KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

BARA BÖLME METODUNU KULLANARAK ŞEBEKE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

ERDİ DOĞAN

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

BARA BÖLME METODUNU KULLANARAK ŞEBEKE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

ERDİ DOĞAN

Doç. Dr. Nuran YÖRÜKEREN		
Danışman,	**Kocaeli Üniv.**	**.....**
Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK		
Jüri Üyesi,	**Düzce Üniv.**	**.....**
Prof. Dr. Ayşen BASA ARSOY		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniv.**	**.....**
Prof. Dr. Bora ALBOYACI		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniv.**	**.....**
Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ		
Jüri Üyesi,	**KTÜ**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih: 30.01.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Enerji iletim sisteminin güvenliği, enerji sisteminin tamamını ilgilendiren hassas bir konudur. İletim sisteminde yaşanan problemler, milyonlarca insanı ilgilendiren büyük çaplı enerji kesintilerine yol açmaktadır. Bu doğrultuda enerji iletim sisteminde oluşacak bir arızanın röleler vasıtasıyla sistemden izole edilmesi ne kadar önemliyse, arıza sonrası aşırı yüklenmeler sebebiyle gerçekleşecek ardışık servis harici olmaların engellenmesi de o kadar önemlidir. Başka bir ifadeyle, iletim sisteminde bulunan bir ekipman üzerinde meydana gelecek bir arızanın tüketicide kesintiye yol açmaması gerekir. Arıza sonrası arz güvenliğinin devam etmesini amaçlayan bu kural N-1 güvenliği olarak adlandırılmakta olup iletim sistemi operatörleri tarafından sürekli olarak analizi yapılan temel bir konudur. Diğer taraftan, artan enerji ihtiyacına binaen daha yüksek miktarda enerji transferi gerçekleştirebilmek için iletim altyapıları sürekli olarak genişletilmektedir. Genişleyen iletim sisteminin eşdeğer empedansı azalmakta ve bu durum sistemde oluşabilecek arızaların kısa devre akım miktarlarını artırmaktadır. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde özellikle 154 kV gerilim seviyesinde görülen aşırı kısa devre akımları, can ve mal güvenliğini korumak için mutlaka sınırlandırılmalıdır. Sistem operatörleri, aşırı kısa devre akımlarını devre kesicilerin akım kesme kapasitesine indirebilmek için transformatör merkezlerinde iki ana bara arasında bulunan kuplaj kesicileri, merkezde bulunan fiderleri uygun baralara dağıttıktan sonra servis harici ederek veya sitemde bulunan bazı enerji iletim hatlarını devreden çıkararak, sistem eşdeğer empedansını artırmaktadır. Kısa devre akımlarını sınırlandırmak için yapılan bu işlem, iletim sisteminin topolojisini değiştirdiği için N-1 güvenliğini önemli miktarda etkilemektedir. Enerji sisteminde bara bölme işleminin yapılabileceği birçok transformatör merkezi bulunduğu için problemin çözüm uzayı 10^{10} ile 10^{30} arasında değişmektedir ve sistem operatörleri bu boyuttaki bir çözüm uzayında hem kısa devre akımlarını sınırlandıracak hem de N-1 güvenliğini sağlayacak topolojiyi elde etmek amacıyla sıklıkla statik analizler yapmaktadır. Tez çalışmamızın temel amacı, iletim sistemi operatörlerinin sistem güvenliğini sağlamak amacıyla aldığı bara bölme kararlarına destek olacak yapay zekâ optimizasyon algoritmalarının probleme adapte edilmesi ve Türkiye Elektrik İletim Sisteminde kullanılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda problemi çözebilmek için sezgi-üstü teknikler olan Genetik Algoritma, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Bozkurt Optimizasyonu, Salp Sürüsü, Yapay Arı Kolonisi, Yerçekimsel Arama ve Kâşif Algoritmalarından yararlanılmıştır.

Tez çalışmam boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli ve saygıdeğer danışman hocam Sayın Doç. Dr. Nuran YÖRÜKEREN'e, değerli fikirleriyle çalışmamıza katkı sağlayan ve tez izleme komitesinde bulunan hocalarım Sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ ve Sayın Prof. Dr. Bora ALBOYACI'ya şükranlarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımızı yürütmeye ve uygulamaya imkân veren Kuzey Batı Anadolu Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü ailesine ve elde edilen bulguların çeşitli platformlarda paylaşılmasına olur veren TEİAŞ yönetimine şükranlarımı sunar ve teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde kuşkusuz derin emekleri olan, sevgi ve şefkatini asla esirgemeyen, eğitim söz konusu olduğunda sınırlı bütçeye rağmen elde avuçta ne varsa seferber eden annem Nurhayat DOĞAN ve babam Veysel DOĞAN'ın ellerinden öperim. Varlıklarıyla mutluluk kaynağımız olan oğullarım Talha Kutluhan ve Salih Ersagun'un fedakâr annesi, hayat yoldaşım Dr. Aybüke Betül DOĞAN'a daima gösterdiği sabır ve manevi destek için sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Ocak - 2021 Erdi DOĞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER iii
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ xii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR xx
ÖZET xxvii
ABSTRACT xxviii
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Nedenleri 4
1.2. Önceki Çalışmalar 8
1.3. Tez Çalışmasının Katkıları 19
1.4. Tez Düzeni 20
2. ŞEBEKE TOPOLOJİ KONTROLÜ 22
2.1. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Kullanılan Bara Tipleri 22
2.2. Elektrik Şebekesinde Topoloji Kontrolü 25
2.2.1. Bara bölme uygulaması 28
2.2.2. İletim hattını servis harici etme uygulaması 30
2.3. Bölüm Değerlendirmesi 31
3. BARA BÖLME OPTİMİZASYONU 32
3.1. N-1 Analizini Hızlandırma Yaklaşımları 34
3.1.1. Lineer olmayan kısıt analizi 35
3.1.2. Lineer kısıt analizi 40
3.2. Performans Endeksleri 47
3.2.1. Görünür güç performans endeksi 47
3.2.2. Reaktif güç performans endeksi 51
3.2.3. Kısa devre performans endeksi 54
3.2.4. Güvenilirlik performansı 57
3.3. Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar 59
3.4. Bölüm Değerlendirmesi 63
4. SEZGİ-ÜSTÜ ALGORİTMALAR 67
4.1. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm). 70
4.2. Yerçekimsel Arama Algoritması (Gravitational Search Algorithm) 75
4.3. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) 81
4.4. Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Dinamically Controlled Particle Swarm Optimization) 85
4.5. Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm) 89
4.6. Bozkurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimizer) 97
4.7. Salp Sürüsü Algoritması (Salp Swarm Algorithm) 102
4.8. Kâşif Algoritması (Pathfinder Algorithm) 105
4.9. Bölüm Değerlendirmesi 109

5. SEZGİ-ÜSTÜ ALGORİTMALARIN BARA BÖLME OPTİMİZASYONU PROBLEMİNE UYARLANMASI 111
5.1. Transfer Fonksiyonları ve Pozisyon Güncelleme Kuralları 113
5.1.1. S-Şekilli transfer fonksiyonları 115
5.1.2. V-Şekilli transfer fonksiyonları 118
5.1.3. Pozisyon güncelleme kuralları 122
5.1.4. Önerilen ikili kâşif algoritması (Binary pathfinder algorithm) 126
5.2. Güç Sistemi Kısıtlarının Algoritmalara Adaptasyonu 129
5.2.1. Temsilci oluşturma 130
5.2.2. Kümeleme yöntemi 131
5.2.3. Başarısız transfer işlemini ayıklama ve topoloji kontrolü 134
5.3. BBO Problemi için Tasarlanan Algoritma 141
5.4. Fider Transferi için Alternatif Bir Yaklaşım: Etiketleme Yöntemi 150
5.4.1. Hedef baralara bağlı fider listesinin oluşturulması ve etiket numaralarına göre sıralanması 151
5.4.2. Etiketleme tabanlı fider transferi 154
5.5. Bölüm Değerlendirmesi 158
6. ANALİZ SONUÇLARI 161
6.1. Benchmark Fonksiyonları ve Sonuçları 162
6.1.1. Kullanılan benchmark fonksiyonları 163
6.1.2. Benchmark fonksiyonlarından elde edilen sonuçlar 165
6.2. Wilcoxon İşaretli Sıra Testi (Wilcoxon Signed-Rank Test) 191
6.3. IEEE 14-Baralı Test Sistemi ve Sonuçlar 194
6.3.1. İkili kâşif algoritmasıyla IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 199
6.3.2. İkili salp sürüsü algoritmasıyla IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 215
6.3.3. İkili bozkurt optimizasyonu kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 223
6.3.4. İkili yerçekimsel arama algoritması kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 230
6.3.5. İkili yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 237
6.3.6. İkili dinamik kontrollü parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 244
6.3.7. İkili parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 251
6.3.8. Genetik algoritmayla IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 258
6.3.9. Uygulanan sezgi-üstü algoritmaların IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde gösterdiği performansların karşılaştırılması 260
6.4. IEEE 57-Baralı Test Sistemi ve Sonuçlar 265
6.4.1. İkili kâşif algoritmasıyla IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 268
6.4.2. İkili parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasıyla IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 270

6.4.3. Genetik algoritmayla IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları 272
6.4.4. IEEE 57-baralı test sisteminde uygulanan sezgi-üstü algoritmaların karşılaştırılması 274
6.5. Önerilen İKA Algoritmasıyla IEEE 118-Baralı Test Sisteminde BBO Probleminin Çözümü 278
6.6. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Örnek Olay Analizleri 280
6.6.1. Bursa bölgesinde bara bölme optimizasyonu 282
6.6.2. İstanbul Anadolu Yakası bölgesinde bara bölme optimizasyonu 288
6.7. Bölüm Değerlendirmesi 298
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 300
KAYNAKLAR 306
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 319
ÖZGEÇMİŞ 320

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Tek bara ve tek bara-transfer tek hat şeması 23
Şekil 2.2 Kare bara tek hat şeması 23
Şekil 2.3 İki ana bara ve transfer bara ile kuplaj+transfer fider düzeni 24
Şekil 2.4 İki ana bara ve transfer bara tek hat şeması 24
Şekil 2.5 İki ana bara tek hat şeması 25
Şekil 2.6 Tez kapsamında oluşturulan 23 baralı test sistemi 26
Şekil 2.7 TM-2 ve TM-6'da bara düzenlemesi ile temel durum güç akışı 29
Şekil 2.8 TM-3 ve TM-7 arasındaki EİH servis harici iken temel durum güç akışı 30
Şekil 3.1 Bara bölme metoduyla iletim hattını pasifleştirme 32
Şekil 3.2 Baralara bağlı fiderlerin ikili yapısı 33
Şekil 3.3 N-1 analizi kapsamına alınan irtibat ve uzak bağlantı hatları 35
Şekil 3.4 N-1 analizi hızlandırma adımları 37
Şekil 3.5 Dağılım faktörleri kullanılarak oluşturulmuş kısıt analizi Python kodu 46
Şekil 3.6 Yüklenme miktarına göre kademeli cezalandırma 48
Şekil 3.7 Aktif ve reaktif yüklenme payları a) P-V eğrisi b) Q-V eğrisi 52
Şekil 3.8 Arıza sonrası P-V grafiği 52
Şekil 3.9 Dengesiz bir fazörün simetrili bileşenler formatında ifadesi 56
Şekil 4.1 Popülasyon, kromozom ve gen 70
Şekil 4.2 Tek nokta çaprazlama tekniği 71
Şekil 4.3 Mutasyon işlemi 72
Şekil 4.4 GA temel işleyiş 73
Şekil 4.5 GA için sözde-kod 74
Şekil 4.6 YAA'nın sözde kodu 79
Şekil 4.7 YAA'da bir kütleyi etkileyen kuvvetler 80
Şekil 4.8 Bir parçacığın pozisyon güncellemesi a) Atalet küçük b) Atalet büyük 83
Şekil 4.9 PSO sözde-kodu 84
Şekil 4.10 DKPSO sözde-kodu 88
Şekil 4.11 Bal arılarının temsili davranışı 90
Şekil 4.12 YAKA sözde-kodu 95
Şekil 4.13 Kurtlar ve avın iki boyutlu gösterimde muhtemel pozisyonları 99
Şekil 4.14 BO sözde-kodu 101
Şekil 4.15 SSA sözde-kodu 104
Şekil 4.16 Kâşif Algoritmasının sözde-kodu 108
Şekil 5.1 S-Şekilli transfer fonksiyonları 116
Şekil 5.2 Sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına geçiş süreci 117
Şekil 5.3 V-Şekilli transfer fonksiyonları 119
Şekil 5.4 VTF6(x) fonksiyonunun temsili davranışı 120
Şekil 5.5 İkili Kâşif Algoritmasının sözde-kodu 128
Şekil 5.6 Algoritmalarda kullanılan temsilci düzeni 131

Şekil 5.7 Baralar arası fider transfer kümesi (0,0,1,1) 132
Şekil 5.8 EİH transferinde kimlik çakışmasını önleme örneği 135
Şekil 5.9 Bank şeklinde çalışan Otr. gösterimi 136
Şekil 5.10 Radyal bara gösterimi 137
Şekil 5.11 EİS'in birbiriyle bağlantısı olmayan bölgelere ayrılması 140
Şekil 5.12 PSS/E'den veri çekme ve düzenleme 141
Şekil 5.13 Algoritmaların ihtiyaç duyduğu bireyleri üretme ve kontrol etme 142
Şekil 5.14 Pozisyon değiştirme sınıfına atanmış görevler 143
Şekil 5.15 Uygunluk kontrolü modülünün görevleri 143
Şekil 5.16 Sezgi-üstü algoritmaların BBO çözümündeki genel işleyişi 144
Şekil 5.17 Kara kutuya girişler ve çıkış 146
Şekil 5.18 BBO problemi için oluşturulan algoritma 148
Şekil 5.19 Hedef TM'lerde bara konumu optimize edilecek ekipmanların belirlenmesi ve isim sözlüğünün oluşturulması 152
Şekil 5.20 Temsilci yapısı Python kodu 153
Şekil 5.21 Etiket numarasıyla sıra takibi 154
Şekil 5.22 BBO yapılacak bölgede fiderlerin mevcut pozisyonunu algılama 155
Şekil 5.23 Kuplaj kesici pozisyonunun belirlenmesi 156
Şekil 5.24 İletim hattı pozisyon kontrolü 157
Şekil 5.25 Fiderleri ilgili pozisyonlara taşıyan Python kodu 157
Şekil 6.1 İkilik tabandan onluk tabana geçiş 163
Şekil 6.2 Algoritmaların f1 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 169
Şekil 6.3 Algoritmaların f2 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 171
Şekil 6.4 Algoritmaların f3 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 171
Şekil 6.5 Algoritmaların f4 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 172
Şekil 6.6 Algoritmaların f5 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 172
Şekil 6.7 Algoritmaların f6 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 179
Şekil 6.8 Algoritmaların f7 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 180
Şekil 6.9 Algoritmaların f8 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 180
Şekil 6.10 Algoritmaların f9 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 181
Şekil 6.11 Algoritmaların f10 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri 181
Şekil 6.12 Algoritmaların f11, d:120 fonksiyonunda ortalama yakınsama eğrileri 188
Şekil 6.13 Algoritmaların f11, d:160 fonksiyonunda ortalama yakınsama eğrileri 189
Şekil 6.14 Algoritmaların f12, d:120 fonksiyonunda ortalama yakınsama eğrileri 190
Şekil 6.15 Algoritmaların f12, d:160 fonksiyonunda ortalama yakınsama eğrileri 190

Şekil 6.16 Değiştirilmiş IEEE 14-baralı test sistemi 195
Şekil 6.17 Farklı senaryolarda HİKA'nın ortalama yakınsama eğrileri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 209
Şekil 6.18 Farklı senaryolarla HİKA'dan elde edilen
en iyi sonuçların radar grafikleri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 210
Şekil 6.19 Farklı senaryolarda NİKA'nın ortalama yakınsama eğrileri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 211
Şekil 6.20 Farklı senaryolarla NİKA'dan elde edilen
en iyi sonuçların radar grafikleri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 212
Şekil 6.21 Farklı senaryolarda İSSA'nın ortalama yakınsama eğrileri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 220
Şekil 6.22 Farklı senaryolarla İSSA'dan elde edilen
en iyi sonuçların radar grafikleri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 221
Şekil 6.23 Farklı senaryolarda İBO'nun ortalama yakınsama eğrileri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 228
Şekil 6.24 Farklı senaryolarla İBO'dan elde edilen
en iyi sonuçların radar grafikleri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1

c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 229
Şekil 6.25 Farklı senaryolarda İYAA'nın ortalama yakınsama eğrileri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 235
Şekil 6.26 Farklı senaryolarla İYAA'dan elde edilen
en iyi sonuçların radar grafikleri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2, k) VTF4(x) ve PGK-2 236
Şekil 6.27 Farklı senaryolarda İYAKA'nın ortalama yakınsama eğrileri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 242
Şekil 6.28 Farklı senaryolarla İYAKA'dan elde edilen
en iyi sonuçların radar grafikleri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1
e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2 243
Şekil 6.29 Farklı senaryolarda İDKPSO'nun ortalama yakınsama eğrileri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF4(x) ve PGK-1
e) VTF6(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF4(x) ve PGK-2 k) VTF6(x) ve PGK-2 248
Şekil 6.30 Farklı senaryolarla İDKPSO'dan elde edilen
en iyi sonuçların radar grafikleri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF4(x) ve PGK-1
e) VTF6(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF4(x) ve PGK-2 k) VTF6(x) ve PGK-2 249
Şekil 6.31 Farklı senaryolarda İPSO'nun ortalama yakınsama eğrileri
a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1
c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF4(x) ve PGK-1
e) VTF6(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2
g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2
j) VTF4(x) ve PGK-2 k) VTF6(x) ve PGK-2 255

Şekil 6.32 Farklı senaryolarla İPSO'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafikleri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF4(x) ve PGK-1 e) VTF6(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF4(x) ve PGK-2 k) VTF6(x) ve PGK-2 256
Şekil 6.33 GA'nın IEEE 14-baralı test sistemindeki ortalama yakınsama eğrisi....259
Şekil 6.34 IEEE 14-baralı test sisteminde GA'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafiği 259
Şekil 6.35 Sezgi-üstü algoritmaların IEEE 14-baralı test sisteminde gösterdiği performansların karşılaştırılması....261
Şekil 6.36 IEEE 14-baralı test sisteminde GA'dan elde edilen en iyi bara düzeni 263
Şekil 6.37 IEEE 14-baralı test sisteminde İKA'dan elde edilen en iyi bara düzeni....264
Şekil 6.38 IEEE 14-baralı test sisteminde İYAKA'dan elde edilen en iyi bara düzeni 264
Şekil 6.39 IEEE 57-baralı test sisteminde yapılan değişiklikler a) Kanawha TM b) Clinch-R TM c) Saltvill TM 266
Şekil 6.40 İKA'nın IEEE 57-baralı test sistemindeki ortalama yakınsama eğrileri a) NİKA-VTF2(x)-PGK-1, b) HİKA-VTF4(x)-PGK2....269
Şekil 6.41 İKA ile IEEE 57-baralı test sisteminden elde edilen sonuçların radar grafikleri a) NİKA- VTF2(x)-PGK-1, b) HİKA- VTF4(x)-PGK2....270
Şekil 6.42 İPSO'nun IEEE 57-baralı test sistemindeki ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x)-PGK-1, b) VTF2(x)-PGK-2 271
Şekil 6.43 İPSO ile IEEE 57-baralı test sisteminden elde edilen sonuçların radar grafikleri a) STF3(x)-PGK-1, b) VTF2(x)-PGK2 272
Şekil 6.44 GA'nın IEEE 57-baralı test sistemindeki ortalama yakınsama eğrisi....273
Şekil 6.45 IEEE 57-baralı test sisteminde GA'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafiği 273
Şekil 6.46 Sezgi-üstü algoritmaların IEEE 57-baralı test sisteminde gösterdiği performansların karşılaştırılması....275
Şekil 6.47 IEEE 57-baralı test sisteminde GA'dan elde edilen en iyi bara düzeni 276
Şekil 6.48 IEEE 57-baralı test sisteminde İKA'dan elde edilen en iyi bara düzeni....277
Şekil 6.49 IEEE 57-baralı test sisteminde İPSO'dan elde edilen en iyi bara düzeni 277
Şekil 6.50 İKA ile IEEE 118-baralı test sisteminde elde edilen bara dağılımı....279
Şekil 6.51 Bursa Bölgesinde İKA ile elde edilen optimal bara düzeni....283
Şekil 6.52 Bursa Bölgesinde İPSO ile elde edilen optimal bara düzeni 285
Şekil 6.53 Bursa Bölgesinde GA ile elde edilen optimal bara düzeni 286
Şekil 6.54 Bursa Bölgesinde sezgi-üstü yöntemler kullanılarak elde edilen bara düzenlerinde hesaplanan kısa devre akımları 287

Şekil 6.55 İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde
İKA ile elde edilen optimal bara düzeni 289
Şekil 6.56 İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde
İPSO ile elde edilen optimal bara düzeni.....291
Şekil 6.57 İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde
GA ile elde edilen optimal bara düzeni 293
Şekil 6.58 İstanbul Bölgesinde sezgi-üstü yöntemler kullanılarak
elde edilen bara düzenlerinde hesaplanan kısa devre akımları 294
Şekil 6.59 İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde GA ve lineer kısıt analizi
kullanılarak elde edilen optimal bara düzeni 297

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1 Test sisteminde kullanılan iletim hatlarının kesit ve yüklenme sınırları 26
Tablo 2.2 Test sisteminde kullanılan jeneratörlerin reaktansları....27
Tablo 2.3 Tüm kuplaj kesiciler kapalı iken yapılan N-1 analiz sonuçları....27
Tablo 2.4 Tüm kuplaj kesiciler kapalı iken yapılan kısa devre analiz sonuçları 27
Tablo 2.5 Bara bölme işleminde sonra yapılan N-1 analizi 28
Tablo 2.6 Bara bölme işleminde sonra yapılan kısa devre analiz sonuçları 29
Tablo 2.7 İletim hattı anahtarlaması yapıldıktan sonra yapılan N-1 analizi 30
Tablo 2.8 İletim hattı anahtarlaması yapıldıktan sonra hesaplanan kısa devre akımları 31
Tablo 3.1 Hat kısıt ve üretim kayma dağılım faktörleri....43
Tablo 6.1 Tek-modlu, çok-modlu ve ayrık benchmark fonksiyonları....164
Tablo 6.2 İPSO'nun f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans....165
Tablo 6.3 İDKPSO'nun f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans 166
Tablo 6.4 İYAKA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans....167
Tablo 6.5 İYAA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans 168
Tablo 6.6 GA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans 168
Tablo 6.7 İSSA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans....169
Tablo 6.8 İBO'nun f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans....170
Tablo 6.9 İKA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans 173
Tablo 6.10 İPSO'nun f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans....174
Tablo 6.11 İDKPSO'nun f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans 175
Tablo 6.12 İYAKA'nın f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans....176
Tablo 6.13 İYAA'nın f6 ve f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans 177
Tablo 6.14 GA'nın f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans....177
Tablo 6.15 İSSA'nın f6 ve f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans 178
Tablo 6.16 İBO'nun f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans....179
Tablo 6.17 İKA'nın f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans 182
Tablo 6.18 İPSO'nun f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans....183
Tablo 6.19 İDKPSO'nun f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans 184
Tablo 6.20 İYAKA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans 185
Tablo 6.21 İYAA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans 186
Tablo 6.22 GA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans 187
Tablo 6.23 İSSA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans....187
Tablo 6.24 İBO'nun f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans 188
Tablo 6.25 İKA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans 189
Tablo 6.26 Wilcoxon sıralama testine basit bir örnek 193
Tablo 6.27 Değiştirilmiş IEEE 14-baralı test sistemi EİH bilgileri....196
Tablo 6.28 Değiştirilmiş IEEE 14-baralı test sisteminde tüm kuplaj kesiciler kapalı iken hesaplanan 3-faz kısa devre arıza akımları 197
Tablo 6.29 Sezgi-üstü algoritmalarda kullanılan parametreler 198

Tablo 6.30 Hamming mesafeli KA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 200
Tablo 6.31 Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 200
Tablo 6.32 Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 200
Tablo 6.33 Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 201
Tablo 6.34 Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 201
Tablo 6.35 Hamming mesafeli KA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 202
Tablo 6.36 Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 202
Tablo 6.37 Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 202
Tablo 6.38 Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 203
Tablo 6.39 Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 203
Tablo 6.40 Normal mesafeli KA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 204
Tablo 6.41 Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 204
Tablo 6.42 Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 204
Tablo 6.43 Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 205
Tablo 6.44 Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 205
Tablo 6.45 Normal mesafeli KA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 206
Tablo 6.46 Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve

PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 206
Tablo 6.47 Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 206
Tablo 6.48 Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 207
Tablo 6.49 Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları 207
Tablo 6.50 Hamming mesafeli İKA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları 213
Tablo 6.51 HİKA'da kullanılan VTF4(x)-PGK-2 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)..... 213
Tablo 6.52 Normal mesafeli İKA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları 214
Tablo 6.53 NİKA'da kullanılan VTF2(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)..... 214
Tablo 6.54 SSA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları..... 216
Tablo 6.55 SSA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları..... 216
Tablo 6.56 SSA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları..... 216
Tablo 6.57 SSA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları..... 217
Tablo 6.58 SSA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları..... 217
Tablo 6.59 SSA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları..... 217
Tablo 6.60 SSA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları..... 218
Tablo 6.61 SSA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları..... 218
Tablo 6.62 SSA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları..... 218
Tablo 6.63 SSA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve

PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....219
Tablo 6.64 SSA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için
kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları.....222
Tablo 6.65 İSSA'da kullanılan VTF2(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve
PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları
(0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test).....222
Tablo 6.66 BO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....223
Tablo 6.67 BO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....224
Tablo 6.68 BO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....224
Tablo 6.69 BO'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....224
Tablo 6.70 BO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....225
Tablo 6.71 BO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....225
Tablo 6.72 BO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....226
Tablo 6.73 BO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....226
Tablo 6.74 BO'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....226
Tablo 6.75 BO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....227
Tablo 6.76 BO algoritmasını sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek
için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları.....227
Tablo 6.77 İBO'da kullanılan STF3(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve
PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları
(0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test).....230
Tablo 6.78 YAA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....231
Tablo 6.79 YAA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....231
Tablo 6.80 YAA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve

PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....231
Tablo 6.81 YAA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....232
Tablo 6.82 YAA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....232
Tablo 6.83 YAA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....232
Tablo 6.84 YAA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....233
Tablo 6.85 YAA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....233
Tablo 6.86 YAA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....233
Tablo 6.87 YAA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....234
Tablo 6.88 YAA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için
kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları.....234
Tablo 6.89 İYAA'da kullanılan VTF4(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve
PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları
(0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test).....237
Tablo 6.90 YAKA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan
elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....238
Tablo 6.91 YAKA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan
elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....238
Tablo 6.92 YAKA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....238
Tablo 6.93 YAKA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....239
Tablo 6.94 YAKA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....239
Tablo 6.95 YAKA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....239
Tablo 6.96 YAKA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....239

Tablo 6.97 YAKA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....240
Tablo 6.98 YAKA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....240
Tablo 6.99 YAKA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....240
Tablo 6.100 YAKA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları.....241
Tablo 6.101 İYAKA'da kullanılan VTF3(x)-PGK-2 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test).....244
Tablo 6.102 DKPSO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....244
Tablo 6.103 DKPSO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....245
Tablo 6.104 DKPSO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....245
Tablo 6.105 DKPSO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....245
Tablo 6.106 DKPSO'da kullanılan VTF6(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....246
Tablo 6.107 DKPSO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....246
Tablo 6.108 DKPSO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....246
Tablo 6.109 DKPSO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....247
Tablo 6.110 DKPSO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....247
Tablo 6.111 DKPSO'da kullanılan VTF6(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....247
Tablo 6.112 DKPSO'yu sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları.....250
Tablo 6.113 İDKPSO'da kullanılan VTF6(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test).....250

Tablo 6.114 PSO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....251
Tablo 6.115 PSO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....252
Tablo 6.116 PSO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....252
Tablo 6.117 PSO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....252
Tablo 6.118 PSO'da kullanılan VTF6(x) fonksiyonu ve
PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....253
Tablo 6.119 PSO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....253
Tablo 6.120 PSO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....253
Tablo 6.121 PSO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....253
Tablo 6.122 PSO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....254
Tablo 6.123 PSO'da kullanılan VTF6(x) fonksiyonu ve
PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....254
Tablo 6.124 PSO'yu sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için
kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları.....257
Tablo 6.125 İPSO'da kullanılan VTF2(x)-PGK-2 ile diğer fonksiyon ve
PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları
(0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test).....257
Tablo 6.126 GA ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....258
Tablo 6.127 Sezgi-üstü algoritmaların IEEE 14-baralı test sistemi
üzerinde gösterdiği performansların karşılaştırılması 262
Tablo 6.128 Sezgi-üstü algoritmaların Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları 263
Tablo 6.129 NİKA VTF2(x)-PGK-1 ile IEEE 57-baralı
test sisteminde 20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....269
Tablo 6.130 HİKA VTF4(x)-PGK-2 ile IEEE 57-baralı
test sisteminde 20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....269
Tablo 6.131 İPSO STF3(x)-PGK-1 ile IEEE 57-baralı
test sisteminde 20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....271

Tablo 6.132 İPSO VTF2(x)-PGK-2 ile IEEE 57-baralı
test sisteminde 20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....271
Tablo 6.133 GA ile IEEE 57-baralı test sisteminde
20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen
en iyi çözümlerin maliyet sonuçları.....272
Tablo 6.134 IEEE 57-baralı test sisteminde kullanılan
sezgi-üstü algoritmaların istatistiksel sonuçları 274
Tablo 6.135 NİKA'da kullanılan VTF2(x)-PGK-1 ile İPSO ve GA
yöntemlerinin Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları
(0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test).....274
Tablo 6.136 Kuplaj kesicilerin tamamı serviste iken
Bursa Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları 283
Tablo 6.137 İKA ile elde edilen bara düzeniyle
Bursa Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları 284
Tablo 6.138 İPSO ile elde edilen bara düzeniyle
Bursa Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları 285
Tablo 6.139 GA ile elde edilen bara düzeniyle
Bursa Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları 286
Tablo 6.140 Kuplaj kesicilerin tamamı serviste iken
İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları.....288
Tablo 6.141 İKA ile elde edilen bara düzeniyle
İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları.....290
Tablo 6.142 İPSO ile elde edilen bara düzeniyle
İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları.....292
Tablo 6.143 GA ile elde edilen bara düzeniyle
İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları.....295
Tablo 6.144 GA ve lineer kısıt analizi kullanılarak elde edilen bara
düzeniyle İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları.....296

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Kâşif Algoritmasında kullanılan bir salınım vektörü
$\vec{a}$	: Bozkurt Algoritmasında yinelemeler boyunca 2'den 0'a doğru lineer olarak azalan bir vektör
a_i	: Yerçekimsel Arama Algoritmasında i. kütlenin ivmesi
$a_i^d(t)$	: Yerçekimsel Arama Algoritmasında t anında d. doğrultuda i. temsilcinin ivmesi
$\overrightarrow{Ar}$	: Bozkurt arama algoritmasında [-2$\vec{a}$,2$\vec{a}$] aralığında rastgele değişen bir vektör
$\overrightarrow{Ar}$	: N-1 analizi kapsamında servis harici edilerek sistemin geri kalanına etkisi irdelenecek toplam iletim hattı, Otr. ve jeneratör sayısı
BBM	: Amaç fonksiyonunda bara bölme maliyeti
BB	: Güç sisteminde bölünebilecek bara sayısı
BC_i	: Güç sisteminde i. baranın bölünüp bölünmediğini belirten ikili kod
BBS	: Güç sisteminde izin verilen maksimum bara bölme sayısı
BN	: Yapay Arı Kolonisi Algoritmasında işçi arı sayısı
$\overline{bd_i^c}$	: Güvenilirlik performansında i. hattın veya baranın c. kısıttaki birim büyüklüğü (pu)
best(t)	: Yerçekimsel Arama Algoritmasında t anındaki en büyük kütle
C	: Sabit bir katsayı
C_1	: Parçacık Sürüsü Optimizasyonunda bilişsel bileşen katsayısı
C_2	: Parçacık Sürüsü Optimizasyonunda sosyal bileşen katsayısı
C_{1b}, C_{1p}	: Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonunda ivme katsayıları
$\vec{C}$	: Bozkurt algoritmasında (0,2) arasında rastgele değişen bir vektör
c_1	: Salp sürüsü optimizasyonu algoritmasında maksimum yineleme sayısı ve mevcut yineleme sayısı ile ilişkili olacak şekilde tasarlanmış üstel bir katsayı
D	: Yapay arı kolonisi algoritmasında optimize edilecek karar değişkeni sayısı
dn	: Performans endekslerinde kullanılan dinamik bağımlı değişken
EİHS	: N-1 analizi kapsamında servis harici edilerek sistemin geri kalanına etkisi irdelenecek toplam iletim hattı sayısı
f_i	: Wilcoxon işaret testinde iki algoritmanın i. sonuçları arasındaki fark
F_{ij}	: Yerçekimsel arama algoritmasında j. kütlenin i. kütle üzerine uyguladığı kuvvet
$F_{ij}^d(t)$	: Yerçekimsel arama algoritmasında t anında d. boyutta j. kütlenin i. kütle üzerine uyguladığı kuvvet
$fit_i(t)$	: Sezgi-üstü algoritmalarda t anında i. temsilcinin uygunluk değeri
F_j	: Salp sürüsü optimizasyonu algoritmasında j. boyuttaki besin kaynağı
G	: Yerçekimsel arama algoritmasında yerçekim sabiti

$\bar{ga}_i$: Güvenilirlik performansında i. ekipmanda belirli düzeyde bozulmalara izin verebilmek için kullanılan birim değer cinsinden güvenlik aralığı

G^{best} : Parçacık sürüsü optimizasyonunda sürüdeki tüm üyelerin o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyon

GP : Sistemin N-1 güvenliğini ve kısa devre akımlarını değerlendirerek mevcut durum hakkında sayısal olarak bilgi veren güvenilirlik performansı

G^{rms} : Dinamik kontrollü parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasında sürünün ortalama karekök tecrübesi

Iter : Mevcut yineleme sayısı

JS : N-1 analizi kapsamında servis harici edilerek sistemin geri kalanına etkisi irdelenecek toplam jeneratör sayısı

k : Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonunda dinamik bilişsel ve sosyal ivme katsayılarının oranı

kA : Kiloamper

$K_{bc,a}$: Akım takviye dağılım faktörü (current-injection distribution factor)

K_{best} : Yerçekimsel arama algoritmasında zamana bağlı bir fonksiyon

KDA_i : Güç sisteminde i. barada meydana gelen kısa devre akımı (kA)

$KDA_i^{sınır}$: Güç sisteminde i. barada bulunan kesicinin kısa devre kesme kapasitesi (kA)

k_e : Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonunda bilişsel ve sosyal bileşenin eşit olacağı noktaya göre optimize edilmiş bir katsayı

K_i : Kısa devre akımı performans endeksinde ölçeklendirme katsayısı

kV : Kilovolt

k_w : Dinamik kontrollü parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasında en büyük ve en küçük atalet ağırlıklarının oranı

L : Hat-kesinti dağılım faktörü (line-outage distribution factor)

$L_{cd,ab}$: a-b hattının servis harici olmasıyla c-d hattının ne kadar etkileneceğini belirleyen dağılım katsayısı

M : Aşırı yüklenmeler için belirlenmiş bir sınır değer

M_{aj} : Yerçekimsel arama algoritmasında j. kütlenin aktif yerçekimsel kütlesi

$maks_j$: Algoritmalarda bir bireyin j boyutu için belirlenen üst sınır

MaksIter : Toplam yineleme sayısı

min_j : Algoritmalarda bir bireyin j boyutu için belirlenen alt sınır

$M_i(t)$: Yerçekimsel arama algoritmasında t anında i. temsilcinin kütlesi

M_{ii} : Yerçekimsel arama algoritmasında i. kütlenin eylemsizlik kütlesi

mm^2 : Milimetrekare

M_{pi} : Yerçekimsel arama algoritmasında i. kütlenin pasif yerçekimsel kütlesi

MVA : Megavolt amper

MVAr : Megavar

MW : Megawatt

MWh : Megawatt saat

N : İletim sisteminde arıza durumunda gözlemlenecek olan toplam hat ve Otr. sayısı

n : Performans endekslerinde kullanılan sabit bir ölçeklendirme katsayısı

N_b : Güç sisteminde bulunan toplam bara sayısı

np_i : Yapay arı kolonisi algoritmasında i. besin kaynağının normalleştirilmiş olasılıksal performans değeri

OS : N-1 analizi kapsamında servis harici edilerek sistemin geri kalanına etkisi irdelenecek toplam ototransformatör sayısı

P_{ac,ab_kst} : a-c hattında a-b hattının servis harici olmasıyla meydana gelen aktif güç akışı (MW)

P_{ac_temel} : a-c hattının temel durum aktif güç akışını (MW)

PE_{GA} : Görünür güç performans endeksi

$PE_{GA,EİH}$: EİH güç akışı performans endeksi

$PE_{GA,Jen}$: Jeneratör güç akışı performans endeksi

$PE_{GA,Otr.}$: Otr. güç akışı performans endeksi

PE_{KD} : Kısa devre performans endeksi

PE_V : Reaktif Güç Performans Endeksi

P_i : Parçacık sürüsü optimizasyonunda i. parçacığın mevcut konumu

$P_i(t+1)$: Parçacık sürüsü optimizasyonunda i. parçacığın bir sonraki konumu

P_i^{best} : Parçacık sürüsü optimizasyonunda i. parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyon

$P_i^{önpos}$: Dinamik kontrollü parçacık sürüsü optimizasyonunda i. parçacığın bir önceki konumu

$P_{Jen.}^{i}$: Güç sisteminde i. baradaki jeneratörün aktif gücü (MW)

$P_{Jen.}^{Min.}$: Güç sisteminde i. baradaki jeneratörün minimum aktif gücü (MW)

$P_{Jen.}^{Maks.}$: Güç sisteminde i. baradaki jeneratörün maksimum aktif gücü (MW)

P_k : Kısıtların sistemde kalan diğer ekipmanlar üzerindeki aktif güç akışlarına etkisini içeren matris

P_{ksy} : İzlenen ekipmanların arıza sonrası güç akışlarını içeren matris

P_{kst_td} : Kısıt durumu incelenen ekipmanın temel durum aktif güç akışlarını içeren matris

p_{maks} : Yapay arı kolonisi algoritmasında en büyük olasılık değeri

p_{min} : Yapay arı kolonisi algoritmasında en düşük olasılık değeri

$P_{Tal.}^{i}$: Güç sisteminde i. baradaki talebin aktif gücü (MW)

R^2 : Yerçekimsel arama algoritmasında iki kütle arasındaki mesafenin karesi

$R_{ij}(t)$: Yerçekimsel arama algoritmasında t anında iki kütle arasındaki öklid mesafesi

rand(0,1) : 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı

rand(-1,1) : -1 ile 1 arasında rastgele bir sayı

$\vec{r}_1$, $\vec{r}_2$, $\vec{r}_3$: 0 ile 1 arasında rastgele değerler alan vektörler

S^+ : Wilcoxon işaret testinde birinci algoritmanın ikinci algoritmaya üstün geldiği sıralamaların toplamı

S^- : Wilcoxon işaret testinde ikinci algoritmanın birinciden daha iyi olduğu sıralamaların toplamı

S_e^a : Güç sisteminde gerçekleşen a. arıza esnasında e. ekipman üzerinden akan görünür güç miktarı (MVA)

$S_e^{sınır}$: Güç sisteminde bulunan e. ekipmanın termal güç sınırı (MVA)

s_i : Bazı baraların bölünme maliyetini diğerlerinden ayrıştırmak için kullanılan sabit bir katsayı

sıra(f_i) : Wilcoxon işaret testinde elde edilen farkın diğer tüm farklar ile karşılaştırılarak sıralanmasıyla belirlenen sıra numarası

S_{min} : VTF6(x) fonksiyonunda 0 ile 1 arasında seçilen en küçük katsayı değeri
S_{maks} : VTF6(x) fonksiyonunda 0 ile 1 arasında seçilen en büyük katsayı değeri
SN : Yapay arı kolonisi algoritmasında besin kaynağı sayısı
STF(x) : S-şekilli transfer fonksiyon
$\tanh x$: Hiperbolik tanjant fonksiyonu
u_2 : Kâşif algoritmasında -1 ile 1 arasında rastgele değerler alan bir vektör
V_i : Güç sisteminde i. baradaki gerilimin genliği (pu)
V_i^a : Güç sisteminde a. arıza esnasında i. baranın gerilimi (kV)
V_i^{nom} : Güç sisteminde i. baranın nominal gerilimi (kV)
$v_i^d(t)$: Yerçekimsel arama algoritmasında temsilcinin d. doğrultuda t anındaki hız bilgisi
$v_i^d(t+1)$: Yerçekimsel arama algoritmasında temsilcinin d. doğrultuda bir sonraki hızı
$V_i(t)$: Parçacık sürüsü optimizasyonunda t anında i. üyenin hızı
$V_i(t+1)$: Parçacık sürüsü optimizasyonunda i. üyenin bir sonraki hızı
v_{ij} : Yapay arı kolonisi algoritmasında besin kaynağı i. pozisyonda olan arının j. boyuttaki aday pozisyonu
V_j : Güç sisteminde j. baradaki gerilimin genliği (pu)
VTF(x) : V-şekilli transfer fonksiyon
Y_{ij} : Güç sisteminde bulunan i-j hattının admitansı (S)
Z : Empedans (ohm)
θ_{ij} : Güç sisteminde bulunan i-j hattının empedans açısı (rad.)
$Q_{Jen.}^i$: Güç sisteminde i. baradaki jeneratörün reaktif gücü (MVar)
$Q_{Tal.}^i$: Güç sisteminde i. baradaki talebin reaktif gücü (MVar)
$Q_{Jen.}^{Min.}$: Güç sisteminde i. baradaki jeneratörün minimum reaktif gücü (MVar)
$Q_{Jen.}^{Maks.}$: Güç sisteminde i. baradaki jeneratörün maksimum reaktif gücü (MVar)
w : Parçacık sürüsü optimizasyonunda mevcut yinelemede kullanılacak olan atalet katsayısı
W_e : Dinamik kontrollü parçacık sürüsü optimizasyonunda değiştirilmiş atalet ağırlığı
$W_{eö}$: Performans endekslerinde bazı önemli iletim hatlarının veya Otr.lerin önem derecesini belirtebilmek için kullanılan bir pozitif katsayı
worst(t) : Yerçekimsel arama algoritmasında t anındaki en küçük kütle
w_{max} : Parçacık sürüsü optimizasyonunda en yüksek atalet katsayısı
w_{min} : Parçacık sürüsü optimizasyonunda en küçük atalet katsayısı
W_p : Güç sisteminde bir barayı bölmenin maliyeti
W_{vi} : Güç sisteminde bazı önemli baralar için belirlenebilecek sabit bir katsayı
X : Reaktans (ohm)
$\vec{X}$: Bozkurt arama algoritmasında gri kurdun pozisyonu
$\vec{X}(t+1)$: Bozkurt arama algoritmasında kurt sürüsünde bulunan herhangi bir gri kurdun bir sonraki pozisyon vektörü
x_i^d : Yerçekimsel arama algoritmasında i. kütlenin d. boyuttaki pozisyonu
$x_i^d(t)$: Yerçekimsel arama algoritmasında t anında i. kütlenin d. boyuttaki pozisyonu
$x_i^d(t+1)$: Yerçekimsel arama algoritmasında temsilcinin d. doğrultuda bir sonraki pozisyonu
x_{ij} : Yapay arı kolonisi algoritmasında besin kaynağı i. pozisyonda olan

arının j. boyuttaki mevcut pozisyonu

x_i^K : Kâşif algoritmasında i. üyenin K. yinelemedeki pozisyonunu

x_i^{K+1} : Kâşif algoritmasında i. üyenin bir sonraki pozisyonu

$x_j^d(t)$: Yerçekimsel arama algoritmasında t anında j. kütlenin d. boyuttaki pozisyonu

x_j^1 : Salp sürüsü optimizasyonu algoritmasında j. boyuttaki ilk salp, yani lider salp, pozisyonu

x_j^i : Salp sürüsü optimizasyonu algoritmasında i. takipçi salpin j. boyuttaki pozisyonu

x_j^{i-1} : Salp sürüsü optimizasyonu algoritmasında i. takipçinin ardından gelen salpin j. boyuttaki pozisyonu

x_j^K : Kâşif algoritmasında j. üyenin pozisyonu

$\vec{X}_p$: Bozkurt arama algoritmasında avın konumu

x_p^K : Kâşif algoritmasında kâşif üyenin (liderin) mevcut pozisyonu

x_p^{K+1} : Kâşif algoritmasında kâşifin sonraki pozisyonu

$\vec{X}_\alpha$: Bozkurt arama algoritmasında α kurdunun pozisyon vektörü

$\vec{X}_\beta$: Bozkurt arama algoritmasında β kurdunun pozisyon vektörü

$\vec{X}_\delta$: Bozkurt arama algoritmasında δ kurdunun pozisyon vektörü

δ_i : Güç sisteminde i. baradaki gerilimin açısı (rad.)

δ_j : Güç sisteminde j. baradaki gerilimin açısı (rad.)

α : Kâşif algoritmasında komşularla gerçekleşen etkileşimin seviyesini belirleyen katsayı

β : Kâşif algoritmasında liderin sürüyü kendine doğru çekme seviyesini etkileyen katsayı

ε : Kâşif algoritmasında titreşim vektörü

εr : Yerçekimsel arama algoritmasında çok küçük ve sabit bir sayı

μ_1, μ_2 : Dinamik kontrollü parçacık sürüsü optimizasyonunda üstel daraltma fonksiyonunda kullanılan katsayılar

η : Dinamik kontrollü parçacık sürüsü optimizasyonunda mevcut yinelemeyle maksimum yinelemenin oranı olan ve yineleme sayısı yükseldikçe artan bir değişken

ζ_1, ζ_2 : Dinamik kontrollü parçacık sürüsü optimizasyonunda üstel daraltma fonksiyonları

$\Delta V^{sınır}$: Güç sisteminde gerilim bozulması için izin verilen güvenli aralık (pu)

Kısaltmalar

A	:	Amper
AA	:	Alternatif Akım
AAOGA	:	Alternatif Akım Optimal Güç Akışı
BAYTİM	:	Batı Anadolu Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü
BBO	:	Bara Bölme Optimizasyonu
BM	:	Bölge Müdürlüğü
BO	:	Bozkurt Optimizasyonu
BYTİM	:	Bölge Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü

DAOGA	:	Doğru Akım Optimal Güç Akışı
DAYTİM	:	Doğu Anadolu Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü
DFR	:	Düşük Frekans Rölesi
Diğ.	:	Diğerleri
DKPSO	:	Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
DTR	:	Dinamik Termal Oran
EAAİS	:	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi
EİS	:	Enerji İletim Sistemi
EİH	:	Enerji İletim Hattı
FKT	:	Faz Kaydırıcı Transformatör
GA	:	Genetik Algoritma
GDAYTİM	:	Güney Doğu Anadolu Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü
GGPE	:	Görünür Güç Performans Endeksi
GKÜP	:	Güvenlik Kısıtlı Üretim Planlaması
HİKA	:	Hamming mesafeli İkili Kâşif Algoritması
IEEE	:	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
İBO	:	İkili Bozkurt Optimizasyonu
İDKPSO	:	İkili Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
İKA	:	İkili Kâşif Algoritması
İPSO	:	İkili Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
İSO	:	İletim Sistemi Operatörü
İSSA	:	İkili Salp Sürüsü Algoritması
İYAA	:	İkili Yerçekimsel Arama Algoritması
İYAKA	:	İkili Yapay Arı Kolonisi Algoritması
KA	:	Kâşif Algoritması
KBAYTİM	:	Kuzeybatı Anadolu Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü
KDA	:	Kısa Devre Akımı
KEY	:	Karakteristik Empedans Yüklenmesi
KDPE	:	Kısa Devre Performansı Endeksi
KİT	:	Kamu İktisadi Teşebbüsü
KTLP	:	Karışık Tamsayılı Lineer Programlama
MYTİM	:	Milli Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü
NİKA	:	Normal mesafeli İkili Kâşif Algoritması
OİA	:	Optimal İletim Anahtarlaması
OTDF	:	Outage Transfer Distribution Factor (Kesinti dağılım katsayısı)
Otr.	:	Ototransformatör
PGK	:	Pozisyon Güncelleme Kuralı
PSO	:	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
PSS/E	:	Power System Simulator for Engineering (Mühendislik için Güç Sistemi Simülatörü)
Pu	:	Per unit (Birim değer)
RGPE	:	Reaktif Güç Performans Endeksi
SCADA	:	Supervisory Control and Data Acquisition (Merkezi Denetim ve Veri Toplama)
SEH	:	Sıfır Empedans Hattı
SSA	:	Salp Sürüsü Algoritması
SZ	:	Sürü Zekâsı
ŞTO	:	Şebeke Topoloji Optimizasyonu

TEİAŞ	:	Türkiye Elektrik İletim AŞ
TF	:	Transfer Fonksiyonu
TM	:	Transformatör Merkezi
Tr.	:	Transformatör
YAA	:	Yerçekimsel Arama Algoritması
YAKA	:	Yapay Arı Kolonisi Algoritması
YTBS	:	Yük Tevzi Bilgi Sistemi
YTİM	:	Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü

BARA BÖLME METODUNU KULLANARAK ŞEBEKE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Enerji iletim altyapısının genişlemeye devam etmesi, meydana gelebilecek kısa devre akımlarını (KDA) yükseltmektedir. Bu nedenle İletim Sistemi Operatörleri (İSO), güç sisteminde çeşitli topolojik değişiklikler yaparak KDA'yı sınırlandırmaktadır. Enerji sisteminde fosil yakıtların azaltılması için sisteme entegre edilen yenilenebilir enerji kaynakları nedeniyle oluşan üretim belirsizlikleri ile büyük ölçekli sanayi kuruluşlarının darbeli yükleri sonucunda oluşan tüketim belirsizliklerine ek olarak KDA'yı kısıtlamak için yapılan topolojik düzenlemeler, N-1 güvenliğinde bozulmalara neden olmaktadır. İSO'ların sıklıkla karşılaştığı bu zorlayıcı problemi çözmek ve operatöre ihtiyaç duyduğu güvenli bara dağılımını sunabilmek amacıyla sekiz farklı yapay zekâ optimizasyon algoritması ilk defa böyle bir problemde kullanılmıştır. Bu kapsamda, sürekli çözüm uzayına sahip (continuous search space) problemler için önerilmiş olan Kâşif Algoritması, sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına (discrete search space) geçişi sağlanarak geliştirilmiş ve İkili Kâşif Algoritması (İKA) olarak önerilmiştir. İKA'nın performansını değerlendirebilmek için çeşitli benchmark fonksiyonları, sekiz farklı algoritmayla çözülmüş ve karşılaştırılmıştır. Güç sisteminde statik güvenliğin değerlendirildiği N-1 analizini hızlandıracak çeşitli yaklaşımlar sunulmuştur. Kısıt analizini sadece enerji iletim hatlarının aşırı yüklenmesi açısından değil aynı zamanda gerilim bozulmaları bakımından da değerlendiren güvenilirlik performansı yöntemi önerilmiştir. Yazılım altyapısı Python programlama diliyle kurulmuş olup, güç akışı ve kısa devre akım hesapları PSS/E programından çekilmiştir. Sezgi-üstü yöntemler için önerilen senaryoları parametrik ve parametrik olmayan istatistiksel göstergelerle karşılaştırabilmek için IEEE 14, 57 ve 118-baralı test sistemleri üzerinde çeşitli analizler yapılmıştır. Başarılı olduğu istatistiksel veriler ışığında kanıtlanan yöntemler, Türkiye Elektrik İletim Sistemi İstanbul Anadolu Yakası ve Bursa Bölgelerinde kullanılmış ve sistem güvenliğini tesis edebilen sonuçlar elde edilmiştir. Benzetim ortamında sezgi-üstü yöntemlerden elde edilen başarılı sonuçların İstanbul Anadolu Yakası ve Bursa bölgelerinde uygulanmasıyla birlikte önerilen algoritmaların çıktılarına göre gerçek sistem işletimi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bara Bölme Optimizasyonu, Enerji İletim Sistemi İşletmesi, Kısıt Analizi, Sezgi-üstü, Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları.

NETWORK TOPOLOGY OPTIMIZATION BY USING THE BUS SPLITTING TECHNIQUE

ABSTRACT

The transmission system expansion increases the short circuit currents (SCC) to be occurred. Therefore, Transmission System Operators (TSO) restrict the SCC by making various topological changes. The energy production uncertainties happening due to renewable energy sources, which are put in the energy system in order to reduce fossil fuels, and the uncertainties of the energy consumption occurring because of variable loads caused by the heavy industry and the topological changes to be implemented to reduce the SCC can lead to the failure of the N-1 security. Eight different meta-heuristic techniques were employed for the first time in the bus splitting optimization problem in a bid to solve this challenging problem frequently encountered by the TSO and with a view of presenting the reliable bus layout needed by the operator. Moreover, the Pathfinder Algorithm, which is proposed to solve the continuous problems, was improved by providing the transition from the continuous search space to the discrete search space and this concept was proposed as the Binary Pathfinder Algorithm (BPFA). Several benchmark functions were solved and compared with eight different algorithms in order to evaluate the performance of the BPFA. Various approaches were presented to reduce the solution time of the N-1 security analysis. The reliability performance technique, which evaluates the contingency analysis not only in terms of the overloading of the transmission lines but also in voltage violation, was proposed. The Python programming language was utilized to process algorithms, and the power flow and the short circuit current calculations were implemented with the Python interface of the PSS/E program. To compare the scenarios proposed for the meta-heuristic methods with parametric and non-parametric statistical indicators, different runs were performed on the IEEE 14, 57 and 118-bus test systems. The methods statistically proven their effectiveness in terms of solving bus splitting optimization problem were utilized on the Istanbul Anatolian Side and Bursa areas of the Turkish Electricity Transmission System and ultimately the results to provide the system security were obtained. Consequently, the operation of the real system was implemented according to the outputs of the proposed algorithms.

Keywords: Bus Splitting Optimization, Energy Transmission System Operation, Contingency Analysis, Meta-heuristic, Artificial Intelligence Optimization Algorithms.

GİRİŞ

Enerji, insanoğlunun vazgeçemeyeceği temel bir ihtiyaçtır. Bu ihtiyacı karşılamak için üretilen enerjiyi tüketim bölgelerine aktarma işlevini, Enerji İletim Sistemi (EİS) yerine getirir. İletim sisteminin üretim ve tüketim birimleri arasında köprü görevi görmesi ve düzenleyici rol üstlenmesi sebebiyle kontrolü son derece önemlidir. Enerjinin sürdürülebilir ve güvenilir olması, sosyal refahın yükselmesini etkileyecek bir faktördür. Dolayısıyla artan enerji talebini kesintisiz ve kaliteli bir sistemle karşılayabilmek amacıyla iletim altyapısı sürekli olarak genişletilmektedir. Büyüyen iletim sistemini kontrol etmek, daha karmaşık bir yapıya bürünmesi nedeniyle giderek zorlaşmaktadır.

Güç sistemini işletmekle sorumlu olan İletim Sistemi Operatörleri (İSO); frekans dengesini gözetmeli, gerilim seviyelerini ve kısa devre akımlarını (KDA) kabul edilebilir seviyelerde işletmeli, iletim hatlarının termal kapasitesi üzerinde yüklenmesini engellemeli ve arz güvenliğini bozacak durumlara karşı önlem almalıdırlar. İSO, iletim sisteminde bulunan ekipmanları sistem durumuna göre düzenlemeli ve beklenen kriterleri sağlamalıdır. Dolayısıyla arz-talep dengesi, iletim hatlarının, ototransformatörlerin (Otr.) ve transformatörlerin (Tr.) yüklenme durumları, gerilim kontrolü ve KDA'nın seviyesi, İSO'ların iletim sistemini güvenilir ve kaliteli şekilde işletebilmek için kontrol etmesi gereken önemli parametrelerdir.

Eklenen yeni Enerji İletim Hattı (EİH) ve Otr.ler ile birlikte giderek karmaşık bir yapıya bürünen EİS'i işletmek zorlaşmaktadır. Basit bir sistemde, bir EİH'nin servis harici olması halinde sistemin geri kalanında oluşacak etkiyi görebilmek kolaydır; karmaşık bir sistemde ise hangi arızanın nasıl bir sonuç doğuracağını öngörmek zordur. İSO'lar senelerce sistem işleterek kazandığı işletme tecrübesini etkin şekilde kullanarak ve çeşitli güç sistemi analiz programlarıyla statik ve dinamik analizler yaparak, sistem güvenliğini sağlamaktadır. Bununla birlikte İSO'lar, EİS'te anlık olarak gerçekleşen güç akışlarını takip ederek gerekli önlemleri alabilmek için sistemin önemli bir bölümüne entegre edilen SCADA (Supervisory Control and Data

Acquisition) sistemine sahiptir. İSO'lar gün öncesi, orta ve uzun dönem planlamaları için çeşitli analiz programlarından faydalanırken, anlık sistem takibi için SCADA'yı kullanmaktadır. Gerek iletim genişleme planlamasında gerek günlük işletmede, sistem arz güvenliğini tesis etmek için uygulanabilecek ihtimal sayısı, manuel olarak bakılamayacak kadar fazladır. Bu nedenle, İSO'ların bu zorlu problemi çözerken kararlarına destek olacak bilimsel yaklaşımların geliştirilmesi gereklidir.

Optimizasyon problemleri; mevcut değişkenleri kullanarak ve bazen de çeşitli kısıtlara dikkat ederek, en uygun sonucu bulmaya çalıştığımız karmaşık sorunlardır. Optimizasyon problemlerini çözebilmek amacıyla lineer ya da lineer olmayan matematiksel programlama teknikleri kullanılmaktadır [1]. Yöneylem araştırması, optimizasyon problemlerinden deterministik sonuçlar elde etmek için çeşitli matematiksel optimizasyon yaklaşımlarının incelendiği bir araştırma alanıdır. Deterministik matematiksel yaklaşımlar net sonuçlar vermesine rağmen son dönemde araştırmacılar, stokastik (tesadüfi) süreçleri bulunan sezgisel ve sezgi-üstü[1] algoritmalara yoğunlaşmışlardır.

Sezgisel algoritmalar, problemler için özel geliştirilmiş yöntemlerdir; sezgi-üstü algoritmalar ise çeşitli problemleri çözebilecek yeteneğe sahiptir. Sezgi-üstü algoritmalar, son 25 yıldır çeşitli mühendislik alanlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır [2]. En çok bilinen sezgi-üstü algoritmalar, Genetik Algoritma [3] ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu [4] yöntemleri olsa da araştırmacılar bu alanda çok farklı teknikler önermişlerdir. Uygulama basitliği, türevsiz işleyiş, esneklik ve yerel optimalden kaçınma, sezgi-üstü algoritmaların araştırmacılar tarafından tercih edilmesine sebep olan başlıca etmenlerdir [2].

[1] Sezgi-üstü (meta-heuristic) algoritmalar, yapay zeka optimizasyon algoritmaları olarak da ifade edilmektedir.

1. GENEL BİLGİLER

Türkiye'de enerji sistemini işletmekten sorumlu yetkili, bir Kamu İktisadi Teşebbüsü (KİT) olan Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketidir (TEİAŞ). TEİAŞ bünyesinde bulunan 22 Bölge Müdürlüğü (BM), iletim sisteminin arıza, bakım, onarım ve tesis faaliyetlerini yürütmektedir. Enerji sisteminin yönetimi ise Yük Tevzi İşletme Müdürlükleri (YTİM) bünyesinde gerçekleştirilir. Türkiye'de enerji sistemini işletebilmek için 10 adet YTİM kurulmuştur. Milli YTİM (MYTİM), çatı sistem olarak adlandırılan 400 kV gerilim seviyesiyle ilgili işletme unsurlarını genel bir bakış açısıyla kontrol ederken; diğer 9 adet Bölge YTİM (BYTİM) kendi bölgesine ait 400 ve 154 kV gerilim seviyesindeki iletim alt yapısını işletmekle sorumludur. Enterkonnekte şebekede iletim sisteminin tamamı birbiriyle irtibatlı bulunsa bile her bölgenin 154 kV gerilim seviyesinde benzersiz özellikleri bulunmaktadır. Örneğin, geçmişte Doğu Anadolu YTİM'de (DAYTİM) gece saatlerinde aşırı gerilim problemi görülmüşken, Güney Doğu Anadolu YTİM (GDAYTİM) bölgesinde asenkron sulama motorlarından kaynaklanan düşük gerilim problemleri yaşanmıştır. Benzer şekilde, Batı Anadolu YTİM (BAYTİM) bölgesinde rüzgâr üretim potansiyelinin çok yüksek olması nedeniyle üretim belirsizliği yaşanırken, Kuzey Batı Anadolu YTİM (KBAYTİM) sınırları içerisinde bulunan bazı bölgelerde demir-çelik fabrikalarından kaynaklanan tüketim belirsizliği yaşanabilmektedir. Bu sebeple, her BYTİM'de bulunan İSO'lar, hem yaşanan genel problemlere çözüm yolu ararken hem de kendi bölgesine ait özel sorunları aşmak için çabalamaktadır.

