T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TÜRKİYE 400 kV'LUK GÜÇ SİSTEMİ İÇİN SEZGİSEL YÖNTEMLER KULLANILARAK OPTİMAL FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN YERLEŞİM NOKTALARININ BELİRLENMESİ

BEYTULLAH BOZALİ

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. ALİ ÖZTÜRK

DÜZCE, 2022

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TÜRKİYE 400 kV'LUK GÜÇ SİSTEMİ İÇİN SEZGİSEL YÖNTEMLER KULLANILARAK OPTİMAL FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN YERLEŞİM NOKTALARININ BELİRLENMESİ

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

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
Düzce Üniversitesi

Eş Danışman
Doç. Dr. Salih TOSUN
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Salih TOSUN
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ahmet DEMİR
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Yunus BİÇEN
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ferzan KATIRCIOĞLU
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Metin VARAN
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi _____

Doç. Dr. Nihat PAMUK
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 16/12/2022

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

16 Aralık 2022

Beytullah BOZALİ

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen tez izleme komite üyeleri Doç. Dr. Salih TOSUN'a ve Doç. Dr. Ahmet DEMİR'e ve diğer jüri üyesi hocalarımıza şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. Pakize ERDOĞMUŞ'a, Doç. Dr. Ferzan KATIRCIOĞLU'na ve Doktora öğrencisi Bülent HOŞ'a şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması süresince fedakârlık gösteren ve bana destek olan sevgili eşim Hemide BOZALİ 'ye ve çocuklarım Buğra Tarık, Beşir Taha ve Ravza'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Üzerimde çok emeği olan sevgili annem Zehra BOZALİ 'ye ve babam Hüseyin BOZALİ 'ye ithaf olunur.

16 Aralık 2022 **Beytullah BOZALİ**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ vii

ÇİZELGE LİSTESİ ix

KISALTMALAR xi

SİMGELER xiii

ÖZET xv

ABSTRACT xvi

EXTENDED ABSTRACT xvii

1. GİRİŞ 1

2. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ (FÖB) TEKNOLOJİSİ VE YAPISI ... 6

2.1. GÜÇ SİSTEMİ GÖZLENEBİLİRLİK ANALİZİ VE FÖB'LERİN YERLEŞTİRME KURALLARI 8

2.1.1. Sayısal Gözlemlenebilirlik 8

2.1.2. Topoloji Gözlemlenebilirlik 8

2.2. FÖB'LERİN YERLEŞTİRİLMESİNDE DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR 9

2.2.1. FÖB'lerin İlk Yerleşim Yerinin Tespit Edilmesi 11

2.3. BARA GÖZLEMLENEBİLİRLİK İNDEKSİ 11

2.4. SİSTEM GÖZLENEBİLİRLİĞİ VE GÜVENİLİRLİĞİ 12

2.5. FÖB YERLEŞTİRME PROBLEMİ 13

2.6. FÖB YERLEŞTİRME PROBLEM FORMÜLASYONU 13

2.6.1. Tamsayılı Programlama İle Problem Formülasyonu 13

3. FÖB'LERİN GÜÇ SİSTEMİNE YERLEŞTİRİLME METODLARI 16

3.1. DERİNLİK ÖNCELİKLİ ARAMA YÖNTEMİ (DÖAY) 16

3.2. GRAF TEORİK YÖNTEM (GTY) 18

3.3. ÖZYİNELEMELİ N-1 GÜVENLİK YÖNTEMİ 19

3.4. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI (BTA) 20

3.5. GELİŞTİRİLMİŞ BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI (GBTA) 24

3.6. TAMSAYI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA (TDP) 27

3.6.1. Yerleşim Görselleştirme 27

3.6.1.1. *Grafik Teorisi Kullanarak Görselleştirme* *28*

3.6.1.2. *CBS Kullanarak Görselleştirme* *28*

3.7. YUSUFÇUK ALGORİTMASI (YA) 28

3.8. BINARY PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU (BPSO) 32

4. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ 35

IEEE 14-BARA TEST SİSTEM İÇİN OPTİMAL FÖB YERLEŞTİRME SONUÇLARI 37

4.1.1. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi,

DÖAY, GTY, BTA, GBTA Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları 38
4.1.2. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin TDP Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları 41
4.1.3. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin YA Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları 42
4.1.4. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin BPSO Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları 44
4.1.5. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması 46
4.1.6. IEEE 24-Bara Test Sistem İçin OFY Sonuçlarının Bulunması ve Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması 48
4.1.7. IEEE 57-Bara Test Sistem İçin OFY Sonuçlarının Bulunması ve Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması 53
4.1.8. IEEE 65-Bara Test Sistem İçin OFY Sonuçlarının Bulunması ve Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması 58
4.1.9. IEEE 300-Bara Test Sistem İçin OFY Sonuçlarının Bulunması ve Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması 62
4.2. TÜRKİYE 400 KV'LUK ENTERKONNEKTE GÜÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ÇÖZÜMÜ 69
4.2.1. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları 71
4.2.2. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin (Planlanan Yeni Hatlar ve Baralar Devreye Alınması Durumunda) Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA ve GBTA Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları 74
4.2.3. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin TDP Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları 78
4.2.4. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin (Planlanan Yeni Hatlar ve Baralar Devreye Alınması Durumunda) TDP Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları 81
4.2.5. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin YA Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları 84
4.2.6. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin BPSO Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları 87
4.2.7. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin (Planlanan Yeni Hatlar ve Baralar Devreye Alınması Durumunda) YA Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları 89
4.2.8. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin (Planlanan Yeni Hatlar ve Baralar Devreye Alınması Durumunda) BPSO Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları 91
4.3. TÜRKİYE 400 KV ENTERKONNEKTE GÜÇ SİSTEMİNİN OPTİMUM FÖB YERLEŞTİRME SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI 93
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 96
6. KAYNAKLAR 99
ÖZGEÇMİŞ 108

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. FÖB fonksiyonel blok şeması. 6
Şekil 2.2. FÖB senkronizasyonuna dayalı geniş alan ölçüm sistemi. 7
Şekil 2.3. Graf ve alt graf gösterimi. 9
Şekil 2.4. FÖB yerleştirme kuralının modellenmesi. 10
Şekil 2.5. FÖB yerleştirme kuralının modellenmesi. 10
Şekil 2.6. FÖB yerleştirme kuralının modellenmesi. 10
Şekil 3.1. DÖAY iş akış şeması. 17
Şekil 3.2. DÖAY uygulandığında ziyaret edilen düğüm sırasının gösterimi. 18
Şekil 3.3. Graf köşe ve kenar işleminin gösterimi. 19
Şekil 3.4. Özyinelemeli N-1 güvenlik yönteminin akış şeması. 20
Şekil 3.5. BTA akış şeması. 22
Şekil 3.6. Yerel maksimum noktada sıkışmış yerel arama algoritmasının gösterimi. 23
Şekil 3.7. GBTA akış şeması. 26
Şekil 3.8. Sürü içerisinde bireyler arasındaki beş ana faktör gösterimi. 29
Şekil 3.9. YA akış şeması. 31
Şekil 4.1. IEEE 14-bara test sisteminin tek hat şeması. 35
Şekil 4.2. IEEE 14-Bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme süre sonuçları. 40
Şekil 4.3. IEEE 14-Bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 40
Şekil 4.4. IEEE 14-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), SEB (sarı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil) olarak görselleştirilmesi. 41
Şekil 4.5. IEEE 14-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi. 43
Şekil 4.6. IEEE 14-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi. 45
Şekil 4.7. IEEE 24-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), SEB (sarı),FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil) olarak görselleştirilmesi. 50
Şekil 4.8. IEEE 24-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi. 51
Şekil 4.9. IEEE 24-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi. 52
Şekil 4.10. IEEE 57-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), SEB (sarı), hem FÖB hem de SEB ise (koyu kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil) olarak görselleştirilmesi. 55
Şekil 4.11. IEEE 57-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi. 57
Şekil 4.12. IEEE 57-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi. 58
Şekil 4.13. IEEE 65-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), iki FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil) olarak görselleştirilmesi. 59
Şekil 4.14. IEEE 65-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi. 60
Şekil 4.15. IEEE 65-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi. 62
Şekil 4.16. IEEE 300-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), SEB (sarı), hem FÖB hem de SEB ise baralar (koyu kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil), iki FÖB tarafından gözlenen hatlar (kırmızı) olarak görselleştirilmesi. 65
Şekil 4.17. IEEE 300-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi. 67
Şekil 4.18. IEEE 300-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi. 69
Şekil 4.19. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem: a) Güneydoğu, b) Kuzeybatı parçasının GSAAK modeli (Türkiye 400 kV'luk güç sistemin bazı

bölümleri). 70
Şekil 4.20. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme süre sonuçları. 73
Şekil 4.21. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 74
Şekil 4.22. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem, planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumunda: a) Güneydoğu, b) Kuzeybatı parçasının GSAAK modeli (Türkiye 400 kV Güç Sisteminin bazı bölümleri). 75
Şekil 4.23. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için (Yapım aşamasında olan baralar ve iletim hatları dahil) optimum FÖB yerleştirme süre sonuçları. 77
Şekil 4.24. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için planlanan yeni hatların 78
Şekil 4.25. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB tarafından gözlenemeyen hatlar (yeşil), iki FÖB tarafından gözlemlenen hatlar (kırmızı) olarak görselleştirilmesi. 80
Şekil 4.26. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil), iki FÖB bağlı hatlar (kırmızı) olarak görselleştirilmesi. 83
Şekil 4.27. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yakınsama eğrisi. 86
Şekil 4.28. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için BPSO yakınsama eğrisi. .. 88
Şekil 4.29. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yakınsama eğrisi. 90
Şekil 4.30. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için BPSO yakınsama eğrisi. .. 92
Şekil 4.31. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemleri için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması. 94

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 4.1. IEEE 14-baralı test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 38
Çizelge 4.2. IEEE 14-baralı test sistem için optimum FÖB yerleştirme karşılaştırmalı sonuçlar. 38
Çizelge 4.3. IEEE 14-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 42
Çizelge 4.4. IEEE 14-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 44
Çizelge 4.5. IEEE 14-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması. 47
Çizelge 4.6. IEEE 24-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması. 48
Çizelge 4.7. IEEE 24-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 50
Çizelge 4.8. IEEE 24-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 51
Çizelge 4.9. IEEE 57-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması. 53
Çizelge 4.10. IEEE 57-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 56
Çizelge 4.11. IEEE 57-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 57
Çizelge 4.12. IEEE 65-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 60
Çizelge 4.13. IEEE 65-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 61
Çizelge 4.14. IEEE 300-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması. 63
Çizelge 4.15. IEEE 300-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 66
Çizelge 4.16. IEEE 300-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 68
Çizelge 4.17. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 72
Çizelge 4.18. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 76
Çizelge 4.19. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 78
Çizelge 4.20. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için TDP yöntemi kullanarak, FÖB kaybı dikkate alındığında, optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 81
Çizelge 4.21. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 81
Çizelge 4.22. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için oluşacak herhangi FÖB kaybı ve iletişim hattı kesintisi durumunda, optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 82
Çizelge 4.23. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yöntemi kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 84

Çizelge 4.24. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için BPSO yöntemi kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları. 87
Çizelge 4.25. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yöntemi kullanarak optimal FÖB yerleştirme sonuçları. 89
Çizelge 4.26. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için BPSO yöntemi kullanarak optimal FÖB yerleştirme sonuçları. 91

KISALTMALAR

ABC	Artificial Bee Colony (Yapay Arı Kolonisi)
BAA	Balas Additive Algorithm
BGİ	Bara Gözlemlenebilirlik İndeksi
BILP	Binary Integer Linear Programming (İkili Tamsayılı Doğrusal Program)
BIP	Binary Integer Programming (İkili Tamsayı Program)
BOI	Bus Observability İndex (Bara Gözlemlenebilirlik İndeksi)
BPSO	Binary Particle Swarm Optimization (İkili Parçacık Sürü Optimizasyon)
BSA	Backtracking Search Algorithm
BTA	Benzetilmiş Tavlama Algoritması
BTGBOA	Bulanık Tabanlı Geliştirilmiş Balina Optimizasyon Algoritması
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
CPU	Central Processing Unit (Merkezi İşlem Birimi)
DA	Dragonfly Algorithm (Yusufçuk Algoritma)
DE	Differential Evolution
DFSM	Depth First Search Method (Derinlik İlk Arama Yöntemi)
DFT	Discrete Fourier Transform (Ayrık Fourier Dönüşümü)
DÖAY	Derin Öncelikli Arama Yöntemi
ES	Exhaustive Search (Ayrıntılı Arama)
FMWOA	Fuzzy-based Modified Whale Optimization Algorithm (Bulanık Mantık Tabanlı Modifiye Balina Optimizasyon Algoritma)
FÖB	Fazör Ölçü Birimi
FPA	Flower Pollination Algorithm (Çiçek Tozlaşma Algoritma)
GA	Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
GA-EHBSA	GA Based Enhanced Harmony and Binary Search Algorithm (GA Tabanlı Gelişmiş Uyum ve İkili Arama Algoritma)
gbest	Parçacığın Kişisel En İyi Konumu
gbest	Sürünün En İyi Konumu
GBOA	Geliştirilmiş Balina Optimizasyon Algoritması
GBTA	Geliştirilmiş Benzetilmiş Tavlama Algoritması
GIS	Geographic İnformation System (Coğrafi Bilgi Sistemi)
GPS	Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
GTh	Graph Theoretic (Procedure) (Graf Teorik)
GTY	Graf Teorik Yöntemi
HGA	Hybrid of Genetic Algorithm (Hibrid Genetik Algoritma)
GSAAK	Güç Sistemi Analizi Araç Kutusu
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGA	Immunity Genetic Algorithm (Bağışık Genetik Algoritma)
ILP	Integer Linear Programming (Tamsayı Doğrusal Program)
IP	Integer-based Programming (Tamsayı Tabanlı Programlama)
IWO	Invasive Weed Optimization (İstilacı Ot Optimizasyonu)
KAY	Kirchhoff'un Akım Yasası
KCL	Kirchhoff's Current Law (Kirchhoff Akım Yasası)
KKS	Küresel Konumlandırma Sistemi
MİB	Merkezi İşlem Birimi
M-ILP	Modified Integer Linear Programming (Değiştirilmiş Tamsayılı

	Doğrusal Program)
MSAM	Modified Simulated Annealing Method (Algorithm) (Modifiye Benzetim Tavlama Yöntem)
MST	Minimum Spanning Tree (Algorithm) (Minimum Yayılan Ağaç)
MWOA	Modified Whale Optimization Algorithm (Değiştirilmiş Balina Optimizasyon Algoritma)
NLP	Nonlinear Programming (Doğrusal Olmayan Programlama)
OFY	Optimal FÖB Yerleştirme (Optimal PMU Placement)
OPP	Optimal PMU Placement (Optimal FÖB Yerleştirme)
PMU	Phasor Measurement Unit (Fazör Ölçü Birimi)
PSAT	Power System Analysis Toolbox (Güç Sistemi Analizi Araç Kutusu)
PSO	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
PSO-MFO	Hybrid Particle Swarm-Mothflame Optimization (Hibrit Parçacık Sürü-Güve Alevi Optimizasyon)
SAM	Simulated Annealing Method (Algorithm) (Benzetim Tavlama Yöntem)
SEB	Zero-injection Bus (Sıfır Enjeksiyonlu Bara)
SEB	Sıfır Enjeksiyonlu Bara
SGAİ	Sistem Gözlemlenebilirlik Artıklık İndeksi
SORI	System Observability Redundancy Index (Sistem Gözlemlenebilirlik Artıklık İndeksi)
TDP	Tamsayı Doğrusal Programlama
TLBO	Teaching-Learning Based Optimization (Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon)
TTP	Tamsayı Tabanlı Programlama
YA	Yusufçuk Algoritması
YAK	Yapay Arı Kolonisi

SİMGELER

A	Bağlantı Matrisi
a	Hizalama
A_i	Hizalama
$a_{i,j}$	i, j. Girişin Bağlantı Matrisi
$A_{k,m}$	Binary Bağlantı [*A*] Giriş Matrisinin Eleman Değeri
c	Uyum
C	Sabit Katsayı
c_1 ve c_2	Hızlanma Sabitleri
c_i	*i.* FÖB Toplam Kurulum Maliyeti
C_i	Uyum
E	Grafikteki Kenarların Kümesi
e	Düşman
E_i	Düşmanın Pozisyonunu
f	Besin
$f(x_0)$	Hedef İşlev Değerini
$f(x_1)$	Hedef İşlev Değerini
F_i	Besin Kaynağına Doğru Çekim
i	İndeks
$_i$ ve $_r$	Düşük Güvenilirlikli Baraların Sayısı
$LRBOI_i$	Düşük Güvenilirlikli Barayı İzleyebilen FÖB'lerin Sayısı
M	Ölçüm Fazlalığı İçin Amaç Değeridir
N	Toplam Bara Sayısı
N	Komşu Bireylerin Sayısı
N	Sürünün Büyüklüğü (Toplam Bara Sayısı)
r_1 ve r_2	Parçacık Hareketine Rastgelelik Katan Sayılar
R_i	*i.* Baranın Ölçüm Fazlalığı
r_{ij}	[0, 1] Arasında Rastgele Bir Sayı
s	Ayırma
$S(V_{ij})$	Sigmoid Fonksiyonu
S_i	Ayrılma
t	Geçerli Tekrarlanma
T	Sıcaklık
T_0	İlk Kontrol Sıcaklığı
t_{max}	Maksimum Tekrarlanma Sayısı
V	İkili Vektör
V	Grafikteki Tepe Noktalarının (Düğümlerin) Kümesi
$_{Vij}(t+1)$	Parçacığın Hız Vektörünü
Vj	j. Komşu Bireyin Hızı
w	Eylemsizlik Ağırlık Değeri
w_i	*i.* Baraya FÖB Kurulum Maliyeti
X	Mevcut Bireyin Pozisyonu
X	İkili Sayısı Sistemi Değerleriyle Verilen Karar Vektörü
X^-	Düşman
X^+	Besin Kaynağı
x_0	Rastgele Bir Başlangıç Koşulu
x_1	Yeni Bir Durum
x_i	FÖB'lerin Yerleştirileceği i. Barayı İfadesi
$X_{ij}(t)$	*(T)* Zamanında *J.* Boyuttaki *İ.* Parçacığın Konum Vektörü

$X_{ij}(t+1)$	*(T+1)* Zamanında *J.* Boyuttaki *İ.* Parçacığın Konum Vektörü
Xj	j. Komşu Bireyin Konumu
X_{t+1}	Pozisyon Vektör
ΔX	Adım
τ_i	Kendisine Bağlı Dal Sayısı

ÖZET

TÜRKİYE 400 kV'LUK GÜÇ SİSTEMİ İÇİN SEZGİSEL YÖNTEMLER KULLANILARAK OPTİMAL FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN YERLEŞİM NOKTALARININ BELİRLENMESİ

Beytullah BOZALİ
Düzce Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi
Danışman: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
Aralık 2022, 107 sayfa

Güç sistemlerinin kararsızlık durumuna gelmeden önce, gerekli önlemler alınarak kararlı ve güvenilir bir şekilde çalıştırılması, sistemi izlemek ve kontrol etmekle mümkündür. Fazör Ölçüm Birimi (FÖB) cihazı, güç sistemlerinin izlenmesi, kontrolü ve korunması için sistem üzerine kurulmuş modern ölçüm cihazıdır. FÖB cihazlarının maliyetleri çok yüksek olduğundan dolayı, sisteme optimum sayıda ve tüm sistemi gözlemleyecek şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı yöntemler kullanılarak, optimal sayıda FÖB ile tüm güç sistemini gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Matlab ile uyumlu çalışan Güç Sistemi Analizi Araç Kutusu (GSAAK) programdan yararlanılarak, Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi modellenmiş ve Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi ile Optimal FÖB Yerleştirme (OFY) yapılmıştır. Sezgisel yöntem olmayan, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, Derin Öncelikli Arama Yöntemi (DÖAY), Graf Teorik Yöntemi (GTY), ve Tamsayı Doğrusal Programlama (TDP) kullanılarak OFY gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Sezgisel yöntem olan, Benzetilmiş Tavlama Algoritması (BTA), Geliştirilmiş Benzetilmiş Tavlama Algoritması (GBTA), Binary Parçacık Sürü Optimizasyonu (BPSO) ve Yusufçuk Algoritması (YA) kullanılarak Optimal FÖB yerleşim noktaları bulunmuştur. Çalışma ayrıca, Geliştirilmiş Tamsayı Doğrusal Programlama (TDP) yöntemi kullanarak yeni bir yöntem önermektedir. TDP yaklaşımı kullanılırken OFY ile elde edilen FÖB'lerin konumlarını göstermek için grafiğe dayalı kuvvet yönlendirmeli yöntemi ve coğrafi bilgi sistemini kullanarak bir haritalama sistemi ile görselleştirme tekniği kullanılmıştır. BPSO ve YA yöntemleri ile çözüm yapılırken, indekslerin çoklu çözümleri sıralamak için, Bara Gözlemlenebilirlik İndeksi (BGİ) ve Sistem Gözlemlenebilirlik Artıklık İndeksi (SGAİ) unsurları kullanılmıştır. Önerilen yöntemlerin güvenirliği, IEEE-14 Bara Test Sistemi üzerinde test edilmiştir. Önerilen yöntemler ile bulunan sonuçlar, literatürde IEEE-14 Bara Test Sistemi için, bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Güvenirliği test edilen yöntemler, Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemine uygulanmış. Sonuç olarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için optimum FÖB sayısı ve bu FÖB'lerin hangi baralara yerleştirilmesi gerektiği bilgisi farklı yöntemlerle belirlenmiştir. Bu yöntemler ilk kez Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemine uygulanmıştır. Çalışmada önerilen yöntemlerin sonuçları güç sistemi işletmecilerine alternatif bir çözüm önerisi olarak sunulmaktadır.

Anahtar sözcükler: FÖB, Gözlemlenebilirlik, Optimum FÖB yerleşimi, Sezgisel yöntemler, Türkiye 400 kV enterkonnekte güç sistemi.

ABSTRACT

DETERMİNATİON OF OPTİMAL PHASOR MEASUREMENT UNİTS SETTLEMENT POİNTS USİNG HEURİSTİC ALGORİTHMS FOR TÜRKİYE 400 kV INTERCONNECTED POWER SYSTEM

Beytullah BOZALİ
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
December 2022, 107 pages

It is possible to operate the power systems in a stable and reliable manner by taking the necessary precautions before they become unstable, by monitoring and controlling the system. The Phasor Measurement Unit (PMU) device is a modern measurement device built on the system for monitoring, control and protection of power systems. Since the costs of PMU devices are very high, they should be placed in the system in optimum numbers and in a way that can observe the whole system. In this study, it is aimed to observe the whole power system with the optimal number of PMUs using different methods. Using the Power System Analysis Toolbox (PSAT) program, which works in harmony with Matlab, Türkiye 400 kV Interconnected Power System was modeled and Optimal PMU Placement (OPP) was made with the Recursive N-1 Security Method. OPP has been performed using the Recursive N-1 Security Method, Depth First Search Method (DFSM), Graph Theory Method (GTM), and Integer Linear Programming (ILP), which are not heuristics. In addition, Optimal PMU placement points were found using the Heuristics, Simulated Annealing Algorithm (SAA), Modified Simulated Annealing Algorithm (MSAA), Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) and Dragonfly Algorithm (DA). The study also proposes a new method using the Developed Integer Linear Programming (ILP) method. While using the ILP approach, a mapping system and a visualization technique using a graphic-based force-directed method and a geographic information system were used to show the locations of PMUs obtained from OPP. While solving with BPSO and DA methods, Bus Observability Index (BOI) and System Observability Redundancy Index (SORI) elements were used to rank the multiple solutions of the indices. The reliability of the proposed methods was tested on the IEEE-14 Bus Test System. The results found with the proposed methods are compared with the results found in the literature for the IEEE-14 Bus Test System. The methods whose reliability has been tested have been applied to the Türkiye 400 kV Interconnected Power System. As a result, the optimum number of PMUs for the Türkiye 400 kV Interconnected Power System and the information on which buses these PMUs should be placed in were determined by different methods. These methods were applied for the first time to Türkiye 400 kV Interconnected Power System. The results of the methods proposed in this study are presented as an alternative solution proposal to the power system operators.

Keywords: FÖB, Observability, Optimal PMU placement, Heuristic methods, Türkiye 400 kV interconnected power system.

EXTENDED ABSTRACT

DETERMİNATİON OF OPTİMAL PHASOR MEASUREMENT UNİTS SETTLEMENT POİNTS USİNG HEURİSTİC ALGORİTHMS FOR TÜRKİYE 400 kV INTERCONNECTED POWER SYSTEM

Beytullah BOZALİ
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
December 2022, 107 pages

1. INTRODUCTION

For stable planning and operation of power systems it is necessary to reliably fully monitor the system. In order to fully observe the power system, the current, voltage, phase angle and frequency values of the system must be observed and controlled quickly. We can quickly and reliably measure the basic electrical quantities of the system, such as voltage, current, phase angle, frequency, together with PMU devices. Due to the high cost of PMUs, it is not possible to install PMUs on the buses of every transmission line in the power system. For this reason, it is of great importance to place PMU devices in appropriate places and in the optimum number of power systems. In the literature, heuristic and non-heuristic methods have been used to solve the optimum number of PMU placement problems.

Within the scope of this thesis, solutions have been realized by applying the Recursive N-1 Security Method, DFSM, GTM, SAA, MSAA, BPSO, ILP and DA methods to find the optimum number of PMU and the locations of the buses to be placed for power systems. It was applied to the IEEE-14 Bus Test System to test the accuracy of the applied methods. The methods whose accuracy was tested with the values in the literature were then applied to the 400 kV Interconnected Power System in Türkiye. In addition, OPP has been made considering the commissioning of new buses and transmission lines planned for the 400 kV Interconnected Power system in Türkiye. The optimum number of PMUs for 400 kV Interconnected Power systems in Türkiye and on which buses these PMUs should be placed have been determined. Thanks to the study, the location information of PMUs, which are of great importance in terms of providing the

management and control of the power system in a safe way, were obtained for 400 kV Interconnected Power systems in Türkiye and presented as an alternative solution to institutions and organizations working on this subject. The execution times by the CPU were also calculated and added to the study. In this study, the optimum number of PMUs to be placed and the positions of PMUs to be placed in order for the power system to be fully observable were determined.

In this thesis, the SA algorithm has been developed and applied to power systems, which is a new MSAA method. A new visualized ILP method using graph theory and geographic information system is used to solve the OPP problem. For the first time, the OPP problem was solved for the 400 kV Interconnected Power System in Türkiye using the Recursive N-1 Security Method, DFSM, GTM, SAA, MSAA, BPSO, ILP and DA methods. When comparing the methods, DA performed well when compared to other methods and also when tested even in large power systems, it successfully performed the optimal placement process. As a result, it has been determined that both the IEEE power systems and the 400 kV Interconnected Power System in Türkiye will be used efficiently, with the optimum PMU placed in the systems, they can be completely observed and the power systems can be easily managed without any collapse.

2. MATERIAL AND METHODS

In this thesis, it is aimed to find the number of PMU devices to be placed on the buses in the power system for monitoring, control and protection of 400 kV Interconnected Power Systems in Türkiye and to find the location information of the PMUs to be placed. The locations of the PMUs required to provide the entire power system observability with a minimum number of costs are modeled with a constrained optimization problem. The objective function is to reduce as much as possible the number of PMUs to be installed on the busbars in the power system.

In this study, DFSM, GTM, Recursive N-1 Security Method, SAA, SA Algorithm were developed and OPP operation was performed using a new method MSAA, BPSO, a new graphically visualized ILP and a new heuristic method, DA. In order to test whether these methods work correctly or not, they are compared with the studies in the literature with IEEE bus test systems with OPP processing. After confirming that the methods were working correctly, they were applied on the existing 400 kV Interconnected Power

System in Türkiye and on the new power system formed when the buses and transmission lines being built in addition to the Türkiye 400 kV Interconnected Power System are included. Thanks to the work done, 400 kV Interconnected Power Systems in Türkiye become completely observable with the optimum PMU placed in the systems, and they can be easily intervened without any collapse in the power systems.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this study, OPP problem solution study was carried out considering the commissioning of new buses and transmission lines planned for Türkiye 400 kV Interconnected Power System and Türkiye 400 kV Interconnected Power System. To solve the OPP problem, first of all, IEEE-14 Bus Test System DFSM, GTM, Recursive N-1 Security Method, SAA, SA Algorithm was developed and a method MSAA, BPSO, graphically visualized ILP and DA methods were applied. Optimum PMU numbers and location information obtained for the IEEE-14 Bus Test System were compared with the studies in the literature. The results of many methods in the literature of the methods we use and the results obtained from the methods we use are almost the same. This situation proved the reliability of the DFSM, GTM, Recursive N-1 Security Method, SAA, MSAA, BPSO, ILP and DA methods proposed as an alternative solution proposal in this study.

These reliable methods were applied for the first time in this study to solve the OPP problem on the 400 kV Interconnected Power System in Türkiye, and reliable results were obtained. In addition, DFSM, GTM, SAA, MSAA, BPSO, ILP and DA methods with proven reliability were applied on the IEEE-24, IEEE-57, IEEE-65, IEEE-300 Bus Test Systems and the OPP problem was solved. Optimum PMU numbers and bus locations where PMUs should be placed were determined. Thanks to the ILP method, the buses that need to be placed in the IEEE bus systems are visualized.

In IEEE bus test systems, BOI and SORI values were determined to rank the multiple solutions of the indices, as well as to determine the locations of the OPP process and PMUs using BPSO and DA methods. By using BPSO and DA methods, Optimum FÖB numbers for IEEE-24, IEEE-57, IEEE-65, IEEE-300 Bus Test Systems, locations where PMUs should be placed and SORI values were compared with studies in the literature.

By using DFSM, GTM, Recursive N-1 Security Method, SAA, MSAA, BPSO, ILP and DA methods whose reliability has been proven in this study, OPP problem solution study

was carried out for 400 kV Interconnected Power Systems in Türkiye for the first time. For the 400 kV Interconnected Power system in Türkiye, Optimum FÖB numbers, bus locations and settling time were determined by using DFSM, GTM, Recursive N-1 Security Method, SAA, MSAA.

By using the ILP method, for 400 kV Interconnected Power Systems in Türkiye, the positions of the PMUs, the lines observed by the PMU device, the lines that cannot be observed by the PMUs and the lines observed by the two PMUs are visualized. For 400 kV Interconnected Power Systems in Türkiye, using BPSO and DA methods, the optimum number of PMU, the locations where PMUs should be located, BOI, SORI values and settling time were found in this thesis study.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

With the study, optimum number of PMUs and bus information, which are of great importance for the management and control of the power system, have been determined for IEEE bus test systems and 400 kV Interconnected Power Systems in Türkiye. For solving the OPP problem, DFSM, GTM, Recursive N-1 Security Method, SAA, MSAA, BPSO, ILP and DA methods were applied for the first time for 400 kV Interconnected Power Systems in Türkiye. The DA method can fully observe the power system with a smaller number of PMUs compared to other methods. In this way, when all the constraints of the OPP problem are taken into account, the power system can be observed completely at a lower cost by using the DA method, and this provides a great cost advantage.

By using the results of OPP studies, we can plan a more reliable power system management. The proposed methods can be used as an alternative solution method in future studies for the solution of state prediction and failure analysis problems. Alternative optimization studies can be done by considering the different features of PMU devices as a constraint. The proposed methods can be used as an alternative solution method in future studies for the solution of state estimation and error analysis problems.

1. GİRİŞ

Büyük enterkonnekte güç sistemlerinin doğru bir şekilde planlanması ve verimli işletilmesi için, etkin bir şekilde gözlenebilmesi gerekmektedir. Güç sisteminin gözlemlenmesi FÖB cihazları ile sağlanmaktadır. Güç sistemlerinde, FÖB cihazları yardımıyla, akım, gerilim faz açısı ve frekans gibi temel elektriksel büyüklükler ölçülerek gözlemlenebilmektedir [1–3]. Küresel Konumlandırma Sistemi (KKS) kullanması, FÖB'lerin daha hızlı gelişmesine imkân sağlamıştır [4]. FÖB'ler, tüm elektrik şebekesinde gerilim ve akım fazörleri için gerçek zamanlı ölçümler sağlamaları nedeni ile durum tahmininde, geniş alan izlemede ve güç sisteminin kontrolünün sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır [5]. FÖB ölçümleri, siber saldırılara karşı riskleri azaltmak için yapılan çalışmalarda, reaktif güç kontrolü olarak ifade edilen Volt-VAr kontrolü çalışmalarında ve iletim ağı durum tahmini çalışmalarında sağladığı faydalar nedeniyle güç sistemlerindeki kullanımları önemli hale gelmiştir [6–9]. Güç sistemlerinin sağlıklı gözlemlenememesi nedeni ile gerekli önlemler alınmadığı durumlarda güç sisteminde elektrik kesintileri yaşanmıştır [10], [11]. FÖB cihazları maliyetleri çok yüksek olduğundan, bu cihazların kullanımı halinde büyük bütçelere ihtiyaç duyulmaktadır [12], [13]. FÖB'lerin yüksek maliyeti nedeniyle bazı trafo indirim merkezlerindeki iletişim tesislerinin eksikliğini gidermek için, güç sistemindeki her iletim hattına bir FÖB kurulması pratik değildir [14]. Trafo indirim merkezleri arasındaki doğru ve hızlı haberleşmenin sağlanabilmesi için, FÖB'lerin uygun baralara yerleştirilmeleri gerekmektedir. FÖB cihazlarının yerleştirilirken, güç sisteminin dinamik ve değişken çalışma koşulları, FÖB maliyetleri, farklı teknolojik gelişmiş koruma cihazların etkileri, Sıfır Enjeksiyonlu Bara (SEB) bulunup bulunmaması durumları dikkate alınmalıdır [15]. İletim hatlarının çalışma limitlerinin belirlenmesinde (güç transfer limiti, gerilim, açı kararlığı, frekans değeri limiti) FÖB cihazları büyük kolaylıklar sağlar. Ayrıca koruma koordinasyon çalışmalarında da FÖB cihazlarından sağlanan ölçüm bilgilerinin kullanımı güç sisteminin işletmelerine önemli avantaj sağlamaktadır [16], [17].

Rüzgâr enerjisi sistemi, güneş enerjisi sistemi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının enterkonnekte sistemlere eklenmesi çalışmalarında FÖB cihazları büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Arıza sıklığının azaltılmasında, gerilim kararlılığı, açı kararlılığı, frekans

kararlığı çalışmalarında da FÖB cihazların ürettiği verilerden büyük oranda faydalanılmaktadır. Optimal FÖB Yerleştirme (OFY) çalışmaları, tüm güç sisteminin gözlemlenebilirliğini sağlamak için minimum sayıda FÖB ve FÖB'lerin baralara karşılık gelen konumlarını belirlemişlerdir [14]. FÖB cihazı Vircinia Technology tarafından 1990 yılında geliştirilmiş ve tecrübe kazanabilmek için birçok bara sistemine takılmıştır [18]. 1995 yılında, The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) FÖB standartlarını yayınlamıştır. Yayınlanan FÖB standarttı 2005 yılında revize edilerek C37.118-2005 olarak güncellenmiştir [19]. FÖB'ler güç sistemlerin, gelişmiş gözlemlenebilirlik, koruma ve sistemin kontrol edilebilmesi için kullanılan geniş alan ölçüm sistemleri olarak tanımlamaktadır [20]. FÖB'ler den alınan ölçüm bilgileri güç sisteminin planlanması ve işletilmesinde hayati öneme sahiptir. Güç sistemine yerleştirilecek olan FÖB sayısını azaltmak için, Ohm Yasası ve Kirchhoff'un Akım Yasası (KAY) mantığından yararlanılarak her düğme cihaz koymaktansa, birkaç referans düğüm belirlenerek, güç sistemine yerleştirilecek cihaz sayısı azaltılabilmektedir. Bu durum güç sisteminin, daha az sayıda FÖB cihazı ile gözlemlenebilir olmasına imkân sağlamaktadır [5], [12], [21].

Güç Sistemlerinin gözlemlenebilirlik analizini yapabilmek için üç yaklaşım vardır. Bunlar: sayısal, topolojik ve hybrid yaklaşımlardır [22], [23]. Topolojik gözlem yaklaşımı, bir ağ tamamen gözlemlenebilmesi için ölçüm kümesi, en az bir ölçüm ağacı oluşturabilmesi gerekmektedir [24], [25]. Hybrid yaklaşım, iki ya da daha çok, farklı ağ topolojisinin, karma olarak kullanılabilir şeklinde olması gerekir. Güç sistemlerinin her barasına bir FÖB yerleştirilmesi ekonomik değildir [26]. OFY problemlerin çözümlerinde farklı algoritmalar ve yöntemler kullanılmıştır. OFY problemlerinin çözümü için sezgisel ve sezgisel olmayan yöntemler kullanıldığı belirlenmiştir [27]. OFY için üç yaklaşım önermişlerdir. Bunlar; Derinlik İlk Arama, Benzetim Tavlama ve Minimum Yayılma Ağacıdır [28]. FÖB'lerin optimum yerleşimi için, GSAAK kullanılarak, İlk Derinlik Arama, Graf Teorisi, Benzetilmiş Tavlama, Yeniden Dönen Ağaç ve Doğrudan Yayılan Ağaç gibi yöntemlerden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, TDP yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [29]. OFY için, PSAT kullanarak, DFSM, Graf Teorisi Yöntem, SAM, Yeniden Dönen Ağaç ve Doğrudan Yayılan Ağaç gibi farklı metodlar kullanılmıştır. Ayrıca ILP yöntemi güç sistemine uygulayarak elde edilen FÖB yerleştirme sonuçları karşılaştırılmıştır [14]. Bir çalışmada, ILP ve Genetik Algoritma (GA) kullanarak OFY çözümleri önermişlerdir. Önerilen yöntemler IEEE bara test sistemlerinde ve Hindistan

Güney Şebeke sistemlerine uygulamışlar. Sonuçları ILP ile karşılaştırmışlar ve önerilen GA sonuçları merkezi işlem birimi hesaplama süresinde önemli bir azalma olduğu gözlemlemişlerdir [30]. OFY problemini çözmek için, Tamsayı Tabanlı Programlama (TTP) yöntemi ve GA yöntemi önermişlerdir [31]. Diğer bir çalışmada, OFY problemini GA ve ikili tam sayılı doğrusal programlama kullanılarak çözülmüştür. Önerilen yaklaşım, farklı boyutta standart IEEE test sistemlerine uygulanmıştır. Farklı SGAİ için güç sistemine optimal yerleştirilecek FÖB'lerin lokasyonları bulmuşlardır [32]. FÖB'lerin optimum sayısını ve yerleştirme yerini belirlemek için GA yöntemi kullanılmış ve ILP yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Sonuçları IEEE test sistemleri üzerine uygulanmıştır [33]. OFY problemini çözmek için GA sezgisel yöntemi uygulamışlardır [34] – [39]. FÖB sayılarını ve yerleştirilmesi gereken baraları belirlemek için GA optimizasyonu kullanılmıştır. IEEE bara test sistemlerine ve 114 baralı Cezayir Güç Sistemi üzerinde test etmişlerdir [40]. Sistemimi tamamıyla gözlemlemek için, Geri İzleme Arama Algoritması, Diferansiyel Evrim (DE), Yapay Arı Kolonisi (YAK), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) and İstilacı Yabani Ot Optimizasyonu yöntemleri kullanılmıştır [41]. Bir çalışmada, Binary Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (BPSO) yöntemine dayanan en uygun FÖB'lerin yerleştirme problemini ele almışlardır. Elde edilen sonuçlar, tüm güç sisteminin izlenmesini sağladığını vurgulamışlardır [42]. Tüm güç sistemini tamamen gözlenmesi için, PSO ve Öğretme-Öğrenmeye Tabanlı Optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. PSO tekniğinin, SEB'ler olmadığında %20 oranında daha iyi bir çözüme yakınlaştığını belirlemişlerdir [43]. Gou çalışmasında, SEB'lerin sistemde bulunup veya bulunmaması durumları dikkate alan ILP yöntemini önermiştir [44]. SEB ölçümleri olan ve olmayan durumlar dikkate alınmış. OFY için tam gözlenebilirlik ve eksik gözlemlenebilirlik gibi durumlar geliştirilmiş ILP formülasyonuyla incelenmiştir. ILP formülasyonu, IEEE farklı test sistemlerine uygulanmış [45]. SEB'lerin etkisini OFY modeline dahil etmek için, ILP yaklaşımı kullanan bir yöntem önermişlerdir. OFY'den elde edilen FÖB'lerin konumlarını göstermek için görselleştirme tekniği kullanmışlardır [46]. Optimal FÖB yerleşimi ve maksimum tekrarlılık ile tam gözlemlenebilirlik elde etmek için Değiştirilmiş Tam Sayılı Doğrusal Programlama tekniği önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini ve kesinliğini kanıtlamak için, standart IEEE-14, 30, 57, 118 Bara Test Sistemleri ve gerçek zamanlı Hint Kuzey Bölgesi Güç Şebekesi-246 (NRPG-246) dahil olmak üzere çok çeşitli test sistemlerine uygulamıştır [47]. OFY normal sistem durumlarında SEB'lerin dahil edilmesi ve FÖB kesintisi ile ilgili beklenmedik durumlar dikkate alınarak incelenmiştir.

Önerilen yöntemin etkinliği, IEEE- 14, 24, 30, 118 Baralı Test Sistemlerinde ve Polonya 2383-Bara Test Sistemi üzerinde test edilmiştir [48]. OFY problemini için Geliştirilmiş Balina Optimizasyon Algoritması (GBOA) ve eşzamanlı optimizasyona dayalı, Bulanık Tabanlı Geliştirilmiş Balina Optimizasyon Algoritması (BTGBOA) önerilmiştir. OFY problemini, SEB'lerin güç sisteminde bulunan veya bulunmayan durumları için incelenmiştir. Önerilen yöntemler, IEEE-14, 30, 57, 118 Bara Test Sistemleri ve Polish 2383- Bara Sistemine uygulanmıştır [49]. Toplam maliyeti en aza indirmek için FÖB'lerin, güç sistemlerine en uygun şekilde yerleştirilmesi gerektiği önerilmektedir. Tamsayılı Doğrusal Programlama algoritması literatürdeki çalışmalara kıyasla iyi performans gösterdiğini vurgulamışlardır [50].

