
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

DAĞITIM HATLARINDA OPTİMUM GÜÇ AKIŞI VE GERİLİM KARARLILIĞININ SAĞLANMASI İÇİN BİR OPTİMİZASYON TEKNİĞİ UYGULAMASI

Serkan İŞCAN

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2022

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Serkan İŞCAN

18/01/2022

DAĞITIM HATLARINDA OPTİMUM GÜÇ AKIŞI VE GERİLİM KARARLILIĞININ SAĞLANMASI İÇİN BİR OPTİMİZASYON TEKNİĞİ UYGULAMASI

(Doktora Tezi)

Serkan İŞCAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Gelişen teknoloji ve küresel nüfus artışı elektrik enerjisine olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Artan enerji talebine bağlı güç sistemlerinin planlı bir şekilde genişlemesi ve bara gerilim değerlerini belirli limitlerle sunması beklenir. Güç sistemlerinin kontrolsüz büyümesinin, sisteme ait güç kayıplarını, gerilim kararsızlığını ve hataları artırdığı bilinmektedir. Güç sistemlerinde iyi bilinen problemlerin başında gelen güç akışı, uzun yıllardır klasik matematiksel yöntemler kullanılarak çözümleri yapılan ve mevcut güç sisteminde en iyi güç akışını amaçlayan çalışma konusudur. Ancak klasik yöntemler bazı durumlarda başarılı olamamakta ve bu sebeple literatürde son yıllarda belirlenen kısıtlar çerçevesinde en iyi güç akışının sağlanabilmesi için meta-sezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Bu tez çalışması; güç sistemlerinde en iyi güç akışını gerçekleştirebilmek için meta-sezgisel algoritmalardan gri kurt optimizasyonu (GKO) algoritmasında tanımlanan kurt kolonisinin bireysel görev davranışlarını dikkate alarak, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmasının keşif ve kullanım kabiliyetinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Böylece yeni bir meta-sezgisel yaklaşım kullanılarak hibrit algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen hibrit PSO (HPSO) algoritmasının etkinliği, algoritma performanslarının ölçülmesinde çok sık kullanılan benchmark test fonksiyonları ile sınanmıştır. Daha sonra geliştirilen HPSO, klasik PSO ve GKO algoritmalarının performansı, aktif güç kayıplarının ve gerilim sapmasının azaltılmasının hedeflendiği iki amaç fonksiyonu tanımlanarak IEEE 30 ve 57-bara test sistemleri üzerinde güç akışı optimizasyonu yapılarak incelenmiştir. Optimizasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar, Newton-Raphson güç akışı analizi sonuçları referans alınarak değerlendirilmiştir. MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında temel durum ve yük artışı gibi farklı senaryolar, şönt reaktif güç kompansatörleri bağlanmadan ve bağlandıktan sonra analiz edilmiştir. Yapılan tüm benzetim çalışmalarında; geliştirilen HPSO algoritmasının güç sistemlerinin her çalışma koşulunda; güç kayıpları ve toplam gerilim sapması değerleri bakımından en üstün sonuçları ürettiği belirlenmiştir. Bunlara ilaveten IEEE 30-bara test sisteminde Pareto analizleri ile HPSO algoritmasının etkinliği doğrulanmıştır.

Bilim Kodu : 90513
Anahtar Kelimeler : Güç akışı, gerilim kararlılığı, güç sistemi, optimizasyon, HPSO
Sayfa Adedi : 172
Danışman : Doç. Dr. Orhan KAPLAN

AN APPLICATION OF OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR PROVIDING OPTIMUM POWER FLOW AND VOLTAGE STABILITY IN DISTRIBUTION LINES

(Ph. D. Thesis)

Serkan İŞCAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2022

ABSTRACT

Technology development and global population growth increase the demand for electrical energy each day. It is expected that the power systems due to the increasing energy demand will expand in a planned manner and present the bus voltage values with certain limits. It is known that uncontrolled growth of power systems increases system power losses, voltage instability and errors. Power flow, which is one of the well-known problems in power systems, has been the subject of study for many years. Power flow has been solved by using classical mathematical methods which aimed the optimal power flow in the existing power system. However, classical methods are not successful in some cases, and for this reason, it has been determined that meta-heuristic algorithms are used in order to provide optimal power flow within the framework of the constraints determined in the literature in recent years. This thesis study; In order to realize the optimal power flow in power systems, it aims to improve the exploration and exploitation capability of the particle swarm optimization (PSO) algorithm, taking into account the individual task behaviors of the wolf colony defined in the gray wolf optimization (GWO) algorithm. Thus, a hybrid algorithm was developed using a new meta-heuristic approach. The efficiency of the developed hybrid PSO (HPSO) algorithm has been tested with benchmark test functions, which are frequently used to measure algorithm performances. In addition to these, the performance of HPSO, classical PSO and GWO algorithms were investigated by defining two objective functions that aims to reduce active power losses and voltage deviation by optimizing power flow on the IEEE 30 and 57-bus test systems. Obtained results were evaluated with reference to the Newton-Raphson power flow analysis results. In the simulation studies using MATLAB software, different scenarios such as base loaded and load increase were analyzed before and after connecting the shunt reactive power compensators. In every condition of power systems simulation studies; the developed HPSO algorithm has the best results in terms of power losses and total voltage deviation values. In addition, the efficiency of the HPSO algorithm was verified by Pareto analysis in the IEEE 30-bus test system.

Science Code : 90513
Key Words : Power flow, voltage stability, power system, optimization, HPSO
Page Number : 172
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Orhan KAPLAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince her daim değerli olduğumu hissettiren, desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Orhan KAPLAN'a öncelikle teşekkür ederim. Yoğun çalışmalarım boyunca yanımda olan annem, babam, eşim ve kendilerine yeterli zaman ayıramadığım biricik kızlarım Beren ve Ceren'e; çalışmalarım sırasında güç sistemleri alanında sürekli olumlu katkılarını sunan kıymetli hocalarım Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR, Prof. Dr. Şevki DEMİRBAŞ hocalarıma; algoritma çalışmaları ve yayın hazırlıklarımda profesyonel tecrübelerini aktaran değerli hocam Prof. Dr. Hamit ERDEM'e; çalışmalarım süresince fikir alışverişinde bulunduğum kıymetli meslektaşım Dr. Öğr. Üyesi Gürcan LOKMAN'a; tez yazımı süresince önemli katkılarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü çalışanı değerli akademik ve idari personeline; çalışmalarımın başından sonuna kadar küçük ya da büyük katkılar sağlayan isimlerini sayamadığım değerli dost ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xviii

1. GİRİŞ 1

2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK 17

2.1. Giriş 17

2.2. Kararlılık Tanımı 17

2.3 Güç Sistemlerinde Kararlılığın Sınıflandırılması 18

2.3.1. Rotor açısı kararlılığı 19

2.3.2. Frekans kararlılığı 20

2.3.3. Gerilim kararlılığı 21

2.4. Tarihte Yaşanan Önemli Gerilim Kararlılığı Sorunları 24

3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞ ANALİZİ 27

3.1. Giriş 27

3.2. AA Güç Akışının Tanımlanması 30

3.3. Güç Sistemlerinde Bara Çeşitleri 31

3.3.1. Salınım barası (V-δ bara) 32

3.3.2. Yük barası (P-Q bara) 33

Sayfa

3.3.3. Üretim barası (P-V bara) 33

3.4. İletim Hattının Yapısı 33

3.5. Bara Admitans Matrisi 36

3.6. Güç Sisteminde Güç Eşitlikleri 40

3.7. Güç Akışı Probleminin Klasik Metotlar Kullanılarak Çözümü 42

3.7.1. Newton-Raphson metodu 42

3.7.2. Gauss-Seidel metodu 44

3.7.3. Fast-Decoupled metodu 45

4. GÜÇ SİSTEMİNDE META-SEZGİSEL ALGORİTMALAR KULLANILARAK GÜÇ AKIŞI PROBLEMİNİN OPTİMİZASYONU 47

4.1. Giriş 47

4.2. Problemin Belirlenmesi 48

4.2.1. Problemin matematiksel olarak tanımlanması 51

4.2.2. Amaç fonksiyonları 51

4.2.3. Kısıtlar 52

4.3. Güç Akışı Probleminin Optimizasyonunda Kullanılan Meta-Sezgisel Algoritmalar 53

4.3.1. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması 54

4.3.2. Gri kurt optimizasyonu (GKO) algoritması 56

5. GELİŞTİRİLEN HİBRİT OPTİMİZASYON ALGORİTMASI 59

5.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar 59

5.2. Hibrit Parçacık Sürü Optimizasyonu (HPSO) Algoritması 60

5.3. Hibrit Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasının Test edilmesi 62

6. META-SEZGİSEL ALGORİTMALARIN GÜÇ SİSTEMİNE UYGULANMASI 69

Sayfa

6.1. Giriş 69

6.2. IEEE Bara Test Sistemleri 72

6.2.1. IEEE 30-bara test sistemi 72

6.2.2. IEEE 57-bara test sistemi 77

6.3. IEEE Bara Test Sistemlerinde Güç Akışı Optimizasyon Uygulamaları 83

6.3.1. IEEE 30-Bara test sisteminin temel yüklü güç akışı optimizasyonu 84

6.3.2. IEEE 30-Bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları 97

6.3.3. IEEE 30-Bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları 111

6.3.4. IEEE 30-Bara test sisteminde yük artışı durumunun algoritmaların ürettiği güç kaybı ve gerilim kararlılığına olan etkileri 125

6.3.5. IEEE 57-Bara test sisteminin temel yüklü güç akışı optimizasyonu 128

6.4. IEEE 30-Bara Test Sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait Pareto En İyi Analizleri 143

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 151

KAYNAKLAR 159

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Bara tipleri ve özellikleri 33

Çizelge 4.1. Güç sistemleri güç akışı optimizasyonunda kullanılan teknikler 48

Çizelge 4.2 PSO sözde kodu 56

Çizelge 4.3. GKO sözde kodu 58

Çizelge 5.1. HPSO sözde kodu 62

Çizelge 5.2. Benchmark test fonksiyonları 63

Çizelge 5.3. PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait benchmark testi parametre değerleri 66

Çizelge 5.4. PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile benchmark test fonksiyonları çözümleri 67

Çizelge 6.1. IEEE 30-bara test sistemine ait parametreler 74

Çizelge 6.2. IEEE 30-bara test sistemine ait hat parametreleri 75

Çizelge 6.3. IEEE 30-bara test sistemi üretim birimlerinin aktif ve reaktif güç limitleri 76

Çizelge 6.4. IEEE 30-bara test sistemi baralardaki aktif ve reaktif yükler 76

Çizelge 6.5. IEEE 57-bara test sistemine ait parametreler 78

Çizelge 6.6. IEEE 57-bara test sistemine ait hat parametreleri 80

Çizelge 6.7. IEEE 57-bara test sistemi üretim birimlerinin aktif ve reaktif güç limitleri 82

Çizelge 6.8. IEEE 57-bara test sistemi baralardaki aktif ve reaktif yükler 82

Çizelge 6.9. PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon parametre değerleri 83

Çizelge 6.10. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim bilgileri 85

Çizelge 6.11. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilimleri faz açısı bilgileri 87

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.12. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif ve reaktif güç bilgileri 90

Çizelge 6.13. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları 97

Çizelge 6.14. IEEE 30-bara test sistemi baralardaki %25 artırımlı aktif ve reaktif yük bilgileri..... 97

Çizelge 6.15. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim bilgileri..... 99

Çizelge 6.16. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim faz açısı bilgileri 101

Çizelge 6.17. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif ve reaktif güç bilgileri..... 104

Çizelge 6.18. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artırımlı PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları..... 111

Çizelge 6.19. IEEE 30-bara test sistemi baralardaki %50 artırımlı aktif ve reaktif yükler 112

Çizelge 6.20. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %50 yük artırımlı RGK'sız gerilim bilgileri 113

Çizelge 6.21. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %50 yük artırımlı ve RGK'sız gerilim faz açısı bilgileri ... 115

Çizelge 6.22. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %50 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif ve reaktif güç bilgileri 118

Çizelge 6.23. IEEE 30-bara test sistemi %50 yük artırımlı RGK'lı ve RGK'sız PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları..... 125

Çizelge 6.24. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim bilgileri..... 129

Çizelge 6.25. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilimleri faz açısı bilgileri 132

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.26. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif ve reaktif güç bilgileri 136

Çizelge 6.27. IEEE 57-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları 143

Çizelge 7.1. IEEE 30-bara test sistemi temel yük, %25 ve %50 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon performansları 153

Çizelge 7.2. Temel yüklü IEEE 30-bara test sistemi NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının literatürdeki çalışmalarla verimliliklerinin karşılaştırılması 156

Çizelge 7.3. Temel yüklü IEEE 57-bara test sistemi NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının literatürdeki çalışmalarla verimliliklerinin karşılaştırılması 156

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 2.1.	Güç sistemlerine ait kararlılık çeşitleri	19
Şekil 2.2.	İki baralı iletim hattına ait tek hat şeması	22
Şekil 2.3.	Güç iletim hattı için a) P-V ve b) Q-V eğrileri	23
Şekil 3.1.	İletim hattına ait seri empedans ve şönt admitans şeması	34
Şekil 3.2.	Güç sistemini meydana getiren elemanların çeşitli diyagramlarda kullanılan eşdeğer devreleri ve standart modelleri	35
Şekil 3.3.	5 Baralı güç sistemine ait tek hat şeması	37
Şekil 3.4.	pq bara arası güç akışı şeması	41
Şekil 3.5.	Güç dağıtım sistemlerinin kontrol stratejileri	46
Şekil 4.1.	PSO'da parçacığın iki boyuttaki vektörel hareketi	55
Şekil 4.2.	Gri kurt topluluğunun 2 boyutlu avlanma stratejisi	58
Şekil 5.1.	HPSO vektör diyagramı	61
Şekil 6.1.	Güç sisteminin güç akışı optimizasyon uygulamasına ait akış şeması	70
Şekil 6.2.	IEEE 30-bara test sistemine ait tek hat şeması	73
Şekil 6.3	IEEE 57-bara test sistemine ait tek hat şeması	77
Şekil 6.4.	IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği	86
Şekil 6.5.	IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği	87
Şekil 6.6.	IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarında bara gerilimlerine ait faz açısı grafiği	89
Şekil 6.7.	IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait bara gerilimlerine ait faz açısı grafiği	89

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.8. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif güç değerleri grafiği 91

Şekil 6.9. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen reaktif güç değerleri grafiği 92

Şekil 6.10. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı toplam aktif güç kaybı değerleri 92

Şekil 6.11. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı toplam reaktif güç kaybı değerleri 93

Şekil 6.12. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı gerilim sapması değerleri 94

Şekil 6.13. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı CPU süre kullanımı değerleri 95

Şekil 6.14. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'lı ve RGK'sız bellek kullanımı değerleri 95

Şekil 6.15. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği 100

Şekil 6.16. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği 101

Şekil 6.17. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açısı grafiği 103

Şekil 6.18. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açısı grafiği 103

Şekil 6.19. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif güç değerleri grafiği 105

Şekil 6.20. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı üretilen reaktif güç değerleri grafiği 106

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.21. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı toplam aktif güç kaybı değerleri grafiği 106

Şekil 6.22. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı toplam reaktif güç kaybı değerleri grafiği 107

Şekil 6.23. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı gerilim sapması değerleri..... 108

Şekil 6.24. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı CPU süre kullanımı değerleri 109

Şekil 6.25. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı bellek kullanımı değerleri..... 109

Şekil 6.26. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği 114

Şekil 6.27. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği 115

Şekil 6.28. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait bara gerilimleri faz açısı grafiği..... 117

Şekil 6.29. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait bara gerilimlerine faz açısı grafiği..... 117

Şekil 6.30. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif güç değerleri grafiği 119

Şekil 6.31. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı üretilen reaktif güç değerleri grafiği 120

Şekil 6.32. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı toplam aktif güç kaybı değerleri 120

Şekil 6.33. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı toplam reaktif güç kaybı değerleri 121

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.34. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı gerilim sapması değerleri 122

Şekil 6.35. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı CPU süre kullanım değerleri 123

Şekil 6.36. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artırımlı RGK'lı ve RGK'sız bellek kullanımı değerleri 123

Şekil 6.37. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız yük artırımlı toplam aktif güç kaybı değerleri 126

Şekil 6.38. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'lı yük artırımlı toplam aktif güç kaybı değerleri 126

Şekil 6.39. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız yük artırımlı bara gerilim sapması değerleri 127

Şekil 6.40. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'lı yük artırımlı bara gerilim sapması değerleri 128

Şekil 6.41. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği 131

Şekil 6.42. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği 132

Şekil 6.43. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarında bara gerilimlerine ait faz açısı grafiği 134

Şekil 6.44. IEEE 57-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarında bara gerilimlerine ait faz açısı grafiği 135

Şekil 6.45. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif güç değerleri grafiği 137

Şekil 6.46. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen reaktif güç değerleri grafiği 138

Şekil 6.47. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı toplam aktif güç kaybı değerleri 138

Şekil 6.48. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı toplam reaktif güç kaybı değerleri 139

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.49. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı gerilim sapması değerleri 140

Şekil 6.50. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı CPU süre kullanımı değerleri 141

Şekil 6.51. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı bellek kullanımı değerleri 141

Şekil 6.52. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait amaç fonksiyonu değerleri 144

Şekil 6.53. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait toplam aktif güç kaybı 144

Şekil 6.54. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait toplam gerilim sapması 145

Şekil 6.55. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait toplam CPU süre kullanımı 146

Şekil 6.56. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait toplam bellek kullanımı 147

Şekil 6.57. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait Pareto grafiği 148

Şekil 6.58. IEEE 30-bara test sisteminde PSO algoritmasına ait Pareto grafiği 148

Şekil 6.59. IEEE 30-bara test sisteminde GKO algoritmasına ait Pareto grafiği 149

Şekil 6.60. IEEE 30-bara test sisteminde HPSO algoritması ait Pareto grafiği 150

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
c_1	PSO'da bilişsel sabite
c_2	PSO'da sosyal sabite
n	Bara sayısı
B	İletim hattı suseptansı
G	İletim hattı kondüktansı
G_{best}	Küresel en iyi konum
g_d	d. hattın iletkenliği
I_h	Hat akımı
N	Popülasyon büyüklüğü
P	Aktif güç
P_{best}	Bireysel en iyi konum
P_i	i. bara barası aktif gücü
P_G	Üretim barası aktif gücü
$P_{kayıp}$	İletim hattı aktif güç kaybı
P_L	Yük barası aktif gücü
P_{SL}	Salınım barası aktif gücü
R	İletim hattı direnci
R_h	Hat direnci
Q	Reaktif güç
Q_G	Üretim barası reaktif gücü
Q_i	i. bara reaktif gücü
Q_L	Yük barası reaktif gücü
Q_{SL}	Salınım barası reaktif gücü
V_i	i. Bara gerilimi
V_r	Hat başı baranın gerilim genliği
V_s	Hat sonu baranın gerilim genliği

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{V_G}$	Üretim barası gerilim genliği
$\mathbf{\delta_G}$	Üretim barası gerilim faz açısı
$\mathbf{V_L}$	Yük barası gerilim genliği
$\mathbf{V_{SL}}$	Salınım barası gerilim genliği
$\mathbf{\delta_{SL}}$	Salınım barası gerilim faz açısı
$\mathbf{V_b}$	b. bara gerilimi
$\mathbf{V_c}$	c. bara gerilimi
$\mathbf{V_D}$	Toplam gerilim sapması
$\mathbf{V_s}$	Hat sonu bara
$\mathbf{r_1}$	[0-1] arası rastgele değerlikli vektör
$\mathbf{r_2}$	[0-1] arası rastgele değerlikli vektör
$\mathbf{v_i}$	PSO'da i. parçacık hızı
$\mathbf{w}$	PSO'da atalet ağırlığı
$\mathbf{X}$	İletim hattı reaktansı
$\mathbf{x_i}$	PSO'da i. parçacık konumu
$\mathbf{Y}$	İletim hattı şönt admitansı
$\mathbf{Z}$	İletim hattı seri empedansı
$\mathbf{\theta_Z}$	İletim hattı empedansına ait faz açısı
$\mathbf{\delta}$	Hat başı-sonu bara gerilimleri faz açıları farkı
$\mathbf{\delta_{bc}}$	b ve c baraları gerilimi faz açıları farkı
$\mathbf{\delta_i}$	i. bara gerilimi faz açısı
$\mathbf{\delta_L}$	Yük barası gerilimi faz açısı
$\mathbf{\varepsilon}$	İterasyona ait hassasiyet

Kısaltmalar	Açıklamalar
ACSR	Çelikle güçlendirilmiş aliminyum iletken
ADS	Aktif dağıtım sistemi
AWG	Amekrikan tel ölçü birimi
BOA	Balina optimizasyon algoritması
CIGRE	Uluslararası büyük elektrik sistemleri konseyi
DE	Differansiyel evrim
DES	Dağıtım elektrik santrali
FACTS	Esnek alternatif akım iletim sistemi
GA	Genetik algoritma
GS	Gauss-Seidel
GKO	Gri kurt optimizasyonu
HPSO	Hibrit parçacık sürü optimizasyonu
IEEE	Uluslararası elektrik-elektronik mühendisleri enstitüsü
KAA	Karga arama algoritması
KKO	Karınca koloni optimizasyonu
MATLAB	Matrix labaratory
MCM	1000000 dairesel mil
MVAr	Mega volt amper reaktif
MW	Mega vat
NR	Newton-Raphson
PDS	Pasif dağıtım sistemi
PSO	Parçacık sürü optimizasyonu
P-V	Aktif güç – gerilim genliği
pu.	Birim değer (per unit)
Q-V	Reaktif güç – gerilim genliği
RGK	Reaktif güç kompansatörü
SSSC	Statik seri senkron kompansatör
VSI	Gerilim kararlılık indeksi
V- δ	Gerilim genliği-faz açısı
YY	Yüzyıl

1. GİRİŞ

Gelişen yeni teknolojilerin temiz ve vazgeçilmez enerji kaynağı olan elektrik enerjisinin diğer enerji türlerine kolaylıkla dönüştürülebilmesi, elektrik enerjisine olan ilgi ve talebin her geçen gün daha da artmasına sebep olmaktadır. Sürekli artan yük taleplerinin karşılanması için enerji arzının da artırılması beklenmektedir. Güç sistemlerinde artan yük talepleri günümüzde genellikle fosil yakıtlı enerji santralleri ve yenilenebilir enerji kaynaklı üretim santralleri ile karşılanmaktadır. Enerji üretiminde kullanılan fosil kaynaklı yakıtların oluşturduğu çevresel kirlilik ve buna bağlı küresel iklim değişikliği vb. olumsuzluklar, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasına neden olmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklı enerji üretim santrallerinin birçok farklı noktadan mevcut güç sistemlerine bağlanması ile birlikte oluşan bağlantı noktası belirsizliği ve kurulu güç değerinin tespiti konusu güç akışı çalışmalarının önemini daha da artırmaktadır [1]. Bunlara ilaveten, güç sistemlerinde bulunan yüklerin günden güne artmaya devam etmesi, sistemin güç akışını bozabilmekte ve gerilim kararlılığını olumsuz yönde etkilemektedir [2]. Güç sistemlerinde güç akışının ve gerilim kararlılığının olumsuz etkilenmesi; güç akışı probleminin tanımlanmasını ve çözümünü gerektirmiştir. Güç sisteminde gerilim genlikleri ve güç değerleri bilinen baraların verileri kullanılarak diğer baraların gerilim genlikleri, faz açıları, aktif-reaktif güç üretimi ve iletim hat kayıplarının hesaplanması güç akışı probleminin çözümünü gerektirir [3].

Güç akışı; güç sisteminin performansının sürekli değerlendirilmesi için gerekli olan ve yinelemeli yöntemler kullanılarak çözülebilen doğrusal olmayan bir problemdir. Bu sayede güç sistemine yeni iletim hatları ve güç üretim üniteleri eklemeye gerek kalmaksızın güç sisteminin güncellenmek istenmesi durumunda, oluşacak parametrelerin belirlenen limitler ve standartlar çerçevesinde olup olmayacağı belirlenir. Böylelikle güç sistemlerinin kararlılık ve güvenilirlik değerlendirilmesi yapılabilmektedir [4].

Güç akışı problemlerinin çözümü sayısal bilgisayarlarla klasik yöntemler kullanılarak 1950'li yıllardan itibaren gerçekleştirilmeye başlanmıştır [5]. Newton-Raphson, Gauss-Seidel ve Fast-Decoupled gibi klasik yinelemeli metotlar farklı boyutlardaki güç sistemlerinin güç akış problemlerinin çözümünde başarıyla kullanılmıştır [6-8].

Araştırmacılar tarafından güç akışının standart çözümü olarak görülen Newton-Raphson metodu, literatürde diğer klasik yinelemeli yöntemler arasında en çok kullanılan yöntem olarak öne çıkmaktadır [8]. Newton-Raphson metodu ile güç akışı probleminin çözümü iyi şartlandırılmış bir güç sistemi için sağlamlık, etkinlik ve güvenilirlik konularında uygun olarak değerlendirilmektedir [9]. Oldukça başarılı olan Newton-Raphson metodu, her döngüde Jacobian matrisini çarpanlara ayırmayı ve güncellemeyi gerektirir [10,11]. Klasik yöntemlerden bir diğeri olan ve birçok çalışmada kullanılan Gauss-Seidel metodu, yüksek döngü sayısına ve düşük yakınsama özelliğine sahiptir [12]. Sabit matrisler kullanılarak gerçekleştirilen Fast-Decoupled metodu ile güç akışı, özellikle Newton-Raphson yönteminde ortaya çıkan yakınsama probleminin çözümü için önerilmiştir [13]. Bu klasik yöntemler, nominal koşullara yakın çalışan bir güç sisteminde gerekli bara gerilimlerini, faz açılarını ve aktif-reaktif güç değerlerini uygun bir şekilde hesaplayabilmektedir [14]. Ancak güç sistemlerine ait iletim hatlarının yüksek hat direnci (1'den büyük) ve endüktansı oranına (R/X) sahip olması, esnek AA iletim hatlarının kurulumu, negatif hat reaktansı ve salınım barasının konumu kötü koşullandırılmış güç sistemine sebep olabilmektedir [15]. Böyle bir durumda, klasik yinelemeli yöntemler, kötü koşullandırılmış güç sistemi için farklı çözüm matris yapısı oluşturması nedeniyle güç akışı için yetersiz kalmaktadır [16]. Klasik yinelemeli yöntemlerin bir başka dezavantajı, çözümün yakınsamasının başlangıç değeri seçimine bağlı olmasıdır [17,18]. Önceki çalışmalarda, klasik yöntemlerin çözüm yeteneği ve kalitesini geliştirmek için çaba sarf edilmiş olup türev operatörünün kullanılması, yakınsama hızı, kalitesi vb. dezavantajları ile kötü koşullandırılmış güç sistemine sebebiyet verme durumu devam etmektedir [19]. Klasik yinelemeli yöntemlerin kullanımında ortaya çıkan güç akışı sorunlarının üstesinden gelmek için optimizasyon teknikleri 20. YY sonlarında geliştirilmeye başlanmıştır. Yeni nesil yöntemlerde tercih edilen en iyi güç akışı, güç sistemlerinin analizinde önemli bir yer tutmaktadır. En iyi güç akışı, güç sistemlerinde kısıtlı ve doğrusal olmayan problemlere ayrık değişkenlerle çözüm sağlar [20]. En iyi güç akışında amaç; güç sisteminde güç akışı denklemlerini hesaplayıp etkinlik, kararlılık ve güvenilirliği sağlamak için güç sisteminin donanım çalışma sınırlarını optimize ederek kullanılan donanımların çalışma sınırlarını en iyi çalışma değerlerinde tutabilmektir. Son yıllarda araştırmacılar doğrusal olmayan en iyi güç akışı problemine ait küresel en iyi çözümü bulma konusundaki üstün yetenekleri nedeniyle meta-sezgisel tabanlı optimizasyon algoritmaları üzerinde çalışmaya devam etmektedir [21]. 21. YY başlarında güç sistemlerinin optimizasyonunda vazgeçilmez hale gelen meta-sezgisel algoritmaların kullanımının gelişerek sürdüğünü gösteren çalışmalar devam etmektedir [22].

Uluslararası standartlarda kabul gören güç sistemlerinin verileri kullanılarak çeşitli meta-sezgisel algoritmalarla enerji üretim santrallerinin en iyi konum ve kapasite değerleri tespitinin yapılması, güç iletim hattı kayıplarının azaltılması, gerilim profilinin ve gerilim kararlılık indeksinin iyileştirilmesi, üretim ve yakıt maliyetinin azaltılması, farklı algoritmaların yakınsama ve performans karşılaştırmaları vb. konular bu alanda yapılan çalışmaların odak noktalarıdır [21-23]. Doğa tabanlı meta-sezgisel algoritmaların kullanıldığı güç sistemi optimizasyon çalışmalarında olasılık esas alınmaktadır. Başlıca olasılık esaslı meta-sezgisel algoritmalardan; tabu arama, yapay arı kolonisi (YAK), gri kurt optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, genetik algoritma (GA), benzetimli tavlama, evrimsel gelişim algoritması, karınca koloni optimizasyonu (KKO), balina optimizasyon algoritması (BOA), vb. algoritmalar günümüzde doğa ve popülasyon tabanlı olarak rastgele arama-tarama tekniği ile en iyiyi aramaya dair çözümler üreterek, güç sistemlerinin optimizasyonunda tercih edilmektedir [24-46].

PSO, GA, GKO, BOA, KKO ve YAK meta-sezgisel algoritmaları çeşitli fonksiyonların çözümlerinde en iyi çözüm kümesine ulaşma çalışmalarında; uygulamalarda sunduğu avantaj ve dezavantajlı yönler çok sık karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda algoritmaların üstün yönleri birbirleri arasında transfer edilerek eksik yönleri geliştirilmektedir. Son yıllarda popülasyon tabanlı algoritmaların iyi yönlerinin birbirleri arasında transfer edildiği, davranış stratejilerinin diğer algoritmalar tarafından taklidine yönelik geliştirilen birçok hibrit optimizasyon algoritması literatürde yer almaktadır [25-66].

Meta-sezgisel ve hibrit algoritmalar kullanılarak güç sistemlerinde en iyi güç akışı, güç kaybının azaltılması, gerilim kararlılığı, gerilim kararlılık indeksinin artırılması, maliyet ve sera gazlarının azaltılması konularında literatürde yer alan başlıca çalışmalar aşağıda verilmektedir.

2020 yılında Ismail ve diğerleri, güç sistemlerinde güç kaybını azaltma, gerilim kararlılığını artırma, gerilim profili ve yüklenebilirliği iyileştirme için hibrit tabanlı yaklaşımlar kullanan reaktif güç kompanzasyonunun en iyi konumu ve boyutlandırılması üzerine kapsamlı bir inceleme çalışması sunmuşlardır. Mevcut güç sisteminin kapasitesini tam olarak kullanabilmek amacıyla; güç sisteminde reaktif güç kompansatörüne ait en iyi güç değerlerinin belirlenmesi ve en iyi konum tayinine ilişkin analitik, geleneksel, meta-sezgisel ve hibrit tabanlı yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilen en iyi güç akışı çalışmalarının

sonuçlarının yer aldığı kapsamlı bir performans karşılaştırma araştırması yapmışlardır. Yapılan çalışmada, güç kayıpları ve gerilim sapmalarının azaltılarak, güç sistemi kararlılığının artırılması, güç sisteminin güvenilirliği ve güvenliğinin sağlamlaştırılmasında kullanılan birden fazla yaklaşımın etkinliği ve geçerliliği vurgulanmıştır [22].

2007 yılında Shin ve arkadaşları, radyal güç sistemlerinde güç kayıp azaltımı ve gerilim kararlılığının artırılması için yeni bir en iyi yönlendirme algoritmasını; mevcut güç sistemine yeni aktif ve reaktif yükler eklendiğinde gerilim çökmesine neden olabilecek kritik iletim yollarını otomatik olarak tespit etmek ve etkili olarak hat seçimini ve yönlendirmesini yapmak için kullanmıştır. Geliştirilen yeni yöntemin diğer algoritmalara olan üstünlüğü ve etkinliği belirtilmiştir [23].

2020 yılında Farh ve arkadaşları, dağıtık yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı üretimin büyüklüğü ve bağlantı noktasının tayini için karga arama algoritması tabanlı yeni bir hibrit PSO algoritması önermişlerdir. Geliştirilen hibrit algoritma kullanılarak IEEE 30-bara test sisteminin en iyi güç akışını gerçekleştirmişlerdir. Toplam maliyet ve toplam güç kaybının azaltılması amaç fonksiyonlarını kullanarak elde edilen çalışma sonuçlarına göre hibrit PSO algoritmasının karga arama, PSO algoritmalarından üstün olduğunu bildirmişlerdir [24].

2020 yılında Jamal ve arkadaşları, doğadan esinlenen yeni bir meta-sezgisel GKO algoritması ile en iyi reaktif güç dağıtımının sağlanabilmesi konusu üzerinde çalışmışlardır. IEEE 30-bara test sistemi üzerinde güç kaybı, gerilim sapması, gerilim kararlılığı indeksi ve enerji maliyetinin asgariye indirilmesi amaçlanan çalışmada; elde edilen yeni yönteme ait sonuçlar diğer yapay zekâ metotları ile karşılaştırılarak geliştirilen GKO'nun daha üstün sonuçlar ürettiği belirtilmiştir [25].

2009 yılında Ela ve arkadaşları yaptıkları makale çalışmasında, etkili ve güvenilir evrimsel tabanlı bir yaklaşımla en iyi güç akışı problemini çözmüşlerdir. En iyi güç akışı problemine ait değişkenler ile IEEE 30-bara test sistemi üzerinde yakıt maliyeti azaltımı, gerilim profilinin iyileştirilmesi ve gerilim kararlılığının artırılması amaçlanan çalışmada; diferansiyel evrim algoritmasından elde edilen sonuçların diğer meta-sezgisel yöntemlere olan etkinliği ve sağlamlığı vurgulanmıştır [26].

2021 yılında Dugue ve arkadaşları çalışmalarında, dağıtım hatlarında ölçüm cihazlarının en iyi konumlandırılması konusunda bir çoklu amaç fonksiyonunu kullanarak değiştirilmiş maymun arama algoritmasının performans testini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında; düşük yatırım maliyeti ile akıllı şebeke ölçüm cihazları ve fazör ölçüm ünitelerinin en iyi noktalarda konumlandırılması için aday çözümlerin önerilmesi sağlanmıştır. Maymun arama algoritması pareto çözümlerinin güç sistemi planlayıcılara önderlik ettiği ve kullanışlı ticari bir yöntem olduğu vurgulanarak, elde edilen sonuçların diğer meta-sezgisel algoritmalara kıyasla daha iyi sonuçlar ürettiği belirlenmiştir [27].

2020 yılında Suresh ve arkadaşı yaptıkları çalışmada, dağıtım hatlarında dağıtık üretim birimlerinin konumlandırılması amacıyla hibrit çekirge optimizasyon algoritması ile guguk kuşu arama algoritması kullanarak dağıtık üretim birimi konum ve güç kapasitesi optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. IEEE 33-bara ve IEEE 69-bara test sistemleri ile MATLAB/Simulink ortamında yapılan çalışmada dağıtık üretim ünitesi konum ve güç değerleri, mevcut güç sistemindeki güç kaybına, gerilim profili ve hattın güç akışına göre kararlaştırılmıştır. Dağıtım sisteminde güç kaybı azaltılarak gerilim kararlılığının sağlanması, güç sistemine farklı yük durumu senaryoları uygulanarak araştırılmış ve önerilen hibrit yaklaşım mevcut salp sürü optimizasyonu ve yıldırım arama algoritması ile karşılaştırılarak diğerlerine göre etkinliği ve sağlamlığı vurgulanmıştır [28].

2020 yılında Nasr ve arkadaşları, izole mikro şebekelerde güvenlik konusunu değerlendirerek, güç kayıplarının azaltılması, gerilim kararlılığının iyileştirilmesi ve üretim maliyetlerinin azaltılması amacıyla çoklu amaç fonksiyonlu güvenlik kısıtlı yeni bir mikro şebeke enerji yönetim sistemi metodu önererek pareto en iyi yaklaşımı gerçekleştirmiştir. Ayrıca bir CIGRE kıyaslama test sistemi olan Avrupa orta gerilim şebekesi üzerinde güvenlik kısıtlı mikro şebeke enerji yönetim sisteminin performansı test edilmiştir. Önerilen güncel metodun, genel cebirsel modelleme sisteminde uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonuçları bu metodun uygulanabilirliğini göstermiştir. Önerilen metodun mikro şebeke enerji yönetim sistemlerindeki güvenlik kısıtlamalarının yönetiminde önemi, etkinliği ve kullanışlılığı ortaya konulmuştur [29].

2020 yılında Elsayed ve arkadaşları, güç sisteminde en iyi reaktif güç dağıtımı için çok amaçlı optimizasyon probleminin geliştirilmiş yığın tabanlı optimizasyon algoritması ile çözümünü gerçekleştirmiştir. Çalışmada önerilen algoritmanın pareto ön yaklaşımı ile iki ve

üç amaç fonksiyonunun çözümü verilmiştir. Küresel en iyi çözümü arama yeteneğinin geliştirildiği ve yerel optimumdan kaçınılan yaklaşımla, IEEE 30-57-118-bara test sistemleri verileri ile generatör gerilimleri, şönt kapasitör reaktif güçleri ve transformatörlerin kademe ayarlarının değerleri belirlenmiştir. Önerilen yığın tabanlı optimizasyon algoritmasının sonuçları, literatürde yakın zamanda yayınlanan algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre önerilen algoritmanın diğer algoritmalara üstünlüğünü kanıtlanarak, en iyi reaktif güç dağıtımı probleminin çözümünde yığın tabanlı optimizasyon algoritmasının sağlamlığı vurgulanmıştır [30].

2021 yılında Dagag ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, geri izleme arama algoritması ile yakıt maliyeti, güç kaybı ve gerilim sapması azaltımı içerikli bir çoklu amaç fonksiyonu yaklaşımı önermiştir. Önerilen algoritma ile elde edilen tüm pareto çözümlerinden en iyi uzlaşma çözümünü çıkarmak için geri izleme arama algoritmasına bir bulanık mantık üyelik tekniği entegre edilmiştir. IEEE 30-57-118-bara test sistemleri verileri kullanılarak gerçekleştirilen güç akışı çalışmalarında elde edilen sonuçların son yıllarda kullanılan algoritmalarla karşılaştırılması sonucunda geri izleme arama algoritmasının etkinliği, üstünlüğü ve sağlamlığı vurgulanmıştır [31].

2016 yılında Saha ve arkadaşının yaptığı çalışmada, kaos gömülü simbiyotik organizmalar arama algoritması kullanılarak güç kayıplarının dağıtık üretim optimizasyonu ile azaltılması ve simbiyotik organizmalar arama algoritması ile IEEE 33, 69 ve 118-bara test sistemleri üzerinde karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Çoklu amaç fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçlarda, kaos gömülü simbiyotik organizmalar arama algoritmasının çalışmasının, simbiyotik organizmalar arama algoritmasına göre etkinliğinin daha iyi olduğu ve kayıpların azaltılmasından ötürü kazanç katsayısının daha fazla olduğu ortaya çıkarılmıştır. Çalışmada gerilim profilinin geliştirilmesi, kritik yüklerin davranışı ve artan yük taleplerinde bara gerilim kararlığının sağlanması ve gerilim çökmelerinin önlenmesi temel alınmıştır. Kaos gömülü simbiyotik organizmalar arama algoritması ile en iyi güç akışı sonucunda dağıtık üretim birimleri kritik baralara bağlandığında, dağıtım sisteminin gerilim profilinin daha iyi hale geldiği görülmüştür. Yapılan çalışma kullanışlı bir toolkit olarak sunulmuştur [32].

2021 yılında Shahraki ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmalarında, geliştirilmiş GKO algoritmasını küresel optimizasyon ve mühendislik problemlerinin çözümünde kullanmışlardır. Kurt kolonisinde birey çeşitliliği eksikliği, keşif ve kullanım arasındaki

dengesizliği ve GKO algoritmasının erken yakınsamasını hafifletmek için geliştirilen yeni GKO algoritması, boyut öğrenmeye dayalı avlanma araması adlı yeni bir hareket stratejisinden yararlandırılmıştır. Bu algoritma CEC 2018 ve dört farklı mühendislik problem üzerinde denenerek altı farklı meta-sezgisel algoritma ile karşılaştırılmış, sonuçlar Friedman ve MAE istatistiki testleri üzerinde analiz edilmiştir. Geliştirilmiş GKO algoritmasının deneylerde kullanılan algoritmalara kıyasla daha rekabetçi ve üstün olduğu vurgulanmıştır [33].

2021 yılında Chakraborty ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, balina optimizasyon algoritmasının arama uzayındaki düşük keşif kabiliyetinin geliştirilmesi esasına bağlı simbiyotik organizmalar arama algoritması ile balina optimizasyon algoritmasının hibritlenmesi sonucu yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Geliştirilen hibrit algoritmanın performansı CEC 2019 verileri üzerinde denenerek etkinlik ve yakınsama hızı geliştirilmiştir. Altı gerçek mühendislik problem üzerinde denenen yeni hibrit algoritmanın diğer algoritmalara üstünlüğü vurgulanmıştır [34].

2020 yılında Gilvaei ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, ateş böceği algoritması ve bulanık mantık PSO hibrit algoritmasının kullanılması ile elde edilen yeni, güvenilir ve etkili bir algoritma tanıtımı gerçekleştirmiştir. Geliştirilen yeni algoritma kullanılarak IEEE 30-57-118-bara test sistemleri verileri üzerinde gerçekleştirilen güç akışı çalışmalarında, elde edilen en iyi reaktif güç dağıtımı sonuçlarının sürü tabanlı diğer algoritmalarla karşılaştırılması yapılmıştır. İstatistiksel analiz sonuçları değerlendirildiğinde, geliştirilen hibrit algoritmanın karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde üstünlüğü, sağlamlığı ve etkinliği doğrulanmıştır [35].

2021 yılında Naderi ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, kendi kendine uyarlanabilir PSO ve diferansiyel evrim algoritmalarına yönelik yeni bir bulanık mantık uyarlanabilir hibrit konfigürasyon PSO algoritması önerilmiş ve incelenmiştir. Yapılan çalışmada pratik olarak toplam yakıt maliyeti, aktif güç kayıpları ve emisyon başlıklarını içeren çoklu amaç fonksiyonu tercih edilmiştir. Hibrit konfigürasyon PSO algoritmasının IEEE 30-57-118-bara test sistemleri verileri kullanılarak en iyi güç akışı problemi ile testi sonucunda; problem hızlı bir şekilde çözülmüş ve sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Önerilen yeni hibrit algoritmanın farklı ölçeklerde çok amaçlı ve dış-bükey olmayan

optimizasyon problemlerinin çözümündeki performansı, uygunluğu, üstünlüğü ve etkinliği vurgulanmıştır [36].

2020 yılında ElSehiemy ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerinde en iyi güç akışı problemini PSO ve salp sürü optimizayonu algoritmalarının hibritlenmesi ile elde edilen yeni algoritmayı kullanarak çözmüştür. Elde edilen hibrit PSO algoritmasının etkinliği ve sağlamlığı, 18 farklı senaryo çalışması kullanılan üç standart test sisteminde test edilerek parametre değişiklikleri yapılarak doğrulanmıştır [37].

2020 yılında Ansari ve arkadaşları tarafından sunulan çalışmada, IEEE 16, 30, 57 ve 118-bara test sistemleri üzerinde GKO algoritması ile dağıtık üretim birimlerini en iyi kapasitede konumlandırarak güç kaybının azaltılması ve gerilim profilinin iyileştirilmesi amaçlanan optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Farklı tip ve sayıda dağıtık üretim birimleri dahil edilerek yapılan karşılaştırmada, güç katsayısının dağıtık üretim dahil edildiğinde daha da iyileştiği bildirilmiştir. GKO algoritmasının dağıtım hatlarında güç kullanım kapasite ve güvenilirlik artışında literatürde sunulan diğer algoritmalara göre etkinliği ve üstünlüğü vurgulanmıştır [38].

2021 yılında Babu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, IEEE 33 ve 69-bara test sistemleri üzerinde uyarlanmış balina optimizasyon algoritması kullanılarak en iyi kapasitede şönt kapasitör konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca johnson algoritması, dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması sırasında minimum genişleme ağacı yapısını bulmak için kullanılmıştır. Maliyet ve güç kaybı azaltımı amaçlanan çalışmada önerilen yeni yöntemin etkinliği ve üstünlüğü vurgulanmıştır [39].

2021 yılında Boonraksa ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, dağıtım şebekelerine yeni eklenmekte olan elektrikli araç ve elektrikli otobüslerin şarj istasyonlarının artarak devam etmesinin şebekeye getirdiği dezavantajların dinamik olarak takip edilmesi konusunu ele almıştır. En uygun büyüklükte kapasitör konumlandırılması esaslı güç kaybı azaltımı amaçlanan çalışmada, yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak uygun güçlerde ve konumda kapasitör gruplarının güç sisteminde güç kaybını önemli oranda azalttığı ve maliyet kaybından da kazanç sağlayarak elde ettiği üstünlük vurgulanmıştır [40].

2020 yılında Khan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, yeni bir kesirli parçacık sürü optimizasyonu tasarımı ve yerçekimi arama algoritmasını hibritleyerek en iyi reaktif güç dağıtımı probleminin çözümünde kullanmıştır. Çalışmada IEEE 30 ve 57-bara test sistemi üzerinde güç kaybı ve gerilim sapması amaç fonksiyonları tercih edilmiştir. Önerilen kesirli parçacık sürüsü optimizasyonu tasarımı yerçekimi arama hibrit algoritmasının üstün performansı, en iyi reaktif güç dağıtımı probleminin her bir senaryosu için doğrulanmıştır. Önerilen yeni yaklaşımdan elde edilen sonuçlar son geliştirilen benzer algoritmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Belirtilen yaklaşımın tekil ve çoklu amaç fonksiyonlarında literatürdeki diğer algoritmalara olan üstünlüğü ve etkinliği vurgulanmıştır [41].

2020 yılında Hemeida ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, canlılardan esinlenilen yeni bir manta ışını toplayıcı optimizasyon algoritmasını ilk defa kullanarak, en iyi güç ve konumlarda dağıtık üretim birimlerinin yerleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Güç sisteminde güç kaybı, gerilim kararlılığı ve gerilim kararlılığı indeksinin iyileştirilmesi amaçlanan çoklu amaç fonksiyonu çalışmasında, IEEE 33, 69-bara test sistemleri üzerinde manta ışını toplayıcı optimizasyon algoritması, daha az döngüde en iyi sonuçları üreterek optimizasyon problemi çözümünde zaman ve enerji tasarrufu sağlamıştır. Yeni manta ışını toplayıcı optimizasyon algoritması tekniğinin, farklı güç sistemi problemlerinin optimizasyonunda ümit verici bir geleceğe sahip olduğu vurgulanan bu çalışmanın yeni nesil optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılması neticesinde daha iyi performans elde ettiği bildirilmiştir [42].

2019 yılında Hasan ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, yeniden yapılandırılmış bir güç sisteminde iletim hatları güç kaybının azaltılarak yeniden düzenlenmesinin hayati önem taşıdığı bildirilerek, yeni bir rota belirleme algoritması ile güç kayıplarının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. IEEE 30-bara test sistemi üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, güç akışının üretim ve yük üniteleri arasında taşınmasına ait en iyi iletim hattı güzergahının belirlenmesi çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada rota belirleme algoritması kullanılarak elde edilen sonuçların literatürdeki mevcut yöntemlerle karşılaştırılması sağlanmış ve önerilen yöntemin iletim hattı güç kaybı azaltımında diğerlerine göre belirgin iyileştirme sağladığı vurgulanmıştır [43].

2018 yılında Nguyen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ekonomik güç dağıtımı için yakıt maliyeti azaltımını amaçlamıştır. Geliştirilen yüksek performanslı guguk kuşu arama algoritması ile klasik guguk kuşu arama algoritmasına adaptif mutasyon tekniği uygulanarak IEEE 30,57 ve 118-bara test sistemleri üzerindeki üretim ünitelerinde tüm kısıtlamaları sağlayan ekonomik güç dağıtımı çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, önerilen yüksek performanslı guguk kuşu arama algoritmasının gelişmiş meta-sezgisel algoritmalara göre daha etkin ve kararlı sonuçlar ürettiği vurgulanmıştır [44].

2020 yılında Hassan ve arkadaşı tarafından güç sistemi üretim ünitelerine ait en iyi konum ve güç kapasitesi belirlenmesi amaçlı gerçekleştirilen çalışmada, ikili PSO karıştırılmış kurbağa sıçraması hibrit algoritması kullanılarak IEEE 33 ve 69-bara test sistemlerinde güç kayıplarının en aza indirilmesi ve gerilim kararlılığının iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Önerilen hibrit algoritmanın güç sistemi üretim ünitelerinin güç kapasitesi ve konumlandırılması başlıklarında hibrit GKO ve hibrit büyük patlama büyük çöküntü algoritmasına göre daha iyi sonuçlar ürettiği vurgulanmıştır [45].

2020 yılında Elattar ve arkadaşı yaptıkları çalışmada, geliştirilmiş güve alev optimizasyonu ile güç sistemi yenilenebilir enerji üretim ünitelerine ait en iyi konum ve güç kapasitesi belirlenmesini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada güç kaybı, gerilim sapması, maliyet ve sera gazı azaltımı amaçlanmıştır. IEEE 69-bara test sistemi kullanılarak dağıtık üretim birimleri için aday baraların belirlenmesi sağlanmıştır. Önerilen yöntem ile elde edilen çok amaçlı optimizasyon çalışması sonuçlarının güncel literatür algoritmalarından elde edilen sonuçlardan daha etkili ve üstün olduğu sonucuna ulaşılmıştır [46].

2021 yılında Khan ve arkadaşları yaptığı çalışmada, esnek AA iletim sistemlerinde, en iyi reaktif güç dağıtımı probleminin çözümünde statik seri senkron kompansatör entegrasyonunun geliştirilmiş salp sürü algoritması ile sağlanması amaçlanmıştır. IEEE 30 ve 57-bara test sistemleri üzerinde gerçekleştirilen en iyi reaktif güç dağıtımı probleminin çözümünde kullanılan geliştirilmiş salp sürü algoritmasının diğer meta-sezgisel algoritmalara olan üstünlüğü belirtilmiştir. Güç sistemi güç kaybı ve gerilim kararlılığı performansı statik seri senkron kompansatörün en iyi konum ve kapasitede dahil edilmesiyle önemli ölçüde geliştirilmiştir [47].

2021 yılında Uniyal ve arkadaşı yaptıkları çalışmada, dağıtık üretim ünitesinin en uygun güçte konumlandırılması ve güç sisteminin yeniden düzenlenmesi için adaptif geliştirilmiş balina optimizasyon algoritması kullanarak yük ve üretim üniteleri güçlerinin olasılıklı değişen güç faktörü katsayısı değerleri üzerinde çalışmıştır. Radyal güç sistemi kısıtlamalarını kontrol etmek için önerilen tekniğin etkinliği iki standart dağıtım şebekesi üzerinde test edilerek diğer çalışmalara olan üstünlükleri vurgulanmıştır [48].

2014 yılında Esmaili ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, fazlaca eklenen dağıtık üretim birimlerinin her zaman güç kaybı azaltımı noktasında işe yaramayabileceği, ancak en iyi güç kapasitesi ve sayısında dağıtık üretim biriminin konumlandırılması ile güç sisteminin yeniden düzenlenerek güç kaybının azaltılabileceği ve gerilim kararlılığının artırılabileceği belirtilmiştir. Dinamik programlama araması yöntemi kullanılarak gerilime ilişkin kısıtlamaların da dikkate alındığı çalışmada, 34-baralı dağıtım sistemi üzerinde elde edilen güç akışı sonuçları tartışmaya açılarak önerilen yöntemin benzer çalışmalara olan üstünlüğü ve etkinliği vurgulanmıştır [49].

2019 yılında Rambabu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, tristör kontrollü seri kompansatör kullanılarak güç sisteminde güç akışının geliştirilmesi, gerilim, güç kalitesi ve güvenilirliğin sağlanması amaçlanmıştır. IEEE 57-bara test sistemleri üzerinde en iyi tristör kontrollü seri kompansatör konumu için bir kaynaşmış çeşitlilik indeksi önerilen çalışmada, GKO algoritması ile tristör kontrollü seri kompansatör birlikte kullanılarak elde edilen sonuçlar normal ve değiştirilmiş güç sistemi koşullarında karşılaştırılmıştır. GKO algoritmasının değişen şartlarda oldukça iyi sonuçlar ürettiği ve etkinliği vurgulanmıştır [50].

2020 yılında Kaymaz ve arkadaşları lévy coyote optimizasyon algoritması kullanarak olasılıklı rüzgâr gücü ile en iyi güç akışı probleminin çözümünü önermiştir. Geliştirilen yöntem ile IEEE 30, 57 ve 118-bara test sistemleri üzerinde yakıt maliyeti, sera gazları, güç kaybı azaltımı ve gerilim profili, gerilim kararlılığının iyileştirilmesi amaçlı tekil ve çoklu amaç fonksiyonların kullanımı sağlanmıştır. En iyi güç akışı çalışmasında elde edilen sonuçlara göre, lévy coyote optimizasyon algoritmasının olasılıklı rüzgâr enerjisi ile en iyi güç akışı problemine çözüm üretiminde diğer yeni nesil optimizasyon yöntemlerinden daha etkili olduğu vurgulanmıştır [51].

2020 yılında Khan ve arkadaşları, en iyi güç akışı probleminin çözümünde hibrit ateşböceği algoritması ve PSO algoritmalarını birleştirerek elde ettikleri hibrit PSO algoritmasını, MATLAB yazılımı kullanarak IEEE 30-bara test sistemi üzerinde test etmişlerdir. Yapılan en iyi çözümlerin klasik PSO algoritması sonuçları ile karşılaştırılmasında, önerilen hibrit yönteminin, en iyi güç akışı problemlerinin zorlukları ve karmaşıklıkları ile daha etkin başa çıkabilir olduğu ve yakınsamada daha hızlı olduğu ayrıca daha iyi küresel çözümler üretebildiği vurgulanmıştır [52].

2015 yılında Youssef yaptığı çalışmada, akıllı dağıtım fiderleri üzerinde geliştirilen etkin bir algoritma ile reaktif yüklerin dengelenmesi için şönt kapasitör ile gerilim regülasyonu sağlamaya çalışmıştır. Dağıtım sisteminin ABCD parametreleri ileri/geri tarama algoritmasında uygulanarak aktif ve reaktif güç enjeksiyonunun yapılması ile gerilim hassasiyetinin elde edilmesi sonucunda güç sistemi gerilim kararlılığına katkı sağlanmıştır. Dengesiz yükler ve kısa devre anında çalışan güç sisteminde uygulanan algoritmanın uygun tepki vermesi çalışmanın avantajı olarak bildirilmiştir. IEEE test fideri üzerinde denenen önerilen algoritmanın etkinliği ve üstünlüğü vurgulanmıştır [53].

2017 yılında Abdelazez ve arkadaşı, radyal dağıtım sistemlerinde karga arama algoritması kullanarak iletken kesitlerinin optimizasyonunu çalışmıştır. IEEE 16 ve 85-bara test sistemi üzerinde geçerliliği kanıtlanan algoritma vasıtasıyla gerekli iletken tipi ve kesitleri belirlenmiştir. Önceki çalışmalarda evrimsel algoritma ile %10, harmony arama algoritması ile %13 değerlerinde kayıplardan kazanç elde edildiği belirtilirken karga arama algoritması ile kayıplardan %24 kazanç elde edildiği vurgulanmıştır [54].

2014 yılında Eltantawy ve arkadaşı, akıllı dağıtım sistemlerinde güç akışı hesaplarında kullanılmak üzere yakınlaştırma algoritması ile bir ileri/geri tarama güç akışı çalışması yapmışlardır. Güç dağıtım sistemlerinde daha esnek çözüm ürettiği vurgulanan algoritmanın manuel numerik teknikleri gerektirmediği tamamen otomatik işlemlerle çevrimiçi çözüm gerçekleştirdiği vurgulanmıştır. Akıllı şebekelerde sistemin boyutlarının ve güç akışı çözüm süresinin azaltılmış olması çalışmanın avantajı olarak görülmüştür. IEEE 37 ve 123-bara test sistemleri üzerinde yapılan benzer çalışmalar ve yakınlaştırma algoritması ile ileri/geri tarama güç akışı çalışması sonuçları karşılaştırıldığında, daha etkin sonuçlar elde edildiği vurgulanmıştır [55].

2016 yılında Monsef ve arkadaşlarının Oshawa'da Akıllı Enerji Şebekeleri Konferansı'nda, dağıtım sistemlerinde gerilim kararlılığı ve reaktif yüklerin telafi edilmesi konusunda merkezi ve merkezi olmayan dağıtım sistemleri, aktif ve pasif dağıtım sistemleri konusunda geniş bir literatür araştırması sunmuşlardır. Güç kayıplarının ve gerilim sapmalarının azaltılması, kontrol değişkenlerinin minimuma indirilmesi ve optimizasyon tekniklerinin ele alınması içerikli bu çalışmada merkezi haberleşmeli dağıtım sistemlerinin optimizasyon problemlerinin üstesinden daha iyi gelebildiği vurgulanmıştır. Avantaj olarak iki yönlü güç alışverişinin yapıldığı akıllı şebekelerde merkezi dağıtım sistemlerinin daha kullanışlı olduğu tespiti yapılmıştır. Sonuç olarak bir literatür taraması sonrası tek ve çift yönlü güç akışının yapıldığı şebekelerde akıllı yapıda önerilen yaklaşımların kurulumunun oldukça faydalı olabileceği vurgulanmıştır [56].

2017 yılında Ghatak ve arkadaşının yaptığı çalışmada, yük akımı ve bara voltajı matrisi ile tek adımda çalışabilen bir ileri/geri tarama algoritması geliştirilmiştir. Uygun değerde akım enjeksiyonunun formüle edilmesi ile IEEE 10, 28, 34 ve 69-bara test sistemleri üzerinde, daha önce çalışılan ileri/geri tarama ve direk yaklaşım algoritmalarına göre geliştirilen sistemin döngü sayısını ve CPU çalışma süresini azaltarak daha hızlı çalıştığı bildirilmiştir. Yük akımı ve bara voltajı matrisi ile geliştirilen bu yaklaşımın hızı ve etkinliği karşılaştırmalı olarak test edilmiş olup diğer 2 çalışmaya göre üstünlüğü vurgulanmıştır [57].

2015 yılında Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, IEEE 5, 34 ve 123-bara test sistemleri üzerinde önerilen ve uygulanan gerilim regülasyonu metodu ile yapılan en iyi güç akışının bara gerilimlerini beklenilen değerlerde sabit tutabildiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak; güç sistemlerinde güç kayıplarının azaltılması amaçlı dış bükey optimizasyon metodunun dağıtım sistemlerine uygulanması ile geliştirilen bu uygulamada, gerilim sapması konusunda etkinliğin sağlandığı ve gereksiz gerilim regülasyonu cihazlarının kullanımının en aza indirgendiği vurgulanmıştır [58].

2016 yılında Sedghi ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, tabu arama, genetik algoritma, PSO gibi birçok farklı algoritmaların basit ve karmaşık problemlerde optimizasyon kabiliyetleri, hesaplama maliyeti, karışıklığın ayarlanması, çözüm üzerinde bağımsızlık, tek çalışmada güvenilirlik ve sağlamlık karşılaştırmaları yapılmıştır. Modern yeni nesil optimizasyon algoritmalarının verildiği bu çalışmada, dağıtım şebekelerinin genişleme probleminin planlanmasında yaşanılan sıkıntılara değinilmiştir [59].

Bunlara en iyi cevap verebilecek optimizasyon tekniğinin genetik algoritma ve tabu arama algoritmalarının hibritlenmesi ile elde edilen geliştirilmiş hibrit PSO algoritmasının olduğu vurgulanmıştır [59].

2016 yılında Diaz ve arkadaşları, ileri/geri tarama algoritması kullanarak IEEE 33-bara test sistemi üzerinde minimum güç kaybı için en iyi güç akışı tekniğinin uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, güç akışı sorunlarının oluştuğu ada tipi dağıtım ve mikro şebeke üzerinde gerilim çökmesine karşı ileri/geri tarama algoritması ile pasif bara oluşumunu engellemek için dengelenmiş gerilim, güç kapasitesinin düzenli kullanımı ve dağıtımı sağlanmıştır. Önerilen yaklaşımın benzer çalışmalara olan sağlamlığı ve etkinliği vurgulanmıştır [60].

2017 yılında Warwandkar ve arkadaşının yaptığı çalışmada, P-Q enjeksiyon metodu; yeni bir formülasyon doğrudan hesap metodu ile IEEE 13, 30, 34, 37 ve 43-bara sistemleri üzerinde geleneksel yük akışı tekniğine ek olarak fiziksel modelleme metodu kullanarak doğrudan yük akış miktarlarının belirlenmesini çalışmışlardır. Sonuç olarak generatörler üzerinden P-Q enjeksiyonu ile jacobi matrisi, numerik analiz ve trigonometrik herhangi bir işlem gerektirmeyen bu çalışma ile dağıtım şirketlerinin kullanımı için faydalı ve etkin yeni bir metot geliştirildiği vurgulanmıştır [61].

2017 yılında Mosaddegh ve arkadaşlarınca gerçekleştirilen çalışmada, akıllı yük dağıtım fiderlerinin bilgisayar destekli kontrolü amaçlanmıştır. Genetik algoritma, yapay sinir ağları ve akıllı şebeke iletişim ara yazılımı yöntemi ile en iyi güç akışı probleminin çözümü yapılmıştır. Dağıtım sistemi fiderlerinin uzaktan bilgisayar kontrollü mimarisinin oluşturulduğu çalışmada; genetik algoritma ve yapay sinir ağları kontrolü ile akıllı yük ve tüketicilerin talep kestirimi yapılmıştır. Kullanıcı operatörlere kolaylık ve akıllı şebekeler üzerinde iletişime olanak sağlayan yöntemin etkinliği, sağlamlığı ve güvenilirliği vurgulanmıştır [62].

Yapılan literatür çalışmaları bir bütün olarak değerlendirildiğinde; güç sistemlerinde güç akışı analizleri ile güç kayıp azaltımı, gerilim kararlılığının sağlanması, elektrik enerjisinin etkin, güvenilir, kaliteli ve ayrıca belirli limitler dahilinde sürekliliğinin sağlanmasının başlıca çalışma konusu başlıkları olduğu belirlenmiştir.

Güç kayıp, maliyet azaltımı ve gerilim kararlılığı çalışmalarında, meta-sezgisel algoritmaların son yıllarda çok sık kullanıldığı gözlemlenmektedir. Güç sistemlerinde güç akışı probleminin çözümünde tabu arama, yapay arı kolonisi, genetik algoritma, benzetimli tavlama, evrimsel gelişim algoritması, karınca koloni optimizasyonu, balina optimizasyon algoritması, parçacık sürü optimizasyonu, gri kurt optimizasyonu vb. algoritmalar ve bunların kendi aralarında birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit algoritmalar küresel en iyi sonucu üretmek amacıyla kullanılmaktadır [63-66].

Yukarıda detaylı olarak verilen literatür araştırmasında; yenilenebilir enerji kaynaklı üretim birimlerinin en uygun büyüklükte konumlandırılması, mevcut güç üretim birimlerinin ise en iyi kapasite değerlerinde kullanılması için güç sistemlerinde yapılan güç akışı probleminin çözümünün güncel bir araştırma konusu olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasında klasik güç akışı analizlerinin tarihçesi, güç sistemlerinde oluşan güç kayıpları ve gerilim kararlılığı problemleri ve bu problemlerin çözümünde kullanılan yeni nesil meta-sezgisel algoritmalar araştırılmıştır. Daha sonra güç akışı probleminin çözümü için klasik Newton Raphson metodu, optimizasyon problemi olarak güç akışının tanımlanması ve meta-sezgisel algoritmalardan PSO ve GKO algoritmaları kullanılarak güç akışı optimizasyonu ele alınmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak beşinci bölümde mevcut meta-sezgisel algoritmaların üstün yönlerine odaklanılarak geliştirilen hibrit PSO algoritması tanımlanmıştır. Önerilen algoritmanın geçerliliğini ve etkinliğini doğrulamak için benchmark test fonksiyonları kullanılarak algoritmalar karşılaştırmalı olarak sınanmıştır. Daha sonra MATLAB yazılımı kullanılarak IEEE 30-bara test sistemi temel yük ve yük artışı benzetim çalışmalarında; klasik Newton-Raphson, PSO, GKO ve geliştirilen HPSO algoritmalarıyla güç akışı gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bunlara ilaveten algoritmaların farklı bara test sistemlerindeki performanslarının değerlendirilmesi amacıyla IEEE 57-bara test sisteminde belirtilen algoritmalarla güç akışı optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Tez çalışmasının sonuç bölümünde; güç kayıplarının azaltılması ve gerilim kararlılığının sağlanması amaçlı güç akışı optimizasyon uygulamalarında önerilen HPSO algoritmasının PSO, GKO ve diğer literatürde yer alan algoritmalara olan etkinliği gösterilmiştir. Tezin sonuç bölümünde önerilen HPSO algoritması kullanılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilip literatürde yer alan diğer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılarak geliştirilen algoritmanın üstünlük ve sağlamlığı vurgulanmıştır.

2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK

2.1. Giriş

Güç sisteminde kararlılık, güvenilirlik ve enerji maliyetleri birbirleriyle ilişkilidir. Güç sistemi operatörleri, hat veya üretim birimlerinde beklenmeyen arıza durumlarında güç sisteminin güvenli ve kararlı çalışmasının devamını taahhüt etmektedir. Sistemin güvenliği doğrudan elektrik birim maliyetini de etkilemektedir. Güç sisteminin güvenliğinin sağlanması sistemin kararlı çalışabilmesine bağlıdır [67]. Güç sistemlerinde enerji arzı güvenilirliğinin sağlanması için iletim ve dağıtım operatör şirketlerinin ana hedeflerinden birisi olan kararlılık konusu, 20. YY başlarından itibaren güç sisteminin güvenli çalışabilmesinde en önemli problem olarak tanımlanmaktadır [68]. Güç sistemlerinde kararsızlık sonucu oluşan geniş çaplı gerilim çökmeleri, bu problemin dikkate alınmasını ve çözülmesini gerektiren en önemli başlık olduğunu göstermiştir. Gelişen teknolojinin dağıtık üretimi artırması, yeni yükler üreterek sistemde yer almasına bağlı güç sistemlerinin genişleyerek büyümesi, güç sistemi üzerindeki baskıyı artırmaya devam etmektedir. Güç sistemleri üzerindeki bu baskı kararsızlık sorunu olarak ortaya çıkabilmektedir [68].

Güç sistemlerinin çalışmasında çeşitli bozucu etkiler ansızın oluşabilmektedir. Bozucu etkiler ise sistemin kararlı çalışmasını olumsuz etkilemektedir. Kararlı çalışmasını etkileyen yıldırım düşmesi, kısa devre, izolasyon hataları ve güç sistemi güvenliği, kontrol ekipmanlarının arızası vb. durumlar büyük bozucu etki oluşturabilir. Bunlarla birlikte, yük taleplerindeki ani değişimler de güç sisteminde küçük bozucu etkiler oluşturabilir. Belirtilen bozucu etkiler sonrasında güç sisteminin kararlılığını sürdürmesi beklenir [69]. Sonraki alt bölümlerde kararlılık tanımı, güç sistemlerine ait rotor açısı, frekans ve gerilim kararlılığının sınıflandırılması, tarihte yaşanan önemli gerilim kararlılığı sorunları ve nedenleri ele alınmaktadır.