TEİAŞ'ın paylaştığı lisanslı üretim sistem verilerine göre; 2019 yılında yaşanan en yüksek tüketim miktarı 26 Ağustos günü saat 16:30'da 45,324 MW olarak gerçekleşmiştir. İthalat ve ihracat dahil olmak üzere maksimum üretim miktarı ise 1 Ağustos günü saat 17:00'da 45,346 MWh olarak açıklanmıştır. Enerji sistemimizde bulunan santrallerin kurulu gücü 2020 Temmuz ayı itibariyle 92,097 MW iken enerjinin dağıtım birimlerine iletimi için 747 adet Trafo Merkezi (TM) ve yaklaşık 70,034 km uzunluğunda EİH tesis edilmiştir. Yenilenebilir dağıtık enerji kaynakları dağıtım seviyesinden bağlanarak iletim sisteminin yükünü hafifletse bile geleneksel

üretim kaynaklarının önemi ve miktarı hala ciddiyetini korumaktadır. Türkiye'de özellikle Nükleer Enerji Kaynaklarının da enerji portföyüne katılacağı düşünülürse geleneksel üretim tesislerinin önemini koruduğu kolaylıkla anlaşılabilir. Ayrıca, hidroelektrik ve rüzgâr santralleri gibi yenilenebilir enerji kaynakları, yüksek miktarda üretim kapasitesine sahip olmaları nedeniyle genel olarak yüksek gerilim iletim sistemine bağlanırlar. Dolayısıyla, gelişmeye devam eden ülkemizde enerjiye olan ihtiyaç sürekli olarak artmakta ve buna paralel olarak iletim sistemimizin genişleme süreci de devam etmektedir.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Başlatılma Nedenleri

Enerji sistemini işletmekle sorumlu İSO'lar, kesinlikle uyulması gereken birçok kısıtla ve engellenmesi gereken birçok tehlikeyle mücadele etmektedir. Bir yandan enerjiye artan talebi karşılayabilmek adına genişleyen iletim sisteminin doğurduğu sorunlar, diğer yandan özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının genişlemesiyle yaşanan stokastik süreçler, iletim sisteminin yönetimini giderek zorlaştırmaktadır.

İSO'lar enerji sistemini işletirken çeşitli güvenlik kriterlerine uymalı ve sistemi gerçek zamanlı takip edebilmelidir. Temel durumda[1], BYTİM'lerin takip ettiği iki önemli konu bulunmaktadır.

Birincisi, üretim ve dağıtım birimlerini tamamıyla etkileyen gerilim kontrolüdür. Örneğin, ülkemizde gündüz saatlerinde tüketilen enerji önemli miktarda yükseldiği için güç sisteminin gerilimi düşmektedir. İSO'lar gerilim bozulmasını önceden belirlenmiş bir seviyede tutabilmek amacıyla çeşitli ekipmanlarda ayarlamalar yaparak sisteme müdahale etmektedir. Eğer iletim sisteminde gerilim düşme eğilimindeyse İSO'lar, sistemde servis harici edilmiş bir iletim hattı varsa servise alır, reaktörleri servis harici eder, şönt ve seri kapasitörleri servise alır, üretim birimlerindeki ikaz akımlarını yükseltir ve Otr.lerde kademe ayarları yapar. Gece saatlerinde ise tüketim miktarının azalması sebebiyle gerilim seviyesi yükseldiği için yapılan işlemlerin tersi uygulanır.

İkincisi, kısa devre analizi yaparak iletim sisteminde meydana gelebilecek yüksek miktardaki akımların takibidir. Bilindiği gibi, güç sisteminde oluşabilecek arızalarda,

[1] Temel durumda sözcük öbeğiyle enerji sisteminin mevcut durumu kastedilmektedir.

sorunlu bölgeyi iletim sisteminden izole edebilmek amacıyla çeşitli röle sistemleri kullanılmaktadır. Arıza gerçekleştiği zaman rölelerden enerjiyi kesme komutu alan kesicilerin bir kapasitesi bulunmaktadır. En sade şekliyle, kesici içerisinde arıza akımı kesilirken meydana gelen arkın söndürülebilmesi için meydana gelen aşırı akımın, kesici kapasitesinden yüksek olmaması gerekir. Aksi halde, arızalı bölgeyi iletim sisteminden koparması gereken kesici zarar görerek arızayı sonlandıramaz. Böyle bir durumda, enerji sisteminin koruma felsefesine göre tasarlanmış yedek koruma sistemleri devreye girerek arızayı sonlandırır ancak bu işlem gerçekleşene kadar arıza süresi uzadığı için sistemin dinamik kararlılığı da etkilenebilir. Ayrıca, arıza süresinin uzaması can ve mal kaybına da sebep olabilir. Dolayısıyla İSO'lar, iletim sisteminde kısa devre analizi yaparak KDA'nın belirlenmiş sınırların üzerine çıkmasını önlemelidir.

Güç sisteminde temel durum için gerilim kontrolü ve kısa devre analizi çok önemli bir konu olmasına rağmen EİS'te temel durumdan farklı senaryolarında mutlaka değerlendirilmesi gerekmektedir. Arz güvenliğini tehlikeye sokabilecek durumların tespit edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması, sürdürülebilir ve güvenilir enerji sistemi için oldukça önemlidir. Bu doğrultuda İSO'lar, çeşitli güç sistemi programları kullanarak N-1[1] analizi yapmak durumundadır. N-1 analizi statik ve dinamik olarak ikiye ayrılır. Statik N-1 analizinde, arızanın gerçekleşmesiyle oluşan birkaç saniyelik geçici rejim davranışıyla ilgilenilmez fakat arıza sonrasında sistemin dinamik açıdan kararlı olduğu varsayılarak, arızalı ekipmanın sistemden izole edilmesi sonucunda sistemdeki gerilim ve yüklenme durumları irdelenir. Örneğin, N-1 analizi yapan bir İSO, güç sistemi benzetim programı vasıtasıyla servis harici ettiği iletim hattının farklı iletim hatlarında aşırı yüklenmelere ve dolayısıyla zincirleme açmalara neden olduğunu tespit ettiğinde, gerekli önlemleri almasıyla birlikte enerjinin tüketiciye kesintisiz ulaştırılması yolunda çok önemli bir hamle yapmış olmaktadır.

Mevcut durumda, ülkemizde bulunan TM'lerin tamamı her saat başında fiderlerine[2] ait aktif ve reaktif güç akışları ile bara gerilimlerini Yük Tevzi Bilgi Sistemine (YTBS)

[1] N-1 kriteri, sistemde bulunan N adet ekipmandan 1 adet ekipmanın sevis harici olması halinde sistemin geri kalanında bozucu bir etkinin oluşmaması ve tüketicilerin ilgili arızadan etkilenmemesi için zorunlu tutulmuş bir güvenlik kriteridir.

[2] Bu çalışma kapsamında bir TM'de bulunan baraya bağlı EİH'nin, Tr.nun veya Otr.nun her biri fider, yani kesici ve ayırıcı ekipmanlarına sahip bir besleyici, olarak isimlendirilmektedir.

aktarmaktadırlar. YTBS bünyesinde, her saat başında girilen değerlere göre gerçek zamanlı şebeke analizleri yapılarak İSO'ların kısa devre ve kısıt durumlarını statik açıdan değerlendirmesine yardımcı olunmaktadır. Dijital ortamda iletim sistemimiz için her saat başı yapılan bu analizler gerek mevcut durumu değerlendirmede gerekse sistemin geleceğine yön vermede çok kıymetli bilgiler barındırmaktadır. İSO'lar, iletim sisteminin büyük bir bölümüne adapte edilmiş SCADA sistemiyle iletim sistemini gerçek zamanlı takip etmektedir. Ayrıca, YTBS'de gerçekleştirilen statik analizleri inceleyerek karşılaşabileceği risklerle yüzleşmektedir. Tehlikeli senaryolarla karşılaştıklarında, temel durum gerilim kontrolü örneğinde olduğu gibi çeşitli yöntemler uygulayarak sistem güvenliğini sağlamaktadır. Bunlara ek olarak, kısa dönem sistem planlaması yapabilmek amacıyla çeşitli güç sistemi analiz programları kullanarak iletim sisteminde yapılması gereken bakım-onarım çalışmaları kapsamında ihtiyaç duyulan kesintileri gerçekleştirmektedir.

Genişleyen iletim sisteminde arz güvenliği artmakta ve fakat sistem empedansı azalmaktadır. Günümüzde, özellikle İstanbul ve Bursa gibi sanayinin ve nüfusun çok yoğun olduğu büyükşehirlerde, empedansın çok düşmesi sebebiyle çok yüksek KDA hesaplanmaktadır. KDA'yı azaltmak amacıyla empedansı artıracak ekipmanlar kısa devrenin yüksek çıktığı TM'lerdeki ilgili baralara yerleştirilmektedir. Ancak bu yaklaşım, güç kayıplarını artırmakla birlikte ek yatırım maliyeti gerektirmektedir. Bununla ilgili başka bir seçenek de sistemde çok yüksek KDA'nın görüldüğü baralara daha yüksek kapasiteye sahip kesicilerin eklenmesi olabilir. Ancak bu seçenek hem işletmede problemlere yol açacak hem de ek yatırım maliyetine neden olacaktır. Mevcut durumda İSO'ların da yaptığı gibi KDA'yı sınırlandırmanın en etkili ve maliyetsiz yolu, çift baralı TM'lerde kuplaj kesiciyi açmak suretiyle bara bölme işlemidir. TM'lerde bulunan baralar birbirlerinden ayrılmadan önce uygun fider dağılımı yapılmalıdır. KDA, bara bölme yöntemiyle sistemin doğal empedans karakteristiği değiştiği için sınırlandırılabilmektedir. Fakat iletim sisteminin topolojisi değiştirildiği için yeni sistemin güvenlik kriterlerine uygunluğu derinlemesine irdelenmelidir.

İSO'lar KDA'yı sınırlandırırken manuel olarak denedikleri her bir topolojik düzen için N-1 ve kısa devre analizi yapmaktadır. Çok karmaşık olmayan bir iletim sistemi için işletme tecrübesini hesaba katarak manuel analizler ile doğru bara düzenlerinin

oluşturulması mümkündür. Ancak sistem yapısı geliştikçe uygulanabilecek bara düzeni sayısı, İSO'ların deneme yanılma yöntemiyle yapamayacakları kadar büyük rakamlara ulaşmaktadır. Güç sisteminde çözüm uzayının çok büyük olması sebebiyle KDA'yı sınırlandırırken N-1 güvenliğini sağlayacak uygun topolojinin bilimsel yaklaşımlar ile yapılması, İSO'ların karar süreçlerine yardımcı olmak açısından kıymetli bir yenilik olacaktır.

KDA hesabı ve alternatif akım (AA) güç akış eşitlikleri lineer olmayan özelliklere sahiptir. Ayrıca, problemin doğası gereği birçok yerel optimal nokta bulunmaktadır. Bu sebeplerle bara bölme optimizasyonu (BBO) problemi konveks ve lineer olmayan karmaşık bir yapıya sahiptir. Deterministik bir matematiksel yaklaşım olarak böyle bir problem için çeşitli gevşetme metotları, Lagrange teknikleri, dal-sınır algoritması ve tam sayılı programlama gibi bilimsel yaklaşımlar kullanılabilir [5]. Ancak geleneksel yöntemlerde, çözülecek problemin boyutu büyük olduğu zaman hesaplama süresi önemli miktarda arttığı için sezgi-üstü yaklaşımlara başvurmak makul bir seçenek olmaktadır [6].

Belirtilen nedenler doğrultusunda tez çalışmasının ana amacı, Türkiye Elektrik İletim Sisteminde karşılaşılan gerçek bir problemde, İSO'lara alacakları kararlarda yardımcı olabilmek amacıyla sezgi-üstü algoritmaların araştırılması ve BBO problemini çözecek şekilde kullanılmasıdır. Probleme uyarlanan sezgi-üstü tekniklerle birlikte iletim sisteminde güvenilirliğin artırılması amaçlanmıştır. Sürekli problemler için tasarlanan sezgi-üstü tekniklerin ikili versiyonlarını türetebilmek ve BBO problemi üzerindeki etkinliğini test edebilmek için çeşitli pozisyon güncelleme kuralları ve bazıları tez kapsamında önerilen transfer fonksiyonları algoritmalara adapte edilmiştir. Oluşturulan bara düzenlerinin güvenlik seviyesini sayısal olarak ifade edebilmek için güvenilirlik performansı yaklaşımı önerilmiştir. BBO probleminin çözüm süresi bakımından gün içi planlamalarda da kullanılabilir olması için sadece lineer olmayan N-1 analiziyle değil aynı zamanda lineer kısıt analiziyle de optimizasyon yapılmıştır. Tez kapsamında, sürekli problemler için önerilen Kâşif Algoritmasının ikili problemleri çözebilecek şekilde geliştirilmiş olan ayrık versiyonu İkili Kâşif Algoritması adıyla önerilmiştir. Önerilen algoritmanın hem çeşitli test fonksiyonlarından hem de BBO probleminden elde ettiği rekabetçi çözümler sunulmuştur. Kullanılan sezgi-üstü teknikler için geliştirilen çeşitli senaryolar, IEEE

14, 57 ve 118-baralı test sistemlerinde uygulanmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Test sistemlerinde başarılı olduğu gözlemlenen sezgi üstü teknikler, iletim sisteminin İstanbul Anadolu Yakası ve Bursa Bölgeleri için uygulanmış ve İSO'ların işini kolaylaştıracak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

1.2. Önceki Çalışmalar

İletim sisteminin ağ yapısını değiştirmenin iki farklı yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan ilki, tezin amacı kapsamında bahsedilen BBO yaklaşımı iken; ikincisi, Optimal İletim Anahtarlaması[1] (OİA) olarak ifade edebileceğimiz bazı iletim hatlarının servis harici edilme işlemidir. Aynı zamanda bu iki yöntemin aynı anda kullanıldığı yaklaşım, şebeke topoloji optimizasyonu (ŞTO) olarak isimlendirilebilir. İletim sisteminde sistem güvenliğini sürdürmek amacıyla ŞTO yönteminin lineer programlama yöntemleriyle kullanılması 80'li yıllardan beri araştırmacıların ilgi duyduğu bir alan olmuştur [7–10]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak ŞTO ve OİA metotları işletme maliyetini düşürmek amacıyla kullanılmıştır. Ancak bazı araştırmacılar işletme maliyetlerini düşürürken sistem güvenliğini tehlikeye atmamak adına güvenlik kısıtlarına dikkat etmiştir.

İşletme maliyetlerini düşürmek amacıyla ŞTO yönteminden faydalanan çalışmalar [11, 12]'de verilmiştir. Heiderifar ve diğ. problemin çözümünde Benders ayrıştırma yöntemini kullanmıştır. Problemin çözümünde her bir jeneratör ve yük biriminin hangi baraya bağlı olduğunu belirtecek ikili değişkenler kullanırken iletim hatları için üç farklı ikili değişken tanımlamışlardır. EİH'ye ait ikili değişkenlerden biri, hattın serviste olup olmadığını belirlemekteyken; diğer ikisi, her iki uçtaki bağlantı noktalarını temsil etmektedir. Büyük çaplı bir şebekede karar değişkeni miktarını kısıtlayabilmek için çalışma kapsamında bazı sınırlar tanımlanmıştır. TM'de kuplaj kesici açılmamış ise hangi fiderin hangi barada olduğu matematiksel olarak önemli olmayacaktır ve bu nedenle kuplaj kesicinin durumunu belirten ikili değişken sıfır ise diğer tüm teçhizatın ikili değişkenleri de sıfır olmaya ve yapılan bu sınırlamayla birlikte kuplajı kapalı TM'lerde tüm fiderler bara-1'de olmaya zorlanmıştır. Bununla birlikte, N-1 güvenliğinin sağlanması için kuplaj açıldıktan sonra her baraya en az iki

[1] Literatürde Optimal Transmission Switching olarak ifade edilen bu yöntem, iletim sisteminde bulunan iletim hatlarından uygun olan bir veya birkaç iletim hattının bazı kazanımlar elde edebilmek amacıyla kasıtlı olarak servis harici edilmesini amaçlamaktadır.

iletim hattının bağlı olması, bu şekilde bir topoloji yok ise ilgili TM'deki kuplajın açılmaması matematiksel olarak sağlanmıştır. Benders ayrıştırma yöntemi doğrultusunda ana problem kapsamında sistem işletme maliyeti minimize edilirken N-1 güvenliği alt problem kapsamında ele alınmıştır [11]. Heidarifar ve Ghasemi [11]'de problemin çözüm süresini kısaltmaya yönelik işlemlere ek olarak hassasiyet analizine dayalı kümeleme yöntemini önermişlerdir. Her TM'nin ve EİH'nin maliyet üzerindeki etkisi BBO ve OİA yöntemleriyle belirlenerek, işlem yapılacak aday TM ve EİH sayılarının düşürülmesi ve çözüm süresinin azaltılması amaçlanmıştır [12].

Genel olarak iletim sistemlerinde iletim hatlarının termal kapasiteleri mevsimlere göre önceden belirlenmiş sınırlara dayanarak belirlenmekte olup sistem işletimi hesaplanmış bu değerlere göre yapılmaktadır. Araştırmacılar tarafından incelenen Dinamik Termal Oranda (DTR) ise iletim hattının kapasitesini büyük oranda o andaki hava koşulları belirlemektedir. Geleneksel yaklaşımda, yaz aylarında hava sıcaklığının yüksek olması nedeniyle iletim hattının termal kapasitesi azaldığı için güç sistemi önceden belirlenmiş termal sınıra uyacak şekilde işletilmektedir fakat DTR yönteminde, EİH'lerin kapasitesinden en yüksek seviyede faydalanabilmek amacıyla termal kapasiteler o anda ölçülen hava şartlarına göre sürekli olarak değiştirilmektedir. Dolayısıyla DTR yöntemi herhangi bir yatırıma ihtiyaç duyulmadan iletim sisteminin transfer kapasitesini yükseltmektedir. Xiao ve diğ. DTR ve ŞTO yöntemlerinin her ikisinde de ek bir yatırıma gerek duyulmadan mevcut iletim sisteminin kapasitesinde artış yapılabilmesinden ilham alarak bu iki yöntemi birleştirme yoluna gitmişlerdir. DTR ve ŞTO yöntemlerinin birleştirilmesiyle birlikte iletim sisteminin beklenmeyen olaylara karşı daha güvenilir olduğu sonucu ortaya çıkmıştır [13].

E. Nasrolahpour ve diğ. N-1 durumunda meydana gelecek aşırı yüklenmeleri azaltabilmek için bara bölme optimizasyonu yöntemini kullanmıştır. Problem ana ve alt problem olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Ana problem kapsamında doğru akım güç akışı eşitlikleri vasıtasıyla bara bölme optimizasyonu yapılmıştır. Alt problem kapsamında ise elde edilen topolojinin AA güç akışı açısından kontrolü yapılarak sistemdeki gerilim bozulmaları ve reaktif güç dengesi irdelenmiştir. Ana ve alt problem Benders ayrıştırma yöntemiyle oluşturulmuştur [14].

Yang ve diğ. çalışmalarında işletme maliyetlerini düşürmenin yanında kısa devre akımlarını sınırlandıran ve N-1 güvenliğini sağlayan bir OİA stratejisi geliştirmişlerdir. Kısa devre ve AA güç akış eşitlikleri lineer olmayan özelliklere sahip olduğu için KDA hesabı lineerleştirilmiş ve DA güç akış eşitlikleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında KDA hesabını lineerleştirmeden kaynaklanan hata miktarını azaltabilmek amacıyla hata telafi algoritması geliştirilmiştir. Karışık tam sayılı lineer programlama (KTLP) metodunu kullanarak oluşturdukları matematiksel modeli IEEE 30-baralı, 118-baralı ve 300-baralı test sistemlerinde uygulamış ve kısa devre hesabındaki hata miktarının elektriksel uzaklık büyüdükçe azaldığını görmüşlerdir [15].

KDA'yı sınırlandırmak için kullanılan başka bir yaklaşım da Namchoat ve Hoonchareon tarafından çalışılmıştır. Problemin çözümü için yaygın şekilde kullanılan sezgi-üstü algoritmalardan olan Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) yöntemleri kullanılmıştır. Önerilen model Thailand enerji iletim sisteminde test edilmiştir. Araştırmacılar PSO yönteminin çözüme ulaşmada daha etkin olduğunu ve problemin hesaplama süresinin PSO yöntemiyle 691 saniye, GA yöntemiyle 1057 saniyede gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Global çözüme GA yöntemiyle %92 oranında, PSO yöntemiyle %88 oranında yaklaşmışlardır. Problemde AC güç akışı yöntemi kullanılmış ve dolayısıyla sistem gerilim açısından irdelenmiştir [16]. Çalışma kapsamında kısa devre akımlarının sınırlandırıldığı yeni topolojilerde kısıt analizi yapılmamıştır. Güç sisteminde topoloji değişimi yapılıyorsa sistemin arızalara karşı göstereceği direnç mutlaka analiz edilmelidir.

M. Del Castillo ve H. Song yaptıkları çalışmada kısa devre akımlarını sınırlandırmak amacıyla Tabu Arama algoritması kullanarak bara bölme metodunu kullanmıştır [17]. Bu çalışmada, bölünebilecek baralarda fider dağılımının optimal şekilde yapılması üzerine bir strateji geliştirmek yerine bara dağılımları ön tanımlı yapılmıştır. Yani, fiderlerin hangi baraya bağlanacağı yazar tarafından belirlenmiştir. Amaç fonksiyonunda ise en az sayıda bara bölme yapılacak şekilde kısa devre akımlarının sınırlandırılması hedeflenmiştir. Dolayısıyla, algoritmanın karar değişkenleri sadece baraları birbirine bağlayan kuplaj kesicilerin konumudur. Bu yönüyle çözüm uzayı oldukça küçük tutulmuş olsa bile karmaşık bir sistemde bara dağılımının manuel olarak yapılması zaten problemin çözülmesi gereken asli bölümüdür.

G. Granelli ve diğ. optimal şebeke yeniden yapılandırması[1] (optimal network reconfiguration) için karışık-tamsayılı lineer programlama yöntemiyle genetik algoritmayı birlikte kullanmıştır. Problemin amaç fonksiyonu iletim sisteminde meydana gelen mevcut aşırı yüklenmeleri ortadan kaldırmak veya hafifletmek olarak belirlenmiştir. TM'ye bağlı iletim hattının hangi baraya bağlı olduğunu belirlemek için sözde paralel hatlar oluşturulmuştur. Bir EİH için sistemde 4 adet sanal hat tanımlanmıştır. Bu sözde paralel hatlardan sadece birinin serviste olmasına izin verilerek bara dağılımının yapılması hedeflenmiştir. Sistemde meydana gelen aşırı yüklenmeler bara dağılımı yapıldıktan sonra da devam ediyorsa, algoritma en uygun iletim hattını servis harici etme sürecini işletmeye başlamaktadır [18].

P. N. Vovos ve diğ. yaptıkları çalışmada kısa devre akımlarını sınırlandıracak senaryoların her biri için optimal güç akışı çalıştırmakta ve N-1 kriteri açısından bozulma olup olmadığına bakmaktadır. Kısıtların tamamını sağlayabilirken maliyeti en düşük senaryo optimal olarak seçilmektedir. Burada kısa devre akımlarını düşürebilmek için şebeke topoloji optimizasyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Ancak, bara bölme işleminde fiderlerin bara dağılımı ön tanımlı yapılmıştır. Hangi fiderin hangi baraya bağlanacağı [17]'de olduğu gibi algoritma başlatılmadan önce yazar tarafından belirlenmiştir [19]. Bu şekilde bara dağılımının ön tanımlı yapıldığı benzer çalışmalar [20] ve [21]'de yapılmıştır. Karar değişkenleri normalde 0 ve 1 gibi ayrık tanımlanırken [20] kapsamında sürekli karar değişkenleri kullanılmıştır. Bara bölünecek aday pozisyonlara değişken reaktans yerleştirilmiş ve reaktansın miktarı yükseldikçe kısa devre akımlarındaki azalma miktarına dayalı olarak ilgili barada kuplaj bölünmesine gerek olup olmadığına karar verilmiştir. Daha sonra bara bölünecek noktalarda sürekli değerler atanan karar değişkenlerini ayrıklaştırma işlemi uygulanmıştır. [21]'de yapılan çalışmada ise kısa devre akımlarını sınırlandırmak için iki yaklaşım birlikte modellenmiştir. Bu yaklaşımlardan biri bara bölme metoduyken diğeri sisteme kısa devre sınırlandırıcı eklenmesidir. TM'lerde kuplaj kesicisinin servis harici edilmesi yöntemiyle kısa devre akımları uygun seviyelere çekilemediyse kısa devre sınırlandırıcının optimal olarak yerleştirilmesi ve reaktans değerinin belirlenmesi süreci işletilmiştir.

[1] Şebeke yeniden yapılandırması ile şebeke topoloji optimizasyonu kavramları aynı işlevi görmektedir.

OİA yaklaşımıyla güç kayıplarının azaltılması araştırma alanlarından bir tanesidir. İletim hattı servis harici edildiğinde yüksüz durum kayıpları azalırken akıma bağlı kayıplar artmaktadır. Bu nedenle ilgili iletim hattının servis harici edilmesiyle güç kayıplarının azalması arasındaki ilişki, şebekenin anlık durumuna bağlıdır. Fritz ve Haubrich güç kayıplarını azaltmak için geliştirdikleri OİA algoritmasını Almanya şebekesinde test etmişlerdir. Oluşturulan matematiksel programın her bir adımında tüm kısıtların dikkate alınması, çözüm uzayının oldukça büyümesine sebep olduğu için algoritma başlangıçta hiçbir güvenlik kısıtını dikkate almadan işleyecek şekilde tasarlanmıştır. Algoritma, kısıtlara dikkat etmeden oluşturduğu topolojilerde daha sonra N-1 ve kısa devre açısından güvenlik durumunu kontrol etmekte ve kısıtlardan herhangi birinde istenmeyen bir durumla karşılaşılmış ise sadece bu bozulmayı kapsayan güvenlik kısıtını optimizasyon algoritmasına eklemektedir. Bu iteratif süreci herhangi bir bozulma kalmayana kadar devam edecek şekilde tasarlamışlardır. Çalışmanın sonucunda hafif yüklü saatlerde uygun iletim hatları ve transformatörlerin servis harici edilmesiyle güç kayıplarının %4 ile %6 arasında azaltılabileceği belirtilmiştir [22].

Lobato ve diğ. güç sisteminde meydana gelen aşırı yüklenmeleri azaltabilmek veya tamamen ortadan kaldırabilmek için en uygun anahtarlama stratejisini belirleyen bir KTLP algoritması sunmuşlardır. Her adımda bir iletim hattını servis harici eden bir iteratif süreç formüle edilmiştir. Her yinelemede yüklenen hatlar için servis harici edilecek en uygun aday belirlenmektedir. Belirlenen adayları servis harici edecek olan lineer kısıtlar üretilmekte ve formüle edilen KTLP algoritması ile devreden çıkarılacak en uygun iletim hattı seçilmektedir. İletim sisteminde meydana gelen aşırı yüklenmelerin tamamı bitene kadar yinelemeli süreç devam etmektedir. Problemin çözümünde DA güç akış yöntemi kullanılmış ve problemin amaç fonksiyonu sistemdeki hatlarda meydana gelen aşırı yüklenmelerin maliyeti ve anahtarlanan hatların maliyeti olarak belirtilmiştir. Problemin kısıtları, lineer DA güç akışı ile formüle edilen şebeke eşitlikleri, hatların aşırı yüklenme limitleri, hattın servis harici edilmesiyle ilgili olan tam sayılı değişkenler için kurulmuş lineer eşitliklerden oluşmaktadır. Oluşturulan algoritmayı örnek uygulama olması amacıyla İspanya güç sisteminin bir bölümünde kullanmışlardır [23].

DA optimal güç akışı (DAOGA) ile ŞTO yaklaşımlarının birleştirildiği bir başka çalışma [24]'te yapılmıştır. Sistemde bulunan hatların tamamını N-1 analizine katmanın gereksiz olduğu düşünülerek algoritmanın çözüme başlamadan önce sistem güvenliği açısından riskli olan EİH'leri belirlemesi ve hafızaya alarak N-1 analizi esnasında kullanması sağlanmıştır. Problemin amaç fonksiyonu belirlenen üretimlerdeki ve şebeke topolojisindeki sapmaların minimize edilmesi şeklinde tasarlanmıştır. Problemin çözümünde dal-sınır algoritması kullanılmış ve faz kaydırıcı transformatörlerin (FKT) kademe ayarları da algoritmaya dahil edilmiştir. Oluşturulan algoritmanın büyük çaplı şebekelerdeki etkinliğini göstermek için Fransa şebekesi tercih edilmiştir.

Fisher ve diğ. OİA yaklaşımını şebekenin farklı yüklenme koşullarında kullanmış olup her durum için farklı topoloji elde etmişlerdir. Bunun anlamı bir yüklenme koşulu için elde edilen sonuçların başka bir yüklenme koşulu için optimal olmadığıdır. Dolayısıyla gerçek zamanlı sistem koşulları dikkate alınarak şebeke topolojisine karar verilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Üretim maliyetlerini minimize etmek amacıyla servis harici edilen iletim hatlarının temel durumda meydana gelen aşırı yüklenmeleri azalttığını veya tamamen ortadan kaldırdığını fakat sistemi zayıflatması sebebiyle arıza durumlarında güvenilirliğin azaldığını belirtmişlerdir [25].

Khodaei ve Shahidehpour işletme maliyetlerini ve aşırı yüklenmeleri azaltmak amacıyla güvenlik kısıtlı üretim planlaması (GKÜP) ile OİA tekniklerini birleştirmişlerdir. Problemin çözümünü kolaylaştırabilmek için Benders ayrıştırma tekniğini kullanmışlardır. Tasarlanan yöntemde ana problem GKÜP, saatlik üretim dağılımını bulurken; alt problem OİA, şebeke kısıtlarını dikkate alarak servis harici edilecek olan iletim hattını tespit etmektedir. OİA alt problemi şebekede bulunan kısıtları engelleyemiyorsa gerekli değişiklikleri ana probleme göndermektedir. Matematiksel modellemeye, iletim hattının servis harici edilebilmesi için iki bara arasındaki faz farkının belirlenen bir değerden düşük olması şartı eklenmiştir. Ayrıca problem kısıtlarında bir baraya bağlı bütün iletim hatlarının servis harici olması engellenmiştir [26]. Hedman ve diğ. yine GKÜP ve OİA tekniklerini birleştirerek çalışmışlardır fakat GKÜP formüllerini oluştururken daha önce ihmal edilmiş olan santrallerin devreden çıkma ve devreye girme süreleri ve maliyetlerini de dikkate

almışlardır. Ayrıca, tüketimde meydana gelen belirsizlikleri benzetim çalışmasına ekleyebilmek için her saat için şebekeden çekilen güç miktarını değiştirmişlerdir [27]. Barrows ve Blumsack ilgili problemin karmaşıklığını azaltabilmek adına iletim sisteminin alt bölgelere ayrılmasını ve OİA probleminin oluşturulan her bir alt bölgeye eş zamanlı uygulanmasını önermişlerdir [28].

KTLP problemlerinde genel olarak kullanılan en önemli çözüm yöntemi dal-sınır algoritmasıdır. Ancak problemi çözmek için ihtiyaç duyulan dal-sınır ağacı ve kesme düzleminin üretilmesi çok büyük depolama alanı ister ve ticari yazılımlar dahi belleklerinin yetmemesi sebebiyle hata verebilirler. Araştırmacılar tarafından OİA probleminin pratik olarak uygulanması önündeki engellerden biri olan hesaplama zamanını azaltmaya yardımcı olacak sezgisel yöntemler sunulmuştur [29, 30]. Liu ve diğ. OİA probleminde karar verilmesi gereken birçok ikili değişken bulunduğu için bu ikili değişkenlerin sayısını azaltarak optimal sonuca yakın bir verinin elde edilmesini amaçlamışlardır. Başlangıçta herhangi bir iletim hattı servis harici edilmeden mevcut durumdaki DAOGA'yı çözdürmüşler ve güç transfer dağıtım faktörleri ve hat kesintisi dağılım faktörleri gibi hassasiyet faktörleri ile her bir baraya bağlı gölge fiyatları elde etmişlerdir. Servis harici edilecek iletim hattının bulunduğu barada en az üç iletim hattının bulunmasını ada konumuna düşmenin önüne geçmek için ön şart olarak kabul etmişlerdir. Dolayısıyla bu şarta sahip olmayan tüm iletim hatlarını, servis harici edilip edilmeyeceğine dair karar verilecek iletim hattı kümesinin dışına almışlardır. Daha sonra ilk olarak belirlenen hassasiyet faktörleri ile gölge fiyatlar kullanılarak iletim hatları sıraya konulmuş ve belirlenen bir değerin altında kalan iletim hatları da kümenin dışına alınmıştır. Bu işlemlerin uygulanmasıyla birlikte KTLP probleminin çok daha az karar değişkeniyle çözülmüş olacağını vurgulamışlardır [30].

Ostrowski ve diğ. güç sisteminde iki bara arasında bulunabilecek özdeş iki hattan kaynaklanan simetrinin KTLP probleminde gereksiz hesaplamalara sebep olacağını belirterek problemin çözümüne yönelik iki farklı yaklaşım sunmuş ve karşılaştırmışlardır. Sunulan yaklaşımı IEEE 118-baralı test sisteminde uygulamış ve çözüm süresinde yaklaşık olarak %74 azalma görmüşlerdir [31].

Hedman ve diğ. N-1 güvenliğini dikkate alarak OİA ile DAOGA problemlerini birleştirmişlerdir. Önerdikleri yöntemi farklı yüklenme koşulları altında IEEE 118-

baralı test sisteminde uygulamışlar ve çalışma kapsamında akıllı öğrenme konseptini kullanmışlardır. OİA çözümleri şebekenin anlık durumuna göre değişkenlik gösterir ancak bazı iletim hatları şebekenin şartları değişse bile servis harici edilen hatlar arasında bulunur. İSO'lar bu önemli EİH'leri geçmişten gelen deneyimlerini dikkate alarak belirlerler. Araştırmacılar akıllı öğrenme sezgiselini de bu mantığa dayanarak tasarlamışlardır. Farklı durumlarda servis harici edilen özel iletim hatlarından oluşan bir alt küme oluşturarak sonraki çözümlerde kullanmışlardır [32].

Khanabadi ve diğ. N-1 kriterini dikkate alarak OİA problemi ile Alternatif Akım Optimal Güç Akışı (AAOGA) problemlerini birleştirmiş ve problemin çözümünde daha önce açıklanan çalışmalarda da sıklıkla kullanılmış olan Benders ayrıştırma yöntemini kullanmışlardır. Problemin ilk bölümünde ana problem KTLP problemi olarak oluşturulmuş ve ikinci bölüm lineer olmayan alt problem olmuştur. Ana problem, her bir ünitenin aktif güç üretimini ve sistem konfigürasyonunu belirleyecek şekilde oluşturulmuştur. EİH'lerin aktif güç akışı açısından sınırları ana problemde kontrol edilmiş fakat gerilim ve reaktif güç akışları ana problemde dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla alt problem, ana problemin AA kısıtlar açısından uygunluğunu kontrol edecek şekilde tasarlanmıştır. Alt problemde, ana problemden gelen veriler değerlendirilmekte ve gerilim ile reaktif güç açısından problem oluşturan hamleleri önceleyecek kısıtlar eklenerek ana problem tekrar çözdürülmektedir [33].

İletim hatlarının servis harici edilmesiyle değiştirilen iletim sistemi topolojisi ada sistemler oluşmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla problem tasarımında ilave güvenilirlik kısıtları eklenmelidir. Bu ilave kısıtlar zaten çözümü zor olan problemi daha fazla zorlaştırmaktadır. [34]'te yapılan çalışmada ada konumunu engelleyecek kısıtların çözüm sürecini iyileştirecek şekilde tasarlanması üzerinde durulmuştur. Önerilen algoritma grafik teorisine dayandırılmıştır. Sunulan problemde sistem sadece kendine ait baralar arasında bağlantılar bulunan alt bölümlere ayrılmış ve iki bara arasında sadece bir iletim hattı olması durumunda bu EİH'ye kesim hattı denmiştir. Oluşturulan her bir alt grupta, N bara varsa N-1 bağlantı olmalıdır kuralı uygulanmıştır.

DAOGA yöntemiyle yapılan OİA çalışmalarında özellikle şebekenin yüklü olduğu saatlerde doğru sonuçlar alınamayabilir. Aynı zamanda gerilim ve reaktif güç

problemleri göz ardı edildiği için sistem güvenilirliği risk altında olmaktadır. Sorous ve Fuller yaptıkları çalışmada [25]'te önerilen yöntemi geliştirmiş ve karşılaştırmışlardır. Buna göre AAOGA yöntemi kullanılarak OİA problemi çözülmüştür. Lagrange dual değişkenleri ve Karush-Kuhn-Tucker yöntemi kullanılarak OİA ile servis harici edilen iletim hattının maliyet kazancı üzerindeki etkisi elde edilmiş olup, IEEE 118-baralı test sisteminde uygulanan yöntemler karşılaştırılmıştır [35]. AAOGA ile OİA problemlerinin birleştirildiği farklı çalışmalar da önerilmiştir [36-38]. Yinelemeli olarak tasarladıkları sürecin ilk aşamasında aday çözümleri sağlaması için karışık tam sayılı ikinci derece konik programlama tekniği kullanan araştırmacılar; ikinci aşamada AA uygunluk kontrolü yapılacak şekilde düzenlemişlerdir [36]. Araştırmacılar bu konuda N-1 güvenlik koşullarını dikkate alarak sistem güvenliğini araştıran ardışık bir çözüm yöntemini [37] ve sezgisel yaklaşım tabanlı dinamik programlama yöntemini [38] sunmuşlardır.

Yüklenme payı sistem işletme noktasıyla gerilim çökme noktası arasında kalan sınır olarak ifade edilmektedir. İstenilen yüklenme sınırını elde edebilmek için santrallerin aktif/reaktif güç üretim miktarları değiştirilebilmektedir. Santrallere bu işlemlerin yaptırılması ise sistem işletmecisi için ek bir maliyet anlamına gelmektedir. Gerilim çökmesini engellemek amacıyla yük atma işleminin yapılması diğer bir seçenektir fakat yük atma işlemi gerilim kararlılığını korumak için yapılan en maliyetli işlemdir. [30]'da yapılan çalışmada gerilim kararlılık problemindeki yüklenme payını daha az maliyetle artırabilmek için OİA yöntemi sunulmuştur. Anahtarlama işlemi için en uygun iletim hatları değiştirilmiş ikili Parçacık Sürüsü Optimizasyonu yöntemiyle seçilmektedir. Sunulan yöntem IEEE 118-baralı test sisteminde uygulanmış ve yüklenme payı maliyetinin OİA ile azaltıldığı belirtilmiştir [39].

Henneaux ve Kirschen OİA problemine farklı bir açıdan yaklaşarak olasılıksal güvenlik penceresinden değerlendirme yapmışlardır. Sundukları yöntemi IEEE tek bölgeli ve üç bölgeli güvenilirlik test sisteminde uygulamışlardır. Öncelikle DAOGA ile gerçekleştirdikleri OİA problemini uygulamışlardır. Servis harici edilmesi durumunda mali kazanç sağlanırken N-1 güvenliğinin de sürdürüleceği iletim hatları belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen topolojiye AAOGA uygulanmıştır. Bu aşamada DAOGA ile belirlenen bazı iletim hatlarının servis harici edilmesi durumunun AA çözüm için uygun sonuç vermediği görülmüştür. Ayrıca AAOGA uygulandığında

DAOGA ile elde edilen mali kazançların her durum için aynı şekilde elde edilemediği görülmüştür. Daha sonra olasılıksal güvenlik analizi yapılmış ve olası ardışık açmalarda ve gerilim karasızlığının oluşması durumunda tüketiciye verilemeyen enerjinin maliyeti probleme dahil edilmiştir. Sonuç olarak her ne kadar N-1 güvenliği sağlanırken üretim maliyetlerinin azaltıldığı düşünülse de servis harici edilen iletim hatlarının sistemi zayıflattığı ve ardışık açmalar olması durumunda yeni maliyetlerin oluşmasına sebep olacağı belirtilmiştir [40]. Benzer şekilde Dehghanian ve Kezunovic OİA probleminin olasılıksal etkisini araştırmışlar ve OİA uygulandıktan sonra jeneratörlerin geçici durum kararlılığını da incelemişlerdir [41]. Sistem bileşenlerinde meydana gelen arızaların olasılıksal doğasını yakalamak amacıyla Monte Carlo simülasyonuyla birlikte evrimsel algoritma ile OİA problemi [42]'de araştırılmıştır.

OİA'nın enerji piyasasındaki uygulamaları ve ekonomik etkileri [43]'te ve gün öncesi planlamada kullanımı ise [44]'te çalışılmıştır. Büyük çaplı rüzgâr kurulu gücü bulunan şebekelerde iletim hattı genişleme optimizasyonu ile OİA problemi [45]'te birleştirilerek çalışılmışken; iletim sistemi genişleme planında önemli bir kısıt olarak görülen KDA'nın BBO optimizasyonuyla azaltılması da [46]'da incelenmiştir. [47]'de yapılan çalışmada bölgelere ayrılarak işletilen büyük çaplı sistemlerde OGA problemine OİA entegre edilmiştir.

Sistemde yaşanacak arızalar neticesinde üretim tüketim dengesini koruyabilmek amacıyla düşük frekans röleleri (DFR) kullanılmaktadır. Bu röleler, sistem frekansının önceden belirlenen değerler altına düşmesi halinde sistemden yük atma işlemini gerçekleştirmektedir. DFR ile atılacak yükleri azaltmak amacıyla topoloji optimizasyonu [48]'de çalışılmıştır. [49]'da topoloji kontrolünün güç sistemi dinamik gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. OİA problemi ile değişken empedanslı Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (EAAİS) cihazları arasındaki ilişki de araştırılan alanlar arasına girmiştir [50,51].

Günümüzde rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegre edilmesiyle, İSO'ların mücadele etmesi gereken belirsizlikler artmaktadır. Üretim tarafında yaşanan belirsizlikler özellikle büyük güçlü tesisler sebebiyle tüketim tarafında da yaşanabilmektedir. Araştırmacılar tarafından iletim sisteminde sıklıkla karşılaşılan bu belirsizlikler dikkate alınarak OİA problemi incelenmiştir [52-54].

T. Ding ve diğ. arıza sebebiyle oluşabilecek geniş çapta bir kesintinin önlenebilmesi için bara bölme yöntemini kullanmıştır. Sürekli hal kısıtlarını değerlendirerek bir bara bölme stratejisi uygulandıktan sonra geçici hal kararlılığının da değerlendirildiği bir strateji geliştirilmiştir. Uygulanan değerlendirme süreçleri hem sürekli hal sistem kısıtlarının hem de geçici durum kararlılık kısıtlarının tamamen sağlandığı bara bölme işlemi bulununcaya kadar yinelemeli şekilde işletilmiştir [55].

Önceki çalışmalar incelendiğinde araştırmacılar işletme maliyetini düşürmek, kısa devre akımlarını sınırlandırmak, N-1 kriterini sağlamak ve güç kayıplarını azaltmak gibi temel kavramlar için şebeke topoloji kontrolünü çalışmışlardır. Bunun dışında DFR ile atılacak yük miktarını azaltmaya yönelik çalışmalardan sistem genişleme planlarına kadar çeşitli amaçlar doğrultusunda araştırmalar yapılmıştır. Tüm bunların dışında bir grup çalışma da tamamen farklı bir amaca yönelmiştir. Bu çalışmalarda iletim sisteminde meydana gelen ciddi arızalar neticesinde çok büyük çapta kesintilerin yaşanmaması amacıyla bilinçli olarak sistemin bir bölümünü diğer bölümünden ayırmak için tasarlanan OİA yaklaşımı kullanılmıştır [56-62].

Tez çalışmamız kapsamında, literatür incelemesinden anlaşılacağı üzere, önceki çalışmalarda hiç uygulanmamış olan amaç ve yöntemlerin BBO probleminde kullanılması hedeflenmiştir. Önceki çalışmalar arasında kısa devre akımlarını sınırlandıran, N-1 güvenliğini sağlayan ve işletme maliyetini azaltan bir uygulama yapılmıştır [15] ancak bu çalışma kapsamında OİA yöntemi kullanılmıştır. Yapılan analizler neticesinde, güç sistemimizde özellikle tüketimin yüksek olduğu saatlerde sadece OİA kullanarak hem kısa devre akımlarını sınırlandırmanın hem de sistem arz güvenliğini sağlamanın uygulanabilir olmadığı görülmüştür. Bunun yanı sıra literatürde hem BBO hem de OİA yönteminin kullanıldığı çalışmalar her ne kadar N-1 güvenliğini dikkate almış olsalar bile gerilim bozulmalarını ve KDA hesabını ihmal etmişlerdir [11-13]. Bunların dışında sezgi-üstü yaklaşımlar kullanarak KDA'yı sınırlandırmak amacıyla gerçekleştirilmiş bir çalışma N-1 güvenliğini dikkate almamıştır [16]. Görüldüğü gibi tez çalışmamız edindiği amaç bakımından benzersizdir. Çalışmamızın ana amacı İSO'lara iletim sistemini işletirken alacakları kararlarda yardımcı olmaktır ve gerçek bir olay anında problemlerine çözüm bulmaktadır. Dolayısıyla, kontrol edilmesi gereken temel yaklaşımların ihmal edilmemesi gerekmektedir. Her ne kadar işletme maliyetleri de İSO'lar için çok önemli

bir konu olsa da sistem güvenliği ve direncinin çok daha önemli olmasına dayanarak çalışmamız kapsamında mali kaygılarla ilgilenilmemiştir. Bu doğrultuda BBO probleminin amaç fonksiyonu, kısa devre akımlarını sınırlandıracak, N-1 güvenliğini sağlayacak ve sistemin dinamik kararlılığını zayıflatmamak amacıyla mümkün olduğunca az bara bölecek şekilde tasarlanmıştır.

1.3. Tez Çalışmasının Katkıları

Tez çalışmamız, İSO'ların iletim sistemini işletirken her gün mücadele ettikleri sorunların bazılarını çözmede yardımcı olabilmek amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda oluşturulan amaç fonksiyonu ve kullanılan yöntemler önceki çalışmalarda irdelenmeyen özgün yaklaşımlardır.

Çok amaçlı BBO probleminin amaç fonksiyonu iki farklı yaklaşımla oluşturulmuştur: Birincisi, amaçların ağırlık katsayıları ile çarpılarak toplandığı toplama yöntemidir (aggregating method); ikincisi ana amaç dışındaki amaçların kısıta çevrilerek problemin tek amaçlı fonksiyona dönüştürüldüğü ε-kısıtlama yöntemidir (ε-constraint method). Literatürde bulunan aktif ve reaktif güç performans endeksleri iletim sisteminin performansını daha gerçekçi biçimde ifade edebilecek yönde geliştirilmiş ve amaç fonksiyonu toplama metoduna göre oluşturulan senaryolar için kısa devre performans endeksi yöntemi önerilmiştir. Güvenilirlik performansı, N-1 analizi kapsamında sistemin güvenlik seviyesini sayısal olarak ifade edebilmek amacıyla hem iletim hatlarının aşırı yüklenme durumunu hem de gerilim bozulmalarını değerlendirebilen bir matematiksel yaklaşım olarak önerilmiş ve ε-kısıtlama yönteminde kullanılmıştır.

Problemin çözümünde, deterministik tekniklerin büyük ölçekli sistemlerde bellek yetersizliği sebebiyle hata vermesi, yerel optimale yakınsama problemi olması ve çözüm süresinin sistem büyüdükçe üstel şekilde artması nedeniyle stokastik süreçleri olan sezgi-üstü teknikler tercih edilmiştir.

Çözüm süresi, sezgi-üstü algoritmaların kaliteli sonuçlar sunabilmesi için on binlerce bara düzeni oluşturarak maliyet hesabı yapması nedeniyle önemli bir problemdir. Bu sorunu gidermek amacıyla kısıt analizini hızlandıracak çeşitli yaklaşımlar sunulmuştur.

Çalışmamız kapsamında BBO problemini çözebilmek için sekiz adet sezgi-üstü algoritma denenmiştir. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm) [3], Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) [4], Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (DKPSO) (Dynamically Controlled Particle Swarm Optimization) [63], Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAKA) (Artificial Bee Colony) [64], Yerçekimsel Arama Algoritması (YAA) (Gravitational Search Algorithm) [65], Bozkurt Optimizasyonu (BO) (Grey Wolf Optimizer) [2], Salp Sürüsü Algoritması (SSA) (Salp Swarm Algorithm) [66] ve Kâşif Algoritması (KA) (Pathfinder Algorithm) [67] ilk defa böyle bir problemin çözümünde kullanılmıştır.

Sürü zekâsı mantığıyla oluşturulan sezgi-üstü algoritmalar sürekli problemleri çözmek amacıyla tasarlanmış olsalar da bazıları ikili problemlere uyacak şekilde geliştirilmiştir. Sürekli çözüm uzayından ayrık çözüm uzayına geçiş için kullanılan Pozisyon Güncelleme Kuralı (PGK) ve Transfer Fonksiyonu (TF) kombinasyonları algoritmaların performansı üzerinde büyük öneme sahiptir. Bu nedenle algoritmaların tamamında, oluşturulan on farklı PGK-TF senaryosu kullanılmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Literatürde ayrık problemlere uyarlanmamış Kâşif Algoritması, ilk defa tez çalışmamız kapsamında PGK ve TF kombinasyonları kullanılarak ikili problemlere adapte edilmiş ve İkili Kâşif Algoritması olarak önerilmiştir.

Bahsedilen sezgi-üstü algoritmalar farklı TF'ler ve PGK'lar ile birlikte IEEE 14, 57 ve IEEE 118-baralı test sistemlerinde kullanılmıştır. Başarılı sonuçlar verdiği görülen yaklaşımlar, Türkiye Elektrik İletim Sisteminin İstanbul Anadolu Yakası ve Bursa Bölgelerinde kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sezgi-üstü algoritmaların sunduğu çözümler İstanbul Anadolu Yakası ve Bursa Bölgelerinde kullanılarak, fiderlerin bara düzenleri ilk defa yapay zekâ optimizasyon algoritmalarının çıktılarıyla yapılmıştır.

1.4. Tez Düzeni

Bölüm 2'de Türkiye Elektrik İletim Sisteminde kullanılan bara tipleri genel hatlarıyla tanıtılmış, iletim sisteminde iletim hattı servis harici edilmesiyle (OİA) veya bara bölünmesiyle (BBO) elde edilen kazanımın mantığı açıklanmış ve örneklerle desteklenmiştir.

Bölüm 3'de Bara Bölme Optimizasyonu probleminin amaç fonksiyonu ve kısıtları gösterilmiş, kısa devre ve N-1 analiz sonuçlarını değerlendirebilmek için tasarlanan yöntemler sunulmuştur.

Bölüm 4'te kullanılan sezgi-üstü yöntemler ayrıntılı şekilde açıklanmış ve sözde-kodları paylaşılmıştır.

Bölüm 5'te sezgi-üstü yöntemlerde sürekli çözüm uzayından ayrık çözüm uzayına geçiş süreci ortaya konmuştur ve güç sistemi kısıtlarının algoritma sürecine nasıl adapte edildiği anlatılmıştır. Çalışmamız kapsamında önerilen İkili Kâşif Algoritması tekniği sunulmuş ve problem için tasarlanan algoritma paylaşılmıştır.

Bölüm 6'da sezgi-üstü algoritmaların çeşitli problemler üzerindeki performansını test edebilmek için kullanılan yöntemlerin tamamıyla benchmark fonksiyonları çözülmüştür. IEEE 14, 57 ve 118-baralı test sistemlerinde BBO problemini çözmek için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Başarılı olduğu istatistiksel veriler ışığında tespit edilen algoritmalar ile gerçek bir sistem üzerinde, Türkiye Elektrik İletim Sisteminin İstanbul Anadolu Yakası ve Bursa Bölgelerinde, benzetim çalışmaları yapılarak elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

Bölüm 7'de tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular değerlendirilmiş, sonuçlar yorumlanmış ve gelecek araştırmalarda ele alınabilecek konulara yer verilmiştir.

2. ŞEBEKE TOPOLOJİ KONTROLÜ

Enerji iletim sisteminde topoloji kontrolünün nasıl yapıldığını ve Türkiye'de İSO'ların bunu ne amaçla kullandığını örneklerle açıklamadan önce, Türkiye Elektrik İletim Sisteminde kullanılan bara tipleri anlatılmaktadır. Bara tipleri incelendikten sonra örnek bir test sistemi üzerinde şebeke topolojisinin nasıl değiştirildiği açıklanmıştır.

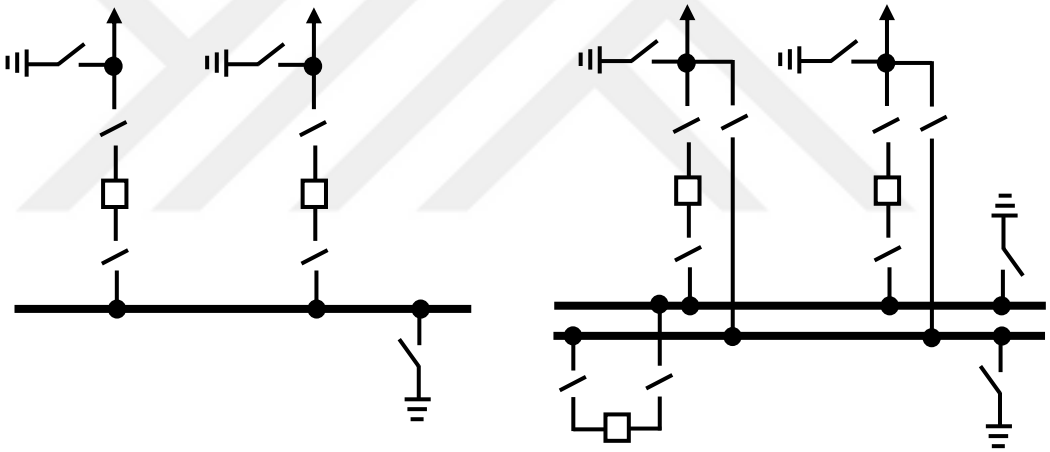
2.1. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Kullanılan Bara Tipleri

Trafo merkezlerinin bara tipleri topoloji kontrolü açısından önem arz etmektedir. Değişken empedanslı EAAİS cihazlarının bulunmadığı güç sisteminde topoloji kontrolü iki ana mantık üzerine kurulmuştur: Birincisi, çift baralı TM'lerde gerekli bara düzenini yaptıktan sonra iki bara arasında bulunan kuplaj kesicinin açılmasıdır; ikincisi, güç sisteminde bulunan iletim hatlarından uygun olanları servis harici etmektir. Dolayısıyla TM'lerin sahip olduğu bara tiplerinin yapısı topoloji kontrolü yapılırken dikkate alınması gereken bir konudur. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde tek baralıdan iki ana bara ve transfer baralı TM'lere kadar farklı türlerde tesis edilmiş merkezler bulunmaktadır ve şebekemizde kullanılan bara tipleri genel hatlarıyla aşağıda verildiği gibidir,

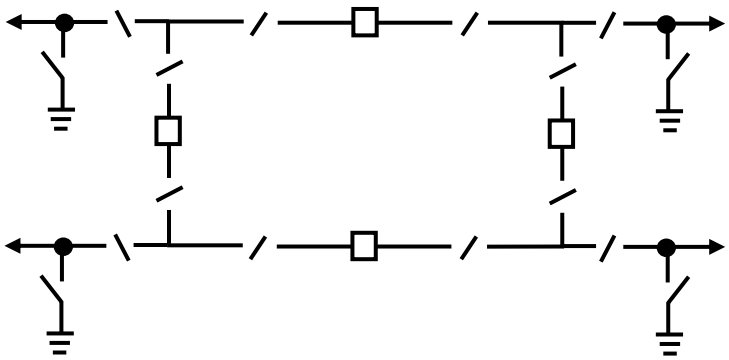
- Tek baralı
- Fiderlerinde şönt (by-pass) ayırıcı bulunan tek baralı
- Tek bara ve transfer baralı
- Kare baralı
- İki ana bara ve transfer baralı (transfer ve kuplaj fideri birleşik)
- İki ana bara ve transfer baralı
- İki ana baralı
- Parçalı iki ana baralı
- Parçalı iki ana bara ve transfer baralı
- Parçalı tek baralı
- Parçalı tek bara ve transfer baralı

Belirtilen bara tiplerinin yanı sıra belirli TM'ler için tasarlanmış istisnai uygulamalar bulunsa bile bunlar önemsenmeyecek kadar az sayıdadır. İletim sistemimizde 154 kV gerilim seviyesinde baraların %55'den fazlası tek bara ve transfer baralı yapıya sahipken, 400 kV gerilim seviyesinde TM'lerin %65'ten fazlası iki ana bara ve transfer baralı şekilde tesis edilmiştir. Topoloji kontrolü için gerekli olan iki ana baralı TM miktarı 154 kV gerilim seviyesinde %30'un üzerindedir. Güç sisteminde bulunan tek baralı TM sayısı 400 kV ve 154 kV merkezlerin %2'sinden fazla değildir ve bu sayede Türkiye Elektrik İletim Sisteminde esnek bir şekilde topoloji kontrolü yapmak uygulanabilirdir. Bara ve fider kavramlarının daha iyi anlaşılması amacıyla bahsedilen bara tiplerinin bazıları tanıtılmıştır.

Şekil 2.1'de tek bara ve tek bara-transfer yapılarının temsili tek hat şeması verilmiştir. Bu özellikteki bir TM'de bara düzeninden bahsedilemez.



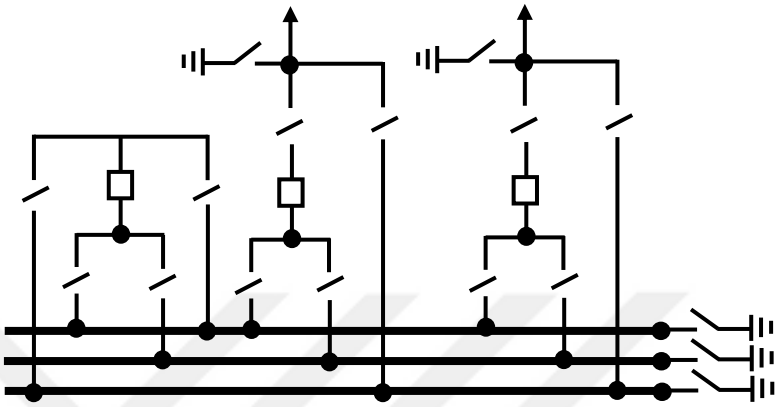
Şekil 2.1. Tek bara ve tek bara-transfer tek hat şeması



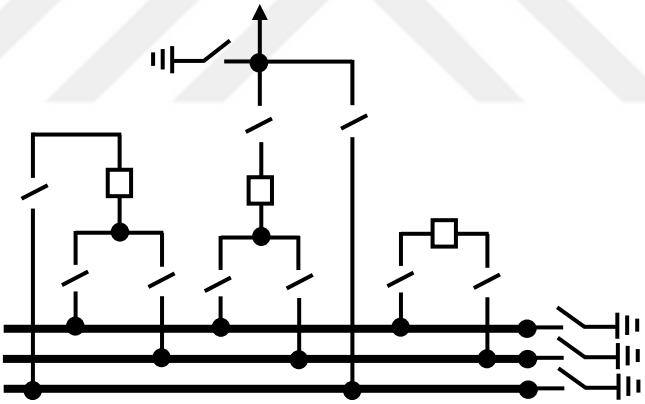
Şekil 2.2. Kare bara tek hat şeması

Türkiye Elektrik İletim Sisteminde kare bara olarak adlandırılan bara yapısı nadiren bölünebilir ancak fiderlerin dağılımı esnek bir şekilde yapılamaz. Bunun anlamı, kare-tip baralarda bölme işlemi uygulanırsa oluşan bara düzeni statiktir, değiştirilemez. Dolayısıyla bara bölme işleminin Şekil 2.2'de verilen kare-tip baralarda uygulanması uygun değildir.

.



