde Eş. 2.4 elde edilmektedir.

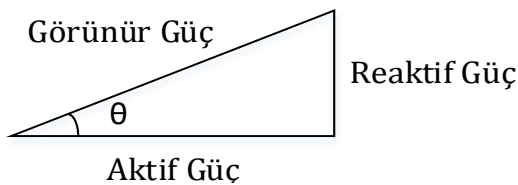
$$P = VI = (IR)I = I^2R \quad (2.4)$$

Akım ve gerilimin sabit olmayıp zamana göre farklı değerler aldığı sinüsoidal dalga biçimindeki Alternatif Akım güç sistemlerinde ise güç formülü, daha basit yapıda olan Eş. 2.4 ifadesinden, akım, gerilim ve gücün karmaşık (kompleks) olarak değerlendirildiği Eş. 2.5 formülüne dönüşmektedir.

$$S = VI^* \quad (2.5)$$

Eş.2.5’de verilen tek fazlı bir sisteme ait görünür güç formülünde, faz ile nötr hattı arasındaki gerilim değeri ile akımın eşleniği hesaplamalarda kullanılmaktadır ve bu durumda akımın sanal kısmı işaret değiştirmektedir. Görünür güç (S), aktif (P) ve reaktif gücün (Q) vektörel toplamına eşittir.

Aktif güç ile görünür güç arasındaki açının daralması aktif gücü artırırken reaktif gücü azaltmaktadır. Görünür gücün, ( $\theta$ ) açısının kosinüs değeri ile çarpımı aktif gücü, sinüs değeri ile çarpımı reaktif gücü vermektedir. Aktif gücün görünür güce oranı da güç faktörü olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.5’de güç üçgeni gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Güç Üçgeni

Güç üçgeni ve görünür güç matematiksel denklemler ile tanımlanacak olursa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$S = |V| |I| \angle \theta \text{ VA} \quad (2.6)$$

$$S = |V| |I| \cos \theta + j |V| |I| \sin \theta \text{ VA} \quad (2.7)$$

$$S = P + jQ \text{ VA} \quad (2.8)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ VA} \quad (2.9)$$

Üç fazlı güç sistemlerinde ise güç formülü aşağıdaki formdadır.

$$S = 3 VI^* \quad (2.10)$$

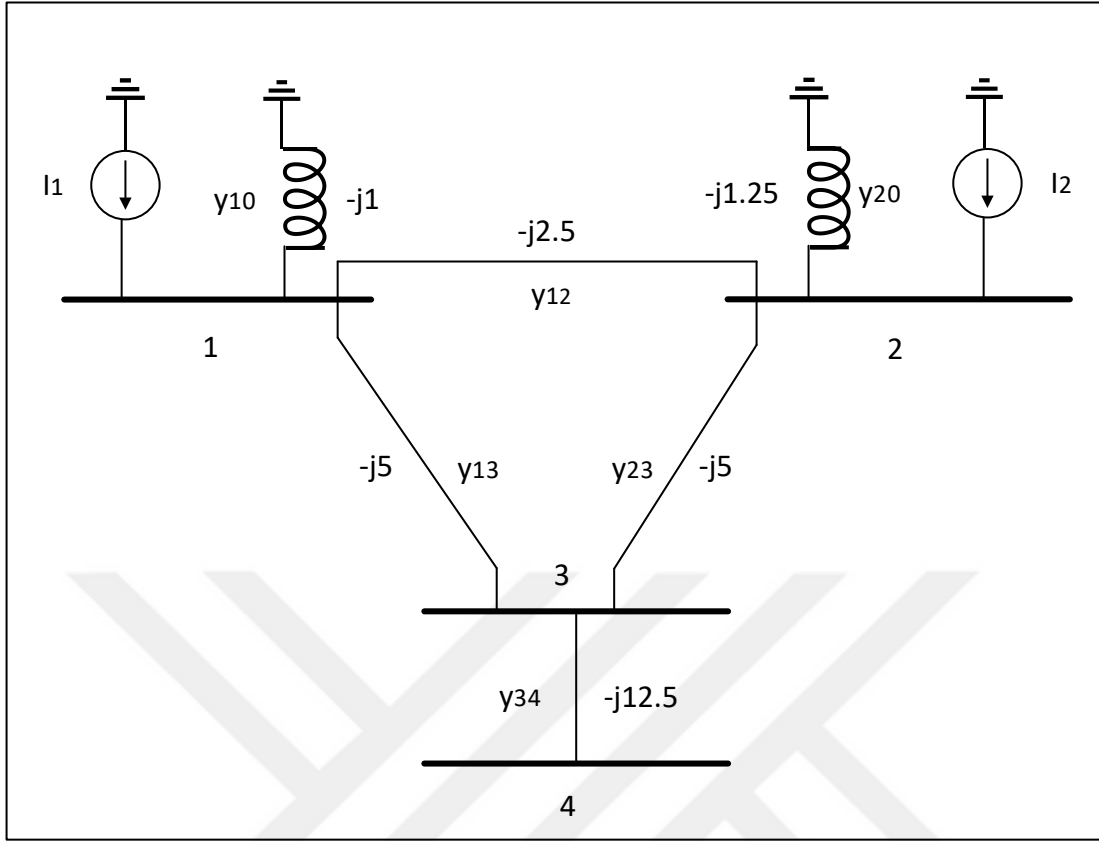
Alternatif akım güç sistemleri, gerilim değerinin istenen aralığa göre ayarlanabilir olması ve yüksek gerilimde hat kayıplarının daha az olması sayesinde yerleşim yerleri ve sanayi tesisleri dışında, demiryolu katener sistemleri gibi özel amaçlı tesislerde de enerji temini için yaygın olarak tercih edilmektedir.

## 2.5. Bara Admitans Matrisi

Güç sistemleri arıza analizlerinde bara empedans matrisi kullanılırken, güç akışı analizlerinde, matematiksel modellemesi güç akışı problem çözümüne uygun olan bara admitans matrisi kullanılmaktadır.

Matris, sistemdeki toplam bara sayısınca eşit satır ve sütun sayısına sahip  $n \times n$  boyutunda kare matristir. Diyagonal çizgi üzerinde yer alan admitanslar, baraya etki eden tüm admitans değerlerinin toplamı ile elde edildiğinden öz admitans olarak adlandırılmaktadır. Köşegen dışında kalan matrisin diğer elamanları ise, sadece birbirlerine olan etkileri nedeniyle karşılıklı admitans olarak nitelendirilmektedir.

Bara admitans matrisinin nasıl oluşturulduğunun gösterimi için Şekil 2.6'da yer alan 4 baralı güç sistemi örnek olarak verilmiş, devre denklemi çözümü ve matris denklemleri adımlar halinde sıralanmıştır [43].



Şekil 2.6. Dört baralı örnek güç sistemi [43]

Baralar, admitanslar ve akım kaynaklarının gösterildiği Şekil 2.6'da örneklenen devrede referans olarak 0.düğüm (toprak) referans alınmıştır. 1 ve 2 nolu baralara Kirchoff'un Akım Kanunu (bir baraya/düğüm noktasına doğru ya da ters yönde akan akımların toplamı sıfıra eşittir) uygulanmaktadır. Bu durumda bara akım denklemleri matematiksel formda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3) \\ I_2 = y_{20}V_2 + y_{12}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3) \\ 0 = y_{23}(V_3 - V_2) + y_{13}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4) \\ 0 = y_{34}(V_4 - V_3) \end{array} \right\} \quad (2.11)$$

Denklemler,  $I = YV$  formülüne göre yeniden düzenlendiğinde Eş. 2.12 elde edilmektedir.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3 \\ I_2 = -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23})V_2 - y_{23}V_3 \\ 0 = -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4 \\ 0 = y_{34}V_3 + y_{34}V_4 \end{array} \right\} \quad (2.12)$$

Bir sonraki adımda köşegen ve köşegenler dışındaki admitanslar toplanarak denklemde yerine yazılır. Böylelikle Eş. 2.13’de yer alan öz admitanslar (diyagonal üzerinde yer alan) ve Eş. 2.14’deki karşılıklı admitanslar (diyagonal dışında yer alan) bulunur.

$$\begin{cases} Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13} \\ Y_{22} = y_{20} + y_{12} + y_{23} \\ Y_{33} = y_{13} + y_{23} + y_{34} \\ Y_{44} = y_{34} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} Y_{12} = Y_{21} = -y_{12} \\ Y_{13} = Y_{31} = -y_{13} \\ Y_{23} = Y_{32} = -y_{23} \\ Y_{34} = Y_{43} = -y_{34} \end{cases} \quad (2.14)$$

Denklemi  $I_{bus} = Y_{bus} V_{bus}$  formatında ve kare matris halinde yazabilmek için, birbiriyle bağlantısı olmayan baraların köşegen dışındaki admitans değerlerini sıfıra eşitleyecek olan Eş. 2.15 matematiksel denkleği kullanılır.

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

Sonuç olarak, n baralı sistem için düğüm gerilim denklemi matris formatında Eş. 2.16’daki gibi yazılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

### 3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK AKIŞI

1900'lü yılların başlangıcından itibaren üzerinde akademik çalışmaların yapıldığı yük akışı, ilk olarak Ekonomik Dağıtım ve Güç Akışı olarak çözümlenmiştir. Bugün itibariyle de Optimal Güç Akışı kabul ve tanımlamasıyla, güç sisteminin amaca uyarlanmış hedef fonksiyonunun en uygun sonuçları verebildiği çok parametrelili ve kompleks bir yapıya dönüşmüştür.

#### 3.1. Ekonomik Dağıtım

Karmaşık ve bilgisayar destekli çözülebilen OGA probleminden önce, güç sistemlerinde yakıt maliyetinin azaltılması için sıklıkla ekonomik dağıtım probleminin çözümü yapılıyordu [1-3].

OGA'ya kıyasla yalın olarak güç sistemi yakıt maliyetinin minimize edilmeye çalışıldığı ekonomik dağıtımda, eşitsizlik denklemi olarak sadece generatör aktif güç değerlerinin limitler dâhilinde olması, eşitlik denklemi olarak ise generatör toplam çıkış güç değerinin iletim hattı kayıpları ile talep güç toplamına eşit olması yeterli olmaktadır [1-3].

Yük dağıtım denklemlerinde kullanılan parametreler aşağıda sıralanmaktadır [1-3].

$F$ : Toplam yakıt maliyetidir.

$N_{gen}$ : Generatör sayısıdır.

$P_{Gi}$ :  $i$ .generatörün çıkış aktif gücüdür.

$a_i, b_i, c_i$  :  $i$ . generatörün yakıt maliyeti katsayılarıdır.

$f(i)$  :  $i$ .generatörün yakıt maliyetidir.

$P_{talep}$ : Talep edilen aktif güçtür.

$P_{i,min}$ :  $i$ .generatörün minimum çıkış gücüdür.

$P_{i,max}$ :  $i$ .generatörün maksimum çıkış gücüdür.

$P_{kayıp}$ : Güç sistemindeki toplam kayıp güçtür.

$$\sum_{i=1}^{N_{gen}} (P_{Gi}) - P_{talep} - P_{kayıp} = 0 \quad (3.1)$$

Güç eşitliği denklemi Eş. 3.1'de gösterildiği üzere; generatörler, talep güç ve kayıpları karşılayacak miktarda güç üretmektedir.

ED probleminde hedef fonksiyon (F), her bir generatörün yakıt maliyet katsayıları ile değer aralığı Eş. 3.2'de verilen generatör aktif güçlerinin çarpımının toplamı ile çözülmektedir.

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad i = 1, \dots, N_{gen} \quad (3.2)$$

$$f(i) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (3.3)$$

$$F = \sum_{i=1}^{N_{gen}} f(i) \quad (3.4)$$

### 3.2. Güç Akışı

Yük akışı olarak da adlandırılan ve ekonomik yük dağıtımına kıyasla daha fazla sayıda giriş verisi ve denklemin hesaba katıldığı Güç Akışı (GA) probleminin çözümünde, üç fazlı güç sisteminin dengeli ve kararlı hal durumunda olduğu kabul edilmektedir. Bu varsayım ile amaca özel programlar kullanılarak tüm baraların gerilim değerleri ve açıları hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak da, sistemdeki iletim hatları ve trafolardaki aktif ve reaktif güç akışları ile kayıplar bulunmaktadır [49].

1950'lerden itibaren, güç akışı probleminin çözümü için birçok farklı yöntem kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. ED'den farklı olarak, güç akışının öncelikli amacı maliyeti aşağı seviyelere indirmek değil, işletme koşullarının sağlandığı durumda enerjinin dağıtım sistemlerine ulaştırılmasıdır.

Güç akışı analizi ile sağlanan sonuçlar dikkate alınarak, güç sisteminin işletme koşulları, yakın ve uzun vadeli planlamalar, sistemdeki arızalar ve olası arıza durumları, güç talebindeki artış ve azalmalar, yakıt maliyeti vb. konuların değerlendirilmesi mümkün olmaktadır.

### 3.3.Optimal Güç Akışı

Optimal Güç Akışı (OGA), temel olarak güç sistemlerindeki güç üretiminin belirlenen sınır değerler içerisinde eşitlik ve eşitsizlik denklemlerinin sağlanması, yük akışının dengeli ve kaliteli olarak yapılması ile güç sisteminin arızaya geçme durumlarından uzak nominal koşullarda işletilmesi esasına dayanmaktadır.

Optimal Güç Akışını, ekonomik dağıtım ve güç akışı probleminden ayıran en büyük farklılık da sınır değerler dâhilinde güç sisteminin işletilmesi ve yükün dağıtılması ile güç akışının zorunlu istekleri ve temel kriterleri sağlanırken aynı zamanda hedef fonksiyon sonucunun en iyi hale getirilmesidir. Bu bakımdan OGA, ekonomik yük dağıtımı ile güç akışının kesişim noktası olarak da tanımlanabilir.

Bu noktada, OGA'nın önemi ortaya çıkmış ve araştırma ile çalışmalar doğrusal olmayan, çok değişkenli ve karmaşık yapıdaki OGA probleminin ve hedef fonksiyonların çözümü üzerinde yoğunlaşmıştır.

Özellikle son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojileri, modelleme teknikleri ile hızlı yakınsayan ve global optimumu yakalayan algoritmalar OGA probleminin sonuç değerlerini oldukça aşağıya çekmiştir. OGA modellemesinde, referans (salınım/salıncak), generatör ve yük olmak üzere üç tip bara bulunmaktadır. Generatör baralarından bir tanesi, referans olarak seçilmekte ve diğer generatörlerin bara çıkış değerlerine göre güç sisteminin istenen limitler dâhilinde kalabilmesi için gerekli çıkış değerlerini vermektedir. Sistemdeki bir baranın referans olarak seçilmesi, optimal güç akışı koşullarının sağlanabilmesi için zorunlu olup, talep gücün ve kayıpların karşılanabilmesi için baranın esnek yapıda modellenmesi sebebiyle salıncak ya da salınım barası olarak da adlandırılmaktadır.

Çözülecek problem, değişkenler, eşitlik ve eşitsizlik denklemleri ile minimize edilecek hedef fonksiyon aşağıdakiler gibi ifade edilmektedir [50-52].

$$\begin{aligned}
 & \min f(x, u) \\
 & g(x, u) \\
 & h(x, u)
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$f$ : minimize edilecek duruma özgü belirlenen hedef fonksiyondur.

$x$ : durum değişkenleridir.

$u$ : karar değişkenleridir.

$g$ : değişkenlere bağlı eşitlik sınır denklemleridir.

$h$ : değişkenlere bağlı eşitsizlik sınır denklemleridir.

Durum değişkenleri, güç akışına göre değer almaktadır. Bu nedenle, hedef fonksiyonun, karar değişkenlerine bağlı olarak değer alan durum değişkenleri; referans bara aktif gücü, yük baraları gerilimleri, generatör reaktif güçleri ve iletim hatlarından oluşmaktadır.

$$x = [ P_{G1}; V_{L1}, \dots, V_{LN_{yük}}; Q_{G1}, \dots, Q_{GN_{gen}}; S_{L1}, \dots, S_{NL} ] \quad (3.6)$$

$P_{G1}$ : Referans (salıncak) bara aktif gücüdür.

$V_L$ : Yük barası gerilimidir.

$Q_G$ : Generatör reaktif gücüdür.

$S_L$ : İletim hattıdır.

$N_{yük}$ :Yük barası sayısıdır.

$N_{gen}$ : Generatör (gerilim kontrollü) barası sayısıdır.

$N_L$ : İletim hattı sayısıdır.

OGA analizinde giriş verisi olarak kullanılan ve hedef fonksiyonun sonuç değerini doğrudan belirleyen karar değişkenleri; generatör baraları güç ve gerilimleri, trafolar ve kompanzatörlerdir.

$$u = [ P_{G2}, \dots, P_{GN_{gen}}; V_{G1}, \dots, V_{GN_{yük}}; T_1, \dots, T_{N_t}; Q_{C1}, \dots, Q_{CN_c} ] \quad (3.7)$$

$P_G$ : Referans bara haricindeki generatör baraları aktif gücüdür.

$V_G$ : Generatör bara gerilimidir.

$T$ : Transformatör kademe ayarıdır.

$Q_c$ : Şönt Kompanzatördür.

$N_t$ : Transformatör sayısıdır.

$N_c$ : Kompanzatör sayısıdır.

OGA probleminin çözümünde sağlanması gereken eşitlik ve eşitsizlik sınır denklemleri de aşağıda tanımlanmıştır.

Eşitlik denklemleri, güç sistemindeki aktif ve reaktif güçlerin, üretim ile talep (yük) ve kayıplar toplamının sıfıra eşit olması olarak ifade edilmektedir.

$P_{Gi}$ : i. generatör barası aktif gücüdür.

$Q_{Gi}$ : i. generatör barası reaktif gücüdür.

$P_D$ : Talep aktif güçtür.

$Q_D$ : Talep reaktif güçtür.

$P_L$ : Kayıp aktif güç değeridir.

$Q_L$ : Kayıp reaktif güç değeridir.

$V_{Gi}$ : i. generatör barası gerilimidir.

$V_{Lj}$ : j. yük barası gerilimidir.

$G_{ij}$ : i. generatör ile j. yük barası kondüktansdır.

$\beta_{ij}$ : i. generatör ile j. yük barası suseptansdır.

$\delta_i$ : i. generatör barası gerilim açısıdır.

$\delta_j$ : j. yük barası gerilim açısıdır.

$i = 1, \dots, N_{gen}$ ,  $j = 1, \dots, N_{yük}$  ve bara sayısı  $N_b = 30$  olmak üzere aktif ve reaktif güç denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

$$P_{Gi} - P_{Di} - P_{Li} = 0 \quad (3.8)$$

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [ G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) ] = 0 \quad (3.9)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_{Li} = 0 \quad (3.10)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [ G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) ] = 0 \quad (3.11)$$

Eşitsizlik denklemleri, güç sistemindeki generatör, trafo, kompanzasyon ve iletim hatlarının belirlenen sınır değerler aralığında kalması şeklinde tanımlanmaktadır. OGA'nın istenildiği gibi gerçekleştirilmesi için, tüm sistem bileşenleri değerlerinin verilen aralıkta

kalması gerekmektedir. Bu ölçüt, optimal güç akışının sağlanabilmesi için mutlak surette yerine getirilmesi gereken bir şart ve zorunluluktur. Karar ve durum değişkenleri sınır değer denklemleri aşağıda verilmiştir.

Generatör aktif güç sınır değerleri

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max} \quad i = 1, \dots, N_{gen} \quad (3.12)$$

Generatör reaktif güç sınır değerleri

$$Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max} \quad i = 1, \dots, N_{yük} \quad (3.13)$$

Generatör bara gerilimi sınır değerleri

$$V_{Gi,min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi,max} \quad i = 1, \dots, N_{gen} \quad (3.14)$$

Yük bara gerilimi sınır değerleri

$$V_{Lj,min} \leq V_{Lj} \leq V_{Lj,max} \quad i = 1, \dots, N_{yük} \quad (3.15)$$

Transformatör sınır değerleri

$$T_{i,min} \leq T_i \leq T_{i,max} \quad i = 1, \dots, N_t \quad (3.16)$$

Kompanzasyon barası sınır değerleri

$$Q_{ci,min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci,max} \quad i = 1, \dots, N_c \quad (3.17)$$

İletim hattı sınır değerleri,

$$|S_{Li}| \leq S_{Li,max} \quad i = 1, \dots, N_L \quad (3.18)$$

### 3.4. OGA Problemi Hedef Fonksiyonunun Çözümü

Karar ve durum değişkenlerine göre biçimlendirilen hedef fonksiyon, yakın zamana kadar sadece generatör yakıt maliyetinin minimize edilmesi için çözülmüştür. Son dönemde ise aktif güç kaybı, salınım, gerilim profili ve kararlılık kavramları için eniyileme yapıldığı birbirinden ayırık veya bileşik durumlar için de hedef fonksiyon belirlenmektedir. Tüm durumlar için yine karar değişkenleri belirleyici olmakta ancak hedef fonksiyonun yapısı değiştirilmektedir.

Örneğin, yakıt maliyeti yerine gerilim kararlılığının optimize edilmesinin hedeflendiği bir durumda; generatör güçleri ve gerilimleri ile güç sistemindeki trafo kademe ayarları ve kompanzatörler, güç akışı gereksinimlerini sağlarken yakıt maliyetinden bağımsız olarak kararlılığın maksimum olduğu değerleri vermektedir.

Tez çalışmasında aşağıda başlıklar halinde verilen birbirinden farklı ve tamamen ayrı sekiz durum için iki farklı algoritma ile OGA analizi ve optimizasyonu yapılmıştır.

1. Yakıt Maliyeti
2. Vana Noktası Etkili Yakıt Maliyeti
3. Birden Fazla Yakıt Türü ile Çalışan Generatörlerin Yakıt Maliyeti
4. Aktif Güç Kaybı
5. Gerilim Profili
6. Salınım
7. Gerilim Kararlılığı
8. Arıza Durumunda Gerilim Kararlılığı

Her bir durum için standart IEEE 30 barası üzerinde, sezgisel optimizasyon algoritmalarıyla yapılan OGA analizi ve hedef fonksiyonun şekillenmesi tezin beşinci bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.

### **3.5. IEEE 30 Barası**

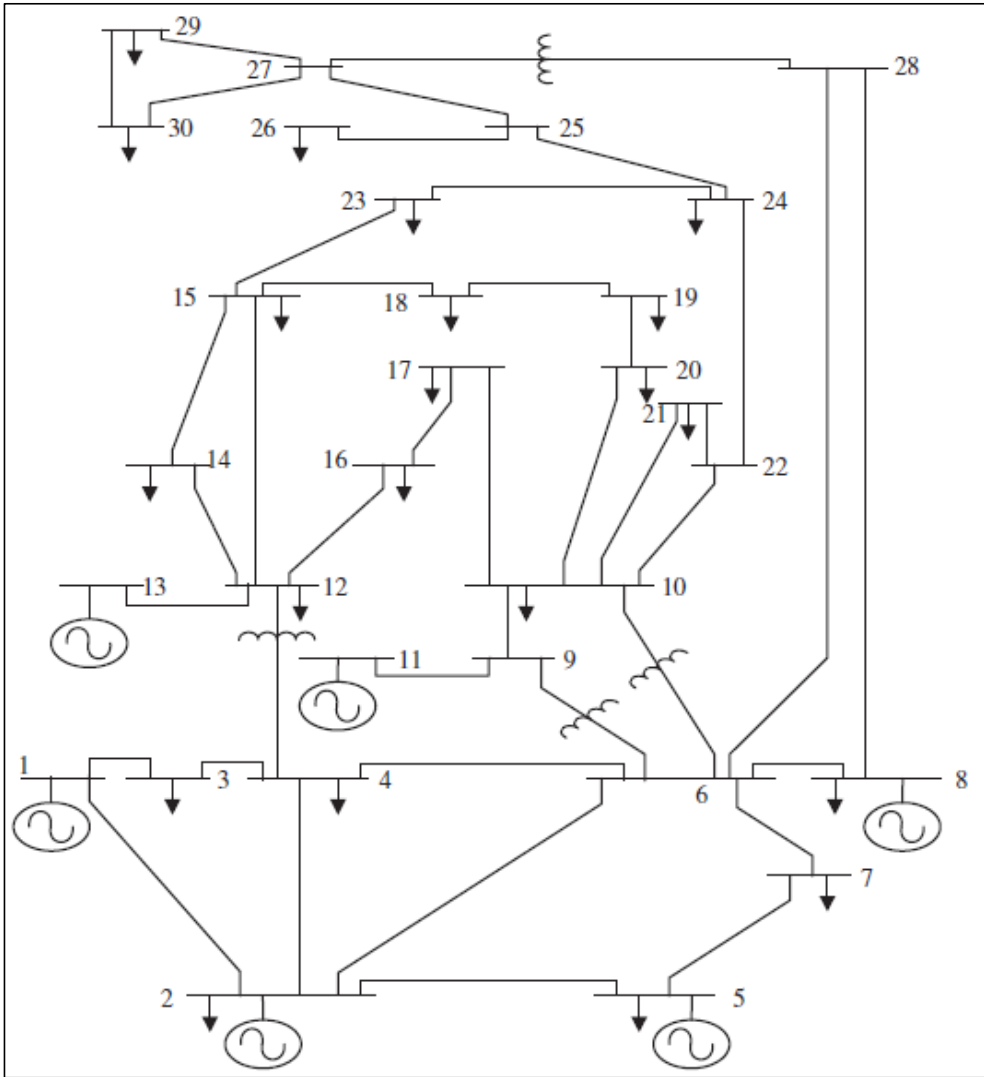
Güç sistemleri üzerinde benzetim metoduyla gerçekleştirilen çalışma ve araştırmalarda diğer yayınlar ile uyumun sağlanabilmesi açısından çoğunlukla standart baralar tercih edilmektedir.

IEEE bara sistemleri uygulamada oldukça yaygın olup güç akışı benzetimleri için 14, 30, 57, 118 ve 300 baralı, dinamik test çalışmaları için ise 17 generatörlü 162 baralı ve 50 generatörlü 145 baralı tipleri bulunmaktadır [53].