Bu tez çalışması kapsamında, güç sistemleri için, optimum sayıda FÖB ve FÖB'lerin yerleştirilmesi gereken baraların yerlerinin bulunmasına yönelik olarak, Özyinelemeli

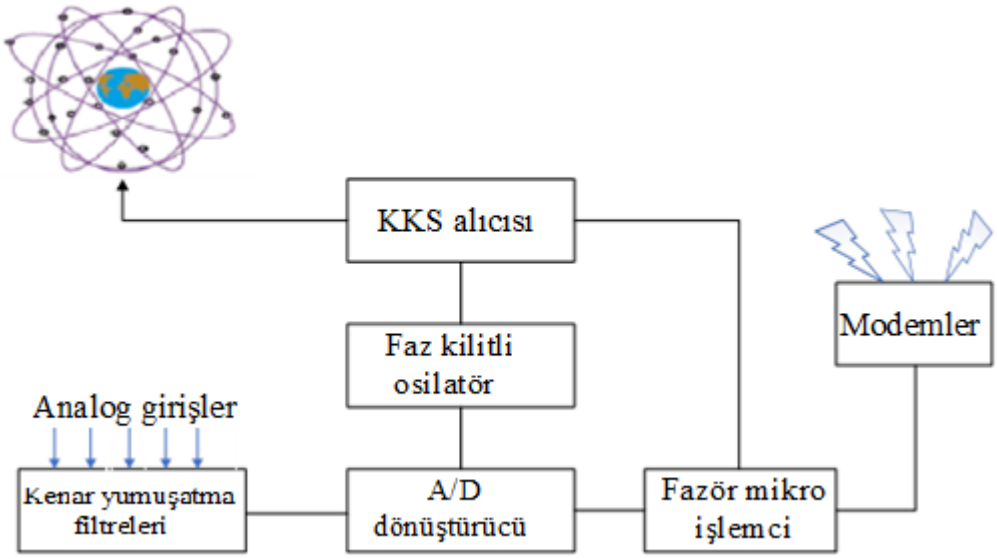
N-1 Güvenlik Yöntemi, Derin Öncelikli Arama Yöntemi (DÖAY), Graf Teorik Yöntemi (GTY), Tamsayı Doğrusal Programlama (TDP), Benzetilmiş Tavlama Algoritması (BTA), Geliştirilmiş Benzetilmiş Tavlama Algoritması (GBTA), Binary Parçacık Sürü Optimizasyonu (BPSO) ve Yusufçuk Algoritması (YA) kullanılarak çözümler yapılmıştır. Uygulanan yöntemlerin doğruluğunun test edilmesi için IEEE-14 Bara Test Sistemi üzerinde uygulanmıştır. Literatürdeki bulunan değerler ile doğruluğu test edilen yöntemler daha sonra Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistemine uygulanmıştır. Ayrıca Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç sistemi için planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumu da dikkate alınarak OFY çalışması yapılmıştır. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç sistemleri için optimum FÖB sayısı ve FÖB'lerin hangi baralara yerleştirilmesinin gerektiği belirlenmiştir. Yapılan çalışma sayesinde güç sisteminin yönetimi ve kontrolünün güvenli bir şekilde sağlanması açısından büyük öneme sahip olan FÖB'lerin lokasyon bilgileri Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemleri için elde edilmiş olup bu konuda çalışmalar yapan kurum ve kuruluşlara alternatif bir çözüm olarak sunulmuştur. Merkezi İşlem Birimi (MİB) tarafından gerçekleştirilme süreleri de hesaplanarak çalışmaya eklenmiştir. Bu çalışmayla, güç sisteminin tamamen gözlemlenebilir olması için, optimum sayıda yerleştirilmesi gereken FÖB sayısı ve FÖB'lerin yerleştirilmesi gereken konumları belirlenmiştir. Literatüre ana katkısı:

- BT algoritması geliştirilerek yeni bir yöntem olan GBTA güç sistemlerine uygulanmıştır.

- OFY problemin çözümü için grafik teorisi ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanarak görselleştirilmiş yeni bir TDP yöntemi kullanılmıştır.
- Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistemi için ilk kez Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, TDP ve YA yöntemleri kullanılarak, OFY problemi çözümü gerçekleştirilmiştir.
- Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, TDP ve YA yöntemleri ilk kez IEEE-65 Bara Test Sistemine uygulanmıştır.
- GBTA ve YA yöntemleri ilk kez IEEE-24, IEEE-57, IEEE-65, IEEE-300 Bara Test Sistemine uygulanmıştır.
- Güç sistemlerinin izlenme eksikliği nedeniyle yaşanabilecek kontrol sorunlarından kaynaklı çökmeler kolayca yönetilebilecektir.
- Bu çalışma sayesinde hem IEEE güç sistemleri hem de Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistemlerinin enerjisi verimli kullanılabilecek ve sistemlere yerleştirilen optimum FÖB sayesinde, sistemler tamamen gözlemlenebilir hale gelecektir.

2. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ (FÖB) TEKNOLOJİSİ VE YAPISI

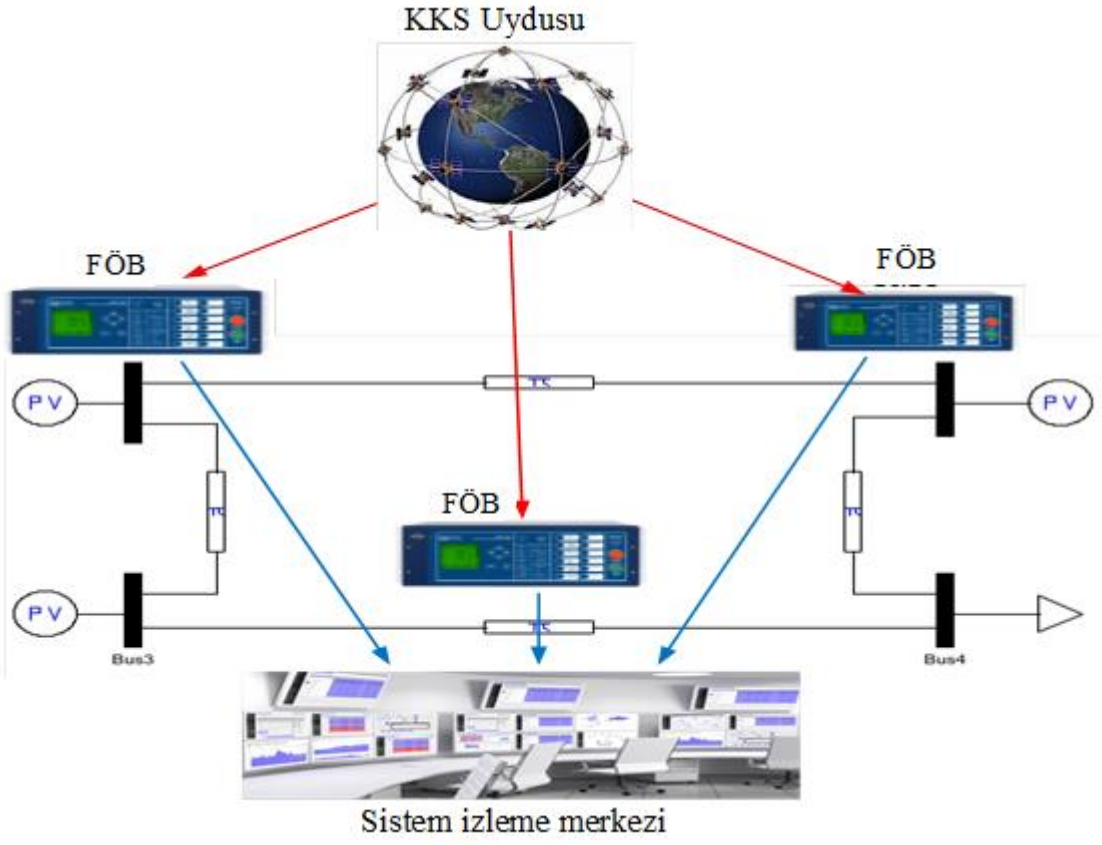
FÖB'ler güç sistemlerinde zaman senkronizasyonuna dayalı olarak fazör ölçümleri sağlayan cihazlardır. FÖB'ler, Senkronize fazör hesaplama yeteneği, güç sistemi izleme ve kontrolü, sayesinde gelecekteki en önemli ölçüm cihazlarından biri olacaktır. Şekil 2.1'de, Virginia Tech ait ilk FÖB donanım blok şeması verilmiştir [3]. FÖB cihazı güç sisteminde gerilim ve akım fazörlerini, anlık ve zaman senkronize olarak, hassas ölçüm yapabilecek şekilde üretilmektedir [21]. Güç sisteminin izlenmesi ve kontrolü için, FÖB cihazlarının senkronize fazör hesaplama yeteneğine sahip olması cihazın önemini arttırmaktadır. Şekil 2.1'de FÖB prensip şeması verilmiştir [51], [52].



Şekil 2.1. FÖB fonksiyonel blok şeması.

Güç trafosu ve akım trafosundan gelen, gerilim ve akım ölçümleri, kenar yumuşatma filtreleri tarafından filtrelenir. Kenar yumuşatma filtrelerinin çıkışından gelen sinyaller, A/D dönüştürücü kullanılarak dijital sinyale dönüştürülmektedir. Faz kilitli osilatör, CBS'den gelen referans sinyal ile örnekleme senkronizasyonunu sağlar. Dijital sinyaller, Ayrık Fourier Dönüşümü, kullanarak faz değerlerini hesaplanır. Faz değerleri hesaplandıktan sonra fazör mikro işlemciyi beslerler [33], [53]. FÖB cihazları güç sistemlerinin, gerilim ve akım fazörlerini, anlık ve zaman dayalı olarak hassas ölçüm yapabilir olarak üretilmektedir. Bir fazör ölçüm cihazı, 50/60Hz frekanslarında akım ve

gerilim ölçebilen çok gelişmiş bir cihazdır. Fazör ölçüm yöntemi, yüksek derecede çözünürlük ve doğruluk sağlar. Ölçülen fazörler, saniyede 50/60 numune yerel veya uzak bir alıcıya iletilebilir [28]. Bir FÖB cihazı, kurulu veri yolunun gerilim fazörünü ve bu veri yoluna bağlı hatların bir kısmının veya tamamının akım fazörlerini ölçebilir.



Şekil 2.2. FÖB senkronizasyonuna dayalı geniş alan ölçüm sistemi.

Sistemin oluşacak arızaları önceden tespit edilebilmek için, güç sistemin yük akışı, akıcı ve anlık olarak gözlemlenebilir olmalıdır [54]. Güç sistemlerindeki, en yoğun olduğu baralardan anlık değişim ölçümleri alınması, sistemlerini tamamen gözlemlenebilmesi ve yönetilmesi bakımından çok önemlidir [55]. Şekil 2.2'de fazör ölçüm senkronizasyonuna dayalı geniş alan ölçüm sisteminin şekli verilmektedir [56]. Şekil 2.2'ye göre, baralarda bulunan FÖB'ler tarafından ölçülen akım, gerilim ve frekans değerleri, KKS yardımıyla sistem izleme merkezine iletilmekte ve karşılaştırılmaktadır. Herhangi bir uyumsuzluk anında güç sistemine müdahale edilmektedir.

2.1. GÜÇ SİSTEMİ GÖZLENEBİLİRLİK ANALİZİ VE FÖB'LERİN YERLEŞTİRME KURALLARI

FÖB'ler pahalı cihazlardır. Bundan dolayı, güç sistemlerinin gözlenebilir olması için FÖB'lerin sisteme minimum sayıda yerleştirilmesi gerekmektedir. Tüm güç sistemi gözlemlendiği zaman, FÖB yerleştirme işlemi durdurulur. Sistemin gözlenebilir olup olmadığını incelemek amacıyla, sistemler sayısal gözlemlenebilir ve topoloji gözlemlenebilir olmak üzere iki şekilde analiz edilirler [57].

2.1.1. Sayısal Gözlemlenebilirlik

Sayısal gözlemlenebilirlik, tam olarak birleştirilmiş veya ayrılmış ölçüm modelleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, ölçüm Jacobian matrisi veya ölçüm bilgisi kazanç matrisinin sayısal çarpanlara ayrılmasına dayanmaktadır.

$$z = Hx + v$$

(2.1)

Denklem (2.1)'de *z*, m boyutların metrik vektörü *H*, m*(2N-1) boyutların Jacobian matrisi *x*,

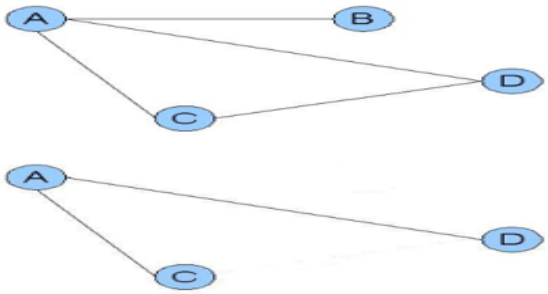
2N-1 boyutlarındaki voltaj vektörü *v*, m boyutu metrik gürültü vektörünü ifade etmektedir. Metrik Jacobian matris, Rank (H) = 2N-1 değerine sahipse (N düğüm), sistem sayısal gözlenebilirdir [58].

2.1.2. Topoloji Gözlemlenebilirlik

Ayrıştırılmış ölçüm modeli ve grafik (graf) teorisi kullanılmaktadır. Yöntemde kararlar, mantıksal işlemlerle yapılmaktadır. Bu nedenle, güç sistemin gözlemlenebilirliği, mevcut ölçüm seti ile tam bir sıralama ağacı oluşturarak yalnızca ağ bağlantısı, ölçüm türleri ve konumları hakkında bilgi gerektirmektedir [28]. Güç sistemlerini topoloji olarak temsil etmek için, sistem n uçları içeren bir graf olarak ve b kenarları olan bir graf olarak dikkate alınmaktadır. Buradaki n baraları ve b iki barayı birbirine bağlayan hatları temsil eder.

G = (V, E)
V: grafikteki tepe noktalarının (düğümlerin) kümesidir.
E: grafikteki kenarların kümesidir.
Alt graf tanımı: $G' = (V', E')$, $V' \subseteq V$, ve $E' \subseteq E$

Genellikle, eğer bir alt grafta, G'nin tüm düğümlerini içeren, yani V⊆V' olan bir G' var ise, bu güç sistemi topolojik olarak gözlemlenebilir olduğu kabul edilmektedir [59]. Şekil 2.3'te graf ve alt graf gösterimi verilmektedir.



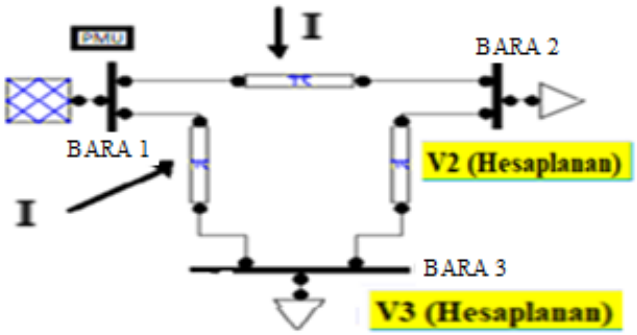
Şekil 2.3. Graf ve alt graf gösterimi.

2.2. FÖB'LERİN YERLEŞTİRİLMESİNDE DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

FÖB cihazlarının yüksek maliyetleri nedeniyle, elektrik güç sistemindeki tüm baralara yerleştirmek mümkün değildir [60]. Bundan dolayı, bu çalışmada optimizasyon probleminde ortaya çıkan amaç fonksiyonu, FÖB'lerin sayısını en aza indirmek ve yerleştirilecek baraları bulmaya çalışmaktır [48]. OFY problem formülasyonu, ağdaki tüm veri yollarının gözlemlenebilir olması için güç sistemindeki FÖB'lerin sayısını minimum sayıda olacak şekilde olmalıdır. Temel amaç, tam bir gözlemlenebilirlik ile tüm sistemdeki FÖB sayısını azaltmaktır [61], [62]. FÖB'lerin konumunu tanımlamak matematiksel bir optimizasyon problemidir. OFY probleminin amacı, tüm sistemin tam olarak gözlemlenebilir olması için minimum sayıda FÖB kurulacağı bara yerini belirlemektir [63]. Optimizasyon çalışmalarında FÖB sayısını en aza indirmek için bir amaç fonksiyonuna ihtiyaç vardır. Bu tipik bir optimizasyon problemidir. FÖB'lerin hat fazör akımlarını ölçmesi ve Ohm yasası kullanılması ile diğer bir komşu baranın gerilimi hesaplanabilmektedir. Gözlenebilir bir nokta için, düğüm noktasındaki gerilim doğrudan ölçülebiliyorsa, ya da bilinen diğer akım veya gerilim fazörü kullanılarak dolaylı hesaplanabiliyorsa, gözlenebilir bir noktadır. FÖB'lerin güç sistemine yerleştirilmesinde dikkat edilecek kurallar sırası ile şunlardır.

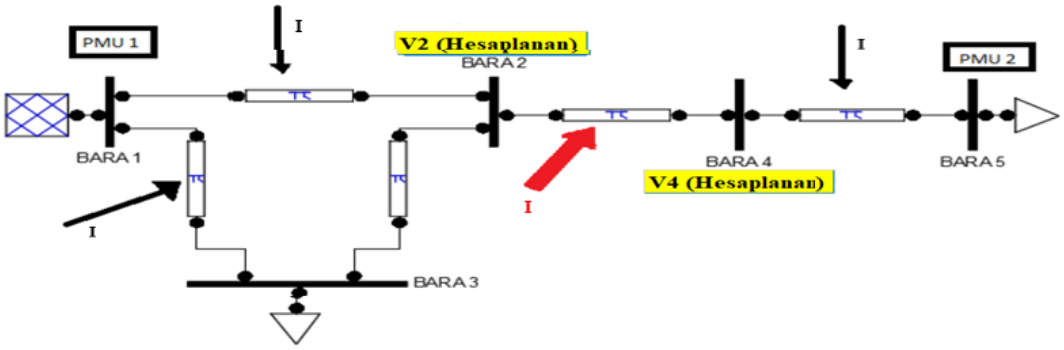
Kural-1: FÖB'in yerleştirildiği baranın gerilimi ile bu baraya bağlı her kolun akımı, Şekil 2.4'deki gibi ölçülebilir.

Kural-2: FÖB'in yerleştirildiği baraya gelen her bir kolun, diğer ucundaki gerilim değeri Şekil 2.4'deki gibi hesaplanabilir.



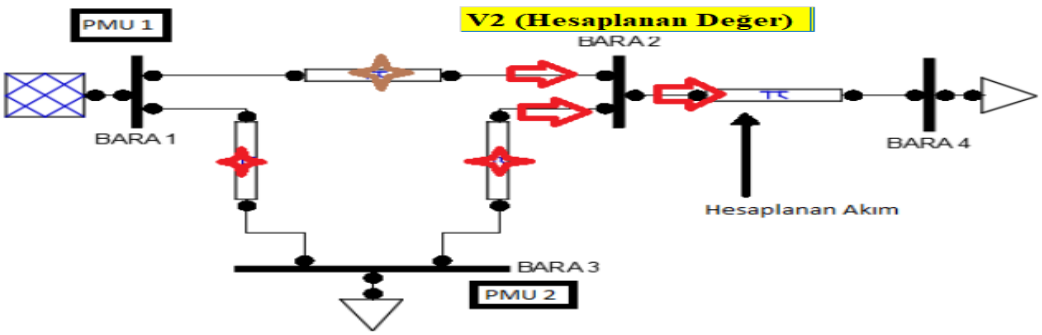
Şekil 2.4. FÖB yerleştirme kuralının modellenmesi.

Kural-3: İki bara arasında gerilim değeri bilinmekte olan, hattın akım değeri, Şekil 2.5'teki gibi hesaplanır. Bu değer, gözlemlenen bölgelerin birbirine bağlanmasını sağlar.



Şekil 2.5. FÖB yerleştirme kuralının modellenmesi.

Kural-4: Kirşofun akım yasası ile dolaylı olarak, Şekil 2.6'da her hattın akım değeri hesaplanabilinir. Bu kural, düğüm noktasına gelen farklı kollardan sadece birisinin akım değeri biliniyorsa uygulanabilir. FÖB'lerin ölçümlerde büyük bir doğruluğa sahip olması şebekenin durum tahmininde önemli bir rol oynamaktadır. Her bara, FÖB'ler tarafından en az bir kez gözlemlenmelidir [44], [64], [65].



Şekil 2.6. FÖB yerleştirme kuralının modellenmesi.

2.2.1. FÖB'lerin İlk Yerleşim Yerinin Tespit Edilmesi

Güç sistemi iletim şebekesinde FÖB'nin ilk yerleşim yerinin belirlenmesi, graf teorisi mantığı kullanılarak yapılmaktadır. Güç sisteminde bulunan tüm düğümlerin birbiriyle bağlantılı hale getirilmesi için, düğümdeki tüm kolların, akım fazörlerinin ölçülebilmesi veya hesaplanabilmesi amaçlanmaktadır [54]. FÖB'lerin ilk yerleşim yerinin tespit edilmesi için dikkat edilmesi gereken kurallar sırasıyla verilmiştir.

Kural-1: FÖB bağlanmış her dala bir akım fazör ölçümü ata.
Kural-2: Bilinen gerilim değerine sahip iki barayı birbirine bağlayan her dala hesaplanmış akım fazörü atanır.

Bu kurallar ile prosedür sistemin gözlenebilir kısmından geriye kalan gözlenemeyen kısmına bir ağaç oluşturarak adım adım genişler. *Prosedür sırasıyla şu şekilde gerçekleşir.*

•FÖB yerleştirilmiş kök olarak tanımlanan bir baradan başlanır ve bir düğümden diğer bir komşu düğüme ilerlenir.

•Her adımda, gözlenemeyen kısımda en fazla dalı olan baraya bir FÖB eklenerek sistemin gözlenebilir kısmı genişletilir. Bu durum FÖB'nin o baraya bağlı bütün hatlardaki akım fazörlerinin ölçebilmesi avantajını ortaya çıkarır [51].

•Ağaç, verilen bir yol boyunca daha fazla genişletilemiyorsa, bir önceki düğüm noktasına dönülerek yeni bir yol seçilir.

•Prosedür tamamlandığında, yani güç sisteminin tamamen gözlenebilir olduğunda, sisteme yerleştirilen FÖB'ler sayılır. FÖB'lerin kümesi başlangıç tahmini olarak kabul edilir ve benzetim yolları ile bu kümenin büyüklüğü azaltılmaya çalışılır [51].

2.3. BARA GÖZLEMLENEBİLİRLİK İNDEKSİ

Minimum sayıda FÖB ile güç sisteminin tamamen gözlemlenebilmesi sorunu çözmek için SGAİ, bir koşul olarak kabul edilir [66]. FÖB ile doğrudan veya dolaylı olarak, bir veri yolu üzerinde en az bir ölçüm elde edildiğinde, veri yolunun gözlemlenebilir olduğu söylenebilir. Sistemin daha fazla güvenilirliği için, daha yüksek SGAİ sahip olan çözüm alınır. Alınan bu çözümler minimum FÖB sayısı kriterlerini ve maksimum SGAİ kriterlerini karşılamalıdır. Bu nedenle, önerilen yöntem, uygulanan diğer algoritmalara kıyasla önemli avantajlardan birini temsil eden tüm çözümler için hızlı bir arama sağlar [48]. SGA indeksi, bir sistemdeki tüm veri yollarının BGİ'lerin toplayarak, toplam sistem

gözlemlenebilirliğini hesaplamak için kullanılır [66].

$$TSORIs = \sum_{i=1}^{N_B} BOI_i \tag{2.2}$$

Denklem (2.2)'de, *TSORI*'ler, sistem gözlemlenebilirlik seviyesini gösteren toplam sistem gözlemlenebilirlik artıklık indeksidir. Denklem (2.2)'de BOI, bara i'yi izleyebilen gerçek FÖB sayısını temsil etmektedir. BOI, i veri yolu dahil olmak üzere i veri yoluna bağlı toplam veri yolu sayısını tanımlarken, SORI tüm FÖB veri yollarının BOI'sinin toplamıdır. Maksimum SGAİ değerine sahip çözüm, en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. Tam gözlemlenebilirlik için bara i (τ_i)'nin birden maksimum bağlana bilirliği aralığında olmalıdır. Denklem (2.3)'te (τ_i) ile bir eklemenin nedeni, bir bara bir FÖB yerleştirildiğinde, baranın ve tüm baraların voltaj fazörünü ölçebilmesidir. Bu kısıtlamalar, toplam sistem gözlemlene bilirliğini maksimize etmek için dikkate alınır [49]. BGİ'nin sınırlaması şu şekilde ifade edilir:

$$1 \le BOI_i \le (\tau_i + 1) \tag{2.3}$$

2.4. SİSTEM GÖZLENEBİLİRLİĞİ VE GÜVENİLİRLİĞİ

OFY problemini çözmek için, $SORI_m$ indeksinin hem toplam sistem gözlene bilirliği hem de güvenilirlik seviyelerini maksimize ettiği düşünülür ve aşağıdaki gibi ifade edilir [49], [67].

$$SOR\,\mathrm{I}_\mathrm{m} = \left(\sum_{i \varepsilon r} LRBOI_i + \sum_{i \varepsilon N-r} BOI_i \right) \tag{2.4}$$

Denklem (2.4)'de $LRBOI_i$, düşük güvenilirlikli barayı izleyebilen FÖB'lerin sayısıdır. $_i$ ve $_r$, düşük güvenilirlikli baraların sayısıdır.

LRBOI'nin sınırlaması şu şekilde ifade edilir:

$$2 \le LRBOI_i \le (\tau_i + 1) \tag{2.5}$$

Denklem (2.3) ve (2.5)'te kendisine bağlı dal sayısı (τ_i) ile bir eklenir, çünkü bir FÖB, bara ve kendisine bağlı tüm bitişik baraların voltaj fazörünü ölçebilir.

2.5. FÖB YERLEŞTİRME PROBLEMİ

Güç sistemlerinin, detaylı olarak gözlemlenmesi, sistem arızasının önceden belirlenmesi, sistemin yük akış durumunun akıcı ve anlık olarak izlenmesi, değişken ve lineer olmayan güç sistem dinamiklerinin ortaya çıkarılması, kesintisiz güç dağıtımını mümkün hale gelmesine imkânlar sağlaması ve sistem kararlılığının en zor koşullarda bile sürdürülmesi, güç sistemini tamamen gözlemlenebilir hale getirmekle mümkündür. Güç sistemlerini tamamen gözlemlemek için FÖB cihazları kullanılmaktadır. FÖB cihazları pahalı olduğundan, güç sistemine optimum sayıda ve tüm sistemi tamamen gözlemleyecek şekilde yerleştirilmelidir. Bu çalışmada amaç fonksiyonumuz, tüm güç sisteminin tamamen gözlenebilir hale getirmek, kısıt fonksiyonu, en az sayıda FÖB gerektirecek şekilde FÖB'leri baralara yerleştirmektir.

2.6. FÖB YERLEŞTİRME PROBLEM FORMÜLASYONU

Bir FÖB, veri yoluna yerleştirilmiş ise, veri yolunun gerilim fazörünü ve tüm hatların akım fazörlerini ölçülebilmektedir. FÖB'ler güç sistemindeki stratejik baralara yerleştirilmesi ile tüm sistemin gözlenebilir hale gelir [68]. Güç sistemine FÖB yerleşiminin amacı, minimum sayıda FÖB ile sistemin tamamen gözlemlenebilirliğini sağlamaktır. FÖB'lerin yerleştirilmesi gereken baraların kümesi, grafiğin baskın bir grubuna karşılık gelir [21]. G grafiğindeki baskın bir takım (veya harici olarak dengeli bir takım) G'deki her bir köşeye egemen olan köşeler şu anlamda: ya egemen kümeye dâhil edilir ya da egemen kümedeki bir veya daha fazla köşeye bitişiktir [69]. Bu nedenle, minimum optimal FÖB yerleşimi problemi grafikteki en küçük baskın küme problemine eşlenir [21]. FÖB'lerin, ilgili veri yolundaki gerilim fazörlerinin ve bu veri yolundan çıkan tüm hatların akım fazlarını ölçmek için yeterli kanala sahip olduğu varsayılmaktadır [68]. Sonuç olarak, tüm bitişik veri yollarının gerilim fazörlerinin, bu veri yoluna gelen hatlar boyunca izlenen fazör akımları ve bilinen hat parametreleri kullanılarak çözülebilir [70]. Bu çalışmada optimal FÖB yerleşimi probleminin çözümü için bir tam sayılı doğrusal programlama tabanlı formülasyonu kullanılmıştır.

2.6.1. Tamsayılı Programlama İle Problem Formülasyonu

Bir n-bara sistemi için OFY problemi Denklem (2.6)'daki gibidir [68]. FÖB'lerin yerleştirilmesi problemini optimizasyon problemine dönüştürmek için Denklem (2.6)'da

amaç ve Denklem (2.7)'de kısıt fonksiyonları tanımlanmaktadır. Amaç fonksiyonu oluşturulurken FÖB'lerin fiyat bilgileri de dikkate alınabilinir. Çalışmamızda tüm baralar da kullanılan FÖB'lerin fiyatta eşit özellikte olduğu düşünülerek problem çözülmüştür [21].

$$\min = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i \tag{2.6}$$

$$f(x) = A.\ X \geq 1 \tag{2.7}$$

Denklem (2.8)'da güç sistemindeki herhangi bir baraya en az bir FÖB bağlı olduğu durumu ifade eder. Denklem (2.9)'de FÖB maliyetini ve sayısını içinde bulunduran amaç fonksiyonu ifade edilmiştir. xi FÖB lokasyon bilgisi gösteren ifadedir. w_i, $_i$. barada FÖB kurulum maliyetidir, N güç sistemindeki bara sayısını ifade etmektedir. Denklem (2.10) ve (2.11) kısıtları ifade etmektedir. Denklem (2.11)'de X ikilik sayısı sistemi değerleriyle verilen karar vektörüdür ve $[A]$ matrisi her bir satırı bara numarasına göre herhangi bir baranın diğer baralar arasında iletim hattı bulunup bulunmadığını ifade eder. İki bara arasında iletim hattı bağlantısı varsa "1" yoksa "0" ile belirtilir. Burada;

$$xi = \begin{cases} 1 & Eğer\ FÖB\ i.baraya\ yerleştirilirse \\ 0 & diğer\ durumlarda \end{cases}, \quad \text{for i=1,…..,N} \tag{2.8}$$

$$Obj = min \sum_{i=1}^{N} w_i x_i \tag{2.9}$$

$$f(x) \geq [b] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \mathrm{N} \times 1 \tag{2.10}$$

$$f(x) = [A][\mathrm{X}] \tag{2.11}$$

$$f(x) \geq 1 \tag{2.12}$$

OFY formülasyonu, FÖB sayısını en aza indirir ve geometrik olarak her bir veri yolu eşzamanlı olarak gözlemlenebilirliğini sağlar. Denklem (2.12)'de gözlemlenebilirliğini sağlandığında güç sisteminin tamamen gözlemlenebilir olduğu kabul edilir [71]. f(x), bir bara üzerinde FÖB olup olmadığını ve FÖB'lerin sayısını ifade eder, [A] ve [X] matrisinin çarpımı ile hesaplanır. İkilik bağlantı [A] giriş matrisinin eleman değerleri Denklem (2.13)'te kullanılarak belirlenir.

$$\mathrm{A_{k,m}} = \begin{cases} 1, & \text{eğer k = m veya} \\ 1, & \text{k ve m birbirine bağlı ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \tag{2.13}$$

Çalışmada, güç sistemine yerleştirilen baraların birim fiyatları (w_i) 1 olarak kabul edildiğinden ve optimal FÖB yerleştirme problemi Denklem (2.12) ile temsil edilmekte ve Denklem (2.8) ve (2.9) dayalı olarak kısıt denklemi yeniden organize edilerek Denklem (2.14) elde edilir.

$$min \sum_{i=1}^{N} x_i \tag{2.14}$$

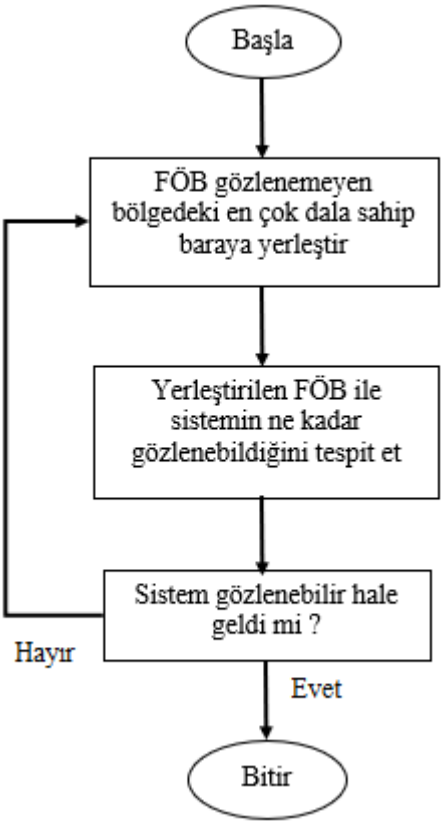
N sayıda baraya sahip bir güç sistemi için OFY, (2.8), (2.9), (2.10), (2.11), (2.12), ve (2.13) denklemleri aracılığıyla yerleştirilecek baraların konumunu ve sayısını hesaplar [72]. FÖB'lerin yerleşimi Denklem (2.13) ile ele alınmaktadır. Bu denkleme göre karar değişkeni, FÖB varsa "1" değerini, yokluğunda ise "0" değerini tutar.

3. FÖB'LERİN GÜÇ SİSTEMİNE YERLEŞTİRİLME METODLARI

FÖB cihazları, güç sistemlerinde yerleştirilen baraların akım ve gerilim bilgilerini fazör olarak ölçüm sağlamaktadır. Amaç minimum sayıda FÖB ile maksimum gözlemlenebilirlik sağlamak ve FÖB'lerin güç sistemindeki hangi baralara yerleştirilmesi gerektiğini belirlemektir. Minimum maliyetle tüm güç sistemi gözlemlenebilirliğini sağlanması için gereken FÖB'lerin konumları, kısıtlı bir optimizasyon problemi ile modellenebilir. Amaç fonksiyonu, güç sistemindeki baralara kurulacak FÖB'lerin maliyetini mümkün olduğunca azaltmaktır. Güç şebekesinin kısıtları her bir düğümünün en az bir FÖB tarafından gözlemlenebilir olmalıdır [73]. Optimum sayıda FÖB ile sistemi gözlemlemek için güç sisteminde stratejik baralar belirlenir. Stratejik baralar belirlenirken ağ bağlantısı bilgilerine dayanarak elde edilir [63]. Stratejik baraların belirlemek için literatürde farklı sezgisel yöntemler ve sezgisel olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Bu tezde, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, grafiksel olarak görselleştirilmiş yeni bir yöntem TDP ve yeni bir sezgisel yöntem olan YA kullanılarak OFY işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler, IEEE bara sistemlerine, Türkiye 400 kV'luk mevcut olan enterkonnekte güç sistemi üzerinde ve Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistemine ek olarak yapılmakta olan baralar ve iletim hatları dahil edildiğinde oluşan yeni güç sistemine uygulanmıştır.

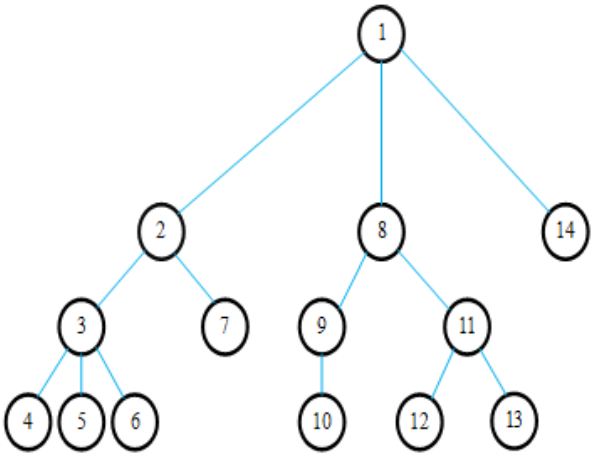
3.1. DERİNLİK ÖNCELİKLİ ARAMA YÖNTEMİ (DÖAY)

DÖAY, FÖB yerleşiminin ağaç arama yöntemine dayalı çalışan geleneksel bir yöntem olup, çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [74]. Şekil 3.1'de DÖAY iş akış şeması verilmektedir.



Şekil 3.1. DÖAY iş akış şeması.

Bu yöntem, güç sistemdeki düğümlerin dal sayıları inceleyip, en çok dala sahip, bağlantı noktası ifade eden bara bulunur [75]. Güç sistemlerine yerleştirilecek olan ilk FÖB, sistemde belirlenen en çok kola sahip baraya yerleştirilir. Eğer bu özelliğe sahip birden çok bara var ise, bir tanesi rastgele seçilir. Diğer FÖB'ler ise sırayla şebeke tamamıyla gözlenebilir hale gelene kadar baralara yerleştirilir. Şebekede ölçülemeyen bir dal akımı veya gerilimi bulunduğu zaman, başa dönüş yapılarak yeniden süreç başlatılarak çözüm yapılır [76]. DÖAY yerel çözümlere odaklanması sebebiyle araştırmacılar global çözümler üreten alternatif algoritmalar üzerinde çalışmaktadırlar [77]. Genel olarak, DÖAY, hiçbir alt düğüm bulunmayana kadar bir alt düğümünden doğrudan alt düğümünden birine doğru bir ağacı arar, ardından geri döner ve geçerli düğümün üst düğümünün başka bir alt düğümünden arama yapar. Şekil 3.2'de DÖAY çalışırken baraların ziyaret edilme sırası verilmektedir.



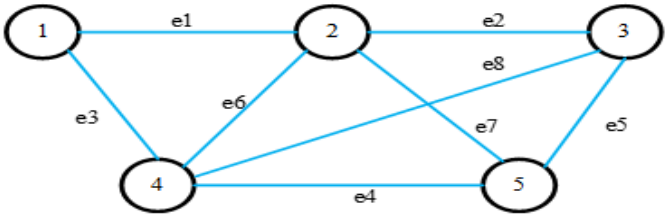
Şekil 3.2. DÖAY uygulandığında ziyaret edilen düğüm sırasının gösterimi.

3.2. GRAF TEORİK YÖNTEM (GTY)

GTY, derinlik metoduna benzemektedir. Tek farkı, Kirşofun akım yasası ile dolaylı olarak hesaplanabilen, her hattın akım değeri biliniyor varsayımını da dikkate alarak işlem yapmasıdır. Köşe adı verilen düğümlerden ve kenar adı verilip köşeleri birbirine bağlayan bağlantılardan oluşan veri yapısına graf denir. Graf, noktalar ve bu noktaları birleştiren çizgilerden meydana gelir. Şekil 3.3'te graf köşe ve kenar gösterimi verilmektedir.

Düğüm {1, 2, 3, 4, 5}
Kenar = {(1, 2), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (2, 5), (3, 4), (3, 5), (4, 5)} = {e1, e3, e2, e6, e7, e8, e5, e4}

GTY iş akış şeması Şekil 3.3. Graf köşe ve kenar 'te verilmekte olan DÖAY iş akış şeması ile aynıdır. Dallarında akım ölçümleri veya hesaplanan ölçümler olan alt graf ölçüm grafı denir. FÖB yerleştirilmiş olan bir baranın dallarının akım fazör ölçümleri yapılırken, gerilim değeri bilinen iki barayı birbirine bağlayan dalın akım fazör değerleri hesaplanır ve bunlara hesaplanan akım fazör ölçümü denir [51]. DÖAY ve GTY arasındaki tek fark, sistemin tamamen gözlenebilir olup olmadığını yargılamaktır. GTY bazı durumlarda, özellikle birleştirme yöntemi kullanıldığında, DAÖY kıyasla daha iyi bir çözüm bulamayacaktır. Ayrıca, DÖAY doğası gereği, yalnızca yerel optimal çözümleri önemseyen ağ gözlü bir algoritma olduğundan, alt düğümleri genişletme konusunda benzer bir yapıya sahip olan GTY, revize edilse bile, en uygun çözümleri bulamaması muhtemeldir [59].



Şekil 3.3. Graf köşe ve kenar işleminin gösterimi.

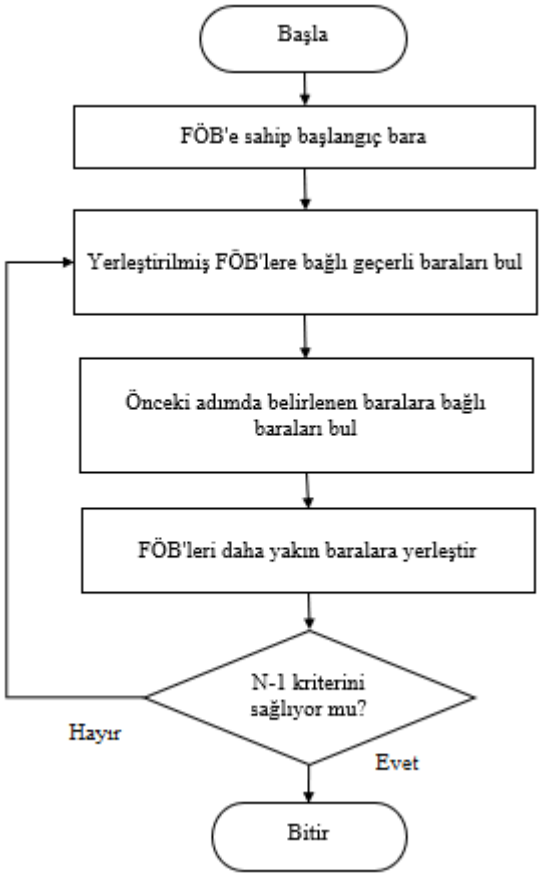
Şekil 3.3'te bir graf, bir kenar kümesiyle birbirine bağlanan bir dizi düğümden oluşur. Başlangıçta, sağlanan n veri yolu sistemi, tüm veri yolları köşeler ve iletim hatları kenarlar olarak düşünülerek N sayıda köşe ve e sayıda kenar grafına dönüştürülür. Bağlı graf tek bir bileşenden oluşur [78]. Karar matrisini formüle etmek için önce verilen sistem, bir dizi kenar (E) ile bağlanan bir dizi köşe (V), G= (V, E) grafik modeline dönüştürülür. Düğümler ve iki düğüm arasındaki dallar sırasıyla köşe ve kenar olarak kabul edilir [79]. Makalede, graf köşe sayısı ve kenar sayısı sırasıyla N ve e olarak ifade edilmiştir. Bağlı bir graf "tek bileşen" olarak kabul edilir ve bağlantısı kesilmiş graf birden fazla bileşenin birleşimidir. Bir graf ağacı, tüm köşelerin N−1 kenarlarından bağlandığı üst graph tüm köşelerini içeriyorsa, yayılan bir ağaçtır. Yayılan ağaç, bir üst graf döngüsüz bir alt graftır. Kapsayan ağaca dahil olmayan ana grafiğin kalan kenarları (e − N +1), bağlantı kenarları olarak adlandırılır. Graf yer alan (e − N + 1) döngülerden tüm akor kenarlarının silinmesi yayılan bir ağaç oluşturur. Yayılan ağacın tüm köşeleri kesilmiş tepe veya asılı tepe şeklidir ve tüm kenarlar kesik kenarlardır. Mevcut ölçümler yardımıyla yayılan bir ağaç tam dizine sahipse ağ tamamen gözlemlenebilir [79–81].

3.3. ÖZYİNELEMELİ N-1 GÜVENLİK YÖNTEMİ

Özyinelemeli N-1 güvenlik yöntemi, minimum FÖB yerleşimi için kurallar, sabit bir ağ topolojisi ve ölçüm cihazlarının tam güvenilirliğini var saymaktadır. Hat kesintileri durumunda tam bir gözlemlenebilirlik sağlamaktadır. Bir veri yolunun barası olduğunu, aşağıdaki iki kriterden en az biri geçerli olduğunda söylenebilir.