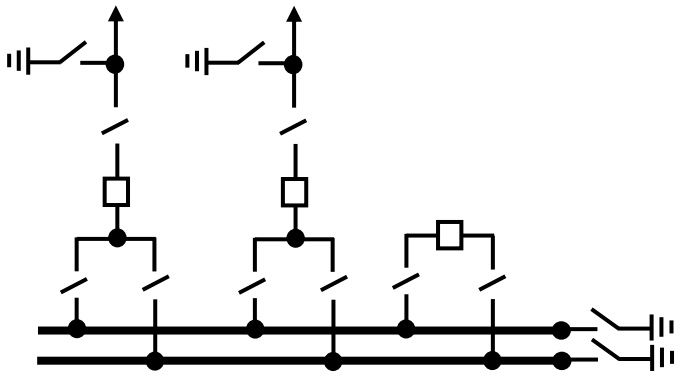
Şekil 2.3. İki ana bara ve transfer bara ile kuplaj+transfer fider düzeni



Şekil 2.4. İki ana bara ve transfer bara tek hat şeması

Şekil 2.3'te verilen çift bara+transfer bara bulunan trafo merkezlerinde transfer fideri aynı zamanda kuplaj fideri olarak da kullanılmaktadır. Bu tip TM'lerde transfere alınan bir fider bulunuyorsa kuplaj kesicinin kullanılması mümkün değildir. Bunun anlamı, eğer ilgili TM'de kuplaj kesici kapalı olarak işletiliyorken bir fiderin transfere alınması gerekiyorsa ancak tüm fiderler bir baraya toplanarak diğer bara boşaltıldıktan sonra ilgili fider transfere alınabilir. Bu tip trafo merkezlerinde bara bölme ve düzenleme açısından fiziki olarak engel teşkil eden bir durum yoktur. Ancak herhangi

bir fiderin transferde olması durumunda bara düzeninin değiştirilemeyeceği göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.5. İki ana bara tek hat şeması

İki ana bara bulunan TM'ler ile iki ana bara ve transfer bara bulunan TM'ler bara düzeni optimizasyonu açısından en uygun yapıya sahiptir. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te verilen bara yapıları şebekenin farklı noktalarına yayılmış biçimde bulunmaktadır.

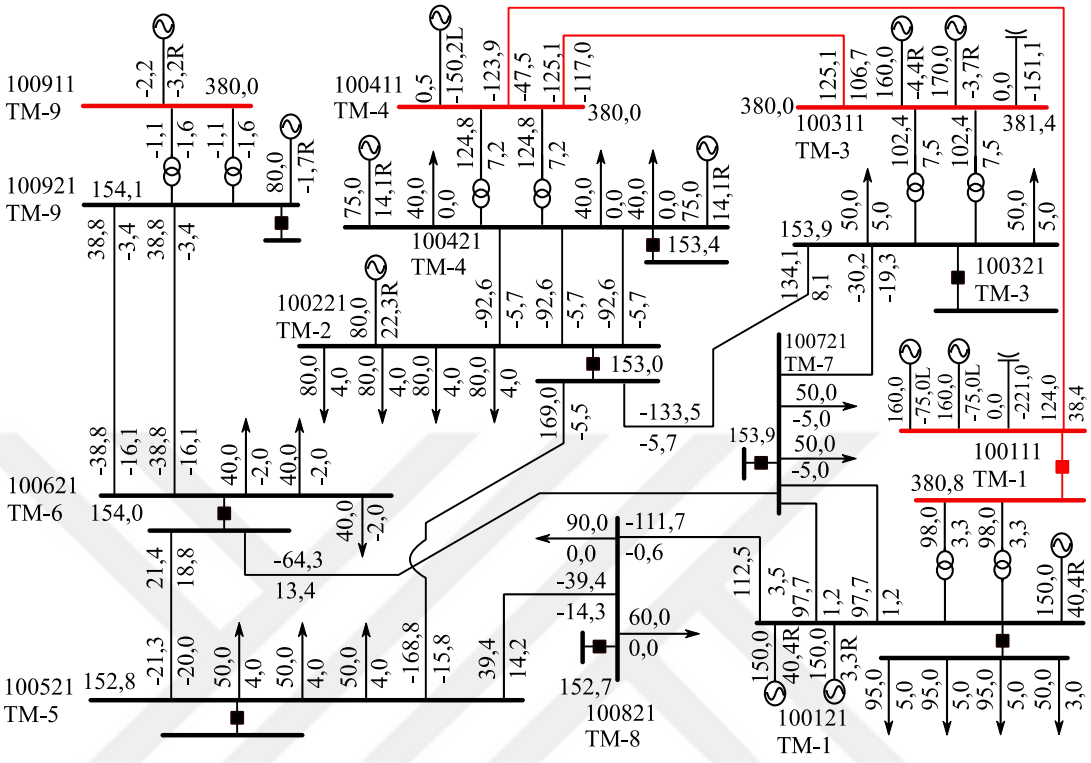
2.2. Elektrik Şebekesinde Topoloji Kontrolü

Türkiye Elektrik İletim Sisteminde şebeke topolojisi özellikle 154 kV gerilim seviyesinde kontrol edilmektedir. Topoloji kontrolü, çalışma müsaadeli işlerde[1] sistem arz güvenliğini sürdürmek amacıyla yapılabilmektedir fakat asıl kontrol amacı kısa devre akımlarını sınırlandırmaktır.

Elektrik şebekesinde topoloji kontrolünün amacını gösterebilmek için Şekil 2.6'da verilen test sistemi analiz edilmiştir. Analizler PSS/E versiyon 34 programı ile gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta tüm TM'lerde kuplaj kesiciler kapalı konumdadır. Test sisteminde 23 adet bara, 16 adet iletim hattı, 8 adet 250 MVA Otr., 13 adet jeneratör, 23 adet tüketim birimi, 2 adet şönt kapasitör bulunmaktadır. Topoloji kontrolü esnasında izole sistem oluşmasını engellemek için 100411 ve 100911 numaralı baraların her ikisi de salınım barası yapılmıştır. Tablo-2.1'de iletim hatlarının

[1] Çalışma Müsadeli İşler: İletim sisteminde arıza ve bakım-onarım çalışmaları, çalışma tarihinden en erken iki gün önce YTİM'den enerji kesintisi istenerek planlanır. YTİM, gerekli analizleri yaparak sistem şartları uygunsa ilgili çalışmaya müsaade eder, uygun değilse ileri bir tarihe erteler.

kesitleri ve yüklenme sınırları, Tablo-2.2'de jeneratör reaktansları verilmiştir. Şekil 2.6'da görüldüğü üzere temel durumda yüklenen bir ekipman yoktur.



Şekil 2.6. Tez kapsamında oluşturulan 23 baralı test sistemi

Tablo 2.1. Test sisteminde kullanılan iletim hatlarının kesit ve yüklenme sınırları

Trafo Merkezleri		Hat ID	İletken Tipi	Yüklenme Sınırı (MVA)		
				Yaz	Kış	Termik
TM-1 380,0	TM-4 380,0	1	2x954 (2B Cardinal)	1360	845	1005
TM-1 154,0	TM-7 154,0	1	1272 MCM	336	206	247
TM-1 154,0	TM-7 154,0	2	1272 MCM	336	206	247
TM-1 154,0	TM-8 154,0	1	795 MCM	250	153	182
TM-2 154,0	TM-4 154,0	1	795 MCM	250	153	182
TM-2 154,0	TM-4 154,0	2	795 MCM	250	153	182
TM-2 154,0	TM-4 154,0	3	795 MCM	250	153	182
TM-2 154,0	TM-3 154,0	1	795 MCM	250	153	182
TM-2 154,0	TM-5 154,0	1	1600 mm2 kablo	360	360	360
TM-3 380,0	TM-4 380,0	1	3x1272 (3Ph,Pheasent)	2480	1524	1825
TM-3 154,0	TM-7 154,0	1	1272 MCM	336	206	247
TM-5 154,0	TM-6 154,0	1	795 MCM	250	153	182
TM-5 154,0	TM-8 154,0	1	795 MCM	250	153	182
TM-6 154,0	TM-9 154,0	1	1600 mm2 kablo	360	360	360
TM-6 154,0	TM-9 154,0	2	1600 mm2 kablo	360	360	360
TM-6 154,0	TM-7 154,0	1	795 MCM	250	153	182

Tablo 2.2. Test sisteminde kullanılan jeneratörlerin reaktansları

Gruplar	Jeneratör Reaktansları (PU)				
	Pozitif			Negatif	Sıfır
	Subtransient	Transient	Senkron		
TM-1 (4 Grup) 13,8	0,228	0,275	2,15	0,227	0,098
TM-1 13,8	0,167	0,22	2,174	0,13	0,053
TM-2 13,8	0,167	0,22	2,174	0,13	0,053
TM-3 (2 Grup) 13,8	0,228	0,275	2,15	0,227	0,098
TM-4 (3 Grup) 13,8	0,228	0,275	2,15	0,227	0,098
TM-9 (2 Grup) 13,8	0,228	0,275	2,15	0,227	0,098

Tablo-2.3'te test sisteminde bulunan tüm kuplaj kesiciler kapalı iken gerçekleştirilen N-1 analizi neticesinde %100'ün üzerinde yüklenen iletim hatları verilmiştir. Burada yüklenme profili iletim hatlarının termik kapasitesi dikkate alınarak oluşturulmuştur. TM-2'den TM-5'e giden iletim hattının servis harici olması durumunda TM-1'den TM-8'e giden iletim hattı %115,5 yüklenmektedir. Bu yüklenme durumu her ne kadar hattın termal kapasitesinin üzerinde olsa da iletim hattının aşırı akım röleleri vasıtasıyla servis harici edilmesini gerektirmez. Dolayısıyla N-1 güvenliği açısından herhangi bir topoloji düzenlemesi yapılmasına gerek yoktur.

Tablo 2.3. Tüm kuplaj kesiciler kapalı iken yapılan N-1 analiz sonuçları

İzlenen Hat		Kısıt		Oran	Güç Akışı	%
100222 TM-2	100321 TM-3	100121	100821	182.0	192.5	105.8
100121 TM-1	100821TM-8	100222	100521	182.0	210.2	115.5

Tablo 2.4. Tüm kuplaj kesiciler kapalı iken yapılan kısa devre analiz sonuçları

Bara Adı			3-Faz (A)	Faz-Toprak (A)
100121	TM-1 – bara-1	154.00 kV	30088.0	35536.2
100221	TM-2 – bara-1		27613.6	28911.6
100321	TM-3 – bara-1		29603.5	31993.3
100721	TM-7 – bara-1		29760.0	32538.9

Tablo-2.4'te tüm kuplaj kesiciler kapalı iken yapılan kısa devre analizi ile elde edilen 28 kA'in üzerinde KDA'ya sahip baralar gösterilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere

TM-1, TM-3 ve TM-7'de kısa devre akımları 154 kV gerilim seviyesi için belirlenmiş olan 31.5 kA sınırının üzerine çıkmıştır. Dolayısıyla kısa devre akımlarını sınırlandırmak amacıyla 23 baralı güç sisteminde topoloji düzenlemesi yapılmalıdır. Ancak çözüm uzayı büyük olduğu için deneme yanılma yöntemiyle uygun sonuçlar elde edilmesi oldukça zordur. Test sistemi üzerinde bir iletim hattını servis harici ederek veya uygun bara dağılımını yaptıktan sonra iki bara arasındaki bağlantıyı keserek kısa devre akımlarını sınırlandırmak için sistem buna uygun şekilde tasarlanmıştır. KDA'yı sınırlamak için yaptığımız işlemlerin N-1 kriteri açısından da değerlendirilmesi yapılacaktır. Test sisteminde gösterilen yaklaşımlar, özellikle bara bölme yöntemi, İSO'lar tarafından iletim sistemi işletmesi esnasında her gün kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerin makul şekilde anlaşılması açısından şebeke topoloji düzenlemesi iki farklı senaryoda incelenmiş ve sonuçları verilmiştir.

2.2.1. Bara bölme uygulaması

İlk senaryoda TM'lerdeki bara düzeni değiştirilerek kısa devre akımlarının sınırlandırılması ve aynı zamanda N-1 kriterinin de sağlanması amaçlanmıştır. Bu bağlamda TM-2 ve TM-6'da uygun bir bara dağılımı yapılarak kuplaj kesiciler açılmıştır. Oluşturulan topolojinin temel durum güç akışları Şekil 2.7'de gösterilmektedir.

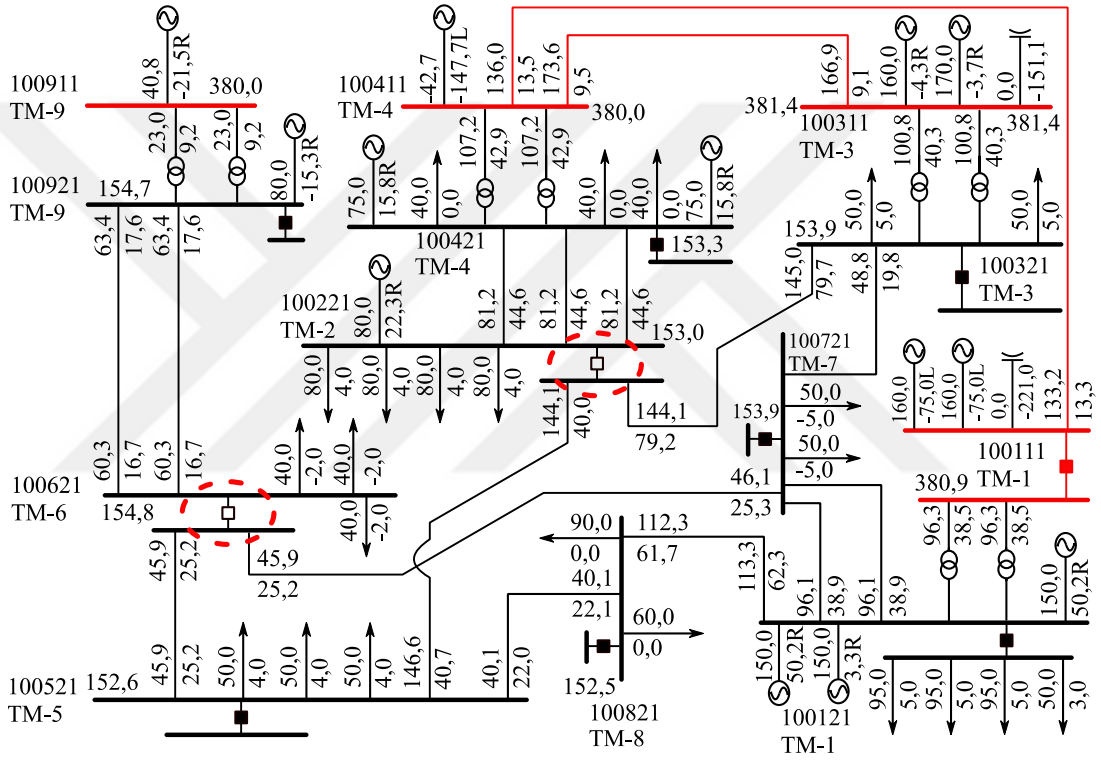
Tablo 2.5. Bara bölme işleminde sonra yapılan N-1 analizi

İzlenen Hat		Kısıt		Oran	Güç Akışı	%
100222 TM-2	100321 TM-3	100121	100821	182.0	232.2	127.6
100121 TM-1	100821 TM-8	100222	100321	182.0	212.7	116.9
100121 TM-1	100821 TM-8	100222	100521	182.0	215.2	118.2

Tablo-2.5'te TM-2 ve TM-6'da kuplaj kesiciler açık iken N-1 analizi neticesinde %100'ün üzerinde yüklenen iletim hatları verilmiştir. TM-1'den TM-8'e giden iletim hattının servis harici olması durumunda TM-2'den TM-3'e giden iletim hattı %127,6 yüklenmektedir. Mevcut durumda ilgili yüklenme iletim hattının servis harici olmasına sebebiyet vermemektedir. Ancak tehlikeli düzeyde aşırı yüklenme gözlemlendiği için arıza sonrasında gerekli düzenlemelerin yapılarak hattın yüklenme seviyesini kabul edilebilir seviyelere düşürmek gerekir.

Tablo 2.6. Bara bölme işleminde sonra yapılan kısa devre analiz sonuçları

	Bara Adı		3-Faz (A)	Faz-Toprak (A)
100121	TM-1 – bara-1		22560.7	27559.9
100221	TM-2 – bara-1		17132.4	18671.5
100222	TM-2 – bara-2	154.00 kV	13889.1	11488.5
100321	TM-3 – bara-1		21732.7	24263.7
100721	TM-7 – bara-1		21853.6	24683.4

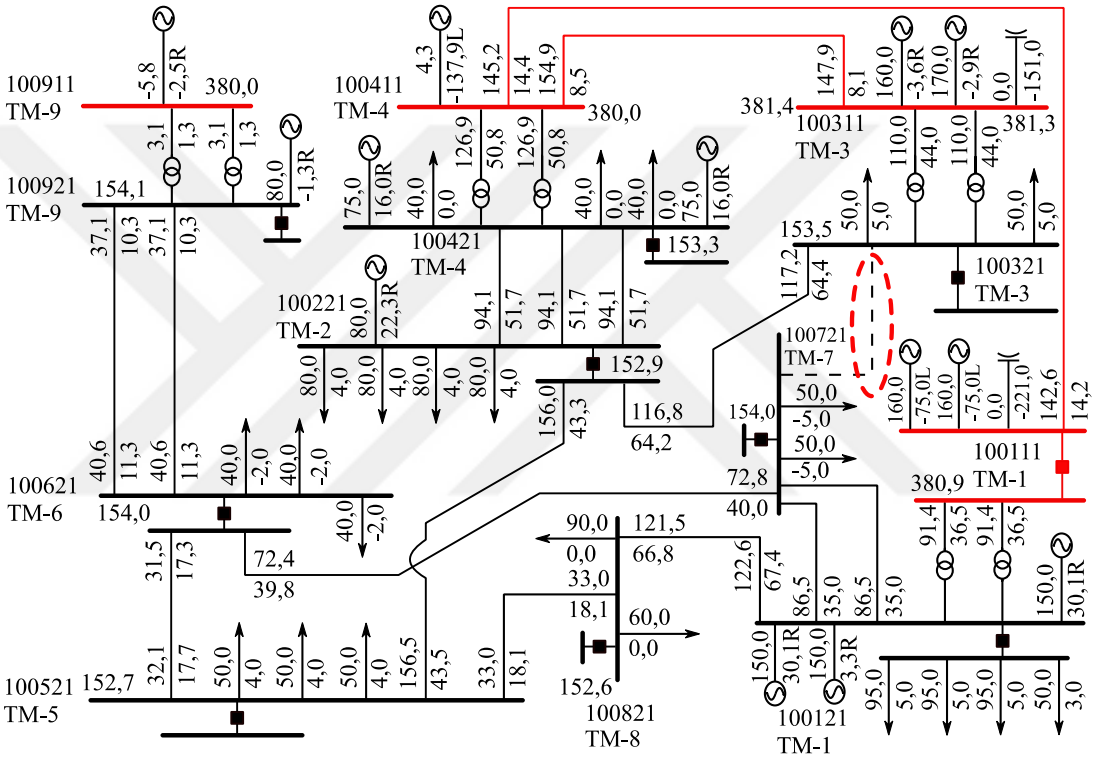


Şekil 2.7. TM-2 ve TM-6'da bara düzenlemesi ile temel durum güç akışı

Tablo-2.6'da TM-2 ve TM-6'da kuplaj kesiciler açık iken kısa devre analizi sonuçları verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere bara bölme metodu uygulandıktan sonra ilk durumda aşırı KDA hesaplanan baraların tamamı 31.5 kA'in altına çekilmiştir. Oluşturulan topolojide test sistemindeki hiçbir bara 31.5 kA sınırını geçmemektedir. Bara bölme işlemi sayesinde kısa devre akımları sınırlandırılırken N-1 güvenliği korunarak iletim sistemi güvenli bölgede işletilmiştir.

2.2.2. İletim hattını servis harici etme uygulaması

TM'lerde bara düzeni ayarlanarak kısa devre akımları sınırlandırılmıştır ancak N-1 durumunda bazı iletim hatlarının servis harici olmasa bile aşırı yüklendiği görülmüştür. Yapılan bara düzeninden daha iyi bir düzenin varlığından henüz haberdar değiliz. Deneme yanılma yöntemiyle daha iyi bir stratejinin bulunması gerekmektedir. Bu bağlamda TM-3 ile TM-7 arasındaki enerji iletim hattı servis harici edilmiştir. Şekil 2.8'de temel durum güç akışları görülmektedir.



Şekil 2.8. TM-3 ve TM-7 arasındaki EİH servis harici iken temel durum güç akışı

Tablo 2.7. İletim hattı anahtarlaması yapıldıktan sonra yapılan N-1 analizi

İzlenen Hat		Kısıt		Oran	Güç Akışı	%
100121 TM-1	100821 TM-8	100222	100521	182.0	200.4	110.1
100121 TM-1	100821 TM-8	100111	100411	182.0	196.8	108.1

Tablo-2.7'de TM-3 ve TM-7 arasındaki EİH açık iken N-1 analizi neticesinde %100'ün üzerinde yüklenen iletim hatları verilmiştir. TM-2'den TM-5'e giden iletim hattının servis harici olması durumunda TM-1'den TM-8'e giden iletim hattı %110,1 yüklenmektedir. Görüldüğü üzere bir EİH'nin servis harici edilmesi ile işletilen

sistemde yapılan N-1 analizi neticesinde gerçekleşen yüklenme durumu temel durum N-1 yüklenme durumuna göre iyileşmiştir.

Tablo 2.8. İletim hattı anahtarlaması yapıldıktan sonra hesaplanan kısa devre akımları

Bara Adı			3-Faz (A)	Faz-Toprak (A)
100121	TM-1 – bara-1	154.00 kV	25286.3	30045.7
100221	TM-2 – bara-1		26003.9	26905.1
100321	TM-3 – bara-1		18138.5	14367.8
100721	TM-7 – bara-1		23672.3	25578.8

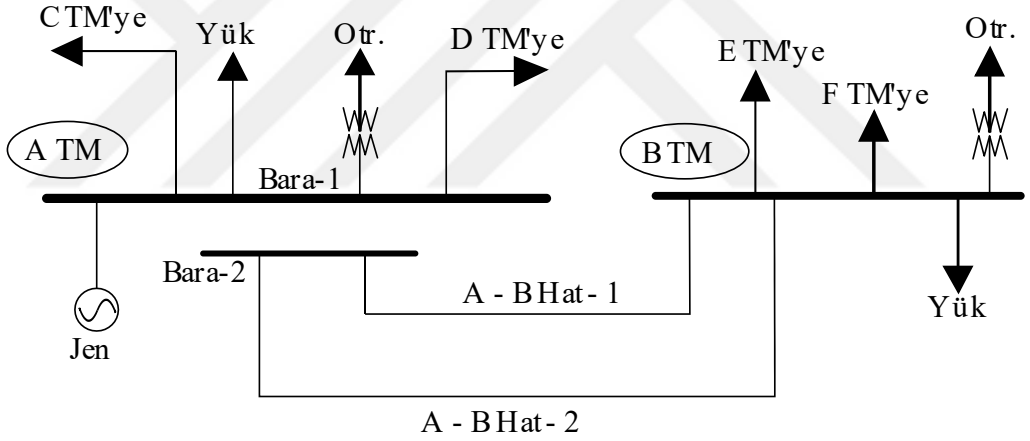
Tablo-2.8'de TM-3 ve TM-7 arasındaki EİH açık iken kısa devre analizi sonuçları verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere kısa devre akımlarının tamamı 31.5 kA'in altındadır ve böylece iletim hattı servis harici etme işlemiyle kısa devre akımları sınırlandırılırken N-1 güvenliği korunmuştur.

2.3. Bölüm Değerlendirmesi

Test sistemi üzerinde uygulanan senaryolardan anlaşıldığı üzere kısa devre akımlarını sınırlandırmak için bara bölme veya iletim hattı servis harici etme işlemi uygulanmalıdır. KDA sınırlanırken sistem topolojisi değiştirildiği için yeni oluşan sistem, güvenlik kriterleri açısından irdelenmelidir. Deneme-yanılma yöntemiyle yeni topolojiler elde edilerek sistem durumu güçlendirilebilir fakat problemin çözüm uzayı büyük olduğu için elde edilen topolojinin optimal olup olmadığı hakkında bir fikir sahibi olunamaz. Ayrıca sistem yapısının karmaşıklığı arttıkça deneme-yanılma yöntemiyle optimale yakın bir noktayı yakalamak mümkün olmadığı gibi kabul edilebilir bir çözümün dahi bulunması zorlaşacaktır. Örneğin, üzerinde çalıştığımız test sisteminde bara bölme optimizasyonu açısından on binlerce ihtimal bulunmaktadır. Bu ihtimallerin tamamını denemek mümkün değildir. Böyle basit bir test sisteminde bile çok yüksek miktarda ihtimal bulunması yapılan işlerin ne kadar zor bir optimizasyon problemi olduğunu göstermektedir. Gerçek bir iletim sisteminde, sistemi önceden belirlenmiş bölgelere ayırdıktan sonra optimizasyon işlemi bölgesel olarak uygulansa dahi milyarlarca ihtimal olduğu unutulmamalıdır.

3. BARA BÖLME OPTİMİZASYONU

Bölüm 2'de verilen test sistemi üzerinde yapılan örnek senaryolar ile bara bölme ve iletim hattı anahtarlama yöntemleri açıklanmıştır. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde 154 kV gerilim seviyesinde yapılan analizlerde optimal iletim anahtarlamasının tek başına kısa devre akımlarını sınırlandırmak için yeterli olmadığı görülmüştür. Diğer taraftan, iletim sistemimizde KDA'yı sınırlandırmak amacıyla hali hazırda bara bölme yöntemi kullanılmaktadır. Şebeke topoloji optimizasyonu konseptiyle her iki yöntemi de kullanmanın faydalı olacağı düşünülmektedir fakat bu durumda problemin çözüm uzayı daha geniş bir yapıya bürünmektedir.

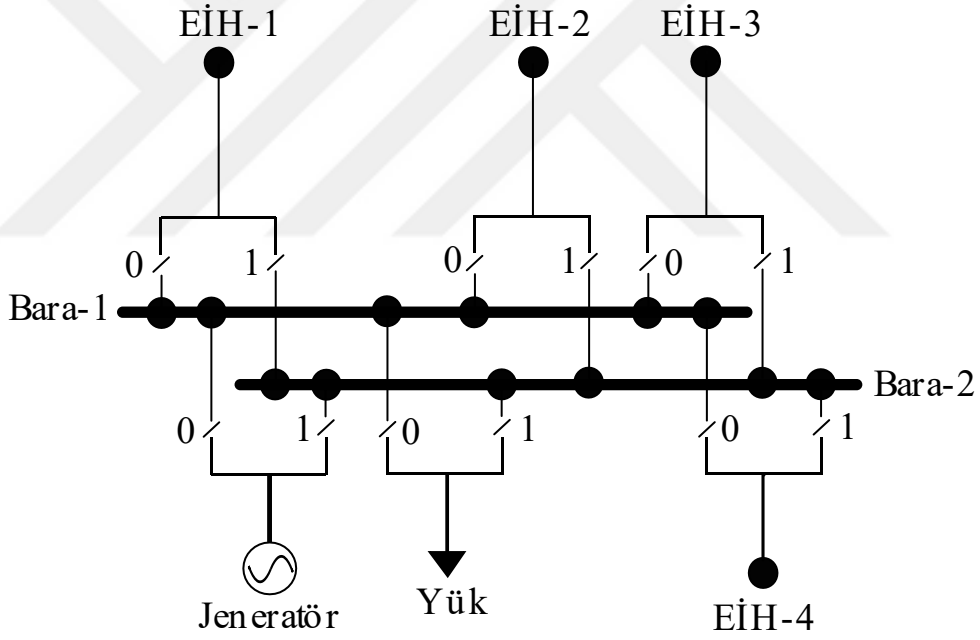


Şekil 3.1. Bara bölme metoduyla iletim hattını pasifleştirme

Yapılan analizler neticesinde BBO yöntemiyle elde edilen topolojilerden, aslında bazı iletim hatlarının servis harici gibi işletilecek şekilde bara düzenlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Şekil 3.1'de BBO yöntemi sonucunda oluşabilecek bir bara dağılımı örneklendirilmiştir. Görüldüğü üzere A-B hat-1 ve hat-2 reelde servis harici edilmemiş olsa da sadece boş bara ile irtibatlandırılması, aslında ilgili EİH'lerin servis harici edilmiş olmasıyla aynı mantıktadır. Dolayısıyla, BBO problemiyle elde edilen topolojilerin aslında sınırlı bir alanda OİA stratejisini ihtiva ettiği anlaşılmaktadır.

Sınırlı bir alan söylemiyle kastedilen şey herhangi bir iletim hattının boş baraya alınarak işletilmesi ihtimalinin sadece bara bölünebilecek TM'lerde mümkün olmasıdır. Bunun anlamı, OİA problemi iletim sisteminde bulunan hatların tümüyle anahtarlama stratejisini gerçekleştirilebilmekte iken BBO yöntemi kullanılarak elde edilen topolojilerde kısıtlı bir alandaki EİH'ler boş baraya alınarak servis hariciymiş gibi işletilebilmektedir.

Gerçek iletim sisteminde yapılan analizlerde BBO yöntemiyle elde edilen topolojilerin KDA'yı sınırlandırmak için yeterli olduğu ve aynı zamanda mevcut şebekede N-1 güvenliğinin sağlanabildiği görülmüştür. Bu sebeple, tez kapsamında problemin çözüm uzayını genişletmemek amacıyla zaten problemin çözümü için yeterli olan BBO yöntemi tek başına kullanılmak üzere seçilmiştir.



Şekil 3.2. Baralara bağlı fiderlerin ikili yapısı

BBO problemi tam sayılı programlama probleminin bir dalı olan kombinasyonel (combinatorial) ve ikili (binary) optimizasyon problemidir. Kombinasyon, bir kümenin elemanlarıyla oluşturulan gruplardır ve sıralamanın bir önemi yoktur. BBO probleminin yapısında kombinasyon vardır çünkü TM'de bulunan EİH'ler, Otr.ler ve Tr.lerden oluşturulan kümeler bara-1'e veya bara-2'ye bağlanacaktır. Problemi çözebilmek için ikili kodlardan faydalanılmaktadır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi bir

EİH'nin bara-1'e bağlı olması durumu 0 kodu ile ifade edilebilirken bara-2'ye bağlı olması durumunu 1 kodu ile temsil edebiliriz. Dolayısıyla TM'de bulunan fiderlerin hangi baraya bağlı olduğunu temsil eden (0,1) ikili kodları kullanılarak bunların kombinasyonları ile farklı topolojiler elde edilir. Elde edilen çeşitli şebeke topolojilerinin uygunluk değerleri hesaplanarak daha uygun olan topolojilerin sonraki yinelemelere aktarılması sağlanır. Yinelemeler bittiğinde o ana kadar elde edilen en iyi bara düzeni algoritmanın verdiği en uygun çözüm olmaktadır. Uygunluk değerleri hesaplanırken iki ana unsur bulunmaktadır; birincisi N-1 kısıt analizidir, ikincisi kısa devre analizidir. Özellikle N-1 analizi problemin çözüm süresini önemli miktarda yükseltmektedir ve bu nedenle çalışmamız kapsamında kısıt analizini hızlandıracak çeşitli teknikler kullanılmıştır.

3.1. N-1 Analizini Hızlandırma Yaklaşımları

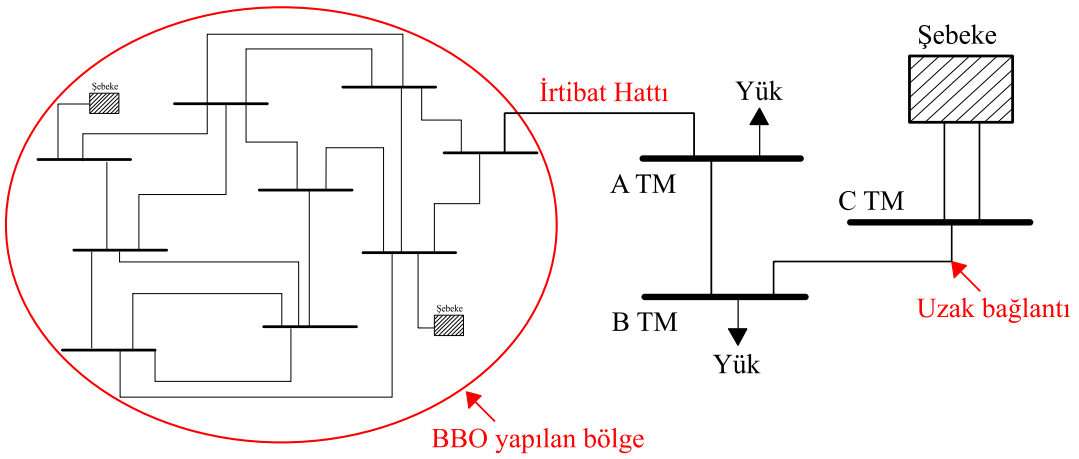
Kısıt analizi kapsamında alternatif akım ve doğru akım olmak üzere iki çeşit güç akışı eşitliği kullanmak mümkündür. AA güç akışı eşitliklerinin kullanılması halinde lineer olmayan bir çözüm uzayıyla karşılaşılmaktadır ve bu yöntemde problem doğrusal bir formata dönüştürülemediği için çözüm süreleri uzamaktadır. Çünkü lineer olmayan N-1 analizinde kısıt listesinde bulunan ekipmanlar teker teker servis harici edilerek AA güç akışı hesaplanmakta ve ilgili kısıtın sistemin geri kalanında oluşturduğu etki izlenmektedir. Bu yaklaşımın çözüm süresi yüksek olsa da oluşturulan topolojide reaktif güç akışlarının ve bara gerilimlerinin değerlendirilebilmesi için AA güç akışlarının hesaplanması gerekmektedir. Bu nedenle lineer olmayan kısıt analizi başlığı altında çözüm süresini azaltmak amacıyla kısıt listesini daraltacak ve AA güç akışlarını hızlandıracak çeşitli yaklaşımlar sunulmuştur.

Güç sisteminde yeterince reaktif güç rezervi bulunuyorsa ve bu rezerv sistemin farklı noktalarına dağılmış durumdaysa, gerilim bozulmaları ve reaktif güç akışları ihmal edilebilir. Bu ihmallerin yapıldığı DA güç akışlarının kullanılmasıyla birlikte problem doğrusal bir formata dönüşmektedir. Çünkü kısıt listesinde bulunan tüm ekipmanların sistemin geri kalanına etkisi matris işlemleriyle elde edilmektedir. Lineer kısıt analizi başlığı altında N-1 analizinin nasıl vektörize edildiği paylaşılmış ve çözüm süresi önemli miktarda düşürülmüştür.

3.1.1. Lineer olmayan kısıt analizi

İletim sisteminin N-1 güvenliğinden emin olabilmek için potansiyel önemli arızaların tamamı irdelenmelidir. Sistem durumunun mevsimlere ve hatta günlere göre değişimi problemli görünmeyen bir arızayı çok önemli hale getirebilmektedir. Bu sebeple, önceden belirlenmiş birkaç EİH'nin topoloji düzenlemesinde performans değerlendirmesi için kullanılması yeterli değildir. Topoloji değiştirilmeden önce ciddi bir arıza gibi gözükmeyen bir EİH veya Otr. arızası, topolojik değişimden sonra önemli problemlere yol açabilecek bir kısıta dönüşebilmektedir. Bu bakış açısıyla yapılacak bir N-1 analizinde iletim sisteminde bulunan tüm EİH, Otr. ve jeneratörlerin teker teker servis harici edilmesi gerekecektir.

Türkiye Elektrik İletim Sisteminde bulunan 70,000 km uzunluğundaki iletim hatlarının tamamını, İstanbul Anadolu Yakasında 154 kV gerilim seviyesinde gerçekleştirilen bir N-1 analizinde değerlendirmek çözüm süresi açısından mümkün değildir ve analizin başarısı açısından da önemli değildir. Bu nedenle, sadece birkaç iletim hattı seçilerek yapılacak bir N-1 analizi ne kadar hatalı ise sistemin tamamını kapsayarak yapılacak bir analiz de o kadar gereksiz olacaktır. Bu doğrultuda, N-1 analizi yapılırken analiz süresini kısaltacak bazı ihmal ve yaklaşımlarda bulunulmuştur.



Şekil 3.3. N-1 analizi kapsamına alınan irtibat ve uzak bağlantı hatları

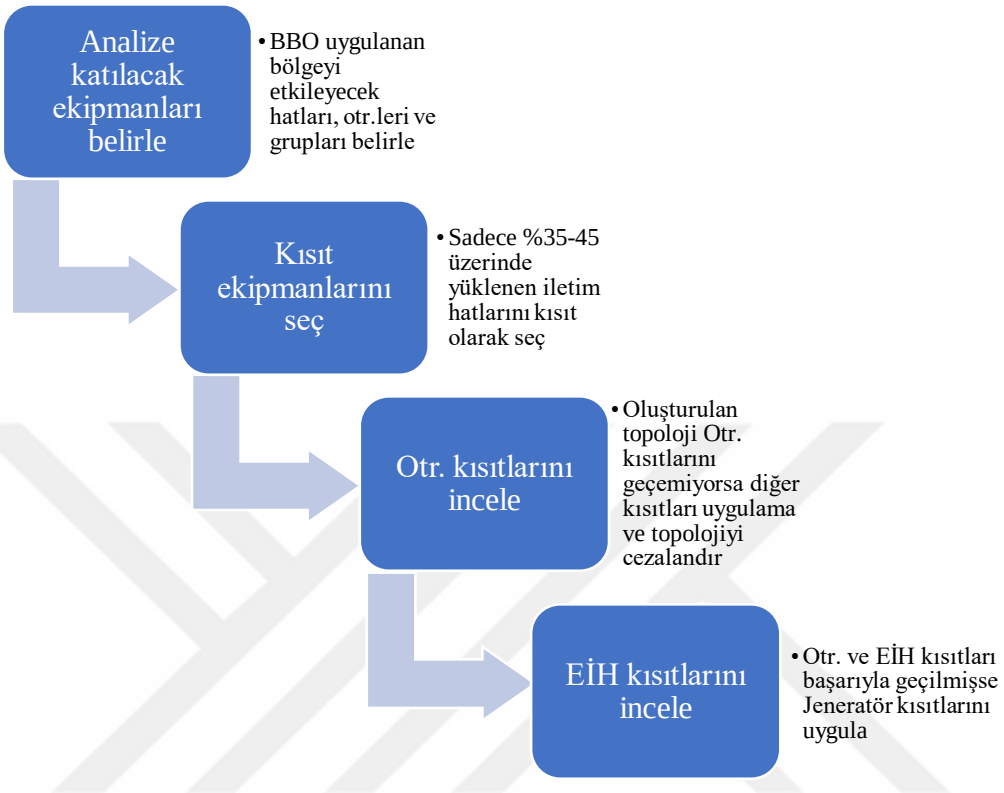
Yinelemeler başlatılmadan önce BBO yapılacak bölgede kısıt analizine dahil edilecek teçhizatlar belirlenmelidir. Örneğin, Bursa bölgesinde kısa devre akımlarının yüksek çıktığı bir alanda yapılan bara bölme optimizasyonu için gereken N-1 analizinde

sadece o alana ait iletim hattı, Otr. ve jeneratörler ile o alanı etkileyebilecek yakın veya uzak bağlantı hatları dikkate alınmıştır. Şekil 3.3'de yakın ve uzak bağlantıları görselleştirmek için örnek bir sistem verilmiştir ve görüldüğü üzere bara bölme optimizasyonu yapılması belirlenen bir alan işaretlenmiştir. Bu alanın içerisinde bulunan ekipmanlar ve bu alanla bağlantılı irtibat hatları N-1 analizi kapsamında servis harici edilerek etkisi irdelenecek ekipmanlardır. Bunlara ek olarak bölgeyi etkileyebilecek uzak bağlantı hatları da bulunabilmektedir. Örneğin Şekilde B TM ile C TM arasındaki iletim hattı servis harici olursa A ve B TM'lerinde bulunan tüketiciler irtibat hattı üzerinden BBO yapılan bölge üzerinde kalmaktadır. Dolayısıyla BBO yapılan bölgedeki tüketim miktarını etkileyen bir senaryo ile karşılaşılmaktadır. Bu nedenle, BBO yapılan alanın N-1 analizi yapılırken uzak bağlantı hatlarının da analiz kapsamına alınması son derece önemlidir.

N-1 güvenlik analizi yapılırken sadece bara bölme optimizasyonu yapılacak bölgeyi etkileyen ekipmanların irdelenmesi analiz süresini önemli miktarda azaltmaktadır. Üstelik, sistemin tamamında yapılacak olan bir kısıt analizinden de teknik olarak hiçbir farkı yoktur. Ancak sezgi-üstü algoritmalar yinelemeli bir süreçle optimale yakın bir noktayı elde ettikleri için N-1 analiz süresinin çok daha kısa sürelere çekilmesi gerekmektedir.

Belirli bir oranın altında yüklenen EİH'lerin diğer hatlar veya Otr.ler üzerindeki etkisi ardışık açmalara neden olacak kadar değildir. Bu nedenle BBO yapılacak bölgeye tanımladığımız EİH'lerin tamamını servis harici ederek analiz yapmaya ihtiyaç yoktur. Ancak bu sınır belirlenirken dikkatli olunmalıdır. Eğer hatların tamamı aynı kesite sahip olsaydı, bu sınırı belirlemek daha kolay olurdu. Ancak gerçek bir sistemde 154 kV gerilim seviyesinde aynı bölgede bulunan bazı hatlar 360 MVA'ya kadar aşırı akım nedeniyle servis harici edilmezken, bazı EİH'ler 180 MVA'ya ulaştığında aşırı akım koruma röleleri vasıtasıyla servis harici edilmektedir. Dolayısıyla, eğer sadece belirli bir oranın üzerinde yüklenme olan EİH'ler N-1 açısından irdelenecekse bu oran BBO yapılacak bölgenin dokusuna göre dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır. İncelemelerimiz neticesinde %35'den 45'e kadar bir eleme bandının seçilebildiği görülmüştür. Tez kapsamında yaptığımız analizlerde %45'in üzerinde yüklenen EİH'ler N-1 analizine dahil edilerek analiz süresi kısaltılmıştır ancak bu şekilde elde edilen bara düzenlerini

uygulamaya geçirmeden önce eleme bandı olmayan bir N-1 analizine tabi tutulması gerektiği unutulmamalıdır.



Şekil 3.4. N-1 analizi hızlandırma adımları

Yapılan hızlandırma işlemleri N-1 analizinin süresini düşürmede etkili olsa bile hala yeterli değildir. İletim sisteminin gün öncesi planında BBO'nun uygulanabilir olması için 5-6 saat içerisinde uygun çözümün sunulması gerekmektedir. N-1 analizinde sadece iletim hatlarının kısıtı değil aynı zamanda sistemde bulunan Otr. ve jeneratörlerin de kısıtları irdelenmektedir. Gerçek bir iletim sisteminde alçak gerilim seviyesinden bağlı olan birçok santral bulunmaktadır. Bu jeneratörler iletim seviyesini önemli ölçüde etkilemeyeceği için analize katılmasına gerek duyulmamıştır. Ancak, 400 kV ve 154 kV gerilim seviyesinde bağlı olan santrallerin jeneratörleri N-1 analiz sürecine dahil edilmelidir. Burada özellikle doğal gaz çevrim santrallerinde bulunan çevrim gruplarının üretim miktarlarına dikkat edilmelidir. Örneğin, 2 adet gaz türbini ve 1 adet buhar çevrim türbini bulunan santralde gaz türbinlerinden biri N-1 analizi kapsamında servis harici edilecekse, mutlaka buhar çevrim grubunun da üretim miktarı yarı yarıya düşürülmelidir.

İletim sisteminde sadece birkaç EİH'nin servis harici edilmesiyle gerçekçi bir N-1 analizi yapılmış olmaz ancak bazı kısıtların problem oluşturduğu bir sistemde geri kalan kısıtları irdelemenin teknik olarak bir faydası yoktur. Bu doğrultuda N-1 analiz süresini azaltacak bir yaklaşım daha yapılmıştır. İletim sistemimizde bulunan 400/154 kV Otr.ler 154 kV gerilim seviyesi için bir kaynak olarak düşünülürse, bu kaynaklar en az 150 MVA ve en fazla 500 MVA olarak sistemin farklı noktalarına dağıtılmıştır. 400 kV gerilim seviyesi ile 154 kV gerilim seviyesi arasında bir köprü görevi gören bu Otr.lerin servis harici olması, 154 kV iletim sistemi için son derece tehlikeli bir kısıttır. Bu nedenle N-1 analizi yapılırken eğer iletim sistemi Otr. kısıtlarına karşı dayanıklı değilse nispeten hafif arızaları incelemeye gerek yoktur prensibiyle hareket edilmiştir. Böyle bir durumda iletim hatları ve jeneratörler için hesaplanacak olan performans endekslerine sabit bir ceza katsayısı atanmıştır. Yapılan bu tasarım ile Otr. arızalarına mukavemet gösteremeyen topolojilerin hızlı bir şekilde elenmesi ve N-1 prosedürünün önemli ölçüde hızlanması sağlanmıştır. Uygulanan hızlandırma adımları Şekil 3.4'de gösterilmektedir.

Tez çalışmamız kapsamında oluşturduğumuz ilk N-1 analizi İstanbul Anadolu Yakası bölgesinde kullanıldığında, analiz süresi yaklaşık olarak 180 saniye sürmüştür. Tek bir analizin 3 dk. sürmesi yinelemeli sezgi-üstü algoritmaların en az 3000 kere buna ihtiyaç duyacağını düşünürsek, sadece N-1 analizi için 150 saatlik bir zamana ihtiyaç duyulmasına neden olacaktır. Bu durum uygulanabilir olmadığı için hızlandırma adımları geliştirilmiştir. Belirtilen adımların dışında N-1 analiz süresini düşürecek bir strateji daha bulunmaktadır. Analiz boyunca her ekipmanın servis harici olması durumu izlenirken onlarca defa Newton-Raphson güç akışı işlemi gerçekleştirilmektedir. BBO uygulayacağımız bölgeye göre kısıt sayımızı düşürmüş olsak bile hala güç akışı tüm Türkiye Elektrik İletim Sistemi dikkate alınarak gerçekleşecek ve dolayısıyla binlerce defa yapılan bir işlem ihtiyaç olmamasına rağmen ağır bir dosya üzerinde işlenmiş olacaktır. Bu doğrultuda güç sistemi belirtilen adımlara ek olarak güç akışlarında önemli miktarda sapmalara neden olmayacak şekilde küçültülebilir. Şebeke küçültme işlemi aşağıdaki prensiplere göre uygulanmıştır.

- BBO yapılacak alan ile irtibatı olan bölgeler sistemde tutulur (BBO alanı ile irtibatı olan bölgeler dışındaki tüm sistem silinecektir)

- Sistemin geri kalanı silinmeden önce irtibat hatlarındaki güç akışlarını temsil edecek şekilde ilgili baralara üretim veya tüketim birimleri eklenir.
- Yeni bir salınım barası seçilir.
- Sistemin geri kalanı silinir.
- 400 kV seviyede reaktif güç ihtiyacı varsa ihtiyaç giderilinceye kadar yeni salınım baraları oluşturulur.

Şebeke küçültme işlemi ile 180 saniye süren bir N-1 analizi yaklaşık olarak 80 saniyeye kadar düşmektedir. Ancak farklı işletme koşullarında yapılan birçok analiz neticesinde şebeke küçültme işleminin gerçek değerlere göre sapmalara neden olabileceği gözlemlenmiştir. Bu durumla nadir olarak karşılaşılsa da böyle bir ihtimal olduğu unutulmamalıdır. Bu tür bir sorunla karşılaşıldığında BBO yapılacak bölgeyle irtibatlı bölgeler dışında bulunan bazı bölgelere de küçültülmüş şebekede yer vermek sorunu çözmektedir.

Bahsedilen konuların dışında iletim sisteminin yapısına göre bazı özel durumlara da dikkat edilmesi gerekmektedir. Örneğin ark ocağı bulunan tesislerde olduğu gibi dalgalı bir tüketim grafiğine sahip bir TM'de aynı zamanda büyük güçlü gruplar varsa N-1 analizinde iyileştirmeler yapılmalıdır. Çünkü ilgili tesiste dalgalı bir tüketim grafiği olduğu için tüketim miktarları sürekli değişerek, çok yüksek veya çok düşük değerlere hızlı şekilde ulaşacaktır. Dolayısıyla N-1 analizi kapsamında uygulanan kısıtların ilgili TM'de tüketim değerinin çok yüksek ve aynı zamanda çok düşük olduğu durumlarda incelenmesi gerekmektedir. Tüketim miktarının çok yüksek olduğu duruma göre oluşturulmuş bir topoloji, çok düşük tüketim durumunda iyi performans gösteremeyebilir. Çünkü tüketim miktarı düştüğü zaman ilgili TM'de üretilen enerji bağlantı hatları vasıtasıyla şebekeye dağılacaktır ve bu durumun göz ardı edilmesi halinde bazı iletim hatlarının aşırı yüklenmesiyle karşı karşıya kalınabilmektedir. Aşırı akım rölelerinin çalışması halinde ardışık açmalar gerçekleşebilir ve üretim birimleri devreden çıkabilir. Oluşturulan topolojide böyle bir senaryoyla karşılaşmamak için özel tesislerin tüketim grafikleri dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, değişken yüklü sanayi kuruluşlarının yoğun olduğu bölgelerde marjinal tüketim noktalarına karşı dayanıklı bir bara dağılımı elde edebilmek için kısıt analizi her yinelemede iki kere yapılmalıdır.

Tüketim tarafında olduğu gibi üretim kısmında da değişken yüklenme grafiği oluşmaktadır. Özellikle rüzgâr türbinlerinin yoğun olduğu bir bölgede veya böyle bir bölgeyle irtibatlı olan bir bölgede BBO yapılacaksa, her yinelemede rüzgâr üretimlerinin yüksek ve düşük olduğu iki kısıt analizi yapılmalıdır. Çünkü buradaki üretim profili çok değişken olabilir. Rüzgâr üretimi tam kapasite çalışıyorken birkaç saat sonra üretim kapasitesi dramatik şekilde azalabileceği için BBO ile oluşturulan bara düzeninin N-1 kriterleri açısından her iki durumda da güvenilir olması önemlidir. Şunu belirtmek gerekir, eğer sistem operatörü gün öncesi rüzgâr üretim tahminlerine sahipse, ertesi gün gerçekleşecek rüzgâr potansiyeli bilindiği için BBO kapsamında iki kısıt analizi yapmaya ihtiyaç yoktur.

3.1.2. Lineer kısıt analizi

Önceki bölümde bara bölme optimizasyonu kapsamında yapılan kısıt analizi, gerilim bozulmalarını ve reaktif güç akışlarını dikkate alabilmek için alternatif akım hesabıyla yapılmıştır. Ancak ayrıntıları açıklandığı gibi tez kapsamında kısıt analizini hızlandıracak çeşitli teknikler kullanılmış olsa da optimizasyon işleminin gün içi problemlerde uygulanması zaman problemi nedeniyle uygulanabilir olmayabilir. Dolayısıyla İSO'ların alternatif akım güç akışı eşitlikleri kullanılarak uygulanan bara bölme optimizasyonunu gün öncesi planlamada kullanmasını önermekteyiz. Bunun yanı sıra gün içi planlamada faydalanmak üzere daha hızlı yaklaşımlara ihtiyaç olduğu görülmektedir.

Bu bölüm içeriğinde güç akışı doğruluk oranlarını mümkün olduğunca koruyarak kısıt analizini hızlandırmaya yönelik yaklaşımlar sunulmuştur. Ayrıca, bölüm içeriğinde sunulan bazı yaklaşımların Python açık kaynak kodları verilmiştir. Tasarlanan yaklaşımda, transformatörlerin optimizasyon sürecinden çıkarılma opsiyonu ve N-1 analiz sürecinin vektörize edilmesi için kullanılan kesinti transfer dağılım katsayısı (outage transfer distribution factor (OTDF)) optimizasyon sürecini kısaltan başlıca etmenler olmuştur.

Lineer olmayan kısıt analizinde olduğu gibi lineer kısıt analizinde de şebekede bulunan ekipmanların hepsini N-1 analizi kapsamına almaya ihtiyaç yoktur. Böyle bir yaklaşım matris boyutunu önemli miktarda artırarak çözüm süresini uzatacaktır. Dolayısıyla, lineer kısıt analizi kapsamında da BBO yapılacak bölgedeki ekipmanlara ek olarak

bölgeye irtibatlı hatlar ve uzak bağlantı hatları dikkate alınmıştır. Eğer BBO yapılacak bölgeyle yakın irtibatlı bölgelerde kısıt analizini etkileyecek Otr.ler varsa, bunlar da kısıt analizi kapsamına dahil edilmelidir.

- Kısıt analizinde kullanılacak dağılım faktörleri;

Güç sisteminde bir iletim hattının servis harici olması durumunda hattın üzerindeki güç akışının diğer hatlar üzerine hangi oranlarda dağıldığı, kesinti dağılım katsayısıyla belirlenebilmektedir. Önceden belirlenmiş katsayıların kullanılmasıyla birlikte kısıt analizi doğrusal bir formata dönüştürülmektedir. OTDF, iletim hatlarının sırayla servis harici edilmesi ve eksilen iletim hattının diğer ekipmanlar üzerinde meydana getirdiği güç akışı değişiklikleri gözlemlenerek elde edilebilir. İletim hatlarının empedans karakteristiklerini kullanarak OTDF'nin elde edilmesi de alternatif bir yaklaşımdır. Bir iletim hattının servis harici olma durumunu benzetebilmek için arıza öncesi Thevenin eşdeğer devresinde baralar arasına -Z empedansı eklenebilir. Detayları [68]'de verilen yaklaşıma göre Eşitlik (3.1)'de verilen ifade ile bir iletim hattının servis harici olması durumunda diğer iletim hattına ne kadarlık bir etkisi olacağı önceden hesaplanabilmektedir. Güç sisteminde bulunan a-b hattının servis harici olması durumu, c-d hattı üzerinde ΔI_{c-d} miktarında akım değişikliğine neden olmaktadır.

$$\frac{\Delta I_{cd}}{I_{ab}} = -\frac{Z_{ab}}{Z_{cd}}\left[\frac{(Z_{ca}-Z_{cb})-(Z_{da}-Z_{db})}{Z_{th,ab}-Z_{ab}}\right]=L_{cd,ab} \tag{3.1}$$

$L_{cd,ab}$ hat-kesinti dağılım faktörü (line-outage distribution factor) olarak bilinmektedir. Benzer dağılım faktörleri, sistemde bulunan herhangi bir hat kesintisinin herhangi bir hat üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için hesaplanabilmektedir. Elde edilen dağılım faktörü kısıt analizinde kullanılarak analiz süresi önemli miktarda düşürülmektedir.

Güç sisteminde ekipmanların empedansı yerine sadece reaktanslarının kullanılmasıyla birlikte DA kısıt analizi gerçekleştirilmektedir. Bu durumda iletim sisteminde oluşan kayıplar ihmal edilir, bara gerilimleri 1 pu yapılır ve baralar arasındaki açı farkının çok küçük olduğu varsayılır. DA modelde dağılım katsayılarını elde etmek için Eşitlik (3.1)'de verilen ifadede empedans yerine ilgili ekipmanların reaktanslarını kullanmak yeterlidir.

$$L_{cd,ab} = \frac{\Delta I_{cd}}{I_{ab}} = \frac{\Delta P_{cd}}{P_{ab}} = -\frac{X_{ab}}{X_{cd}}\left[\frac{(X_{ca}-X_{cb})-(X_{da}-X_{db})}{X_{th,ab}-X_{ab}}\right] \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de DA kısıt analizi için kullanılacak hat kesinti dağılım faktörünün ifadesi bulunmaktadır. DA güç akışı hesabında yapılan ihmaller nedeniyle bir iletim hattından geçen pu akım ile pu aktif güç akışı aynıdır. Bu nedenle matematiksel ifadede verildiği gibi DA yaklaşımla elde edilen dağılım katsayısı kullanılarak kesinti sonrasında sadece akım değişim oranı değil aynı zamanda aktif güç akışı değişimi de elde edilebilmektedir. Eğer iletim sisteminde bara bölme optimizasyonu yapılacak bölgede yeterince reaktif güç rezervi bulunduğu biliniyorsa, kısıt analizinde reaktif güç akışları ve kayıplar ihmal edilerek, hat kesinti dağılım katsayıları kullanılabilir.

Güç sisteminde bulunan herhangi bir barada mevcut üretim miktarının artırılmasıyla birlikte bazı iletim hatlarındaki güç akışları değişecektir. İletim sisteminde a barasında üretime başlayan bir jeneratör, ΔI_a miktarında bir akım ekleyerek, b ve c baralarında Eşitlik (3.3)'te verildiği gibi gerilim değişimine neden olur.

$$\Delta V_b = Z_{ba}\Delta I_m, \quad \Delta V_c = Z_{ca}\Delta I_m \quad (3.3)$$

Eğer b ve c baraları arasında Z_{bc} empedanslı bir iletim hattı bağlantısı bulunuyorsa bu hatta meydana gelecek değişim Eşitlik (3.4)'te verilmiştir.

$$\Delta I_{bc} = \frac{\Delta V_b - \Delta V_c}{Z_{bc}} = \frac{Z_{ba}-Z_{ca}}{Z_{bc}}\Delta I_m \quad (3.4)$$

Bu eşitlik aslında akım takviye dağılım faktörünün (current-injection distribution factor) elde edilmesini sağlamaktadır ve $K_{bc,a}$ Eşitlik (3.5)'de verilmiştir.

$$K_{bc,a} = \frac{\Delta I_{bc}}{\Delta I_a} = \frac{Z_{ba}-Z_{ca}}{Z_{bc}} \quad (3.5)$$

Dolayısıyla a barasında bulunan üretim miktarı ne zaman değişirse b-c hattından geçen akış, $\Delta I_{bc} = K_{bc,a}\Delta I_a$ miktarı kadar değişecektir. Kısıt analizi kapsamında bir barada bulunan üretim biriminin servis harici edilmesi durumunda talep edilen enerji başka bir baraya takviye edilecek akımlarla karşılanır. Üretim dengesini sağlayabilmek için a barasında bulunan üretim miktarının ΔI_a miktarında değiştiğini ve buna karşılık b barasında bulunan üretim miktarının da ΔI_b miktarında değiştiğini farz edelim. Bu

durumda a barasından b barasına kayan üretim miktarının c-d hattında meydana getirdiği değişim miktarı Eşitlik (3.6)'da verilmiştir.

$$\Delta I_{cd}=K_{cd,a}\Delta I_a+K_{cd,b}\Delta I_b \tag{3.6}$$

Tablo 3.1. Hat kısıt ve üretim kayma dağılım faktörleri

Hat kısıt dağılım faktörü				
		Kısıt uygulanan iletim hattı		
İletim hattında meydana gelen değişimin katsayısı		a-b	a-c	b-c
	a-b		$L_{ab,ac}$	$L_{ab,bc}$
	a-c	$L_{ac,ab}$		$L_{ac,bc}$
	b-c	$L_{bc,ab}$	$L_{bc,ac}$	
Üretim kayma dağılım faktörü				
		Hatlarda meydana gelen değişimin katsayısı		
Üretimin takviye edildiği bara	a	$K_{ab,a}$	$K_{ac,a}$	$K_{bc,a}$
	b	$K_{ab,b}$	$K_{ac,b}$	$K_{bc,b}$

Eşitlikte görüldüğü gibi akım takviye dağılım faktörleri kullanılarak bir baradan başka bir baraya kayan üretim miktarının belirli bir hat üzerindeki etkisi elde edilmektedir. Bu yaklaşım üretimde meydana gelen kayma miktarının iletim hatları üzerindeki etkisini gösterdiği için akım kayma dağılım faktörü (current-shift distribution factor) olarak da isimlendirilmektedir. DA güç akışı modelinde akım kayma dağılım faktörü üretim kayma dağılım faktörü (generation-shift distribution factor) olarak bilinmektedir. Tablo 3.1'de hat kısıt ve üretim kayma dağılım faktörlerinin yapısı örneklendirilmiştir. Her kısıt uygulanan iletim hattı için oluşturulan dağılım faktörleri, kısıt uygulanmayan iletim hatlarında meydana gelecek değişimin katsayısı olarak tabloya işlenmiştir. Üretim kayma dağılım faktörü için oluşturulan tablo da aynı mantıkla oluşturulmuştur.

Çalışmamız kapsamında ihtiyaç duyulan OTDF katsayıları PSS/E programından çekilmiştir. Programdan elde edilen dağılım faktörlerinin her sütunu, izlenen elemanlar üzerinde karşılık gelen kısıtın neden olduğu hassasiyet katsayılarından oluşmaktadır. PSS/E programında OTDF katsayıları, izlenen elemanlarda kısıt öncesi

ve kısıt sonrası oluşan güç akışlarının değişim oranıyla elde edilmektedir. İlgili güç akışları DA analizle elde edilmektedir. Sonuç olarak dağılım katsayılarının bulunduğu matrisin bir elemanı Eşitlik (3.7)'de verilen yöntemle hesaplanmaktadır [69].

$$L_{ac,ab}=\frac{(P_{ac,ab_kst}-P_{ac_temel})}{\Delta P_{ab}} \tag{3.7}$$

$$P_{ac,ab_kst}=P_{ac_temel}+\left(L_{ac,ab}x\Delta P_{ab}\right) \tag{3.8}$$

P_{ac,ab_kst}, a-c hattının a-b hattında meydana gelen bir arıza neticesinde oluşan aktif güç akışını, P_{ac_temel} a-c hattının temel durum aktif güç akışını ve ΔP_{ab} a-b hattının kısıt öncesindeki aktif güç akışını temsil etmektedir. Eşitlik (3.7) ile elde edilen $L_{ac,ab}$ katsayıları kısıt analizi esnasında Eşitlik (3.8)'de verildiği gibi kullanılmaktadır.