IEEE 30 barası, güç alanında yapılan çalışmalarda yaygın olarak referans olarak kullanılan baralardan biridir ve güç problemlerinin çözümü baranın standart değerleri kullanılarak yapılmaktadır.

OGA probleminin çözümlendiği tez çalışmasında, tüm durumlar için standart IEEE 30 barası baz alınmıştır. Böylelikle alınan sonuçlar, literatürdeki diğer çalışmalar ile mukayese edilebilmiştir.

Tez çalışmasındaki hedef fonksiyonların çözümünde ve değerlendirilmesinde Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de verilen bara, generatör ve iletim hattı verileri kullanılmıştır.



Şekil 3.1. IEEE 30 baralı güç sistemi [27]

IEEE 30 standart barası, biri referans olarak seçilen olmak üzere toplamda 6 güç barası, 24 yük barasından oluşmaktadır. Güç sistemindeki 1, 2, 5, 8, 11 ve 13 numaralı baralar güç geri kalanlar yük barasıdır. Ayrıca, güç sistemindeki 1. bara aynı zamanda referans (salıncak/salınım) bara olarak seçilmiştir.

Ayrıca, bara sistemi 41 iletim hattı, 4-12, 6-9, 6-10 ve 27-28 numaralı hatlar arasında 4 adet kademe ayarlı transformatör ve 10, 12, 15, 17, 20, 21,23, 24 ve 29 numaralı yük baraları üzerinde 9 adet şönt kompanzasyon barasını içermektedir.

Çizelge 3.1. IEEE 30 baralı güç sisteminde aktif ve reaktif talep güçler [52]

Bara No	Bara Tipi	Talep		Bara No	Bara Tipi	Talep	
		Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVAR)			Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVAR)
1	3	0	0	16	1	3,5	1,8
2	2	21,7	12,7	17	1	9,0	5,8
3	1	2,4	1,2	18	1	3,2	0,9
4	1	7,6	1,6	19	1	9,5	3,4
5	2	94,2	19,0	20	1	2,2	0,7
6	1	0	0	21	1	17,5	11,2
7	1	22,8	10,9	22	1	0	0
8	2	30,0	30,0	23	1	3,2	1,6
9	1	0	0	24	1	8,7	6,7
10	1	5,8	2,0	25	1	0	0
11	2	0	0	26	1	3,5	2,3
12	1	11,2	7,5	27	1	0	0
13	2	0	0	28	1	0	0
14	1	6,2	1,6	29	1	2,4	0,9
15	1	8,2	2,5	30	1	10,6	1,9

Çizelge 3.1'deki baraların toplam talep güç değeri 283,4 MW ve 126,2 MVAR olmaktadır. Yük baraları (1), generatör baraları (2) ve salıncak bara (3) rakamı ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.2'de optimizasyon öncesi generatör aktif ve reaktif güçleri ile gerilim değerleri verilirken Çizelge 3.3'de iletim hatları karakteristik bilgileri yer almaktadır.

Çizelge 3.2. IEEE 30 baralı sistemde generatörlerin eniyileme öncesi işletme koşulları [54]

Bara No	Generatör No	Generatör çıkış değerleri		
		Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVAR)	Gerilim (p.u.)
1	G <sub>1</sub>	99,211	5,335	1,05
2	G <sub>2</sub>	80	27,657	1,04
5	G <sub>3</sub>	50	21,544	1,01
8	G <sub>4</sub>	20	22,933	1,01
11	G <sub>5</sub>	20	38,583	1,05
13	G <sub>6</sub>	20	40,345	1,05

Çizelge 3.3. IEEE 30 baralı güç sisteminin iletim hattı bilgileri [52-54]

İletim hattı no	Çıkış-Giriş Baraları	R (p.u)	X (p.u.)	B (p.u.)	Trafo kademesi	Maksimum yük kapasitesi (MVA)
1	1-2	0,0192	0,0575	0,0264	-	130
2	1-3	0,0452	0,1852	0,0204	-	130
3	2-4	0,057	0,1737	0,0184	-	65
4	3-4	0,0132	0,0379	0,0042	-	130
5	2-5	0,0472	0,1983	0,0209	-	130
6	2-6	0,0581	0,1763	0,0187	--	65
7	4-6	0,0119	0,0414	0,0045	-	90
8	5-7	0,0460	0,1160	0,0102	-	70
9	6-7	0,0267	0,0820	0,0085	-	130
10	6-8	0,0120	0,0420	0,0045	-	32
11	6-9	0	0,2080	0	1,078	65
12	6-10	0	0,5560	0	1,069	32
13	9-11	0	0,2080	0	-	65
14	9-10	0	0,1100	0	-	65
15	4-12	0	0,2560	0	1,032	65
16	12-13	0	0,1400	0	-	65
17	12-14	0,1231	0,2559	0	-	32
18	12-15	0,0662	0,1304	0	-	32
19	12-16	0,0945	0,1987	0	-	32
20	14-15	0,2210	0,1997	0	-	16
21	16-17	0,0824	0,1932	0	-	16
22	15-18	0,1070	0,2185	0	-	16
23	18-19	0,0639	0,1292	0	-	16
24	19-20	0,0340	0,0680	0	-	32
25	10-20	0,0936	0,2090	0	-	32
26	10-17	0,0324	0,0845	0	-	32
27	10-21	0,0348	0,0749	0	-	32
28	10-22	0,0727	0,1499	0	-	32
29	21-22	0,0116	0,0236	0	-	32
30	15-23	0,1000	0,2020	0	-	16
31	22-24	0,1150	0,1790	0	-	16
32	23-24	0,1320	0,2700	0	-	16
33	24-25	0,1885	0,3292	0	-	16
34	25-26	0,2544	0,3800	0	-	16
35	25-27	0,1093	0,2087	0	-	16
36	28-27	0	0,3960	0	1,068	65
37	27-29	0,2198	0,4153	0	-	16
38	27-30	0,3202	0,6027	0	-	16
39	29-30	0,2399	0,4533	0	-	16
40	8-28	0,0636	0,2000	0,0214	-	32
41	6-28	0,0169	0,0599	0,0065	-	32

## 4. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

Yakın zamana kadar nümerik yapıdaki problemlerin çözümünde iterasyon sayısı, süre, yakınsama ve sonuç bakımından günümüzün çözüm yöntemlerine nazaran oldukça sınırlı ve dar ölçekli olan geleneksel yöntemler kullanılmaktaydı. Bu durumda hedef fonksiyonun çözümü, sınırları gerçek duruma göre kısıtlı hale gelmiş olan araştırma uzayında aranmakta olduğundan çözüm kümesinde yer alan ve de daha uygun değerlere sahip sonuçlara ulaşamıyordu.

Bugün ise optimizasyon algoritmalarının ortaya çıkması ve çalışma alanına özgü mühendislik problemlerinin çözümünde verimli olarak kullanılmaya başlanması ile birlikte pek çok yeni algoritma literatüre kazandırılmıştır. Optimizasyon algoritmaların temeli; yapay zekaya, sürü zekasına, canlıların genetik yapısına, doğa olaylarına vb. dayanmaktadır ve rasgele başlangıç, çalışma uzayında optimum sonucu arama, her iterasyonda yenilenerek daha iyi değeri seçme ve belirlenen durma kriterine göre sonuç vererek fonksiyonun çözümünden oluşmaktadır.

Klasik iteratif yöntemlerle kıyaslandığında en uygun değer (global optimum) bulunmasının kesin olmaması bu tür algoritmaların eksik yönü olarak tanımlanmaktadır. [55].

Sezgisel yaklaşım üzerine kurulan ve hızlı bir şekilde yakınsaması beklenen yöntemler, zaman zaman algoritmada bazı değişiklikler ve uyarlamalar da yapılarak; uygunluk, yakınsama ve referans değerle tutarlı sonuç verme kriterleri gözetilerek hedef fonksiyonun çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır.

Optimizasyon algoritmaları, çalışma uzayında kabul ve varsayımlar yaparak algoritmanın modellemesini yapmakta ve basit yapıdaki matematiksel denklemler ile sonuca gitmektedir.

Sürü zekası olarak ifade edilen ve grup içindeki üyelerin birbirinin konumu, hızı, hareketleri, hedefe yakınlığı vb. parametreleri değerlendirerek, kendilerini hedefe yaklaştıran ya da uzaklaştıran adımlar (tekrarlar) attığı sezgisel algoritmalar, bugün birçok mühendislik uygulamasında sıkça kullanılmaktadır.

Her algoritmanın; benzetim, kabul ve varsayımları birbirinden farklılık gösterebileceğinden her problemin bütün algoritmalarda çözüm vermesi veya yakınsaması olası değildir. Bu nedenle çözülecek problem ile seçilen algoritmanın birbiri ile örtüşmesi ve istenen referans aralığında sonuç elde edilmesi gerek şarttır.

Buna ilaveten, bilimin her alanındaki uygulama ve problemler birbirinden bağımsız ve ayrık parametre, ister ve değişkenlere sahip olduğundan her algoritmanın bütün çalışma alanlarında uygulanabilmesi mümkün olmamaktadır.

Bu ilkeler dikkate alınarak, tez çalışmasında OGA analizinde yakınsak davranan ve doğrusal olmayan fonksiyonlara uygulanabilir olan Parçacık Sürü Optimizasyon ve Su Döngüsü Algoritmaları kullanılmıştır.

#### 4.1. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması

Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) Algoritması, birbirine çarpmadığı kabul edilen kuşların sosyal bir davranış olarak nitelenen sürü halinde uçuşlarından esinlenilerek, Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilmiş popülasyona temelli, olasılıksal, sezgisel ve doğrusal olmayan yapıdaki fonksiyonların çözümünde kullanılan eniyileme tekniğidir [35-36].

PSO tekniği ilke olarak, sürü içerisindeki parçacıkların hedefe ulaşma hareketlerinin gözlemlenerek modellenmesi ve başlangıç ile bitiş arasındaki adımların ve ilerlemelerin matematiksel olarak ifade edilmesi esasına dayanmaktadır.

$D$ : Araştırma uzayının karar değişkenlerine bağlı boyutudur.

$p$ : Sürüdeki her bir parçacıktır.

$N_{par}$ : Sürüdeki toplam parçacık sayısıdır.

$P_{PSO}$ : Bağımsız değişkenler matrisidir.

$rand$ : [0 1] aralığında seçilen rasgele sayıdır.

$k$ : iterasyon sayısıdır.

$max_{iter}$ : Döngüdeki maksimum iterasyon sayısıdır.

$i$ : Sürüdeki  $i$ . parçacıktır.

$V_i$ :  $i$ .parçacığın araştırma uzayındaki hızıdır.

$x_i$ : i.parçacığın araştırma uzayındaki konumudur.

$p_{best}$ : Her bir parçacığın elde edilen en iyi lokal sonuç değeridir.

$g_{best}$ : Sürüdeki tüm parçacıkların ( $p_{best}$ ) değerleri arasındaki en iyi global sonuç değeridir.

$w_i$ : atalet (eylemsizlik) ağırlık katsayıdır.

$c_1$  ve  $c_2$ : parçacığın hızının hesaplanmasında kullanılan, algoritma içerisindeki olasılık tabanlı pozitif hızlandırma katsayılarıdır.

PSO Algoritmasının esası, parçacıkların oluşturduğu sürü içerisinde her bir parçacığın lokal en iyi olarak tanımlanan  $p_{best}$  ve global en iyi olarak nitelendirilen  $g_{best}$  sonuçlarının her tekrarda karşılaştırılması ve durma kriterine göre problem sonucunda eniyilemenin sağlanmasıdır [36].

Algoritmanın sonuca yakınsamasında belirleyici olan katsayılardan  $c_1$ , parçacığın lokal en iyi ( $p_{best}$ ) değerine kendi deneyimi ile,  $c_2$  ise global en iyi ( $g_{best}$ ) değerine sürü içindeki deneyim ile ulaşma adımlarında kullanılan sabitlerdir.

PSO algoritmasında probleme özgü olarak, sabit katsayıların farklı değerlerde alınabilmesi mümkündür ve tez çalışmasında  $c_1$  ile  $c_2$  değerlerinin her ikisi de 2 olarak seçilmiştir.

Eşitlik 4.1'de toplam parçacık sayısının satırları, problemin boyutunun ise sütun sayısını belirlediği bağımsız değişkenler matrisi ( $P_{PSO}$ ) yer almaktadır.

$$P_{PSO} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & \cdots & p_{1d} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & \cdots & p_{2d} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N_{par}1} & p_{N_{par}2} & \cdots & \cdots & p_{N_{par}d} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$p_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}] \quad i = 1, \dots, N_{par} \quad d = 1, \dots, D \quad (4.2)$$

$$p_{best} = [p_{best,i}, \dots, p_{best,N_{par}}] \quad i = 1, \dots, N_{par} \quad (4.3)$$

$$g_{best} = [g_{best}^k, \dots, g_{best}^{max_{iter}}] \quad k = 1, \dots, max_{iter} \quad (4.4)$$

$$v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, \dots, v_{id}] \quad i = 1, \dots, N_{par} \quad d = 1, \dots, D \quad (4.5)$$

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, \dots, x_{id}] \quad i = 1, \dots, N_{par} \quad d = 1, \dots, D \quad (4.6)$$

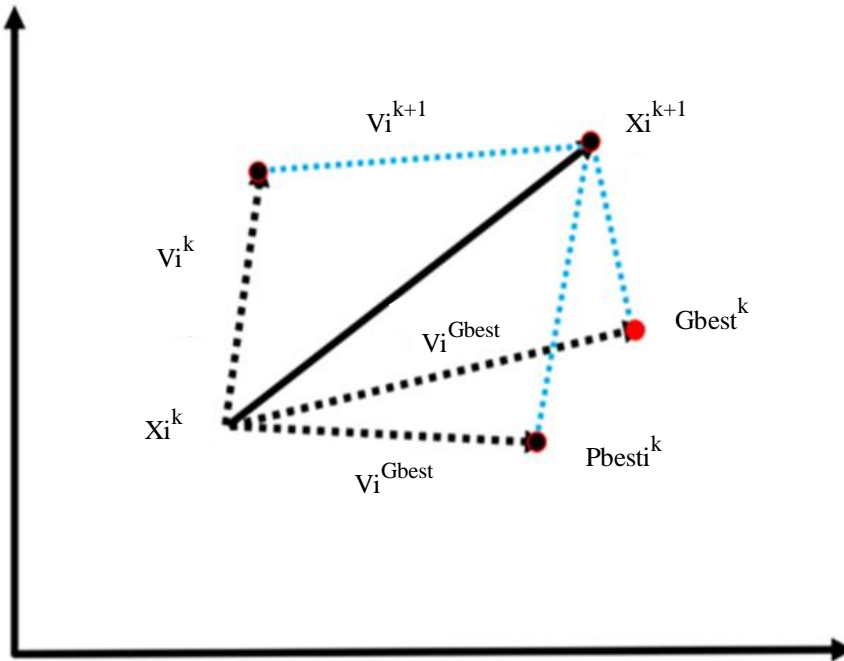
$k = 1, \dots, max_{iter}$  ve  $i = 1, \dots, N_{par}$  olmak üzere hız ve konum denklemleri Eş. 4.7 ve Eş. 4.8'de verilmiştir [37].

$$v_i^{k+1} = w_i v_i^k + c_1 rand(pbest_i^k - x_i^k) + c_2 rand(gbest^k - x_i^k) \quad (4.7)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (4.8)$$

Eylemsizlik ağırlık katsayısı PSO algoritmasına dahil edilmeden önce parçacıkların hızı Eş. 4.9 ile bulunmaktaydı [35].

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 rand(pbest_i^k - x_i^k) + c_2 rand(gbest^k - x_i^k) \quad (4.9)$$



Şekil 4.1. Parçacık sürü optimizasyonunun vektör diyagramı [56]

Sürüyü oluşturan parçacıkların iterasyona bağlı, hız ve konumları ile lokal ve global en iyi değerlerinin vektörel çizimi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

#### 4.1.1. PSO algoritmasının çalışma prensibi

Çalışma uzayında, kaç adet parçacık olacağı belirlenir ve her bir parçacık için rasgele seçilen koordinatlar ile algoritma başlatılır.

Popülasyonu oluşturan tüm parçacıklar için en iyi sonuç olarak nitelendirilen uygunluk (fitness) değeri bulunur. Bulunan ilk değerler aynı zamanda sürüdeki tüm parçacıklar için kendilerinin en iyi sonuçlardır.

Elde edilen uygunluk değeri parçacığın lokal en iyi ' $p_{best,i}$ ' değeri olup, her parçacığın lokal minimum değeri vardır ve bu değer parçacık tarafından hafızada tutulur.

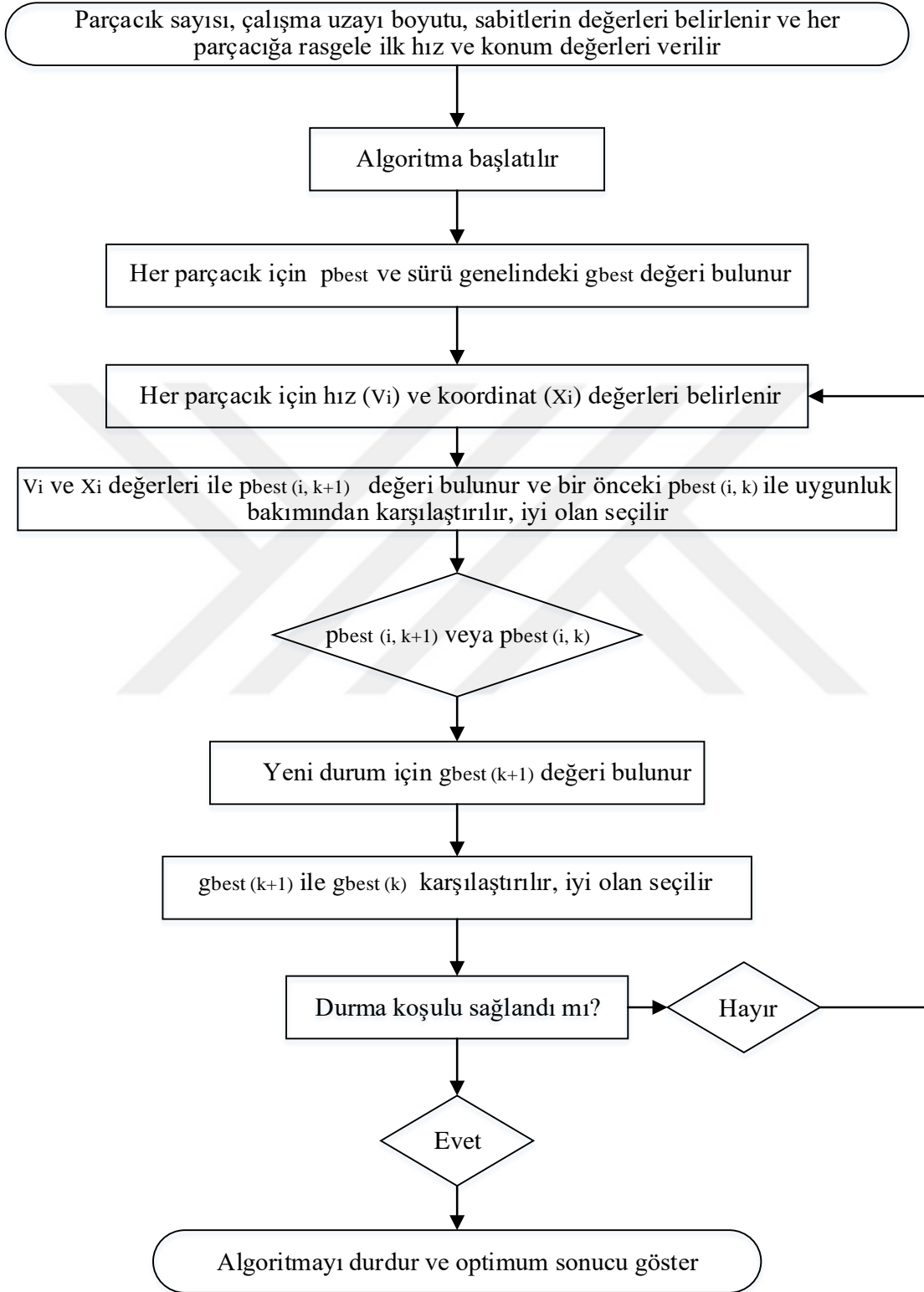
Sürüdeki her parçacık kendi  $p_{best,i}$  değerinin dışında, sürüdeki diğer parçacıklar arasındaki en iyi değere sahip olan global en iyi değer ' $g_{best}$ 'i de hafızasında tutar. Sürü genelinde tek bir global minimum değeri vardır.

Eş. 4.7 ve Eş. 4.8 kullanılarak her iterasyonda parçacığın rasgele atanan hızı ve hıza bağlı yeni konum değerleri bulunur.

Döngüdeki tekrarlamalarda bulunan her değer, parçacığın en iyi uygunluk değeri  $p_{best,i}$  ile karşılaştırılır ve daha iyi değer hafızada tutularak algoritma çalışmasına devam eder.  $p_{best,i}$  değerine göre  $g_{best}$  değeri de sürekli yenilenir.

Belirlenen maksimum iterasyon sayısı veya durma koşuluna bağlı olarak daha öncesinde istenen sonuç alındıysa, algoritma çalışmayı durdurur.

#### 4.1.2. PSO algoritması akış şeması



Şekil 4.2. Parçacık sürü algoritması akış şeması

### 4.1.3. PSO algoritması ile optimal güç akışı probleminin çözümü

Algoritmada parçacık olarak tanımlanan her bir durum değişkeni, OGA analizinde hedef fonksiyon kümesinin alt kümesine karşılık gelmektedir. Bireysel en iyi değerleri ifade eden *pbest* her tekrarda bir önceki sonuç ile kıyaslanmakta ve daha iyi olan değer döngü içinde kalmaktadır. Eldeki çıktıların belirsiz seçimlerle yeni değerlere dönüşmesi de parçacıkların hız ve koordinatlarına göre yeni lokasyonlara ulaşmalarına denk gelmektedir. Başka bir ifadeyle her bir yeni konum, OGA için yeni bir hedef fonksiyon çözümüdür.

Örnekleme için yakıt maliyetini seçtiğimizde; öncelikle toplam sayısı 24 olan kontrollü değişkenlerin aldığı değerlere karşılık parçacık sayısı kadar birbirinden bağımsız sonuç elde edilir ve amaca uygun en küçük değer gruptaki global en iyi olarak tanımlanır.

İterasyonların başlaması ile birlikte, maliyet bir önceki iterasyon ile kıyaslanıp daha düşük sonuç, lokal minimum olmakta ve çözüm kümesindeki global minimum yeniden bulunmaktadır. Durma kriterinin sağlandığı an itibariyle, maliyet açısından en iyi değer hedef problemin sonucu olmaktadır.

## 4.2. Su Döngüsü Algoritması

Bir çok eniyileme tekniği gibi popülasyona dayalı olan ancak diğer algoritmalarından farklı olarak canlılardan oluşan bir grubun hareketleri yerine doğada gerçekleşen bir olay temelinde hedefe ulaşan Su Döngüsü Algoritması (SDA), H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad ve M. Hamdi tarafından modellenerek literatüre kazandırılmış ve kısıtlamalı optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır [38].

Algoritma ilkesel olarak, suyun tabiatta farklı biçimlerde ve konumlarda bulunma halleri gözlemlenerek oluşturulmuştur ve akarsu, nehir, deniz olarak tanımlanan küme elemanlarını içermektedir. Deniz, fonksiyonun en iyi sonuç veren tekil değeri iken nehirler ikincil en iyi değerler alt kümesi, akarsular ise çözüm kümesinin hedef değerden en uzak ögeleridir [38].

Teorik olarak algoritma, yağışların hacimsel büyüklükleri bakımından küçükten büyüğe sırasıyla akarsuları, nehirleri ve denizi meydana getirdiği prensibinden hareketle

yapılandırılmıştır. Problemin çözüm sürecinde akarsular, nehirlere ve doğrudan denize dönüşebilir. Benzer şekilde nehirler de denize dönüşebilmektedir. Algoritma, esas olarak sanal boyutta en geniş hacimli öğeyi çalışma uzayının merkezi ve ulaşılabilecek en uygun değer olarak kabul etmektedir.

$N_p$ : Çözüm kümesindeki toplam deniz, nehir ve akarsu sayısıdır.

$S$  : Deniz sayısıdır ve 1'e eşittir.

$N_s$  : Nehir sayısıdır.

$A_s$  : Akarsu sayısıdır.

$N_{sn}$ : Nehirler ve denizlerin toplam sayısıdır.

$D$ : Çözülecek problemin karar değişkenlerinin toplam sayısı ve aynı zamanda problemin giriş parametreleri bazında boyuttur.

#### 4.2.1. Su döngüsü algoritmasının çalışma prensibi

Hedef fonksiyonu belirleyecek kontrol değişkenleri alt ve üst limitler dâhilinde rasgele seçilip başlangıçtaki değerler atanır ve uygunluk koşuluna göre sıralanarak fonksiyonun İlk Durum Matrisi ( $Y_{ilk}$ ) ile bu matris temelinde aşağıda sıralanan eşitlikler elde edilir [38]. Bu matriste bütün bileşenlerin yağış ile oluştuğu ve akarsu olduğu kabul edilir.

$$\text{İlk durum matrisi } (Y_{ilk}) = \begin{bmatrix} Yağış_1 \\ Yağış_2 \\ Yağış_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ Yağış_{Np-1} \\ Yağış_{Np} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$Y_{ilk}$  matrisi problemin boyutuna göre yeniden düzenlendiğinde Eş. 4.11'e dönüşmektedir. Matrisin her bir satırında yer alan ve örnek alınan 1.satırı temsil eden  $y_1^1, \dots, \dots, y_D^1$  sembolleri karar değişkenlerine karşılık gelmektedir.

$$Y_{ilk} = \begin{bmatrix} y_1^1 & y_2^1 & y_3^1 & \vdots & \vdots & y_D^1 \\ y_1^2 & y_2^2 & y_3^2 & \vdots & \vdots & y_D^2 \\ y_1^3 & y_2^3 & y_3^3 & \vdots & \vdots & y_D^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1^{Np} & y_2^{Np} & y_3^{Np} & \vdots & \vdots & y_D^{Np} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$Y_{ilk}$  matrisinin her bir satırındaki değişkenlerin verdiği sonuç, başlangıç durumunda hedef fonksiyonun aynı satırdaki çözümüdür. Sonuç değeri (R) ile matrisin satır ve sütunları arasındaki bağıntıyı gösteren matematiksel ifade Eş. 4.12’de gösterildiği gibidir.

$$R_i = f(y_1^i, y_2^i, y_3^i, y_4^i, \dots, y_D^i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, Np \quad (4.12)$$

Akarsuların konumlarına göre sıralanması ile de algoritmanın etkin bileşenleri olan deniz ile nehirler belirlenir ve bu kümelenmenin dışında kalanlar akarsu olarak nitelendirilir. Böylelikle başlangıç koşulu için çözülecek problemin hedef fonksiyon matrisi ( $Y_{hedef}$ ) düzenlenmiş olmaktadır.