2.2. Kararlılık Tanımı

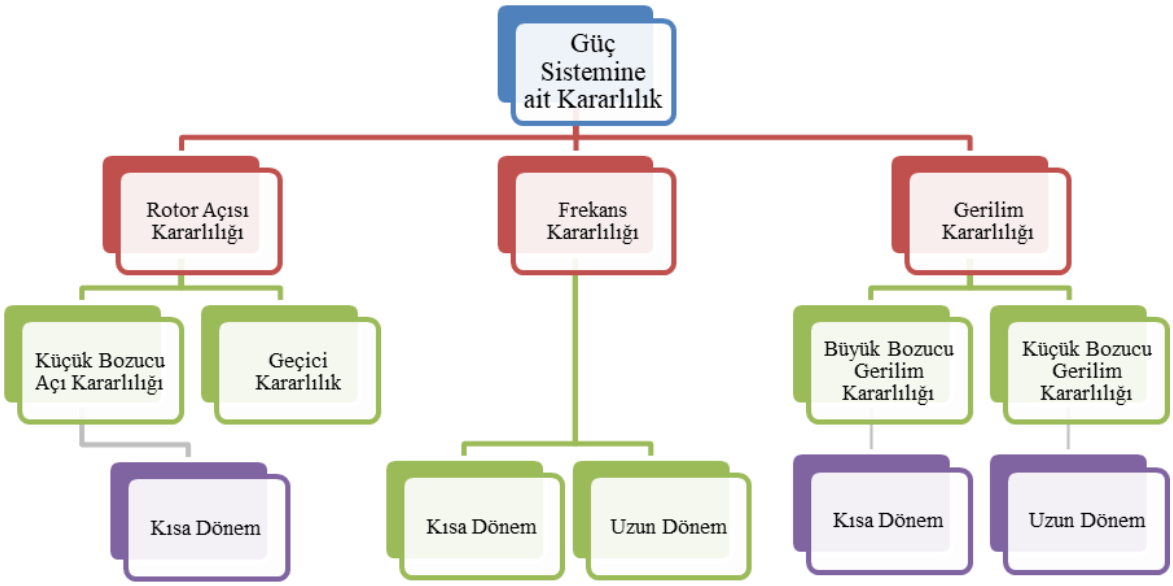
Güç sistemlerinde elektrik enerjisinin üretim, iletim ve tüketiminde; şebekenin kontrolsüz oluşu, yüklerin ve üretim birimlerinin gelişen yeni ve yenilenebilir enerji teknolojileri ile çeşitlenmesi, önemli gerilim kararlılığı sorunlarını ortaya çıkarmıştır [70].

Gerilim kararlılığı sorunları kısa veya uzun süreli gerilim hataları şeklinde ortaya çıkmakta ve kontrol edilemediğinde güç sistemlerini kullanılamaz hale getirebilmektedir. Güç sistemi kararlılığı; bir güç üretim, iletim ve dağıtım sisteminin, belirli bir başlangıç çalışma koşulu için normal çalışma limit değerlerinde dengede kalabilmesidir ve fiziksel olarak bir olumsuzluğa maruz kaldıktan sonra çalışma dengesini yeniden kazanma kabiliyetidir. Güç sisteminin birçok değişkeni sınırlıdır, böylece pratik olarak tüm sistem dengede kalır [70,71].

Güç sistemi kararlılığı sınıflandırılmak istenildiğinde, oluşabilecek kararsızlık modunun fiziksel durumu, kararsızlığın gözlenebildiği ana sistem değişkenince ifade edildiği şekildedir. Hesaplama yöntemi ile kararsızlık durumu tahmin edilerek bu kararsızlığın etkileyebileceği düşünülen olumsuzluğun boyutu da belirlenebilir. Güç sistemi kararsızlığını değerlendirmek için; güç akışı problemi, kullanılan cihazlar, süreçler ve zaman da hesaba katılmalıdır [72].

2.3 Güç Sistemlerinde Kararlılığın Sınıflandırılması

Güç sistemlerinde kararlılık 3 ana başlık altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar; rotor açısı kararlılığı, frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığı olarak isimlendirilir [70,71]. Güç sisteminde kararlılığın değerlendirilmesi geçici bir bozucu etki sonrasında gerçekleşir. Bozucu etki küçük veya büyük olabilir. Ani yük değişimlerinin oluşturduğu küçük bozucu etkiler güç sistemi tarafından çoğu zaman karşılanabilmektedir. Güç sisteminde oluşan kısa devreler ve aşırı yüklenme sonucu gerçekleşen büyük bozucu etkiler ise güç sistemine ait koruma röleleri ile bertaraf edilebilmektedir. Bertaraf edilemediği farklı senaryo durumlarında, güç sistemi kararlılığının nasıl etkileneceğinin bilinmesi güç sistemi operatörlerinin beklentileri arasındadır [73]. Genel olarak güç sistemine ait gerilim, faz açısı, akım, güç ve frekans verilerinin birlikte değerlendirilmesi sistemin anlık kararlılığı hakkında bilgi vermektedir [74]. Güç sistemlerine ait kararlılık çeşitleri 3 ana başlıkta; küçük, büyük, geçici, kalıcı, kısa ve uzun dönem kararlılığı olmak üzere alt başlıklara ayrılmıştır. Şekil 2.1'de güç sistemine ait kararlılıklar alt başlıklarıyla verilmektedir.



Şekil 2.1. Güç sistemlerine ait kararlılık çeşitleri

2.3.1. Rotor açısı kararlılığı

Güç sistemine ait rotor açısı kararlılığı, enterkonnekte bağlı güç sistemlerinde senkron makinelerin bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra senkronizasyon değerlerini koruyabilme yeteneğini ifade etmektedir. Rotor açısı kararlılığı, sistemdeki her senkron makinenin elektromanyetik tork ve mekanik tork arasındaki dengeyi korumasına, ayrıca bozucu etki öncesine dönebilme yeteneğine bağlıdır. Ortaya çıkabilecek kararsızlık, bazı generatörlerin güç kaybına neden olan açısal salınımların artması şeklinde oluşur. Rotor açısı kararlılık problemi, güç sistemlerinde bulunan elektromekanik salınımların çalışılmasını içerir. Bu problemdeki temel faktör, senkron makinelerin rotor açıları değiştikçe güç çıkışlarının değişme şeklidir [70-75].

Kararlı hâl koşulları altında, giriş mekanik torku ile her bir generatörün çıkış elektromanyetik torku arasında bir denge vardır ve hız sabit kalır. Sistem bozuluyorsa, bu denge bozulur ve dönen bir makinenin hareket yasalarına göre rotorunun hızlanmasına veya yavaşlamasına neden olur. Bir generatör geçici olarak diğerinden daha hızlı çalışırsa, rotorunun açısal konumu yavaş makineninkine göre ilerler. Elde edilen açısal fark, yükün bir kısmını güç açısı ilişkisine bağlı olarak yavaş makineden hızlı makineye aktarır. Bu durum, hız farkını ve dolayısıyla açısal ayrımı azaltma eğilimindedir [76-77].

Belli bir sınırın ötesinde açısal farkın artması, açısal ayrılmanın daha da artırılması için güç aktarımındaki azalmaya eşlik eder. Sistem, bu rotor hızı farklılıklarına karşılık gelen kinetik enerjiyi absorbe edemiyorsa, kararsızlık ortaya çıkar. Herhangi bir durum için, sistemin kararlılığı, rotorların açısal konumlarındaki sapmaların yeterli geri yükleme torku ile sonuçlanıp sonuçlanmamasına bağlıdır [78].

Bir senkron makine ile sistemin geri kalanı arasında veya makine grupları arasında, birbirlerinden ayrıldıktan sonra her bir grup içinde senkronizasyon sağlanamadığı durumda senkronizasyon kaybı meydana gelebilir [79].

2.3.2. Frekans kararlılığı

Frekans kararlılığı, bir güç sisteminde şiddetli bir sistem bozucu etkisini takiben sisteme ait sabit frekansı koruyabilmesi ve üretim birimleri ile yük arasında önemli bir dengesizliği dengede tutabilmesi anlamına gelir. Frekans kararlılığı, istenmeyen minimum yük kaybıyla birlikte güç üretimi ve yük arasındaki dengeyi koruyarak bozucu etki öncesine dönebilme yeteneğine bağlıdır [71-79].

Frekans kararsızlığı, üretim birimlerinin veya yüklerin ani olarak devreye alınıp devreden çıkarılması nedeniyle sürekli frekans dalgalanmaları sonucu meydana gelebilir. Şiddetli sistem bozucu etkileri genellikle; büyük frekans oluşumu, dengesiz güç akışları, gerilim limitlerinin aşılması ve diğer sistem değişkenlerinin limit dışı çalışması olarak belirlenebilir. Geleneksel geçici kararlılık veya gerilim kararlılığı çalışmalarında; modellenmemiş olan senaryolar, kontrol ve koruma ekipmanlarının işlevleri frekans kararsızlığını tetikler. Bu işlevlerin frekans kararsızlığını tetiklemesi çok yavaş olabilir veya sadece sistem gerilim ve frekans koruma röleleri için tetikleyici olabilir [72].

Enterkonnekte bağlı büyük güç sistemlerinde, kararsızlık durumlarının önlenmesi için yaygın olarak sistemlerin parçalara bölünmesi faydalı olabilmektedir. Bu durumda güç sistemi kararlılığı hedeflenirken, her bir güç sistemi parçasının minimum yük kaybıyla çalışma dengesi durumuna ulaşıp ulaşamayacağının araştırılması gereklidir. Senkron makinelerin göreceli hareketlerinden ziyade, güç sisteminin baz frekansıyla çalıştığına dair genel tepkisi ölçülür [67-69].

Genellikle, frekans kararlılığı problemleri, güç sistemi ekipmanlarının tepkilerindeki yetersizlikler, kontrol ve koruma ekipmanının zayıf koordinasyonu veya yetersiz güç üretim rezerviyle ilişkilidir [70].

Belirtilen nedenlerden kaynaklı güç sistemlerinde oluşacak olan frekans kararsızlığı, değişken olarak önemli bir yük veya üretim kaybına sebep olabilecek büyük olumsuzluk durumlarına yol açabilir [73].

2.3.3. Gerilim kararlılığı

Güç sistemi baralarında gerilim değerlerinin belirli limitler dahilinde kalması gerilim kararlılığı açısından önemlidir. Değişen yük talepleri olan bir güç sistemine ait bara gerilimlerinin baz gerilim değerinin % ±10 aralığında kalması beklenir. Belirlenen gerilim limitleri korunamayan güç sisteminde gerilim kararsızlığı yaşanabilir [72,73].

Literatürde gerilim kararlılığının çeşitli tanımları bulunmaktadır. Genel kabul gören iki tanıma göre; güç sisteminin zaman kapsamında çalışma durumundaki büyük ve küçük arızaları dikkate alınmaktadır. İlk ana tanımda IEEE-CIGRE gerilim kararlılığını: *"Bir güç sisteminin küçük arıza kararlılığına sahip olduğunu, sistemde meydana gelen küçük bir arızanın ardından yüklere yakın bölgelerdeki gerilimlerin, benzer veya arıza öncesi değerlerine yakın olarak kalabilmesidir."* olarak tanımlamaktadır. Bu tanıma göre bir arızaya maruz kalmış ve belirli bir çalışma durumunda bulunan güç sisteminin, yüklere yakın bölgelerdeki gerilim değerleri arıza sonrası denge değerleriyle benzerlik gösteriyorsa kararlı olduğu söylenebilir [74]. Arıza sonrası denge gerilim değerlerinin kabul edilebilir sınırların altında bulunması hâlinde sistemde gerilim çökmesi meydana gelmektedir.

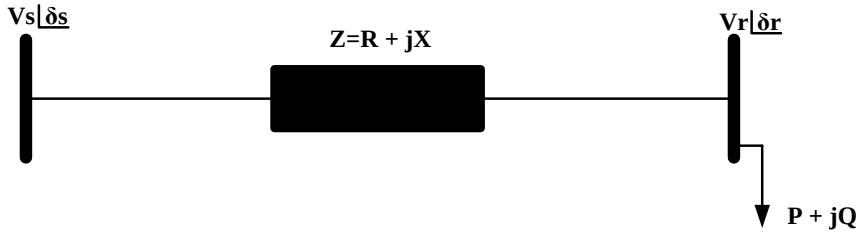
İkinci genel kabul gören gerilim kararlılığı hakkında IEEE tarafından yapılan tanımda:

> "Gerilim kararlılığı; güç sistemi geriliminin belirli sınırlar içinde korunmasıdır ki böylece yük admitansı yükseldiğinde, yükün gücü de artacak ve böylece hem güç hem de gerilim kontrol edilebilir olacaktır. Gerilim çöküşü, sistemin büyük bir bölümünde meydana gelen gerilim kaybının yol açtığı gerilim kararsızlığı durumunun bir sonucudur. Gerilim güvenliği, sistemin sadece kararlı bir şekilde çalışma kabiliyeti değil, aynı zamanda meydana gelebilecek çeşitli arıza ya da işletme durumları karşısında kararlı halde kalabilme (sistem geriliminin iyileştirilmesine kadar olan süre boyunca) yeteneğidir." [75].

Bir sistemde gerilim kararsızlığı durumu, yükteki artış veya sistemde meydana gelen değişimlerden dolayı gerilimin hızla aşağıya düşmesi sonucunda operatör ve otomatik kontrol sistemlerinin hatayı düzeltmekte yetersiz kaldığı durumlarda meydana gelir. Gerilim düşüşü birkaç saniye olabileceği gibi 10-20 dakika kadar da sürebilir. Eğer düşüş azalmadan devam ederse, güç sisteminde kararlı hâl açısal kararsızlık ve gerilim çökmesi meydana gelir [70-75].

Gerilim kararlılığı probleminin çözümünde güç akışı tekniklerinden yararlanılmaktadır. Gerilim kararlılığı, sabit çalışma koşullarında çalışan güç sisteminin üretim ve tüketim birimleri arasında güç aktarabilme yeteneğinin durumuna göre sağlanır. Güç sistemi üzerindeki yüklerin durumu gerilim kararlılığı ile ilişkilidir. Bozucu bir etki sonrasında güç sistemi denge durumunu sağlayarak bozucu etki öncesinde belirlenen kabul edilebilir sınırlarda kalabiliyor ise belirtilen güç sistemi kararlı çalışmaktadır. Kabul edilebilir sınır değerlerinin dışına çıkılması durumunda güç sistemi kararsızlığa doğru giderek sistemde kısa veya uzun süreli gerilim çökmesi olayları gözlemlenebilir [72]. Gerilim kararsızlığına neden olan gerilim çökmesi olayı, aşırı aktif ya da reaktif yük artışı sonucu güç sisteminin kapasite üstü talebe karşılık verememesi ile ortaya çıkabilmektedir [71].

Güç sistemi üzerinde güç ile gerilim verileri arasındaki bağıntı doğrudan gerilim kararlılığını etkilemektedir. Güç ve gerilim bağıntılarının inceleneceği 2 baralı iletim hattına ait şema Şekil 2.2'de verilmektedir [71].



Şekil 2.2. İki baralı iletim hattına ait tek hat şeması

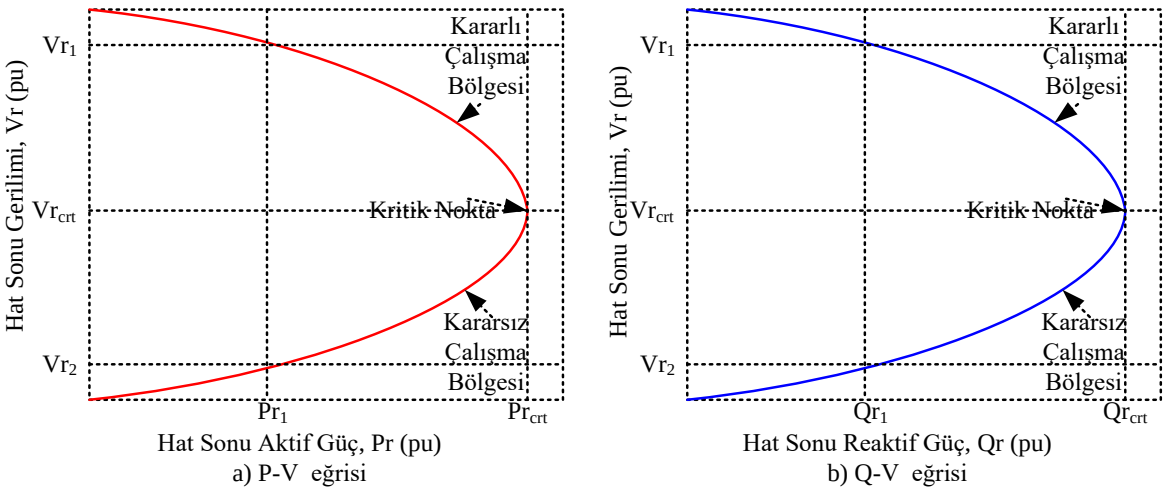
2 baralı iletim hattı üzerindeki gerilim ve güç bağıntıları Eş. 2.1 ve Eş. 2.2 ile elde edilmektedir. Eşitliklerde; P aktif Q ise reaktif gücü, *Vs* ve *Vr* sırasıyla hat-başı ve hat-sonu gerilimlerinin büyüklüğü, $\delta = \delta_s - \delta_r$ hat-başı ve hat-sonu gerilimler arasındaki faz farkını, Z hat empedansı büyüklüğü ve θ_Z ise hat empedansının faz açısını göstermektedir.

$$P = \frac{V_r - V_s}{Z}\cos(\theta_Z - \delta) - \frac{V_r^2}{Z}\cos(\theta_Z) \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{V_r - V_s}{Z}sin(\theta_Z - \delta) - \frac{V_r^2}{Z}sin(\theta_Z) \quad (2.2)$$

Bara sayısı ikiden daha fazla olan güç sistemlerinde güç ve gerilim bilgilerinin elde edilmesi için güç akışı analizi teknikleri kullanılmaktadır [76]. Güç akışı analizi teknikleri 3. bölümde detaylı olarak verilmiştir.

Gerilim kararlılığının analiz edilmesi için iki baralı güç iletim hattına ait P-V ve Q-V eğrileri Şekil 2.3.a ve 2.3.b'de verilmektedir. P-V eğrisi incelendiğinde, hat sonu aktif gücü kritik nokta değeri ile gerilim kritik değerlerinin birleşim noktası olan kritik yüklenme noktası oluşturularak çizilen kararlılık eğrisinin üst bölgeleri kararlı durum çalışma bölgesini oluştururken, eğrinin altında kalan bölge ise kararsız durum çalışma bölgesini tanımlamaktadır. Q-V eğrisi incelendiğinde, hat sonu reaktif gücü kritik nokta değeri ile gerilim kritik değerlerinin kesişimi olarak kritik yüklenme noktası işaretlendiğinde çizilen kararlılık eğrisinin üst bölgeleri kararlı durum çalışma bölgesini oluştururken, eğrinin altında kalan bölge ise kararsız durum çalışma bölgesini tanımlamaktadır. Her iki eğride tek bir noktada gerilim kararlılığı sınırını belirleyecek olan azami güç bilgisi ve kritik gerilim değeri bulunmaktadır. P-V ve Q-V eğrilerinden yola çıkılarak, talep edilen güçler belirtilen azami güç değerini aştığı andan itibaren güç sistemi kararsızlığa doğru gitmektedir [76].



Şekil 2.3. Güç iletim hattı için a) P-V ve b) Q-V eğrileri

2.4. Tarihte Yaşanan Önemli Gerilim Kararlılığı Sorunları

Güç sistemi kararlılığı, sistem mühendislerinin önemle üzerinde durduğu karmaşık konuların en başında gelmektedir. Bu nedenle güç sistemlerinin kararlılığı konusunun günümüzde hangi aşamada olduğunu kavrayabilmek açısından geçmişten günümüze olan tarihçesine bakmak yerinde olacaktır [77].

İlk defa 1920'li yıllarda güç sistemlerinin kararlılığı önemli bir sorun olarak tanımlanmıştır. 1924 ve 1925 yıllarında ilk laboratuvar testleri ile güç sistemi saha testleri gerçekleştirilmiştir [78].

İlk kararlılık sorunlarının incelemesi, uzun iletim hatları ile büyükşehirlerin merkezindeki yükleri besleyen hidroelektrik santrallerinin kararlılık problemi olarak ele alınmıştır. Bazı mali nedenlerden ötürü belirtilen güç sistemlerinin kararlı durum çalışmasına yakın değerlerde çalışması beklenirken, iletim hatlarındaki kısa devre arızaları ile diğer sistem hataları sebebiyle güç sisteminin sürdürülebilirliği sağlanamamıştır. İletim hatlarının büyümesi ve genişlemesi nedeniyle kararlılık sorunlarının daha da artması, güç üretim santrallerinde senkronizasyon hatalarını da tetiklemiştir [70,79].

Güç sistemi analiz metotları, model tasarımları ve güç sistemi dinamik sistemlerinin kararlılığı çalışmaları bilgisayar mimarilerinin gelişimine paralel olarak devam etmiştir. 1950'li yıllarda güç sistemlerinden senkron generatör, uyartım sistemi ve hız ayarlayıcı hidrolik (governor) sisteminin özel problemlerle analiz edilmesinde özel olarak analog bilgisayarlar kullanılmıştır [70]. İlk sayısal bilgisayarla güç sistemi kararlılık analizi 1956'da gerçekleştirilmiştir [72].

Dünyanın çeşitli bölgelerinde ve ülkelerinde tarihten günümüze büyük çaplı güç sistemi kararsızlığı ve gerilim çökmesi olayları yaşanmıştır. İnsan hayatını son derece olumsuz etkileyen enerji kesintileri ile sonuçlanan olayların bazıları aşağıda verilmektedir.

9 Kasım 1965'te akşam 17:00 saatlerinde Kanada'nın Ontario eyaleti yakınlarındaki 230 kV değerinde bir enerji nakil hattının devreye girmesi ile diğer enerji nakil hatlarında oluşan ağır yüklenme koşulları, Amerika Birleşik Devletleri'nin kuzeydoğusundaki sekiz eyalette 30 milyon kişinin 13 saat boyunca elektrik kesinti yaşamasına sebep olmuştur [80].

2 Şubat 1971 akşamı Waterside elektrik tesisi patlaması nedeniyle Amerika Birleşik Devletleri'nin 4 eyaletinde 1 saat elektrik kesintileri yaşanmasına neden olmuştur. 4 Temmuz 1976'da New York eyaletinde Hudson Nehri civarında bulunan Edison transformatör merkezine yıldırım düşmesi sonucunda yaşanan zincirleme elektrik kesintisinde 2 kesicinin hattı açması sonucu bazı bölgelerin 24 saatten fazla elektrik kesintisi yaşamasına sebep olmuştur. 10 Mayıs 1977'de Romanya ülke genelinde 5 saat süren elektrik kesintilerinin insan hatası kaynaklı olduğu tespit edilmiş olup ülke ekonomisine 1 milyar Dolar zarar vermiştir. 22 Aralık 1982'de Kaliforniya'da 500 kV enerji nakil hatları ile 230 kV enerji nakil hatlarının birbirleri üzerine çökmesi ile 5 milyon insan saatlerce süren elektrik kesintilerine maruz kalmıştır. 27 Aralık 1983'te bir güç üretim santralindeki kesici arızası nedeniyle İsveç ulusal enterkonnekte sisteminin üçte ikisi devre dışı kalarak 4,5 milyon insanın saatlerce elektriksiz kalmıştır [80].

17 Mayıs 1985'te Güney Florida eyaleti generatörlerde oluşan fırça arızasının sebep olduğu yangın nedeniyle 500 kV enerji nakil hattı devre dışı kalarak 4,5 milyon insan 3,5 saat boyunca elektriksiz kalmıştır. 22 Haziran 1999 tarihinde Brezilya Sao Paulo eyaletindeki 440 kV bir transformatör merkezine yıldırım isabet etmesi sonucunda devre dışı kalan 750 kV AA ve 600 kV DA enerji nakil hatları sonucunda 97 milyon insan saatlerce elektriksiz kalmıştır. 9 Mayıs 2000'de Portekiz Lizbon'da bir leyleğin enerji nakil hattına çarpması sonucunda şehrin tümünün uzun süre boyunca elektriksiz kalmasına neden oldu. 28 Eylül 2003'te Fransa-İtalya arasındaki 400 kV enerji nakil hattının fırtına sebebiyle ağaçlara çarpıp zarar görmesi ile oluşan aşırı yüklenme sonucunda şebeke gerilimi frekansının önce 49 Hz. daha sonra 47,5 Hz'e düşmesi ile birlikte İtalya genelinde uzun süreli elektrik kesintileri yaşanmıştır. 18 Ağustos 2005'te Endonezya'da arızalanan bir iletim hattı nedeniyle Doğu Java'daki bir elektrik santralinin iki birimi ile Batı Java'daki elektrik santralinin altı birimini devre dışı bırakan bir seri arızaya yol açarak Java bölgesinin uzun süre komple elektriksiz kalmasına neden olmuştur [80].

10 Kasım 2009'da Brezilya ve Paraguay'da sağanak yağış ve fırtına sebebiyle iletim hatlarında oluşan kısa devreler, transformatör merkezlerinin devre dışı kalmasını sağlamıştır. Bu arıza sonucunda 18 eyalette Brezilya tüketiminin %45'inin enerjisi kesilmiş ve 87 milyon insan karanlıkta kalmıştır [80].

31 Mart 2015'te Türkiye'de 400 kV enerji nakil hattında yapılan bakım çalışması sırasında Doğu-Batı bölgelerinde oluşan yük talebi farklılıklarının fazla olması, Osmanca-Kurşunlu hattının aşırı yüklenmesine sebep olmuştur. Bu durum hat gerilimlerine ait frekansın 47 Hz. seviyesine düşmesine yol açarak geniş çaplı gerilim çökmeleri meydana getirmiştir. 8 saatten fazla süren gerilim çökmesi olayından Türkiye'nin hemen hemen bütün bölgeleri olumsuz etkilenmiştir. 9 Ocak 2021'de bir mühendislik hatası sonucu Guddu'da meydana gelen hat arızası sebebiyle frekans ve gerilim çökmesi meydana gelmiştir. Pakistan'ın %90'ını kapsayan büyük gerilim çökmesi; 210 milyon insanın elektriksiz kalmasına sebep olmuştur [80].

Geçmişten günümüze dünyanın çeşitli bölgelerinde yaşanan gerilim kararlılığı sorunları incelendiğinde; gerilim kararsızlığına yol açan birçok etkenin beklenmedik durumlarda ortaya çıktığı belirlenmiştir. Aşırı yüklenme, üretim birimlerinde meydana gelen arızalar, hava olayları, kontrol, koruma ve anahtarlama ekipmanlarının hatalı davranması vb. olumsuz durumlar güç üretim birimleri ve iletim hatlarının olumsuz etkilenmesine neden olmuştur. Ayrıca güç sisteminde domino etkisi oluşturarak güç sistemlerinin gerilim, frekans kararsızlığı yaşamasına ve büyük bir bölümünün devre dışı kalmasına yol açmıştır.

3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞ ANALİZİ

3.1. Giriş

Dünya genelinde, güç sistemleri üzerinden yüksek gerilim değerlerinde doğru ve alternatif akım formunda elektrik enerjisi iletimi yapılmaktadır. Yüksek gerilimde doğru akım formunda güç iletiminin zorlukları nedeniyle elektrik enerjisi zorunlu haller haricinde genellikle alternatif akım (AA) formunda iletilir. AA elektrik enerjisinin, doğru akıma (DA) göre dönüşümde ve iletimde kolaylıkları bulunmaktadır. Güç sistemlerinde AA elektrik enerjisi formunun uzak mesafelere iletiminde güç kayıplarını oluşturan hat akımlarını en aza indirmek gerekir. İletim hattı üzerindeki hat akımlarını asgari değerlere indirmek için frekans sabit kalmak koşuluyla hat gerilim değerlerini bir transformatör marifetiyle daha yüksek gerilim değerlerine çıkarmak mümkündür. Güç üretim birimlerinde 5-15 kV AA gerilim değerlerinde üretilen elektrik enerjisi, bir güç transformatörü yardımıyla iletim hattına aktarılmak üzere 6–500 kV gerilim değerlerine yükseltilebilmektedir. Genellikle AA formunda, 50-60 Hz. frekans değerlerinde iletim hattına aktarılan elektrik enerjisi, iletim hattının omik, endüktif ve kapasitif yük özelliği göstermesi sebebiyle sonraki durağa ulaşana kadar iletim hattı kayıplarına maruz kalır. İletim hattı üzerinde oluşan kayıplar nedeniyle güç sistemi gönderici ve alıcı baralarında güç ve gerilim değerleri farklılaşması meydana gelir [78].

Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımında kullanılan bileşenlerin oluşturduğu karmaşık yapı güç sistemi olarak tanımlanır [79]. Güç sistemleri bileşenlerinin işletilmesinde kabul edilebilir değerlerde sürdürülebilirliğinin sağlanması, beklenmeyen durumlara yönelik gerekli önlemlerin alınması ve artan taleplere göre enerji arzının ayarlanabilmesi için planlamaların oluşturulması sistemin devamlılığı açısından çok önemlidir. Güç sistemi operatörlerinin, güç sisteminin sürekli değişen aktif ve reaktif güç taleplerini karşılaması, frekans, gerilim değerlerini koruması ve güvenilirlik seviyesini en iyi değerlerde tutması beklenir. Güç sistemi üzerinden aktarılan enerjinin ise asgari maliyetlerde ve en az çevresel zararlı etki ile sunulması beklenir [72]. Güç sisteminde sürekli değişen dengelerin kontrol altında tutulması gerekirken, bu dengelerin ne şekilde sağlanacağının planlanması konusunda güç akış analizlerinden faydalanılır [7,73].

Bir güç sistemine ait farklı bağlantı noktalarında farklı güç üretim değerleri ve yüklenme durumlarında, baralardaki gerilim, gerilime ait faz açısı, aktif güç ve reaktif güç büyüklüklerinden herhangi ikisinin bilinmesi durumunda gerilim değeri ve faz açısı başta olmak üzere bilinmeyen büyüklüklerin hesaplanması güç akışı probleminin çözümü olarak tanımlanır [70,71]. Güç sisteminin modellenmesi sonrasında güç akışı probleminin çözümünde sayısal analiz teknikleri tercih edilir. Güç akışı analizinin gerçekleştirilmesi ile bütün baralardaki gerilim genlik ve faz açısı değerleri elde edilir. Baralardaki aktif ve reaktif güç tüketim bilgileri bilinmekte olan güç sisteminde, üretilen aktif ve reaktif güç bilgilerinin karşılaştırılması sonucu oluşan güç farkları güç sistemi üzerinde gerçekleşen güç kayıplarını temsil etmektedir. Oluşan güç kayıp bilgisi ile bir güç sistemi üzerinde gönderici ve alıcı baralardaki gerilim ve faz açısı bilgileri hesaplanabilmektedir. İdeal bir güç sistemi üretim birimlerinde üretilen güçler ile tüketim birimleri üzerinden talep edilen güçler arasında fark olmaması beklenir. Ancak gerçek bir güç sisteminde güç üretim, iletim ve dağıtım birimlerinde oluşan kayıplar sıfırdan büyük olacağından dolayı üretim ve tüketim birimlerinin güç değerlerinde farklı sayısal değerler oluşur. Diğer bir ifade ile tüketilen güçlerle kayıp güçlerin birleşimi üretilen güce tekabül etmektedir.

Güç sistemlerinin analizlerinin yapılabilmesi için kullanılan bileşenlerin bir bütün olarak modellenmesi beklenir. Oluşturulan modele göre yüklerin talep ettiği güçler aktif ve reaktif güç bileşeninden oluşan karmaşık güçler olacağından, güç sistemindeki üretim birimlerini temsil eden generatörlerin bir gerilim kaynağı yerine doğrudan güç kaynağı olarak görev yapması sebebiyle modellenen devrelerin doğrudan çözümü zor olabilmektedir. Güç akışı probleminin çözümü için güç sisteminin kararlı hal durumunun devamlı değerlendirilmesi gerekmekle birlikte olası farklı çalışma durumlarının tespiti yapılarak öngörülerin oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle farklı çalışma koşulları için belirlenen probleme göre elde edilen modellerin matematiksel ifadelerle çözümlenmesi sağlanır. Güç sisteminde bulunan yükler zamana bağlı sürekli değişkenlik gösterdiği için kararlı durum sergilemezken, günün belirli saatleri baz alınarak sabit kabul edilen yükler ile kararlı durum analizi gerçekleştirilebilir [8]. Güç sistemlerinde kararlı durum çözümü güç akışı diğer adıyla yük akışı problemi olarak tanımlanan matematiksel ifadeler çok sık başvurulan nümerik analiz yöntemidir [72]. Kararlı hal güç sistemi baralarında belirli değerlerde güç üretimi ve gerilim limitleri ile gerilim genlikleri ve faz açılarının hesaplanması işlemi güç akışı matematiğinin konusudur.

Güç akışı problemini çözmek için güç sistemi; kararlı durum güç ve gerilim genlikleri kullanılarak modellenir ve bu modelde güç akışı problemi matematiksel yöntemlerle çözülebilirken, çözümde tüm baraların gerilimleri, faz açıları, üretilen aktif ve reaktif güç ile baralar arası akan aktif, reaktif güç bilgileri elde edilebilmektedir [7,72].

Güç akışı analizi ile güç sistemi bara gerilimleri ve baralar arası güç akışının gerçek zamanlı durumunun izlenmesi sağlanır. Bir güç sisteminin sürdürülebilir performans göstermesi için üç şartın yerine getirilmesi beklenir. Bunlar;

- Güç sisteminde üretim birimlerinde üretilen güçler sistemin tüm yüklerini ve üretim, iletim, dağıtım kayıplarını karşılayacak büyüklükte olmalıdır.
- Güç sistemi bara gerilim değerleri uluslararası standartlarda belirtilen değer aralığında olmalıdır.
- Güç sistemini oluşturan ekipmanlar sistemin kabul edilebilir herhangi bir yük değeri için aşırı yüklenmemelidir.

Güç sistemlerinde, güç akışı probleminin çözümünde gerilim, akım büyüklüklerinin hesaplanmasında fazör kavramından yararlanılır. İletim ve dağıtım sistemlerinin birçok bölümü kilovolt seviyesinde gerilimlerle çalışmaktadır. Bu durumun doğal sonucu olarak sistemler üzerinden kilovattan (kW) megavata (MW) ya da kilovolt-amperden (KVA) megavolt-ampere (MVA) uzanan büyüklükte güç taşınmaktadır. Güç sistemlerinin farklı bölümlerinde farklı fiziksel büyüklüklere sahip gerilim, akım, empedans ve güç değerleri önceden belirlenmiş temel (baz) değerlerin yüzdesi olarak sadeleştirilerek ifade edilebilir. Bu şekilde yapılan ölçeklendirme ya da normalleştirme işlemi güç sistemlerini ifade etme kolaylığı ve transformatörlerin dönüştürme oranlarını ortadan kaldırılması gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu işlem güç sistem analizinde yaygın olarak yapılmaktadır ve elde edilen büyüklükler per-unit (pu.) değer olarak ifade edilmektedir. Güç sistemi performansının değerlendirilmesinde; tüm gerilim, akım, empedans ve güç hesaplamalarında ortak olarak pu. değerler kullanılmaktadır [78].

Güç sisteminde herhangi bir büyüklüğün pu. değeri önceden bu büyüklüğün cinsinden belirlenmiş baz değerine ondalık kesri olarak ifadesidir. Bir güç sisteminde pu. değerler cinsinden hesaplamalarda tutarlılık sağlayabilmek amacıyla iki değer genel olarak sistemin anma gerilimi (V_{baz}) ve anma görünür gücü (VA_{baz}) baz olarak seçilir.

Üç fazlı dengeli güç sistemleri bir faz eşdeğer eşitlikler kullanılarak gösterilebilir. Bir faz eşdeğer devre büyüklükleri birime indirgenmiş değerler cinsinden ifade edilirse güç sisteminin pu. eşdeğer devresi bulunacaktır. Üç fazlı bir sistemin anma güç değeri genel olarak görünür güç cinsinden ve anma gerilim değeri hat (fazlar arası) gerilimi olarak belirtilir. Özellikle hat gerilimi cinsinden pu. ifade ile faz gerilimi cinsinden pu. ifade arasında hesaplamalar sırasında karışıklık olabilir. Sistemin gerilim büyüklükleri hat gerilimi olarak ifade edilse de faz başına eşdeğer devrede gerekli gerilim faz gerilim değeridir. Faz gerilimi baz değeri hat gerilimi baz değerinin $\sqrt{3}$'e bölünmesiyle elde edilir. Bir güç sisteminde faz gerilim değeri baz kabul edilerek sistemin bir noktasındaki gerçek faz gerilimi pu. değeri, aynı noktada sistemin hat gerilimi baz kabul edilerek gerçek hat geriliminin pu. değerine eşittir. Benzer olarak üç fazlı güç sisteminin görünür güç değeri faz başına görünür güç değerinin üç katıdır ve üç fazlı görünür güç baz değeri bir faz eşdeğer devre görünür güç baz değerinin 3 katıdır. Bu sebeple üç fazlı bir sistemde üç faz toplam görünür güç değeri baz olarak kabul edildiğinde sistemin üç faz güç pu. değeri, sistemin bir faz eşdeğer devresinde bir faz görünür güç değeri baz olarak kullanıldığında bir faz güç için bulunan pu. değerine eşittir [79,80].

3.2. AA Güç Akışının Tanımlanması

Güç sistemlerinde kullanılan bileşenler uygulamada her zaman üç fazlı olarak tasarlanır. Ancak dengeli şartlarda (tüm fazlardaki akımlar eşit genlikte ve 120° faz farklı) çalıştığı kabul edilen üç fazlı güç sistemi iletim hatları, bir faz ve nötr iletkeninden oluşan faz başına eşdeğer devre kullanılarak oluşturulan tek hat şeması ile modellenebilir. Üç fazın, faz başına eşdeğerinin birim olarak ifadesi, dengeli sistemin per-unit büyüklüklerini kullanan tek hat eşdeğer devreyi meydana getirir. Güç akış probleminin matematiksel gösterimi ve çözümü tek hat eşdeğer devre dikkate alınarak pu. değerler yardımıyla gerçekleştirilir. Güç sistemi eşitlikleri çeşitli formlarda sistematik olarak ifade edilebilse de birçok güç sisteminin analizi için en uygun düğüm gerilimleri yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç sistemi eşitliklerinin sistemin admitans değerleri kullanılarak düğüm denklemleri şeklinde gösterimi düğüm akımları bakımından karmaşık eş zamanlı doğrusal denklemler meydana getirir. Düğüm akımları bilindiğinde bu doğrusal denklem kümesi düğüm gerilimleri için çözülebilir.

Güç sistemlerinde akımdan ziyade genellikle güç değerlerinin bilinmesi sebebiyle güç değerlerinin kullanıldığı eşitlikler, güç akış eşitlikleri ya da yük akış eşitlikleri olarak bilinir ve bu eşitlikler doğrusal olmayan özelliğe sahiptir. Bu sebeple güç akış eşitlikleri mutlaka döngüsel yöntemler kullanılarak çözümlenmelidir [75].

Güç sistemlerinin analizinde, bara sayısının fazla olması sonucu oluşan karmaşıklığı bertaraf edebilmek için güç sisteminin matematiğinin oluşturulması gerekmektedir. Güç sistemlerinde matematik modellerinin oluşturulduktan sonra bara çeşitleri, iletim hattı parametreleri, üretim ve talep gücü bilgilerinin kullanıldığı güç akışı analizi çalışmaları ile bir güç sistemindeki tüm baralarda oluşan gerilim, faz açısı, üretim ve kayıp güç bilgileri belirlenir. Güç sistemlerinde bara çeşitleri sonraki bölümde tanımlanmaktadır [76].

3.3. Güç Sistemlerinde Bara Çeşitleri

Güç iletim hatlarını oluşturan iletkenlere ait matematiksel ifadeler, güç akışında bara admitans matrisini (Y_{Bara}) oluşturmada kullanılırlar [76]. Ayrıca aktif ve reaktif güç üretimi yapan generatörlerin güç sistemine aktardığı ve yüklerin talep ettiği güç değerleri güç akışındaki iletim hatları elemanlarının dışında bara matrisine dahil edilmektedir. Üç fazlı olarak tasarlanan güç iletim hatlarına ait bir faz eşdeğeri, aktif ve reaktif güç üretimi yapan generatörler ve yüklerin birbirleri ile olan bağlantıları baralar üzerinden gerçekleştirilir. Güç sistemindeki baraların yük ya da generatör bağlı olduğu durum göz önünde bulundurularak sınıflandırılmasına rağmen güç akış problemini matematiksel olarak ifade edebilmek için daha belirgin bir sınıflandırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla güç akışının matematiksel olarak ifade edilebilmesi için güç akış problemini çözmeden önce baraları kendi aralarında sahip olunan bilgilere göre sınıflandırmak daha uygundur. Bu bilgiler her bir bara için baranın elektriksel şartlarını ifade eden dört olası değişkendir. Örnek olarak rastgele bir "i" barası için enjekte edilen aktif güç P_i, reaktif güç Q_i, gerilim genliği $|V_i|$ ve gerilim açısı δ_i bu değişkenlerdir. Bu değerler kullanılarak baralar üç temel sınıfta incelenebilir. Salınım, üretim ve yük baraları olmak üzere 3 çeşit tanımlanan baralar güç sistemlerinde güç akış analizlerinde kullanılmaktadır. Alt bölümlerde belirtilen bara çeşitlerinin sınıflandırılması ve tanımları yer almaktadır.

3.3.1. Salınım barası (V-δ bara)

Salınım barası için referans bara ismi de kullanılmaktadır. Güç sisteminde sadece bir tane salınım barası vardır ve sistemde bulunan herhangi bir generatör barası salınım barası olarak belirlenebilir. Salınım barası için gerilim genliği $|V_i|$ ve açısı δ_i bilinmektedir. Aslında güç sistemlerinde fiziksel olarak böyle bir bara bulunmamakta, matematiksel olarak güç akışı çözümünün gerçekleştirilebilmesi için gerekmektedir. Güç akış problemini tam olarak anlayabilmek için belirtilen ifade detaylandırıldığında; güç sisteminde yapılan güç üretimi hem yükleri hem de sistem kayıplarının tamamını karşılamalıdır. Güç akış probleminin çözümüne başlamadan önce P- Q (yük) baralarındaki tüm aktif ve reaktif güç enjeksiyonları bilinmektedir. Ancak güç sistemdeki güç akışının bir fonksiyonu olarak değişkenlik gösteren henüz hesaplanmamış güç sistemi kayıpları bilinmeyecektir. Bu sebeple P-V (üretim) baralarının biri hariç tümünün aktif güç enjeksiyonları ayarlanabilir. Aktif güç enjeksiyonunun ayarlanmadığı bu P-V bara salınım barası olarak modellenecektir. Böylece bu baraya bağlı bulunan generatörün aktif güç üretimi, güç sistemi akışına bağlı olarak değişen kayıpların karşılanabilmesi için salınacaktır ve sistem için gerekli aktif güç boşluğunu dolduracaktır. Salınım barasının gerilim genliği $|V_i|$, generatörün gerilim değerine denk gelecek şekilde seçilir. Salınım barasında gerilim açısı δ_i herhangi bir değer seçilebilir ancak normalde bu değer 0° olarak seçilmektedir. Salınım barasının aktif güç akışının sistem mühendisleri tarafından ayarlanmaması bu değerin güç akışı problemi çözümünün doğal bir sonucu olduğu için bu değer matematiksel olarak takip edilebilir ancak fiziksel olarak imkânsız değerler alabilecektir. Bu sebeple güç akışı probleminin çözümü yapıldıktan sonra salınım barası aktif güç üretim değerinin generatörün fiziksel limitleri içinde olması kontrol edilmelidir.

Sonuç olarak; güç sistemlerinde, güç akışı analizleri öncesinde iletim hatları üzerinde oluşan güç kayıplarının belirsizliği nedeniyle, güç akışı gerçekleştirildiğinde oluşan güç kayıpları üretim baralarına ek güç oluşturmaktadır. Oluşacak ek gücün bilinmemesi nedeniyle tanımlanan salınım barasına ait sadece bara gerilimi ve faz açısı (V_{SL} ve δ_{SL}) belirlenir. Güç sistemine ait üretim ve yük bilgileri için yapılacak olan güç akışı analizi sonucunda salınım barasından güç sistemine aktarılan aktif ve reaktif güç (P_{SL}ve Q_{SL}) bilgileri hesaplanır.

3.3.2. Yük barası (P-Q bara)

Yük baralarında, güç sisteminden talep edilen aktif ve reaktif güç değerleri (P_L ve Q_L) belli olup, yük barasına ait gerilimlerin genlikleri ve faz açıları (V_L ve δ_L) hesaplanır.

3.3.3. Üretim barası (P-V bara)

Güç sisteminde generatörlerin bağlı bulunduğu üretim baralarında üretilen aktif güç ve generatör gerilimi (P_G ve V_G) değerleri belirlidir. Üretim baralarına ait reaktif güç ve faz açıları (Q_G ve δ_G) hesaplanır. Generatörlere ait reaktif güç üretimi belirli limitler dahilinde sağlanmaktadır. Reaktif güç üretiminde asgari ve azami değerler ($Q_{min} \leq Q_G \leq Q_{maks}$) belirlenirken amaç generatör gerilimini istenilen genlikte sabit tutmaktır [76,79]. Reaktif güç limitleri aşıldığında ise bara gerilimi (V_G) değişeceği için bara aktif ve reaktif güç değerleri (P_G ve Q_G) belli olan yük barası gibi tekrar değerlendirilebilir. Güç akışı analizleri sırasında reaktif güç limitlerinin altına inilmesi durumunda mevcut bara tekrar üretim (P_G ve V_G) barasına dönüştürülebilir. Çizelge 3.1'de bara çeşitleri, bilinen ve güç akışı sonrası hesaplanan değişkenlerin bilgileri verilmektedir.

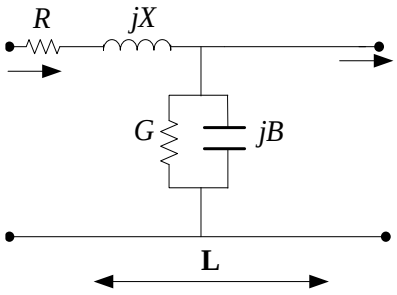
Çizelge 3.1. Bara tipleri ve özellikleri

Bara Çeşidi	Bilinen Kontrol Değişkenleri	İstenen Durum Değişkenleri	Bara Sayısı
Salınım ($V-\delta$) Barası	V_{SL} ve δ_{SL}	P_{SL} ve Q_{SL}	1
Yük (P-Q) Barası	P_L ve Q_L	V_L ve δ_L	PQ
Üretim (P-V) Barası	P_G ve V_G	Q_G ve δ_G	PV
		Toplam bara sayısı:	n=PQ+PV+1

3.4. İletim Hattının Yapısı

Güç sistemlerinde kullanılan iletim hatlarında iletken olarak çelikle güçlendirilmiş alüminyum özlü iletkenler tercih edilir ve ACSR (Aliminium conductor steel reinforced-Çelikle güçlendirilmiş alüminyum iletken) olarak isimlendirilirler. Bu iletkenler Kanada standartlarına göre genel olarak kuş isimleri olan güvercin, kartal, baykuş vb. ile adlandırılırlar.

ACSR iletkenler AWG ya da MCM ölçekleri ile anılan kesitlere sahipken Türk Standartlarında TS-IEC 1089'a uygun olarak 15 mm^2 ile 750 mm^2 kesitleri arasında üretilmektedir. Bir iletim hattına ait iletkende, seri olarak iletkenin direnci ve manyetik alandan doğan reaktans ile şönt elektrik alandan doğan toprak kapasitesi oluşmaktadır. Şekil 3.1'de iletim hattında tanımlanan seri empedans ve şönt admitans şeması verilmektedir.



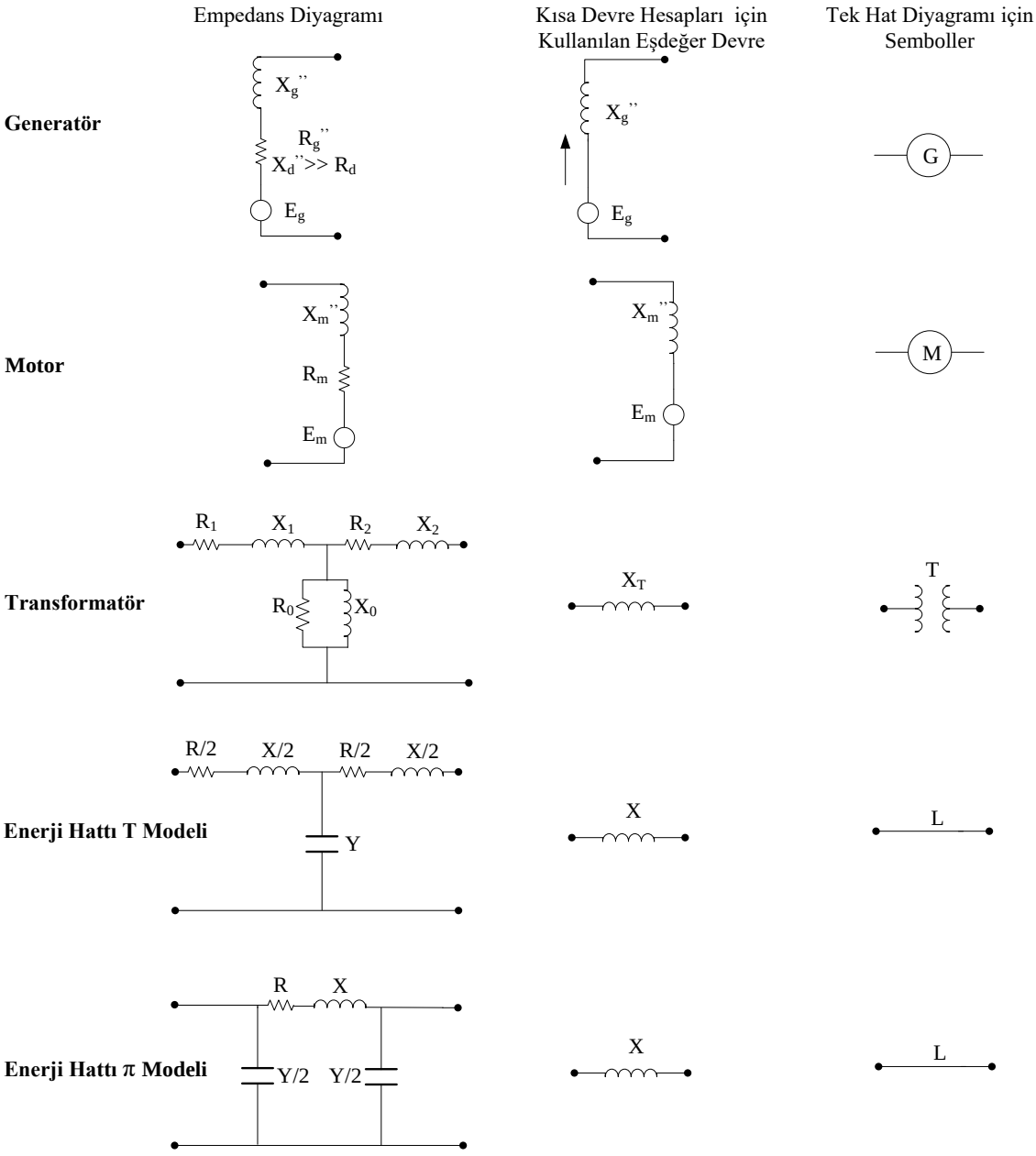
Şekil 3.1. İletim hattına ait seri empedans ve şönt admitans şeması

Empedans (Z); reel (R) ve sanal (jX) kısımları bulunan kompleks sayının vektörel toplamı olarak ifade edilebilir.

- $Z = R + jX$ (seri empedans)
- $Y = G + jB$ (şönt admitans)

Burada, R ve G sırasıyla direnç ve kondüktans (iletkenlik) olarak isimlendirilir. X reaktans ve B ise süseptans'tır. İdeal dirençler için, Z ve Y sırasıyla R ve G'ye indirgenir. Ama AA devresi, kapasitörü, indüktörü ve sıfır olmayan X ve B'yi içerir. $Z = 1/Y$ yalnızca AA devreleri için $R = 1/G$'dir.

- $1/R$: R direncinin iletkenliği denir. G harfi ile gösterilir. Birimi Siemens'tir.
- $1/X$: X endüktif reaktansın tersine, elektrik akımına gösterdiği kolaylığa süseptans denir. B harfi ile ifade edilir. Endüktif süseptans B_L, kapasitif süseptans da B harfleri ile gösterilir, birimi ise Siemens'tir.
- $1/Z$: Elektrik akımına göstermiş olduğu kolaylığa admitans denir. Y harfi ile ifade edilir, birimi ise $1/\Omega$ veya Siemens'tir.



Şekil 3.2. Güç sistemini meydana getiren elemanların çeşitli diyagramlarda kullanılan eşdeğer devreleri ve standart modelleri

Bir güç sisteminde güç akışı yapılabilmesi için tek hat diyagramından, empedans diyagramına geçilmesi gereklidir. Empedans diyagramına geçilebilmesi için güç sistemini oluşturan her elemanın eşdeğer devresinin bilinmesi istenir. Şekil 3.2'de güç sistemlerinde kullanılan empedans diyagramları, kısa devre hesapları için kullanılan eşdeğer devreler ve tek hat diyagramı için semboller gösterilmektedir [70,71,76,79].

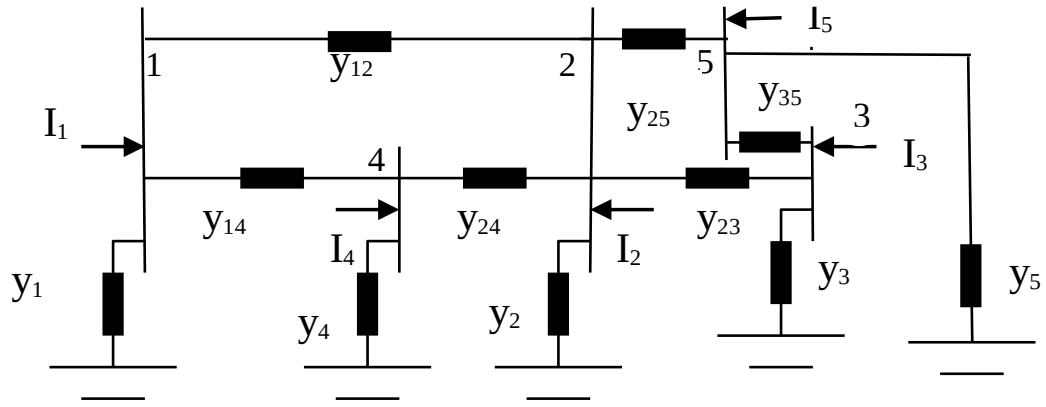
Empedans diyagramında generatörler, endüklenen EMK'ya seri bağlı birer empedans ile, iletim hatları yeterli doğrulukta T ve π devrelerinden birisi ile, transformatörler kendi eşdeğer devreleri ile gösterilir [70,71].

Güç akışı yapılacak yükler seri bağlı birer direnç ve reaktans ile ifade edilirler. Empedans diyagramında, tek hat diyagramında görülen generatörlerin nötrleri ile toprak arasındaki akım sınırlandırıcı empedanslar gösterilmez. Dengeli haldeki generatörlerin nötrleri sistem nötrleri ile aynı potansiyele sahip olacağından bunların üzerinden bir toprak akımı geçmez. Empedans diyagramındaki bütün değerler aynı gerilime, yani transformatörlerin sekonder veya primer gerilimine göre ifade edilir [70].

Güç sistemlerinde güç akışı analizlerinde klasik yöntem olarak adlandırılan Newton-Raphson, Gauss-Seidel ve Fast-Decoupled yöntemleri kullanılmaya devam ederken, bunlardan en yaygın olarak Newton-Raphson yöntemi genel anlamda birçok çalışmada daha fazla tercih edilmektedir [77,78]. Güç akış analizini gerçekleştirebilmek için salınım, yük ve üretim baralarında dört farklı büyüklükten (P, Q, V, δ) ikisinin bilinmesi ve diğer ikisinin ise hesap edilmesi güç akışı analizi ile mümkün olmaktadır. Güç akışı analizlerinde kullanılan üç farklı yöntem ilerleyen alt bölümlerde tanımlanmıştır.

3.5. Bara Admitans Matrisi

Güç sistemi baralarında güç enjeksiyonu, akım enjeksiyonu yapılmasıyla benzer anlama gelmektedir. Akım enjeksiyonları pozitif (baraya) ya da negatif (baradan dışarıya) olabilir. Burada bir kol boyunca akan akımın aksine, akım enjeksiyonu bir düğüm büyüklüğüdür. Genel olarak temel devre analizi aracı olarak kullanılan admitans matrisi, bir baradaki akım enjeksiyonlarını bara gerilimleriyle ilişkilendirmektedir. Böylece admitans matrisi düğüm büyüklükleriyle ilgilidir. Şekil 3.3'te gösterilen 5 baralı güç sistemine ait tek hat şeması verilmektedir.



Şekil 3.3. 5 Baralı güç sistemine ait tek hat şeması

Şekilde 3.3'te iletim hatlarını temsil eden dallar düğüm noktaları (baralar) birbirine ve toprağa bağlanmaktadır. Topraklanan dallar, hattın her iki ucundaki şarj kapasitansı da dahil olmak üzere baralardaki şönt elemanları temsil eder. Örnek olarak, i barasını j barasına bağlayan ve i barasında bir şönt eleman bulunan bir dal için y_{ij} olarak ifade edilen admitans değeri, sistemdeki tüm dallar için gösterilir. Her bir *"i"* barasındaki akım enjeksiyonları "I_i" indisiyle belirtilmektedir. Kirchoff'un akımlar kanunu gereğince her bir baradan dallara ve toprağa akan akımlar ile baraya akan akımların toplamı eşit olmalıdır. Böylece Şekil 3.3'te 1 numaralı baraya enjekte edilen akım Ohm Kanunu kullanılarak Eş. 3.1-3'teki gibi açıklanabilir.

$$I_1 = V_1 y_1 + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_4) y_{14} \tag{3.1}$$

1 numaralı bara ile 3 numaralı bara arasındaki bağlantının empedansı sonsuz olduğundan dolayı admitans değeri sıfır olmaktadır. Bu gösterim hesaplamalar için önemli bir avantaj olan 1 numaralı baranın güç sistemindeki tüm baralarla bağlanabilmesine olanak verecektir. Bara 1 üzerinde enjekte edilen akım Eş. 3.2'de kullanılarak tekrar ifade edilebilir.

$$I_1 = V_1 y_1 + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13} + (V_1 - V_4) y_{14} \tag{3.2}$$

y_{13} değeri sıfır olduğu için bu değeri içeren terimlerin baradaki toplam akım katkısı sıfırdır. Matematiksel uygunluk için Eş. 3.2 tekrar düzenlenerek Eş. 3.3'te verilmiştir.

$$I_1 = V_1(y_1 + y_{12} + y_{14}) + V_2(-y_{12}) + V_4(-y_{14}) \tag{3.3}$$

Benzer olarak 2,3,4 ve 5 nolu baralarda enjekte edilen akım değerleri Eş. 3.4-7'deki gibi ifade edilebilir.

$$I_2 = V_1(-y_{21}) + V_2(y_2 + y_{21} + y_{23} + y_{24} + y_{25}) + V_3(-y_{23}) + V_4(-y_{24}) + V_5(-y_{25}) \quad (3.4)$$

$$I_3 = V_2(-y_{32}) + V_3(y_3 + y_{32} + y_{35}) + V_5(-y_{35}) \quad (3.5)$$

$$I_4 = V_1(-y_{41}) + V_2(-y_{42}) + V_4(y_4 + y_{41} + y_{42}) \quad (3.6)$$

$$I_5 = V_2(-y_{52}) + V_3(-y_{53}) + V_5(y_5 + y_{52} + y_{53}) \quad (3.7)$$

Burada *k* barasından *i* barasına devrenin admitans değeri (y_{ki}), *i* barasından *k* barasına devre admitansına (y_{ik}) eşittir. Örnek olarak Eş. 3.3'te yer alan $y_{12} = y_{21}$ ya da $y_{14} = y_{41}$ admitans değerleri gösterilebilir. Böylece baralardan enjekte edilen akım değerlerinin düğüm gerilimlerinin lineer fonksiyonları olduğunu görülebilir ve bu fonksiyonların çözümünü kolaylaştırabilmek adına matrisler kullanarak daha kompakt formda Eş. 3.8'de ifade edildiği gibi gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 + y_{12} + y_{14} & -y_{12} & 0 & -y_{14} & 0 \\ -y_{21} & y_2 + y_{21} + y_{23} + y_{24} + y_{25} & -y_{23} & -y_{24} & -y_{25} \\ 0 & -y_{32} & y_3 + y_{32} + y_{35} & 0 & -y_{35} \\ -y_{41} & -y_{42} & 0 & y_4 + y_{41} + y_{42} & 0 \\ 0 & -y_{52} & -y_{53} & 0 & y_5 + y_{52} + y_{53} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Eş. 3.8'de verilen devrenin tüm admitans değerlerini içeren bu matris admitans matrisidir. Eş. 3.9'da gösterildiği ifade ile Y-bara matrisi olarak tanımlanır.

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} y_1 + y_{12} + y_{14} & -y_{12} & 0 & -y_{14} & 0 \\ -y_{21} & y_2 + y_{21} + y_{23} + y_{24} + y_{25} & -y_{23} & -y_{24} & -y_{25} \\ 0 & -y_{32} & y_3 + y_{32} + y_{35} & 0 & -y_{35} \\ -y_{41} & -y_{42} & 0 & y_4 + y_{41} + y_{42} & 0 \\ 0 & -y_{52} & -y_{53} & 0 & y_5 + y_{52} + y_{53} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Bu matrisin simetrik olduğuna dikkat edilmelidir. Verilen matrisi satır ve sütun sırasıyla belirterek Eş. 3.10'da verilen matris elde edilebilir.

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

Eş. 3.10'da kullanılan Y_{ij} gösterimi admitans değerlerini göstermektedir. Bunlar sadece admitans matrisinin satır ve sütun elemanlarının gösterimini sağlamaktadır. Bu değerler Eş. 3.8'de yerine yazılırsa Eş. 3.11'de gösterilen matris bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

Eş. 3.10 ve Eş. 3.11 kullanılarak Eş. 3.12'deki akım-gerilim vektörleri tanımlanabilir.

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix}, \quad \underline{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \Rightarrow \underline{I} = \underline{Y}\,\underline{V} \tag{3.12}$$

Eş. 3.11 ve Eş. 3.12'de gösterilen admitans matrisi esasında herhangi boyutta doğrusal yapıdaki eşitlikler için de geçerli olan aşağıdaki sıralanan noktalar elde edilmiştir. Eş 3.13'te belirtilen admitans matris ifadesi simetriktir:

$$Y_{ij} = Y_{ji} \tag{3.13}$$

Matrisin köşegen elemanı Y_{ii}, i barasına bağlı şönt elemanları da kapsayacak şekilde Eş 3.14'te tüm kolların admitanslarının toplamına ve eşittir:

$$Y_{ii} = y_i + \sum_{k=1,k\neq i}^{N} y_{ik}. \tag{3.14}$$

Eş. 3.10 ve Eş. 3.11'de köşegenel elemanların dışında kalan i barasını j barasına bağlayan admitanslar Eş 3.15'te ifade ile belirtildiği gibi negatif değerlidir.

Y_{ij}=-y_{ji} (3.15)

Belirtilen bu özellikler kullanılarak bir güç sistemi için admitans matrisinin matematiksel olarak ifadesi kolaylıkla yapılabilir.