- Kısıt analizinin vektörize edilmesi;

Güç sisteminde hat kısıt ve üretim kayma dağılım faktörleri ile temel durum güç akışları kullanılarak kısıt analizi için ihtiyaç duyulan çözüm süresi önemli miktarda azaltılabilir. Ancak bu yaklaşımda, elde edilen aktif güç akışlarında sapmalar olacağı ve reaktif güç akışları ile gerilim bozulmalarının ihmal edileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Güç sisteminde ancak yeterli düzeyde reaktif güç rezervi bulunduğu düşünülüyorsa bu yaklaşım tercih edilebilir. Ancak yine de vektörize edilmiş kısıt analiziyle elde edilen topolojilerin AA kısıt analizinden geçirilmesinde sistem güvenliği açısından fayda olduğu düşünülmektedir.

Kısıt analizini vektörize ederek güç sistemindeki tüm kısıtların aynı anda hesaplanmasını sağlamak için matris işlemleri kullanılmalıdır. Aşağıda verilen L matrisinde bulunan her sütun, ilgili sütuna karşılık gelen iletim hattında kesinti olması durumunda kullanılacak olan önceden hesaplanmış OTDF katsayılarını içermektedir. P_{kst_td} matrisindeki her sütun ise kısıt durumu incelenen ekipmanın temel durum aktif güç akışı miktarını içermektedir. Bu matrisin sütun sayısı kısıt uygulanan iletim hattı kadarken, satır sayısı izlenen hat sayısı kadardır. Aşağıda örnek olması amacıyla L ve P_{kst_td} matrislerinin içeriği verilmiştir. Örnek içerikte görüldüğü gibi hem kısıt uygulanan hat sayısı hem de izlenen hat sayısı 4 adettir. Kısıt uygulanan hat için üretilen dağılım faktörü doğal olarak -1'dir.

$$L=\begin{bmatrix} -1{,}00000000e+00 & 7{,}47253537e-01 & 2{,}40478694e-01 & 3{,}06818157e-01 \\ 7{,}05820620e-01 & -1{,}00000000e+00 & 3{,}61200422e-01 & 5{,}27121276e-02 \\ 8{,}30607712e-02 & 1{,}32079467e-01 & -1{,}00000000e+00 & 1{,}40630290e-01 \\ 7{,}05814138e-02 & 1{,}28374146e-02 & 9{,}36632454e-02 & -1{,}00000000e+00 \end{bmatrix}$$

$$P_{kst_td}=\begin{bmatrix} 454{,}92941284 & -691{,}6293335 & 45{,}1963501 & 48{,}40790176 \\ 454{,}92941284 & -691{,}6293335 & 45{,}1963501 & 48{,}40790176 \\ 454{,}92941284 & -691{,}6293335 & 45{,}1963501 & 48{,}40790176 \\ 454{,}92941284 & -691{,}6293335 & 45{,}1963501 & 48{,}40790176 \end{bmatrix}$$

$$P_k=L*P_{kst_td} \tag{3.9}$$

Eşitlik (3.9)'da verilen P_k, L ile P_{kst_td} matrislerinin eleman elemana çarpılmasıyla elde edilen aktif güç kayma miktarını ifade etmektedir. P_k matrisinin her sütunu, bir kısıtın sistemde kalan diğer ekipmanlar üzerindeki aktif güç akışlarına etkisini temsil etmektedir. Örneğin, yukarıda verilen örnek L ve P_{kst_td} matrislerinin eleman elemana çarpılmasıyla oluşan P_k matrisinin 1. sütunu [-454,92941284, 321,098560226965, 37,7867878720536, 32,1095611374511] olarak hesaplanır. Görüldüğü gibi arıza öncesinde 1. kısıt üzerindeki güç akışı büyük oranda izlenen ikinci hat üzerine kaymaktadır.

$$P_{ksy}=P_k + P_{td} \tag{3.10}$$

Eşitlik (3.10)'da verilen denklemde P_k ve P_{td} matrisleri toplanarak P_{ksy} matrisi elde edilmektedir. P_{td} matrisi arıza öncesi temel durum güç akışlarını ifade ederken P_{ksy} matrisi kısıt analizinin tamamını içeren arıza sonrası güç akışlarını temsil etmektedir.

Şekil 3.5'te hat kesinti ve üretim kayma dağılım faktörleri kullanılarak oluşturulan kısıt analizi fonksiyonunun bir bölümü bulunmaktadır. Matris formuna dönüştürülen veriler basit matris toplama ve eleman elemana çarpma yöntemleriyle kullanılabilir bir formata dönüştürülmüştür. Verilen kodun sonunda elde edilen kısıt_sonrası_yuk matrisi kısıt analizi kapsamında izlenen tüm ekipmanların kısıt sonrası aktif güç akışı bilgilerini içermektedir. Bu içeriğin oluşturulmasından sonra yüklenme miktarlarının termal kapasitelere göre yüzdelik oranlara çevrilmesi, aşırı yüklenen hatların tespit

edilmesi ve hangi kısıtların aşırı yüklenmelere neden olduğunun belirlenmesi kolaylıkla elde edilebilir.

```
def kisit_analizi(sav_ismi, dosya_yolu, ytim, bolge, dfax_ismi, dfax_ismi_jen):
    """
    dfax_olustur fonksiyonu PSS/E'nin standart dosyaları olan sub, mon, con  dosyalarını
    kullanarak otdf hesabı için gerekli olan dfx uzantılı dosyayı oluşturmak için düzenlenmiştir.
    """
    dfax_olustur(sav_ismi, bolge, sub_ismi, con_ ismi, mon_ ismi, dfax_ ismi)
    psspy.case(dosya_yolu+"\\"+sav_ismi+".sav")   #sav. dosyası açılır.
    psspy.progress_output(6,"",[0,0])
    psspy.bsys(1,0,[154., 400.],len(bolge), bolge,0,[],0,[],2,[2,1]) #analiz edilecek bölge oluşturulur.
    """
    Hat kesinti ve üretim kayma dağılım katsayıları oluşturulur. Kullanılan otdf_olustur fonksiyonu
    otdf katsayılarının PSS'ten çekilmesi ve takip edilebilir bir formata dönüştürülebilmesi için
    oluşturduğumuz bir fonksiyondur. branch_list_mon ifadesi izlenen hatları içermektedir. Burada
    ilk 6 rakam gönderen taraf (from bus) bara numarası sonraki 6 rakam alıcı bara numarası
    (to bus) ve son rakam ilgili hattın kimlik numarasını temsil etmektedir. Branch_list_con ise kısıt
    oluşturulan hatların listesini içermektedir.
    """
    otdf, otdf_jen, branch_list_mon, branch_list_con = otdf_olustur(dfax_ ismi, dfax_ ismi _jen)
    # temel durum yüklenme miktarları çekilir.
    tml_yuk= np.array([psspy.brnmsc(int(branch_list_mon[i][0:6]),int(branch_list_mon[i][6:12]),
    str(int(branch_list_mon[i][-1])),"P")[1] for i in range(len(branch_list_mon))])
    tml_yuk_gen=np.array([psspy.macdat(int(otdf_gen.codesc[i].split()[5]),
    otdf_gen.codesc[i].split()[2], 'P')[1] for i in range(len(otdf_gen.codesc))])
    #N-1 analizinde kullanmak için kısıt uygulanacak hatların temel durum güç akışları çekilir.
    tml_yuk_con=np.array([[psspy.brnmsc(int(branch_list_con[i][0:6]),
    int(branch_list_con[i][7:13]),branch_list_con[i][-1],"P")[1]]
    for i in range(len(branch_list_con))])
    """
    kisit_oncesi_yuk matrisinin boyutu (hat listesinin uzunluğu, hat listesinin uzunluğu) kadardır.
    [[20 30 15 .... 250]....[20 30 15 .... 250]]. Daha sonra kisit_oncesi_yuk matrisi ve otdf faktörleri
    kullanılarak kısıt sonrası yüklenme seviyeleri elde edilecektir.
    """
    kisit_oncesi_yuk = np.ones((len(temel_yuk_con),1)) * tml_yuk
    """
    #temel_yuk_con_matrisi nin boyutu (len(tml_yuk), len(tml_yuk)) kadardır. Örneğin,
    [[tml_yuk [0], tml_yuk [0]], [tml_yuk [1], tml_yuk [1]]]
    """
    tml_yuk_con_matrisi = np.ones((len(tml_yuk_con),1)).T* tml_yuk_con
    """
    otdf hatların kısıt dağılım katsayılarını içermektedir. Örneğin,
    [[-1.00000000e+00  6.90140247e-01], [ 6.90140247e-01 -1.00000000e+00]],
    Birinci iç liste birinci hattın kısıt dağılım katsayılarını temsil ederken ikinci iç liste ikinci hattın
    kısıt dağılım faktörüdür. temel_yuk_con_matrisi ile otdf matrisinin çarpımı kısıt sonrası oluşacak
    aktif güç kayma mitkarlarını vermektedir. Kısıt sonrası aktif güç akışlarını elde etmek için kısıt
    sonrası aktif güç kayma miktarları ile temel durum güç akışları toplanmaktadır.
    """
    kayma = otdf * tml_yuk_con_matrisi
    kayma_jen=np.array([np.array(otdf_gen.factor[i])*tml_yuk_jen[i]
    for i in range(len(temel_yuk_jen))])
    kısıt_sonrası_yuk = kayma + kisit_oncesi_yuk
```

Şekil 3.5. Dağılım faktörleri kullanılarak oluşturulmuş kısıt analizi Python kodu

Kısıt analizini hızlandırmak için uygulanan ihmaller ile çözüm süresi kayda değer şekilde azalmıştır. Kısıt analizinin yapıldığı bölgenin büyüklüğüne ve analizin yapıldığı PC'nin özelliklerine göre analiz süresinde değişmeler olabilir. Ancak, 2.60 GHz ve 16 GB RAM özelliklerine sahip dizüstü bilgisayarda yapılan analizlerde Türkiye Elektrik İletim Sisteminin Bursa ve İstanbul Bölgelerinde 1000 adet kısıt analizi sırasıyla sadece 3,7 ve 3,2 dakika sürmektedir. Tezin başlangıcında 1 adet kısıt analizi sonucunu 3 dakika alabiliyorken çalışmamızın sonunda yaklaşık 4 dakikada 1000 adet kısıt analizi gerçekleştirilmiştir.

3.2. Performans Endeksleri

Kullanılan sezgi-üstü algoritmaların daha iyiye ulaşmak için BBO yöntemiyle elde edilen topoloji performanslarını değerlendirmesi gerekmektedir. BBO yönteminden beklediğimiz netice, kısa devre akımları belirlenen sınırların üzerinde olmayan ve N-1 güvenliği sağlanmış bir bara düzeninin oluşmasıdır. Dolayısıyla, performansına bakılması gereken kavramlar kısa devre ve N-1 kriteridir. Sistem güvenliğini değerlendirebilmek amacıyla [70]'te önerilen performans endeksleri kullanılabilir. Çalışmamız kapsamında IEEE 14-baralı test sisteminde uygulanan BBO yönteminde performans endekslerinden faydalanılmıştır fakat reaktif güç akışlarının iletim hatlarının termal kapasitesi üzerinde önemli miktarda etkisi olması sebebiyle orijinal çalışmadaki aktif güç performans endeksi görünür güç performans endeksi olarak değiştirilmiştir. Ayrıca iletim sisteminin yüklenme profilini daha hassas biçimde ifade edebilmek amacıyla ilgili performans endeksleri geliştirilmiştir.

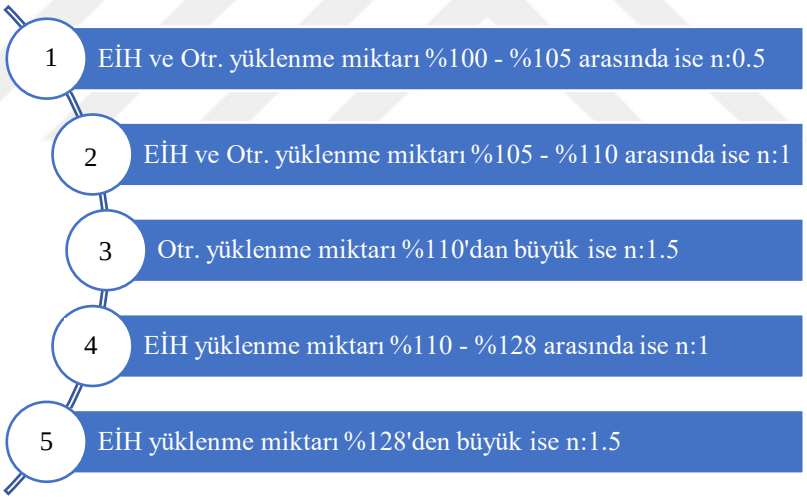
3.2.1. Görünür güç performans endeksi

Kısa devre akımlarını sınırlandırmak için bara düzenlerinde yapılan değişikliklerin sistem güvenliği üzerine etkisi mutlaka irdelenmelidir. Sistem güvenliği İSO'lar tarafından N-1 kriterine uyarak sağlanmaktadır. Daha öncede bahsedildiği gibi N-1 güvenliği kapsamında iletim sisteminde bulunan ekipmanlardan bir tanesinin servis harici olması durumu, ardışık problemlere yol açarak tüketicinin etkilenmesine neden olmamalıdır. Dolayısıyla N-1 analizinde iletim sisteminde bulunan ekipmanlar teker teker servis harici edilerek servis harici olan teçhizatın diğer ekipmanlar üzerindeki etkisi statik olarak gözlemlenmektedir. Bu etki, bazı ekipmanların aşırı akım koruma röleleri vasıtasıyla servis harici edilecek kadar termal kapasitesinin üzerinde

yüklenmesi şeklinde olabilirken, bazı baralarda yaşanan gerilim bozulmasının %10'un üzerine çıkması halinde de olabilir. Bu nedenle, N-1 analizi kapsamında ekipmanlar üzerindeki güç akışının ve baralardaki gerilim bozulmasının incelenmesinde fayda vardır.

$$PE_{GA}=\sum_{a=1}^{AS}\sum_{e\neq a}^{N}\frac{W_{eö}}{2n}\left(\frac{S_e^{\,a}}{S_e^{sınır}}\right)^{2n} \tag{3.11}$$

Eşitlik (3.11)'de PE_{GA} Görünür Güç Performans endeksini (GGPE), AS N-1 analizi kapsamında servis harici edilerek sistemin geri kalanına etkisi irdelenecek toplam iletim hattı, Otr. ve jeneratör sayısını, N iletim sisteminde arıza durumunda gözlemlenecek olan toplam hat ve Otr. sayısını, $S_e^{\,a}$ a. arıza esnasında e. ekipman üzerinden akan görünür güç miktarını, $S_e^{sınır}$ e. ekipmanın termal güç kapasitesini, $W_{eö}$ bazı önemli iletim hatlarında veya Otr.lerde kullanılabilecek bir pozitif katsayıyı, n sabit bir ölçeklendirme katsayısını temsil etmektedir.



Şekil 3.6. Yüklenme miktarına göre kademeli cezalandırma

GGPE'de $W_{eö}$ bazı önemli ekipmanları ayırt edebilmek amacıyla oluşturulmuş sabit bir katsayıdır. N-1 analizinde odaklandığımız nokta bir ekipmanın servis harici olması durumunda başka bir ekipmanın aşırı yüklenerek servis harici olmaması durumudur. Dolayısıyla bizim için önemli olan iletim hattı, aşırı yüklenmiş iletim hattıdır. Yani problemimizin doğasında önceden bilinen bir önemli hattan ziyade aşırı yüklenebilecek hatların hepsi önemlidir mantığı yatmaktadır. Bu doğrultuda performans endeksi hesaplanırken yüklenme oranlarına göre kademeli artış gösteren

dn üstel ifadesi tercih edilmiştir. Buna göre örnek bir format Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Burada belirtilen yüklenme miktarları hatların termik oranlarıdır ve termik kapasitelerin aşılması ilgili ekipmanların servis harici olması anlamına gelmemektedir. Bu nedenle, ekipmanların servis harici olacağı yüklenme sınırına kadar alınan riskin seviyesini belirleyecek kademelendirme yapılmalıdır. Bu düzenlemeyle birlikte aşırı yüklenmelerin tamamı çok tehlikeli olarak değerlendirilmeyip hiyerarşik bir düzene göre atanan dn üstel ifadesine göre maliyet katsayıları yükselmektedir.

$$PE_{GA,Otr.}=\sum_{a=1}^{OS}\sum_{e\neq a}^{N}\begin{cases}\frac{W_{eö}}{2n}\left(\frac{S_e{}^{a}}{S_e^{sınır}}\right)^{2dn} \\ dn=0.5,\ S_e^{sınır}<S_e{}^{a}<\%105,\ S_e{}^{a}=\text{EİH ve Otr.} \\ dn=1,\ \%105<S_e{}^{a}<\%110,\ S_e{}^{a}=\text{EİH ve Otr.} \\ dn=1.5,\quad \%110\leq S_e{}^{a},\ S_e{}^{a}=\text{Otr.} \\ dn=1,\quad \%110<S_e{}^{a}<\%125,\ S_e{}^{a}=\text{EİH} \\ dn=1.5,\quad \%125\leq S_e{}^{a},\ S_e{}^{a}=\text{EİH}\end{cases} \tag{3.12}$$

Belirtilen hızlandırma yaklaşımları ve kademeli ceza prensibine göre Eşitlik (3.11)'de verilen güç performans endeksinde değişiklikler yapılmıştır. Buna göre Otr.ler için düzenlenen GGPE Eşitlik (3.12)'de verilmiştir. $PE_{GA,Otr.}$ Otr. güç akışı performans endeksini, dn dinamik bağımlı değişkeni ve OS Otr. sayısını ifade etmektedir. Bir Otr. servis harici edildiğinde başka bir EİH veya Otr. üzerindeki görünür güç akışı $S_e{}^{a}$, %105'ten küçük ve %100'den büyükse, bu ekipmanın performansa katkısı dn=0.5 olacağı için küçük olacaktır. Yani belirli bir oranda yüklenme söz konusu olsa bile etkisi büyük olmayacağı için performansı da önemli miktarda azaltmayacaktır. Ancak Otr. arızası neticesinde başka bir Otr. %110'un üzerinde yükleniyorsa dn=1.5 olacağı için performans endeksi ciddi miktarda artacak ve dolayısıyla topolojinin uygunluğu da kayda değer oranda azalacaktır. EİH ve Otr.nin farklı yüklenme koşullarına göre farklı dn üstel değerleri almasının sebebi aşırı akım açma karakteristiklerinin farklı olmasıdır. Bir Otr. için %110 üzerinde yüklenme önemli bir aşırı akımdan servis harici olma tehlikesiyken; bir EİH için arıza hallerinde kabul edilebilir bir orandır. Dolayısıyla, salt bir yüklenme oranından ziyade ekipman bazlı yüklenme oranı dikkate alınarak hassas bir performans hesaplama tekniği geliştirilmiştir. Şunu belirtmek gerekir, verilen oranlara tam bir uyum içinde olunması beklenmez; aksine, iletim

sisteminin röle felsefesine göre verilen oranlar değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle örnek olarak verilen oranların iletim sisteminin dokusuna göre ayarlanması gerekir.

$$PE_{GA,EİH}=\sum_{a=1}^{EİHS}\sum_{e\neq a}^{N}\begin{cases}\frac{W_{eö}}{2n}\left(\frac{S_e{}^{a}}{S_e^{sınır}}\right)^{2dn}, & PE_{GA,Otr.}<M\\ dn=0.5,\ S_e^{sınır}<S_e{}^{a}<\%105,\ S_e{}^{a}=EİH \text{ ve Otr.} & \\ dn=1,\ \%105<S_e{}^{a}<\%110,\ S_e{}^{a}=EİH \text{ ve Otr.} & \\ dn=1.5,\ \%110\leq S_e{}^{a},\ S_e{}^{a}=Otr. & \\ dn=1,\ \%110<S_e{}^{a}<\%125,\ S_e{}^{a}=EİH & \\ dn=1.5,\ \%125\leq S_e{}^{a},\ S_e{}^{a}=EİH & \\ C, & PE_{GA,Otr.}>M\end{cases} \quad (3.13)$$

Otr. performans endeksi hesaplandıktan sonra EİH kısıtlarının değerlendirilmesi safhasına geçilmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi Otr. kısıtları 154 kV gerilim seviyesi için en problemli kısıtlardır (baralarda gerçekleşecek kısıtlar tek bir arızayla aynı anda birden fazla fiderin servis harici olması sebebiyle N-1 kapsamında düşünülmemiştir). Eğer oluşturulan bara düzeni Otr. kısıtlarında aşırı yüklenmelere maruz kalıyorsa, EİH ve Jen. kısıtlarına bakarak zaman kaybetmenin teknik olarak faydadan çok zararı olmaktadır. Dolayısıyla, Eşitlik (3.13)'te görüldüğü gibi Otr. performans endeksi önceden belirlenmiş bir M değerinden daha büyükse iletim hattı kısıtları hesaplanmayarak yine önceden belirlenmiş sabit bir C katsayısına eşitlenmektedir.

EİH ve Otr. kısıtları geçildikten sonra Eşitlik (3.14)'te belirtilen yaklaşım uygulanmaktadır. Görüldüğü üzere Otr. ve EİH kısıtları karşısında başarılı bir şekilde işletilebilen topolojilere Jen. kısıtları da dahil edilmektedir. Aksi halde, Jen. performans endeksine önceden belirlenen sabit bir C değeri atanır.

$$PE_{GA,Jen}=\sum_{a=1}^{JS}\sum_{e\neq a}^{N}\begin{cases}\frac{W_{eö}}{2n}\left(\frac{S_e}{S_e^{sınır}}\right)^{2dn}, & PE_{GA,Otr.}, PE_{GA,Hat} < M\\ dn=0.5,\ S_e^{sınır}<S_e{}^{a}<\%105,\ S_e{}^{a}=EİH \text{ ve Otr.} & \\ dn=1,\ \%105<S_e{}^{a}<\%110,\ S_e{}^{a}=EİH \text{ ve Otr.} & \\ dn=1.5,\ \%110\leq S_e{}^{a},\ S_e{}^{a}=Otr. & \\ dn=1,\ \%110<S_e{}^{a}<\%125,\ S_e{}^{a}=EİH & \\ dn=1.5,\ \%125\leq S_e{}^{a},\ S_e{}^{a}=EİH & \\ C, & PE_{GA,Otr.}, PE_{GA,EİH}>M\end{cases} \quad (3.14)$$

$$PE_{GA}=PE_{GA,EİH} + PE_{GA,Jen.} + PE_{GA,Otr.} \quad (3.15)$$

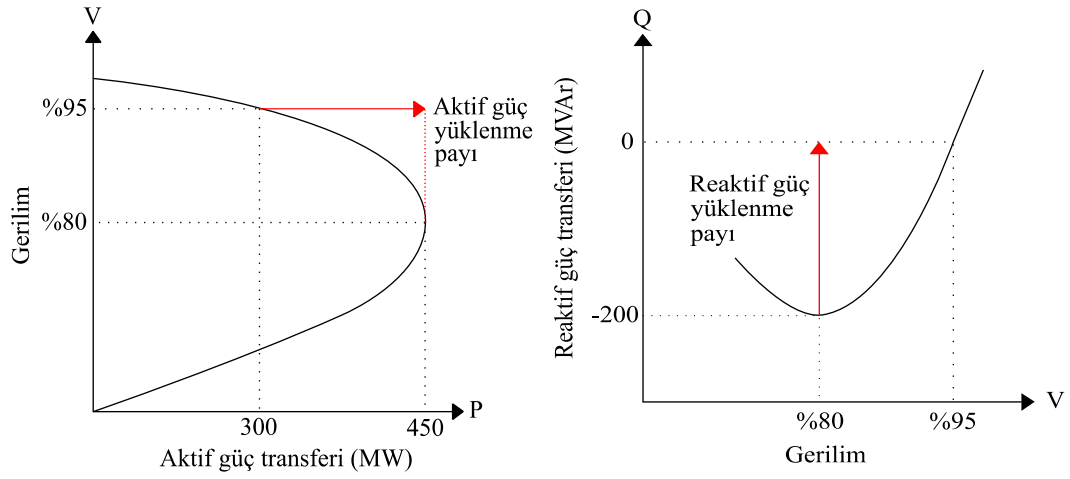
Denklem (3.15)'te görüldüğü üzere güç akışı performans endeksi Otr., EİH ve Jen. performans endekslerinin toplamına eşittir. Eşitlik (3.11) referans alınarak yapılan düzenlemeler ile aşırı yüklenmeleri derecelendirebilen matematiksel bir yaklaşım elde edilmiştir. Böylece, kullanılacak algoritmalar oluşturdukları topolojinin uygunluğunu belirlerken arıza esnasında meydana gelen yüklenmelerin ne kadar tehlikeli olduğuna karar verebilme yeteneğine sahip olmuşlardır. Eğer sınırların bu kadar keskin şekilde konulması istenmezse, kümeleme yöntemi olarak bulanık mantık yaklaşımı uygulanabilir. Çalışmamız kapsamında bulanık mantık yerine keskin sınırların tercih edilmesinin ana nedeni belirli sınırları aşan yüklenmelerin engellenmesi zorunluluğudur. Örneğin, %110 yüklenmede servis harici olan bir Otr.nin %109 yüklenmesi ile %111 yüklenmesi arasında çok keskin bir fark vardır. Açma sınırı aşıldıktan sonra koruyucu röleler, ters zamanlı açma karakteristiğine göre servis harici etmek için saymaya başlamaktadırlar. Örneğin, %111 yüklenen bir Otr. 380 sn. sonra servis harici olacak iken %120 yüklenen bir Otr. 180 sn.de açıyorsa, bu kısmı değerlendirmek için bulanık mantık yaklaşımından faydalanılabilir. Ancak çalışmamız kapsamında hiçbir ekipmanın açma sınırını geçmesine müsaade edilmeyecek şekilde tasarım yapıldığı için bu senaryoyu uygulamaya gerek duyulmamıştır.

3.2.2. Reaktif güç performans endeksi

N-1 analizi kapsamında daha önce de bahsedildiği gibi kontrol edilmesi gereken iki temel nokta bulunmaktadır: Birincisi, önceki bölümde ayrıntılarıyla sunulan ekipmanlar üzerindeki görünür güç akışlarıdır; ikincisi, arıza sonrası baralarda meydana gelen gerilim bozulmalarıdır. Bir iletim hattı karakteristik empedans yüklenmesinin[1] (KEY) altında yükleniyorsa kapasitöre benzer davranış gösterirken; üstünde yüklüyse reaktör gibi davranacaktır. Yani, yüklü bir iletim hattı reaktöre benzer bir davranış göstererek sistem gerilimini azaltmaya çalışacaktır. EİH'nin reaktansı direncinden daha büyük olduğu için (yaklaşık on kat olabilir) reaktif gücün uzak mesafelere iletilmesi, güç kayıplarından dolayı sistem geriliminde daha büyük etkilere neden olacaktır [71]. Buna ek olarak, iletim sisteminde yeterli miktarda reaktif güç rezervinin bulunmaması halinde sistem gerilimi düşme eğilimine devam edecektir.

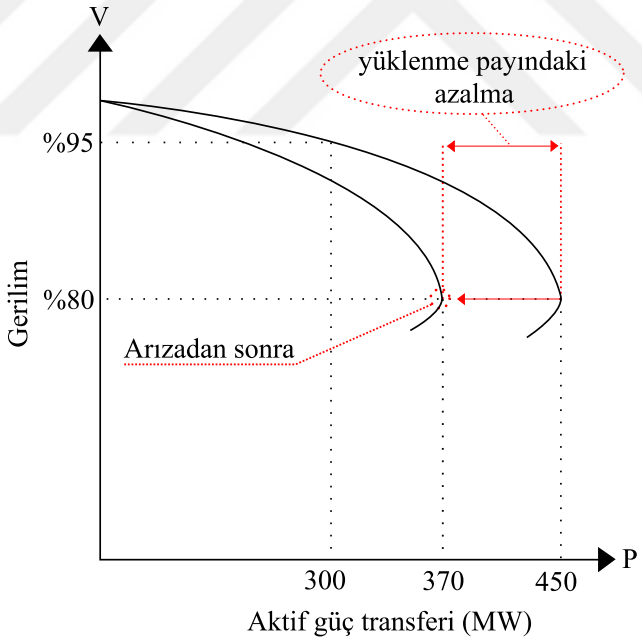
[1] Karakteristik empedans yüklenmesi (surge impedance loading) bir EİH'nin kapasitif veya endüktif reaktif güce ihtiyaç duymadığı yüklenme koşuludur.

Gerilim düşümü anlık sistem durumuna göre değişkenlik gösterebilen bir sınırı geçtiğinde ise gerilim çökmesi yaşanarak ciddi kesintiler meydana gelecektir.



(a) (b)

Şekil 3.7. Aktif ve reaktif yüklenme payları a) P-V eğrisi b) Q-V eğrisi [71]



Şekil 3.8. Arıza sonrası P-V grafiği [71]

İletim sisteminde gerilim kararlılığı bazı önemli baralar için üretilen P-V ve Q-V eğrileri vasıtasıyla incelenmektedir. P-V eğrisi vasıtasıyla gerilim kararsızlığına girmeden önce ne kadar aktif güç yüklenme payı bulunduğu görülmekte, Q-V eğrisi aracılığıyla da gerilim karasızlığı öncesi kaç MVar'lık reaktif güç payına sahip

olunduğu hesaplanabilmektedir. Şekil 3.7'de örnek P-V ve Q-V eğrileri verilmiştir. İletim sisteminde özellikle önemli EİH veya Otr.lerin servis harici olması durumunda aktif ve reaktif güç yüklenme paylarının önemli miktarda değişmesi muhtemeldir. Dolayısıyla, temel durumda izlenen gerilimler kararsızlıktan çok uzak gibi görünse bile N-1 durumunda hızlı bir gerilim kararsızlığı meydana gelebilir. Şekil 3.8'de arıza sonrasında yüklenme payında meydana gelebilecek azalma sembolik olarak gösterilmiştir. Arıza öncesi 150 MW'lık aktif güç yüklenme payının arıza sonrası 70 MW'a düştüğü örnek olması amacıyla belirtilmiştir. Arızalı ekipmanın sistemdeki önemine göre yüklenme payı farklı seviyelerde değişmektedir.

Gerçek bir iletim sisteminin işletiminde reaktif gücün ihmal edilmesi, hem ekipmanlar üzerindeki görünür güç yüklenmesinin hem de baralardaki gerilim bozulmalarının göz ardı edilmesi demektir. Dolayısıyla ekipmanların termal yüklenme sınırlarını geçip geçmediği tam olarak bilinemezken sistemin gerilim kararsızlığına gidip gitmediği hakkında da bir fikir sahibi olunamaz. Klasik optimizasyon yöntemlerinde problemi lineer hale getirmek amacıyla uygulanan doğru akım güç akışı eşitlikleri reaktif güç akışlarını ihmal ettiği gibi büyük çaplı sistemlerde aktif güç akışlarında dahi önemli sapmalara sebep olabilmektedir. Bu nedenle lineer kısıt analiziyle elde edilen çözümler, AA güç akışı kullanılarak gerilim bozulmaları ve reaktif güç akışları açısından test edilmelidir.

$$PE_V = \sum_{a=1}^{AS} \sum_{i=1}^{Nb} \frac{W_{vi}}{2n} \left(\frac{|V_i^a - V_i^{nom}|}{\Delta V^{sınır}} \right)^{2n} \tag{3.16}$$

Eşitlik (3.16)'da [70]'de önerilen Reaktif Güç Performans Endeksi (RGPE) eşitliği verilmiştir. AS servis harici edilecek ekipman sayısını, Nb bara sayısını, W_{vi} bazı önemli baralar için belirlenebilecek sabit bir katsayıyı, V_i^a a. arıza esnasında i. baranın gerilimini, V_i^{nom} i. baranın nominal gerilimini, $\Delta V^{sınır}$ gerilim bozulması için izin verilen aralığı ve n sabit bir katsayıyı temsil etmektedir.

RGPE, görünür güç performans endeksinin tamamlayıcısıdır. Yani, N-1 analizi kapsamında Otr. arızalarında gerilim bozulması açısından problem yaşanan bir topolojide EİH kısıtlarını irdelemeye ve Otr. kısıtlarında başarılı olsa da EİH arızalarında gerilim bozulması yaşanan bir bara düzeninde Jen. kısıtına bakmaya gerek

yoktur. GGPE kapsamında Otr. kısıtını geçemeyen topolojiye ceza verilerek elenmesi sayesinde aynı işlemin gerilim bozulmasında da kullanılmasına gerek duyulmamıştır. Çünkü GGPE açısından başarılı olamayan bir topolojide gerilim bozulması da kaçınılmazdır.

$$\frac{|V_i^a - V_i^{nom}|}{\Delta V^{sınır}} = \begin{cases} \frac{|V_i^a - V_i^{nom}|}{\Delta V^{sınır}}, & \left(\frac{|V_i^a - V_i^{nom}|}{\Delta V^{sınır}}\right)^2 \geq 0.25 \\ 0, & \left(\frac{|V_i^a - V_i^{nom}|}{\Delta V^{sınır}}\right)^2 < 0.25 \end{cases} \tag{3.17}$$

İletim sisteminde gerilimlerin 1,1 per-unit (pu) ile 0,9 pu arasında değişmesi kabul edilebilir bozulmalar olarak görülmektedir. Çalışmamız kapsamında sadece bu sınırı aşan gerilim bozulmalarının tespit edilmesi amacıyla Eşitlik (3.17) oluşturulmuştur. Buna göre, belirlenmiş sınırlar arasında gerçekleşen bozulmaların tamamı göz ardı edilecek iken bu sınırların dışına çıkan bozulmalar performans endeksini önemli miktarda etkileyecektir. Buradaki keskin sınır, gerilim çökmelerinin önüne geçebilmek amacıyla oluşturulmuştur. Eğer iletim sisteminin işletildiği bölgede gerilim değişimlerine karşı oldukça hassas sanayi kuruluşları bulunuyorsa belirtilen sınır küçültülerek izin verilen bozulma aralığı daraltılabilir.

3.2.3. Kısa devre performans endeksi

İletim sisteminde kısa devre akımlarının hesabı, kullanılacak kesicilerin seçimi açısından çok önemlidir. Meydana gelen bir kısa devre esnasında kesiciler arızalı bölgeyi sistemden ayırmadan önce sistemde çok yüksek akımlar dolaşmaktadır. Eğer sistemde bulunan kesiciler bu yüksek akımları kesebilecek kapasitede değilse ciddi problemler ile karşı karşıya kalınır. İletim sisteminde hesaplanan kısa devre akımlarına göre tesis edilen kesicilerin kapasitesi yıllar sonra yetersiz kalabilmektedir. Artan enerji talebini karşılamak amacıyla sürekli olarak genişleyen iletim sisteminde, eşdeğer empedansın azalması nedeniyle kısa devre akımları da sürekli artmaktadır. Dolayısıyla daha önce hesaplanmış KDA'ya göre tesis edilmiş kesiciler mevcut durumdaki akımları kesecek kapasiteye sahip olamayacak hale gelmektedir.

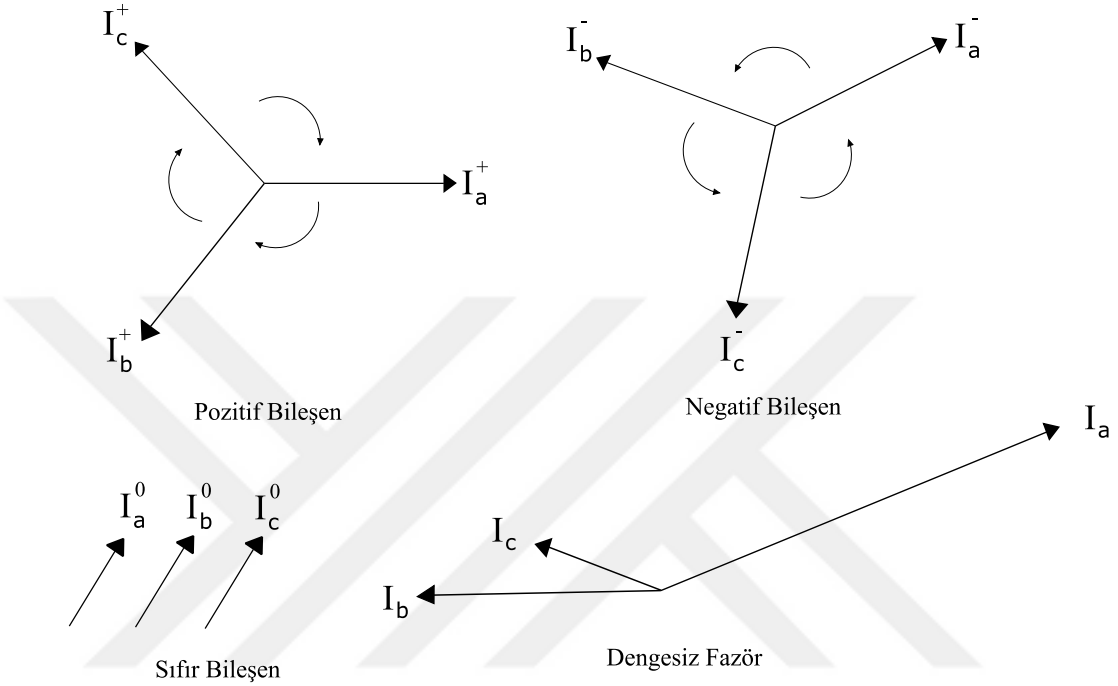
Kısa devre temel olarak dengeli ve dengesiz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Dengeli kısa devre arızası üç fazlı kısa devre arızasını, faz-toprak, iki-faz ve iki-faz toprak gibi

arızalar da dengesiz arızaları temsil etmektedir. Kısa devre akımlarının genliği, jeneratörlerin iç empedansına ve aradaki devrenin empedansına bağlıdır. Kısa devre esnasında bir jeneratörün empedansı sabit değildir. Bu nedenle kısa devre hesaplamaları için jeneratörlerin bu davranışı alt-geçiş (subtransient), geçiş (transient) ve kararlılık (steady-state) olmak üzere üç sürece bölünmüştür. Arıza esnasındaki alt-geçiş süreci çok büyük akımların oluşmasına neden olsa da sadece birkaç çevrim devam ederken; geçiş süreci, nispeten daha uzun sürmektedir (yaklaşık 30 çevrim) [72]. İletim sistemimizde kesicilerin arıza noktasını sistemden ayırma zamanı, arızanın geçiş safhasına denk gelmektedir. Tez kapsamında, KDA hesapları geçiş sürecindeki akımlar dikkate alınarak yapılmıştır fakat iletim sistemine eklenecek yeni kesiciler için alt-geçiş safhasının dikkate alınması gerektiğini belirtmekte fayda vardır.

KDA hesabında, devrenin Thevenin eşdeğerini elde etmek gibi şebeke küçültme yöntemi tercih edilebilir fakat bu yöntemin büyük ölçekli devrelerde uygulanması zordur ve sistem büyüdüğünde hata yapılmasına neden olmaktadır. Şebekede bulunan herhangi bir baranın dengeli arıza sırasındaki kısa devre akımını ve bara gerilimini hesaplayabilmek için bara empedans matrisi kullanılmaktadır. Dengesiz arızaların hesabında ise simetrili bileşenler yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. Simetrili bileşenler, dengesiz bir akım veya gerilim fazörünün üç dengeli simetrik bileşene ayrılması yaklaşımının bir sonucudur. Dolayısıyla tüm dengesiz arızaların hesabında pozitif, negatif ve sıfır bileşen empedans matrislerinin oluşturulması gerekmektedir. Şekil 3.9'da dengesiz bir fazörün simetrili bileşenleri verilmiştir. İletim hattının, jeneratörün, yıldız bağlı yükün ve transformatörün bileşen empedanslarının karakteristiği farklıdır. Özellikle transformatörlerin bağlantı gruplarına göre sıfır bileşen empedans karakteristiği önemlidir. Bileşen empedans matrislerinin oluşturulmasına, bara veya iletim hattı üzerindeki dengeli veya dengesiz arıza akımı denklemlerine ve arıza esnasındaki gerilim eşitliklerine [72]'de verilen çalışmada ayrıntılı bir şekilde yer verilmiştir.

Çalışmamız kapsamında hem Newton-Raphson güç akışı sonuçları hem de arıza akımı hesapları PSS/E güç sistemi analiz programından faydalanılarak elde edilmiştir. Bu programın seçilmesindeki ana neden, esnek bir yapıya sahip olan Python programlama dilinde yazılmış olmasıdır. Aynı zamanda PSS/E programı tarafından oluşturulan uygulama programlama ara-yüzü (application program interface) [69] ayrıntılı ve

açıklayıcı bilgilerle donatıldığı için yazılım açısından kolaylık sağlamaktadır. Son olarak, TEİAŞ'ın iletim şebekemizin yapısını YTBS üzerinden PSS/E programında kullanılabilecek formatta (sav dosyası) indirilebilmesini mümkün kılması, bu programı kullanmada bir diğer önemli etkendir.



Şekil 3.9. Dengesiz bir fazörün simetrili bileşenler formatında ifadesi

Henüz BBO probleminin amaç fonksiyonunu matematiksel olarak ifade etmesek de birden fazla amacı aynı anda gerçekleştirmeye çalıştığımız açıktır. Bu sebeple, BBO problemi çok-amaçlı (multi-objective) optimizasyon problemidir. Çoklu bir amacı gerçekleştirebilmek için araştırmacılar çeşitli yöntemler kullanmışlardır. Bu yöntemlerden belki de ilk kullanılanı toplama yöntemidir. Toplama yönteminde, amaçlar belirli katsayılar ile çarpılır, bölünür, toplanır veya çıkarılır, daha sonra belirli basit matematiksel işlemlerden geçirilen amaçlar birbirleriyle toplanmaktadır. Optimizasyon algoritması ise bu toplam değeri minimize etmeye çalışır. Böyle bir yöntemin kullanılması durumunda kısa devre akımlarıyla diğer performans endekslerinin benzer ölçekte olması için bazı işlemlere tabi tutulması gerekir. Bu kapsamda oluşturulan Denklem (3.18)'de Kısa Devre Performans Endeksi (KDPE) gösterilmektedir.

$$PE_{KD}=\sum_{i=1}^{N_b}\begin{cases}\left(\frac{KDA_i}{K_i}\right)^n, & KDA_i \geq KDA_i^{sınır}\\ 0, & KDA_i < KDA_i^{sınır}\end{cases} \quad (3.18)$$

PE_{KD} kısa devre performans endeksini, N_b toplam bara sayısını, KDA_i i. barada meydana gelen KDA'yı, K_i ölçeklendirme katsayısını, n sabit bir üstel katsayıyı ve $KDA_i^{sınır}$ i. barada bulunan kesicinin kısa devre kesme kapasitesini ifade etmektedir. Denklemden anlaşılacağı üzere, eğer barada meydana gelen kısa devre akımları kesici kapasitesini aşacak mahiyetteyse bu durum kısa devre performans endeksini artıracak bir etkiye sebep olacaktır. Artan KDPE ise oluşturulan topolojinin başarısız olduğunu göstermektedir.

İletim sistemi için geçici rejim kararlılığı açısından en ciddi arıza 3-faz kısa devredir. Çünkü böyle bir arızada döner kütlede depolanan enerji, tüketim birimlerine hiç iletilemediği için daha fazla olmaktadır. Bu nedenle depolanan bu enerjiyi boşaltmak için gereken süre de daha fazla olacaktır. Ancak kısa devre akımlarının genliği açısından aynı ifadeyi kullanamayız. Çünkü sistemin yapısına ve arıza yerine göre dengesiz arızalar üç faz arızadan daha büyük genliklere ulaşabilmektedir. Tez çalışmamız kapsamında, Türkiye Elektrik İletim Sisteminde hem üç-faz hem de faz-toprak arızalarına bakarak değerlendirme yapılmıştır. Ancak IEEE 14, 57 ve 118-baralı test sistemlerinde böyle bir hassasiyete gerek duyulmadığı için sadece üç-faz arıza tipi dikkate alınmıştır.

3.2.4. Güvenilirlik performansı

İletim sisteminin güvenilirliğini sağlamak amacıyla N-1 analizi uygulanacağı birçok kez ifade edilmiştir. Bu analiz neticesini değerlendirebilmek için görünür güç ve reaktif güç performans endeksleri de tanıtılmıştır. Ancak farklı bir bakış açısıyla oluşturulan Eşitlik (3.19) ile hem görünür güç hem de reaktif güç performans endeksi tek bir matematiksel yaklaşım olarak ifade edilmiştir.

$$GP=\sum_{c=1}^{AS}\sum_{i=1}^{N} e^{\left(\left(\frac{\left|\overline{bd_i^c}-1\right|}{\overline{ga}_i}\right)-\overline{ga}_i\right)*n} \quad (3.19)$$

AS daha önce de belirtildiği gibi sistemde kontrol edilen toplam kısıt sayısını, N iletim ekipmanlarının yüklenme profili inceleniyorsa toplam EİH ve Otr. sayısını ancak bara gerilimleri inceleniyorsa toplam bara sayısını, $\overline{bd_i^c}$ i. ekipmanın c. kısıttaki birim büyüklüğü, $\overline{ga}_i$ i. ekipmanda belirli düzeyde bozulmalara izin verebilmek için kullanılan pu cinsinden güvenlik aralığını ve n sabit bir katsayıyı temsil etmektedir. Yaklaşımın önerilmesindeki ana neden GGPE ile RGPE yaklaşımlarından elde ettiğimiz benzer işleyişi tek bir denklem üzerinden gerçekleştirmektir.

Tek bir denklem üzerinden farklı konular hesaplanacağı için hedef olguya göre parametre ayarı yapılmalıdır. Örneğin, Denklem (3.19) ile sistemin görünür güç performansı elde edilecek ise aşağıda verilen düzenlemeler yapılmalıdır;

- N toplam EİH ve Otr. sayısını temsil eder
- $\overline{bd_i^c}$ i. EİH veya Otr. üzerinde c. kısıttaki pu cinsinden görünür güç akışını ifade eder
- GP'nin yalnızca $\overline{bd_i^c} > 1$ koşulunun sağlanması durumunda hesaplanması gerekir
- $\overline{ga}_i$ i. ekipmanın izin verilen aşırı yüklenme miktarını temsil eden güvenli aralığı ifade eder. Örneğin, i. ekipmanın Otr. olması durumunda, izin verilebilecek aşırı yüklenme miktarı %100-%110 seçilirse ilgili değişken 0,1 (1,1-1,0=0,1) yapılır. Diğer yandan i. ekipmanın EİH olması durumunda, izin verilebilecek aşırı yüklenme miktarı %100-%125 aralığı seçilirse, ilgili değişken 0,25 (1,25-1,0=0,25) olarak düzenlenir. Eğer EİH'de %125'in üzerinde bir yüklenme gerçekleşirse GP'nin sonucu üstel şekilde artacak ve ilgili topoloji başarısız olacaktır.

Belirtilen basit düzenlemelerin yapılması durumunda, Eşitlik (3.19) N-1 halinde aşırı yüklenmeleri tespit ederek görünür güç performans endeksini hesaplayabilecek kabiliyette olmaktadır. Diğer taraftan, eğer denklemin gerilim bozulmaları açısından kullanılması gerekiyorsa, yukarıda açıklanan düzenlemelere benzer şekilde aşağıda verilen basit ayarlamaların yapılması gerekmektedir.

- N bu senaryoda toplam bara sayısını ifade eder
- $\overline{bd_i^c}$ i. barada c. kısıttaki pu cinsinden gerilim bozulma miktarını temsil eder

- GP'nin yalnızca $\overline{bd_i^c} > 1{,}1$ ve $\overline{bd_i^c} < 0{,}9$ koşullarından birinin oluşması durumunda hesaplanması gerekir
- $\overline{ga}_i$ i. barada izin verilen gerilim bozulması miktarını temsil eden güvenli aralığı ifade eder. Örneğin, gerilim bozulmasının %110'dan büyük ve %90'dan küçük olması tercih edilmezse, ilgili değişken 0,2 olarak kullanılır. Eğer %105-%95 bandı güvenli aralık olarak seçilirse bu durumda $\overline{ga}_i$ 0,1 yapılır.

Yapılan açıklamalardan anlaşıldığı üzere değişkenlerdeki basit düzenlemeler ile hem görünür güç performansı hem de reaktif güç performansı hesaplanabilmektedir. Denklem (3.19) ile iki farklı kavramın tek formül üzerinden değerlendirilebilmesi sağlanmış olup, IEEE 57-baralı test sisteminde N-1 performansının değerlendirilmesi safhasında kullanılmıştır.

3.3. Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar

Tez çalışmamız kapsamında, İSO'lar tarafından sürekli olarak çözülmeye çalışılan gerçek bir problemi ele alarak önceki çalışmalarda yapılmamış yaklaşımlar incelenmiştir ve elde edilen çıktıların şebekemizin işletiminde önemli katkılar sağlaması ve yenilikler getirmesi amaçlanmıştır. Literatürde BBO probleminin amaç fonksiyonunda yoğun olarak işletme maliyetlerini azaltma anlayışı mevcuttur. Nadiren de olsa işletme maliyetleri azaltılırken N-1 durumu ve kısa devre akımları dikkate alınmıştır fakat bu çalışmalarda da lineer olmayan bir problem çeşitli ihmaller vasıtasıyla lineer bir problem haline getirilerek yapılmıştır. Dolayısıyla bu çalışmalarda reaktif güç akışı ve gerilim bozulmaları ihmal edilmiştir.

Çalışmamız kapsamındaki ana amaç kısa devre akımlarını sınırlandırmaktır. Ancak KDA'yı sınırlandırırken sistemin güvenlik kısıtlarının da muhakkak irdelenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla ikinci amacımız N-1 durumunda ekipmanlar üzerinde oluşacak aşırı yüklenmeleri ve gerilim bozulmalarını önlemektir. İletim sistemini gereğinden fazla bölmek arıza esnasında geçici durum kararlılığını olumsuz yönde etkileyebilecek bir yaklaşım olabilir. Dolayısıyla üçüncü amacımız olabildiğince az bara bölmektir. Yani mümkün olan en az bara bölme işlemiyle KDA'lar kısıtlanmalı ve N-1 güvenliği sağlanmalıdır.

$$BBM=\sum_{i=1}^{BB} s_i(W_p x BC_i) \quad (3.20)$$

Eşitlik (3.20)'de BBM bara bölme maliyetini, BB bölünebilecek bara sayısını, s_i bazı baraların bölünme maliyetini diğerlerinden ayrıştırmak için kullanılan sabit bir katsayıyı, W_p bara bölme maliyeti ve BC_i i. baranın bölünüp bölünmediğini belirten ikili kodu temsil etmektedir. Katsayılar hassasiyete göre ayarlanarak amaç fonksiyonuna dahil edilmelidir. Örneğin, rüzgâr potansiyelinin çok yoğun olduğu bölgede bulunan bir TM'de üretim belirsizliğinden dolayı bara bölme işleminin yapılması istenmeyebilir. Böyle bir durumda s_i katsayısı ayarlanarak ilgili barada kuplaj bölme durumunda ciddi bir maliyetle karşılaşılması ve bu nedenle algoritmaların öncelikle diğer seçenekleri değerlendirmesi sağlanmaktadır. W_p bara bölme maliyeti, sistemde oluşan kısıtların maliyetini geçmeyecek şekilde seçilmelidir; aksi halde, algoritmalar bara bölme işlemi yapmaktansa sistem güvenilirliğini azaltmayı tercih edecektir.

Şu ana kadar açıklanan bölümlerle birlikte BBO probleminde minimize etmeye çalıştığımız amaçların tamamı belirtilmiş oldu. Aynı anda birden fazla amaç gerçekleştirilmeye çalışıldığı için BBO problemi çok-amaçlı optimizasyon problemidir. Böyle bir problemi çözmek için araştırmacılar çeşitli yöntemler kullanmıştır [73]. Bu yöntemlerden en basiti toplama (aggregation) yöntemidir. Bu yönteme göre oluşturduğumuz amaç fonksiyonu Eşitlik (3.21)'de verilmiştir.

$$\min. \sum w_1 x PE_{GA} + w_2 x PE_V + w_3 x PE_{KD} + w_4 x BBM \quad (3.21)$$

Toplama metodunda amaç fonksiyonunda bulunan amaçları önemine göre organize etmek için amaçlar çeşitli matematiksel operatörlerle birlikte kullanılır. Bu nedenle, amaçlar *w* ağırlıklarıyla çarpılarak amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. Toplama metodu oldukça basit olması sebebiyle avantaj sağlasa da amaçların ağırlığını düzenlemek aslında oldukça zor bir işlemdir. Bu ağırlıkları düzenleyebilmek için problemi iyi analiz etmek gerekir. Üstelik amaç sayısı fazla olduğu zaman ağırlıkları düzenlemek olanaksız hale gelmektedir. BBO problemi kapsamında amaç sayısı fazla olmadığı ve problemin yapısı iyi bilindiği için toplama yöntemi kullanılabilir.

Nitekim, Denklem (3.21)'de verilen amaç fonksiyonu IEEE-14 baralı test sisteminde denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

Diğer taraftan, geniş bir uygulama alanında kendine yer bulan Pareto-tabanlı teknikler çok-amaçlı optimizasyon problemleri için başarılı sonuçlar vermektedir. Pareto tekniğinde, kazanılacak bir fayda karşılığında bir şeyi feda etme (trade-off) konsepti kullanılmaktadır. Örneğin, oluşturulan bir topolojide önceki topolojilere göre kısa devre akımları daha düşük çıkarken N-1 güvenliğinde gözle görülür bir iyileşme sağlanamıyorsa, en azından amaçlardan birinde iyileşme görüldüğü için bu duruma Pareto iyileşmesi (Pareto-improvement) denmektedir. Bu durum bir ortak kararın sonucudur. Yani, bir amaçta iyileşme görülürken hiçbir amaçta gerileme görülmediği için bu yeni pozisyona geçilmesi ortak alınan mantıklı bir kararın sonucu olmaktadır. Pareto iyileşmesi sağlanmadığı duruma gelindiğinde ise artık Pareto-optimal elde edilmiş olmaktadır.

Sezgi-üstü yöntemlerle çok-amaçlı optimizasyon problemlerin çözümünde kullanılan Pareto-tabanlı teknik tez çalışmamız kapsamında kullanılmamıştır. Pareto-tabanlı tekniğin tercih edilmemesinin altında iki sebep yatmaktadır. Birincisi, kısa devre akımları şebekede belirlenen sınırı aşıyorsa N-1 analizi yapmaya gerek olmamasıdır. Bunun anlamı, kısa devrede bir iyileşme olması durumunda N-1 kriterinde de bir iyileşme olup olmadığının kontrol edilmesine kısa devre sınırı aşıyorsa ihtiyaç yoktur. N-1 analizi çözüm süresini doğrudan etkilediği için ancak kısa devre sonuçları uygunsa yapılmalıdır. İkincisi, KDA minimize edilmek zorunda değildir. KDA'nın belirlenen sınırın altında olması gereklidir ve yeterlidir. EİS'i, mümkün olan en küçük KDA'yı sağlayacak şekilde düzenlemek gereksiz bir işlem olmanın yanında şebekenin güç kayıplarını da artıracaktır.

Araştırmacıların uygulaması basit olduğu için yaygın şekilde kullandığı bir başka yöntem de Ɛ-kısıtlama (Ɛ-constraint) tekniğidir. Bu yöntemde, amaç fonksiyonunda bulunan amaçların biri hariç hepsi kısıtlara dönüştürülür. En önemli görülen amaç, amaç fonksiyonu olur. Yani, çok-amaçlı problem tek-amaçlı probleme dönüştürülür. Diğer amaçlar da kabul edilebilir sınırlamalar ile kısıt haline dönüştürülür. BBO problemimizin yapısına daha uygun olması sebebiyle Ɛ-kısıtlama yöntemi IEEE 57-baralı test sisteminde uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Pareto-tabanlı tekniğin tercih edilmeme sebebi anlatılırken KDA'nın minimize edilmesine ihtiyaç olmadığı ifade edilmişti. Aslında, problemi çözmede ana amacımız KDA'yı sınırlandırmak olsa bile buna amaç fonksiyonunda yer vermemek çözüm süresi açısından daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Dolayısıyla, KDA kısıt formatına dönüştürülerek sınırı aşan topolojilerde amaç fonksiyonunun hesaplanmasına gerek kalmayacaktır. Amaç fonksiyonunda kalan diğer amaçlar N-1 güvenlik performansı ve bara bölme maliyetidir. N-1 güvenlik performansı kapsamında hesaplanan reaktif güç performansı kısıt olarak yazılabilir fakat çalışmamız kapsamında önerilen Denklem (3.19) ile amaç fonksiyonunun içinde bulunabildiği için kısıt formatına dönüştürülmedi. Aynı zamanda bölünebilecek bara sayısı da kısıt formatına dönüştürülerek amaç fonksiyonundan çıkarıldı.

$$\text{min.} \quad GP \tag{3.22}$$

Denklem (3.22)'de minimize edilmesi amaçlanan tek bir amaç bulunmaktadır. Güvenilirlik performansı GP, düzenlenen topolojinin arıza durumuna ne kadar dayanıklı olduğunu göstermektedir. İçeriğinde hem görünür güç akışları hem de gerilim bozulmaları bulunmaktadır.

Toplama metodu ve Ɛ-kısıtlama tekniğiyle elde edilen amaç fonksiyonlarının her ikisinin de sağlaması gereken kısıtlar bulunmaktadır. Ancak Ɛ-kısıtlama tekniğinde amaç fonksiyonundan çıkarılan amaçlar kısıt bölümüne taşındığı için toplama metodunda olmayan kısıtlar aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

Ɛ-kısıtlama tekniğine özel kısıtlar,

$$KDA_i < KDA_i^{sınır} \tag{3.23}$$

$$\sum_{i=1}^{BB} BC_i < BBS \tag{3.24}$$

KDA_i i. baradaki kısa devre akımını, $KDA_i^{sınır}$ i. baradaki kısa devre akımı sınırını, BC_i baranın bölünüp bölünmediğini temsil eden ikili kodu, BB bölünebilecek bara sayısını ve BBS izin verilen maksimum bara bölme sayısını temsil etmektedir. Kullanılan toplama yaklaşımı ve Ɛ-kısıtlama yöntemi için tanımlanan ortak kısıtlar aşağıda verilmiştir.

Ortak kısıtlar,

$$P^{i}_{Jen.}\text{-}P^{i}_{Tal.}: \sum_{j=1}^{N} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}\text{-}\delta_i+\delta_j), \text{i:2'den n'e kadar} \quad (3.25)$$

$$Q^{i}_{Jen.}\text{-}Q^{i}_{Tal.}:\text{-} \sum_{j=1}^{N} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij}\text{-}\delta_i+\delta_j), \text{i:2'den n'e kadar} \quad (3.26)$$

$$P^{Min.}_{Jen.} \leq P_{Jen.}{}^{i} \leq P^{Maks.}_{Jen.} \quad (3.27)$$

$$Q^{Min.}_{Jen.} \leq Q_{Jen.}{}^{i} \leq Q^{Maks.}_{Jen.} \quad (3.28)$$

$P^{i}_{Jen.}$ ve $Q^{i}_{Jen.}$ i. baradaki jeneratörün aktif ve reaktif gücünü, $P^{i}_{Tal.}$ve $Q^{i}_{Tal.}$ i. baradaki talebin aktif ve reaktif gücünü, V_i ve δ_i i. baradaki gerilimin genlik ve açısını, V_j ve δ_j j. baradaki gerilimin genlik ve açısını, Y_{ij} ve θ_{ij} i-j hattının admitansını ve empedans açısını, $P^{Min.}_{Jen.}$ ve $Q^{Min.}_{Jen.}$ i. baradaki jeneratörün minimum aktif ve reaktif gücünü, $P^{Maks.}_{Jen.}$ ve $Q^{Maks.}_{Jen.}$ i. baradaki jeneratörün maksimum aktif ve reaktif gücünü ifade etmektedir.

3.4. Bölüm Değerlendirmesi

Ülkemizin gelişen sanayisi ve büyüyen ekonomisine paralel olarak enerjiye olan talebin artmaya devam etmesi beklenmektedir. Klasik şebekelerde enerji iletimi, üretim ve dağıtım arasında bir köprü görevi görmesinin yanı sıra gerilim ve frekans dengesini korumasıyla enerji sisteminin tamamını dengede tutan önemli bir unsurdur. Üretim ve dağıtım tarafında yaşanan problemler iletim sistemini etkilemeyebilir fakat iletim sisteminde yaşanan sorunlar hem üreticiyi hem de tüketiciyi doğrudan etkilemektedir.

Türkiye'de yüksek gerilim iletim sistemi Türkiye Elektrik İletim AŞ tarafından yönetilmektedir. TEİAŞ talep tarafında gerçekleşecek artış miktarını çeşitli analizler yaparak tahmin etmeye çalışmakta ve on yıl sonrasının vizyonuyla iletim sistemini genişletecek yatırımlar yapmayı planlamaktadır. İletim altyapısının genişlemesi sadece yeni iletim hatlarının sisteme entegre edilmesiyle değil aynı zamanda üretim santralleri ve 400 kV ile 154 kV arasında köprü görevi gören ototransformatörler vasıtasıyla da olmaktadır.