- İletim hattındaki düğümlere bir FÖB yerleştirilir;
- Belirlenen düğüme bir FÖB konularak en az iki düğüme bağlanır.

İkinci koşul, eğer bara tek uçlu hatta bağlı ise yok sayılır. Şekil 3.4'te önerilen özyinelemeli N-1 güvenlik yöntemi yerleşimini elde etmek için algoritmanın akış şeması verilmektedir [82].



Şekil 3.4. Özyinelemeli N-1 güvenlik yönteminin akış şeması.

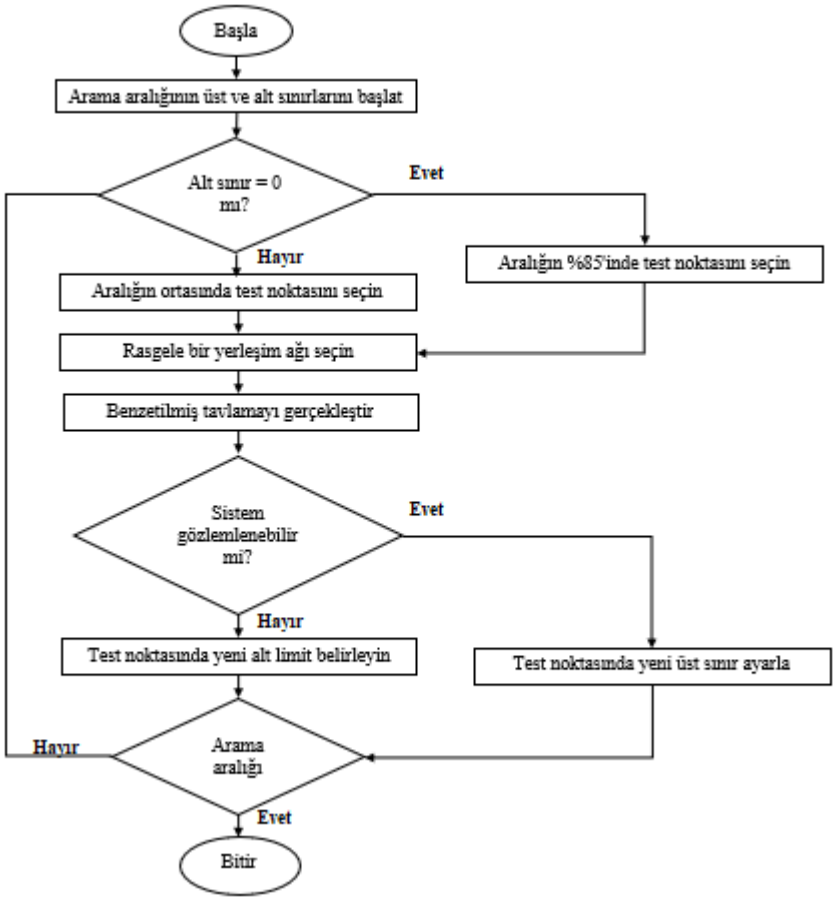
3.4. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI (BTA)

BTA 1953 yılında Metropolis tarafından ileri sürülmüştür. BTA, mevcut çözümün rastgele varyasyonlarını deneyerek, bir optimizasyon problemine iyi bir çözüm bulan bir tekniktir. Daha kötü bir değişim, hesaplama ilerledikçe azalan bir olasılıkla yeni çözüm olarak kabul edilir. Soğutma programı veya yavaşlama hızı ne kadar yavaşsa, algoritma o kadar optimal veya en yakın çözümü bulmaktadır [56]. Katı maddenin (metal gibi) fiziksel tavlama işlemini simüle ederek kombinasyon optimizasyon problemlerini çözer. Fiziksel tavlama işleminde, genellikle metali eritmek için önce ısıtır, parçacıkların serbestçe hareket etmesini sağlar, yani yüksek enerji aşaması, daha sonra sıcaklığı kademeli olarak düşürür ve parçacıkları düşük enerji aşamasının kristal kafesini oluşturur. Donma noktası etrafındaki sıcaklık mümkün olduğunca yavaş düştüğü sürece, madde en düşük enerji aşamasının temel durum kristalini oluşturmak için yerel stresten ayrılabilir. Kristali optimum sonuca, soğutma işlemine ve optimizasyon işlemine karşılık gelen şekilde yapılır; buna uygun olarak BTA algoritmasını devreye alınır [83]. Bu fiziksel

sürece benzer şekilde, BTA'nın her adımı, hem ilgili fonksiyon değerleri arasındaki farka hem de genel bir parametreye bağlı olan olasılıkla seçilen, rastgele "yakındaki" çözümle mevcut çözümü değiştirir. T (sıcaklık), bu işlem sırasında yavaş yavaş azalır. Bağımlılık, mevcut çözümün T büyük olduğunda hemen hemen rasgele, ancak T sıfıra giderken giderek "yokuş aşağı" değişmesidir. *Prosedür aşamaları*;

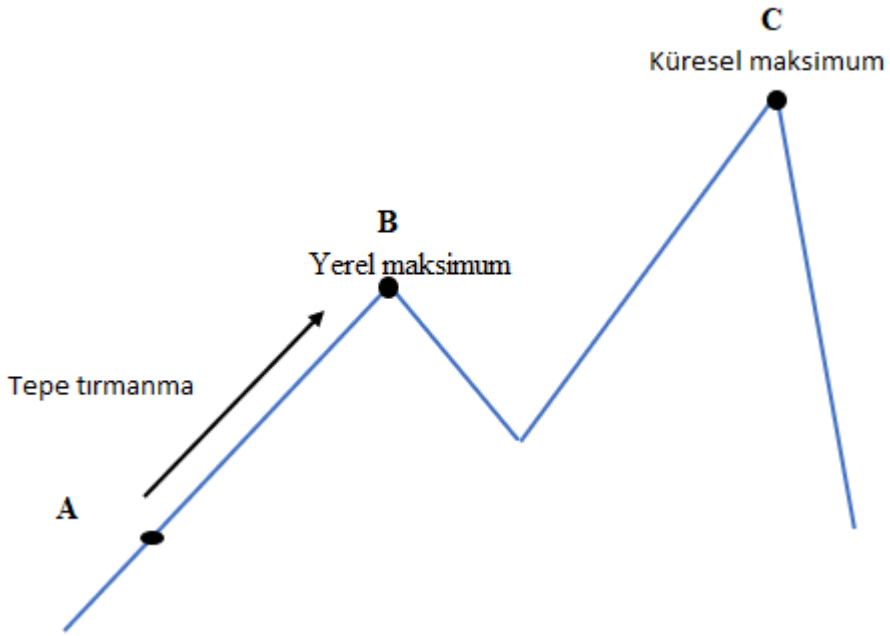
(1) Onaylama çözüm alanından rastgele bir başlangıç koşulu x_0 seçin, hedef işlev değerini f (x_0) hesaplayın ve ilk kontrol sıcaklığını (T_0) ve Markov Zinciri uzunluğunu seçiniz.
(2) Onay çözüm alanında rastgele bir karışıklık yaratın, ardından yeni bir durum x_1 elde edin, hedef işlev değerini f (x_1) hesaplayın.
(3) $f(x_1)<f(x_0)$ değerinin karşılanıp karşılanmadığına karar verin. Karar evet ise, o zaman yeni durumu x_1'i geçerli durum olarak kabul edin; eğer değilse, o zaman Metropolis kuralına göre x_1'i sağlayıp sağlamadığına karar verin, eğer evet ise, o zaman x_1 yeni durumunu geçerli durum olarak kabul et, yoksa x_0 durumunu geçerli durum olarak kabul eder.
(4) Örnek işlemin bazı yakınsaklık kurallarına göre bitip bitmediğini sorgular, evet ise o zaman (5) 'e gider; değilse, (2)'ye döner.
(5) Bazı tavlama tasarılarına göre T kontrol sıcaklığı adım adım azaltılır. Böylece tavlama işleminin tamamlanıp tamamlanmadığı kontrol edilir.
(6) Tavlama işleminin bitip bitmediği kontrol edilir. Buna göre, Bitmiş ise adım 7 'ye gider; bitmemiş ise, adım (2)'ye git kararı ile algoritma çalışır.
(7) Mevcut çözümü en iyi çözüm olarak kabul edilir [28], [83], [84].

Bir güç sistemine FÖB optimum yerleştirme için BTA uygulama akış şeması Şekil 3.5'te verilmektedir [28].



Şekil 3.5. BTA akış şeması.

BTA bir tür skolastik yerel aramadır. Yerel aramanın temel fikri, algoritmanın mevcut çözümden daha iyi olan bitişik bir çözüm olup olmadığını aramaya devam etmesi ve mevcut çözümden daha iyiyse yeni bulunan çözümü kabul etmesidir. Böyle bir temel algoritmaya tepe tırmanma araması denir. Tepe tırmanma araştırmasının sorunu yerel optimal çözümde sıkışıp kalması ve bu nedenle küresel optimal çözümü arıyor olmasıdır. Şekil 3.6'da verilen tepe tırmanma araması, A noktasında aramaya başlar ve B eğrisindeki tüm noktaların B değerinden daha düşük değere sahip olması nedeniyle, belirtilen eğri çizgisinde maksimum bir değer bulmamızı isteniyorsa B noktasında duracaktır. B noktası yerel maksimum noktadır, fakat C noktası olması gereken küresel maksimum noktadır.



Şekil 3.6. Yerel maksimum noktada sıkışmış yerel arama algoritmasının gösterimi.

BTA, metalürjide tavlama işlemi sırasında atomların hareketini simüle eder. Arama sırasında, daha iyi bir çözüm bulunamazsa, BTA araması olasılıkta daha kötü bir çözümü kabul edecektir. BTA araştırmasının yerel optimal çözümün yol açtığı durumlardan sıçrayarak bazı olasılıklarda küresel optimal çözümü bulabilmesi beklenmektedir. OFY problemlerinde BTA araştırması uygulaması başlangıç için önerilmektedir. OFY problemlerinde benzetilmiş tavlama araştırması uygulaması orijinal versiyonda, bir üst sınır ve alt sınır arama alanını sınırlayacak şekilde tasarlanmıştır. Üst sınır sistemi tamamen gözlenebilir kılmak için varsayılan maksimum FÖB miktarını ve alt sınır varsayılan FÖB miktarını ifade eder. Algoritma her zaman, içinde bulunduğu miktarı bulmaya çalışacaktır. Kurulan FÖB'ler V_{test} eşittir, yani üst ve alt sınırın toplamının yarısı veya %85'ine eşittir. Perturb () işlevi aracılığıyla rastgele yeni yerleşimlerin nasıl üretileceğine gelince, bu algoritma verilen yerleşimde FÖB olmayan bir FÖB'suz bir veri yolundan diğer veri yollarına rastgele hareket ettirerek yeni bir yerleşim oluşturacaktır. Aşağıda BTA süreci için kullanılan sözde kod verilmektedir [28], [85], [86];

1. Fonksiyon Benzetilmiş Tavlama ()
Giriş: v_{test}, M
Çıkış: $yerleşim_{yeni}$
Çıkış: Yeni yerleşim, Sonuç yok
2. $T \leftarrow 15$
3. FÖB sayısının v_{test} olduğu zaman, rastgele bir yerleşim oluştur
4. E ← Yerleştirme uygulandığında gözlemlenemeyen bara sayısı
5. for $i \leftarrow 1$ ***to*** 40 **do**
6. **for** $j \leftarrow 1$ ***to*** M **do**
7. $yerleşim_{yeni} \leftarrow$ **Perturb**(*yerleşim*)
8. $E_{yeni} \leftarrow$Yeni yerleşim uygulandığında gözlemlenemeyen bara sayısı
9. **if** $E_{yeni} = 0$ **then**
10. **return** $yerleşim_{yeni}$
11. **end**
12. $\Delta E \leftarrow E_{yeni} -$ E
13. **if** $\Delta E > 0$ **and** $exp\ (-\Delta E\ /T) < 0$ ile 1 arasında rastgele bir sayı ***then***
14. **break**
15. **end**
16. $yerleşim \leftarrow yerleşim_{yeni}$
17. $E \leftarrow E_{yeni}$
18. **end**
19. $T \leftarrow 0.879 * T$ (Tavlama işlemi)
20. end

BTA sonlandırmak için üç farklı koşuldan herhangi birinin gerçekleşmesi gerekir. Birinci durdurma kriteri, gözlenemeyen bara sayısı olarak seçilen E fonksiyonunun minimum değere ulaşmasıdır. İkinci durdurma koşulu, belirli bir kontrol sıcaklığı için kabul edilecek hiçbir FÖB çözüm setinin olmamasıdır. Bu, tavlama işlemindeki donma noktasıdır. Algoritmanın devamı için kontrol sıcaklığı artırılarak yeni bir çözüm elde edilmeye çalışılır. Üçüncü koşul, izin verilen minimum kontrol sıcaklığına ulaşılmasıdır [59]. Bu çalışmada, problemin çözümü için tüm durma koşullarının sağlanması gerektiği düşünülmektedir.

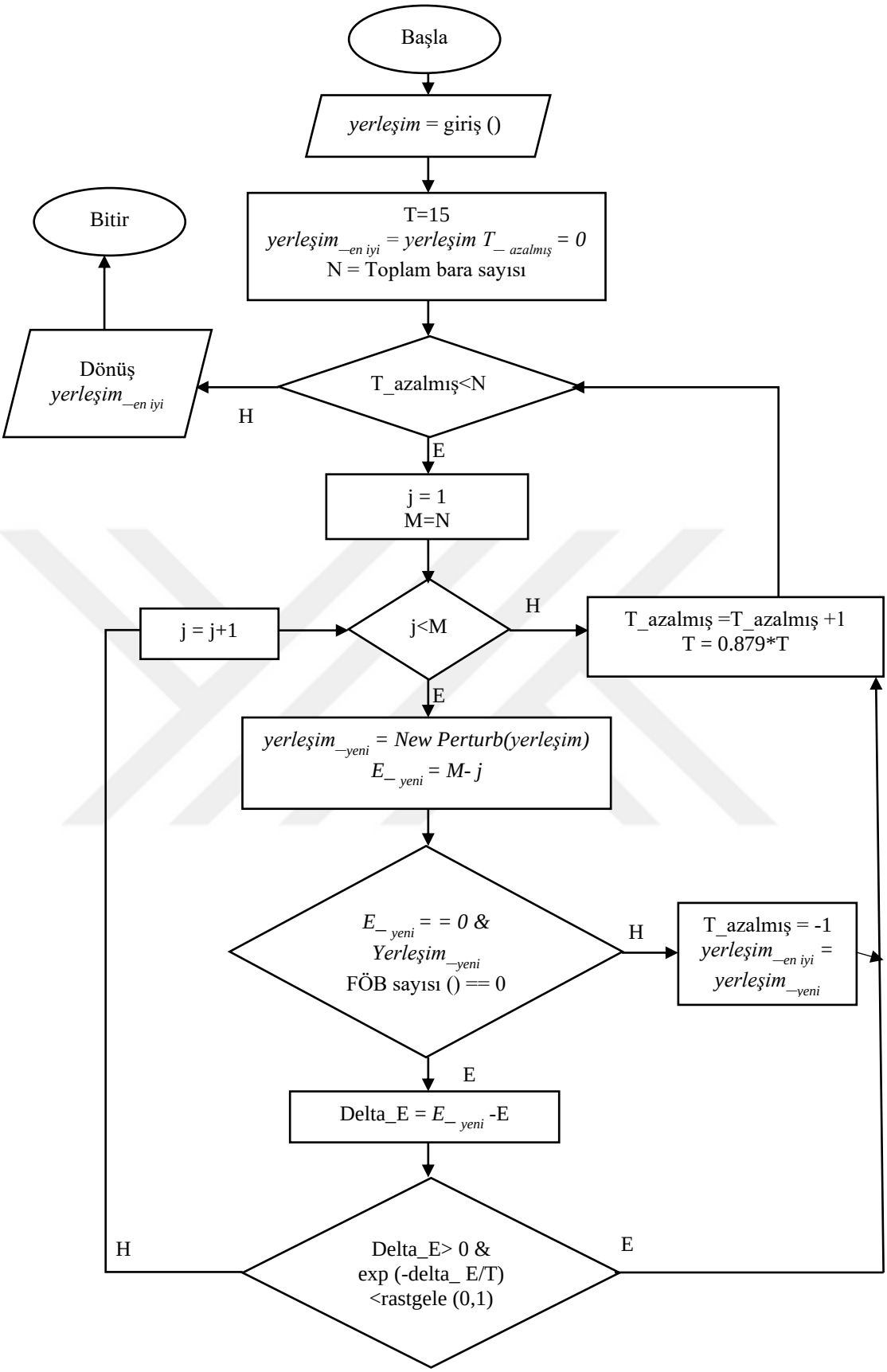
3.5. GELİŞTİRİLMİŞ BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI (GBTA)

Bu çalışmada, FÖB kurulumlarının sayısını en aza indirecek şekilde formüle edilerek, rastlantısallığı arttırıp ve böylece optimal çözüm bulma olasılığını artırmak için yeni bir *perturb* fonksiyonunun uygulayarak geliştirilmiş BTA yöntemi önermektedir. Geliştirilmiş BTA yönteminde, rastlantısallığı arttırmak için, NewPerturb () işlevinde rastgele çözümler iki yöntemle üretilir: (1) FÖB rastgele bir FÖB'suz baraya taşımak ve (2) bir FÖB rasgele çıkarmak veya eklemektir. Orijinal BTA yalnızca birinci yöntemi

uygularken, kullanılması beklenen FÖB miktarını sınırlamak için üst ve alt sınırı kullanır. İkinci yöntemi, V_{test} arama yoluyla makul olup olmadığını kontrol etmek için çok fazla zaman harcamaksızın, algoritmanın en uygun çözüme hızla yaklaşmasına yardımcı olur. Bu nedenle, ilk yerleştirme olarak daha kötü bir yerleşim belirtilmişse, GBTA, BTA'dan daha iyidir. Optimal FÖB yerleşimi problemleri için global optimal çözümü bulma olasılığı BTA yöntemine kıyasla daha yüksektir. GBTA sürecinin sözde kod aşamaları aşağıda verilmektedir [75], [86].

Giriş: *yerleşim*
Çıkış: $yerleşim_{en\ iyi}$
1. $T \leftarrow 15$
2. $yerleşim_{en\ iyi} \leftarrow$ *yerleşim*
3. $T_{azalmış} \leftarrow 0$
4. while $T_{azalmış} < N$ **do**
5. **for** $j \leftarrow 1$ ***to*** M **do**
6. $yerleşim_{yeni} \leftarrow$ **New Perturb***(yerleşim)*
7. $E_{yeni} \leftarrow$ Yerleştirme yeni uygulandığında gözlemlenemeyen baraların sayısı
8. **if** $E_{yeni}=0$ **and** $yerleşim_{yeni}$ *karşılaştırıldığında* $yerleşim_{en\ iyi}$ *daha fazla FÖB yok* ***then***
9. $T_{azalmış} \leftarrow -1$
10. $yerleşim_{en\ iyi} \leftarrow yerleşim_{yeni}$
11. **break**
12. **end**
13. $\Delta E \leftarrow E_{yeni} -$ E
14. **if** $\Delta E > 0$ **and** $exp\ (-\Delta E / T) < 0$ ile 1 arasında rastgele bir sayı ***then***
15. **break**
16. **end**
17. **end**
18. $T_{azalmış} \leftarrow T_{azalmış} + 1$
19. T ← 0.879 * T (Tavlama işlemi)
20. end return $yerleşim_{en\ iyi}$

GBTA işlemi için kod akış şeması Şekil 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3.7. GBTA akış şeması.

3.6. TAMSAYI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA (TDP)

TDP literatürde yaygın olarak kullanılan matematiksel bir tekniktir. Bu çalışmada, OFY için SEB'ler dikkate alınarak veya alınmayarak optimum FÖB sayısı ve FÖB'lerin konumları bulmak amacıyla yeni bir TDP yöntemi formüle edilmiştir.

$$Minimize \sum_{i=1}^{N} c_i \; X_i \tag{3.1}$$

$$Subject\,to\; f_i = \sum_{j=1}^{N} a_{i,j} \; X_j \geq 1 \forall i \tag{3.2}$$

$$X_i = \begin{cases} 1 \; eğer \; bir \; FÖB \text{ i. baraya kurulu ise} \\ 0 \; diğer \; durumlarda \end{cases} \tag{3.3}$$

c_i i. FÖB'ün toplam kurulum maliyetidir.

$a_{i,j}$ bağlantı matrisinin ij. girişidir.

$$a_{i,j} \begin{cases} 1 \; eğer \; i = j \\ 1 \; eğer \; i \text{ ve } j \; birbirine \, bağlı \, ise \\ o \; diğer \; durumlarda \end{cases} \tag{3.4}$$

N sistemdeki bara sayısıdır.

Denklem (3.1)'de amaç işlevi sistemin tamamen gözlemlenebilir olması için en aza indirilmesi gereken gerekli toplam FÖB sayısıdır. Denklem (3.2)'de eşitsizlik kısıtı, sistemdeki tüm veri yollarının en az bir FÖB tarafından gözlemlenebilir olmasını sağlar. Ölçüm fazlalığını, bir veri yolu FÖB tarafından ulaşılma sayısını en üst düzeye çıkarmak için, amaç fonksiyonuna R_i gibi bir terim eklenir [81].

$$Minimize \sum_{i=1}^{N} c_i \; X_i - \sum_{i=1}^{N} R_i \tag{3.5}$$

Denklem (3.5)'de R_i, *i.* baranın ölçüm fazlalılığıdır. Ölçüm fazlalık maksimizasyonu problemini bir minimizasyon hedef fonksiyonuna dönüştürmek için negatif işaretlisi eklenir [46].

3.6.1. Yerleşim Görselleştirme

Literatürde OFY'nin sayısal sonuçları sadece tablo kullanılarak gösterilmektedir. Bu, özellikle büyük güç sistemleri çözüme ilişkin iç görüler sağlamak için yeterli değildir. OFY'nin elde edilen sonuçlarının haritalar üzerinde grafiksel ve coğrafi olarak

gösterilmesinde yarar vardır. Bu çalışmada, grafik teorisi ve CBS kullanılarak iki görselleştirme yöntemi ile OFY yapılmıştır.

3.6.1.1. *Grafik Teorisi Kullanarak Görselleştirme*

Serbest geçişli düzenlerde düğüm ve kenarlardan oluşan bir ağ çizmenin en esnek yöntemi, kuvvet yönlendirmeli yöntemdir. Görsel olarak iyi ve serbest geçiş düzleme sahip düğümlerden ve kenarlardan oluşan bir ağ çizme yöntemlerinden biri kuvvet yönelimli yöntemdir [87].

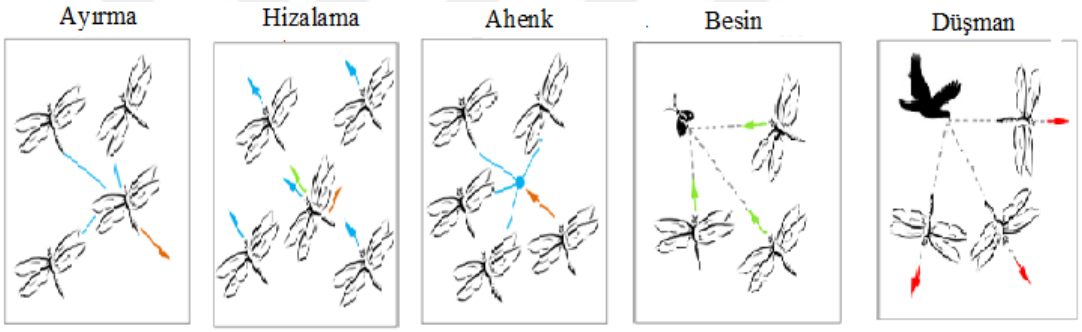
3.6.1.2. *CBS Kullanarak Görselleştirme*

Optimal FÖB yerleşimi için kullanılan ağ, coğrafi verilere, yani her bir baranın enlem ve boylamına sahipse, yerleşimi gerçek bir harita üzerinde göstermek faydalı olur. CBS, bir harita üzerinde verilerin görselleştirilmesi ve analizi için insanların etkileşimde bulunduğu yazılım, donanım ve coğrafi verilerin bir kombinasyonudur [88]. CBS, güç sistemi ağlarını farklı katmanlarla görselleştirmek ve aralarındaki mekânsal ilişkileri ifade etmek için çeşitli işlev ve araçlara sahiptir [89].

3.7. YUSUFÇUK ALGORİTMASI (YA)

Arama kabiliyeti yüksek ve son yıllarda geliştirilmiş olan YA sezgisel optimizasyon tekniği OFY probleminin en iyi bir şekilde çözmek için uygulanmıştır. Dünya da pek çok farklı türlere sahip olan Yusufçuk sineği, büyük birleşik gözler ile, güçlü saydam kanatlar ile, göz alıcı renkler ve uzunca vücutları ile tanınmaktadırlar. Yusufçuk sineğinin yaşam döngüsü, larva ve yetişkin olarak, iki evreden oluşmaktadırlar. Avlanma özelliklerinde eşsiz ve nadir görülen zeki davranışlar görülmektedir. Avlanmak için ileri geri hareket eden yusufçuk sinekleri statik sürüde küçük gruplar halinde uçarlar. Statik sürünün ana karakteristik özelliği, uçma yolu güzergâhında yerel hareketler ve ani değişiklikler yapabilmesidir. Yusufçuk sinekleri, göç için, dinamik sürülerde, büyük grup halinde uzun yolculuklar yapabilmektedir [90]. Reynold'a göre, sürü davranışları üç temel prensip ayırmaktadır [91]. Ayırma; Komşuluk içerisindeki diğer kişiler ile çarpışmayı önlemektir. Hizalama; Komşuluk içerisindeki diğer bireyler ile hız uyumunu göstermektir. Ahenk; Komşuluk kütlesinin merkezine doğru bireyleri ile eğilimini vurgulamaktadır. Sürünün asıl amacı, hayatta kalabilmek ve bireylerin gıda kaynaklarına doğru yönelebilmektir. Bu temel eyleminin yanında sürüyü dışarıdan düşmanlar tarafından rahatsız edebilir. Konum güncelleme işleminde beş ana faktör kullanılmakta ve Şekil 3.8'de verilmektedir [92].

YA ve diğer bazı meta sezgisel yöntemler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Bazı optimizasyon problemleri ve YA kullanılan uygulamalar incelenmiştir. Araştırma sırasında, çoğu durumda YA'nın global optimuma yakınsama konusunda iyi bir yeteneğe sahip olduğu keşfedilmiştir. YA'nın, çeşitli alanlarda farklı ve karmaşık problemleri optimize etme yeteneğine sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, kıyaslama fonksiyonlarının sonuçları, YA'nın basit ve orta dereceli problemleri çözmede büyük bir yeteneğe sahip olduğunu vurgulamışlardır [93]. YA'nın çeşitli problemleri geliştirme yeteneğini göstermek için algoritma ve diğer meta sezgisel teknikler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan yazarlar, YA'nın alandaki pratik tekniklerden biri olduğunu keşfetmişlerdir. YA'nın basitliği, araştırmacıları eldeki sorunları optimize etmek için, algoritmayı kullanmaya teşvik eden nedenlerden biridir. Ayrıca algoritmanın doğruluğu ve yakınsama hızı da bir diğer sebeptir. Genel olarak, küçük ve orta ölçekli problemler için algoritma iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [94].



Şekil 3.8. Sürü içerisinde bireyler arasındaki beş ana faktör gösterimi.

Şekil 3.8'de sürü içerisinde bireyler arasındaki ilişkisi bulunan beş ana faktör verilmektedir. Bu beş davranışların her birini matematiksel modelleri aşağıdaki gibidir [73].

Ayırma şu şekilde hesaplanır

$$S_i = -\sum_{j=1}^{N} X - X_j \tag{3.6}$$

Denklem (3.6)'daki *X* mevcut bireyin pozisyonu, *Xj* ise *j*. komşu bireyin pozisyonunu göstermektedir. *N* komşu bireylerin sayısıdır.

Hizalama şu şekilde hesaplanır

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} V_j}{N} \tag{3.7}$$

Denklem (3.7)'de yer alan *Vj* değeri *j.* komşu bireyin hızını göstermektedir.

Ahenk şu şekilde hesaplanır.

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} X_j}{N} - X \tag{3.8}$$

Besin kaynağına doğru çekim aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$F_i = X^+ - X \tag{3.9}$$

Denklem (3.9)'da X^+ ifadesi besin kaynağının pozisyonunu göstermektedir. Bir düşman tehdidi karşısında dışa doğru davranış aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Denklem (3.10)'da X^- ifadesi tehdit eden düşmanın pozisyonunu göstermektedir.

$$E_i = X^- + X \tag{3.10}$$

Yapay yusufçuk sineklerinin pozisyonlarını güncellemek ve onların hareketlerine benzetmek için ΔX adım ve X pozisyon olmak üzere iki vektör düşünülmüştür.

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\Delta X_t \tag{3.11}$$

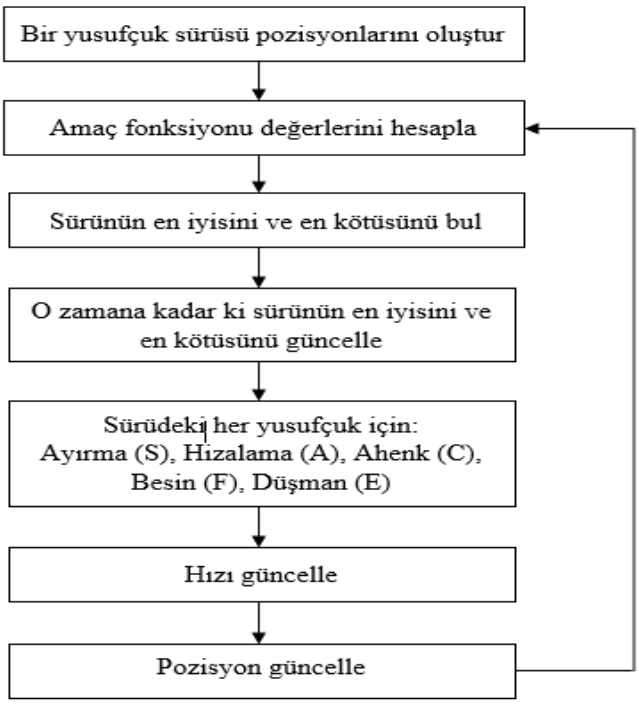
Denklem (3.11)'de *s* ayırma, *a* hizalama, *c* uyum, *f* besin, *e* düşman faktörlerinin ağırlık değerlerini ifade eder. Ayrıca *w* değeri *t.* döngüdeki atalet ağırlığını göstermektedir. Adım vektörünü hesapladıktan sonra, Denklem (3.12)'de pozisyon vektörü hesaplanmaktadır.

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_{t+1} \tag{3.12}$$

Rassallığı, stokastik davranışı ve yapay yusufçukların keşif özelliklerini geliştirmek için rastgele yürüyüş için (Le'vy uçuşu) kullanılmıştır. Bu durumda yusufçukların pozisyonları aşağıdaki eşitlik kullanılarak güncellenmiştir.

$$X_{t+1} = X_t + Le'vy(d) * X_t \tag{3.13}$$

Denklem (3.13)'te *t* mevcut döngüyü, *d* ise pozisyon vektörünün boyutunu temsil etmektedir. Şekil 3.9'da YA akış şeması verilmiştir [92].



Şekil 3.9. YA akış şeması.

YA sürecinin sözde kod aşamaları aşağıda verilmektedir [92].

Yusufçuk popülasyonu *Xi*'yi başlat *(i = 1, 2, ..., n)*

Adım vektörlerini *ΔXi* başlat *(i = 1, 2, ..., n)*

while son koşul sağlanmadı

Tüm yusufçukların objektif değerlerini hesaplayın

Besin kaynağını ve düşmanı güncelleyin

w, s, a, c, f ve *e*'yi güncelleyin

S, A, C, F ve *E*'yi denklem (3.6) ile (3.10) kullanarak hesaplayın

Komşu yarıçapı güncelle

if bir yusufçukta en az bir komşu yusufçuk vardır

Denklemi (3.11) kullanarak hız vektörünü güncelleyin

Denklemi (3.12) kullanarak konum vektörünü güncelleyin

else

Denklemi (3.13) kullanarak konum vektörünü güncelleyin

end if

Yeni konumları aşağıdakilere göre kontrol edin ve düzeltin değişkenlerin sınırları

end while

3.8. BINARY PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU (BPSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Kennedy ve Eberhart tarafından 1995 yılında önerilmiş olan, literatürde en çok bilinen, kullanılmakta olan, sürü halinde yaşamakta olan hayvanların sosyal davranışlarını temel alarak oluşturulan, popülasyon tabanlı algoritmadır [95]. Literatürde sürü tabanlı algoritmalar ile yapılan çalışmalar karşılaştırılmış, PSO ve BPSO algoritmaları literatürde sürü tabanlı olarak en çok çalışma yapılan algoritma olduğu belirtmişlerdir [96]. Ayrık problemlerin üstesinden gelebilmek ve PSO'nun uygulanabilirliğini geliştirmek için Kennedy ve Eberhardt tarafından BPSO geliştirilmiştir [97]. PSO adımları ile BPSO adımları aynıdır. BPSO ve PSO arasındaki tek fark, BPSO'da konum güncellemesi farklı şekilde yapılmaktadır. Her bir parçacığın hız değerine göre sigmoid fonksiyon değerleri hesaplanmakta ve parçacıkların konumu güncellenmektedir [98]. BPSO'da yenilenmesinde (***pbest***) ve (***gbest***) değerleri PSO gibi güncellenmektedir. BPSO ile PSO arasında iki temel farklılık vardır. Birincisi, BPSO'da, her parçacığın konumu binary sayı (0-1) değerlerinden oluşur. İkincisi, hız parçacığın 0 veya 1 değerini alma olasılığı olarak tanımlanmaktadır [98-99]. BPSO'da hız güncellenmesi PSO'da olduğu gibi güncellenmekte ve Denklem (3.14)'te verilmektedir.

$$v_{ij}^{(t+1)} = w v_{ij}^{(t)} + c_1 r_1 \left(pbest_{ij}^{(t)} - x_{ij}^{(t)} \right) + c_2 r_2 \left(gbest^{(t)} - x_{ij}^{(t)} \right) \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'te, c_1 ve c_2 parçacığın sırasıyla kendi en iyi ve global en iyi parçacığında yakınsadığı öğrenme hızıdır. c_1 ve c_2 literatürdeki değerlere genellikle [0.2, 2] aralığında değer almaktadır. Çalışmamızda c_1 ve c_2 değerleri olarak [0.2, 1] aralığında değer verilmiştir. c_1, parçacığının hafızadaki en iyi konuma yönelmesini sağlamaktayken, c_2 ise parçacığın sürünün en iyi konuma doğru yönelmesini sağlamaktadır. $c_1 = c_2$ sıfıra eşit olması durumunda sürü mevcut hızlarıyla arama uzayının sınırlarına ulaşıncaya kadar eylemlerine devam etmektedir. r_1 ve r_2 katsayıları, [0, 1] aralığında normal dağılım ile binary rastgele olarak üretilmekte olan sayılardır. Bu sayı değerleri her iterasyon da yenilenmekte olup, arama işleminde sürünün hareketlerine rastgelelik katmaktadır [98, 100-101].

Bu çalışmada kullanılan w değeri eylemsizlik ağırlık değeridir. Eylemsizlik ağırlığı, önceki hızın yeni hız üzerinde etkisi olarak tanımlanmaktadır. w değeri, parçacıkların bir

önceki hızına bağlı kalarak hız güncellemesini yapmakta ve çözüm anında, ani hız değişimi yapmasını engellemektedir. Yerel ve küresel arama sırasında bir denge oluşturmak için her yineleme için doğrusal olarak azaltılmaktadır. w değeri PSO'da daha az iterasyon ile optimum çözümü elde etmek için global ve yerel arama arasındaki dengeyi sağlamaktadır. w büyük değerlikli olması global arama yapılmasını, küçük değerlikli olması yerel arama yapabilmesini sağlamaktadır. Bu yüzden w değeri uygun değerde belirlenmesi çok önem arz etmektedir [98, 100, 102]. Denklem (3.15)'te w değerini hesaplamak için kullanılan denklem verilmektedir.

$$w = (w_1 - w_2) \times \frac{(t_{\max} - t)}{t_{\max}} + w_2 \tag{3.15}$$

w_1 ve w_2 sırasıyla 0,9 ve 0,4 olan maksimum ve minimum eylemsizlik ağırlık değerini alacaktır. $t_{\max}$, maksimum tekrarlanma sayısıdır ve t, geçerli tekrarlanmadır. Denklem (3.15), optimizasyon sürecinin global arama ile başlamasını ve sona doğru yerel aramaya yerleşmesini sağlamaktadır. Gruptaki (sürüdeki) bireyler (parçacıklar), söz konusu problem için en uygun çözümü bulmak amacıyla arama uzayı boyunca uçarlar. Parçacıklar konumlarını kendi deneyimlerine ve ayrıca hareket ettikleri zaman boyunca komşu parçacıkların deneyimlerine göre ayarlamaktadır. Her parçacığın deneyimi, daha iyi bir konuma geçmeden önceki konumuna ve hızına bağlıdır. Her parçacığın, Denklem (3.16)'ya bağlı olarak sürekli PSO'daki konumlarını değiştirmektedir

$$x_{ij}^{(t+1)} = x_{ij}^{(t)} + v_{ij}^{(t+1)} \tag{3.16}$$

Denklem (3.16)'da $x_{ij}(t)$ ve $x_{ij}(t+1)$ sırasıyla *(t)* ve *(t+1)* zamanında *j.* boyuttaki *i.* parçacığın konum vektörler iken $v_{ij}(t+1)$ ise parçacığın hız vektörünü göstermektedir. Denklem (3.16)'da hız vektörü, bireysel parçacıkların ve sürü içindeki diğer parçacıkların deneyimine bağlı olarak hesaplanmaktadır [100]. Çalışmamızda kullanılan BPSO'da konum vektörü x, ilgili veri yolunda FÖB yerleştirilmiş ise bir, ilgili veri yoluna FÖB yerleştirilmemiş ise sıfır kabul edilmektedir. Sigmoid fonksiyonu yardımıyla, her iterasyon için her parçacığın hız vektörünün değerine göre karar verecek olan Denklem (3.17) kullanılarak konum vektörü x güncellenmektedir. Konum vektörü x'i güncellemek için Denklem (3.17) kullanılmaktadır.

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} 1 & eğer\ r_{ij} < S(v_{ij}) \\ 0 & diğer\ durumlar \end{cases} \tag{3.17}$$

Denklem (3.17)'de r_{ij} [0, 1] arasında rastgele bir sayı almaktadır, $S(v_{ij})$ ise bir Sigmoid fonksiyonudur. Parçacıkların konumu binary (0-1) sayı değerlerini alacağından, hız değerleri [0,1] aralığında oluşmaktadır ve her x_{ij}'nin 1 değerini alma olasılığını belirlemek amacıyla Denklem (3.18) ile verilmekte olan Sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır [98, 100].

$$S(v_{ij}) = \frac{1}{1+e^{-v_{ij}}} \tag{3.18}$$

BPSO kullanmak için uygunluk fonksiyonu Denklem (3.19) formüle edilmiştir [103].

$$J(x) = (w_1 \times \sum_{i=1}^{N} fi) + (w_2 \times N_{PMU}) + (C \times j_1) \tag{3.19}$$

Denklem (3.19)'da $\sum_{i=1}^{N} fi$, N_{PMU} ve j_1 büyüklüğü olarak karşılaştırılabilir w_1, w_2 ve C 'nin üç ağırlık değerleridir. $\sum_{i=1}^{N} fi$, N_{PMU} ve j_1, sırasıyla gözlemlenebilir veri yolu sayısını, toplam FÖB sayısını ve ölçüm artıklığını temsil eden uygunluk fonksiyon değerleridir. *C* sabit katsayıdır. *N* sürünün büyüklüğü (toplam bara sayısı). N_{PMU} ve j_1 Denklem (3.20) ve Denklem (3.21) gibi tanımlanmaktadır.

$$N_{PMU} = X^T X \tag{3.20}$$

$$j_1 = (M - AX)^T (M - AX) \tag{3.21}$$

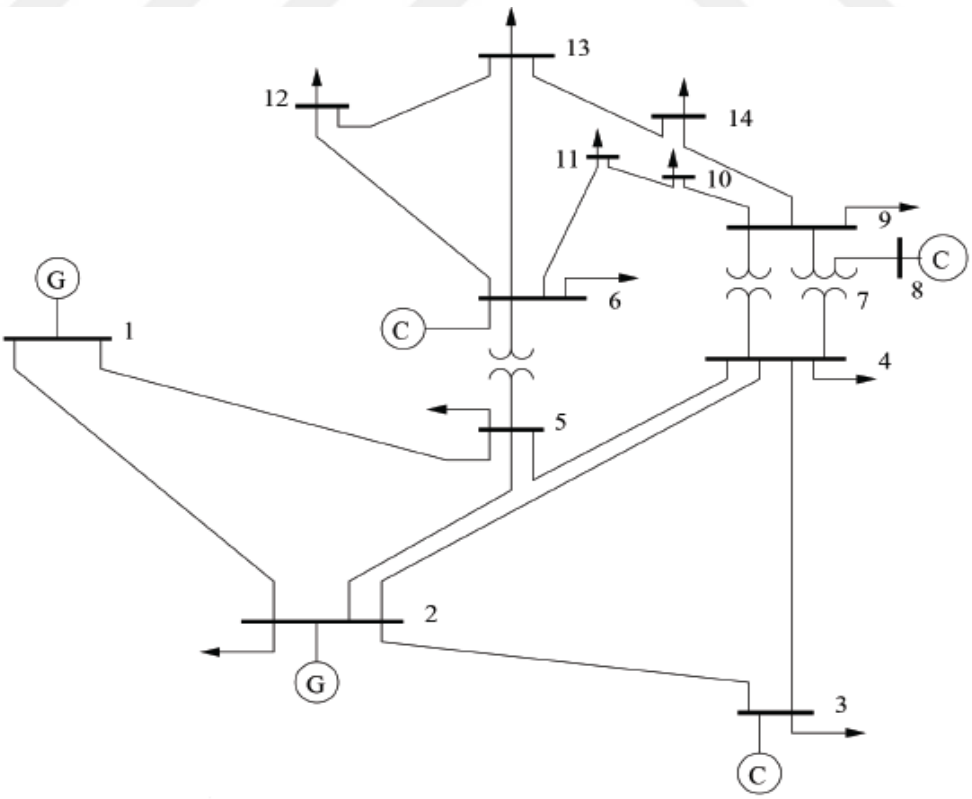
Denklem (3.21)'de *M*, ölçüm fazlalığı için amaç değeridir. Denklem (3.21)'de A bir güç sistemi için ikili bağlantı matrisi dir ve öğeleri Denklem (3.22)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1 & eğer\ i = j \\ 1 & eğer\ i\ ve\ j\ bağlı\ ise \\ 0 & diğer\ durumlarda \end{cases} \tag{3.22}$$

Bir parçacığın bireysel en iyi konum vektörü, *pbest* ve global en iyi konum vektörü *gbest*, bu uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak değerlendirilir [100, 103].

4. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ

OFY'nin en uygun çözümünü bulmak için önerilen yöntemlerin doğruluğunu, literatürde IEEE 14-bara, IEEE 24-bara, IEEE 30-bara, New England 39-bara, IEEE 57-bara, IEEE 118-bara ve IEEE 300-baralı sistemler gibi farklı standart test sistemlerine uygulanarak değerlendirilmiştir [36], [104]. Bu çalışmada Şekil 4.1'de verilen IEEE-14 Bara Test Sistemi için, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, ILP ve YA yöntemleri uygulanarak OFY çözümleri bulunmuştur [105]. YA ve BPSO yöntemleri kullanılarak, IEEE-14 Bara Test Sistemi için ayrıca, BGİ ve SGAİ değerleri bulunmuştur [49]. Çalışmamızda önerilen yöntemlerin sonuçları, daha iyi anlaşılması için literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin güvenilirliği böylece test edilmiştir. Güvenirliliği test edilmiş olan yöntemler Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistemine uygulanmıştır. Ayrıca, Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için yapılması planlanan yeni hatların ve baraların devreye alınmasını dikkate alınarak sisteme uygulanmıştır.



Şekil 4.1. IEEE 14-bara test sisteminin tek hat şeması.

Denklem (2.6)'da IEEE 14-Baralı Test Sistemi için N=14 değerini ve i=1, 2, 3, 4, 5,..….14 değerleri dikkate alınarak Denklem (4.1) elde edilir [106]. Denklem (4.1) amaç fonksiyonunu ifade etmektedir.

$$\min = \Sigma_{i=1}^{14} w_i \cdot x_i \tag{4.1}$$

IEEE 14-Bara Test Sistemi için $[A]$ matris formuna çevrilirken Denklem (2.13)'te verilen kurallar dikkate alınarak elde edilen $[A]$ matrisi Denklem (4.2)'de verilmektedir.

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Denklem (4.2) ile verilen A Matrisinin deki 1'ler, diğer baralarla bağlı olduğunu ifade derken 0'lar, diğer baralar arasında bağlantı olmadığını ifade ederler. 1. Satırında verilen 1'ler, 1. bara 2 ve 5. baralara bağlıdır. 1. baraya yerleştirilen FÖB ile 2, 5 nolu baralardaki akım, gerilim ve faz açıları gözlemlenebilir. Benzer şekilde $[A]$ Matrisinin 3. satırı incelendiğinde, 3. bara 2. ve 4. baralara bağlıdır. 3. baraya yerleştirilen FÖB ile 2, 3, 4 nolu baralardaki akım, gerilim ve faz açıları gözlemleyebiliriz. $[A]$ Matrisinin tüm satırları için 1 ve 3. satırlar için ifade edilen aynı kurallar geçerli olduğu söylenebilir. 14-Bara Test Sistemi olduğunda 14X14 boyutunda bir matris oluşturulur [14]. IEEE 14-Bara Test Sistemi için $[A]$ matris formunu kısıt fonksiyonuna çevrilmiş fonksiyon denklemleri, Denklem (4.3)'te verilmektedir.

$$f(x) = [A]\,[\mathrm{X}] = \begin{cases} f1 = x1 + x2 + x5 & \geq 1 \\ f2 = x1 + x2 + x3 + x4 + x5 & \geq 1 \\ f3 = x2 + x3 + x4 & \geq 1 \\ f4 = x2 + x3 + x4 + x5 + x7 + x9 & \geq 1 \\ f5 = x1 + x2 + x4 + x5 + x6 & \geq 1 \\ f6 = x5 + x6 + x11 + x12 + x13 & \geq 1 \\ f7 = x4 + x7 + x8 + x9 & \geq 1 \\ f8 = x7 + x8 & \geq 1 \\ f9 = x4 + x7 + x9 + x10 + x14 & \geq 1 \\ f10 = x9 + x10 + x11 & \geq 1 \\ f11 = x6 + x10 + x11 & \geq 1 \\ f12 = x6 + x12 + x13 & \geq 1 \\ f13 = x6 + x12 + x13 + x14 & \geq 1 \\ f14 = x9 + x13 + x14 & \geq 1 \end{cases} \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'de "+" operatörü mantıksal "VEYA (OR)" görevi görür ve eşitsizliğin sağ tarafında 1 kullanılması, toplamda görünen değişkenlerden en az birinin sıfır olmamasını sağlar. f1 ≥ 1 kısıtı, bara 1'i gözlemlenebilir hale getirmek için 1, 2 veya 5 veri yolları üzerindeki baralardan birine en az bir FÖB'ün yerleştirilmesi gerektiğini belirtir. Benzer şekilde, dördüncü sınırlama f4 ≥ 1, bara 4'ü gözlemlenebilir hale getirmek için 2, 3, 4, 5, 7 veya 9 numaralı baraların herhangi birine en az bir FÖB'ün yerleştirilmesi gerektiğini gösterir. IEEE 14-Baralı Test Sistemi için: Denklem (2.6)'da xi ϵ {0, 1} değerlerini alırken, i=1, 2, 3, 4, 5,6,,……14 değerlerini almaktadır.

IEEE 14-BARA TEST SİSTEM İÇİN OPTİMAL FÖB YERLEŞTİRME SONUÇLARI

Önerilen yöntemler IEEE-14 Bara Test Sistemine uygulanmıştır. FÖB cihazının fiyatı yüksek ve kulumu maliyetli olduğundan dolayı, sistemdeki SEB'ler dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları bulunmuştur. SEB dikkate alınıp veya alınmaması durumları dikkate alınarak çözümler yapılmıştır. Güç sistemlerine kurulacak olan FÖB sayısı, SEB'ler kullanılarak daha da azaltılmaktadır. Optimum FÖB sayısı ve yerleşim yerlerinin bulunmasına yönelik olarak, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, TDP ve YA yöntemleri uygulanarak çözümler gerçekleştirilmiştir. OFY'nin sonuçlarını grafik teorisi ve CBS kullanılarak ILP yöntemi yardımıyla harita üzerinde görselleştirilmiştir. BGİ ve SGAİ değerleri aynısı yeni bir sezgisel yöntem olan YA kullanılarak bulunmuştur. Önerilen yöntemlerin sonuçları, daha iyi anlaşılması için literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

4.1.1. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları

Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA kullanılarak IEEE 14 bara test sistemi için Optimum FÖB sayısı, yerleştirilmesi gereken bara konumları, yerleşme süreleri bulunmuştur. Daha sonra IEEE 14-Baralı Test Sistemi için, literatür dikkatli incelendi ve literatüre bulunan sonuçlarla bulduğumuz sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1. IEEE 14-baralı test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

Yöntemler	**FÖB Sayısı**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**Geçen Zaman (s)**
Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi	8	1, 2, 4, 6, 7, 10, 12, 14	0.19309s
DÖAY	6	1, 4, 6, 8, 10, 14	0.001543s
GTY	5	1, 4, 6, 10, 14	0.005160s
BTA	4	2, 6, 7, 9	0.014177s
		2, 4, 10, 13	
		1, 4, 6, 9	
		1, 4, 11, 13	
		2, 8, 10, 13	
		2, 7, 10, 13	
		2, 9, 11, 13	
		4, 5, 10, 13	
GBTA	**3**	**2, 6, 9**	0.026704s
	4	1, 4, 11, 13	
		4, 5, 11, 13	
		2, 9, 10, 13	

IEEE 14-Baralı Test Sistemi için literatür dikkatli incelendiğinde literatüre çok çok yakın sonuçlar (aynı sonuçlar) elde edildiği görülmüştür.

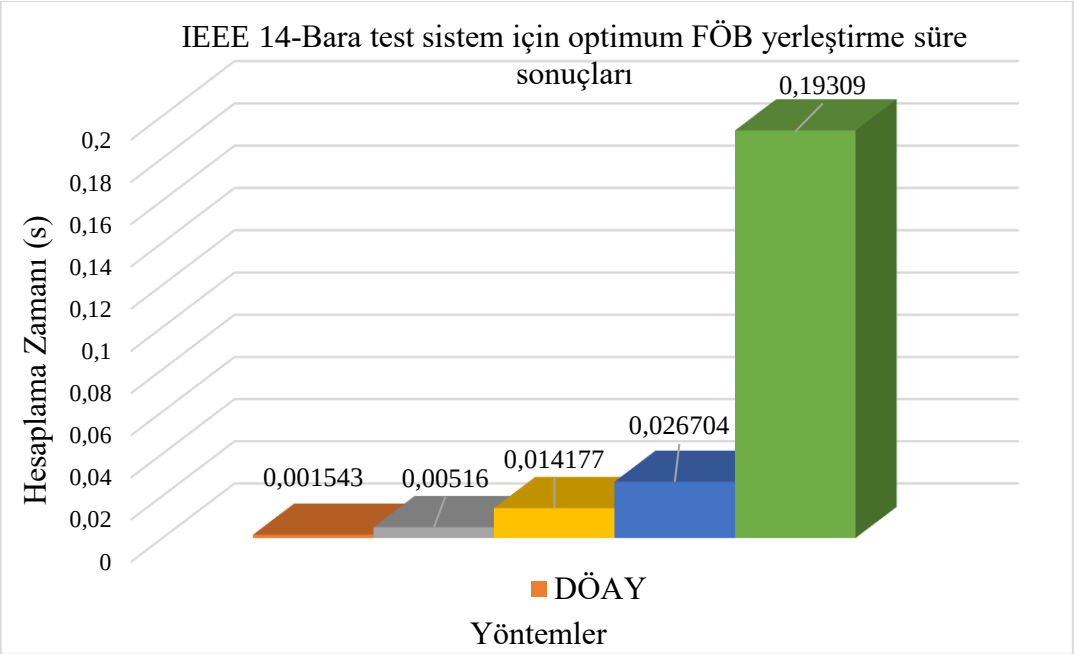
Çizelge 4.2. IEEE 14-baralı test sistem için optimum FÖB yerleştirme karşılaştırmalı sonuçlar.

Yöntemler	**FÖB Sayısı**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**Geçen Zaman (s)**
DÖAY	6 [36], [74]	1, 4, 6, 8, 10, 14 [104]	0.001791s, [75]
			0.701s [58]
			0.094s [28]
			0.0256s [29]
GTY	5 [75]	1, 4, 6, 10, 14 [104]	0.024160s
	5 [29]	1, 4, 6, 10, 14	0.0355s
	6 [68]	1, 4, 6, 8, 10, 14	---

Çizelge 4.2. (devam) IEEE 14-baralı test sistem için optimum FÖB yerleştirme karşılaştırmalı sonuçlar.

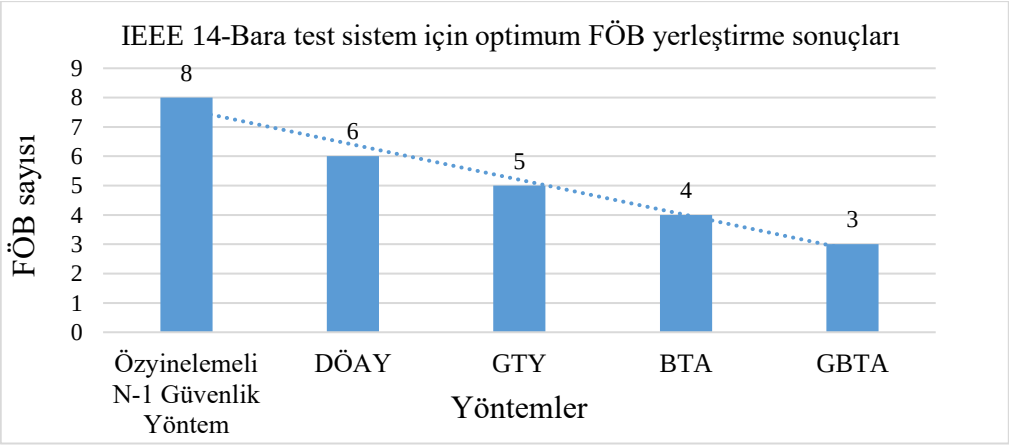
BTA	4 [108]	4, 5, 6, 9 [58]	2.423s
		2, 6, 7, 9 [74],	---
		1, 4, 11, 13 [28],[78]	0.359 s
		1, 4, 6 ,9 [29]	0,2202s
GBTA	**3**	**2, 6, 9**	0.026704s
	4	1, 4, 11, 13	
		4, 5, 11, 13	
		2, 9, 10, 13	

Çizelge 4.2'de DÖAY [28], [29], [36], [58], [74], [75], [104], [107], GTY [29], [68], [74], [75], [83], [104], [107], ve BTA [28], [29], [58], [74], [75], [78], [107] referans numaralı makalelerde Çizelge 4.1'de verilen çalışma sonuçlarına benzer şekilde bara sayısı ve lokasyon bilgileri literatürde bulmuşlardır. Ayrıca geliştirilmiş BTA, BTA geliştirilerek yeni bir yöntem olarak güç sistemine uygulanmıştır. GBTA benzer şekilde [75] referans numarası ile literatürde bir çalışma mevcuttur. Çalışma sonucuna göre, FÖB sayısı 3, 4, 5 olarak belirlenmiş ve lokasyon bilgileri verilmemektedir. Bulduğumuz sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında kullanmış olduğumuz yöntemlerin güvenilir yöntemler olduğunu kanısına varılmıştır. Böylece bu yöntemlerin güvenli bir şekilde Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi üzerinde uygulanabilirliği ortaya çıkmaktadır. IEEE 14-Baralı Test Sistemi için optimal FÖB alternatif lokasyon noktaları farklı çözümler ile tüm sistemin gözlenebilir farklı çözümleri bulunmaktadır. Tüm sistemi gözlemleyen en az sayıda FÖB sayısına sahip farklı çözümler bulunabilir. IEEE 14-Baralı Test Sistemi için, Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, en iyi çözüm olarak GA ve bazı yöntemlerin bulduğu 2, 6, 9 lokasyon bilgilerinin aynısı GBTA kullanılarak elde edilmiştir. Optimal FÖB yerleştirmede geçen zaman bilgisayarın özelliğine bağlı olarak her bilgisayar için farklıdır.



Şekil 4.2. IEEE 14-Bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme süre sonuçları.

Şekil 4.2'de IEEE 14-Baralı Test Sistemi için yerleşme süre sonuçları verilmektedir. Bu sonuçlara göre; DÖAY 0.001543s ile MİB hesaplama zamanının büyük ölçüde azaltarak, daha az zaman aldığını belirlemiş, ancak FÖB sayısı fazladır. Yerleşme zamanı bakımından en fazla süreyi Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi almaktadır. Literatürde bazı sezgisel yöntemlerin bulduğu FÖB sayısı ve lokasyon bilgileri aynısı veya daha iyi sonuçlar GBTA ile bulunmuştur.



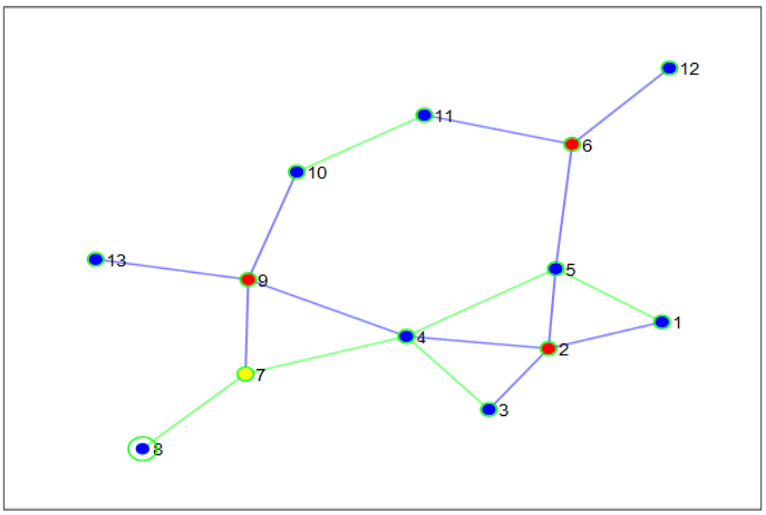
Şekil 4.3. IEEE 14-Bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

IEEE 14-Baralı Test Sistemi tamamen gözlemlenebilir olması için optimal FÖB yerleştirilmesi gereken bara lokasyonları Çizelge 4.1'de verilmektedir. Bara sayıları Şekil 4.3'e göre, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi 8 FÖB cihazı ile, DÖAY 6 FÖB cihazı

ile, GTY 5 FÖB cihazı ile, BTA 4 FÖB cihazı ile IEEE 14-Baralı Test Sistemini tamamen gözlemlenebilir olmasını sağlarken, GBTA kullanılarak tüm sistemi gözlemlemek için 3 FÖB cihazı kullanılması yeterli olacaktır.

4.1.2. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin TDP Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları

FÖB cihazının fiyatı yüksek ve kulumu maliyetli olduğundan dolayı, sistemdeki SEB'ler dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları bulunmuştur. SEB'ler sistemin gerilimler ve akımlarını, Ohm Kanunu ve KAY kullanılarak hesaplandığında, güç sistemlerine kurulacak olan FÖB sayısını daha da azaltmıştır. OFY'nin sonuçlarını sırasıyla grafik teorisi ve CBS kullanarak bir harita üzerinde görselleştirilmiş TDP yöntemi kullanılmıştır. Literatürde TDP ile yapılan çalışmalar incelendiğinde, IEEE 14-Baralı Test Sistemi için en iyi çözüm olarak, GA ve bazı sezgisel yöntemlerin bulduğu 2, 6, 9 lokasyon bilgilerini elde edilmiştir. Yerleşme süresi 0.9549s ile MİB hesaplama zamanının büyük ölçüde azaltarak, daha az zamanda yerleştirme işlemi gerçekleştirmektedir. Şekil 4.4'te FÖB konumlarının ve haritalama sisteminin benzerini referans [46]'da bulunan şeklin aynısı bulunmuştur. Sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, TDP yöntemi ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.4. IEEE 14-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), SEB (sarı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil) olarak görselleştirilmesi.

Şekil 4.4'te OFY için, grafik teorisi ve CBS kullanarak harita üzerinde bara sistemlerini görselleştirilmiş yeni bir TDP yöntemi kullanılmıştır. FÖB konumları kırmızı renkle

görselleştirilmiştir. SEB baralar sarı renk ile görselleştirilmiştir. FÖB tarafından doğrudan kontrol edilen hatlar mavi ile FÖB tarafından doğrudan gözlenemeyen (Ohm Kanunu ve KAY kullanılarak gözlenir hale gelen) hatlar yeşil ile hem SEB bara hem de FÖB yerleştirilen bara koyu kırmızı ile iki FÖB tarafından gözlenen hatlar kırmızı ile görselleştirilmiştir.

4.1.3. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin YA Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları

Bu çalışmayla OFY işlemi, ilk kez yeni bir sezgisel yöntem olan YA yöntemi IEEE 14-Baralı Test Sistemi için kullanılmıştır. Optimum FÖB yerleştirme ve maksimum tekrarlılık ile tam gözlemlenebilirlik elde etmek için SEB kullanılmaktadır. YA yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları ile, SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelge 4.3'e göre IEEE 14-Baralı Test Sistemi için normal çalışma koşullarında 4 FÖB ile ve SEB dikkate alındığında ise 3 FÖB ile tamamen gözlenebilmektedir. Çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SGAİ değeri 19 ve SEB dikkate alındığında ise 17 bulunmuştur.

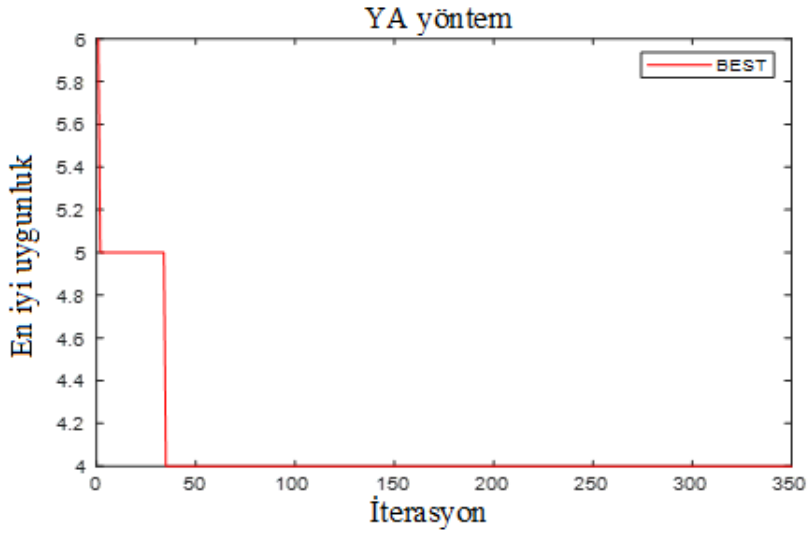
Çizelge 4.3. IEEE 14-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

FÖB Sayısı	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**BOI**	***TSORIs***	**Hesaplama Zamanı (s)**
4*	2, 7, 10, 13	1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1	16	90.506781
	2, 7, 11, 13	1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	16	91.537592
	2, 8, 10, 13	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	14	52.077693
	2, 6, 8, 9	1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1 ,1, 1, 1, 1, 1	16	93.629638
	2, 6, 7, 9	**1, 1, 1, 3, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1**	**19**	**94.869380**
3**	**2, 6, 9**	**1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1**	**17**	**42.016600**
	3, 6, 9	1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	15	51.011688

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.

IEEE 14-Baralı Test Sistemi için literatür dikkatli incelendiğinde literatüre aynı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Örneğin [28], [29], [58], [107] referans numaralı makalelerde Çizelge 4.3'te verilen çalışma sonuçlarına benzer şekilde bara sayısı ve lokasyon bilgileri bulmuşlardır. Ayrıca referans [49]'da yapılan IEEE 14-Bara Test Sistemi için bir diğer çalışmada, bara sayısı, BGİ ve SGAİ içi bulunan değerlerin aynısını yeni ve sezgisel bir yöntem olan YA yöntemini kullanılarak bulunmuştur. Bulduğumuz sonuçlar literatürle

karşılaştırıldığında kullanmış olduğumuz YA yönteminin güvenilir ve doğru çalışan bir yöntem olduğunu belirlenmiştir. Böylece bu yöntemlerin güvenli bir şekilde Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi üzerinde uygulanabilirliği ortaya konulmuştur. Yerleşme süresi 52.077693s ile MİB hesaplama zamanının büyük ölçüde azaltarak, daha az zamanda yerleştirme işlemi gerçekleştirmektedir. YA yöntemi, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözmekte ve optimal sayıda FÖB ile tüm güç sistemini tamamen gözlemlemektedir. Çizelge 4.3'te, normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı sonuçlarına göre sistemi tamamen gözlemleye bilmek için 4 FÖB cihazı bağlanması gerekmektedir. Maksimum SGAİ değerine sahip çözüm, en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. Çizelge 4.3'te 19 SGAİ değerine sahip 4 FÖB'ün çözüm en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. En iyi çözümü 2, 6, 7, 9 nolu baralara FÖB'ler yerleştirerek tüm sistemi gözlenmektedir. Tüm sistemi gözlemleyebilmek için 4 FÖB cihazı kullanılması yeterlidir. Çizelge 4.3'te, SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı, 17 SGAİ değerine sahip 3 FÖB'ün çözüm en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. En iyi çözümü 2, 6, 9 nolu baralara FÖB'ler yerleştirerek tüm sistem gözlenmektedir.



Şekil 4.5. IEEE 14-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi.

Şekil 4.5'te IEEE 14-Bara Test Sistemi için YA yakınsama şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve fitness değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 100 ve iterasyon değeri 350 iken optimum sayıda FÖB değerleri ve FÖB'lerin yerleştirileceği baralar bulunmuştur.

4.1.4. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin BPSO Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları

Bu çalışmayla OFY işlemi, diğer bir sezgisel yöntem olan BPSO yöntemi IEEE 14 Bara Sistemi için kullanılmıştır. Optimum FÖB yerleştirme ve maksimum tekrarlılık ile tam gözlemlenebilirlik elde etmek için SEB kullanılmaktadır. Ayrıca çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için BGİ ve SGAİ değerleri bulunmuştur. BPSO yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları ile, SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelge 4.4'e göre IEEE 14-Bara Test Sistemi için normal çalışma koşullarında 4 FÖB ile ve SEB dikkate alındığında ise 3 FÖB ile tamamen gözlenmektedir. Çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SORI değeri 19 ve SEB dikkate alındığında ise SORI değeri 15 bulunmuştur.

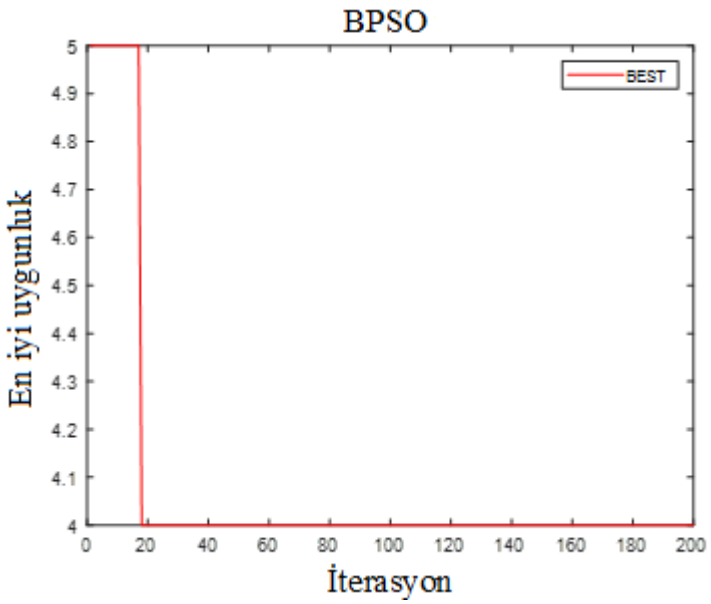
Çizelge 4.4. IEEE 14-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

FÖB Sayısı	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**BOI**	***TSORIs***	**Hesaplama Zamanı (s)**
4*	**2, 6, 7, 9**	**1, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2**	**19**	**0.30264**
	2, 7, 10, 13	1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1	16	0.26555
	2, 7, 11, 13	1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	16	0.35286
	2, 8, 10, 13	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	14	0.28399
	2, 6, 8, 9	1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1 ,1, 1, 1, 2, 2	18	0.26233
3**	**2, 6, 9**	**1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1**	**15**	**0.25671**

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.

IEEE 14-Bara Test Sistemi için literatür dikkatli incelendiğinde, literatürde OFY için BPSO kullanılarak bulunan sonuçların aynısı elde edilmiştir. Örneğin [103], [114], [117], [118] referans numaralı makalelerde Çizelge 4.4'te verilen çalışma sonuçlarına aynı bara sayısını ve lokasyon bilgileri bulmuşlardır. Ayrıca referanslı [117]'de yapılan IEEE 14-Bara Test Sistemi için, bulduğumuz BGİ değerleri ve SGAİ değerlerin aynısı, BPSO yöntemini kullanılarak bulunmuştur. BPSO yöntemi kullanılarak bulduğumuz sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında aynı değerleri bulduğumuzdan dolayı kullanmış olduğumuz BPSO güvenilir yöntem olduğu belirlenmiştir. Böylece bu yöntemlerin güvenli bir şekilde Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemleri üzerinde uygulanabilirliği ortaya çıkmaktadır. BPSO kullandığımızda IEEE 14-Bara Test Sistemi için optimal FÖB

alternatif lokasyon noktaları farklı çözümler ile tüm sistemin gözlenebilir çözüm noktaları bulunmuştur. Çizelge 4.4'de 19 SGAİ değerine sahip 4 FÖB'ün çözüm en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. En iyi çözümü 2, 6, 7, 9 nolu baralara FÖB'ler yerleştirerek tüm sistem gözlemlenebilmektedir. Tüm sistemi gözlemleyebilmek için 4 FÖB cihazı kullanılması yeterli olacak ve Ohm kanunu kullanılarak FÖB tarafından doğrudan ölçülemeyen hat akımları bulunabilinir. Çizelge 4.4'de, SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı, 15 SGAİ değerine sahip 3 FÖB'ün çözüm en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. En iyi çözümü 2, 6, 9 nolu baralara FÖB'ler yerleştirerek tüm sistem gözlemlenebilinir.



Şekil 4.6. IEEE 14-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi.

Şekil 4.6'da IEEE 14 14-Bara Test Sistemi için BPSO yakınsama eğim şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve popülasyon değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 1000 ve popülasyon değeri 100 değerleri arasında iken optimum sayıda FÖB değerleri ve FÖB'lerin yerleştirileceği baralar bulunmuştur. c_1 ve c_2 değerleri [0,2-2] arasında değer alırlar. Çalışmamızda c_1 ve c_2 değerleri değeri olarak [0,2-1] arasında değer verdiğimizde optimum sayıda FÖB sayısı bulunmuştur.

4.1.5. IEEE 14-Bara Test Sistem İçin Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması

Literatürde IEEE bara sistemleri için OFY bir çok faklı yöntemlerle çalışmalar yapılmıştır. Çizelge 4.5'te, Depth First, Graph Theoretic Procedure, Minimum Spanning Tree, Groebner bases algorithm, Binary integer programming (BIP), Immunity Genetic Algorithm (IGA), ILP and Exhaustive Search (ES), Hybrid Particle Swarm-Mothflame optimization (PSO-MFO), Nonlinear Programming (NLP), (MWOA), Binary Particle Swarm Optimization (BPSO), GA based Enhanced Harmony and Binary Search Algorithm (GA-EHBSA), Balas Additive Algorithm (BAA), Flower Pollination Algorithm (FPA), Hybrid of Genetic Algorithm (HGA), Binary Integer Linear Programming (BILP) and Minimum Spanning Tree (MST) gibi yöntemler kullanılarak elde edilmiş OFY sonuçları verilmiştir. Ayrıca, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, yeni bir sezgisel yöntem olan YA ve görselleştirilmiş TDP yönteminin sonuçları Çizelge 4.5'te verilmektedir. YA ve BPSO yöntemleri normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları ile, SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları verilmiştir. Çizelge 4.5'te IEEE 14-Bara Test Sistemi için, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, YA ve TDP yöntemleri kullanılarak elde edilen OFY sonuçları ile literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Literatürde bulunan sonuçlarla benzer sonuçlar bulunmuştur. BPSO, geliştirilmiş GBTA, yeni bir sezgisel yöntem olan YA ve grafik teorisi ve CBS kullanarak bir harita üzerinde görselleştirilmiş TDP yöntemi alternatif ve güvenilir bir çözüm teknikleri olarak sunulmuştur. YA yöntemi ile normal çalışma koşullarında 4 FÖB tüm sistem gözlemlenirken, SEB dikkate alınırsa 3 FÖB ile tüm sistem gözlemlenebilir. Ayrıca çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için BPSO ve YA yöntemlerini kullanarak SGAİ değeri bulunmuştur. Sistemin daha fazla güvenilirliği için, daha yüksek SGAİ sahip çözüm alınır. Literatürde IEEE 14-Bara Test Sistemi OFY için bunulan en yüksek SGAİ değerinin 19'dır. IEEE 14-Bara Test Sistemi için SGAİ değeri olarak 19 bulunmuştur.

Çizelge 4.5. IEEE 14-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

Yöntemler	**FÖB Sayısı**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	***TSORIs***
YA	**4***	**2, 6, 7, 9**	**19**
YA	**3****	**2, 6, 9**	**17**
TDP	**3****	**2, 6, 9**	**---**
BPSO	**4***	**2, 6, 7, 9**	**19**
BPSO	**3****	**2, 6, 9**	**15**
GBTA	**3***	**2, 6, 9**	**---**
BTA	**4***	**2, 6, 7, 9,**	**---**
GTY	**5***	**1, 4, 6, 10, 14**	**---**
DÖAY	**6***	**1, 4, 6, 8, 10, 14**	**---**
Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntem	**8***	**1, 2, 4, 6, 7, 10, 12, 14**	**---**
Depth First [86]	6	---------	---
Graph Theoretic Procedure [86]	5	---------	---
MST [86]	3	---------	---
Groebner Bases Algorithm [48]	4*	2, 8, 10, 13	----
	3**	2, 6, 9	---
BIP [109]	4	2, 6, 7, 9	---
IGA [35]	3	2, 6, 9	---
BILP [32], [27]	4 *	2, 6, 7, 9	---
	3**	2, 6, 9	---
GA [32]	4	**2, 6, 7, 9**	**19**
		2, 6, 8, 9	17
		2, 8, 10, 13	14
		2, 7, 11, 13	16
		2, 7, 10, 13	16
ILP and ES [110]	4*	2, 6, 7, 9	---
	3**	2, 6, 9	---
PSO-MFO [111]	4	2, 6, 7, 9	19
ILP [112]	4	2, 6, 7, 9	---
NLP [112]	4	2, 8, 10, 13 2, 6, 8, 9 2, 7, 11, 13 2, 7, 10, 13 **2, 6, 7, 9**	14 17 16 16 **19**
ILP [113]	4*	2, 6, 7, 9	
	3**	**2, 6, 9** 3, 6, 9	**15** 13
MWOA [49]	4*	**2, 6, 7, 9** 2, 7, 10, 13 2, 6, 8, 9 2, 7, 11, 13 2, 8, 10, 13	**19** 16 16 16 14
	3**	2.6,9	16
BPSO and GA [114]	4	2, 6, 7, 9	---
GA-EHBSA [115]	4	2, 7, 10, 13	---
BAA [116]	4*	2, 6, 7, 9	---
	3**	2, 6, 9	---

Çizelge 4.5. (devam) IEEE 14-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

FPA [104]	4*	2 ,6 ,7, 9 2 ,6, 8, 9	19 17
	3**	2, 6, 9	15
BPSO [117]	4*	2, 6, 7, 9	19
		2, 7, 10, 13	16
BPSO [118]	4*	2, 6, 7, 9	
BPSO [103]	4*	2, 6, 7, 9	---
	3**	2, 6, 9	---

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.

4.1.6. IEEE 24-Bara Test Sistem İçin OFY Sonuçlarının Bulunması ve Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması

Çizelge 4.6'de IEEE 24-Bara Test Sistemi için bulunan sonuçlar ile literatür de bulunan sonuçlarla karşılaştırılması verilmektedir. IEEE 24-Bara Test Sistemin de 38 iletim hattı, 24 bara vardır. Bu baraların 4 adedi (11, 12, 17, 24) SEB'dır. DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, TDP ve YA yöntemleri kullanılarak elde edilen OFY sonuçları ile literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılması Çizelge 4.6'de verilmektedir.

Çizelge 4.6. IEEE 24-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

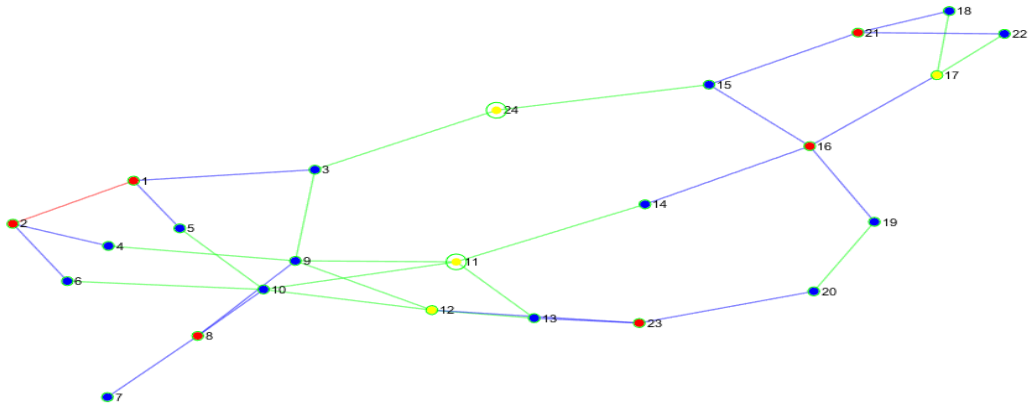
Yöntemler	**FÖB Sayısı**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	***TSORIs***
YA	**7***	**2, 3, 8, 10, 16, 21, 23**	**34**
YA	**6****	**1, 2, 8, 16, 21, 23**	**30**
TDP	**6****	**1, 2, 8, 16, 21, 23**	**---**
BPSO	**7***	**2, 3, 8, 10, 16, 21, 23**	**32**
BPSO	**6****	**1, 2, 8, 16, 21, 23**	**30**
GBTA	**7***	**1, 7, 9, 10, 16, 21, 23**	**---**
BTA	**8***	**2, 3, 8, 10, 13, 16, 22, 23**	**---**
GTY	**9***	**1, 7, 9, 10, 13, 16, 20, 21, 24**	**---**
DÖAY	**9***	**1, 7, 9, 10, 13, 16, 20, 21, 24**	**---**
Groebner Bases Algorithm [48]	7*	2, 3, 8, 10, 16, 21, 23	---
	6**	1, 2, 8, 16, 21, 23	---
BIP [109]	7	2, 3, 8, 10, 16, 21, 23	---
ILP [110]	7	3, 4, 8, 10, 16, 21, 23	---
ILP [113]	7* 6**	2, 3, 8, 10, 16, 21, 23 1, 2, 8, 16, 22, 23	 24
BPSO and GA [114]	8	2, 3, 8, 10, 13, 16, 21, 23	---

Çizelge 4.6. (devam) IEEE 24-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

BPSO [42]	7*	2, 3, 8, 10, 16, 21, 23 3, 4, 8, 10, 16, 21, 23 2, 8, 10, 16, 21, 23, 24 2, 3, 7, 10, 16, 21, 23 2, 3, 5, 7, 13, 16, 19, 21 3, 4, 7, 10, 16, 21, 23	31 30 30 29 29 28
	6**	1, 9, 10, 16, 21, 23 2, 3, 10, 16, 21, 23 2, 8, 9, 16, 21, 23 2, 5, 9, 16, 21, 23 1, 2, 8, 13, 16, 21 2, 5, 8, 16, 21, 23 1, 2, 8, 12, 19, 21	29 27 27 26 25 24 24
GA-EHBSA [115]	7	2, 3, 8, 10, 16, 21, 23	---
BAA [116]	7*	2, 3, 8, 10, 16, 21, 23	---
	6**	1, 2, 8, 16, 21, 23	---
BPSO [119]	7*	1, 2, 8, 11, 15, 17, 23	---
	6**	2, 8, 10, 15, 17, 20	---

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.

Ayrıca, TDP yöntemi kullanılarak, optimum FÖB sayısı ve konumları bulunmuştur. SEB'ler güç sistemlerine kurulacak olan FÖB sayısını daha da azaltmıştır. OFY'nin sonuçlarını sırasıyla grafik teorisi ve CBS kullanarak bir harita üzerinde görselleştirilmiş TDP yöntemi kullanılmıştır. SEB'ler sisteme dahil edildiğinde 1, 2, 8, 16, 21, 23 nolu baralar FÖB yerleştirildiğinde tüm güç sistemi tamamen gözlenebilmektedir. Sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, TDP yöntemi ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.7'de OFY için, harita üzerinde bara sistemlerini görselleştirilmiş TDP yöntemi kullanılmıştır. FÖB konumları kırmızı renk ile, SEB baralar sarı renk ile, FÖB tarafından doğrudan kontrol edilen hatlar mavi ile, FÖB tarafından doğrudan gözlenemeyen (Ohm Kanunu ve KAY kullanılarak gözlenir hale gelen) hatlar yeşil renk ile, hem SEB bara hem de FÖB yerleştirilen baralar koyu kırmızı renkle ile, iki FÖB tarafından gözlenen hatlar kırmızı renkle ile görselleştirilmiştir.



Şekil 4.7. IEEE 24-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), SEB (sarı),FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil) olarak görselleştirilmesi.

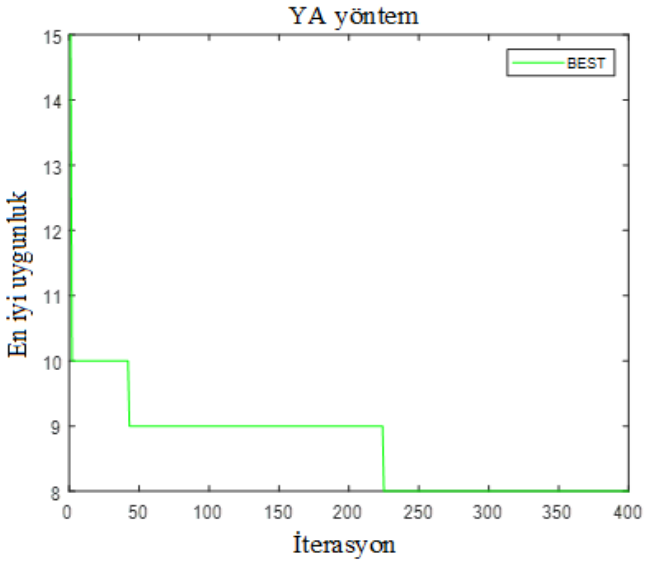
Çizelge 4.7'de IEEE 24-Bara Test Sistemi için YA yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve FÖB konumları verilmiştir. Normal çalışma koşullarında 7 FÖB ile ve SEB'ler dikkate alındığında ise 6 FÖB ile tamamen gözlenmektedir. Çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SGAİ değeri 34 ve SEB'ler dikkate alındığında ise SGAİ değeri 30 bulunmuştur.

Çizelge 4.7. IEEE 24-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

IEEE Bara Sistemi	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**BOI**	***TSORIs***
24-bara	7*	**2, 3, 8, 10, 16, 21, 23**	**2, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1**	**34**
		2, 8, 11, 12, 13, 16, 19	2, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	32
		2, 6, 12, 13, 14, 20, 22	2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	31
		3, 4, 6, 9, 10, 16, 21	2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	31
		1, 7, 11, 14, 15, 16, 22	1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	30
	6**	**1, 2, 8, 16, 21, 23**	**2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1**	**30**
		1, 2, 8, 16, 22, 23	1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	29
		1, 2, 5, 9, 13, 23	2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 2,12, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	29
		1, 3, 6, 19, 22, 23	1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	28

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları

Şekil 4.8'de IEEE 24-Bara Test Sistemi için YA yakınsama şekilleri verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve fitness değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 50 ve iterasyon değeri 500 değerleri arasında değer verildiğinde, optimum sayıda FÖB sayısı ve konumları bulunmuştur.



Şekil 4.8. IEEE 24-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi.

Çizelge 4.8'de IEEE 24-Bara Test Sistemi için BPSO yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları ile, SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve FÖB konumları verilmiştir. Normal çalışma koşullarında 7 FÖB ile ve SEB dikkate alındığında ise 6 FÖB ile tamamen sistem gözlenmektedir. Çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SGAİ değeri 32 ve SEB'ler dikkate alındığında ise SGAİ değeri 30 bulunmuştur.