$a = 1, 2, \dots, A_s$  ve  $n = 1, 2, \dots, N_s$  olmak üzere  $Y_{hedef}$  matrisi Eş. 4.13’de verilmiştir.

$$Y_{hedef} = \begin{bmatrix} Deniz \\ Nehir_1 \\ Nehir_2 \\ \vdots \\ Nehir_n \\ Akarsu_1 \\ Akarsu_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ Akarsu_a \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Akarsuların, ilk koşula göre kendilerinden daha iyi konumda (uygunluk değerinde) olan nehir ve denizlere doğru akacağı varsayımından hareketle, her bir akarsuyun hem doğrudan denize hem de nehirlere doğru aktığı durumlar için yeni sonuç değerleri edilir. Her iterasyonda (k) tekrarlanan sonuçlar, mevcut haldeki deniz ve nehirlerin sonuçları ile mukayese edilerek; akarsuyun aldığı değer deniz ve nehir değerlerinden daha iyi olması halinde akarsu ile deniz ve nehirler yer değiştirir.

Aynı yaklaşım, nehirlerin deniz ile mukayese edilmesinde de uygulanır ve eğer nehir sonuç değeri denizden daha iyi ise nehir denizin yerini alır. Akarsuların nehirlerin veya denizin yerini alamadığı ancak akarsuyun daha iyi bir konuma (uygun değer) eriştiği hallerde, daha yakınsak olan sonuç hafızada tutularak algoritma çalışmasına devam etmektedir.

Akarsu ve nehirlerin, yeni değerlerinin bulunmasında hem  $[0, 1]$  arası rasgele bir sayı hem de  $C$  sabiti kullanılmaktadır.  $C$  katsayısı,  $1 < C < 2$  aralığında seçilebilmekle birlikte en iyi sonucun  $C = 2$  değerinin kullanıldığı durumda alındığı vurgulanmıştır [39].

Akarsuların yeni konumlarının hesaplandığı denklemler Eş. 4.14 ve Eş. 4.15’de, nehirlerin ise Eş. 4.16’da verilmiştir.

$$X_{akarsu}(k+1) = X_{akarsu}(k) + rand \times C \times (X_{deniz}(k) - X_{akarsu}(k)) \quad (4.14)$$

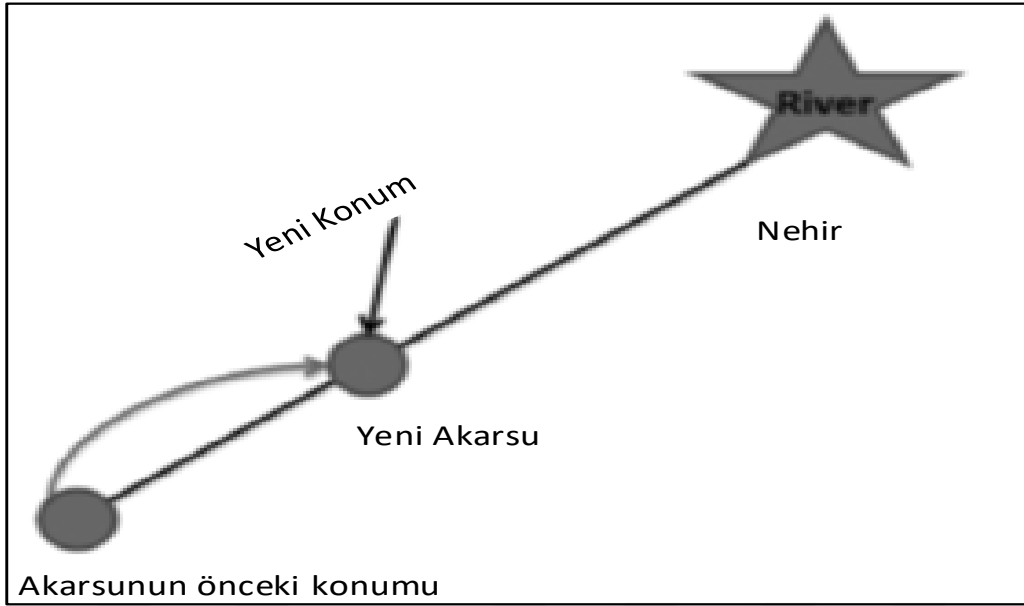
$$X_{akarsu}(k+1) = X_{akarsu}(k) + rand \times C \times (X_{nehir}(k) - X_{akarsu}(k)) \quad (4.15)$$

$$X_{nehir}(k+1) = X_{nehir}(k) + rand \times C \times (X_{deniz}(k) - X_{nehir}(k)) \quad (4.16)$$

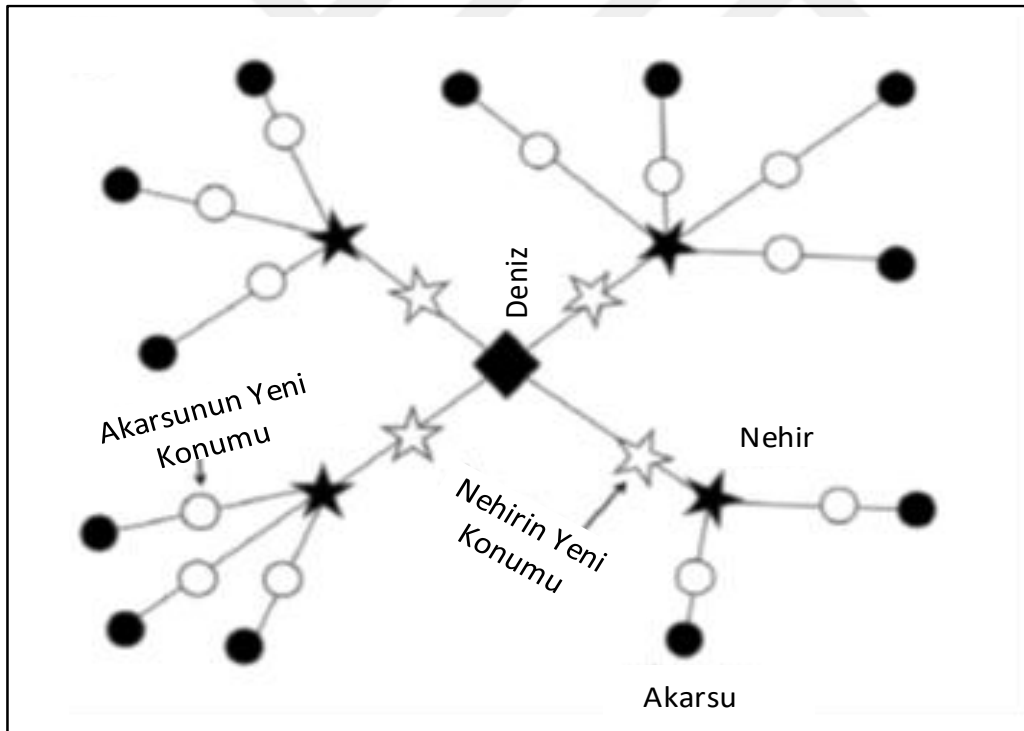
Yukarıdaki denklemlerde akarsuların deniz ve nehirlerle dönüşebilmesi için takip eden iterasyondaki sonuçlarının nehirler ve denizden daha iyi olması gerek şarttır.

Bu zorunluluk dikkate alındığında, akarsuların ikincil yağışlar, yer altı sularının katılımı vb. ile sanal boyutta hacimlerinin arttığı, nehirler ve denizlerin ise daha az yağış aldıkları ya da buharlaşma ile daha fazla miktarda su kaybettiklerinden dolayı hacimlerinin azaldığı ve bu değişimlere bağlı olarak da akarsuların nehirlerin ve denizin yerini aldığı benzetimsel bir yaklaşımla ifade edilebilir. Aynı yaklaşım, nehirlerin denize dönüşmesi için de geçerli olacaktır.

Şekil 4.2’de akarsunun nehre doğru akışı, Şekil 4.3’de ise akarsular, nehirlerin ve denizin döngü içerisindeki birbirlerine karşı konumlarını simgeleyen şematik gösterimi yer almaktadır.



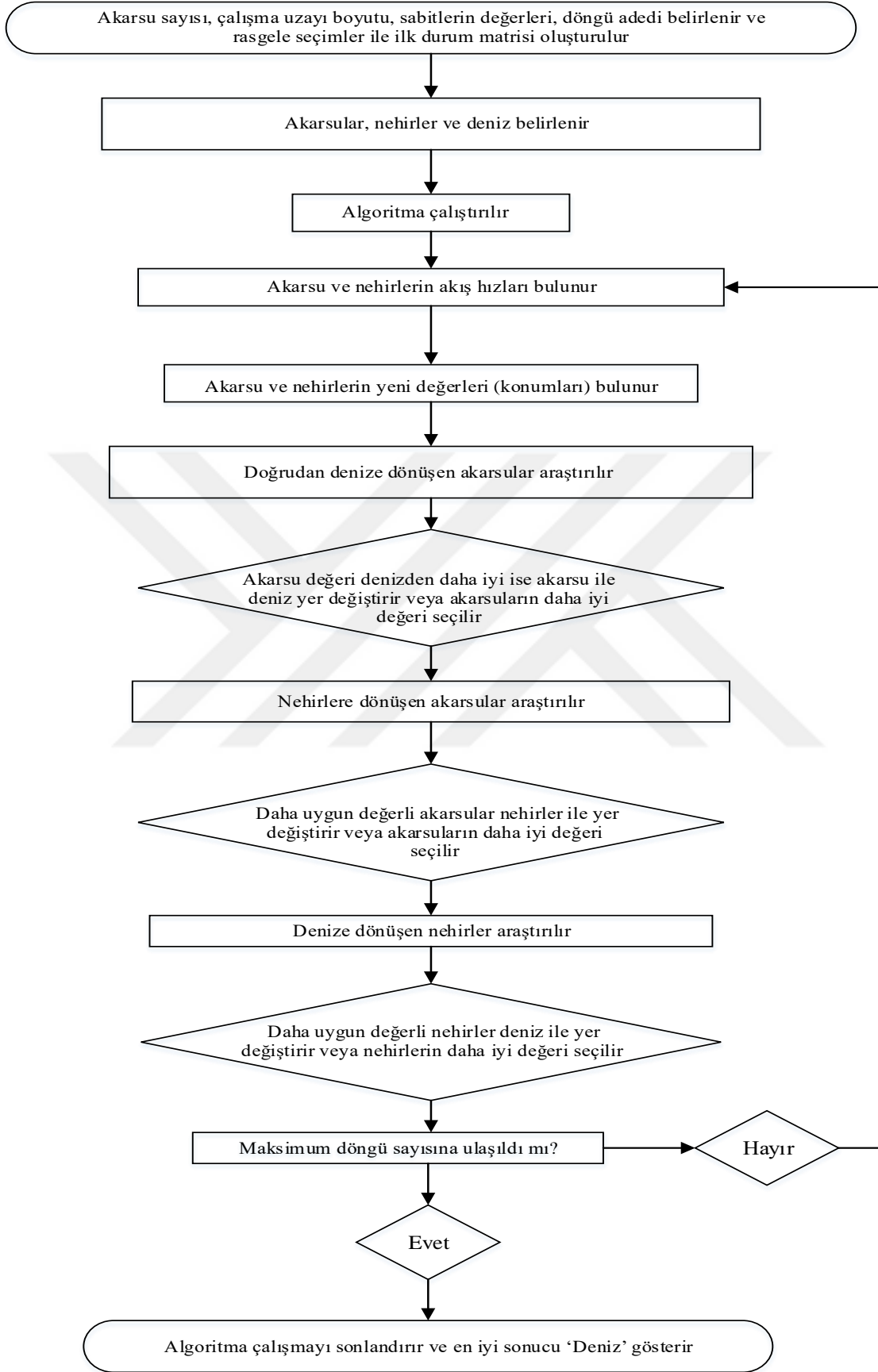
Şekil 4.3.Su döngüsü algoritmasında akarsunun nehire doğru akışı [40]



Şekil 4.4.Su döngüsü algoritmasında akarsu, nehir ve denizin şematik gösterimi [40]

#### 4.2.2. Su döngüsü algoritması akış şeması

Matematiksel denkliklerin oluşumu ve çalışma prensibi önceki alt bölümlerde açıklanan algoritmanın adımlar halindeki akış şeması Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.5. Su döngüsü algoritması akış şeması

### 4.2.3. SDA ile optimal güç akışı probleminin çözümü

Yapısı itibari ile üç kademeli olan ve her bir bileşen grubu alt matris olarak da değerlendirilebilecek formda olan algoritmada, en iyi değer (Deniz) çözüm uzayının merkezindedir ve kümenin diğer öğeleri Denizin yerini almaya çalışmaktadır.

Algoritmayı, OGA'ya uyarladığımızda, ilk halde problemin bağımsız değişkenleri ile bulunan sonuçlar sınıflandırılmakta ve döngünün her yinelenmesinde alt matris eleman sayıları sabit tutularak, yeni durumdaki alt matris belirlenmektedir. Bu döngüsel koşul, Çözüm Kümesi Matrisi ( $\mathcal{C}_{SDA}$ ) ve a, b, c matrisin satır sayıları olmak üzere Eş. 4.17'de matris formunda ifade edilmiştir.

$$\mathcal{C}_{SDA} = \begin{bmatrix} a = 1 & x & [Deniz] & \downarrow \uparrow \\ & & \uparrow \downarrow & \downarrow \uparrow \\ b & x & [Nehir] & \downarrow \uparrow \\ & & \uparrow \downarrow & \downarrow \uparrow \\ c & x & [Akarsu] & \downarrow \uparrow \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a = 1 & x & [Deniz] \\ b & x & [Nehir] \\ c & x & [Akarsu] \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Probleme özgü olarak, Aktif Güç Kaybının en aza indirgenmesini irdelediğimizde; popülasyon sayısına eşit miktarda ilk durum sonucu alınmakta ve bu sonuçlar üç ayrı grupta optimizasyon kistasına göre sıralanmaktadır. Burada optimum sonuç güç kaybının en az olduğu satır “Deniz” iken, diğerleri denizden ıraksak olan sonuçları temsil etmektedir.

Şekil 4.5'deki akış şemasında belirtildiği üzere döngü içerisinde yer alan ve mevcut en uygun değere yakınsamaya çalışan çözüm kümesi matrisinin diğer öğeleri, her iterasyonda yinelenerek farklı güç kaybı değerleri almaktadır. Bu tekrarlanan süreç boyunca, güç kaybı değeri sürekli olarak değişmekte ve hedefe yaklaşmasına bağlı olarak, nehir ya da doğrudan denize dönebilmektedir. Hedeften sapması en yüksek grup olan akarsu alt matrisinde bulunan bir sonuç, güç kaybının azalmasına karşın diğer sonuçların da iyileşmesi sebebiyle akarsu grubunda kalabilmektedir. Problem, olası en iyi sonucun bulunması esaslı olduğundan algoritma çalışmayı belirlenen sayıda tekrarlama sonrasında durdurmaktadır. Akış boyunca bulunan ve bağımlı değişkenlerin de eşitsizlik denklemleri aralığında kaldığı minimum aktif güç kaybı, hedef fonksiyonun çözümü olmaktadır.



## 5. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYON VE SU DÖNGÜSÜ ALGORİTMALARI İLE OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ANALİZİ

OGA probleminin PSO ve SDA ile çözümlendiği bu bölümde, hedef fonksiyon her durum için ayrı ve bağımsız olarak formüle edilmiştir. MATPOWER programı ile benzetimi yapılan ve referans IEEE 30 bara sisteminde çözülen hedef fonksiyon sonuç değerleri içerisinde en iyi veriler kıyaslamalarda kullanılmıştır. Her iki algoritmada da her durum için döngü 100 defa çalıştırılmış; PSO algoritması için 50 parçacık, SDA için nehir ve akarsuların eşit dağılımının sağlanması amacıyla (başlangıçta) 51 akarsu kullanılmıştır.

Her iki algoritmanın bulunduğu sonuçlar kendi aralarında ve literatürdeki değerlerle karşılaştırılırken, OGA'nın gerek şart ve isterlerinin de sağlandığının gösterilmesi amacıyla eşitsizlik denklemlerini oluşturan değişkenlerin sonuç değerleri de verilmiştir.

OGA'nın referans IEEE 30 barasına göre limit değerleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiş olup tüm durumlar için aynı sınır değerler kısıtlamasıyla hedef fonksiyon çözülmüştür [54]. Durum değişkenlerinden olan iletim hatlarının maksimum taşıma kapasiteleri bir önceki bölümde (Bkz. Çizelge 3.3), verilmiştir.

Generatör baraları aktif ve reaktif güç değer aralığı Eş. 5.1 ve Eş. 5.2'de matris formunda belirlendiği gibidir.

$$P_{min} = \begin{bmatrix} P_{1,min} = 50 \\ P_{2,min} = 20 \\ P_{5,min} = 15 \\ P_{8,min} = 10 \\ P_{11,min} = 10 \\ P_{13,min} = 12 \end{bmatrix} MW, \quad P_{max} = \begin{bmatrix} P_{1,max} = 200 \\ P_{2,max} = 80 \\ P_{5,max} = 50 \\ P_{8,max} = 35 \\ P_{11,max} = 30 \\ P_{13,max} = 40 \end{bmatrix} MW \quad (5.1)$$

$$Q_{min} = \begin{bmatrix} Q_{1,min} = -20 \\ Q_{2,min} = -20 \\ Q_{5,min} = -15 \\ Q_{8,min} = -15 \\ Q_{11,min} = -10 \\ Q_{13,min} = -15 \end{bmatrix} MVAR, \quad Q_{max} = \begin{bmatrix} Q_{1,max} = 200 \\ Q_{2,max} = 100 \\ Q_{5,max} = 80 \\ Q_{8,max} = 60 \\ Q_{11,max} = 50 \\ Q_{13,max} = 60 \end{bmatrix} MVAR \quad (5.2)$$

Generatör baraları gerilim değeri aralığı (p.u.)

$$0,95 \leq V_{gen} \leq 1,1 \quad (5.3)$$

Yük baraları gerilim değeri aralığı (p.u.)

$$0,95 \leq V_{yük} \leq 1,05 \quad (5.4)$$

Kompanzasyon baraları değeri aralığı (MVAR)

$$0 \leq Q_c \leq 5 \quad (5.5)$$

Trafo kademe ayarları değeri aralığı

$$0,9 \leq T \leq 1,1 \quad (5.6)$$

Ceza fonksiyonu, tüm durumlar için hesaba katılmış ve limit aşımı halinde güç baralarının yakıt maliyetine dâhil edilmiştir. Generatör baraları aktif ve reaktif güçleri, yük baraları gerilim değerleri, transformatör kademe ayarları ve VAR kompanzasyon sistemleri ceza fonksiyonunu oluşturan parametreler olarak değerlendirilmiş ve sonuçların belirlenen limitler dâhilinde olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Ceza Maliyet Fonksiyonu ( $Pen$ ), güç sistemindeki limitlerden sapmaları önlemek için hedef fonksiyona entegre edilen caydırıcı unsurdur ve Eş 5.7’de görüldüğü gibi, sınır değerleri aşan tüm bileşenlerin ceza maliyetlerinin toplamıyla elde edilmektedir.

$P_{G1}^{lim}$  salınım barası aktif güç,  $Q_{Gi}^{lim}$  gerilim kontrollü bara reaktif güçleri,  $V_{Li}^{lim}$  yük baraları gerilimleri alt/üst limit değerleri ve  $S_{Li}^{max}$  iletim hatlarının maksimum görünür güç taşıma kapasitesidir [57].

$$Pen = \lambda_p (P_{G1} - P_{G1}^{lim})^2 + \lambda_Q \sum_{i=1}^{N_{gen}} (Q_{Gi} - Q_{Gi}^{lim})^2 + \lambda_v \sum_{i=1}^{N_{yük}} (V_{Li} - V_{Li}^{lim})^2 + \lambda_s \sum_{i=1}^{N_L} (S_{Li} - S_{Li}^{max})^2 \quad (5.7)$$

$\lambda_p$  salınım barası aktif güç,  $\lambda_Q$  generatör baraları reaktif güçleri,  $\lambda_v$  yük baraları gerilimleri ve  $\lambda_s$  iletim hattı taşıma kapasitelerinin aşılması halinde uygulanan ceza sabitleridir.

$$x^{lim} = \begin{cases} x^{max}; & x > x^{max} \\ x^{min}; & x < x^{min} \end{cases} \quad (5.8)$$

Tez çalışmasında OGA probleminin çözümünde uygulanan parçacık sürü ve su döngüsü algoritmaları ile elde edilen ve güç sisteminin bağımlı değişkenleri olan referans generatör barası aktif güç, generatör baraları reaktif güç, yük bara gerilimleri ve iletim hattı yüklenme değerlerinin izin verilen sınırlar içerisinde kalmıştır. Hedef fonksiyonların tüm durumlar için çözümünde limit aşımı olmadığından da yakıt giderine ilaveten ceza maliyeti oluşmamıştır.

OGA problemi önceleri sadece yakıt maliyet hesabına dayalı olarak hedef fonksiyonun minimize edilmesi amacıyla çözümlenirken, son zamanlarda yapılan çalışmalarda, OGA problemi sadece generatörlerin yakıt maliyet hesabının minimuma indirgenmesi bağlı olarak çözülmekte, birim maliyeti etkileyen birçok işletmesel ve çevresel unsur toplam maliyetin hesaplanmasında dikkate alınmaktadır. Bu durumda toplam maliyet, hedef fonksiyon ile dikkate alınan ikinci koşulun maliyetinin toplamı ile elde edilmektedir.

Bu kısımda yer alan tüm durumlar için, OGA'nın anlatıldığı bölüm 3 ile yeni nesil sezgisel algoritmaların ele alındığı bölüm 4 içerisinde tanımlı formül ve denklemler kullanılarak eniyileme yapılmıştır.

### 5.1. Yakıt Maliyeti Optimizasyonu

Dağıtım şebekesine, yükün ihtiyacı olan elektrik enerjisini sağlayacak olan güç sistemlerinde maliyet, gerilim kontrollü baraların ürettiği güçlerin her bir generatörün maliyet katsayılarıyla çarpımı ile bulunmaktadır. Sistemdeki, güç baraları talep gücü ve kayıpları karşılayacak miktarda üretim yapmaktadır.

$P_{Gi}$ : i. generatörün çıkış aktif güç değeridir.

$a_{i1}, b_{i2}, c_{i3}$ : i. generatörün yakıt maliyeti katsayılarıdır [52].

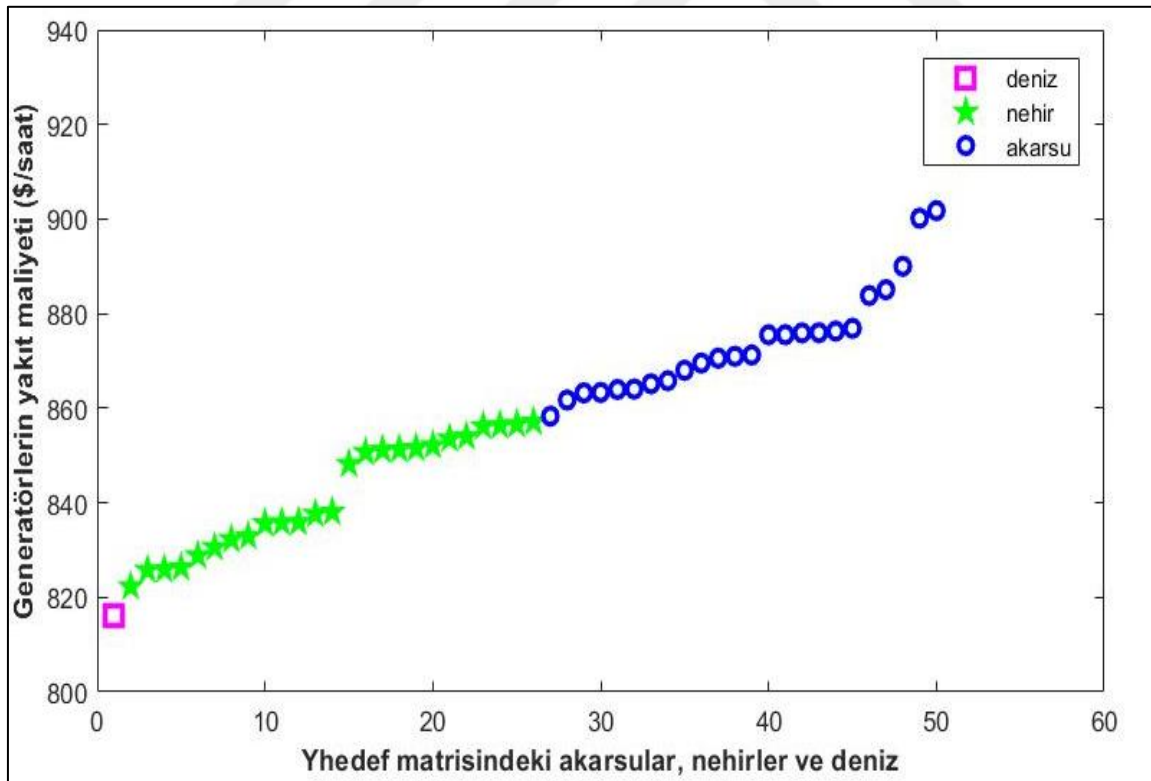
$$\text{Yakıt maliyeti katsayı matrisi} = \begin{bmatrix} a_{11} = 0 & b_{12} = 2,00 & c_{13} = 0,00375 \\ a_{21} = 0 & b_{22} = 1,75 & c_{23} = 0,0175 \\ a_{31} = 0 & b_{32} = 1,00 & c_{33} = 0,0625 \\ a_{41} = 0 & b_{42} = 3,25 & c_{43} = 0,00834 \\ a_{51} = 0 & b_{52} = 3,00 & c_{53} = 0,025 \\ a_{61} = 0 & b_{62} = 3,00 & c_{63} = 0,025 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Saatlik yakıt maliyeti her generatör için Eş. 5.10 ile toplam maliyet ise tüm generatör maliyetlerinin toplandığı Eş. 5.11 ile bulunmaktadır [52].