Genişleyen iletim sistemi, eşdeğer empedansın azalması nedeniyle meydana gelebilecek arızalar esnasında oluşan kısa devre akımlarının yükselmesine yol açmaktadır. Özellikle en fazla 31.5 kA akım kesme kapasitesi olan kesicilerin bulunduğu 154 kV gerilim seviyesinde oluşacak kısa devre akımları, önlem alınmadığı taktirde çok yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bir yandan 2030 vizyonundan ziyade günümüzde yaşanan aşırı kısa devre akımlarını sınırlandırmaya çalışan iletim sistemi operatörleri, diğer yandan dinamik şebekenin arz güvenliğini sürdürmeyi amaçlamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, dengeleyici sistemlerin geliştirilmesi ve maliyetlerin kabul edilebilir düzeylere düşmesiyle birlikte şebekelerdeki yerini giderek artırmaktadır. Türkiye Enerji İletim Sisteminde 2020'nin ilk 6 ayında Rüzgâr ve Güneş enerji kaynaklarının üretimdeki payı %12'yi geçmiştir ve bu kaynakların daha yüksek oranda yaygınlaştırılması beklenmektedir. Bu kaynaklar, karbon salınımını düşürmesi ve doğal oluşumları kullanarak rezerve ihtiyaç duymaması gibi özellikleriyle enerji alanında vazgeçilemez bir konuma sahip olmuştur fakat kaynak mevcudiyetinin belirsizliği nedeniyle üretim miktarında yaşanan hızlı değişimler, iletim sistemi işletimini giderek zorlaştırmaktadır. Üretim tarafında yenilenebilir enerji kaynakları ve tüketim tarafında ağır sanayinin çektiği darbeli yükler, iletim sistemi operatörlerinin N-1 güvenliğini sağlama noktasında alacağı kararları zorlaştırmaktadır.

Kısa devre akımlarını sınırlandırmak ve N-1 güvenliğini sağlamak amacıyla herhangi bir ek yatırıma gerek kalmadan uygulanabilecek üç temel yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan biri iletim hatlarından arz güvenliğini tehlikeye sokmayacak şekilde uygun olanları servis harici etmek suretiyle kısa devre akımlarını sınırlandıran Optimal iletim Sistemi Anahtarlaması yöntemidir. KDA'yı sınırlandırmak amacıyla kullanılabilecek bir diğer yöntem, iki baralı transformatör merkezinde bulunan fiderleri uygun baralara dağıtarak kuplaj kesicinin servis harici edildiği Bara Bölme Optimizasyonu tekniğidir. Son olarak OİA ve BBO yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan şebeke topoloji optimizasyonu, KDA'yı sınırlandırmak amacıyla kullanılabilecek üçüncü yaklaşımdır.

Türkiye şebekesinde 154 kV gerilim seviyesinde özellikle enerjiye talebin yoğunlaştığı büyükşehirlerde iletim sistemini tam kuplaj[1] işletmek mümkün değildir. Örneğin Bursa şehir merkezine yakın bazı TM'lerde baraların birleştirilmesi halinde 48 kA'i aşan üç faz kısa devre akımlarının oluşacağı hesaplanmaktadır. Dolayısıyla İSO'lar zaten KDA'yı sınırlandırmak amacıyla bara bölme tekniğini kullanmaktadır ve edinilen işletme tecrübesiyle birlikte iletim sisteminin direncini (resilience) ve güvenilirliğini (reliability) sürdürmektedir. Ancak özellikle sisteme eklenen yeni Otr.ler, KDA'yı sınırlandırma ve N-1 güvenliğini sağlama arasındaki hassas dengeyi sürdürebilmeyi giderek zorlaştırmaktadır.

Mevcut işletme koşulları dışında sistemde yapılması gereken arıza, bakım ve onarım çalışmaları için iletim sistemi teçhizatlarının servis harici edilmesi gerekmektedir. İletim sisteminde herhangi bir nedenle bir teçhizatın servis harici edilmesi sonrasında yine sistemin N-1 güvenliği sürdürülmelidir. Dolayısıyla İSO'lar bir EİH'yi veya Otr.ü planlı bakım kapsamında veya arıza durumunda servis harici ettikten sonra iletim sisteminin güvenliğini sağlayabilmek için topolojik düzenlemeler yapmak zorundadır. Önemine binaen özellikle tüketimin yoğun olduğu yaz ve kış aylarında servis harici edilemeyecek bazı EİH veya Otr.lerin uygun bara dağılımları yapılarak devreden çıkarılabilir duruma getirilmesi mümkündür. Bu bağlamda OİA, BBO veya ŞTO gibi yöntemlerin kullanılması ile bakım-onarım çalışmaları için servis harici edilmesi mümkün görünmeyen cihazların devreden çıkarılabilecek şekilde uygun topolojik dağılımın oluşturulmasıyla birlikte arıza önleyici faaliyetlerin yapılmasına destek olunacaktır.

Nedeni ne olursa olsun, İSO'lar sistem güvenliğini sağlamak için gerekli bara düzenlerini oluşturmak zorundadır. Sınırlandırılmış bölgeler halinde bakıldığında bile 10^{10} ile 10^{30} arasında değişen bir çözüm uzayıyla karşı karşıya kalınmaktadır. Bu nedenle topoloji düzenlemesi karar süreçlerinde yapay zekâ optimizasyon algoritmalarından destek almak, sistem güvenliği açısından son derece önemlidir. Bugün destek mahiyetinde olan bu konunun 2030 vizyonunda şebeke işletirken mutlaka başvurulması gereken bir öneme haiz olacağını düşünmekteyiz. Sadece kısa devre akımlarını sınırlandırmak ve N-1 güvenliğini sağlamak için değil aynı zamanda

[1] Sitemde bulunan kuplaj kesicilerin tamamını serviste tutma işlemi kastedilmektedir.

işletme maliyetlerini azaltmak amacıyla da topoloji düzenlemesinin yapılacağı günlerin geleceğini öngörmekteyiz.

İSO'lara alacakları kararlarda yardımcı olabilmek için çözülmesi gereken bara bölme optimizasyonu problemi çok-amaçlı optimizasyon problemidir. Bu tür problemler için kullanılabilecek başarılı yöntemlerden biri Pareto-tabanlı tekniklerdir. Ancak tasarladığımız BBO probleminde amaç sayısı kontrol edilebilir düzeyde olduğu için toplama metodu kullanılmıştır. Toplama metodunda kısa devre hesabı yapıldıktan sonra N-1 analizinin de yapılması gerekmektedir. Sezgi-üstü yöntemlerle 3,000 ila 50,000 arasında yineleme işlemi gerçekleştiği için gerek olmadığı halde her yinelemede N-1 analizinin yapılması çözüm süresini artırmaktadır. Dolayısıyla bir yöntemin daha değerlendirilmesi uygun görülmüştür.

Uygulanan ikinci teknik Ɛ-kısıtlama yaklaşımı olmuştur. Bu tekniğin seçilmesindeki ana nedenler uygulama basitliği ve amaçlarımızın aynı zamanda birer kısıt olmasıdır. Kısa devre akımlarını sınırlandırmak ana amacımız ancak her barada mümkün olan en küçük KDA'nın elde edilmesi gibi bir yaklaşıma ihtiyaç yoktur. KDA'nın belirlenen sınırın altında olması yeterlidir. Böylece, ana amacımızı kısıta çevirerek kısa devre açısından uygun olmayan hiçbir topolojide N-1 analizi yapılmamıştır. Dolayısıyla Ɛ-kısıtlama tekniğinde çözüm süreleri daha kullanışlı olmuştur.

Detaylı şekilde bahsedilen N-1 analiz sürecini hızlandırma teknikleri ile başlangıçta sezgi-üstü algoritmalarda kullanımı mümkün gözükmeyen bu analiz, kullanılabilir formata getirilmiştir. Lineer olmayan N-1 analizinin yanı sıra vektörize edilmiş lineer kısıt analizi de alternatif bir yöntem olarak sunulmuştur. Görünür güç ve reaktif güç endekslerinde gerçek iletim sisteminde kullanılabilmesi amacıyla uygun düzenlemeler yapılmıştır. Toplama yönteminde kullanabilmek amacıyla kısa devre performans endeksi önerilmiştir. Son olarak, Ɛ-kısıtlama tekniğinde tek bir amaç fonksiyonu kalacağından görünür güç ve reaktif güç performansını temsil edecek şekilde güvenilirlik performans endeksi önerilmiştir. BBO problemi kapsamında geliştirilen hızlandırma yaklaşımları, performans endeksleri ve amaç fonksiyonları önceki çalışmalarda böyle bir problem için daha önce kullanılmamış özgünlüktedir. Açıklanan yöntemler gerek IEEE test sistemlerinde gerekse gerçek iletim sisteminde kullanılmış ve uygun çözümler elde edilmiştir.

4. SEZGİ-ÜSTÜ ALGORİTMALAR

Sezgisel algoritmalar, optimal noktayı bulmayı garanti etmeseler bile makul bir hesaplama süresi içerisinde en uygun çözümlerden birini keşfetmeye çalışırlar. Bu algoritmalar genellikle probleme özeldir ve bir problem için kullanılan algoritma farklı bir problemi çözmek için kullanılamaz. Bunun aksine, sezgi-üstü teknikler farklı disiplinlere mensup problemleri çözebilmek için geliştirilmiştir. Yani bir sezgi-üstü algoritma konuşma işleme (speech processing) problemini çözebildiği gibi elektrik şebekelerinde ünite programlaması (unit commitment) probleminde de kullanılabilmektedir [74].

Sezgi-üstü algoritmalar, basitlik (simplicity), esneklik (flexibility), türevsiz-işleyiş (derivation-free) ve yerel optimalden sakınma (local-optimal avoidance) özellikleriyle optimizasyon problemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yapıları basittir çünkü, çok basit kavramlardan ilham alırlar. Bu ilhamlar evrimsel kavramlar, fizik kanunları veya hayvan davranışları ile ilgilidir. Bu algoritmalar esnektir çünkü, algoritmada özel bir değişiklik yapılmadan farklı problemlere uygulanabilmektedir. Sezgi-üstü algoritmalar sistemleri bir kara kutu (black box) olarak gördüğü için sadece girişler ve çıkışlar önemlidir. Bu algoritmaların büyük çoğunluğu türevsiz bir mekanizmaya sahiptir. Kısmi türeve dayalı (gradient-based) optimizasyon yaklaşımlarının aksine, sezgi-üstü algoritmalar problemleri stokastik olarak optimize ederler. Son olarak sezgi-üstü algoritmalar geleneksel optimizasyon teknikleriyle karşılaştırıldıklarında yerel optimal noktalardan kaçınma bakımından üstün bir yeteneğe sahiptir [2].

Her şey karşılıklıdır veya bedava yemek yok (No-Free Lunch (NFL)) teoremi, optimizasyon problemlerinin tamamını çözebilen bir sezgi-üstü algoritmanın olmadığını kanıtlamaktadır [75]. Başka bir ifadeyle, bazı algoritmalar bazı problemler için çok iyi sonuçlar verse bile bazıları için kabul edilemeyecek kadar kötü sonuçlar verebilmektedir. Araştırmacılar, NFL teoremi sebebiyle sezgi-üstü algoritmaları geliştirmeye devam etmektedir.

Genel olarak sezgi-üstü algoritmalar çözüm yolu açısından iki temel sınıfa ayrılabilir;

- Tek çözüm tabanlı
- Popülasyon tabanlı

İlk sınıf, çözüm sürecine bir adayla başlar ve bu çözüm yinelemeler ile iyileştirilir. İkinci sınıf ise bir çözüm kümesi oluşturarak optimizasyon işlemini gerçekleştirir. Popülasyon tabanlı sezgi-üstü algoritmalarda rastgele bir başlangıç nüfusu oluşturulur ve bu nüfusun performansı yinelemeler ile geliştirilir. Bu çözüm yönteminin tek çözüm tabanlı algoritmalarla karşılaştırıldığında bazı avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar aşağıda verilmiştir;

- Çoklu aday çözümler arama uzayının umut vadeden bölümleriyle ilgili bilgiyi paylaşır
- Çoklu aday çözümler yerel optimalden kaçınmak için birbirlerine yardım ederler
- Genellikle arama uzayını daha iyi tararlar

Sezgi-üstü algoritmalar ilham aldıkları kaynağa göre üç sınıfa ayrılabilir;

- Evrimsel (Evolutionary)
- Fizik-tabanlı (Physics-based)
- Sürü Zekâsı (Swarm Intelligence)

Evrimsel algoritmalar, doğadaki evrim konseptinden ilham alırlar. Bu dalda en çok bilinen algoritma 1992 yılında Holland'ın önerdiği Genetik Algoritmadır [3]. Holland, bu algoritmayla Darwin'in evrim kavramlarının benzetimini yapmıştır. Bu yöntemde her bir yeni popülasyon önceki jenerasyonda bulunan bireylerin mutasyon ve kombinasyonuyla oluşturulur. En iyi bireyin yeni popülasyondaki kullanım oranı daha yüksek olduğundan, yeni oluşturulan nüfus önceki jenerasyondan muhtemelen daha iyi olacaktır. Yapılan yineleme süreciyle başlangıç popülasyonunun optimize edilmesi mümkün olmaktadır. Diferansiyel Evrim [76], Evrimsel Programlama [77] ve biyo-coğrafyaya dayalı optimizasyon [78] evrimsel algoritmalardan bazılarıdır.

Sezgi-üstü algoritmaların ilham aldığı kaynağa göre ikinci dalı Fizik-tabanlı tekniklerdir. İsminden de anlaşılacağı gibi fizik kurallarını taklit etmektedirler. Yerçekimsel Yerel Arama [79], Yerçekimsel Arama Algoritması [65], Yapay

Kimyasal Reaksiyon Optimizasyon Algoritması [80], Kara Delik Algoritması [81], Işın Optimizasyonu [82], Küçük Dünya Optimizasyon Algoritması [83] ve Galaksi-tabanlı Arama Algoritması [84] bazı fizik-tabanlı sezgi-üstü tekniklerdir. Fizik-tabanlı algoritmaların işleyişi evrimsel-tabanlı algoritmalardan farklıdır. Arama temsilcilerinden oluşan rastgele kümeler arama uzayında fizik kurallarına dayalı olarak hareket eder ve haberleşir. Bu hareket yerçekimi kuvveti, elektromanyetik kuvvet ve eylemsizlik kuvveti gibi fiziksel kurallara bağlı olarak gerçekleşir.

Sezgi-üstü algoritmaların üçüncü alt sınıfı Sürü Zekâsı (SZ) yaklaşımıdır. Bu algoritmalar, doğada bulunan böcek, koyun, sığır, kurt veya balık sürüleri gibi canlıların sosyal davranışlarını taklit eder. Algoritmaların işleyişi Fizik-tabanlı algoritmaların işleyişiyle oldukça benzerdir fakat burada arama temsilcileri canlı varlıkların sosyal zekasını ve birlikteliğini taklit ederek araştırır. Eberhart ve Kennedy [4] tarafından önerilen Parçacık Sürüsü Optimizasyonu en popüler SZ tekniğidir ve kuş sürülerinin sosyal davranışlarından ilham almaktadır. PSO'nun bir parçacığı o ana kadar elde ettiği kendi tecrübesi ve sürünün en iyi tecrübesinden faydalanarak yeni bir konum bulma prensibini takip eder. Yapay Arı Kolonisi Algoritması [64], Karınca Kolonisi [85], Yarasa İlhamlı Algoritma [86], Yapay Balık Sürüsü Algoritması [87], Maymun Arama [88], Guguk Kuşu Arama Algoritması [89], Ateş Böceği Algoritması [90], Bozkurt Optimizasyonu [2], Salp Sürüsü Algoritması [66] ve Kâşif Algoritması [67] SZ tekniğinin kullanıldığı algoritmalardan bazılarıdır.

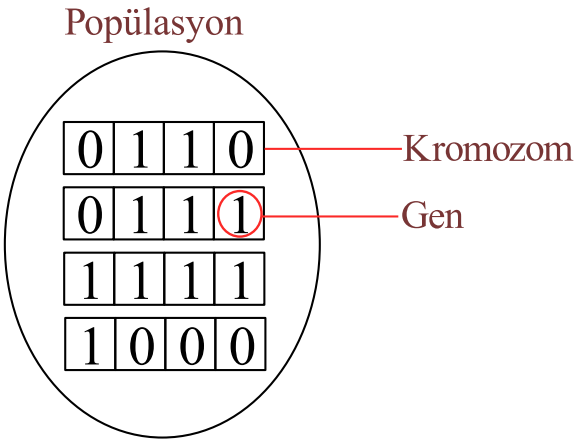
Tez çalışmamız kapsamında Bölüm 3'te ayrıntıları açıklanan bara bölme optimizasyonu problemini çözebilmek amacıyla 8 adet sezgi-üstü algoritma kullanılmıştır. GA ve PSO algoritması daha önce BBO problemi için kullanılmıştır [16] fakat ilgili çalışmada sadece kısa devre akımları dikkate alınmış ve dolayısıyla sistem güvenliği göz ardı edilmiştir. Bu sebeple, amaç fonksiyonu açıklanan BBO probleminin çözümünde Genetik Algoritma [3], Parçacık Sürüsü Optimizasyonu [4], Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu [63], Yapay Arı Kolonisi Algoritması [64], Yerçekimsel Arama Algoritması [65], Bozkurt Optimizasyonu [2], Salp Sürüsü Algoritması [66] ve Kâşif Algoritması [67] sezgi-üstü algoritmaları ilk kez kullanılmıştır. Kullanılan algoritmaların yapısı ayrıntılı bir şekilde bu bölüm içeriğinde açıklanmaktadır.

4.1. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)

Genetik Algoritma optimizasyon problemlerini çözebilmek amacıyla temel olarak doğal seçilim sürecinden ilham alan bir sezgi-üstü algoritmadır. Doğada güçlü olanın ayakta kalması ve soyunu sürdürmesiyle zayıf olanın yok olması durumu bir doğal seçilim sürecidir. GA'nın bir problemi çözerken oluşturduğu popülasyonda performansı yüksek olan genler sonraki kuşaklara aktarılırken düşük olanlar yok olurlar. Böylece doğal seçilim süreci vasıtasıyla her yinelemede daha iyi bir kuşak oluşturma eğiliminde olmaktadır. Durdurma kriteri sağlanana kadar devam eden bu yinelemeli doğal seçilim süreci problemin optimale yakın bir çözümünü elde eder.

GA tasarımı 5 safhadan oluşmaktadır. Bu safhalar aşağıda verilmiştir;

- Başlangıç popülasyonu oluşturulur
- Popülasyonda bulunan bireylerin uygunluk değerleri belirlenir
- Ebeveynler seçilir
- Çaprazlama yapılır
- Mutasyon işlemi gerçekleşir



Şekil 4.1. Popülasyon, kromozom ve gen

GA'da popülasyon kromozomlardan oluşur. Her kromozomun kendine ait genleri bulunmaktadır. Burada her gen optimizasyon probleminin bir karar değişkenini ifade edebileceği gibi ikili tabandan onluk tabana geçilerek her kromozomun içerisindeki gen grupları da karar değişkenlerini temsil edebilir. Örneğin, BBO probleminde bir kromozom içerisindeki bir gen, bara-1 veya bara-2'ye bağlanması gereken bir enerji

iletim hattı olarak değerlendirilebilir. BBO problemindeki karar değişkenleri fiderlerin konum bilgisi olduğu için çalışılması gereken format zaten ikili tabandır. Şekil 4.1, GA'da kastedilen popülasyonun neye benzediğini göstermek amacıyla verilmiştir. Görüldüğü gibi popülasyon içerisinde 4 adet kromozom bulunmaktadır. Bu kromozomların her biri 4 adet gene sahiptir. Yani popülasyon 4 genli 4 kromozomdan oluşmuştur.

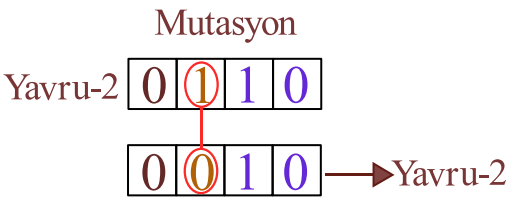


Şekil 4.2. Tek nokta çaprazlama tekniği

Oluşturulan popülasyondaki kromozomların uygunluk değerleri hesaplanarak ne kadar başarılı oldukları ölçülür. Örneğin, amaç fonksiyonumuz x^2 olsun. Bu fonksiyonu 10'luk tabanda minimize etmeye çalıştığımızı varsayalım. Bu durumunda Şekil 4.1'de verilen popülasyonda bulunan her bir kromozom bir karar değişkeni olmaktadır. Bu kromozomların onluk tabandaki karşılıkları sırasıyla 6, 7, 15 ve 8 olarak hesaplanır. Bu değerler x karar değişkenini temsil ettiği için amaç fonksiyonunda kullanılır. Buna göre minimize etmeye çalıştığımız amaç fonksiyonumuzun çıktısı sırasıyla 36, 49, 225 ve 64 olarak hesaplanır. Buna göre, mevcut popülasyonda en uygun sonucu veren kromozom 36 değeri ile birinci kromozomdur. Uygunluk değerleri elde edilen kromozomlara, eşleşme havuzuna gönderilmek üzere bir seçim prosedürü uygulanır. Seçilen kromozomlar çaprazlama işlemiyle birlikte yeni bireyler üretecektir. Şekil 4.2'de tek nokta tekniğiyle yapılan bir çaprazlama örneği verilmiştir. Burada rastgele seçilen bir genden itibaren gen takası işlemi uygulanmaktadır. İki ebeveynden iki adet yavru kromozom meydana gelmektedir. Dikkat edilirse şekilde yapılan çaprazlama işleminin ardından oluşan kromozomlar, ebeveyn kromozomlar ile tamamen aynıdır.

Çaprazlama işlemiyle oluşturulan yavrular belirli bir oranla mutasyona maruz kalırlar. Bu işlem GA'da oldukça önemlidir çünkü henüz araştırılmamış ve keşfedilmemiş alanların bulunması mutasyon işlemiyle mümkün olmaktadır. Örneğin, çaprazlama işleminin çıktısı olan Yavru-2 kromozomu için üretilen rastgele bir sayının mutasyon

oranından küçük olduğunu varsayalım. Yani, bu kromozom popülasyona yeni bir birey olarak aktarılmadan önce mutasyon operatöründen geçecektir.

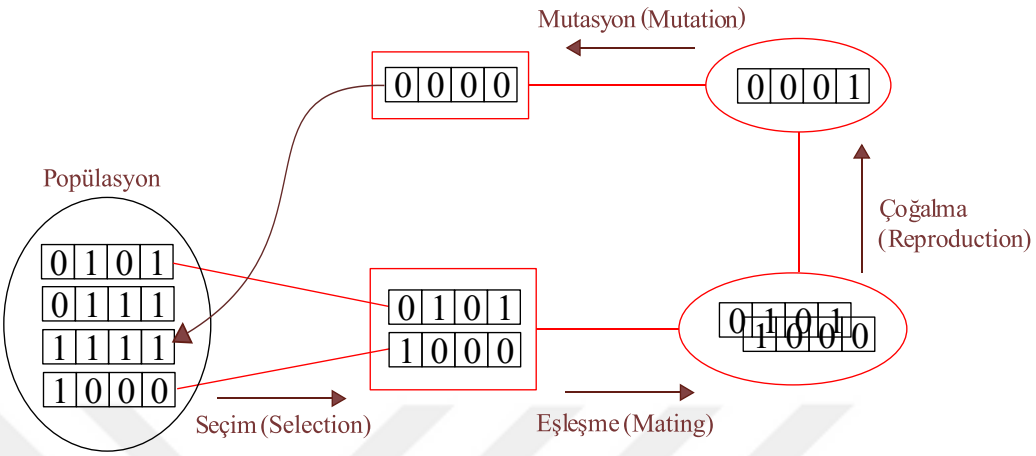


Şekil 4.3. Mutasyon işlemi

Mutasyon işleminden geçirilen Yavru-2, artık popülasyona yeni bir birey olarak katılmaya hazır hale gelmektedir. Şekil 4.3'te verilen mutasyon işlemiyle Yavru-2'nin rastgele seçilen 3. kromozomu mutasyona uğrayarak değişmiştir. Yavru-2, artık yeni popülasyona dahil olan yeni bir birey olduğu için uygunluk değeri hesaplanmalıdır. Yavru-2'nin onluk tabandaki karşılığı 2 olmuştur ve amaç fonksiyonunda karar değişkeni olarak kullanıldığında uygunluk değerinin 4 olduğu görülmektedir. Amaç fonksiyonunda başlangıçta elde edilen en iyi değer 36 iken çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden geçen bir kromozom daha ilk yinelemede 4 değerini elde etmiştir. Bu prensibe benzer şekilde durdurma kriteri sağlanana kadar yineleme süreci devam ederek en iyi sonuç elde edilemeye çalışılır.

Başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulabildiği gibi problemin yapısı biliniyorsa iyi bir noktadan başlanılması için bireyler bilinen genlerle de oluşturulabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi popülasyonda bulunan genlerin uygunluk değerlerine göre seçilen ebeveynler eşleşerek yeni bireyler üretirler. Meydana gelen yeni bireyler de belirli bir oranda mutasyona uğrayarak yeni popülasyonu oluşturur. Genel işleyişi daha rahat görebilmek amacıyla oluşturulan Şekil 4.4'te GA'nın işleyişi en temel şekilde sunulmaktadır. Görüldüğü üzere 4 bite sahip 4 adet kromozomu bulunan bir başlangıç popülasyonu bulunmaktadır. Yukarıda verdiğimiz örnekten farklı olması amacıyla bu sefer en iyi çözümün kromozomda bulunan bitlerin (genlerin) hepsi ikilik tabanda 0 iken elde edildiğini varsayalım. Bu popülasyonda bulunan kromozomlardan daha fazla 0'ı bulunan daha güçlü bir birey olacaktır. Seçim prosedürüyle güçlü bireyler daha yüksek olasılıkla seçilir ve eşleşme havuzuna aktarılır. Burada mevcut bireyler ebeveyn olurlar. Ebeveynlerin eşleşmesiyle birlikte çocuklar oluşur. Bu çocukların mutasyona uğraması sürecin son basamağıdır. Belirtilen süreç, durdurma kriteri

sağlanana kadar devam eder. Örneğimizde ilk yinelemede bitlerinin tamamı 0 olan bir birey oluştuğu için algoritma uygun çözümü bulmuştur.



Şekil 4.4. GA temel işleyiş

GA için oluşturulan sözde-kod Şekil 4.5'de verilmiştir. GA'da bulunan genetik operatörler doğal seçilim işlemini ve kalıtsal geçişleri taklit etmektedir. İlk operatör olan seçim aşamasında, güçlü bireylerin seçilmesi amacıyla rulet tekerleği ve turnuva yöntemleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. İlk yöntemde popülasyon içerisindeki bireylerin popülasyondaki uygunluk ağırlığı, ebeveyn olmak için seçilme ihtimalini temsil etmektedir. İkincisinde ise popülasyondan rastgele seçilen bireylerin arasından en güçlü bireyler ebeveyn olarak tercih edilir. Her iki yaklaşımda da güçlü bireyler tercih edilmekte ama yine de tesadüfi bir süreç işlemektedir. Eşleşme havuzu için seçilecek bireylerden en iyi olanları sonraki kuşaklara ebeveyn olamama durumuyla karşı karşıya kalabilir. Bu durumu önlemek adına seçkinlik (elitism) kavramı ortaya atılmıştır. Seçkinlik, popülasyonda bulunan en iyi bireylerin katkısını kaybetmemek için seçim prosedürüne tabi tutulmadan eşleşme havuzuna gönderilmeleri durumudur.

Bahsedildiği üzere seçim süreciyle eşleşme havuzu oluşturulduktan sonra, sıra yeni bireyleri oluşturacak olan çaprazlama operatörüne gelir. Eşleşme havuzundan rastgele seçilen bireyler ebeveyn olur. Ebeveynlerin genleri çaprazlama işlemiyle birlikte yeni bir birey meydana getirir. Çaprazlamanın düz, tek nokta, çok nokta, karma ve ayrık gibi çok çeşitli yaklaşımları bulunmaktadır [91,92]. Problem için hangi çaprazlama tekniğinin daha uygun olacağı tasarımcı tarafından belirlenmelidir. Çaprazlama işlemi keşfedilen bölgelerden faydalanmak, yani ilgili bölgelerin yerel optimaline yaklaşmak

için gerekli olan önemli bir operatördür. Sezgi-üstü yöntemlerde çaprazlama operatörüyle gerçekleşen işlem faydalanma (exploitation) sürecini temsil eder.

Ebeveynlerin çaprazlama işleminden geçmesiyle oluşan yeni bireyler popülasyonun yeni üyeleri olmak üzeredir. Ancak yeni bireyler bir operatörden daha geçmelidir.

```
1:    Giriş: Popülasyon Sayısı, Yineleme Sayısı, Mutasyon Oranı, Seçkin Sayısı, Fitness = ∞
2:    Başlangıç popülasyonunu oluştur ve uygunluk değerini belirle;
2.1:        for i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar yap;
2.2:            i. kromozomu oluştur ve popülasyona ekle end
2.3:            i. kromozomun uygunluk değerini hesapla ve kaydet end
4:    While t ≤ Yineleme Sayısı
4.1:        Seçim işlemiyle eşleşme havuzunu oluştur
4.2:        Çaprazlama yap
4.3:        Bireyleri mutasyon operatöründen geçir
4.4:        Yeni popülasyonu oluştur
4.5:        for i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar yap;
4.6:            i. kromozomun uygunluk değerini hesapla end
4.7:  end
```

Şekil 4.5. GA için sözde-kod

Mutasyon operatörü çözüm uzayında henüz keşfedilmemiş alanların tespit edilmesinde son derece önemli bir rol oynar. Problemin çözümünde gelecek vadeden bölgelerin araştırıldığı bu safhaya keşif (exploration) denir. Yeni bireylerin tamamının mutasyona uğraması söz konusu değildir. Bahsedilen mutasyon işlemi sadece belirlenmiş bir ihtimalle gerçekleşir. Örneğin mutasyon oranı 0,01 seçilirse, oluşan bireyler %1 olasılıkla mutasyona uğrayacaktır. Mutasyon işlemi kromozom bazında uygulanabileceği gibi kromozomun her bir geni için ayrı ayrı da uygulanabilir. Mutasyon oranı keşif safhası için önemli bir parametredir. Bu oranın yüksek seçilmesi durumunda çözüm uzayında çok agresif bir keşif süreci yaşanacağı için gelecek vadeden bölgelerden faydalanmadan farklı bölgelere geçiş söz konusu olur. Diğer taraftan küçük seçilmesi durumunda çözüm uzayı gerektiği kadar araştırılamayacaktır. Dolayısıyla, mutasyon oranının seçimi oldukça önemli bir konudur. Mutasyon operatörü bulunmayan bir GA'nın uygun çözümler sunabilmesi, ancak popülasyon büyüklüğünün çok büyük seçilmesiyle mümkün olabilir. Sabit bir mutasyon oranının tercih edilmemesi durumunda uygulanabilecek farklı yöntemler de bulunmaktadır.

Örneğin, çözüm kalitesindeki gelişmeyi takip ederek mutasyon oranının ayarlandığı adaptif mutasyon oranı tercih edilebilecek özelliklere sahiptir [93].

Sezgi-üstü algoritmalarda keşif ve faydalanma safhaları dengeli şekilde işlemelidir. İki strateji arasındaki denge ne kadar iyi olursa problemin çözümü de o kadar başarılı olur. Bahsedildiği gibi GA'da keşif safhası mutasyon işlemi ile yapılırken araştırma safhası çaprazlama operatörüyle yapılmaktadır. GA, sezgi-üstü algoritmalar arasında son derece başarılı bir yaklaşım olmasına rağmen araştırmacıların farklı tekniklere yönelmesinin nedenlerinden birisi de ayarlanması gereken parametre sayısıdır. GA'da hangi çaprazlama yönteminin daha uygun olacağına karar vermek ve mutasyon oranını belirlemek problemin çözüm kalitesi açısından son derece önemlidir. Uygun seçimler yapılmadığı taktirde GA'dan başarılı çözümler almak mümkün olmayabilir.

4.2. Yerçekimsel Arama Algoritması (Gravitational Search Algorithm)

Galileo tarafından keşfedilen yerçekimi bilimi, Isaac Newton ve Albert Einstein tarafından geliştirilmiştir. Newton'un açıkladığı fizik kurallarına göre, evrendeki her parçacık diğer tüm parçacıkları bir kuvvetle çekmektedir. Bu kuvvet, parçacığın aktif kütlesi ile kuvvet uygulanan parçacığın pasif kütlesinin çarpımıyla doğru orantılıyken parçacıklar arasındaki mesafenin karesiyle ters orantılıdır. Bir nesneye kuvvet uygulandığı zaman, nesnenin ivmesi hem uygulanan kuvvetin şiddetine hem de kuvvet uygulanan nesnenin eylemsizlik kütlesine bağlıdır [74]. YAA, popülasyon ve fizik-tabanlı bir sezgi-üstü arama algoritmasıdır ve yukarıda bahsedilen yerçekimi kavramından esinlenerek tasarlanmıştır.

YAA'da problemin çözüm uzayı, içinde bulunan maddelerin yerçekimine sahip olduğu bir evren olarak düşünülmüştür. Çözüm uzayında bulunan kütleler ile çözüm kalitesini temsil eden uygunluk değeri arasında bir ilişki kurularak uygunluğu daha yüksek olan çözümün kütlesi de daha büyük olacak şekilde tasarlanmıştır. Evrende bulunan bu kütleler, Newton'un 2. Hareket Yasasına bağlı olarak pozisyonlarını değiştirmektedirler. Kütlesi büyük olan maddenin, yani uygunluk değeri iyi olan çözümün, yerçekimi kuvveti de daha büyük olmaktadır. YAA'nın bu kısa girişte dahi içeriğinde ne kadar orijinal yaklaşımlar barındırdığı araştırmacılar tarafından da teyit edilmiştir. Nitekim ilk YAA tanıtıldıktan sonra ikili, ayrık ve çok-amaçlı optimizasyon versiyonları gibi çok çeşitli uygulama yaklaşımları sunulmuştur.

YAA'da her bir temsilcinin 4 özelliği bulunmaktadır; Pozisyon, eylemsizlik kütlesi, aktif yerçekimsel kütle, pasif yerçekimsel kütle. Kütlenin pozisyonu, problemin bir çözümüne karşılık gelmektedir ve bunun yerçekimsel ve eylemsizlik kütleleri bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak belirlenir. Başka bir ifadeyle, her bir kütle bir çözüm sunmaktadır ve algoritma yerçekimsel ve eylemsizlik kütlelerini uygun şekilde ayarlayarak arama işlemini gerçekleştirir. Zamanla, kütlelerin en ağır kütle tarafından çekilmesi beklenir ve bu en büyük kütle arama uzayındaki en uygun çözümü vermektedir.

Aktif yerçekimsel kütle, başka bir kütleye göre sahip olduğu yerçekimsel alan kuvvetinin miktarıdır. Aktif yerçekimsel kütlesi küçük olan bir nesnenin yerçekimsel alan kuvveti de az olur. Pasif yerçekimsel kütle ise nesnenin yerçekimsel alanla olan etkileşim kuvveti miktarıdır. Aynı yerçekimsel alan kuvvetine sahip iki nesneden daha az pasif yerçekimsel kütleye sahip olan nesne daha az kuvvet uygular. Eylemsizlik kütlesi, nesneye bir kuvvet uygulandığı zaman konumunu değiştirmeye gösterdiği direnç miktarıdır. Eylemsizlik kütlesi büyük olan bir nesne değişikliklere karşı daha yavaş tepki gösterir.

$$F_{ij}=G\frac{M_{aj}xM_{pi}}{R^2} \tag{4.1}$$

$$a_i=\frac{F_{ij}}{M_{ii}} \tag{4.2}$$

F_{ij} j. kütlenin i. kütle üzerine uyguladığı kuvveti, M_{aj} j. kütlenin aktif yerçekimsel kütlesini, M_{pi} i. kütlenin pasif yerçekimsel kütlesini, R^2 iki kütle arasındaki mesafenin karesini, G yerçekim sabitini, a_i i. kütlenin ivmesini ve M_{ii} i. kütlenin eylemsizlik kütlesini temsil etmektedir. Burada genel görelilik teorisine dayanarak kütlenin pasif yerçekimsel kütlesiyle eylemsizlik kütlesinin eşit olduğu varsayılmıştır.

Nesnelerin tamamı yerçekim kuvveti aracılığıyla birbirlerini çekerler ve bu kuvvet nesnelerin büyük kütleli nesnelere doğru hareket etmesine sebep olur. Bu yüzden, kütleler yerçekim kuvveti aracılığıyla doğrudan bir iletişim kullanarak iş birliği yaparlar. İyi çözümlere karşılık gelen kütlesi büyük nesneler hafif olanlara göre daha yavaş hareket ederler ve bu sayede algoritmanın faydalanma safhası işlemiş olur.

Burada kütleler yerçekim ve hareket kanunlarına uygun şekilde hareket ederek en iyi çözümü elde etmeye çalışırlar.

$$X_i=\left(x_i^1,..,x_i^d,..,x_i^n\right)\ i:1,2,..,N \tag{4.3}$$

N tane kütle olduğunu varsayarsak i. kütle Eşitlik (4.3)'te verilmiştir ve burada x_i^d i. kütlenin d. boyuttaki pozisyonunu temsil etmektedir. Bu kütlenin t anında d. boyutuna j. kütlenin uyguladığı kuvvet Denklem (4.4)'de verilmiştir.

$$F_{ij}^d(t)=G(t)\frac{M_{pi}(t)xM_{aj}(t)}{R_{ij}(t)+\varepsilon r}\left(x_j^d(t)-x_i^d(t)\right) \tag{4.4}$$

$G(t)$ t anındaki yerçekim kuvvetini, $x_j^d(t)$ j. kütlenin d. boyuttaki pozisyonunu, $x_i^d(t)$ i. kütlenin d. boyuttaki pozisyonunu, $R_{ij}(t)$ iki kütle arasındaki öklid mesafesini ve εr küçük ve sabit bir sayıyı temsil etmektedir.

$$F_i^d(t)=\sum_{j=1,j\neq i}^{N} rand(0,1)xF_{ij}^d(t) \tag{4.5}$$

Algoritmanın stokastik bir davranış sergileyebilmesi için i. kütlenin d. boyutunu etkileyen tüm kuvvetler 0-1 arasında değişen rastgele bir sayıyı temsil eden rand(0,1) ile çarpılarak toplanır.

$$a_i^d(t)=\frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \tag{4.6}$$

$a_i^d(t)$ t anında d. doğrultuda i. temsilcinin ivmesini ifade etmektedir. Eşitlik (4.6)'dan görüldüğü üzere hareket yasasına göre kütle, uygulanan kuvvet ile kendi eylemsizlik kuvveti ters orantılı olacak şekilde ivme kazanır.

$$v_i^d(t+1)=rand(0,1)\ x\ v_i^d(t)+a_i^d(t) \tag{4.7}$$

$$x_i^d(t+1)=x_i^d(t)+v_i^d(t+1) \tag{4.8}$$

$v_i^d(t)$ ve $x_i^d(t)$ temsilcinin t anındaki hız ve konum bilgisini, $v_i^d(t+1)$ ve $x_i^d(t+1)$ temsilcinin bir sonraki hızını ve pozisyonunu ve $rand(0,1)$ 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıyı temsil etmektedir. Elde edilen ivme, temsilcinin bir sonraki hızını Eşitlik

(4.7)'de verildiği gibi bulmak için kullanılırken yeni konum bilgisi de Eşitlik (4.8)'e uygun olarak elde edilir.

Yerçekimi sabiti G, lineer olarak azalan bir sabit olarak tasarlanmıştır. Yerçekim ve eylemsizlik kütleleri ise bir uygunluk değerlendirmesiyle hesaplanmaktadır. Daha büyük kütleler daha iyi temsilcilerdir ve bu kütleler daha çok çekim kuvvetine sahiptir ve yavaş hareket ederler. Yerçekimsel kütle ile eylemsizlik kütlesinin eşit olduğu varsayımıyla birlikte kütlelerin değerleri bir uygunluk haritası kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$M_{ai}=M_{pi}=M_{ii}=M_i,\ i=1,2,..,N \tag{4.9}$$

$$m_i(t)=\frac{fit_i(t)-worst(t)}{best(t)-worst(t)} \tag{4.10}$$

$$M_i(t)=\frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^{N} m_j(t)} \tag{4.11}$$

$$best(t)=\min. fit_j(t),\ j\in\{1,..,N\} \tag{4.12}$$

$$worst(t)=maks. fit_j(t),\ j\in\{1,..,N\} \tag{4.13}$$

$fit_i(t)$ t anında i. temsilcinin uygunluk değerini, best(t) ve $worst(t)$ t anındaki en büyük ve en küçük kütleyi ve $M_i(t)$ t anında i. temsilcinin kütlesini ifade etmektedir. Böylece, temsilcilerin kütleleri uygunluk değerine göre her t anı için hesaplanmaktadır.

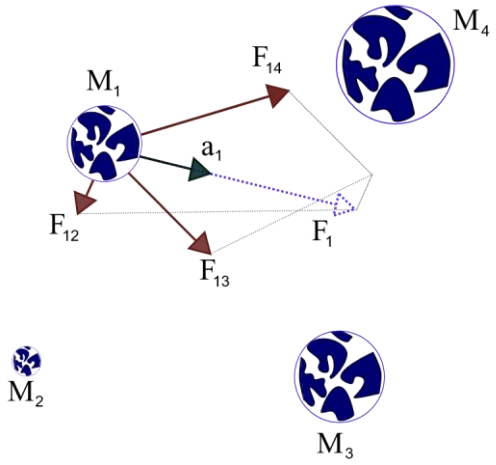
Şu ana kadar açıklandığı haliyle her yinelemede tüm kütleler birbirleri üzerinde kuvvet uygulamaktadır. Bu işlem aslında algoritmanın keşif safhasını oluşturmaktadır. Baştan sona kadar aynı agresif tavırla keşif safhasını yürütmek, bulunan bölgelerden faydalanma işleminin önüne geçecektir. Bu nedenle, keşif ve faydalanma safhaları arasında iyi bir uyum sağlayabilmek adına bir kütleyi etkileyen temsilci sayısı lineer olarak azalacak şekilde tasarlanmıştır. Oluşturulan K_{best} kümesinde bulunan temsilciler diğer kütleleri çekecektir. K_{best} kümesi zamana bağlı bir fonksiyondur. Bu kümenin başlangıç değeri K_0'dır ve zamanla lineer olarak azalmaktadır. Böylece, başlangıçta tüm kütleler çekim kuvveti uygularken, K kümesinin zamanla lineer olarak azalmasıyla birlikte çekim kuvveti uygulayan kütleler azalır ve en sonunda çekim

kuvveti uygulayan sadece bir kütle kalır. Bu doğrultuda, Denklem (4.5)'te verilen ifade Denklem (4.14) olarak değiştirilir. Eşitlikten anlaşıldığı üzere i kütlesine etki eden j kütlelerinin K_{best} listesinin bir elemanı olması gerekir. K_{best} listesi yinelemeler boyunca azaldığına göre i kütlesini etkileyen kütlelerin sayısı da buna paralel olarak azalmaktadır.

$$F_i^d(t)=\sum_{j\in K_{best},j\neq i}^{N} rand(0,1)xF_{ij}^d(t) \quad (4.14)$$

1: ***Giriş***: Temsilci Sayısı, Yineleme Sayısı
2: Başlangıç popülasyonunu oluştur ve uygunluk değerini belirle;
2.1: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
2.2: $X_i=(x_i^1,..,x_i^d,..,x_i^n)$ ***end***
3: ***While*** t ≤ Yineleme Sayısı
3.1: Temsilcilerin uygunluk değerini hesapla;
3.1.1: ***for*** i = 1'den Temsilci Sayısına kadar ***yap***;
3.1.2: X_i'nin uygunluk değerini hesapla ***end***
3.2: Temsilcilerin yerçekim ve eylemsizlik kütlesini hesapla;
3.2.1: ***for*** i = 1'den Temsilci Sayısına kadar ***yap***;
3.2.2: M_i'yi hesapla ***end***
3.3: Yerçekim sabiti G'yi ve K_{best} kümesini güncelle
3.4: Temsilcileri etkileyen kuvvetleri hesapla;
3.4.1: ***for*** i = 1'den Temsilci Sayısına kadar ***yap***;
3.4.2: $F_i^d(t)=\sum_{j\in K_{best},j\neq i}^{N} rand(0,1)xF_{ij}^d(t)$ kuvveti hesapla ***end***
3.5: Kütlelerin ivmesini güncelle;
3.5.1: ***for*** i = 1'den Temsilci Sayısına kadar ***yap***;
3.5.2: $a_i^d(t)=\frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)}$ ivmeyi hesapla ***end***
3.6: Temsilcilerin hızını güncelle;
3.6.1: ***for*** i = 1'den Temsilci Sayısına kadar ***yap***;
3.6.2: $v_i^d(t+1)=rand(0,1)\ x\ v_i^d(t)+a_i^d(t)$ hızını güncelle ***end***
3.7: Temsilcilerin pozisyonunu güncelle;
3.7.1: ***for*** i = 1'den Temsilci Sayısına kadar ***yap***;
3.7.2: $x_i^d(t+1)=x_i^d(t)+v_i^d(t+1)$ posizyonu güncelle ***end***
3.8: t = t+1
3.9: ***end***

Şekil 4.6. YAA'nın sözde kodu



Şekil 4.7. YAA'da bir kütleyi etkileyen kuvvetler

YAA'nın sözde kodu Şekil 4.6'da sunulmuş ve YAA'da bir kütleyi etkileyen kuvvetler Şekil 4.7'de verilmiştir. M_1 kütlesine uygulanan F_1 kuvveti diğer kütlelerin M_1 kütlesine uyguladığı bileşke kuvvete karşılık gelmektedir. F_1 kuvvetinin eylemsizlik kütlesine bölümüyle de a_1 ivmesi oluşmaktadır. M_1 kütlesi elde edilen bu a_1 ivmesiyle bir sonraki pozisyonuna geçecektir.

Toparlamak gerekirse, çeşitli alanlarda başarılı sonuçlar veren bu fizik-tabanlı sezgi-üstü algoritmanın başlıca özellikleri aşağıda verilmiştir;

- Her bir temsilci diğerlerinin performansını gözlemleyebildiği için yerçekimsel kuvvet bir bilgi transferi aracına dönüşür.
- Komşu temsilciler tarafından temsilciye uygulanan kuvvet sebebiyle temsilci kendi etrafındaki alanı görebilir.
- Ağır bir kütle, daha etkili bir çekim yarıçapına ve bu sebeple büyük bir çekim kuvvetine sahiptir. Bu nedenle, yüksek performansa sahip temsilciler daha büyük yerçekimsel kütleye sahip olur. Sonuç olarak, temsilciler en iyi temsilciye doğru hareket etme eğiliminde olurlar.
- Eylemsizlik kütlesi harekete karşıdır ve temsilcinin yer değiştirmesini yavaşlatır. Bu sebeple, ağır eylemsizlik kütlesi olan temsilciler yavaşça hareket ederek çözüm uzayını daha yerel olarak araştırır. Yani gelecek vadeden bölgelerin yerel optimalini bulmaya çalışarak faydalanma safhasını gerçekleştirir. Bu durum, adaptif öğrenme oranı olarak da düşünülebilir.

- Yerçekim sabiti G'nin zamanla azalmasıyla birlikte uygulanan kuvvetler ve temsilci hızları da paralel olarak azalır. Temsilcilerin yüksek hızlı olması çözüm uzayını agresif şekilde aramalarını sağlar. Bu süreç keşif safhasıdır. Temsilcilerin hızı azaldıkça belirli bölgeleri daha detaylı aramaya başlarlar. Bu süreç ise faydalanma safhasıdır. Bu iki safha arasındaki dengeyi sağlamak için G sabiti zamanla azalmaktadır. Aynı şekilde çekim kuvveti uygulayan kütleler kümesi K_{best}'in başlangıçta temsilcilerin tamamını kapsaması ve zamanla azalması da iki safha arasındaki dengeyi sağlayabilmek için yapılmıştır.
- YAA hafızası olmayan bir algoritmadır.

Fizik-tabanlı sezgi-üstü algoritma ailesine ait YAA'nın E.Rashedi ve diğ. tarafından önerilen orijinal hali aktarılmıştır [65]. YAA'nın geliştirilmesi amacıyla araştırmacılar tarafından yerçekim ve görelilik gibi kavramlardan ilham alan operatörlerin yanında mutasyon, çaprazlama ve ayrık yerel arama gibi işlevler de kullanılmıştır. Tez çalışmamız kapsamında türev çalışmalardan ziyade orijinal kaynağın ikili formatı üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

4.3. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)

Tez kapsamında kullanılan sezgi-üstü algoritmalardan evrimsel konsepte sahip olan Genetik Algoritma ve fizik-tabanlı yaklaşıma sahip olan Yerçekimsel Arama Algoritması önceki başlıklarda tanıtılmıştır. BBO algoritması için kullanılan sezgi-üstü algoritmalardan 6'sı Sürü Zekâsı konseptine göre işleyen yaklaşımlardır. Bunun ana sebebi, SZ kavramını ilham alan yaklaşımların uygulama basitliği ve en az evrimsel ve fizik-tabanlı yaklaşımlar kadar verimli olmalarıdır.

Araştırmacılar, sürüde bulunan büyük miktarda kuşun eş zamanlı davranarak aniden yön değiştirdiğini, dağıldığını ve tekrar bir araya geldiğini gözlemlemişlerdir. Başlangıçta, kuşların bu davranışını, birbirleri arasındaki mesafeyi muhafaza etme çabası olarak yorumlamışlardır. Ancak kuşların ve balıkların fiziksel yer değiştirmelerini avcıdan kaçmak, besin veya eş aramak veya çevresel parametreleri optimize etmek (sıcak bölgelere göçmek gibi) için ayarladığı anlaşılmıştır [4].

PSO yöntemi SZ kavramıyla işlem yapan bir sezgi-üstü algoritmadır. Bahsedilen kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışlarından ilham almıştır. Sürülerin sosyal ve bilişsel

davranışları istedikleri hedefe kolektif bir şuurla ulaşmalarını sağlamaktadır. PSO yönteminde, sürüde bulunan üyeler bir sonraki hızlarını ve pozisyonlarını belirlemek için kendi tecrübelerini kullanabilirler. Aynı zamanda bu üyeler pozisyon belirleme sürecinde birbirlerinden bilgi alırlar. Böylece hem kendi geçmişlerini hem de sürünün sahip olduğu geçmişi değerlendirerek karar pozisyonlarını güncellerler.

Sürüdeki her bir parçacık o ana kadar elde ettiği en iyi çözümü hafızasında tutmaktadır. Bu değere pbest denilmektedir. PSO aynı zamanda popülasyonda bulunan herhangi bir parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyonu hafızasında tutmaktadır ve bu pozisyon gbest olarak isimlendirilmektedir [4].

Sürüde bulunan üyelerin kendi tecrübelerini kullandığı bölüm bilişsel bileşen olarak adlandırılırken, sürünün diğer üyelerinden bilgi aldığı bölüm sosyal bileşen olarak adlandırılmaktadır. Bilişsel bileşen parçacığın o ana kadar elde ettiği pbest ile ilgiliyken sosyal bileşen herhangi bir parçacığın o ana kadar elde ettiği sürünün en iyi pozisyonu olan gbest ile ilgilidir.

Parçacığın bir sonraki hızı belirlenirken önceki hızının bir atalet katsayısıyla çarpımı ile bilişsel ve sosyal bileşenlerin toplamı kullanılır. Bilişsel bileşende parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyonla mevcut pozisyonunun farkı alınır. Sosyal bileşende ise sürüden elde edilen en iyi pozisyonla parçacığın mevcut pozisyonunun farkı alınır. Bilişsel ve Sosyal bileşenlere stokastik bir özellik kazandırabilmek için her iki bileşende 0 ile 1 arasında rastgele seçilen bir sayı ile çarpılır.

Parçacığın bir sonraki hızını belirlerken hangi bileşeni ne kadar kullanması gerektiğini belirleyen kat sayılar kullanılmaktadır. C_1 ve C_2 katsayıları olarak bilinen bu sabitler, üyelerin kendi tecrübesi ile diğer üyelerden aldığı bilgiyi kullanma oranını belirleyen sabit katsayılardır. Bu iki sabit arasındaki denge, algoritmanın optimale yakınsaması açısından oldukça önemlidir.

$$V_i(t+1)=V_i(t) \text{ x } w+ \text{Bilişsel}_i(t) + \text{Sosyal}_i(t) \tag{4.15}$$

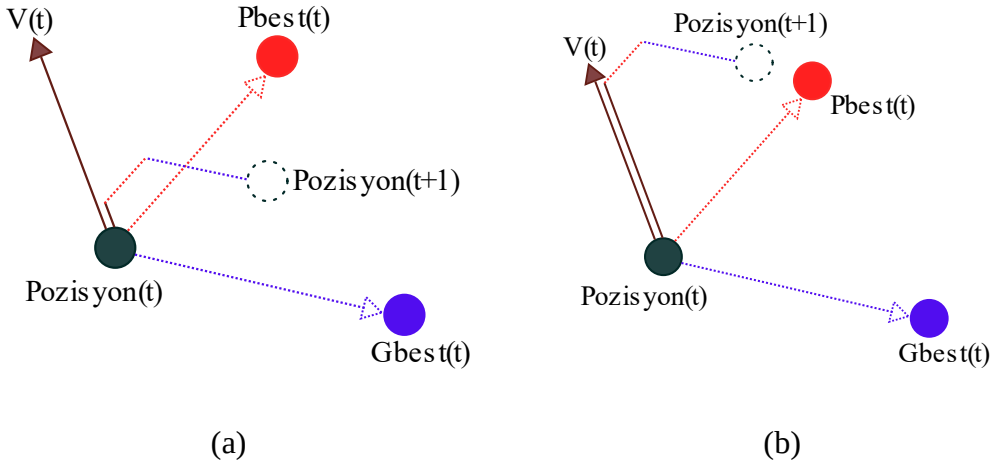
$$\text{Bilişsel}_i(t)=C_1 \text{ x } \text{rand}(0,1)\text{x}\left(P_i^{best}- P_i\right) \tag{4.16}$$

$$\text{Sosyal}_i(t)=C_2 \text{ x } \text{rand}(0,1)\text{x}\left(G^{best}- P_i\right) \tag{4.17}$$

$$P_i(t+1)=P_i(t)+ V_i(t+1) \quad (4.18)$$

$$w=w_{min}+(w_{max}-w_{min}) \text{ x } \frac{\text{MaksIter-Iter}}{\text{MaxIter}} \quad (4.19)$$

$V_i(t)$ i. üyenin hızını, $V_i(t+1)$ ise bir sonraki hızını, P_i^{best} i. parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyonu, P_i i. parçacığın mevcut konumunu, G^{best} sürüdeki tüm üyelerin o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyonu, $P_i(t+1)$ i. parçacığın bir sonraki konumunu, w_{max} ve w_{min} sırasıyla en yüksek, en küçük atalet katsayısını ve w ise o anki yinelemede kullanılacak olan atalet katsayısını temsil etmektedir. Atalet katsayısı, arama uzayında bulunan henüz keşfedilmemiş alanların tespit edilmesi açısından önemli bir parametredir. Algoritmanın başlangıç yinelemelerinde arama uzayının agresif şekilde araştırılması dinamik değişen eşitlik (4.19) ile mümkün olmaktadır. Başlangıçta çözüm uzayının yaygın şekilde araştırılması keşif safhasının gereğidir. Yinelemeler ilerledikçe atalet azalmaktadır ve dolayısıyla arama uzayında bulunan gelecek vadeden bölgelerin yerel minimumları keşfedilmeye çalışılmaktadır. Dolayısıyla, ataletin azaltılması durumu da faydalanma safhasının gereğidir.



(a) (b)

Şekil 4.8. Bir parçacığın pozisyon güncellemesi a) Atalet küçük b) Atalet büyük

Şekil 4.8'de sürüde bulunan bir parçacığın pozisyon güncellemesinin nasıl yapıldığı vektörel formatta gösterilmektedir. Parçacığın hızı V(t) bir atalet katsayısıyla çarpılmıştır. Parçacığın ilgili yinelemeye kadar elde ettiği en iyi pozisyon ile mevcut pozisyonunun farkı C_1 katsayısı ve 0 ile 1 arasındaki rastgele bir sayı ile çarpılarak hız bileşeniyle vektörel olarak toplanmıştır. Sürünün elde ettiği en iyi pozisyon ile mevcut

pozisyonun farkı alınmış ve bu fark C_2 katsayısı ve 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıyla çarpılarak vektörel toplama eklenmiştir. Nihayetinde elde edilen nokta parçacığın bir sonraki pozisyonunu ifade etmektedir. Sürüde bulunan tüm parçacıklar bu prensibe göre hareket ederek arama uzayını taramaktadır.

PSO başlangıçta yüksek atalet katsayısı kullanarak arama uzayını daha agresif aramaktadır. Keşif ve faydalanma safhalarını daha iyi idrak edebilmek adına Şekil 4.8 (a) ve (b) dikkatle incelenmelidir. Farklı hiçbir değişiklik yapmadan sadece atalet katsayısının değişimiyle parçacığın davranışı önemli derecede değişmektedir.

1: ***Giriş***: Popülasyon ve Yineleme Sayısı, C_1 ve C_2, w_{max} ve w_{min},
Üst Sınır (ÜS) ve Alt Sınır (AS)
2: Başlangıç popülasyonunu oluştur ve P_i[Best] ve G[Best] değerlerini belirle;
2.1: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
2.2: $Pozisyon_i$= rand(AS,ÜS) rastgele hız ve pozisyon üret
2.3: P_i[Best] ve G[Best] hesapla ***end***
4: ***While*** t≤Yineleme Sayısı
4.1: $w=w_{min}+(w_{max}-w_{min})$ x $\frac{\text{Yineleme Sayısı-t}}{\text{Yineleme Sayısı}}$ denklemiyle ataleti hesapla
4.2: Hız, Pozisyon, P_i^{best} ve G^{best} güncelle
4.2.1: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
4.2.2: $Bilişsel_i(t)=C_1$ x rand(0,1)x$(P_i^{best}- P_i)$
$Sosyal_i(t)=C_2$ x rand(0,1)x$(G^{best}- P_i)$
denklemlerine göre bilişsel ve sosyal bileşenleri hesapla
4.2.3: $V_i(t+1)=V_i(t)$ x w+ $Bilişsel_i(t)$ + $Sosyal_i(t)$
denklemiyle parçacık hızını güncelle
4.2.4: $P_i(t+1)=P_i(t)+ V_i(t+1)$
denklemiyle parçacık pozisyonunu güncelle
4.2.5: ***if*** $P_i(t+1) > P_i^{best}$;
4.2.6: $P_i^{best} = P_i(t+1)$
4.2.7: ***if*** $P_i^{best} > G^{best}$;
4.2.8: $G^{best} = P_i^{best}$ ***end; end***
4.2.9: ***end***
4.3: t = t+1;
4.4: ***end***

Şekil 4.9. PSO sözde-kodu

Parçacık, ataleti küçük iken sürünün elde ettiği en iyi pozisyona doğru yönelme eğilimindedir. Ancak, parçacığın ataleti büyük olduğu zaman çözüm uzayının farklı noktalarını araştırma hevesi bulunmaktadır. Görüldüğü üzere ataleti büyük olan parçacık, ilgili iterasyona kadar elde edilebilmiş global optimalden uzaklaşmaktadır. Algoritmanın genel yapısını içeren sözde-kod Şekil 4.9'da verilmiştir.

4.4. Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Dinamically Controlled Particle Swarm Optimization)

Sezgi-üstü algoritmalardan sürü zekâsı yaklaşımı ile geliştirilen PSO algoritmasında sosyal ve bilişsel bileşenlerde bulunan sabit katsayılar ve parçacığın mevcut hızıyla çarpılan atalet sabiti, keşif ve faydalanma süreçleri arasındaki dengeyi tesis etmektedir. Bölüm 4.3'te ayrıntılarıyla bahsedilen PSO yönteminde atalet katsayısı zamana bağlı bir fonksiyon olarak tanıtılmıştır. Böylece, başlangıçta atalet sabiti büyük olduğu için agresif arama stratejisi uygulanırken, yineleme sayısı arttıkça atalet sabiti düşer ve sosyal-bilişsel bileşenler vasıtasıyla bulunan bölgelerin yerel optimalleri araştırılır. Ancak parçacığın bir sonraki hızı belirlenirken atalet sabitinin sadece parçacığın mevcut hızını etkilediği unutulmamalıdır. Yani sosyal ve bilişsel bileşenlerle çarpılan sabit katsayıların da keşif ve faydalanma safhaları arasındaki denge üzerinde çok önemli etkileri olduğu unutulmamalıdır.