Çizelge 4.8. IEEE 24-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

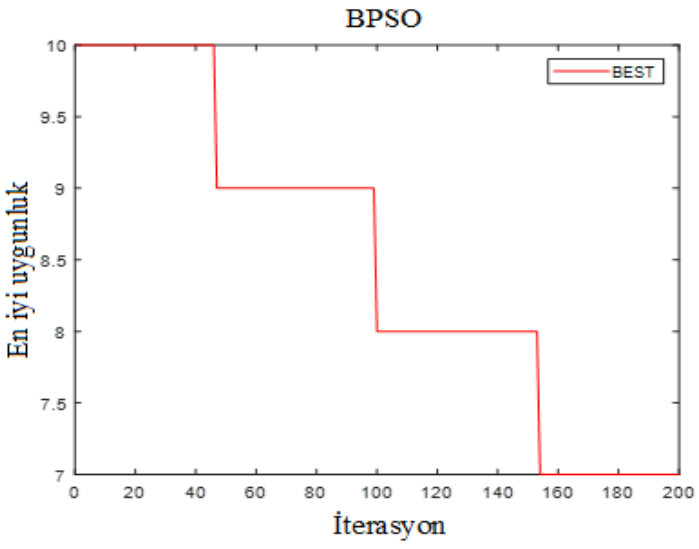
IEEE Bara Sistemi	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**BOI**	***TSORIs***
24-bara	7*	**2, 3, 8, 10, 16, 21, 23**	**2, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1**	**32**
		2, 3, 7, 10, 16, 21, 23	2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	29
		2, 8, 10, 16, 21, 23, 24	1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1	31
		3, 4, 7, 10, 16, 21, 23	1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	28

Çizelge 4.8. (devam) IEEE 24-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

24-bara	6**	**1, 2, 8, 16, 21, 23**	**2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1**	**30**
		1, 2, 8, 9, 15, 20	2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	29
		2, 3, 7, 10, 15, 20	1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	29

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları

IEEE 24-Bara Test Sistemi için literatür dikkatli incelendiğinde, literatüre OFY için BPSO kullanılarak bulunan sonuçların aynısı elde edildiği belirlenmiştir. Örneğin [42], [114], [119] referans numaralı makalelerde Çizelge 4.8'de verilen çalışma sonuçlarına aynı bara sayısı bulunmuştur. Ayrıca referanslı [42]'de yapılan IEEE 24-Bara Test Sistemi için çalışmada, gözlemlenebilirlik indeksi SGAİ değeri içi bulunan değerlerden daha iyi SGAİ değeri bulunmuştur. BPSO algoritması kullanılarak bulduğumuz sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında aynı değerleri bulduğumuzdan dolayı kullanmış olduğumuz BPSO güvenilir yöntem olduğu belirlenmiştir. Böylece bu yöntemlerin güvenli bir şekilde Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemleri üzerinde uygulanabilirliği ortaya konulmuştur.



Şekil 4.9. IEEE 24-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi.

Şekil 4.9'da IEEE 24-Bara Test Sistemi için BPSO yakınsama eğim şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'de fazla aynı iterasyon ve popülasyon değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır.

4.1.7. IEEE 57-Bara Test Sistem İçin OFY Sonuçlarının Bulunması ve Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması

Çizelge 4.9'da IEEE 57-Bara Test Sistemi için bulunan sonuçlar ve literatür de yapılan çalışmalarla karşılaştırılması verilmektedir. IEEE 57-Bara Test Sistemin de 80 iletim hattı, 57 bara mevcuttur. Bu baraların 15 adeti (4, 7, 11, 21, 22, 24, 26, 34, 36, 37, 39, 40, 45, 46, 48) SEB'dır. DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, TDP ve YA yöntemleri kullanılarak elde edilen OFY sonuçları ile literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. IEEE 57-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

Yöntemler	**FÖB Sayısı**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	***TSORIs***
YA	**17***	**1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 53, 57**	**74**
YA	**11****	**1, 9, 14, 20, 25, 29, 32, 38, 50, 54, 56**	**61**
TDP	**12****	**1, 4, 9, 14, 20, 25, 29, 32, 38, 50, 54, 56**	---
BPSO	**17***	**1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 53, 57**	**73**
		1, 3, 5, 6, 9, 15, 16, 19, 27, 29, 30, 32, 38, 41, 47, 51,54	**73**
GBTA	**18***	**1, 4, 7, 9, 15, 19, 21, 24, 27, 30, 32, 36, 39, 41, 46, 50, 52, 54**	---
BTA	**19***	**1, 4, 7, 9, 15, 19, 21, 24, 27, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 52, 54**	---
GTY	**21***	**2, 4, 7, 9, 15, 16, 17, 19, 21, 24, 27, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 52, 54**	---
DÖAY	**19***	**1, 4, 7, 9, 15, 19, 21, 24, 27, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 52, 54**	---
Depth First [86]	21	--------	---
Graph Theoretic Procedure [86]	13	--------	---
Minimum Spanning Tree [86]	30	--------	---
IGA [35]	11	1, 6, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56	
BILP [32]	17*	1, 4, 6, 13, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 39, 41, 45, 47, 51, 54	---
	13**	1, 4, 9, 14, 18, 22, 25, 28, 32, 37, 50, 53, 56	---
GA [32]	17*	**1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 53, 57** 1, 4, 9, 20, 24, 27, 29, 31, 32, 36, 38, 41, 45, 46, 51, 54, 57 1, 4, 9, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 41, 44, 46, 51, 54, 57 1, 4, 9, 19, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 39, 41, 45, 46, 49, 50, 54 1, 4, 9, 15, 20, 24, 25, 28, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 54 1, 4, 7, 9, 15, 20, 24, 25, 27, 32, 36, 38, 41, 46, 51, 53, 57 …….	**72** 68 68 67 71 71

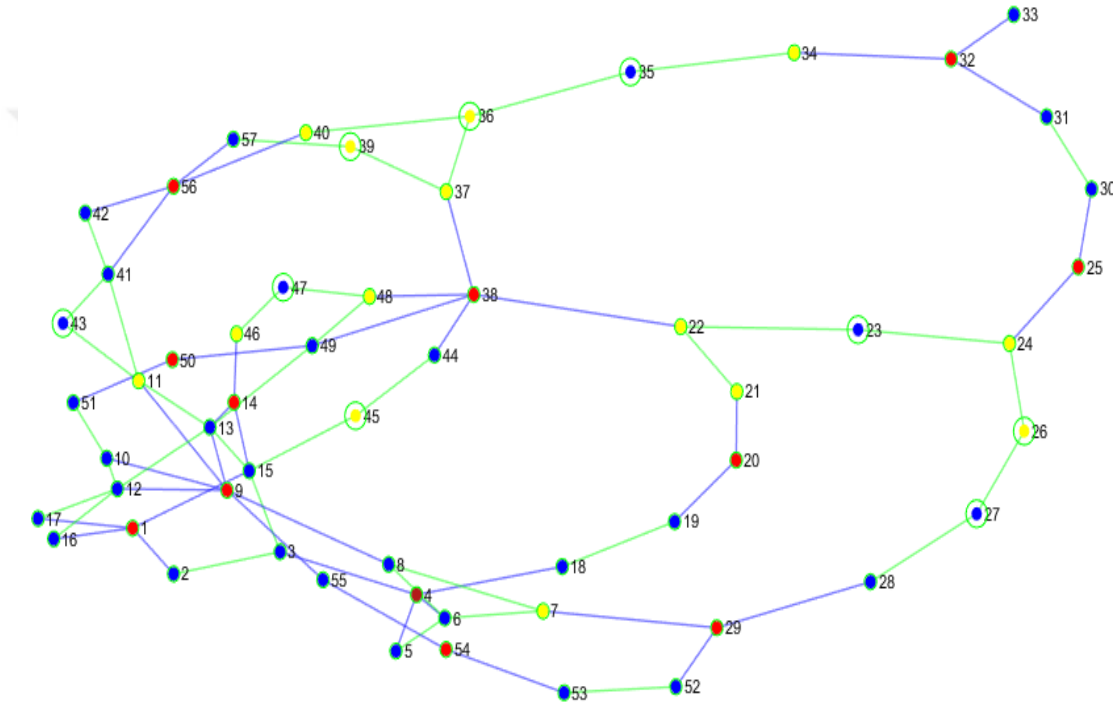
Çizelge 4.9. (devam) IEEE 57-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

PSO-MFO [111]	17	6, 9, 12, 15, 18, 21, 23, 26, 29, 30, 34, 37, 38, 47, 51, 53, 56	67
ILP [61]	17	1, 4, 9, 15, 20, 24, 25, 28, 29, 32, 36, 38, 41, 46, 50, 53, 57	---
NLP [112]	17	**1, 4, 9, 15, 20, 24, 25, 28, 29, 32, 36, 38, 41, 46, 50, 53, 57** 1, 6, 7, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 50, 53 1, 4, 7, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 32, 36, 38, 41, 47, 50, 53, 57 1, 3, 6, 10, 19, 22, 25, 27, 32, 36, 41, 44, 46, 49, 52, 55, 57 1, 4, 6, 10, 19, 22, 25, 27, 32, 36, 41, 45, 46, 49, 52, 55, 57 1, 6, 10, 15, 19, 22, 25, 27, 32, 36, 41, 44, 46, 49, 52, 55, 57 1, 4, 9, 10, 19, 22, 25, 26, 29, 32, 36, 41, 44, 46, 49, 54, 57 ……..	71 71 71 64 65 66 68
MWOA [49]	17*	1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 25, 28, 32, 36, 38, 41, 47, 50, 53, 57 1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 31, 32, 36, 38, 41, 46, 51, 53, 57 1, 4, 7, 9, 15, 20, 24, 25, 27, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 53 ……..	72 72 71
	11**	1, 4, 13, 20, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56 1, 4, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54 1, 4, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56 1, 6, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56 1, 6, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54	59 58 58 58 57
GA-EHBSA [115]	17	1, 4, 9, 15, 20, 24, 25, 28, 29, 32, 36, 38, 41, 46, 50, 53, 57	---
FPA [104]	17*	1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 31, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 53, 57 1, 4, 7, 9, 15, 20, 24, 28, 31, 32, 36, 38, 41, 46, 50, 53, 57	72 71
	12**	1, 6, 9, 14, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 50, 53 2, 6, 12, 14, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54	52 49
BPSO [118]	17*		---
BPSO [119]	17*	1, 4, 6, 13, 19, 22, 25, 26, 29, 32, 36, 39, 41, 45, 47, 51, 54	---
	11**	1, 5, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56	---

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.

Ayrıca YA ve TDP yöntemleri kullanılarak elde edilen OFY sonuçları, Literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Literatürde bulunan sonuçlarla benzer sonuçlar bulunmuştur. Bu nedenle YA ve TDP yöntemi alternatif ve güvenilir bir çözüm tekniği olarak sunulmuştur. OFY'nin sonuçlarını görselleştirilmiş TDP yöntemi kullanılmıştır.

SEB'ler sisteme dahil edildiğinde 1, 4, 9, 14, 20, 25, 29, 32, 38, 50, 54, 56 nolu baralar FÖB yerleştirildiğinde tüm güç sistemi tamamen gözlenebilmektedir. Sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, TDP yöntemi ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.10'da OFY için, grafik teorisi ve GIS kullanarak harita üzerinde bara sistemlerini görselleştirilmiş TDP yöntemi kullanılmıştır. FÖB konumları kırmızı renk ile, SEB'ler sarı renk ile, FÖB tarafından doğrudan kontrol edilen hatlar mavi renkle, FÖB tarafından doğrudan gözlenemeyen (Ohm Kanunu ve KAY kullanılarak gözlenir hale gelen) hatlar yeşil renkle, hem SEB hem de FÖB yerleştirilen bara koyu kırmızı renkle görselleştirilmiştir.



Şekil 4.10. IEEE 57-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), SEB (sarı), hem FÖB hem de SEB ise (koyu kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil) olarak görselleştirilmesi.

Çizelge 4.10'da YA yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları ile SEB dikkate alınarak ve alınmayarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları verilmiştir. YA yöntemi ile normal çalışma koşullarında 17 FÖB tüm sistem gözlemlenirken, SEB dikkate alınırsa 11 FÖB ile tüm sistem gözlemlenebilir. Literatürde OFY için bunulan en yüksek SGAİ değerinde daha iyi SGAİ (74) değeri bulunmuştur. Çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SGAİ değeri 74 ve SEB'ler dikkate

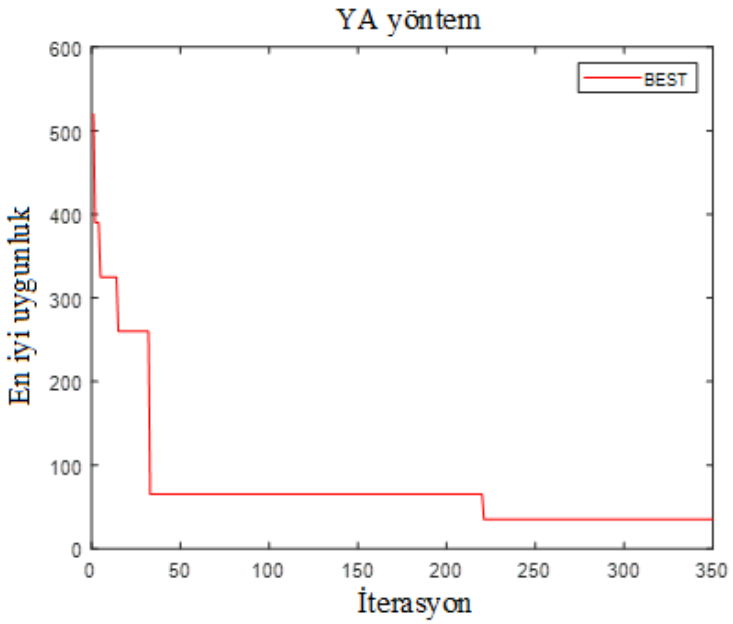
alındığında ise SGAİ değeri 61 bulunmuştur.

Çizelge 4.10. IEEE 57-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

IEEE Bara Sistemi	FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar	FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar	TSORIs
57-bara	17*	**1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 53, 57**	**74**
		1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 29, 32, 36, 38, 41, 46, 50, 53, 57	72
		1, 4, 6, 9, 15, 20, 25, 28, 32, 36, 38, 41, 47, 50, 53, 57	72
		1, 4, 10, 13, 15, 21, 23, 25, 29, 35, 38, 40, 43, 46, 49, 54, 55	71
		1, 2, 3, 5, 9, 14, 20, 27, 28, 30, 33, 47, 49, 52, 54, 55, 56	72
		1, 2, 5, 7, 10, 15, 17, 18, 22, 33, 37, 38, 44, 45, 48, 53,54	72
		3, 4, 6, 9, 12, 19, 20, 28, 31, 33, 37, 42, 43, 47, 50, 51, 56	71
		1, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 25, 29, 32, 35, 42, 43, 47, 50, 54, 56	69
		1, 3, 8, 10, 13, 17, 20, 23, 25, 32, 34, 45, 49, 53, 54, 55	69
	11**	**1, 9, 14, 20, 25, 29, 32, 38, 50, 54, 56**	**61**
		1, 4, 13, 20, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56	60
		1, 4, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56	59
		1, 3, 6, 10, 15, 25, 33, 38, 43, 55, 57	58
		2, 9, 12, 27, 43, 47, 49, 51, 54, 55, 56	57

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.

Şekil 4.11'de IEEE 57-Bara Test Sistemi için YA yakınsama şekilleri verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve fitness değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 50 ve iterasyon değeri 500 değerleri arasında değer verildiğinde, optimum sayıda FÖB sayısı ve konumları bulunmuştur.



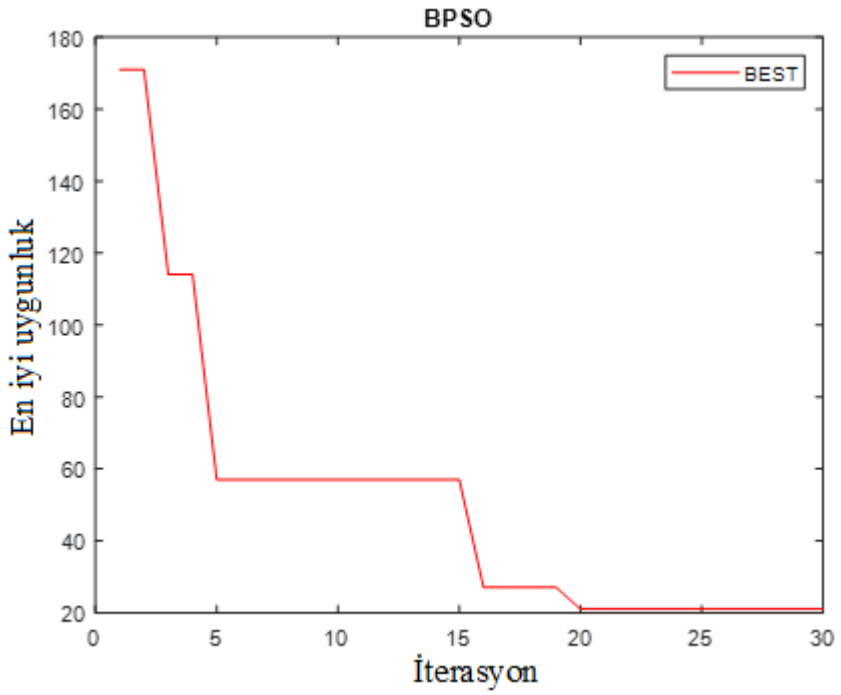
Şekil 4.11. IEEE 57-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi.

Çizelge 4.11'de BPSO yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları verilmiştir. BPSO yöntemi ile normal çalışma koşullarında 17 FÖB ile tüm sistem gözlenmektedir. Ayrıca çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SGAİ değeri BPSO yöntemiyle bulunmuştur. Literatürde OFY için bunulan en yüksek SGAİ değerinde daha iyi SGAİ (73) değeri bulunmuştur.

Çizelge 4.11. IEEE 57-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

IEEE Bara Sistemi	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**TSORIs**
57-bara	17*	**1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 53, 57**	**73**
		1, 3, 5, 6, 9, 15, 16, 19, 27, 29, 30, 32, 38, 41, 47, 51,54	**73**
		1, 4, 9, 10, 16, 20, 25, 29, 32, 36, 41, 43, 46, 49, 50, 53, 57	72
		3, 4, 6, 9, 12, 19, 20, 28, 31, 33, 37, 42, 43, 47, 50, 51, 56	71
		3, 4, 6, 9, 12, 14, 20, 27, 28, 31, 36, 41, 44, 46, 49, 53, 56	71
		1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 29, 32, 36, 38, 41, 46, 50, 53, 57	70
		3, 4, 12, 15, 18, 20, 25, 28, 32, 36, 41, 45, 47, 49, 50, 53, 54	69
		1, 4, 6, 9, 18, 20, 25, 26, 32, 39, 40, 41, 43, 46, 48, 51, 53	69
		1, 6, 9, 10, 15, 18, 20, 25, 28, 31, 32, 41, 44, 49, 53, 54, 57	68
		1, 4, 9, 14, 17, 22, 26, 29, 32, 34, 38, 40, 41, 47, 50, 51,53	68

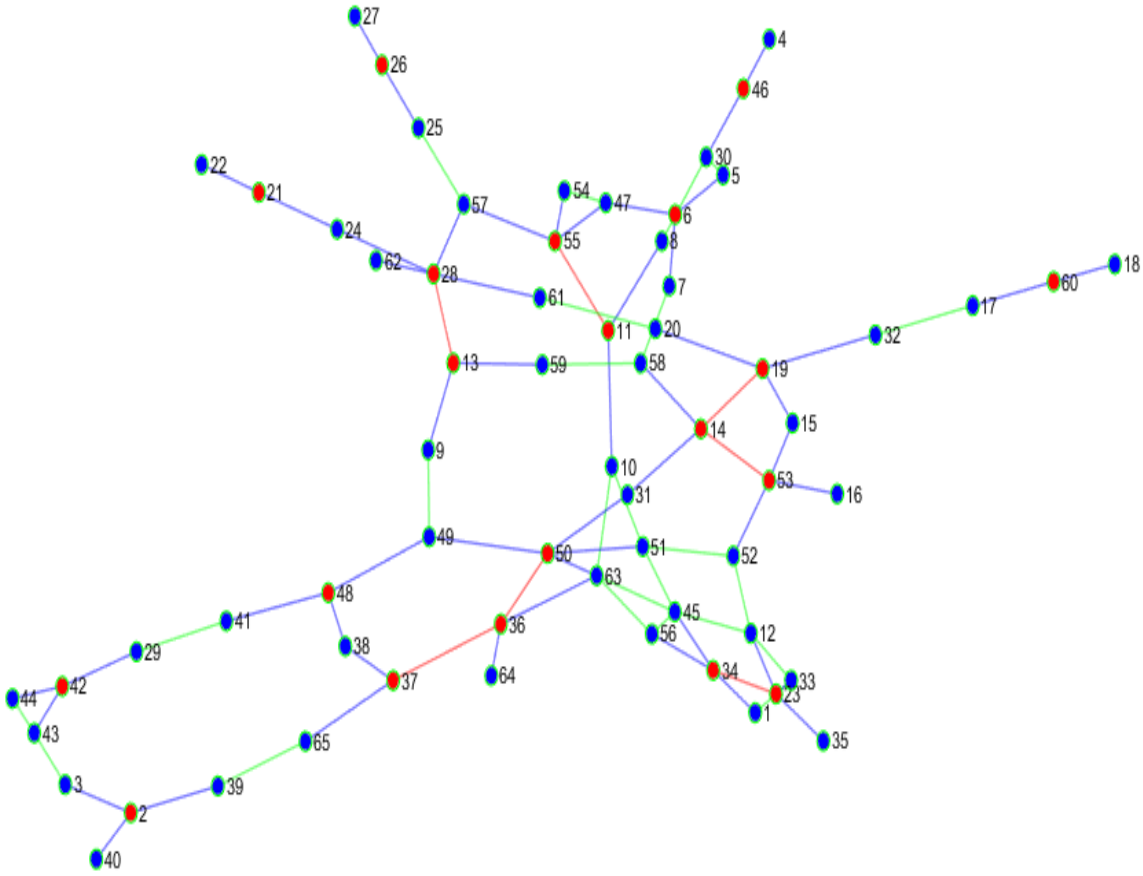
Şekil 4.12'de IEEE 57-Bara Test Sistemi için BPSO yakınsama eğim şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve popülasyon değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 1000 ve popülasyon değeri 100 değerleri arasında iken optimum sayıda FÖB değerleri ve FÖB'lerin yerleştirileceği baralar bulunmuştur. c_1 ve c_2 değerleri [0,2-2] arasında değer alırlar. Çalışmamızda c_1 ve c_2 değerleri değeri olarak [0,2-1] arasında değer verdiğimizde optimum sayıda FÖB sayısı bulunmuştur.



Şekil 4.12. IEEE 57-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi.

4.1.8. IEEE 65-Bara Test Sistem İçin OFY Sonuçlarının Bulunması ve Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması

IEEE 65-Bara Test Sistemin de 93 iletim hattı, 65 bara mevcuttur. ILP yöntemi kullanılarak IEEE 65-Bara Test Sistemi için OFY yapılmıştır. Literatür daha önce IEEE 65-Bara Sistem için OFY çalışması bulunmamaktadır. IEEE 65-Bara Test Sisteminde SEB bulunmamaktadır. TDP yöntemi ile 20 FÖB ile ve 2, 6, 11, 13, 14, 19, 21, 23, 26, 28, 34, 36, 37, 42, 46, 48, 50, 53, 55, 60 bara lokasyonlarına yerleştirilmesiyle IEEE 65-Bara Test Sistemi tamamen gözlenmektedir. Şekil 4.13'te IEEE 65-Bara Test Sistemi için TDP yöntemi kullanılarak elde edilen OFY görsel şekli verilmektedir.



Şekil 4.13. IEEE 65-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), iki FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil) olarak görselleştirilmesi.

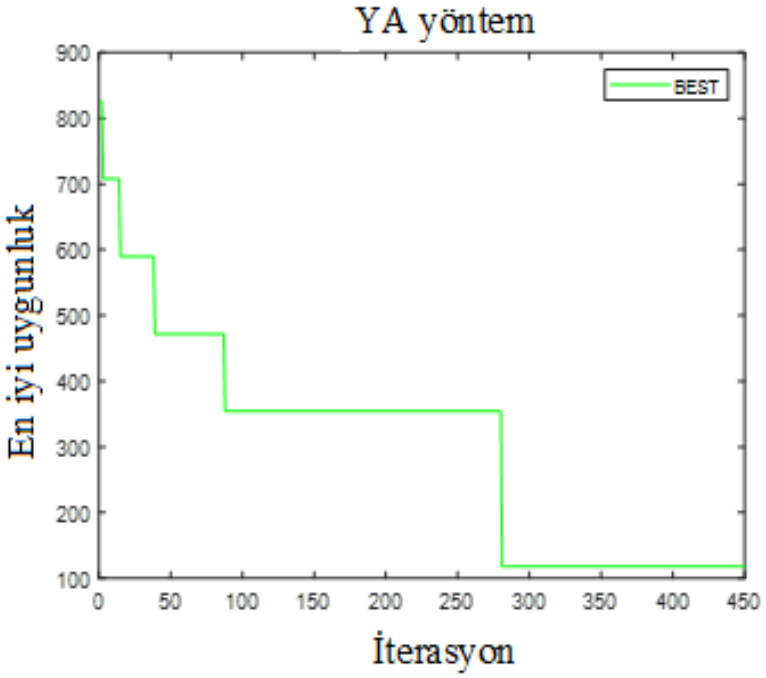
Ayrıca OFY işlemi, ilk kez yeni bir sezgisel yöntem olan YA yöntemi IEEE 65-Bara Test Sistemi için kullanılmıştır. Çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için BGİ ve SGAİ kullanılmıştır. YA yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları ile, Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12'de IEEE 65 Bara Test Sistem için YA yöntemin kullanılarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları bulunmuştur. IEEE 65-Bara Test Sisteminde SEB bulunmamaktadır. YA yöntemin kullanıldığında, güç sistemi 18 FÖB ile tamamen gözlenmektedir. Çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SGAİ değeri 90 bulunmuştur. Literatürde IEEE YA yöntemin için OFY çalışması bulunmadığından dolayı karşılaştırma yapılamamaktadır.

Çizelge 4.12. IEEE 65-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

IEEE Bara Sistemi	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	***TSORIs***
65-bara	18	**2, 3, 4, 5, 6, 12, 17, 18, 25, 26, 30, 31, 35, 45, 48, 54, 58, 63**	**90**
		3, 4, 13, 18, 26, 29, 30, 31, 34, 36, 37, 38, 44, 51, 56, 61, 62, 63	89
		3, 5, 7, 10, 18, 24, 25, 30, 33, 35, 36, 42, 43, 48, 51, 54, 55, 57	89
	19	**2, 5, 7, 16, 17, 18, 23, 24, 25, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 48, 51, 54, 63**	**97**
		4, 6, 10, 14, 16, 19, 20, 35, 36, 37, 45, 50, 51, 54, 58, 60, 61, 63, 64	96
		2, 6, 11, 13, 14, 19, 21, 23, 26, 28, 34, 36, 42, 46, 48, 50, 53, 55, 60	95
		6, 9, 12, 14, 16, 18, 22, 23, 25, 31, 33, 35, 36, 41, 42, 48, 50, 58, 60	94
		3, 4, 6, 11, 15, 20, 21, 24, 30, 36, 37, 38, 39, 47, 51, 55, 57, 60, 61	92
		2, 4, 7, 23, 30, 34, 38, 40, 43, 45, 48, 49, 50, 51, 53, 55, 57, 58, 64	91

Şekil 4.14'te en iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve fitness değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 50 ve iterasyon değeri 500 değerleri arasında değer verildiğinde, optimum sayıda FÖB sayısı ve konumları bulunmuştur.



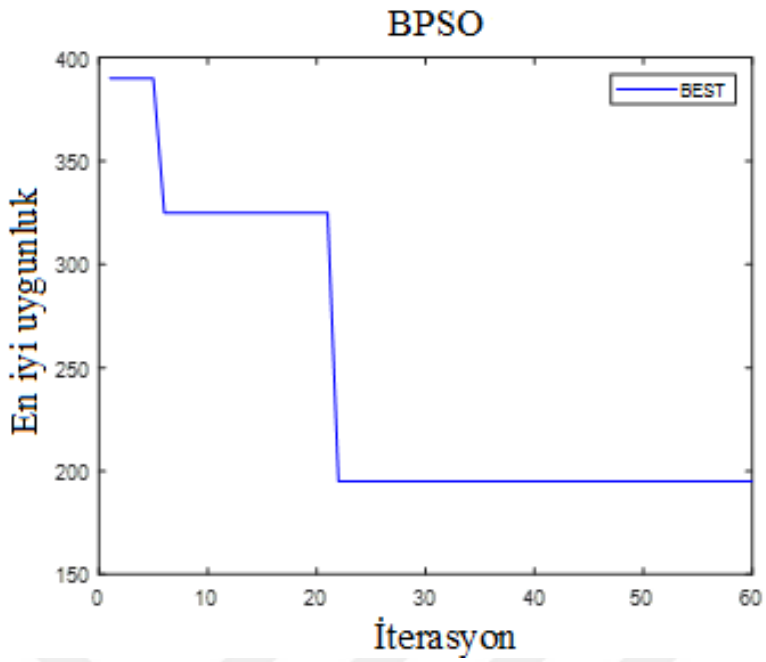
Şekil 4.14. IEEE 65-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi.

Çizelge 4.13'de BPSO yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları verilmiştir. BPSO yöntemi ile normal çalışma koşullarında 22 FÖB tüm sistem gözlenmektedir Ayrıca çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SGAİ değeri BPSO yöntemiyle bulunmuştur. OFY için bunulan en yüksek SGAİ değerinde (90) değeri bulunmuştur.

Çizelge 4.13. IEEE 65-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

IEEE Bara Sistemi	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	***TSORIs***
65-bara	22	**2, 5, 7, 11, 16, 17, 18, 23, 24, 25, 30, 36, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 48, 51, 54, 63**	**90**
		2, 7, 9, 10, 17, 18, 19, 22, 23, 26, 28, 29 30, 31, 35, 36, 38, 44, 52, 54, 56, 58	88
		2, 5, 7, 13, 14, 17, 21, 26, 31, 33, 35, 37, 42, 43, 45, 46, 48, 51, 55, 58, 60, 61	86
		2, 3, 9, 12, 16, 18, 21, 26, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 42, 46, 48, 51, 55, 58, 61, 65	85
		2, 5, 6, 8, 14, 16, 19, 21, 22, 23, 26, 28, 30, 32, 34, 37, 44, 47, 49, 50, 53, 60	85
		2, 9, 11, 12, 13, 19, 21, 25, 28, 30, 35, 36, 37, 38, 39, 42, 47, 50, 53, 57, 58, 60	84
		4, 5, 11, 15, 17, 22, 24, 26, 28, 31, 33, 36, 40, 43, 45, 48, 49, 53, 54, 58, 64, 65	84
		3, 4, 5, 9, 11, 13, 15, 18, 20, 21, 26, 28, 34, 36, 37, 40, 41, 43, 45, 49, 50, 53	83

Şekil 4.15'te IEEE 65-Bara Test Sistem için BPSO yakınsama şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve popülasyon değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 1000 ve popülasyon değeri 100 değerleri arasında iken optimum sayıda FÖB değerleri ve FÖB'lerin yerleştirileceği baralar bulunmuştur. c_1 ve c_2 değerleri [0,2-2] arasında değer alırlar. Çalışmamızda c_1 ve c_2 değerleri değeri olarak [0,2-1] arasında değer verdiğimizde optimum sayıda FÖB sayısı bulunmuştur.



Şekil 4.15. IEEE 65-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi.

4.1.9. IEEE 300-Bara Test Sistem İçin OFY Sonuçlarının Bulunması ve Farklı Yöntemlerle Sonuçların Karşılaştırılması

Çizelge 4.14'te IEEE 300-Bara Test Sistem için bulunan sonuçlar ve literatür de yapılan çalışmalarla karşılaştırılması verilmektedir. IEEE 300-Bara Test Sistemin de 304 iletim hattı, 300 bara mevcuttur. Bu baraların 67adeti (4, 7, 12, 16, 18, 23, 28, 29, 30, 33, 36, 39, 40, 52, 54, 56, 57, 62, 65, 68, 70, 71, 72, 73, 82, 94, 95, 96, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 123, 129, 130, 137, 139, 142, 143, 144, 145, 147, 148, 153, 172, 173, 174, 184, 189, 191, 198, 205, 216, 219, 223, 245, 246, 266, 270, 271, 272, 273, 276, 291) SEB'dır. DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, TDP ve YA yöntemleri kullanılarak elde edilen OFY sonuçları ile literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırmalı Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.14. IEEE 300-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

Yöntemler	FÖB Sayısı	FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar	*TSORIs*
DA	**87***	**1, 3, 4, 14, 16, 31, 34, 36, 37, 39, 42, 43, 50, 53, 55, 59, 60, 63, 66, 74, 75, 77, 79, 81, 84, 86, 87, 89, 93, 95, 101, 106, 109, 112, 114, 122, 125, 130, 131, 133, 134, 141, 143, 145, 146, 148, 149, 150, 152, 154, 161, 165, 167, 176, 177, 178, 180, 182, 185, 188, 190, 193, 198, 201, 202, 209, 221, 222, 223, 232, 240, 246, 248, 252, 254, 255, 256, 259, 271, 274, 276, 283, 284, 286, 289, 294, 300**	**424**
DA	**72****	**1, 2, 3, 11, 15, 17, 20, 22, 23, 25, 31, 35, 37, 38, 43, 48, 49, 53, 55, 58, 59, 60, 64, 79, 83, 85, 86, 88, 89, 93, 98, 99, 103, 105, 109, 116, 118, 119, 122, 132, 135, 136, 141, 152, 157, 163, 167, 169, 177, 183, 189, 190, 193, 196, 202, 204, 208, 210, 211, 213, 216, 217, 224, 228, 267, 268, 269, 270, 272, 274, 276, 294**	**402**
TDP	**72****	**1, 2, 3, 11, 15, 17, 20, 22, 23, 25, 31, 35, 37, 38, 43, 48, 49, 53, 55, 58, 59, 60, 64, 79, 83, 85, 86, 88, 89, 93, 98, 99, 103, 105, 109, 116, 118, 119, 122, 132, 135, 136, 141, 152, 157, 163, 167, 169, 177, 183, 189, 190, 193, 196, 202, 204, 208, 210, 211, 213, 216, 217, 224, 228, 267, 268, 269, 270, 272, 274, 276, 294**	**---**
BPSO	**89***	**1, 3, 4, 14, 16, 31, 34, 36, 37, 39, 42, 43, 50, 53, 55, 59, 60, 63, 66, 74, 75, 77, 79, 81, 84, 86, 87, 89, 93, 95, 101, 106, 109, 112, 114, 122, 125, 130, 131, 133, 134, 141, 143, 145, 146, 148, 149, 150, 152, 154, 161, 165, 167, 176, 177, 178, 180, 182, 185, 188, 190, 193, 198, 201, 202, 209, 221, 222, 223, 232, 240, 246, 248, 252, 254, 255, 256, 259, 262, 269, 271, 274, 276, 283, 284, 286, 289, 294, 300**	**402**
GBTA	**87**	**1, 2, 3, 11, 14, 17, 19, 22, 23, 25, 27, 31, 36, 38, 42, 44, 46, 48, 50, 53, 55, 58, 60, 61, 64, 66, 74, 79, 81, 85, 86, 92, 93, 99, 101, 105, 109, 115, 116, 117, 119, 122, 126, 132, 133, 138, 141, 152, 157, 164, 166, 170, 183, 185, 188, 189, 190, 193, 195, 199, 201, 203, 208, 210, 212, 213, 217, 219, 224, 228, 229, 235, 240, 243, 257, 259, 262, 264, 267, 268, 269, 270, 272, 275, 276, 294, 300**	**---**
BTA	**107**	**2 3 5 11 12 14 17 18 19 22 23 25 27 30 31 36 38 42 44 46 48 50 53 54 55 58 60 61 64 68 69 71 79 80 81 85 86 92 93 97 99 101 103 105 109 113 115 116 117 118 119 122 132 133 134 138 141 145 149 150 152 157 164 166 170 172 183 185 188 189 190 191 193 195 198 199 201 203 208 210 212 213 217 219 220 223 224 227 229 235 240 242 243 247 255 257 259 262 267 268 269 270 272 275 276 299 300**	**---**
GTY	**109**	**3, 5, 6, 11, 12, 14, 17, 19, 22, 23, 25, 27, 30, 31, 36, 38, 42, 44, 46, 48, 50, 54, 55, 58, 61, 62, 64, 68, 69, 71, 79, 80, 81, 85, 86, 92, 93, 97, 99, 101, 103, 105, 107, 109, 113, 115, 116, 117, 118, 119, 122, 132, 133, 134, 138, 141, 145, 147, 149, 150, 152, 157, 164, 166, 170, 172, 183, 185, 188, 189, 190, 191, 193, 195, 198, 199, 201, 203, 208, 210, 212, 213, 217, 219, 220, 223, 224, 227, 229, 235, 238, 242, 243, 247, 248, 255, 257, 259, 260, 262, 267, 268, 269, 270, 272, 275, 276, 299, 300**	**---**

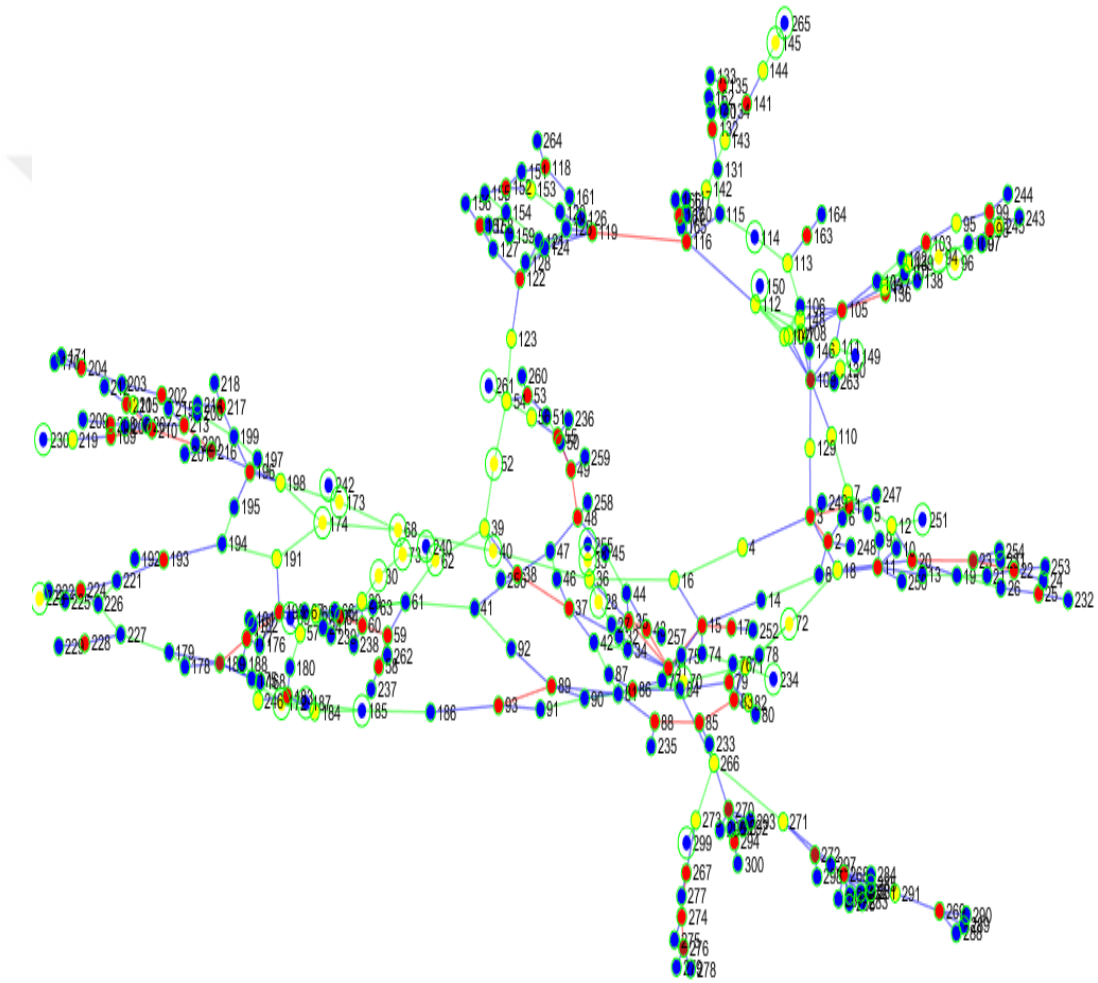
Çizelge 4. 14. (devam) IEEE 300-bara test sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

DÖAY	**110**	**2, 3, 5, 11, 12, 14, 17, 18, 19, 22, 23, 25, 27, 30, 31, 36, 38, 39, 42, 44, 46, 48, 50, 53, 54, 55, 58, 60, 61, 64, 68, 69, 71, 79, 80, 81, 85, 86, 92, 93, 97, 99, 101, 103, 105, 107, 109, 113, 115, 116, 117, 118, 119, 122, 132, 133, 134, 138, 141, 145, 147, 149, 150, 152, 157, 164, 166, 170, 172, 183, 185, 188, 189, 190, 191, 193, 195, 198, 199, 201, 203, 208, 210, 212, 213, 217, 219, 220, 223, 224, 227, 229, 235, 240, 242, 243, 247, 255, 257, 259, 262, 267, 268, 269, 270, 272, 275, 276, 299, 300**	---
ILP [112]	87	1, 2, 3, 11, 12, 15, 17, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 33, 37, 38, 43, 48, 49, 53, 54, 59, 62, 64, 65, 68, 71, 79, 82, 85, 86, 88, 89, 93, 98, 99, 101, 109, 111, 112, 113, 116, 118, 119, 124, 132, 135, 138, 139, 143, 145, 152, 157, 163, 167, 173, 177, 183, 187, 189, 190, 193, 196, 202, 204, 209, 210, 212, 213, 216, 217, 224, 225, 228, 230, 236, 237 ,238, 267, 268, 269, 270, 272, 273, 274, 276, 294	----
NLP [112]	87	1, 2, 3, 11, 12, 15, 17, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 33, 37, 38, 43, 48, 49, 53, 54, 59, 62, 64, 65, 68, 71, 79, 82, 85, 86, 88, 89, 93, 98, 99, 101, 109, 111, 112, 113, 116, 118, 119, 124, 132, 135, 138, 139, 143, 145, 152, 157, 163, 167, 173, 177, 183, 187, 189, 190, 193, 196, 202, 204, 209, 210, 212, 213, 216, 217, 224, 225, 228, 230, 236, 237, 238, 267, 268, 269, 270, 272, 273, 274, 276, 294 **1, 2, 3, 11, 12, 15, 17, 19, 22, 23, 25, 27, 33, 37, 38, 43, 48, 49, 53, 54, 59, 62, 64, 65, 68, 71, 73, 79, 82, 85, 86, 88, 89, 93, 98, 99, 101, 109, 111, 112, 113, 116, 118, 119, 124, 132, 135, 138, 139, 143, 145, 152, 157, 163, 167, 173, 177, 183, 187, 189, 190, 193, 196, 202, 204, 209, 210, 212, 213, 216, 217, 224, 225, 228, 230, 236, 237, 238, 267, 268, 269, 270, 272, 273, 274, 276, 294** ----------	417 **418**
BILP [120]	77	6, 17, 26, 53, 56, 69, 73, 87, 92, 103, 110, 117, 123, 126, 128, 129, 135, 140, 145, 147, 148, 149, 150, 153, 158, 159, 162, 164, 186, 187, 188, 189, 209, 212, 215, 216, 218, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 246, 275, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 292, 293, 295, 296, 297, 298, 299, 300	----
	87	1, 2, 3, 11, 15, 19, 23, 25, 27, 33, 37, 43, 48, 49, 53, 54, 62, 64, 68, 69, 71, 73, 76, 83, 86, 88, 92, 93, 98, 99, 101, 109, 111, 112, 113, 116, 119, 124, 132, 135, 138, 139, 143, 145, 152, 157, 163, 167, 183, 187, 188, 189, 190, 193, 196, 202, 204, 209, 210, 212, 213, 216, 218, 222, 226, 228, 230, 233, 236, 237, 238, 242, 251, 253, 256, 262, 264, 268, 269, 270, 272, 275, 276, 277, 299, 300	----

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.