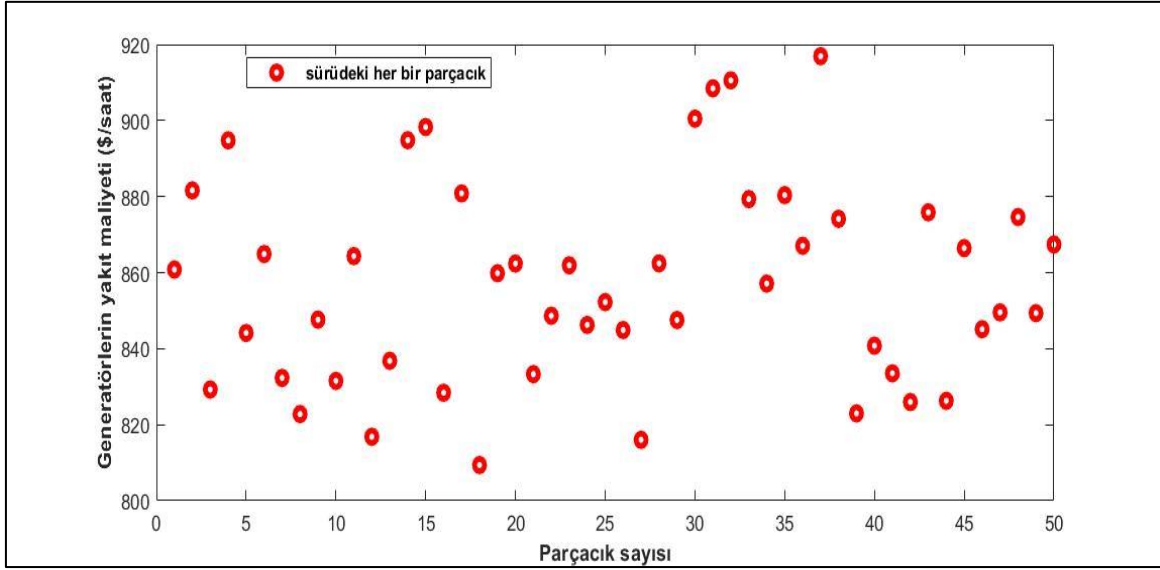
$$f(i) = a_{i1} + b_{i2}P_{Gi} + c_{i3}P_{Gi}^2 \quad i = 1, \dots, N_{gen} \quad (5.10)$$

$$F_{yakıt} = \sum_{i=1}^{N_{gen}} f(i) \quad (5.11)$$

Her iki algoritmanın başlangıç koşullarındaki grafikleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmektedir.

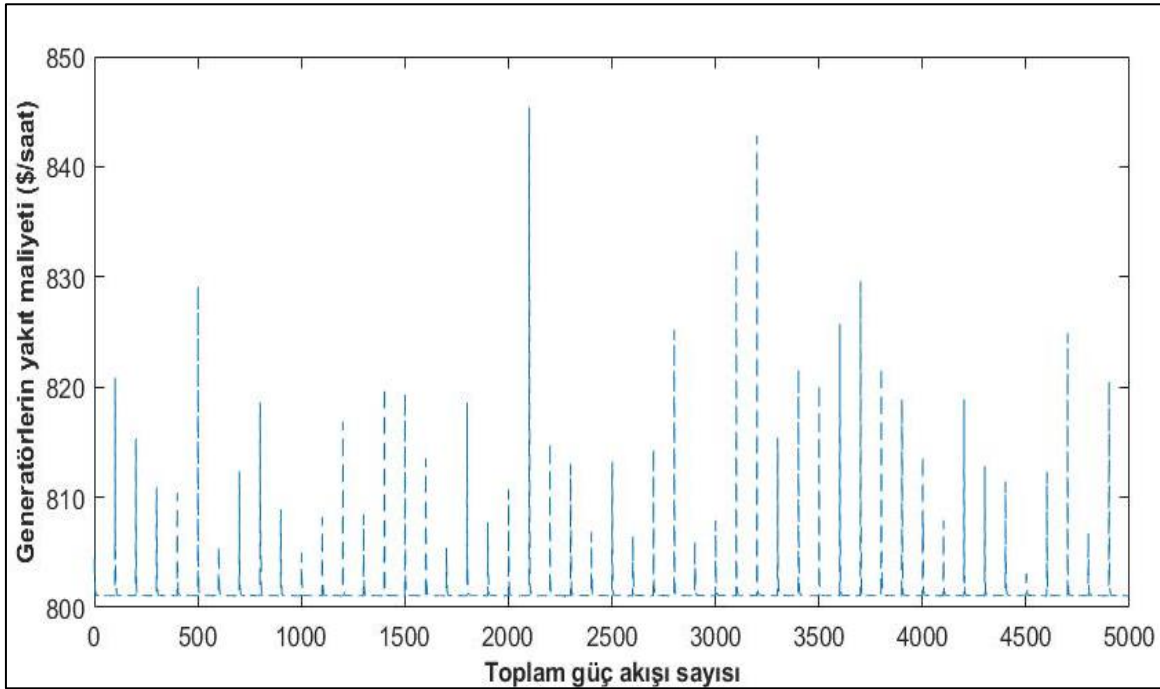


Şekil 5.1. SDA ile yakıt maliyeti optimizasyonunda  $Y_{hedef}$  matrisinin başlangıç koşulundaki durumu



Şekil 5.2. PSO ile yakıt maliyeti optimizasyonunda parçacıkların başlangıç konumu

PSO algoritmasında parçacıkların iterasyonlar öncesi ilk değerleri Şekil 5.2’de görüldüğü gibi dağınık bir yapıda olup, bu durum için en düşük maliyeti veren parçacık, gruptaki en iyi değer olarak seçilmekte ve algoritma durma koşulunu sağlayana kadar çalıştıktan sonra en iyi sonucu vermektedir.

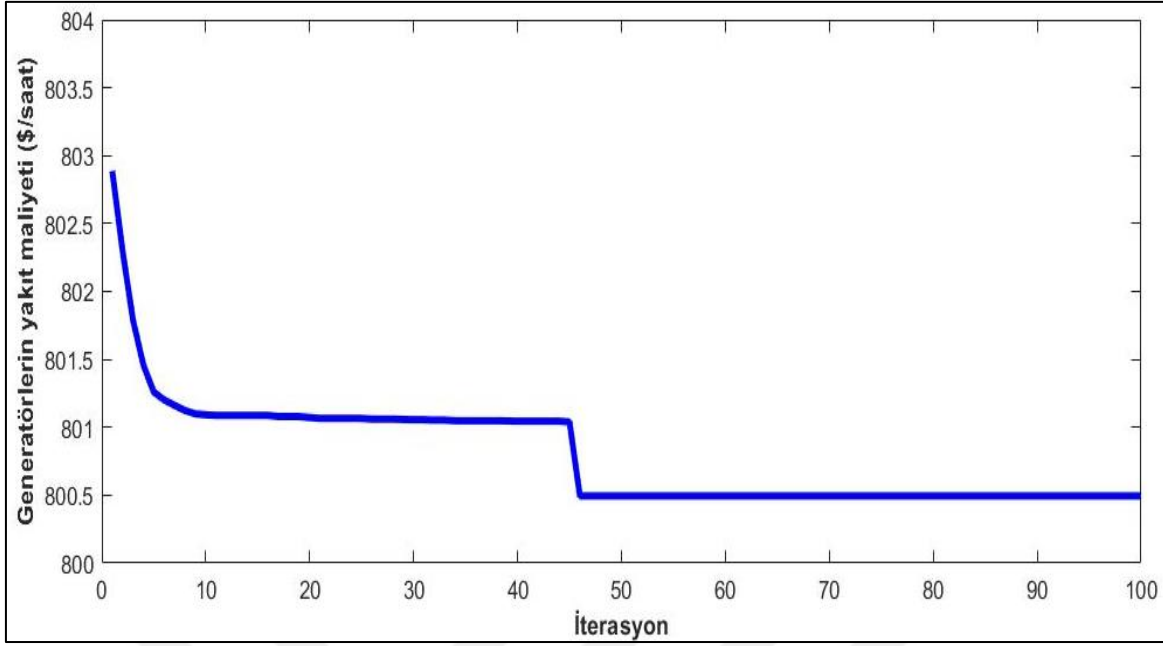


Şekil 5.3. PSO algoritmasında generatörlerin yakıt maliyetinin güç akışına göre değişimi

Yakıt maliyetinin yanı sıra aktif güç kaybı, gerilim kararlılığı ile gerilim profili (sapması), salınım ve kontrollü değişken değerlerini içeren ayrıntılı analiz Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yakıt maliyeti optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası

Güç Sistemi Çıktıları ve Karar Değişkenleri	Algoritma					
	PSO	SDA	GSA [58]	ARCBO[59]	YAK [22]	DDE [33]
Yakıt Maliyeti (\$/saat)	800,4942	800,4807	800,5099	800,5159	800,660	802,376
Güç Kaybı (MW)	9,0131	9,0091	9,0345	9,0255	9,0328	9,459
Gerilim Sapması (p.u.)	0,8555	0,8621	0,90357	0,8867	0,9209	-
Salınım (ton/saat)	0,36576	0,36575	0,36645	0,3663	0,365141	-
Kararlılık	0,1388	0,1387	0,13833	0,1385	0,1381	-
P <sub>Gen1</sub> (MW)	176,9635	176,9608	177,2131	177,159	176,7917	175,974
P <sub>Gen2</sub> (MW)	48,7476	48,7457	48,7326	48,5610	48,5026	48,884
P <sub>Gen5</sub> (MW)	21,3869	21,3867	21,4572	21,4289	21,5071	21,510
P <sub>Gen8</sub> (MW)	21,3253	21,3230	21,0638	21,2958	21,3296	22,240
P <sub>Gen11</sub> (MW)	11,9545	11,9595	11,9657	11,9803	12,3018	12,251
P <sub>Gen13</sub> (MW)	12,0353	12,0333	12,0021	12,0004	12,0000	12,000
V <sub>Gen1</sub> (p.u.)	1,0815	1,0817	1,0848	1,0851	1,0811	1,0500
V <sub>Gen2</sub> (p.u.)	1,0616	1,0618	1,0653	1,0651	1,0584	1,0382
V <sub>Gen5</sub> (p.u.)	1,0316	1,0317	1,03386	1,0331	1,0283	1,0113
V <sub>Gen8</sub> (p.u.)	1,0364	1,0365	1,03823	1,0384	1,0375	1,0191
V <sub>Gen11</sub> (p.u.)	1,0963	1,0964	1,0927	1,1000	1,0977	1,0951
V <sub>Gen13</sub> (p.u.)	1,0444	1,0443	1,04533	1,0408	1,0488	1,0837
Trafo <sub>6-9</sub>	1,0450	1,0453	1,04907	1,0974	1,05	0,9866
Trafo <sub>6-10</sub>	0,9617	0,9619	0,938762	0,9006	0,95	0,9714
Trafo <sub>4-12</sub>	0,9719	0,9723	0,970177	0,9663	0,9875	0,9972
Trafo <sub>28-27</sub>	0,9772	0,9772	0,97498	0,9760	0,9750	0,9413
Q <sub>C10</sub> (MVAR)	3,8987	3,9606	2,37123	2,2567	5,00	-
Q <sub>C12</sub> (MVAR)	4,1271	4,1761	2,57918	4,2353	5,00	-
Q <sub>C15</sub> (MVAR)	4,7019	4,7187	4,20734	4,2998	5,00	-
Q <sub>C17</sub> (MVAR)	3,7531	3,8231	5,0000	4,9446	5,00	-
Q <sub>C20</sub> (MVAR)	4,3490	4,3851	3,687712	3,7381	4,00	-
Q <sub>C21</sub> (MVAR)	3,6681	3,7429	4,95747	4,9901	5,00	-
Q <sub>C23</sub> (MVAR)	2,7241	2,8203	3,08148	2,6502	3,00	-
Q <sub>C24</sub> (MVAR)	4,6727	4,6911	4,98767	5,0000	5,00	-
Q <sub>C29</sub> (MVAR)	2,8194	2,8291	2,48706	2,3967	3,00	-



Şekil 5.4. PSO algoritmasında generatörlerin yakıt maliyeti

Sonuçlar incelendiğinde SDA ile edilen sonucun PSO Algoritmasından daha düşük değerde olduğu görülmektedir. Literatürdeki diğer optimizasyon algoritmalarıyla mukayese yapıldığında ise PSO ve SDA ile bulunan maliyet sonuçlarının Güve Sürüsü (GSA) [58], Adaptif Gerçek Kodlu Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon Algoritması (ARCBO) [59], Yapay Arı Kolonisi (YAK) [22] ve Değiştirilmiş Diferansiyel Evrim (DDE) [33] algoritmalarından daha iyi değerde olduğu görülmektedir.

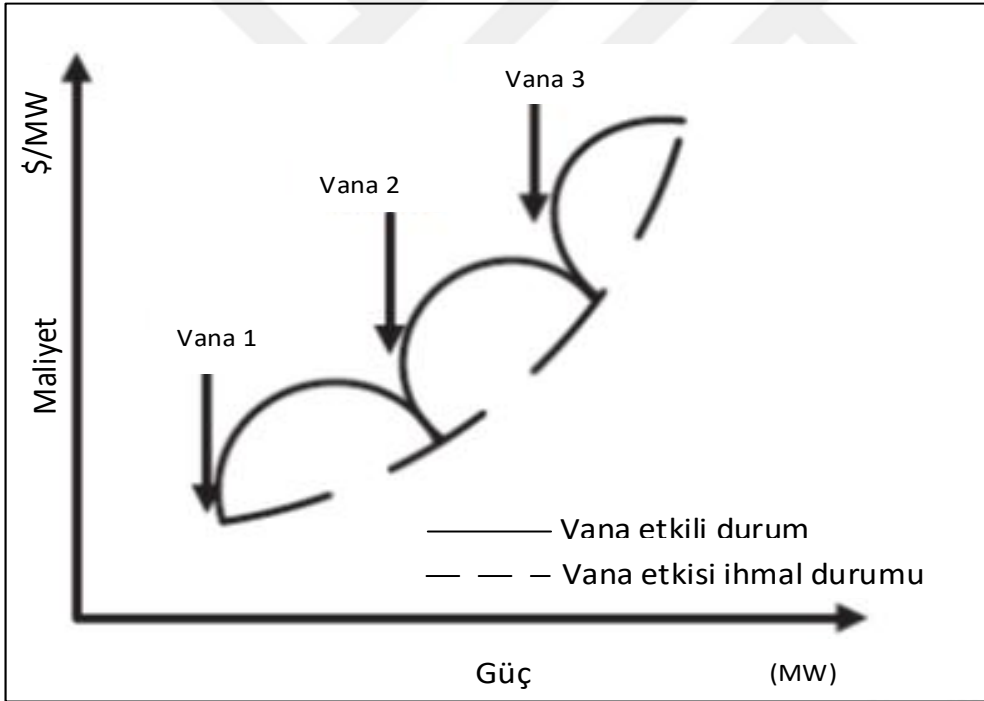
Başlangıç durumu ile kıyaslandığında ise maliyet 901,918 \$/saat [54] ve 901,9516 \$/saat [60] seviyelerinden yaklaşık %11,25 azalışla PSO algoritmasında 800,4942 \$/saate, SDA'da 800,4807 \$/saate inmiştir. 30 baralı güç sisteminin ilk durumdaki gerilim kararlılık seviyesi de 0,1723'ten [60] 0,1388 (PSO) ve 0,1387 değerine (SDA) gerilemiştir. Benzer şekilde, yük bara gerilimlerinin toplam sapma miktarı 1,1496 p.u. [60] değerinden 0,8555 p.u. (PSO) ve 0,8621 p.u. (SDA) değerine doğru iyileşme göstermiştir.

Buna karşın diğer optimizasyon teknikleri ile de tutarlı olduğu üzere, talep yük sabit tutulurken kayıp güçlerin artış göstermesi neticesinde aktif güç kaybı 5,8219 MW [60] ve 5,812 MW miktarından [54] 9,0131 MW (PSO) ve 9,0091 MW'a (SDA) yükselmiştir.

## 5.2. Vana Nokta Etkili Yakıt Maliyeti Optimizasyonu

Elektrik santrallerinde üretim yapılırken kaynakların verimli kullanım düzeyini artırmak için buhar türbinleri maksimum kapasite değerine ulaştığında devreye alınmaktadır. Enerji üretimine başlayan ve aktif hale gelen türbinlerin santraldeki üretim sürecine dâhil edilmesi de valfler vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Bu süreçte, türbinin maksimum verimlilik seviyesine gelebilmesi için geçen sürede harcanan güce karşılık gelen yakıt gideri de ikinci dereceden denkleme eklenmektedir. Generatörlerden maksimum düzeyde verim alınabilmesi için vanalar maksimum çıkış gücünde ve sırayla açılmaktadır [61].

Türbinlerin güç temin zincirine alınırken yakıt sarfiyatına etkisi Şekil 5.5’de gösterildiği gibi dalgalı şeklinde olmaktadır.



Şekil 5.5. Vana noktası etkisinin güç/maliyet grafiği [62]

IEEE 30 sistemindeki 1 ve 2 numaralı baraların vana nokta etkili baralar olduğu kabul edilmiştir. Bu koşulda, 1. ve 2. generatörlerin maliyet fonksiyonları Eş. 5.12 ve Eş. 5.13 ile hesaplanmaktadır [62] ve maliyet katsayıları da Çizelge 5.2’de yer almaktadır [33].

$$f(i) = a_{i1} + b_{i2}P_{Gi} + c_{i3}P_{Gi}^2 + \left| d_i \sin \left( e_i (P_{Gi,min} - P_{Gi}) \right) \right| \quad i = 1, 2 \quad (5.12)$$

$$F_{vana} = \sum_{i=1}^{i=2} f(i) \quad (5.13)$$

Çizelge 5.2. Vana-noktası etkili baraların yakıt maliyeti katsayıları [33]

Bara no	Generatör	Katsayı				
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
1	$G_1$	150,00	2,00	0,0016	50,00	0,0630
2	$G_2$	25,00	2,50	0,0100	40,00	0,0980

Vana etkisinin maliyete yansıtılmasıyla ilk duruma göre hesaplanan yakıt maliyetinin doğruluk oranı yükselmektedir.

Vana etkisinin yakıt tutarına dahil edilmediği 5., 8., 11. ve 13. baraların yakıt maliyeti Eş. 5.14 ile toplam maliyetleri ise Eş. 5.15 ile hesaplanmaktadır.

$$f(ii) = a_{ii1} + b_{ii2}P_{Gii} + c_{ii3}P_{Gii}^2 \quad ii = 3, \dots, N_{gen} \quad (5.14)$$

$$F_2 = \sum_{ii=3}^{N_{gen}} f(ii) \quad (5.15)$$

Son halde, ceza fonksiyonunu da kapsayan toplam yakıt maliyetini Eş. 5.16 vermektedir.

$$F_{yakıt} = F_{vana} + F_2 + Pen \text{ \$/saat} \quad (5.16)$$

Yerçekimsel Arama Algoritması (YAA) [27], GSA [58], YAK [22] ve DDE [33] algoritmalarına nazaran PSO ve SDA'nın bulduğu sonuçların daha iyi olduğu Çizelge 5.3'de görülebilmektedir. Bununla birlikte, vana nokta etkisinin yakıt maliyetini bu etkinin ihmal edildiği bir önceki duruma göre her iki algoritma için de %16 civarında artırmıştır.

Maliyet giderinin yanında, vana noktasının ihmal edildiği haldeki değerlere kıyasla aktif güç kayıplarının ve salınım miktarının arttığı, kararlılık seviyesinin düştüğü aksi yönde ise yük baralarındaki dalgalanmaların azalması ile birlikte gerilim profilinin düzelme gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 5.3. Vana-noktası etkili yakıt maliyeti optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası

Güç Sistemi Çıktıları ve Karar Değişkenleri	Algoritma					
	PSO	SDA	YAA [27]	GSA [58]	DDE [33]	YAK [22]
Yakıt Maliyeti (\$/saat)	927,9135	926,6501	929,7240	930,7441	930,793	945,4495
Güç Kaybı (MW)	11,2846	11,6268	15,1458	13,1378	13,064	14,0928
Gerilim Sapması (p.u.)	0,4113	0,3682	0,5779	0,44929	-	0,5284
Salınım (ton/saat)	0,4273	0,4365	-	0,43493	-	0,42377
Kararlılık	0,1426	0,1450	0,1564	0,15676	-	0,1431
$P_{Gen1}$ (MW)	195,7767	198,4760	199,5994	197,5689	197,426	194,844
$P_{Gen2}$ (MW)	48,6290	44,9240	51,9464	51,9685	52,037	51,9921
$P_{Gen5}$ (MW)	17,1379	18,1947	15,000	15,0004	15,000	15,00
$P_{Gen8}$ (MW)	10,8573	10,7503	10,000	10,00	10,000	10,00
$P_{Gen11}$ (MW)	10,1026	10,0534	10,000	10,00	10,001	10,00
$P_{Gen13}$ (MW)	12,1811	12,6284	12,000	12,00	12,000	15,6567
$V_{Gen1}$ (p.u.)	1,0605	1,0601	1,0990	1,03356	1,0371	1,0227
$V_{Gen2}$ (p.u.)	1,0440	1,0373	1,0180	1,01127	1,0130	1,0035
$V_{Gen5}$ (p.u.)	1,0232	1,0385	1,0522	0,971351	0,9648	1,0252
$V_{Gen8}$ (p.u.)	1,0349	1,0226	0,9500	1,03439	1,0320	1,0076
$V_{Gen11}$ (p.u.)	1,0928	1,0560	0,9634	1,09929	1,0982	0,9821
$V_{Gen13}$ (p.u.)	1,1000	1,1000	0,9507	1,09992	1,0890	1,1000
Trafo <sub>6-9</sub>	1,0699	1,0851	0,9090	1,100	1,0969	1,0500
Trafo <sub>6-10</sub>	1,1000	1,0285	0,9182	1,0532	1,0909	1,1000
Trafo <sub>4-12</sub>	1,0601	1,0103	0,9256	1,06973	1,0991	0,9625
Trafo <sub>28-27</sub>	0,9754	0,9841	0,9459	1,06513	1,0021	0,9000
$Q_{C10}$ (MVAR)	3,2236	1,3302	-	4,98433	-	-
$Q_{C12}$ (MVAR)	3,9992	2,8996	-	4,99678	-	-
$Q_{C15}$ (MVAR)	0,8611	1,8379	-	4,99345	-	-
$Q_{C17}$ (MVAR)	2,7527	2,3737	-	4,99414	-	-
$Q_{C20}$ (MVAR)	4,1600	1,3789	-	4,65486	-	-
$Q_{C21}$ (MVAR)	2,7397	4,0786	-	4,99686	-	-
$Q_{C23}$ (MVAR)	3,8446	1,5652	-	4,99969	-	-
$Q_{C24}$ (MVAR)	1,6203	2,5623	-	4,99499	-	-
$Q_{C29}$ (MVAR)	1,8728	3,9868	-	4,995	-	-



Tez çalışmasında 1 nolu referans bara ve 2 nolu güç barası, iki ayrı yakıt tipini güce dönüştürebilen baralar olarak seçilmiş ve belirlenen sınır değerler ile maliyet katsayıları Çizelge 5.4’de verilmiştir. Bu durumda, seçili generatörlerin yakıt maliyeti hesabında eşik değer baz alınarak aşağıdaki tablodaki katsayılar kullanılmaktadır [33].