PSO algoritmasının başarısı, parametrelerinin iyi ayarlanmasına bağlıdır. Bu nedenle, erken yakınsama sebebiyle yerel optimale takılma sorunu meydana gelebilmektedir. Araştırmacılar, PSO'nun karşılaştığı problemi çözebilmek amacıyla sosyal ve bilişsel bileşenler ile atalet ağırlığını kontrol ederek geleneksel PSO'yu iyileştirecek çalışmalar gerçekleştirmiştir. Zamana bağlı olarak değişen atalet ağırlığının yanında dinamik olarak değişen sosyal ve bilişsel bileşen katsayıları kullanmışlardır [94-97]. V.K. Jadoun ve diğ. PSO'yu geliştirmek amacıyla yapılmış önceki çalışmaları geliştirerek Dinamik Kontrollü PSO modelini önermişlerdir [63]. Önerilen DKPSO yöntemi, parçacık hızlarını duruma göre değiştirebilen etkin yaklaşımlara sahip olduğu için tez çalışması kapsamında BBO problemini çözebilme açısından değerlendirilmiştir. DKPSO metodu, keşif safhasını iyileştirirken faydalanma safhasını kolaylaştırmak için parçacıkların hızını uçuşları boyunca etkin bir şekilde kontrol eden ve düzenleyen bir yaklaşımla işlemektedir.

PSO'dan daha iyi bir performans elde etmek amacıyla parçacıklar ilk etapta çözüm uzayını etkin şekilde arayabilmelidir. Bu sebeple parçacıklar, ilk uçuşları boyunca yüksek hızda uçmalıdırlar. Daha sonra gelecek vadeden bölgelerin yerel optimallerini bularak global optimale yaklaşmak gerekir. Bu faydalanma safhasının gerçekleşmesi için parçacıklar ilerleyen uçuşlarında kademeli olarak hızlarını düşürmelidir. Dolayısıyla, parçacıkların hızında uygun düzenlemeler yapılarak PSO'nun performansı artırılabilir.

Sürünün sosyal ve bilişsel davranışları arasında uygun bir denge kurulması halinde PSO'nun performansı iyileşecektir. Başlangıçta, bilişsel bileşen sosyal bileşenden daha baskın olarak çözüm uzayının parçacıklar tarafından daha etkin aranmasını sağlamalıdır. Ancak daha sonra yerel faydalanmayı iyileştirmek için tüm parçacıklar sürünün o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyona doğru yakınsamalıdır. Bunun olabilmesi için de uçuşun ilerleyen bölümlerinde sosyal bileşen bilişsel bileşenden daha baskın olmalıdır. Bu durum keşif ve faydalanma arasında iyi bir denge kurulması için gereklidir.

Geleneksel PSO'da sosyal ve bilişsel bileşen katsayıları sabit olduğu için keşif ve faydalanma arasındaki denge korunamamakta ve erken yakınsama problemi oluşabilmektedir. Bu sebeple, uygun üstel daraltma fonksiyonları ζ_1 ve ζ_2 önerilerek parçacıkların hızını dinamik olarak düzenleyen bir değiştirilmiş kontrol eşitliği önerilmiştir. Ayrıca, önceki pozisyon ve ortalama karekök tecrübesinden faydalanılarak bilişsel ve sosyal bileşenler de değiştirilmiştir. Yapılan değişiklik ve düzenlemeler ile Eşitlik (4.15-4.17)'de verilen ifadeler aşağıda verilen denklemlere dönüştürülmüştür.

$$V_i(t+1)=V_i(t) \times W_e + Bilişsel_i(t) + Sosyal_i(t) \quad (4.20)$$

$$Bilişsel_i(t)= \zeta_1 \times C_{1b} \times rand(0,1)x\left(P_i^{best} - P_i\right) + (1-\zeta_1) \times C_{1p} \times rand(0,1)x\left(P_i - P_i^{önpos}\right) \quad (4.21)$$

$$Sosyal(t)_i= \zeta_2 \times C_2 x\ rand(0,1)x\left(G^{best} - P_i\right) + \zeta_2 \times C_2 x\ rand(0,1)x(G^{rms} - P_i) \quad (4.22)$$

W_e değiştirilmiş atalet ağırlığını, P_i i. parçacığın pozisyonunu, P_i^{best} i. parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyonu, $P_i^{önpos}$ i. parçacığın bir önceki konumunu, G^{best} sürünün o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyonu, C_{1b}, C_{1p} ve C_2 ivme katsayılarını, G^{rms} sürünün ortalama karekök tecrübesini, ζ_1 ve ζ_2 üstel daraltma fonksiyonlarını temsil etmektedir.

Önerilen yöntemde, sürünün yerel faydalanmasıyla global araştırması arasındaki dengeyi düzenlemek için atalet ağırlığı değiştirilmiştir. Parçacığın bir önceki tecrübesi bilişsel bileşeni iyileştirmek için eklenirken sürünün RMS tecrübesi sosyal bileşeni güçlendirmek için eklenmiştir. Bunların yanında, sürünün sosyal ve bilişsel davranışlarını düzenlemek için dinamik hızlanma katsayıları tanımlanmıştır.

$$W_e=e^{(-\eta \log_e k_w)} \tag{4.23}$$

η mevcut yinelemeyle maksimum yinelemenin oranı olan ve yineleme sayısı yükseldikçe artan bir değişkeni ve k_w en büyük ve en küçük atalet ağırlıklarının oranını vermektedir.

$$\zeta_1=e^{-\mu_1 \eta} \tag{4.25}$$

$$\zeta_2=k \text{ x } e^{\mu_2 \eta} \tag{4.26}$$

$$k=\left(\frac{k_e}{C_2}\right) \text{ x } e^{-\mu_2} \tag{4.27}$$

μ_1 ve μ_2 üstel ifadenin katsayılarını, k dinamik bilişsel ve sosyal ivme katsayılarının oranını, k_e bilişsel ve sosyal bileşenin eşit olacağı noktaya göre optimize edilmiş bir katsayıyı ifade eder. Önerilen yöntemde sosyal ve bilişsel bileşenlerin toplam yineleme sayısının 2/3'ünde eşit olması durumu önerilmiş ve bu nokta için optimize edilmiş k_e değerinin 0,2 olduğu belirtilmiştir. Yine ihtiyaç duyulan diğer katsayılar için de bazı öneriler ilgili çalışma kapsamında tavsiye edilmiştir.

PSO'nun bazı problemlerde yaşadığı erken yakınsama problemini çözebilmek adına önerilen DKPSO yöntemi, sürüdeki parçacıklar arasında daha güçlü bir iletişim ağı kurmak için sürünün elde ettiği en iyi pozisyonların ortalama karekökünü kullanmıştır.

Ayrıca her parçacığın en iyi pozisyonuyla kıyaslanmasının yanı sıra bir önceki pozisyonuyla da kıyaslanması sağlanmıştır.

DKPSO'da dinamik olarak değişen sosyal ve bilişsel bileşen katsayılarıyla keşif ve faydalanma safhaları arasındaki denge korunmaya çalışılmıştır. Yapılan iyileştirmelerin BBO probleminde nasıl çalışacağını görebilmek amacıyla sonraki bölümlerde açıklanacak olan DKPSO yönteminin ikili formatı önerilmiş ve BBO probleminde kullanılmıştır. Şekil 4.10'da PSO yönteminin farklı bir versiyonu olan DKPSO algoritmasının sözde-kodu verilmiştir.

1: ***Giriş***: Popülasyon ve Yineleme Sayısı, C_{1b} , C_{1p} ve C_2, w_{max} ve w_{min}, μ_1 ve μ_2, k_e Üst Sınır (ÜS) ve Alt Sınır (AS)

2: Başlangıç popülasyonunu oluştur ve P_i^{best} ve G^{best} değerlerini belirle;

2.1: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;

2.2: $Pozisyon_i$= rand(AS,ÜS) rastgele hız ve pozisyon üret

2.3: P_i[Best] ve G[Best] hesapla ***end***

4: ***While*** t≤Yineleme Sayısı

4.1: η:t/Yineleme Sayısı, ζ_1:$e^{-\mu_1\eta}$, k:$(\frac{k_e}{C_2})$ x $e^{-\mu_2}$, ζ_2:k x $e^{\mu_2\eta}$ ve W_e: $e^{(-\eta \log_e k_w)}$ Parametrelerini hesapla

4.2: Hız, Pozisyon, P_i^{best} ve G^{best} güncelle

4.2.1: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;

4.2.2: $Bilişsel_i(t)=\zeta_1$ x C_{1b} x rand(0,1)x$(P_i^{best}- P_i)$ + (1-ζ_1) x C_{1p} x rand(0,1)x$(P_i-P_i^{önpos})$

$Sosyal_i(t)= \zeta_2$ x C_2x rand(0,1)x$(G^{best}- P_i)$ + ζ_2 x C_2x rand(0,1)x$(G^{rms}- P_i)$

denklemlerine göre bilişsel ve sosyal bileşenleri hesapla

4.2.3: $V_i(t+1)=V_i(t)$ x W_e+ $Bilişsel_i(t)$ + $Sosyal_i(t)$

denklemiyle parçacık hızını güncelle

4.2.4: $P_i(t+1)=P_i(t)+ V_i(t+1)$

denklemiyle parçacık pozisyonunu güncelle

4.2.5: ***if*** $P_i(t+1) > P_i^{best}$;

4.2.6: $P_i^{best} = P_i(t+1)$

4.2.7: ***if*** $P_i^{best} > G^{best}$;

4.2.8: $G^{best} = P_i^{best}$ ***end; end***

4.2.9: G^{rms} ve $P_i^{önpos}$ güncelle

4.2.9: ***end***

Şekil 4.10. DKPSO sözde-kodu

4.5. Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm)

Bal arısı kolonisinde bulunan kolektif zekâ bir optimizasyon problemini çözebilmek için gerekli olan süreçlere sahiptir. D. Karaboğa hazırladığı teknik raporda bal arılarının davranışları üzerine oluşturduğu algoritmayı paylaşmıştır [98]. Daha sonra D. Karaboğa ve B. Baştürk teknik raporda sunulan algoritma için geliştirilen matematiksel modeli sunmuştur [64, 93].

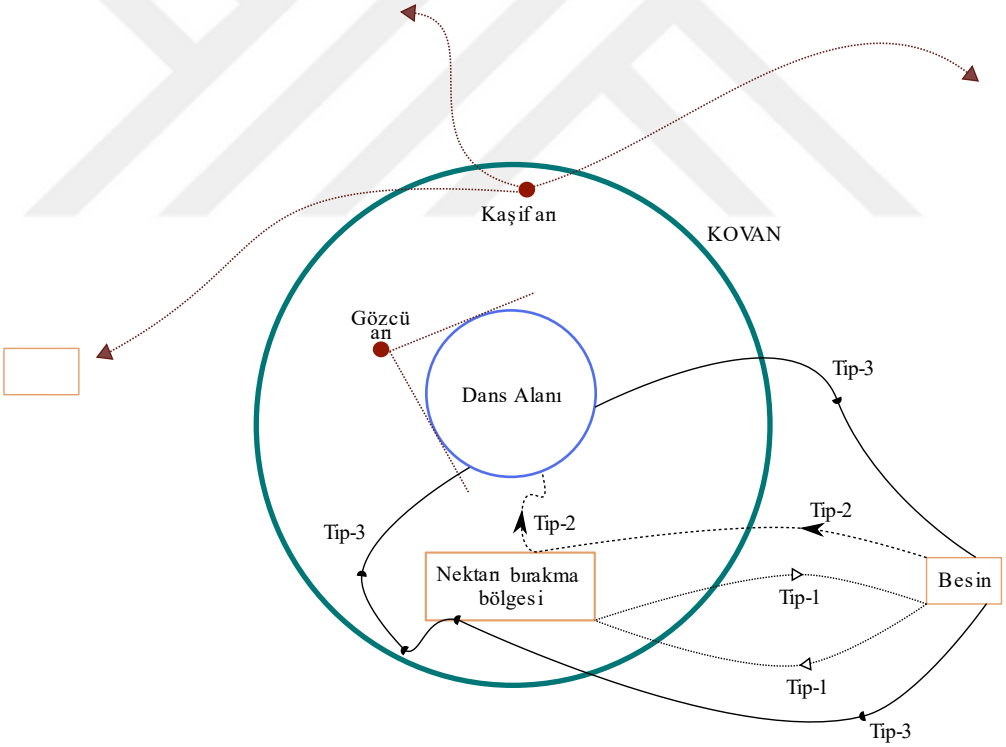
Arı kolonisinde bulunan işçi arılar besin kaynaklarından aldıkları bal özünü kovanlarına taşırlar. Besin kaynağının tespit edilmesinde ise kâşif ve gözcü arılar önemli bir rol oynamaktadır. Arılar arasında gerçekleşen bilgi alışverişi kolektif şuurun oluşmasında önemli bir yer tutar. Bu bilgi alışverişini yapıldığı yer ise arı kolonisinin kovanıdır. Kovanın içerisinde dans alanı olarak isimlendirilen ve bilgi paylaşımının yapıldığı bir bölüm bulunur. Arılar arasında besin kaynağının kalitesiyle ilgili iletişim dans alanında gerçekleşir.

Gözcü arıların önünde dans alanında besin kaynaklarıyla ilgili yapılan çeşitli danslar bu arılara besin kaynaklarının kalitesiyle ilgili bilgi vermektedir. Gözcü arılar edindiği bu bilgileri kullanarak en verimli kaynağa gitmek üzere bir işçi arı olmaya karar verebilir. Daha verimli besin kaynakları için daha yoğun bir bilgi paylaşımı olacağı için gözcü arıların daha verimli besin kaynağını seçmesi kuvvetle muhtemeldir. İşçi arılar, kârlılıkla orantılı bir olasılıkla bilgi paylaşımını yaparlar ve paylaştıkları bilginin uzunluğu bu orantıyla ilgilidir. Yani bir işçi arı besin kaynağı için daha uzun dans yapıyorsa bu durum ilgili besin kaynağının zenginlik oranının yüksek olduğunu göstermektedir.

İşsiz bir arının iki seçeneği bulunmaktadır: Birincisi, bir kâşif arı olarak rastgele dolaşıp besin kaynağı arayabilir ve işsiz arının bu davranışı tesadüfi hareket teorisine (random-walk theory) uygun olarak gerçekleşir; ikincisi, bir gözcü arı olarak kovandaki dans alanında paylaşılan bilgileri alır ve buna göre kendisini zengin besin kaynaklarına giden bir işçi olarak tayin edebilir.

Şekil 4.11'de bal arılarının temsili davranışı görülmektedir. İşçi arılar besin kaynağından aldığı bal özünü kovanda bulunan nektar bırakma alanına teslim ederler. Bu işlemi yaptıktan sonra işçi arılar üç farklı davranış biçimi sergileyebilir. Tip-1

olarak ifade ettiğimiz davranış biçiminde işçi arılar besin kaynağından aldığı nektarı bırakır ve tekrar besin kaynağına geri döner. Yani bu davranış biçiminde arılar dans alanına uğramazlar. Dolayısıyla, bir arının Tip-1 olarak ifade ettiğimiz davranışı sergilemesi durumunda bilgi paylaşımında bulunmayacağı sonucu ortaya çıkar. Tip-2 olarak düşünülen davranış biçiminde ise arı nektarı boşalttıktan sonra besin kaynağına geri dönmez ve bağımsız davranır. Yani bu arı besin kaynağından nektar taşıma işini bırakır. Tip-3 davranış biçiminde ise işçi arı nektarı bıraktıktan sonra dans alanında bilgi aktarımını yapar ve besin kaynağına geri döner. Bu davranış biçiminde yeni işçi arılar ilgili besin kaynağına doğru yola çıkabilir. Gözcü arı dans alanında iletilen bilgileri izleyerek ne yapması gerektiğine karar verir. Zenginlik oranı yüksek olan besin kaynağını tercih etmesi büyük olasılıktır. Kâşif arı ise tesadüfi arama stratejisiyle yeni besin kaynakları aramaktadır.



Şekil 4.11. Bal arılarının temsili davranışı

Yapılan araştırmalar kolonide bulunan tüm arıların eş zamanlı olarak besin aramaya çıkmadıklarını göstermektedir. Mevcut durumda işsiz bir arının besin aramaya başlaması durumu, toplam arı sayısı ile mevcut besin arama sayısı arasındaki farkla orantılı olduğu bilinmektedir.

Arıların bu davranışları, kendi kendini örgütleme (self-organization) becerisi bakımından dört temel ihtiyacı karşılamaktadır. Bu temel ihtiyaçlar, pozitif ve negatif geri bildirim, düzensiz değişim ve çoklu etkileşimdir. Arıların davranışıyla kendi kendini örgütlemede ihtiyaç duyulan davranış biçimlerinin nasıl karşılandığı aşağıda verilmiştir;

- Besin kaynağından gelen nektar miktarı arttıkça buna paralel olarak besin kaynağını izleyen gözcü arı sayısının da artması pozitif geri bildirimdir.
- Arıların terk ettiği besin kaynağından faydalanma sürecinin durdurulması negatif geri bildirimdir.
- Kâşif arıların yeni besin kaynağı bulmak amacıyla gerçekleştirdiği tesadüfi arama süreci düzensiz değişim ihtiyacını karşılar.
- Arıların yuvada bulunan diğer arılara besin kaynağıyla ilgili bilgi paylaşması durumu çoklu etkileşimin karşılığıdır.

YAKA'da önerilen yaklaşımla, arı kolonisinin davranışları matematiksel olarak modellenmiştir. Modelleme yapılırken bazı varsayım ve kabuller de yapılmıştır. Örneğin, normalde besin kaynağına birden fazla arı gidebiliyorken, YAKA'da her bir besin kaynağı için sadece bir arı gidebilmektedir. Yani kovan etrafında bulunan besin kaynağı sayısı, kolonide bulunan işçi arı sayısı kadardır. İşçi arının besin kaynağını bitirmesi durumunda kaynağı tüketen işçi arı bir kâşif arıya dönüşmektedir.

Algoritmanın her yinelemesinde gerçekleşen işlemler şunlardır; işçi ve gözcü arıları besin kaynaklarına göndermek, besin kaynaklarının nektar miktarını hesaplatmak ve kâşif arıları belirleyerek muhtemel besin kaynaklarına doğru onları yönlendirmek. Burada bir besin kaynağı optimize edilmesi gereken problemin bir çözümünü temsil etmektedir. Besin kaynağının nektar miktarı ise elde edilen çözümün kalitesini ifade etmektedir.

Gözcü arılar bir olasılık tabanlı seçim prosedürü kullanarak besin kaynaklarında istihdam edilir. Besin kaynağının nektar miktarı arttıkça gözcü arıların besin kaynağını tercih etmesini sağlayan olasılık değeri de yükselmektedir. Her koloni keşfetme işlevini gören kâşif arılara sahiptir ve bu arılar besin kaynağı ararken yardım alabileceği bir rehbere sahip değildir. Onlar tamamen tesadüfi olarak herhangi bir

besin kaynağı bulmaya çalışırlar. Kâşif arılar, zaman zaman daha önce hiç keşfedilmemiş zengin bir besin kaynağı bulabilmektedir. YAKA algoritmasında her işçi arı aynı zamanda kâşif arı olabilmektedir. Bir besin kaynağında besin arayan işçi arının yinelemeler boyunca ilerleme kaydedememesi durumunda, ilgili besinin tükendiği varsayılarak işçi arı tarafından terkedilir. Besin kaynağını terk eden bir işçi arı tesadüfi bir besin arama davranışında bulunarak kâşif arıya dönüşür. Bu işlemin kaç yinelemede bir gerçekleşeceğini belirlediğimiz sınır değer algoritmanın başarısı açısından oldukça önemlidir.

Sezgi-üstü algoritmaların tamamında olması gereken keşfetme ve faydalanma safhaları YAKA algoritmasında da uygulanmaktadır. İşçi ve gözcü arılar besin kaynaklarından nektar elde etmeye çalışarak faydalanma safhasını gerçekleştirir. Kâşif arılar ise çözüm uzayının henüz hiç bilinmeyen, keşfedilmemiş ve gelecek vadeden bölgelerini araştırarak keşif safhasını uygulamaktadır.

Algoritma temel olarak üç safhadan oluşmaktadır. Başlangıçta arılar tarafından rastgele besin kaynakları oluşturulmakta ve bunların nektar miktarları hesaplanmaktadır. Bu arılar daha sonra kovana geri dönerek dans alanında bekleyen arılara besin kaynaklarının nektar bilgilisini aktarırlar. İkinci bölümde, bilgi paylaşımı yapıldıktan sonra her işçi arı bir önceki çevrimde gittikleri besin kaynağı hafızasında bulunduğu için oraya gider ve mevcut komşularında bulunan görsel bilgiyi kullanarak yeni bir besin kaynağı seçer. Üçüncü aşamada, gözcü arılar dans alanında işçi arılar tarafından verilen nektar bilgisine bağlı olarak bir besin kaynağı seçerler. Daha önce de bahsedildiği gibi besin kaynağının nektar miktarı ne kadar yüksek olursa gözcü arının ilgili besin kaynağını seçme ihtimali de o kadar yüksek olur. Gözcü arı seçtiği alana vardıktan sonra görsel bilgiye bağlı olarak hafızasında bulunan komşulardan birinde yeni bir besin kaynağı seçer. Görsel bilgi besin kaynaklarının karşılaştırılmasına bağlıdır. İşçi arılar besin kaynağındaki nektarı terk ettiklerinde yeni bir besin kaynağı kâşif arı tarafından belirlenir ve terkedilenle değiştirilir. Önerilen modelde her yinelemede yeni bir besin kaynağı arayan sadece bir kâşif arı olması tercih edilirken işçi ve gözcü arıların eşit sayıda olması uygun görülmüştür.

Yapay işçi veya gözcü arı yeni bir besin kaynağı bulmak için olasılıksal olarak kendi hafızasındaki pozisyonu günceller ve yeni kaynağın nektar miktarını test eder. Burada

yeni kaynaktan kasıt, problem için oluşturulan yeni bir çözüm iken nektar miktarı ise çözümün uygunluk değerini temsil etmektedir. Arıların bulduğu yeni kaynağın nektar miktarı eski kaynaktan daha iyiyse eski pozisyon unutularak yeni kaynak hafızaya alınır. Aksi halde yeni bulunan pozisyon dikkate alınmayarak eski pozisyon hafızada kalmaya devam eder. Tüm işçi arılara arama süreçlerini tamamladıktan sonra dans alanında bulunan gözcü arılarla besin kaynaklarının nektar ve pozisyon bilgisini paylaşırlar. Gözcü arılar işçi arılardan aldıkları nektar bilgisini değerlendirir ve nektar miktarına göre oluşturulan bir olasılığa dayanarak bir besin kaynağını seçer. İşçi arı ise kendi hafızasındaki pozisyonu günceller ve aday çözümün nektar miktarını kontrol eder. Eğer nektar miktarı önceki pozisyondan fazlaysa eski pozisyon unutularak yeni besin kaynağı hafızaya alınır.

Başlangıçta oluşturulacak olan besin kaynağı tesadüfi bir süreç ile meydana getirilmektedir. Denklem (4.28) ile başlangıç koloni oluşturulmaktadır.

$$v_{ij}=min_j+rand(0,1)x\left(maks_j- min_j\right) \tag{4.28}$$

v_{ij} kolonide bulunan i. besin kaynağının j. boyutundaki pozisyonunu, rand(0,1) 0 ile 1 arasında tesadüfi olarak seçilecek bir sayıyı, $maks_j$ besin kaynağı için belirlenen üst sınırı, min_j ise alt sınırı ifade etmektedir.

Bir gözcü arı besin kaynağıyla ilgili olasılık değerine bağlı olarak bir besin kaynağı seçmektedir. Denklem (4.29) besin kaynağı olasılık hesabını ifade etmektedir.

$$p_i=\frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \tag{4.29}$$

fit_i işçi arının değerlendirdiği i. pozisyondaki besin kaynağının nektar miktarıyla orantılı olan i. çözümün uygunluk değerini, SN işçi arı sayısıyla (BN) eşit olan besin kaynağı sayısını temsil etmektedir. İşçi arılar gözcü arılara bilgilerini bu yolla aktarmaktadırlar.

$$fit_i=\begin{cases} \frac{1}{1+f_i}, & f_i\geq 0 \\ f_i, & f_i<0 \end{cases} \tag{4.30}$$

Besin kaynağının uygunluk miktarını tespit edebilmek için Eşitlik (4.30)'da verilen mantık önerilmektedir. Uygunluk miktarları kullanılarak elde edilen olasılık değerlerinin 0 ile 1 arasında rastgele seçilen bir sayıyla karşılaştırılabilmesi için istatistiksel bir metotla normalleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle Denklem (4.31)'de verilen azami-asgari normalleştirme (min-max normalization) kullanılmalıdır.

$$np_i = \frac{p_i - p_{maks}}{p_{maks} - p_{min}} \tag{4.31}$$

np_i i. besin kaynağının normalleştirilmiş olasılıksal performans değerini, p_{maks} en büyük olasılık değerini ve p_{min} en düşük olasılık değerini temsil etmektedir.

Gözcü arılar, işçi arılardan elde edilen normalleştirilmiş olasılık değerine göre bir seçim yaparak o bölgede nektar toplamaya çıkar. Bu işlem yapılırken iki hususa dikkat etmek gerekir: Birincisi, sadece normalleştirilmiş olasılık değeri 0 ile 1 arasında rastgele seçilen bir değerden daha yüksek olan besin kaynakları gözcü arıların araştırılacak besin kaynağı listesine eklenmelidir; ikincisi, gözcü arıların belirlenmiş zengin besin kaynaklarından hangisine gideceği rastgele seçilmelidir. Böylece işçi arılar tarafından gelecek vadettiği belirtilen bölgeleri gözcü arılar etkin bir şekilde araştırarak bu bölgenin yerel optimalini elde etmeye çalışırlar.

Gerek işçi arıların gerekse gözcü arıların buldukları bölgede araştırma yapabilmesi için bir pozisyon güncelleme yaklaşımına ihtiyaç vardır. Dolayısıyla, eski bir pozisyondan yeni bir aday besin kaynağı üretebilmek için Eşitlik (4.32) kullanılmaktadır.

$$v_{ij} = x_{ij} + rand(-1,1) x \left(x_{ij} - x_{kj}\right), \; k \in \{1,2,..,BN\}, \; j \in (1,2,..,D) \tag{4.32}$$

$rand(-1,1)$ -1 ile 1 arasında değişen rastgele bir sayıyı, BN toplam işçi arı sayısını, D optimize edilecek karar değişkeni sayısını, k ve j rastgele seçilen indeksleri temsil etmektedir. Burada k indeksi i'den farklı bir sayı olmak zorundadır. Besin kaynağı i. pozisyonda olan arının j. boyuttaki mevcut pozisyonu x_{ij} iken aday pozisyonu v_{ij}'dir. Burada arı, pozisyon güncelleme işlemini yaparken kendisinin ve komşusunun besin kaynağını kullanılır. Sadece aday pozisyonun verimi mevcut pozisyondan daha iyiyse pozisyon güncellenir. Aksi taktirde pozisyon değişimi yapılmaz.

1: ***Giriş***: İşçi Arı ve Gözcü Arı Sayısı, Sınır, Yineleme Sayısı

2: Başlangıç popülasyonunu oluştur ve uygunluk değerini belirle;

2.1: ***for*** i = 1'den İşçi Arı Sayısına kadar ***yap***;

2.2: $x_{ij}=min_j+rand(0,1)x(maks_j- min_j)$ denklemine göre pozisyon üret

2.3: f_i yi hesapla ***end***

4: ***While*** t≤Yineleme Sayısı

4.1: İşçi arılara aday besin üret ve uygunluk değerini hesapla;

4.1.1: ***for*** i = 1'den İşçi Arı Sayısına kadar ***yap***;

4.1.2: $v_{ij}=x_{ij}+rand(-1,1)x(x_{ij}- x_{kj})$ denklemine göre aday besin üret

4.1.3: adayların uygunluk değerlerini hesapla

4.1.4: ***if*** $v_i > x_i$;

4.1.5: aday pozisyonu yeni besin kaynağı yap ***end***

4.1.6: ***end***

4.2: Uygunluk miktarlarına göre olasılık değerlerini hesapla;

4.2.1: ***for*** i = 1'den İşçi Arı Sayısına kadar ***yap***;

4.2.2: $p_i=\frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n}$'e göre hesapla ***end***

4.2.3: p_i değerlerini normalize et

4.3: Gözcü arılara zengin besin kaynağı kümesi üret

4.3.1: ***for*** i = 1'den İşçi Arı Sayısına kadar ***yap***;

4.3.2: ***if*** $np_i > rand(0,1)$

4.3.3: Zengin_Besin_Kaynakları listesine ekle ***end***

4.3.4: ***end***

4.4: Gözcü arıları zengin besin kaynaklarına gönder;

4.4.1: ***for*** i = 1'den Gözcü Arı Sayısına kadar ***yap***;

4.4.2: x_i = rastgele_seç(Zengin_Besin_Kaynakları)

4.4.3: $v_{ij}=x_{ij}+rand(-1,1)x(x_{ij}- x_{kj})$ denklemine göre aday besin üret

4.4.4: adayların uygunluk değerlerini hesapla

4.4.5: ***if*** $v_i > x_i$;

4.4.6: aday pozisyonu yeni besin kaynağı yap ***end***

4.4.7: ***end***

4.5: Nektarı biten (sınırı geçen) kaynak varsa, ilgili işçi arıyı kâşif arı yap;

4.5.1: $x_{ij}=min_j+rand(0,1)x(maks_j- min_j)$ denklemine göre rastgele pozisyon üret

4.6: Elde edilen en iyi çözümü hafızaya al;

4.7: t = t+1;

4.8: ***end***

Şekil 4.12. YAKA sözde-kodu

Aday pozisyon oluşturulurken komşu besin kaynaklarından yararlanılmaktadır. Mevcut pozisyon ile kolonide bulunan ve rastgele seçilen k. pozisyondaki besin kaynağı arasındaki fark küçüldükçe işçi arının aday pozisyonu da mevcut pozisyonuna giderek yaklaşmaktadır. Bu sebeple, çözüm arama uzayındaki optimum çözüme yaklaştıkça adım uzunluğu adaptif olarak azalmaktadır.

Daha önce de bahsedildiği gibi işçilerin terk ettiği besin kaynağı kâşif arılar tarafından üretilen yeni bir besin kaynağıyla değiştirilir. YAKA algoritmasında bir pozisyonun uygunluk değeri önceden belirlenen ve sınır olarak adlandırılan yineleme sayısı boyunca herhangi bir iyileşme gösterememişse bu besin kaynağının terkedildiği varsayılmaktadır.

Her bir aday pozisyon v_{ij} üretilip değerlendirildikten sonra aday pozisyonların performansı mevcut besin kaynaklarının performansıyla karşılaştırılır. Eğer yeni besin eskisiyle eşit ya da daha fazla nektara sahipse yeni pozisyon hafızaya alınır ve eski pozisyon silinir. Aksi halde, eski besin kaynağı kullanılmaya devam eder. Burada aday besin kaynakları ile eskiler arasında aç gözlü (greedy) bir seçim süreci işletilmektedir.

Açıklamalardan da anlaşılacağı üzere YAKA algoritması 4 farklı seçim süreci uygulamaktadır;

- Eşitlik (4.29)'da tanımlandığı gibi gözcü arılar gelecek vadeden bölgeleri keşfetmek için global bir seçim süreci kullanırlar
- Eşitlik (4.30)'da belirtildiği gibi işçi ve gözcü arılar hafızalarındaki kaynağın çevresinde komşu besin kaynaklarından faydalanarak bir yerel arama süreci uygularlar
- Tüm arılar tarafından aç gözlü seçim süreci olarak adlandırılan bir yerel seçim süreci uygulanır
- Kâşif arılar tarafından tesadüfi seçim süreci uygulanır

Algoritmanın sözde-kodu Şekil 4.12'de verilmiştir. YAKA algoritmasında üç kontrol parametresi bulunmaktadır: 1) İşçi veya gözcü arıların sayısına (SN) eşit olan besin kaynağı sayısı, 2) Kâşif arının görevlendirileceği sınır değer, 3) Yineleme sayısı. D. Karaboğa ve B. Baştürk her yinelemede sadece 1 adet kâşif arı tercih ederken işçi ve gözcü arı sayısını da eşit olarak düşünmüştür.

4.6. Bozkurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimizer)

Bozkurt Optimizasyonu Mirjalili ve diğ. tarafından 2014 yılında sürü zekası konseptine dayanarak sunulan yeni ve etkili bir algoritmadır [2]. Araştırmacılar yöntemi bozkurtların sosyal davranışlarından ilham alarak sezgi-üstü algoritmaların doğasına uygun şekilde modellemişlerdir.

Bozkurtlar (Canis lupus) besin zincirinin en tepesinde bulunan yırtıcılar olarak görülmektedir. Bozkurtlar 5-12 elemanı bulunan gruplar halinde yaşamayı tercih ederler. Liderleri erkek veya kadın olabilir ve alfa (α) olarak isimlendirilir. Alfa kurdu, avlanma, dinlenme yeri ve uyanma vakti gibi kararları vermeden sorumludur. Alfanın verdiği bir karar grubun tamamına uygulanır. Ancak bazen alfa kurdunun gruptaki diğer kurtları takip ettiği demokratik davranışların da görüldüğü bilinmektedir. Genellikle, tüm grup üyeleri kuyruklarını aşağıda tutarak alfa kurduna itaat ettiklerini gösterirler. Alfa kurtlarının sadece grup içerisinde çiftleşmesine müsaade edilir. Alfa kurdunun gruptaki en güçlü üye olması beklenmez. Bir alfa kurdu olabilmek için grubu yönetebilecek kapasiteye sahip olunmalıdır. Başka bir deyişle grubu en iyi yönetecek kurdun, gruptaki en güçlü kurt olmasa bile alfa kurdu olması sağlanır. Bu durum, gruptaki organizasyon ve disiplin kavramının fiziksel güçten çok daha önemli olduğunu göstermektedir.

Hiyerarşik düzende alfa kurdundan sonra beta (β) kurdu bulunmaktadır. Betalar, diğer grup aktivitelerinde veya karar alma konusunda alfaya yardım eden alt yönetici pozisyonundadır. Beta kurdu erkek veya kadın olabilir ve alfanın çok yaşlanması veya ölmesi durumunda muhtemelen en iyi alfa adayı beta kurdu olur. Betalar alfa kurdunun emirlerine uymalıdır ancak aynı zamanda hiyerarşik olarak kendinden daha düşük seviyede bulunan diğer kurtları da yönetmelidir. Beta kurdu alfanın emirlerini tüm gruba uygulatır ve geri dönüşleri alfaya bildirir.

En düşük seviyede bulunan bozkurt omegadır (ω). Omega kurtları, grupta bulunan tüm baskın kurtlara itaat etmek zorundadır. Ele geçirilen bir avı yeme hakkı en son omega kurduna verilmektedir. Omegalar grup içerisinde çok önemsiz gibi görünse bile grupta omega bulunmaması durumunda iç çatışmalar yaşandığı bilinmektedir. Aynı zamanda omega kurtları zaman zaman bebek bakıcısı olarak da kullanılabilmektedir.

Bunların dışında alfa ve beta kurtlarına uyması gereken ve omegaya baskın olan delta (δ) kurtları bulunmaktadır. Gözcüler, nöbetçiler, yaşlılar, avcılar ve bakıcılar bu gruba dahildirler. Gözcüler, bölgenin sınırlarını izlemek ve tehlikeli olması durumunda grubu bilgilendirmekten sorumludur. Nöbetçiler, grubun güvenliğini sağlarlar. Yaşlılar, bir zamanlar alfa veya beta olan tecrübeli kurtlardır. Avcılar, gruba yiyecek sağlamak için avlanırken alfa ve betaya yardım eder. Son olarak, hasta bakıcılar gruptaki zayıf, hasta ve yaralı kurtların bakımlarından sorumludurlar.

Bozkurtların sosyal hiyerarşisine ek olarak avlanma konusundaki sosyal davranışları da oldukça ilginçtir. Bozkurtların avlanma sürecinde kullandıkları temel adımlar aşağıda verilmiştir;

- Bir avı izleme, takip etme ve yaklaşma
- Avın kaçışı bitene kadar kovalama, çevirme ve taciz etme
- Ava saldırma

Mirjalili ve diğ. bozkurtların bahsedilen hiyerarşik ve avlanma davranışlarından ilham alarak optimizasyon problemlerini çözebilecek bir matematiksel model önermişlerdir.

Bozkurtlar avlanma süreci boyunca avı çevrelemektedirler. Bu davranışlarını matematiksel olarak modellemek için aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir;

$$\vec{D}=\left|\vec{C}.\vec{X}_p(t)-\vec{X}(t)\right| \tag{4.33}$$

$$\vec{X}(t+1)=\left|\vec{X}_p(t)-\vec{A}.\vec{D}\right| \tag{4.34}$$

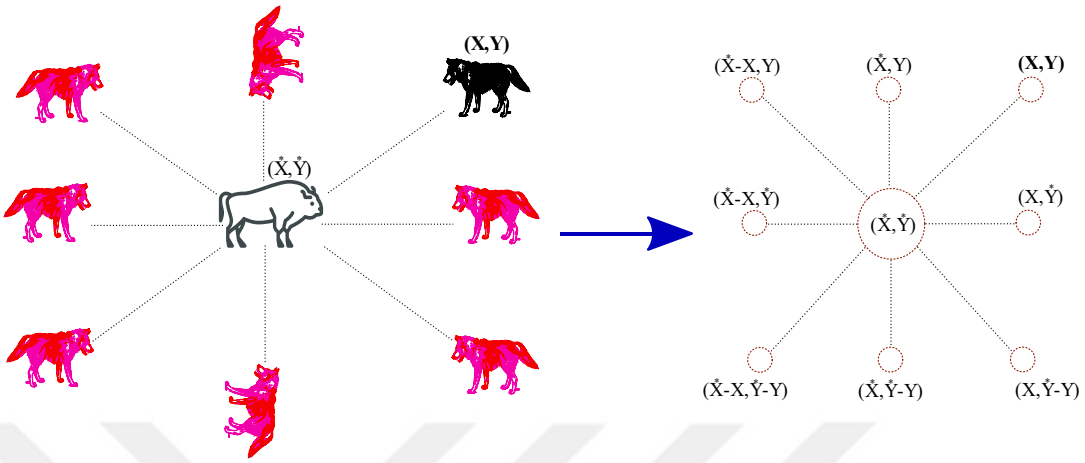
$$\overrightarrow{Ar}=2\vec{a}.\vec{r}_1-\vec{a} \tag{4.35}$$

$$\vec{C}=2.\vec{r}_2 \tag{4.36}$$

$\vec{a}$ vektörü yineleme sürecinde 2'den 0'a doğru lineer olarak azalan bir bileşeni, $\vec{r}_1$ ve $\vec{r}_2$ 0 ile 1 arasından rastgele değişen değerler alan vektörleri, $\vec{X}_p$ avın konumunu ve $\vec{X}$ gri kurdun pozisyonunu temsil etmektedir. Çalışmamız kapsamında $\vec{a}$ vektörü aşağıda verildiği gibidir;

$$\vec{a} = ((-2 \text{ x Iter})/\text{MaksIter}) + 2 \tag{4.37}$$

Iter o ana kadar yapılmış olan yineleme sayısını ve MaksIter toplam yapılacak yineleme sayısını ifade etmektedir.



Şekil 4.13. Kurtlar ve avın iki boyutlu gösterimde muhtemel pozisyonları [2]

Eşitlik (4.33) ve (4.34)'de verilen denklemlerin davranışını idrak edebilmek amacıyla iki boyutlu pozisyon vektörleri ve muhtemel komşu pozisyonları Şekil 4.13'de örneklendirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi (X,Y) koordinatında bozkurt bulunurken (X*,Y*) koordinatında av bulunmaktadır. Kurdun avın çevresindeki muhtemel pozisyonları da yine koordinat sisteminde ifade edilmiştir. Örneğin, kurt (X, Y*) koordinatına gelirse X ekseninde yerini değiştirmemişken Y ekseninde avla aynı hizaya gelecek şekilde hareket etmiş olmaktadır. Aynı şekilde (X*,Y) koordinatına gelirse Y eksenin hizasını değiştirmiş olmayacak ancak X ekseninde avıyla aynı hizaya gelecek şekilde hareket etmiş olacaktır. Geldiği bu pozisyondan yine X ekseninde hareket ederek (X*-X,Y) koordinatına geçme ihtimali de bulunmaktadır. Bahsedilen bu pozisyonlar eşitliklerde belirtilen yaklaşımla ifade edilebilmektedir. Kurt ve avın pozisyonlarını bildiğimiz için $\overrightarrow{Ar}$ ve $\overrightarrow{C}$ vektörlerini bilmemiz durumunda kurdun bir sonraki pozisyonunu elde edebiliriz. Örneğin, $\overrightarrow{Ar}$ vektörünün (0,1) ve $\overrightarrow{C}$ vektörünün (1,1) olduğunu farz edelim. Bu durumda kurdun bir sonraki pozisyonu (X*, Y*-Y) olacaktır. İki boyutlu olarak gösterilen bu davranış n boyutlu bir gösterimde de aynı mantıkla işlemektedir.

Bozkurtlar, avın yerini algılama ve etrafını çevreleme yeteneğine sahiptir. Alfanın dışında beta ve delta da zaman zaman avlanma sürecine katılmaktadır. Ancak bizler arama uzayında optimum noktanın, yani avımızın, yeri hakkında bir fikre sahip

olmadığımız için avın yerini tahmin edebilmeliyiz. Dolayısıyla avın yerini matematiksel olarak modelleyebilmek amacıyla avın konumu alfa, beta ve deltanın bilgileri kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu doğrultuda, mevcut yinelemeye kadar elde edilen ilk üç iyi çözüm saklanarak diğer tüm arama temsilcilerinin pozisyon değişimi için referans olarak kullanılır. Başka bir deyişle, tüm arama temsilcileri ilk üç pozisyondan gelen bilgiye göre pozisyonlarını güncellerler. Buna göre aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir.

$$\overrightarrow{D_\alpha}=\left|\overrightarrow{C_1}.\vec{X}_\alpha-\vec{X}\right|,\ \overrightarrow{D_\beta}=\left|\overrightarrow{C_2}.\vec{X}_\beta-\vec{X}\right|,\ \overrightarrow{D_\delta}=\left|\overrightarrow{C_3}.\vec{X}_\delta-\vec{X}\right| \tag{4.38}$$

$$\vec{X}_1=\vec{X}_\alpha-\overrightarrow{Ar}_1.\left(\overrightarrow{D_\alpha}\right),\ \vec{X}_2=\vec{X}_\beta-\overrightarrow{Ar}_2.\left(\overrightarrow{D_\beta}\right),\ \vec{X}_3=\vec{X}_\delta-\overrightarrow{Ar}_3.\left(\overrightarrow{D_\delta}\right) \tag{4.39}$$

$$\vec{X}(t+1)=\frac{\vec{X}_1+\vec{X}_2+\vec{X}_3}{3} \tag{4.40}$$

Elde edilen pozisyondan faydalanma safhası bozkurtların ava saldırması olarak düşünülmektedir. Avın hareketi durduğunda bozkurtlar ava saldırarak avı bitirirler. Matematiksel olarak bunu ifade edebilmek için lineer olarak azalan $\vec{a}$ vektörü verilmiştir. $\overrightarrow{Ar}$ katsayısının dalgalanma aralığı da $\vec{a}$ vektörüyle birlikte azalmaktadır. Başka bir ifadeyle, aslında $\overrightarrow{Ar}$ katsayısı [-2$\vec{a}$,2$\vec{a}$] aralığında rastgele değişen bir katsayıdır ve $\vec{a}$ vektörü azaldıkça $\overrightarrow{Ar}$ vektörünün salınım aralığı da küçülmektedir. $\overrightarrow{Ar}$ vektörü [-1,1] aralığına geldiği zaman arama temsilcisinin sonraki pozisyonu mevcut pozisyonu ile avın konumu arasında gerçekleşmektedir. Bu durum, artık bulunan bölgenin yerel optimalini elde etme, yani bulunan avdan faydalanma safhasının matematiksel karşılığı olmaktadır.

Şu ana kadar verilen operatörler ile birlikte BO algoritması, arama temsilcilerinin kendi pozisyonlarını alfa, beta ve deltaya göre güncellemelerini ve ava saldırmalarını sağlar. Bu haliyle bırakıldığı taktirde matematiksel modelin yerel optimalden kaçınma özelliği bulunmamaktadır. Bu sebeple, $\overrightarrow{C}$ vektörü (0,2) arasında rastgele değişen bir değer olarak atanmıştır. Bu vektör sayesinde kurtların tesadüfi davranışı devam edebilmektedir. $\overrightarrow{C}$ katsayısı, kurtların doğada karşılaştığı engeller olarak düşünülebilir.

$\vec{C}$ vektörü ile sadece ilk iterasyonlarda değil son yinelemede bile keşif çalışması yapılabilmektedir.

1: ***Giriş***: Popülasyon Sayısı, Yineleme Sayısı
2: Başlangıç popülasyonunu oluştur;
2.1: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
2.2: X_i=(1,2,..,n) pozisyon üret ***end***
3: a, Ar, C parametrelerini belirle. Her bir temsilcinin uygunluk değerini hesapla;
X_α: En iyi temsilci, X_β: İkinci en iyi temsilci, X_δ: Üçüncü en iyi temsilci
4: ***While*** t≤Yineleme Sayısı
4.1: Kurtların pozisyonunu güncelle;
4.1.1: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
4.1.2: $\vec{X}(t+1)=\frac{\vec{X}_1+\vec{X}_2+\vec{X}_3}{3}$ denklemine göre pozisyon güncelle
4.1.3: ***end***
4.2: a, Ar, C parametrelerini belirle. Her bir temsilcinin uygunluk değerini hesapla;
4.2.1: X_α, X_β ve X_δ konumlarını güncelle
4.3: t = t+1;
4.4: ***end***

Şekil 4.14. BO sözde-kodu

Özetlemek gerekirse, BO algoritmasında arama süreci rastgele bir bozkurt popülasyonu oluşturularak başlar. Yineleme süreci boyunca alfa, beta ve delta kurtları avın muhtemel yerini tahmin eder. Her bir aday çözüm, ava olan uzaklığını yapılan tahmine göre günceller. Önce keşif süreci ve daha sonra faydalanma kavramını gerçekleştirebilmek için $\vec{a}$ vektörü 2'den 0'a lineer olarak azaltılır. Aday çözümler $\overrightarrow{Ar}$ vektörü 1'den büyük olursa avdan uzaklaşma eğiliminde olurken 1'den küçük olursa yakınlaşma eğiliminde olmaktadır. Nihayetinde BO algoritması en uygun çözüme ulaşır. Algoritmanın sözde-kodu Şekil 4.14'de verilmiştir. Görüldüğü gibi algoritmanın ayarlanması gereken bir parametresi yoktur. Uygulama basitliği algoritmanın kullanılmasında ana nedendir. Sonraki Bölümlerde açıklanacak olan performans analizinde BO algoritmasının basitliğinin yanı sıra çözüm kalitesi ve güvenilirliği yüksek bir yöntem olduğu görülecektir.

4.7. Salp Sürüsü Algoritması (Salp Swarm Algorithm)

Salp Sürüsü Algoritması okyanuslarda yaşayan saydam görünümlü fıçı şeklindeki deniz canlılarının besin arama davranışından ilham alınarak S. Mirjalili ve diğ. tarafından önerilmiştir [66].

Salpler fıçı şeklinde saydam bir vücuda sahiptir ve Salpidae ailesine mensuptur. Salp canlısının dokusu ve ilerlemek için vücudundan su pompalaması deniz anasına çok benzemektedir. Bu canlının yaşadığı çevreye ulaşmak ve bu canlıyı laboratuvar ortamında tutabilmek çok zor olduğu için araştırmacıların bu canlı hakkında edindiği bilgiler sınırlıdır. Ancak bu algoritmanın oluşturulmasında ilham alınan nokta biyolojik araştırmacıların bu canlıların salp zinciri adı verilen bir sürü oluşturduğunu tespit etmiş olmasıdır. Şu anda salp sürüsünün bu davranışının ana nedeni tam olarak anlaşılmamış olsa bile besin arama sürecinde hızlı koordinat değiştirerek daha iyi hareket etmeyi başarmak için salp zinciri oluşturdukları düşünülmektedir.

Salp zincirlerini matematiksel olarak modelleyebilmek için salp popülasyonu lider ve takipçileri olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Lider olarak atanan salp zincirin en başında dururken takipçiler zincirin geri kalanını temsil etmektedir. Salp zincirinin lideri sürünün geri kalanına kılavuzluk yaparken takipçilerin hepsi ardı sıra lideri takip etmektedir. Bir zincirin halkaları gibi en arkadaki salp bir önündekini takip ediyor olsa bile aslında en öndeki lideri takip etmektedir.

Bir optimizasyon probleminin n adet karar değişkeni olacağı için önerilen teknikte diğer sürü zekâsı konseptine dayalı sezgi-üstü yöntemlerde olduğu gibi salplerin pozisyonu n boyutlu olarak tasarlanmıştır. Salplerin bu n boyutlu pozisyonları iki boyutlu x matrisinde saklanmaktadır. Sürünün hedefi arama uzayında bulunan F besin kaynağına ulaşmaktır. Buna göre liderin pozisyon güncellemesi aşağıda verilen denklem ile gerçekleştirilmektedir;

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1\left(\left(maks_j - min_j\right)r_1 + min_j\right), & r_2 \geq 0 \\ F_j - c_1\left(\left(maks_j - min_j\right)r_1 + min_j\right), & r_2 < 0 \end{cases} \tag{4.41}$$

x_j^1 j. boyuttaki ilk salpin, yani lider salpin pozisyonunu, F_j j. boyuttaki besin kaynağını, $maks_j$ j. boyutun üst sınırını, min_j j. boyutun alt sınırını, r_1, r_2 ve c_1 rastgele sayıları

temsil etmektedir. Eşitlik (4.41)'den lider salpin sadece yemek kaynağına göre pozisyonunu güncellediği görülmektedir. Rastgele sayıları temsil eden katsayıların da pozisyon güncelleme esnasında son derece önemli olduğu anlaşılmaktadır.

$$c_1=2e^{-\left(\frac{4iter}{MaksIter}\right)^2} \tag{4.42}$$

Eşitlik 4.42'de MaksIter maksimum yineleme sayısını ve iter içinde bulunulan yinelemeyi temsil etmektedir. Keşif ve faydalanma safhaları arasındaki dengeyi sağlaması açısından c_1 katsayısı SSA'nın en önemli parametresi olarak görülmektedir.

Diğer katsayılar r_1 ve r_2 0 ile 1 arasında değişen rastgele bir sayıyı temsil etmektedir. Bu katsayılar, bir sonraki pozisyonun pozitif veya negatif yönde ilerlemesi durumunu ve adım büyüklüğünü belirlemektedir.

Lideri takip eden salp zincirinin diğer üyeleri pozisyonlarını değiştirirken lideri takip etmek zorundadırlar. Takipçilerin pozisyonunu güncellemek için Newton'un hareket yasasından yararlanılmıştır.

$$x_j^i=\frac{1}{2}at^2+v_0t \text{ , } i\geq 2 \tag{4.43}$$

x_j^i i. takipçi salpin j. boyuttaki pozisyonunu, t zamanı, v_0 başlangıç hızını, $v=\frac{x-x_0}{t}$'de $a=\frac{v_{son}}{v_0}$ ifadelerini temsil etmektedir. Optimizasyon probleminde zaman yineleme olduğu için yinelemeler arasındaki zaman farkı 1'dir ve $v_0 = 0$ olduğu düşünülürse Eşitlik (4.43)'ü (4.44) olarak revize etmek gerekmiştir.

$$x_j^i=\frac{1}{2}\left(x_j^i+x_j^{i-1}\right) \text{ , } i\geq 2 \tag{4.44}$$

x_j^i i. takipçi salpin j. boyuttaki pozisyonunu göstermektedir. Sadece Eşitlik (4.41) ve (4.44) denklemleri ile salp zincirinin besin arama sürecinin matematiksel benzetimi yapılmıştır. Ancak lider salpin pozisyon güncellemesinde ihtiyaç duyduğu besin kaynağı bilgisi bir optimizasyon problemindeki en iyi çözüme tekabül etmektedir. Problemin en iyi çözümü bilinmediğine göre burada bir varsayım yapılmalıdır. Mirjalili ve diğ. besin kaynağının pozisyonunu içinde bulunulan en iyi çözüm olarak düşünmüşlerdir. Yani salp zincirinin o ana kadar elde ettiği en iyi çözüm besin kaynağı

olarak düşünülecektir. Salp zincirinin en iyi çözümü aynı zamanda zincirin lideridir. Lider pozisyonunu besin kaynağına göre güncellemektedir ve besin kaynağının o ana kadar elde edilen en iyi pozisyon olduğu varsayılırsa lider aynı zamanda besin kaynağı olmaktadır. Dolayısıyla salp zincirinin lideri bir sonraki pozisyonunu mevcut pozisyonunu referans alarak belirlemektedir.

1: ***Giriş***: Popülasyon Sayısı, Yineleme Sayısı, Üst Sınır, Alt Sınır
2: Başlangıç popülasyonunu oluştur;
2.1: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
2.2: x_i=(1,2,..,n) pozisyon üret ***end***
3: ***While*** t≤Yineleme Sayısı
3.1: Her bir salpin uygunluk değerini hesapla;
3.2: F = En iyi temsilciyi besin kaynağı olarak seç
3.3: $c_1=2e^{-\left(\frac{4iter}{MaxIter}\right)^2}$ hesapla
3.4: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
3.4.1: ***if*** i = 1 lider salpi güncelle;
3.4.2: $$x_j^1=\begin{cases} F_j+c_1\left(\left(maks_j-min_j\right)r_1+min_j\right), & r_2\geq 0 \\ F_j-c_1\left(\left(maks_j-min_j\right)r_1+min_j\right), & r_2<0 \end{cases}$$
3.4.3: ***else*** takipçi salpleri güncelle;
3.4.4: $$x_j^i=\frac{1}{2}\left(x_j^i+x_j^{i-1}\right)$$
3.4.5: ***end***
3.4.6: ***end***
3.5: Üst ve Alt sınıra göre salpleri düzelt
3.6: t = t+1;
3.7: ***end***

Şekil 4.15. SSA sözde-kodu

Şekil 4.15'te sözde-kodu verilen SSA algoritması, BO'da olduğu gibi uygulama basitliğine sahiptir. Aynı zamanda algoritmanın ayarlanması gereken parametresi neredeyse yoktur. Sözde-kod incelendiğinde başlangıçta zinciri oluşturacak her bir salpin karmaşık bir düzende olacağı anlaşılacaktır. Çünkü başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulmaktadır. Ancak oluşturulan matematiksel model salplerin birkaç iterasyon içerisinde zincir şekline bürünerek besin arama sürecine devam etmesini sağlamaktadır.

4.8. Kâşif Algoritması (Pathfinder Algorithm)

Kâşif Algoritması H. Yapıcı ve N. Çetinkaya tarafından 2019 yılında önerilmiş yeni bir sezgi-üstü optimizasyon algoritmasıdır [67]. Bu metot, hayvan gruplarının kolektif hareketinden ve en iyi besin kaynağını bulmaya çalışan sürülerin hiyerarşik düzeninden ilham almıştır.

Önerilen modelde optimizasyon problemlerinin doğası gereğince her bir üye d boyutlu olabilmektedir. Eğer bir üye herhangi bir anda en çok umut vadeden noktada bulunuyorsa, o üye lider olarak seçilmektedir. Önceki bölümde detayları açıklanan SSA'da aynı şekilde salp sürüsünün en iyi üyesi lider olarak seçilmekteydi. Bu yönüyle KA algoritması liderlik hiyerarşisi kullanarak SSA'da kullanılan konsepti uygulamıştır. Ancak SSA'da salp sürüsünün üyeleri liderlerini takip ederken KA'da sürünün diğer üyeleri hem liderlerini takip etmekteler hem de komşu pozisyonlara göre bağımsız hareket edebilmektedirler. Bu yönüyle KA'nın SSA'da kullanılan liderlik hiyerarşisinden daha farklı bir yaklaşım kullandığı anlaşılmaktadır. KA algoritmasında sürünün lideri kâşif (pathfinder) olarak adlandırılmıştır. Sürünün üyeleri besin kaynağını veya avını bulmak için veya kâşif üyeyi takip edebilmek için aşağıda verilen denkleme göre hareket etmektedir;

$$x(t+\Delta t)=x^{0}(t).n+f_i+f_p+\varepsilon \tag{4.45}$$

t zamanı, x pozisyon vektörünü, n açısı bulunmayan bir birim vektörü, f_i, x_i ve x_j komşulukları arasında gerçekleşen ikili etkileşimi, f_p kâşif üyenin pozisyonuna, yani sürünün en iyi pozisyonuna, bağlı olan global kuvveti ve ε titreşim vektörünü ifade etmektedir.

Diğer taraftan, kâşif üyenin pozisyon güncelleme davranışı aşağıda verildiği gibi gerçekleşmektedir;

$$x_p(t+\Delta t)= x_p(t)+\Delta x+A \tag{4.46}$$

x_p kâşif üyenin pozisyonunu, Δx kâşifin bir noktadan diğerine gitmek için aldığı mesafeyi ve A ise bir salınım vektörünü temsil etmektedir. Yukarıda verilen denklemler liderlik hiyerarşisine sahip kolektif bir sürü yapısını modellemektedir fakat

bu haliyle bir optimizasyon problemini çözmek için kullanılamazlar. Bu nedenle kâşif üyenin pozisyon güncelleme davranışı Denklem (4.47)'de verildiği gibi revize edilirken sürünün diğer üyeleri Denklem (4.49)'da verildiği gibi hareket edecek şekilde güncellenmiştir.

$$x_p^{K+1}=x_p^K+2r_3.\left(x_p^K-x_p^{K-1}\right)+A \tag{4.47}$$

$$A=u_2.e^{\frac{-2Iter}{MaksIter}} \tag{4.48}$$

r_3 0 ile 1 arasında rastgele değerler alan bir vektörü, u_2 -1 ile 1 arasında rastgele değerler alan bir vektörü, MaksIter toplam yineleme sayısını, Iter o esnada bulunulan yinelemeyi, x_p^{K+1} kâşifin sonraki pozisyonunu ve x_p^K kâşif üyenin mevcut pozisyonunu temsil etmektedir.

$$x_i^{K+1} = x_i^K + R_1.\left(x_j^K - x_i^K\right) + R_2.\left(x_p^K - x_i^K\right) + \varepsilon \tag{4.49}$$

$$\varepsilon = (1 - \frac{K}{K_{maks}}).u_1.D_{ij} \tag{4.50}$$

$$D_{ij}=\left\|x_i-x_j\right\| \tag{4.51}$$

$$R_1=\alpha r_1 \ , \ R_2=\beta r_2 \tag{4.52}$$

x_i^K i. üyenin K. yinelemedeki pozisyonunu, x_i^{K+1} i. üyenin bir sonraki pozisyonunu, x_j^K j. üyenin pozisyonunu, r_1 ve r_2 (0,1) aralığından seçilen tesadüfi değişkenleri, α komşularla gerçekleşen etkileşimin seviyesini belirleyen katsayıyı ve β liderin sürüyü kendine doğru çekme seviyesini etkileyen katsayıyı temsil etmektedir. Burada yazar iki önemli durumdan bahsetmektedir: 1) $\alpha=0$ ve $\beta=0$ durumu, 2) $\alpha=\infty$ ve $\beta=\infty$ durumu. İlk durumun gerçekleşmesi halinde sürüde bulunan her birey herhangi bir etkileşimde bulunmadan arama uzayında tamamen tesadüfi şekilde dolaşacaktır. İkinci durumda ise bireyler etkileşim esnasında kabul edilemez bir dış etkiye maruz kalacağı için sağlıklı bir etkileşimden bahsetmek mümkün olmayacaktır. H. Yapıcı ve N. Çetinkaya yaptıkları analizlerde $\alpha<1$ ve $\beta<1$ iken takipçi üyelerin pozisyonlarını değiştiremediğini ve dolayısıyla lidere yaklaşamadıklarını görmüşlerdir. Diğer taraftan, $\alpha \gg 1$ ve $\beta \gg 1$ iken takipçi üyelerin pozisyon değişirken yaşadıkları adım

büyüklüğünün artabildiği ve dolayısıyla yine kâşif üyeye yaklaşamadıklarını tespit etmişlerdir. Bu sebeple, katsayılar belirtildiği gibi seçilirse arzu edilen kaliteli çözümler elde edilemeyebilir. Dolayısıyla bu katsayıların yaklaşık olarak 1 ve çevresinde olması faydalı olacaktır. Yazarlar KA'yı önerdikleri çalışmada α ve β katsayılarını her yinelemede 1 ile 2 arasından seçilen tesadüfi bir sayı olarak önermişlerdir.

Lider üyenin bir önceki pozisyonuyla olan etkileşimin ve takipçi üyelerin hem birbirleriyle olan hem de liderle olan etkileşimin sonucu sıfır olursa, bu durumda A ve ε her üyenin tesadüfi olarak hareket etmesini sağlayacaktır. Dolayısıyla, A ve ε uygun bir değer aralığında olmalı ve tesadüfi bir hareket gerçekleştirebilmek için de bir rastgele sayı üreteci içermelidir. Bu değişkenler, başlangıçta yüksek değerler alarak güçlü bir araştırma süreci işletmeli ve yinelemeler arttıkça azalarak umut vadeden bölgelerin yerel optimallerini tespit etmek üzere faydalanma sürecini çalıştırabilmelidir. Bu değişkenlerin içinde bulunan u_1 ve u_2 rastgele sayı üreteçlerinin üst ve alt sınırı -1 ile 1 seçilmiştir. Bu değişkenler -1 ile 1 arasında tesadüfi olarak sayı üretecektir. Bu aralığın daha geniş olması durumunda adım büyüklüğü gereğinden fazla artacağı için üyeler muhtemel iyi çözümlerden uzaklaşacaklardır.