OFY'nin sonuçlarını sırasıyla grafik teorisi ve CBS kullanarak bir harita üzerinde görselleştirilmiş TDP yöntemi kullanılmıştır. TDP yöntemi ile IEEE 300-Bara Test Sistemin de 72 baraya FÖB yerleştirildiğinde tüm güç sistemi tamamen

gözlenebilmektedir. Sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, TDP yöntemi ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.16'da OFY için, grafik teorisi ve CBS kullanarak harita üzerinde bara sistemlerini görselleştirilmiş TDP yöntemi kullanılmıştır. FÖB konumları kırmızı renk ile, SEB'ler sarı renk ile, FÖB tarafından doğrudan kontrol edilen hatlar mavi ile, FÖB tarafından doğrudan gözlenemeyen (Ohm Kanunu ve KAY kullanılarak gözlenir hale gelen) hatlar yeşil renkle, hem SEB hem de FÖB yerleştirilen baralar koyu kırmızı renkle, iki FÖB tarafından gözlenen hatlar kırmızı renkle, FÖB olmayan hatlar yeşil renkle görselleştirilmiştir.



Şekil 4.16. IEEE 300-bara test sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), SEB (sarı), hem FÖB hem de SEB ise baralar (koyu kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil), iki FÖB tarafından gözlenen hatlar (kırmızı) olarak görselleştirilmesi.

Çizelge 4.15'te YA yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları ile SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları verilmiştir. YA yöntemi ile normal çalışma koşullarında 87 FÖB tüm sistem

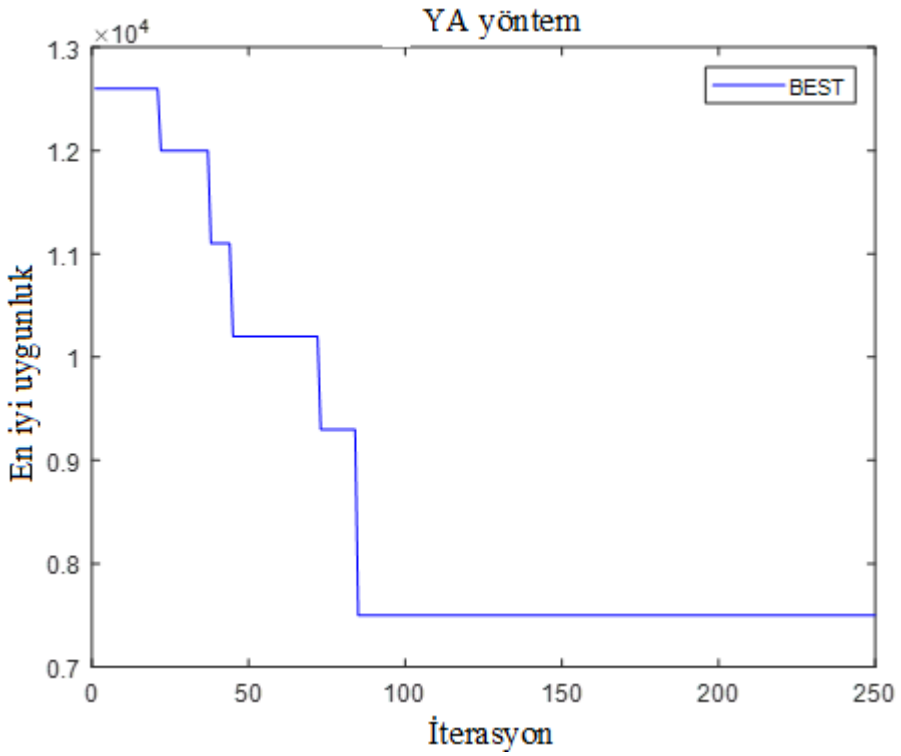
gözlemlenirken, SEB dikkate alınırsa 72 FÖB ile tüm sistem gözlemlenebilir. Literatürdeki çalışmalarda aynı FÖB sayısını bulunmuştur. Çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SGAİ değeri 424 ve SEB'ler dikkate alındığında ise SGAİ değeri 402 bulunmuştur. Literatürde OFY için bunulan en yüksek SGAİ değerinde, daha iyi SGAİ değeri bulunmuştur.

Çizelge 4.15. IEEE 300-bara test sistem için YA kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

IEEE Bara Sistemi	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	***TSORIs***
300-bara	87*	**1, 3, 4, 14, 16, 31, 34, 36, 37, 39, 42, 43, 50, 53, 55, 59, 60, 63, 66, 74, 75, 77, 79, 81, 84, 86, 87, 89, 93, 95, 101, 106, 109, 112, 114, 122, 125, 130, 131, 133, 134, 141, 143, 145, 146, 148, 149, 150, 152, 154, 161, 165, 167, 176, 177, 178, 180, 182, 185, 188, 190, 193, 198, 201, 202, 209, 221, 222, 223, 232, 240, 246, 248, 252, 254, 255, 256, 259, 271, 274, 276, 283, 284, 286, 289, 294, 300**	**424**
		1, 2, 3, 11, 12, 15, 17, 19, 22, 23, 25, 27, 33, 37, 38, 43, 48, 49, 53, 54, 59, 62, 64, 65, 68, 71, 73, 79, 82, 85, 86, 88, 89, 93, 98, 99, 101, 109, 111, 112, 113, 116, 118, 119, 124, 132, 135, 138, 139, 143, 145, 152, 157, 163, 167, 173, 177, 183, 187, 189, 190, 193, 196, 202, 204, 209, 210, 212, 213, 216, 217, 224, 225, 228, 230, 236, 237, 238, 267, 268, 269, 270, 272, 273, 274, 276, 294	420
		1, 2, 3, 11, 15, 17, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 33, 37, 38, 43, 48, 49, 53, 54, 59, 62, 64, 65, 68, 71, 79, 82, 85, 86, 89, 93, 98, 99, 101, 109, 111, 112, 113, 116, 119, 124, 132, 135, 138, 139, 143, 145, 152, 157, 160, 163, 173, 183, 187, 188, 189, 190, 193, 196, 202, 204, 209, 210, 212, 215, 216, 217, 224, 225, 228, 230, 235, 236, 237, 238, 251, 264, 267, 268, 269, 270, 272, 273, 274, 276, 294	410
	72**	**1, 2, 3, 11, 15, 17, 20, 22, 23, 25, 31, 35, 37, 38, 43, 48, 49, 53, 55, 58, 59, 60, 64, 79, 83, 85, 86, 88, 89, 93, 98, 99, 103, 105, 109, 116, 118, 119, 122, 132, 135, 136, 141, 152, 157, 163, 167, 169, 177, 183, 189, 190, 193, 196, 202, 204, 208, 210, 211, 213, 216, 217, 224, 228, 267, 268, 269, 270, 272, 274, 276, 294**	**402**
		2, 5, 8, 10, 17, 21, 27, 31, 35, 42, 75, 78, 79, 81, 83, 88, 91, 93, 98, 104, 106, 114, 115, 116, 117, 122, 128, 132, 141, 149, 151, 157, 158, 159, 162, 163, 165, 166, 167, 168, 175, 177, 181, 183, 190, 196, 199, 204, 207, 208, 209, 210, 214, 223, 225, 235, 250, 256, 257, 260, 262, 265, 269, 274, 277, 283, 286, 290, 292, 293, 294, 295, 298	398

*Normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.
**SEB dikkate alınarak elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları.

Şekil 4.17'de IEEE 300-Bara Test Sistem için YA yakınsama şekilleri verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve fitness değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 50 ve iterasyon değeri 500 değerleri arasında değer verildiğinde, optimum sayıda FÖB sayısı ve konumları bulunmuştur.



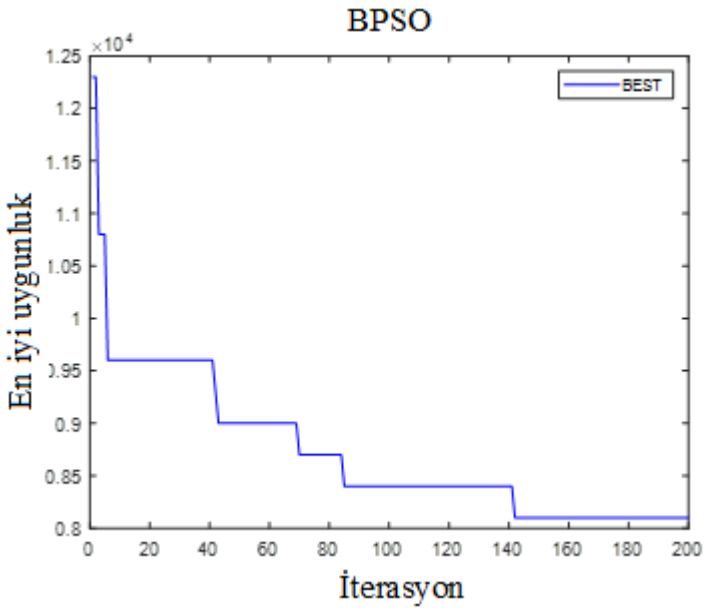
Şekil 4.17. IEEE 300-bara test sistem için YA yakınsama eğrisi.

Çizelge 4.16'da BPSO yöntemin normal çalışma koşullarında elde edilen optimum FÖB sayısı ve konumları verilmiştir. BPSO yöntemi ile normal çalışma koşullarında 89 FÖB tüm sistem gözlenmektedir. Ayrıca çalışmamızda çoklu çözümleri daha iyi sıralamak ve güç sisteminin tamamen gözlemleyebilir olduğunu anlamak için SGAİ değeri BPSO yöntemiyle bulunmuştur. OFY için bunulan en yüksek SGAİ değerinde (402) değeri bulunmuştur. YA ve BPSO karşılaştırıldığında çok sayıda iletim sistemine ve baraya sahip güç sistemlerinde YA yöntemi daha az sayıda FÖB ile gözlenebilmektedir.

Çizelge 4.16. IEEE 300-bara test sistem için BPSO kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

IEEE Bara Sistemi	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	***TSORIs***
300-bara	**89**	1, 3, 4, 14, 16, 31, 34, 36, 37, 39, 42, 43, 50, 53, 55, 59, 60, 63, 66, 74, 75, 77, 79, 81, 84, 86, 87, 89, 93, 95, 101, 106, 109, 112, 114, 122, 125, 130, 131, 133, 134, 141, 143, 145, 146, 148, 149, 150, 152, 154, 161, 165, 167, 176, 177, 178, 180, 182, 185, 188, 190, 193, 198, 201, 202, 209, 221, 222, 223, 232, 240, 246, 248, 252, 254, 255, 256, 259, 262, 269, 271, 274, 276, 283, 284, 286, 289, 294, 300	**402**
		1, 2, 10, 11, 16, 19, 20, 31, 36, 44, 46, 47, 48, 49, 53, 57, 58, 61, 64, 66, 69, 77, 78, 81, 83, 84, 90, 92, 100, 102, 106, 110, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 124, 126, 134, 135, 136, 140, 141, 144, 149, 150, 152, 157, 170, 171, 176, 181, 185, 188, 189, 193, 194, 196, 199, 200, 202, 203, 204, 208, 210, 214, 223, 226 227, 228, 235, 237, 240, 242, 244, 247, 256, 257, 258, 260, 262, 268, 277, 279, 280, 292, 293	388
		1, 3, 5, 6, 9, 10, 15, 19, 22, 24, 26, 35, 37, 42, 43, 46, 49, 50, 55, 61, 64, 76, 78, 83, 86, 91, 93, 98, 99, 103, 116, 121, 122, 125, 127, 140, 146, 158, 163, 167, 179, 181, 183, 186, 188, 190, 193, 194, 199, 200, 203, 207, 208, 210, 212, 215, 217, 224, 228, 229, 232, 235, 236, 237, 238, 239, 243, 248, 251, 258, 259, 261, 264, 265, 267, 268, 274, 275, 277, 278, 279, 282, 283, 289, 293, 294, 295, 299, 300	368

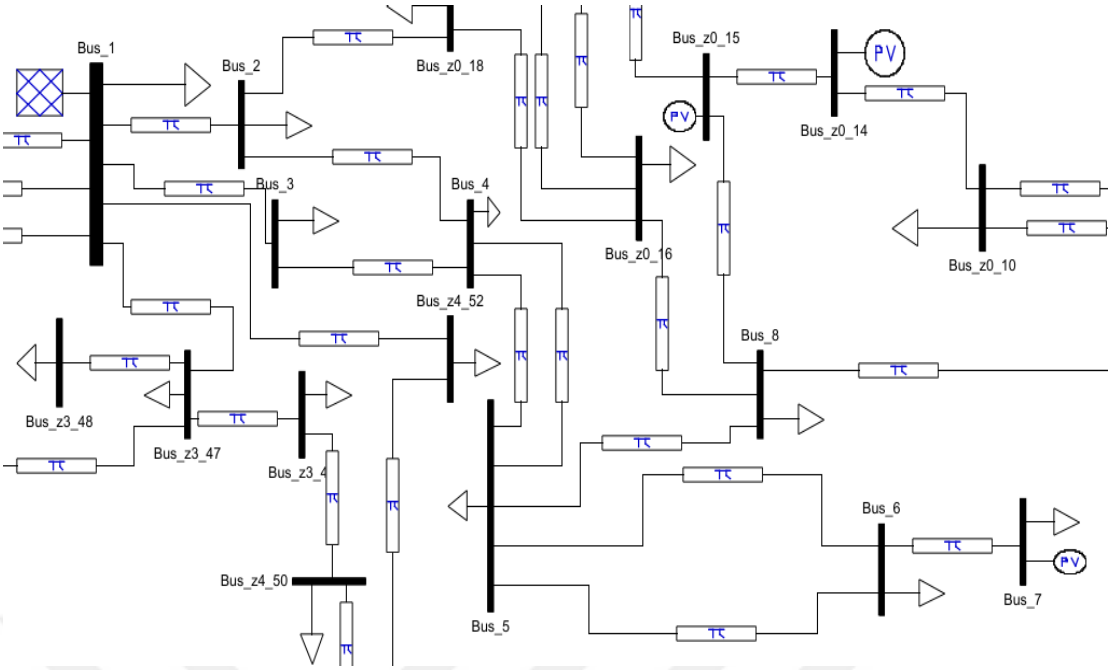
Şekil 4.18'de IEEE 300-Bara Test Sistem için BPSO yakınsama şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve popülasyon değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 1000 ve popülasyon değeri 100 değerleri arasında iken optimum sayıda FÖB değerleri ve FÖB'lerin yerleştirileceği baralar bulunmuştur. c_1 ve c_2 değerleri [0,2-2] arasında değer alırlar. Çalışmamızda c_1 ve c_2 değerleri değeri olarak [0,2-1] arasında değer verdiğimizde optimum sayıda FÖB sayısı bulunmuştur.



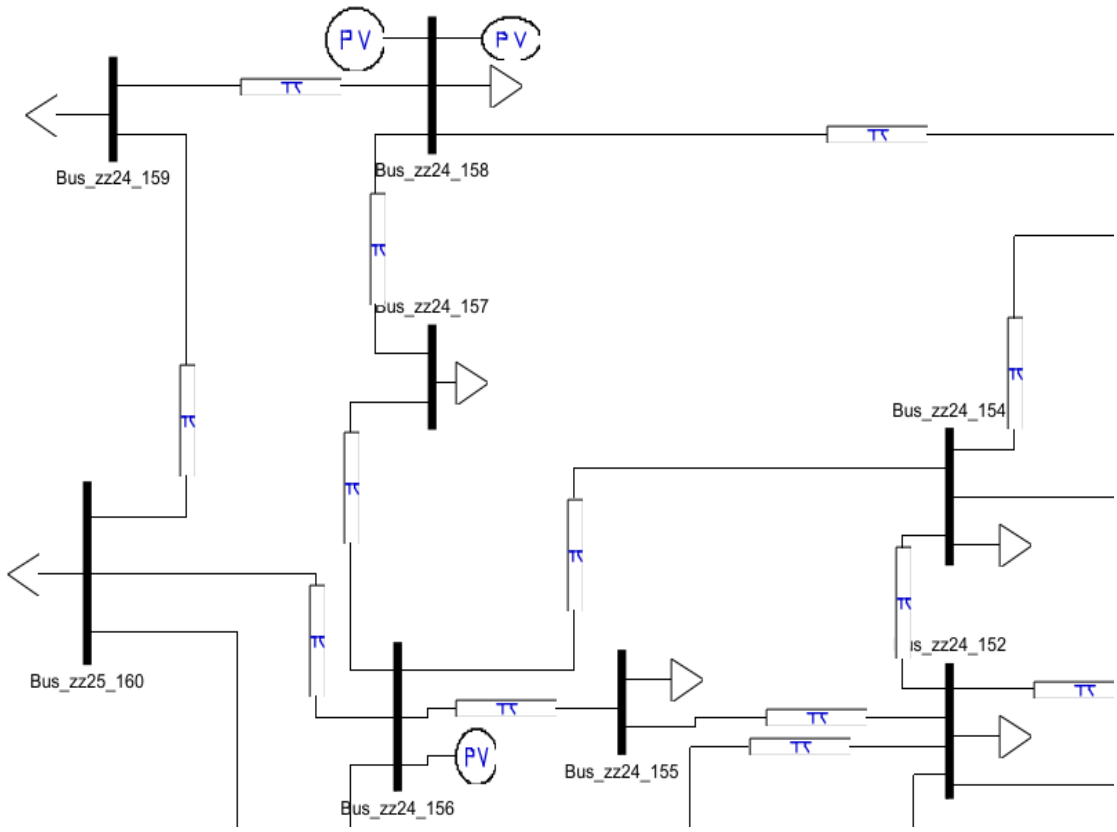
Şekil 4.18. IEEE 300-bara test sistem için BPSO yakınsama eğrisi.

4.2. TÜRKİYE 400 kV'LUK ENTERKONNEKTE GÜÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ÇÖZÜMÜ

Bilgisayar destekli benzetim programı GSAAK kullanılarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi (mevcut çalışmakta olan baralar ve iletim hattı) ile devreye alınmamış hatlar (inşası devam eden hat ve baralar) için ayrı ayrı modellenmiştir. Amaç güç sisteminin tamamını gözlemleyecek şekilde FÖB'lerin yerleştirmesi olduğu için, güç sisteminin anlık üretim ve tüketim parametreleri gerekmemektedir. Aynı şekilde sisteme bağlı olan kompanzasyon sistemleri de ihmal edilmiştir. OFY işlemi için sistemin bağlantı şeması yeterli olacaktır. Türkiye 400 kV mevcut çalışmakta olan enterkonnekte güç sisteminin 160 bara ve 257 iletim hattı bulunmaktadır. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sisteminin devreye alınmamış hatlar (inşası devam eden) dikkate alındığında 167 bara ve 280 iletim hatta sahip olacaktır. Modelleme işlemleri Intel i7-8550u 1.8 Ghz işlemci ve 8GB RAM'a sahip bilgisayarda yapılmıştır. Modellemeler Matlab 2018b programın kullanılarak ASAAK programı ile yapılmıştır. OFY işlemi Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, TDP ve YA yöntemleri kullanılarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sisteminin GSAAK programında modellenmesinin kısımları Şekil 4.19'da verilmektedir [121].



a)



b)

Şekil 4.19. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem: a) Güneydoğu, b) Kuzeybatı parçasının GSAAK modeli (Türkiye 400 kV'luk güç sistemin bazı bölümleri).

Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistem modellenmesi denklem (4.9)'e göre modellenirse, güç sisteminin problem formülasyonu Denklem (4.4)'deki gibi elde edilir.

$$\min = \Sigma_{i=1}^{160} w_i \cdot x_i \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)'te e xi ϵ {0, 1} değerlerini alırken, i=1,2,3,4,5……160 sayı değerlerini almaktadır. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için bara matris formlarını oluştururken, Denklem (4.13) kullanılarak Denklem (4.2)'ye benzer şekilde $[A]$ matris formu elde edilir. Oluşturulan bu matris formunun boyutu 160x160'lık boyutunda bir matris formudur. Matris formunu kısıt fonksiyonuna çevirmek için Denklem (4.10) ve (4.11) kullanılır. Kısıt fonksiyonu Denklem (4.3)'te verilen kısıt fonksiyonlarına benzer şekilde, f1, f2, ……f160≥ 1 (toplamda 160 adet farklı fonksiyon) olarak elde edilir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için planlanan yeni hatların ve baraların devreye alınması durumunda, Denklem (4.4) e xi ϵ {0, 1} değerlerini alırken, i=1,2,3,4,5……167 sayı değerlerini almaktadır. Oluşturulan bu matris formunun boyutu 167x167'lık boyutunda bir matris formunda oluşur. Kısıt fonksiyonu Denklem (4.3)'te verilen kısıt fonksiyonlarına benzer şekilde, f1, f2, f3,……f167≥ 1 (toplamda 167 adet farklı fonksiyon) olarak telde edilir.

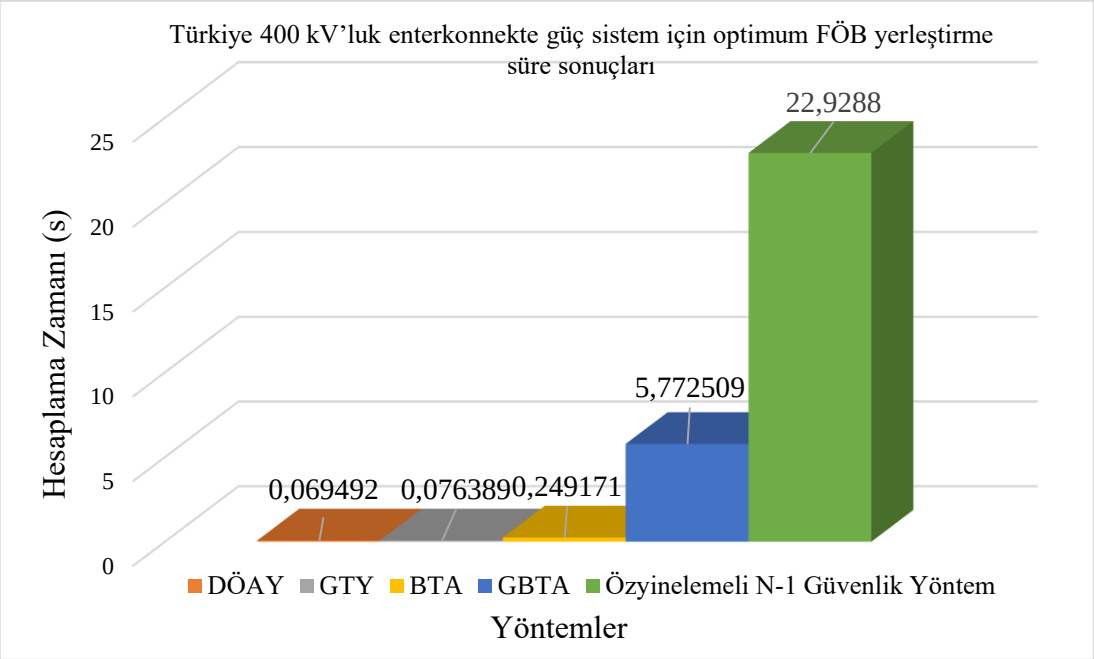
4.2.1. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları

Türkiye 400 kV mevcut çalışmakta olan enterkonnekte güç sisteminin de 160 bara ve 257 iletim hattından oluşmaktadır. GSAAK kullanılarak Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi ve Matlab programı ile DÖAY, GTY, BTA, GBTA yöntemleri güç sistemine uygulandığında elde edilen sonuçları Çizelge 4.17'de verilmiştir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemini modellerken bara isimleri yerine bara numaraları kullanılmıştır.

Çizelge 4.17. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

Yöntemler	**FÖB Sayısı**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**Geçen Zaman (s)**
Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntem	81	2, 3, 5, 6, 9, 11, 14, 15, 16, 19, 23, 24, 26, 29, 30, 32, 34, 35, 38, 41, 44, 45, 47, 50, 52, 53, 55, 57, 61, 62, 63, 65, 66, 67, 70, 72, 73, 75, 78, 81, 84, 86, 87, 88, 91, 92, 93, 94, 97, 101, 102, 104, 105, 107, 109, 112, 115, 116, 118, 119, 121, 122, 124, 126, 129, 130, 132, 135, 137, 139, 140, 143, 144, 146, 148, 150, 152, 156, 157, 159, 160	22.9288s
DÖAY	59	1, 5, 7, 9, 11, 15, 16, 19, 23, 25, 27, 28, 32, 36, 37, 39, 40, 48, 49, 51, 53, 55, 57, 61, 63, 65, 66, 70, 72, 75, 82, 83, 85, 88, 91, 92, 93, 98, 100, 103, 107, 108, 110, 112, 115, 118, 120, 124, 126, 130, 132, 138, 142, 144, 146, 149, 152, 156, 159	0.069492s
GTY	59	1, 5, 7, 9, 11, 15, 16, 19, 23, 25, 27, 28, 32, 36, 37, 39, 40, 48, 49, 51, 53, 55, 57, 61, 63, 65, 66, 70, 72, 75, 82, 83, 85, 88, 91, 92, 93, 98, 100, 103, 107, 108, 110, 112, 115, 118, 120, 124, 126, 130, 132, 138, 142, 144, 146, 149, 152, 156, 159	0.076389s
BTA	59	1, 5, 7, 9, 11, 15, 16, 19, 23, 25, 27, 28, 32, 36, 37, 39, 40, 48, 49, 51, 53, 55, 57, 61, 63, 65, 66, 70, 72, 75, 82, 83, 85, 88, 91, 92, 93, 98, 100, 103, 107, 108, 110, 112, 115, 118, 120, 124, 126, 130, 132, 138, 142, 144, 146, 149, 152, 156, 159	0.249171s
GBTA	**55**	**1. Çözüm** 1, 5, 7, 9, 11, 15, 16, 19, 23, 25, 27, 28, 32, 36, 37, 41, 48, 49, 51, 53, 55, 57, 61, 63, 66, 70, 72, 75, 82, 83, 85, 87, 91, 93, 98, 103, 104, 107, 110, 112, 115, 118, 120, 124, 126, 130, 132, 138, 142, 144, 146, 149, 152, 156, 159	5,772509s
		2. Çözüm 1, 5, 7, 9, 11, 15, 16, 19, 23, 25, 27, 28, 32, 36, 37, 39, 40, 48, 49, 51, 53, 55, 57, 63, 66, 69, 72, 75, 82, 83, 85, 91, 93, 98, 100, 103, 107, 108, 110, 112, 115, 118, 120, 124, 126, 130, 132, 138, 142, 144, 146, 149, 152, 156, 159	6.816179s

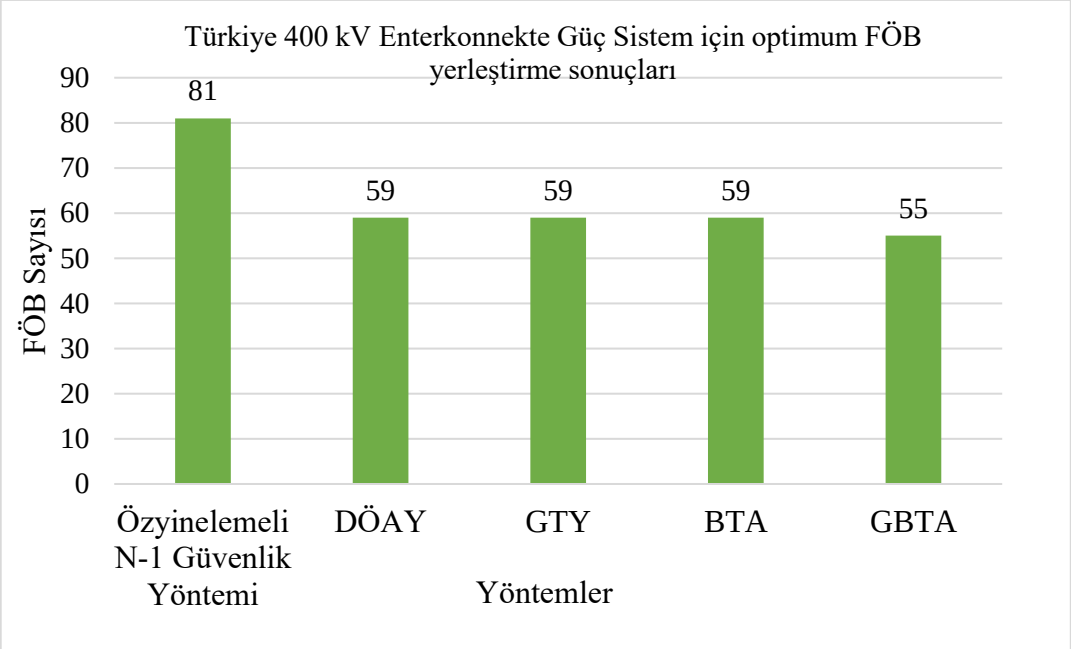
Çizelge 4.17'de Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemine uygulanan yöntemlerin karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 4.20'de Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemini için yerleşme süre sonuçları verilmektedir. DFSY 0.069492s ile MİB hesaplama süresi büyük ölçüde azaltarak, daha az sürede OFY yapılabilmektedir. Yerleşme zamanı bakımından en fazla süreyi Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntem almaktadır. Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntem, DÖAY, GTY, BTA, GBTA kendi aralarında karşılaştırıldığında, GBTA en az sayıda FÖB ile Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistem tamamen gözlemleyebilmektedir.



Şekil 4.20. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme süre sonuçları.

FÖB cihazları, kurulum maliyeti yüksek olduğundan dolayı sistemin tümünü gözlemlenebilir kılacak şekilde en az sayıda FÖB yerleştirilmesi gerekmektedir. FÖB cihazlarını optimal şekilde yerleştirmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistemi tamamen gözlemlenebilir olması için optimal FÖB yerleştirilmesi gereken bara lokasyonları Çizelge 4.17'de verilmektedir. Bara sayıları Şekil 4.21'de verilmiştir. Şekle göre, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi 81 adet, DÖAY, GTY, BTA 59 adet baraya FÖB cihazı yerleştirilmesi durumunda Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sisteminin tamamının gözlemlenebilmesi mümkündür. Güç sisteminin GBTA ile 55 baraya FÖB cihazı yerleştirilmesi ile tüm sistemin gözlemlenebilmektedir. GBTA iki farklı çözüm bulmaktadır. Bu çözümlerin optimum FÖB sayısı aynı olup yerleştirilmesi gereken bara lokasyonları ve yerleştirme süreleri

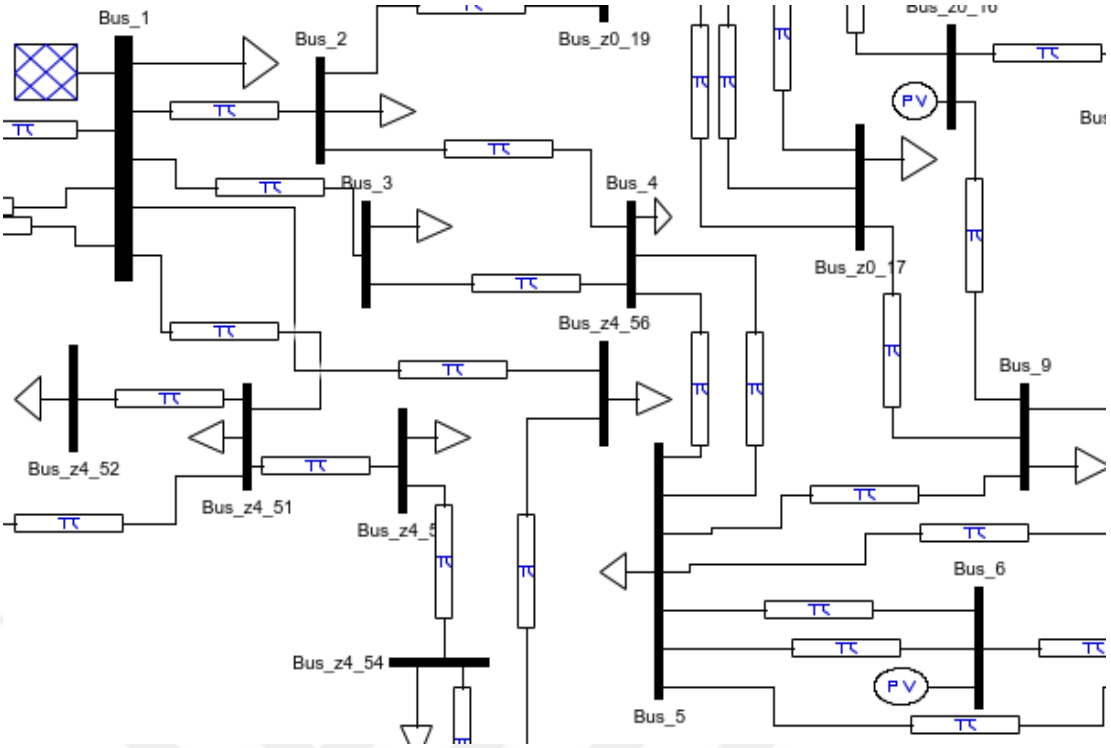
farklıdır. Güç sistemini tamamen gözlemleyebilmek için, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA ve GBTA kullanılarak elde edilen optimum FÖB sayıları ve bara lokasyon bilgileri Türkiye'de nerede olduğu tarafımızca bilinmektedir.



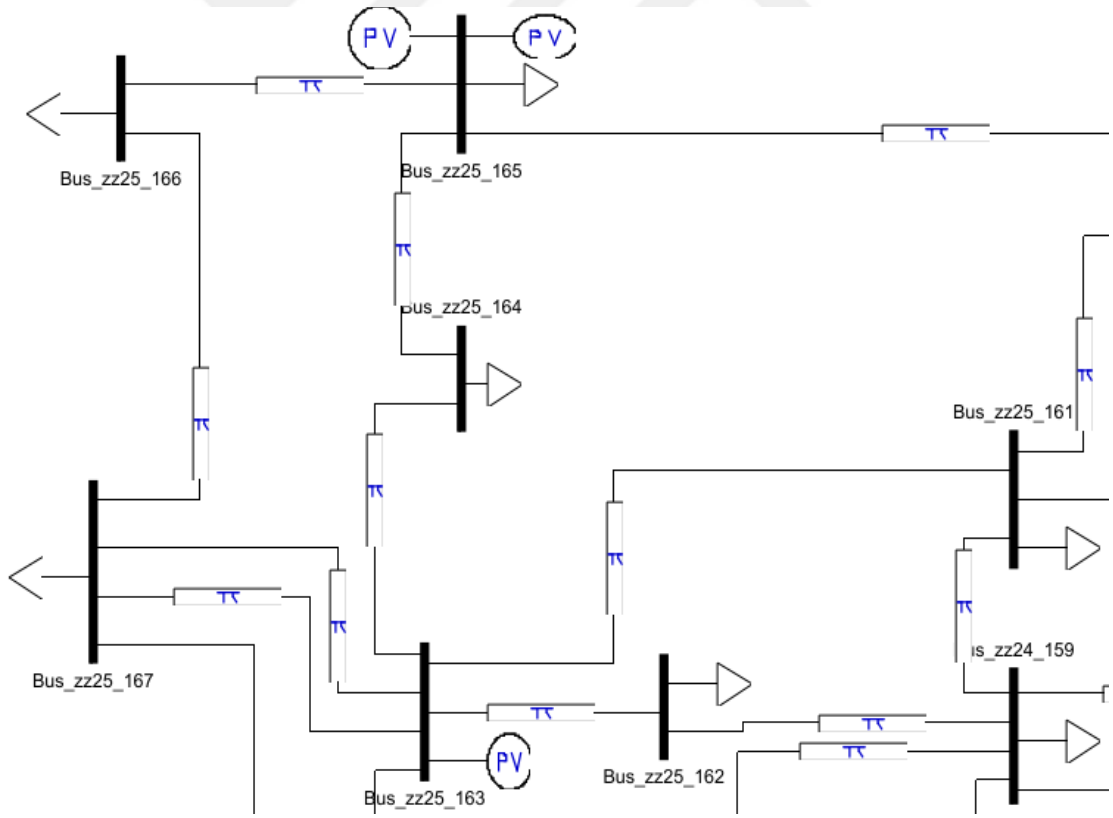
Şekil 4.21. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

4.2.2. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin (Planlanan Yeni Hatlar ve Baralar Devreye Alınması Durumunda) Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA ve GBTA Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları

Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumunda güç sistemin de 167 bara ve 280 iletim hattından oluşmaktadır. (İnşası devam eden 7 bara ve 23 iletim hattı bulunmaktadır). GSAAK kullanılarak Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi ve Matlab programı ile DÖAY, GTY, BTA ve GBTA güç sistemine uygulandığında elde edilen sonuçlar Çizelge 4.18'de verilmiştir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sisteminde, planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumunda, GSAAK modelinin bazı bölümleri Şekil 4.22'de verilmektedir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemini planlanan yeni baralar ve iletim hatları modellerken bara isimleri yerine bara numaraları kullanılmıştır.



a)



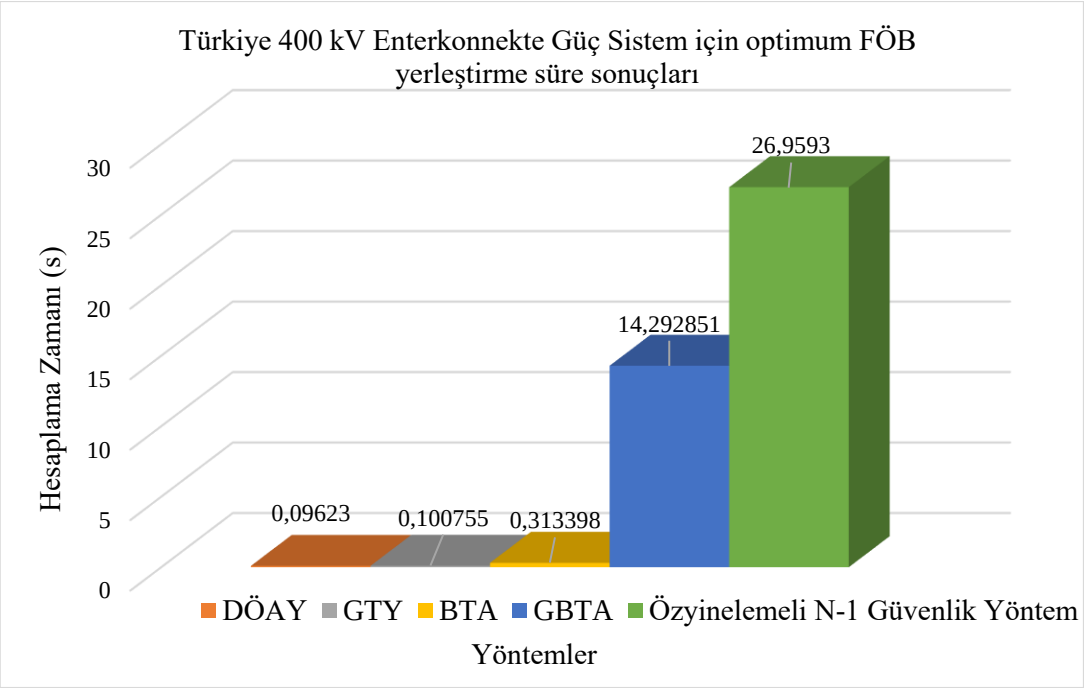
b)

Şekil 4.22. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem, planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumunda: a) Güneydoğu, b) Kuzeybatı parçasının GSAAK modeli (Türkiye 400 kV Güç Sisteminin bazı bölümleri).