Çizelge 5.4. Referans generatör baralarının aktif güç sınır değerleri ve maliyet katsayıları

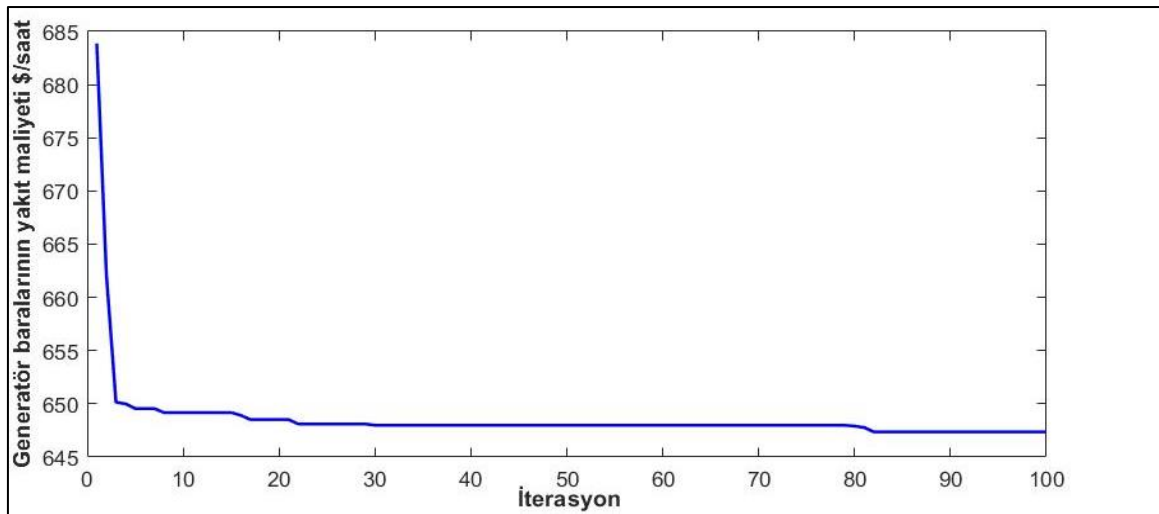
Bara no	Generatör	$a_{i1}$	$b_{i1}$	$c_{i1}$	$a_{i2}$	$b_{i2}$	$c_{i2}$
1	$G_1$	$50 \leq P_{G1} \leq 140$			$140 \leq P_{G1} \leq 200$		
		55	0,7	0,005	82,5	1,05	0,0075
2	$G_2$	$20 \leq P_{G2} \leq 55$			$55 \leq P_{G2} \leq 80$		
		40	0,3	0,01	80	0,6	0,02

1 ve 2 nolu baraların yakıt maliyeti toplamı Eş. 5.18 ile bulunmaktadır.

$$F_{par} = \sum_{i=1}^{i=2} f(i) \quad (5.18)$$

Tek tip yakıt ile güç üreten baraların yakıt maliyeti ise daha önce verilen Eş. 5.14 ve Eş. 5.15 kullanılarak elde edilmektedir. Son halde, ceza fonksiyonunu da kapsayan toplam yakıt maliyetini Eş. 5.19 vermektedir.

$$F_{yakıt} = F_{par} + F_2 + Pen \text{ \$/saat} \quad (5.19)$$



Şekil 5.7. PSO algoritması ile kademeli durumun optimizasyonunda generatörlerin yakıt maliyeti

Çizelge 5.5. Kademeli yakıt maliyeti optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası

Güç Sistemi Çıktıları ve Karar Değişkenleri	Algoritma					
	PSO	SDA	BCO [57]	ÖÖA [28]	YAK [22]	DE [63]
Yakıt Maliyeti (\$/saat)	647,3622	646,8150	647,7437	647,9202	649,0855	650,8224
Güç Kaybı (MW)	6,8788	6,7905	7,06	7,1064	7,2526	7,6333
Gerilim Sapması (p.u.)	0,8125	0,8109	-	1,4173	0,6665	0,5733
Salınım (ton/saat)	0,28329	0,2835	-	-	0,28256	-
Kararlılık	0,1379	0,1393	-	0,1211	0,1383	0,1366
P <sub>Gen1</sub> (MW)	139,8836	139,9831	140,00	140,000	139,9422	139,9830
P <sub>Gen2</sub> (MW)	54,9981	54,9957	55,00	55,000	54,9857	54,8249
P <sub>Gen5</sub> (MW)	24,3988	24,0845	24,1257	23,9338	23,0162	25,7889
P <sub>Gen8</sub> (MW)	34,9650	34,9997	35,00	35,000	33,0583	34,8331
P <sub>Gen11</sub> (MW)	19,3718	19,5131	18,660	19,6291	17,8480	17,2469
P <sub>Gen13</sub> (MW)	16,6616	16,6144	17,681	16,9374	21,8022	18,3565
V <sub>Gen1</sub> (p.u.)	1,0646	1,0748	1,0500	1,0500	1,0500	1,0421
V <sub>Gen2</sub> (p.u.)	1,0540	1,0548	1,0396	1,0404	1,0399	1,0364
V <sub>Gen5</sub> (p.u.)	1,0245	1,0229	1,0133	1,0150	1,0136	1,0080
V <sub>Gen8</sub> (p.u.)	1,0248	1,0346	1,0225	1,0265	1,0246	1,0070
V <sub>Gen11</sub> (p.u.)	1,0830	1,0684	1,0722	1,1000	1,1000	1,0402
V <sub>Gen13</sub> (p.u.)	1,0794	1,0782	1,0866	1,1000	1,0866	1,0204
Trafo <sub>6-9</sub>	0,9962	0,9922	1,0060	0,9810	1,0000	0,9984
Trafo <sub>6-10</sub>	0,9636	0,9619	0,9000	0,9000	0,9000	0,9880
Trafo <sub>4-12</sub>	1,0205	1,0216	0,9645	0,9557	1,0000	1,0674
Trafo <sub>28-27</sub>	0,9637	0,9676	0,9305	0,9364	0,9375	0,9307
Q <sub>C10</sub> (MVAR)	0,7991	2,0665	-	0,00	-	-
Q <sub>C12</sub> (MVAR)	0,1642	1,5443	-	0,00	-	-
Q <sub>C15</sub> (MVAR)	1,0175	3,3274	-	0,00	-	-
Q <sub>C17</sub> (MVAR)	3,4991	3,8559	-	0,00	-	-
Q <sub>C20</sub> (MVAR)	4,3775	2,7649	-	0,00	-	-
Q <sub>C21</sub> (MVAR)	2,6283	4,0927	-	0,00	-	-
Q <sub>C23</sub> (MVAR)	3,2352	3,1610	-	0,00	-	-
Q <sub>C24</sub> (MVAR)	3,3116	3,2828	-	0,00	-	-
Q <sub>C29</sub> (MVAR)	4,3256	0,6630	-	0,00	-	-

Çizelge 5.5 incelendiğinde SDA ile bulunan 646,8150 \$/saat ve PSO ile elde edilen 647,3622 \$/saat'lik yakıt giderlerinin mukayese yapılan GSA [58], Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon Algoritması (BCO) [57], Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (ÖÖA) [28], YAK [22] ve Diferansiyel Evrim Algoritmasından (DE) [63] daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Generatörlerin sebep olduğu toplam salınım miktarı ve aktif güç kaybı, PSO ve SDA için, yakıt maliyeti ve vana noktası etkili yakıt maliyeti optimizasyonuna kıyasla azalma

göstermiştir. Kararlılık düzeyi ise vana noktasının dikkate alındığı duruma göre iyileşme gösterirken, gerilim profili ise artmıştır.

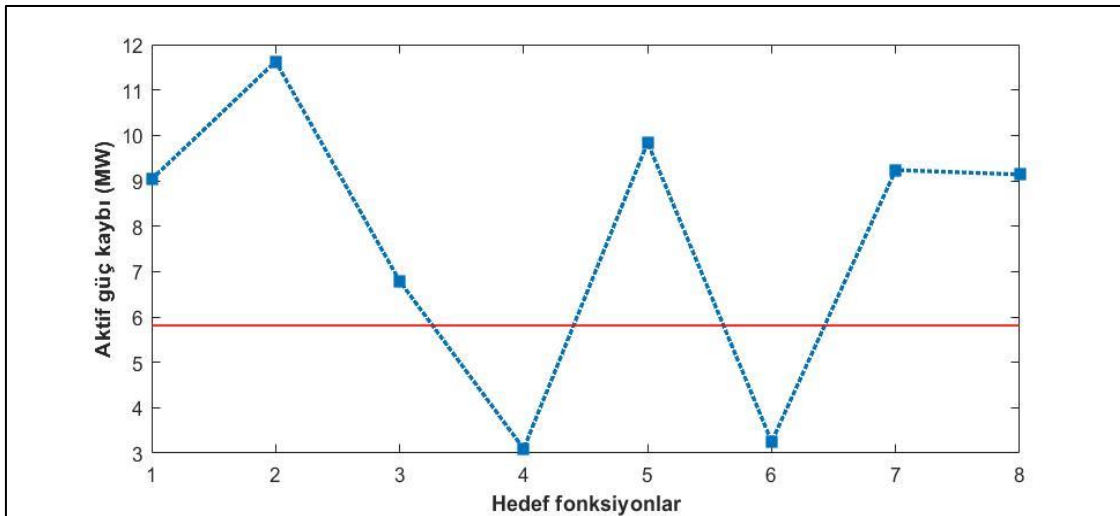
#### 5.4. Aktif Güç Kaybının En Aza İndirgenmesi

Gerilim ve yük baralarını birbirine bağlayan enerji iletim hatlarındaki direnç ve reaktans mesafe ile artan oranda güç kaybına neden olmakta ve yüke ulaşan toplam güç miktarı azalmaktadır.

Hat kayıplarını azaltmak ve aktif güç verimliliğini artırmak için yapılan çalışmada, iletim hattının her iki ucundaki baraların gerilim ve açı değerleri ile hattın rezistans ve reaktans değerleri Eş. 5.20’de yerine yazıldığında 41 hat üzerinde oluşan toplam güç kaybını vermektedir [22,62].

$$P_{kayıp} = \sum_{a=1}^{N_L} \left( \frac{r_a}{r_a^2 + x_a^2} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \right) \text{ MW} \quad (5.20)$$

Çizelge 5.6’da da görüldüğü üzere güç santralindeki aktif güç kaybı parçacık sürü optimizasyonu ile 3,0957 MW’a, su döngüsü ile 3,0963 MW’a indirgenmiş ve GSA [58], ARCBO [59], YAK [22] ve DDE [33] algoritmalarından daha iyi sonuçlar alınmıştır. Şekil 5.8’deki grafik SDA’da güç kaybının hedef fonksiyonlara göre değişimini göstermektedir



Şekil 5.8. Güç kaybının hedef fonksiyonlara göre SDA’da değişimi

Başlangıç işletme koşullarında kayıp miktarının 5,812 [54] ve 5,8219 MW [60] olduğu dikkate alındığında % 46,74'lük bir düşüş meydana gelmiştir. Yakıt maliyeti hedef fonksiyon çıktılarına kıyasla da kayıp miktarı ve toplam salınım önemli ölçüde azalmıştır. Buna karşın maliyet artış göstererek tüm durumlar içerisindeki en yüksek seviyeye ulaşmıştır.

Çizelge 5.6. Güç kaybı optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası

Güç Sistemi Çıktıları ve Karar Değişkenleri	Algoritma					
	PSO	SDA	GSA [58]	ARCBO[59]	YAK [22]	DDE[33]
Güç Kaybı (MW)	3,0957	3,0963	3,1005	3,1009	3,1078	3,2008
Yakıt Maliyeti (\$/saat)	967,3489	967,6289	967,6636	967,6605	967,6810	967,86
Gerilim Sapması (p.u.)	0,8758	0,8959	0,88868	0,8913	0,9008	-
Salınım (ton/saat)	0,20729	0,2073	0,20727	0,2073	0,2072	-
Kararlılık	0,1390	0,1385	0,13858	0,1386	0,1386	0,12178
P <sub>Gen1</sub> (MW)	51,6117	51,5037	51,5005	51,5020	51,5078	51,6008
P <sub>Gen2</sub> (MW)	79,9988	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
P <sub>Gen5</sub> (MW)	49,9777	49,9961	50,00	49,9993	50,00	50,00
P <sub>Gen8</sub> (MW)	34,9590	34,9977	35,00	34,9998	35,00	35,00
P <sub>Gen11</sub> (MW)	29,9962	29,9988	30,00	29,9999	30,00	30,00
P <sub>Gen13</sub> (MW)	39,9522	40,00	40,00	39,9999	40,00	40,00
V <sub>Gen1</sub> (p.u.)	1,0619	1,0596	1,06187	1,0618	1,0627	1,0435
V <sub>Gen2</sub> (p.u.)	1,0571	1,0575	1,05766	1,0577	1,0575	1,04353
V <sub>Gen5</sub> (p.u.)	1,0388	1,0369	1,03811	1,0381	1,0385	1,02470
V <sub>Gen8</sub> (p.u.)	1,0442	1,0444	1,04422	1,0447	1,0444	1,03470
V <sub>Gen11</sub> (p.u.)	1,0757	1,0792	1,07203	1,0854	1,0739	1,07
V <sub>Gen13</sub> (p.u.)	1,0450	1,0469	1,05906	1,0523	1,0463	1,043
Trafo <sub>6-9</sub>	1,0316	1,0380	1,09074	1,0701	1,0500	1,0375
Trafo <sub>6-10</sub>	0,9854	0,9685	0,900009	0,9113	0,9375	0,925
Trafo <sub>4-12</sub>	0,9829	0,9899	0,997851	0,9971	0,9875	0,975
Trafo <sub>28-27</sub>	0,9796	0,9788	0,976541	0,9771	0,9750	0,975
Q <sub>C10</sub> (MVAR)	4,9614	2,9995	4,99998	0,0147	5,00	5,00
Q <sub>C12</sub> (MVAR)	4,9711	4,9759	0,767227	4,9670	5,00	3,00
Q <sub>C15</sub> (MVAR)	4,9971	4,8322	4,22968	4,5824	5,00	0,00
Q <sub>C17</sub> (MVAR)	4,9915	4,9407	5,00	4,9837	5,00	1,00
Q <sub>C20</sub> (MVAR)	4,9937	4,6772	3,96706	3,9249	4,00	4,00
Q <sub>C21</sub> (MVAR)	4,9704	5,00	5,00	4,9907	5,00	2,00
Q <sub>C23</sub> (MVAR)	3,0074	3,8985	3,01344	2,9803	3,00	5,00
Q <sub>C24</sub> (MVAR)	4,9551	4,9437	4,99999	5,00	5,00	5,00
Q <sub>C29</sub> (MVAR)	2,3389	2,7915	2,32797	2,2742	2,00	5,00

### 5.5. Gerilim Profilinin İyileştirilmesi

Yakıt maliyetinin azaltılması ile yük baralarının gerilim değerlerindeki sapmaları düzeltme ve referans olarak belirlenen 1.0 p.u. değerine mutlak değer bazında mümkün olduğunca yaklaştırmanın bir arada gerçekleştirilmesinin amaç edinildiği durumda, her bir yük barasının hedeften sapmayı veren mutlak değerleri toplamı güç sisteminin gerilim profilini düzeyini göstermektedir. Referans değere yakınsamanın fazla olması, bir başka deyişle yük baraları gerçek değerleri ile referans arasındaki farkın kümülatif toplamının sifıra yakınlığı, yük baralarının birbirine ve referans değere yakın gerilim düzeyinde olduğunu ifade etmektedir.

$V_d$ : Referans değerden mutlak uzaklaşma (sapma) toplam değeridir (p.u.).

$V_j$ : j. yük barası değeridir (p.u.).

$N_{yük}$ : Yük barası sayısıdır.

$w_{fd}$ : Ağırlık faktörüdür.

Yük barası geriliminin p.u. cinsinden referans değeri 1,0 olmak üzere gerilim profilini iyileştirme amaçlı durumun matematiksel denklemi aşağıdaki Eş. 5.21'deki gibidir [63].

$$V_d = \sum_{j=1}^{N_{yük}} |V_j - 1,0| \text{ p.u.} \quad (5.21)$$

Ağırlık faktörüne bağlı ilave maliyet ise serbestçe belirlenebilen  $w_{fd}$  katsayısı ile yük baralarının toplam gerilim sapması değerinin çarpımı ile bulunmaktadır [63].

$$F_d = w_{fd} \times V_d \text{ \$/saat} \quad (5.22)$$

Son halde, toplam tutar; yakıt maliyeti, gerilim profili maliyeti ve ceza unsurunun toplamıyla hesaplanmaktadır.

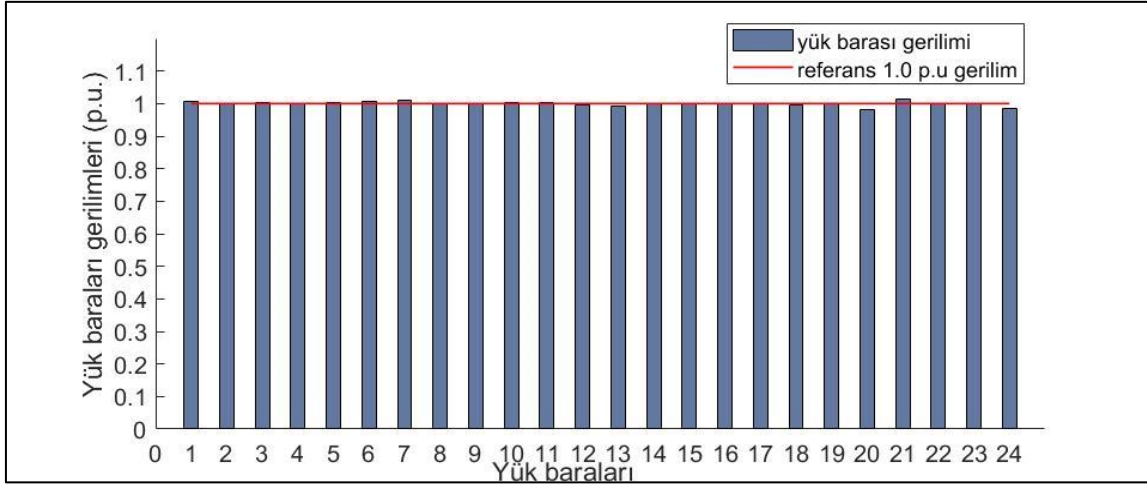
$$F = F_1 + F_d + Pen \text{ \$/saat} \quad (5.23)$$

Aynı anda iki koşulun birlikte sağlanmasının amaçlandığı hedef fonksiyon sonuçlarının literatür ile tutarlı olduğu Çizelge 5.7’de görülmektedir. 1,1496 p.u. [60] ilk hal verisine nazaran 0,0995 p.u. (PSO) ve 0,0970 p.u. (SDA) sonuçları ile güç sistemindeki yük baraları gerilimleri birbirine yaklaştırılırken aynı zamanda gerilim profilinde yaklaşık %91,56’lık azalış gerçekleşmiştir.

PSO ve SDA ile elde edilen gerilim profilinin Kara Delik Tabanlı Optimizasyon Algoritması (KDA) [60], GSA [58], BCO [57] ve DE [63] algoritması sonuçlarından daha iyi seviyede olduğu Çizelge 5.7 aşağıda yer almaktadır.

Çizelge 5.7. Gerilim profili optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası

Güç Sistemi Çıktıları ve Karar Değişkenleri	Algoritma					
	PSO	SDA	GSA [58]	BCO [57]	KDA [60]	DE [63]
Gerilim Sapması (p.u.)	0,0995	0,0970	0,10842	0,1020	0,1262	0,1357
Yakıt Maliyeti (\$/saat)	804,7763	803,6236	803,3125	804,9982	804,5975	805,2619
Güç Kaybı (MW)	9,7680	9,8411	9,7206	9,95	9,5778	10,4412
Salınım (ton/saat)	0,3525	0,3647	0,36344	-	-	-
Kararlılık	0,1487	0,14883	0,14783	-	0,1377	0,1316
P <sub>Gen1</sub> (MW)	172,5121	176,7025	176,2053	173,4298	172,0275	183,1277
P <sub>Gen2</sub> (MW)	48,5954	48,4201	48,7218	49,06	48,0936	47,4435
P <sub>Gen5</sub> (MW)	21,5128	21,5397	21,8452	21,77	21,8736	18,7281
P <sub>Gen8</sub> (MW)	22,4777	22,0038	22,2104	23,27	20,8257	16,1515
P <sub>Gen11</sub> (MW)	13,4178	12,4948	12,1357	13,84	14,8864	11,8855
P <sub>Gen13</sub> (MW)	14,6521	12,0801	12,0022	11,98	15,2725	16,5050
V <sub>Gen1</sub> (p.u.)	1,0271	1,0419	1,05052	1,0272	1,0338	1,0490
V <sub>Gen2</sub> (p.u.)	1,0148	1,0263	1,0313	1,0088	1,0170	1,0335
V <sub>Gen5</sub> (p.u.)	1,0140	1,0135	1,01057	1,0145	1,0116	1,0117
V <sub>Gen8</sub> (p.u.)	1,0069	1,0063	1,00766	1,0092	1,0027	1,0043
V <sub>Gen11</sub> (p.u.)	1,0530	1,0290	1,02101	1,0510	1,0435	1,0432
V <sub>Gen13</sub> (p.u.)	1,0016	0,9890	0,992125	1,0170	1,0141	0,9931
Trafo <sub>6-9</sub>	1,0649	1,0459	1,03943	1,0722	1,0236	1,0439
Trafo <sub>6-10</sub>	0,9127	0,9028	0,900965	0,9000	0,9250	0,9230
Trafo <sub>4-12</sub>	0,9640	0,9385	0,953765	1,0000	0,9786	0,9345
Trafo <sub>28-27</sub>	0,9689	0,9691	0,956971	0,9708	0,9633	0,9616
Q <sub>C10</sub> (MVAR)	4,8204	4,8524	5,00	4,140	2,9696	3,6479
Q <sub>C12</sub> (MVAR)	1,7636	0,0550	2,2444	3,55	2,3947	0,3806
Q <sub>C15</sub> (MVAR)	4,3182	4,9328	4,75979	5,00	3,1905	4,0931
Q <sub>C17</sub> (MVAR)	1,5206	0,1033	0,271973	0	3,0773	2,9372
Q <sub>C20</sub> (MVAR)	4,9918	4,9328	4,99208	5,00	4,0279	4,7958
Q <sub>C21</sub> (MVAR)	4,5418	4,9313	4,9143	5,00	3,8901	4,4684
Q <sub>C23</sub> (MVAR)	4,8145	4,9222	4,82359	5,00	3,7811	3,8162
Q <sub>C24</sub> (MVAR)	4,8617	4,9188	4,93992	4,90	3,7777	4,2009
Q <sub>C29</sub> (MVAR)	2,3815	2,5738	0,955192	2,65	2,3794	1,2597



Şekil 5.9. PSO algoritması ile gerilim profili iyileştirmesi

## 5.6. Salınım Miktarının Azaltılması

Temiz enerji olarak da adlandırılan yenilenebilir ve bir nevi sonsuz rüzgar ve güneş enerjisi ile jeotermal ve hidroelektrik santrallerinin aksine, enerjinin kömür gibi fosil yakıtlar ile üretildiği termik güç santrallerinde, kaynağın güce dönüşüm sürecinde  $CO_x$ ,  $SO_x$  ve  $NO_x$  gibi insana ve çevreye zararlı olan sera gazları ortaya çıkmaktadır [64].

Bu yapıdaki tesislerin, kaynağı işleme aşamasında yaydıkları gazların azaltılması ve sera gazı etkisinin sınırlandırılması için yapılan iyileştirme, ikinci dereceden olan aynı zamanda üstel kısımdan oluşan Eş. 5.24’de verilen denklem ile çözülmektedir [64].

$$f(i) = \sum_{i=1}^{N_{gen}} \alpha_{i1} + \beta_{i2} P_{Gi} + \gamma_{i3} P_{Gi}^2 + \omega_i \exp(\mu_i P_{Gi}) \text{ ton/saat} \quad (5.24)$$

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \omega_i, \mu_i$ : i. generatörün salınım katsayılarıdır ve Çizelge 5.8’de listelenmiştir.

Çizelge 5.8. IEEE 30 sistemindeki güç baraları salınım katsayıları [64]

Bara no	Generatör	Salınım katsayıları				
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\omega$	$\mu$
1	$G_1$	4,091	-5,554	6,49	0,0002	2,857
2	$G_2$	2,543	-6,047	5,638	0,0005	3,333
5	$G_3$	4,258	-5,094	4,586	0,000001	8
8	$G_4$	5,326	-3,55	3,38	0,002	2
11	$G_5$	4,258	-5,094	4,586	0,000001	8
13	$G_6$	6,131	-5,555	5,151	0,00001	6,667

Değiştirilmiş Sıçrayan Kurbağa Algoritması (DSKA) [65], Diferansiyel Arama Algoritması (DAA) [66], GSA [58] ve YAK [22] algoritmalarından daha az salınım yapıldığını gösteren PSO ve SDA çıktıları Çizelge 5.9'dadır. Salınım miktarındaki düşüşün yanında güç kaybının da azalma gösterdiği ancak güç kaybı optimizasyonuna benzer şekilde yakıt maliyetinin arttığı ve 901,918 \$/saat [54] ve 901,9516 \$/saat [60] başlangıç seviyelerinin de üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Yakıt maliyetindeki bu artış, hedef fonksiyonun başarıyla çözümlenmesi ve salınımın en aza indirgenmesi için gerekli ve sağlanması gereken bir isterdir. Diğer algoritmalar kullanılarak yapılan çalışma sonuçlarına bakıldığında maliyetin benzer seviyelerde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.9. Salınım optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası

Güç Sistemi Çıktıları ve Karar Değişkenleri	Algoritma					
	PSO	SDA	GSA [58]	YAK [22]	DSKA[65]	DAA [66]
Salınım (ton/saat)	0,204800	0,204817	0,20482	0,204826	0,2056	0,205825
Yakıt Maliyeti (\$/saat)	944,3889	944,4015	944,5003	944,4391	951,5106	944,4086
Güç Kaybı (MW)	3,2558	3,2515	3,2358	3,2470	-	3,24373
Gerilim Sapması (p.u.)	0,8226	0,8352	0,87393	0,8463	-	-
Kararlılık	0,1393	0,1397	0,13888	0,1402	-	0,12734
P <sub>Gen1</sub> (MW)	64,0307	64,0875	64,9966	64,0621	65,7798	64,0725
P <sub>Gen2</sub> (MW)	67,8117	67,5824	67,6392	67,5849	68,2688	67,5711
P <sub>Gen5</sub> (MW)	49,9730	49,9961	50,00	50,00	50,00	50,00
P <sub>Gen8</sub> (MW)	34,9388	34,9922	35,00	35,00	34,9999	35,00
P <sub>Gen11</sub> (MW)	29,9695	29,9979	30,00	30,00	29,9982	30,00
P <sub>Gen13</sub> (MW)	39,9321	39,9954	40,00	40,00	39,9970	40,00
V <sub>Gen1</sub> (p.u.)	1,0582	1,0594	1,06282	1,0612	-	1,0600
V <sub>Gen2</sub> (p.u.)	1,0518	1,0510	1,05642	1,0550	-	1,0549
V <sub>Gen5</sub> (p.u.)	1,0340	1,0316	1,03743	1,0350	-	1,0316
V <sub>Gen8</sub> (p.u.)	1,0368	1,0420	1,04358	1,0433	-	1,0399
V <sub>Gen11</sub> (p.u.)	1,0870	1,0879	1,07504	1,0878	-	1,0778
V <sub>Gen13</sub> (p.u.)	1,0564	1,0527	1,05341	1,0535	-	1,0709
Trafo <sub>6-9</sub>	1,0163	1,0112	1,09961	1,0125	-	0,9989
Trafo <sub>6-10</sub>	1,0071	1,0167	0,900732	1,0125	-	1,0046
Trafo <sub>4-12</sub>	0,9988	0,9979	0,996876	1,0000	-	1,0368
Trafo <sub>28-27</sub>	0,9754	0,9833	0,976927	0,9875	-	0,9792
Q <sub>C10</sub> (MVAR)	2,8486	4,7140	4,99654	5,00	-	3,93
Q <sub>C12</sub> (MVAR)	4,9749	4,8929	4,99781	5,00	-	5,00
Q <sub>C15</sub> (MVAR)	4,7765	4,9357	3,33964	5,00	-	5,00
Q <sub>C17</sub> (MVAR)	4,9996	4,8650	4,99897	5,00	-	5,00
Q <sub>C20</sub> (MVAR)	3,9943	4,0008	4,9998	4,00	-	5,00
Q <sub>C21</sub> (MVAR)	4,9790	4,7715	4,99845	5,00	-	5,00
Q <sub>C23</sub> (MVAR)	2,9475	3,0735	2,95234	3,00	-	4,06
Q <sub>C24</sub> (MVAR)	4,9997	4,7632	4,99802	5,00	-	5,00
Q <sub>C29</sub> (MVAR)	2,6068	2,9591	2,23148	3,00	-	2,86

### 5.7. Gerilim Kararlılık Seviyesinin Yükseltilmesi

Güç sisteminin belirlenen alt ve üst eşik değerler aşılmadan işletilmesi, güç akışının gerek koşullarından biri olduğu gibi aynı zamanda sürekliliğin ve kararlılığın sağlanabilmesi için de yerine getirilmesi gereken isterler arasındadır.