SSA'da olduğu gibi KA'da kâşif üye en iyi besin kaynağını bulmaya çalışmakta ve pozisyonlarını buna göre hareket ettirmektedir. Ancak global optimal nokta belirsiz olduğu için o ana kadar elde edilen en iyi üye, en iyi besin kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Başka bir ifadeyle, kâşif üye bizzat kendisini aramakta ve kendisine göre pozisyonunu değiştirmektedir. KA'nın bulduğu yeni pozisyon eskisinden iyiyse liderin pozisyonu güncellenmektedir. Daha sonra takipçi üyelerin pozisyonları güncellenmekte ve her birinin uygunluk değeri hesaplanmaktadır. Takipçi üyelerden herhangi birinin uygunluk değeri kâşif üyeden daha iyi olursa ilgili takipçi üye yeni lider olarak atanmaktadır. Burada YAKA'da olduğu gibi aç gözlü (greedy) bir seçim prosedürü işlediği görülmektedir.

Diğer yandan, A ve ε değişkenlerinin 0'a doğru yakınsaması keşif ve faydalanma arasındaki dengeyi sağlamakta olup, α ve β bu dengeyi sağlamadaki diğer önemli katsayılardır. Bu değişkenler sezgi-üstü algoritmalarda bulunması gereken stokastik davranışı sağlayarak üyelerin en iyiye doğru yaklaşmasını kolaylaştırmakta ve yerel

optimale yakınsama sorununu çözmektedir. Ayrıca, α ve β katsayıları algoritmanın sadece ilk yinelemelerde değil aynı zamanda son yinelemelerde dahi keşif safhasını yürüterek tesadüfi harekette bulunmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, sürüde bulunan her üye global en iyi noktaya doğru hareket etme potansiyeline sahip olmaktadır.

1: ***Giriş***: Popülasyon Sayısı, Yineleme Sayısı, Üst Sınır, Alt Sınır
2: Başlangıç popülasyonunu oluştur;
2.1: ***for*** i = 1'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
2.2: x_i=(1,2,..,n) pozisyon üret ve uygunluk değerlerini hesapla ***end***
2.3: Kâşif üyeyi belirle
3: ***While*** K≤Yineleme Sayısı
3.1: α ve β etkileşim katsayılarını [1,2] arasından seç,
3.2: A ve ε değişkenlerini hesapla,
3.3: r_1, r_2 ve r_3 değişkenlerini (0,1) arasından seç,
3.4: u_1 ve u_2 değişkenlerini (-1,1) arasından seç,
3.5: R_1 ve R_2 hesapla,
3.6: $x_p^{K+1}=x_p^K+2r_3.\left(x_p^K-x_p^{K-1}\right)$+A denklemiyle kâşif üyeyi güncelle, sınırları kontrol et
3.7: ***if*** kâşif üyenin yeni pozisyonu eskisinden iyiyse ***yap***;
3.7.1: kâşifi güncelle ***end***
3.8: ***for*** i = 2'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
3.8.1: $x_i^{K+1} = x_i^K + R_1.\left(x_j^K - x_i^K\right) + R_2.\left(x_p^K - x_i^K\right) + \varepsilon$ denklemiyle takipçi üyelerin aday pozisyonlarını belirle, sınırları kontrol et
3.8.2: ***end***
3.9: Üyelerin yeni uygunluk değerlerini hesapla ve en iyi pozisyonu bul,
3.10: ***if*** en iyi pozisyon <kâşif üyenin pozisyonu ***yap***;
3.10.1: en iyi pozisyona sahip üyeyi kâşif üye olarak ata ***end***
3.11: ***for*** i = 2'den Popülasyon Sayısına kadar ***yap***;
3.11.1: ***if*** i. üyenin yeni pozisyon uygunluğu < i. üyenin eski pozisyonu
3.11.2: i. üyeyi güncelle ***end***
3.11.3: ***end***
3.12: t = t+1;
3.13: ***end***

Şekil 4.16. Kâşif Algoritmasının sözde-kodu

KA'nın sözde-kodu Şekil 4.16'da verilmiştir. BO ve SSA'da olduğu gibi KA algoritması da başlangıçta ayarlanması gereken bir parametreye ihtiyaç duymamaktadır. Etkileşim katsayıları α ve β aslında ayarlanması gereken önemli

parametrelerdir ancak orijinal çalışma kapsamında ilgili değişkenlerin 1 ile 2 arasından rastgele seçilmesi teşvik edildiği için bu katsayıları ayarlamak için özel bir çaba harcanmasına gerek kalmamıştır. Uygulama basitliği bu algoritmada da oldukça başarılı şekilde tesis edilmiştir. Her sezgi-üstü yöntemde olduğu gibi burada da başlangıç popülasyonu tesadüfi olarak oluşturulmakta, üyelerin uygunluk değeri hesaplanmakta ve en iyi üye bulunarak kâşif olarak adlandırılan lider yapılmaktadır. Yineleme süreci başladığında Eşitlik (4.47) ve (4.49)'a göre liderin ve takipçilerinin pozisyon güncellemeleri için gerekli olan katsayı ve değişkenler hesaplanmaktadır. Kâşif üye ve diğer üyeler için pozisyon güncellemesi esnasında aday çözüm üretilmekte ve aday çözüm ile mevcut çözüm karşılaştırılarak aç gözlü seçim süreci işletilmektedir. Sürüde bulunan takipçi üyeler hem liderlerini takip etme potansiyeline sahiptir hem de komşularıyla ikili etkileşim kurarak bağımsız hareket etme kabiliyetini göstermektedir. Bu bağımsız hareket kabiliyeti sürüde bulunan her bir üyenin çözüm uzayını daha etkin aramasını sağlamaktadır. BO algoritmasında kurt sürüsünün üyeleri en iyi üç çözümden faydalanarak pozisyonlarını güncellemekteydi. SSA'da ise salp zincirinin takipçi üyeleri komşu etkileşimiyle dolaylı olarak lideri takip etmekteydi. Kâşif algoritmasında SSA ve BO'da olduğu gibi liderlik hiyerarşisi kullanılmış olsa bile takipçi üyelerin bağımsız hareket edebilme yeteneğinin global optimale yakınsama ihtimalini artırdığını düşünmekteyiz.

4.9. Bölüm Değerlendirmesi

Evrim teorisi, fizik kuralları ve sürü zekâsı kavramlarından ilham alınarak geliştirilen 8 farklı sezgi-üstü algoritma ayrıntılarıyla tanıtılmış ve sözde kodları paylaşılmıştır. Uygulama basitliği ve etkinliği nedeniyle sürü zekâsı konseptine göre tasarlanan sezgi-üstü tekniklere ağırlık verilmiştir. Bahsedilen yaklaşımların her biri ilham aldığı kaynağın matematiksel modelini başarılı bir şekilde modellemiştir.

Sezgi-üstü algoritmalar, türevli işlemlere ihtiyaç duymaması, yerel optimal bölgelerden kaçınma becerisi, uygulama anlamında basitliği ve çeşitli problemlere adapte edilebilmesiyle esnekliği bakımından çeşitli mühendislik alanlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu algoritmaların hangi problemde daha kaliteli sonuçlar vereceği öngörülememektedir. Bu durum tez çalışmamız kapsamında çeşitli yaklaşımların kullanılmasında etkili olan faktördür. Yapay zekâ optimizasyon

algoritmalarının bir problemi çözerken başvurduğu iki temel olgu bulunmaktadır: Birincisi, bulunulan yerel bölgenin en uygun noktasının araştırıldığı faydalanma safhasıdır; ikincisi yerel arama bölgesinden çıkarak henüz hiç fark edilmemiş yeni bölgelerin bulunduğu keşfetme bölümüdür. Optimal sonucu arayış içerisinde olan nüfusun üyeleri faydalanma safhasını farklı algoritmalarda benzersiz kavramlarla gerçekleştirir. Bu bölüm, GA'da çaprazlama operatörüyle, YAA'da eylemsizlik kütlesiyle, PSO'da bilişsel ve sosyal bileşenlerle, YAKA'da işçi ve gözcü arılarla, BO'da α, β ve δ kurtlarının ortalamasıyla, SSA'da salp zincirinin liderini takip eden salplerle ve KA'da üyelerin birbirleriyle ve kaşifle olan etkileşimiyle icra edilir. Algoritmaların faydalanma safhaları genellikle yinelemeler ilerledikçe gerçekleşir çünkü başlangıçta çözüm uzayının keşfi yapılır. Bahsedilen keşfetme safhası, GA'da mutasyon operatörüyle, YAKA'da kâşif arıyla, PSO'da atalet katsayısıyla, YAA'da zamana bağımlı olarak azalan yerçekim sabiti G ve K_{best} listesiyle, BO'da C ve Ar vektörleriyle, SSA'da c_1 değişkeniyle ve KA'da α ve β etkileşim katsayıları ile titreşim ve salınım vektörleriyle işletilmektedir. Algoritmaların başarısı, keşfetme ve faydalanma safhaları arasındaki hassas dengeyi kurabilme kabiliyetlerine bağlıdır.

Çalışma prensipleri açıklanan sezgi-üstü algoritmalardan mevcut haliyle BBO problemine kullanılabilecek tek yöntem GA'dır. Bahsedildiği gibi BBO problemi kombinasyonel ikili bir problemdir ve GA dışındaki algoritmalar sürekli problemleri çözmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu nedenle, sonraki bölümde mevcut haliyle BBO problemini çözmek için yeterli donanıma sahip olmayan 7 tekniğin ikili versiyonları üretilecek ve açıklanacaktır.

5. SEZGİ-ÜSTÜ ALGORİTMALARIN BARA BÖLME OPTİMİZASYONU PROBLEMİNE UYARLANMASI

Sezgi-üstü algoritmalar genellikle sürekli optimizasyon problemlerini çözebilmek amacıyla önerilirler. Ayrık optimizasyon problemine ilgi duyan araştırmacılar, önerilen sezgi-üstü algoritmaların ayrık versiyonlarını geliştirirler. Ayrık optimizasyon problemlerinde bulunan karar değişkenleri belirlenmiş sınırlar içerisinde sadece tam sayı veya önceden belirlenmiş 0 ve 1 gibi ayrık değerler alabilmektedir. Ayrık problemin karar değişkenlerinin sadece 0 ve 1 değerlerini almasına müsaade ediliyorsa bu problem ikili (binary) optimizasyon problemi olarak ifade edilmektedir.

Kombinasyonel problemler, ayrık optimizasyon problemlerinden tam sayılı programlamanın bir dalıdır. Gerçek hayatta karşılaştığımız çeşitli problemlerin yapısında kombinasyonel yaklaşım bulunmaktadır. Bu problemlerden bazıları radyasyon terapisi, hava yolu işletmesinde mürettebat ve kaynak planlama, araç güzergahını belirleme ve internet trafiğini yönlendirme olarak gösterilebilir [99].

İkili optimizasyon problemleri ise kombinasyonel problemlerin önemli bir sınıfı olarak gösterilmektedir. Ticari banka şubeleri, acil durum araçları ve sağlık merkezleri gibi tesis yerleştirme problemlerinde ve rüzgâr türbini yerleşimi, iletişim ve bütçe gibi planlama görevlerinde günlük hayatta yaygın şekilde karşımıza çıkmaktadır [5]. Sırt çantası problemi (knapsack problem) [100] ve gezgin satıcı problemi (traveling salesperson problem) [101] en çok bilinen ikili kombinasyonel problemlerdir.

Enerji İletim Sisteminde Bara Bölme Optimizasyonu ikili kombinasyonel optimizasyon problemidir. Problemin çözümünde kullanılan karar değişkenleri ikili formatta ifade edilmektedir. Çünkü iletim sistemi trafo merkezlerinde bulunan fiderlerin bara-1 veya bara-2'ye bağlı olması durumu, iki ihtimal bulunması sebebiyle ikili kod konseptine uygundur. Bir fiderin bara-1'e bağlı olması durumu 0 kodu ile ifade edilirken bara-2'ye bağlı olması durumu 1 kodu ile temsil edilebilir. Dolayısıyla problemin karar değişkenleri (0,1) ikili kod şeklinde ifade edilmektedir. Aynı zamanda BBO probleminin yapısı kombinasyoneldir. Çünkü TM'lerde bulunan fiderlerin

çeşitli kümeler halinde bara-1 veya bara-2'ye bağlanma durumları söz konusudur. Yani, baralara bağlanma şekilleri çeşitli kombinasyonlarda olabilmektedir. BBO probleminde birkaç baralı test sisteminde dahi on binlerce seçenek bulunabilirken gerçek bir iletim sisteminde milyarlarca seçenekle karşı karşıya kalınabilir. Çözüm uzayının çok büyük olması nedeniyle BBO probleminin çözümünde dal-sınır algoritması gibi geleneksel yöntemler yerine sezgi-üstü algoritmaların kullanılması tercih edilmiştir.

Bir sezgi-üstü algoritmanın ikili versiyonu üretilirken iki temel unsur kullanılmaktadır: Birincisi transfer fonksiyonudur; ikincisi pozisyon güncelleme kuralıdır. Transfer fonksiyonu sürekli zeminden ayrık düzene geçişi sağlamak için kullanılan ve ikili sezgi-üstü algoritmaların performansı üzerinde en büyük etkiye sahip olan unsurdur. Pozisyon güncelleme kuralı ise transfer fonksiyonundan gelen bilgiye göre pozisyonun 0 veya 1 olmasına karar verilirken uygulanan mantıksal bir işlemdir.

Ayrık optimizasyon problemlerini çözebilmek amacıyla çalışmamız kapsamında kullanılan fizik-tabanlı sezgi-üstü algoritma olan İkili Yerçekimsel Arama Algoritması (İYAA) [102], sürü zekâsı yaklaşımıyla işleyen İkili Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (İPSO) [103-106], İkili Yapay Arı Kolonisi (İYAKA) [107, 110], İkili Bozkurt Optimizasyonu (İBO) [100, 109] ve İkili Salp Sürüsü Algoritması (İSSA) [5,108] yöntemleri önerilmiştir. Verilen teknikler ikili optimizasyon problemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Özellik seçimi (feature selection) [106, 109–120], ünite planlaması (unit commitment) [121-128] ve güç sistemini yeniden düzenleme (power network reconfiguration) [18], [129–136] problemleri, tez çalışmamız kapsamında kullanılan ikili sezgi-üstü yöntemlerin kullanıldığı alanlardan sadece birkaçını oluşturmaktadır. Önceki çalışmalarda 2019 yılında H. Yapıcı ve N. Çetinkaya tarafından önerilen Kâşif Algoritmasının ikili formatı önerilmemiştir. İkili Kâşif Algoritması (İKA) ilk defa tez çalışmamız kapsamında sunulmuştur.

S. Mirjalili ve A. Lewis PSO yöntemini ikili formata dönüştürebilmek için çeşitli transfer fonksiyonları önermiştir. S-şekilli ve V-şekilli transfer fonksiyonlarını kullanarak test fonksiyonları üzerinde BPSO algoritmasının performansını test etmiş ve transfer fonksiyonunun ikili sezgi-üstü yönteminde en kritik unsur olduğunu belirtmiştir [103].

Bazı sezgi-üstü yöntemlerde transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kurallarını uygulamak kabul edilebilir sonuçların alınmasını sağlamıştır. Ancak örneğin YAKA'da olduğu gibi bazı algoritmalarda bu dönüşüm stratejisi yeterli olmamıştır. Dolayısıyla her bir algoritmaya uygulanan ortak yaklaşımlar bulunduğu gibi bazı algoritmalara özel yaklaşımlar da kullanılmıştır. Bu bölüm altında kullanılan transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralları tanıtılmaktadır ve bazı algoritmalar için üretilmiş özel yaklaşımlar açıklanmaktadır. Ayrıca güç sisteminin doğası gereği kontrol edilmesi gereken eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarını sağlayabilmek amacıyla uygulanan yaklaşımlar detaylı şekilde sunulmaktadır.

5.1. Transfer Fonksiyonları ve Pozisyon Güncelleme Kuralları

Sürekli problemleri çözebilmek amacıyla tasarlanan sezgi-üstü algoritmaların ayrık problemlere uygulanabilmesi için transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı uygulanmaktadır. Bir transfer fonksiyonu bazı algoritmalar için başarılı sonuçlar verirken bazı algoritmalarda kabul edilemez sonuçlar sunabilmektedir. Pozisyon güncelleme kuralları için de aynı durum geçerlidir. Bu sebeple uygulanan sezgi-üstü yöntemlerin ikili formata geçiş süreci, farklı transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kurallarıyla birlikte karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir.

Bir transfer fonksiyonu, belirlenmiş sezgi-üstü algoritmalarda sürekli çözüm uzayında gerçekleşen arama sürecini kullanarak ikili çözüm uzayına geçebilmeyi sağlamaktadır. Rashedi ve diğ. [102] ile S. Mirjalili ve A. Lewis [103] yaptıkları çalışmalarda bir transfer fonksiyonunda bulunması gereken temel özelliklerin aşağıda verildiği gibi olması gerektiğini belirtmiştir;

- Sürekli arama süreci işletilerek elde edilen verilere göre pozisyonun değişme olasılığını temsil edeceği için bir transfer fonksiyonunun çıkış değeri 0 ile 1 arasında olmalıdır.
- Sürekli zeminde elde edilen hız bilgisinin küçük olması durumunda transfer fonksiyonunun çıkışı da buna göre pozisyon değişme ihtimalini azaltacak şekilde küçük olmalıdır. Örneğin bir transfer fonksiyonunun cevabı 0,1 olursa ilgili pozisyonun değişme ihtimali az olacaktır.
- Algoritmadaki temsilcinin hızı büyük bir değer olursa buna göre transfer fonksiyonu yüksek olasılıkla temsilcinin pozisyonunu değiştirecek şekilde sonuç

vermelidir. Örneğin transfer fonksiyonunun cevabı 0,9 olursa ilgili pozisyon büyük ihtimalle değişecektir.

- Bir transfer fonksiyonunun çıkış değeri sürekli zeminde elde edilen hız yükseldikçe artmalıdır. En iyi çözümden uzaklaşan temsilcilerin önceki pozisyonlarına dönebilmesi için pozisyonlarının değişme olasılığı da yüksek olmalıdır. Örneğin sürekli zeminde elde edilen hız bilgisi 1 iken transfer fonksiyonunun cevabı 0,6 ise hız bilgisi 2 olduğunda fonksiyon cevabı da buna bağlı olarak 0,6'nın üzerine çıkmalıdır.
- Benzer şekilde hızı azalan bir temsilcinin transfer fonksiyonu cevabı da aynı şekilde azalmalıdır.

Belirtilen konseptin kullanılmasıyla ikili formata geçiş işlemi mümkün olmaktadır. Sürekli problemlerde pozisyon güncelleme süreci temsilcinin hızına bağlı olarak işlemektedir. Aynı şekilde ikili formatta da sürekli zemindeki hız bilgisine göre pozisyon güncelleme işlemi gerçekleşmektedir. Ancak BO, SSA ve KA gibi SZ konseptine bağlı sezgi-üstü algoritmaların hız bilgisi bulunmamaktadır. Bu tür algoritmalar pozisyonlarını önceki pozisyonu, komşu temsilcilerin pozisyonu, takip ettikleri lider temsilcinin pozisyonu veya besin kaynağının tahmini pozisyonuna bağımlı olarak güncellemektedir. Dolayısıyla bu tür algoritmaların ikili formata geçiş sürecinde temsilci hızı yerine temsilci pozisyonu kullanılmıştır.

Tez çalışmamız kapsamında BBO problemini çözebilmek amacıyla 4. Bölümde açıklanan sezgi-üstü algoritmaların ikili formatları denenmiştir. Bu algoritmaların tamamı bahsettiğimiz BBO problemi için ilk defa kullanılmıştır. Transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kurallarının sürekli çözüm uzayından ayrık çözüm uzayına geçişte çok önemli etkenler olması sebebiyle her algoritma için çeşitli fonksiyonlar karşılaştırmalı olarak denenmiştir. S-şekilli transfer fonksiyonundan 1 adet ve V-şekilli transfer fonksiyonundan 4 adet olmak üzere toplam 5 çeşit transfer fonksiyonu her bir algoritma için BBO'yu çözebilme kabiliyeti açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca her bir transfer fonksiyonu iki farklı pozisyon güncelleme yaklaşımıyla birlikte uygulanmıştır.

Kullanılan yöntemlerden olan GA için transfer fonksiyonuna ihtiyaç yoktur. Diğer 7 algoritma için 10 farklı durum değerlendirilerek 80 farklı ikili-sezgi üstü yaklaşımı

(Kâşif Algoritmasında 20 farklı senaryo denenmiştir) karşılaştırmalı olarak BBO probleminde test edilmiştir. Detayları test sonuçlarının açıklandığı bölümde verilen istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Algoritmaları istatistiksel açıdan değerlendirebilmek için her bir durum IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde 30 bağımsız çalıştırmaya tabi tutularak toplam 2430 farklı çözüm elde edilmiştir. BBO problemi, istatistiksel veriler ışığında başarılı olduğu görülen yöntemlerle IEEE 57 ve 118-baralı test sistemleri üzerinde çözülmüş ve değerlendirilmiştir. Test sistemlerinde başarılı sonuçlar veren algoritmalar gerçek iletim sisteminde kullanılmış, başarılı sonuçlar elde edilmiş ve iletim sisteminin ilgili bölümleri elde edilen çıktılara göre işletilmiştir.

5.1.1. S-Şekilli transfer fonksiyonları

S-şekilli transfer fonksiyonları ismini şeklinden almaktadır. En çok bilinen türü sigmoid fonksiyonudur. S-şekilli transfer fonksiyonlarının temel özelliği pozitif x ekseninde yüksek olasılık sunarken negatif x ekseninde düşük olasılık sunmasıdır. Yani sürekli arama süreciyle elde edilen temsilci hızı pozitif eksende bulunuyorsa S-şekilli transfer fonksiyonunun cevabı ilgili temsilcinin pozisyonunu büyük ihtimalle değiştirecek şekilde olmaktadır. Ancak temsilcinin hızı negatif eksende olursa S-şekilli transfer fonksiyonu cevabının pozisyonu değiştirme ihtimali çok düşük olmaktadır.

$$STF1(x)=\frac{1}{1+e^{-4x}} \tag{5.1}$$

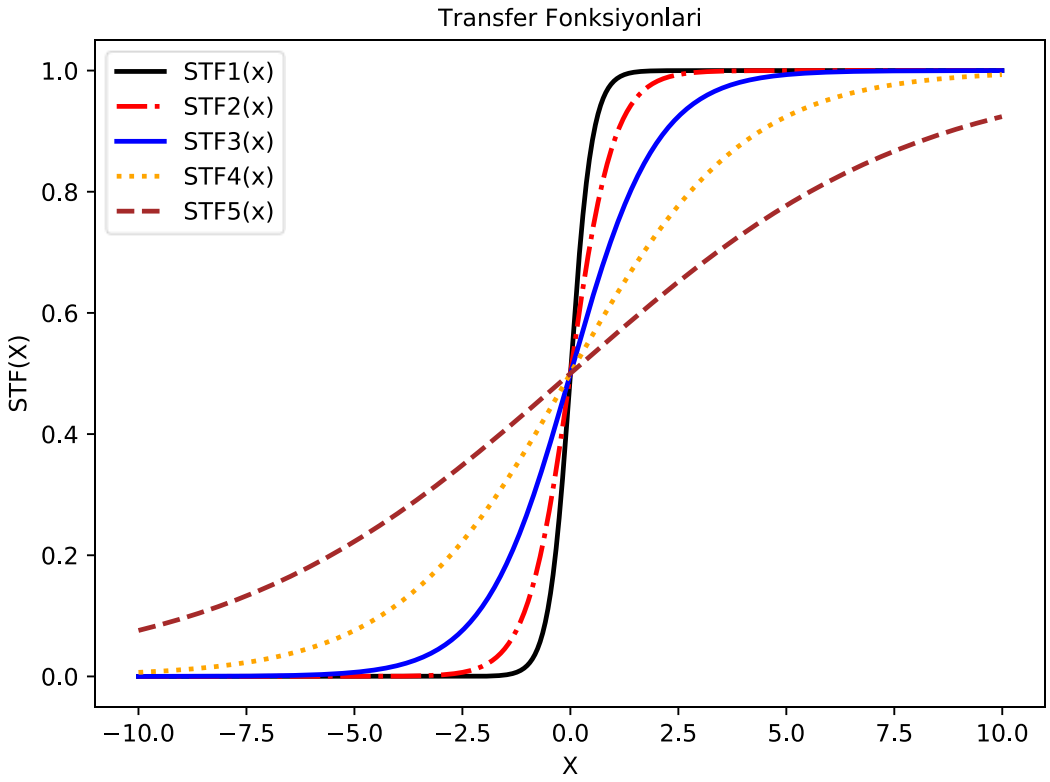
$$STF2(x)=\frac{1}{1+e^{-2x}} \tag{5.2}$$

$$STF3(x)=\frac{1}{1+e^{-x}} \tag{5.3}$$

$$STF4(x)=\frac{1}{1+e^{-0.5x}} \tag{5.4}$$

$$STF5(x)=\frac{1}{1+e^{-0.25x}} \tag{5.5}$$

STF(x) S-şekilli transfer fonksiyonlarını temsil etmektedir. Denklem (5.1-5.5)'te verilen ifadelerin tamamı S-şekilli transfer fonksiyonları olarak ifade edilebilir. Sigmoid fonksiyonu olarak bahsettiğimiz STF3(x) S-şekilli transfer fonksiyonları arasında en çok kullanılan fonksiyondur.

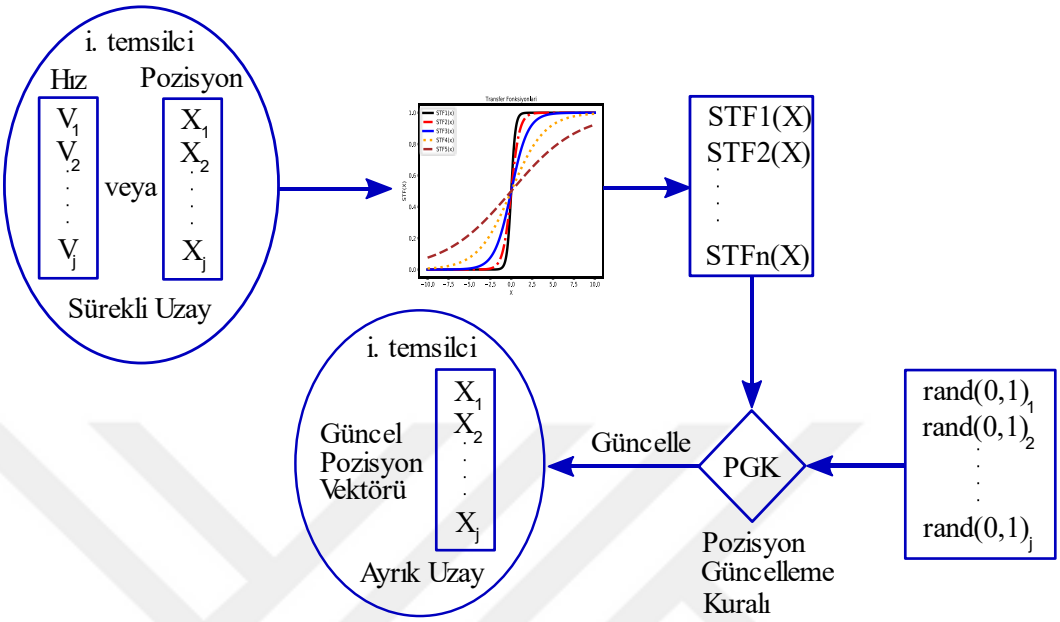


Şekil 5.1. S-Şekilli transfer fonksiyonları

Şekil 5.1'de yukarıda matematiksel ifadeleri verilen S-şekilli transfer fonksiyonlarının (STF1(x)-STF5(x)) grafiksel gösterimi verilmiştir. Görüldüğü gibi STF1(x) ve STF2(x) fonksiyonları çok keskin bir şekilde artmakta ve doyum noktalarına ulaşmaktadır. STF3(x) nispeten daha düşük bir eğimle artsa bile doyum noktasına hızlı ulaşmaktayken STF4(x) ve STF5(x) belirlenen sınırlar içerisinde doyum noktasına ulaşamayacak kadar düşük bir eğimle artış göstermektedir.

Sürekli arama uzayına göre elde edilen hız değerleri, bahsedilen transfer fonksiyonlarına sokularak fonksiyondan alınan cevaba göre pozisyon güncelleme işlemi yapılmaktadır. Bir transfer fonksiyonunun eğimi ne kadar dik olursa pozisyonun güncellenme ihtimali de o kadar yüksek olmaktadır. Yani eğimin dikliği arttıkça pozisyon değişim olasılığı da yükselmektedir. Dolayısıyla yukarıda verilen S-şekilli

transfer fonksiyonları arasında pozisyon değişme eğilimi en çok olan fonksiyon STF1(x) iken en az olan STF5(x) fonksiyonudur.



Şekil 5.2. Sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına geçiş süreci

Sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına geçiş için uygulanan işleyiş Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Algoritmanın yapısına göre sürekli arama uzayından gelen hız veya pozisyon bilgisi transfer fonksiyonuna sokulur. Transfer fonksiyonu çıktı olarak 0 ile 1 arasında bir cevap verir. Transfer fonksiyonundan alınan cevap, pozisyon güncelleme kuralından geçirilerek i. temsilcinin güncellenmiş pozisyonu oluşturulur. Görüldüğü gibi güncelleme kuralına 0 ile 1 arasında rastgele üretilmiş sayılardan oluşan bir vektör daha girmektedir. Pozisyon güncelleme işlemi, rastgele sayılardan oluşan vektör ile transfer fonksiyonu cevabının karşılaştırılması yoluyla yapıldığı için bu vektöre ihtiyaç vardır.

BBO problemi için kullanılması gereken S-şekilli transfer fonksiyonları test sistemlerinde ön değerlendirmeye sokulmuştur. Yapılan ön değerlendirmeler neticesinde STF3(x) olarak verdiğimiz sigmoid fonksiyonunun S-şekilli transfer fonksiyonu olarak problemin çözümünde kullanılmasının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, çalışmamız kapsamında sadece 1 adet S-Şekilli transfer fonksiyonu kullanılırken V-şekilli transfer fonksiyonu ailesine mensup 4 adet fonksiyonun kullanılması tercih edilmiştir.

5.1.2. V-Şekilli transfer fonksiyonları

Bu gruba ait transfer fonksiyonlarının görünümü V harfine benzediği için V-Şekilli fonksiyonlar ismini almıştır. S-Şekilli transfer fonksiyonlarında sürekli arama sürecinden gelen hız bilgisinin negatif olması halinde pozisyon değişme olasılığının çok düşük olduğunu belirtmiştik. V-Şekilli transfer fonksiyonlarında pozitif hız için uygulanan olasılıksal dağılımın aynısı negatif hızlar için de geçerli olmaktadır. Bu durum sürekli çözüm uzayından ayrık çözüm uzayına geçişte daha gerçekçi bir sürecin işlemesini sağlamaktadır.

$$VTF1(x) = |\tanh x| \tag{5.6}$$

$$VTF2(x) = \left|\frac{x}{\sqrt{1+x^2}}\right| \tag{5.7}$$

$$VTF3(x) = \left|\frac{1-e^{-0.5x}}{1+e^{-0.5x}}\right| \tag{5.8}$$

$$VTF4(x) = \left|\frac{1-e^{-0.5x}}{1+e^{-0.5x}}\right| * 0.7 + 0.3 \tag{5.9}$$

$$VTF5(x) = \left|\frac{1-e^{-0.25x}}{1+e^{-0.25x}}\right| \tag{5.10}$$

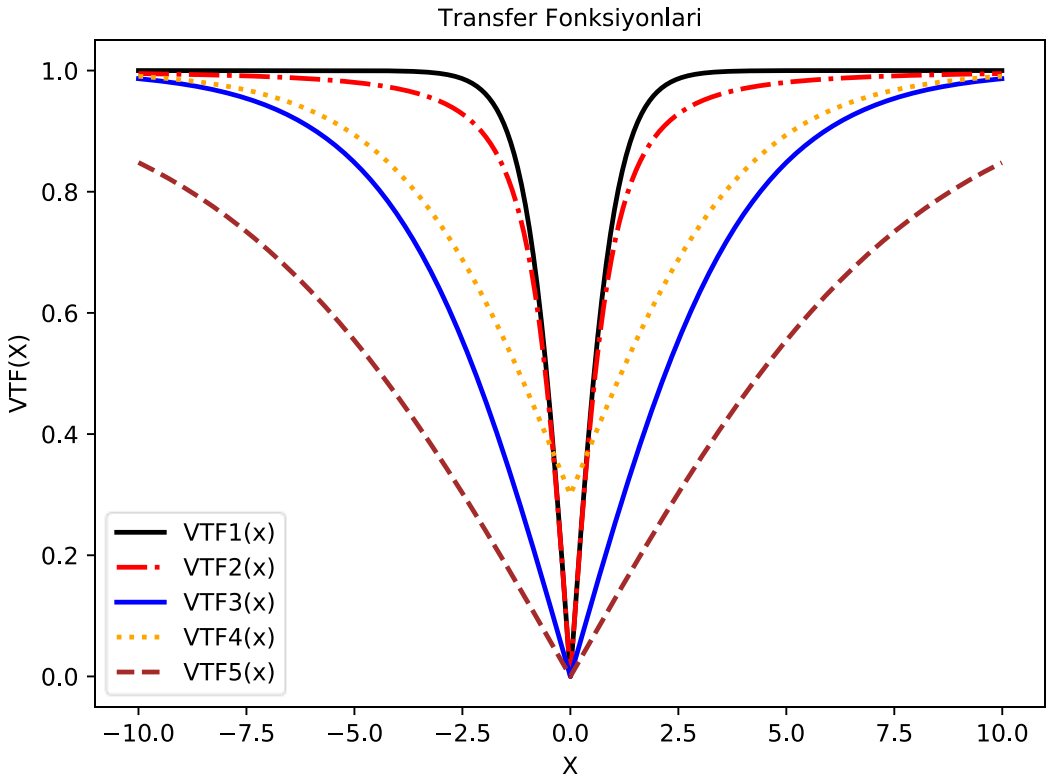
$$VTF6(x) = |\tanh x| \text{ x } S + CS \tag{5.11}$$

$$S = S_{maks} + \left((S_{maks} - S_{min}) x \left(\frac{Iter - MaksIter}{MaksIter} \right) \right) \text{ x rand}(-1,1), \quad CS = 1 - S \tag{5.12}$$

tanh x hiperbolik tanjant fonksiyonunu, S_{min} ve S_{maks} 0 ile 1 arasında seçilen en küçük ve en büyük katsayı değerlerini, Iter ve MaksIter mevcut yineleme sayısı ve toplam iterasyon sayısını ifade etmektedir.

Denklem (5.6-5.11)'de verilen matematiksel ifadelerin tamamı V-Şekilli transfer fonksiyonu ailesine aittir. V-Şekilli fonksiyonların negatif hızları hassasiyetle dikkate alması sebebiyle S-Şekilli fonksiyonlara göre daha yüksek oranda kullanılması tercih edilmiştir. Çalışmamız kapsamında 5 adet V-Şekilli transfer fonksiyonu (VTF1(x) – VTF4(x), VTF6(x)) bahsedilen sezgi-üstü algoritmalarda BBO problemini çözme

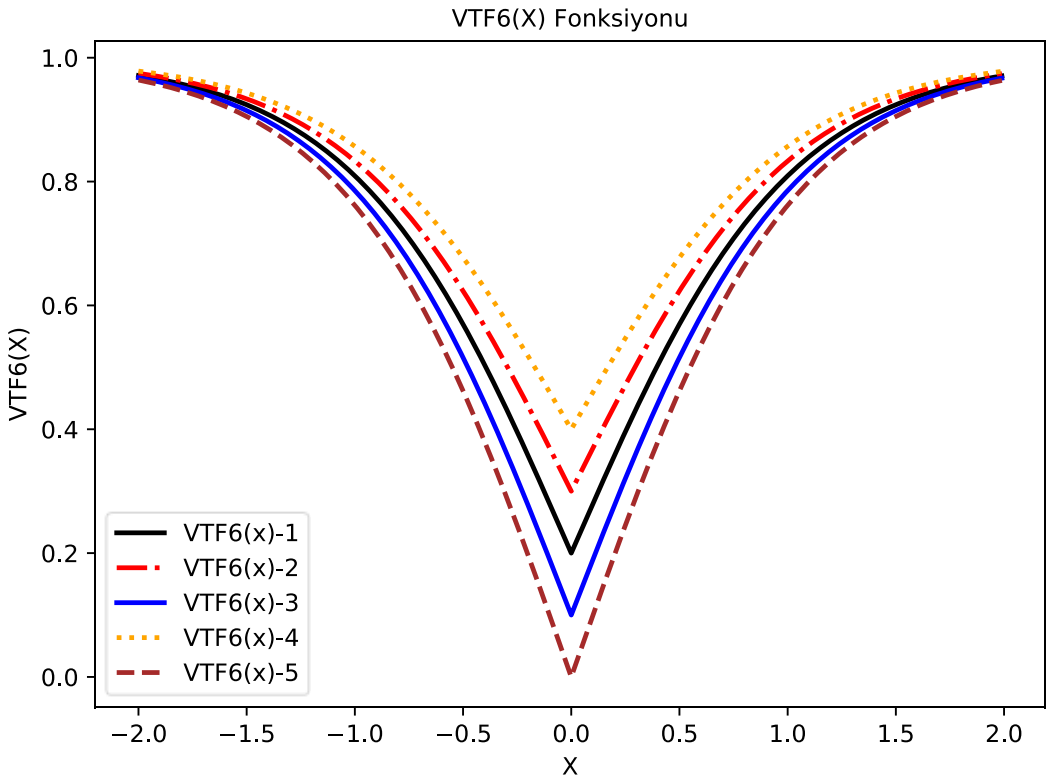
kabiliyeti açısından test edilmiştir. VTF4(x) ve VTF6(x) fonksiyonları ilk defa tez çalışmamız kapsamında önerilmiştir. VTF6(x) fonksiyonu özellikle DKPSO algoritmasını iyileştirmek amacıyla geliştirilmiş olup PSO ve DKPSO yöntemleri için oluşturulan senaryolarda VTF3(x) yerine kullanılmıştır.



Şekil 5.3. V-Şekilli transfer fonksiyonları

Belirtilen transfer fonksiyonlarının görselleri Şekil 5.3'te verilmiştir. VTF1(x) her iki eksende de çok dik bir şekilde yükselmekte ve doyma noktasına ulaşmaktadır. Böyle bir transfer fonksiyonunun kullanılması durumunda sürekli çözüm uzayına göre işleyen algoritmadan gelen hız değişimleri, yüksek olasılıkla temsilcinin pozisyonunu değiştirmeye yetecektir. Tez çalışmamız kapsamında önerdiğimiz VTF4(x)'te en küçük bir hız değişimi %30'un üzerinde bir ihtimalle pozisyon değişimine neden olacak şekilde davranırken daha yüksek olasılıklara nispeten düşük bir eğimle çıkmakta ve belirtilen aralıkta doyum noktasına ulaşmamaktadır. Yaygın şekilde bilinen V-Şekilli transfer fonksiyonu hiperbolik tanjant (VTF1(x)) fonksiyonudur. Ancak küçük değişiklikler dahi çözüm kalitesini etkileyebildiği için diğer fonksiyonlar da denenmiştir. V-Şekilli transfer fonksiyonları kullanılarak sürekli çözüm uzayından ayrık çözüm uzayına geçiş süreci Şekil 5.2'de verilen işleyişle tamamen aynıdır.

VTF6(x) fonksiyonu sezgi-üstü algoritmaların sürekli arama uzayında gerçekleştirdikleri stokastik keşfetme safhasını içerisinde barındırmaktadır. Önerdiğimiz bu fonksiyon hem yineleme sayısına hem de rastgele üretilen bir sayıya bağlı olarak her pozisyon değişim kararında farklı bir şekle bürünmektedir. Kullanıcı tarafından belirtilmesi gereken en büyük ve en küçük S değerine göre oluşan aralığın -1 ile 1 arasından seçilen rastgele bir sayıyla çarpılması, fonksiyona sürekli uzaydan ayrık uzaya geçişte stokastik bir özellik katmaktadır. Ayrıca ilgili aralığın kullanım oranı iterasyon sayısının artmasıyla birlikte doğru orantılı olarak yükselmektedir. Şunu belirtmek gerekir ki en büyük ve en küçük S değeri arasındaki bölgenin tam kapasite kullanılması pozisyon değişme ihtimalini azaltmaktadır. Başka bir ifadeyle, S terimi ne kadar küçük olursa ilgili pozisyonun değişme ihtimali o kadar yüksek olacaktır.



Şekil 5.4. VTF6(x) fonksiyonunun temsili davranışı

VTF6(x) fonksiyonunun çalışma prensibini daha etkin gösterebilmek için Şekil 5.4'te verilen grafik oluşturulmuştur. S değerinin alabileceği en büyük değerin 0.8 ve en küçük değerin 0.6 olduğunu varsayalım. Bu durumda -1 ile 1 arasında seçilen tesadüfi sayının 0 olması halinde S değeri 0,8 değerini alarak matematiksel ifadesi 0,8 x tanhx+0,2 olan bir transfer fonksiyonu oluşturacaktır ve ilgili fonksiyon Şekil 5.4'te

verilen VTF6(x)-1 grafiğine karşılık gelmektedir. S değeri küçülerek 0,7 değerini aldığında VTF6(x)-2 grafiğinde verildiği gibi davranırken 0,6 değerinde VTF6(x)-4 grafiğini taklit eder. Tam tersi yönde S değerinin 0,9 olması durumu VTF6(x)-3 ile ifade edilirken 1 olması durumu VTF6(x)-5 ile gösterilmektedir. Görüldüğü gibi S değeri azaldıkça hiperbolik tanjant fonksiyonunun başlangıç noktası yukarı doğru kaymaktadır. Bunun anlamı, temsilcinin hızı sıfır dahi olsa sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına geçerken pozisyon değiştirme ihtimali yükselmektedir. Diğer taraftan S değerinin artmasıyla birlikte fonksiyonun başlangıç noktası 0'a yaklaşmaktadır. Bunun anlamı da düşük hızlarda pozisyon değişme ihtimali azalmaktadır.

VTF6(x) fonksiyonu yinelemelerin başlangıcında S_{maks}-S_{min} bandını yüksek oranda kullanma eğilimindedir. Örneğin ilk yinelemede fonksiyonun başlangıç noktası 0,3 olabilirken ikinci yinelemede 0,01 olabilir. Yani oluşan fonksiyonun başlangıç noktası -1 ile 1 arasında rastgele üretilen sayının işaretine göre agresif değişikliklere uğramaktadır. Tesadüfi olarak üretilen bu sayının pozitif eksende olması halinde fonksiyonun başlangıç noktası 0'dan uzaklaşarak pozisyon değiştirme ihtimalini yükseltmekte ve keşfetme sürecine destek olmaktadır. Üretilen rastgele sayının negatif eksende olması halinde ise fonksiyon başlangıç noktası 0'a doğru yaklaşarak, pozisyonların değişme ihtimalini azaltıp faydalanma sürecine destek olmaktadır. Yinelemeler yükseldikçe maksimum ve minimum arasındaki marjın kullanım oranı azalmaktadır. Yani fonksiyonun başlangıç noktası, S_{maks} çevresinde kümelenmeye başlamaktadır. Başka bir ifadeyle fonksiyonun başlangıç noktasındaki agresif değişimler azalmaktadır. Görüldüğü üzere VTF6(x) fonksiyonu stokastik ve dinamik yapısıyla algoritmaların faydalanma sürecine zarar vermeden keşfetme safhasına destek olmak amacıyla tasarlanmıştır.

Sürekli arama uzayından ayrık uzaya geçmek için belirtilen fonksiyonların dışında farklı yaklaşımlar da sunulmuştur. Özellikle YAA ve YAKA yaklaşımlarının ayrık uzaya geçişinde problemler oluşmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar sürekli çözüm uzayında çok başarılı sonuçlar veren bu iki algoritmanın ayrık problemler için de kullanılabilmesi amacıyla çalışmalar yapmıştır. Örneğin Kıran, yaptığı çalışmada sürekli zemindeki YAKA yaklaşımının ikili problemlere uygulanabilmesi için Eşitlik (5.13)'ü önermiştir [137]. Denklemde verilen x_{ai} ayrık uzaydaki temsilci pozisyonunu

temsil ederken x_{si} sürekli zamandaki pozisyonu ifade eder. Böyle bir fonksiyonla girdi ile çıktı arasındaki ilişki şu şekilde olmaktadır: eğer sürekli arama uzayından gelen hız veya pozisyon bilgisi 0,5 ile 1,499 arasında olursa fonksiyonun cevabı 1 olacaktır; eğer 0 ile 0,499 ve 1,5 ile 1,999 arasında olursa bu durumda cevap 0 olacaktır. Belirtilen bu fonksiyon BBO problemi için ön değerlendirmeye tabi tutulmuş ve problem için uygun olmadığı görülmüştür.

$$x_{ai}=\text{round}(|x_{si} \bmod 2|) \bmod 2 \tag{5.13}$$

Başka bir örnek YAA algoritması için geliştirilen bir yaklaşımla verilebilir. Bölüm 4'te YAA konu başlığı altında anlatılan algoritmada bulunan Eşitlik (4.4)'te j. kütlenin i. kütleye uyguladığı kuvvet formülü içerisinde $x_j^d(t)$-$x_i^d(t)$ ibaresi yer almaktadır. İkili formatta $x_j^d(t)$ ve $x_i^d(t)$ karar değişkenleri sadece 1 ve 0 olabilmektedir. İkisinin de 1 veya 0 olması durumunda d. boyutta uygulanan bir kuvvet olmayacaktır ve dolayısıyla ek bir hızlanma da görülmeyecektir. Temsilcinin d. boyutunda mevcutta pozitif bir hızı bulunurken $x_j^d(t)$-$x_i^d(t)$ eşitliğinin sonucu 1 olursa pozitif ivmeye pozitif bir kuvvet uygulanarak temsilci hızı artacak ve pozisyon güncelleme ihtimali de yükselecektir. Bu durumun gerçekleşmesi beklenen ve istenen bir senaryodur. Ancak böyle bir durumda temsilcinin mevcut hızı negatifken pozitif bir kuvvet uygulandığında pozisyon değişim ihtimali beklenenin tersine azalacaktır. Bir kuvvet uygulandığı için hızı artması gereken bir temsilcinin tam tersine hızının azalması istenmeyen bir senaryodur. Bu senaryonun tam tersi de doğrudur. Yani $x_j^d(t)$-$x_i^d(t)$ denkleminin sonucu -1 iken temsilcinin ilgili boyuttaki hızı pozitifse yavaşlamaya neden olacak ve pozisyon değişim ihtimali yine azalacaktır. Khanesar ve Branson yaptıkları çalışmada bu problemi çözebilmek adına XOR mantığına dayalı bir yaklaşım önermiştir [138]. Yapılan analizlerde faydalı bir yöntem olan XOR mantıklı İkili YAA'nın yine de BBO problemini çözmek için yeterli olmadığı görülmüştür.

5.1.3. Pozisyon güncelleme kuralları

Sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına geçiş sürecinde transfer fonksiyonlarından elde edilen çıktıların önceden belirlenmiş kurallara göre değerlendirilmesi gerekmektedir. Pozisyon güncelleme kuralı, transfer fonksiyonunun çıkışındaki bilgiyle 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir sayının karşılaştırılması

neticesinde pozisyonun değişip değişmeyeceğine karar vermektedir. Başlangıçta pozisyon güncelleme kuralı Kennedy ve Eberhart tarafından Eşitlik (5.14)'de verildiği gibi önerilmiştir [104].

$$x_i^d(t+1)=\begin{cases} 1, & TF(v_i^d(t+1))>rand(0,1) \\ 0, & TF(v_i^d(t+1))\leq rand(0,1) \end{cases} \quad (5.14)$$

$x_i^d(t+1)$ i. temsilcide d. boyutun bir sonraki pozisyonunu, $v_i^d(t+1)$ sürekli arama uzayından elde edilen i. temsilcide d. boyutun bir sonraki hızını, $TF(v_i^d(t+1))$ sürekli zaman hız bilgisini ayrık arama uzayına geçirebilmek için kullanılan transfer fonksiyonunu ve rand(0,1) 0 ile 1 arasında rastgele değişen bir sayıyı temsil etmektedir. Çalışmamız kapsamında bu kurala Pozisyon Güncelleme Kuralı-1 (PGK-1) ismi verilmiştir.

Önerilen pozisyon güncelleme kuralıyla bazı problemlerde yerel optimale takılma sorunu görüldüğü için S. Mirjalili ve A. Lewis'in çalışmasında belirtildiği gibi araştırmacılar güncelleme kuralı üzerine çalışmalarına devam etmiştir [103]. Shen ve diğ. yaptıkları çalışmada İPSO'yu geliştirmek için farklı bir güncelleme kuralı önermiştir [139].

$$x_i^d(t+1)=\begin{cases} x_i^d(t), & 0<v_i<a \\ P_i^{best}, & 0<v_i<0{,}5x(a+1) \\ G^{best}, & 0{,}5x(a+1)<v_i<1 \end{cases} \quad (5.15)$$

v_i 0 ile 1 arasında değişen rastgele bir sayıyı, $x_i^d(t)$ i. parçacığın d. boyuttaki mevcut pozisyonunu, P_i^{best} parçacığın o yinelemeye kadar elde ettiği en iyi pozisyonunu, G^{best} sürünün o ana kadar elde ettiği en iyi pozisyonu temsil etmektedir. Burada a değişkeni 0.5'te başlayıp yinelemelerle birlikte 0.33'e kadar azalan bir değişken olarak belirtilmiştir. Ayrıca yazar, parçacıkların %10'unda sosyal ve bireysel davranışları takip etmeden arama uzayında tesadüfi olarak hareket edilmesine müsaade etmiştir. Bu yaklaşımda ayrık düzene geçerken herhangi bir transfer fonksiyonunun kullanılmadığı görülmektedir.

Wang ve diğ. yaptıkları çalışma kapsamında yine İPSO algoritmasını geliştirebilmek için yeni bir pozisyon güncelleme kuralı sunmuştur [140].

$$P\left(x_i^d(t)\right)=\frac{x_i^d(t)-R_{min}}{R_{max}-R_{min}} \tag{5.16}$$

$$x_i^d(t+1)=\begin{cases} 1, & P\left(x_i^d(t)\right)\geq rand(0,1) \\ 0, & P\left(x_i^d(t)\right)<rand(0,1) \end{cases} \tag{5.17}$$

$P\left(x_i^d(t)\right)$ çıkışı 0 ile 1 arasında değişen bir lineer fonksiyonu, R_{min} ve R_{max}, $x_i^d(t)$ için önceden belirlenmiş üst ve alt limiti temsil etmektedir.

Önerdikleri bu yaklaşımla İPSO'nun hesaplama karmaşıklığı azalırken çözüm kalitesinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Ancak bu yöntem de farklı problem tiplerinde yerel optimale takılma sorunundan kurtulamamıştır.

Lee ve diğ. PSO algoritmasında sürekli arama uzayında gerçekleşen sürecin çıktılarını kullanarak yeni bir değişiklik daha yapmış ve Eşitlik (5.14)'e çok benzeyen aşağıdaki denklemi önermiştir [105].

$$x_i^d(t+1)=\begin{cases} 1, & TF(x_i^d(t+1))>rand(0,1) \\ 0, & TF(x_i^d(t+1))\leq rand(0,1) \end{cases} \tag{5.18}$$

Eşitlik (5.14)'te PSO'nun sürekli arama uzayından elde edilen hız bilgisi transfer fonksiyonuna sokularak 0 ile 1 arasından seçilen rastgele bir sayıyla karşılaştırılmaktaydı. Eşitlik (5.18)'de aynı süreç işlemekte fakat bu sefer PSO'nun sürekli arama uzayındaki hız bilgisi yerine pozisyon bilgisi kullanılmıştır. Tez çalışmamız kapsamında kullandığımız bazı algoritmalarda hız bilgisi olmadığı için pozisyon bilgisi kullanılmıştır. Bu iki yaklaşım da oldukça benzer olduğu için Eşitlik (5.18)'de verilen ifade de PGK-1 olarak değerlendirilmiştir. PGK-1 adı altında yapılan işlemler için hız bilgisi olan algoritmalarda Eşitlik (5.14) kullanılmış olup hız bilgisi olmayanlarda Eşitlik (5.18) tercih edilmiştir.

Önerilen çeşitli yaklaşımlara rağmen hala yerel optimale takılma problemi çözülemediği için araştırmacılar bu konu üzerindeki çalışmalarına devam etmiştir. Menhas ve diğ. yaptıkları çalışmada Genetik Algoritmada kullanılan çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin İPSO'da kullanılmasını önermiştir [141]. Çaprazlama

operatörü olarak önerilen Eşitlik (5.19) daha önce bahsedilen Eşitlik (5.18)'e oldukça benzemektedir.

$$x_i^d(t+1)=\begin{cases} x_i^d(t), & 0<v_i<a \\ P_i^{best}, & a<v_i<2a \\ G^{best}, & 2a<v_i<1 \end{cases} \tag{5.19}$$

v_i 0 ile 1 arasında değişen tesadüfi bir sayıyı ve a çaprazlama oranını temsil etmektedir.

$$x_i^d(t+1)=\begin{cases} \text{değiştir}(x_i^d(t)), & v_i \leq m \\ x_i^d(t), & v_i > m \end{cases} \tag{5.20}$$

v_i çaprazlama operatöründe olduğu gibi 0 ile 1 arasında değişen tesadüfi bir sayıyı temsil ederken m mutasyon oranını ifade etmektedir. Burada değiştir(x) fonksiyonuyla pozisyonun tamamlayıcısını alma işlemi uygulanır. Yani, pozisyon 0 ise 1 yapılır, 1 ise 0 yapılır.

Çaprazlama operatörüyle yerel optimalden kaçınma problemini çözemeyen algoritmanın mutasyon operatörüyle çözüm uzayının farklı bölgelerine ulaşabilmesi amaçlanmıştır. Ancak yine de yerel optimale takılma sorunu istenen düzeyde çözülememiştir.

Rashedi ve diğ. yaptıkları çalışmada YAA'nın ikili formatını önerirken hiperbolik tanjant transfer fonksiyonunu önermişlerdir [102]. Bu fonksiyonun S-Şekilli fonksiyonlara göre farklı bir yapıda olması sebebiyle buna uygun olarak yeni bir pozisyon güncelleme kuralı önerilmiştir.

$$x_i^d(t+1)=\begin{cases} \text{değiştir}(x_i^d(t)), & TF(v_i^d(t+1))>\text{rand}(0,1) \\ x_i^d(t), & TF(v_i^d(t+1))\leq\text{rand}(0,1) \end{cases} \tag{5.21}$$

Transfer fonksiyonunun girişi algoritmanın sürekli zamandaki hızı iken çıkışı 0 ile 1 arasında bir değer olmaktadır. Elde edilen bu değerin 0 ile 1 arasında üretilmiş rastgele bir sayıdan büyük olması durumunda temsilcinin mevcut pozisyonu değiştirilecek; aksi halde, pozisyon güncelleme işlemi yapılmayacaktır. Bu yöntem, sonraki bölümlerde Pozisyon Güncelleme Kuralı-2 (PGK-2) olarak ifade edilecektir. Tez çalışmamız kapsamında PGK-1'de yapıldığı gibi burada da hız bilgisi olmayan algoritmalarda pozisyon bilgisi kullanılmıştır.

Görüldüğü gibi yerel optimalden kurtulmak adına çeşitli pozisyon güncelleme kuralları önerilmiş ancak yine de her problem çeşidi için uygun bir yöntem henüz elde edilememiştir. Bu nedenle hangisinin BBO problemi için daha iyi olduğunu tespit edebilmek amacıyla tez çalışmamız kapsamında PGK-1 ve PGK-2 olarak adlandırdığımız Eşitlik (5.14) ve Eşitlik (5.21) 1 adet S-Şekilli ve 4 adet V-Şekilli transfer fonksiyonuyla birlikte her bir algoritma için test edilmiştir.

5.1.4. Önerilen ikili kâşif algoritması (Binary pathfinder algorithm)

Genetik algoritma dışında kullandığımız sezgi-üstü algoritmaların tamamı sürekli optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiştir. Optimizasyon problemleri içerisinde ayrık problemlerin de günlük yaşamda sıklıkla karşımıza çıkması sebebiyle her algoritma için ayrık versiyonlar önerilmiştir. Çeşitli transfer fonksiyonları, pozisyon güncelleme kuralları, genetik operatörler ve bunların dışında kalan özel uygulamalar ile sürekli çözüm uzayından elde edilen verinin ayrık çözüm uzayındaki karşılığı elde edilmeye çalışılmıştır.

H. Yapıcı ve N. Çetinkaya tarafından 2019 yılında önerilen Kâşif Algoritması test fonksiyonları üzerinde rekabetçi sonuçlar vermiştir [67]. BBO probleminde de başarılı sonuçlar verebilmeyi başaran bu güçlü algoritmanın ikili formatı ilk defa tez çalışmamız kapsamında önerilmiştir [142]. Algoritmayı güçlü olarak tabir etmemizin başlıca nedenleri basitliği, esnekliği ve yerel optimalden kaçabilme kabiliyetidir.

Bölüm 4'te KA'nın sürekli problemleri çözebilmek amacıyla önerilmiş özgün hali detaylarıyla birlikte tanıtılmıştır. Algoritmanın uygulama basitliğini sadece iki temel formül kullanılması ve ayarlanması gereken parametrenin neredeyse olmaması sağlamaktadır. Esnekliğini farklı problemlere rahatlıkla kullanılabilme özelliğinden almaktadır. Yerel optimal noktalardan kaçınabilmesini de stokastik süreçleri isabetli şekilde işleterek keşif (exploration) ve faydalanma (exploitation) safhaları arasındaki dengeyi iyi yönetebilmesine borçludur.

Algoritmanın ana iskeletini liderlik hiyerarşisi oluşturmaktadır. Kâşif (pathfinder) olarak isimlendirilen sürü lideri besin kaynağını bulmaya çalışmaktadır. Algoritmanın bize göre en önemli özelliği her ne kadar grup lideri üyeler tarafından takip edilse de her üye aslında güçlü bir lider potansiyelindedir. Çünkü sürüde bulunan temsilciler

hem liderlerini takip ederler hem de komşu üyelerle etkileşime girerler. Dahası, grubun herhangi bir üyesi bu etkileşimlerin miktarını değiştirebilen ve tesadüfi davranış içeren katsayıların yanı sıra tamamen etkileşim dışı rastgele davranışlar sergileyebilmektedir. Üyelerin tesadüfi davranışları başlangıç yinelemelerde yüksek iken sonlara doğru azalmaktadır. Sürüde bulunan temsilcilerden herhangi biri mevcut liderden daha verimli bir pozisyona ulaşırsa sürünün yeni lideri olmaya hak kazanmaktadır.

KA'nın test fonksiyonları üzerinde gösterdiği etkili performans nedeniyle BBO probleminde uygulanmasına karar verilmiştir. Yöntemin henüz üretilmiş bir ikili formatı olmaması sebebiyle çeşitli transfer fonksiyonları ve pozisyon güncelleme kuralları uygulanmış ve BBO problemi için İkili Kâşif Algoritması (İKA) önerilmiştir. Test sonuçlarının sunulduğu bölümde detayları verilen analizlerle sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına geçerken pozisyon güncelleme kuralının en az kullanılan transfer fonksiyonu kadar önemli olduğu görülmektedir.

Şekil 5.4'te önerilen İKA'nın sözde-kodu sunulmuştur. Görüldüğü gibi sürekli arama uzayında elde edilen pozisyon bilgileri transfer fonksiyonlarına sokulmakta ve elde edilen sonuç tercih edilen pozisyon güncelleme kuralına göre yapılacak işlemi belirlemektedir. Sürekli-ayrık geçişini yapabilmek amacıyla Güncelleme Yöneticisi adında bir fonksiyon oluşturulmuştur. Ana döngü işlerken sürekli olarak Güncelleme Yöneticisine başvurmakta ve elde edilen yeni pozisyonlar değerlendirilmektedir.

BBO problemini çözmek için yaptığımız analizlerde sürüde birbirinin aynısı olan bireylerin oluşabildiği ve dolayısıyla çeşitliliğin kaybolabildiği görülmüştür. Algoritmanın türüne göre sürüde bulunan aynı bireylerin miktarı değişiklik göstermektedir. Genellikle sürüdeki çeşitliliğini kaybetmeyen algoritmaların daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ancak birbirine benzeyen üyelerin sürü içerisinde tespit edilmesi durumunda bunların uygunluk değerini tekrar hesaplayarak çözüm süresini uzatmamak amacıyla sözde-kodun 6.9 ile 6.10 maddelerinde verilen yaklaşım uygulanmıştır. Buna göre, eğer yeni üretilen pozisyon sürüde bulunan herhangi bir üyeyle aynı ise bu üyenin uygunluk değeri hesaplanmayacaktır. İKA yaklaşımında durdurma kriteri olarak yineleme sayısı tercih edilmiştir. Belirlenen en fazla yineleme sayısına kadar iteratif süreç işlemektedir.