3.6. Güç Sisteminde Güç Eşitlikleri

Daha önce bir güç sistemine enjekte edilen net güç miktarının belirlenmesi açıklanmamıştır. Bu bölümde bara gerilimleri ve admitansları bakımından güç sistemine enjekte edilen güç ifadesinin türetimi gösterilecektir. Öncelikle kullanılan tüm büyüklüklerin per-unit değerler olduğu tekrar belirtilmelidir. Bir fazlı güç sistemlerinde kullanılan benzer eşitlikler kullanılarak kompleks güç S_k Eş. 3.16'da ifade edilmektedir.

$$S_k = V_k I_k *$$ (3.16)

Bir baradan enjekte edilen akımın genel denklemi Eş. 3.17'de verilmektedir.

$$I_k = \sum_{j=1}^{N} Y_{kj}\, V_j$$ (3.17)

Daha öncede belirtildiği üzere Eş. 3.13'te kullanılan Y_{ij} terimleri admitans matrisi elemanlarıdır. Güç akışını türetirken dikkat edilmesi gereken en önemli adım admitans matrisini sistemin güç eşitlikleriyle ilişkilendirmek ve admitans değerlerini kullanarak güç değerlerini ifade etmektir. Eş. 3.17'de verilen akım ifadesi Eş. 3.16'da yerine konulmasıyla Eş. 3.18'de gösterilen bu önemli bağlantı kurulmuştur.

$$S_k = V_k\left(\sum_{j=1}^{N} Y_{kj}\, V_j\right)^* = V_k \sum_{j=1}^{N} {Y_{kj}}^*\, {V_j}^*$$ (3.18)

Burada V_k genliği ve açısı olan, $V_k = |V_k|\angle\theta_k$ şeklinde ifade edilen bir fazördür. Y_{kj} admitansların bir fonksiyonudur ve bu sebeple genellikle karmaşık değerlidir. Böylece admitans matrisi elemanı olan Y_{kj} reel kısmı G_{kj}, imajiner kısmı B_{kj} olmak üzere $Y_{kj} = G_{kj} + jB_{kj}$ formunda gösterilebilir. Eş. 3.18'de gerilimlerin fazör gösterimi ve admitans terimlerinin kompleks formda yerlerine yazılmasıyla Eş. 3.19'daki denklem elde edilir.

$$S_k = V_k \sum_{j=1}^{N} {Y_{kj}}^* {V_j}^* = |V_k|\angle\theta_k \sum_{j=1}^{N}(G_{kj} + jB_{kj})^* \left(|V_j|\angle\theta_j\right)^* = |V_k|\angle\theta_k \sum_{j=1}^{N}(G_{kj} - jB_{kj}) \left(|V_j|\angle -\theta_j\right) = \sum_{j=1}^{N}|V_k|\angle\theta_k\left(|V_j|\angle -\theta_j\right)(G_{kj} - jB_{kj}) = \sum_{j=1}^{N}\left(|V_k||V_j|\angle(\theta_k - \theta_j)\right)(G_{kj} - jB_{kj}) \quad (3.19)$$

Euler özdeşliğini kullanarak, $V_k = |V_k|\angle\theta_k = |V_k|(\cos\theta_k + j\sin\theta_k)$, Eş. 3.19'da verilen fazörler sinüzoitlerin karmaşık fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

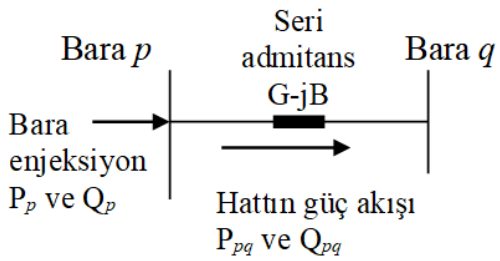
$$S_k = \sum_{j=1}^{N}\left(|V_k||V_j|\angle\left(\theta_k - \theta_j\right)\right)\left(G_{kj} - jB_{kj}\right) = \sum_{j=1}^{N}|V_k||V_j|\left(cos(\theta_k - \theta_j) + j\,sin(\theta_k - \theta_j)\right)(G_{kj} - jB_{kj}) \quad (3.20)$$

Eş. 3.20'de verilen ifadede parantez içindeki çarpım işlemini cebirsel olarak gerçekleştirdikten sonra reel ve sanal kısımları bir araya toplandığında, karmaşık güç $S_k = P_k + jQ_k$ olarak gösterilmektedir. Elde edilen terimlerden sistemin aktif güç eşitliği Eş. 3.21 ve reaktif güç eşitlikleri Eş. 3.21'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$P_k = \sum_{j=1}^{N}|V_k||V_j|\left(G_{kj}\,cos(\theta_k - \theta_j) + B_{kj}\,sin(\theta_k - \theta_j)\right) \quad (3.21)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^{N}|V_k||V_j|\left(G_{kj}\,sin(\theta_k - \theta_j) - B_{kj}\,cos(\theta_k - \theta_j)\right) \quad (3.22)$$

Eş. 3.21 ve 3.22'de gösterilen iki eşitliğe güç akışı denklemleri denir. Güç akışı probleminin çözümü bu eşitlikler aracılığıyla gerçekleştirilir. Eş. 3.21 ve 3.22'deki için ifadelerde *k* barasını *p* barası olarak tekrar isimlendirirsek, bu bara sadece *q* barası olarak isimlendirilen başka bir baraya bağlandığında; *p* barasının güç enjeksiyonu *pq* hattı boyunca akan güce eşittir. Bu durum aşağıdaki Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. *pq* bara arası güç akışı şeması

Şekil 3.4'te gösterilen güç sistemi için Eş. 3.21 ve 3.22'de verilen güç eşitlikleri Eş. 3.23 ve 3.24'te gösterildiği şekilde olacaktır.

$$P_p = |V_p|^2 G_{pp} + |V_p||V_q|G_{pq}\, cos(\theta_p - \theta_q) + |V_p||V_q|B_{pq}\, sin(\theta_p - \theta_q) \quad (3.23)$$

$$Q_p = -|V_p|^2 B_{pp} + |V_p||V_q|G_{pq}\, sin(\theta_p - \theta_q) - |V_p||V_q|B_{pq}\, cos(\theta_p - \theta_q) \quad (3.24)$$

Şekil 3.4'te pq hattı admitansı $y = G - jB$, Eş. 3.23 ve Eş. 3.24 kullanıldığında, $G_{pq} = -G$ ve $B_{pq} = B$ değerini alacaktır. Eğer p barasına bağlı şönt reaktans yoksa, $G_{pp} = G$ ve $B_{pp} = B$ olur. Bu ifadeler doğrultusunda Eş. 3.25, Eş. 3.26'daki gibi tekrar ifade edilebilir.

$$P_p = |V_p|^2 G - |V_p||V_q|G\, cos(\theta_p - \theta_q) + |V_p||V_q|B\, sin(\theta_p - \theta_q) \quad (3.25)$$

$$Q_p = |V_p|^2 B - |V_p||V_q|G\, sin(\theta_p - \theta_q) - |V_p||V_q|B\, cos(\theta_p - \theta_q) \quad (3.26)$$

Reaktif güç ifadesindeki terimler yeniden düzenlenirse güç eşitlikleri Eş. 3.27 ve Eş. 3.28'de gösterildiği şekilde olacaktır.

$$P_p = |V_p|^2 G - |V_p||V_q|G\, cos(\theta_p - \theta_q) + |V_p||V_q|B\, sin(\theta_p - \theta_q) \quad (3.27)$$

$$Q_p = |V_p|^2 B - |V_p||V_q|B\, cos(\theta_p - \theta_q) - |V_p||V_q|G\, sin(\theta_p - \theta_q) \quad (3.28)$$

3.7. Güç Akışı Probleminin Klasik Metotlar Kullanılarak Çözümü

3.7.1. Newton-Raphson metodu

Güç akışı analizi tekniklerinden en çok tercih edileni Newton-Raphson sayısal analiz tekniğidir. 1959'da Van Ness bu metodu temel yük akışı problemlerinde kullanılmak üzere önermiştir. Newton Raphson metodu iki veya daha fazla bilinmeyeni olan güç sistemlerinin doğrusal eşitliklerinde çözüm sağlamaktadır. Jacobi matrisini kullanan bu metot sisteme ait gerilim ve faz açısını, aktif ve reaktif güç aralıklarını, belirlenen hata payından küçük oluncaya dek tekrarlamalı olarak sürdüren sayısal analiz türüdür. Kararlı sonucu buluncaya kadar belirlenen döngü limitini aşmadan çözümü devam ettirir [8].

NR metodunda matematiksel eşitlik $f(x)$ olarak tanımlanır. Denklemde i sayıda çözüm; ε_a hata payından (tolerans değeri) küçük sonuçlar elde edilene kadar gerçekleştirilir. Eş. 3.29 ve Eş. 3.30'da hata payı hesabı verilmektedir [78].

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f\prime(x_i)} \tag{3.29}$$

$$|\varepsilon_a| = \left|\frac{x_{i+1}-x_i}{x_{i+1}}\right| . 100 \tag{3.30}$$

Şekil 3.4'teki iki baralı bir sistemdeki çözüm hesaplanmak istenirse; bu sistemin eşitliğinin döngüsel yaklaşımla çözümünde istenilen "Ɛ" hassasiyet değerinden daha küçük bir değer elde edilinceye kadar çözüm yinelenir.

n sayıda baraya sahip bir güç sisteminde i isimli barada aktif ve reaktif güç eşitlikleri Eş. 3.31 ve Eş. 3.32'de tanımlanmaktadır [8,78].

$$P_i(Aktif\ g\text{üç}) = |V_i| \sum_{k=1}^{n} |V_k|\,|Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i), i = 1,2,\dots,n \tag{3.31}$$

$$Q_i(Reaktif\ g\text{üç}) = |V_i| \sum_{k=1}^{n} |V_k|\,|Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i), i = 1,2,\dots,n \tag{3.32}$$

Eş. 3.31 ve Eş. 3.32 taylor serisine açılarak yüksek mertebeden kısmi türevler göz ardı edildiğinde Eş. 3.33'te tanımlanan ve Eş. 3.34'te kullanılan Jacobi matrisleri elde edilmektedir [78-79].

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\underline{x}^{(0)})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(\underline{x}^{(0)})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(\underline{x}^{(0)})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(\underline{x}^{(0)})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(\underline{x}^{(0)})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(\underline{x}^{(0)})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(\underline{x}^{(0)})}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(\underline{x}^{(0)})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(\underline{x}^{(0)})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \tag{3.34}$$

Bu eşitliklerde Jacobi matrisi, aktif ve reaktif güç değerlerindeki küçük değişimler ile gerilim-faz açısı arasındaki değişimlerin bağıntısının hesabını sağlamaktadır. Bu eşitliklerde, 1 numaralı bara salınım barası olarak kabul edildiğinden bu baraya gerilim ve faz açısı değeri kullanılmaz.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{(tahmin)} - P_i^{(k)} \tag{3.35}$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{(tahmin)} - Q_i^{(k)} \tag{3.36}$$

$$\left|\delta_i^{(k+1)}\right| = \left|\delta_i^{(k)}\right| - \Delta\left|\delta_i^{(k)}\right| \tag{3.37}$$

$$\left|V_i^{(k+1)}\right| = \left|V_i^{(k)}\right| - \Delta\left|V_i^{(k)}\right| \tag{3.38}$$

Eş. 3.35'te ve Eş. 3.36'daki $\Delta P_i^{(k)}$ve $\Delta Q_i^{(k)}$ aktif ve reaktif güç çözüm değerleri ile tahmin edilen değerler arasındaki farkı verilmektedir. Tekrarlamalı çözümde bir sonraki gerilim değeri ve faz açısı eşitliği Eş. 3.37 ve Eş. 3.38'de tanımlamaktadır.

3.7.2. Gauss-Seidel metodu

Newton-Raphson'dan farklı olarak Gauss tekniği uygulanarak önerilen Gauss-Seidel metodu doğrusal olmayan eşitsizliklerin çözümünde tercih edilmektedir. Gauss-Seidel metodu; n adet baraya sahip bir güç sistemine ait gerilimlerin her döngüde yeni değerler elde edilerek eski değere olan farkının sapma yüzdesinden küçük olana kadar sürdürülmesi prensibine göre çalışır [79]. Eş. 3.39 ve Eş. 3.40'ta baralara ait güç bilgilerinden yararlanılarak i nolu bara akım ve gerilim değerleri hesaplanabilir [79].

$$I_i = \frac{P_i - JQ_i}{V_i^*}, i = 1,2,\dots,n \tag{3.39}$$

Eş. 3.39'da P_i i nolu bara aktif güç değerini, Q_i i nolu bara reaktif güç değeri ve V_i, i barasının en son hesaplanan gerilimini, I_i ise i barasının akım değerini temsil etmektedir.

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}}\left[I_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{n} Y_{ik}V_k\right] i = 1,2,\dots,n \quad (3.40)$$

Eş 3.40'ta, Y_{ii} baraların özadmitans değeri, V_i, i. bara gerilimi, Y_{ik}, i. ve k. baralar arası admitans değerini ve V_k i. baranın en son döngüdeki gerilim değerini ifade etmektedir [78]. Eş. 3.39'da elde edilen akım değerleri Eş. 3.40'ta yerine konulduğunda hesaplanan gerilim bilgileri Eş. 3.41'deki çözümde yerini alır.

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{P_i - JQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{n} Y_{ik}V_k\right] i = 1,2,\dots,n \quad (3.41)$$

3.7.3. Fast-Decoupled metodu

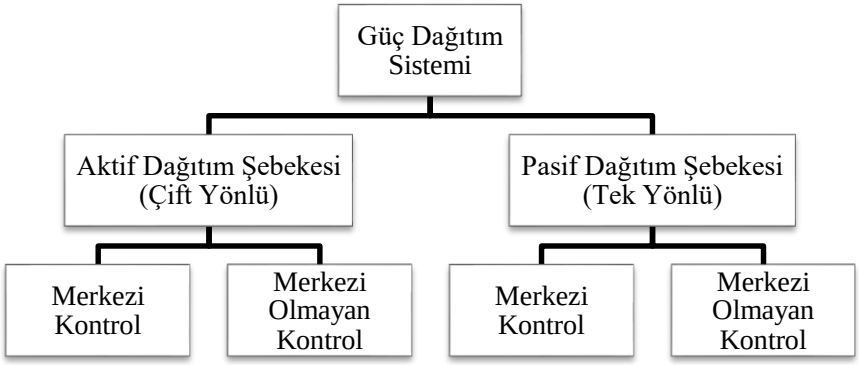
Newton-Raphson'da kullanılan Jacobi matrislerinde değişiklikler yapılması ile elde edilen bu metodun eşitsizlikleri daha hızlı çözmesi beklenir. Fast-Decoupled tekniğinde aktif güç ile gerilim değerleri ve reaktif güç ile faz açısı irtibatlandırılır. Eş. 3.42 ve Eş. 3.43'te Jacobi matrisleri; avantaj olarak Fast-Decoupled metodunun hesaplama süresini kısaltmaktadır. Ancak bu durum bazı dezavantajlı durumların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir [77].

$$J_1(i)\Delta\delta(i) = \Delta P(i) \quad (3.42)$$

$$J_4(i)\Delta V(i) = \Delta Q(i) \quad (3.43)$$

21. yüzyılda güç sistemlerinde elektrifikasyonunun genişlemesi ve yüklerin gelişen teknolojiler ile çeşitlenmesi, iletim ve dağıtım hatlarında önemli kararlılık sorunlarını ortaya çıkarmıştır. Bu sorunlar kısa, uzun veya anlık gerilim yükselmesi veya düşüşü, gerilim çentiği ve gerilim çökmesi (sürekli elektrik kesintisi) şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığının sağlanması amacıyla, klasik güç akış analizi tekniklerinin günümüzdeki beklentileri tam olarak karşılayamaması sebebiyle yeni nesil güç akışı optimizasyon teknikleri ile güç sistemlerinin mevcut durumunun değerlendirilmesi ve yeniden planlanması ön plana çıkmaktadır [81-100].

Birçok dağıtık üretim modeli ve algoritmalar, dağıtım sisteminin kalitesini, güvenliğini, güvenilirliğini, etkinliğini, yüklenebilirliğini ve maliyetini en uygun düzeyde tutabilmek için geliştirilmeye devam etmektedir [101-111]. İlk güç dağıtım sistemlerinin yapısı merkezi olarak tasarlanmıştır. Günümüzde tek yönlü güç akışına olanak sağlayan dağıtım sistemlerine pasif dağıtım sistemleri denilmektedir [112]. Ancak günümüzde dağıtım sistemleri topolojisi çift yönlü güç akışı sağlamaya zorlandığından bu sistemler aktif dağıtım sistemi olarak tanımlanmıştır. Aktif dağıtım sistemlerinin oluşumunda; dağıtım sistemine güç santrallerinin entegre edilmesi çeşitli karmaşıklıkların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Karmaşaların çözümünde kullanılan kontrol stratejileri merkezi ve merkezi olmayan yaklaşımlar olarak ikiye ayrılmaktadır [113]. Günümüzde dağıtım sistemlerinin aşırı yüklü olması dağıtım sistemi operatörlerinin yüksek gerilimlerde limit altı gerilim düşümlerinde deneyim kazanmaları gerektiğini ön plana çıkarmaktadır [114]. Bunun tersine aktif dağıtım sistemlerinde aşırı yenilenebilir dağıtık üretim santrallerinin yoğunluğu baralarda kontrolsüz gerilim yükselmesi oluşturabilmektedir. Aktif dağıtım sistemlerinde genel olarak kullanılan dağıtık üretim santralleri aktif enerji kayıplarını önlerken şönt kapasitörler sistemin reaktif enerji ihtiyaçları için kullanılmaktadır [115-125]. Merkezi olmayan dağıtım sistemi kontrol teknikleri lokal olarak problemleri çözebilirken, merkezi kontrol sistemi haberleşme ağının desteği ile genel çözüm önerileri dolayısıyla güç akışı optimizasyon sorununu ve her bir kontrol değişkeninin ayarlanması işlemlerini daha rahat yapabilmektedir. Genel olarak kontrol işlemleri kural bazlı ve şebeke model bazlı olmak üzere iki kısma ayrılır [126-134]. Şekil 3.5'te güç dağıtım sistemlerinin kontrol stratejilerine ait şema verilmektedir.



Şekil 3.5. Güç dağıtım sistemlerinin kontrol stratejileri

4. GÜÇ SİSTEMİNDE META-SEZGİSEL ALGORİTMALAR KULLANILARAK GÜÇ AKIŞI PROBLEMİNİN OPTİMİZASYONU

4.1. Giriş

Güç sistemlerinde oluşan güç kayıplarının en aza indirilerek sistemin en iyi değerlerde yüklenmesi beklenir. Güç sistemi operatörleri kapasite değişiminde çevre birimlerinin korunması, ekonomik ve teknik kârın en iyi seviyede olmasını hedeflemektedir. Günümüz güç iletim ve dağıtım hatlarının çoğunluğunun dağıtık oluşu ve tek merkezden beslenmesi, beklenen özelliklerin sağlanamamasını ve kontrolsüz olayların meydana gelebileceğini göstermektedir [135]. Bundan dolayı güç sistemlerinde güç akışı probleminin optimizasyonu gerçekleştirilerek güç sisteminin yeniden planlanması önem arz etmektedir. Güç akışı optimizasyon çalışmalarında ise sistem kayıplarının en aza indirilmesi, gerilim kararlılığının korunması ve geliştirilmesi, güvenlik, güvenilirlik ve sistem yüklenebilirliğinin en iyi düzeyde tutulması amaçlanmaktadır [136]. Yapılan çalışmalarda bunu başarabilmek için belirlenen tekil ya da çoklu amaç fonksiyonlarıyla birçok güç akışı optimizasyon tekniği ve algoritmaları kullanılmaktadır [137-140].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; klasik analitik yöntemler, meta-sezgisel algoritmalar, yapay zekâ teknikleri çalışmalarının güç akışı optimizasyon tekniklerinin ana başlıkları olduğu belirlenmiştir [120-135]. Analitik olarak yapılan çalışmalara bakıldığında; Newton-Raphson, Jacobi, Gauss-Seidel ve Fast-Decoupled tekniklerinin yanı sıra Eigen değeri değerlendirme, Modal analizi, indeks metodu, kalıntı esaslı yöntem, hassasiyet esaslı yöntem, nokta kestirimi metodu kullanılmakta olan başlıca yöntemlerdir [75-79].

Güç akışı optimizasyon teknikleri sınıflandırılmak istendiğinde; meta-sezgisel algoritmalar ve çoklu nesnel programlama teknikleri ön plana çıkmaktadır [90,91]. Optimizasyon algoritmaları; tabu arama, benzetilmiş tavlama, genetik algoritma, evrimsel strateji, yapay bağışıklık sistemi, karınca kolonisi optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, gri kurt optimizasyonu, hibrit tabu arama/genetik algoritma teknikleri, lineer programlama, ceza ardışık metot lineer programlama, çoklu olasılık programlama, ardışık ikinci dereceden programlama, sıradan programlama, egzoz arama algoritması, gradyan arama algoritması, devamlı güç akışı algoritması, en iyi güç akışı algoritması vb. teknikler kullanılmaya devam edilmektedir [1,13,22,44].

Yapay zekâ tabanlı çalışılan tekniklere bakıldığında, bulanık mantık, genetik algoritma, yapay sinir ağları, bitki gelişimi benzetim algoritması, vücut bağışıklığı algoritması, yapay arı kolonisi metodu, emperyalist rekabetçi algoritma, guguk kuşu arama algoritması vb. kullanılmaktadır [50-66,134]. Çizelge 4.1'de güç sistemlerinin güç akışı optimizasyonunda kullanılan tekniklerin sınıflandırması yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Güç sistemleri güç akışı optimizasyonunda kullanılan teknikler

Analitik Teknikler	Çoklu Nesnel Programlama Meta-Sezgisel Algoritmalar	Yapay Zeka Tabanlı Teknikler
• Newton Raphson • Jacobi • Gauss-Seidel • Hızlı ayrıştırılmış teknikleri • Eigen değeri değerlendirme • Modal analizi • İndeks metodu • Kalıntı esaslı yöntem • Hassasiyet esaslı yöntem • Nokta kestirimi metodu	• Tabu arama • Izgara arama • Altın oran • Benzetilmiş tavlama • Evrimsel strateji • Karınca kolonisi • Gri kurt kolonisi • Balina optimizasyonu • Bakteri besin arama • Parçacık sürü optimizasyonu • Hibrit tabu arama • Genetik algoritma teknikleri • Egzost arama algoritması • Gradyan arama algoritması • Devamlı güç akışı algoritması • Optimum güç akışı algoritması	• Bulanık mantık • Genetik algoritma • Yapay sinir ağları • Bitki gelişimi benzetim algoritması • Vücut bağışıklığı algoritması • Yapay arı kolonisi • Emperyalist rekabetçi algoritma • Guguk kuşu arama algoritması

4.2. Problemin Belirlenmesi

Meta-sezgisel algoritmalar; bir problemin belirlenmesinin ardından çözümlenmesinde amaç ve kısıt fonksiyonlarının belirlenerek verilen ön koşullar çerçevesinde en iyi sonucu bulmak için kullanılır. Optimizasyon ise, bir problemin önceden belirlenen limitler dahilinde en iyi çözüm değerine ulaşmak için gerçekleştirilen işleme denilmektedir [105].

Optimizasyon; bir probleme ait sonucun asgari ya da azami değerlere ulaştırılması amaçlı kullanılabilmektedir. En iyi değerlerin üretilmesi amaçlanan optimizasyon çalışmalarında, en az bir amaç belirlenmesi gerekli olup birden fazla amaç belirlenerek çoklu amaç fonksiyonları türetilebilir. Optimizasyonun gerçekleştirilmesi için kullanılan algoritmaların sade yapıda, seri, kararlı olması, gerektiğinde doğrusal olmayan problemlere uygulanabilmesi beklenir [106-111]. Optimizasyon algoritmaları doğal varlıkların davranışlarının benzetimine ait matematiksel tanımları kullanırlar. Meta-sezgisel algoritmalar klasik algoritmalara göre doğrusal olmayan dışbükey fonksiyonların çözümünde daha avantajlı ve etkin olasılıklı küresel en iyi sonucu üretmektedir. Son yıllarda meta-sezgisel algoritmalardan parçacık sürü optimizasyonu ve gri kurt optimizasyonu algoritmaları güç sistemlerinin optimizasyonunda; en iyi güç akışı probleminin çözümü uygulamalarında sık kullanılmaktadır [99-101]. Bu algoritmaların yerel minimum yerine küresel minimumu tespit etmeleri için, keşif ve kullanım kabiliyetleri geliştirilmeye devam etmektedir. Algoritmalarda kullanılan davranışsal ve sayısal ifadelerin güncelleme ve hibritleme çalışmalarına ek olarak algoritmalarda kullanılan parametre seçiminde ve akış diyagramlarında güncellemeler de yapılabilmektedir [112-113].

Güç sistemlerinde güç akışı parametrelerinin bilgisayar destekli optimizasyonu gelişerek devam etmektedir. Yeni algoritmaların keşfedilmesi, geliştirilmesi, yakınsama hızlarının artırılması, güvenilirlik ve uygulama alanında yenilikler oluşturulması sürmektedir [114].

Güç sistemlerinde istenmeyen durumlardan yüksek güç kaybı veya fazla maliyetin asgari değerlere düşürülmesi optimizasyonun temel hedefidir. Bunun yanında güç sisteminin etkinliğinin, güvenliğinin, güvenilirliğinin ve sürdürülebilirliğinin arttırılarak işletimde en iyi değerlerin hedeflenmesi işlemleri de optimizasyon kavramının konusudur. Güç sistemi optimizasyonunda, azami veya asgari değerlerin hedeflenerek güç sistemi kısıtlarının değer aralığında kalması beklenir [115]. Güç sistemi kısıt tanımlamaları; generatör üretim birimleri kapasitesi, transformatör kademe oranları, yakıt kullanımı, yakıt maliyeti, enerji tarife bedeli, hat taşıma kapasiteleri, bara gerilimleri, aktif ve reaktif güç limitleri olmak üzere artırılıp azaltılabilir. Böylece tanımlanan kısıtlar hesaba katılarak herhangi bir amacın azami ya da asgari değere çekilmesi optimizasyon probleminin çözümü ile gerçekleşir. Değerleri tanımlanan bir güç sistemi modelinin optimizasyonu, matematiksel problemin güvenilir bir şekilde ifade edilmesi ile gerçekleştirilir [116].

Güç sistemlerinin ekonomik güç dağıtımlarında üretilen, iletilen ve tüketilen güçlerin matematiksel karşılaştırmaları gerçekleştirilirken gerilim ve faz açısı bilgileri göz ardı edilebilmektedir. Güç sistemlerinin optimizasyonunda; çevrimiçi çalışma yerine genellikle kararlı hal durumları dikkate alınarak çevrimdışı değerlerle güç akışı optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır [117-120]. Ancak birçok güç sisteminde gerçek zamanlı çalışma verileri de daha güvenilir ve etkin sonuçlar üretmek için tercih edilmektedir.

Güç sistemlerinde en iyi planlama, tasarım ve işletme için optimizasyon kavramına ihtiyaç duyulur. Optimizasyon çalışmalarında bir veya birden fazla amaç fonksiyonu tanımlanabilir. Bu fonksiyonlara ait değişkenler belirlendikten sonra eşitlik ve eşitsizlik kısıtları dahilinde güç akışı optimizasyon işlemi başlatılır. Güç sistemlerinde güç kayıp azaltımı ve gerilim kararlılığının sağlanması için optimum güç akışı probleminde aşağıdaki büyüklükler kullanılır:

Minimize ya da maksimize edilecek amaç fonksiyonu:$f(x,u)$

- Eşitlik kısıtları:$g(x,u)=0$
- Eşitsizlik kısıtları:$h(x,u)\leq 0$
- Eşitliklerde x durum, u ise kontrol değişkenlerini temsil etmektedir.

Durum (x:bağımlı) değişkenleri:

- Yük barası gerilimi V_L ve faz açısı δ_L
- Salınım barası aktif P_{SL} ve reaktif güçleri Q_{SL}
- Üretim barası reaktif gücü Q_G ve gerilim faz açısı δ_G
- Hatta ait parametreler

Kontrol (u:bağımsız) değişkenleri:

- Yük barası aktif P_L ve reaktif güçleri Q_L
- Salınım barası gerilimi V_{SL} ve faz açısı δ_{SL}
- Üretim barası aktif P_G ve gerilimi V_G

Güç sistemleri analiz programlarının optimizasyon bölümünde, sistem kayıplarını azaltmak için salınım, üretim ve yük baralarında belirlenen kısıtlar çerçevesinde tanımlanan amaç fonksiyonları değerlendirilerek güç sisteminin kararlılığı test edilebilmektedir.

Güç sistemlerinin optimizasyonunda; algoritmalar ve amaç fonksiyonları bir bütün halinde çalışarak güç sistemine ait değişkenlerinin limitler aralığında olup olmadığının belirlenmesi beklenir.

4.2.1. Problemin matematiksel olarak tanımlanması

Güç sistemlerinde üretim ve işletme maliyeti, güvenilirlik, güç kayıpları, gerilim sapması iyileştirme çalışmaları son yıllarda birçok farklı optimizasyon teknikleri ile gerçekleştirilmektedir [94,102,103]. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığını sağlamak için iki ana problemin sayısal olarak ifade edilerek çözümünün gerçekleştirilmesi ve gerekli iyileştirmenin yapılması gereklidir. Ana problemlerden ilki güç iletim hatlarında oluşan aktif güç kayıplarıdır. Aktif güç kayıplarının en aza indirilmesi güç sisteminin çalışma kapasitesinin iyileştirilmesini sağlayacaktır. İkinci problem ise kontrolsüz olan gerilim sapmalarının sıfırlanması ya da sıfıra çok yakın bir değerlere indirgenmesidir. İki ana problem belirlendikten sonra bu problemlere en uygun amaç fonksiyonlarının yazılması gerekmektedir. Bölüm 3'te tanımlanan güç akışı eşitlikleri kullanılarak elde edilen parametreler ile bir güç sisteminde hesaplanacak aktif güç kaybı ($P_{kayıp}$) temel kayıp formülü Eş. 4.1'de verilmektedir.

$$P_{kayıp} = \sum_{h=1}^{n} |I_h|^2 R_h \tag{4.1}$$

Burada n hat sayısını, h hat numarasını, I_h hat akımını, R_h ise hattın omik direncini ifade etmektedir. b ve c nolu baralar arası $P_{kayıp}$ Eş. 4.2'de tanımlanmaktadır.

$$P_{kayıp} = (V_b^2 + V_c^2 - 2V_b V_c \cos\delta_{bc}).Y_{bc} \tag{4.2}$$

olarak hesaplanır. Burada δ_{bc}, b ve c baraları gerilim açılarının farkı, Y_{bc} ise bu baralar arası admitansı ifade etmektedir. Bütün baralar arası iletim hattı kayıpları hesaplanarak elde edilecek toplam değer, güç sisteminin toplam güç kaybı değerini verecektir.

4.2.2. Amaç fonksiyonları

N adet iletim hattına sahip bir güç sisteminde aktif güç kaybını en aza indirmek için kullanılacak 1. amaç fonksiyonu ifadesi:

$$Min\ (f1) = \min P_{kayıp} = \sum\ g_d(V_b^2 + V_c^2 - 2V_bV_c\cos\delta_{bc}), d \in N \quad (4.3)$$

Eş. 4.3'te N adet iletim hattı sayısını, d ise o hattın numarasını, g_d b ve c nolu baralar arası d. hattın iletkenliğini δ_{bc}, b ve c nolu baralar arası gerilim açı farkını, V_b ve V_c, b ve c nolu baraların gerilim büyüklüğünü ifade etmektedir. 2. amaç fonksiyonu gerilim kararlılığı üzerine tanımlanmaktadır. Öncelikle baraların beklenen gerilim değeri ile gerçek gerilim değeri arasındaki fark hesaplanır. Sonrasında tüm baralardaki sapmalar toplanır ve toplam gerilim sapması elde edilir. 2. amaç fonksiyonu Eş. 4.4'te yazılacak olursa:

$$Min\ (f2) = minV_D = \sum_{b=1}^{N_b}\left|V_b - V_b^{ref}\right| \quad (4.4)$$

Eş. 4.4'te V_D yük baralarına ait toplam gerilim sapmasını verirken, N_b yük baralarının sayısıdır. V_b, b nolu yük barasının gerçek gerilimini, V_b^{ref} ise beklenilen 1 pu gerilim büyüklüğünü ifade eder.

Algoritmalarla güç akışı optimizasyonu verilerinin amaç fonksiyonları kullanılarak değerlendirilmesi sonucunda belirlenen eşitlik ve eşitsizlik kısıtları çerçevesinde elde edilecek olan asgari değerlerin aktarıldığı çoklu amaç fonksiyonu ifadesi Eş. 4.5'te verilmektedir.

$$Min\ (f3) = w\ \min P_{kayıp} + (1-w)\ minV_D \quad (4.5)$$

Eş. 4.5'te w çoklu amaç fonksiyonuna ait ağırlık faktörünü ifade etmektedir.

4.2.3. Kısıtlar

Güç akış analizleri gerçekleştirilirken, baralarda oluşan güç ve gerilim bilgilerinin belirli aralıklar dahilinde sınırlandırılması gereklidir. Aksi halde güç akışı optimizasyonu başarısız olarak sonuçlanabilmektedir. Kısıtlamalar ise Eş. 4.6'da belirtildiği şekilde sistem gerilimlerin 1±0,10 pu. arasında kalması beklenir. Eş. 4.7'de P_G, üretim baralarında üretilen toplam aktif güç, $\sum Py$ ise yük baralarında tüketilen toplam aktif gücü, Pk ise güç sisteminde oluşan toplam kayıp gücü temsil etmektedir. Güç sisteminde güç üretiminin, kayıplar dahil tüketime eşit ya da daha büyük olması gereklidir.

$$0{,}90\ pu. \leq |V_b| \leq 1{,}10\ pu.\ b = 1,2,\dots,n \tag{4.6}$$

$$0 \leq \sum Py + Pk \leq P_G \tag{4.7}$$

$$V_b^{min} \leq V_b \leq V_b^{maks}\ ,\ 1 \leq b \leq n_{bara} \tag{4.8}$$

Eş. 4.8'de V_b^{min}, V_b^{maks} b nolu barada oluşan asgari ve azami gerilim değeri, n_{bara} ise bara sayısı, V_b, b. baranın gerilimi olarak tanımlanır. Üretim birimlerinin aktif güç kısıtları ise Eş. 4.9'da verilmektedir.

$$P_{Gb}^{min} \leq P_{Gb} \leq P_{Gb}^{maks}, 1 \leq b \leq n_G \tag{4.9}$$

P_{Gb}^{min} üretimin asgari, P_{Gb}^{maks} ise üretimin azami aktif gücünü ifade ederken, n_G ise üretim birimleri sayısıdır.

$$Q_{Gb}^{min} \leq Q_{Gb} \leq Q_{Gb}^{maks}, 1 \leq b \leq n_G \tag{4.10}$$

Eş. 4.10'da Q_{Gb}^{min} üretimin asgari, Q_{Gb}^{maks} ise üretiminin azami reaktif gücünü ifade ederken, n_G üretim birimleri sayısıdır.

$$T_b^{min} \leq T_b \leq T_b^{maks}, 1 \leq i \leq n_T \tag{4.11}$$

Eş 4.11'de T_b^{min}, T_b^{maks} b nolu transformatörde oluşan asgari ve azami kademe (tap) değeri, n_T ise transformatör sayısıdır. Güç sistemlerinde bulunan iletim hatlarında oluşan gerilim düşümlerini bertaraf etmek için çeşitli kademe transformatörleri kullanılmaktadır. Bu transformatörlerde kademeler değiştirilerek gerilim genlik değeri artırılıp azaltılabilmektedir. Normal şartlarda kademe ayarı 1 değerini alırken gerilim düşümü yaşanılan hatlarda kademe değerleri 1'in üzerine çıkabilmektedir.

4.3. Güç Akışı Probleminin Optimizasyonunda Kullanılan Meta-Sezgisel Algoritmalar

Güç sistemlerinde; güç akışı probleminin eşitlik ve eşitsizlik kısıtları dikkate alınarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında meta-sezgisel algoritmalar tercih edilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan algoritmalar alt bölümlerde tanımlanmaktadır.

4.3.1. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması

Meta-sezgisel yöntemlerden bir tanesi olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması, balık ve kuş sürülerinin besin arama hareketlerini kullanır. Doğrusal olmayan sayısal problemlerin çözümünde en iyi sonuçları elde etmek için ilk olarak 1995-1996 yıllarında sosyo-psikolog James Kennedy ve elektrik mühendisi Russel Eberhart tarafından önerilen popülasyon tabanlı olasılıklı bir optimizasyon yöntemidir. Değişkenleri ve parametreleri birden fazla olan denklemlerin çözümünde en iyi yaklaşım için tercih edilir [81]. PSO, problemin en iyi sonucu bulmak için problemin en küçük parçacıklarını oluşturur. Her bir parçacık arama boyunca kendi pozisyonunu sürüdeki en iyi pozisyona doğru ayarlarken, bir önceki tecrübesinden de yararlanır [82].

Parçacık sürü optimizasyonu algoritması, gelişim tabanlı bir algoritmadır [83]. Sayısal problemlere ait denklemlerin çözümünde esneklik sağlamak için bu algoritmanın birçok parametresi değiştirilebilir ve ayarlanabilir [84]. Parametrelerin değiştirilmesinde lineer ya da lineer olmayan farklı teknikler uygulanabilir [85]. Birçok ülkede yaklaşık 25 yıldır mühendislik alanında tekil ve çoklu problemlerin optimizasyonunda kullanılmaktadır [86,87].

PSO algoritması olasılıklı çözüm üretmesi nedeniyle genetik algoritmaya benzerdir. Balık, kuş vb. canlı sürülerinin 2 boyutlu uzayda yiyecek arama davranışlarını esas almaktadır ve sürü parçacıklarından oluşur [88]. Her bir parçacığa rastgele bir başlangıç konum ve hızı atanır. Sürüdeki her bir parçacık (birey) problemin aday çözümünde görev alır [89]. Kısıtlı ya da kısıtsız optimizasyon problemlerinde tekil ya da çoklu nesnel yaklaşımla problemlerin yaklaşık çözümleri elde etmek için esnek kullanım sağlar [90,91].

PSO, türev operatörü kullanılmaması nedeniyle uygulama kolaylığı sağlamaktadır. Sürü içerisindeki her bir parçacık kendi pozisyonları içerisinde bireysel en iyi pozisyonunu (P_{best}) ararken, sürü içerisindeki bütün parçacıkların o ana kadar bulduğu en iyi konum, küresel en iyi konum (G_{best}), olarak tanımlanmaktadır. Parçacıklardan elde edilen konum bilgisi uygunluk fonksiyonunda değerlendirilerek çözüme en yakın pozisyondaki parçacık belirlenir ve küresel en iyi konumdaki G_{best} parçacık olarak güncellenir [1].

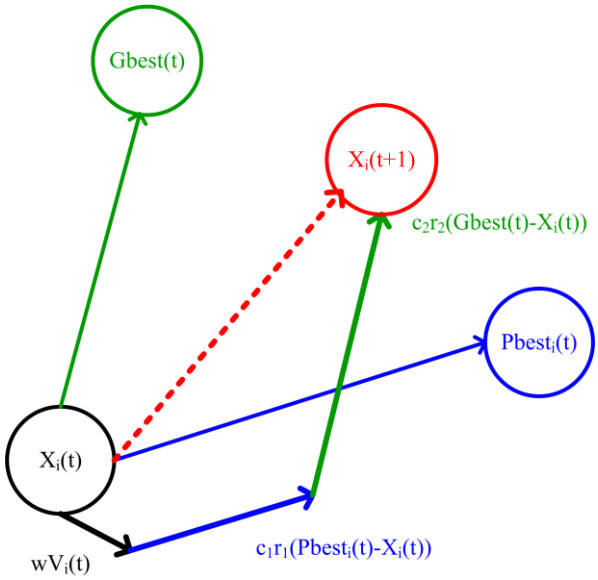
Sürüdeki her parçacık arama uzayında birbiriyle bağımlı hareket ederek potansiyel en iyi çözümü aramaktadır [92,93]. Yani pozisyonunu iki faktöre göre ayarlar: $p_{i,j} = (p_{i1}, p_{i2}, \ldots, p_{iD})$ şeklinde gösterilen kişisel en iyi pozisyonu P_{best} ve $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \ldots, p_{gD})$ şeklinde gösterilen tüm sürüdeki en iyi pozisyon G_{best} t. döngüdeki hızı $v_{i(t)} = (v_{i1}, v_{i2}, \ldots, v_{iD})$ ile gösterilir ve $v_{imaks} = (v_{imaks1}, v_{imaks2}, \ldots, v_{imaksD})$ ile sınırlandırılır. Parçacığın sırasıyla atalet ağırlığı w, bir sonraki hızı $v_{i,j(t+1)}$ ve pozisyonu $x_{i(t+1)}$ Eş. 4.12-Eş. 4.14'e göre hesaplanır [1,81-85]:

$$w = w_{maks} - \left(\frac{w_{maks} - w_{min}}{iter_{maks}} . iter\right) \tag{4.12}$$

$$v_{i,j(t+1)} = w\, v_{i,j(t)} + c_1 r_{1,j(t)}(Pbest_{i,j(t)} - x_{i,j(t)}) + c_2 r_{2,j(t)}(Gbest_{(t)} - x_{i,j(t)}) \tag{4.13}$$

$$x_{i(t+1)} = x_{i(t)} + v_{i(t+1)} \tag{4.14}$$

PSO algoritmasında limitlerin aşılması durumunda tekrar güncellemeye gidilir. O döngüye kadar belirlenen değerler arasında en iyi değer bireysel değer P_{best} olarak belirlenir. Parçacıkların bir iki boyutlu vektörel hareketi Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. PSO'da parçacığın iki boyuttaki vektörel hareketi

PSO'da sürüye ait bireylerin kişisel ve küresel davranışlarını matematiksel olarak tanımlayan Eş. 4.12, Eş. 4.13 ve Eş. 4.14'e göre verilen büyüklüklerin en iyi sonuçla çözümlenmesine ait PSO sözde kodu Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.2 PSO sözde kodu

1.	*Başla*
2.	Belirle NP, w_{maks}, w_{min},c_1, c_2
3.	*For* $iter = 1$ to $iter = maks$ döngü
4.	*For* her parçacık; Amaç fonksiyonunu hesapla
5.	Belirle P_{best}
6.	*End*
7.	$G_{best(t)} = P_{best}$ popülasyon içerisinde,
8.	*End*
9.	*For* her parçacık
10.	Güncelle Hız: $v_{i,j(t+1)} = w\, v_{i,j(t)} + c_1 r_{1,j(t)}(Pbest_{i,j(t)} - x_{i,j(t)}) + c_2 r_{2,j(t)}(Gbest_{(t)} - x_{i,j(t)})$
11.	Güncelle Konum $x_{i(t+1)} = x_{i(t)} + v_{i(t+1)}$
12.	*Bitir*

4.3.2. Gri kurt optimizasyonu (GKO) algoritması

Gri kurt optimizasyonu algoritması, gri kurt bireylerinin av arama, tarama, bulma ve avlanma sırasında bireysel ve toplu davranışlarının matematiksel olarak tanımlanmasının taklidi dikkate alınarak geliştirilmiştir [33]. Kurt kolonisi hiyerarşisinde, kurtlar alfa, beta, delta ve omega olarak tanımlanmıştır. Bu hiyerarşide diğer bireylere baskın olan alfa kurt grubu, lider tür olarak belirlenmiştir. Alfa kurtlara ana yardımcı tür beta ise lider yardımcısı olarak tanımlanmıştır. Delta türü ise 3. derecede kurtları temsil etmektedir. Bu üç grupta tanımlanmayan diğer kurt türleri ise omega kurtları olarak tanımlanmıştır [94]. Hiyerarşide avlanma görevi kurtların etkileşimlerinin sosyal görev paylaşımı esası ile yapılmaktadır. Gri kurt algoritmasının işleyişi; avı arama, çevreleme, ava saldırma ve avlanma aşamaları ile gerçekleşmektedir [94,98]. Sosyal bir hiyerarşi ve sürü zekâsı, avı arar, çevreler, ava yaklaşarak saldırı düzenler. Aynı aşamada alfa, beta ve delta parçacıkları pozisyonlarına göre diğer av tespitlerini sürdürürler. Eş. 4.15 ve Eş. 4.16'da gri kurtların avını çevreleme eşitlikleri verilmiştir. Eşitliklerde i döngü numarasını, $X_{p(i)}$ avın o anki pozisyonunu, A ve C ise katsayı vektörlerini, X ise parçacığın konumunu ifade etmektedir.

$$D = |C.X_{p(i)} - X(i)| \quad (4.15)$$

$$X_{(i+1)} = |X_{p(t)} - A.D| \quad (4.16)$$

Eş. 4.17 ve Eş. 4.18'de katsayıların hesaplanması için gerekli matematiksel ifadeler verilmektedir. Eşitliklerde a'nın değeri 2 ila 0 arası azalan katsayıyı ifade etmektedir. r_1 ve r_2 rastgele [0, 1] arası vektörlerdir.

$$A = |2a.r_1 - a| \quad (4.17)$$

$$C = |2a.\ r_2| \quad (4.18)$$

Eş. 4.19 – Eş. 4.25 arasındaki matematiksel ifadeler alfa, beta ve delta bireylerinin avlanma sırasında konum belirleme ve avın konumunu kestirme basamaklarını tanımlamaktadır [95].

$$D_\propto = |C_1.X_\propto - X| \quad (4.19)$$

$$D_\beta = |C_2.X_\beta - X| \quad (4.20)$$

$$D_\delta = |C_3.X_\delta - X| \quad (4.21)$$

$$X_1 = |X_\propto - A_1.D_\propto| \quad (4.22)$$

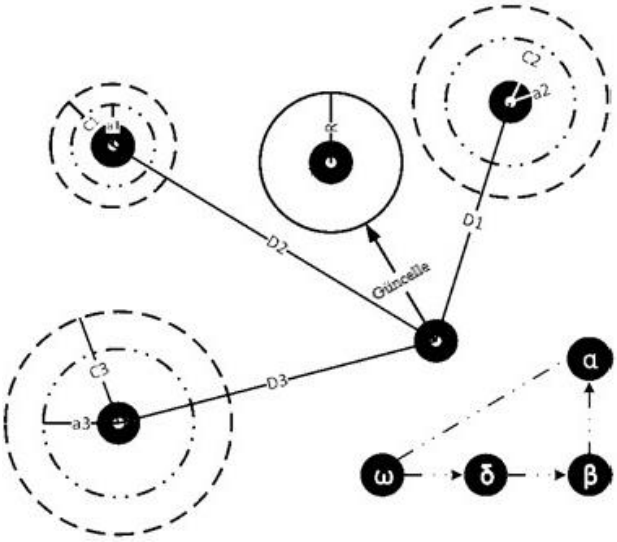
$$X_2 = |X_\beta - A_2.D_\beta| \quad (4.23)$$

$$X_3 = |X_\delta - A_3.D_\delta| \quad (4.24)$$

$$X_{(t+1)} = \frac{X_1+X_2+X_3}{3} \quad (4.25)$$

Eş. 4.19 – Eş. 4.25'e göre avın konum bilgilerini bireysel olarak belirleyen 3 parçacığın elde ettiği geçerli ve değerli üç çözüme göre diğer parçacıkların getirdiği konum bilgileri birleştirilerek alfa, beta ve delta parçacığının ava olan mesafelerini güncellemeleri sağlanır. Avın aranması sırasında a değeri azaltılarak gittikçe ava yaklaşılır [94-98].

Parçacığın bir sonraki pozisyonu önceki pozisyonundan daha iyi bir yerde, ava yakınlaşır [95]. Şekil 4.2'de kurt topluluğunun 2 boyutlu avlanma stratejisi gösterilmektedir [110,111].



Şekil 4.2. Gri kurt topluluğunun 2 boyutlu avlanma stratejisi

Gri kurtların avlanma durumlarından yola çıkılarak elde edilen GKO'ya ait sözde kodu Çizelge 4.3'te verilmektedir.

Çizelge 4.3. GKO sözde kodu

1.	*Başla*
2.	Belirle NP, w_{maks}, w_{min}, $r_1 - r_2$, $a = 2'den\ 0'a\ azalmakta$
3.	$For\ iter = 1'den\ iter = maks$ döngü
4.	Katsayı vektörlerini hesapla $A = \|2a.r1 - a\|, C = \|2a.r2\|$
5.	*For* her parçacık için
6.	Amaç fonksiyonunu belirle
7.	Belirle P_{alfa}, P_{beta} ve P_{delta} birey konumları
8.	*End*
9.	Avın konumunu belirle $(P_{alfa} + P_{beta} + P_{delta})/3$
10.	*End*
11.	*For* her parçacık için
12.	Ava olan uzaklığı belirle $D = \|C.Xp(i) - X(i)\|$
13.	Konumları güncelle $X(i + 1) = \|Xp(t) - A.D\|$
14.	*Bitir*

Yapılan bu çalışmada, PSO, GKO algoritmaları kullanılarak; her iki algoritmanın iyi yönlerinin birleştirilmesi ile elde edilen keşif ve kullanım kabiliyeti geliştirilmiş hibrit PSO algoritması sonraki bölümde tanıtılmaktadır.

5. GELİŞTİRİLEN HİBRİT OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

5.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar

İlk defa 1995'te başlayan PSO çalışmaları 25 yıldır devam etmektedir. PSO'nun kabiliyetini artırabilmek için son yıllarda birçok yeni geliştirilmiş hibrit PSO çalışmaları gerçekleştirilmiştir [96]. Genellikle PSO parçacıklarının keşif ve kullanım kabiliyetinin artırılması hedeflenen hibrit çalışmalarda farklı ikili kombinasyonlar uygulanmıştır. Elde edilen birçok kombinasyon optimizasyon problemleri üzerinde denenmektedir. Optimizasyon problemlerinde algoritmanın yakınsama hızı ve algoritmada çözüme ait sonucu elde eden küresel en iyi konum bilgileri çok önemli büyüklüklerdir. Bu büyüklükler çözümün kalitesini ve doğruluğunu belirler [97]. Literatürde yapılan çeşitli hibrit PSO ve GKO algoritma çalışmaları aşağıda verilmektedir:

Hibrit PSO çalışmasında; PSO'ya ait bireysel ve küresel en iyi konumu belirleyen parçacıklarda kullanılan c_1 ve c_2 katsayıları ve bunlara bağlı en iyi konum ifadeleri 3'e çıkarılıp yeni katsayılar c_1, c_2 ve c_3 olarak güncellenmiştir. Elde edilen yeni konum tespiti ve hız ifadeleri farklı matematiksel fonksiyonlar üzerinde test edilmiştir [96]. Bir başka hibrit GKO tabanlı PSO hibrit optimizasyon çalışmasında; c_1, c_2 ve c_3 katsayılarının yanında parçacık sayısı da artırılmıştır [98].

Farklı bir yaklaşımla geliştirilen diğer bir hibrit PSO tabanlı GKO algoritması güç sistemlerinde yük dengelenmesi amaçlı bir matematiksel fonksiyon üzerinde test edilerek sonuçlar harmony arama, yapay arı kolonisi, GKO ve PSO ile karşılaştırılmış ve daha iyi sonuç üretebildiği vurgulanmıştır [99]. PSO tabanlı ve değiştirilmiş hibrit GKO algoritmalarının birlikte kullanımının daha iyi arama kabiliyetine kavuştuğu ve hızlı yakınsama gerçekleştirdiği vurgulanan farklı bir çalışmada; yeni bir gecikme faktörü tanımlaması yapıldığı, bu tanımın küresel en iyi konumun belirlenmesini geliştirdiği, GKO'da 2'den 0'a doğrusal azalan a katsayısının ise farklı bir gecikme faktörü katsayısı ile çarpımı uygulanması yapılarak daha etkin sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Böylelikle geliştirilen hibrit yaklaşımın birkaç farklı matematiksel fonksiyona uygulanması ile yeni algoritmanın etkinliği ve başarılı olduğu vurgulanmıştır [100].

Farklı bir çalışmada, PSO algoritması diğer meta-sezgisel yöntem olan GKO algoritması ile hibritlenmiş ve güç sistemlerinin optimizasyonunda kullanılmaya başlanmıştır. IEEE 14, 30-bara test sistemleri ve 10 generatör ünitesi modelinde tek alanlı ünite taahhüt probleminin çözümü için farklı bir PSO ve HPSO karşılaştırma çalışması sonucunda, NPSO'nun klasik PSO'dan daha hızlı olduğu, PSO-GKO'nun üretim maliyetinin NPSO ve klasik PSO'dan daha iyi olduğu ancak PSO-GKO'nun yakınsama hızının NPSO'dan daha düşük olduğu açıklanmıştır [101].

Yapılan hibritleme çalışmalarında diğer çalışmalardan farklı olarak küresel en iyi parçacık konumunun hassasiyetinin geliştirilmesi yaklaşımı, GKO algoritması çalıştırılarak elde edilen en iyi alfa, beta ve delta parçacık konum bilgilerinin PSO algoritmasının içerisinde kullanılmasıyla elde edilmiştir [96]. PSO algoritmasında, popülasyondaki parçacıkların konumları sürekli olarak güncellenerek ve gri kurtlar varken her bireyin kendi pozisyonları içinde en iyi konumunun belirlenmesi ve sürünün içindeki bireylerin küresel en iyi pozisyonlarının alfa, beta ve delta tip bireylerin üzerine kaydedilmesini esas alır. GKO kurallarına göre alfa kurt lideri ve beta kurt lideri yardımcısı olarak temsil edilir. Lider ve asistanına ek olarak, delta sürünün 3. derece avını arayan birey olarak bilinir. Sınıflandırmada, omega en alt alt basamaktaki gri kurtları temsil eder [97].

5.2. Hibrit Parçacık Sürü Optimizasyonu (HPSO) Algoritması

Yapılan hibritleme çalışmasında; problemin çözümü aranırken PSO popülasyonundaki küresel en iyi konumun belirlenmesinde, alfa, beta ve delta parçacıklarının davranışları taklit edilmiştir. Aynı arama uzayı içerisinde, alfa, beta ve delta kurtlarının konum tespiti davranışlarını taklit edilerek konum bilgileri belirlenmiştir. Bu konum bilgileri PSO'da her döngüde güncellenerek keşif ve kullanım kabiliyeti geliştirilmiş ve çözüme daha kaliteli yaklaşım sağlanmıştır. Alfa, beta ve delta kurtlarının Eş. 5.1 – Eş. 5.3'de tanımlanan üç konumuna göre oluşturulacak ortak konum bilgisi güncellemesi Eş. 5.4'te tanımlanmıştır. Geliştirilen HPSO algoritmasında kullanılan her döngüdeki tüm parçacıkların küresel olarak en iyi konum ifadesi Eş. 5.5'te verilmiştir.

$$X_1 = |X_\alpha - A_1 . D_\alpha| \tag{5.1}$$

$$X_2 = |X_\beta - A_2 . D_\beta| \tag{5.2}$$

$$X_3 = |X_\delta - A_3 . D_\delta| \tag{5.3}$$

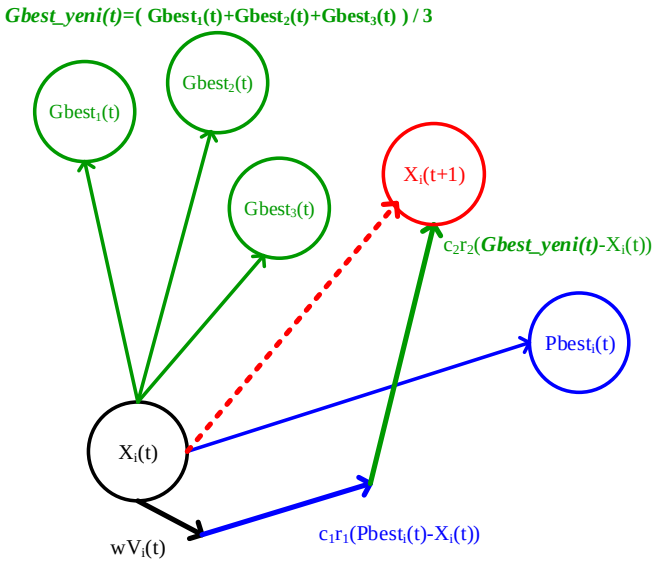
$$X_{(t+1)} = \frac{X_1+X_2+X_3}{3} \tag{5.4}$$

$$G_{best_yeni} = \frac{G_{best1}+G_{best2}+G_{best3}}{3} \tag{5.5}$$

$$v_{i,j(t+1)} = w\, v_{i,j(t)} + c_1 r_{1,j(t)}(Pbest_{i,j(t)} - x_{i,j(t)}) + c_2 r_{2,j(t)}(Gbest_yeni_{(t)} - x_{i,j(t)}) \tag{5.6}$$

$$x_{i(t+1)} = x_{i(t)} + v_{i(t+1)} \tag{5.7}$$

HPSO'da hibrit oluşturulan vektörel güncellemede, PSO'nun 3 farklı vektörle elde edilen pozisyon bilgilerinin doğruluğunu artırmak için bir vektöre GKO sürülerinin vektörel bilgisinin dahil etmesi sağlanmıştır. PSO içerisindeki küresel en iyi konum olan G_{best_yeni} vektörü tıpkı GKO'daki alfa, beta ve delta parçacıklarının koordinasyonunda olduğu gibi 3 ayrı en iyi G_{best} vektörü ile elde edilmiştir. Eş. 5.6'da güncellenen G_{best_yeni} vektörü kullanılarak hız vektörü $v_{i,j(t+1)}$ ve Eş. 5.7'de konum vektörü $x_{i(t+1)}$ elde edilir. Böylece, aynı arama uzayındaki konum doğruluğu artırılarak çözüme ulaşmadaki hata oranı en aza indirilmiştir. Şekil 5.1'de GKO tabanlı HPSO parçacıklarının her birinin hız ve konum bilgisini gösteren vektör diyagramı verilmektedir.



Şekil 5.1. HPSO vektör diyagramı

İlk döngüde, G_{best1} sıfırdan farklı değer alırken, G_{best2} ve G_{best3} sıfır değerlerini almaktadır. İkinci döngüde, G_{best1} ve G_{best2} sıfırdan farklı değer alırken, G_{best3} sıfır değerini almaktadır. Üçüncü döngüden itibaren G_{best1}, G_{best2} ve G_{best3} sıfırdan farklı değerler almaya başlayarak en son döngüye kadar bu değer atamaları devam etmektedir. G_{best_yeni} değeri ise G_{best1}, G_{best2} ve G_{best3} büyüklüklerinin her döngüde ortalama değeri ile belirlenmektedir.
Hibrit PSO algoritmasının sözde kodu Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.1. HPSO sözde kodu

1.	*Başla*
2.	Belirle NP, w_{maks}, w_{min}, c_1, c_2
3.	*For* $iter = 1$ to $iter = maks$ döngü
4.	*For* her parçacık; Amaç fonksiyonunu hesapla
5.	Belirle P_{best}
6.	*End*
7.	$G_{best1} = P_{best1}$, $G_{best2} = P_{best2}$, $G_{best3} = P_{best3}$
8.	$G_{best_yeni} = (G_{best1} + G_{best2} + G_{best3})/3$
9.	*End*
10.	*For* her parçacık
11.	Güncelle Hız: $v_{i,j(t+1)} = w\, v_{i,j(t)} + c_1 r_{1,j(t)}(Pbest_{i,j(t)} - x_{i,j(t)}) + c_2 r_{2,j(t)}(Gbest_{(t)} - x_{i,j(t)})$
12.	Güncelle Konum $x_{i(t+1)} = x_{i(t)} + v_{i(t+1)}$
13.	*Bitir*

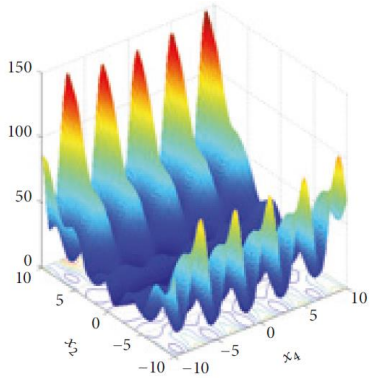
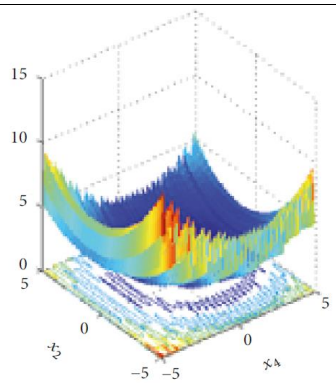
Yapılan mevcut çalışmada, geliştirilen HPSO meta-sezgisel algoritmasının etkinliğinin doğrulanması için ilk olarak 12 adet benchmark test fonksiyonu kullanılarak PSO ve GKO algoritmalarıyla birlikte testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PSO, GKO ve HPSO meta-sezgisel algoritmalarının güç sistemlerindeki güç akışı optimizasyonu performansları değerlendirilmek üzere IEEE 30 ve 57-bara test sistemi verileri kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırması sağlanmıştır. Geliştirilen HPSO algoritmasının diğer 2 algoritmaya göre ürettiği avantajlı sonuçlar Bölüm 6'da detaylı olarak verilmiştir.

5.3. Hibrit Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasının Test edilmesi

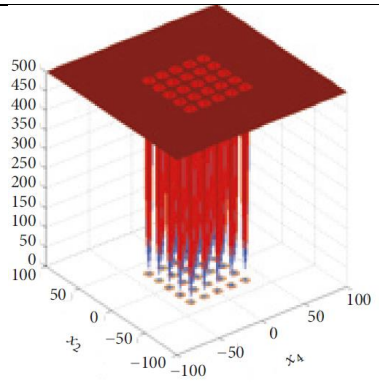
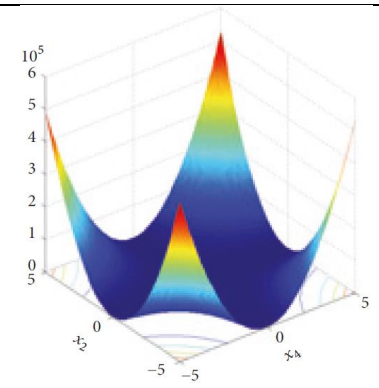
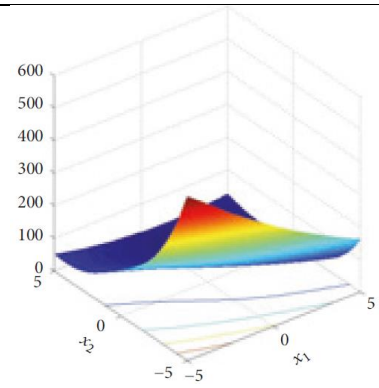
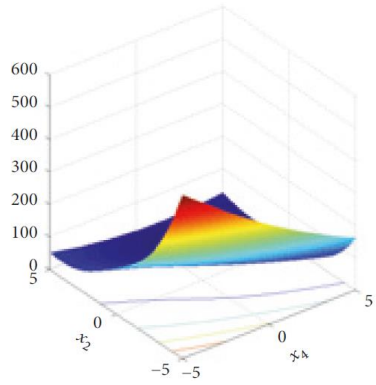
Geliştirilen HPSO algoritmasının performansının test edilmesi, klasik PSO ve GKO algoritmasına olan avantajlarının gözlemlenerek değerlendirilebilmesi için 12 adet benchmark test fonksiyonu kullanılmıştır.

Kullanılan fonksiyonların tanımları, boyutları, arama aralıkları, minimum fonksiyon değerleri ve parametre uzayını gösteren MATLAB grafikleri Çizelge 5.2'de verilmektedir. Tanımlanan 12 adet benchmark test fonksiyonlarının, MATLAB yazılımı ortamında PSO, GKO ve HPSO optimizasyon algoritmaları kullanılarak çözümleri gerçekleştirilmiştir.

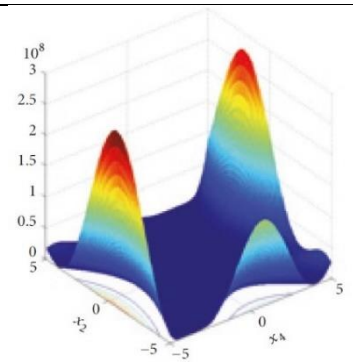
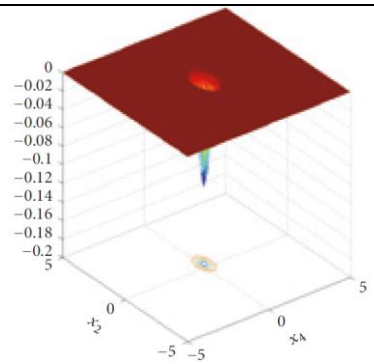
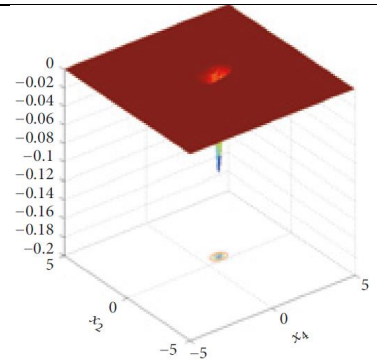
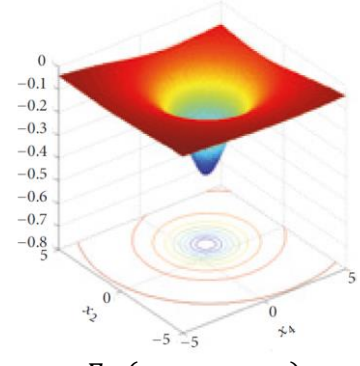
Çizelge 5.2. Benchmark test fonksiyonları

Fonksiyon	D Boyut	Aralık	f_{min}	Parametre uzayı [96]
$F_1(x) = \frac{\pi}{n}\left\{10sin(\pi y_i) + \sum_{i=1}^{n-1}(y_i-1)^2[1 + 10sin^2(\pi y_{i+1}) + (y_n-1)^2]\right\} + \sum_{i=1}^{n}(x_i, 10,100,4)$ $y_i = 1 + \frac{x_i+1}{4}$ $u = (x_i, a, k, m)$ $= \begin{cases} k(x_i-a)^m & x_i > a \\ 0 & -a < x_i < a \\ k(-x_i-a)^m & x_i < -a \end{cases}$	30	[-50, 50]	0	 $F_1(x_1, x_2, x_3, x_4)$
$F_2(x) = 0.1\left\{sin^2(3\pi x_i) + \sum_{i=1}^{n}(x_i - 1)^2[1 + sin^2(3\pi x_i + 1)] + (x_n-1)^2[1 + (2\pi x_n)]\right\} + \sum_{i=1}^{n} u(x_i, 5, 100, 4)$	30	[-50, 50]	0	 $F_2(x_1, x_2, x_3, x_4)$

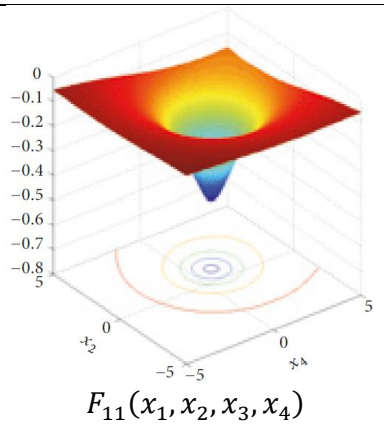
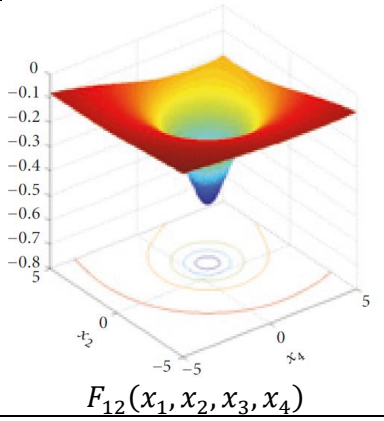
Çizelge 5.2. (devamı) Benchmark test fonksiyonları

$F_3(x) = \left(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{\sum_{i=1}^{2}(x_i - a_{ij})^2}\right)^{-1}$	2	[-65, 65]	1	 $F_3(x_1, x_2, x_3, x_4)$
$F_4(x) = \sum_{i=1}^{11}\left[a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_i + x_4}\right]^2$	4	[-5, 5]	0,00030	 $F_4(x_1, x_2, x_3, x_4)$
$F_5(x) = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 - \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4$	2	[-5, 5]	-1,0316	 $F_5(x_1, x_2, x_3, x_4)$
$F_6(x) = \left(x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6\right)^2 + 10\left(1 - \frac{1}{8\pi}\right)cosx_1 + 10$	2	[-5, 5]	0,398	 $F_6(x_1, x_2, x_3, x_4)$

Çizelge 5.2. (devamı) Benchmark test fonksiyonları

$F_7(x) = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)]x[30 + (2x_1 - 3x_2)^2x(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)]$	2	[-2, 2]	3	 $F_7(x_1, x_2, x_3, x_4)$
$F_8(x) = -\sum_{i=1}^{4} c_i exp\left(-\sum_{j=1}^{3} a_{ij}(x_j - p_{ij})^2\right)$	3	[1, 3]	-3,86	 $F_8(x_1, x_2, x_3, x_4)$
$F_9(x) = -\sum_{i=1}^{4} c_i exp\left(-\sum_{j=1}^{6} a_{ij}(x_j - p_{ij})^2\right)$	6	[0, 1]	-3,32	 $F_9(x_1, x_2, x_3, x_4)$
$F_{10}(x) = -\sum_{i=1}^{5} [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0, 10]	-10,1532	 $F_{10}(x_1, x_2, x_3, x_4)$

Çizelge 5.2. (devamı) Benchmark test fonksiyonları

$F_{11}(x) = -\sum_{i=1}^{7}[(X-a_i)(X-a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0, 10]	-10,4028	 $F_{11}(x_1, x_2, x_3, x_4)$
$F_{12}(x) = -\sum_{i=1}^{10}[(X-a_i)(X-a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0, 10]	-10,5363	 $F_{12}(x_1, x_2, x_3, x_4)$

PSO, GKO ve HPSO algoritmaları Çizelge 5.3'te verilen parametre değerlerinde; popülasyon birey sayısı 30, döngü sayısı 1000 olarak ayarlanıp 10'ar kez çalıştırılarak test edilmiştir.