Kessel ve Glavitsch gerilim kararlılığının tahmin edilebilmesi için 1986 yılında yaptıkları çalışmada  $L_{indeks}$ 'i tanımlamışlardır [67].

Kararlılık seviyesinin azalması ile artış gösteren gerilim çökmesi durumu, yük karakteristiğinden doğrudan etkilenmekte ve sistemin reaktif güç tedarikinde yetersiz kalması ya da reaktif gücün sistemin kendisi tarafından aşırı kullanımı sonucunda oluşabilmektedir [67].

Gerilim kararlılık düzeyi 0 ile 1 arasında değişen pozitif bir tam sayı olup yüksüz durumda 0 iken, sınır olarak belirlenen 1'e ulaşılan an gerilim çökmesinin yaşanacağı haldir.  $L_{indeks}$  değerinin sürekli izlenebilir olması sayesinde güç sistemindeki kararlı halden sapmalar ve çökme durumuna yaklaşımlar anlık olarak tespit edilebilmekte ve gerekli tedbirlerin alınmasına imkân sağlanmaktadır [67].

Kararlı hal durumunun nicel olarak ölçümü için yük ve generatör baraları parametreleri kullanılarak bara admitans matrisi ( $Y_{bus}$ ) oluşturulur.  $Y_{bus}$ , yük ve generatörlerin birbiriyle ve kendi aralarındaki admitans değerlerinden oluşan  $n \times n$  boyutunda kare matristir. Aynı boyuttaki Hibrit matris (H) ise bara admitans matrisinin kısmen tersinin alınması ile elde edilmektedir.

Kararlılık seviyesinin ölçümünde kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir [28].

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (5.25)$$

$$\begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = [Y_{bus}] \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{LL} & Y_{LG} \\ Y_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = [H] \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [H_{LL}] & [H_{LG}] \\ [H_{GL}] & [H_{GG}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & -Z_{LL}Y_{LG} \\ Z_{LL}Y_{GL} & -Y_{GL}Z_{LL}Y_{LG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

$$F_{ji} = -Z_{LL}Y_{LG} \quad (5.29)$$

Güç sistemindeki her bir yük barası için, hibrit matrisin  $H_{LG}$  alt matris değeri ile generatör bara gerilimlerinin yük üzerindeki etkisini gösteren hesaplamalar sonucunda, yük barası sayısınınca  $L_{indeks}$  değeri bulunmaktadır.

$V_i$ : p.u. biriminde i. generatör barası gerilimidir.

$V_j$ : p.u. biriminde j. yük barası gerilimidir.

$N_{gen}$ : Toplam generatör barası sayısıdır.

$F_{ji}$ : j. yük ve i. generatör barasına bağlı katsayıdır.

$L_j$ : j. yük barası gerilim kararlılığı değeridir.

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{N_{gen}} F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \right| \quad (5.30)$$

Güç sistemi genelindeki gerilim kararlılık düzeyi ise elde edilen 0-1 aralığındaki sayısal veriler arasında mutlak olarak 1'e en yakın değerdir.

$$L_{indeks} = \text{maksimum}(L_j) \quad (5.31)$$

Bu çalışmada gerilim kararlılığı ve yakıt maliyeti optimizasyonunun aynı denklem içinde yer aldığı kabul edilmiş ve hedef fonksiyon bu duruma uygun biçimde çözümlenmiştir. Böylelikle bir yandan  $L_{indeks}$  nicelik olarak minimize edilirken, diğer yandan kararlılık seviyesi, maliyet hesabında sınırlandırıcı etki yapmıştır. Güç sistemindeki kararlılık düzeyinin toplam maliyete etkisinin hesaplanabilmesinde ise  $w_{vs}$  katsayısı kullanılmakta ve değeri sabit olmayıp kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Bu durumda kararlılığın maliyete etkisi Eş. 5.32 ile bulunmaktadır.

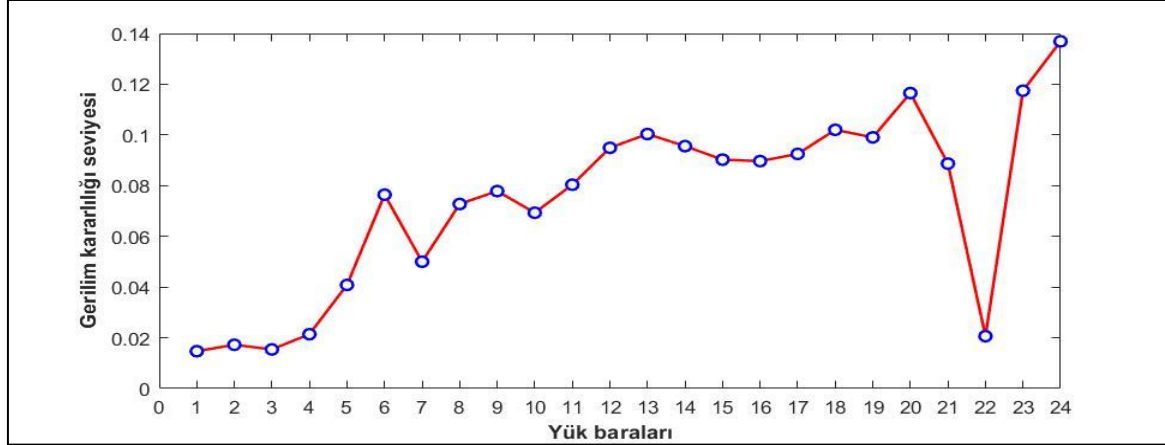
$$F_2 = w_{vs} \times L_{indeks} \text{ \$/saat} \quad (5.32)$$

Kararlılık bakımından PSO ve SDA'nın Güve Sürüsü (GSA) [58], Diferansiyel Evrim (DE) [63] ve Yapay Arı Kolonisi (YAK) [22] algoritmalarından daha iyi seviyede olduğu sonuçlar Çizelge 5.10'da verilmiştir. İlk durumdaki 0,1723 [60] değerine kıyasla güç sisteminin kararlılık seviyesi, parçacık sürü ve su döngüsü eniyileme teknikleri ile % 20,49 civarında düzelme göstererek sırasıyla 0,13691 ve 0,137 değerlerine gerilemiştir.

Çizelge 5.10. Gerilim kararlılık seviyesi optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası

Güç Sistemi Çıktıları ve Karar Değişkenleri	Algoritma				
	PSO	SDA	GSA [58]	DE [63]	YAK [22]
Kararlılık	0,13691	0,13700	0,13713	0,13745	0,1379
Yakıt Maliyeti (\\$/saat)	801,2270	801,7115	801,2248	800,4203	801,6650
Güç Kaybı (MW)	9,1980	9,2362	8,9761	8,9985	9,2954
Gerilim Sapması (p.u.)	0,8804	0,7922	0,92655	0,93846	0,9380
Salınım (ton/saat)	0,3657	0,3631	0,36106	0,36592	0,364295
P <sub>Gen1</sub> (MW)	177,0005	176,0892	175,6415	176,9908	176,4801
P <sub>Gen2</sub> (MW)	48,2116	47,9536	47,0661	48,786	48,8594
P <sub>Gen5</sub> (MW)	20,7190	20,6894	21,5451	21,212	21,7626
P <sub>Gen8</sub> (MW)	22,0662	23,2496	21,0438	21,5819	21,4316
P <sub>Gen11</sub> (MW)	12,0444	11,6765	14,7626	11,8277	12,1617
P <sub>Gen13</sub> (MW)	12,5563	12,9780	12,317	12,0002	12,00
V <sub>Gen1</sub> (p.u.)	1,0718	1,0681	1,07742	1,0831	1,0722
V <sub>Gen2</sub> (p.u.)	1,0546	1,0489	1,0616	1,0641	1,0621
V <sub>Gen5</sub> (p.u.)	1,0299	1,0263	1,0331	1,0329	1,0567
V <sub>Gen8</sub> (p.u.)	1,0479	1,0361	1,04836	1,0379	1,0438
V <sub>Gen11</sub> (p.u.)	1,0997	1,0902	1,0999	1,0928	1,0286
V <sub>Gen13</sub> (p.u.)	1,0604	1,0941	1,05084	1,0455	1,0490
Trafo <sub>6-9</sub>	1,0375	1,0232	1,04275	1,0265	1,0125
Trafo <sub>6-10</sub>	0,9011	0,9005	0,90553	0,9426	0,9000
Trafo <sub>4-12</sub>	1,0033	1,0684	0,974468	0,9667	1,0000
Trafo <sub>28-27</sub>	0,9619	0,9485	0,971978	0,9697	0,9750
Q <sub>C10</sub> (MVAR)	0,7501	1,1993	3,38991	0,7465	5,00
Q <sub>C12</sub> (MVAR)	2,8438	4,3197	1,83146	0,301	5,00
Q <sub>C15</sub> (MVAR)	3,4524	0,7678	2,98534	4,517	3,00
Q <sub>C17</sub> (MVAR)	0,8667	0,8706	1,09045	4,7206	5,00
Q <sub>C20</sub> (MVAR)	0,7123	4,8251	0,673286	3,7417	5,00
Q <sub>C21</sub> (MVAR)	3,3957	0,1783	3,74157	4,9716	4,00
Q <sub>C23</sub> (MVAR)	3,2936	0,2506	2,45557	2,7587	4,00
Q <sub>C24</sub> (MVAR)	1,6605	0,2871	2,34699	4,9129	5,00
Q <sub>C29</sub> (MVAR)	0,2388	0,0970	2,38303	2,0903	3,00

Şekil 5.10’da görülen grafik, SDA ile yapılan kararlılık seviyesi eniyilemesi için toplamda 24 yük barasının  $L_{indeks}$  değerini yansıtmaktadır ve referans alt limiti olan “0” değerinden en uzak kararlılık karakteristiğine sahip 24 sıra numaralı  $V_{L30}$  yük barası güç sisteminin gerilim kararlılığı seviyesini vermektedir.



Şekil 5.10. SDA algoritmasında yük baralarının kararlılık seviyeleri

### 5.8.Arıza Durumunda Gerilim Kararlılık Seviyesinin Yükseltilmesi

Kararlılık seviyesi, yük artışı olması ya da iletim hattı ile generatörlerin devre dışı kalması sonucunda optimal durumdan sapma gösterecek ve limit değere biraz daha yaklaşacaktır. Aynı periyot içerisinde birden fazla bileşenin sistem dışına çıkması ise güvenli çalışma sınırlarını zorlayacak ve güç santralının limit değerler civarında çalışma süresini artıracaktır.

İletim hattında meydana gelen arıza ya da hatanın kararlılığa etkisinin görülebilmesi için 41 hattın bulunduğu referans sistemdeki 2-6 nolu baraları bağlayan 6 numaralı hat üzerinde arıza olduğu varsayılmış [22] ve bu çalışma koşulundaki gerilim kararlılığı bir önceki alt bölümde verilen eşitlikler ile bulunmuştur.

$L_{indeks}$  değeri, üretilen gücün yüke aktarıldığı iletim hatları, yük ve gerilim baralarına göre değişeceğinden, bu alanda yapılan çalışmalar ile uyumluluğun sağlanabilmesi IEEE 30’lu bara sistemindeki 2 ve 6 numaralı baralar arasındaki yük akışı kesilmiş ve sistemdeki güç akışı 40 iletim hattı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu durumdaki OGA analizinde devre dışı kalan iletim hattı değerleri hesaplamalara dâhil edilmemiştir.

Sonuçlar irdelendiğinde, gerilim kararlılığı bakımından PSO ve SDA çıkış verilerinin Güve Sürüsü [58] ve Yapay Arı Kolonisi [22] algoritmalarından daha düşük değerde olduğu ve bir hat devre dışı kaldığında güç sisteminin kararlı hal durumunun, normal işletme koşullarına göre az da olsa daha aşağı seviyede olduğu Çizelge 5.11’de görülmektedir.

Çizelge 5.11. Arıza durumunda gerilim kararlılık seviyesi optimizasyonu sonuçları ve diğer algoritmalar ile kıyası

Güç Sistemi Çıktıları ve Karar Değişkenleri	Algoritma			
	PSO	SDA	GSA [58]	YAK [22]
Kararlılık	0,13839	0,13870	0,13917	0,1474
Yakıt Maliyeti (\$/saat)	817,1165	817,5581	804,4838	809,0112
Güç Kaybı (MW)	9,0823	9,1384	9,9486	11,1757
Gerilim Sapması (p.u.)	0,7909	0,7581	0,91773	0,8778
Salınım (ton/saat)	0,2949	0,2945	0,36127	0,361712
P <sub>Gen1</sub> (MW)	147,0220	146,7738	175,4861	175,5039
P <sub>Gen2</sub> (MW)	57,4807	57,6047	47,9242	49,2197
P <sub>Gen5</sub> (MW)	26,5040	26,5723	21,3747	19,0339
P <sub>Gen8</sub> (MW)	22,7122	22,6949	23,9205	25,7126
P <sub>Gen11</sub> (MW)	19,7138	19,7478	12,6431	13,1056
P <sub>Gen13</sub> (MW)	19,0496	19,1448	12,00	12,00
V <sub>Gen1</sub> (p.u.)	1,0656	1,0641	1,08773	1,0577
V <sub>Gen2</sub> (p.u.)	1,0579	1,0555	1,07089	1,0445
V <sub>Gen5</sub> (p.u.)	1,0778	1,0773	1,03405	1,0625
V <sub>Gen8</sub> (p.u.)	1,0512	1,0506	1,02777	1,0469
V <sub>Gen11</sub> (p.u.)	1,0814	1,0779	1,09126	1,0709
V <sub>Gen13</sub> (p.u.)	1,0689	1,0688	1,06292	1,0712
Trafo <sub>6-9</sub>	1,0382	1,0383	1,02531	0,9500
Trafo <sub>6-10</sub>	0,9829	0,9801	0,936761	1,0625
Trafo <sub>4-12</sub>	0,9701	0,9713	1,01206	1,0000
Trafo <sub>28-27</sub>	0,9964	0,9952	0,959546	0,9375
Q <sub>C10</sub> (MVAR)	4,1151	4,0772	1,83754	5,00
Q <sub>C12</sub> (MVAR)	2,3293	2,2424	5,00	5,00
Q <sub>C15</sub> (MVAR)	1,3459	1,3764	5,00	5,00
Q <sub>C17</sub> (MVAR)	1,3574	1,3671	5,00	5,00
Q <sub>C20</sub> (MVAR)	2,4936	2,4462	2,83784	5,00
Q <sub>C21</sub> (MVAR)	1,2743	1,2765	5,00	5,00
Q <sub>C23</sub> (MVAR)	3,1622	3,1653	5,00	5,00
Q <sub>C24</sub> (MVAR)	2,5479	2,4875	5,00	5,00
Q <sub>C29</sub> (MVAR)	2,8918	2,8915	1,48653	5,00

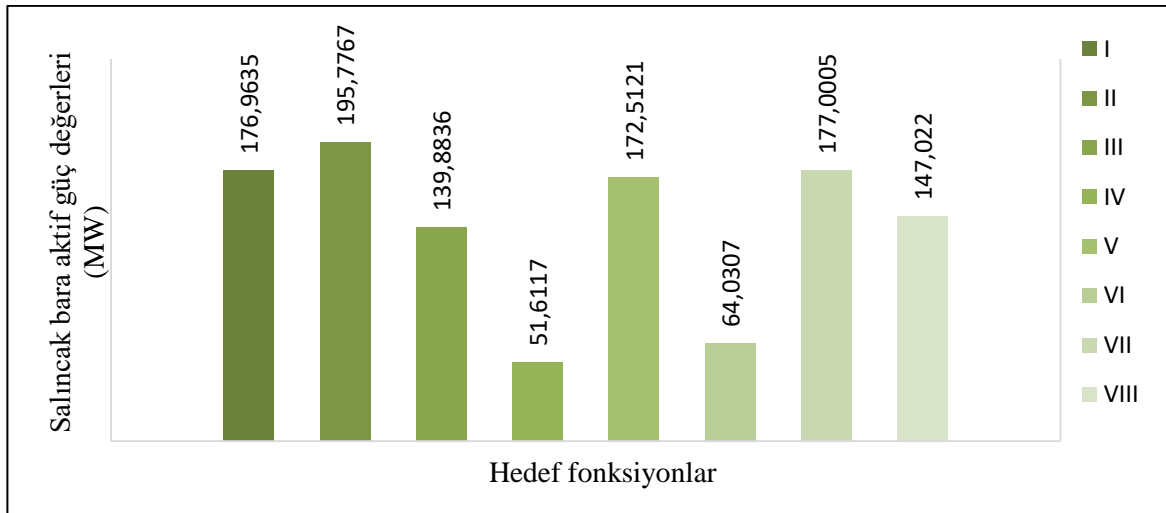
## 5.9. Optimize Edilen Hedef Fonksiyonların Durum Değişkenleri

Tezin bu bölümünde optimal güç akışının gerek şartı olan ve arama uzayındaki sonuçları kati surette kısıtlayan bağımlı değişkenlerin her bir durum için çıkış değerleri verilerek PSO ve SDA ile alınan sonuçların doğruluğu ve simülasyon çalışmasının gerçekleştirildiği IEEE 30 baralı sistemde yük akışının istenen şartları sağladığı kanıtlanmaktadır.

Yakıt maliyeti (D-I), vana etkili maliyet (D-II), kademeli fonksiyonlu maliyet (D-III), güç kaybı (D-IV), gerilim profili (D-V), salınım (D-VI), kararlılık (D-VII) ve arıza halinde kararlılık (D-VIII) olmak üzere her iki algoritma ile yapılan çalışmalardaki durum değişkenleri sonuçları tablolar halinde ve grafikler ile takip eden alt bölümde verilmiştir.

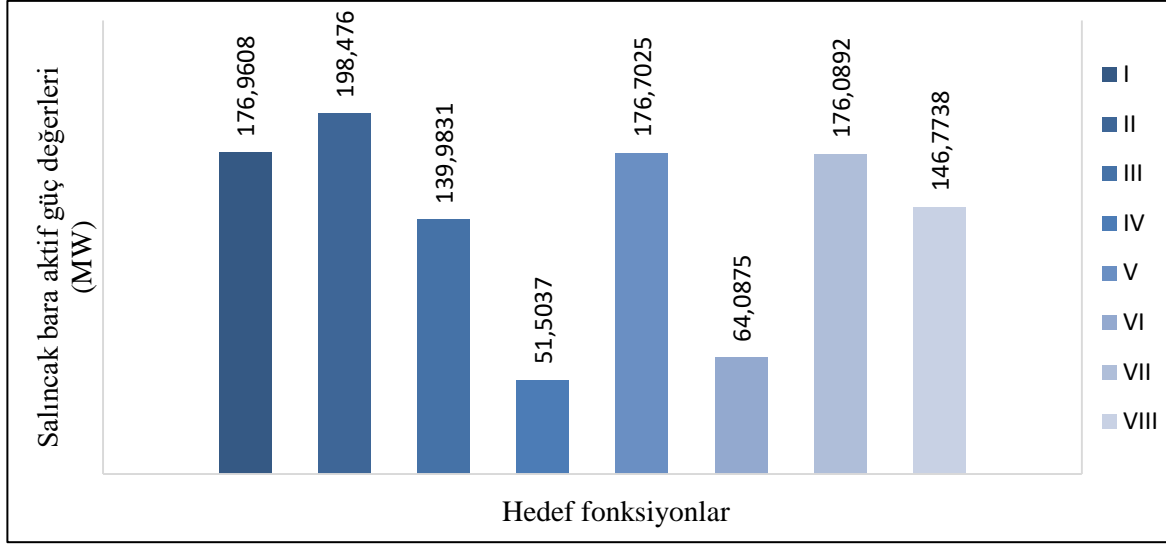
### 5.9.1. Referans bara aktif güç çıkışları

Güç sistemindeki yük akışında diğer generatörlerin ürettiği güç değerlerine göre talebi karşılamak için eksik kalan ve ihtiyaç duyulan miktarda güç üreten referans (salıncak) baranın hedef fonksiyon türlerine göre değerleri parçacık sürü eniyilemesi için Şekil 5.11'de ve su döngüsü için 5.12'deki grafiklerde görülmektedir.



Şekil 5.11. PSO algoritması ile hedef fonksiyonların optimizasyonunda salıncak bara aktif güçleri

Salıncak bara için izin verilen aktif güç aralığının 50 ile 200 MW (Bkz. Eş. 5.1), arasında olduğu dikkate alındığında optimal güç akışı için istenen koşul sağlanmış olmaktadır.



Şekil 5.12. SDA ile hedef fonksiyonların optimizasyonunda salıncak bara aktif güçleri

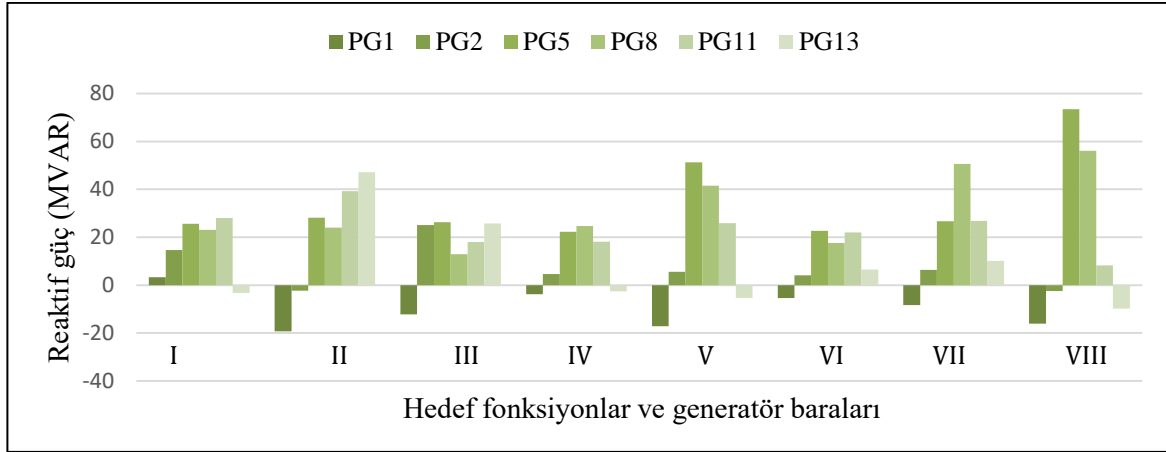
### 5.9.2. Generatör baraları reaktif güç çıkışları

Hedef fonksiyonun bağımlı değişkenlerinden olan reaktif güç çıkış değerlerinin, güç akışının optimal olarak nitelendirilebilmesi için limit değerler içinde kalması gerekmektedir. Aksi halde, OGA probleminin çözümünde uygulanan zorunlu kısıtlılık ihmal edilmiş olacak ve optimal yük akışının isterleri yerine getirilmemiş olacaktır.

Tez çalışmasında çözümlenen tüm durumlar için sınır değerler (Bkz. Eş. 5.2), arasında kalan reaktif güç çıkışları PSO algoritması için Çizelge 5.12’de, SDA için Çizelge 5.13’de listelenmiş, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de grafiksel olarak verilmiştir.