Çizelge 4.18. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

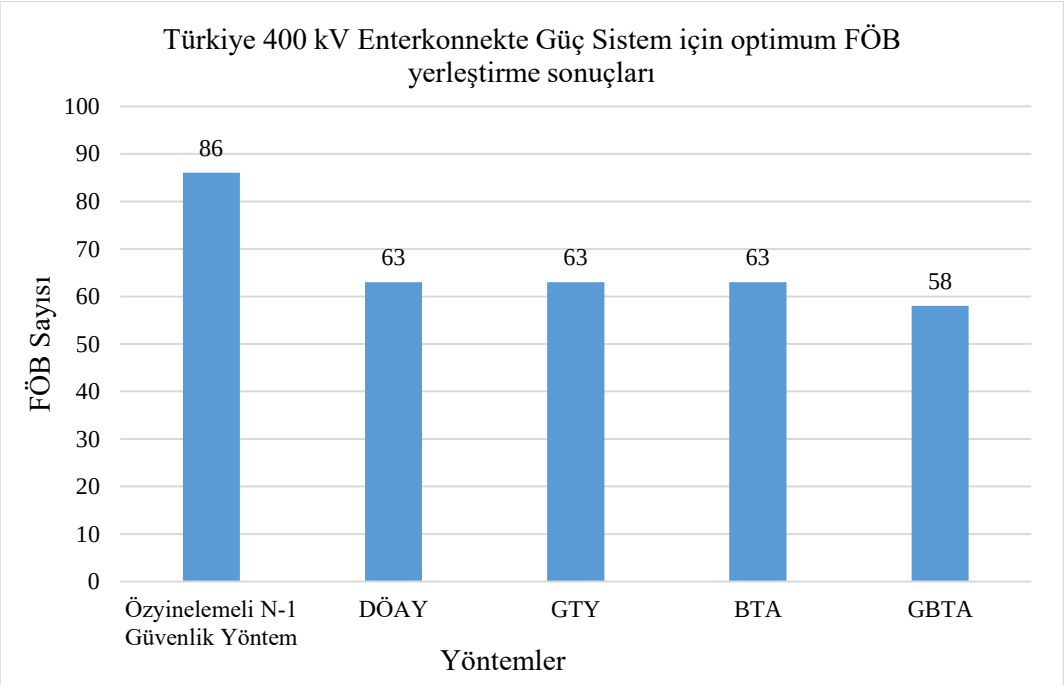
Yöntemler	**FÖB Sayısı**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**Geçen Zaman (s)**
Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntem	86	1, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 15, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 34, 36, 37, 38, 41, 44, 46, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 65, 66, 67, 69, 70, 74, 76, 77, 79, 82, 85, 88, 90, 91, 92, 95, 96, 97, 98, 101, 105, 107, 109, 110, 111, 112, 114, 116, 119, 122, 123, 125, 126, 128, 129, 131, 133, 136, 137, 139, 142, 144, 146, 147, 150, 151, 153, 155, 157, 159, 163, 164, 166, 167	26.9593s
DÖAY	63	1, 5, 8, 10, 13, 14, 16, 17, 20, 23, 26, 28, 32, 33, 35, 39, 40, 42, 43, 52, 53, 55, 57, 59, 61, 65, 67, 69, 70, 74, 76, 79, 86, 87, 89, 92, 95, 96, 97, 102, 104, 107, 112, 114, 115, 117, 119, 122, 126, 129, 131, 133, 137, 139, 142, 145, 149, 151, 153, 156, 159, 163, 166	0.096230s
GTY	63	1, 5, 8, 10, 13, 14, 16, 17, 20, 23, 26, 28, 32, 33, 35, 39, 40, 42, 43, 52, 53, 55, 57, 59, 61, 65, 67, 69, 70, 74, 76, 79, 86, 87, 89, 92, 95, 96, 97, 102, 104, 107, 112, 114, 115, 117, 119, 122, 126, 129, 131, 133, 137, 139, 142, 145, 149, 151, 153, 156, 159, 163, 166	0.100755s
BTA	63	1, 5, 8, 10, 13, 14, 16, 17, 20, 23, 26, 28, 32, 33, 35, 39, 40, 42, 43, 52, 53, 55, 57, 59, 61, 65, 67, 69, 70, 74, 76, 79, 86, 87, 89, 92, 95, 96, 97, 102, 104, 107, 112, 114, 115, 117, 119, 122, 126, 129, 131, 133, 137, 139, 142, 145, 149, 151, 153, 156, 159, 163, 166	0.313398s
GBTA	**58**	**1. Çözüm** 1, 5, 8, 10, 12, 16, 17, 20, 26, 28, 32, 33, 35, 39, 40, 42, 43, 52, 53, 55, 57, 59, 61, 65, 67, 70, 74, 76, 79, 86, 87, 89, 95, 97, 102, 104, 107, 112, 114, 115, 117, 119, 122, 126, 129, 131, 133, 137, 139, 142, 145, 149, 151, 153, 156, 159, 163, 166	14.292851s
		2. Çözüm 1, 5, 8, 10, 13, 14, 16, 17, 20, 26, 28, 32, 34, 39, 40, 42, 43, 52, 53, 55, 57, 59, 61, 65, 67, 70, 74, 76, 79, 86, 87, 89, 95, 97, 102, 104, 107, 112, 114, 115, 117, 119, 122, 126, 129, 131, 133, 137, 139, 142, 145, 149, 151, 156, 159, 161, 163, 166	15.124038s

Çizelge 4.18'de Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumunda uygulanan yöntemlerin sonuçları verilmiştir. Süre olarak en uzun benzetim süresine sahip Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi en fazla sayıda FÖB birimi ile sistemi gözlenebilmektedir. DÖAY, GTY, BTA kullanılarak sisteme yerleştirilen FÖB sayıları aynı olmakla birlikte yerleşme süreleri farklıdır. Şekil 4.23'te yerleşme süreleri verilmektedir.



Şekil 4.23. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için (Yapım aşamasında olan baralar ve iletim hatları dahil) optimum FÖB yerleştirme süre sonuçları.

En optimum sayıda FÖB yerleştirme işlemini GBTA ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.18'de ve Şekil 4.24'te verilmekte olduğu gibi, Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumunda güç sistemin tamamen gözlemlemek için GBTA kullandığımızda 58 FÖB gerekmektedir. Çizelge 4.18'de GBTA için iki farklı çözüm bulunmuştur. Enterkonnekte güç sistemini tamamen gözlemlemek için 58 baraya FÖB yerleştirilmesi gerekirken, yerleştirilecek olan FÖB'lerin farklı baralara yerleştirilmesi gerekir. Bu baralar Türkiye'de neresi olduğu tarafımızca bilinmektedir.



Şekil 4.24. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için planlanan yeni hatların devreye alınması durumunda, optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

4.2.3. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin TDP Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları

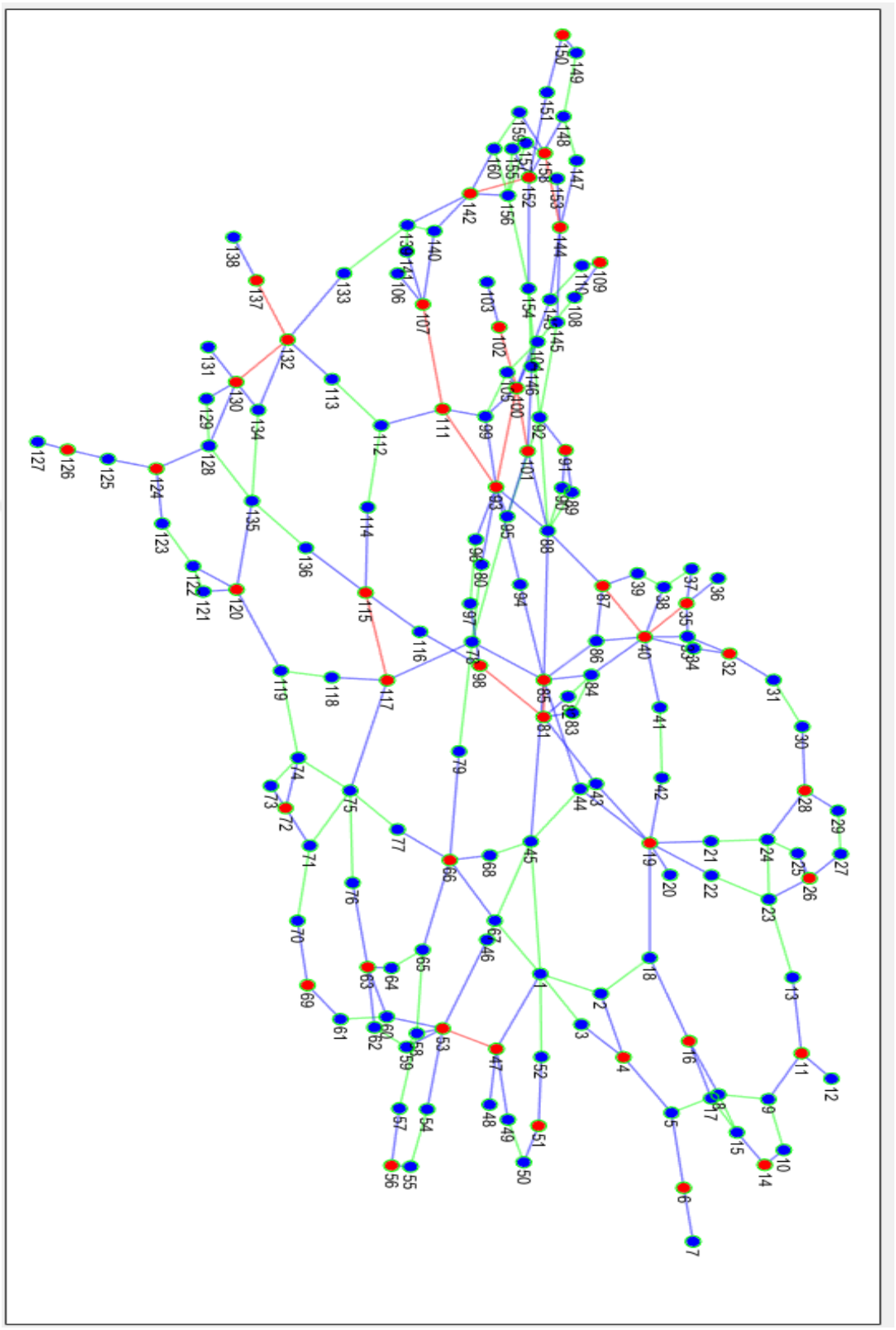
OFY problemini çözmek için, geliştirilmiş TDP yöntemi kullanılmaktadır. TDP yaklaşımı kullanılırken OFY elde edilen FÖB'lerin konumlarını göstermek için grafiğe dayalı kuvvet yönlendirmeli yöntemi ve coğrafi bilgi sistemini kullanarak bir haritalama sistemi ile görselleştirme tekniği kullanılmıştır.

Çizelge 4.19. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

Yöntemler	FÖB Sayısı	FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar	Geçen Zaman (s)
TDP	50	1, 4, 6, 11, 14, 16, 19, 23, 26, 28, 32, 35, 40, 47, 51, 53, 56, 59, 63, 66, 69, 72, 75, 81, 85, 87, 91, 92, 93, 98, 100, 101, 102, 107, 109, 111, 115, 117, 120, 124, 126, 130, 132, 137, 142, 144, 150, 152, 156, 158	0.9799s

Çizelge 4.19'da TDP yöntemi kullanılarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimal FÖB yerleştirme lokasyon bilgilerini bulunmuştur. Optimal FÖB yerleştirmede süresi bilgisayarın özelliğine bağlı olarak her bilgisayar için farklıdır. Yerleşme süresi 0.9799s ile MİB hesaplama zamanının büyük ölçüde azaltarak, daha az

zaman yerleştirme işlemi gerçekleştirmektedir. Yöntem, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözmede, optimal sayıda FÖB elde etmede yeteneğini göstermiştir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sisteminde SEB bulunmamaktadır. Çizelge 4.19'daki sonuçlarına göre sistemi tamamen gözlemleye bilmek için 50 FÖB cihazı güç sistemine yerleştirilmesi gerekmektedir. Ancak 44 FÖB cihazı kullanılarak ve dolaylı olarak Ohm kanunu kullanılarak ölçülen hat akımları ile hesaplamalar yapılarak tüm sistem gözlemlenmesi de mümkündür. TDP yöntemi kullanılarak, Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi tamamen gözlemlenebilir olması için optimal FÖB yerleştirilmesi gereken bara lokasyonları ve bara sayıları Çizelge 4.19'da verilmiştir ve Şekil 4.25'te görselleştirilmiştir. Şekil 4.25'te FÖB konumları kırmızı renk dairelerle vurgulanmıştır. Bir ucunda kurulu bir FÖB tarafından doğrudan ölçülen hat akım çizgileri mavi renk ile modellenmiştir. Ayrıca, dolaylı olarak ölçülen akımlara sahip hatlar yeşil renkle belirtilmiştir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sisteminin şekline göre TDP 50 FÖB cihazı ile güç sisteminin tamamen gözlenir olmasını sağlar. Tüm sistemi gözlemleyebilmek için 50 FÖB cihazı kullanılması yeterli olacak ve Ohm kanunu kullanılarak FÖB tarafından doğrudan ölçülemeyen hat akımları bulabiliriz. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi SEB bara bulunmadığından, SEB'ler dikkate alınıp çözüm yapılmamıştır.



Şekil 4.25. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB tarafından gözlenemeyen hatlar (yeşil), iki FÖB tarafından gözlemlenen hatlar (kırmızı) olarak görselleştirilmesi.

Çizelge 4.20. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için TDP yöntemi kullanarak, FÖB kaybı dikkate alındığında, optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

Yöntemler	FÖB Sayısı	FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar (Önerilen)	Geçen Zaman (s)
TDP	67	1, 2, 4, 6, 9, 11, 14, 17, 16, 19, 23, 24, 26, 28, 32, 35, 38, 40, 45, 47, 51, 53, 56, 58, 63, 65, 66, 69, 72, 75, 78, 81, 84, 85, 88, 87, 91, 92, 93, 98, 100, 101, 102, 104, 107, 109, 111, 112, 115, 117, 119, 120, 124, 126, 130, 132, 135, 137, 139, 142, 144, 148, 150, 152, 154, 156, 158	1.2708s

Çizelge 4.20'de Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için önerilen TDP yöntemi kullanılarak sistemi tamamen gözlemlenebilmesi, FÖB kaybı veya hat kesintisi gibi yaygın beklenmedik durumlar önlemek için yerleştirilmesi gerek optimal FÖB konumları verilmektedir. FÖB kaybı veya hat kesintisi gibi yaygın beklenmedik durumlar da Çizelge 4.20'de optimal FÖB konumları alternatif bir çözüm olarak sunulmaktadır.

4.2.4. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin (Planlanan Yeni Hatlar ve Baralar Devreye Alınması Durumunda) TDP Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları

Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumunda güç sistemin de 167 bara ve 280 iletim hattından oluşmaktadır. (İnşası devam eden 7 bara ve 23 iletim hattı bulunmaktadır). TDP yöntemi güç sistemine uygulandığında elde edilen sonuçlar aşağıda Çizelge 4.21'de verilmiştir.

Çizelge 4.21. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

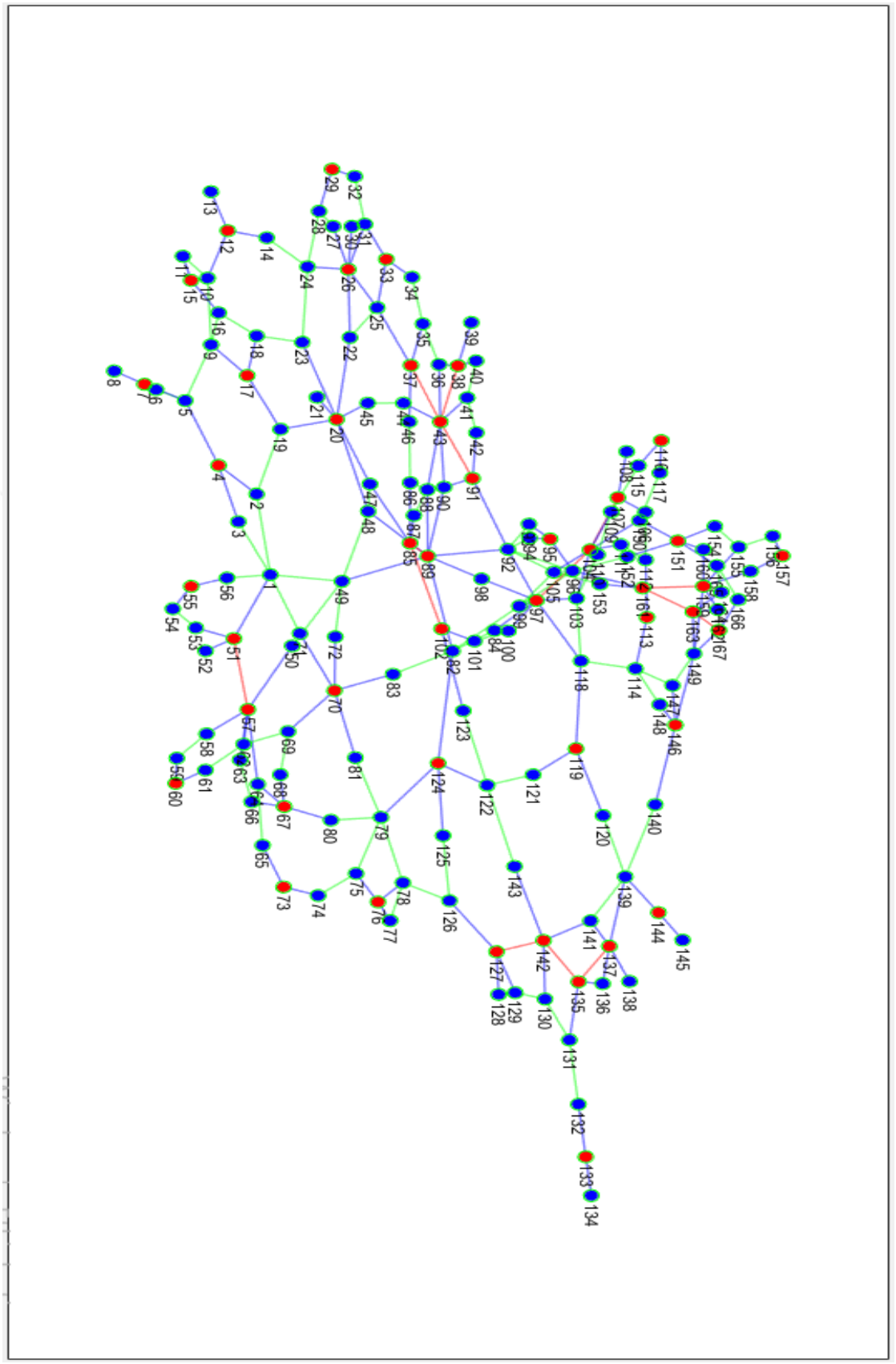
Yöntemler	FÖB Sayısı	FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar	Geçen Zaman (s)
TDP	51	1, 4, 7, 9, 12, 15, 17, 20, 26, 29, 33, 37, 38, 43, 51, 55, 57, 60, 67, 70, 73, 76, 85, 89, 91, 92, 95, 97, 102, 104, 107, 113, 114, 116, 119, 122, 124, 127, 133, 135, 137, 139, 142, 144, 146, 151, 157, 159, 161, 163, 167	0.9969s

Çizelge 4.21'de TDP yöntemi kullanılarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için planlanan yeni baralar ve iletim hatları devreye alınması durumunda optimal FÖB yerleştirme lokasyon bilgilerini bulunmuştur. Optimal FÖB yerleştirmede geçen zaman bilgisayarın özelliğine bağlı olarak her bilgisayar için farklıdır. Yerleşme süresi 0.9969s ile MİB hesaplama zamanı kısa sürede optimal FÖB yerleşimi yapılmaktadır. Yöntem, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözme ve optimal sayı FÖB yerleştirme yeteneği göstermiştir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi SEB bulunmamaktadır. Çizelge 4.21'deki sonuçlarına göre sistemi tamamen gözlemleye bilmek için 51 FÖB cihazı sisteme bağlanması gerekmektedir. Ancak 45 FÖB cihazı kullanılarak ve dolaylı olarak ölçülen akımlara sahip hatlar akımları hesaplanarak tüm sistem gözlemlenmesi de mümkün olabilir.

Çizelge 4.22. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için oluşacak herhangi FÖB kaybı ve iletişim hattı kesintisi durumunda, optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

Yöntemler	**FÖB Sayısı**	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar (Önerilen)**	**Geçen Zaman (s)**
TDP	69	1, 4, 7, 9, 12, 15, 17, 18, 20, 24, 26, 29, 31, 33, 35, 37, 38, 41, 43, 49, 51, 55, 57, 60, 62, 67, 70, 73, 76, 79, 85, 88, 89, 91, 92, 95, 97, 99, 101, 102, 103, 104, 107, 109, 112, 113, 114, 116, 119, 122, 124, 126, 127, 130, 133, 135, 137, 139, 142, 144, 146, 151, 155, 157, 159, 161, 163, 165, 167	0.9969s

Çizelge 4.22'de Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için planlanan yeni baralar ve iletim hatları devreye alınması durumunda önerilen TDP yöntemi kullanılarak sistemi tamamen gözlemlemek, FÖB kaybı veya hat kesintisi gibi yaygın beklenmedik durumlar da optimal FÖB konumları dikkate alına bilinir. Çizelge 4.22'de FÖB kaybı veya hat kesintisi durumunda 69 FÖB cihazıyla tüm sistem gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.26. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem, FÖB konumlarına (kırmızı), FÖB cihazının gözlemlediği çizgiler (mavi), FÖB olmayan hatlar (yeşil), iki FÖB bağlı hatlar (kırmızı) olarak görselleştirilmesi.

Şekil 4.26'da FÖB konumları kırmızı dairelerle vurgulanmıştır. Bir ucunda kurulu bir FÖB tarafından doğrudan ölçülen hat akımları çizgi mavi ile renklendirilmektedir. Ayrıca, dolaylı olarak ölçülen akımlara sahip hatlar yeşil renkle vurgulanmıştır. Bu çizgiler Ohm kanunu kullanılarak hesaplanır, çünkü her iki uç da komşu baralar aracılığıyla gözlemlenebilir hale gelir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için planlanan yeni baralar ve iletim hatları devreye alınması durumunda tamamen gözlemlenebilir olması için optimal FÖB yerleştirilmesi gereken bara lokasyonları Çizelge 4.21'de verilmiştir ve bara sayıları Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Şekle göre TDP 51 FÖB cihazı ile güç sisteminin tamamen gözlenir olmasını sağlar. Tüm sistemi gözlemleyebilmek için 51 FÖB cihazı kullanılması yeterli olacak ve Ohm kanunu kullanılarak FÖB tarafından doğrudan ölçülemeyen hat akımları bulunur.

4.2.5. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin YA Kullanarak Optimal FÖB Yerleştirme Sonuçları

YA yöntemi, Türkiye 400 kV mevcut çalışmakta olan enterkonnekte güç sistemine uygulanmıştır. YA tam ağ gözlemlenebilirliğine tabi olan gerekli sayıda FÖB kurulumunu en aza indirmeyi ve güç sistemlerinin daha iyi çalışması için güvenilirliği en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan FÖB'lerin optimal yerleşimi problem formülasyonunu çözerek sonuçlar bulunmuştur. Ayrıca, BGİ ve SGAİ, çoklu çözümleri daha iyi sıralamak için kullanılmıştır. Çizelge 4.23'te YA yöntemi kullanarak optimal FÖB yerleşim sonuçları verilmiştir.

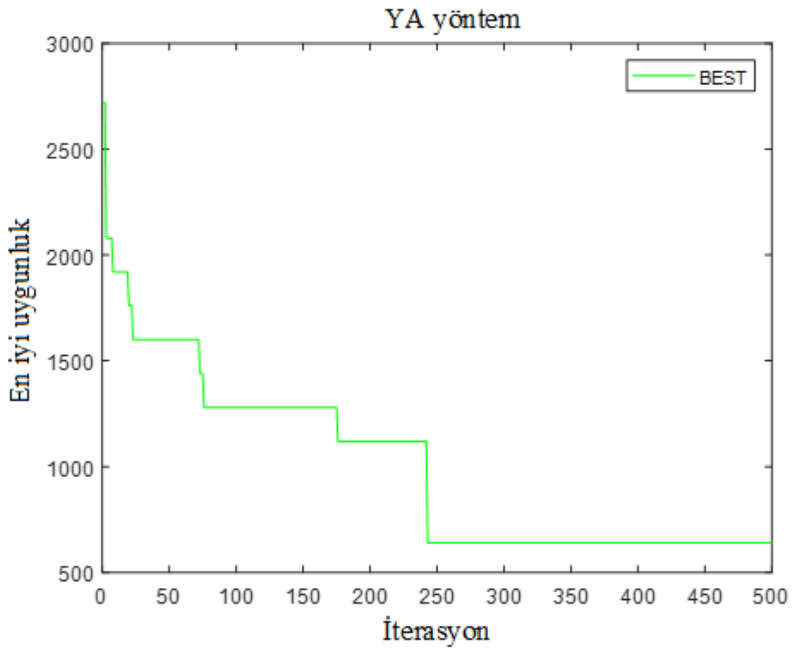
Çizelge 4.23. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yöntemi kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

FÖB Sayısı	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**BIO**	***TSORIs***	**Geçen Zaman (s)**
49	**2, 7, 13, 15, 20, 24, 26, 32, 36, 41, 42, 48, 51, 56, 58, 61, 71, 72, 74, 78, 80, 81, 85, 92, 95, 96, 98, 101, 102, 103, 104, 107, 109, 111, 114, 116, 118, 119, 121, 123, 124, 126, 127, 135, 136, 141, 143, 150, 156**	**3, 2, 1, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 4, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 5, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 4, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 3, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 4, 1, 2, 2, 1, 2, 3, 3, 4, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 3, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 4, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 3, 4, 2, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 3, 2, 2, 4, 1, 2, 1, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 5, 2, 4, 3, 5, 2, 1, 2, 2, 2**	**302**	**176.20698s**

Çizelge 4.23. (devam) Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yöntemi kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

50	1, 2, 7, 8, 10, 14, 15, 16, 27, 28, 31, 34, 40, 43, 48, 53, 54, 56, 57, 58, 61, 63, 65, 69, 70, 71, 72, 75, 83, 85, 91, 98, 99, 103, 105, 112 ,113, 117, 118, 123, 134, 135, 140, 143, 144, 145, 147, 150, 153, 156	3, 1, 1, 2, 3, 2, 1, 3, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 5, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 4, 1, 2, 2, 1, 2, 3, 3, 4, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 4, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 3, 4, 2, 3, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 3, 2, 2, 4, 1, 1, 1, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 6, 1, 4, 3, 5, 2, 1, 2, 2, 2	285	179.55698s
	1, 2, 7, 8, 10, 14, 15, 16, 27, 28, 31, 34, 40, 43, 48, 53, 54, 56, 57, 58, 61, 65, 69, 70, 71, 72, 75, 83, 85, 91, 98, 99, 103, 105, 112, 113, 117, 118, 123, 126, 134, 135, 140, 143, 144, 145, 147, 150, 153, 156	1, 1, 1, 2, 3, 2, 1, 3, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 4, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 4, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 4, 2, 3, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 3, 2, 2, 4, 1, 1, 1, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 6, 1, 4, 3, 5, 2, 1, 1, 2	255	181.52293s
	1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 18, 19, 27, 30, 33, 34, 37, 39, 41, 42, 48, 50, 52, 61, 63, 64, 66, 67, 74, 75, 80, 81, 84, 85, 87, 88, 89, 90, 92, 99, 109, 116, 117, 120, 123, 124, 133, 141,151, 160	1, 1, 1, 2, 3, 2, 1, 3, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 4, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 4, 2, 3, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 4, 1, 4, 3, 3, 2, 1, 1, 2	247	180.53697s
44	8, 9, 10, 13, 15, 19, 20, 23, 26, 28, 33, 36, 39, 44, 45, 54, 57, 59, 60, 67, 68, 70, 71, 72, 76, 78, 82, 88, 95, 99, 100, 107, 117, 118, 129, 130, 131, 133, 135, 138, 139, 140, 153, 160	2 1 1 1 2 1 1 1 3 2 3 2 2 2 3 2 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 2 2 2 3 2 2 3 1 2 2 1 2 1 3 2 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 3 2 1 1 1 1 1 2 4 2 3 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 4 2 2 4 3 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 3 1 2 2 2 2 1 2 1 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 3 2 2 2 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1 1 1 3 2 2 2 1 1 1 3 1 3 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 3 3 2 2 2	262	179.78140s

Çizelge 4.23'de YA yöntemi kullanılarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimal FÖB yerleştirme lokasyon bilgilerini bulunmuştur. Yerleşme süresi 176.20698s ile MİB hesaplama zamanının büyük ölçüde azaltarak, daha az zaman yerleştirme işlemi gerçekleştirmektedir. Yöntem, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözme ve FÖB'ler optimal sayı ve konumlarını sağlama yeteneğini göstermiştir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi SEB bulunmamaktadır. Çizelge 4.23'te YA yöntemi kullanılarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için optimal FÖB yerleştirme lokasyon bilgilerini, BGİ ve SGAİ değerleri bulunmuştur. YA yöntemi, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözme ve optimal FÖB sayısı ve FÖB'lerin konumlarını bulma yeteneği göstermiştir. Çizelge 4.23'deki sonuçlarına göre sistemi tamamen gözlemleyebilmek için 49 FÖB cihazı bağlanması gerekmektedir. Ohm kanunu kullanılarak, her iki uç da komşu baralar aracılığıyla, 44 FÖB cihazı kullanılarak ve dolaylı olarak ölçülen akımlara sahip hat akımları hesaplanarak tüm sistem gözlemlenmesi de mümkündür. Maksimum SGAİ değerine sahip çözüm, en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. Çizelge 4.23'te 302 SGAİ değerine sahip 49 FÖB çözüm en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. Tüm sistemi gözlemleyebilmek için 49 FÖB cihazı kullanılması yeterli olacak ve Ohm kanunu kullanılarak FÖB tarafından doğrudan ölçülemeyen hat akımları bulunur.



Şekil 4.27. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yakınsama eğrisi.

Şekil 4.27'de Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yakınsama şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi en az 50'den fazla aynı iterasyon ve fitness değerleri kullanılarak çalışma yapılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 3000 ve iterasyon değeri 500 'de fazla iken optimum FÖB sayısı ve konumları bulunmuştur.

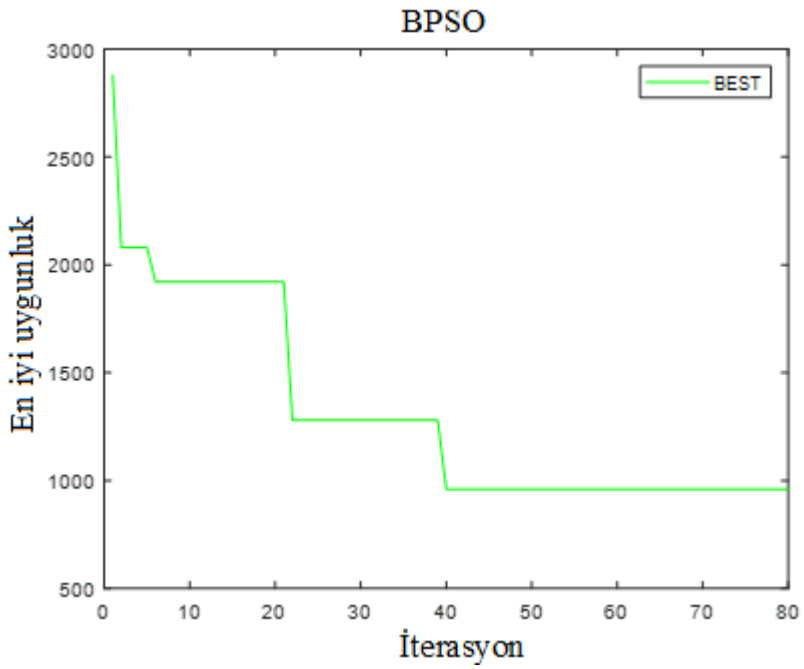
4.2.6. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin BPSO Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları

BPSO yöntemi, Türkiye 400 kV mevcut çalışmakta olan enterkonnekte güç sistemine uygulanmıştır. BGİ ve SGAİ, çoklu çözümleri daha iyi sıralamak için kullanılmıştır. Çizelge 4.24'te BPSO yöntemi kullanarak optimal FÖB yerleşim sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.24. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için BPSO yöntemi kullanarak optimum FÖB yerleştirme sonuçları.

FÖB Sayısı	**FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar**	**BIO**	***TSORIs***	**Geçen Zaman (s)**
54	**2, 7, 9, 13, 15, 20, 24, 26, 32, 36, 41, 42, 48, 51, 56, 58, 61,** 65, 69, **71, 72, 74, 78, 80, 81, 85,** 88, **92, 95, 96, 98, 101, 102, 103, 104, 107, 109, 111, 114, 116, 118, 119, 121, 123, 124, 126, 127, 135, 136, 141, 143,** 145, **150, 156**	**3, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 4, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 5, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 3, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 3, 3, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 3, 2, 2, 3, 3, 2, 1, 2, 2, 2**	**272**	**156.20118s**
54	3, 7, 12, 13, 14, 15, 24, 27, 30, 32, 33, 39, 40, 41, 44, 45, 48, 50, 55, 57, 59, 63, 65, 66, 67, 69, 74, 78, 82, 88, 90, 94, 96, 99, 100, 103, 106, 109, 110, 111, 115, 116, 119, 124, 125, 128, 131, 132, 139, 141, 142, 144, 151, 154	2, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 3, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 4, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 3, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 4, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 3, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 4, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 5, 1, 1, 1, 1, 5, 2, 1, 2, 1, 1	235	120.94011s
54	1, 4, 6, 9, 11, 14, 16, 23, 27, 32, 35, 36, 39, 47, 48, 49, 53, 56, 59, 62, 66, 69, 71, 73, 75, 84, 86, 88, 89, 92, 96, 98, 99, 100, 103, 112, 114, 116, 117, 122, 125, 127, 130, 131, 132, 136, 138, 141, 142, 143,144 ,150, 153, 156	2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 2, 3, 1, 3, 4, 3, 5, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 1, 2, 3, 2, 1, 2, 1, 3, 2, 4, 4, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 3, 3, 5, 3, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 2, 4, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 4, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 3, 3, 2, 2, 2, 3, 1, 1, 1, 3	257	110.5961s

Çizelge 4.24'te BPSO yöntemi kullanılarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için optimal FÖB yerleştirme lokasyon bilgilerini bulunmuştur. Optimal FÖB yerleştirmede geçen zaman bilgisayarın özelliğine bağlı olarak her bilgisayar için farklıdır. Yerleşme süresi 156.20118s ile MİB hesaplama zamanının büyük ölçüde azaltarak, daha az zaman yerleştirme işlemi gerçekleştirmektedir. BPSO, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözme ve FÖB'ler optimal sayı ve konumlarını sağlama yeteneğini göstermiştir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi SEB bulunmamaktadır. Çizelge 4.24'te BPSO yöntemi kullanılarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için optimal FÖB yerleştirme lokasyon bilgilerini, BGİ ve SGAİ değerleri bulunmuştur. BPSO yöntemi, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözme ve optimum FÖB sayısı ve konumlarını sağlama yeteneği göstermiştir. Çizelge 4.24'deki sonuçlarına göre sistemi tamamen gözlemleye bilmek için 54 FÖB cihazı bağlanması gerekmektedir. Maksimum SGAİ değerine sahip çözüm, en iyi optimum çözüm olarak kabul edilir. Çizelge 4.24'te 272 SGAİ değerine sahip 54 FÖB çözüm en iyi optimum çözüm olarak kabul edilir. Tüm sistemi gözlemleye bilmek için 54 FÖB cihazı kullanılması yeterli olacak ve Ohm kanunu kullanılarak FÖB tarafından doğrudan ölçülemeyen hat akımları bulunur.



Şekil 4.28. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için BPSO yakınsama eğrisi.

Şekil 4.28'de Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için BPSO yakınsama şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve

popülasyon değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 1000 ve popülasyon değeri 200 değerleri arasında iken optimum sayıda FÖB değerleri ve FÖB'lerin yerleştirileceği baralar bulunmuştur. c_1 ve c_2 değerleri [0,2-2] arasında değer alırlar. Çalışmamızda c_1 ve c_2 değerleri değeri olarak [0,2-1] arasında değer verdiğimizde optimum sayıda FÖB sayısı bulunmuştur.

4.2.7. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin (Planlanan Yeni Hatlar ve Baralar Devreye Alınması Durumunda) YA Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları

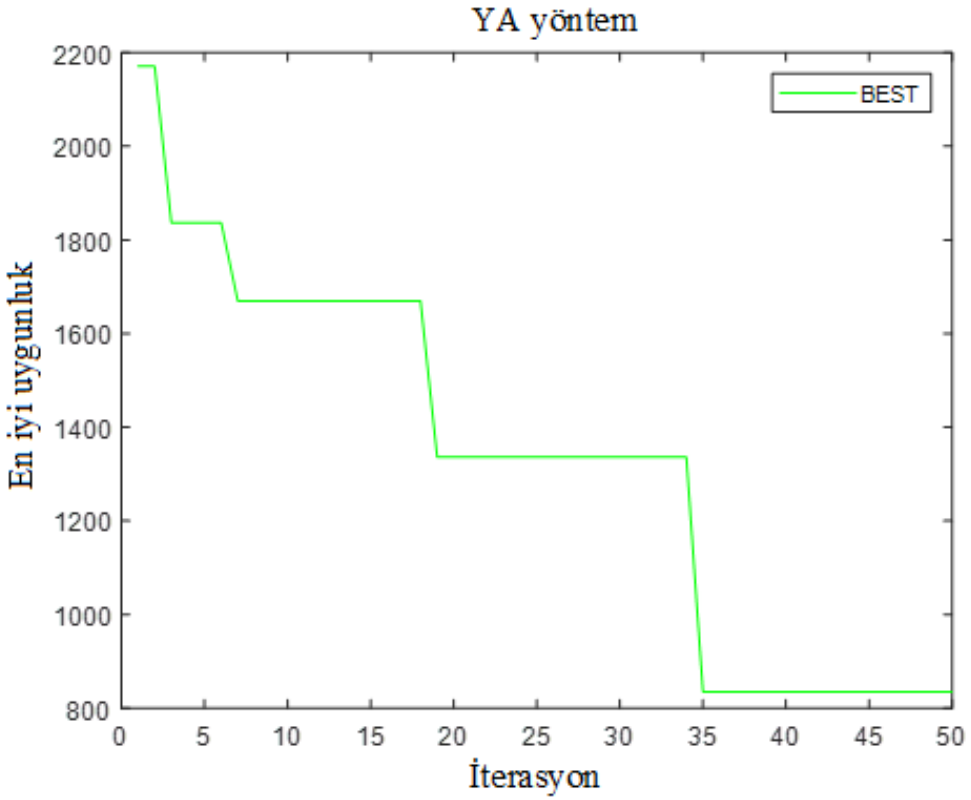
Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumunda güç sistemin de 167 bara ve 280 iletim hattından oluşmaktadır. (İnşası devam eden 7 bara ve 23 iletim hattı bulunmaktadır). Yeni bir sezgisel yöntem olan YA yöntemi ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.25'te verilmiştir.

Çizelge 4.25. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yöntemi kullanarak optimal FÖB yerleştirme sonuçları.

FÖB Sayısı	FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar	BIO	*TSORIs*	Geçen Zaman (s)
51	3, 4, 6, 7, 10, 20, 21, 23, 25, 26, 32, 33, 39, 40, 42, 44, 47, 57, 58, 59, 62, 66, 67, 72, 77, 80, 86, 88, 90, 94, 102, 106, 107, 112, 113, 114, 116, 120, 121, 122, 126, 129, 132, 134, 136, 138, 142, 145, 151, 153, 161	3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 3, 3, 4, 4, 1, 1, 4, 3, 2, 3, 2, 1, 1, 2, 3, 2, 1, 1, 2, 3, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 4, 2, 1, 2, 3, 3, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 3, 3, 3, 2, 1, 1, 2 ,1, 2, 2, 1, 2, 4, 2, 3, 3, 5, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 1, 1, 3, 4, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 3, 2, 2, 2, 2, 1, 3, 3, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 4, 2, 3, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 3, 1, 2, 2, 3	311	181.9648s

Çizelge 4.25'te YA yöntemi kullanılarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem planlanan yeni hatların ve baraların devreye alınması durumu için optimal FÖB yerleştirme lokasyon bilgilerini bulunmuştur. Yerleşme süresi 181.9648s ile MİB hesaplama zamanının büyük ölçüde azaltarak, daha az zaman yerleştirme işlemi gerçekleştirmektedir. Yöntem, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözme ve FÖB'ler optimal sayı ve konumlarını sağlama yeteneğini göstermiştir. Türkiye 400 kV

Enterkonnekte Güç Sistemi SEB bulunmamaktadır. Çizelge 4.25 sonuçlarına göre sistemi tamamen gözlemleye bilmek için 51 FÖB cihazı bağlanması gerekmektedir. Maksimum SGAİ değerine sahip çözüm, en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. Çizelge 4.25'de 311 SGAİ değerine sahip 51 FÖB'ün çözüm en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. Tüm sistemi gözlemleye bilmek için 51 FÖB cihazı kullanılması yeterli olacak ve Ohm kanunu kullanılarak FÖB tarafından doğrudan ölçülemeyen hat akımları bulunur.



Şekil 4.29. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için YA yakınsama eğrisi.

Şekil 4.29'da Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem yeni hatların ve baraların devreye alınması durumu için YA yakınsama şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi en az 50'den fazla aynı iterasyon ve fitness değerleri kullanılarak çalışma yapılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 2500 ve iterasyon değeri 500 iken optimum sayıda FÖB değerleri ve FÖB konumları bulunmuştur.

4.2.8. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem İçin (Planlanan Yeni Hatlar ve Baralar Devreye Alınması Durumunda) BPSO Kullanarak Optimum FÖB Yerleştirme Sonuçları

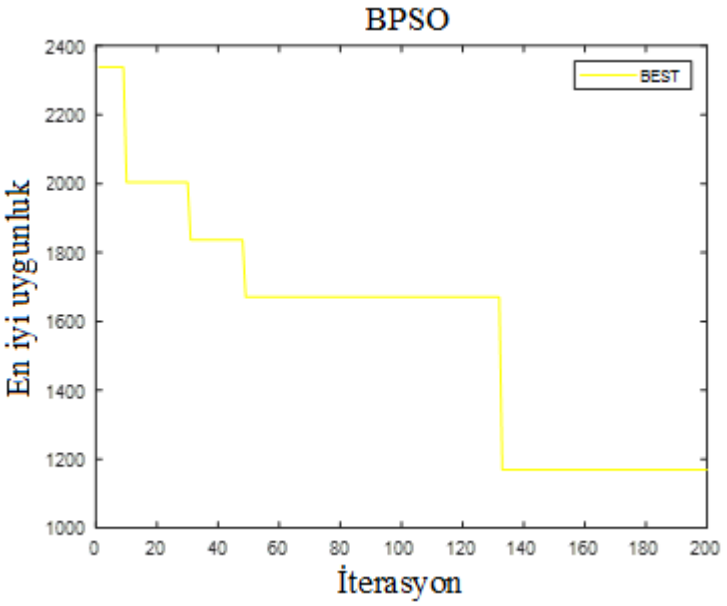
Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için planlanan yeni baralar ve iletim hatların devreye alınması durumunda güç sistemin de 167 bara ve 280 iletim hattından oluşmaktadır. (İnşası devam eden 7 bara ve 23 iletim hattı bulunmaktadır). Yeni bir sezgisel yöntem olan BPSO yöntemi ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.26'da verilmiştir.

Çizelge 4.26. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için BPSO yöntemi kullanarak optimal FÖB yerleştirme sonuçları.