Çizelge 5.3. PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait benchmark testi parametre değerleri

PSO	GKO	HPSO
Popülasyon büyüklüğü,N:30	N:30	N:30
Azami döngü sayısı, i:1000	i:1000	i:1000
Bilişsel sabite, c_1:0,5	a katsayısı:2	c_1:0,5
Sosyal sabite, c_2:1,5	a_0 katsayısı:2	c_2:1,5
Azami atalet ağırlığı, w_2:0.9		w_2:0.9
Asgari atalet ağırlığı, w_1:0.2		w_1:0.2
Çalıştırma Sayısı, NoR:10	NoR:10	NoR:10

Çizelge 5.4'te benchmark test fonksiyonları üzerinde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen çözümlere ait minimum, maksimum ve standart sapma sayısal değerleri karşılaştırıldığında; minimum, maksimum ve standart sapma değerleri bazında HPSO algoritmasının klasik GKO ve PSO'ya olan sayısal üstünlüğü 12 farklı fonksiyonda da gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.4. PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile benchmark test fonksiyonları çözümleri

F_{No}	Alg.	Min	Maks	Std
F_1	PSO	1,46	7,87E+08	9 E+07
	GKO	13 E-03	6,8 E+08	2,6 E+07
	HPSO	2,2 E-06	7,1 E+08	2,4 E+07
F_2	PSO	0,05	4,4 E+08	4 E+07
	GKO	0,52	9,1 E+08	3,6 E+07
	HPSO	2 E-05	1,1 E+09	4,1 E+07
F_3	PSO	0,9908	394,73	13,38
	GKO	0,9908	15,69	8,23
	HPSO	0,9908	397,71	7,26
F_4	PSO	0,001655	0,21672	0,01773
	GKO	0,000307	0,06999	0,01105
	HPSO	0,000307	0,93020	0,01667
F_5	PSO	-1,031628	1,67636	0,17589
	GKO	-1,031630	-0,58219	0,04942
	HPSO	-1,031630	0,01280	0,03179
F_6	PSO	0,397887	3,52207	0,11692
	GKO	0,397888	2,21995	0,10152
	HPSO	0,397887	4,13700	0,08721
F_7	PSO	3	79,2279	2,23902
	GKO	3	36,6039	1,731504
	HPSO	3	44,3030	0,75159
F_8	PSO	-3,86278	-3,26599	0,03675
	GKO	-3,86278	-3,20529	0,023893
	HPSO	-3,86277	-3,13560	0,022020
F_9	PSO	-3,32199	-0,72237	0,265750
	GKO	-3,32199	-1,37684	0,124782
	HPSO	-3,32199	-0,86340	0,109350
F_{10}	PSO	-10,1532	-0,25897	3,72401
	GKO	-10,1530	-0,40532	2,14723
	HPSO	-10,1532	-0,28180	2,03651
F_{11}	PSO	-10,4029	-0,36177	1,74351
	GKO	-10,4025	-0,59405	2,24204
	HPSO	-10,4028	-0,49830	2,12765
F_{12}	PSO	-10,5364	-0,61006	3,47507
	GKO	-10,5362	-1,16716	2,12253
	HPSO	-10,5363	-0,61210	2,10472

Benzer döngü sayılarında elde edilen fonksiyon sonuçlarına bakıldığında; HPSO'nun ürettiği sonuçların minimum çözüm değeri "0" olan fonksiyonlarda 0'a PSO ve GKO'dan daha çok yaklaştığı gözlemlenmiştir.

Tüm fonksiyonlardaki standart sapma değerlerine bakıldığında; PSO ve GKO algoritmalarından daha düşük standart sapma değerine sahip olduğu görülmektedir. Test edilen tüm benchmark fonksiyonları üzerinde çözüme olan yakınsamanın HPSO tarafından en iyi şekilde yapıldığı belirlenmiştir. Çözüm kümesi sonuçlarına bakıldığında HPSO'nun sıfıra yakın daha net ve daha kararlı sonuçlar ürettiği belirlenmiştir.

12 adet benchmark test fonksiyonları kullanılarak PSO, GKO ve geliştirilen HPSO optimizasyon algoritmaları ile yapılan fonksiyon çözümlerine ait sonuçlarının performans karşılaştırması yapıldığında; HPSO algoritmasının çözüm kararlılığı, çözüm kalitesi, yakınsama hızı ve küresel en iyi sonuca ulaşmasındaki kabiliyeti nedeniyle PSO ve GKO algoritmalarından daha üstün olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca daha güvenilir ve kaliteli sayısal değerleri üreten HPSO algoritması, erken hatalı yakınsama davranışı göstermemesi ve lokal minimumda takılı kalmaması sebebiyle küresel en iyi keşif ve kullanım kabiliyetindeki güvenilirlik, sağlamlık ve üstünlüğünü kanıtlamıştır.

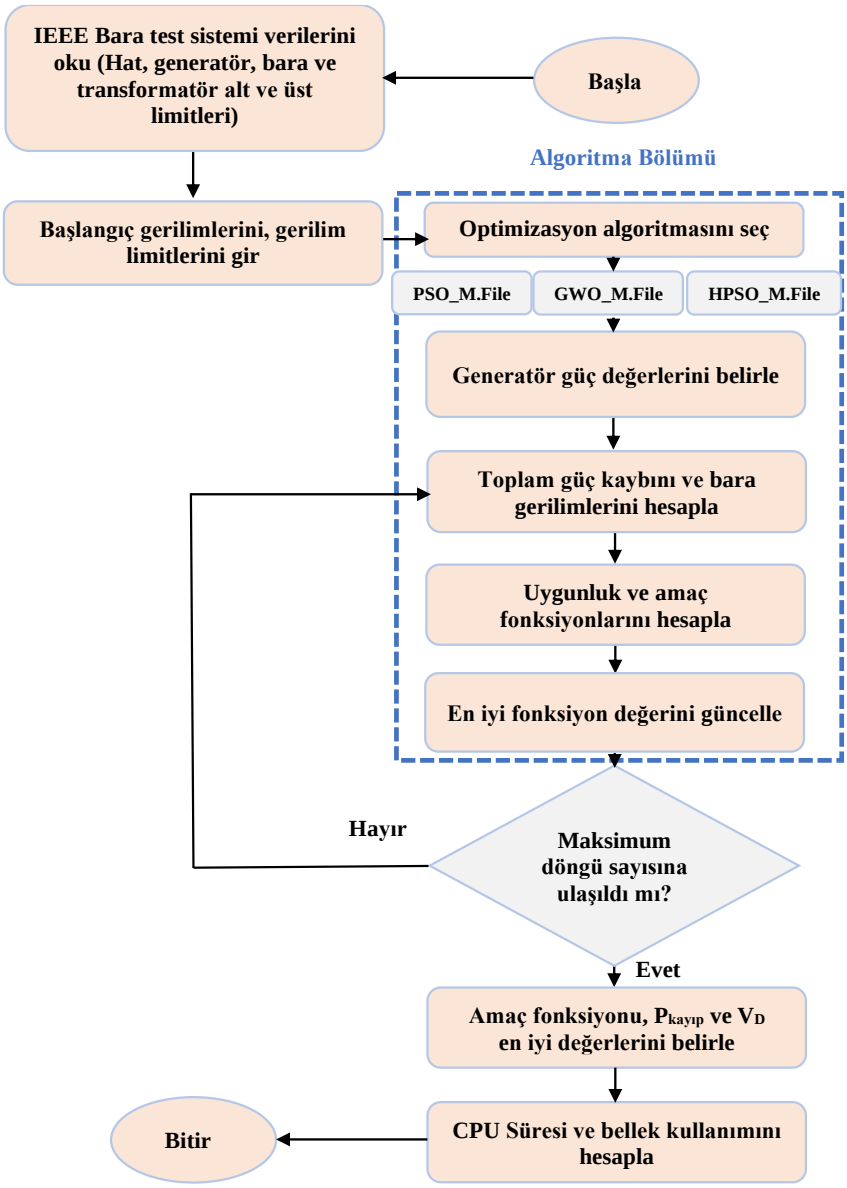
6. META-SEZGİSEL ALGORİTMALARIN GÜÇ SİSTEMİNE UYGULANMASI

6.1. Giriş

Yapılan güç akışı optimizasyon çalışmalarında; bir güç sisteminin toplam güç iletim kayıpları ve toplam gerilim sapması değerlerini en aza indirmek, bara gerilim değerlerini 1 pu. referans değerlerine en yakın olacak şekilde düzenlemek amaçlanmıştır. Güç sisteminde güç kayıplarının azaltılması ve bara gerilim değerlerinin 1 pu. referans değerlerine yaklaştırılabilmesi için güç üretim birimlerinin üretim limitleri çerçevesinde en iyi güç değerlerini üretmek üzere meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak güç akışı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

MATLAB yazılımı ortamında; Intel Core i5, 5200U 2.20 GHz. işlemci (CPU), 8 GB Ram bellek, 64 bit işletim sistemli sayısal bilgisayar ile IEEE 30 ve 57-bara test sistemleri üzerinde öncelikle Newton-Raphson (NR) güç akışı analizi gerçekleştirilerek baraların gerilim ve faz açısı değerleri, üretim birimlerinde üretilen güç bilgileri ile güç iletim hatları üzerinde oluşan kayıp güç bilgileri elde edilmiştir. Newton-Raphson güç akışının, klasik Gauss-Seidel ve Fast-Decoupled yöntemlerine göre daha avantajlı sonuçlar üretmesi nedeniyle, yapılan IEEE 30 ve 57-bara test sistemleri güç akışı analizi sonuçları tez çalışmasının temel referans noktası olarak vurgulanmıştır [77,78].

Çalışmanın devamında, PSO ve GKO meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının her birisi 100 döngü sayısı ile IEEE 30 ve 57-bara test sistemi verileri kullanılarak 20'şer kez çalıştırılmıştır. Bu algoritmaların ürettiği amaç fonksiyonu değerleri, bara gerilim ve faz açısı değerleri, üretim birimlerinde üretilen aktif ve reaktif güç bilgileri, güç iletim hatları üzerinde oluşan kayıp güç bilgileri ve algoritmaların süre ve bellek kullanım değerleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında PSO ve GKO algoritmalarının olumlu yönlerinden yola çıkılarak geliştirilen yeni HPSO algoritması, PSO ve GKO algoritmaları ile aynı koşullarda IEEE bara test sistemi verileri kullanılarak 100 döngü sayısı ile 20 kez çalıştırılmıştır. NR güç akışı analizi değerleri sonuçları referans alınarak, PSO, GKO ve HPSO güç akışı optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlar bir bütün olarak sonraki bölümlerde değerlendirilmiştir. Güç sisteminde en az güç kaybı ve gerilim sapması amaçlanan güç akışı optimizasyon uygulaması için kullanılan akış şeması Şekil 6.1'de verilmektedir.



Şekil 6.1. Güç sisteminin güç akışı optimizasyon uygulamasına ait akış şeması

Akış şemasına göre; seçilen IEEE bara test sistemine ait hat, generatör, bara, transformatör, kompansatör verileri, gerilim ve gerilim limit bilgileri sisteme girilir. Meta-sezgisel optimizasyon algoritması seçildikten sonra güç üretim limitleri dahilinde generatör güçleri en uygun değerlerde belirlenir. Güç akışı optimizasyonunda, üretilen ve talep edilen güçler göz önünde bulundurularak bara gerilimleri, gerilim faz açıları ve iletim hattı güç kaybı değerleri hesaplanır. Algoritmalara ait uygunluk ve amaç fonksiyonları değerlendirilir ve en uygun amaç fonksiyon değeri durdurma kriteri olan maksimum döngü sayısına ulaşılana kadar güncellenir. Durdurma kriteri sağlandığında ise elde edilen minimum güç kaybı, gerilim sapması değeri ve amaç fonksiyonları belirlenir. Ayrıca algoritmaların CPU süre ve bellek kullanım bilgileri hesaplanır.

Literatürde uluslararası genel kabul gören güç sistemlerinden IEEE 30-bara test sistemi üzerinde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının minimum güç kaybı ve gerilim sapması amaçlı güç akışı optimizasyon çalışmalarında, belirtilen algoritmaların güç sistemi üzerinde oluşabilecek farklı durumlardaki davranışlarının nasıl olacağının incelenmesi amacıyla 6 farklı senaryo oluşturulmuştur. Farklı senaryolara ait veriler kullanılarak yapılan güç akışı optimizasyon çalışmalarında; IEEE 30-bara test sisteminine ait reaktif güç kompansatörsüz (RGK'sız) 3 farklı durum ve reaktif güç kompansatörlü (RGK'lı) 3 farklı durum için PSO, GKO ve HPSO güç akışı optimizasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Reaktif güç kompansatörsüz her senaryo için NR güç akışı analizi ile bara gerilimleri, gerilim faz açıları, toplam kayıp aktif güç, gerilim sapma değerleri elde edilmiştir. Bunlara ilaveten bütün senaryolarda yapılan güç akışı optimizasyon çalışmalarında; PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait bara gerilimleri, gerilim faz açıları, toplam kayıp aktif güç, toplam gerilim sapma değerleri belirlenmiştir. Meta-sezgisel algoritmalardan elde edilen kayıp güç ve gerilim sapması değerlerinin yanı sıra CPU hesaplama süreleri ve bellek kullanım değerleri de ayrıca değerlendirilmiştir. IEEE 30-bara test sistemi üzerinde uygulanan senaryolar aşağıda tanımlanmaktadır.

<u>IEEE 30-bara test sistemi güç akışı optimizasyon çalışmalarına ait senaryolar:</u>

1. RGK'sız temel yüklü
2. RGK'lı temel yüklü
3. RGK'sız +%25 yüklü
4. RGK'lı + %25 yüklü
5. RGK'sız + %50 yüklü
6. RGK'lı + %50 yüklü

Tanımlanan senaryo çalışmalarında, IEEE 30-bara test sisteminde, klasik Newton-Raphson metodu referans olacak şekilde güç akış analizi yapılarak elde edilen bara gerilimleri, faz açıları, üretim birimlerinde üretilen güçler, iletim hatları üzerinde toplam kayıp güç ve toplam gerilim sapma değerleri tablolar haline getirilerek grafik sunumları hazırlanmıştır. Ayrıca belirtilen güç sistemi üzerinde PSO, GKO ve HPSO meta-sezgisel güç akışı optimizasyon algoritmaları ayrı ayrı çalıştırılarak elde edilen bara gerilimleri, faz açıları, üretim birimlerinde üretilen güçler, iletim hatları toplam kayıp güç ve toplam gerilim sapma değerlerine ait sonuç tabloları oluşturulmuştur.

Her algoritmadan elde edilen değerlerin karşılaştırılması ve grafik sunumları ayrı ayrı yapılmıştır. Tanımlanan 6 farklı senaryo için elde edilen güç akışı optimizasyon uygulamasından elde edilen sonuçlar sonraki bölümlerde verilmektedir.

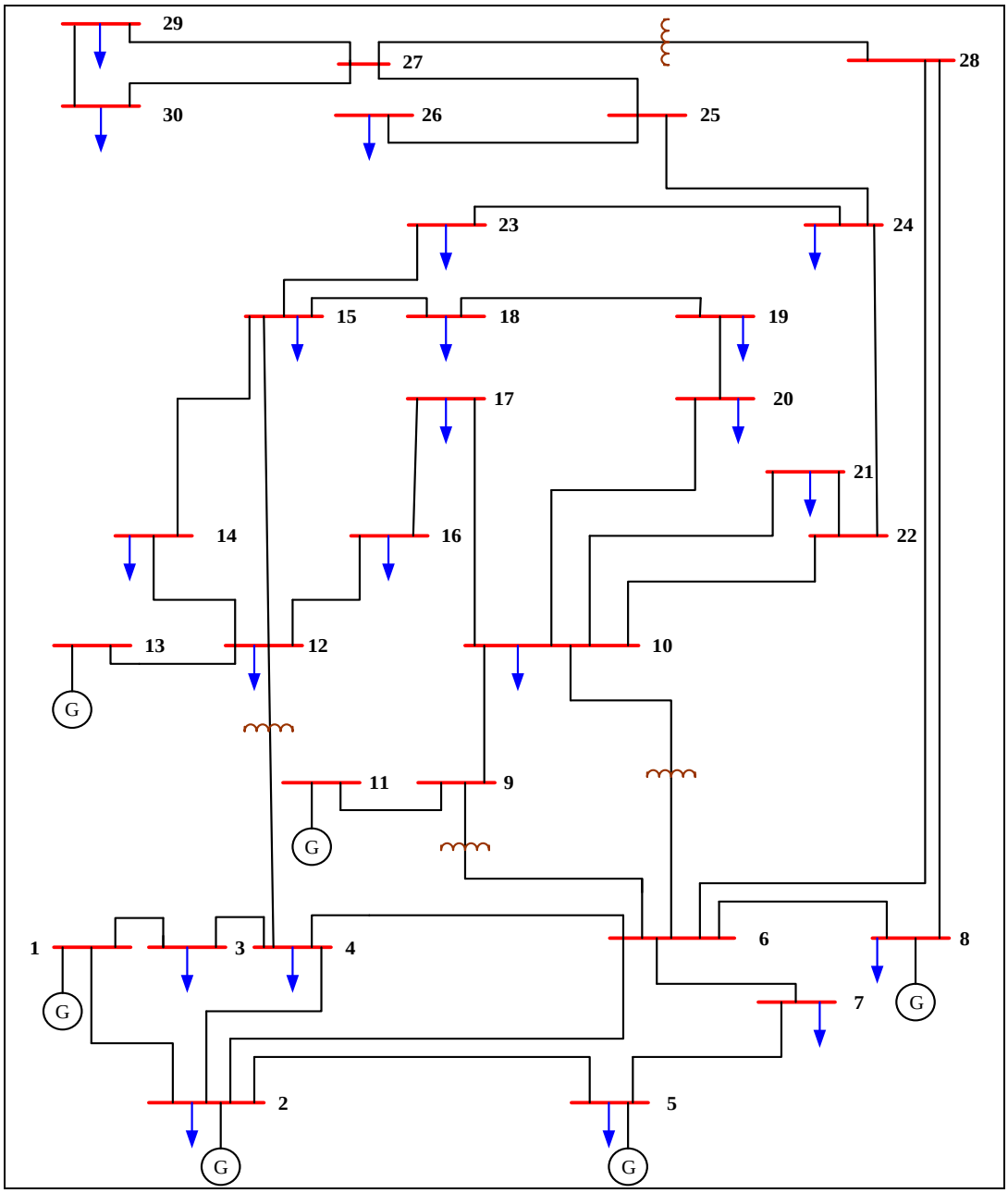
IEEE 30-bara test sisteminde yapılan güç akışı optimizasyon çalışmalarınına ek olarak; geliştirilen HPSO algoritmasının farklı güç sistemlerindeki performansının incelenmesi amacıyla daha fazla bara sayısı ve güç kapasitesine sahip IEEE 57-bara test sistemi temel yük durumunda güç akışı optimizasyonu yapılmıştır. IEEE 30 ve 57-bara test sistemlerinin yapıları ve bu güç sistemlerine ait parametreler sonraki bölümde verilmektedir.

6.2. IEEE Bara Test Sistemleri

Çalışma kapsamında klasik ve meta-sezgisel algoritmalarla yapılan güç akış analizlerinden elde edilen sonuçların standartlar kapsamında değerlendirilebilmesi için 1961'de Amerikan Elektrik Enerjisi Dağıtım Şirketi'ne ait güç dağıtım şebekesinde yer alan IEEE 30 ve 57-bara test sistemleri kullanılmıştır.

6.2.1. IEEE 30-bara test sistemi

IEEE 30-bara test sisteminde 30 adet bara bulunmaktadır. Bu test sistemine ait tek hat şeması Şekil 6.2'de verilmektedir [122].



Şekil 6.2. IEEE 30-bara test sistemine ait tek hat şeması

Bu güç sisteminde, 1 nolu bara salınım barası, 2, 5, 8, 11 ve 13 nolu baralar güç üretiminin yapıldığı generatör baraları, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 26, 29 ve 30 nolu baralar yük baraları olarak tanımlanmaktadır. Mevcut yüklere ait toplam aktif güç 283,40 MW, toplam reaktif güç ise 126,20 MVAr olarak verilmektedir. 6-9, 6-10, 4-12 ve 27-28 nolu baralar arasındaki iletim hatları üzerinde 4 adet kademe transformatörü mevcuttur. Güç sistemine ait baralar arasında toplam 41 adet iletim hattı bulunmaktadır. Kademe transformatörlerinin 0,90-1,10 pu. arasında kademe ayarlama kapasiteleri bulunmaktadır [122].

Çizelge 6.1'de IEEE 30-bara test sistemi baralarına ait bara tipi, gerilim, faz açısı ve baz gerilim değerleri tanımlanmaktadır. Çizelge 6.2'de IEEE 30-bara test sistemine ait baralar arası hat direnci, endüktif reaktansı, süseptans ve transformatör kademe değerlerine ait hat parametreleri verilmektedir.

Çizelge 6.1. IEEE 30-bara test sistemine ait parametreler

Bara No	Bara Tip	Gerilim (pu.)	Faz Açısı (º)	Baz Gerilimi (kV)
1	0	1,05	0	132
2	1	1,04	0	132
3	2	1	0	132
4	2	1	0	132
5	1	1,01	0	132
6	2	1	0	132
7	2	1	0	132
8	1	1,01	0	132
9	2	1	0	1
10	2	1	0	33
11	1	1,05	0	11
12	2	1	0	33
13	1	1,05	0	11
14	2	1	0	33
15	2	1	0	33
16	2	1	0	33
17	2	1	0	33
18	2	1	0	33
19	2	1	0	33
20	2	1	0	33
21	2	1	0	33
22	2	1	0	33
23	2	1	0	33
24	2	1	0	33
25	2	1	0	33
26	2	1	0	33
27	2	1	0	33
28	2	1	0	132
29	2	1	0	33
30	2	1	0	33

Çizelge 6.2. IEEE 30-bara test sistemine ait hat parametreleri

Baradan	Baraya	R (Ohm)	X(Ohm)	$B/2$(Ohm)	Tr. Kademe değeri
1	2	0,0192	0,0575	0,0528	1
1	3	0,0452	0,1852	0,0408	1
2	4	0,5700	0,1737	0,0368	1
3	4	0,0132	0,0379	0,0084	1
2	5	0,0472	0,1983	0,0418	1
2	6	0,0581	0,1763	0,0374	1
4	6	0,0119	0,0414	0,0090	1
5	7	0,0460	0,1160	0,0204	1
6	7	0,0267	0,0820	0,0170	1
6	8	0,0120	0,0420	0,0090	1
6	9	0	0,2080	0	1,0780
6	10	0	0,5560	0	1,0690
9	11	0	0,2080	0	1
9	10	0	0,1100	0	1
4	12	0	0,2560	0	1,0320
12	13	0	0,1400	0	1
12	14	0,1231	0,2559	0	1
12	15	0,0662	0,1304	0	1
12	16	0,0945	0,1987	0	1
14	15	0,2210	0,1997	0	1
16	17	0,0824	0,1932	0	1
15	18	0,1070	0,2185	0	1
18	19	0,0639	0,1292	0	1
19	20	0,0340	0,0680	0	1
10	20	0,0936	0,2090	0	1
10	17	0,0324	0,0845	0	1
10	21	0,0348	0,0749	0	1
10	22	0,0727	0,1499	0	1
21	22	0,0116	0,0236	0	1
15	23	0,1000	0,2020	0	1
22	24	0,1150	0,1790	0	1
23	24	0,1320	0,2700	0	1
24	25	0,1885	0,3292	0	1
25	26	0,2544	0,3800	0	1
25	27	0,1093	0,2087	0	1
28	27	0,0000	0,3960	0	1,0680
27	29	0,2198	0,4153	0	1
27	30	0,3202	0,6027	0	1
29	30	0,2399	0,4533	0	1
8	28	0,0636	0,2000	0,0428	1
6	28	0,0169	0,0599	0,0130	1

Çizelge 6.3. IEEE 30-bara test sistemi üretim birimlerinin aktif ve reaktif güç limitleri

Bara No	P_{Gmin} (MW)	P_{Gmaks} (MW)	Q_{Gmin} (MVAr)	Q_{Gmaks} (MVAr)
1	50	250	-20	200
2	20	80	-20	100
5	15	50	-15	80
8	10	35	-15	60
11	10	30	-10	50
13	12	40	-15	60

Çizelge 6.3'te IEEE 30-bara test sistemi generatör birimlerinin aktif ve reaktif güç üretimi kapasite limitleri tanımlanmaktadır. 1,2,5,8,11 ve 13 nolu baralarda bulunan generatör birimlerinin maksimum 485 MW aktif güç üretimi kapasitesi tanımlanmaktadır.

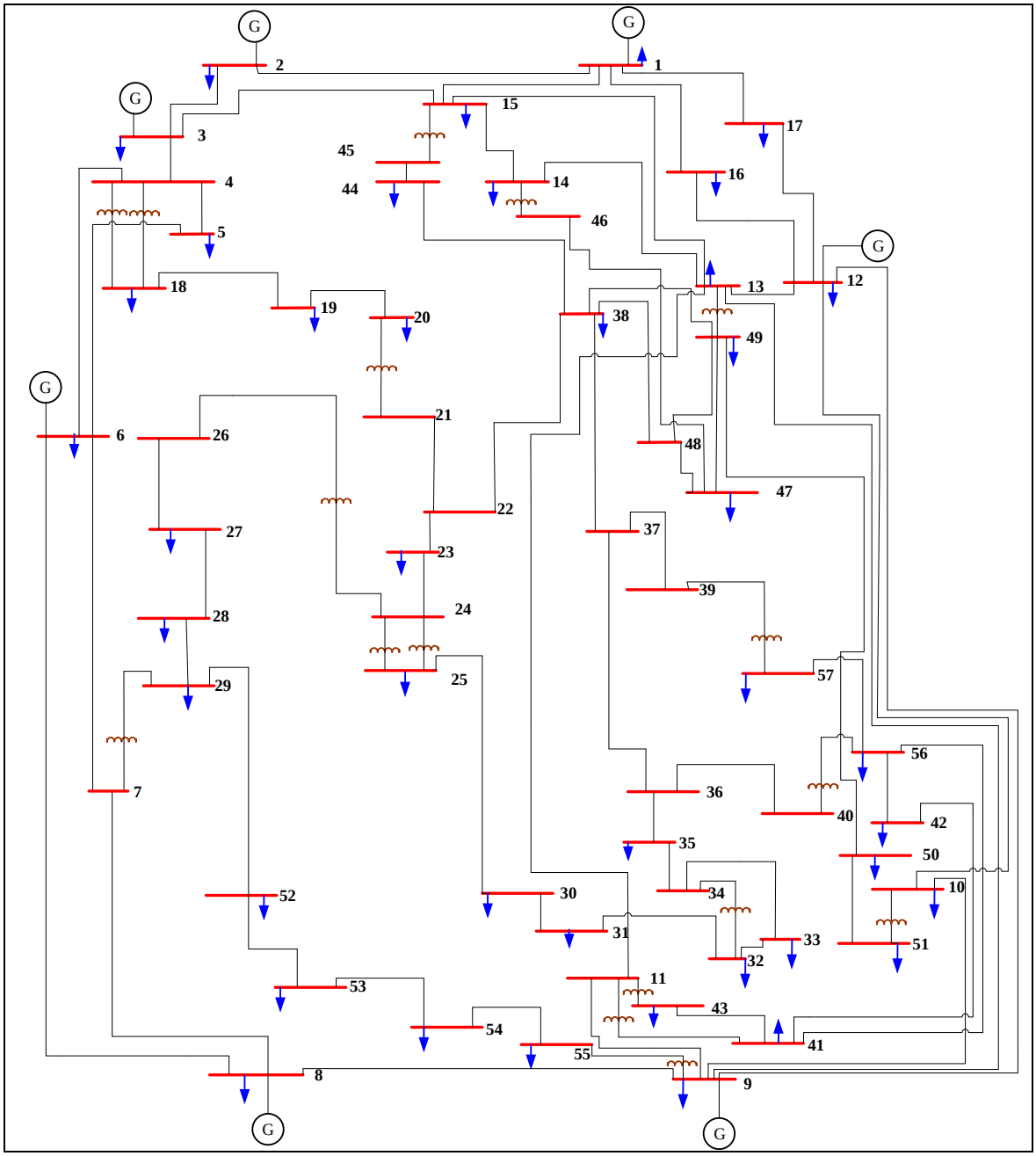
Çizelge 6.4'te IEEE 30-bara test sistemi yük baralarında bağlı yüklere ait aktif ve reaktif güç bilgileri verilmektedir. Temel yüklü IEEE 30-bara test sistemi yük baralarından talep edilen toplam aktif yüklere ait güç 283,4 MW ve toplam reaktif yüklere ait güç ise 126,2 MVAr'dır.

Çizelge 6.4. IEEE 30-bara test sistemi baralardaki aktif ve reaktif yükler

Bara No	$P_{yük}$ (MW)	$Q_{yük}$ (MVAr)
2	21,70	12,70
3	2,40	1,20
4	7,60	1,60
5	94,20	19,00
7	22,80	10,90
8	30,00	30,00
10	5,80	2,00
12	11,20	7,50
14	6,20	1,60
15	8,20	2,50
16	3,50	1,80
17	9,00	5,80
18	3,20	0,90
19	9,50	3,40
20	2,20	0,70
21	17,50	11,20
23	3,20	1,60
24	8,70	6,70
26	3,50	2,30
29	2,40	0,90
30	10,60	1,90
Toplam	283,40	126,20

6.2.2. IEEE 57-bara test sistemi

IEEE 57-bara test sisteminde 57 adet bara bulunmaktadır. Bu test sistemine ait tek hat şeması Şekil 6.3'te verilmektedir [123].



Şekil 6.3 IEEE 57-bara test sistemine ait tek hat şeması

IEEE 57-bara test sisteminde 1 nolu bara salınım barası, 2, 3, 6, 8, 9, 12 nolu baralar üretim baralarıdır.

1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 41, 42, 43, 44, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57 nolu baralar ise yük baraları olarak tanımlanmaktadır. Yüke ait toplam aktif güç 1250,8 MW, toplam reaktif güç 336,4 MVAr olarak verilmektedir 4-18, 7-29, 9-55, 10-51, 11-41, 11-43, 13-49, 14-46, 15-45, 20-21, 24-25, 24-26, 32-34, 39-57 ve 40-56 nolu baralar arasındaki iletim hatları üzerinde kademe transformatörleri mevcuttur. Güç sistemine ait baralar arasında toplam 80 adet iletim hattı bulunmaktadır. Kademe transformatörlerinin 0,90-1,10 pu. arasında kademe ayarlama kapasiteleri vardır [123].

Çizelge 6.5'te IEEE 57-bara test sistemi baralarına ait bara tipi, gerilim, faz açısı ve baz gerilim değerleri tanımlanmaktadır.

Çizelge 6.5. IEEE 57-bara test sistemine ait parametreler

Bara No	Bara Tip	Gerilim (pu.)	Faz Açısı (°)	Baz Gerilimi (kV)
1	0	1,04	0	1
2	1	1,01	0	1
3	1	0,985	0	1
4	2	1	0	1
5	2	1	0	1
6	1	0,98	0	1
7	2	1	0	1
8	1	1	0	1
9	1	0,98	0	1
10	2	1	0	1
11	2	1	0	1
12	1	1,015	0	1
13	2	1	0	1
14	2	1	0	1
15	2	1	0	1
16	2	1	0	1
17	2	1	0	1
18	2	1	0	1
19	2	1	0	1
20	2	1	0	1
21	2	1	0	1
22	2	1	0	1

Çizelge 6.5. (devamı) IEEE 57-bara test sistemine ait parametreler

23	2	1	0	1
24	2	1	0	1
25	2	1	0	1
26	2	1	0	1
27	2	1	0	1
28	2	1	0	1
29	2	1	0	1
30	2	1	0	1
31	2	1	0	1
32	2	1	0	1
33	2	1	0	1
34	2	1	0	1
35	2	1	0	1
36	2	1	0	1
37	2	1	0	1
38	2	1	0	1
39	2	1	0	1
40	2	1	0	1
41	2	1	0	1
42	2	1	0	1
43	2	1	0	1
44	2	1	0	1
45	2	1	0	1
46	2	1	0	1
47	2	1	0	1
48	2	1	0	1
49	2	1	0	1
50	2	1	0	1
51	2	1	0	1
52	2	1	0	1
53	2	1	0	1
54	2	1	0	1
55	2	1	0	1
56	2	1	0	1
57	2	1	0	1

Çizelge 6.6’da IEEE 57-bara test sistemine ait baralar arası hat direnci, endüktif reaktansı, süseptans ve transformatör kademe değerlerine ait hat parametreleri verilmektedir.

Çizelge 6.6. IEEE 57-bara test sistemine ait hat parametreleri

Baradan	Baraya	R (Ohm)	X(Ohm)	$B/2$(Ohm)	Tr. Kademe değeri
1	2	0,0083	0,0280	0,1290	
1	15	0,0178	0,0910	0,0988	
1	16	0,0454	0,2060	0,0546	
1	17	0,0238	0,1080	0,0286	
2	3	0,0298	0,0850	0,0818	
3	4	0,0112	0,0366	0,0380	
3	15	0,0162	0,0530	0,0544	
4	5	0,0625	0,1320	0,0258	
4	6	0,0430	0,1480	0,0348	
4	18	0	0,0555	0	0,9700
4	18	0	0,4300	0	0,9780
5	6	0,0302	0,0641	0,0124	
6	7	0,0200	0,1020	0,0276	
6	8	0,0339	0,1730	0,0470	
7	8	0,0139	0,0712	0,0194	
7	29	0	0,0648	0	0,9670
8	9	0,0099	0,0505	0,0548	
9	10	0,0369	0,1679	0,0440	
9	11	0,0258	0,0848	0,0218	
9	12	0,0648	0,2950	0,0772	
9	13	0,0481	0,1580	0,0406	
9	55	0	0,1205	0	0,9400
10	12	0,0277	0,1262	0,0328	
10	51	0	0,0712	0	0,9300
11	13	0,0223	0,0732	0,0188	
11	41	0	0,7490	0	0,9550
11	43	0	0,1530	0	0,9580
12	13	0,0178	0,0580	0,0604	
12	16	0,0180	0,0813	0,0216	
12	17	0,0397	0,1790	0,0476	
13	14	0,0132	0,0434	0,0110	
13	15	0,0269	0,0869	0,0230	
13	49	0	0,1910	0	0,8950
14	15	0,0171	0,0547	0,0148	
14	46	0	0,0735	0	0,9000
15	45	0	0,1042	0	0,9000
18	19	0,4610	0,6850	0	
19	20	0,2830	0,4340	0	
20	21	0	0,7767	0	1,0430
21	22	0,0736	0,1170	0	
22	23	0,0099	0,0152	0	

Çizelge 6.6. (devamı) IEEE 57-bara test sistemine ait hat parametreleri

22	38	0,0192	0,0295	0	
23	24	0,1660	0,2560	0,0084	
24	25	0	1,1820	0	
24	25	0	1,2300	0	
24	26	0	0,0473	0	1,0430
25	30	0,1350	0,2020	0	
26	27	0,1650	0,2540	0	
27	28	0,0618	0,0954	0	
28	29	0,0418	0,0587	0	
29	52	0,1442	0,1870	0	
30	31	0,3260	0,4970	0	
31	32	0,5070	0,7550	0	
32	33	0,0392	0,0360	0	
32	34	0	0,9530	0	0,9750
34	35	0,0520	0,0780	0,0032	
35	36	0,0430	0,0537	0,0016	
36	37	0,0290	0,0366	0	
37	38	0,0651	0,1009	0,0020	
37	39	0,0239	0,0379	0	
36	40	0,0300	0,0466	0	
38	44	0,0289	0,0585	0,0020	
38	48	0,0312	0,0482	0	
38	49	0,1150	0,1770	0,0030	
39	57	0	1,3550	0	0,9800
40	56	0	1,1950	0	0,9580
41	42	0,2070	0,3520	0	
41	43	0	0,4120	0	
41	56	0,5530	0,5490	0	
42	56	0,2125	0,3540	0	
44	45	0,0624	0,1242	0,0040	
46	47	0,0230	0,0680	0,0032	
47	48	0,0182	0,0233	0	
48	49	0,0834	0,1290	0,0048	
49	50	0,0801	0,1280	0	
50	51	0,1386	0,2200	0	
52	53	0,0762	0,0984	0	
53	54	0,1878	0,2320	0	
54	55	0,1732	0,2265	0	
56	57	0,1740	0,2600	0	

Çizelge 6.7'de IEEE 57-bara test sistemi generatör birimlerinin aktif ve reaktif güç üretimi kapasite limitleri tanımlanmaktadır. 1, 2, 5, 8, 11 ve 13 nolu baralarda bulunan generatör birimlerinin maksimum 1975,88 MW aktif güç üretimi kapasitesi tanımlanmaktadır.

Çizelge 6.7. IEEE 57-bara test sistemi üretim birimlerinin aktif ve reaktif güç limitleri

Bara No	P_{Gmin} (MW)	P_{Gmaks} (MW)	Q_{Gmin} (MVAr)	Q_{Gmaks} (MVAr)
1	0	575,88	-140	200
2	0	100	-17	50
3	0	140	-10	60
6	0	100	-8	25
8	0	550	-140	200
9	0	100	-3	9
12	0	410	-150	155

Çizelge 6.8'de IEEE 57-bara test sistemi yük baralarında bağlı yüklere ait aktif ve reaktif güç bilgileri verilmektedir. Temel yüklü IEEE 30-bara test sistemi yük baralarından talep edilen toplam aktif yüklere ait güç 1250,8 MW, toplam reaktif yüklere ait güç ise 336,4 MVAr'dır.

Çizelge 6.8. IEEE 57-bara test sistemi baralardaki aktif ve reaktif yükler

Bara No	$P_{yük}$ (MW)	$Q_{yük}$ (MVAr)
1	55	17
2	3	88
3	41	21
5	13	4
6	75	2
8	150	22
9	121	26
10	5	2
12	377	24
13	18	2,3
14	10,5	5,3
15	22	5
16	43	3
17	42	8
18	27,2	9,8
19	3,3	0,6
20	2,3	1
23	6,3	2,1
25	6,3	3,2

Çizelge 6.8. (devamı) IEEE 57-bara test sistemi baralardaki aktif ve reaktif yükler

27	9,3	0,5
28	4,6	2,3
29	17	2,6
30	3,6	1,8
31	5,8	2,9
32	1,6	0,8
33	3,8	1,9
35	6	3
38	14	7
41	6,3	3
42	7,1	4,4
43	2	1
44	12	1,8
47	29,7	11,6
49	18	8,5
50	21	10,5
51	18	5,3
52	4,9	2,2
53	20	10
54	4,1	1,4
55	6,8	3,4
56	7,6	2,2
57	6,7	2
Toplam	1250,8	336,4

6.3. IEEE Bara Test Sistemlerinde Güç Akışı Optimizasyon Uygulamaları

IEEE bara test sistemleri güç akışı optimizasyonu çalışmalarında kullanılan 3 farklı meta-sezgisel algoritmaya ait parametre değerleri Çizelge 6.9'da verilmiştir. Bu çizelgeye göre PSO, GKO ve HPSO algoritmaları için popülasyon büyüklükleri 20, azami döngü sayısı 100, çalıştırma sayıları ise 20 olarak her algoritmada eşit parametreler tercih edilmiştir.

Çizelge 6.9. PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon parametre değerleri

PSO	GKO	HPSO
Popülasyon büyüklüğü,N:20	N:20	N:20
Azami döngü sayısı, i:100	i:100	i:100
Bilişsel sabite, c_1:2	a katsayısı:2	c_1:2
Sosyal sabite, c_2:2	a_0 katsayısı:2	c_2:2
Azami atalet ağırlığı, w_2:0.9		w_2:0.9
Asgari atalet ağırlığı, w_1:0.2		w_1:0.2
Çalıştırma Sayısı, NoR:20	NoR:20	NoR:20

6.3.1. IEEE 30-Bara test sisteminin temel yüklü güç akışı optimizasyonu

Temel yüklü olarak IEEE 30-bara test sistemi yük baralarından talep edilen toplam aktif güç 283,40 MW, toplam reaktif güç ise 126,20 MVAr olarak tanımlanmıştır [122]. Güç sistemine ait hat ve bara parametreleri kullanılarak yapılan çalışmalarda; 10, 15, 17, 20, 23, 24 ve 29 nolu baralara paralel bağlı 5 MVAr'a kadar değer alabilen toplam 7 adet şönt kompansatör üniteleri hazır bekletilmiştir. Önce RGK'sız güç akışı uygulamaları daha sonra RGK'lı güç akışı optimizasyon uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Newton-Raphson yöntemi ile yapılan güç akışı analizleri reaktif güç kompansatörsüz olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra PSO, GKO ve geliştirilen yeni HPSO optimizasyon algoritmaları ile önce RGK devre dışı bırakılarak ve devreye dahil edilerek gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışması sonucunda baralarda oluşan parametre değerleri belirlenmiştir. Temel yük talepli güç akışı analizlerinde elde edilen bara gerilim değerleri, faz açıları, baraların toplam gerilim sapması değerleri, güç üretim birimlerinde üretilen aktif, reaktif güç bilgileri, toplam kayıp güç değerleri, şönt kompansatör üniteleri değerleri, meta-sezgisel algoritmaların kullandığı CPU süre ve bellek bilgileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Temel yüklü IEEE 30-bara test sisteminde reaktif güç kompansatörü devre dışı bırakılarak elde edilen NR güç akışı analizi sonuçları diğer çalışmalara referans olarak alınmıştır. Çizelge 6.10'da NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen bara gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. NR güç akışında RGK'sız elde edilen bara gerilim değerleri diğer optimizasyon algoritmalarına göre daha geniş aralıkta olduğu değerlendirilmiştir. PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının gerilim değerlerini daha dar aralıkta tutabildiği belirlenmiştir.

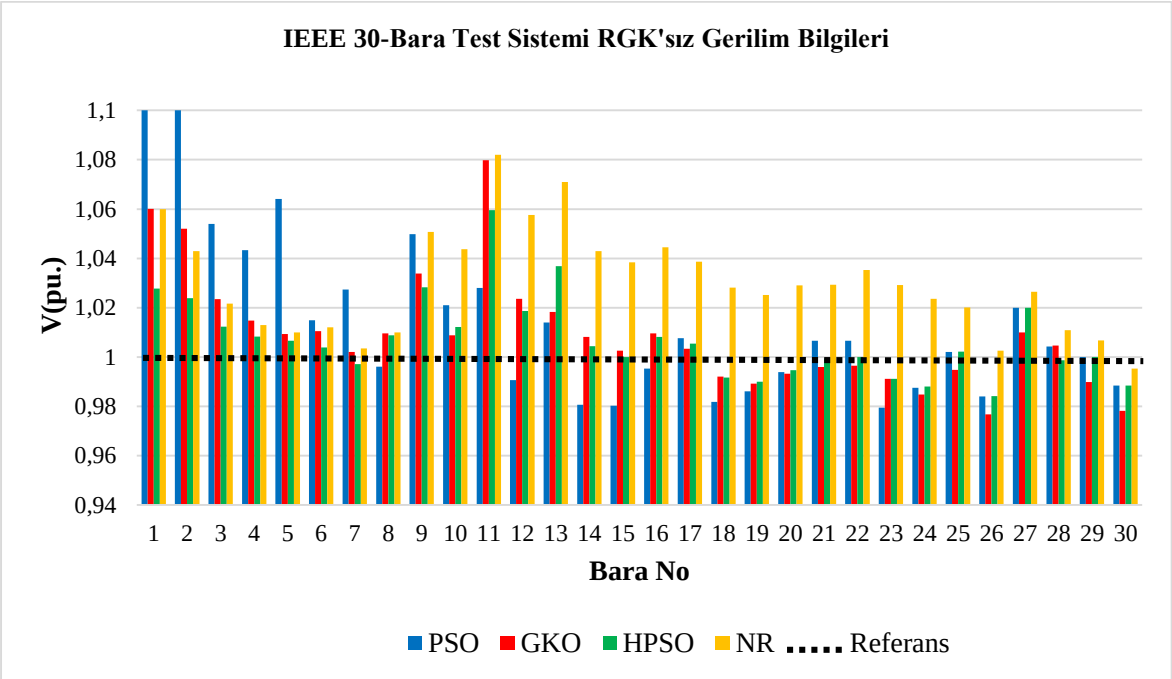
Ayrıca güç sistemine RGK eklendiğinde oluşan gerilim bilgileri değerlendirildiğinde, RGK olmadığında gerilimlerin 1 pu. değerlerden daha da uzaklaştığı belirlenmiştir. PSO, GKO ve HPSO optimizasyon algoritmalarının NR'ye göre RGK'sız ve RGK'lı gerilim limitlerini daha iyi sağlayabildiği gözlemlenmiştir. Her koşulda oluşan gerilim değerleri dikkate alındığında, HPSO algoritmasının PSO ve GKO algoritmalarına göre gerilim kararlılığının sağlanması bakımından üstün olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.10. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim bilgileri

Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Dahil		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
V_g1 (pu.)	1,0600	1,1000	1,0601	1,0277	0,9970	1,0208	1,0120
V_g2 (pu.)	1,0430	1,1000	1,0520	1,0238	0,9888	1,0050	1,0067
V_y3 (pu.)	1,0217	1,0540	1,0234	1,0123	0,9871	0,9947	1,0095
V_y4 (pu.)	1,0129	1,0433	1,0147	1,0083	0,9843	0,9883	1,0082
V_g5 (pu.)	1,0100	1,0641	1,0094	1,0067	0,9500	0,9832	0,9935
V_y6 (pu.)	1,0121	1,0148	1,0105	1,0039	0,9668	0,9888	1,0004
V_y7 (pu.)	1,0035	1,0273	1,0021	0,9971	0,9515	0,9784	0,9896
V_g8 (pu.)	1,0100	0,9961	1,0096	1,0088	0,9500	0,9895	0,9956
V_y9 (pu.)	1,0507	1,0499	1,0338	1,0283	1,0138	1,0161	1,0216
V_y10(pu.)	1,0438	1,0211	1,0088	1,0122	1,0091	1,0091	1,0102
V_g11(pu.)	1,0820	1,0281	1,0797	1,0595	1,1000	1,0677	1,0902
V_y12(pu.)	1,0576	0,9907	1,0236	1,0187	1,0118	1,0223	1,0103
V_g13(pu.)	1,0710	1,0140	1,0183	1,0369	1,0765	1,0159	1,0460
V_y14(pu.)	1,0429	0,9807	1,0082	1,0044	1,0007	1,0096	1,0005
V_y15(pu.)	1,0384	0,9803	1,0025	1,0000	0,9992	1,0067	1,0000
V_y16(pu.)	1,0445	0,9953	1,0095	1,0082	1,0029	1,0103	1,0029
V_y17(pu.)	1,0387	1,0076	1,0034	1,0054	1,0017	1,0058	1,0032
V_y18(pu.)	1,0282	0,9818	0,9921	0,9916	0,9938	0,9980	0,9945
V_y19(pu.)	1,0252	0,9861	0,9892	0,9900	0,9938	0,9961	0,9945
V_y20(pu.)	1,0291	0,9939	0,9932	0,9947	0,9994	1,0007	1,0001
V_y21(pu.)	1,0293	1,0066	0,9960	0,9994	0,9985	0,9989	0,9991
V_y22(pu.)	1,0353	1,0066	0,9965	1,0000	0,9997	0,9998	0,9998
V_y23(pu.)	1,0291	0,9795	0,9912	0,9911	1,0000	0,9993	0,9962
V_y24(pu.)	1,0237	0,9876	0,9848	0,9881	0,9964	0,9938	0,9909
V_y25(pu.)	1,0202	1,0020	0,9948	1,0021	1,0085	1,0083	1,0000
V_y26(pu.)	1,0025	0,9840	0,9767	0,9842	0,9906	0,9905	0,9820
V_y27(pu.)	1,0265	1,0199	1,0100	1,0199	1,0249	1,0262	1,0147
V_y28(pu.)	1,0109	1,0043	1,0046	0,9987	0,9566	0,9843	0,9949
V_y29(pu.)	1,0067	1,0000	0,9899	1,0000	1,0054	1,0171	1,0027
V_y30(pu.)	0,9953	0,9885	0,9782	0,9885	0,9938	1,0012	0,9877

Şekil 6.4'te IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait gerilim bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; GKO ve HPSO algoritmalarının 1 pu. değerine ve birbirlerine daha yakın değerler ürettiği, PSO algoritmasının ise gerilim kararlılığı konusunda daha geri planda kaldığı gözlemlenmiştir.

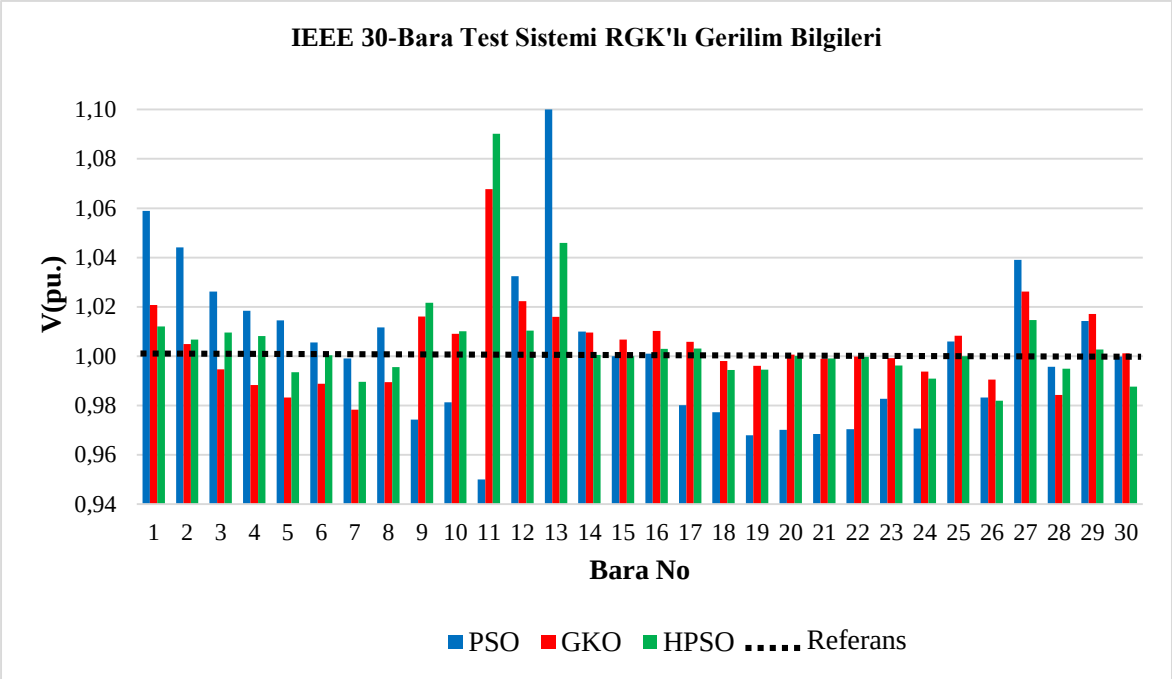
PSO'nun ürettiği gerilim bilgilerine göre bu senaryoda gerilim sapması, GKO ve HPSO algoritmalarına göre daha yüksek değerlerdedir. NR güç akışında ise gerilim değerlerinin diğer algoritmalara göre en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.4. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği

Çizelge 6.10'da güç sistemine RGK eklenerek PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen bara gerilim bilgileri değerlendirildiğinde; RGK'nın devreye alınması ile gerilimlerin daha iyi değerlere ulaştığı ve gerilim sapmalarının azaldığı görülmektedir.

Şekil 6.5'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile güç sistemine RGK eklendiğinde gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait gerilim bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; GKO ve HPSO algoritmalarının 1 pu. değerine ve birbirlerine yakın değerler ürettiği görülmüştür. PSO algoritmasının ise GKO ve HPSO algoritmalarına göre gerilim sapması daha yüksek değerlerdedir.



Şekil 6.5. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği

Çizelge 6.11'de PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı gerilim faz açısı tablosu verilmektedir. RGK'sız elde edilen faz açısı bilgileri incelendiğinde; NR güç akışına ait gerilim faz açısı değerlerinin diğer algoritmalara göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. HPSO'nun PSO'ya göre daha iyi faz açısı sonuçları ürettiği görülmektedir. PSO algoritmasının ise faz açısı bilgileri bakımından GKO'dan iyi olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.11. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilimleri faz açısı bilgileri

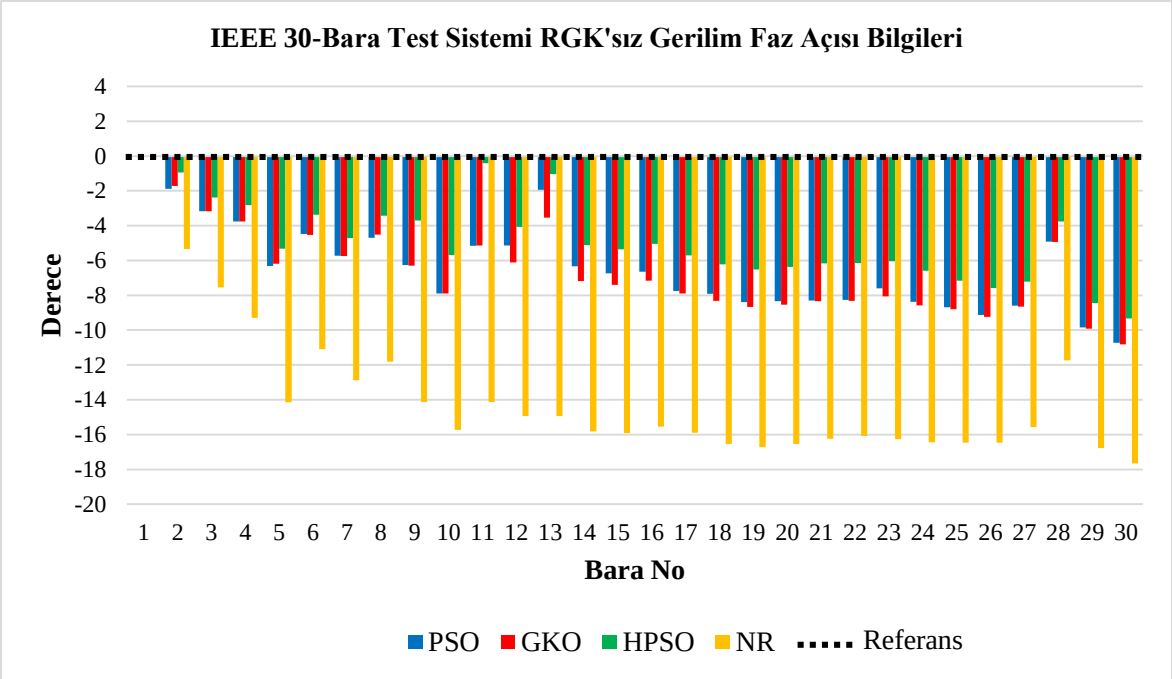
Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
V_g1 (°)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
V_g2 (°)	-5,3474	-1,8827	-1,7132	-0,9415	-0,8980	-1,3017	-0,8934
V_y3 (°)	-7,5448	-3,1619	-3,1730	-2,3830	-2,1751	-2,7299	-2,6222
V_y4 (°)	-9,2989	-3,7532	-3,7673	-2,8144	-2,5463	-3,2296	-3,1111
V_g5 (°)	-14,1542	-6,3223	-6,1851	-5,3140	-5,4704	-5,8369	-5,4295
V_y6 (°)	-11,0880	-4,4746	-4,5340	-3,3774	-3,0796	-3,9481	-3,6402
V_y7 (°)	-12,8734	-5,7182	-5,7427	-4,7062	-4,6247	-5,2525	-4,9209
V_g8 (°)	-11,8039	-4,7017	-4,5216	-3,4319	-2,8043	-3,9596	-3,5329
V_y9 (°)	-14,1363	-6,2606	-6,2915	-3,6959	-3,3229	-4,6677	-4,0342
V_y10(°)	-15,7341	-7,8916	-7,8983	-5,6830	-5,2727	-6,4488	-6,0683

Çizelge 6.11. (devamı) NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilimleri faz açısı bilgileri

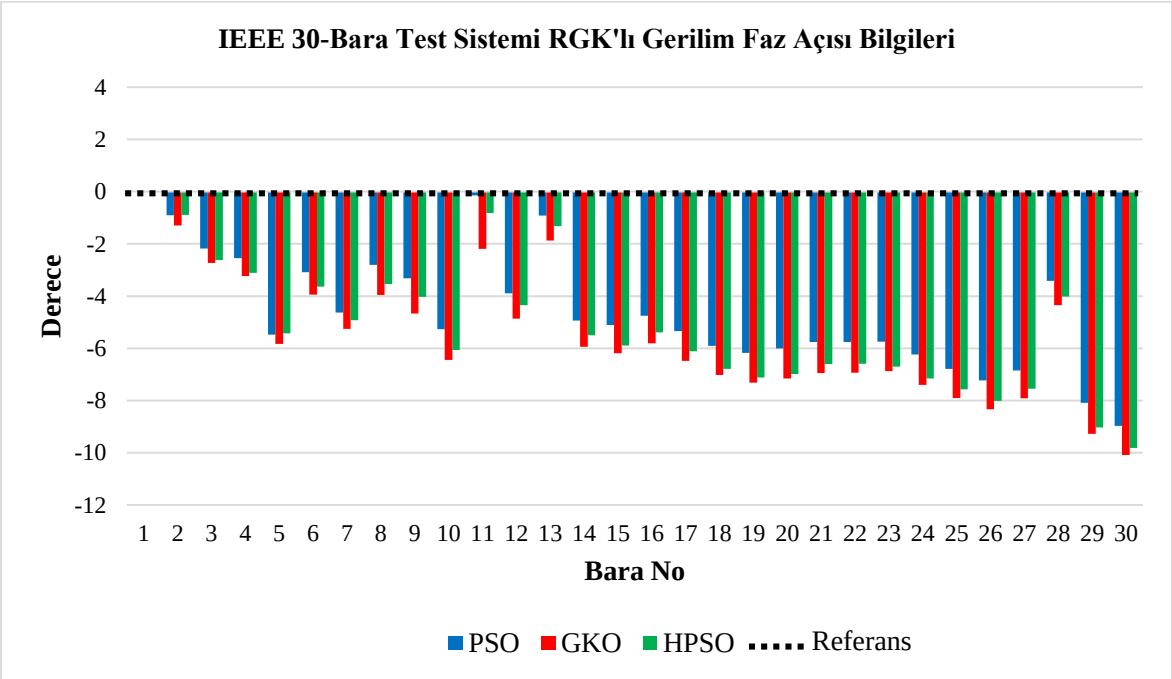
$V_g11(^o)$	-14,1363	-5,1563	-5,1402	-0,4152	-0,1480	-2,1879	-0,8225
$V_y12(^o)$	-14,9416	-5,1360	-6,1108	-4,0637	-3,8998	-4,8596	-4,3526
$V_g13(^o)$	-14,9416	-1,9405	-3,5324	-1,0332	-0,9118	-1,8713	-1,3149
$V_y14(^o)$	-15,8244	-6,3245	-7,1848	-5,1280	-4,9319	-5,9398	-5,4968
$V_y15(^o)$	-15,9101	-6,7369	-7,4033	-5,3549	-5,1053	-6,1822	-5,8931
$V_y16(^o)$	-15,5487	-6,6499	-7,1514	-5,0435	-4,7561	-5,8085	-5,3944
$V_y17(^o)$	-15,8856	-7,7570	-7,8961	-5,7149	-5,3357	-6,4808	-6,1107
$V_y18(^o)$	-16,5425	-7,9141	-8,3220	-6,2166	-5,8988	-7,0167	-6,7905
$V_y19(^o)$	-16,7273	-8,3970	-8,6643	-6,5234	-6,1697	-7,3120	-7,1182
$V_y20(^o)$	-16,5363	-8,3391	-8,5350	-6,3759	-6,0059	-7,1588	-6,9845
$V_y21(^o)$	-16,2462	-8,3032	-8,3440	-6,1644	-5,7614	-6,9497	-6,6000
$V_y22(^o)$	-16,0738	-8,2703	-8,3190	-6,1522	-5,7516	-6,9336	-6,5926
$V_y23(^o)$	-16,2528	-7,6052	-8,0651	-6,0397	-5,7410	-6,8683	-6,7036
$V_y24(^o)$	-16,4409	-8,3681	-8,5846	-6,5851	-6,2327	-7,3945	-7,1551
$V_y25(^o)$	-16,4712	-8,6924	-8,8054	-7,1550	-6,7916	-7,9044	-7,5751
$V_y26(^o)$	-16,4712	-9,1253	-9,2446	-7,5877	-7,2235	-8,3310	-8,0097
$V_y27(^o)$	-15,5558	-8,5986	-8,6514	-7,2094	-6,8426	-7,9193	-7,5458
$V_y28(^o)$	-11,7436	-4,9228	-4,9279	-3,7534	-3,4185	-4,3432	-4,0181
$V_y29(^o)$	16,7777	-9,8368	-9,9145	-8,4476	-8,0808	-9,2758	-9,0298
$V_y30(^o)$	-17,6546	-10,7257	-10,8220	-9,3365	-8,9697	-10,0789	-9,8173

Çizelge 6.11'de güç sistemine RGK eklendiğinde elde edilen gerilim faz açısı bilgileri karşılaştırıldığında; PSO'nun kısmen HPSO'dan daha iyi değerleri ürettiği gözlemlenmiştir.

Şekil 6.6'da IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açıları grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait açı bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; HPSO algoritmasının 0^o açı değerine en yakın değerleri ürettiği, GKO ve PSO algoritmasının ise gerilim açı değerlerinin negatif değerlerde daha dezavantajlı olduğu görülmüştür. NR güç akışı analizi ile elde edilen gerilim faz açısı değerlerinin negatif yönde diğer algoritmalardan daha olumsuz değerlerde olduğu, bu durumun ise bara gerilim bilgilerine daha olumsuz yansıyabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 6.6. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarında bara gerilimlerine ait faz açısı grafiği



Şekil 6.7. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait bara gerilimlerine ait faz açısı grafiği

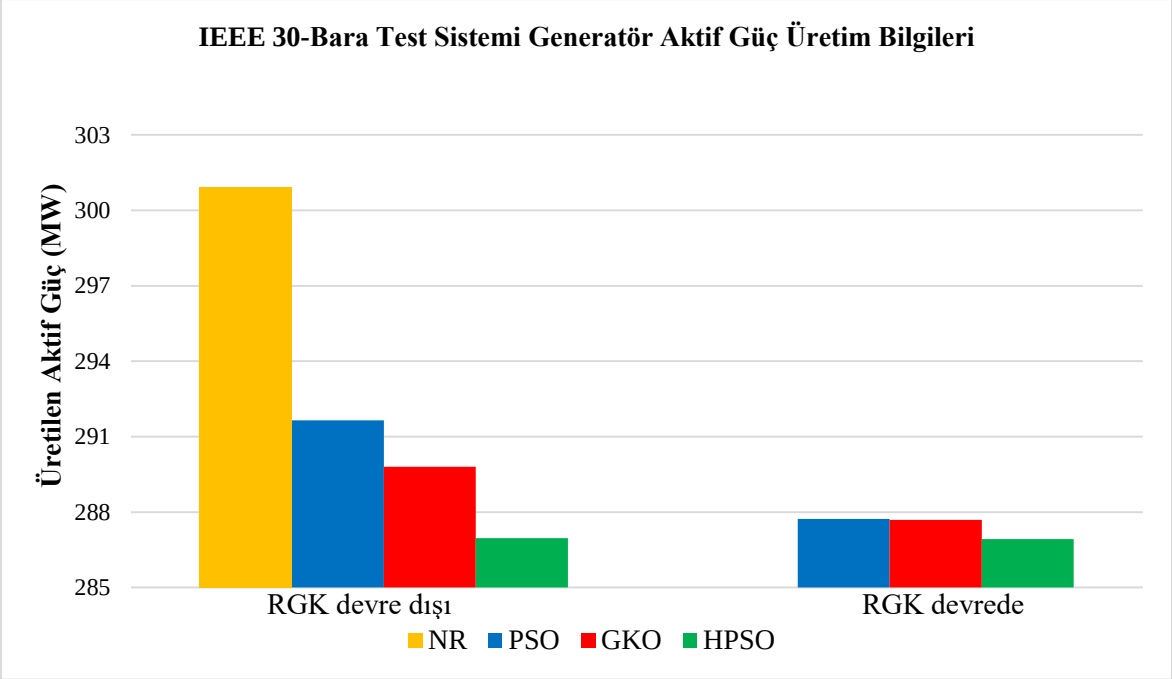
Şekil 6.7'de IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK eklendiğinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açıları grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait açı bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; PSO ve HPSO algoritmalarının 0^o açı değerine daha yakın ve benzer değerler ürettiği, GKO algoritmasının ise gerilim açı değerlerinin daha dezavantajlı olduğu görülmüştür. HPSO algoritmasından elde edilen değerlere bakıldığında, GKO'dan daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Çizelge 6.12'de RGK'sız ve RGK'lı olarak tanımlanan IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif ve reaktif güç üretimini gerçekleştirdikleri görülmektedir. Referans olarak NR algoritmasının ürettiği aktif güç değeri 300,9280 MW ve reaktif güç ise 147,1210 MVAr olarak görülmektedir. RGK'sız ve RGK'lı en az aktif ve reaktif güç üretim gereksinimi duyulmasını sağlayan algoritmanın HPSO algoritması olduğu görülmektedir. Temel yüklü olarak tanımlanan IEEE 30-bara test sisteminde geliştirilen HPSO algoritmasının PSO ve GKO algoritmalarından daha üstün olduğunu ve bu algoritma ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyonu çalışmasında daha az güç üretim gereksinimine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.12. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif ve reaktif güç bilgileri

Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
P_g1(MW)	260,9280	101,6447	119,8175	53,3524	52,7300	74,3584	52,0038
P_g2(MW)	40,0000	80,0000	64,0303	78,7549	32,8397	71,5493	79,9538
P_g5(MW)	0,0000	50,0000	42,2839	50,0000	50,0000	48,1827	49,9916
P_g8(MW)	0,0000	10,0000	17,5340	35,0000	35,0000	31,2983	34,9734
P_g11(MW)	0,0000	10,0000	23,3640	29,9768	30,0000	22,8471	29,9999
P_g13(MW)	0,0000	40,0000	22,7755	39,8864	40,0000	39,4599	27,6878
P_T(MW)	300,9280	291,6447	289,8053	286,9705	287,7300	287,6958	286,9225
Q_g1(MVAr)	-17,1180	-6,6684	31,5165	-4,3143	-7,7102	0,4892	2,4201
Q_g2(MVAr)	47,7660	100,8692	18,0760	14,0699	100,5897	26,1869	16,9049
Q_g5(MVAr)	35,9650	41,7924	28,7970	28,3032	39,7295	4,2004	-9,0066
Q_g8(MVAr)	30,6910	-15,4435	26,5384	42,5656	-14,7045	41,7452	33,1648
Q_g11(MVAr)	35,2700	-10,6741	13,5716	16,7613	-10,0643	26,8919	30,6615
Q_g13(MVAr)	10,2470	18,01442	1,3912	14,5087	-5,7943	4,7633	18,3775
Q_T (MVAr)	147,1210	127,8899	119,8908	111,8944	102,0459	104,2768	92,5221
Şönt Kompansatör					25,0000	18,7817	26,0085
(-): Sistemden çekilen güç, (+):Sisteme verilen güç							

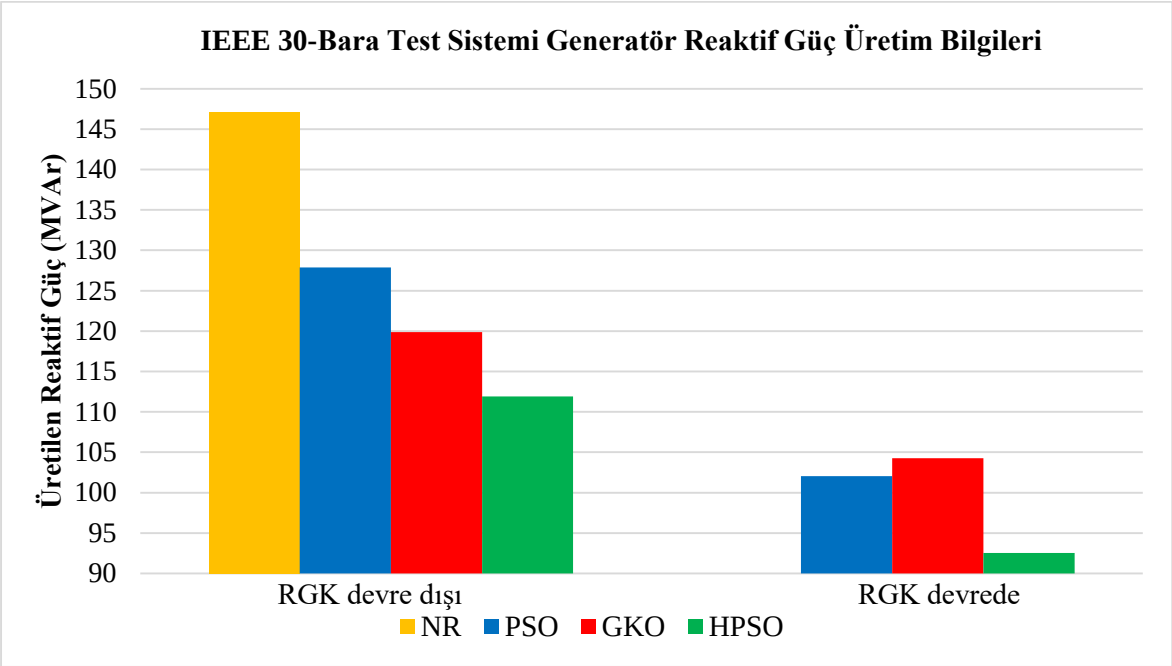
Şekil 6.8'de IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu ve aktif güç üretimini gerçekleştirmesi sonrasında oluşan değerlere ait grafik verilmektedir. NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 300,9280 MW'lık aktif güç üretimi ile maksimum değer NR ile elde edilirken, minimum değer ise 286,9705 MW ile HPSO ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 287,7300 MW maksimum aktif güç üretim değeri PSO algoritması ile elde edilirken, minimum güç üretim değeri ise 286,9225 MW değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. Üretilen toplam aktif güç değerlerinin RGK devre dışı bırakıldığında daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmalarında üretilen aktif güçlerde düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.