Çizelge 5.12. PSO algoritmasında generatörlerin reaktif güç çıkış değerleri

Bara no	Reaktif Güç	Optimize edilen hedef fonksiyonlar ve reaktif güç (MVAR)							
		D-I	D-II	D-III	D-IV	D-V	D-VI	D-VII	D-VIII
1	$Q_{G1}$	3,2225	-19,2557	-12,2158	-3,8313	-17,1448	-5,3440	-8,3276	-16,0566
2	$Q_{G2}$	14,6556	-2,3760	25,1058	4,6856	5,5388	4,1135	6,3534	-2,4329
5	$Q_{G5}$	25,5465	28,1351	26,2350	22,2419	51,2573	22,7244	26,6823	73,4628
8	$Q_{G8}$	23,0404	24,0626	12,9109	24,6846	41,4846	17,5221	50,5927	56,0478
11	$Q_{G11}$	28,0185	39,2408	17,9321	18,0977	25,8370	22,0237	26,7854	8,1837
13	$Q_{G13}$	-3,3023	47,1058	25,6769	-2,6001	-5,3469	6,5540	10,1352	-9,8773

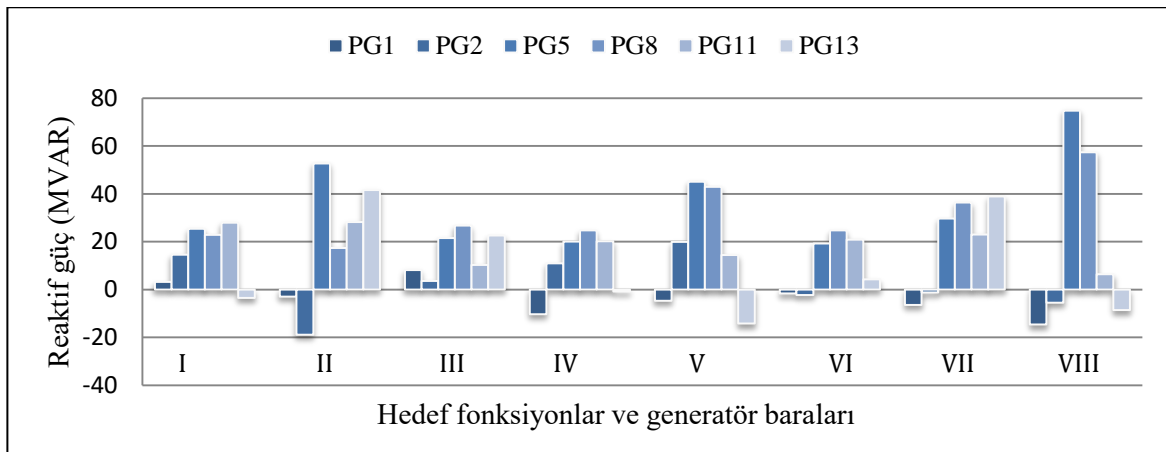


Şekil 5.13. PSO algoritması ile hedef fonksiyonların optimizasyonunda generatör baraları reaktif güç değerleri

Reaktif güç grafikleri PSO için Şekil 5.13 ve SDA için Şekil 5.14’de yer almaktadır.

Çizelge 5.13. SDA algoritmasında generatörlerin reaktif güç çıkış değerleri

Bara no	Reaktif güç	Optimize edilen hedef fonksiyonlar ve reaktif güç (MVAR)							
		D-I	D-II	D-III	D-IV	D-V	D-VI	D-VII	D-VIII
1	$Q_{G1}$	3,1951	-2,9642	8,1362	-10,2734	-4,6782	-1,6703	-6,4382	-14,6380
2	$Q_{G2}$	14,6183	-18,8749	3,6065	10,9907	19,8683	-2,2711	-1,2309	-5,5316
5	$Q_{G5}$	25,4582	52,7095	21,5706	20,0831	45,1030	19,2599	29,6374	74,7684
8	$Q_{G8}$	22,8438	17,3410	26,7414	24,7316	42,8832	24,7560	36,3522	57,4317
11	$Q_{G11}$	27,9870	28,1746	10,3267	20,1302	14,4428	20,9171	22,9541	6,3582
13	$Q_{G13}$	-3,4365	41,5564	22,5931	-0,7857	-14,2391	4,3035	38,8924	-8,6285



Şekil 5.14. SDA ile hedef fonksiyonların optimizasyonunda generatör baraları reaktif güç değerleri

### 5.9.3. Yük baraları gerilimleri

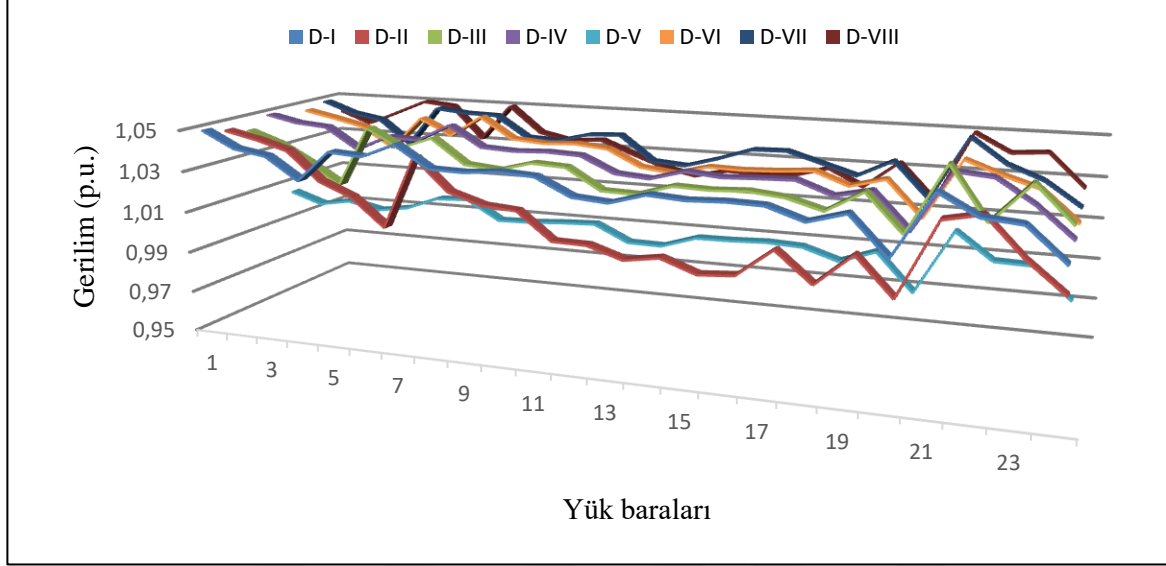
Yük akışının benzetim yöntemiyle çözüldüğü IEEE 30 baralı sistemde 24 adet yük barası bulunmaktadır ve her bir durum için güç akışı karakteristiğine bağlı olarak bu baralarda p.u. biriminde gerilim oluşmaktadır. Bir yük barasının bile, limit değerler olan 0,95 p.u. değerinden daha az ya da 1,05 p.u. (Bkz. Eş. 5.4), değerinden daha fazla gerilimle yüklenmesi halinde optimal güç akışı gerçekleşmemiş olacaktır. Tez çalışmasında 8 farklı hedef fonksiyon çözümünde de yük baraları gerilimi limitleri aşılmamış ve OGA'nın gerek şartı sağlanmıştır.

PSO algoritması ile yapılan OGA probleminin çözümünde 24 adet yük barasının hedef fonksiyon türüne göre değişen değerleri Çizelge 5.14'de listelenmiştir.

Çizelge 5.14. PSO algoritmasında yük baraları gerilimleri

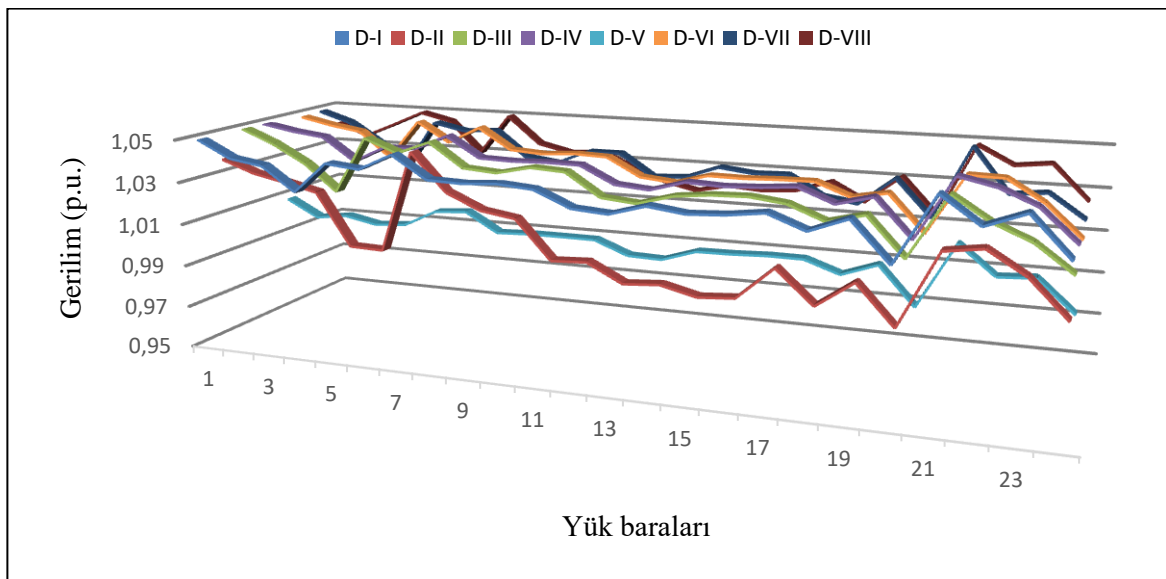
Sıra no	Yük barası	Optimize edilen hedef fonksiyon ve gerilim değerleri (p.u.)							
		D-I	D-II	D-III	D-IV	D-V	D-VI	D-VII	D-VIII
1	V <sub>L3</sub>	1,0498	1,0469	1,0440	1,04995	1,0059	1,0471	1,0499	1,0421
2	V <sub>L4</sub>	1,0418	1,0434	1,0385	1,0465	1,0006	1,0438	1,0442	1,0361
3	V <sub>L6</sub>	1,0392	1,0389	1,0299	1,0452	1,0033	1,0402	1,0414	1,0428
4	V <sub>L7</sub>	1,0286	1,0249	1,0201	1,0350	0,9999	1,0301	1,0292	1,0497
5	V <sub>L9</sub>	1,0434	1,0183	1,0492	1,0423	1,0023	1,0464	1,0492	1,0481
6	V <sub>L10</sub>	1,0423	1,0049	1,0406	1,0416	1,0084	1,0385	1,0476	1,0314
7	V <sub>L12</sub>	1,0490	1,0402	1,0463	1,0498	1,0092	1,0490	1,0472	1,0498
8	V <sub>L14</sub>	1,0388	1,0248	1,0347	1,0401	0,9998	1,0387	1,0367	1,0366
9	V <sub>L15</sub>	1,0384	1,0197	1,0332	1,0392	1,0002	1,0374	1,0360	1,0331
10	V <sub>L16</sub>	1,0398	1,0184	1,0376	1,0399	1,0013	1,0382	1,0400	1,0345
11	V <sub>L17</sub>	1,0388	1,0055	1,0367	1,0392	1,0020	1,0366	1,0408	1,0282
12	V <sub>L18</sub>	1,0309	1,0051	1,0269	1,0317	0,9942	1,0286	1,0285	1,0222
13	V <sub>L19</sub>	1,0296	0,9997	1,0264	1,0304	0,9939	1,0266	1,0272	1,0188
14	V <sub>L20</sub>	1,0344	1,0023	1,0315	1,0350	0,9993	1,0309	1,0319	1,0225
15	V <sub>L21</sub>	1,0333	0,9962	1,0309	1,0334	0,9995	1,0305	1,0375	1,0216
16	V <sub>L22</sub>	1,0340	0,9974	1,0317	1,0341	1,0002	1,0312	1,0379	1,0227
17	V <sub>L23</sub>	1,0336	1,0106	1,0300	1,0346	0,9994	1,0325	1,0329	1,0273
18	V <sub>L24</sub>	1,0281	0,9965	1,0253	1,0285	0,9941	1,0263	1,0279	1,0191
19	V <sub>L25</sub>	1,0330	1,0115	1,0351	1,0322	1,0002	1,0308	1,0363	1,0324
20	V <sub>L26</sub>	1,0156	0,9937	1,0177	1,0148	0,9822	1,0134	1,0189	1,0150
21	V <sub>L27</sub>	1,0446	1,0294	1,0497	1,0431	1,0127	1,0423	1,0499	1,0492
22	V <sub>L28</sub>	1,0354	1,0329	1,0256	1,0416	1,0003	1,0361	1,0380	1,0404
23	V <sub>L29</sub>	1,0339	1,0154	1,0439	1,0309	0,9998	1,0309	1,0314	1,0417
24	V <sub>L30</sub>	1,0190	1,0016	1,0271	1,0167	0,9852	1,0163	1,0199	1,0256

Çizelge 5.14 incelendiğinde 1., 5., 7. ve 21. sıra numaralı  $V_{L3}$ ,  $V_{L9}$  ve  $V_{L12}$ ,  $V_{L12}$  baralarının bazı eniyileme durumları için limit değere yaklaştıkları ancak izin verilen aralıkta kaldıkları görülmekte olup yük baralarının sınır değerlere yaklaşmaları, en uygun değerli çözümün elde edilebilmesinin bir sonucudur.



Şekil 5.15. PSO algoritmasında yük baraları gerilimlerinin hedef fonksiyona göre değişimi

Su döngüsü kullanılarak güç akışı eniyilemesi yapılan hedef fonksiyonların yük bara gerilimlerini gösteren grafik ise Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16. SDA'da yük baraları gerilimlerinin hedef fonksiyona göre değişimi

Yük baraları çıkış gerilimlerinin yer aldığı Çizelge 5.15 değerlendirildiğinde, en düşük değer, gerilim profili iyileştirme durumunda alınan  $V_{L26}$  barasının 0,9823 p.u. değeri iken tüm durumlar için ortalama gerilim 1,0273 p.u. olmuştur. Parçacık sürü eniyilemesine benzer şekilde yine sınır değere üst limitten birkaç yük barası yaklaşmış olmasına karşın hiçbir bara değeri limit ihlaline sebebiyet vermemiştir.

Çizelge 5.15. SDA algoritmasında yük baraları gerilimleri

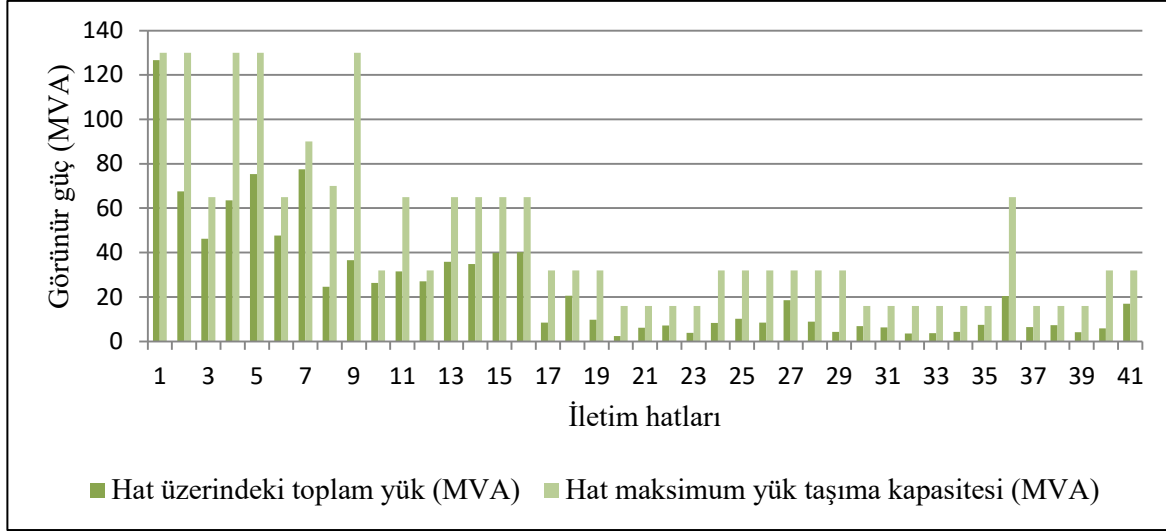
Sıra no	Yük barası	Optimize edilen hedef fonksiyonlar ve gerilim değerleri (p.u.)							
		D-I	D-II	D-III	D-IV	D-V	D-VI	D-VII	D-VIII
1	$V_{L3}$	1,0499	1,0377	1,04999	1,04998	1,0085	1,0486	1,0493	1,0408
2	$V_{L4}$	1,0420	1,0321	1,0435	1,0471	1,0002	1,0453	1,0444	1,0349
3	$V_{L6}$	1,0394	1,0288	1,0350	1,0452	1,0022	1,0429	1,0346	1,0417
4	$V_{L7}$	1,0287	1,0252	1,0224	1,0343	0,9990	1,0307	1,0236	1,0488
5	$V_{L9}$	1,0436	1,0007	1,0490	1,0420	1,0002	1,0495	1,0467	1,0451
6	$V_{L10}$	1,0426	1,0002	1,0430	1,0423	1,0081	1,0402	1,0434	1,0293
7	$V_{L12}$	1,0491	1,0472	1,0491	1,0494	1,0093	1,0484	1,0445	1,0494
8	$V_{L14}$	1,0390	1,0299	1,0381	1,0399	1,0001	1,0384	1,0321	1,0361
9	$V_{L15}$	1,0386	1,0228	1,0369	1,0394	1,0008	1,0373	1,0300	1,0324
10	$V_{L16}$	1,0400	1,0203	1,0404	1,0399	1,0008	1,0384	1,0367	1,0334
11	$V_{L17}$	1,0391	1,0026	1,0395	1,0397	1,0007	1,0378	1,0368	1,0264
12	$V_{L18}$	1,0312	1,0034	1,0290	1,0318	0,9944	1,0292	1,0262	1,0208
13	$V_{L19}$	1,0300	0,9951	1,0275	1,0304	0,9939	1,0275	1,0271	1,0172
14	$V_{L20}$	1,0347	0,9963	1,0320	1,0351	0,9992	1,0320	1,0330	1,0207
15	$V_{L21}$	1,0337	0,9923	1,0337	1,0343	0,9994	1,0318	1,0311	1,0195
16	$V_{L22}$	1,0344	0,9935	1,0342	1,0350	1,0001	1,0324	1,0316	1,0206
17	$V_{L23}$	1,0341	1,0083	1,0323	1,0364	1,0000	1,0326	1,0223	1,0261
18	$V_{L24}$	1,0285	0,9933	1,0258	1,0300	0,9943	1,0264	1,0199	1,0174
19	$V_{L25}$	1,0334	1,0052	1,0300	1,0343	1,0003	1,0295	1,0332	1,0309
20	$V_{L26}$	1,0160	0,9873	1,0125	1,0169	0,9823	1,0120	1,0158	1,0134
21	$V_{L27}$	1,0449	1,0213	1,0411	1,0456	1,0128	1,0401	1,04999	1,0479
22	$V_{L28}$	1,0357	1,0237	1,0307	1,0419	0,9994	1,0397	1,0292	1,0394
23	$V_{L29}$	1,0342	1,0136	1,0237	1,0349	1,0004	1,0298	1,0310	1,0413
24	$V_{L30}$	1,0193	0,9970	1,0116	1,0201	0,9856	1,0147	1,0197	1,0248

#### 5.9.4. İletim hatları görünür güç yüklenme değerleri

Güç sistemlerinde generatör ve yük baraları arasındaki güç akışını sağlayan hatların taşıyabilecekleri ve görünür güç olarak belirlenen yük kapasiteleri vardır (Bkz. Çizelge 3.3). Diğer kontrolsüz değişkenler gibi, iletim hatlarının da kısıt olarak verilen maksimum taşıma kapasitelerini aşmamaları OGA'nın yapılabilmesini mümkün hale getirecektir.

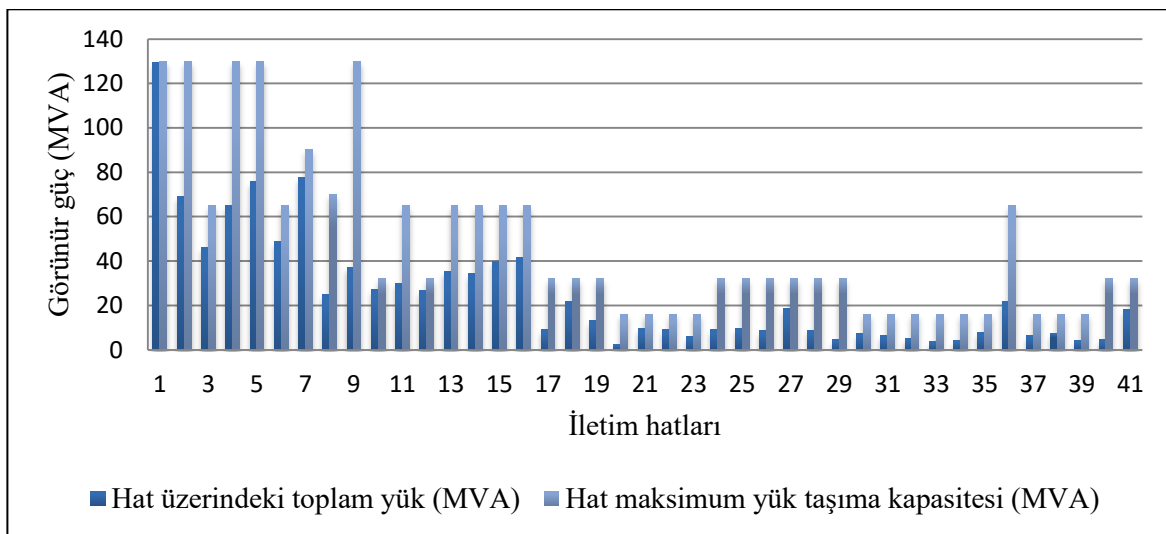
Çizelge 5.16. PSO algoritmasında iletim hatlarının taşıdıkları görünür güçler

İletim hattı	Optimize edilen hedef fonksiyon ve iletim hattı yükleri (MVA)							
	D-I	D-II	D-III	D-IV	D-V	D-VI	D-VII	D-VIII
$S_{L1}$	115,0032	126,6392	90,5010	26,4976	113,3441	36,7520	115,1387	83,8602
$S_{L2}$	62,0963	67,5570	50,0996	25,2798	60,1672	27,5020	62,0626	64,4223
$S_{L3}$	32,7202	35,1447	27,3968	19,9370	31,3265	19,1075	32,7290	46,1856
$S_{L4}$	58,0985	63,4686	46,7062	22,6386	56,4034	24,7159	58,2750	60,5092
$S_{L5}$	62,9857	64,6738	57,9960	39,2600	64,6164	38,9547	63,0891	75,2966
$S_{L6}$	44,2388	47,6651	36,4201	25,5811	43,0949	24,8427	44,4724	Arızalı
$S_{L7}$	51,2162	56,3224	41,2565	25,4404	53,5823	26,1548	52,2735	77,4470
$S_{L8}$	13,1507	11,6699	15,6569	7,2255	19,5027	7,6209	12,8960	24,6052
$S_{L9}$	34,7575	34,0636	36,5498	28,8087	35,3018	29,1071	35,4530	27,7296
$S_{L10}$	11,6412	22,6447	12,2373	2,4256	15,7255	8,4634	22,1754	26,2773
$S_{L11}$	29,3445	25,9630	15,5732	14,4709	31,5512	11,5994	28,2018	14,4693
$S_{L12}$	15,6500	21,9214	13,2306	8,5441	22,9344	7,5022	27,0685	10,6902
$S_{L13}$	28,9920	29,8040	25,5740	33,9458	27,7121	35,8035	28,0223	21,0476
$S_{L14}$	30,1095	30,3879	34,1855	32,7523	30,2154	33,7486	30,2061	34,8138
$S_{L15}$	33,4220	34,2025	27,8349	11,4014	31,9733	9,7041	30,1806	39,9070
$S_{L16}$	12,5345	37,3857	29,6710	40,2225	15,7169	40,1848	15,9348	21,7235
$S_{L17}$	7,53194	8,4266	7,5615	8,1117	7,4693	8,1585	7,4522	8,2627
$S_{L18}$	17,8362	19,8483	17,3476	20,5233	18,0770	20,4998	17,3252	19,8519
$S_{L19}$	7,29855	8,7685	6,6760	9,7054	7,3905	9,7584	6,7939	9,6779
$S_{L20}$	1,67439	1,9436	1,3096	2,4172	1,9492	2,3320	1,4774	1,8536
$S_{L21}$	3,62578	4,7228	2,9762	6,2254	4,0499	6,1526	3,4721	5,6179
$S_{L22}$	5,85887	6,6049	5,4733	7,0477	5,8346	7,1332	5,6418	7,1250
$S_{L23}$	2,59342	3,2220	2,3307	3,8828	2,7948	3,8541	2,3463	3,7267
$S_{L24}$	7,83229	6,8852	8,3292	7,1115	8,2116	6,7590	7,9741	6,4157
$S_{L25}$	9,21641	9,3454	9,5757	7,9885	9,2163	7,9392	10,1618	8,1937
$S_{L26}$	5,85169	6,0432	6,5280	3,4024	7,7238	3,1869	8,5038	4,5027
$S_{L27}$	16,5232	18,5902	17,0086	16,4675	16,4233	16,3646	17,2178	16,6508
$S_{L28}$	7,79935	8,8316	8,0463	7,8475	7,7685	7,7840	8,2167	7,7241
$S_{L29}$	2,91345	2,4175	3,0201	2,6369	2,7748	2,8219	2,0102	4,2348
$S_{L30}$	4,86527	6,4097	4,6310	6,8532	5,3115	6,8470	4,5469	6,0284
$S_{L31}$	5,52341	6,3271	5,8738	6,0845	5,5833	6,0154	6,1416	5,1441
$S_{L32}$	2,10089	2,8498	1,7850	3,5964	2,0436	3,6156	1,8123	3,2863
$S_{L33}$	1,69587	2,0905	2,6607	1,8215	1,7717	1,9746	2,3542	3,6836
$S_{L34}$	4,25982	4,2619	4,2595	4,2599	4,2648	4,2601	4,2594	4,2599
$S_{L35}$	5,93907	6,2840	6,8251	4,8254	6,0473	5,0599	6,6058	7,4796
$S_{L36}$	18,9922	20,1764	18,9181	17,0373	19,2255	17,1160	20,4338	19,3416
$S_{L37}$	6,21944	6,4076	6,4495	6,1960	6,2021	6,2061	6,3564	6,3327
$S_{L38}$	7,10940	7,2803	7,0622	7,1311	7,1468	7,1195	7,2547	6,9610
$S_{L39}$	3,99133	3,7520	4,1955	3,9374	3,9317	3,9662	3,7639	4,1953
$S_{L40}$	3,55354	1,8347	5,8412	4,4228	2,6659	4,9644	3,3096	3,6153
$S_{L41}$	16,0957	16,9647	14,4191	12,3580	15,7450	12,6730	15,9429	15,2664



Şekil 5.17. PSO algoritmasında iletim hatlarının hedef fonksiyon bazında taşıdığı görünür güçler

İletim hatlarının yüklenmeleri her hedef fonksiyon çözümlemesi için yapılan güç akışına göre farklılık göstermektedir ve bu durum Çizelge 5.16 ve Çizelge 5.17’de görülmektedir. 41 hattın her biri için sekiz ayrı durumda taşıdıkları en yüksek görünür güç değerleri seçilmiş ve kapasite limitleri ile mukayeseli grafikleri PSO algoritması için Şekil 5.17’de, SDA için Şekil 5.18’de verilmiştir. Bu grafiklerde de görüldüğü üzere, iletim hatları kapasitelerinin üzerinde güç taşımamıştır ve optimal güç akışının gerek şartını yerine getirmiş bulunmaktadır.