FÖB Sayısı	FÖB Yerleştirilmesi Gereken Baralar	BIO	*TSORIs*	Geçen Zaman (s)
57	3, 4, 6, 7, 10, 13, 16, 17, 20, 21, 23, 25, 26, 32, 33, 39, 40, 42, 44, 47, 52, 57, 58, 59, 62, 66, 67, 72, 77, 80, 86, 88, 90, 94, 102, 106, 107, 112, 113, 114, 116, 120, 121, 122, 126, 129, 132, 134, 136, 138, 142, 145, 151, 153, 161, 163, 166	2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 3, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 3, 3, 2, 2, 1, 1, 1, 3, 2, 3, 2, 1, 1, 2, 3, 2, 1, 1, 2, 3, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 3, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 3, 1, 3, 2, 1, 1, 2 ,1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 3, 2, 2, 2, 1, 1, 3, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 3, 2, 2, 2, 2, 1, 3, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 4, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 3, 1, 2, 2, 3	289	161.8548s
	2, 4, 7, 13, 14, 16, 18, 21, 22, 26, 29, 34, 39, 42, 43, 46, 48, 49, 50, 51, 55, 57, 63, 67, 77, 82, 91, 95, 97, 99, 102, 104, 105, 106, 111, 112, 116, 118, 119, 123, 124, 127, 128, 130, 132, 133, 137, 140, 142, 144, 148, 149, 154, 156, 157, 159, 165	2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 3, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 3, 1, 2, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 3, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 1, 2, 3, 1, 1, 2, 6, 3, 3, 4, 2, 3, 2, 3, 3, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 3, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 4, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 1, 1, 3, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 3	281	122.4716s

Çizelge 4.26'da BPSO yöntemi kullanılarak Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için planlanan yeni hatların ve baraların devreye alınması durumunda optimal FÖB yerleştirme lokasyon bilgilerini bulunmuştur. Optimal FÖB yerleştirmede geçen zaman bilgisayarın özelliğine bağlı olarak her bilgisayar için farklıdır. Yerleşme süresi 161.8548s ile MİB hesaplama zamanının büyük ölçüde azaltarak, daha az zaman yerleştirme işlemi gerçekleştirmektedir. BPSO, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözme ve FÖB'ler optimal sayı ve konumlarını sağlama yeteneğini göstermiştir. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sisteminde SEB bara bulunmamaktadır. Çizelge 4.26'daki

sonuçlarına göre sistemi tamamen gözlemleye bilmek için 57 FÖB cihazı bağlanması gerekmektedir. Maksimum SGAİ değerine sahip çözüm, en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. Çizelge 4.26'de 289 SGAİ değerine sahip 57 FÖB'ün çözüm en iyi optimal çözüm olarak kabul edilir. Tüm sistemi gözlemleye bilmek için 57 FÖB cihazı kullanılması yeterli olacak ve Ohm kanunu kullanılarak FÖB tarafından doğrudan ölçülemeyen hat akımları bulunur.



Şekil 4.30. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için BPSO yakınsama eğrisi.

Şekil 4.30'da Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistem için yeni hatların ve baraların devreye alınması durumunda, BPSO yakınsama şekli verilmiştir. En iyi sonuçların bulunabilmesi için en az 50'den fazla aynı iterasyon ve popülasyon değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. En iyi sonuçlar, fitness değeri 1000 ve popülasyon değeri 200 değerleri arasında iken optimum sayıda FÖB değerleri ve FÖB'lerin yerleştirileceği baralar bulunmuştur. c_1 ve c_2 değerleri [0,2-2] arasında değer alırlar. Çalışmamızda c_1 ve c_2 değerleri değeri olarak [0,2-1] arasında değer verdiğimizde optimum sayıda FÖB sayısı bulunmuştur.

4.3. TÜRKİYE 400 kV ENTERKONNEKTE GÜÇ SİSTEMİNİN OPTİMUM FÖB YERLEŞTİRME SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

DÖAY, sistemdeki düğümlerin dal sayısını inceler ve maksimum dallara sahip düğümleri bulur. Algoritmanın temel çalışma prensibi, güç sistemi gözlemlenebilir hale gelene kadar devam eden FÖB kurallarına göre tüm olası düğümleri test etmektir. DÖAY, global çözümler yerine her zaman en iyi yerel çözümleri bulur. DÖAY süreçte sadece 'derinlik' kriterini dikkate alırken, tekrarlı işlemler yapmamaktadır. Bu neden dolayı diğer yöntemlere göre en uygun FÖB lokasyon bilgilerini minimum sürede bulunur.

GTY yönteminin çalışma prensibi DÖAY benzer. DÖAY ve GTY arasındaki temel fark, sistemin tamamen gözlenebilir olup olmadığını araştırmaktır. Bu nedenle Optimal FÖB konum bilgisi her iki yöntem için de benzerdir.

BTA, optimum çözümü bulabilmek için, mevcut çözümün rastgele varyasyonlarını deneyerek optimizasyon problemini çözen bir yöntemdir Optimizasyon sürecinde, mevcut çözümden daha iyi olan tüm aday çözümler, belirli bir olasılıkla alt çözüm olarak kabul edilir ve değerlendirilir. Ancak bu işlem güç sistemi analizinde işlemleri ve çözüm alanını arttırdığından dolayı, diğer yöntemlere göre optimum FÖB lokasyonlarını daha uzun sürede bulur.

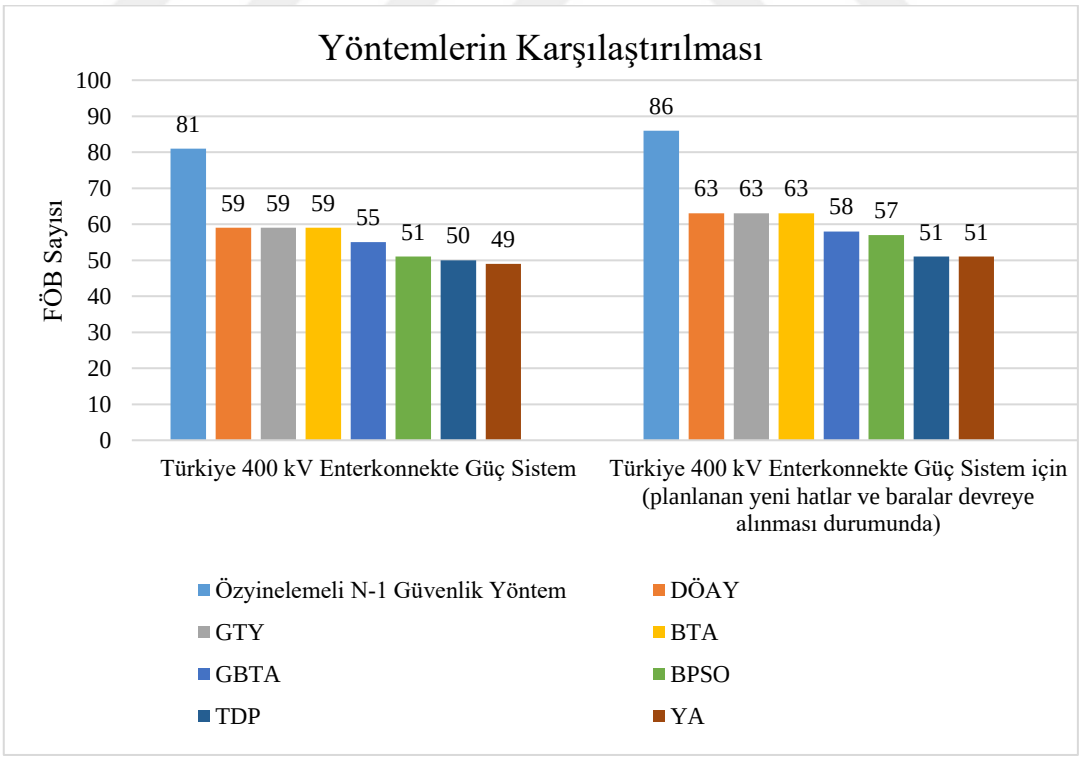
GBTA, rastgelelik artırmak için yeni bir fonksiyon kullanılmıştır. Yöntem, güç sistemine kurulacak FÖB sayısını en aza indirecek şekilde formüle edilmiştir. GBT Yönteminde, fonksiyondaki rastgelelik artırmak için iki yolla rasgele çözümler üretilebilir. Birincisi, FÖB'ün rasgele bir FÖB'suz veri yoluna taşımak, ikincisi ise rasgele bir FÖB'ün kaldırmak veya eklemektir. Bu işlem diğer üç yöntemden daha fazla zaman almaktadır. GBTA, optimum FÖB yerleştirme problemi için global optimal çözümü bulma olasılığı DÖAY, GTY, BTA yöntemlerine göre daha yüksektir.

TDP yönteminde amaç işlev sistemin tamamen gözlemlenebilir olması için en aza indirilmesi gereken gerekli toplam FÖB sayısıdır. Kısıtlar sistemdeki tüm veri yollarının en az bir FÖB tarafından gözlemlenebilir olmasını sağlamaktır. TDP yöntemi bir veri yolunun FÖB tarafından ulaşılma sayısını en üst düzeye çıkarmak için, amaç fonksiyonuna *Ri* terimi eklenmektedir. Bu sayede, Ohm Kanunu ve KAY kullanılarak hesaplandığında güç sistemlerine kurulacak olan FÖB sayısını daha da azaltmış, tüm sistem optimum FÖB ile gözlemlenebilir hale gelmiştir. Literatürde OFY'nin sayısal sonuçları sadece tablo kullanılarak verilmektedir. Bu, özellikle büyük güç sistemlerinde

çözüme ilişkin iç görüler sağlamak için yeterli değildir. Çalışmamızda, grafik teorisi ve CBS kullanılarak iki görselleştirme yöntemi ile OFY işlemi gerçekleştirilmiştir.

YA'nın, çeşitli alanlarda farklı ve karmaşık problemleri optimize etme yeteneğine sahiptir. YA'nın alandaki pratik tekniklerden biri olduğunu keşfetmiştir. YA'nın basitliği, araştırmacıları eldeki sorunları optimize etmek için, algoritmayı kullanmaya teşvik eden nedenlerden biridir. Algoritmanın doğruluğu ve yakınsama hızı da bir diğer sebeptir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde genel olarak, küçük ve orta ölçekli problemler için algoritma iyi sonuçlar verdiğini belirtilmiştir. Ayrıca YA'nın global optimuma yakınsama konusunda iyi bir yeteneğe sahip olduğundan, doğru çözümler elde etme yeteneğinden ve yeni bir algoritma olmasından dolayı çalışmamızda kullanılmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, PSO ve BPSO en çok kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. BPSO, ayrık problemlerin üstesinden gelebilmek ve PSO'nun uygulanabilirliğini geliştirmek için geliştirilmiştir. PSO adımları ile BPSO adımları benzerdir. BPSO ve PSO arasındaki temel fark, BPSO'da konum güncellemesi farklı şekilde yapılmaktadır. BPSO'da her bir parçacığın hız değerine göre sigmoid fonksiyon değerleri hesaplanır ve parçacıkların konumu güncellenir.



Şekil 4.31. Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemleri için optimum FÖB yerleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.31’de Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemleri için farklı yöntemlerle elde edilen OFY işleminin karşılaştırmalı sonuçları verilmektedir. Yöntemler arasında YA yöntemi diğer yedi farklı yönteme göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca güç sisteminin bara sayısının fazla olması durumunda da YA yönteminin diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. YA yöntemi, sisteme kurulacak FÖB sayısını azaltarak, FÖB kurulum maliyetini de düşürmüş olduğu gözlemlenmektedir. Bu neden dolayı YA yöntemi kullanılarak güç sistemini daha düşük maliyetle tamamen gözlemlenebilinir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Artan enerji maliyetlerinden dolayı, güç sistemlerinin gerilim ve açı kararsızlığı gibi olumsuz nedenlerden etkilenmemesi için, tüm sistemin hızlı bir şekilde gözlemlenmesi, kontrol edilmesi ve planlanması gerekmektedir. FÖB sayesinde güç sisteminde kararsızlık anına gelmeden önce, gerekli önlemler alınarak, sistemin kararlılığı ve güvenirliğinin sağlanabilmektir. Çalışmamızdaki amaç fonksiyonu tüm güç sistemini tamamen gözlemlemektir. Kısıt fonksiyonu ise minimum sayıda FÖB cihazı ile tüm güç sisteminin gözlemlenmesini sağlamaktır. Çalışmamızda optimum FÖB sayısı ve yerleşim yerlerinin bulunmasına yönelik olarak, Özyinelemeli N-1 güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, BTA geliştirilerek yeni bir yöntem olan GBTA, BPSO, grafik teorisi ve coğrafi bilgi sistemi kullanarak görselleştirilmiş yeni bir TDP matematiksel yöntem ve yeni bir sezgisel yöntem olan YA yöntemleri uygulanarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yöntemlerin doğruluğunun test edilmesi için IEEE 14-Bara Test Sistemine uygulanmış ve literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Kullanılan yöntemlerin doğruluğu ve güvenilir olduğunu belirledikten sonra Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi ve Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi (planlanan yeni baralar ve iletim hatları devreye alınması durumu) olmak üzere uygulama yapılmıştır. Kullanılan yöntemlerden DÖAY, GTY, BTA, BPSO, literatürdeki bulunan sonuçlarla aynı sonuçlar bulunmuş ve GBTA, TDP, YA yöntemleri kullandığımızda daha iyi sonuçlar bulunmuştur.

GBTA yöntemini kullandığımızda hem IEEE Bara Test Sistemleri hem de Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemleri için, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntem, DÖAY, GTY, BTA ve BTA yöntemlerinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. TDP yöntemi kullanılması sayesinde, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözmede, FÖB'lerin optimal sayısını belirlemede ve konumlarını grafiksel olarak doğru bir şekilde göstermede çok başarılı olmuştur. Ayrıca, OFY'den elde edilen FÖB'lerin konumlarını göstermek için iki görselleştirme tekniği kullanılmıştır. FÖB kaybı veya iletişim hattı kesintisinin etkisi gibi yaygın beklenmedik durumlar da incelenmiştir.

Çalışmamızda diğer bir sezgisel yöntemler olan ve sürüden ilham alınarak tasarlanmış YA ve BPSO kullanılmıştır. Yeni bir sezgi olan YA kullanılmasının amacı, çoğu durumda

YA'nın global optimuma yakınsama konusunda iyi bir yeteneğe ve çeşitli alanlarda farklı ve karmaşık problemleri optimize etme yeteneğine sahip olduğunu belirten çalışmalar literatürde yapılmış olmasıdır. Literatürde YA için yapılan çalışmalarda alandaki pratik tekniklerden biri olduğunu keşfedilmiştir. YA kolay anlaşılır, doğruluğu ve yakınsama hızlı, iyi sonuçlar verdiğinden çalışmamızda kullanılmasının başlıca sebeplerdendir. YA yöntemi, büyük güç sistemlerini kısa sürede çözmede, optimum sayıda FÖB ile tüm güç sistemini gözlemlemede oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışma ile güç sisteminin yönetimi ve kontrolünün güvenli bir şekilde sağlanması açısından büyük öneme sahip olan FÖB'lerin lokasyon bilgileri IEEE 14-Bara Test Sistemi ve Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemleri için belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda Türkiye 400 kV Enterkonnekte Güç Sistemi için önerilen yöntemler uygulayarak, güç sistemi herhangi bir kararsızlık durumuna gelmeden gerekli önlemler alınarak kararlılığı ve güvenirliği sağlanabilinir. Çalışma sonucunda, optimum sayıda FÖB'lerin hem maliyeti azaltarak hem de güç sisteminin tamamının gözlemlenebilmesi için FÖB'lerin hangi baralara yerleştirilmesi gerektiği bulunmuştur. Önerilen yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar, Türkiye'de ilgili çalışmaları yürüten kurum ve kuruluşlara alternatif bir çözüm sunmaktadır.

Bu çalışmanın özgünlüğü, optimum FÖB sayısı ve FÖB konumlarını belirlemek için Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, TDP ve YA yöntemleri kullanılarak ilk kez Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistemlerine uygulanmıştır. Ayrıça, Özyinelemeli N-1 Güvenlik Yöntemi, DÖAY, GTY, BTA, GBTA, BPSO, TDP ve YA yöntemleri ilk kez IEEE-65 Bara Test Sistemine uygulanmıştır. YA ve GBTA yöntemleri ilk kez IEEE-24, IEEE-57, IEEE-300 Bara Test Sistemlerine uygulanarak, optimum FÖB sayısı ve FÖB konumları bulunmuştur. Literatüre ana katkısı, bu çalışma sayesinde hem IEEE Bara Test Sistemleri hem de Türkiye 400 kV'luk Enterkonnekte Güç Sistemlerinin enerjisi verimli kullanılabilecek ve sistemlere yerleştirilen optimum FÖB sayesinde, güç sistemleri tamamen gözlemlenebilir hale gelecektir.

OFY çalışması sonuçlarının kullanılması ile daha güvenilir bir güç sistemi yönetimi planlayabiliriz. Önerilen yöntemler, durum tahmini ve arıza analizi problemlerinin çözümü için ilerideki çalışmalarda alternatif bir çözüm yöntemi olarak kullanılabilir. FÖB cihazlarının farklı özelliklere sahip olma durumu bir kısıt olarak ele alınarak alternatif optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Belli sayıda baralardan ölçüm alınması

gereken durumlar FÖB cihazının yerleştirilmesi ile ilgili olarak değerlendirilmemiştir. Örneğin; sistemin çökmesi durumunda, sistemin toparlanması durumu için, enerjilendirilmesi düşünülen öncelikli yükler iletim sistemin izlenmesi için gerekirse, FÖB cihazları o baraya muhakkak yerleştirilmelidir. FÖB cihazlarının farklı özelliklere sahip olma durumu bir kısıt olarak ele alınarak alternatif optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Bu çalışma sonuçları kullanılması sayesinde daha güvenilir bir güç sistemi yönetimi planlayabiliriz. Önerilen yöntemler, durum tahmini ve hata analizi problemlerinin çözümü için ilerideki çalışmalarda alternatif bir çözüm yöntemi olarak kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

[1] D. Chouhan ve V. A. Jaiswal, "Literature review on optimal placement of PMU and voltage stability", *Indian Journal of Science and Technology,* c. 9, sayı 47, 2016.

[2] R. Seyed-Ehsan, F. Hamid, S. Chanan, A. Jamshid, ve N. Ali Esmaeel, "A novel linear framework for Phasor Measurement Unit placement considering the effect of adjacent zero-injection buses", *Measuremen*t, c.133, ss. 532–540, 2019.

[3] Phadke, Arun G. ve James S. Thorp. "Synchronized Phasor Measurements and Their Applications", New York, Springer, 2008.

[4] A. G. Phadke, J. S. Thorp, ve K. J. Karimi, "State Estimation with Phasor Measurements", *IEEE Transactions on Power Systems,* c. 1, sayı 1, ss. 233-241, 1986.

[5] M. Elimam, Y. J. Isbeih, M. S. El Moursi, K. Elbassioni, ve K. H. Al Hosani, "Novel pptimal PMU placement approach based on the network parameters for enhanced system observability and wide area damping control capability", *IEEE Transactions on Power Systems,* c. 36, sayı 6, ss. 5345–5358, 2021.

[6] A. F. Taha, J. Qi, J. Wang, ve J. H. Panchal, "Risk mitigation for dynamic state estimation against cyber-attacks and unknown inputs", *IEEE Trans Smart Grid*, c. 9, sayı 2, ss. 886–99, 2018.

[7] A. Borghetti, R. Bottura, M. Barbiroli, ve C. A. Nucci, "Synchro phasors-based distributed secondary voltage/var control via cellular network", *IEEE Trans Smart Grid*, c. 8 sayı 1, ss. 262–74, 2017.

[8] C. Xu ve A. Abur, "A fast and robust linear state estimator for very large scale inter-connected power grids", *IEEE Trans Smart Grid*, c. 9, say 5, ss. 4975–4982, 2018.

[9] Z. Jin, P. Wall, Y. Chen, ve J. Yu, "Chakrabarti S, Terzija V. Analysis of hybrid state estimators: the effects of estimator formulations", *IEEE Transactions on Power Systems,* Early Access, 2018.

[10] J. T. Rao ve B. R. Bhalja, "Prevention of maloperation of distance relay under severe stressed conditions for series compensated transmission line considering optimal placement of phasor measurement units", *IET Generation, Transmission & Distribution,* 2020, c. 14, sayı 11, ss. 2148–2159.

[11] A. Dwivedi, B. Mallikarjuna, D. Pal, M. J. B. Reddy, ve D.K. Mohanta. "A real-time synchrophasor-based zone-3 supervision of distance relays under load encroachment condition", *IEEE Systems Journal*, c. 13, sayı 4, ss. 4227–4235, 2019.

[12] V. Yuvaraju ve S. Thangavel, "Optimal phasor measurement unit placement for power system observability using teaching–learning based optimization", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 137, sayı November 2021, ss. 107775, 2022.

[13] N. M. Manousakis ve G. N. Korres, “Optimal allocation of phasor measurement units considering various contingencies and measurement redundancy”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, c. 69, sayı 6, ss. 3403–3411, 2020.

[14] P. T. Nikolaos, M. M. Nikolaos, ve N. K. George, “Optimal PMU Placement Using Nonlinear Programming”, *1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization*, ss. 240–258, 2014.

[15] N. Saeid, A. Jamshid, S. Behrooz, ve N. Mohammad-Ali, “Contingency constrained phasor measurement unit’s placement with n-k redundancy criterion: A robust optimization approach”, *IET Science, Measurement & Technology*, c. 12, sayı 2, ss.151–160, 2018.

[16] A. Aziz, G. Mabaning, ve J. Rel C. Orillaza, “Complete solution of optimal PMU placement using reduced exhaustive search, ” *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Singapore, 22-25 Kasım, 2016.

[17] N. M. Manousakis ve G. N. Korres, “A weighted least squares algorithm for optimal PMU placement”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 28, ss. 3499–3500, 2013.

[18] H. Var ve B. E. Türkay, “Optimal Placement of Phasor Measurement Units for State Estimation in Smart Grid”, *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, Bursa, ss. 6-10, 2016.

[19] *IEEE Standart for Synchro Phasors for Power Systems*, C37.118-2005, IEEE, Nisan 2006.

[20] A. G. Phadke, “Phasor measurements for real time applications”, *IEEE Power and Energy Magazine*, c. 6, sayı 5, ss. 20-22, 2008.

[21] D. Dua, S. Dambhare, R. K. Gajbhiye, ve S. A. Soman, “Optimal multistage scheduling of PMU placement: An ILP approach”, *IEEE Transactions on Power delivery*, c. 23, sayı 4, ss. 1812–1820, 2008.

[22] M. Shahraeini ve M. H. Javidi, "A Survey on Topological Observability of Power Systems", *IEEE Power Engineering and Automation Conference PEAM*, c. 3, Wuhan, China, 2011.

[23] R. Saini Manju ve M. Saini, “Optimal Placement of Phasor Measurement Units for Power System Observability without Considering Zero Injection Buses", *International Journal of Smart Sensors and Ad Hoc Networks*, c. 1, sayı 4, ss. 118-122, 2012.

[24] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen, ve R. Adapa, “Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 8, sayı 2, ss. 701–715, 1993.

[25] B. M. Ivatloo, “Optimal Placement of PMUs for Power System Observability Using Topology Based Formulated Algorithms”, *Journal of Applied Sciences*, c. 9, sayı 13, ss. 2463- 2468, 2009.

[26] P. Jiangnan, S. Yuanzhang, ve H. F. Wang, “Optimal PMU Placement for Full Network Observability using Tabu Search Algorithm”, *Electrical Power and Energy Systems*, c. 28, sayı 4, ss. 223-231, 2006.

[27] W. Yuill, A. Edwards, S. Chowdhury, ve S. P. Chowdhury, "Optimal PMU placement: A comprehensive literature review", *In 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, ss. 1–8, 2011.

[28] A. Y. Abdelaziz, A. M. Ibrahim, ve R. H. Salem, "Power system observability with minimal phasor measurement units placement", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, c. 5, sayı 3, ss. 1–18, 2013.

[29] H. Goklani, N. A. Chauhan, ve M. Prajati, "Optimal placement of phasor measurement unit in smart grid", *International Conference on Advance Trends in Engineering and Technology (ICATET-2014)*, Jaipur, Rajsthan, c. 2, 2014.

[30] K. S. Kumar, S. Member, ve I. M. Sydulu, "Optimal PMU placement techniques for the topological observability of a partial network of the southern grid of India", *IFAC Proceedings Volumes*, c. 47, sayı 1, 2014.

[31] S. Bhongade ve L. Verma, "Optimal placement and location of phasor measurement unit considering bus voltage using genetic algorithm", *Journal of Power Electronics & Power Systems*, c. 6, sayı 1, ss. 74–84, 2016.

[32] N. P. Theodorakatos, N. M. Manousakis, ve G. N. Korres, "Optimal placement of PMUS in power systems using binary integer programming and genetic algorithm", *MedPower*, sayı 3, ss. 23, 2015.

[33] J. V. Kumar, P. Suneetha, ve V. M. S. Sree, "Optimal placement of PMU in a transmission network using genetic algorithm", *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, c. 7, ss. 319–323, 2019.

[34] S. Kumar, B. Tyagi, V. Kumar, ve S. Chohan, "Incremental PMU placement considering reliability of power system network using analytical hierarchical process", *IET Generation Transmission & Distribution*, c. 12, sayı 16, ss. 3900–3909, 2018.

[35] F. Aminifar, C. Lucas, A. Khodaei, ve M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm", *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 24, say 3, ss. 1014–1020, 2009.

[36] H. H. Müller ve C. A. Castro, "Genetic algorithm-based phasor measurement unit placement method considering observability and security criteria", *IET Generation Transmission & Distribution*, c. 10, sayı 1, ss. 270–280, 2016.

[37] A. Asgari ve K. G. Firouzjah, "Optimal PMU placement for power system observability considering network expansion and n - 1 contingencies *IET Generation Transmission & Distribution*, c. 12, sayı 18. ss. 4216–4224, 2018.

[38] M. K. Arpanahi, H. H. Alhelou, ve P. Siano, "A novel multi objective OFY for power system small signal stability assessment considering WAMS uncertainties", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, c. 16, sayı 5, ss. 3039–3050, 2020.

[39] M. M. Ahmed, M. Amjad, M. A. Qureshi, K. Imran, Z. M. Haider, ve M. O. Khan, "A critical review of state-of-the-art optimal PMU placement techniques", *Energies*, c. 15, sayı 6, ss. 2125, 2022.

[40] M. Laouamer, R. D. Mohammedi, A. Kouzou, ve A. Tlemcani, "Optimal placement of PMUs in Algerian network using genetic algorithm", *15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), IEEE*, ss. 947–951, 2018.

[41] M. Shafiullah, J. Rana, S. Alam, ve M. A. Uddin, "Optimal placement of phasor measurement units for transmission grid observability", *International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISET)*, Dhaka, Bangladesh, 2017.

[42] L. A. Azzeddine, M. R. Djamel, K. Abdellah, ve R. M.Mounir, "Optimal PMU placement in power system based on multi-objective particle swarm optimization", *15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Yasmine Hammamet, Tunisia*, 2018.

[43] P. Sarkar ve P. Banerjee, "Optimal Placement of PMU in Transmission Network by PSO Technique", *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*, c. 4, sayı 11, ss. 10–15, 2018.

[44] B. Gou, "Optimal placement of PMUs by integer linear programming", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 23, sayı 3, ss. 1525–1526, 2008.

[45] B. Gou, "Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 23, sayı 3, ss. 1099–1104, 2008.

[46] I. Abdulrahman ve G. Radman, "ILP-Based Optimal PMU Placement with the Inclusion of the Effect of a Group of Zero-Injection Buses", *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, c. 29, sayı 4, ss. 512–524, 2018.

[47] S. K. Kotha ve B. Rajpathak, "Power System State Estimation using Non-Iterative Weighted Least Square method based on Wide Area Measurements with maximum redundancy", *Electric Power Systems Research*, c. 206, 2022.

[48] V. Bečejac ve P. Stefanov, "Groebner bases algorithm for optimal PMU placement", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 115, sayı June 2019, 2020.

[49] S. Ramasamy, B. Koodalsamy, C. Koodalsamy, ve M. B. Veerayan, "Realistic Method for Placement of Phasor Measurement Units through Optimization Problem Formulation with Conflicting Objectives", *Electric Power Components and Systems*, c. 49, sayı 4–5, ss. 474–487, 2021.

[50] Z. Wang, J. Wang, ve D. Shi, "Co-optimal placement of PMUs and associated edge access networks in wide-area measurement system considering cyber contingencies", *The 10th Renewable Power Generation Conference (RPG 2021)*, 2021, ss. 953-959, 2021.

[51] M.A.M. İpek, "Elektrik Güç Sistemlerinde Geniş Alan Ölçüm Sistemi ve Fazör Ölçüm Birimi Yerleşiminin İncelemesi", Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2008.

[52] Singh vd., "Applications of Phasor Measurement Units (PMUs) in Electric Power System Networks Incorporated with FACTS Controllers", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, c. 3, sayı 3, ss. 64-82, 2011.

[53] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems", *IEEE Computer Applications in Power*, c. 6, sayı 2, ss. 10–15, 1993.

[54] A. Sarıtaş, "Akıllı Şebekeler Ve Fazör Ölçüm Birimlerinin Şebekeye Optimal Yerleşimi", Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.

[55] M. Varan, S. Haidary, İ. Öylek ve Ö. Canay, "Akıllı şebekelerde güvenli haberleşme tabanlı güç akışı analizi", *Journal of New Results in Engineering and Natural Science*, c. 8, sayı 8, ss. 63–74, 2018.

[56] N. M. Manousakis, G. N. Korres, ve P. S. Georgilakis, "Optimal placement of phasor measurement units: A literature review", *16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP 2011)*, Hersonissos, Crete, Yunanistan, ss. 1-6, 2011.

[57] S. Zhiming, H. Yuqian, H. Yunshan, "A new algorithm for PMU placement optimization in power system", c. 4, sayı 7, ss. 31-36, 2005.

[58] T.-T. Cai ve Q. Ai., "Research of PMU optimal placement in power systems", *in 2005 World Scientific and Engineering Academy and Society International Conference*, 2005.

[59] P. Xu ve B. F. Wollenberg, "Power System Observability and Optimal Phasor Measurement Unit Placement", Department of Electrical and Computer Engineering College of Science and Engineering, University Minnesota Twin Cities, IET Generation, Transmission and Distribution, ss. 1–55, 2015.

[60] N. M. Manousakis, G. N. Korres, ve P. S. Georgilakis, "Taxonomy of PMU placement methodologies", *IEEE Transactions Power Systems*, c. 27, sayı 2, ss. 1070–1077, 2012.

[61] H. R. Sudheendra, V. K. Jadoun, N. S. Jayalakskmi, ve A. Agarwal, "Latest Trends in PMU Placement Techniques", *2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC), Mathura, India*, 2020.

[62] M. T. Kumar ve P. Acharjee, "Multiple solutions of optimal PMU placement using exponential binary PSO algorithm for smart grid applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 53, sayı 3 (2017), ss. 2550-2559, 2017.

[63] B. K. Saha Roy, A. K. Sinha, ve A. K. Pradhan, "An optimal PMU placement technique for power system observability", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 11/2012, c. 42, sayı 1, ss. 71-77, 2012.

[64] S. M. Mahaei ve M. T. Hagh, "Minimizing the number of PMUs and their optimal placement in power systems," *Electric Power Systems Research*, c. 83, sayı 1, ss. 66–72, 2012.

[65] K. S. Cho, J.R. Shin, ve S. H. Hyun, "Optimal placement of phasor measurement units with GPS receiver", in: Proc. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, c. 1, ss. 258–262, 2001.

[66] A. Enshaee, R. A. Hooshmand, ve F. H. Fesharaki, "A new method for optimal placement of phasor measurement units to maintain full network observability under various contingencies," *Electric Power Systems Research*, c. 89, ss. 1–10, 2012.

[67] K. G. Khajeh, E. Bashar, A. M. Rad, ve G. B. Gharehpetian, "Integrated Model Considering Effects of Zero Injection Buses and Conventional Measurements on Optimal PMU Placement", *IEEE Transactions. Smart Grid*, c. 8, sayı 2, ss. 1006–1013, 2017.

[68] B. Xu ve A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for system with PMUs", *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004*, IEEE, New York, ABD,10-13 Ekim 2004, 2004.

[69] D. Narsingh, "Graph Theory with applications to engineering and computer science", Prentice -Hall Inc., 1974.

[70] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, ve D. G. Eliades, "Placement of synchronized measurements for power system observability", *IEEE Transactions Power Delivery*, c. 24, ss. 12-19, 2009.

[71] X. C. Guo, C. S. Liao, ve C. C. Chu, "Enhanced optimal PMU placements with limited observability propagations," *IEEE Access*, c. 8, ss. 22515–22524, 2020.

[72] M. K. H. Pulok, "Development of Real-Time Voltage Stability Monitoring Tool for Power System Transmission Network Using Synchro Phasor Data", Master Thesis (M.S.), College of Engineering, The Florida State University, 2015.

[73] A. A. Laouid, M. M. Rezaoui, A. Kouzou, ve R. D Mohammedi, " Application of Autonomous Group Particle Swarm Optimization for Optimal PMUs Placement", *2020 17th Int. Multi-Conference systems Signals Devices (SSD'20)*, ss. 79–84, 2020.

[74] H. Vakharia ve N. Bhadauria, " Optimum PMU Placement Techniques - A Comparative Study", *International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology System*, c. 2444, sayı 5, ss. 155–163, 2016.

[75] P. Xu, "Power System Observability and Optimal Phasor Measurement Unit Placement," https://github.com/xupei0610/OFY, ss. 1–41.

[76] The University of New South Wales, "Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 1.3.4," http://seit.unsw.adfa.edu.au/staff/sites/hrp/research/PSAT/psat-1.3.4.pdf. (erişim 10.06.2022).

[77] S. Russell ve P. Norvig, "Articial Intelligence: A Modern Approach", 2009.

[78] P. K. Ghosh ve A. Tahabilder, "Optimal PMU placement for complete system observability and fault observability using graph theory", *2017 International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, IEEE, Pattaya, Thailand, 2017.

[79] P. K. Ghosh, S. Chatterjee, ve B. K. S. Roy, "Optimal PMU placement solution: Graph theory and MCDM-based approach", *IET Generation Transmission & Distribution*, c. 11, sayı 13, ss. 3371–3380, 2017.

[80] G. N. Korres, P. J. Katsikas, K. A. Clements, vd., "Numerical observability analysis based on network graph theory", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 18, sayı 3, ss. 1035–1045, 2003.

[81] L. Huang, Y. Sun, J. Xu, vd., "Optimal PMU placement considering controlled islanding of power system", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 29, sayı 2, ss. 742–755, 2014.

[82] G. B. Denegri, M. Invernizzi, ve F. Milano, "A Security Oriented Approach to PMU Positioning for Advanced Monitoring of a Transmission Grid", *Proceedings. International Conference on Power System Technology, IEEE*, Kunming, China, 2002.

[83] F. Milano, “Power System Analysis Toolbox (PSAT) 2004”, Documentation for PSAT version 1.3.1, July 14, 2004. Copyright 2003, 2004.

[84] R. F. Nuqui, “State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements”, *Doctor of Philosophy In Electrical Engineering*, Blacksburg, Virginia, 2001.

[85] M. Nazari-Heris ve B. Mohammadi-Ivatloo, “Application of heuristic algorithms to optimal PMU placement in electric power systems: An updated review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 50, ss. 214–228, 2015.

[86] M. Farsadi, H. Golahmadi, ve H. Shojaei,“Phasor Measurement Unit (PMU) allocation in power system with different algorithms”, *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009*, ss. I-396-I-400, 2009.

[87] R. Tamassia, “Handbook of graph drawing and visualization”, Boca Raton: CRC Press, 2014.

[88] ESRI documentation., ArcGIS: What is ArcGIS 9.2? USA, 2006.

[89] H. S. Shin ve A. F. Scott, “Power system analysis in GIS,” Burns: McDonnel, 2004.

[90] F. Katircioğlu, “Renkli görüntüler için yusufçuk algoritması kullanılarak benzerlik görüntüsüne dayalı eşikleme,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 5, sayı 2, ss. 506–523, 2017.

[91] C. W. Reynolds, C. W. Reynolds, “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model” *Computer Graphics*, c. 21, sayı 4, ss. 25–34, 1987.

[92] S. Mirjalili, “Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems,” *Neural Computing and* Applications, c. 27, sayı 4, ss. 1053–1073, 2016.

[93] C. M. Rahman ve T. A. Rashid, “Dragonfly algorithm and its applications in applied science survey”, *Computational Intelligence and Neuroscience*, c. 2019, ss. 1-21, 2019.

[94] C. M. Rahman, T. A. Rashid, A. Alsadoon, N. Bacanin, P. Fattah, ve S. Mirjalili, “A survey on dragonfly algorithm and its applications in engineering”, *Evolutionary Intelligence*, ss. 1-21, 2021.

[95] J. Kennedy ve R. Eberhart, ‘‘Particle swarm optimization”, *IEEE ICNN*, c. 4, Nov./Dec., ss. 1942–1948, 1995.

[96] M. Macedo vd., “Overview on Binary Optimization Using Swarm-Inspired Algorithms”, *IEEE Access*, c. 9, ss. 149814–149858, 2021.

[97] J. Kennedy ve R. Eberhart, “A discrete binary version of the particle swarm algorithm”, in *IEEE International Conference on Systems*, c. 5, 1997, ss. 4104–4108, 1997.

[98] N. Subaş, “Sürekli/İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Destek Vektör Makinelerinin Hibrit Kullanımı ile Özellik Seçimi”, Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.

[99] M, A. Khanesar, H. Tavakoli, M. Teshnehlab, ve A. M. Shoorehdeli, “Novel Binary Particle Swarm Optimization”, K N. Toosi University of Technology Iran.

[100] N. H. A. Rahman, A. F. Zobaa, ve M. Theodoridis, "Improved BPSO for optimal PMU placement", *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Stoke, UK, 2015.

[101] H. Gözde, M.C. Taplamacıoğlu, İ. Kocaarslan ve M.A. Şenol, "İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminin yük-frekans kontrolü için parçacık sürüsü optimizasyonu tabanlı PI-kontrolör", *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30,1, ss. 13-21.8, 2010.

[102] B. Alataş, E. Akın, ve A. B. Özer, "Kaotik Haritalı Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmaları", Bilgisayar Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye.

[103] A. Ahmadi, Y. Alinejad-Beromi, ve M. Moradi, "Optimal PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization and considering measurement redundancy", *Expert Systems with Applications*, c. 38, sayı 6, ss. 7263–7269, 2011.

[104] A. A. Abdelsalam, K. M. Hassanin, A. Y. Abdelaziz, ve H. H. Alhelou, "Optimal PMUs placement considering SEBs and single line and PMUs outages", *AIMS Energy*, c. 8, sayı 1, ss. 122–141, 2020.

[105] https://alroomi.org/multimedia/PowerFlow/14BusSystem/IEEE14BusSystem.pdf.(erişim 10.05.2022).

[106] B. Xu ve A. Abur, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for State Estimation", *Power Systems Engineering Research Center*, Final Project Report, PSERC Publication 05-58, ss. 1-42, October 2005.

[107] R. Babu ve B. Bhattacharyya, "Phasor measurement unit allocation with different soft computing technique in connected power network," *Michael Faraday IET International Summit 2015*, IET, Kolkata, 12-13 Eylül 2015, 2015.

[108] N. U. Nimbalkar ve D. P. M. Joshi, "Optimal PMU Placement using ILP and ACO:A Comparative Study", *2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, IEEE, Bangalore, India, 18-20 Ekim 2019, 2019.

[109] P. V. Deshmukh ve P.P. Bedekar, "Optimal PMU Placement Using Binary Integer Programming", *International Journal Of İnnovative Research İn Science Engineering and Technology Abbreviation*, cc. 6, sayı 1, ss. 340–349, 2017.

[110] K. S. K. Reddy, D. A. K. Rao, A. Kumarraja, ve B. R. K. Varma, "Implementation of Integer Linear Programming and Exhaustive Search algorithms for optimal PMU placement under various conditions", *2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)*, IEEE, Bhubaneswar, India, 15-17 Ekim 2015, 2016.

[111] M. Anfal ve H. Abdelhafid, "Optimal placement of PMUS in algerian network using a hybrid particle swarm–moth flame optimizer (PSO-MFO)", *EEA - Electrotech Electron Atom*, c. 65, sayı 3, ss. 191–196, 2017.

[112] N. P. Theodorakatos, N. M. Manousakis, ve G. N. Korres, "Optimal PMU Placement Using Nonlinear Programming", *An International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization*, Kos Island, Greece, 4-6 Temmuz 2014, 2014.

[113] S. P. Singh ve S. P. Singh, "Optimal PMU Placement in Power System Considering the Measurement Redundancy", *International Journal of Advances In Electrical and Electronics Engineering*, c. 4, sayı 6, ss. 593–598, 2014.

[114] K. Kaur ve A. Kaur, "PMU Optimal Placement In Power System Using Binary PSO", I*nternational Journal of Advanced Research in Computer Science,* c. 8, sayı 7, ss. 1078–1082, 2017.

[115] L. Parimalam ve R. Rajeswari, "Achieving Effective Power System Observability in Optimal PMUs Placement Using GA-EHBSA", *Circuits Systems*, c. 07, sayı 08, ss. 2002–2013, 2016.

[116] V. V. R. Raju ve S. V. J. Kumar, "An optimal PMU placement method for power system observability", *2016 IEEE Power Energy Conferans Illinois, PECI 2016*, ss. 1–5, 2016.

[117] S. Chakrabarti, G. K. Venayagamoorthy, ve E. Kyriakides, "PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization", *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference.* IEEE, 2008.

[118] A. Raj ve C. Venkaiah, "Optimal PMU placement by teaching-learning based optimization algorithm", *In 2015 39th National Systems Conference (NSC)*, IEEE Greater Noida, India, 14-16 Aralık 2015, 2016.

[119] Z. H. Rather, C. Liu, Z. Chen, ve P. Thogersen, "Optimal PMU Placement by improved particle swarm optimization", *2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT),* Asia 2013, ss. 1–6, 2013.

[120] R. Babu, S. Raj, ve B. Bhattacharyya, "Weak bus-constrained PMU placement for complete observability of a connected power network considering voltage stability indices", *Protection and Control of Modern Power Systems*, c. 5, sayı 1., 2020.

[121] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Araştırma ve Geliştirme (AR-GE) Müdürlüğü, (erişim 12.08.2020).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Beytullah BOZALİ

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik ve Elektronik Müh. A.B.D.	Düzce Üniversitesi	2022
Y. Lisans	Elektrik Eğitimi	Düzce Üniversitesi	2012
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2015
Lisans	Elektronik Öğretmenliği	Fırat Üniversitesi	2007
Ön Lisans	Elektronik	Karadeniz Teknik Üniversitesi	2003
Lise	Elektronik	Akçaabat Çok Programlı Meslek Lisesi	1999

YAYINLAR

Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler:

1. B. Bozali, A. Öztürk ve S. Tosun, “Designation of optimal location of phasor measurement units by comparing different methods for Türkiye 400 kV power systems”, *Electric Power Components and Systems*, doi: 10.1080/15325008.2022.2145390

2. B. Bozali, A. Öztürk, S. Tosun ve B. Hoş, “Optimal PMU Placement for Türkiye 400 kV interconnected power system observability with dragonfly algorithm”, *Tehnički vjesnik/Technical Gazette*, doi: 10.17559/TV-20220708091029.

Ulusal Hakemli Dergi Yayınları

1. B. Bozali ve A. Öztürk, “Türkiye 400 KV’luk Güç Sistemi İçin Optimal Fazör Ölçüm Birimlerinin Yerleşim Yerlerinin Belirlenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, c. 8, sayı 1, ss. 1319–1336, 2020.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

1. B. Bozali, A. Öztürk, S. Tosun, ve B. Hoş, “Determination of optimal placements of phasor measurement units using ınteger linear programming for 400 kV interconnected power system in Türkiye”, *4. Uluslararası Mühendislik Araştırma Sempozyumu INERS 2022*, Türkiye, 2022.

2. B. Bozali ve A. Öztürk, “Türkiye 400 kv’luk güç sistemi için optimal fazör ölçüm birimlerinin yerleşim yerlerinin belirlenmesi”, *International Marmara Sciences Congress*, Türkiye, 2019. (Özet)