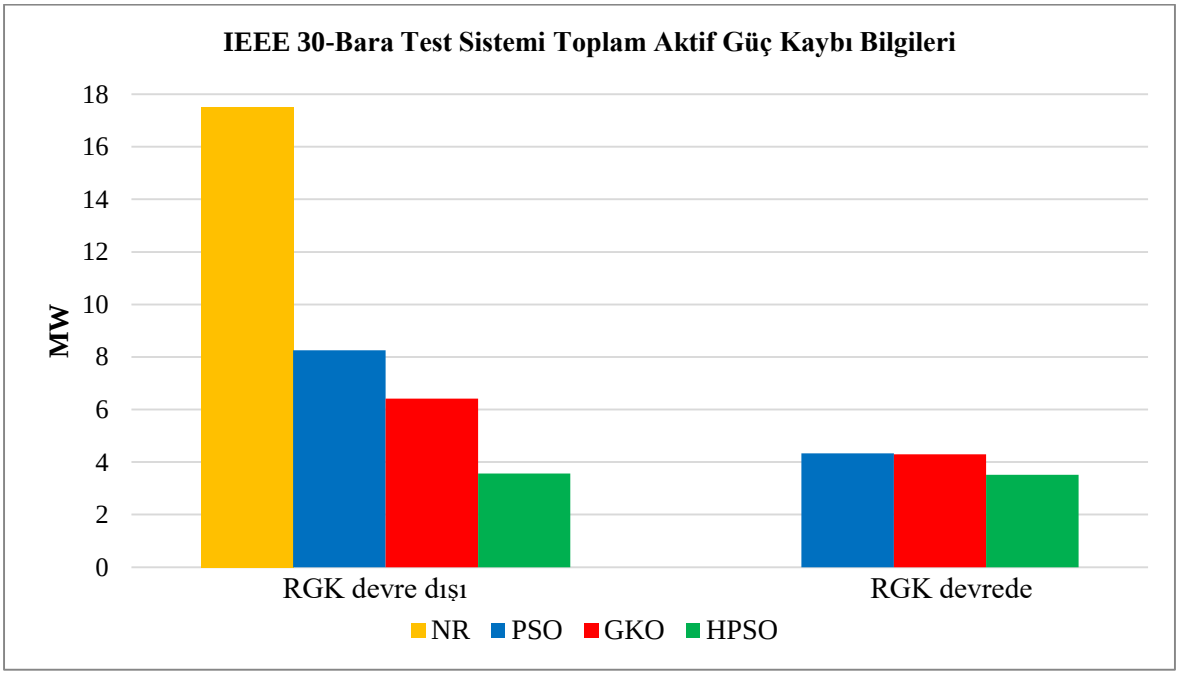
Şekil 6.8. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif güç değerleri grafiği

Şekil 6.9 ve Çizelge 6.12'de RGK devre dışı bırakılarak güç sisteminde üretilen toplam reaktif güç değerleri dikkate alındığında; NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 147,1210 MVAr'lık reaktif güç üretimi ile maksimum değer, minimum değer ise 111,8944 MVAr ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 104,2768 MVAr maksimum reaktif güç üretim değeri GKO ile elde edilirken, minimum reaktif güç üretim değeri ise 92,5221 MVAr değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir.

Üretilen toplam reaktif güç değerleri RGK devre dışı iken oldukça yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile üretilen reaktif güçlerde önemli düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.



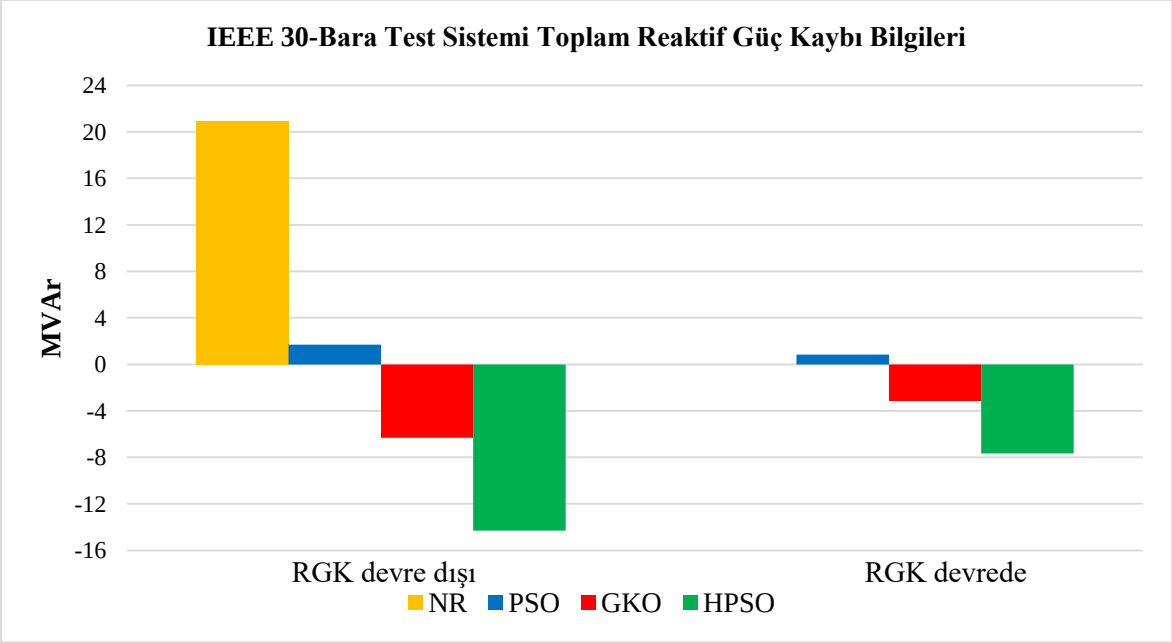
Şekil 6.9. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen reaktif güç değerleri grafiği



Şekil 6.10. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı toplam aktif güç kaybı değerleri

Şekil 6.10'da IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif güç üretimini gerçekleştirmesi sonrasında güç iletim hatları üzerinde oluşan aktif güç kaybı değerlerine ait grafik verilmektedir. NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 17,5280 MW'lık aktif güç kaybı ile maksimum değer, minimum değer ise 3,5700 MW ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 4,3300 MW maksimum aktif güç kaybı değeri PSO algoritması ile elde edilirken, minimum güç kaybı değeri ise 3,5225 MW değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. İletim hatlarında kaybolan toplam aktif güç değerlerinin RGK devre dışı iken daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının da katkısıyla kaybolan aktif güç değerlerinde düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

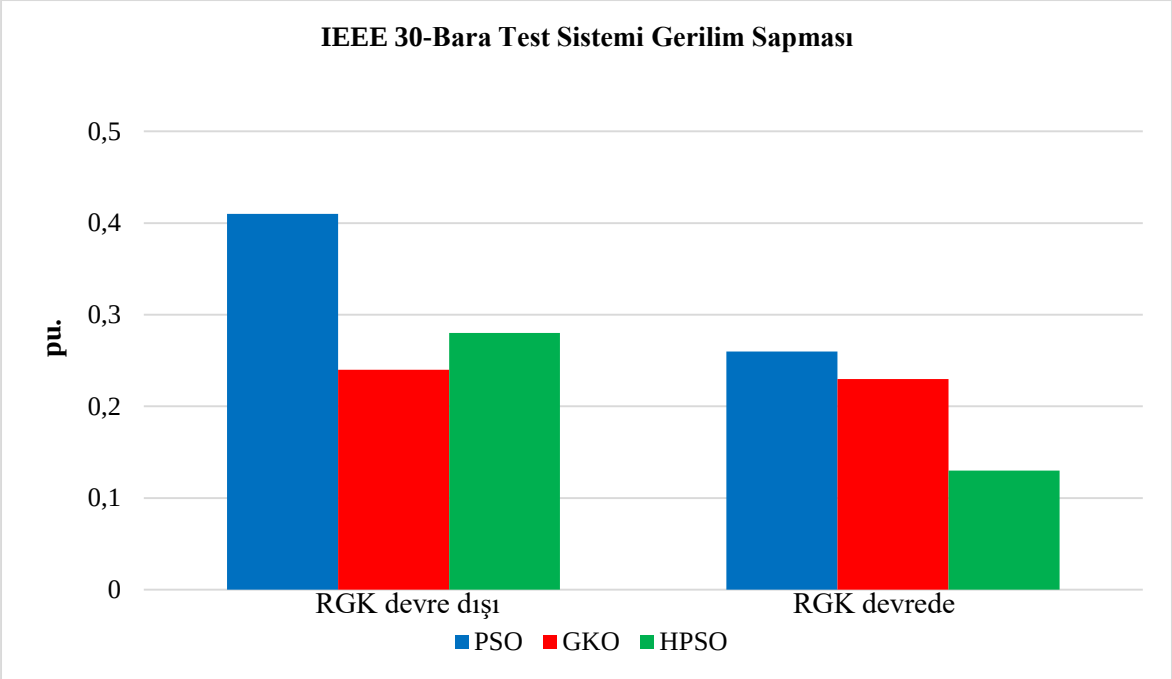
Şekil 6.11'de RGK devre dışı bırakılarak güç sistemi üzerinde kaybolan toplam reaktif güç değerleri dikkate alındığında; NR güç akışı analizinde 20,9210 MVAr'lık reaktif güç kaybı ile maksimum değer, minimum değer ise -14,3056 MVAr ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 0,8459 MVAr maksimum reaktif güç kayıp değeri PSO ile elde edilirken, minimum reaktif güç kaybı değeri ise -7,6694 MVAr değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. Üretilen toplam reaktif güç değerleri RGK devre dışı iken daha yüksek değerlerdedir.



Şekil 6.11. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı toplam reaktif güç kaybı değerleri

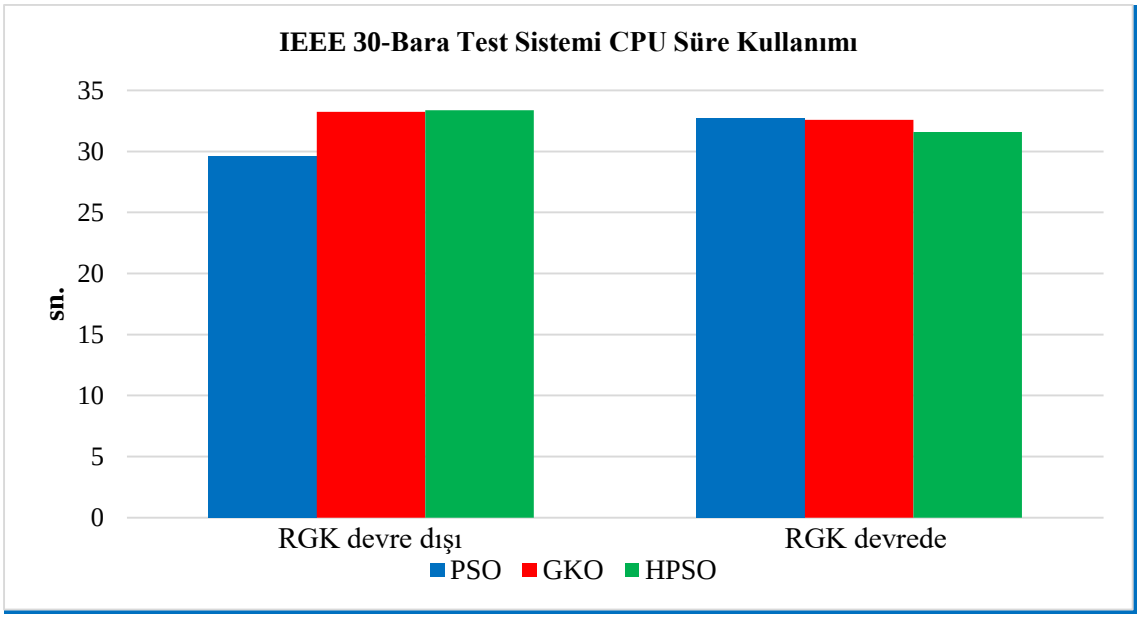
RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile güç akışı optimizasyonunda kayıp reaktif güçlerde de düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.12'de RGK devre dışı bırakıldığında; PSO algoritmasıyla güç sisteminde oluşan bara gerilim sapması maksimum değer 0,4089 pu. elde edilirken, minimum değer ise 0,2400 pu. olarak GKO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; maksimum 0,2673 pu. gerilim sapması değeri PSO ile elde edilirken, minimum 0,13 pu. gerilim sapması değeri ise HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK'nın gerilim kararlılığına olumlu etkisi bu grafikte daha iyi gözlemlenmiştir.

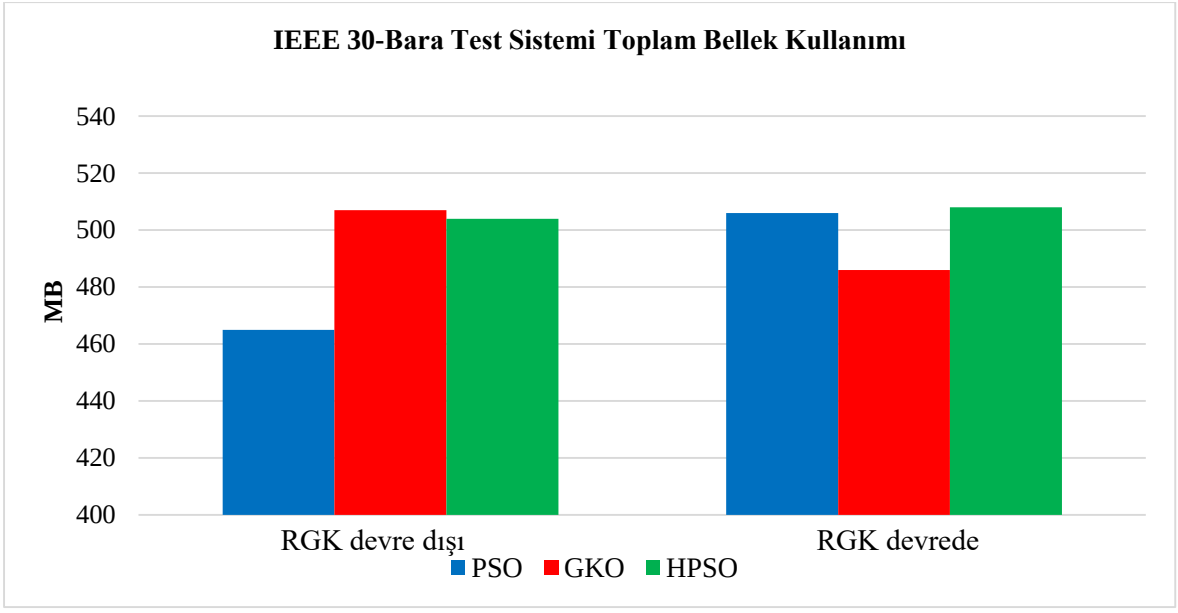


Şekil 6.12. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı gerilim sapması değerleri

Şekil 6.13'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmasında, algoritmaların süre kullanımı değerine ait RGK'lı ve RGK'sız oluşan değerler verilmektedir. PSO'nun RGK'sız 29,6057 sn. ile en kısa sürede optimizasyonu gerçekleştirdiği görülmüştür. GKO 33,2519 sn. ve HPSO ise 33,3931 sn. benzer sürelerde güç akışı optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. RGK eklendiğinde GKO 32,5869 sn. ve HPSO 31,6044 sn. ile kısmen optimizasyon süresi azalırken, PSO'da optimizasyon süresi 32,7179 sn. olarak artış olduğu görülmüştür. RGK devreye alındığında HPSO algoritmasının CPU kullanım süresinde önemli azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 6.13. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı CPU süre kullanımı değerleri



Şekil 6.14. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'lı ve RGK'sız bellek kullanımı değerleri

Şekil 6.14'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmasında, algoritmaların toplam bellek kullanımına ait RGK'sız ve RGK'lı oluşan değerler verilmektedir. PSO'nun RGK'sız 465 MB en az bellek kullanımı, GKO algoritmasının ise 507 MB toplam bellek kullanımı ile en yüksek değeri kullandığı görülmüştür. GKO'nun RGK devreye alındığında bellek kullanımının 486 MB olarak gerçekleştiği görülmektedir. PSO ve HPSO'da ise benzer şekilde RGK'nın devreye girmesi ile bellek kullanımı artışı olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.13'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının RGK olmadan ve RGK dahil edilerek çalıştırılması ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarında; gerilim sapması, toplam aktif ve reaktif güç kaybı, amaç fonksiyonu, aktif güç kayıplarına ait standart sapma değerleri, algoritmaların hesaplama (CPU kullanım) süreleri, bellek kullanım değerlerine ait sayısal bilgiler verilmektedir. RGK devre dışı bırakıldığında güç sistemine ait gerilim sapması değeri minimum 0,24 pu. ile GKO algoritması ile elde edilirken, maksimum değer ise 0,41 pu. ile PSO algoritmasında ortaya çıkmıştır. RGK devreye alındığında oluşan 0,13 pu. gerilim sapması değeri ile HPSO algoritmasının üstünlüğü görülmüştür.

RGK devre dışı iken güç sistemine ait toplam aktif güç kaybı değeri NR güç akışı analizi yöntemi ile 17,53 MW olarak maksimum değeri alırken, 3,57 MW aktif güç kaybı değeri ile HPSO en iyi değeri sunmuştur. RGK devreye dahil edildiğinde maksimum aktif güç kaybı değeri PSO algoritmasında oluşurken, minimum değer ise 3,52 MW olarak HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK harici reaktif güç kayıpları incelendiğinde; maksimum değer 20,92 MVAr olarak NR ile elde edilirken, minimum değer -14,31 MVAr olarak HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK dahil edildiğinde; maksimum 4,33 MVAr reaktif güç kaybı PSO ile elde edilirken, minimum -33,68 MVAr değer HPSO'dan elde edilmiştir.

Amaç fonksiyonu değerlerinde RGK harici ve dahil edildiğinde; 259,80 ve 131,85 değerleri ile PSO maksimum amaç fonksiyonu değerlerini sunmuştur. RGK yokken ve dahil edildiğinde ise HPSO algoritması 155,55 ve 99,72 amaç fonksiyonu değerleri ile üstünlüğünü ve etkinliğini bu başlıkta da ortaya koymuştur. RGK harici minimum CPU kullanım süresi 29,61 sn. olarak PSO algoritmasında gerçekleşirken, maksimum CPU süre kullanımını HPSO algoritması ile 33,38 sn. olarak gerçekleştirmiştir. RGK dahil edildiğinde 31,60 sn. süre ile HPSO minimum, 32,72 sn. ile PSO maksimum süre kullanımını gerçekleştirmiştir. RGK devrede değilken 465 MB minimum bellek kullanım değerine sahip olan GKO algoritması iken maksimum bellek kullanımını 515 MB ile PSO algoritması gerçekleştirmiştir. RGK devreye alındığında ise 508 MB maksimum bellek kullanım değeri HPSO ile gerçekleşirken, 486 MB minimum bellek kullanım değeri GKO ile gerçekleşmiştir. Sonuç olarak; RGK devre dışı ve devredeyken HPSO algoritması, CPU süre ve bellek kullanımı haricinde diğer başlıklarda en iyi değerleri sunarak üstünlüğünü, etkinliğini, güvenilirliğini ve sağlamlığını temel yüklü güç akışı optimizasyonunda ortaya koymuştur.

Çizelge 6.13. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları

	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
Gerilim Sapması (pu.)	-	0,41	0,24	0,28	0,26	0,23	0,13
$P_{kayıp}$(MW)	17,53	8,25	6,41	3,57	4,33	4,29	3,52
$Q_{kayıp}$(MVAr)	20,92	1,69	-6,31	-14,31	-24,15	-21,92	-33,68
Amaç Fonksiyonu	-	259,80	201,83	155,55	131,85	130,56	99,72
Standart Sapma	-	2,47	1,34	0,77	1,80	1,28	0,75
CPU Süresi (sn.)	0,66	29,61	33,25	33,38	32,72	32,59	31,60
CPU Bellek (MB)	515	465	507	504	506	486	508

6.3.2. IEEE 30-Bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO VE HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları

IEEE 30-bara test sisteminde yük baralarındaki temel yükler %25 oranında artırılarak 354,25 MW aktif güç ve 157,75 MVAr reaktif güç olarak tanımlanmıştır. Çizelge 6.14'te %25 oranında artırılmış aktif ve reaktif yük değerleri verilmektedir.

Çizelge 6.14. IEEE 30-bara test sistemi baralardaki %25 artırımlı aktif ve reaktif yük bilgileri

Bara No	$P_{yük}$ (MW)	$Q_{yük}$ (MVAr)
2	27,13	15,88
3	3,00	1,50
4	9,50	2,00
5	117,75	23,75
7	28,50	13,63
8	37,50	37,50
10	7,25	2,50
12	14,00	9,38
14	7,75	2,00
15	10,25	3,13
16	4,38	2,25

Çizelge 6.14. (devamı) IEEE 30-bara test sistemi baralardaki %25 artırımlı aktif ve reaktif yük bilgileri

17	11,25	7,25
18	4,00	1,13
19	11,88	4,25
20	2,75	0,88
21	21,88	14,00
23	4,00	2,00
24	10,88	8,38
26	4,38	2,88
29	3,00	1,13
30	13,25	2,38
Toplam	354,25	157,75

Güç sistemine ait hat, bara, generatör, transformatör ve gerilim parametreleri tanımlanarak NR ile yapılan güç akışı analizleri reaktif güç kompansatörsüz olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra PSO, GKO ve geliştirilen HPSO optimizasyon algoritmaları ile önce reaktif güç kompansatörü devre dışı bırakılarak ve sonrasında devreye alınarak baralarda oluşan gerilim değerleri belirlenmiştir. %25 fazla yük talebi dikkate alınarak gerçekleştirilen güç akışı analizlerinde, IEEE 30-bara test sistemi baralarında oluşan gerilim değerleri, gerilim faz açıları, toplam gerilim sapması değerleri, güç üretim birimlerinde üretilen aktif, reaktif güç bilgileri, toplam güç kayıp değerleri, şönt kompansatör üniteleri değerleri, meta-sezgisel algoritmaların kullandığı CPU süre ve bellek bilgileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24 ve 29 nolu baralara paralel bağlı 0 ila 5 MVAr arasında değer alabilen toplam 9 adet şönt kompansatör üniteleri hazır bekletilmiştir. Önce RGK'sız güç akışı ve optimizasyon uygulamaları daha sonra RGK'lı optimizasyon uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen NR güç akışı analizi sonuçları referans alınarak reaktif güç kompansatörü devre dışı bırakılmış ve PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen güç kayıpları ve gerilim kararlılığı analizleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

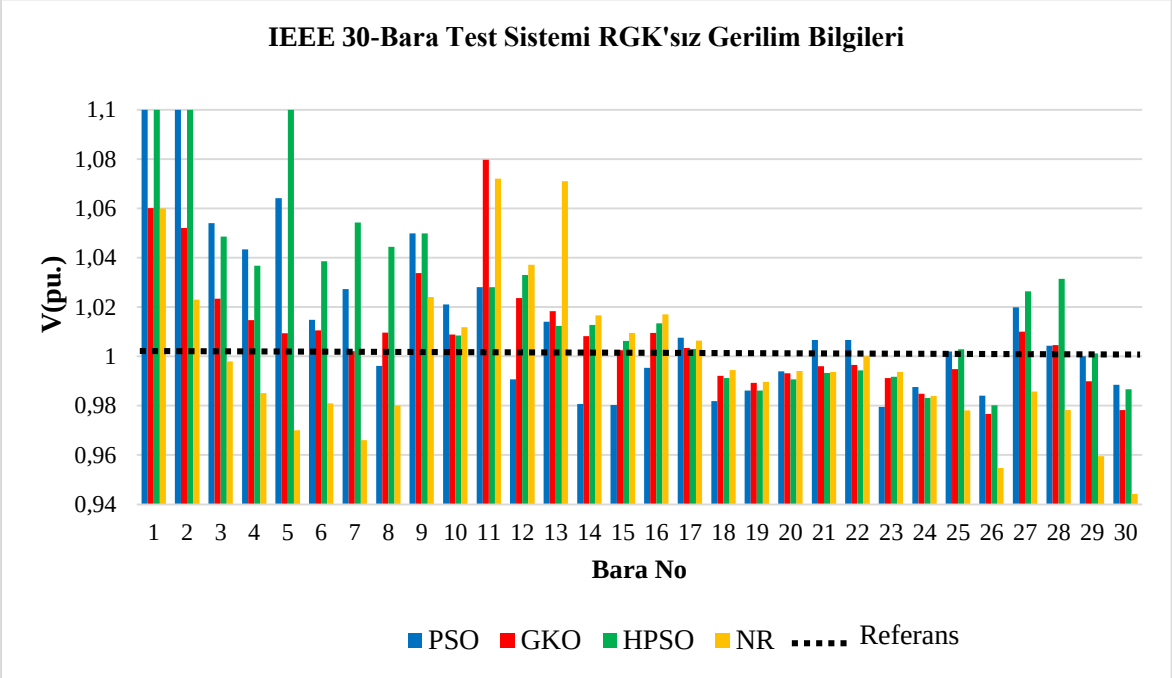
Çizelge 6.15'de NR güç akışı ve PSO, GKO, HPSO algoritmaları ile RGK'sız elde edilen bara gerilim değerleri verilmektedir. Gerilim bilgileri değerlendirildiğinde RGK olmadığında gerilimlerin 1 pu. değerlerden daha da uzaklaştığı görülmektedir.

Çizelge 6.15. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim bilgileri

Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
V_g1 (pu.)	1,0600	1,1000	1,0601	1,1000	1,0589	1,0729	1,0407
V_g2 (pu.)	1,0230	1,1000	1,0520	1,1000	1,0441	1,0421	1,0285
V_y3 (pu.)	0,9980	1,0540	1,0234	1,0485	1,0262	1,0321	1,0258
V_y4 (pu.)	0,9851	1,0433	1,0147	1,0368	1,0184	1,0227	1,0218
V_g5 (pu.)	0,9700	1,0641	1,0094	1,1000	1,0145	1,0059	1,0062
V_y6 (pu.)	0,9810	1,0148	1,0105	1,0385	1,0056	1,0070	1,0080
V_y7 (pu.)	0,9660	1,0273	1,0021	1,0542	0,9991	0,9964	0,9971
V_g8 (pu.)	0,9800	0,9961	1,0096	1,0444	1,0117	0,9993	1,0046
V_y9 (pu.)	1,0240	1,0499	1,0338	1,0498	0,9743	1,0131	1,0326
V_y10(pu.)	1,0118	1,0211	1,0088	1,0084	0,9813	1,0056	1,0130
V_g11(pu.)	1,0720	1,0281	1,0797	1,0281	0,9500	1,0431	1,0633
V_y12(pu.)	1,0371	0,9907	1,0236	1,0330	1,0325	1,0200	1,0257
V_g13(pu.)	1,0710	1,0140	1,0183	1,0123	1,1000	1,0786	1,1000
V_y14(pu.)	1,0166	0,9807	1,0082	1,0127	1,0099	1,0042	1,0085
V_y15(pu.)	1,0095	0,9803	1,0025	1,0062	1,0000	1,0016	1,0039
V_y16(pu.)	1,0170	0,9953	1,0095	1,0134	1,0011	1,0063	1,0124
V_y17(pu.)	1,0064	1,0076	1,0034	1,0030	0,9801	1,0017	1,0088
V_y18(pu.)	0,9945	0,9818	0,9921	0,9912	0,9773	0,9901	0,9936
V_y19(pu.)	0,9896	0,9861	0,9892	0,9862	0,9679	0,9874	0,9916
V_y20(pu.)	0,9941	0,9939	0,9932	0,9907	0,9702	0,9930	0,9976
V_y21(pu.)	0,9936	1,0066	0,9960	0,9933	0,9685	0,9921	0,9998
V_y22(pu.)	1,0000	1,0066	0,9965	0,9943	0,9704	0,9930	1,0002
V_y23(pu.)	0,9937	0,9795	0,9912	0,9917	0,9827	0,9933	0,9916
V_y24(pu.)	0,9839	0,9876	0,9848	0,9832	0,9707	0,9827	0,9860
V_y25(pu.)	0,9781	1,0020	0,9948	1,0029	1,0059	0,9967	0,9999
V_y26(pu.)	0,9547	0,9840	0,9767	0,9802	0,9833	0,9738	0,9772
V_y27(pu.)	0,9858	1,0199	1,0100	1,0263	1,0391	1,0166	1,0199
V_y28(pu.)	0,9782	1,0043	1,0046	1,0314	0,9957	0,9982	1,0008
V_y29(pu.)	0,9595	1,0000	0,9899	1,0012	1,0143	0,9970	1,0040
V_y30(pu.)	0,9442	0,9885	0,9782	0,9866	0,9999	0,9798	0,9854

Şekil 6.15'te IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait gerilim bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; GKO ve HPSO algoritmalarının 1 pu. değerine ve birbirlerine yakın değerler ürettiği, PSO algoritmasının ise gerilim sapması değerinin GKO ve HPSO algoritmalarına göre daha yüksek değerlerde

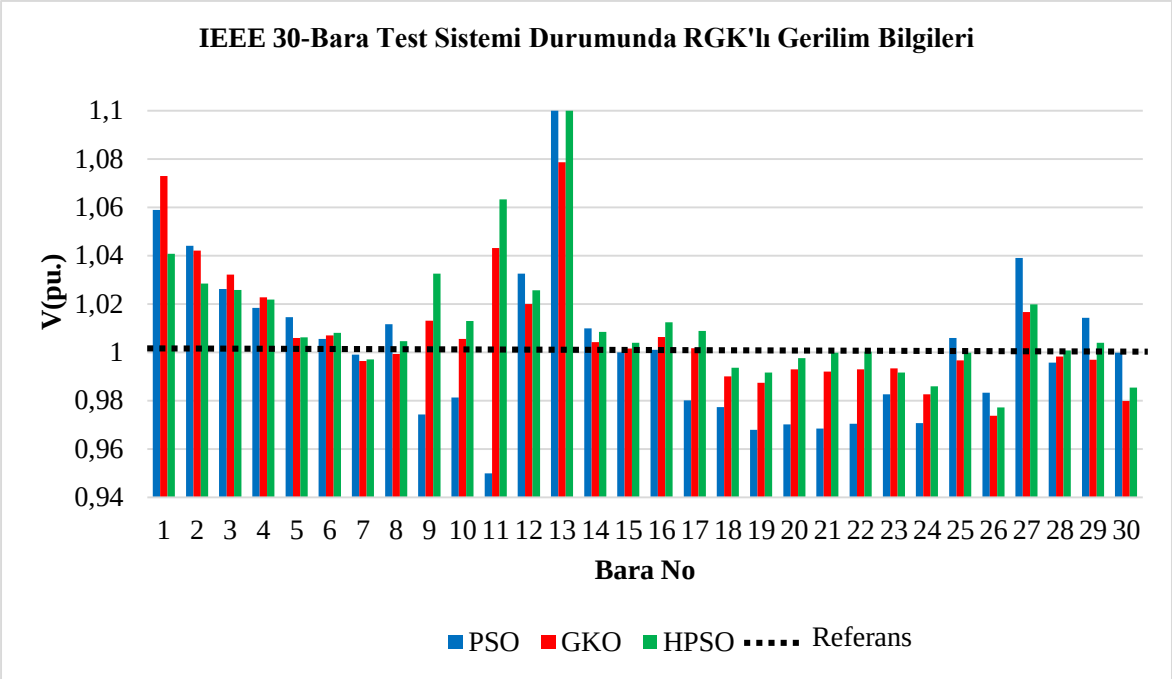
olduğu ve gerilim kararlılığı konusunda daha geride olduğu belirlenmiştir. NR güç akışında ise gerilim değerlerinin diğer algoritmalara göre en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.15. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği

Çizelge 6.15'te güç sistemine RGK eklendiğinde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen bara gerilim bilgileri değerlendirildiğinde; RGK'nın devreye alınması ile gerilimlerin daha iyi değerlere ulaştığı ve gerilim sapmalarının azaldığı görülmektedir.

Şekil 6.16'da IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile güç sistemine RGK eklendiğinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait gerilim bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; GKO ve HPSO algoritmalarının 1 pu. değerine ve birbirlerine yakın değerler ürettiği, PSO algoritmasının ise gerilim kararlılığı konusunda diğer GKO ve HPSO algoritmalarına göre geri planda kaldığı ve gerilim sapması değerinin ise daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.16. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği

Çizelge 6.16'da PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı gerilim faz açısı tablosu verilmektedir. RGK'sız elde edilen faz açısı bilgileri incelendiğinde; HPSO'nun GKO ve PSO'ya göre daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir. PSO algoritmasının ise faz açısı bilgileri bakımından GKO'dan iyi olduğu görülmüştür.

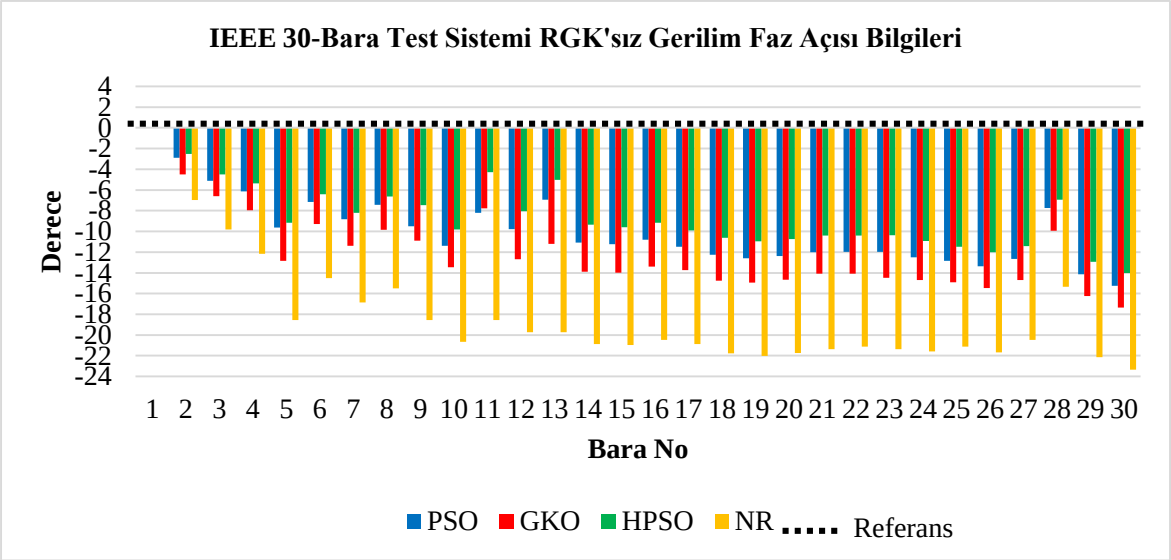
Çizelge 6.16. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim faz açısı bilgileri

Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
V_g1 (º)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
V_g2 (º)	-6,9685	-2,8815	-4,5037	-2,5275	-2,5586	-3,4000	-2,5210
V_y3 (º)	-9,8196	-5,1119	-6,5997	-4,4887	-4,7850	-5,8224	-4,7096
V_y4 (º)	-12,1617	-6,1217	-7,9429	-5,3607	-5,7199	-6,9908	-5,6309
V_g5 (º)	-18,5486	-9,6261	-12,8392	-9,1706	-9,4999	-10,7907	-9,1608
V_y6 (º)	-14,5099	-7,1598	-9,2887	-6,3994	-6,5692	-8,0698	-6,5200
V_y7 (º)	-16,8686	-8,8302	-11,3997	-8,2051	-8,4820	-9,8503	-8,2670
V_g8 (º)	-15,4904	-7,4448	-9,8547	-6,6390	-6,3997	-8,3013	-6,6292
V_y9 (º)	-18,5464	-9,4947	-10,8805	-7,4494	-7,7727	-9,8691	-7,7046
V_y10(º)	-20,6615	-11,3965	-13,4648	-9,8128	-10,2132	-12,5119	-10,1576
V_g11(º)	-18,5464	-8,2071	-7,7709	-4,2673	-4,5763	-6,7784	-4,4464
V_y12(º)	-19,7300	-9,7678	-12,6986	-8,0467	-8,6825	-11,9160	-8,5538

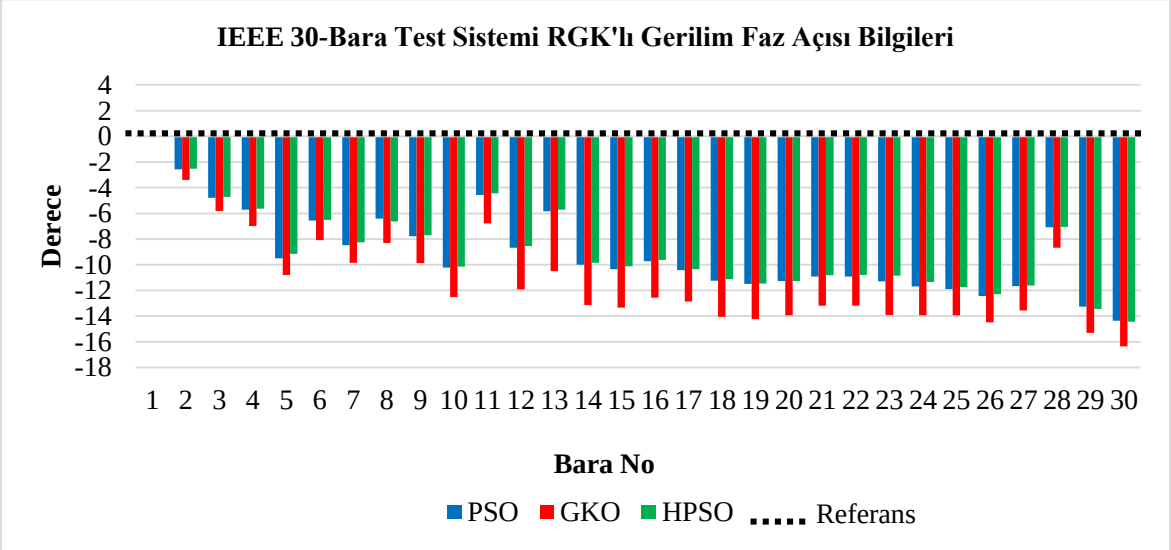
Çizelge 6.16. (devamı) IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim faz açısı bilgileri

$V_g13(^o)$	-19,7300	-6,9416	-11,1886	-5,0351	-5,8338	-10,4890	-5,7088
$V_y14(^o)$	-20,8870	-11,0718	-13,8794	-9,3406	-10,0125	-13,1313	-9,8510
$V_y15(^o)$	-20,9625	-11,2400	-13,9880	-9,5872	-10,3603	-13,3434	-10,1233
$V_y16(^o)$	-20,4754	-10,7858	-13,3936	-9,1590	-9,7339	-12,5788	-9,6359
$V_y17(^o)$	-20,8799	-11,4940	-13,7257	-9,8968	-10,4132	-12,8775	-10,3435
$V_y18(^o)$	-21,7831	-12,2515	-14,7499	-10,6039	-11,2400	-14,0658	-11,1265
$V_y19(^o)$	-22,0174	-12,5970	-14,9416	-10,9508	-11,5081	-14,2366	-11,4671
$V_y20(^o)$	-21,7542	-12,3748	-14,6497	-10,7444	-11,2609	-13,9387	-11,2618
$V_y21(^o)$	-21,3560	-12,0011	-14,0875	-10,4084	-10,9281	-13,1977	-10,8288
$V_y22(^o)$	-21,1102	-11,9743	-14,0762	-10,3909	-10,9169	-13,1885	-10,8036
$V_y23(^o)$	-21,3681	-11,9767	-14,4930	-10,3597	-11,2906	-13,9202	-10,8476
$V_y24(^o)$	-21,5910	-12,5052	-14,6972	-10,9283	-11,6990	-13,9275	-11,3489
$V_y25(^o)$	-21,1137	-12,8330	-14,9221	-11,4706	-11,8994	-13,9288	-11,7350
$V_y26(^o)$	-21,6869	-13,3741	-15,4692	-12,0034	-12,4417	-14,4803	-12,2828
$V_y27(^o)$	-20,4664	-12,6461	-14,6905	-11,4282	-11,6685	-13,5693	-11,6087
$V_y28(^o)$	-15,3585	-7,7458	-9,9222	-6,9414	-7,0867	-8,6698	-7,0536
$V_y29(^o)$	-22,1413	-14,1494	-16,2368	-12,9256	-13,2780	-15,3059	-13,4380
$V_y30(^o)$	-23,3567	-15,2351	-17,3549	-14,0070	-14,3715	-16,3624	-14,4361

Çizelge 6.16'da güç sistemine RGK eklendiğinde oluşan gerilim faz açısı bilgileri değerlendirildiğinde; HPSO'nun kısmen PSO'dan daha iyi değerler ürettiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.17'de IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açıları grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait açı bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; RGK devre dışı kaldığında HPSO algoritmasının 0^o açı değerine en yakın değerleri ürettiği, GKO ve PSO algoritmalarının ise gerilim açı değerlerinin negatif değerlerde ve HPSO'ya göre daha dezavantajlı olduğu görülmüştür. NR güç akışı analizi ile elde edilen gerilim faz açısı değerlerinin negatif yönde diğer algoritmalardan daha olumsuz değerlerde olduğu, bu durumun ise bara gerilim bilgilerine daha da olumsuz yansıyacağı değerlendirilmiştir.



Şekil 6.17. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açısı grafiği



Şekil 6.18. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açısı grafiği

Şekil 6.18'de IEEE 30-bara test sistemine RGK eklendiğinde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açıları grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait açı bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; HPSO algoritmasının 0^{o} açı değerine daha yakın değerler ürettiği, GKO algoritmasının ise gerilim açı değerlerinin daha dezavantajlı olduğu görülmüştür. PSO algoritmasından elde edilen değerlere bakıldığında GKO'dan daha iyi sonuçlar görülmektedir.

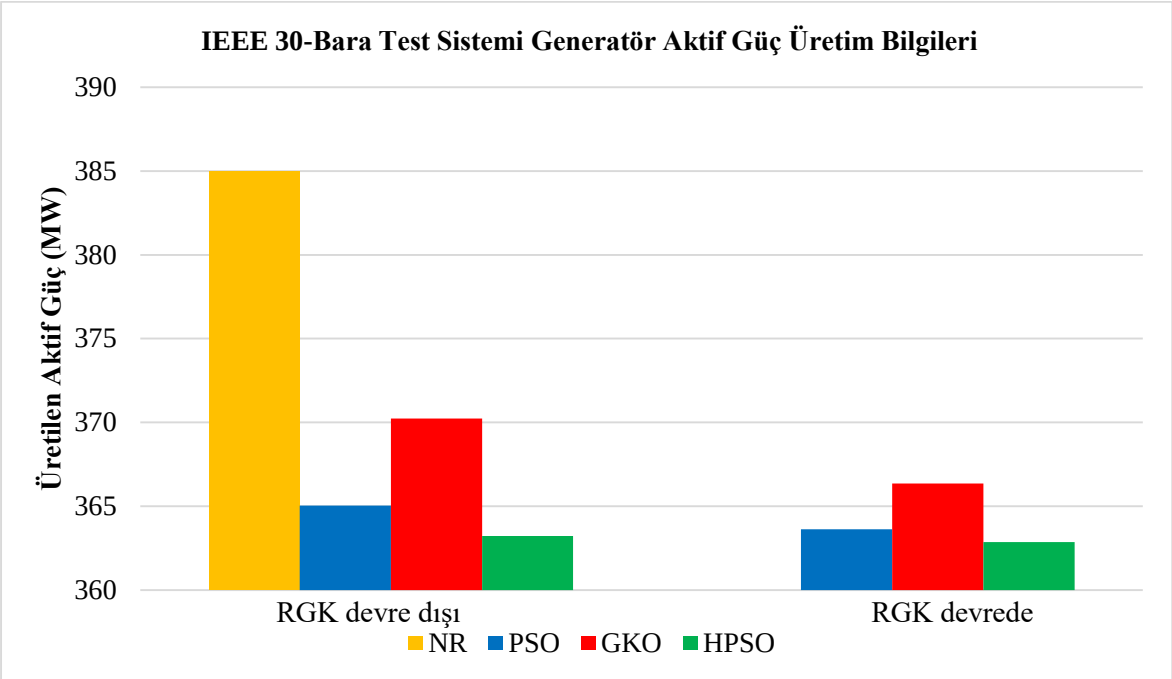
Çizelge 6.17'de RGK'sız ve RGK'lı olarak tanımlanan %25 fazla yüklü IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif ve reaktif güç üretimini gerçekleştirdikleri görülmektedir. Referans olarak NR güç akışı analizinin ürettiği aktif güç değeri 385,4840 MW ve reaktif güç ise 234,0020 MVAr olarak görülmektedir. RGK'sız ve RGK'lı en az aktif ve reaktif güç üretim gereksinimi duyulmasını sağlayan algoritmanın HPSO algoritması olduğu görülmektedir. %25 fazla yüklü olarak tanımlanan güç sisteminde HPSO'nun PSO ve GKO algoritmalarından daha üstün olduğu ve bu algoritma ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında daha az güç üretim gereksinimine ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.17. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif ve reaktif güç bilgileri

Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
P_g1(MW)	345,4840	150,5607	230,5783	128,7708	128,6626	185,4967	127,8547
P_g2(MW)	40,0000	31,4320	52,45191	80,0000	79,9676	66,1476	80,0000
P_g5(MW)	0,0000	49,7359	21,47122	50,0000	50,0000	40,9267	50,0000
P_g8(MW)	0,0000	58,2722	17,1586	34,4601	35,0000	26,8245	35,0000
P_g11(MW)	0,0000	21,0081	28,0041	30,0000	30,0000	27,3919	30,0000
P_g13(MW)	0,0000	54,0253	20,5745	40,0000	40,0000	19,5694	40,0000
P_T(MW)	385,4840	365,0342	370,2387	363,2309	363,6302	366,3569	362,8547
Q_g1(MVAr)	39,7850	0,1498	4,6806	44,1391	4,9454	26,1441	-9,4448
Q_g2(MVAr)	27,6740	31,4320	58,5765	13,3737	16,7577	7,2398	8,8573
Q_g5(MVAr)	48,6670	39,7359	29,6543	20,3061	37,5526	34,8891	38,3511
Q_g8(MVAr)	63,9970	58,2722	46,0025	28,7208	-14,8390	20,2507	29,1187
Q_g11(MVAr)	26,3380	-11,0081	9,3269	27,5930	44,5420	15,7753	16,5226
Q_g13(MVAr)	27,5410	54,02527	39,7857	28,4685	60,4143	45,3434	59,4035
Q_T (MVAr)	234,0020	172,6071	188,0264	162,6012	149,3751	149,6424	142,8084
Şönt Kompansatör					29,3909	26,9044	24,0217
(-): Sistemden çekilen güç, (+):Sisteme verilen güç							

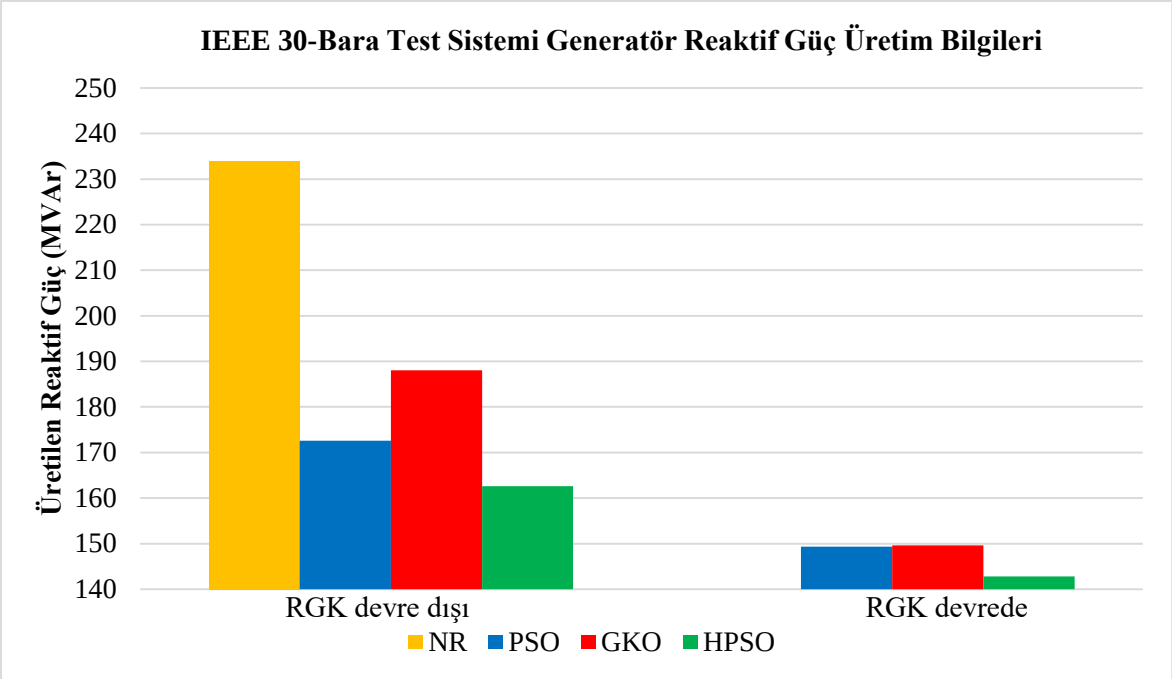
Şekil 6.19'da IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif güç üretimini gerçekleştirmesi sonrasında oluşan değerlere ait grafik verilmektedir. NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 385,4840 MW'lık aktif güç üretimi ile maksimum değer, minimum değer ise 363,2309 MW ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 366,3569 MW maksimum aktif güç üretim değeri GKO ile elde edilirken, minimum güç üretim değeri ise 362,8547 MW değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir.

Üretilen toplam aktif güç değerlerinin RGK devre dışı bırakıldığında daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmalarında üretilen aktif güçlerde düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

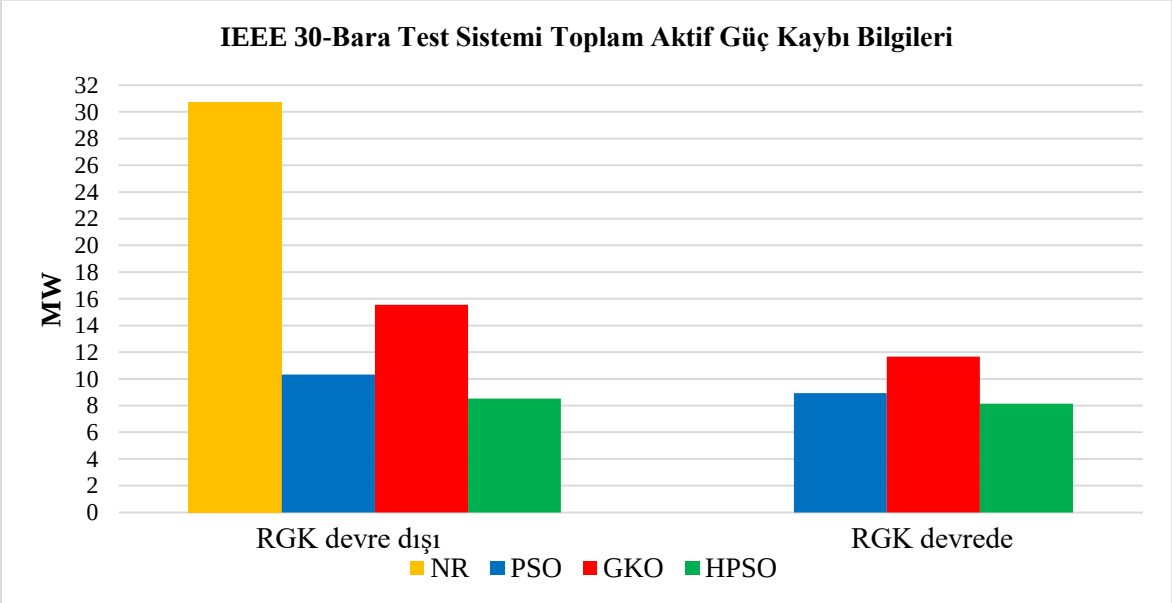


Şekil 6.19. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif güç değerleri grafiği

Şekil 6.20'de RGK devre dışı bırakılarak güç sisteminde üretilen toplam reaktif güç değerleri dikkate alındığında; NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 234,0020 MVAr'lık reaktif güç üretimi ile maksimum değer elde edilirken, minimum değer ise 162,6012 MVAr ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 149,6424 MVAr maksimum reaktif güç üretim değeri GKO ile elde edilirken, minimum reaktif güç üretim değeri ise 142,8084 MVAr değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. Üretilen toplam reaktif güç değerleri RGK devre dışı iken oldukça yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmalarında üretilen reaktif güçlerde önemli azalma olduğu gözlemlenmiştir.



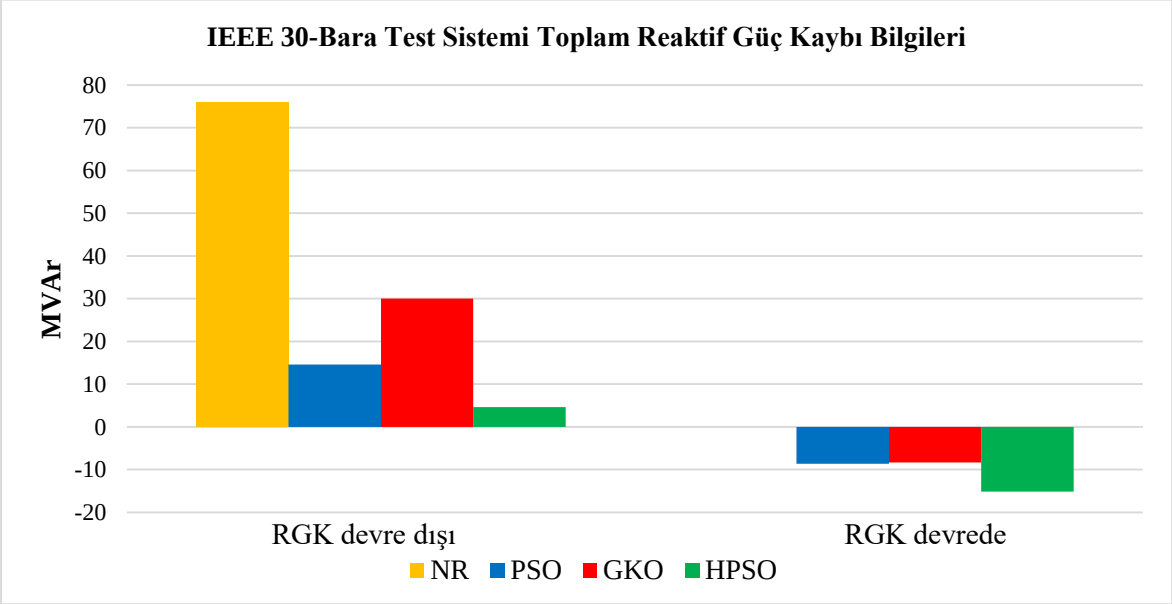
Şekil 6.20. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı üretilen reaktif güç değerleri grafiği



Şekil 6.21. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı toplam aktif güç kaybı değerleri grafiği

Şekil 6.21'de IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif güç üretimini gerçekleştirmesi sonrasında iletim hatları üzerinde oluşan aktif güç kaybı değerlerine ait grafik verilmektedir. NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 30,7840

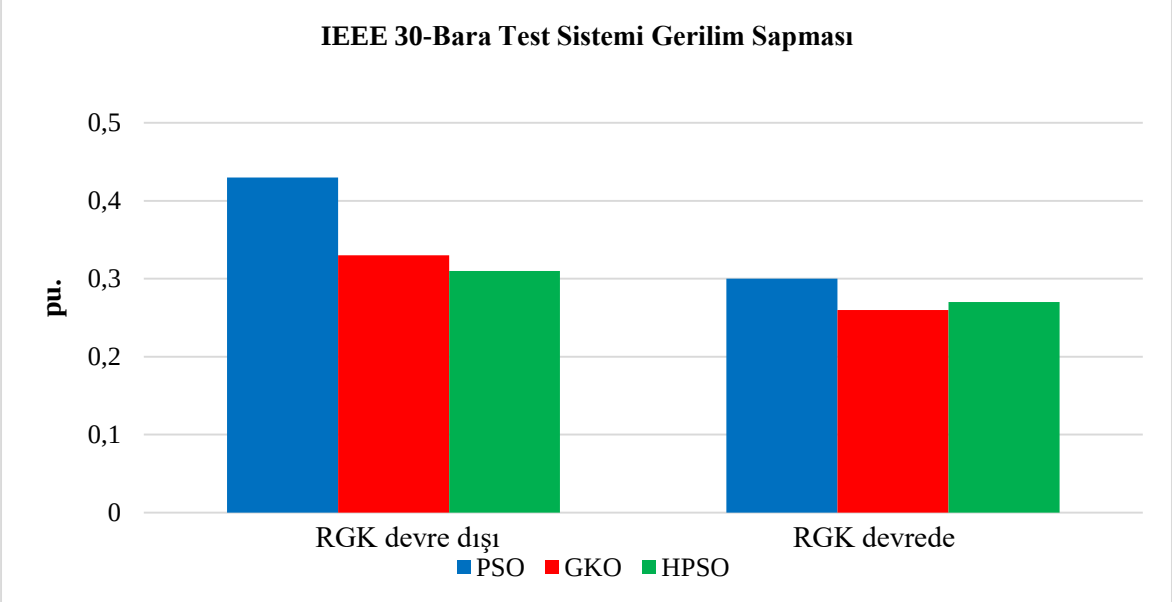
MW'lık aktif güç kaybı ile maksimum değer elde edilirken, minimum değer ise 8,5309 MW ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 11,6569 MW maksimum aktif güç kaybı değeri GKO algoritması ile elde edilirken, minimum güç üretim değeri ise 8,1548 MW değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. İletim hatlarında kaybolan toplam aktif güç değerlerinin RGK devre dışı iken daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının da katkısıyla kaybolan aktif güç değerlerinde önemli azalmalar olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.22. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı toplam reaktif güç kaybı değerleri grafiği

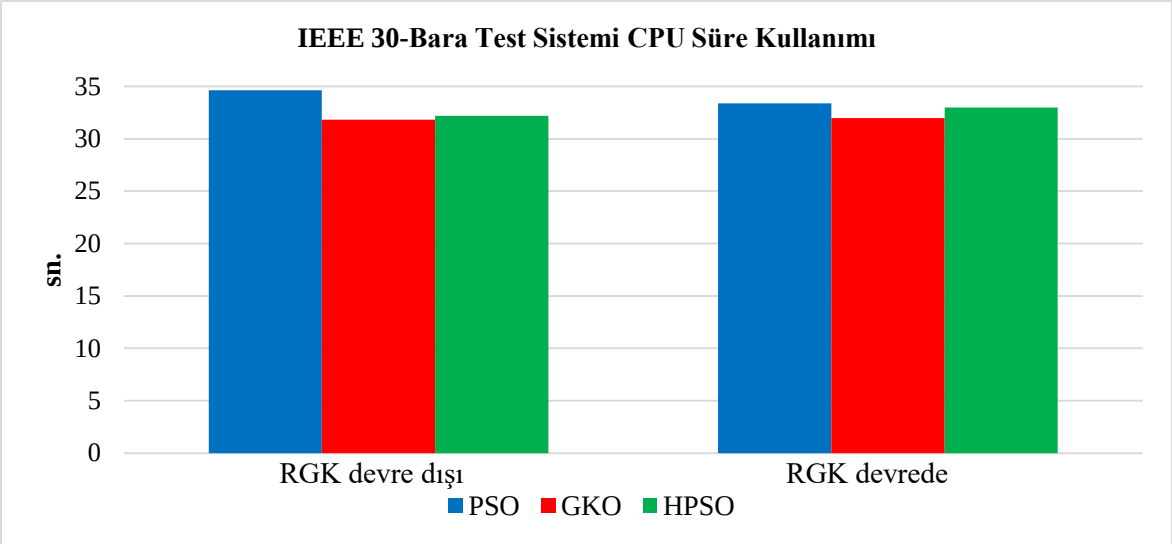
Şekil 6.22'de RGK devre dışı bırakılarak güç sistemi üzerinde kaybolan toplam reaktif güç değerleri dikkate alındığında; NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 76,0020 MVAr'lık reaktif güç kaybı ile maksimum değer elde edilirken, minimum değer ise 4,6012 MVAr ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; -8,3576 MVAr maksimum reaktif güç kayıp değeri GKO ile elde edilirken, minimum reaktif güç kaybı değeri ise -15,1916 MVAr değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. Üretilen toplam reaktif güç değerlerinin RGK devre dışı iken daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile yapılan güç akışı optimizasyonunda kayıp reaktif güçlerde de gözle görülür düşüşler olduğu belirlenmiştir.

Şekil 6.23'te RGK devre dışı bırakıldığında; PSO algoritmasıyla güç sisteminde oluşan bara gerilim sapması maksimum değeri 0,4316 pu. oluşurken, minimum değer ise 0,3157 pu. olarak HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; maksimum 0,3047 pu. gerilim sapması değeri PSO ile elde edilirken, minimum 0,2571 pu. gerilim sapması değeri ise GKO algoritması ile elde edilmiştir. RGK'nın gerilim kararlılığına olumlu etkisi bu grafikte daha iyi gözlemlenmiştir.

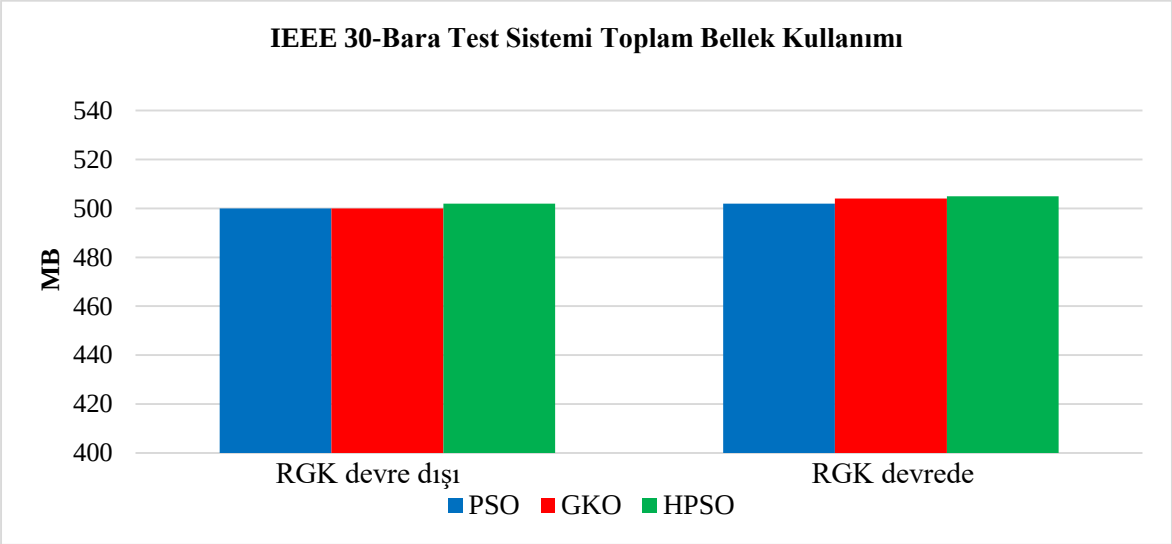


Şekil 6.23. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı gerilim sapması değerleri

Şekil 6.24'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında algoritmaların süre kullanımına ait RGK'lı ve RGK'sız oluşan değerler verilmektedir. PSO'nun RGK'sız 34,6153 sn. ve en uzun sürede optimizasyonu gerçekleştirdiği görülmüştür. HPSO 32,2026 sn. ve GKO ise 31,8104 sn. benzer sürelerde RGK'sız optimizasyonu gerçekleştirmiştir. RGK eklendiğinde GKO 31,9698 sn. ve HPSO 32,9809 sn. ve PSO'da optimizasyon süresi 33,3819 sn. olarak kısmen azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.24. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı CPU süre kullanımı değerleri



Şekil 6.25. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı bellek kullanımı değerleri

Şekil 6.25'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında algoritmaların toplam bellek kullanımına ait RGK'sız ve RGK'lı oluşan değerler verilmektedir. PSO ve GKO'nun RGK'sız 500 MB ve en az bellek kullanımını, HPSO algoritmasının ise 502 MB toplam bellek kullanımı ile en yüksek değeri kullandığı görülmüştür.