Şekil 5.18. SDA’da iletim hatlarının hedef fonksiyon bazında taşıdığı görünür güçler

Çizelge 5.17. SDA algoritmasında iletim hatlarının taşıdıkları görünür güçler

İletim hattı	Optimize edilen hedef fonksiyon ve iletim hattı yükleri (MVA)							
	D-I	D-II	D-III	D-IV	D-V	D-VI	D-VII	D-VIII
$S_{L1}$	115,0000	129,4912	89,9152	27,3784	115,7430	36,6287	114,3549	83,4103
$S_{L2}$	62,0947	69,0576	50,3228	25,3631	61,5412	27,5580	61,9006	64,3781
$S_{L3}$	32,7182	36,1558	27,6478	19,9251	32,4835	19,3674	33,0498	46,1642
$S_{L4}$	58,0986	65,0349	46,9203	22,5773	57,4022	24,7601	58,1950	60,4707
$S_{L5}$	62,9825	68,9196	57,9453	39,1713	64,1137	38,7523	63,1008	75,5856
$S_{L6}$	44,2417	48,6434	36,4181	25,5820	43,6793	25,1434	43,9129	Arızalı
$S_{L7}$	51,2269	56,3739	41,2814	25,4412	53,1233	26,3002	53,0649	77,4565
$S_{L8}$	13,1294	18,5660	14,5812	6,7198	19,3014	6,4785	13,6559	24,8909
$S_{L9}$	34,7637	34,6210	37,1297	28,9961	34,8423	29,6370	35,3919	27,8663
$S_{L10}$	11,6924	22,1688	1,0249	2,3344	16,9642	2,2696	11,8641	27,3544
$S_{L11}$	29,4326	29,3233	14,0287	17,1439	25,6662	9,4783	25,2184	15,0097
$S_{L12}$	15,6231	12,2494	13,7831	10,6857	25,1751	7,8826	26,5951	10,5610
$S_{L13}$	28,9682	28,3481	21,6760	34,8819	18,5616	35,2788	24,7244	20,5231
$S_{L14}$	30,1148	27,3933	33,8532	32,6886	30,5246	34,2739	30,5653	34,3258
$S_{L15}$	33,3617	36,0649	27,8903	9,9501	39,9276	9,5035	37,9476	39,6413
$S_{L16}$	12,5711	41,3492	27,2871	40,1000	19,0563	40,0591	39,1406	21,2272
$S_{L17}$	7,5225	8,9612	7,5293	8,0705	7,3991	8,1319	7,5905	8,3103
$S_{L18}$	17,8301	21,8408	17,4222	20,5005	17,8899	20,5178	17,1800	19,9874
$S_{L19}$	7,2791	13,2486	6,6921	9,6318	7,1694	9,7156	6,5218	9,8852
$S_{L20}$	1,6874	2,4919	1,4065	2,4672	1,9560	2,3830	1,1847	1,8798
$S_{L21}$	3,6264	9,3921	2,9887	6,2214	3,6735	6,2369	3,0200	5,8030
$S_{L22}$	5,8480	9,0839	5,5807	7,0034	5,7071	7,0714	5,4757	7,2384
$S_{L23}$	2,5881	5,9523	2,2455	3,8312	2,6009	3,8459	2,8256	3,8335
$S_{L24}$	7,8506	5,7478	7,9669	7,1246	8,2047	6,9446	8,9849	6,2833
$S_{L25}$	9,2246	8,0757	9,6434	8,0295	9,3405	7,9923	9,6806	8,1254
$S_{L26}$	5,8518	6,1104	6,3705	3,6065	8,6607	3,4783	8,4160	4,2648
$S_{L27}$	16,5032	15,2559	17,0276	16,4028	16,3294	16,5864	18,5895	16,5838
$S_{L28}$	7,7914	7,0192	8,1453	7,8125	7,7301	7,9099	8,8480	7,6832
$S_{L29}$	2,9016	4,5403	2,0937	2,7823	2,7480	2,5398	2,3097	4,3347
$S_{L30}$	4,8578	7,4075	4,7246	6,9534	5,1394	6,8717	4,6164	6,0859
$S_{L31}$	5,5273	4,7691	6,2969	6,1011	5,6053	6,1242	6,4475	5,1305
$S_{L32}$	2,1035	5,0695	2,3157	3,5653	2,0412	3,6303	1,1139	3,4238
$S_{L33}$	1,6929	3,1596	1,2396	1,9202	1,8356	1,7586	3,5953	3,7433
$S_{L34}$	4,2598	4,2640	4,2603	4,2596	4,2648	4,2603	4,2598	4,2601
$S_{L35}$	5,9333	7,3750	5,5041	4,9972	6,1071	4,6798	7,7682	7,5321
$S_{L36}$	18,9881	19,6997	19,1919	16,9983	19,2746	16,7012	21,5455	19,3763
$S_{L37}$	6,2202	6,3446	6,2937	6,2176	6,2062	6,2294	6,3825	6,3709
$S_{L38}$	7,1089	7,0833	7,2287	7,1100	7,1381	7,1063	7,2653	6,9141
$S_{L39}$	3,9926	4,1205	3,7914	3,9886	3,9509	4,0054	3,7557	4,2619
$S_{L40}$	3,5783	3,2738	4,5310	4,4735	2,6526	4,4794	2,9017	3,7651
$S_{L41}$	16,0999	18,1569	13,9550	12,3759	15,9247	12,1989	16,6540	15,2763



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Güç sistemlerinde, yakıt ekonomisi, verimlilik ve en uygun işletme koşullarının sağlanmasının öneminin vurgulanmaya çalışıldığı bu tez çalışmasında, ülkemizde son yıllarda önem kazanmaya başlayan güç akışı probleminin sezgisel optimizasyon algoritmalarıyla çözümlenmesi ve bu alandaki akademik çalışmalar ile tutarlı sonuçların alınması amaçlanmıştır.

Bu amaca yönelik olarak 24 kontrollü, 72 kontrolsüz toplamda 96 değişkene sahip IEEE 30 baralı güç sistemi üzerinde OGA probleminin, birbirinden tamamen bağımsız sekiz ayrı hedef fonksiyon için Parçacık Sürü Optimizasyon ve Su Döngüsü Algoritmalarıyla çözümü yapılmıştır.

Her duruma özgü olarak belirlenen hedef fonksiyonlar ile OGA problemi çözülürken hem karar değişkenleri hem de durum değişkenleri bakımından giriş ve çıkış değerleri belirli sınırlar içerisinde olmalıdır. Bu koşul, güç akışı problemini kısıtlamalı ve karmaşık hale getirmektedir. Bu kısıtlılık halinin bir uzantısı olarak da araştırma uzayı ile buna bağlı olarak çözüm uzayı daralmaktadır.

Problemin bağımsız değişkenleri olarak adlandırılan ve izin verilen değer aralığında seçilen giriş parametrelerinin yanında, bağımlı değişkenler olan referans bara aktif gücü, generatör baraları reaktif güçleri, yük bara gerilimleri ve iletim hattı görünür güç yüklenmelerinden oluşan toplam 72 çıkış parametresi bir bütün halinde gerek şart ve isterleri sağladığı takdirde güç akışı optimal olarak gerçekleştirilmiş olacaktır.

Yakıt maliyeti optimizasyonu, aktif güç kaybının en aza indirgenmesi, yük baraları gerilim profilinin iyileştirilmesi, salınım miktarının azaltılması ve gerilim kararlılık seviyesinin yükseltilmesi için, parçacık sürü ve su döngüsü eniyileme teknikleriyle yapılan çalışmalarda literatür ile tutarlı ve kıyaslama yapılan algoritmalarından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Üç ayrı duruma göre optimizasyonu yapılan yakıt maliyeti açısından SDA, her üç hedef fonksiyon çözümünde PSO Algoritmasından daha iyi sonuç vermiştir. Aktif güç kaybının

minimum seviyeye indirildiği durumda ise PSO Algoritması, SDA'ya nazaran daha düşük değerde sonuç vermiştir. Yük baraları gerilimlerinin referans 1,0 p.u. değerine yaklaştırılmaya çalışılan gerilim profilinin iyileştirilmesinde ise SDA, PSO Algoritmasından daha uygun sonuç bulmuştur. Güç sistemindeki altı adet generatörün de sera gazı yayan türden yakıt ile üretim yaptığı kabul edilen ve salınım miktarının minimizasyonu amaçlanan durumda her iki algoritmanın çözümü de birbirine çok yakın olmakla birlikte, PSO Algoritması az bir farkla SDA'dan daha iyi sonuç bulmuştur.

Gerilim kararlılık seviyesinin artırılması için hedef fonksiyonun hem normal işletme hem de bir iletim hattının devre dışı kaldığı arıza halindeki koşullar altındaki optimizasyonunda, PSO Algoritması ile yapılan problem çözümünde SDA'dan daha iyi sonuç alınmıştır.

Karşılaştırmalardan da görüleceği üzere iki algoritma farklı durumlar için birbirlerine üstünlük sağlamıştır. bunun yanında, araştırmanın hedeflerinden biri olarak belirlenen doğruluk ve diğer çalışmalar ile tutarlılık hedefine ulaşılmış aynı zamanda referans alınan diğer sezgisel algoritmalarından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Gerek PSO Algoritması gerekse SDA ile yapılan çözümlerde hedef olarak belirlenen haricindeki diğer parametrelerde optimize edilen duruma göre değişiklikler görülmüştür. Örneğin yakıt maliyeti eniyilemesinde artış gösteren aktif güç kaybı miktarı, salınımın azaltılması durumunda azalış göstermektedir. Benzer şekilde yük bara gerilimlerindeki toplam sapsmalar vana-nokta etkili yakıt maliyeti optimizasyonunda, diğer durumlara kıyasla oldukça düşük seviyedir. Her bir durum için belirlenen amaç tekil ve belirlenen fonksiyonun çıkış değerini eniyilemek olduğundan, güç sistemi hedefe yönelik çalıştırılmakta ve fonksiyon sonuç değeri haricinde kalan diğer değerler değerlendirmelerin dışında kalmaktadır. Bu çalışmadaki sonuçlar ve nicelik yönünden artış-azalışlar OGA probleminin karakteristik özelliğidir ve çıkış verileri diğer çalışmalar ile de uyumlu olup çözümü de doğrulamaktadır.

OGA probleminin hedefe yönelik sonuçları değerlendirildiğinde, güç sistemlerinin istenen optimizasyon durumuna göre işletme koşullarının belirlendiği görülmektedir. Böylelikle, güç sistemlerinin verimli kullanılması ve güç sistem planlamasının yapılabilmesi mümkün olmaktadır.

Hedef fonksiyonlar çözümlenirken, güç akışının optimal olarak nitelendirilebilmesi için zorunlu koşul olan durum değişkenlerinin alt ve üst sınır değerler aralığında olması gerekliliği de yerine getirilmiştir. Bu şartın sağlandığı da, eniyilemesi gerçekleştirilen sekiz durumun her biri için algoritma bazında verilen çizelge halindeki sonuçlar ile kanıtlanmıştır.

Güç akışının en uygun halde gerçekleşmesi için yapılan çalışmalarda, standart IEEE baralarının yapıları değiştirilerek yeni koşullarda OGA probleminin çözümü de gerçekleştirilebilmektedir.

Günümüzde, fosil ve doğalgaz kaynaklı üretim tesisleri ile hidroelektrik santrallerin haricinde güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının da yaygınlaşması ile güç sistemleri farklı yapıdaki tesislerin bir arada bulunduğu bütünleşik bir hal almıştır.

Bunun yanında, sıklıkla amaca özgü tekil yapıda olan hedef fonksiyonlar, birden fazla durumun eşzamanlı olarak optimize edildiği biçimde de çözümlenebilmektedir. Örneğin, yakıt maliyeti ile birlikte aktif güç kaybı ve gerilim profili optimizasyonunun bileşik olarak tek bir hedef fonksiyonla çözülebilmesi de mümkündür.

Yaşadığımız çağın imkânları ve teknolojik gelişmeler neticesinde enerjiye duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Bu noktada, yakın gelecekte talep edilecek enerji miktarında artış olacağı bilinmekle birlikte bu talebi karşılayacak enerjinin de üretilmesi, kaliteli ve kesintisiz olarak arz edilmesi gerekecektir. Ülkemizde 2000-2016 yılları arasında elektrik enerjisinin %54,8 [34] oranına karşılık gelen kısmının doğalgaz ve ithal kömür gibi dışa bağımlı yakıt türleri ile üretildiği dikkate alındığında, yakıt maliyeti giderinin azaltılmasının ülke ekonomisi adına ne kadar önemli olduğu açıktır. Ayrıca, enterkonnekte sisteme dahil olan ülkemizde gerek yurt içi şebekede gerekse yurt dışı güç sistemlerinde enerjide kalite ve süreklilik bakımından OGA büyük öneme sahiptir.

Bu gelişmeler ve her daim ihtiyaç duyulacak elektrik enerjisinin en az maliyetle karşılanabilmesi için ülkemiz şebekesinde kullanılan güç sistemleri, gerçek çalışma koşulları baz alınarak benzetim yöntemiyle bir optimal güç akışı çalışması yapılabilir.

Bu çalışmaların yanında, kullanılmakta olan güç sistemine yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesi veya var olan kapasitelerinin artırılması, generatör ve yük bara sayılarının artırılması, iletim hatları sayısı ve taşıma kapasitelerinin değiştirilmesi halinde yeni durumda oluşacak yakıt maliyeti ile ilk durumdaki maliyetin karşılaştırmalı analizi yapılabilir. Elde edilecek sonuçlar değerlendirilerek, güç sistemlerinde en uygun koşullarda işletmeciliğin gerçekleştirilmesi sağlanabilir ve ihtiyaç duyulan enerjinin temini için güç sistem planlaması yapılabilir.



## KAYNAKLAR

1. Glimn, A.F., Kirchmayer, L. K., Peterson, V. R. and Stagg, G. W. (1956). Accuracy considerations in economic dispatching of power systems. *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 75(3), 1125-1137.
2. Shipley, R.B. and Hochdorf, M. (1956). Exact economic dispatch-digital computer solution. *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 75(3), 1147-1153.
3. Squires, R. B. (1960). Economic dispatch of generation directly from power system voltages and admittances. *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 79(3), 1235-1244.
4. Van Ness, J. E. (1959). Convergence of iterative load flow studies. *Transactions of the AIEE. Part III: Power Apparatus and Systems*, 78(4), 1590-1595.
5. Hale, H. W. and Goodrich, R. W. (1959). Digital computation of power flow-some new aspects, *Transactions of the AIEE. Part III: Power Apparatus and Systems*, 78(3), 919-923.
6. Van Ness, J. E. and Griffin, J. H. (1961). Elimination methods for load flow studies. *Transactions of the AIEE Part III: Power Apparatus and Systems*, 80(3), 299-302.
7. Carpentier, J. (1962). Contribution to the economic dispatch problem. *Bulletin de la Societe Francoise des Electriciens*, 3(8), 431-447.
8. Sun, D. I., Ashley, B., Brewer and B., Hughes, A. (1984). Optimal power flow by newton approach. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 103(10), 2864-2880.
9. Stott, B. and Alsac, O., (1974). Fast decoupled load flow. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 93(3), 859-869.
10. Mukherjee, P. K. and Dhar, R. N. (1974). Optimal load-flow solution by reduced-gradient method. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(6), 481-487.
11. Shoults, R. R. and Sun, D. T. (1982). Optimal power flow based on p-q decomposition. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 101(2), 397-405.
12. Santos, A., Deckmann, S. and Soares, S. (1988). A dual augmented lagrangian approach for optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(3), 1020 - 1025.
13. Olofsson, M., Andersson, G. and Söder, L. (1995). Linear programming based optimal power flow using second order sensitivities. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(3), 1691-1697.
14. Burchett, R. C., Happ, H. H., and Vierath, D. R. (1984). Quadratically convergent optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 103(11), 3267-3275.

15. Miranda, V. and Saraiva, J. T. (1992). Fuzzy modelling of power system optimal load flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(2), 843-849.
16. Kenarangui, R. and Seifi, A. (1994). Fuzzy power flow analysis. *Electric Power Systems Research*, 29(2), 105-109.
17. Lai, L. L., Ma, J. T., Yokoyama, R. and Zhao, M. (1997). Improved genetic algorithms for optimal power flow under both normal and contingent operation states. *Electrical Power and Energy Systems*, 19(5), 287-292.
18. Yuryevich, J. and Wong, K. P. (1999). Evolutionary programming based optimal power flow algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(4), 1245-1250.
19. Abido, M. A. (2004). *Multiobjective optimal power flow using strength pareto evolutionary algorithm*. 39th International Universities Power Engineering Conference, Bristol, United Kingdom.
20. Karaboga, D. and Baştürk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471.
21. Karaboga, D. and Baştürk, B. (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*, 8(1), 687-697.
22. Adaryani, M. R. and Karami, A. (2013). Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem. *Electrical Power and Energy Systems*, 53, 219-230.
23. Tang, W. J., Li, M. S., Wu, Q. H. and Saunders, J. R. (2008). Bacterial foraging algorithm for optimal power flow in dynamic environments. *IEEE Transactions On Circuits And Systems*, 55(8), 2433-2442.
24. Reddy, S. S. and Rathnam, C. S. (2016). Optimal power flow using glowworm swarm optimization. *Electrical Power and Energy Systems*, 80, 128-139.
25. Abatari, H. D., Abad, M. S. S. and Seifi, H. (2016). *Application of bat optimization algorithm in optimal power flow*. 24th Iranian Conference on Electrical Engineering, Shiraz, Iran.
26. Soares, J., Sousa, T., Vale, Z. A., Morais, H. and Faria, P. (2011). *Ant colony search algorithm for the optimal power flow problem*. IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, USA.
27. Duman, S., Güvenç, U., Sönmez, Y. and Yörükeren, N. (2012). Optimal power flow using gravitational search algorithm. *Energy Conversion and Management*, 59, 86-95.
28. Boucekara H. R. E. H., Abido, M. A. and Boucherma, M. (2014). Optimal power flow using teaching-learning-based optimization technique. *Electric Power Systems Research*, 114, 49-59.

29. Sivasubramani, S. and Swarup, K. S. (2011). Multi-objective harmony search algorithm for optimal power flow problem. *Electrical Power and Energy Systems*, 33, 745-752.
30. Erol, O. K. and Eksin, I. (2006). A new optimization method: Big bang–big crunch. *Advances in Engineering Software*, 37, 106–111.
31. Rao, C. V. G. K. and Yesuratnam, G. (2013). Optimal power flow with valve point loading effects of cost function and mixed-integer control variables using big-bang and big-crunch optimization. *Journal of Advanced Computer Science and Technology*, 2 (1), 1-8.
32. Nguyen, K. P. and Fujita, G. (2016). *Optimal power flow using self-learning cuckoo search algorithm*. IEEE International Conference on Power System Technology, Wollongong, Australia.
33. Sayah, S. and Zehar, K. (2008). Modified differential evolution algorithm for optimal power flow with non-smooth cost functions. *Energy Conversion and Management*, 49, 3036–3042.
34. İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Yerli ve ithal kaynaklı elektrik enerjisi üretiminin toplam Türkiye üretimi içindeki payı (2000-2016). URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.teias.gov.tr%2Ftr%2Fiii-elektrik-enerjisi-uretimi-tuketimi-kayıplar&date=2018-01-08>, Son Erişim Tarihi: 08.01.2018.
35. Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization*. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia.
36. Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995). *A new optimizer using particle swarm theory*. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan.
37. Shi, Y. and Eberhart, A. (1998). *Modified particle swarm optimizer*. IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, Anchorage, USA.
38. Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A. and Hamdi, M. (2012). Water cycle algorithm—a novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *International Journal Computers and Structures*, 110–111, 151–166.
39. Sadollah, A., Eskandar, H., Lee, H. M., Yoo, D. G. and Kim, J. H. (2016). Water cycle algorithm: a detailed standard code. *Software X*, 5, 37-43.
40. Sadollah, A., Eskandar, H., Bahreininejad, A. and Kim, J. H. (2015). Water cycle algorithm with evaporation rate for solving constrained and unconstrained optimization problems. *Applied Soft Computing*, 30, 58–71.
41. Zimmerman, R. D., Murillo-Sánchez, C. E. and Thomas, R. J. (2011). Matpower: steady-state operations, planning and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 12-19.

42. İnternet: Zimmerman, R. D., Murillo-Sanchez, E. C. and others. Matpower a Matlab power system simulation package. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.pserc.cornell.edu%2Fmatpower%2F&date=2017-12-21>, Son Erişim Tarihi: 21.12.2017.
43. Saadat, H. (1999). *Power system analysis*. New York: Mc Graw-Hill, 191-193.
44. Kothari, D. P., Nagrath, I. J. (2009). *Modern power system analysis*. (Third edition). New Delhi: Tata McGraw-Hill, 45,70,138.
45. İnternet: University of Notre Dame. Power systems analysis. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww3.nd.edu%2F%7Elemmon%2Fcourses%2Fee30372%2F&date=2018-01-08>, Son Erişim Tarihi: 08.01.2018.
46. Kurban, M. ve Filik, Ü. B. (2007). Türkiye'deki 22 baralı 380 kV 'luk güç sisteminin iki farklı yöntem kullanılarak ekonomik dağıtım analizi. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 78-86.
47. Grainger, J. J., Stevenson Jr., W. D. (1994). *Power system analysis*. (International editions). New York: Mc Graw-Hill, 25-26,141,170-171.
48. Meier, A. V. (2006). *Electric power systems*. New Jersey: John Wiley & Sons, 66.
49. Glover, J. D., Sarma, M. S. (2002). *Power system analysis and design* (Third edition). USA: Brooks/Cole, 275-276.
50. Tinney, W. F. and Hart, C. E. (1967). Power flow solution by newton's method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 86(11), 1449-1460.
51. Dommel, H. W. and Tinney, W. F. (1968). Optimal power flow solutions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 87(10), 1866-1876.
52. Alsaç, O. and Stott, B. (1974). Optimal load flow with steady-state security. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 93(3), 745-751.
53. İnternet: University of Washington. Power systems test case archive. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww2.ee.washington.edu%2Fresearch%2Fpstca%2F&date=2018-01-08> Son Erişim Tarihi: 08.01.2018.
54. Lee, K. Y., Park, Y. M. and Ortiz, J. L. (1985). A united approach to optimal real and reactive power dispatch. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 104(5), 1147-1153.
55. Çivicioğlu, P. (2013). Backtracking search optimization algorithm for numerical optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219, 8121-8144.
56. Hosseini, H., Shahbazian, M. and Takassi, M. A. (2014). The design of robust soft sensor using anfis network. *Journal of Instrumentation Technology*, 2(1), 9-16.
57. Bhattacharya, A. and Chattopadhyay, P.K. (2011). Application of biogeography-based optimization to solve different optimal power flow problems. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 5(1), 70-80.

58. Mohamed, A. A., Mohamed, Y. S., El-Gaafary, A. A. M. and Hemeida, A. M. (2017). Optimal power flow using moth swarm algorithm. *Electric Power Systems Research*, 142, 190-206.
59. Kumar, A. R. and Premalatha, L. (2015). Optimal power flow for a deregulated power system using adaptive real coded biogeography-based optimization. *Electrical Power and Energy Systems*, 73, 393–399.
60. Bouchekara, H. R. E. H. (2014). Optimal power flow using black-hole-based optimization approach. *Applied Soft Computing*, 24, 879–888
61. Decker, G. L. and Brooks, A. D. (1958). Valve point loading of turbines. *Electrical Engineering*, 77(6), 501.
62. Bai, W., Eke İ. and Lee, K. Y. (2017) An improved artificial bee colony optimization algorithm based on orthogonal learning for optimal power flow problem. *Control Engineering Practice*, 61, 163–172.
63. Abou El Ela, A. A., Abido, M. A and Spea, S. R. (2010) Optimal power flow using differential evolution algorithm. *Electric Power Systems Research*, 80, 878–885.
64. Ravi, C. N. and Rajan, C. C. A. (2013). Emission constraint optimal power flow using differential evolution. *International Journal of Computer Applications*, 61(13), 12-15.
65. Niknam, T., Narimani, M. R., Jabbari, M. and Malekpour, A. R. (2011). A modified shuffle frog leaping algorithm for multi-objective optimal power flow. *Energy*, 36(11), 6420-6432.
66. Abacı, K. and Yamaçlı, V. (2016). Differential search algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem. *Electrical Power and Energy Systems*, 79, 1–10.
67. Kessel, P. and Glavitsch, H. (1986). Estimating the voltage stability of a power system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1(3), 346–354.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARAMAN, Emin  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 27.05.1983, İstanbul  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (312) 309 05 15/4622  
e-mail : eminkaramantcdd@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Elektrik-Elektronik Müh.	2018
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi/Elektrik Müh.	2008
Lise	Bahçelievler Lisesi	2000

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-Halen	TCDD Genel Müdürlüğü	Mühendis

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

-

### Hobiler

Spor



*GAZİ GELECEKTİR..*