RGK devreye alındığında minimum 502 MB bellek kullanımı PSO'da, maksimum bellek kullanımı ise 505 MB değer ile HPSO algoritmasına ait olmuştur. PSO, GKO ve HPSO'da ise benzer şekilde RGK'nın devreye girmesi ile bellek kullanımı artışı olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.18'de IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının RGK olmadan ve dahil edilerek çalıştırılması ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarında; gerilim sapması, toplam aktif ve reaktif güç kaybı, amaç fonksiyonu, aktif güç kayıplarına ait standart sapma değerleri, algoritmaların hesaplama (CPU kullanım) süreleri, bellek kullanım değerlerine ait sayısal bilgiler verilmektedir. RGK devre dışı bırakıldığında güç sistemine ait minimum gerilim sapması değeri 0,31 pu. ile HPSO algoritması ile elde edilirken, maksimum değer ise 0,43 pu. ile PSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 0,26 pu. minimum gerilim sapması değeri ile GKO algoritmasının üstünlüğü görülmüştür. RGK devre dışı iken güç sistemine ait toplam aktif güç kaybı değeri NR güç akışı analizi yöntemi ile 30,78 MW olarak maksimum değeri alırken, 8,53 MW aktif güç kaybı değeri ile HPSO minimum değeri sunmuştur. RGK devreye dahil edildiğinde maksimum aktif güç kaybı değeri 11,66 MW ile GKO algoritmasında oluşurken, minimum değer ise 8,15 MW ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK harici reaktif güç kayıpları incelendiğinde; 76,00 MVAr maksimum değer NR ile elde edilirken, minimum değer 4,60 MVAr ile HPSO algoritmasından elde edilmiştir. RGK dahil edildiğinde maksimum -8,36 MVAr reaktif güç kaybı PSO ile minimum değer ise –15,19 MVAr olarak HPSO'dan elde edilmiştir.

Amaç fonksiyonu değerlerinde RGK harici 288,86 maksimum değer PSO ile elde edilirken, minimum değer 229,49 ile HPSO'dan elde edilmiştir. RGK dahil edildiğinde; maksimum 278,74 değeri ile GKO, minimum 212,14 değeri ile HPSO en iyi değeri sunmuştur. RGK yokken ve dahil edildiğinde; HPSO algoritması amaç fonksiyonu değerleri ile üstünlüğünü ve etkinliğini bu başlıkta da ortaya koymuştur. RGK harici PSO algoritmasının CPU kullanımı 34,62 sn. olarak maksimum sürede, GKO'nun CPU kullanımı ise 31,81 sn. ile minimum sürede sonuçlanmıştır. RGK dahil edildiğinde; 31,97 sn. süre ile GKO minimum, 33,38 sn. ile PSO maksimum süre kullanımını gerçekleştirmiştir. RGK devrede değilken 500 MB minimum bellek kullanım değerine sahip olan GKO ve PSO algoritması iken, maksimum bellek kullanımını 502 MB ile HPSO algoritması gerçekleştirmiştir. RGK devreye alındığında; 505 MB maksimum bellek kullanımını HPSO gerçekleştirirken, minimum bellek kullanım değerini 502 MB PSO gerçekleştirmiştir.

Sonuç olarak IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artışında RGK olmadan veya dahil edilmesi durumunda HPSO algoritması, süre ve bellek kullanımı haricinde diğer başlıklarda en iyi değerleri sunarak etkinliğini, güvenilirliğini ve sağlamlığını kanıtlamıştır.

Çizelge 6.18. IEEE 30-bara test sisteminde %25 yük artırımlı PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları

	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
Gerilim Sapması (pu.)	-	0,43	0,33	0,31	0,30	0,26	0,27
$P_{kayıp}$(MW)	30,78	10,33	15,54	8,53	8,93	11,66	8,15
$Q_{kayıp}$(MVAr)	76,00	14,61	30,03	4,60	-8,62	-8,36	-15,19
Amaç Fonksiyonu	-	288,86	368,09	229,49	235,25	278,74	212,14
Standart Sapma	-	1,90	1,37	1,62	1,40	1,55	0,45
CPU Süresi (sn.)	0,70	34,62	31,81	32,20	33,38	31,97	32,98
CPU Bellek (MB)	517	500	500	502	502	504	505

Algoritmaların IEEE 30-bara test sistemi üzerinde güç akışı optimizasyon çalışmaları süresince ortalama bellek kullanımlarına bakıldığında HPSO'nun PSO üzerinde geliştirilmesi nedeniyle süre ve bellek kullanımını artırdığı değerlendirilmiştir.

6.3.3. IEEE 30-Bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO VE HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları

IEEE 30-bara test sisteminde yük baralarındaki temel yükler %50 oranında artırıldığında oluşan 425,10 MW aktif güç ve 189,30 MVAr reaktif güç verileri güç sistemi üzerinde güncellenmiştir. Çizelge 6.19'da %50 artırımlı aktif ve reaktif yük bilgileri verilmektedir.

Güç sistemine ait diğer hat ve bara parametreleri tanımlanarak, Newton-Raphson güç akışı analizleri reaktif güç kompansatörsüz olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra PSO, GKO ve geliştirilen HPSO optimizasyon algoritmaları ile önce reaktif güç kompansatörü devre dışı bırakılarak ve sonrasında devreye alınarak baralarda oluşan gerilim değerleri belirlenmiştir. %50 fazla yük talebi dikkate alınarak gerçekleştirilen güç akışı analizlerinde; IEEE 30-bara test sistemi baralarında oluşan gerilim değerleri, gerilim faz açıları, baraların toplam gerilim sapması değerleri, güç üretim birimlerinde üretilen aktif, reaktif güç bilgileri, toplam güç kayıp değerleri, şönt kompansatör üniteleri değerleri, meta-sezgisel algoritmaların kullandığı CPU süre ve bellek bilgileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 6.19. IEEE 30-bara test sistemi baralardaki %50 artırımlı aktif ve reaktif yükler

Bara No	$P_{yük}$ (MW)	$Q_{yük}$ (MVAr)
2	32,55	19,05
3	3,60	1,80
4	11,40	2,40
5	141,30	28,50
7	34,20	16,35
8	45,00	45,00
10	8,70	3,00
12	16,80	11,25
14	9,30	2,40
15	12,30	3,75
16	5,25	2,70
17	13,50	8,70
18	4,80	1,35
19	14,25	5,10
20	3,30	1,05
21	26,25	16,80
23	4,80	2,40
24	13,05	10,05
26	5,25	3,45
29	3,60	1,35
30	15,90	2,85
Toplam	425,10	189,30

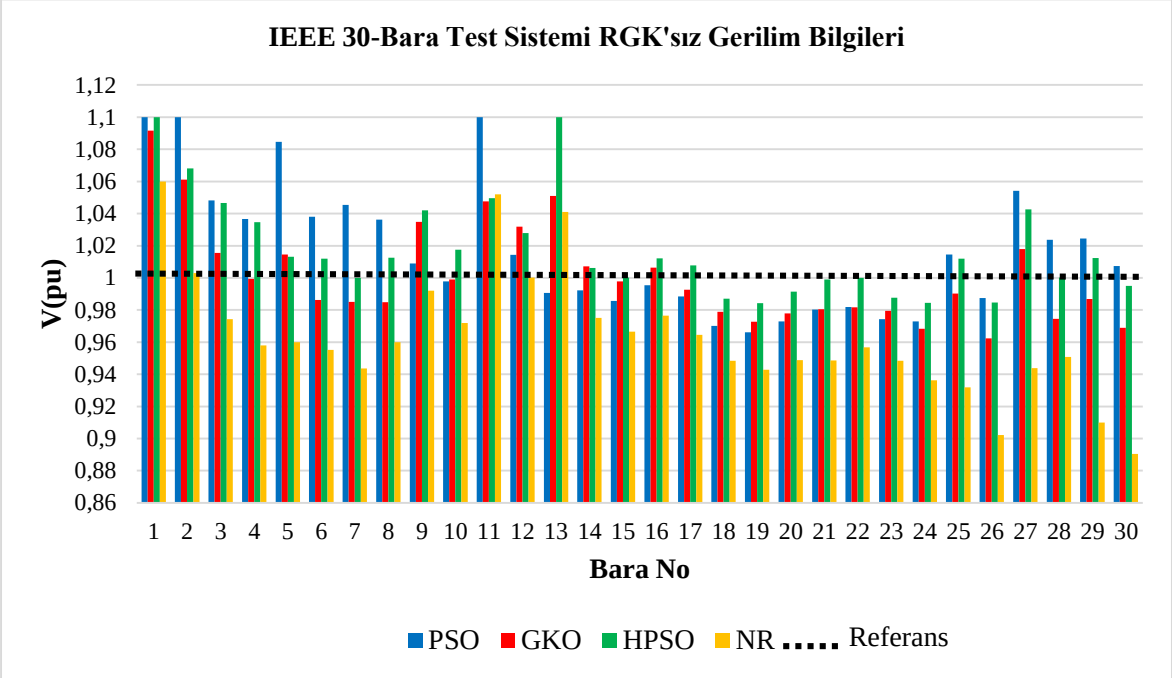
Güç sistemi baralarından 10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24 ve 29 nolu baralara paralel bağlı 0 ila 10 MVAr arasında değer alabilen toplam 9 adet şönt kompansatör üniteleri hazır bekletilmiştir. Önce RGK'sız güç akışı ve optimizasyon uygulamaları daha sonra RGK'lı optimizasyon uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen NR güç akışı analizi sonuçları baz alınarak reaktif güç kompansatörü devre dışı bırakılmış ve PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen güç kayıpları ve gerilim kararlılığı analizleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çizelge 6.20'de NR güç akışı ve PSO, GKO, HPSO güç akışı optimizasyon algoritmaları ile RGK'sız elde edilen bara gerilim değerlerinin RGK'lı değerlere göre 1 pu. değerlerden daha da uzaklaştığı görülmektedir.

Çizelge 6.20. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %50 yük artırımlı RGK'sız gerilim bilgileri

Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
V_g1 (pu.)	1,0600	1,1000	1,0916	1,1000	1,0478	1,0978	1,1000
V_g2 (pu.)	1,0030	1,1000	1,0612	1,0682	1,0211	1,0694	1,0639
V_y3 (pu.)	0,9743	1,0481	1,0156	1,0465	1,0054	1,0410	1,0310
V_y4 (pu.)	0,9579	1,0367	0,9993	1,0346	0,9961	1,0284	1,0159
V_g5 (pu.)	0,9600	1,0847	1,0145	1,0132	0,9500	1,0048	1,0099
V_y6 (pu.)	0,9551	1,0380	0,9862	1,0119	0,9724	1,0046	1,0142
V_y7 (pu.)	0,9437	1,0453	0,9851	1,0000	0,9500	0,9922	1,0000
V_g8 (pu.)	0,9600	1,0363	0,9849	1,0126	0,9500	0,9939	1,0069
V_y9 (pu.)	0,9921	1,0090	1,0348	1,0420	0,9866	1,0265	1,0271
V_y10(pu.)	0,9719	0,9977	0,9990	1,0176	0,9929	1,0082	1,0059
V_g11(pu.)	1,0520	1,1000	1,0476	1,0495	1,0819	1,0284	1,1000
V_y12(pu.)	1,0002	1,0143	1,0318	1,0279	1,0251	1,0175	1,0321
V_g13(pu.)	1,0410	0,9907	1,0509	1,1000	1,1000	1,0720	1,0097
V_y14(pu.)	0,9751	0,9922	1,0072	1,0061	1,0095	1,0009	1,0140
V_y15(pu.)	0,9666	0,9856	0,9978	1,0001	1,0083	0,9996	1,0104
V_y16(pu.)	0,9765	0,9955	1,0063	1,0121	1,0000	1,0040	1,0099
V_y17(pu.)	0,9646	0,9885	0,9927	1,0077	0,9866	1,0018	0,9995
V_y18(pu.)	0,9484	0,9702	0,9788	0,9870	0,9911	0,9859	0,9970
V_y19(pu.)	0,9428	0,9662	0,9726	0,9843	0,9858	0,9828	0,9941
V_y20(pu.)	0,9488	0,9728	0,9779	0,9914	0,9915	0,9897	1,0009
V_y21(pu.)	0,9485	0,9803	0,9805	0,9990	0,9822	0,9925	0,9942
V_y22(pu.)	0,9568	0,9818	0,9817	1,0000	0,9835	0,9939	0,9959
V_y23(pu.)	0,9483	0,9743	0,9794	0,9877	1,0022	0,9985	1,0092
V_y24(pu.)	0,9362	0,9728	0,9683	0,9844	0,9801	0,9852	0,9947
V_y25(pu.)	0,9319	1,0146	0,9903	1,0119	1,0070	1,0055	1,0029
V_y26(pu.)	0,9022	0,9874	0,9624	0,9847	0,9796	0,9781	0,9754
V_y27(pu.)	0,9438	1,0542	1,0179	1,0426	1,0372	1,0317	1,0216
V_y28(pu.)	0,9508	1,0237	0,9744	1,0001	0,9599	0,9956	1,0052
V_y29(pu.)	0,9099	1,0244	0,9868	1,0124	1,0359	1,0264	1,0000
V_y30(pu.)	0,8904	1,0073	0,9690	0,9951	1,0064	0,9984	0,9784

Şekil 6.26'da IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait gerilim bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; HPSO algoritmasının 1 pu. değerine daha yakın değerler ürettiği, GKO algoritmasının HPSO'ya yakın değerler ürettiği, PSO algoritmasının ise gerilim kararlılığı konusunda daha geri planda kaldığı görülmüştür. PSO'nun ürettiği gerilim bilgileri bu senaryoda değerlendirildiğinde; GKO ve

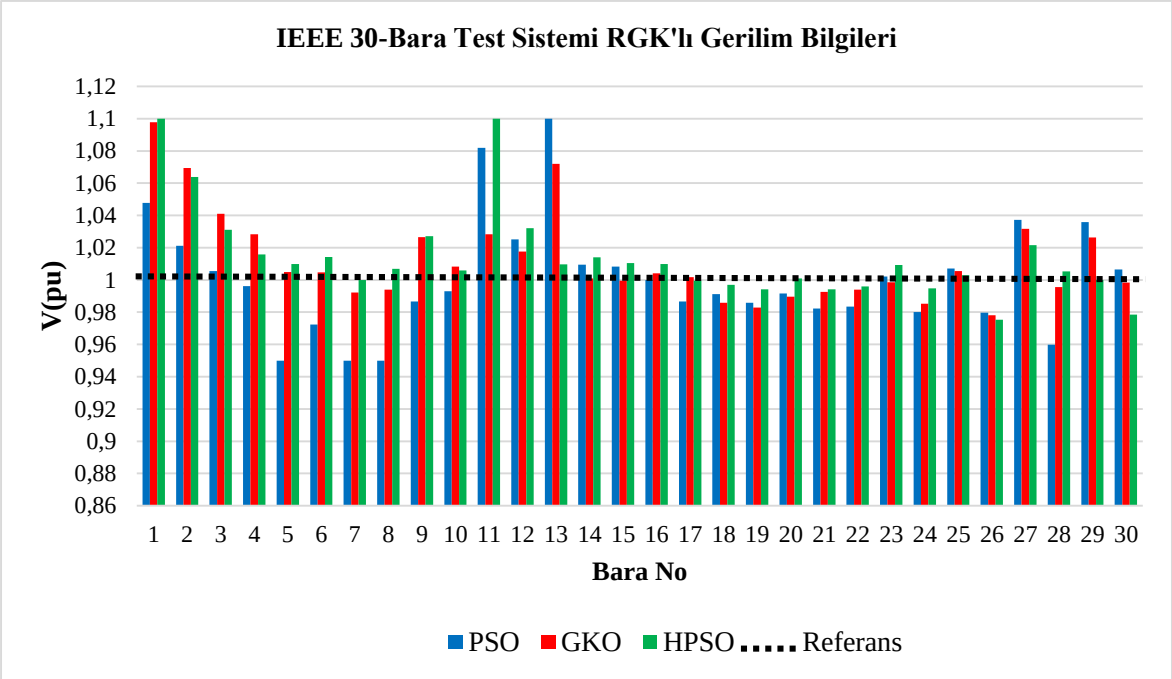
HPSO algoritmalarına göre gerilim sapması yüksek değerlerdedir. NR güç akışında ise gerilim değerlerinin diğer algoritmalara göre en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.26. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği

Çizelge 6.20'de güç sistemine RGK eklenerek PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen bara gerilim bilgileri değerlendirildiğinde RGK'nın devreye alınması ile gerilimlerin 1 pu.'ya daha yakın değerlere ulaştığı ve gerilim sapmalarının azaldığı görülmektedir.

Şekil 6.27'de %50 fazla yüklü IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile güç sistemine RGK eklendiğinde gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait gerilim bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; GKO ve HPSO algoritmalarının 1 pu. değerine ve birbirlerine yakın değerler ürettiği görülmektedir. PSO algoritması ise gerilim kararlılığı konusunda GKO ve HPSO algoritmalarına göre daha geride kalarak oluşan gerilim sapması daha yüksek değerlerdedir.



Şekil 6.27. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği

Çizelge 6.21'de PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı gerilim faz açısı tablosu verilmektedir. RGK'sız elde edilen faz açısı bilgileri incelendiğinde HPSO'nun PSO ve GKO'ya göre daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir. PSO algoritmasının ise faz açısı bilgileri bakımından GKO'dan iyi olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.21. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %50 yük artırımlı ve RGK'sız gerilim faz açısı bilgileri

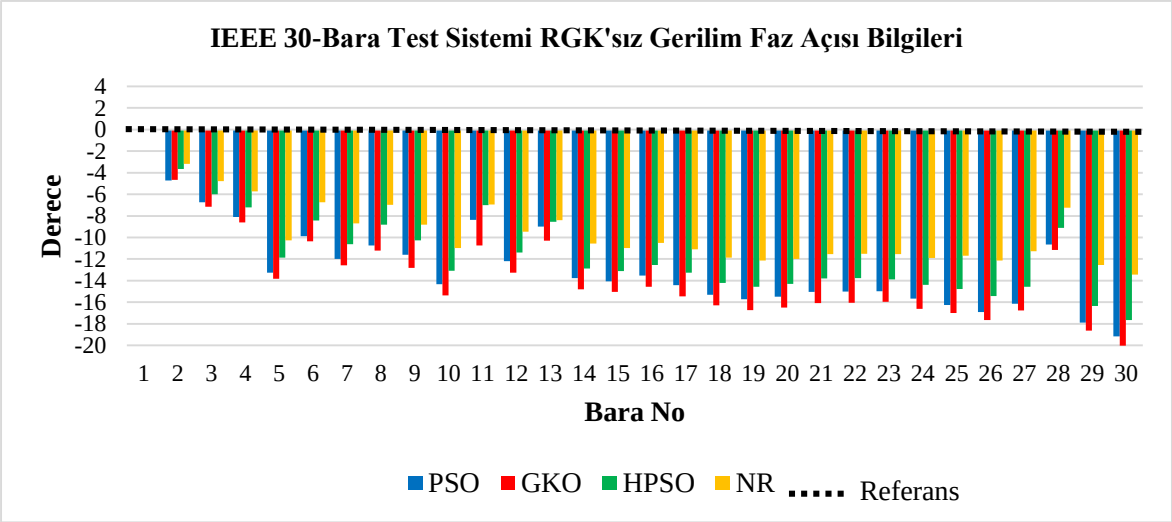
Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
V_g1 (º)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
V_g2 (º)	-3,1871	-4,7073	-4,6591	-3,6464	-4,1323	-3,9722	-3,5951
V_y3 (º)	-4,7675	-6,7454	-7,1443	-6,0030	-6,8651	-6,4271	-5,8638
V_y4 (º)	-5,7150	-8,1145	-8,6152	-7,2067	-8,2513	-7,7267	-7,0397
V_g5 (º)	-10,2821	-13,2696	-13,8344	-11,8696	-12,9969	-12,2990	-11,8601
V_y6 (º)	-6,7454	-9,8825	-10,3643	-8,4285	-9,5515	-8,9810	-8,4988
V_y7 (º)	-8,6903	-11,9900	-12,5950	-10,6250	-11,8328	-11,1393	-10,6629
V_g8 (º)	-6,9831	-10,7321	-11,2062	-8,8033	-9,5707	-9,1736	-8,7341

Çizelge 6.21. (devamı) IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %50 yük artırımlı ve RGK'sız gerilim faz açısı bilgileri

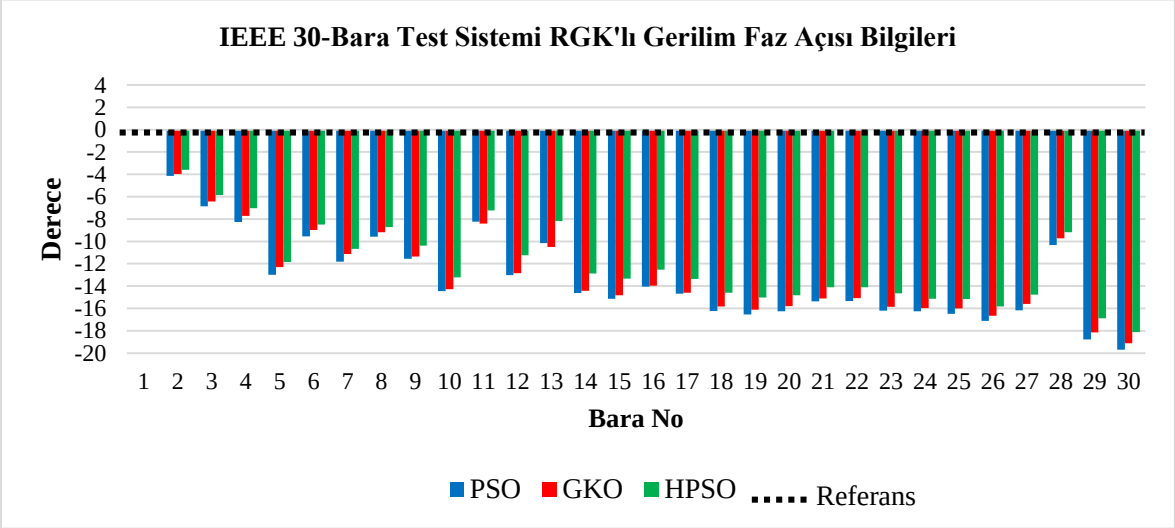
V_y9 (º)	-8,8090	-11,5912	-12,8110	-10,2614	-11,5747	-11,3649	-10,3948
V_y10(º)	-10,9937	-14,3251	-15,3718	-13,0791	-14,4583	-14,2960	-13,2214
V_g11(º)	-6,9457	-8,3682	-10,7471	-6,9904	-8,2232	-8,3989	-7,2288
V_y12(º)	-9,4534	-12,1844	-13,2535	-11,3913	-13,0152	-12,8634	-11,2577
V_g13(º)	-8,3988	-8,9898	-10,2932	-8,5524	-10,1685	-10,5010	-8,1861
V_y14(º)	-10,5548	-13,7601	-14,8046	-12,8695	-14,6403	-14,4191	-12,8770
V_y15(º)	-10,9937	-14,0559	-15,0547	-13,1037	-15,1554	-14,8287	-13,3444
V_y16(º)	-10,4908	-13,5353	-14,5668	-12,5454	-14,0561	-13,9653	-12,5231
V_y17(º)	-11,0889	-14,4324	-15,4658	-13,2523	-14,6785	-14,6056	-13,3633
V_y18(º)	-11,8560	-15,3096	-16,3045	-14,2161	-16,2231	-15,8335	-14,5953
V_y19(º)	-12,1454	-15,7407	-16,7421	-14,5708	-16,5565	-16,1233	-15,0399
V_y20(º)	-11,9865	-15,4799	-16,4909	-14,2877	-16,2633	-15,8045	-14,8130
V_y21(º)	-11,5362	-15,0524	-16,0841	-13,7886	-15,3848	-15,1022	-14,1113
V_y22(º)	-11,5148	-15,0270	-16,0539	-13,7667	-15,3569	-15,0903	-14,1016
V_y23(º)	-11,5536	-14,9953	-15,9566	-13,8926	-16,1907	-15,8604	-14,6635
V_y24(º)	-11,8894	-15,6768	-16,6113	-14,3889	-16,2721	-15,9731	-15,1545
V_y25(º)	-11,6941	-16,2616	-16,9893	-14,7731	-16,4809	-16,0117	-15,1789
V_y26(º)	-12,1295	-16,9041	-17,6648	-15,4192	-17,1336	-16,6663	-15,8370
V_y27(º)	-11,2913	-16,1531	-16,7694	-14,5673	-16,1692	-15,6058	-14,7755
V_y28(º)	-7,2477	-10,6390	-11,1724	-9,1058	-10,3177	-9,7304	-9,1829
V_y29(º)	-12,5450	-17,9002	-18,6478	-16,3549	-18,7902	-18,1465	-16,9044
V_y30(º)	-13,4455	-19,1760	-20,0245	-17,6619	-19,7069	-19,1271	-18,1363

Çizelge 6.21'de güç sistemine RGK eklendiğinde elde edilen gerilim faz açısı bilgileri karşılaştırıldığında; HPSO'nun gerilim faz açısı başlığında en iyi değerleri üretmeye devam ettiği gözlemlenmiştir.

Şekil 6.28'de IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açıları grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait açı bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; HPSO algoritmasının 0^o açı değerine en yakın değerleri ürettiği, GKO ve PSO algoritmasının ürettiği gerilim açı değerlerinin negatif değerlerde daha dezavantajlı olduğu görülmüştür. NR güç akışı analizi ile elde edilen gerilim faz açısı değerlerinin negatif yönde diğer algoritmalardan daha olumlu değerlerde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.28. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait bara gerilimleri faz açısı grafiği



Şekil 6.29. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait bara gerilimlerine faz açısı grafiği

Şekil 6.29'da IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK eklendiğinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açıları grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait açı bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; HPSO algoritmasının 0^o açı değerine daha yakın değerler ürettiği, GKO algoritmasının ise gerilim açı değerlerinin PSO'dan daha iyi olduğu görülmüştür. PSO algoritmasından elde edilen gerilim faz açısı değerlerine bakıldığında; diğer algoritmalara göre daha dezavantajlı değerlerde olduğu görülmektedir.

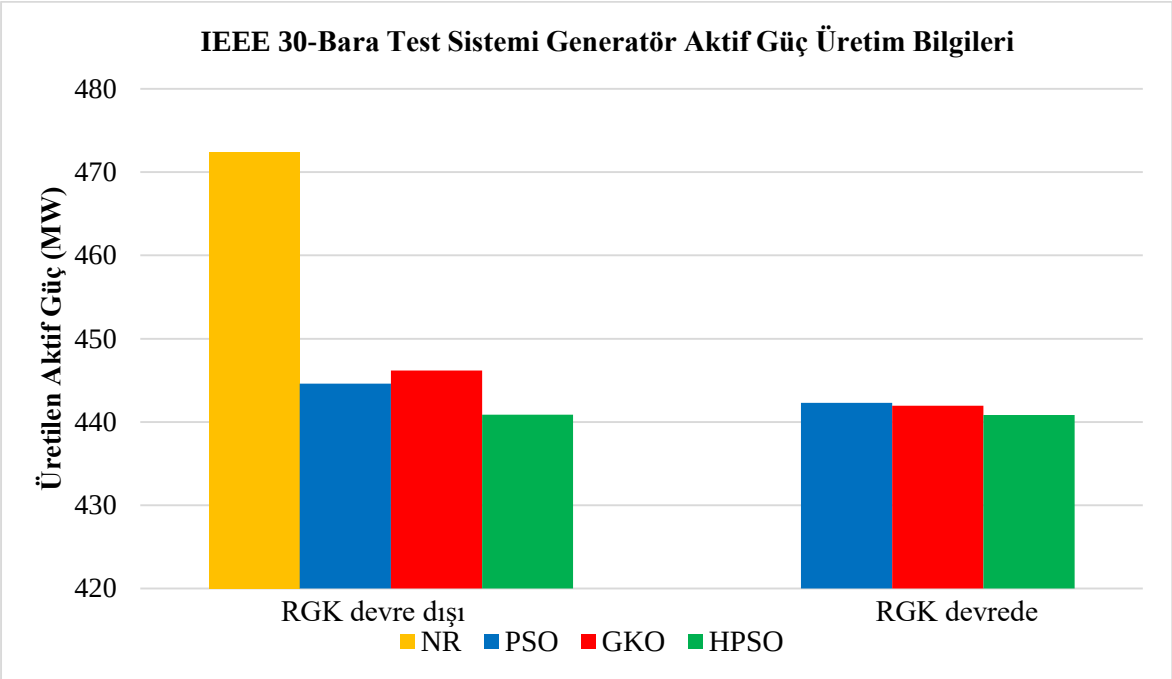
Çizelge 6.22'de RGK'sız ve RGK'lı olarak tanımlanan %50 fazla yüklü IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif ve reaktif güç üretimini gerçekleştirdikleri görülmektedir. Referans olarak NR algoritmasının ürettiği aktif güç değeri 472,4340 MW ve reaktif güç ise 305,0480 MVAr olarak görülmektedir. RGK'sız ve RGK'lı en az aktif ve reaktif güç üretim gereksinimi duyulmasını sağlayan algoritmanın HPSO algoritması olduğu görülmektedir. HPSO algoritmasının %50 fazla yüklü olarak tanımlanan güç sistemi optimizasyonunda; PSO ve GKO algoritmalarından daha üstün olduğu görülmüştür. HPSO algoritması ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmasında sistemin daha az güç üretim gereksinimine ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.22. IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen %50 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif ve reaktif güç bilgileri

Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
P_g1(MW)	432,4340	234,6046	248,1819	205,9105	207,2957	218,8495	205,9839
P_g2(MW)	40,0000	80,0000	76,8319	80,0000	80,0000	80,0000	80,0000
P_g5(MW)	0,0000	50,0000	48,3358	49,9816	50,0000	49,7455	49,9578
P_g8(MW)	0,0000	10,0000	14,0660	35,0000	35,0000	35,0000	35,0000
P_g11(MW)	0,0000	30,0000	18,7704	29,9982	30,0000	26,2620	30,0000
P_g13(MW)	0,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	32,1144	39,8866
P_T(MW)	472,4340	444,6046	446,1860	440,8903	442,2957	441,9713	440,8283
Q_g1(MVAr)	54,7390	-34,8470	32,6167	32,0269	13,4274	24,6286	48,9759
Q_g2(MVAr)	45,6610	106,9707	73,7997	40,3514	49,6301	62,8533	36,6274
Q_g5(MVAr)	72,4240	83,0126	57,5465	38,2379	21,5263	33,0986	36,0143
Q_g8(MVAr)	71,5990	54,9435	53,6066	53,2747	-9,8983	18,8301	28,4923
Q_g11(MVAr)	30,2860	48,9828	6,7716	4,6158	50,4736	1,5931	39,3739
Q_g13(MVAr)	30,3380	-15,5877	15,3954	57,6658	59,8590	42,3994	-15,0913
Q_T (MVAr)	305,0480	243,4848	239,7365	226,1725	185,0179	183,4030	174,3924
Şönt Kompansatör					60,0000	43,1540	51,1679
(-): Sistemden çekilen güç, (+):Sisteme verilen güç							

Şekil 6.30'da IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif güç üretimini gerçekleştirmesi sonrasında oluşan değerlere ait grafik verilmektedir. NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 472,4340 MW'lık aktif güç üretimi ile maksimum değer, minimum değer ise 440,8903 MW ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 442,2957 MW maksimum aktif güç üretim değeri PSO ile elde edilirken, minimum güç üretim değeri ise 440,8283 MW değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir.

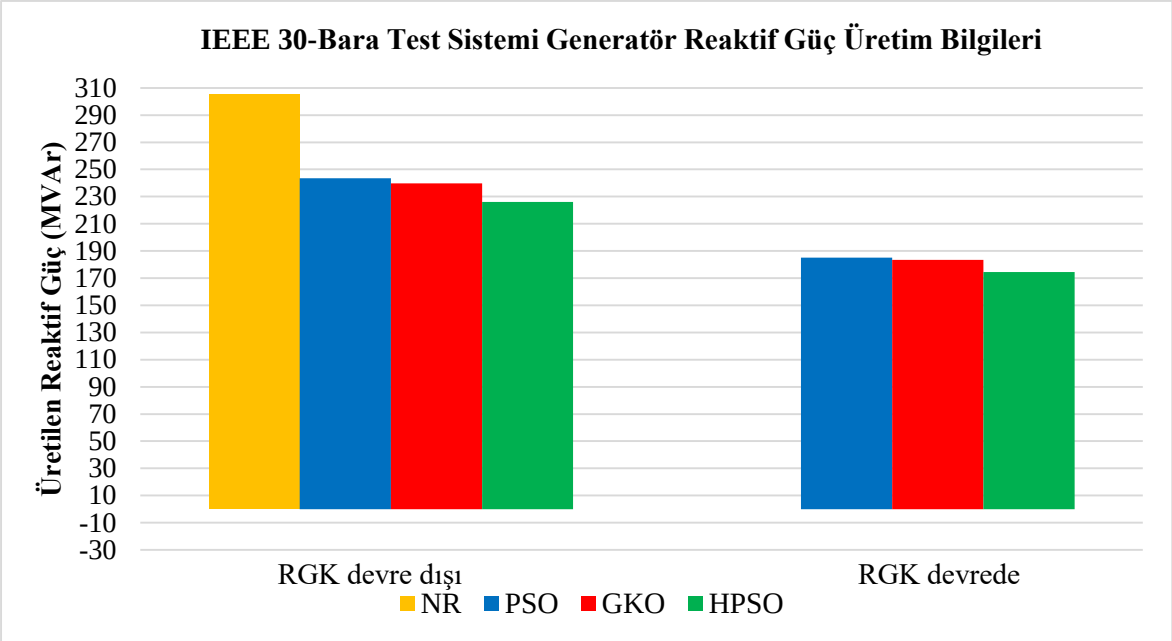
RGK devre dışı bırakıldığında üretilen toplam aktif güç değerlerinin daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO ve GKO ve HPSO algoritmalarında üretilen aktif güçlerde düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.



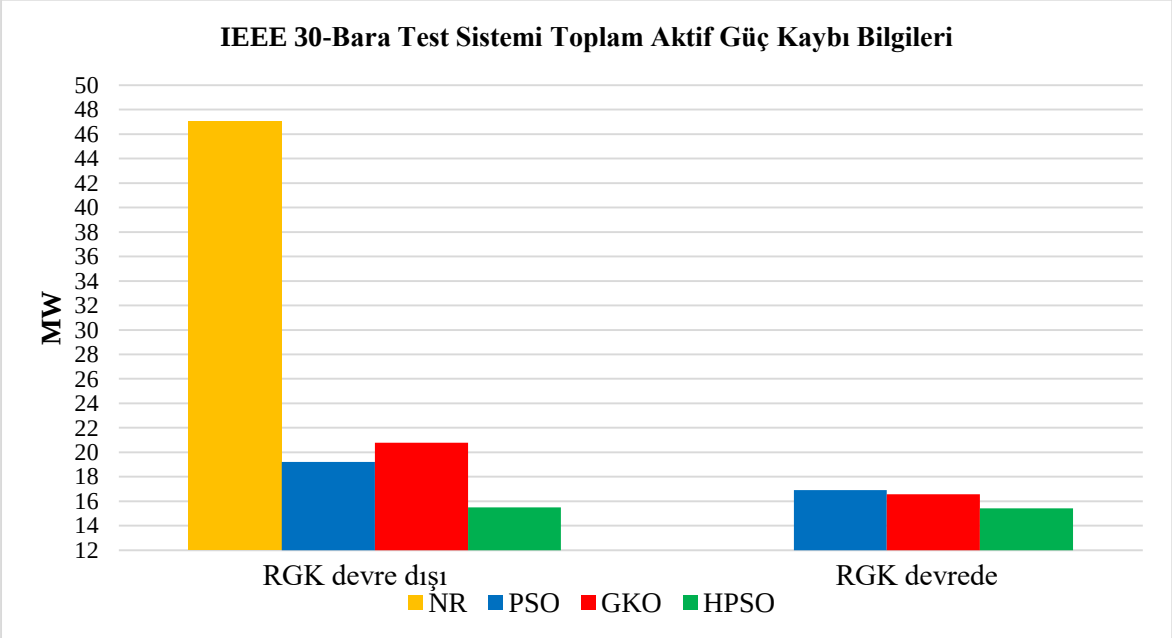
Şekil 6.30. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif güç değerleri grafiği

Şekil 6.31'de RGK devre dışı bırakılarak güç sisteminde üretilen toplam reaktif güç değerleri dikkate alındığında; NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 305,0480 MVAr'lık reaktif güç üretimi ile maksimum değer, minimum değer ise 226,1725 MVAr ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 185,0179 MVAr maksimum reaktif güç üretim değeri PSO ile elde edilirken, minimum reaktif güç üretim değeri ise 174,3924 MVAr değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. Üretilen toplam reaktif güç değerleri RGK devre dışı iken oldukça yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmalarında üretilen reaktif güçlerde anlamlı düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.32'de IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif güç üretimini gerçekleştirmesi sonrasında iletim hatları üzerinde oluşan aktif güç kaybı değerlerine ait grafik verilmektedir.

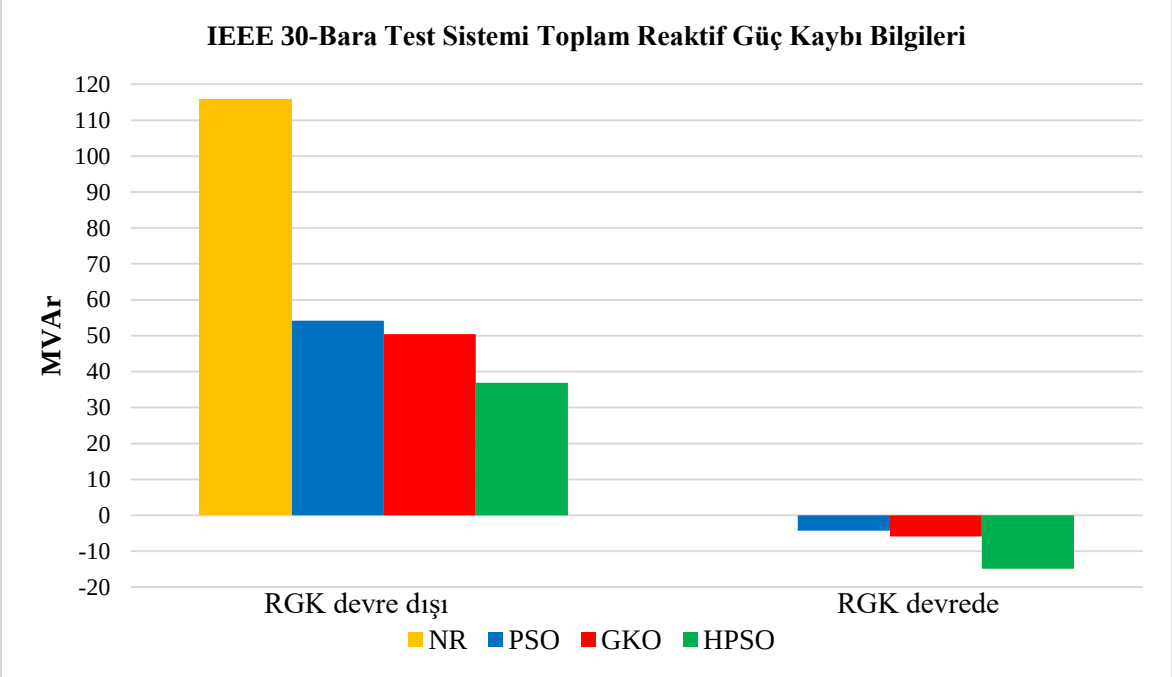


Şekil 6.31. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı üretilen reaktif güç değerleri grafiği



Şekil 6.32. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı toplam aktif güç kaybı değerleri

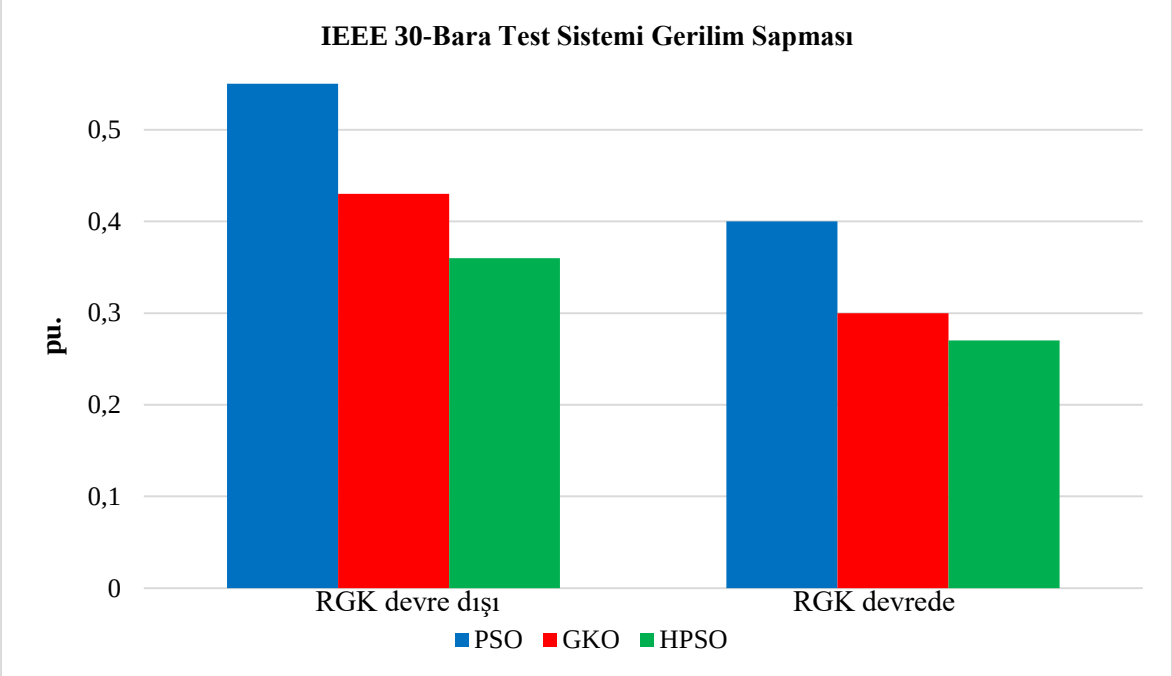
Şekil 6.32'de NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 47,0340 MW'lık aktif güç kaybı ile maksimum değer, minimum değer ise 15,4903 MW ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 16,8957 MW maksimum aktif güç kaybı değeri PSO algoritması ile elde edilirken, minimum güç kaybı ise 15,4283 MW değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. İletim hatlarında kaybolan toplam aktif güç değerlerinin RGK devre dışı iken daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının da katkısıyla bu değerlerde düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.33. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artışı durumunda NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız ve RGK'lı toplam reaktif güç kaybı değerleri

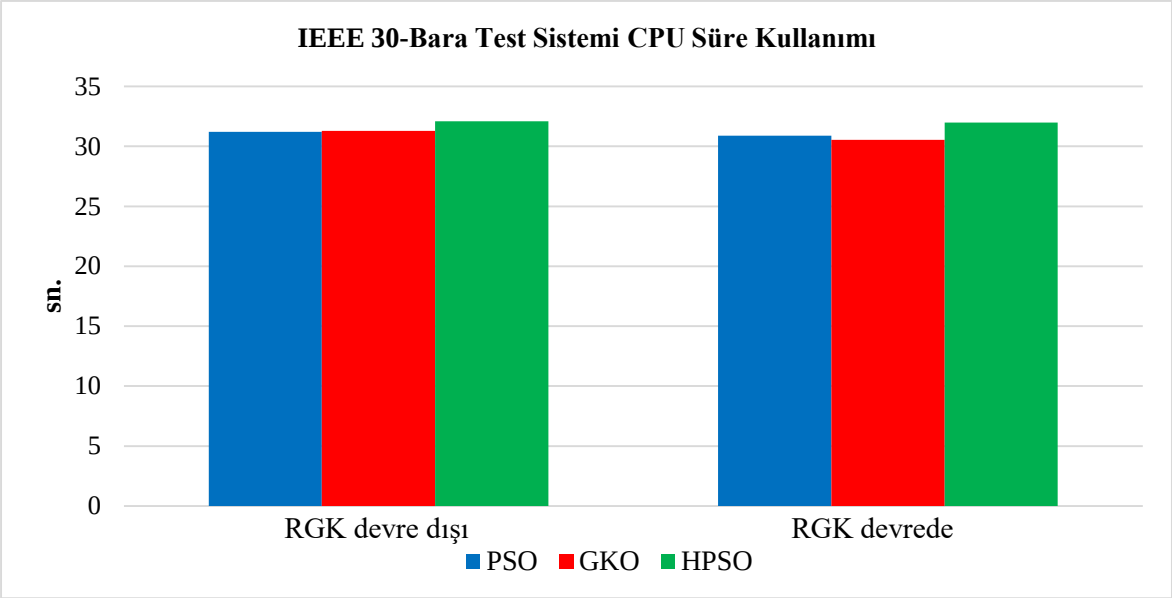
Şekil 6.33'te RGK devre dışı bırakılarak güç sistemi üzerinde kaybolan toplam reaktif güç değerleri dikkate alındığında; NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 115,7480 MVAr'lık reaktif güç kaybı ile maksimum değer, minimum değer ise 36,8725 MVAr ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; -4,2821 MVAr maksimum reaktif güç kayıp değeri PSO ile elde edilirken, minimum reaktif güç kaybı ise -14,9076 MVAr değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. Üretilen toplam reaktif güç değerlerinin RGK devre dışı iken daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmaları optimizasyonunda kayıp reaktif güçlerde de azalmalar olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.34'te RGK devre dışı bırakıldığında; PSO algoritmasıyla güç sisteminde oluşan bara gerilim sapması maksimum değer 0,5504 pu. oluşurken, minimum değer ise 0,3600 pu. olarak HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; maksimum 0,3985 pu. gerilim sapması değeri PSO ile elde edilirken, minimum 0,2713 pu. gerilim sapması değeri ise HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK'nın gerilim kararlılığına olumlu etkisi bu grafikte bir kez daha gözlemlenmiştir.

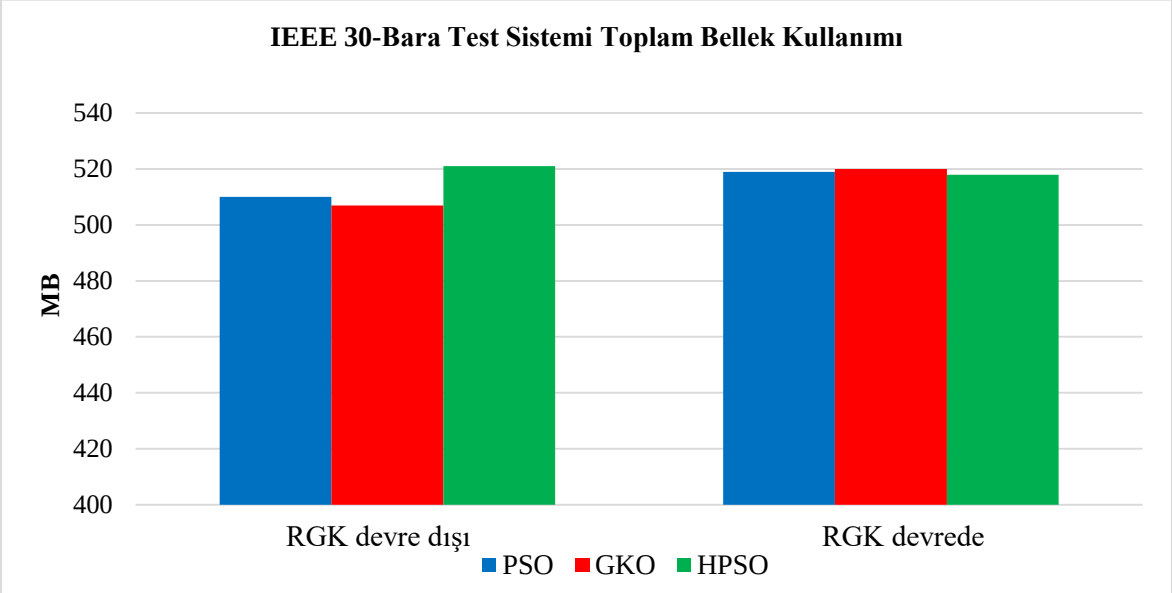


Şekil 6.34. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı gerilim sapması değerleri

Şekil 6.35'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında algoritmaların CPU süre kullanımına ait RGK'lı ve RGK'sız oluşan değerler verilmektedir. PSO'nun RGK'sız 31,2141 sn. değerle en kısa sürede optimizasyonu gerçekleştirdiği görülmüştür. GKO 31,2979 sn. ve HPSO ise 32,0979 sn. benzer sürelerde RGK'sız optimizasyonu tamamlamıştır. RGK eklendiğinde; GKO 30,5525 sn., HPSO 31,9940 sn. ve PSO 30,8881 sn. değerlerde CPU kullanım sürelerinin kısmen azaldığı görülmüştür.



Şekil 6.35. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı CPU süre kullanım değerleri



Şekil 6.36. IEEE 30-bara test sisteminde %50 yük artırımlı RGK'lı ve RGK'sız bellek kullanımı değerleri

Şekil 6.36'da IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında algoritmaların toplam bellek kullanımına ait RGK'sız ve RGK'lı oluşan değerler verilmektedir. GKO'nun RGK'sız 507 MB ile minimum bellek değeri kullandığı görülmüştür. HPSO algoritmasının ise 521 MB toplam bellek kullanımı ile maksimum bellek değeri kullandığı görülmüştür.

RGK eklendiğinde GKO'nun bellek kullanımını 520 MB değerine artırdığı görülmektedir. RGK'nın devreye girmesi ile PSO'da 519 MB değerine çıkan bir artış, HPSO'da ise 518 MB bellek kullanımı değerine düşüş olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.23'te %50 fazla yüklü IEEE 30-bara test sisteminde, NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının RGK olmadan ve dahil edilerek çalıştırılması ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarında; gerilim sapması, toplam aktif ve reaktif güç kaybı, amaç fonksiyonu, aktif güç kayıplarına ait standart sapma değerleri, algoritmaların hesaplama (CPU kullanım) süreleri, bellek kullanım değerlerine ait sayısal bilgiler verilmektedir. RGK devre dışı bırakıldığında güç sistemine ait gerilim sapması değeri minimum 0,36 pu. ile GKO algoritması ile elde edilirken, maksimum değer ise 0,55 pu. ile PSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 0,27 pu. gerilim sapması değeri ile HPSO algoritmasının üstünlüğünü görülmüştür.

RGK devre dışı iken güç sistemine ait toplam aktif güç kaybı değeri NR güç akışı analizi yönteminde 47,53 MW olarak maksimum değeri alırken, 15,49 MW aktif güç kaybı değeri ile HPSO minimum değeri sunmuştur. RGK devreye dahil edildiğinde maksimum aktif güç kaybı değeri 16,90 MW olarak PSO algoritmasında oluşurken, minimum değer ise 15,43 MW olarak HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK harici reaktif güç kayıpları incelendiğinde; maksimum değer 115,75 MVAr ile NR ile elde edilirken, minimum değer -36,87 MVAr ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK dahil edildiğinde; maksimum -4,28 MVAr reaktif güç kaybı PSO'dan, minimum değer ise -14,91 MVAr ile HPSO algoritmasından elde edilmiştir.

Amaç fonksiyonu değerlerinde; RGK harici ve dahil edildiğinde 780,85 ve 490,39 değerleri ile PSO maksimum amaç fonksiyonu değerlerini sunmuştur. RGK yokken ve dahil edildiğinde ise HPSO algoritması 374,06 ve 355,11 amaç fonksiyonu değerleri ile üstünlüğünü ve etkinliğini bu başlıkta da ortaya koymuştur. RGK harici PSO algoritmasının minimum CPU kullanım süresi 31,21 sn. olarak gerçekleşirken, maksimum CPU kullanım süresi 32,10 sn. HPSO'nun olmuştur. RGK dahil edildiğinde minimum 30,55 sn. süre ile GKO, maksimum 31,99 sn. ile HPSO süre kullanımı gerçekleştirmiştir.

RGK devrede değilken 507 MB minimum bellek kullanım değerine sahip olan GKO algoritması iken maksimum bellek kullanımını 521 MB ile HPSO algoritması gerçekleştirmiştir. RGK devreye alındığında ise 518 MB bellek kullanım değeri ile HPSO minimum, 520 MB bellek kullanım değeri ile GKO ise maksimum bellek kullanımını gerçekleştirmiştir.

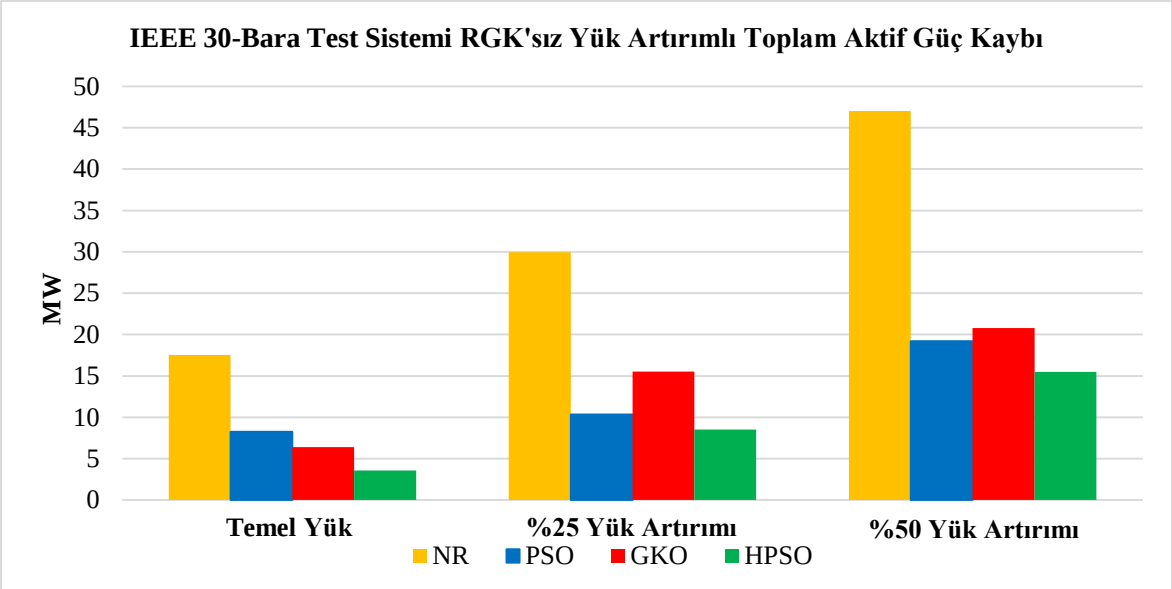
Sonuç olarak; RGK devre dışı ve devredeyken HPSO algoritması, bellek kullanımı haricinde diğer başlıklarda en iyi değerleri sunarak etkinliğini, güvenilirliğini ve sağlamlığını %50 daha fazla yüklü güç sistemi optimizasyonunda da ortaya koymuştur.

Çizelge 6.23. IEEE 30-bara test sistemi %50 yük artırımlı RGK'lı ve RGK'sız PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları

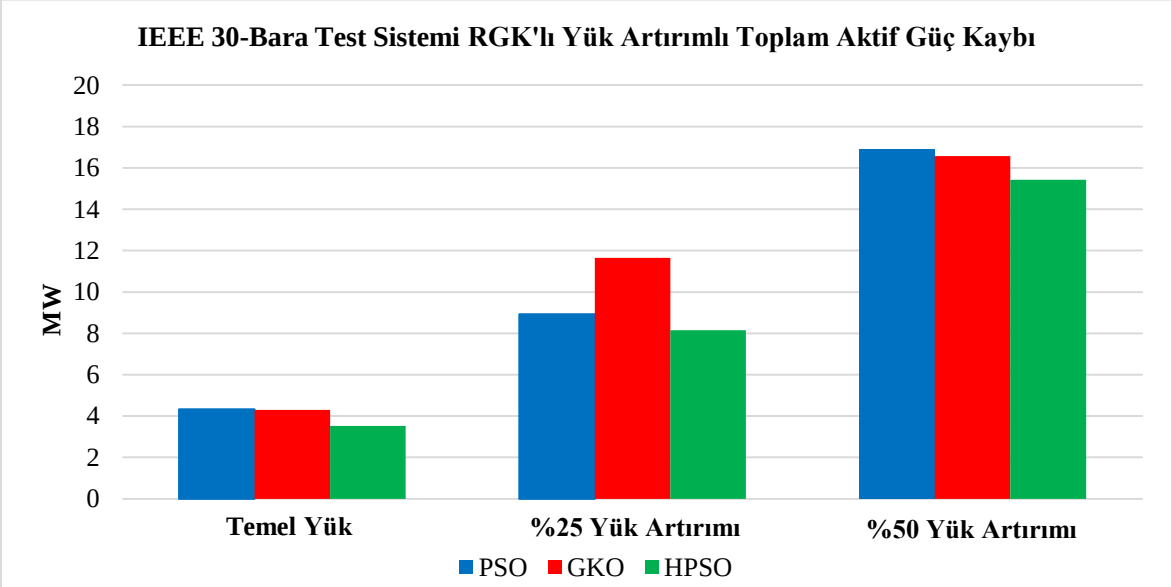
	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
Gerilim Sapması (pu.)	-	0,55	0,43	0,36	0,40	0,30	0,27
$P_{kayıp}$(MW)	47,03	19,20	20,79	15,49	16,90	16,57	15,43
$Q_{kayıp}$(MVAr)	115,75	54,18	50,44	36,87	-4,28	-5,90	-14,91
Amaç Fonksiyonu	-	780,85	491,58	374,06	409,39	383,99	355,11
Standart Sapma	-	3,15	1,76	0,93	1,18	1,13	0,37
CPU Süresi (sn.)	0,90	31,21	31,30	32,10	30,89	30,55	31,99
CPU Bellek (MB)	655	510	507	521	519	520	518

6.3.4. IEEE 30-Bara test sisteminde yük artışı durumunun algoritmaların ürettiği güç kaybı ve gerilim kararlılığına olan etkileri

Şekil 6.37'de RGK'sız yapılan temel yük, %25 ve %50 yük artırımlarının toplam güç kaybına olan etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen verilere ait grafik incelendiğinde; NR güç akışında elde edilen toplam aktif güç kaybı değerinin 17,528 MW ile başlayıp 47,034 MW değerine kadar arttığı değerlendirilerek klasik güç akışı analizinin sürdürülebilir olmadığı anlaşılmıştır. PSO, GKO ve HPSO optimizasyon algoritmalarının RGK'sız ürettiği güç kaybı değerleri incelendiğinde; HPSO ilk sırada yer alarak güç sisteminin her senaryosunda en az güç kaybı değerini sağlamıştır.

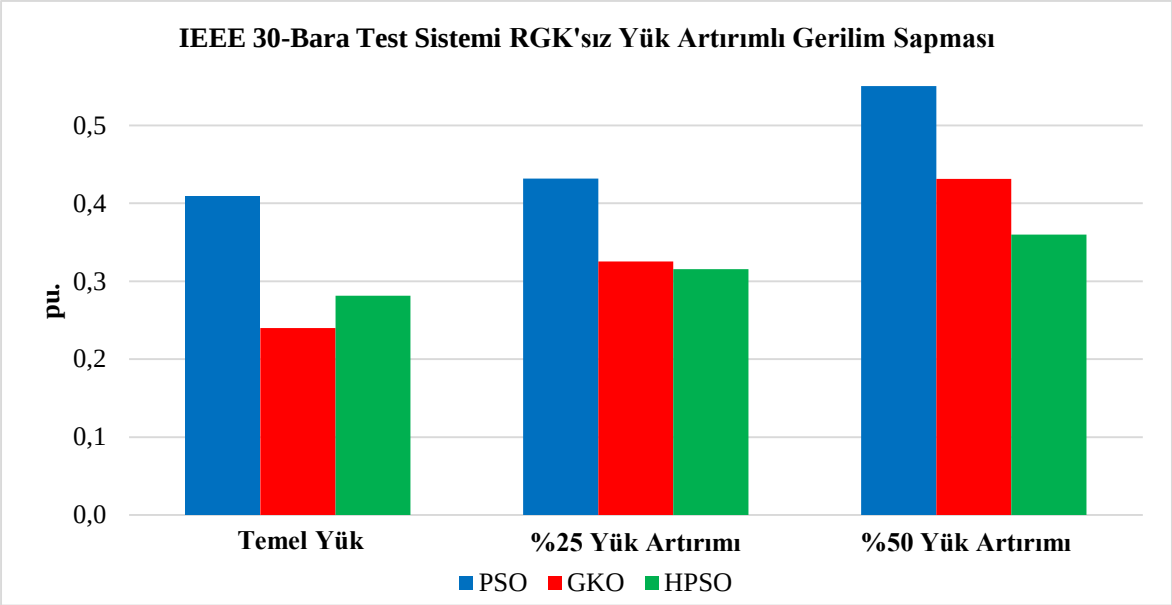


Şekil 6.37. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız yük artırımlı toplam aktif güç kaybı değerleri



Şekil 6.38. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'lı yük artırımlı toplam aktif güç kaybı değerleri

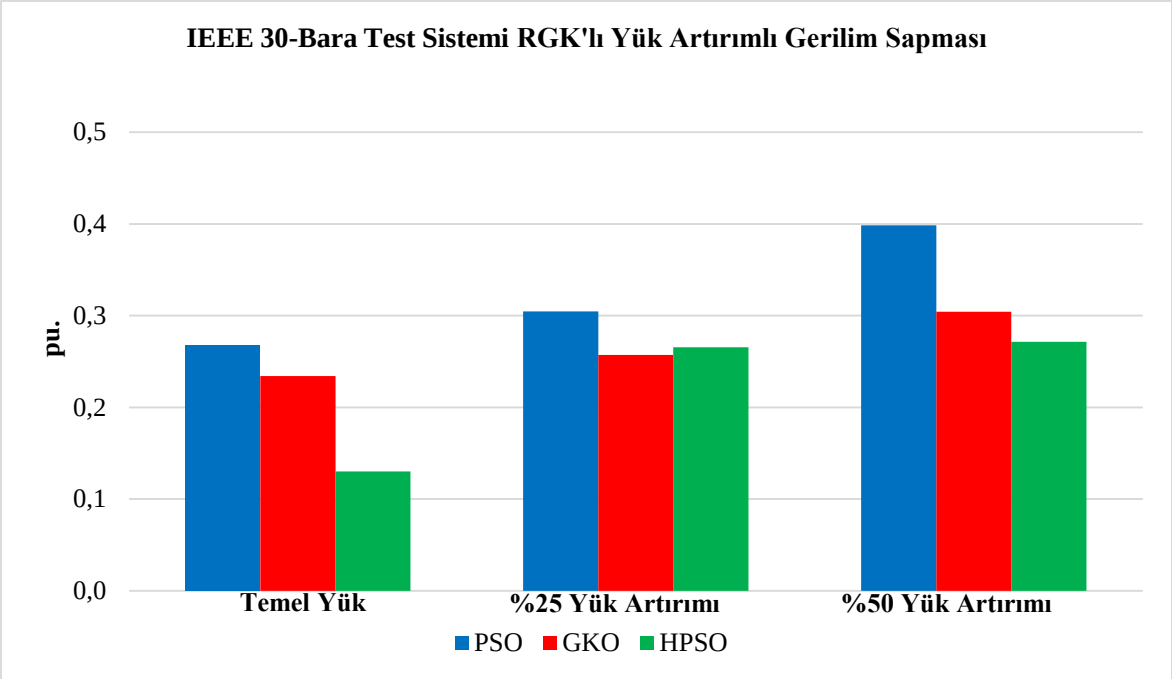
Şekil 6.38'de güç sistemine RGK eklendiğinde yapılan temel yük, %25 ve %50 yük artırımlarının toplam güç kaybına olan etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen verilere ait grafik incelendiğinde; her üç algoritmanın da yük artışına bağlı güç kayıp değerlerini artırdığı belirlenmiştir. Ancak RGK'lı üretilen değerler incelendiğinde; içlerinde geliştirilen HPSO güç akışı optimizasyon algoritmasının PSO ve GKO'ya göre daha kararlı ve küçük güç kaybı değerleri sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 6.39. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'sız yük artırımlı bara gerilim sapması değerleri

Şekil 6.39'da RGK'sız yapılan temel yük, %25 ve %50 yük artırımlarının toplam bara gerilim sapmasına olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. RGK'sız gerilim sapma değerleri bazında algoritmalar değerlendirildiğinde; GKO algoritmasının gerilim kararlılığında oldukça iyi olmasına karşın geliştirilen HPSO algoritmasının yük artışı durumunda daha kararlı gerilim sapması değerleri üreterek üstünlüğü bir kez daha ortaya çıkmıştır.

Şekil 6.40'ta güç sistemine RGK eklendiğinde; gerilim kararlılığının nasıl etkileneceğinin tespiti amaçlanmıştır. Yapılan temel yük, %25 ve %50 yük artırımlarının toplam bara gerilim sapmasına olan etkisi incelendiğinde; HPSO algoritmasının RGK ile daha uyumlu çalıştığı yük artışından etkilenmeyerek GKO ve PSO'ya göre daha kararlı değerler ürettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.40. IEEE 30-bara test sisteminde RGK'lı yük artırımlı bara gerilim sapması değerleri

6.3.5. IEEE 57-Bara test sisteminin temel yüklü güç akışı optimizasyonu

Temel yüklü olarak IEEE 57-bara test sistemi yük baralarından talep edilen toplam aktif güç 1250,80 MW, toplam reaktif güç ise 336,40 MVAr olarak tanımlanmıştır [123]. Güç sistemine ait hat ve bara parametreleri kullanılarak yapılan çalışmalarda; 13, 18, 25, 45 ve 53 nolu baralara paralel bağlı 30 MVAr'a kadar değer alabilen toplam 5 adet şönt kompansatör üniteleri hazır bekletilmiştir. Önce RGK'sız güç akışı uygulamaları daha sonra RGK'lı güç akışı optimizasyon uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Newton-Raphson yöntemi ile yapılan güç akışı analizleri reaktif güç kompansatörsüz olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra PSO, GKO ve geliştirilen yeni HPSO optimizasyon algoritmaları ile önce RGK devre dışı bırakılarak ve devreye dahil edilerek gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışması sonucunda baralarda oluşan parametre değerleri belirlenmiştir. Temel yük talepli güç akışı analizlerinde elde edilen bara gerilim değerleri, faz açıları, baraların toplam gerilim sapması değerleri, güç üretim birimlerinde üretilen aktif, reaktif güç bilgileri, toplam kayıp güç değerleri, şönt kompansatör üniteleri değerleri, meta-sezgisel algoritmaların kullandığı CPU süre ve bellek bilgileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Temel yüklü IEEE 57-bara test sisteminde reaktif güç kompansatörü devre dışı bırakılarak elde edilen NR güç akışı analizi sonuçları diğer çalışmalara referans olarak alınmıştır.

Çizelge 6.24'te NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen bara gerilim değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. NR güç akışında RGK'sız elde edilen bara gerilim değerleri diğer optimizasyon algoritmalarına göre daha geniş aralıkta olduğu değerlendirilmiştir. PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının gerilim değerlerini daha dar aralıkta tutabildiği belirlenmiştir.

Ayrıca güç sistemine RGK eklendiğinde oluşan gerilim bilgileri değerlendirildiğinde, RGK olmadığında gerilimlerin 1 pu. değerlerden daha da uzaklaştığı belirlenmiştir. PSO, GKO ve HPSO optimizasyon algoritmalarının NR'ye göre RGK'sız ve RGK'lı gerilim limitlerini daha iyi sağlayabildiği gözlemlenmiştir. Her koşulda oluşan gerilim değerleri dikkate alındığında, HPSO algoritmasının PSO ve GKO algoritmalarına göre gerilim kararlılığının sağlanması bakımından üstün olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.24. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim bilgileri

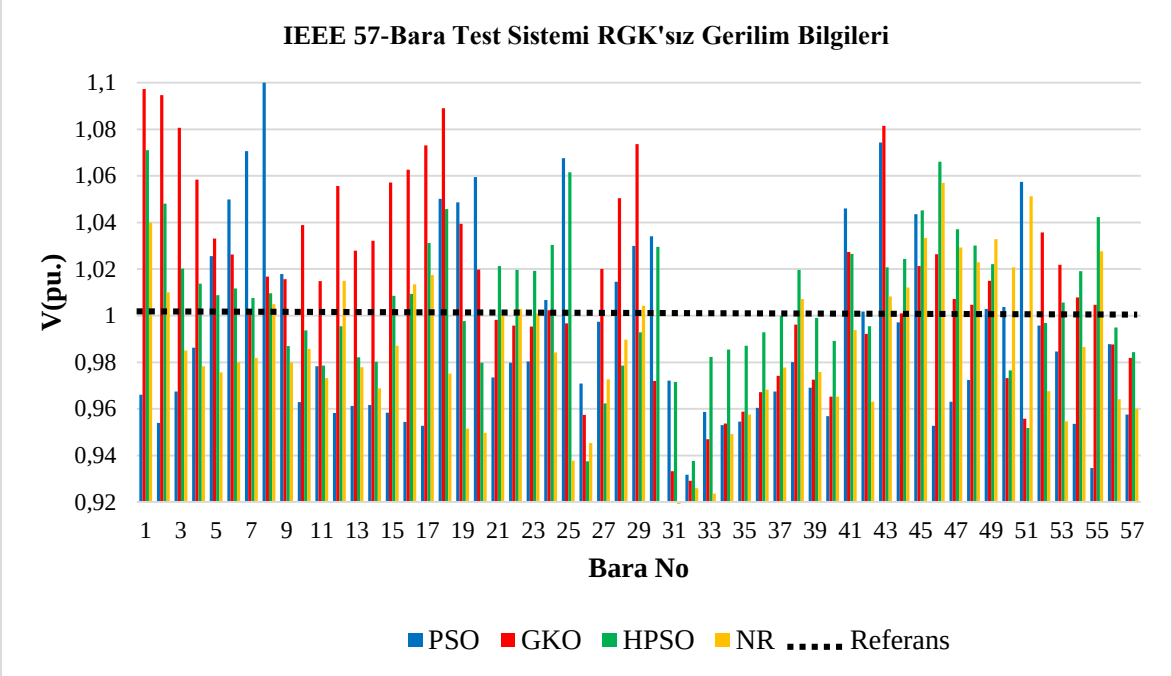
Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Dahil		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
V_g1 (pu.)	1,0400	0,9660	1,0973	1,0710	1,1000	1,0498	1,1000
V_g2 (pu.)	1,0100	0,9540	1,0946	1,0481	1,1000	1,0335	1,0974
V_g3 (pu.)	0,9850	0,9674	1,0806	1,0202	1,0741	1,0351	1,0872
V_y4 (pu.)	0,9783	0,9862	1,0584	1,0138	1,0549	1,0412	1,0722
V_y5 (pu.)	0,9757	1,0255	1,0331	1,0088	1,0183	1,0529	1,0529
V_g6 (pu.)	0,9800	1,0499	1,0263	1,0117	1,0057	1,0636	1,0485
V_y7 (pu.)	0,9819	1,0706	1,0029	1,0075	0,9626	1,0434	1,0180
V_g8 (pu.)	1,0050	1,1000	1,0168	1,0096	0,9530	1,0563	1,0159
V_g9 (pu.)	0,9800	1,0179	1,0156	0,9870	0,9744	1,0204	1,0108
V_y10(pu.)	0,9857	0,9629	1,0389	0,9937	0,9731	0,9931	0,9944
V_y11(pu.)	0,9732	0,9783	1,0149	0,9785	0,9895	1,0071	1,0130
V_g12(pu.)	1,0150	0,9582	1,0557	0,9955	1,0168	1,0209	1,0307
V_g13(pu.)	0,9779	0,9612	1,0279	0,9822	1,0142	1,0135	1,0313
V_y14(pu.)	0,9688	0,9616	1,0322	0,9802	1,0133	1,0085	1,0357
V_y15(pu.)	0,9871	0,9584	1,0572	1,0085	1,0402	1,0261	1,0618
V_y16(pu.)	1,0134	0,9544	1,0626	1,0094	1,0347	1,0226	1,0444
V_y17(pu.)	1,0174	0,9527	1,0731	1,0312	1,0594	1,0284	1,0643
V_y18(pu.)	0,9751	1,0502	1,0891	1,0457	1,0159	1,0194	1,0444
V_y19(pu.)	0,9515	1,0487	1,0394	0,9977	0,9689	0,9980	0,9919
V_y20(pu.)	0,9497	1,0595	1,0198	0,9798	0,9518	0,9967	0,9711
V_y21(pu.)	1,0004	0,9735	0,9982	1,0213	1,0222	0,9660	0,9730
V_y22(pu.)	1,0029	0,9798	0,9958	1,0196	1,0209	0,9687	0,9704
V_y23(pu.)	1,0010	0,9804	0,9953	1,0193	1,0207	0,9693	0,9707

Çizelge 6.24. (devamı) IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilim bilgileri

V_y24(pu.)	0,9842	1,0068	1,0024	1,0303	1,0329	0,9943	0,9914
V_y25(pu.)	0,9378	1,0676	0,9967	1,0615	1,0668	1,0711	1,0599
V_y26(pu.)	0,9453	0,9709	0,9574	0,9375	0,9458	0,9804	0,9593
V_y27(pu.)	0,9727	0,9974	1,0201	0,9624	1,0082	1,0153	1,0082
V_y28(pu.)	0,9897	1,0146	1,0504	0,9785	1,0379	1,0347	1,0329
V_y29(pu.)	1,0043	1,0299	1,0737	0,9928	1,0603	1,0508	1,0522
V_y30(pu.)	0,9201	1,0341	0,9720	1,0296	1,0331	1,0365	1,0294
V_y31(pu.)	0,8999	0,9721	0,9332	0,9716	0,9707	0,9719	0,9749
V_y32(pu.)	0,9259	0,9317	0,9291	0,9376	0,9294	0,9277	0,9461
V_y33(pu.)	0,9236	0,9586	0,9470	0,9823	0,9495	0,9418	1,0069
V_y34(pu.)	0,9491	0,9530	0,9537	0,9855	0,9872	0,9466	0,9427
V_y35(pu.)	0,9575	0,9545	0,9588	0,9871	0,9886	0,9480	0,9440
V_y36(pu.)	0,9682	0,9605	0,9671	0,9929	0,9942	0,9539	0,9497
V_y37(pu.)	0,9778	0,9674	0,9742	0,9999	0,9978	0,9588	0,9564
V_y38(pu.)	1,0071	0,9801	0,9961	1,0196	1,0208	0,9684	0,9692
V_y39(pu.)	0,9758	0,9691	0,9725	0,9990	0,9920	0,9593	0,9577
V_y40(pu.)	0,9653	0,9568	0,9653	0,9892	0,9947	0,9530	0,9462
V_y41(pu.)	0,9938	1,0460	1,0274	1,0265	0,9651	1,0317	1,0357
V_y42(pu.)	0,9631	1,0018	0,9922	0,9954	0,9359	0,9839	0,9924
V_y43(pu.)	1,0083	1,0743	1,0815	1,0207	0,9156	1,0677	1,0401
V_y44(pu.)	1,0121	0,9971	1,0010	1,0243	1,0491	0,9662	0,9736
V_y45(pu.)	1,0334	1,0435	1,0213	1,0452	1,1190	0,9727	0,9939
V_y46(pu.)	1,0570	0,9527	1,0264	1,0661	1,0556	1,0057	0,9983
V_y47(pu.)	1,0292	0,9631	1,0072	1,0371	1,0275	0,9821	0,9778
V_y48(pu.)	1,0229	0,9724	1,0047	1,0301	1,0215	0,9776	0,9748
V_y49(pu.)	1,0328	1,0029	1,0150	1,0221	0,9918	0,9802	0,9746
V_y50(pu.)	1,0207	1,0037	0,9732	0,9765	0,9990	0,9930	0,9874
V_y51(pu.)	1,0513	1,0575	0,9558	0,9518	1,0639	1,0679	1,0623
V_y52(pu.)	0,9676	0,9957	1,0357	0,9968	1,0511	0,9991	1,0317
V_y53(pu.)	0,9546	0,9846	1,0219	1,0057	1,0524	0,9778	1,0271
V_y54(pu.)	0,9866	0,9535	1,0079	1,0191	1,0472	0,9854	1,0165
V_y55(pu.)	1,0276	0,9346	1,0047	1,0423	1,0523	1,0030	1,0167
V_y56(pu.)	0,9641	0,9878	0,9877	0,9949	0,9393	0,9667	0,9796
V_y57(pu.)	0,9600	0,9575	0,9818	0,9844	0,9580	0,9446	0,9514

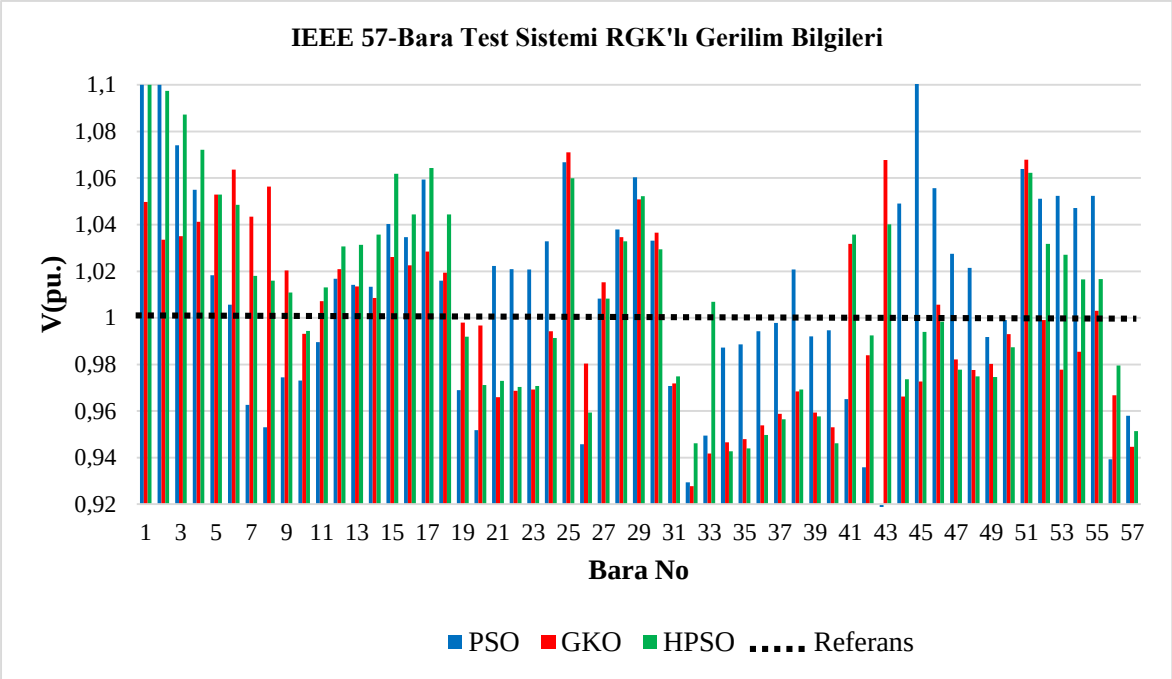
Şekil 6.41'de IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği verilmektedir. 57 adet baraya ait gerilim bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; PSO, GKO ve PSO algoritmalarının 1 pu. değerine ve birbirlerine daha yakın değerler ürettiği, HPSO algoritmasının ise gerilim kararlılığı konusunda daha ön planda olduğu gözlemlenmiştir.

PSO'nun ürettiği gerilim bilgilerine göre bu senaryoda gerilim sapması, GKO ve HPSO algoritmalarına göre daha yüksek değerlerdedir. NR güç akışında ise gerilim değerlerinin diğer algoritmalara göre en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.41. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği

Çizelge 6.24'te güç sistemine RGK eklenerek PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen bara gerilim bilgileri değerlendirildiğinde; RGK'nın devreye alınması ile gerilimlerin daha iyi değerlere ulaştığı ve gerilim sapmalarının azaldığı görülmektedir. Şekil 6.42'de IEEE 57-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile güç sistemine RGK eklendiğinde gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği verilmektedir. 30 adet baraya ait gerilim bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; GKO ve HPSO algoritmalarının 1 pu. değerine ve birbirlerine yakın değerler ürettiği görülmüştür. PSO algoritmasının ise GKO ve HPSO algoritmalarına göre gerilim sapması daha yüksek değerlerdedir.



Şekil 6.42. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarına ait gerilim grafiği

Çizelge 6.25'te PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı gerilim faz açısı tablosu verilmektedir. RGK'sız elde edilen faz açısı bilgileri incelendiğinde; NR güç akışına ait gerilim faz açısı değerlerinin diğer algoritmalara göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. HPSO'nun PSO'ya göre daha iyi faz açısı sonuçları ürettiği görülmektedir. PSO algoritmasının ise faz açısı bilgileri bakımından GKO'dan iyi olduğu belirlenmiştir. Güç sistemine RGK eklendiğinde elde edilen gerilim faz açısı bilgileri karşılaştırıldığında; PSO'nun kısmen HPSO'dan daha iyi değerleri ürettiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.25. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilimleri faz açısı bilgileri

Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Dahil		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
V_g1 (º)	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
V_g2 (º)	-1,1841	-0,1274	0,1150	-0,6156	-0,5789	-0,3529	-0,2652
V_g3 (º)	-5,9711	-1,3548	-0,6828	-3,5929	-1,8066	-4,5092	-2,1954
V_y4 (º)	-7,2605	-0,8040	-0,0680	-4,6515	-2,6568	-5,8327	-3,2189
V_y5 (º)	-8,4942	0,6430	1,7500	-5,5009	-3,0378	-7,1812	-4,0838
V_g6 (º)	-8,6319	1,7158	3,0766	-5,4812	-2,8015	-7,4238	-4,1109

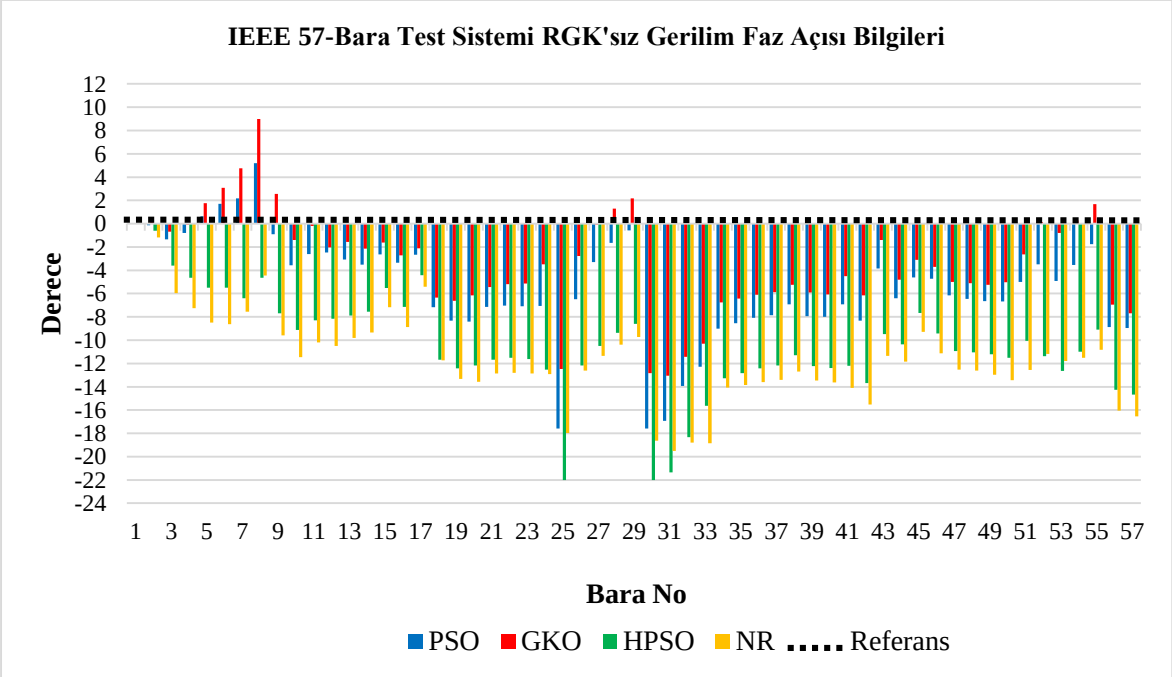
Çizelge 6.25. (devamı) IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilimleri faz açısı bilgileri

V_y7 (º)	-7,5425	2,1769	4,7500	-6,3888	-4,3468	-7,7012	-5,7599
V_g8 (º)	-4,4588	5,1854	8,9843	-4,6329	-2,7288	-5,7149	-4,4418
V_g9 (º)	-9,5871	-0,8943	2,5717	-7,6967	-4,6264	-7,6017	-6,7890
V_y10(º)	-11,4653	-3,5617	-1,4117	-9,1236	-5,9190	-8,5908	-7,5268
V_y11(º)	-10,1905	-2,5946	-0,1789	-8,3031	-5,2517	-7,9261	-6,8538
V_g12(º)	-10,4827	-2,4744	-2,0240	-8,1627	-4,2613	-6,5427	-5,4161
V_g13(º)	-9,7992	-3,0771	-1,5594	-7,8709	-4,9382	-7,2887	-6,0353
V_y14(º)	-9,3406	-3,5114	-2,1431	-7,5460	-4,9010	-7,1468	-5,7510
V_y15(º)	-7,1782	-2,6431	-1,6097	-5,5098	-3,5372	-5,5083	-4,0749
V_y16(º)	-8,8672	-3,3413	-2,7106	-7,1413	-4,3298	-6,0288	-5,1305
V_y17(º)	-5,4002	-2,6514	-2,1142	-4,4120	-2,9312	-3,9063	-3,3486
V_y18(º)	-11,7190	-7,1706	-6,3469	-11,6878	-10,4259	-12,8080	-10,2781
V_y19(º)	-13,3325	-8,3308	-6,6181	-12,4119	-10,5390	-13,3801	-10,8455
V_y20(º)	-13,5842	-8,4020	-6,1427	-12,1825	-9,8560	-13,0313	-10,5063
V_y21(º)	-12,8600	-7,1294	-5,4351	-11,6758	-8,6649	-11,6256	-9,9895
V_y22(º)	-12,8105	-7,0371	-5,1961	-11,5170	-8,4050	-11,4108	-9,7873
V_y23(º)	-12,8593	-7,0824	-5,1423	-11,6158	-8,4820	-11,5475	-9,8918
V_y24(º)	-12,9230	-7,0499	-3,4779	-12,5317	-9,0349	-12,9965	-10,8176
V_y25(º)	-17,9774	-17,5826	-12,4621	-22,0147	-17,7468	-22,6912	-19,7850
V_y26(º)	-12,6119	-6,4936	-2,7845	-12,1764	-8,5916	-12,6499	-10,4166
V_y27(º)	-11,3480	-3,2852	-0,0784	-10,4955	-7,7366	-11,3709	-9,3623
V_y28(º)	-10,3844	-1,6478	1,3069	-9,3695	-6,9734	-10,4481	-8,5234
V_y29(º)	-9,7202	-0,5756	2,1835	-8,6026	-6,4680	-9,8215	-7,9631
V_y30(º)	-18,6352	-17,5834	-12,8235	-22,0105	-17,8282	-22,6437	-19,8281
V_y31(º)	-19,5037	-16,9383	-13,0389	-21,3472	-17,3999	-21,8726	-19,2940
V_y32(º)	-18,8033	-13,9275	-11,4176	-18,3172	-14,7543	-18,6338	-16,4874
V_y33(º)	-18,8451	-12,2865	-10,3031	-15,6399	-13,5093	-17,7335	-12,8462
V_y34(º)	-14,0605	-8,9987	-6,7505	-13,2652	-10,2102	-13,5599	-11,6917
V_y35(º)	-13,8408	-8,5308	-6,4281	-12,8313	-9,8061	-13,0664	-11,2568
V_y36(º)	-13,5900	-8,0718	-6,0897	-12,4101	-9,3994	-12,5856	-10,8333
V_y37(º)	-13,4095	-7,8510	-5,8832	-12,1632	-9,0263	-12,2440	-10,5854
V_y38(º)	-12,7045	-6,9272	-5,2390	-11,2843	-8,1892	-11,0913	-9,5318
V_y39(º)	-13,4570	-7,9492	-5,8940	-12,2220	-8,9731	-12,3251	-10,7003
V_y40(º)	-13,6194	-7,9860	-6,0729	-12,3850	-9,5132	-12,6108	-10,8059
V_y41(º)	-14,0993	-6,9357	-4,4947	-12,2072	-9,3648	-12,2088	-10,9548
V_y42(º)	-15,5352	-8,3207	-6,1436	-13,6694	-10,9520	-13,3880	-12,1301
V_y43(º)	-11,3574	-3,8477	-1,3963	-9,4870	-6,5755	-9,1568	-8,0754
V_y44(º)	-11,8374	-6,4094	-4,7995	-10,3545	-7,6047	-10,2109	-8,7045
V_y45(º)	-9,2753	-4,6175	-3,1071	-7,6778	-5,8066	-7,4904	-6,1632
V_y46(º)	-11,1246	-4,7230	-3,7122	-9,4340	-6,5539	-9,0201	-7,5426
V_y47(º)	-12,5196	-6,1393	-5,0044	-10,9236	-7,8050	-10,5548	-9,0360
V_y48(º)	-12,6071	-6,4684	-5,0962	-11,0450	-7,8313	-10,6944	-9,1741
V_y49(º)	-12,9541	-6,6467	-5,2460	-11,2201	-7,1370	-10,4779	-9,0231
V_y50(º)	-13,4374	-6,6696	-5,0183	-11,5055	-7,8125	-10,9549	-9,6465

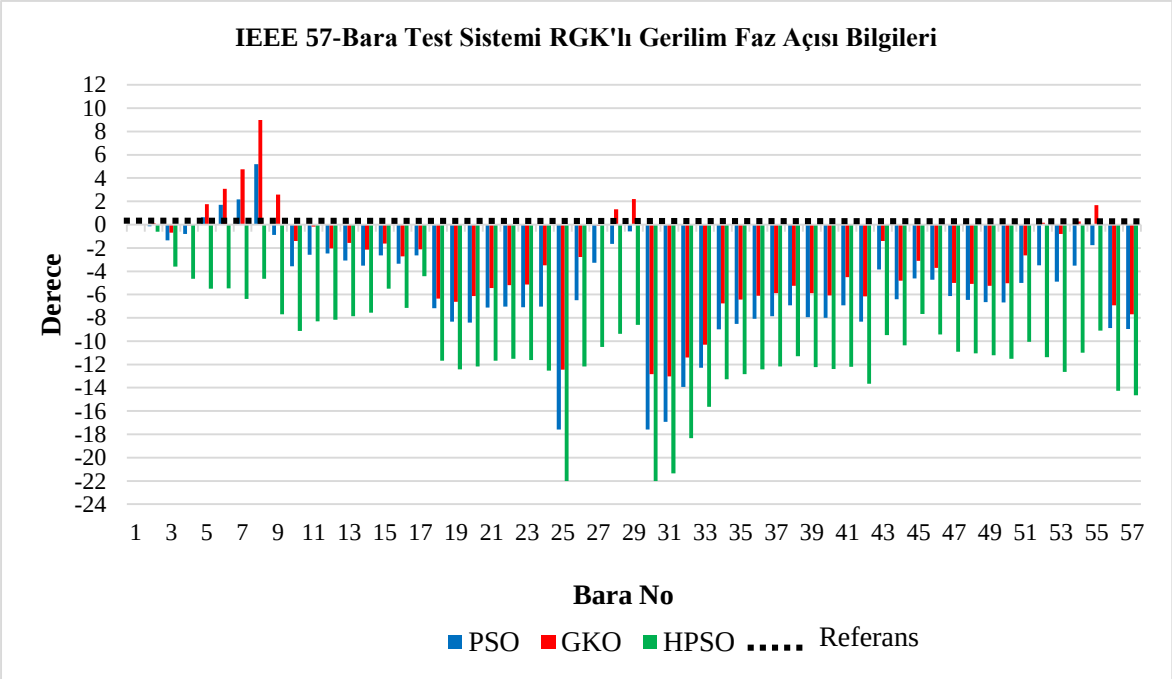
Çizelge 6.25. (devamı) IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile elde edilen RGK'sız ve RGK'lı bara gerilimleri faz açısı bilgileri

$V_y51(^o)$	-12,5619	-4,9986	-2,6391	-10,0672	-7,1926	-10,0026	-8,9048
$V_y52(^o)$	-11,1786	-3,4856	0,1524	-11,3805	-8,7470	-10,7767	-10,2805
$V_y53(^o)$	-11,7896	-4,9035	-0,7997	-12,6457	-9,7934	-11,1299	-11,3600
$V_y54(^o)$	-11,5073	-3,5305	0,2684	-10,9963	-7,9509	-10,1202	-9,7813
$V_y55(^o)$	-10,8219	-1,7580	1,6733	-9,0861	-5,8412	-8,7707	-7,8930
$V_y56(^o)$	-16,0411	-8,8660	-6,9361	-14,2645	-11,5559	-13,6836	-12,4322
$V_y57(^o)$	-16,5526	-8,9654	-7,6863	-14,6600	-12,7136	-13,9637	-12,4420

Şekil 6.43'te IEEE 30-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açıları grafiği verilmektedir. 57 adet baraya ait açı bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; GKO algoritmasının 0^o açı değerine en yakın değerleri ürettiği, PSO ve HPSO algoritmasının ise gerilim açı değerlerinin negatif değerlerde daha dezavantajlı olduğu görülmüştür. NR güç akışı analizi ile elde edilen gerilim faz açısı değerlerinin negatif yönde diğer algoritmalardan daha olumsuz değerlerde olduğu, bu durumun ise bara gerilim bilgilerine daha olumsuz yansıyabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 6.43. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'sız optimizasyon çalışmalarında bara gerilimlerine ait faz açısı grafiği



Şekil 6.44. IEEE 57-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK'lı optimizasyon çalışmalarında bara gerilimlerine ait faz açısı grafiği

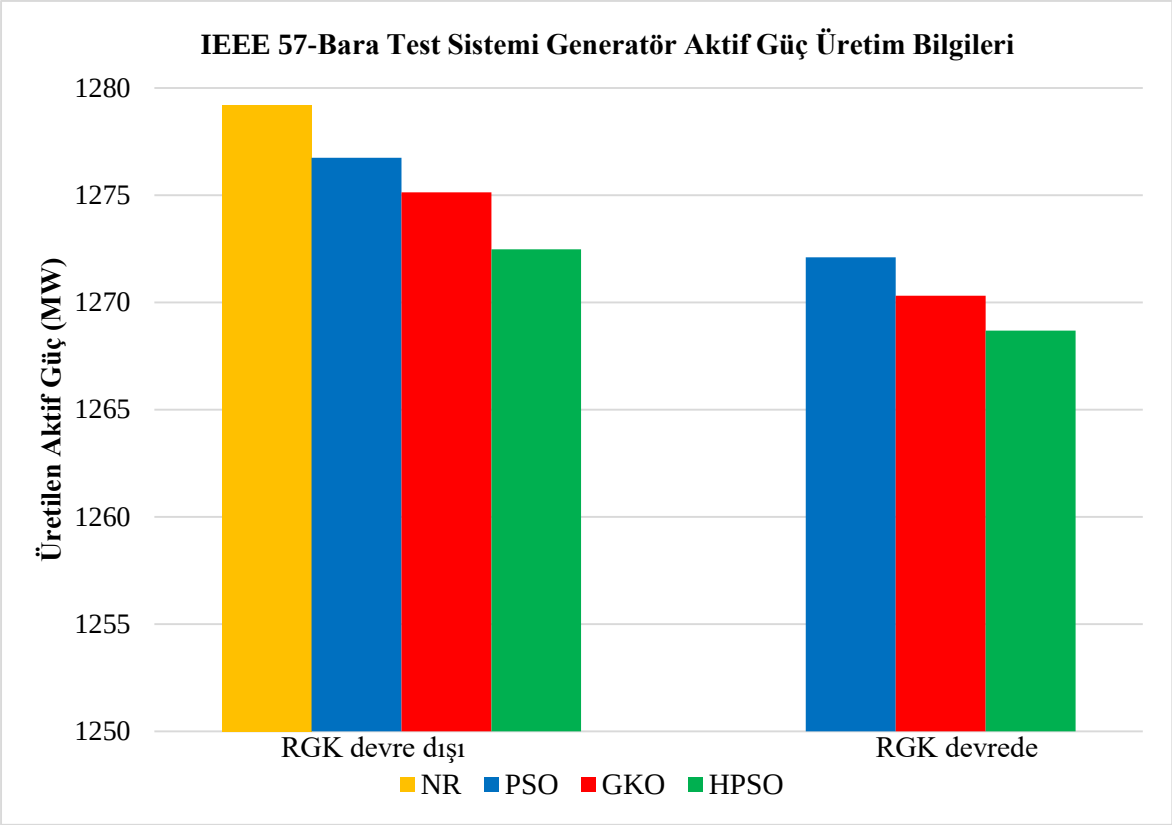
Şekil 6.44'te IEEE 57-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile RGK eklendiğinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarına ait gerilim faz açıları grafiği verilmektedir. 57 adet baraya ait açı bilgilerine algoritma bazında bakıldığında; PSO ve GKO algoritmalarının 0^{o} açı değerine daha yakın ve benzer değerler ürettiği, HPSO algoritmasının ise gerilim açı değerlerinin negatif yönde daha düşük olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.26'da RGK'sız ve RGK'lı olarak tanımlanan IEEE 30-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif ve reaktif güç üretimini gerçekleştirdikleri görülmektedir. Referans olarak NR algoritmasının ürettiği aktif güç değeri 1279,1960 MW ve reaktif güç ise 345,1980 MVAr olarak görülmektedir. RGK'sız ve RGK'lı en az aktif ve reaktif güç üretim gereksinimi duyulmasını sağlayan algoritmanın HPSO algoritması olduğu görülmektedir. Temel yüklü olarak tanımlanan IEEE 57-bara test sisteminde geliştirilen HPSO algoritmasının PSO ve GKO algoritmalarından daha üstün olduğunu ve bu algoritma ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyonu çalışmasında daha az güç üretim gereksinimine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.26. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif ve reaktif güç bilgileri

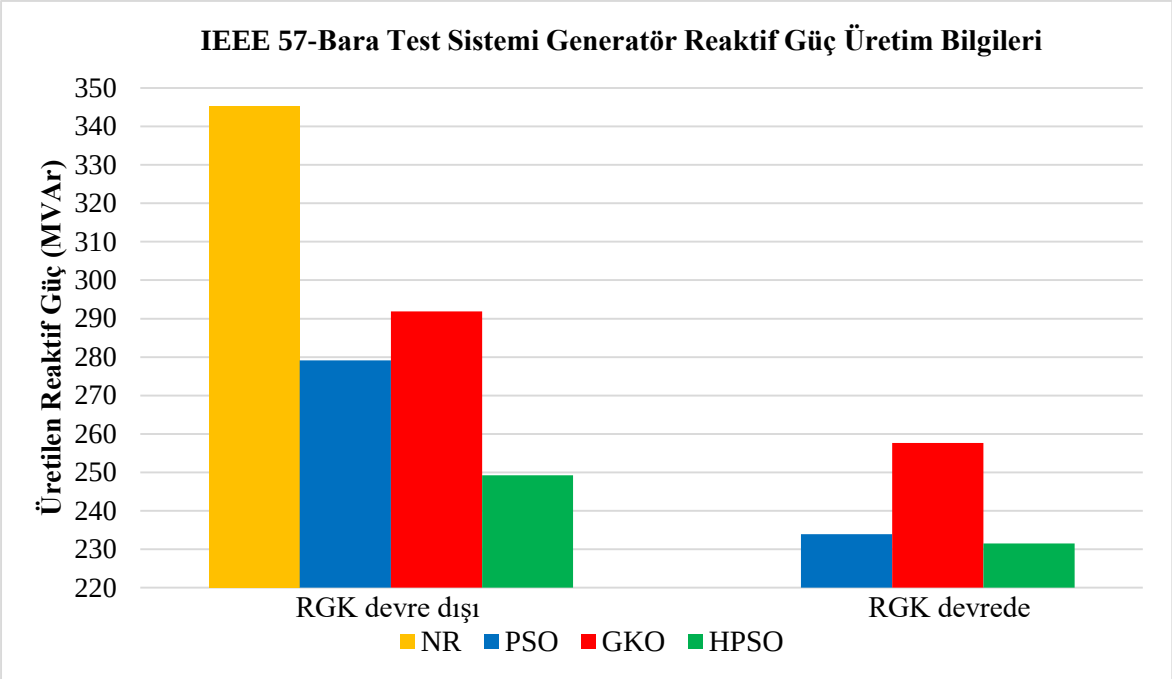
Bara No	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
P_g1(MW)	478,3960	186,4844	166,8474	396,8765	293,0202	334,8786	295,8808
P_g2(MW)	0,0000	1,1350	31,0314	9,5961	0,0000	46,2321	28,4168
P_g3(MW)	40,0000	29,1127	51,2748	91,6690	139,9783	56,0736	140,0000
P_g6(MW)	0,8000	100,0000	51,8266	75,4259	100,0000	52,3779	98,2905
P_g8(MW)	450,0000	550,0000	538,4219	311,6313	229,1026	305,4180	257,1515
P_g9(MW)	0,0000	0,0097	76,1630	65,0702	100,0000	72,8401	44,6293
P_g12(MW)	310,0000	410,0000	359,5636	322,2092	410,0000	402,4949	404,3123
P_T(MW)	1279,1960	1276,7418	1275,1287	1272,4782	1272,1010	1270,3150	1268,6812
Q_g1(MVAr)	129,9400	43,2498	78,8263	167,2977	98,8950	72,4684	75,3043
Q_g2(MVAr)	-0,7700	22,0897	73,6597	21,4075	108,1415	0,3692	69,3063
Q_g3(MVAr)	7,3150	0,2485	104,8128	9,2698	76,4211	17,7272	68,5525
Q_g6(MVAr)	5,7440	11,0478	-9,0710	4,6439	12,8961	60,8643	20,5568
Q_g8(MVAr)	65,3810	208,3961	-23,9957	34,4245	-79,8438	77,1074	-14,9381
Q_g9(MVAr)	6,8760	9,6288	-7,8861	-3,9495	6,6020	-5,3589	8,8570
Q_g12(MVAr)	130,7120	-15,5385	75,5096	16,1642	10,8111	34,4803	3,8899
Q_T (MVAr)	345,1980	279,1222	291,8556	249,2580	233,9230	257,6579	231,5287
Şönt Kompansatör					69,2749	36,3713	50,6446
(-): Sistemden çekilen güç, (+):Sisteme verilen güç							

Şekil 6.45'te IEEE 57-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu ve aktif güç üretimini gerçekleştirmesi sonrasında oluşan değerlere ait grafik verilmektedir. NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 1279,1960 MW'lık aktif güç üretimi ile maksimum değer NR ile elde edilirken, minimum değer ise 1272,4782 MW ile HPSO ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 1272,1010 MW maksimum aktif güç üretim değeri PSO algoritması ile elde edilirken, minimum güç üretim değeri ise 1268,6812 MW değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. Üretilen toplam aktif güç değerlerinin RGK devre dışı bırakıldığında daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmalarında üretilen aktif güçlerde düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

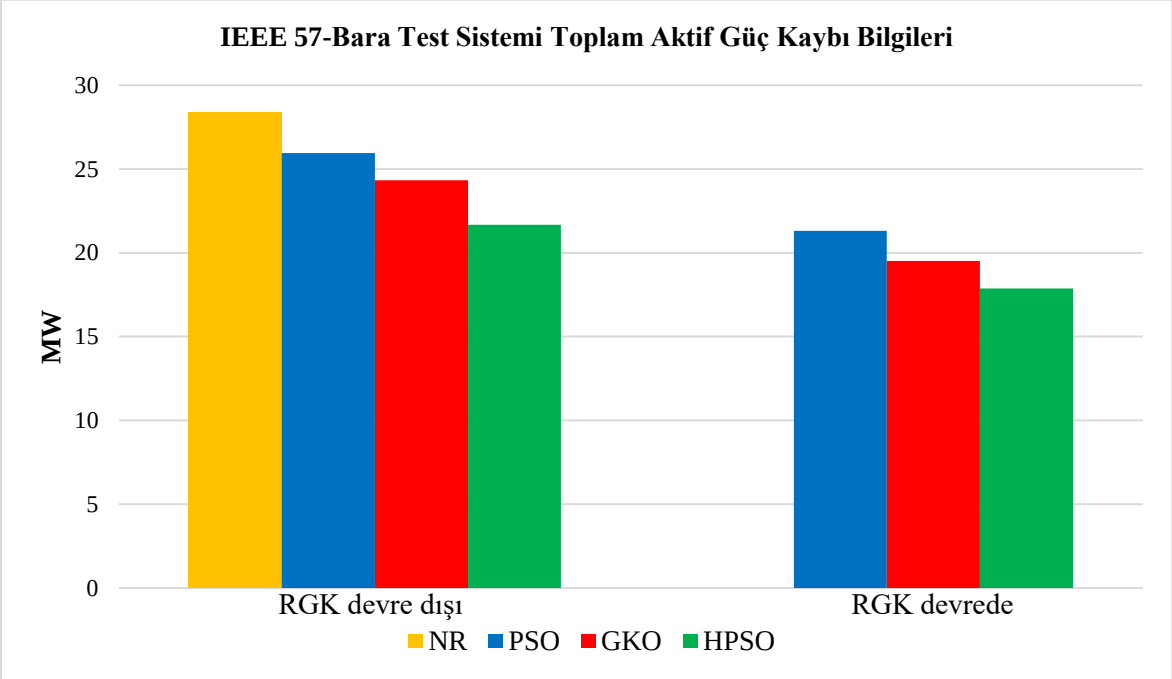


Şekil 6.45. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen aktif güç değerleri grafiği

Şekil 6.46 ve Çizelge 6.26'da RGK devre dışı bırakılarak güç sisteminde üretilen toplam reaktif güç değerleri dikkate alındığında; NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan 345,1980 MVAr'lık reaktif güç üretimi ile maksimum değer, minimum değer ise 249,2580 MVAr ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 257,6579 MVAr maksimum reaktif güç üretim değeri GKO ile elde edilirken, minimum reaktif güç üretim değeri ise 231,5287 MVAr değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. Üretilen toplam reaktif güç değerleri RGK devre dışı iken oldukça yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile üretilen reaktif güçlerde önemli düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.46. IEEE 57-bara test sisteminde NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının güç üretim birimlerinde RGK'sız ve RGK'lı üretilen reaktif güç değerleri grafiği

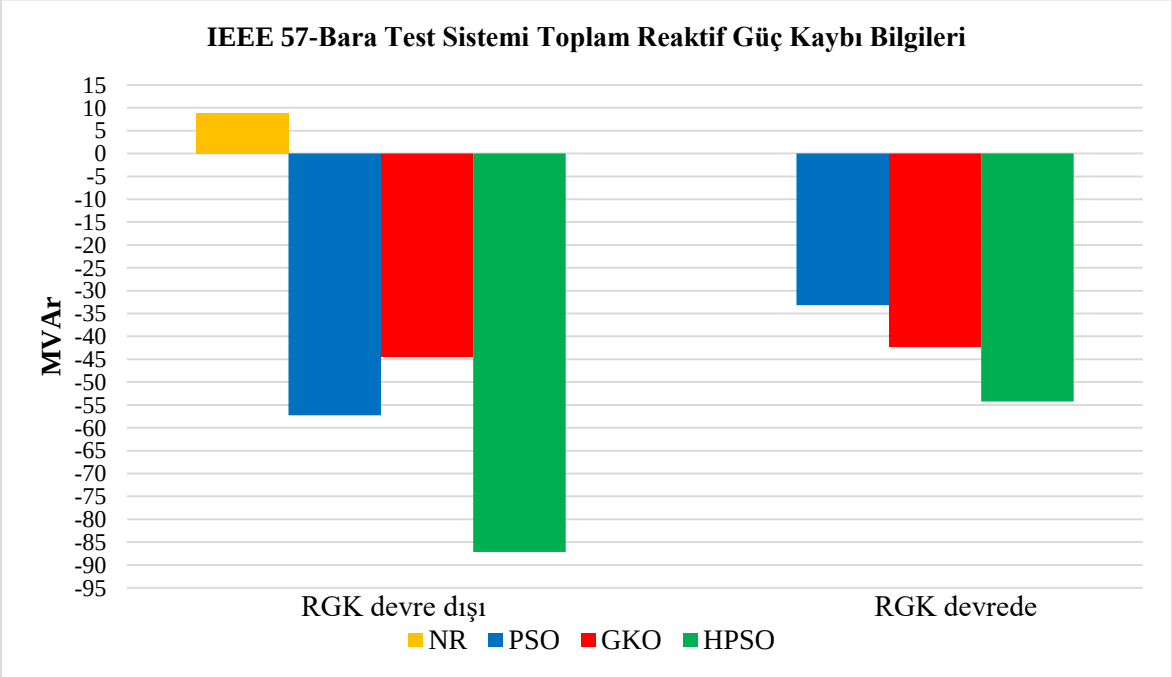


Şekil 6.47. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı toplam aktif güç kaybı değerleri

Şekil 6.47'de IEEE 57-bara test sisteminde generatörlerin güç üretim limitlerine uyumlu aktif güç üretimini gerçekleştirmesi sonrasında güç iletim hatları üzerinde oluşan aktif güç kaybı değerlerine ait grafik verilmektedir. NR güç akışı analizinde RGK bağlanmadan

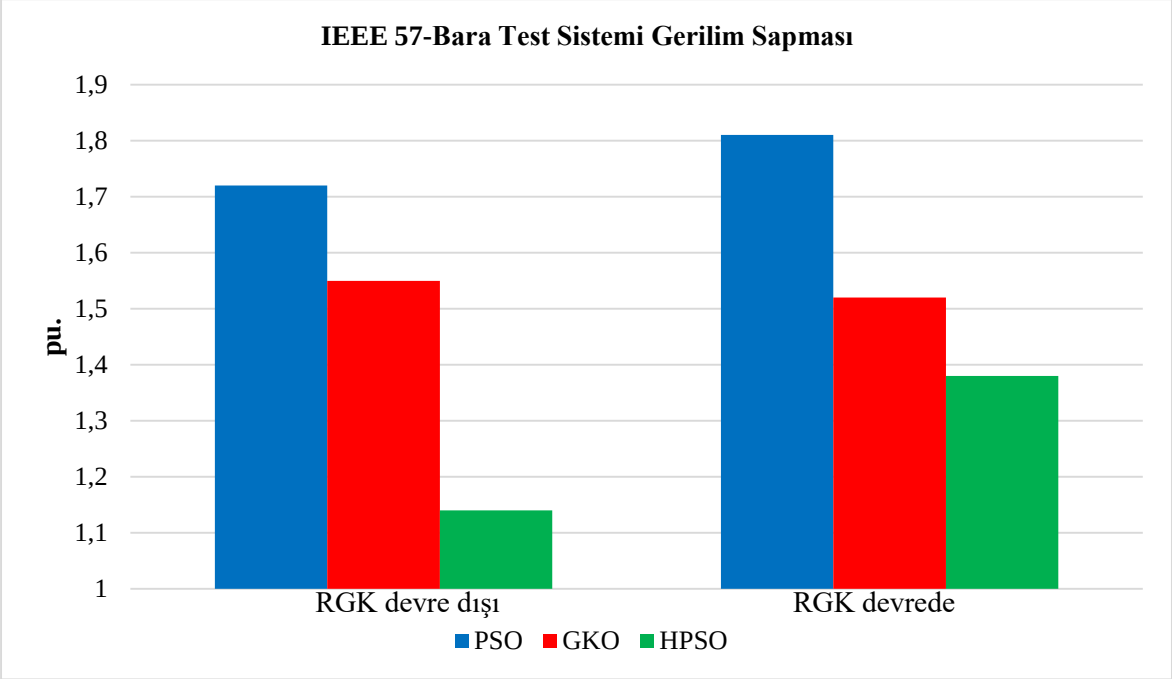
28,3960 MW'lık aktif güç kaybı ile maksimum değer, minimum değer ise 21,6782 MW ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; 21,3010 MW maksimum aktif güç kaybı değeri PSO algoritması ile elde edilirken, minimum güç kaybı değeri ise 17,8812 MW değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. İletim hatlarında kaybolan toplam aktif güç değerlerinin RGK devre dışı iken daha yüksek değerlerde olduğu, RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının da katkısıyla kaybolan aktif güç değerlerinde düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.48'de RGK devre dışı bırakılarak güç sistemi üzerinde kaybolan toplam reaktif güç değerleri dikkate alındığında; NR güç akışı analizinde 8,7980 MVAr'lık reaktif güç kaybı ile maksimum değer, minimum değer ise -87,1420 MVAr ile HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; -33,2021 MVAr maksimum reaktif güç kayıp değeri PSO ile elde edilirken, minimum reaktif güç kaybı değeri ise -54,2267 MVAr değeri ile HPSO algoritmasıyla elde edilmiştir. Üretilen toplam reaktif güç değerleri RGK devre dışı iken daha yüksek değerlerdedir. RGK'nın devreye alınmasıyla birlikte meta-sezgisel PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile güç akışı optimizasyonunda kayıp reaktif güçlerde de düşüşler olduğu gözlemlenmiştir.



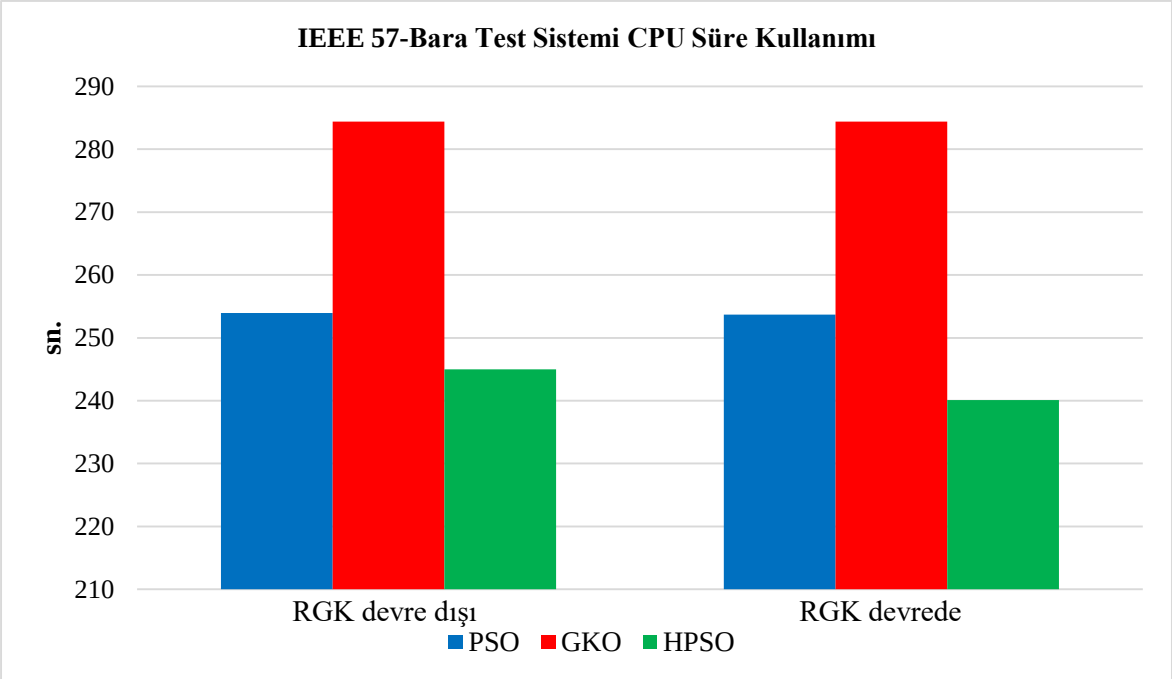
Şekil 6.48. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı toplam reaktif güç kaybı değerleri

Şekil 6.49'da RGK devre dışı bırakıldığında; PSO algoritmasıyla güç sisteminde oluşan bara gerilim sapması maksimum değer 1,72 pu. elde edilirken, minimum değer ise 1,14 pu. olarak HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK devreye alındığında; maksimum 1,81 pu. gerilim sapması değeri PSO ile elde edilirken, minimum 1,38 pu. gerilim sapması değeri ise HPSO algoritması ile elde edilmiştir.

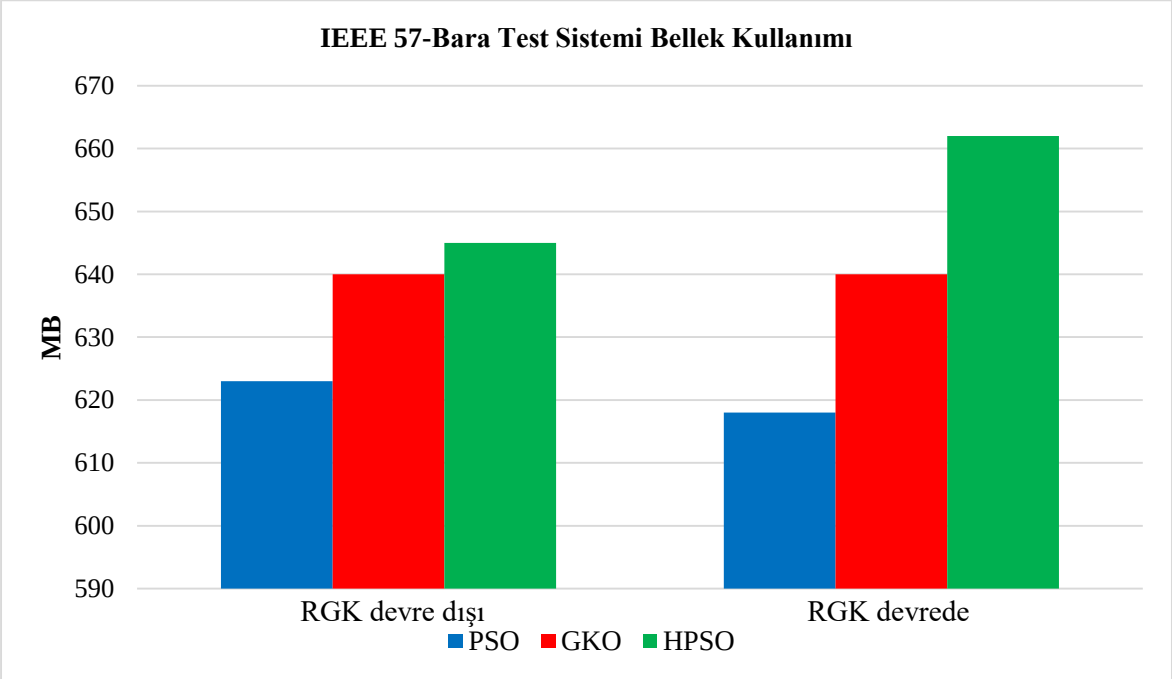


Şekil 6.49. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı gerilim sapması değerleri

Şekil 6.50'de IEEE 57-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmasında, algoritmaların süre kullanımı değerine ait RGK'lı ve RGK'sız oluşan değerler verilmektedir. HPSO'nun RGK'sız 245 sn. ile en kısa sürede optimizasyonu gerçekleştirdiği görülmüştür. GKO 284,39 sn. ve PSO ise 253,97 sn.'de güç akışı optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. RGK eklendiğinde; HPSO'nun 240,08 sn. ile kısmen optimizasyon süresi azalırken, PSO ve GKO'da optimizasyon süresinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. RGK devreye alındığında HPSO algoritmasının CPU kullanım süresinde 5 sn. azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 6.50. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı CPU süre kullanımı değerleri



Şekil 6.51. IEEE 57-bara test sisteminde RGK'sız ve RGK'lı bellek kullanımı değerleri

Şekil 6.51'de IEEE 57-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmasında, algoritmaların toplam bellek kullanımına ait RGK'sız ve RGK'lı oluşan değerler verilmektedir.

PSO'nun RGK'sız 623 MB en az bellek kullanımı, HPSO algoritmasının ise 645 MB toplam bellek kullanımı ile en yüksek değeri kullandığı görülmüştür. RGK devreye alındığında PSO'nun bellek kullanımının 618 MB olarak gerçekleşerek azaldığı görülmektedir. RGK'nın devreye girmesi ile GKO'nun bellek kullanım değeri değişmezken HPSO'nun ise bellek kullanım değerinde artış olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.27'de IEEE 57-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının RGK olmadan ve RGK dahil edilerek çalıştırılması ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarında; gerilim sapması, toplam aktif ve reaktif güç kaybı, amaç fonksiyonu, aktif güç kayıplarına ait standart sapma değerleri, algoritmaların hesaplama (CPU kullanım) süreleri, bellek kullanım değerlerine ait sayısal bilgiler verilmektedir. RGK devre dışı bırakıldığında güç sistemine ait gerilim sapması değeri minimum 1,14 pu. ile HPSO algoritması ile elde edilirken, maksimum değer ise 1,72 pu. ile PSO algoritmasında ortaya çıkmıştır. RGK devreye alındığında oluşan 1,38 pu. gerilim sapması değeri ile HPSO algoritmasının üstünlüğü görülmüştür.

RGK devre dışı iken güç sistemine ait toplam aktif güç kaybı değeri NR güç akışı analizi yöntemi ile 28,39 MW olarak maksimum değeri alırken, 21,68 MW aktif güç kaybı ile HPSO en iyi değeri sunmuştur. RGK devreye dahil edildiğinde maksimum aktif güç kaybı değeri PSO algoritmasında oluşurken, minimum değer ise 17,88 MW olarak HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK harici reaktif güç kayıpları incelendiğinde; maksimum değer 153,50 MVAr olarak NR ile elde edilirken, minimum değer -87,14 MVAr olarak HPSO algoritması ile elde edilmiştir. RGK dahil edildiğinde; maksimum -33,20 MVAr reaktif güç kaybı PSO ile elde edilirken, minimum -54,23 MVAr değer HPSO'dan elde edilmiştir.

Amaç fonksiyonu değerlerinde RGK harici ve dahil edildiğinde; 3002 ve 1888 değerleri ile PSO maksimum değerleri sunmuştur. RGK yokken ve dahil edildiğinde ise HPSO algoritması 1460 ve 1409 amaç fonksiyonu değerleri ile üstünlüğünü ve etkinliğini bu başlıkta da ortaya koymuştur. RGK harici minimum CPU kullanım süresi 245 sn. olarak HPSO algoritmasında gerçekleşirken, maksimum CPU süre kullanımını GKO algoritması ile 284,39 sn. olarak gerçekleştirmiştir. RGK dahil edildiğinde 240,08 sn. süre ile HPSO minimum, 284,40 sn. ile GKO maksimum süre kullanımını gerçekleştirmiştir.

RGK devrede değilken 616 MB minimum bellek kullanım değerine sahip olan NR algoritması iken maksimum bellek kullanımını 645 MB ile HPSO algoritması gerçekleştirmiştir. RGK devreye alındığında ise 662 MB maksimum bellek kullanım değeri HPSO ile gerçekleşirken, 618 MB minimum bellek kullanım değeri PSO ile gerçekleşmiştir. Sonuç olarak; RGK devre dışı ve devredeyken HPSO algoritması, bellek kullanımı haricinde diğer başlıklarda en iyi değerleri sunarak üstünlüğünü, etkinliğini, güvenilirliğini ve sağlamlığını temel yüklü güç akışı optimizasyonunda ortaya koymuştur.

Çizelge 6.27. IEEE 57-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon sonuçları

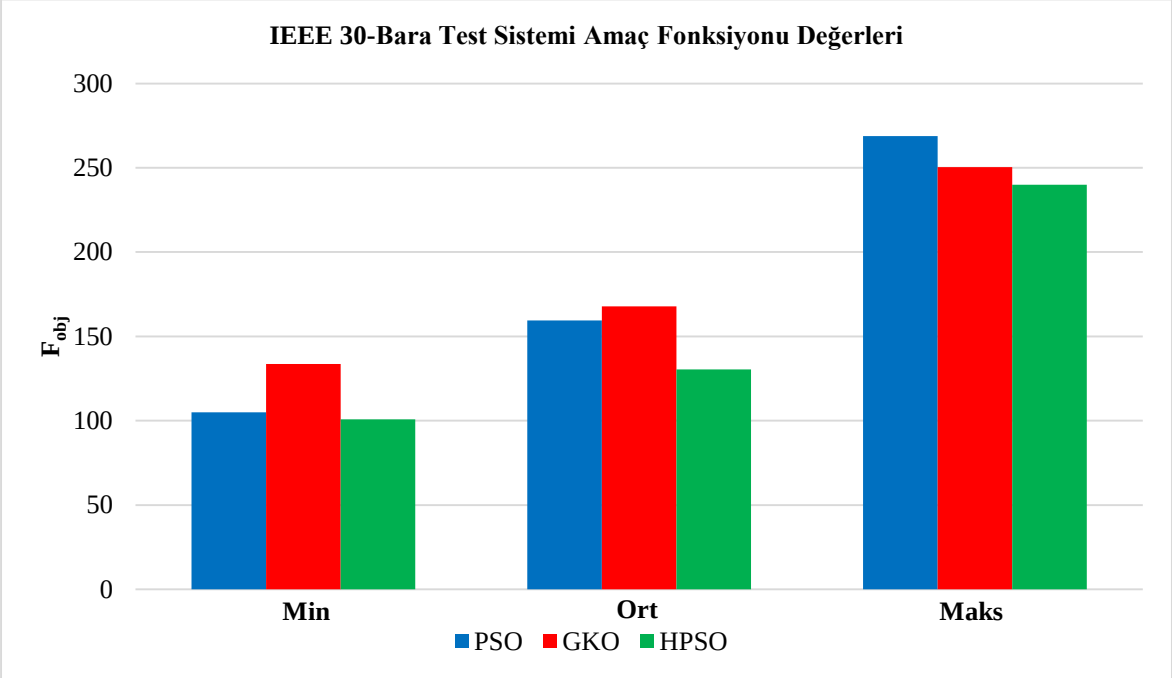
	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
Gerilim Sapması (pu.)	-	1,72	1,55	1,14	1,81	1,52	1,38
$P_{kayıp}$(MW)	28,39	25,94	24,33	21,68	21,30	19,52	17,8812
$Q_{kayıp}$(MVAr)	153,50	-57,28	16,35	-87,14	-33,20	-42,37	-54,23
Amaç Fonksiyonu	-	3002	1790	1460	1888	1610	1409
Standart Sapma	-	10,41	28,62	8,90	10,40	8,00	4,66
CPU Süresi (sn.)	0,95	253,97	284,39	245	253,70	284,40	240,08
CPU Bellek (MB)	616	623	640	645	618	640	662

6.4. IEEE 30-Bara Test Sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait Pareto En İyi Analizleri

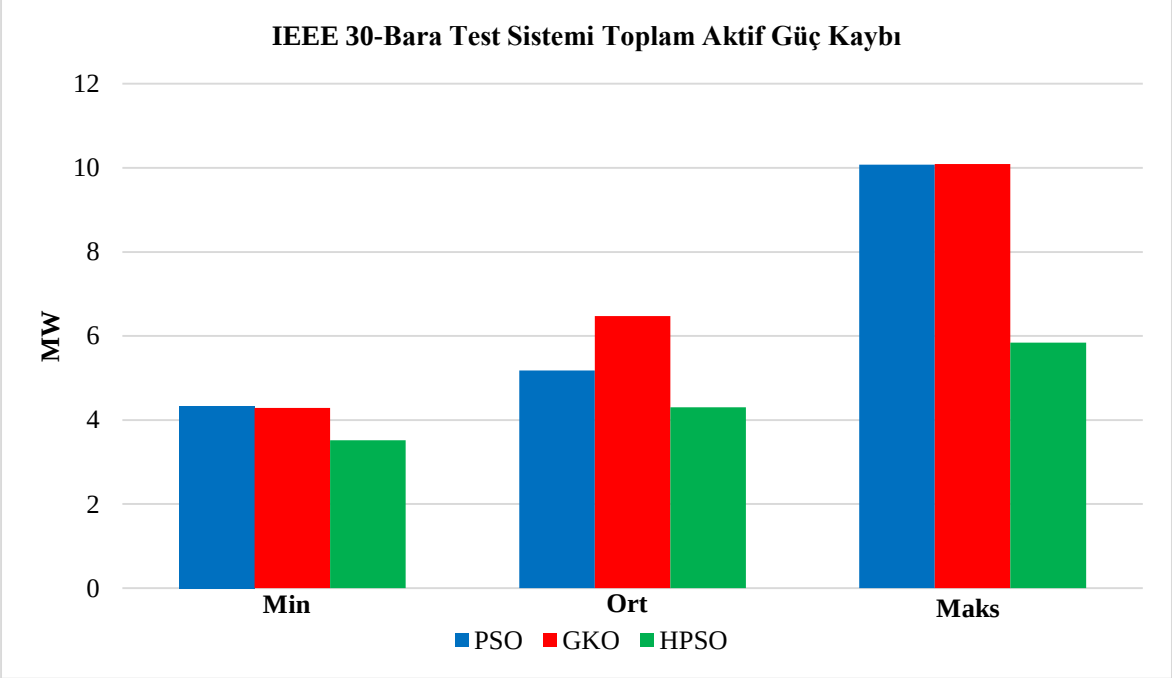
Pareto en iyi analizlerinde; meta-sezgisel algoritmaların tanımlanan amaç fonksiyonları kapsamında toplam çalıştırma sayısı boyunca ürettiği değerler kullanılmaktadır. Bu bölümde 20 kez çalıştırılan optimizasyon algoritmalardan elde edilen; IEEE 30-bara test sisteminin temel çalışma değerlerinde toplam güç kaybı ve gerilim sapmasının birlikte değerlendirildiği amaç fonksiyonu değerleri dikkate alınarak grafikler oluşturulmuştur.

Şekil 6.52'de IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyonunda, toplam aktif güç kaybı ve gerilim sapması değerlerinin bir bütün olarak değerlendirildiği amaç fonksiyonuna ait minimum, ortalama ve maksimum değerler grafiği verilmektedir. Bu grafikte 20 çalıştırma sayısı boyunca geliştirilen HPSO algoritmasının ürettiği amaç fonksiyonunun; minimum 100,75, ortalama 130,37 ve maksimum 240,00 değerlerinde en iyi sayısal değerleri ürettiği görülmüştür.

Amaç fonksiyonu en iyi değerini HPSO'dan sonra sırasıyla PSO ve GKO algoritmaları takip etmiştir.



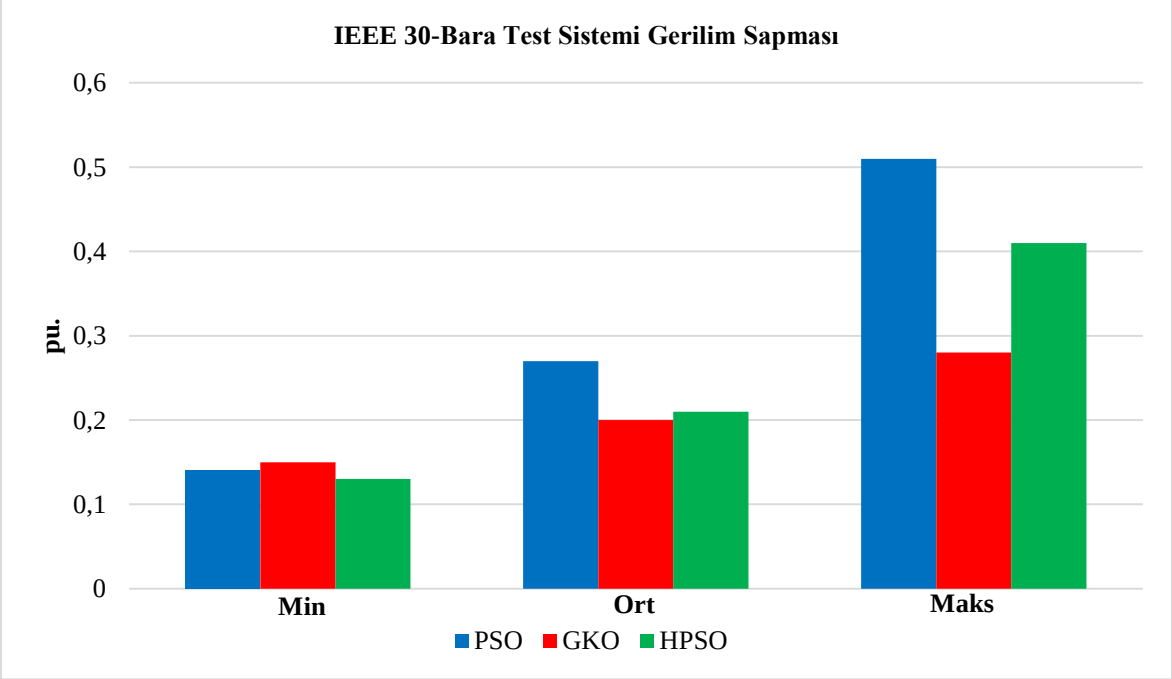
Şekil 6.52. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait amaç fonksiyonu değerleri



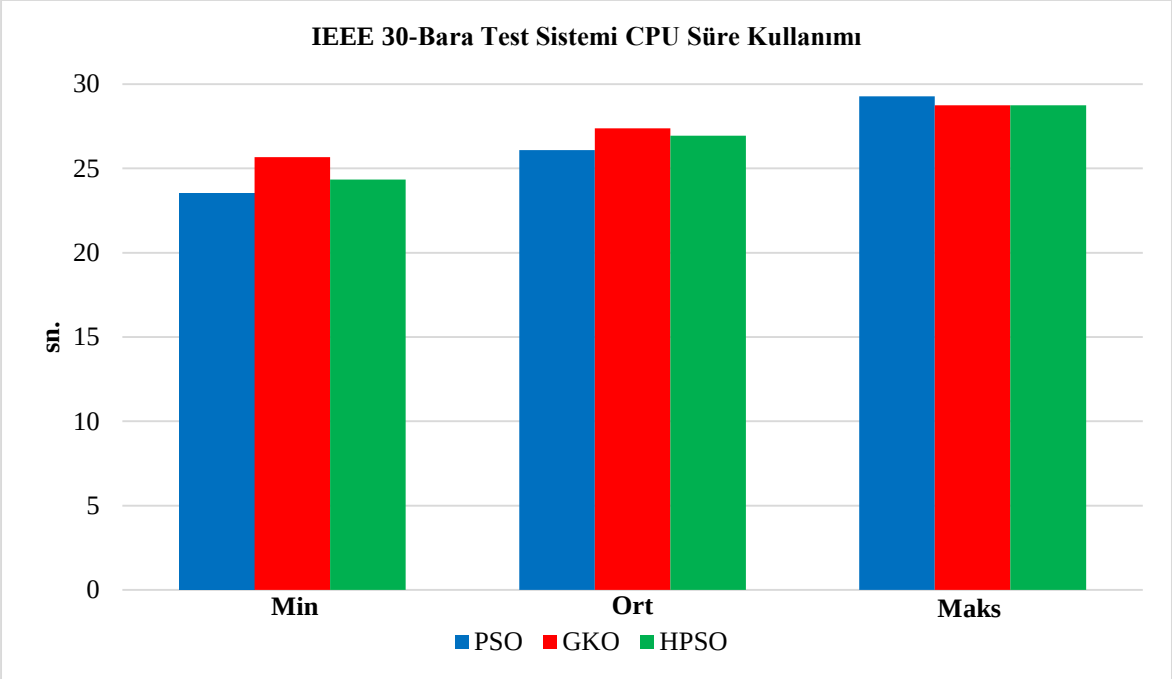
Şekil 6.53. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait toplam aktif güç kaybı

Şekil 6.53'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyonu çalışmasında; 20 çalıştırma süresince algoritmalardan elde edilen toplam aktif güç kaybı değerlerine ait minimum, ortalama ve maksimum değerler grafiği verilmektedir. HPSO algoritmasının ürettiği minimum güç kaybı 3,52 MW, ortalama güç kaybı 4,30 MW ve maksimum 5,84 MW değerlerindedir. Geliştirilen HPSO algoritmasının güç kaybını en iyi değerlere azalttığı ve PSO, GKO algoritmalarına olan üstünlüğü görülmektedir. Ortalama ve maksimum değerde PSO ikinci, GKO ise üçüncü sırada yer almıştır.

Şekil 6.54'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının 20 kez çalıştırıldığında, her birinin ürettiği minimum, ortalama ve maksimum toplam gerilim sapması değerleri verilmektedir. HPSO algoritmasının 0,13 pu. değeri ile minimum gerilim sapması değerini ürettiği belirlenmiştir. Ortalama değerlere bakıldığında 0,20 pu. değeri ile GKO algoritması, HPSO'ya göre daha iyi ortalama gerilim sapması değerini üretmiştir. Maksimum gerilim sapması değerlerinde ise GKO en az ve PSO en fazla gerilim sapması değerini sağlamıştır. Tüm değerler birlikte değerlendirildiğinde, geliştirilen HPSO algoritmasının minimum gerilim sapması değerini ürettiği ve PSO, GKO algoritmalarından üstün olduğu görülmektedir.

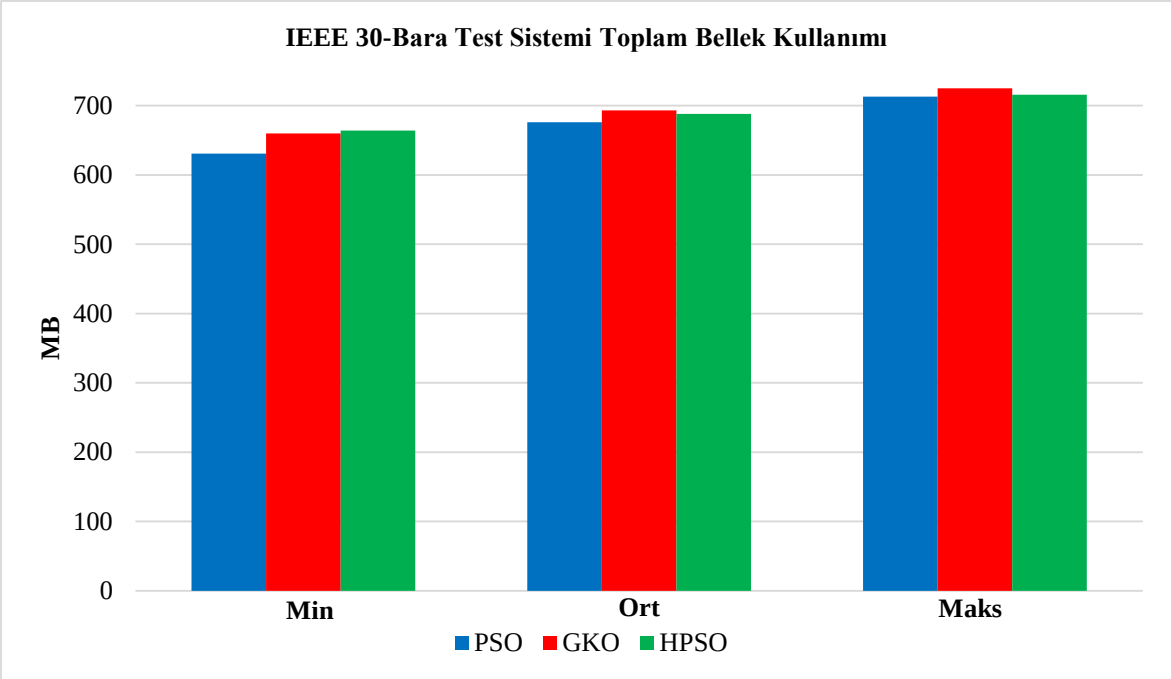


Şekil 6.54. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait toplam gerilim sapması



Şekil 6.55. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait toplam CPU süre kullanımı

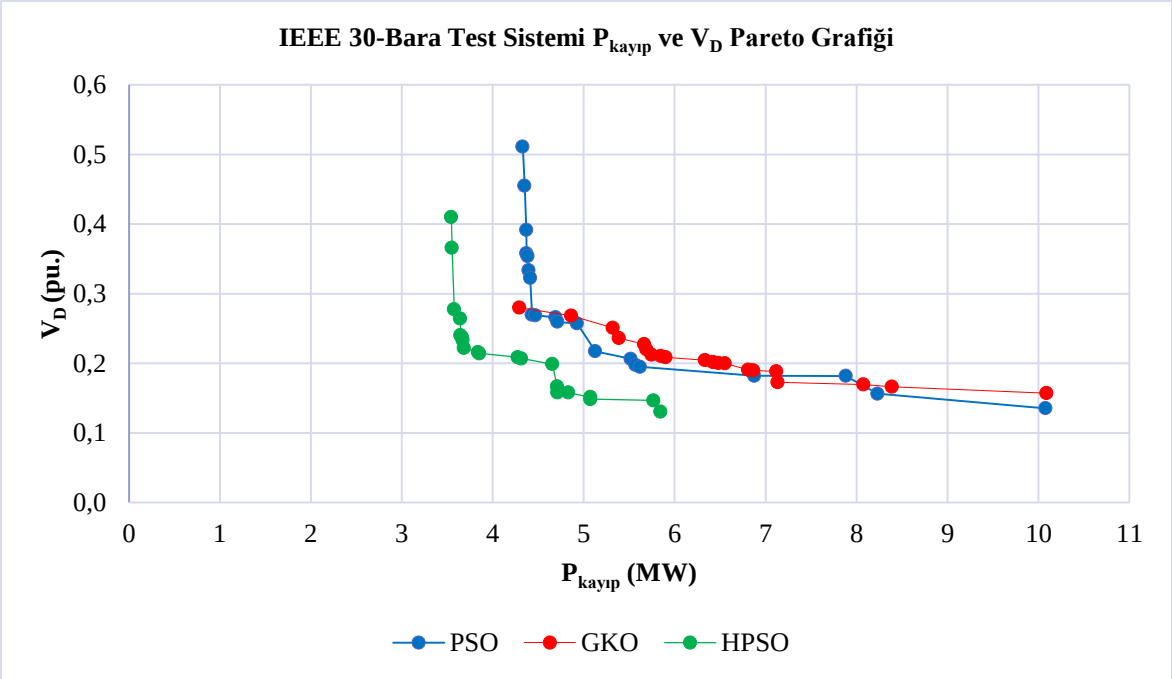
Şekil 6.55'te IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları 20 kez çalıştırılarak gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmasında, algoritmaların süre kullanımına ait minimum, ortalama ve maksimum değerler verilmektedir. PSO algoritmasının minimum 23,54 sn. ve ortalama 26,09 sn. sürede güç akışı optimizasyonunu gerçekleştirdiği görülmektedir. Ortalama 26,93 sn. süre ile HPSO ikinci, 27,37 sn. ile GKO ise üçüncü sırada yer almıştır. Maksimum değerlerde PSO 29,27 sn. en uzun süre kullanımına sahipken, GKO 28,74 sn.ve HPSO 28,75 sn. ile birbirine yakın değerlerde CPU süre kullanımı gerçekleştirmiştir.



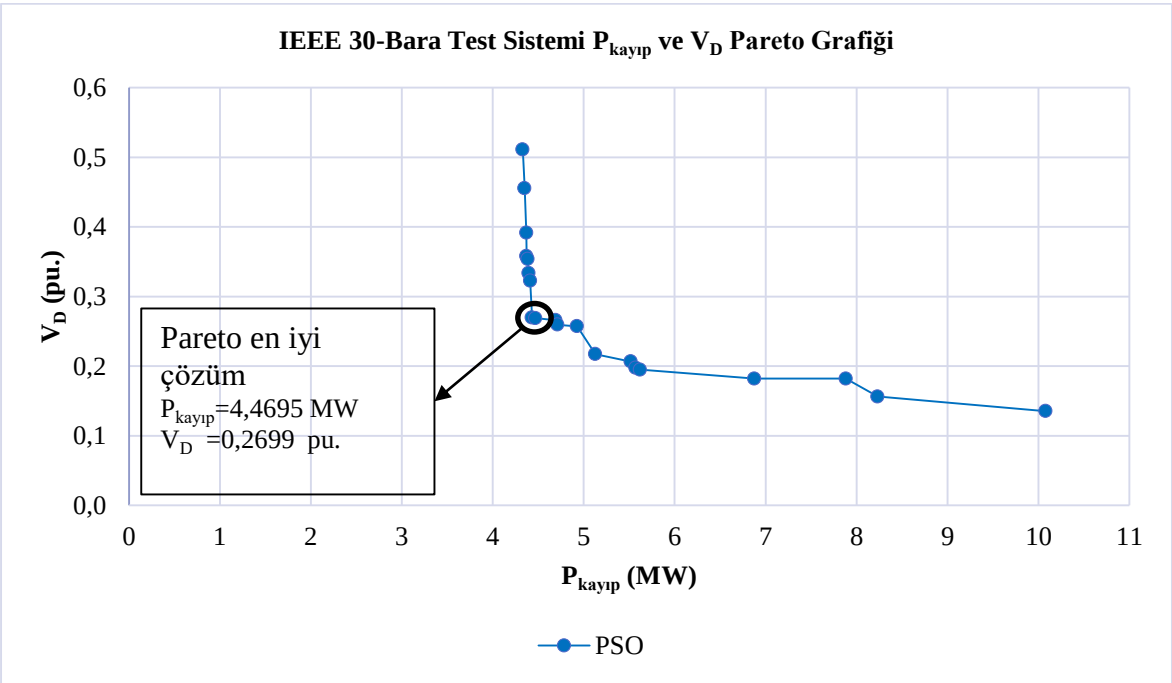
Şekil 6.56. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait toplam bellek kullanımı

Şekil 6.56'da IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmasında 20 kez çalıştırma süresince algoritmaların bellek kullanımına ait minimum, ortalama ve maksimum değerler verilmektedir. Minimum bellek kullanımını 631 MB ile PSO'nun gerçekleştirdiği, 660 MB ile GKO ikinci ve 664 MB ile HPSO üçüncü sırada yer almıştır. Ortalama değerlerde PSO 676 MB, HPSO 688 MB ve GKO 693 MB bellek kullanımı sağlamıştır. Maksimum değerlerde PSO 713 MB, HPSO 716 MB ve GKO 725 MB bellek kullanımını gerçekleştirmiştir. Bellek kullanımı sıralamasında PSO algoritması bellek kullanımı değerleri dikkate alındığında minimum, ortalama ve maksimum değerlerde en az bellek kullanarak ilk sırada yer almıştır.

Şekil 6.57-60'ta IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmaları ile 20 çalıştırma süresince gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmalarından elde edilen çok kriterli Pareto en iyi yaklaşım grafikleri verilmektedir. Şekil 6.57'de, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının 20 kez çalıştırma sayısı boyunca toplam aktif güç kaybı ($P_{kayıp}$) ve gerilim sapması (V_D) değerleri verilmektedir. Bu grafikte HPSO algoritmasına ait eğride toplam güç kaybı ve gerilim sapması değerlerinin PSO ve GKO algoritmalarından daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir.



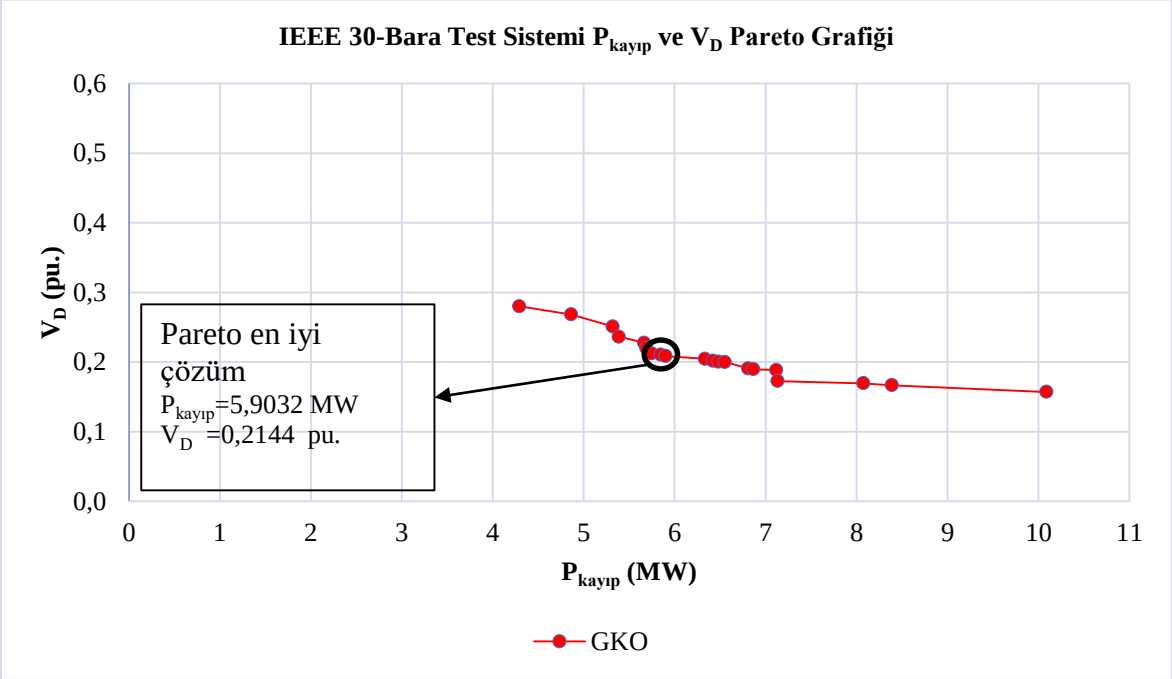
Şekil 6.57. IEEE 30-bara test sisteminde PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait Pareto grafiği



Şekil 6.58. IEEE 30-bara test sisteminde PSO algoritmasına ait Pareto grafiği

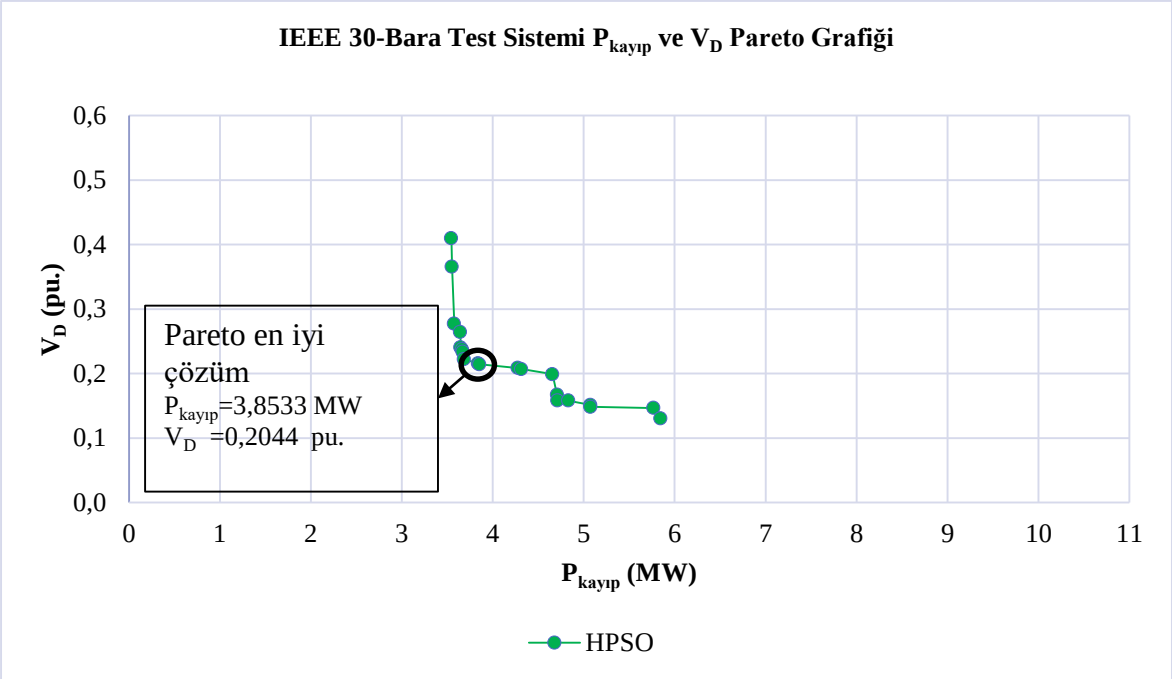
Şekil 6.58'de PSO algoritması ile 20 kez yapılan güç akışı optimizasyonunda; 4,4695 MW toplam aktif güç kaybı ve 0,2699 pu. gerilim sapması değerleri Pareto en iyi çözümüne yansımıştır.

Şekil 6.59'da GKO algoritması ile 20 kez yapılan güç akışı optimizasyonunda; 5,9032 MW toplam güç kaybı ve 0,2144 pu. gerilim sapması değerleri Pareto en iyi çözümüne yansımıştır.



Şekil 6.59. IEEE 30-bara test sisteminde GKO algoritmasına ait Pareto grafiği

Şekil 6.60'da HPSO algoritması ile 20 kez yapılan güç akışı optimizasyonunda; 3,8533 MW güç kaybı ve 0,2044 pu gerilim sapması Pareto en iyi çözüm değeri ile elde edilmiştir. Yapılan güç akışı optimizasyon çalışmalarına ait Pareto en iyi çözüm değerlendirmelerinde; 20'şer defa çalıştırılan algoritmalar içerisinde HPSO algoritmasının kendisini oluşturan PSO ve GKO algoritmalarına olan etkinlik, sağlamlık ve üstünlüğü ortaya konulmuştur.



Şekil 6.60. IEEE 30-bara test sisteminde HPSO algoritması ait Pareto grafiği

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Güç sistemlerinde oluşan hatalar, güç kayıpları ve üretimin yük talebine uyum sağlayamaması gerilim kararlılığı sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Güç iletim ve dağıtım hatlarında gerilim kararlılığı sorunları güç sistemi baralarındaki gerilim değerlerini de olumsuz etkilemektedir. Güç sisteminde olumsuz durumlar yaşanmaması amaçlı kritik baraların iyileştirilmesi ve güç sisteminin yeniden düzenlenebilmesi için çeşitli analiz tekniklerinden yararlanılmaktadır. Gerilim kararlılığı sorunlarının önlenmesi konusunda güç akışı analizi teknikleri kullanılarak iletim hattı güç kayıplarının tespiti ve gerilim sapmalarının en aza indirilmesi amaçlı çalışmalar yapılmaktadır. Ancak son yıllarda sayısal güç akışı analiz yöntemlerinin birden fazla problemde yetersiz kalması nedeniyle yerlerini nesne tabanlı sezgisel programlama tekniklerine bıraktığı belirlenmiştir [104]. Yapılan çalışmada referans olarak kullanılmak üzere uluslararası geçerliliği olan güç sistemlerinden IEEE 30 ve 57-bara test sistemi verileri kullanılarak klasik Newton-Raphson güç akışı analizi gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca bu güç sistemlerine ait veriler kullanılarak bara gerilim bilgileri, aktif ve reaktif güç üretim limitleri ve transformatör kademe ayarları belirlenerek, meta-sezgisel PSO ve GKO algoritmaları ile güç akışı optimizasyon uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Belirtilen PSO ve GKO meta-sezgisel algoritmalarının çalışma stratejisini oluşturan canlı sürülerine ait bireylerin hayatta kalabilmek için besin ararken kullandıkları keşif ve kullanım kabiliyetlerinin birbirleri arasında sentezlenmesi sonucunda yeni bir HPSO algoritma yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni HPSO algoritmasının literatürde sık kullanılan 12 adet benchmark test fonksiyonları üzerinde performans testi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan fonksiyon testlerinde, HPSO'nun kendisini oluşturan PSO ve GKO algoritmalarından daha iyi çözüm değerleri ürettiği belirlenmiştir. Böylelikle HPSO algoritmasının benchmark test fonksiyonlarının çözümünde göstermiş olduğu küresel en iyi konum tespitindeki performansı sonucunda; geliştirilen bu algoritmanın etkin ve üstün bir yöntem olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca PSO, GKO ve geliştirilen HPSO algoritması ile aktif ve reaktif güç üretim limitleri belirlenen IEEE 30-bara test sistemi verileri kullanılarak farklı senaryolarda güç akışı optimizasyon uygulamaları yapılmıştır.

Bu çalışmada; güç sisteminde kararlılığın sınıflandırılması, gerilim kararlılığının tanımlanması, güç ve bara sistemlerinin tanıtımı, güç akışı analizleri, güç akışı analizlerinde kullanılan klasik metotlar, güç akışı optimizasyon teknikleri, problemin ve çalışma mimarisinin tanımlanması, amaç fonksiyonlarının belirlenmesi, meta-sezgisel algoritmalar ve benchmark test fonksiyonlarının çözümü vurgulanmıştır.

Meta-sezgisel algoritmalardan PSO, GKO ve geliştirilen HPSO algoritmaları kullanılarak yapılan güç akışı optimizasyonu uygulamalarında; güç kayıp ve gerilim sapması azaltımı amaçlı 2 amaç fonksiyonu ile IEEE 30-bara test sisteminde 6 farklı senaryo oluşturularak sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan güç akışı optimizasyon çalışmaları sonucunda meta-sezgisel algoritmalardan PSO ve GKO'nun hibritlenmesi ile geliştirilen HPSO algoritmasının daha iyi sonuçlar ürettiği belirlenmiştir. Bunlara ilaveten algoritmaların farklı bara test sistemlerindeki performansını ölçmek üzere IEEE 57-bara test sistemi temel yüklü güç akışı optimizasyonu da ayrıca gerçekleştirilmiştir.

Yapılan güç akışı optimizasyon çalışmalarında; algoritmaların performansı reaktif güç kompansatörü devre dışı bırakılarak ve devreye alınarak 7 başlıkta ölçülmüştür. Bu başlıklar; amaç fonksiyonu, gerilim ve faz açısı bilgileri, gerilim sapması, aktif ve reaktif güç üretim ve kayıp değerleri, hesaplama süreleri ve bellek kullanım değerleridir. Gerçekleştirilen tüm optimizasyon çalışmaları sonucunda, IEEE 30 ve 57-bara test sistemi üzerinde meta-sezgisel algoritmalardan PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının tanımlanan eşitlik ve eşitsizlik sabiteleri kapsamında başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir.

Geliştirilen HPSO algoritması ile güç akışı optimizasyonu sonucunda elde edilen güç kaybı ve gerilim kararlılığı değerlerinin diğer PSO ve GKO meta-sezgisel algoritmalarına göre daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Gerilim bilgileri, gerilim sapması konusunda 1 pu. değere en yakın değerlerin üretimi ve güç kaybı azaltımı konusunda HPSO algoritması IEEE 30 ve 57-bara test sistemi üzerinde en iyi sonuçları üretmiştir. Gerilim açı bilgilerine bakıldığında HPSO algoritması ilk sırada yer alırken, GKO 2. sırada PSO ise son sırada yer almıştır. Toplam aktif güç kaybı değerlerine bakıldığında, HPSO üstünlüğünü koruyarak her üç algoritma içerisinde güç kaybı azaltımında en iyi değerleri sunmuştur. PSO ise HPSO'dan sonra aktif güç kaybı azaltımında 2. sırada, GKO ise son sırada yer almaktadır. CPU hesaplama süreleri dikkate alındığında en hızlı sonuç üreten PSO iken 2. sırada GKO, 3. sırada HPSO yer almıştır.

HPSO algoritmasının amaç fonksiyonu değerleri, gerilim kararlılığı ve aktif güç kaybının azaltılması, gerilim ve gerilim faz açıları başlıklarında çok iyi değerler ürettiği görülmüştür. CPU hesaplama süreleri ve toplam bellek kullanımı başlıklarında ise değerlerin algoritma çalışma durumuna bağlı artabildiği belirlenmiştir. Toplam bellek kullanımı değerlerinde HPSO algoritmasının en fazla bellek kullanımını gerçekleştirdiği belirlenmiştir.

Çizelge 7.1'de IEEE 30-bara test sisteminde temel yük, %25 ve %50 yük artırımları yapıldığında, önce RGK devre dışı bırakılarak, daha sonra RGK güç sistemine dahil edilerek gerçekleştirilen güç akışı optimizasyon çalışmaları bir bütün olarak değerlendirilmiştir. NR güç akış analizi ve PSO, GKO, HPSO algoritmalarının gerilim sapması, aktif ve reaktif güç kaybı, amaç fonksiyonu, standart sapma değerleri, CPU süre ve bellek kullanım değerlerine ait performans karşılaştırmasına ait tablo verilmektedir.

Çizelge 7.1. IEEE 30-bara test sistemi temel yük, %25 ve %50 yük artırımlı RGK'sız ve RGK'lı PSO, GKO ve HPSO algoritmalarına ait optimizasyon performansları

	NR	RGK Devre dışı			RGK Devrede		
		PSO	GKO	HPSO	PSO	GKO	HPSO
Gerilim Sapması (pu.)	-	**	***	****	*	**	***
$P_{kayıp}$(MW)	*	***	**	****	**	*	***
$Q_{kayıp}$(MVAr)	*	**	***	****	*	**	***
Amaç Fonksiyonu	-	**	***	****	*	**	***
Standart Sapma	-	**	***	****	*	**	***
CPU Süresi (sn.)	****	***	**	*	**	***	*
CPU Bellek (MB)	*	****	***	**	***	**	*
****: Çok Başarılı, ***:Başarılı, **:Orta Başarılı, *En az başarılı							

RGK devre dışı bırakıldığında; gerilim sapması değerinde en az başarılı PSO olurken, en başarılı olarak HPSO algoritması gözlemlenmiştir. Toplam aktif güç kayıp bilgilerinde en az başarılı NR güç akışı tekniği olurken, en başarılı HPSO algoritması olarak belirlenmiştir. Toplam reaktif güç kayıp bilgilerinde en az başarılı NR güç akışı tekniği olurken, en başarılı HPSO algoritması olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu bilgilerinde en az başarılı PSO algoritması olurken, en başarılı HPSO algoritması olarak belirlenmiştir. Standart sapma bilgilerinde en az başarılı PSO algoritması olurken, en başarılı HPSO algoritması olarak belirlenmiştir. CPU süre kullanım değerlerinde en az başarılı HPSO algoritması olurken, en başarılı NR güç akışı analizi tekniği olarak belirlenmiştir.

CPU bellek kullanım değerlerinde en az başarılı NR güç akışı analizi tekniği olurken, en başarılı PSO algoritması olarak belirlenmiştir. RGK devre dışı bırakıldığında CPU süre ve bellek kullanımı değerleri haricinde tüm başlıklarda HPSO algoritmasının etkin ve üstün olduğu tespit edilmiştir.

RGK güç sistemine dahil edildiğinde; gerilim sapması değerinde en az başarılı PSO algoritması olurken, en başarılı HPSO olarak gözlemlenmiştir. Toplam aktif güç kayıp bilgilerinde en az başarılı GKO algoritması olurken, en başarılı HPSO algoritması olarak belirlenmiştir. Toplam reaktif güç kayıp bilgilerinde en az başarılı PSO algoritması olurken, en başarılı HPSO algoritması olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu bilgilerinde en az başarılı PSO algoritması olurken, en başarılı HPSO algoritması olarak belirlenmiştir. Standart sapma bilgilerinde en az başarılı PSO algoritması olurken, en başarılı HPSO algoritması olarak belirlenmiştir. CPU süre kullanım değerlerinde en az başarılı HPSO algoritması olurken, en başarılı GKO algoritması olarak belirlenmiştir. CPU bellek kullanım değerlerinde en az başarılı HPSO algoritması olurken, en başarılı PSO algoritması olarak belirlenmiştir. RGK devreye alındığında CPU süre ve bellek kullanımı değerleri haricinde tüm başlıklarda HPSO algoritmasının etkin ve üstün olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasında geliştirilen yeni HPSO algoritmasının IEEE 30-bara test sisteminde, temel yük durumu için performans parametrelerinin literatürde gerçekleştirilen diğer meta-sezgisel algoritmalarla karşılaştırılması yapılmıştır. Literatürde gerçekleştirilen meta-sezgisel algoritmaların sonuçları ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar önce RGK devre dışı bırakılarak, daha sonra RGK güç sistemine dahil edilerek bir arada değerlendirildiğinde; NR güç akış analizi ve PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının gerilim sapması ve aktif güç kaybı değerlerinin verildiği 15 farklı çalışmanın performans karşılaştırmasına ait veriler Çizelge 7.2'de verilmektedir.

Çeşitli meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları ile IEEE 30-bara test sistemi temel yüklü durumda yapılan güç akışı çalışmalarında elde edilen toplam aktif güç kaybı değerleri bazında algoritmaların verimliliği değerlendirildiğinde; Farh ve arkadaşları yeni bir karga arama algoritması ile IEEE 30-bara test sistemi güç akışı optimizasyonu çalışmalarında en iyi 4,55 MW güç kaybı değeri ile çalışma verimliliğini %98,39 bildirmişlerdir [24].

Ela ve diğerleri diferansiyel evrim algoritması ile IEEE 30-bara test sistemi güç akışı optimizasyonu çalışmalarında en iyi 7,63 MW güç kaybı değeri ile çalışma verimliliğini %97,31 olarak bildirmişlerdir [26].

Naderi ve diğerleri 4,99 MW toplam güç kaybı ve 0,44 pu. gerilim sapması değeri ile çalışma verimliliğini %98,24 olarak sonuçlandırmıştır [36]. Elsehiemy ve diğerleri 0,32 pu. gerilim sapması ve 4,55 MW toplam aktif güç kaybı ile çalışma verimliliğini %98,39 olarak vurgulamıştır [37].

Khan ve çalışma arkadaşlarının IEEE 30-bara test sistemi en iyi reaktif güç akışı optimizasyonu çalışmalarında 4,41 MW güç kaybı değeri ile çalışma verimliliğini %98,44 olarak açıklamışlardır [41]. Hasan ve diğerleri IEEE 30-bara test sistemini yeniden yapılandırarak NR güç akışı analizi güç kaybı değerlerini yarıya indirmeyi başararak 9,59 MW toplam aktif güç kaybı değeri ve %96,62 verimlilik açıklamışlardır [43].

Khan ve çalışma arkadaşları IEEE 30-bara test sistemi üzerinde değiştirilmiş salp sürü algoritması ile gerçekleştirdikleri SSSC kapasite ve konum optimizasyonu çalışmasında toplam aktif güç kaybını 4,35 MW, toplam gerilim sapması değerini ise 0,12 pu. olarak açıklayarak çalışma verimliliğini %98,47 olarak vurgulamıştır [47].

Rajan ve arkadaşı IEEE 30-bara test sistemi güç akışı optimizasyonu çalışmalarında %98,41 ve %98,42 algoritma verimliliği bildirmiştir [151,153], Heidari ve arkadaşlarının yaptığı optimizasyon çalışmasında [152] güç sistemi kayıplarını diğer çalışmalara göre belirli oranda azaltarak %98,42 optimizasyon verimliliği bildirmişlerdir.

Bhattacharya ve arkadaşı ise biyo-coğrafya algoritması ile IEEE 30-bara test sisteminde reaktif güç kayıp optimizasyonu ile toplam sistem verimini %98,39 olarak sunmuşlardır [154].

En az güç kaybı verimliliği %93,81 ile NR güç akış analizi ile gerçekleştirilirken, en verimli algoritmanın ise Çizelge 7.2'deki literatür çalışmaları da dahil olmak üzere %98,76 ile yeni geliştirilen HPSO algoritmasına ait olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.2. Temel yüklü IEEE 30-bara test sistemi NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının literatürdeki çalışmalarla verimliliklerinin karşılaştırılması

Algoritma	Gerilim Sapması (pu.)	$P_{kayıp}$ (MW)	Verimlilik (%)
NR	-	17,53	93,81
PSO	0,26	4,33	98,47
GKO	0,23	4,29	98,49
HPSO [24]	0,12	4,55	98,39
DEA [26]	0,57	7,63	97,31
HSAPSO [36]	0,44	4,99	98,24
HPSO[37]	0,32	4,55	98,39
FPSOGSA[41]	0,15	4,41	98,44
RA[43]	-	9,59	96,62
MSSA[47]	0,12	4,35	98,47
EMA[151]	-	4,49	98,42
GBWCA[152]	-	4,48	98,42
HFFA[153]	-	4,52	98,41
BBO[154]	-	4,55	98,39
FPSO[155]	0,12	4,87	98,28
****HPSO**	**0,13**	**3,52**	**98,76**

Algoritmaların verimliliklerinin farklı büyüklükteki güç sisteminde değerlendirilmesi amacıyla IEEE 57-bara test sistemi temel yüklü durumda çeşitli meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak yapılan güç akışı çalışmalarından elde edilen gerilim sapması ve aktif güç kaybı değerleri Çizelge 7.3'te verilmektedir. Güç sisteminin toplam aktif güç kaybı dikkate alınarak algoritmaların verimliliği değerlendirildiğinde; Khan ve arkadaşlarının IEEE 57-bara test sisteminde en iyi reaktif güç akışı optimizasyonu çalışmalarında toplam gerilim sapması değerini 0,80 ve güç kaybı değerini 22,9185 MW olarak çalışma verimliliğini %98,17 olarak açıklamıştır [41].

Khan ve arkadaşları IEEE 57-bara test sistemi üzerinde değiştirilmiş salp sürü algoritması ile gerçekleştirdikleri SSSC kapasite ve konum optimizasyonu çalışmasında toplam aktif güç kaybını 23,9779 MW, toplam gerilim sapması değerini ise 0,97 pu. olarak açıklayarak çalışma verimliliğini %98,08 olarak vurgulamıştır [47].

Villa-Acevedo ve arkadaşları en iyi reaktif güç dağıtım problemi için yeni bir kısıtlama yönetimi yaklaşımında özel genetik algoritma kullanarak toplam aktif güç kaybını 23,8360 MW, toplam gerilim sapması değerini ise 2,70 pu. olarak açıklayarak çalışma verimliliğini %98,09 olarak vurgulamıştır [156].

Shin Mei ve arkadaşları güve alevi optimizasyon algoritması kullanarak güç kayıp azaltımı amaçlı optimum reaktif güç dağıtım çözümü yöntemi ile IEEE 57-bara test sisteminde toplam aktif güç kaybını 24,2529 MW açıklayarak çalışma verimliliğini %98,06 olarak bildirmiştir [157].

IEEE 57-bara test sisteminde en az güç kaybı verimliliği %97,73 ile NR güç akış analizi ile gerçekleştirilirken, en verimli algoritmanın ise Çizelge 7.3'deki literatür çalışmaları da dahil olmak üzere %98,57 ile yeni geliştirilen HPSO algoritmasına ait olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.3. Temel yüklü IEEE 57-bara test sistemi NR, PSO, GKO ve HPSO algoritmalarının literatürdeki çalışmalarla verimliliklerinin karşılaştırılması

Algoritma	Gerilim Sapması (pu.)	$P_{kayıp}$ (MW)	Verimlilik (%)
NR	-	28,3900	97,73
PSO	1,81	21,3000	98,30
GKO	1,52	19,5200	98,44
FPSOGSA[41]	0,80	22,9185	98,17
MSSA[47]	0,94	23,9779	98,08
SGA[156]	2,70	23,8360	98,09
MFO[157]	-	24,2529	98,06
****HPSO**	**1,38**	**17,8812**	**98,57**

Gerçekleştirilen NR, PSO, GKO ve HPSO güç akışı optimizasyonu çalışmalarının uluslararası IEEE güç sistemi üzerinde 6 farklı senaryo ile test edilmesi nedeniyle güç sistemlerinde kapasite artışı olması durumunda, algoritmaların performansının nasıl etkileneceği ayrıca gözlemlenmiştir.

IEEE 30-bara test sistemi temel yük, %25 ve %50 yük artırımı değerleri ile güç sisteminin kapasitesinin artması durumunda yapılan algoritma çalışmalarının geçerliliği ve kararlılığı doğrulanmıştır. Reaktif güç kompansatörü ünitelerinin devre dışı bırakılması veya devreye dahil edilmesi durumunda ise algoritmaların avantajlı durumlarının değişmediği belirlenmiştir.

Bunlara ilaveten farklı büyüklükteki temel yüklü IEEE 57-bara test sisteminin kullanılması halinde algoritma performanslarının etkilenmediği yapılan güç akışı optimizasyon çalışmaları ile doğrulanmıştır.

Yapılan benchmark fonksiyon testleri ve güç sistemi farklı senaryolarındaki güç akışı optimizasyonlarında, geliştirilen HPSO algoritmasının tüm şartlarda güvenli, pratik, üstün ve etkin kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Geliştirilen HPSO algoritmasının ayrıca günümüzde farklı güncel optimizasyon problemlerine uygulanabileceği değerlendirilmiştir.

Dağıtık üretimin günümüzde artarak devam etmesi nedeniyle önerilen yeni metodun özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke bağlantılarında uygun konum ve kapasite tayininin yapılmasında tercih edilebileceği uygun görülmektedir.

Yapılan çalışmalarda kullanılan IEEE şebeke tiplerinin halka tipi şebeke olması ve yük taleplerinin sabit olması bir dezavantaj olarak algılanabilirken, radyal iletim ve dağıtım şebekelerinde gerilim düşümlerinin önüne geçmek için şönt reaktif güç kompansatörlerinin ve dağıtık üretim santrallerinin iletim hattı gerilim düşümlerinin fazlaca olduğu bölümlerinde en uygun kapasite ile konumlandırılması faydalı olarak değerlendirilebilir.

Önerilen güç akışı optimizasyon çalışmaları kullanılarak ulusal yük dağıtım merkezlerince mevcut enterkonnekte bağlı güç sistemlerinin kararlı hal çalışma durumlarının değerlendirilmesi ile olası gerilim kararlılığı sorunlarının öngörülmesi sağlanabilir. Ayrıca güç akışı optimizasyon çalışmaları sonucunda; güç iletim hatlarında oluşan güç kayıp değerleri elde edilerek toplam güç kayıpları ve gerilim sapmaları en aza indirilebilir. Böylelikle mevcut güç sistemlerinin en uygun koşullarda işletilmesi sağlanabilir. Ayrıca mevcut PSO, GKO ve geliştirilen HPSO algoritmaları en iyi reaktif güç dağıtımı ve yenilenebilir enerji üretim santrali kapasitesi belirlenerek en uygun konumlandırılması çalışmalarında ve dinamik güç iletim sistemlerinin güç akışı yönetiminde de tercih edilebilir.

KAYNAKLAR

1. İşcan, S., Kaplan, O. ve Lokman, G. (2021). Güç sisteminde meta-sezgisel algoritmalarla güç kaybı ve gerilim kararlılığı optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 199-209.

2. Eltantawy, A. B. and Salama, M. M. (2014). A novel zooming algorithm for distribution load flow analysis for smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 1704-1711.

3. Salkuti, S. and Kim, S. (2019). Congestion management using multi-objective glowworm swarm optimization algorithm. *Journal of Electrical Engineering & Technology,* 14, 1565-1575.

4. Abdulhamid, M. (2019). Minimization of power losses and ımproving voltage profile in distribution systems by optimal allocation of distributed generation. *International Journal of Electrical Engineering*, 7(4), 11-21.

5. Reddy, S. S. and Rathnam, C. S. (2016). Optimal power flow using glowworm swarm optimization. *Electrical Power and Energy Systems,* 80, 128-139.

6. Dommel, H. and Tinney, W. (1968). Optimal power flow solutions. *IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems*, 87, 1866-1876.

7. Huneault, M., Galiana, F. and Bruno, Q. (1991). A survey of the optimal power flow literature. *IEEE Transactions on Power System*, 6(18), 762-770.

8. Nazari, A. A., Keypour, R., Beiranvand, M. H. and Amjady, N. (2020). A decoupled extended power flow analysis based on Newton-Raphson method for islanded microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* 117, 1-13.

9. Ferreira, L.C.A., Souza, A.C.Z., Granville, S. and Lima, J.W.M. (2002). Interior point method applied to voltage collapse problems and losses reduction. *IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, 149(2), 165-170.

10. Tahir, M., Nassar, M., El-Shatshat, R. and Salama, M. (2016). *A review of volt/var control techniques in passive and active power distribution networks*. 4th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, Oshawa, 57-63.

11. Esmin, A. & Lombert-Torres, G. (2012). Application of particle swarm optimization to optimal power system. *International journal of innovative computing, information & control: IJICIC,* 8(3A), 1705-1715.

12. De, M. and Goswami, S.K. (2014). Optimal reactive power procurement with voltage stability consideration in deregulated power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(5), 2078-2086.

13. Prakash, P., and Khatod, D. (2016). *An analytical approach for optimal sizing and placement of distributed generation in radial distribution systems*. 1st IEEE International Conference on Power Electronics. Intelligent Control and Energy Systems, Delhi, 1-5.

14. Rosa, W., Gerez, C., and Belati, E. (2018). Optimal distributed generation allocating using particle swarm optimization and linearized ac load flow. *IEEE Latin America Transactions,* 16(10), 2665-2670.

15. Hu, K., Cao, S., Li, W. and Zhu, F. (2019). An improved particle swarm optimization algorithm suitable for photovoltaic power tracking under partial shading conditions. *IEEE Access,* 7, 143217-143232.

16. Parashar S, Swarnkar A, Niazi K.R. and Gupta N. (2018). Multiobjective optimal sizing of battery energy storage in grid-connected microgrid. *The Journal of Engineering, IET,* 18, 5281-5283.

17. Zhang, X., Rehtanz, C. and Pal, B. (2006). *Flexible AC transmission systems modelling and control.* Berlin: Springer, 27-28.

18. Kim, B. H. and Baldick, R. (2000). A comparison of distributed optimal power flow algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems,* 15(2), 599-604.

19. Abido, M. A. (2002). Optimal power flow using particle swarm optimization. *Electrical Power and Energy Systems,* 24, 563-571.

20. Ghasemi, M., Ghavidel, S., Akbari, E. and Vahed, A. A. (2014). Solving non-linear, non-smooth and non-convex optimal power flow problems using chaotic invasive weed optimization algorithms based on chaos. *Energy*, 73, 340-353.

21. Gutiérrez D, Lopez J.M. and Vill, W.M. (2016). Metaheuristic techniques applied to the optimal reactive power dispatch: A review. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5), 2253-2263.

22. Ismail, B., Abdulwahab, N., Othman, M., Radzi, M., Vijyakumar, K. and Naain, M. N. (2020). A comprehensive review on optimal location and sizing of reactive power compensation using hybrid-based approaches for power loss reduction, voltage stability improvement, voltage profile enhancement and loadability enhancement. *IEEE Access*, 8, 222733-222765.

23. Shin, J.-R., Kim, B.-S., Park, J.-B. and Lee, K. Y. (2007). A new optimal routing algorithm for loss minimization and voltage stability improvement in radial power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(2), 648-657.

24. Farh, H. M., Al-Shaalan, A. M., Eltamaly, A. M. and Al-shamma'a, A. A. (2020). A novel crow search algorithm auto-drive PSO for optimal allocation and sizing of renewable distributed generation. *IEEE Access,* 8, 27807-27820.

25. Jamal, R., Men, B. and Khan, N. H. (2020). A novel nature inspired meta-heuristic optimization approach of GWO optimizer for optimal reactive power dispatch problems. *IEEE Access*, 8, 202596-202610.

26. Ela, A. A., Abido, M. A. and Spea, S. R. (2009). Optimal power flow using differential evolution algorithm. *Electrical Engineering*, 91, 69-78.

27. Dugue, F. M., Oliviera, L. W., Oliviera, E. J. and Souza, J. C. (2021). A costbenefit multiobjective approach for placement of meters in electrical distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 191, 1-11.

28. Suresh, M. C. and Edward, J. B. (2020). A hybrid algorithm based optimal placement of dg units for loss reduction in the distribution system. *Applied Soft Computing Journal*, 91, 1-14.

29. Nasr, M. A., Nikkhah, S., Gharehpetian, G. B., Azadani, E. N. and Hosseinian, S. H. (2020). A multiobjective voltage stability constrained energy management system for ısolated microgrids. *Electrical Power and Energy Systems*, 117, 1-11.

30. Elsayed, S. K., Kamel, S., Selim, A. and Ahmed, M. (2020). An improved heap-based optimizer for optimal reactive power dispatch. *IEEE Access*, 9, 58319-58336.

31. Dagag, F., Quassaid, M. and Ellaia, R. (2021). A new metaheuristic programming for multi-objective optimal power flow. *Electrical Engineering*, 103, 1217-1237.

32. Saha, S. and Mukherjee, V. (2016). Optimal placement and sizing of dgs in rds using chaos embedded SOS algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(10), 3671-3680.

33. Shahraki, M. H., Taghian, S. and Mirjalili, S. (2021). An improved grey wolf optimizer for solving engineering problems. *Expert Systems With Applications*, 166, 1-25.

34. Chakraborty, S., Saha, A. K., Sharma, S., Mirjalili, S., and Chakraborty, R. (2021). A Novel Enhanced Whale Optimization Algorithm for Global Optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 153, 1-28.

35. Gilvaei, M.N. and Baghramian, A. (2019). A Two-stage stochastic framework for an electricity retailer considering demand response and uncertainities using a hybrid clustering technique. *Iranian Journal of Science and Technology- Transactions of Electrical Engineering*, 43, 541-558.

36. Naderi, E., Kasmei, M. P., Cerna, F. and Lehtonen, M. (2021). A novel hybrid self-adaptive heuristic algorithm to handle single- and multi objective optimal power flow problems. *Electrical Power and Energy Systems*, 125, 1-17.

37. ElSehiemy, R. A., Selim, F., Bentouati, B. and Abido, M. A. (2020). A novel multi-objective hybrid particle swarm and salp optimization algorithm for technical-economical-environmental operation in power systems. *Energy*, 193, 1-18.

38. Ansari, M., Guo, C., Shaikh, M., Chopra, N., Haq, I. and Shen, L. (2020). Planning for distribution system with grey wolf optimization method. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 15, 1485-1499.

39. Babu, M. R., Kumar, C. V. and Anitha, S. (2021). Simultaneous reconfiguration and optimal capacitor placement using adaptive whale optimization algorithm for radial distribution system. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16, 181-190.

40. Boonraksa, T., Boonraksa, P. and Marungsri, B. (2021). Optimal capacitor location and sizing for reducing the power loss on the power distribution systems due to the dynamic

load of the electric buses charging system using the artificial bee colony algorithm. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16(4), 1821-1831.

41. Khan, N. H., Wang, Y., Tian, D., Raja, M. A., Jamal, R. and Muhammad, Y. (2020). Design of fractional particle swarm optimization gravitational search algorithm for optimal reactive power dispatch problems. *IEEE Access*, 8, 146785-146806.

42. Hemeida, M. G., Alkhalaf, S., Mohamed, A.-A. A., Ibrahim, A. A. and Senjyu, T. (2020). Distributed generators optimization based on multi-objective functions using manta rays foraging optimization algorithm (MRFO). *Energies*, 13(15), 1-34.

43. Hasan, N., Nasiruddin, I. and Pandey, Y. (2019). A novel technique for transmission loss allocation in restructured power system. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 14, 1441-1451.

44. Nguyen, T. T., Vo, D. N., Quynh, N. V. and Dai, L. (2018). Modified cuckoo search algorithm: a novel method to minimize the fuel cost. *Energies*, 11(6), 1-27.

45. Hassan, A. S., Sun, Y. and Wang, Z. (2020). Multi-objective for optimal placement and sizing dg units ın reducing loss of power and enhancing voltage profile using BPSO-SLFA. *Energy Reports*, 6, 1581-1589.

46. Elattar, E.E. and Elsayed, S.K. (2020). Optimal location and sizing of distributed generators based on renewable energy sources using modified moth flame optimization technique. *IEEE Access*, 8, 109625-109638.

47. Khan, N. H., Wang, Y., Tian, D., Jamal, R., Kamel, S. and Ebeed, M. (2021). Optimal siting and sizing of SSSC using modified salp swarm algorithm considering optimal reactive power dispatch problem. *IEEE Access*, 9, 49249-49266.

48. Uniyal, A. and Sarangi, S. (2021). Optimal network reconfiguration and dg allocation using adaptive modified whale optimization algorithm considering probabilistic load flow. *Electric Power Systems Research*, 192, 1-19.

49. Esmaili, M., Firozjaee, E.C. and Shayanfar, H.A. (2014). Optimal placement of distributed generations considering voltage stability and power losses with observing voltage-related constraints. *Applied Energy*, 113, 1252-1260.

50. Rambabu, M., Kumar, G.V. and Sivanagaraju, S. (2019). Optimal power flow of integrated renewable energy system using a thyristor controlled series compensator and a grey-wolf algorithm. *Energies*, 12, 1-18.

51. Kaymaz, E., Duman, S. and Guvenc, U. (2020). Optimal power flow solution with stochastic wind power using the le´vy coyote optimization algorithm. *Neural Computing and Applications*, 33, 6775-6804.

52. Khan, A., Hizam, H., Wahab, N.I. and Othman, M. L. (2020). Optimal power flow using hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm. *Plos One*, 15(8), 1-21.

53. Youssef, K.H. (2015). A new method for online sensitivity-based distributed voltage control and short circuit analysis of unbalanced distribution feeders. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(3), 1253-1260.

54. Abdelazez, A. and Fathy, A. (2017). A novel approach based on crow search algorithm for optimal selection of conductor size ın radial distribution networks. *Engineering Science and Technology*, 20(2), 391-402.

55. Eltantawy, A. B. and Salama, M. (2014). A novel zooming algorithm for distribution load flow analysis for smart grid. *IEEE Transactions On Smart Grid*, 5(4), 1704-1711.

56. Monsef, T., Nassar, M., Shatshat, E. and Salama, M. M. (2016, 21-24 August). *A review of Volt/Var control techniques in passive and active power distribution networks*. IEEE Smart Energy Grid Engineering, Oshawa, 57-63.

57. Ghatak, U. and Mukherjee, V. (2017). An improved load flow technique based on load current injection for modern distribution system. *Electrical Power and Energy Systems*, 84, 168-181.

58. Zhang, B., Albert, Y., Tse, D. and Domingues-Garcia, A. (2015). An optimal and distributed method for voltage regulation in power distribution systems. *IEEE Transactions On Power Systems*, 30(4), 1714-1726.

59. Sedghi, M., Amadian, A. and Golkar, M. A. (2016). Assessment of Optimization Algorithms Capability Indistribution Network Planning: Review, Comparison and Modification Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 415-434.

60. Diaz, G., Aleixandre, J. G. and Coto, J. (2016). Direct backward/forward sweep algorithm for solving load power flows in ac droop-regulated microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(5), 2208-2217.

61. Warwandkar, S.D. and Lin, J. (2017). Direct determination of load flow quantities from pq ınjections: a new formulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 89, 19-26.

62. Mosaddegh, A., Canizares, C. A., Bhattacharya, K. and Fan, H. (2017). Distributed computing architecture for optimal control of distribution feeders with smart loads. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(3), 1469-1478.

63. Kothari, D. (2012, 2-3 March). *Power system optimization*. Computational Intelligence and Signal Processing (CISP), National Conference on, Guwahati, 18-21.

64. Sedghi, M., Aliakbar-Golkar, M. and Haghifam M.R. (2013). Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 52, 221-230.

65. Prakash, D. and Laksmin, A. (2016). Optimal siting of capacitors in radial distribution network using whale optimization algorithm. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 499-409.

66. F Fontenele, Melo and Sampaio. (2016). *Application of multi-objective evolutionary algorithms in automatic restoration of radial power distribution systems*. IEEE Conference on, Natal, 33-40.

67. Steinmetz, P. (1920). Power control and stability of electric generating stations. *AIEE Transactions*, 39(2), 1215-1287.

68. IEEE. (1990). Voltage Stability of Power System: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience. *IEEE Special Publication Group on Voltage Stability*, 1-50.

69. Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Cutsem, T.V. and Vittal, V. (2004).Definition and Classification of Power System Stability. *IEEE Transactions On Power Systems, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions*, 19(2), 1387-1401.

70. Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. New York: McGrawHill, 3-17, 959-1021.

71. Taylor, C. W. (1994). *Power System Voltage Stability.* New York: McGraw-Hill, 17-34, 225-261.

72. Kundur, P. (1981). A survey of utility experiences with power plant response during partial load rejections ans system disturbances. *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, PAS-100(5), 2471-2475.

73. CIGRE. (1999). Task Force 38.02.14 Report. *Analysis and Modeling Needs of Power Systems Under Major Frequency Disturbances*, 1-50.

74. CIGRE. (1994). Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse. *CIGRE Publication*, 10-45.

75. IEEE. (1982). Proposed Terms and Definition for Power System Stability. *Transactions On Power Apparatus and Systems, PAS-101*, 1894-1897.

76. Saadat, H. (1999). *Power System Analysis.* New York: McGraw-Hill, 2-8, 102, 189.

77. Stott, B. and Alsac, O. (1974). Fast decoupled load flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 93(3), 859-869.

78. 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.

79. Bergen, A. and Vittal, V. (2000). *Power Systems Analysis*. 2nd Ed., New Jersey USA; Prentice Hall, 323-364.

80. İnternet: List of major power outages. Web: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages. Erişim Tarihi:15.12.2021.

81. Kennedy, J., Eberhart, R.C. (1995, 27 November-1 December). *Particle swarm optimization*. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, 1942-1948.

82. Hu, X., and Eberhart, R. C. (2002, 12-17 May). *Adaptive particle swarm optimization: detection and response to dynamic systems*. Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No.02TH8600), Honolulu, 1666-1670.

83. Hagh, M.T., Amiyan, P., Galvani, S. and Valizadeh, N. (2018). Probabilistic load flow using the particle swarm optimisation clustering method. *IET Generation, Transmission & Distribution,* 12(3), 781-789.

84. Shi Y. and Eberhart R.C. (2007, 16-18 August). *A modified particle swarm optimizer algorithm*. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Xi'an, 675-679.

85. Shi Y. and Eberhart R.C. (2001, 27-30 May). *Fuzzy adaptive particle swarm optimization*. Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, Seoul, 101-106.

86. M'zoughi, F., Bouallègue, S., Garrido, A.J., Garrido, I. and Ayadi, M. (2018). Stalling-free control strategies for oscillating-water-column-based wave power generation plants. *IEEE Transactions on Energy Conversion,* 33(1), 209-222.

87. Benidris, M., Elsaiah, S. and Mitra, J.(2015). Power system reliability evaluation using a state space classification technique and particle swarm optimisation search method. *IET Generation, Transmission & Distribution,* 9(14), 1865-1873.

88. Sun, Q., Shi, Y., Eberhart, R.C. and Bauson, W.A. (2003, 26 April). *Utilizing particle swarm optimization to label a structured beam matrix*. Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS'03 (Cat. No.03EX706), Indianapolis, 118-123.

89. Eberhart, R.C., Groves, D.J. and Woodward, J.K. (2017, 27 November-1 December). *Deep swarm: Nested particle swarm optimization*. 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), Honolulu, 1-6.

90. Ganguly, S. (2014). Multi-Objective planning for reactive power compensation of radial distribution networks with unified power quality conditioner allocation using particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(4), 1801-1810.

91. Hu, X, Eberhart, R.C. and Shi, Y. (2003, 26 April). *Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization*. IEEE Swarm Intelligence Symposium, Indianapolis, 193-197.

92. Eberhart R. and Kennedy, J. (1995, 4-6 October). A *new optimizer using particle swarm theory*. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, 39-43.

93. Eberhart, R.C. and Shi, Y. (2001, 27-30 May). *Particle swarm optimization: Developments, applications and resources*. Congress on Evolutionary Computation, Seoul, 81-86.

94. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Lewis, (2014). A Grey wolf optimizer, *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.

95. Jayakumar, N., Subramanian, S., Ganesan, S. and Elanchezhian, E.B. (2016). Grey wolf optimization for combined heat and power dispatch with cogeneration systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* 74, 252-264.

96. Singh, N. and Singh, S. (2017). Hybrid algorithm of particle swarm optimization and grey wolf optimizer for ımproving convergence performance. *Journal of Applied Mathematics*, 2017, 1-15.

97. Şenel, F., Gökçe, F., Yüksel, A. and Yiğit, T. (2019). A novel hybrid PSO–GWO algorithm for optimization problems. *Engineering with Computers*, 35, 1359-1373.

98. Al-Tashi, Q., Abdulkadir, S., Rais, H., Mirjalili, S. and Alhussain, H. (2019). Binary optimization using hybrid grey wolf optimization for feature selection. *IEEE Access*, 7, 39496-39508.

99. Gohil, B. and Patel, D. (2018, 16-18 August). *A hybrid GWO-PSO Algorithm for load balancing in cloud computing environment*. 2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT). Bangalore, 185-191.

100. Kushwah, Y. and Shrivastava, R. (2018). Particle swarm optimization (PSO) ınspired grey wolf optimization (GWO) algorithm. *International Journal of Mathematics Trends and Technology (IJMTT)*, 58(2), 135-149.

101. Kamboj, V. (2015). A novel hybrid PSO–GWO approach for unit commitment problem. *Neural Computing and Applications*, 27, 1643-1655.

102. Yoshida, H., Kawata, K., Fukuyama, Y., Takayama S. and Nakanishi, Y. (2000). A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(4), 1232-1239.

103. Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H. and Saryazdi, S. (2009). GSA: A gravitational search algorithm. *Information Sciences*, 179, 2232-2248.

104. Alinjak, T., Pavic, I. and Stojkov, M. (2017). Improvement of backward/forward sweep power flow method by using modified breadth-first search strategy. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(1), 102-109.

105. Hu, X., Eberhart, R.C. and Shi, Y. (2003, 26 April). *Engineering optimization with particle swarm*. IEEE Swarm Intelligence Symposium, Indianapolis, 53-57.

106. Ahmed, A., Germano, L.-T. and de Souza, A. (2005). A hybrid particle swarm optimization applied to loss power minimization. *IEEE Transactions On Power Systems*, 20(2), 859-866.

107. Shi, Y. and Eberhart, R.C. (1998, 25-27 March). *Parameter selection in particle swarm optimization*. International Conference on Evolutionary Programming, San Diego, 591-600.

108. AlRashidi and El-Hawary, M.E. (2009). A survey of particle swarm optimization applications in electric power systems. *IEEE Transactions On Evolutionary Computation*, 13(4), 913-918.

109. De Souza, A.C. (1998). Tangent vector applied to voltage collapse and loss sensivity studies. *Electric Power Systems Research*, 47(1), 65-70.

110. Taha, I.B.M. and Elattar, E.E. (2018). Optimal reactive power resources sizing for power system operations enhancement based on improved grey wolf optimiser. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(14), 3421-3434.

111. Sanjay, R., Jayabarathi, T., Raghunathan, T., Ramesh V. and Mithulananthan, N. (2017). Optimal allocation of distributed generation using hybrid grey wolf optimizer. *IEEE Access*, 5, 14807-14818.

112. Khaled, U., Eltamaly, A.M. and Beroual, A. (2017). Optimal power flow using particle swarm optimization of renewable hybrid distributed generation. *Energies*, 10(7), 1-14.

113. Chen, J.H., Yau, H.T. and Hung, W. (2014). Design and study on sliding mode extremum seeking control of the chaos embedded particle swarm optimization for maximum power point tracking in wind power systems. *Energies*, 7, 1706-1720.

114. Bhullar, S. and Ghosh, S. (2018). Optimal integration of multi distributed generation sources in radial distribution networks using a hybrid algorithm. *Energies*, 11(3), 1-15.

115. Liang, R., Tsai, S., Chen, Y. and Tseng, W. (2011). Optimal power flow by a fuzzy based hybrid particle swarm optimization approach. *Electric Power Systems Research*, 81, 1466-1474.

116. Singh, R., Mukherjee, V. and Ghoshal, S. (2016). Particle swarm optimization with an aging leader and challengers algorithm for the solution of optimal power flow problem. *Applied Soft Computing*, 40, 161-177.

117. Balachennaiah, P., Suryakalavathi, M. and Nagendra, P. (2016). Optimizing real power loss and voltage stability limit of a large transmission network using firefly algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 800-810.

118. Karaboğa, D. and Baştürk, B. (2007). Powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471.

119. Çakır, H. (2018). *Elektrik Güç Sistemleri Analizi*, İstanbul: Gelişim Üniversitesi Yayınları, 121-132.

120. Leeton, U., Uthitsunthorn, D., Kwannetr, U., Sinsuphun, N. and Kulworawanichpong, T. (19-21 May 2010). *Power Loss Minimization Using Optimal Power Flow Based on Particle Swarm Optimization*. International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Chiang Mai, 440-444.

121. Yapıcı, H. and Çetinkaya, N. (2017). An improved particle swarm optimization algorithm eagle using strategy for power loss minimization. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 1-11.

122. İnternet: 30 Bus Power Flow Test Case. Web: https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm. Erişim Tarihi:15.12.2021.

123. İnternet: 57 Bus Power Flow Test Case. Web: https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf57/pg_tca57bus.htm. Erişim Tarihi:15.12.2021.

124. Tinney, W.F. and Clifford, E.H. (1967). Power flow solution by Newton's method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 86, 1449-1460.

125. Alam, M., Muttaki, K. and Sutanto, D. (2011). *Assessment of distributed generation ımpacts on distribution networks using unbalanced three-phase power flow analysis*. Power and Energy Society General Meeting, Detroit, 1-8.

126. Chakravorty, M. and Das, D. (2001). Voltage stability analysis of radial distribution networks. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 23(2), 129-135.

127. Roytelman, I. and Ganesan, V. (2000). Coordinated local and centralized control in distribution management systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(2), 718-724.

128. Tamp, F. and Ciufo, P. (2014). A sensitivity analysis toolkit for the simplification of mv distribution network voltage management. *IEEE Transactions On Smart Grid*, 5(2), 559-568.

129. Lavaei, J., Tse, D. and Zhang, B. (2013). Geometry of power flows and optimization in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(2), 572-583.

130. Foster, J., Berry, A., Boland, N. and Waterer, H. (2014). Comparison of mixed-ınteger programming and genetic algorithm methods for distributed generation planning. *IEEE Transactions On Power Systems*, 29(2), 833-843.

131. Sudabattula, S. and Kowsalya, M. (2016). Distributed energy resources allocation using flower pollination algorithm in radial distribution systems. *Energy Procedia*, 103, 76-81.

132. Abdelazez, Y. and Fathy, A. (2017). A novel approach based on crow search algorithm for optimal selection of conductor size in radial distribution networks. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(2), 394-402.

133. Vuletic, J. and Todorovski, M. (2016). Optimal capacitor placement in distorted distribution networks with different load models using penalty free genetic algorithm. *Electrical Power and Energy Systems*, 78, 174-182.

134. Samal, P., Mohanty, S. and Ganguly, S. (2016, 13-16 November). *Planning of distributed generation and capacitor in an unbalanced radial distribution system using cuckoo search algorithm*. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016 19th International Conference on, Chiba, 1-5.

135. Sulaiman, Mustaffa, Z., Mohamed, M. and Aliman, O. (2015). Using the gray wolf optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem. *Applied Soft Computing*, 32, 286-292.

136. Thompson, R.D. (1998). *Atmospheric Processes and Systems*. Newyork:Routledge, 1.

137. Bayraktar, Z., Komurcu, M., Bossard, A. and Werner, D.H. (2013). The wind driven optimization technique and its application in electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(5), 2745-2757.

138. Wadhwa, C.L. (2010). *Electrical power systems*. Delhi: New Age International publishers, 1-10.

139. Vijayvargia, A. (2016). Comparison between different load flow methodologies by analyzing various bus systems. *International Journal of Electrical Engineering*, 9(2), 127-138.

140. Baljinnyam, S., Kees, V. and Witteveen, C. (2017). Newton power flow methods for unbalanced three-phase distribution networks. *Energies,* 10(10), 1-20.

141. Alam, M., J., M. K. and Sutanto, D. (2016). Assessment of distributed generation ımpacts on distribution networks using unbalanced three-phase power flow analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 66, 415-434.

142. Ju, Y., Wu, W., Zhang, B. and Sun, H. (2014). Loop-analysis-based continuation power flow algorithm for distribution networks. *IET Generation, Transmission & Distribution,* 8(7), 1284-1292.

143. De Vas Gunawardena, A.P.S.G., Ranatunga, N.T., Samarathunga, L.L., Weerawansha, S. D.T. and Jayatunga, U. (2016, 15 December). *Three phase asymmetrical power flow algorithm using current injection technique*. Electrical Engineering Conference (EECon), Colombo, 37-42.

144. Odilon L., T., Lourenço, M. and Garcia, A. V. (2015). Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex pu normalization. *IEEE Transactions on Power Systems,* 30(3), 1351-1358.

145. Chatterjee, S. and Mandal, S. (2017, 16-18 March). *A novel comparison of gauss-seidel and newton- raphson methods for load flow analysis*. International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), Chennai, 1-7.

146. Khammash, R.A. (2007). An efficient parallel Gauss-Seidel algorithm for the solution of load flow problems. *The International Arab Journal of Information Technology,* 4(2), 48-152.

147. Stevenson, W.D. (1982). *Elements of Power System Analysis.* New York: McGraw-Hill, 1-10.

148. Stott, B. and Alsac, O. (1974). Fast decoupled load flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* 93(3), 859-869.

149. Hocaoğlu, M., Eminoğlu, U. ve Gözel, T. (2009). Güç akışı, kararlılık ve optimizasyon analizlerinin yapılabileceği bir dağıtım sistemleri analiz paket (dsap) programının geliştirilmesi. *TÜBİTAK Projesi*, 1-11, 33.

150. Zhang, B., Albert, Y.S., Alejandro, D.D. and David, T. (2015). An optimal and distributed method for voltage regulation in power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(4), 1714-1726.

151. Rajan, A., and Malakar, T. (2016). Exchange market algorithm based optimum reactive power dispatch. *Applied. Soft Computing,* 43, 320-336.

152. Heidari, A.A., Abbaspour, R.A. and Jordehi, A.R. (2017). Gaussian bare-bones water cycle algorithm for optimal reactive power dispatch in electrical power systems. *Applied. Soft Computing*, 57, 657-671.

153. Rajan, A., and Malakar, T. (2016). Optimal reactive power dispatch using hybrid Nelder–Mead simplex based firefly algorithm. *International Journal of Electrical. Power Energy Systems*, 66, 9-24.

154. Bhattacharya, A. and Chattopadhyay, P. K., (2010). Solution of optimal reactive power flow using biogeography-based optimization. *International Journal of Electrical. Power Energy Systems*, 4, 568-576.

155. Gilvaei, M. N., Jafari, H., Ghadi, M. J. and Li, L., (2020). A novel hybrid optimization approach for reactive power dispatch problem considering voltage stability index. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 96, 1-27.

156. Villa-Acevedo, W., Lopes-Lezama, J. and Valencia-Velasquez, J., (2018). A novel constraint handling approach for the optimal reactive power dispatch problem. *Energies*, 11(9), 2352-2375.

157. Ng Shin Mei, R., Sulaiman, M.H., Mustaffa, Z., and Daniyal, H., (2017). Optimal reactive power dispatch solution by loss minimization using moth-flame optimization technique. *Applied Soft Computing*, 59, 210-222.



GAZİ GELECEKTİR...