1: ***Giriş***: Şebeke Verisi, Yineleme Sayısı, Sürü Boyutu, Üst Sınır, Alt Sınır, TF(x) türü, Pozisyon Güncelleme Kuralı türü, Uygunluk = ∞,
2: Şebeke verisine göre bölünebilecek baraları tespit et;
3: Baralara bağlı fiderlere göre üye üreten bir fonksiyon oluştur. (Üye Oluşturucu);
3.1: ***for*** i = 1'den Bara Sayısına kadar ***yap***; **for** j = 1'den Fider Sayısına kadar ***yap***;
3.2: ***if*** $\text{random}(0,1) \geq 0.4$ ***then*** pozisyon = 0;
3.3: ***else*** position = 1 ***end***; ***end***; ***end***
4: Kâşifi ve sürünün diğer üyelerini güncelleyebilecek bir fonksiyon oluştur (Güncelleme Yöneticisi);
4.1: ***for*** i = 1'den Bara Sayısına kadar ***yap***; **for** j = 1'den Fider Sayısına kadar ***yap***;
4.2: ***if*** üye = kâşif
4.3: ***then*** sürekli arama uzayında kâşifin pozisyonunu güncelle (Eşitlik (4.47)'ye göre) ve sınırları kontrol et
4.4: ***else*** sürekli arama uzayında üyenin pozisyonunu güncelle (Eşitlik (4.49)'a göre) ve sınırları kontrol et ***end***
4.5: ***if*** TF(x) türü = 1 ***then*** $\text{TF}(x_i^{t+1}) = \frac{1}{1-e^{-x}}$
4.6: ***elseif*** TF(x) türü = 2 ***then*** $\text{TF}(x_i^{t+1}) = |\tanh x|$
4.7: ***elseif*** TF(x) türü = 3 ***then*** $\text{TF}(x_i^{t+1}) = \left|\frac{x}{\sqrt{1+x^2}}\right|$
4.8: ***elseif*** TF(x) türü = 4 ***then*** $\text{TF}(x_i^{t+1}) = \left|\frac{1-e^{-0.5x}}{1+e^{-0.5x}}\right|$
4.9: ***elseif*** TF(x) türü = 5 ***then*** $\text{TF}(x_i^{t+1}) = \left|\frac{1-e^{-0.5x}}{1+e^{-0.5x}}\right| * 0.7 + 0.3$ ***end***
4.10: ***if*** Pozisyon güncelleme kuralı = 1
4.11: ***then*** $x_i^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{TF}(x_{i,k}^{t+1}) > \text{rand}(0,1) \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases}$
4.12: ***else*** $x_{i,k}^{t+1} = \begin{cases} \text{değiştir}(x_{i,k}^{t}), & \text{if } \text{TF}(x_{i,k}^{t+1}) > \text{rand}(0,1) \\ x_{i,k}^{t}, & \text{Aksi halde} \end{cases}$ ***end***
4.13: ***end***; ***end***
5: Başlangıç sürüyü oluştur;
5.1: ***for*** i = 1'den Sürü Boyutuna kadar ***yap***;
5.2: Üye Oluşturucu fonksiyonuyla sürüye üye ekle ***end***
6: Ana döngüye başla
6.1: ***While*** t ≤ Yineleme Sayısı
6.2: $\alpha, \beta = \text{random}(1,2)$
6.3: A, ε yi Eşitlik (4.48) ve (4.50)'ye göre güncelle
6.4: Güncelleme Yöneticisini kullanarak kâşif üyenin pozisyonunu güncelle,
6.5: ***if*** yeni üye eskisinden daha iyiyse
6.6: ***then*** Kâşif üyeyi güncelle ***end***
6.7: ***for*** i = 2'den Sürü Boyutuna kadar ***yap***;
6.8: Güncelleme Yöneticisini kullanarak üyeler için yeni pozisyonlar üret
6.9: ***if*** yeni üye = sürüdeki herhangi bir üye
6.10: ***then*** bu yeni üyenin uygunluk miktarını hesaplama
6.11: ***else*** yeni üyenin uygunluğunu hesapla ***end***; ***end***
6.12: ***if*** en iyi üyenin uygunluğu < Kâşifin uygunluğu
6.13: ***then*** Kâşif üyeyi güncelle ***end***
6.14: ***for*** i = 2' den Sürü Boyutuna kadar ***yap***;
6.15: ***if*** i. üyenin yeni pozisyonu < i. üyenin mevcut pozisyonu
6.16: ***then*** üyeyi güncelle ***end***; ***end***
6.17: t = t+1;
6.18: **end**

Şekil 5.5. İkili Kâşif Algoritmasının sözde-kodu

5.2. Güç Sistemi Kısıtlarının Algoritmalara Adaptasyonu

Sezgi-üstü algoritmalar optimal çözümünü bulmaya çalıştıkları her problemi bir kara kutu olarak görürler. Yani bu algoritmalar problemin doğasıyla ilgilenmezler. Algoritmalar problemin sadece girdileri ve çıktılarıyla ilgilenirler. Dolayısıyla problemi tasarlayanlar, bir problemi sezgi-üstü algoritma ile çözerken problemin doğasına aykırı durumların oluşmasını engellemek için gerekli önlemleri almalıdır.

Bara Bölme Optimizasyonu probleminde güç sisteminin doğası gereği uyulması gereken çeşitli kurallar vardır. Bu kuralların en başında güç akışları, gerilim kısıtları ve sistemin kısa devre akım seviyesi bulunabilir. Güç sisteminin temelini oluşturulan bu kavramlar amaç fonksiyonuna veya kısıtlara konularak uygun olmayan bir yapının oluşması zaten engellenmektedir. Örneğin, kısa devre akımı belirlenen sınırı aşan bir bara düzeni oluşmuş ise o düzen büyük bir rakamla çarpılarak cezalandırılabilir. Böylece uygun olmayan topolojinin algoritmanın çıktısı olarak gelmesine engel olunur.

Sezgi-üstü algoritmaların N-1 analizi ve KDA sonuçlarını aldığı yazılım daha önce de belirtildiği gibi PSS/E yazılımıdır. N-1 analizi için gerekli olan AA güç akışı bu program vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Lineer olmayan cebirsel işlemleri çözebilmek amacıyla çok yaygın olarak kullanılan Gauss-Seidel ve Newton Raphson iteratif çözüm teknikleri bulunmaktadır. Gauss-Seidel yaklaşımı beklenen doğrulukta başarıya ulaşabilmek için çok fazla yinelemeye ihtiyaç duyar ve buna rağmen çözüme yakınsama garantisi de yoktur. Newton Raphson metodu ise Taylor serisini kullanan ve bilinmeyeni başlangıçta tahmin etmeye dayalı olan başarılı bir yaklaşımdır [72]. Güç akışı çözümü yaparken PSS/E programı vasıtasıyla Newton Raphson metodunun kullanılması tercih edilmiştir.

Güç akışı çözümü yapılırken sistemin dengeli koşullarda olduğu varsayılmaktadır. Güç sisteminde bulunan her bir barada gerilimin genliği ve açısı, aktif ve reaktif güç bilgileri bulunmaktadır. Güç akışı çözülürken sistemdeki baralar salınım (slack veya swing), yük ve jeneratör barası olmak üzere üç farklı sınıfa ayrılmaktadır. Salınım barası, gerilimin genlik ve açısının belirlendiği bir referans olarak alınır. Salınım barası şebekede meydana gelen güç kayıpları nedeniyle oluşan üretim-tüketim dengesizliğini telafi etmektedir. Yük barasında bara geriliminin genlik ve açısı bilinmiyorken aktif

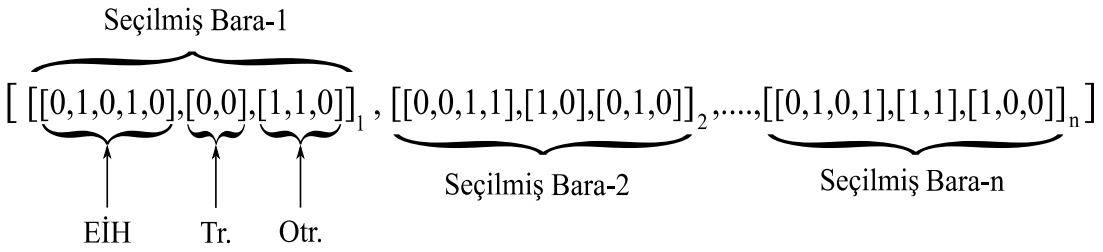
ve reaktif güçler belirlenmektedir. Aktif ve reaktif güçler bilindiği için yük barasına P-Q barası da denilmektedir. Jeneratör barasına düzenleyici bara (regulated bus), gerilimin kontrol edildiği bara (voltage-controlled bus) veya P-V barası da denilmektedir. Bu barada aktif güç ve gerilimin genliği belirlenmekte olup gerilimin açısı ve reaktif güç miktarları bilinmemektedir. Bu baraya bağlı jeneratörlerin reaktif güç limitlerinin de belirlenmiş olması gerekmektedir [72].

Bölüm 3'te detaylı şekilde anlatılan BBO probleminde güç sisteminin temel gereklilikleri ya kısıt şeklinde ya da amaç fonksiyonu içerisinde verilerek sağlanmıştır. Ancak güç sisteminde kontrol edilmesi gereken farklı konular da bulunmaktadır. Örneğin, algoritmalar çok çeşitli bara düzenleri oluşturarak N-1 analizine başvurduğu için sürekli olarak Newton Raphson yöntemiyle güç akışı çözdürecektir ancak güç sisteminde salınım barasının bağlı olmadığı izole bir bölgenin oluşması halinde temel durum güç akışı yapılamayacaktır. Böyle bir durumun gerçek bir şebekedeki karşılığı, enterkonnekte iletim sisteminden farklı bir frekansta çalışan ve kendi üretim-tüketim dengesini sağlamak zorunda olan bir ada sistemin meydana gelmiş olmasıdır. Böyle bir topolojiye özel uygulamalar veya sistem toparlamalar dışında müsaade edilmesi mümkün değildir. Dolayısıyla bara bölme optimizasyonu yapılırken algoritmalar tarafından denemesi yapılan topolojilerde birbirinden izole ada sistemlerin oluşmasına izin verilmemelidir. Bu ve benzeri güç sistemi kısıtlarını algoritmalara adapte etmek için uygulanan yaklaşımlar bu bölüm altında anlatılmıştır.

5.2.1. Temsilci oluşturma

Güç sisteminde bara bölme işlemini optimize etmek için öncelikle hangi TM'lerde baraların bölünebileceğine karar verilmelidir. N-1 güvenliğinden bahsedebilmek için bir baraya bağlı en az 2 iletim hattı bulunmalıdır. Yani, bir TM'de 4'ten daha az iletim hattı varsa, kuplaj kesicinin açılması halinde bir baraya bir EİH kalmakta ve bu durumda ilgili barada bulunan üretici veya tüketicilerin N-1 güvenliği kalmamaktadır. Dolayısıyla kuplaj kesicisi açılarak bara bölme işleminin gerçekleştirilebileceği baraların bu mantık çerçevesinde belirlenmesi gerekmektedir. Bölünebilecek baralar belirlendikten sonra bu baralara bağlı iletim sistemi ekipmanlarına göre hangi baraya bağlı olduklarını belirtecek bir liste şablonu oluşturulmalıdır. Bu şablonda her baraya

ait EİH, Otr. ve Tr.ler belirlenmiş bir sıralamayla konulmalıdır. Aksi halde, hangi ikili kodun hangi ekipmanı temsil ettiğini ayırt etmek mümkün olmayacaktır.



Şekil 5.6. Algoritmalarda kullanılan temsilci düzeni

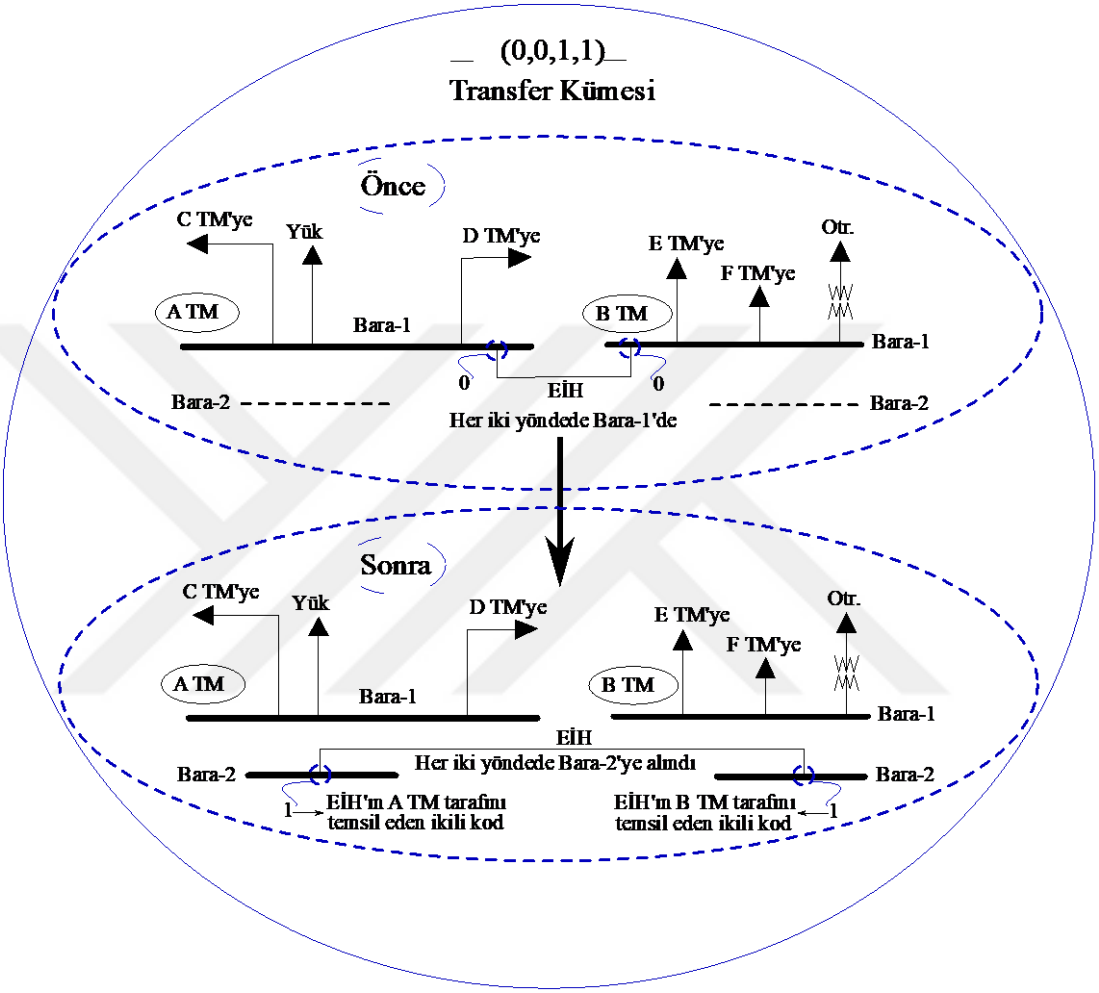
GA'da bir kromozomun, PSO'da bir parçacığın veya BO'da bir kurdun pozisyonunu temsil eden ikili kod düzeni Şekil 5.6'da verilmiştir. BBO optimizasyonu için tasarlanan bu yaklaşım iç içe geçmiş listelerden oluşmaktadır. En dış liste tüm baraları ve ekipmanları bünyesinde barındıran bir temsilcinin pozisyonunu vermektedir. Birinci derece iç listeler bölünmeye uygun baraları temsil etmektedir. Her baranın içinde üç ayrı liste bulunmaktadır. Baranın içerisinde bulunan birinci liste EİH'leri, ikinci liste tüketim veya üretim birimlerinin bağlı olduğu transformatörleri ve üçüncü liste de ototransformatörleri temsil etmektedir.

Dikkat edilirse kuplaj kesiciyi, başka bir ifadeyle Sıfır-Empedans Hattını (SEH) (zero-impedance line) temsil eden herhangi bir ikili kod önerilmemiştir. Bir TM'de bulunan ekipmanların tamamının bir baraya toplanması, bu TM'de SEH'in serviste olmasıyla, bir başka ifadeyle kuplaj kesicinin serviste olmasıyla, aynı mantıktadır. Dolayısıyla, kuplaj kapatarak iki ayrık barayı birbirine bağlama kavramı algoritmaların tüm fiderlerini bir baraya toplayarak yapılabildiği için çözüm uzayını küçültmek amacıyla oluşturulan temsilcilerin karar değişkenleri arasına SEH'i temsil eden bir ikili koda yer verilmemiştir.

5.2.2. Kümeleme yöntemi

Temsilcilerde bulunan ekipmanların daima aynı sırada olması dikkat edilmesi gereken bir başka konudur. Farklı bara düzenlerinde ekipmanların kimlik bilgileri değişerek sıralamadaki yerleri de değişebilmektedir. Bu nedenle, iletim sisteminden alınan bilgilerle bir temsilci oluşturulmadan önce BBO yapılacak bölgede bölünebilecek baralardaki tüm ekipmanlar bara-1'e alınmaktadır. Tüm ekipmanların bara-1'e

alınmasıyla birlikte oluşturulan temsilcinin içerdiği ekipman sıralaması referans olarak seçilmektedir. Algoritmalar tarafından oluşturulan bara düzenleri uygulanmadan önce referans pozisyonuna geçilmelidir. Bunun anlamı, algoritmanın çıktısı olan bir bara düzeni PSS/E ortamında tüm fiderler bara-1'e toplandıktan sonra uygulanmalıdır.



Şekil 5.7. Baralar arası fider transfer kümesi (0,0,1,1)

Ekipmanlar algoritmaların rastgele oluşturduğu düzenlere göre baralara dağıtılmaktadır. Bu işlem yapılırken belirli bir düzende yapılmalıdır. Geçiş işleminin basitleştirilebilmesi için kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde olabilecek geçiş kümeleri belirlenmiş ve bu kümeye ait olan tüm geçişler aynı anda yapılmıştır. Örneğin, Şekil 5.7'de görüldüğü gibi bara bölünebilecek iki TM arasında bulunan bir EİH'nin başlangıç konumu her iki tarafta da bara-1 iken algoritmalardan gelen ikili kod bilgisine göre her iki tarafta da bara-2'ye geçiş yapması gerekiyorsa, bu EİH'nin tabi olduğu küme (0,0,1,1) kümesidir. Oluşturulan her kümenin 4 bilgi içermesi

gerekir: Gönderici bara önceki pozisyonu, alıcı bara önceki pozisyonu, gönderici bara sonraki pozisyonu, alıcı bara sonraki pozisyonu. Görüldüğü gibi EİH başlangıçta hem A TM'de hem de B TM'de bara-1'e bağlıdır. Dolayısıyla bu EİH ilk iki kodu (0,0) olan bir kümeye dahil olacaktır. Ancak transfer kümesine dahil olmak için bu bilgi yeterli değildir. EİH'nin bir kümeye dahil olabilmesi için her iki tarafta da sonraki pozisyonu bilinmelidir. Görüldüğü gibi EİH, her iki TM'de bara-2'ye taşınacaktır. Buna göre EİH'nin dahil olacağı kümenin son iki kodu (1,1) olmalıdır. Sonuç olarak bu EİH (0,0,1,1) kümesine dahil olarak transfer işlemi gerçekleştirilecektir. Açıklanan kümeleme yöntemi Otr. ve Tr.ler için de geçerlidir.

Oluşturulan kümelerin 4 elemanı olması sebebiyle toplam 16 farklı küme oluşturulabilir. Ancak, (0,0,0,0), (1,1,1,1), (1,0,1,0) ve (0,1,0,1) kümelerinde herhangi bir transfer işlemi yapılmayacağı için bunlar etkisiz kümedir. Bu nedenle her iki tarafında da değişiklik yapılabilecek bir ekipmanın transferiyle ilgili 12 farklı seçenek bulunmaktadır. Eğer EİH'nin mevcut pozisyonu (0,0) olarak sabitlenirse sonraki pozisyonu için sadece 4 farklı küme seçeneği bulunmaktadır. Bunun dışında, tek tarafından bara değişimi yapılacak bir EİH veya Tr. ve Otr.nun sadece bir tarafında değişiklik yapılacağı için küme seçeneği sayısı 2 ((0,1) ve (1,0)) olmaktadır.

Tez çalışmamız kapsamında iletim sisteminin 400 kV gerilim seviyesinde henüz bir kısa devre akımı problemi yaşanmadığı için BBO probleminin kapsamı dışında tutulmuştur. Ayrıca bara bölme metoduyla güç sisteminin geçici durum kararlılığı değişeceği için 400 kV gerilim seviyesinde BBO yapılması durumunda minimum seviyede yapılmalı ve geçici durum analizleri de ihmal edilmemelidir. Bu sebeple, Otr.lerin 154 kV gerilim seviyesi tarafında bara değişikliği yapılırken 400 kV gerilim seviyesi tarafında değişiklik yapılmamaktadır. Sonuç olarak, Otr.lerin dahil olabileceği iki transfer kümesi bulunmaktadır. Üretim ve tüketim birimlerinin primeri 154 kV gerilim seviyesi iken sekonderi 34,5 kV ve altındaki gerilim seviyesinde işletilmektedir. Çalışmamız kapsamında dağıtım tarafında bara değiştirmek suretiyle belirli kazanımlar elde etme doğrultusunda çalışılmamıştır. Bu nedenle, Otr.lerde olduğu gibi Tr.lerin de dahil olabileceği iki transfer kümesi bulunmaktadır.

5.2.3. Başarısız transfer işlemini ayıklama ve topoloji kontrolü

Sezgi-üstü algoritmalardan gelen bilgiye göre bir baradan diğer baraya geçmesi gereken ekipmanlar tespit edilerek ilgili kümelere aktarılır. Her küme, içerisinde bulunan ekipmanları kendi özelliğine göre bir baradan diğerine transfer eder. Her şey yolunda gidiyor gibi görünse bile bu geçiş işlemi esnasında net bir şekilde görülmeyen problemler meydana gelebilir. Bu problemlerin en önemlileri aşağıda verildiği gibi sıralanabilir,

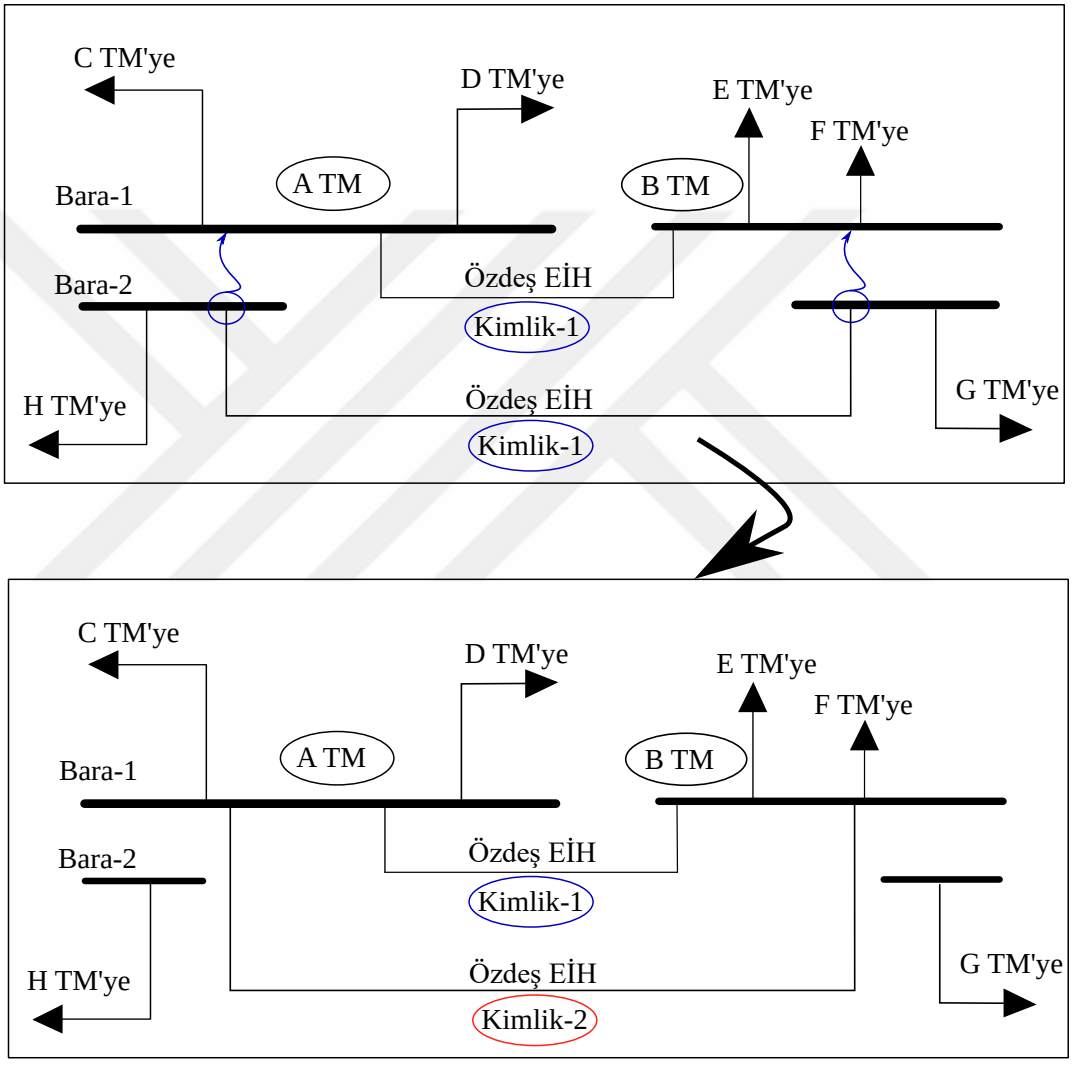
1) Özdeş hatlarda kimlik çakışması
2) Bir kesici ile beslenen birden fazla ekipmanın PSS/E'de tekil modellenmesi
3) Radyal bara tespiti
4) Ekipman transfer edilmeden önce veya edildikten sonra uygun olmayan bara durumunun oluşması
5) P-V baraların ve salınım barasının kaybedilmesi
6) Üretim ve tüketim birimleri ile Otr.lerin boş baraya taşınması
7) Bir baraya sadece 1 adet EİH bağlanması
8) Enterkonnekte İletim Sistemden izole olmuş ada sistemlerin oluşması

Yukarıda bahsedilen başarısız taşıma işlemlerinin detayları verilen sıralamaya uygun olarak aşağıda açıklanmıştır.

1) İletim sisteminde iki TM arasında özdeş iletim hatları bulunabilmektedir. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi A ve B TM'leri arasında iki özdeş EİH bulunmaktadır. PSS/E programında bu tür EİH'ler kimlik numarasıyla ayırt edilebilmektedir. Başlangıç durumunda özdeş hatlar farklı baralarda bulunuyorsa ikisinin de kimlik numarası PSS/E tarafından 1 olarak atanmaktadır. Programın kullanıcı ara yüzüyle iki EİH aynı baraya alındığında birinin kimlik numarası 2 olarak atanmaktadır. Bu durum zaten beklenen ve istenendir. Ancak Python programlama dili kullanarak bara geçişi yapılacağı zaman girdi olarak istenen kimlik bilgisi doğru şekilde verilemezse transfer işlemi başarısız olacaktır. Çünkü program EİH'nin transfer edileceği barada tamamen özdeş bir EİH olması durumunda zaten bu ekipman bu baraya bağlıdır hatasıyla transfer işlemini yapmayacaktır. Sonuç olarak, özdeş hatlar bulunuyorsa bu hatların kimlik bilgileri transfer esnasında hataya sebebiyet vermeyecek şekilde girilmelidir. Bu konuyu biraz daha açıklayabilmek adına Siemens tarafından geliştirilen PSS/E'nin

Uygulama Program Arayüzünde (Application Program Interface (API)) verilen ekipman taşıma fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

- movebrn (EİH'nin barası değişmeyen tarafının bara numarası, EİH'nin barası değişecek tarafının bara numarası, EİH'nin kimliği, EİH'nin barası değişecek tarafın yeni bara numarası, EİH'nin yeni kimliği) [69].

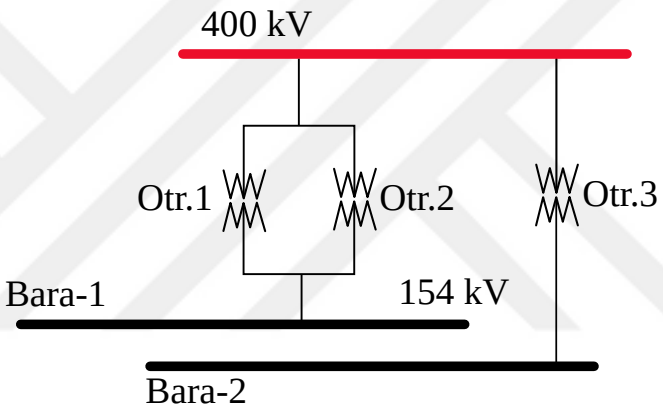


Şekil 5.8. EİH transferinde kimlik çakışmasını önleme örneği

Fonksiyonda Python programlama diliyle bir iletim hattını bir baradan diğer baraya aktarabilmek için gerekli olan bilgiler belirtilmiştir. Görüldüğü gibi iletim hattının yeni kimlik numarası belirtilmelidir. EİH'nin transfer olacağı barada kendisiyle özdeş bir EİH daha varsa ve kimlik numaraları da aynıysa transfer işlemi gerçekleşmeyecektir.

Özdeş hat problemi sebebiyle transfer işlemi gerçekleşmezse algoritmanın denediğini düşündüğü bara düzeni aslında denenmemiş olacak ve hatalı sonuçlar verecektir.

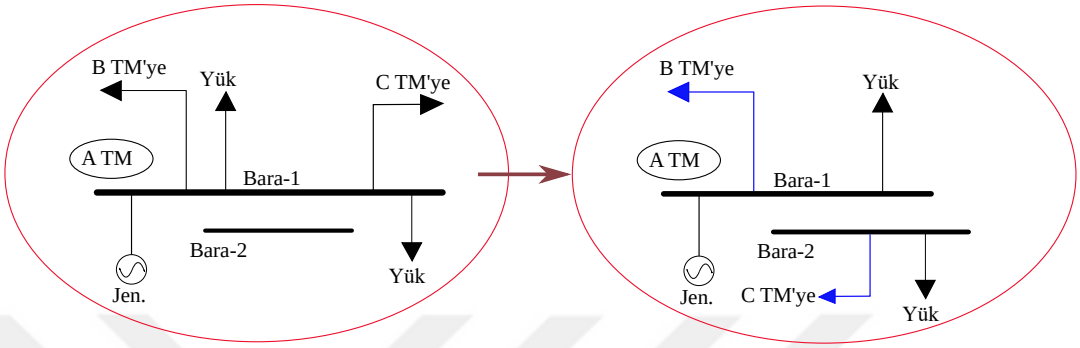
2) Normal şartlar altında PSS/E bünyesindeki Otr. dahil her ekipman yalnız hareket eder. Bir başka deyişle hepsinin kendi kesicisi vardır. Ancak Türkiye Elektrik İletim Sisteminde iki Otr.den oluşan ve Bank olarak adlandırılan teçhizatlar bulunmaktadır. Bu duruma hem N-1 analizinde hem de transfer işleminde dikkat edilmelidir. Eğer ilgili Otr. bir bankın elemanıysa bir Otr. servis harici olurken diğeri de servis harici olmak zorundadır çünkü iki Otr.ün tek kesicisi bulunmaktadır. Aynı şekilde bank mensubu bir Otr. bir baradan diğer baraya aktarılırsa diğeri de aynı şekilde aktarılmalıdır.



Şekil 5.9. Bank şeklinde çalışan Otr. gösterimi

Bank şeklinde çalışan Otr.ler Şekil 5.9'da verildiği gibi tesis edilmektedir. İki adet Otr. paralel çalışacak şekilde primer ve sekonder bağlantıları aynı fider üzerinden tesis edilir. Dolayısıyla bu iki Otr. birbirinden bağımsız hareket etme kabiliyetine sahip değildir. Şekilde verilen Otr.3 bara-2'den bara-1'e bağımsız olarak taşınabilir fakat Otr.1 ve Otr.2 için aynı durum söz konusu değildir. Bu iki Otr. mutlaka birlikte hareket etmelidir. Sezgi-üstü algoritmalarda işleyen tesadüfi süreç sebebiyle algoritma tarafından üretilen bir temsilcinin pozisyon bilgisine göre Otr.1 bara-1'den bara-2'ye aktarılırken Otr.2 bara-1'de kalmaya devam edebilir. Bu nedenle algoritmalardan gelen pozisyon bilgisi sistemin gerçekliğine göre düzenlenerek uygulanmalıdır. Ayrıca Otr. geçişleri esnasında EİH'lerde olduğu gibi kimlik çakışmasına dikkat edilmelidir.

3) Bir baraya bağlı olan sadece 1 adet EİH bulunuyorsa, bu bara radyal bara olarak isimlendirilmektedir. Radyal bir baraya bağlı EİH'nin servis harici olması durumu ilgili baranın EİS'ten kopmasına neden olacaktır. Dolayısıyla N-1 analizi esnasında radyal baralara bağlı EİH'lerin servis harici edilmesine gerek yoktur.



Şekil 5.10. Radyal bara gösterimi

Normalde radyal konumda bulunmayan bir bara, sistemde yapılan bir değişiklik neticesinde radyal bir baraya dönüşebilmektedir. Şekil 5.10'da böyle bir radyallik oluşumuna örnek gösterilmektedir. Başlangıçta A TM'de tüm fiderler bara-1'e bağlı durumdayken radyal bir bara söz konusu değildir. Ancak C TM ile irtibatı sağlayan EİH'nin bara-2'ye alınması durumunda A TM'de bulunan baraların ikisi de artık radyal bara konumuna geçmektedir. BBO probleminin çözüm sürecinde N-1 analizi en az 3000 kere yapılmaktadır. Dolayısıyla radyal konumda bulunan baraların tespit edilmesi ve analiz kapsamından çıkarılması önemlidir.

Radyal bara tespitinin tek amacı N-1 analizinden çıkararak zamandan tasarruf etmek değildir. Nitekim, bir EİH'nin servis harici olması durumunda temel durum Newton Raphson güç akışının çözülememesi, ilgili topolojinin büyük bir sayıyla cezalandırılmasına sebep olmaktadır. Radyal bir baranın bulunduğu sistemde N-1 analizi kapsamında radyal baraya bağlı EİH'nin servis harici edilmesi durumunda, radyal bara ada konumuna düşeceğinden temel durum güç akışı yapılamayacaktır. Bu durum algoritmaların oluşturduğu topolojilerin beklenen şekilde değerlendirilmesini etkileyecektir.

4) Sezgi-üstü algoritmalardan gelen pozisyon bilgisine göre gerekli taşıma işlemleri yapıldıktan sonra bir baraya bağlı herhangi bir ekipman kalmaması halinde ilgili baranın servis harici edilmesi gerekmektedir. Böyle bir durum oluştuğunda ilgili

baranın servis harici edilmemesi halinde sistemden izole bir adanın oluşması sebebiyle temel durum güç akışı yapılamayacaktır. Bu sebeple, oluşturulan bara düzeni büyük bir ceza katsayısıyla çarpılarak hak etmediği bir tutumla karşılaşacaktır. Dolayısıyla, algoritmaların performans değerlendirmesinde hatalı veri işlemesine neden olacaktır.

Diğer taraftan, hali hazırda servis harici olan bir baraya ekipman taşınması gerekiyorsa öncelikle ilgili baranın servise alınması gerekmektedir. Bara servise alınmadan EİH'nin transfer edilmesi durumunda yine temel durum güç akışı gerçekleşemeyecektir. Dolayısıyla, bu durumda da oluşturulan topoloji yanlış bir değerlendirme sürecine tabi tutulmuş olacaktır.

EİS'te bulunan baralar arasından servise alınması veya servis harici edilmesi gereken baraların tespit edilmesi basit bir detaydır. Ancak bu durumun gözden kaçırılması halinde algoritmalardan beklenen verimin alınması mümkün olmayacaktır.

5) Salınım barası, benzetim ortamında güç akış işlemini gerçekleştirebilmek için gerekli olan önemli bir kavramdır. EİS'te meydana gelen güç kayıpları sebebiyle üretim-tüketim dengesinde yaşanan kaymaları telafi eden ekipman salınım barasıdır. Salınım barası olmayan bir sistemde güç akışı süreci işletilemez. P-V barası olarak adlandırılan jeneratör barası da baraya bağlı jeneratörlerin limit değerlerine uyacak şekilde sistemin ihtiyaç duyduğu reaktif güç miktarını sağlamaya çalışmaktadır.

PSS/E programında bir baranın servis harici edilmesi ve tekrar servise alınması durumunda ilgili baranın statüsü değişmektedir. Yani, servis harici edilmeden önce P-V karakteristiğine sahip bir bara, servis harici edildikten sonra tekrar servise alınırken özellikle bara tipi belirtilmezse P-Q barası olarak servise alınmaktadır. Aynı durum salınım barası için de geçerlidir. Böyle bir senaryonun oluşması halinde, örneğin sistemin reaktif güç ihtiyacını karşılayan P-V baralarının kaybedilmesi durumunda, oluşturulan bara düzeni gerektiği gibi değerlendirilemeyecektir.

6) EİS'te iletim hattı bulunmayan bir barada üretim veya tüketim biriminin bağlı olması, özel ada çalışma sistemi uygulanmıyorsa söz konusu değildir. Ancak sezgi-üstü algoritmalarda işletilen tesadüfi süreç ile temsilci pozisyonlarında iletim hattı bulunmayan bir baraya Tr. bağlantısı yapılabilir. Sezgi-üstü algoritmalar problemi bir kara kutu olarak gördüğü için böyle bir problemi önleyecek şekilde çalışması

beklenemez. Aynı zamanda Otr.ler 154 kV gerilim seviyesi için bir kaynak gibi çalışmaktadır ve böyle önemli bir ekipmanın boş barada bırakılması uygun değildir. Bir barada sadece Otr. ve Tr.lerin bulunması teknik olarak mümkündür. Ancak Otr. gibi bir kaynağın üzerine birkaç Tr. bırakılması kullanılamayan bir kapasitenin oluşmasına neden olabilir. Bu sebeplerle, boş bir baraya yalnızca Tr., Otr. veya bunların kombinasyonunun bırakılması engellenecek şekilde tasarım yapılmalıdır.

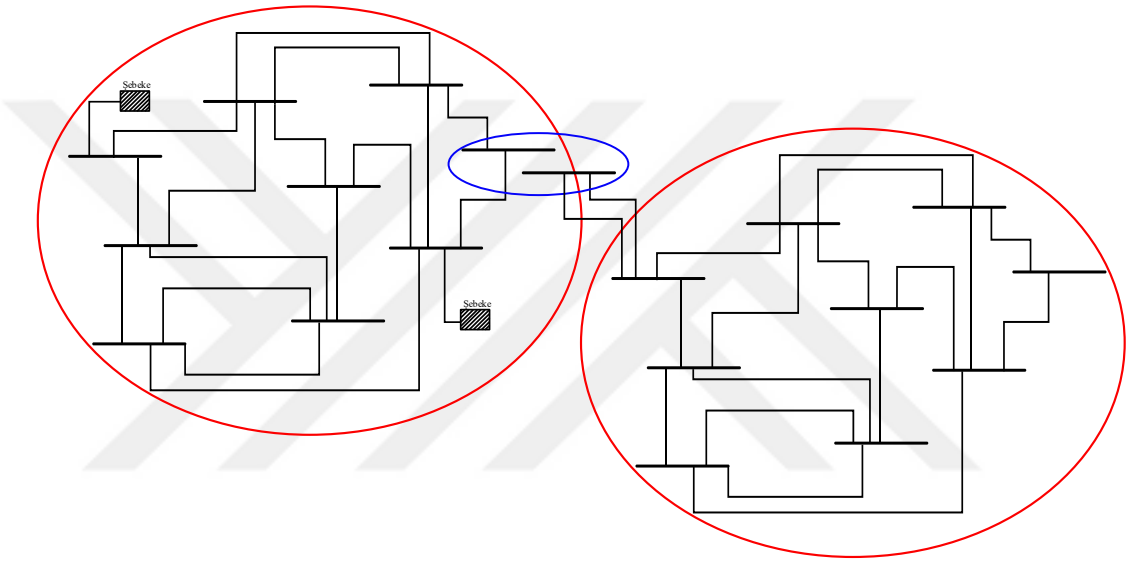
7) Bahsedildiği gibi iletim sisteminde N-1 kriterine göre bir EİH'nin servis harici olması arz güvenliğini tehlikeye sokmamalıdır. Bir baraya sadece bir EİH'nin bağlanması durumunda N-1 güvenliğinden bahsedilmesi söz konusu değildir. Çünkü bu EİH'nin servis harici olması durumunda ilgili baraya bağlı tüketim birimleri kesintiye uğrarken üretim grupları da devreden çıkacaktır. Algoritmalardan gelen pozisyon bilgileri bu doğrultuda düzeltilmelidir.

Esasen bir baraya bağlı Otr. bulunuyorsa sadece bir iletim hattının bağlanmasına izin verilebilir. Ancak Türkiye Enerji İletim Sisteminde kullanılan Otr.lerin büyük bir bölümü bank şeklinde çalıştırılmaktadır. Ayrıca yeni yatırımlarda Otr.lerin bank şeklinde tesisi gerçekleştirilmese bile bir bank kadar güce sahip tekil Otr.lerin tesis edildiği görülmektedir. Dolayısıyla N-1 durumunda bir Otr.ün alternatifi bir EİH olamayacağı düşüncesinden hareketle bir baraya bağlı en az iki EİH olması çalışmamız kapsamında zorunlu tutulmuştur.

8) BBO probleminde sezgi-üstü algoritmalar uygun topolojiyi elde etmeye çalışırken binlerce farklı senaryoyu değerlendirmektedir. Farklı bara düzenleri oluşturulurken sık bağlantılı sistemlerde bile birbirinden tamamen ayrık izole sistemler bara bölme işlemi neticesinde oluşabilmektedir. Böyle bir senaryoyla başarılı sonuçlar elde etmenin en azından Türkiye Elektrik İletim Sistemimizde uygulanan işleyiş açısından bir önemi yoktur. Bunun nedeni iletim sistemimizin tamamen enterkonnekte şekilde işletilmesidir. Bu nedenle oluşacak ada sistemlerin algoritmalar tarafından olumlu değerlendirilmesine engel olunmalıdır.

Şekil 5.11'de bölgelere ayrılmış bir ada işletim sistemi gösterilmektedir. Böyle bir işleyişin benzetim ortamında uygulanabilmesi için her adanın bir salınım barası olmalıdır. Adaların her birinde bir salınım barası tanımlanmaz ise temel durum Newton Raphson güç akışı gerçekleştirilemeyecektir. Bu doğrultuda ada çalışma

sistemi oluştuğunda ilgili bölgeye salınım barası eklenmeyerek temel durum güç akışı başarısız olmalı ve ilgili topolojinin büyük bir ceza katsayısıyla çarpılarak sonraki yinelemelere geçmesi engellenmelidir. Sitemde ada bölgelerin oluşması halinde ilgili topolojinin gerektiği gibi cezalandırılabilmesi için radyal EİH'lerin servis harici edilmesi ve servis harici olan bir baraya ekipman taşınması gibi diğer konuların önlemi mutlaka alınmalıdır. Aksi halde ada bölge oluşmasa bile temel güç akışı sağlanamadığı için ilgili topoloji sanki izole bölgelere neden olmuş ve bu nedenle güç akışı sağlanamıyormuş gibi cezaya maruz kalacaktır.



Şekil 5.11. EİS'in birbiriyle bağlantısı olmayan bölgelere ayrılması

Topoloji kontrolü modülüyle algoritmaların işlettiği stokastik süreçlere müdahale edildiği için bir yineleme içerisinde popülasyonu oluşturan üyelerin bire bir aynı olma ihtimali yükselmektedir. Yapılan analizlerde oluşturulan bara düzeninin ilgili yineleme içerisinde farklı bir üyede olup olmadığı kontrol edilerek, eğer aynı üye varsa N-1 analizi yapılmadan ilgili pozisyonun maliyetini mevcut üyeden alarak belirlemenin çözüm süresini kısalttığı görülmüştür. Yinelemeler boyunca algoritmalar tarafından oluşturulan bara düzenlerinin uygunluk değerleriyle birlikte saklanarak yeni oluşturulan bireylerle karşılaştırılması, N-1 analiz sürecini kısaltmaktadır. Ancak bu noktada yeni oluşturulan bireyin önceden oluşturulmuş bireylerle karşılaştırılması işleminin süresi, yinelemeler arttıkça veri boyutu yükseleceğinden istenmeyen seviyelere çıkabilir. Bu nedenle karşılaştırılacak veri boyutunun N-1 analizi

yapılmadığı için kazanılan süreden daha az zaman alacak şekilde ayarlanması gerektiği unutulmamalıdır.

5.3. BBO Problemi için Tasarlanan Algoritma

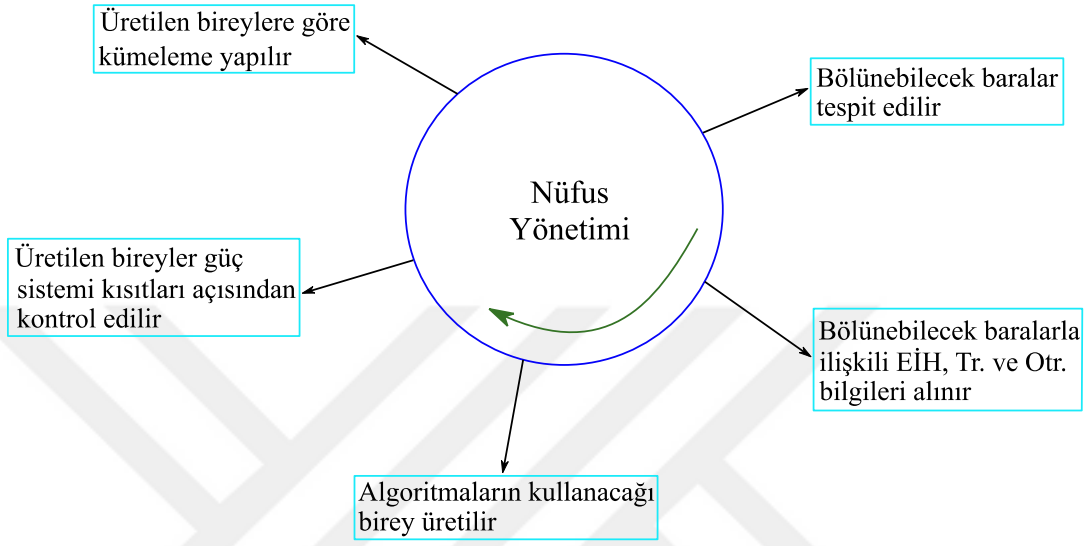
Şu ana kadar anlatılan bölümlerde BBO probleminin ne olduğu, problemi çözebilmek için tanımlanması gereken amaç ve kısıtların yapısı ve bu problemin sezgi-üstü algoritmalara adaptasyonunda dikkat edilmesi gereken konular hakkında detaylı açıklamalar yapılmıştır. Ancak problemin çözümünde kullanılan detay yaklaşımların yanı sıra daha iyi anlaşılabilmesi için çözümde kullanılan başlıca yapıların tanıtılmasında fayda olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.12. PSS/E'den veri çekme ve düzenleme

Çalışmamız kapsamında bahsedildiği gibi şebeke verileri PSS/E programından Python dili kullanılarak çekilmiştir. Şekil 5.12'de PSS/E'den veri çekme ve düzenleme sınıfının içerdiği başlıca bölümler gösterilmektedir. Bu sınıf, sezgi-üstü algoritmayı çalıştırmadan önce bazı ön hazırlıkların yapıldığı bölümdür. Daha önce BBO problemini ülke genelinde aynı anda çalıştırmanın faydasız bir işlem olacağından ve çözüm uzayını kabul edilebilir sonuçlar elde edilemeyecek kadar büyüteceğinden bahsedilmiştir. Dolayısıyla kullanıcı tarafından iletim sisteminin hangi bölgesinde BBO yapılması gerektiğinin belirtilmesi gerekmektedir. Kullanıcı tarafından girilen bilgilere göre BBO yapılacak bölgeye ait bara, EİH, Otr. ve Tr. bilgileri alınarak düzenlenmektedir. Bu bölümde, N-1 analizinde ihtiyaç duyulacak uzak ve yakın

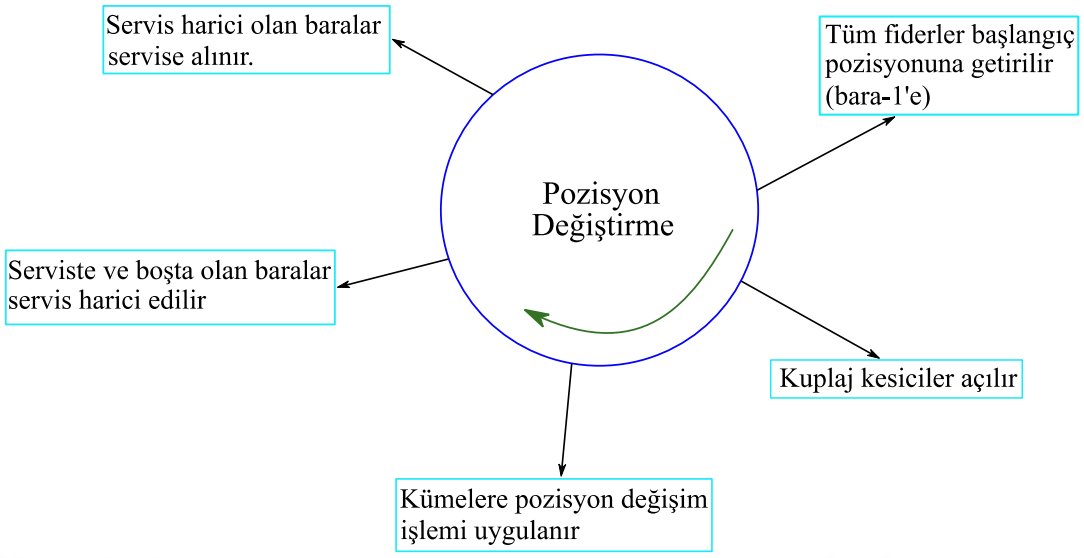
bağlantı hatları ile radyal baralar tespit edilmektedir. Bunun dışında tek baralı, çift baralı ve kuplaj kesiciye sahip TM'ler sınıflandırılmaktadır. Ayrıca analiz süresini kısaltmak amacıyla istenirse şebeke küçültme işlemi yapacak fonksiyonlar da bulunmaktadır.



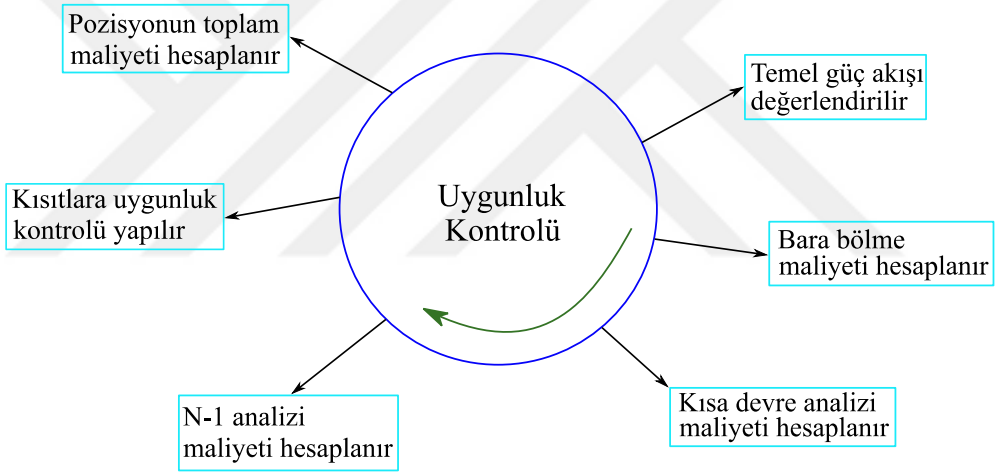
Şekil 5.13. Algoritmaların ihtiyaç duyduğu bireyleri üretme ve kontrol etme

Nüfus yönetimi, tasarlanan programın en sık başvurduğu sınıflardan biridir. Şekil 5.13'te içerdiği başlıca fonksiyonlar verilmiştir. Başarısız transfer işlemini ayıklamak için gereken yaklaşımlar bu modül içerisine gömülmüştür. Bölünebilecek baraların tespitini, algoritmaların ihtiyaç duyduğu bireylerin üretilmesini ve bir baradan diğerine transferi gerçekleştirmek için uygulanan kümeleme yöntemini gerçekleştirmektedir. Nüfus yönetimi modülü şebekeyle ilgili ihtiyaç duyduğu bilgileri almak için PSS/E'den veri çekme ve düzenleme modülüyle haberleşmektedir.

Sezgi-üstü algoritmaların güncellediği pozisyonlara göre iletim sisteminde bulunan tüm ekipmanların düzenlenmesi gerekmektedir. EİH, Otr. ve Tr.lerin bara-1'den bara-2'ye veya bara-2'den bara-1'e geçebilmesi için Şekil 5.14'te verilen pozisyon değiştirme modülü geliştirilmiştir. Nüfus yönetiminden gelen kümelerin içerisindeki her ekipman ilgili kümenin geçiş özelliğine göre bara değişikliğine tabi tutulmaktadır. Bara değişim işleri yapıldıktan sonra üzerinde fider kalmayan bir baranın servis harici edilmesi veya üzerine fider alınan bir baranın servise alınması pozisyon değiştirme sınıfının görevidir.



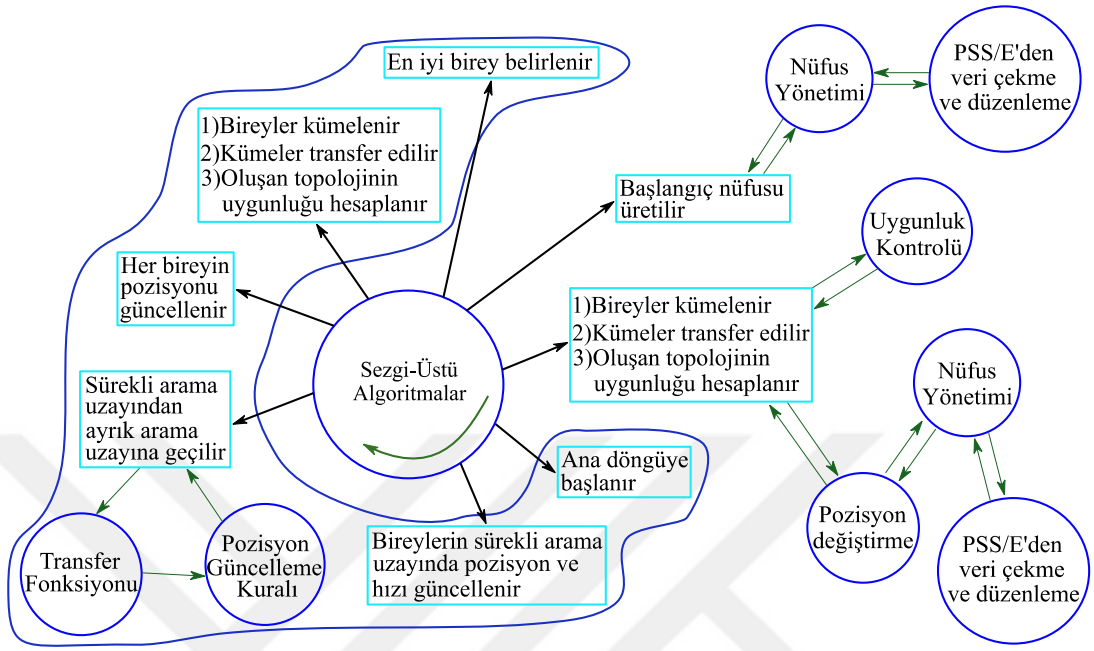
Şekil 5.14. Pozisyon değiştirme sınıfına atanmış görevler



Şekil 5.15. Uygunluk kontrolü modülünün görevleri

Algoritmalardan elde edilen pozisyonlara göre iletim sisteminde gerekli bara dağılımları yapıldıktan sonra bu bireyin uygunluk miktarı hesaplanmalıdır. Genel algoritmanın amacı en uygun bireyi, yani en uygun bara dağılımını, elde etmektir. Dolayısıyla oluşturulan topolojilerin uygunluk miktarları hesaplanmalıdır. Şekil 5.15'te uygunluk kontrolünde kullanılan fonksiyonlar sunulmuştur. Bölüm 3'te anlatılan amaç fonksiyonu ve kısıtlara göre sezgi-üstü algoritmanın ürettiği pozisyonun statik güvenlik açısından değerlendirmesi yapılmaktadır. Burada temel güç akışı değerlendirmesiyle önceki bölümde anlatılan sistemin bağımsız bölümlere

ayrılması durumu kontrol edilmektedir. Bara bölme, kısa devre ve N-1 maliyetleri kısıtlara uygunluk şartıyla toplanarak topolojinin uygunluk miktarını sunmaktadır.



Şekil 5.16. Sezgi-üstü algoritmaların BBO çözümündeki genel işleyişi

Şekil 5.16'da sezgi-üstü algoritmaların BBO problemi çözümündeki genel işleyişi ve diğer modüllerle olan etkileşimleri gösterilmektedir. Problemin çözümü için hangi algoritma seçilirse seçilsin bu işleyişi göstermek ve bu etkileşimleri yapmak zorundadır. Başlangıç nüfusu oluşturulurken bir bireyin, yani bir temsilcinin, oluşturulması için nüfus yönetimi modülüyle iletişim kurulmalıdır. Bir bireyin başlangıç pozisyonu problemin doğasına uygun olmalıdır. BBO probleminde bara düzeni optimizasyonu yapmaya çalıştığımıza göre başlangıç bireyinde bölünebilecek baralar ve bu baralara bağlı ekipmanlara göre oluşturulmuş bir ikili kod serisi üretilmelidir. Bir bireyin oluşturulma mantığı Bölüm 5.2.1.'de temsilci oluşturma başlığı altında anlatılmıştır ve nüfus yönetimi sınıfı bu işlemi gerçekleştirmektedir. Nüfus yönetimi modülü bir temsilciyi oluştururken ihtiyaç duyduğu şebeke verisini PSS/E'den veri çekme ve düzenleme modülüyle iletişime geçerek almaktadır.

Başlangıç nüfusu elde edildikten sonra popülasyonda bulunan bireylere göre gerekli transfer işlemleri yapılmalı ve oluşan bara düzenlerinin uygunluk miktarları belirlenmelidir. Bu aşamada sezgi-üstü algoritma pozisyon değiştirme modülüyle etkileşime girmektedir. Bu modül, bireyleri nüfus yönetimine göndererek gerekli

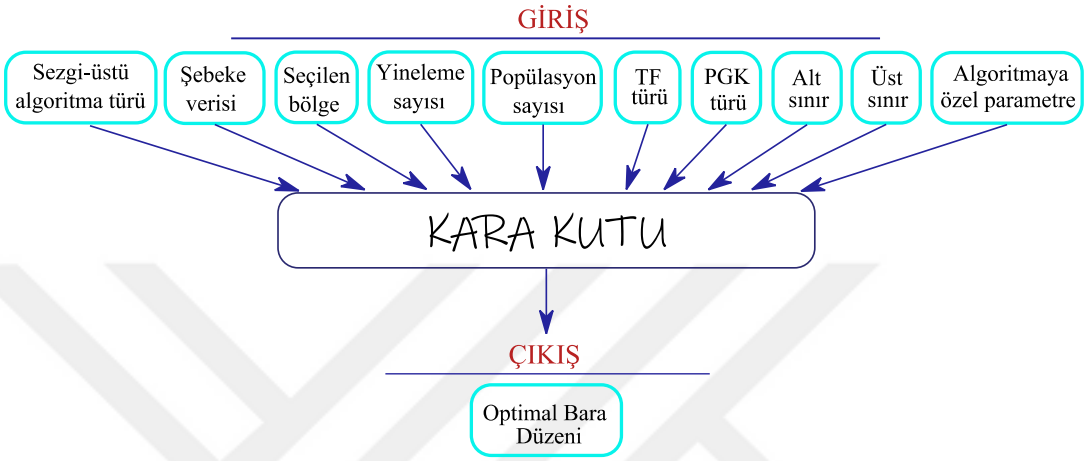
kümeleme işlemlerinin yapılmasını sağlar ve içerisinde belirlenmiş kümelere nüfus yönetimi tarafından atanmış ekipmanları ilgili kümenin özelliğine göre bir baradan diğerine transfer eder. Pozisyon değişiminden sonra oluşan topolojilerin başarısını değerlendirebilmek amacıyla tasarlanan uygunluk kontrolü modülüyle bara düzenlerinin maliyet miktarları belirlenir.

Başlangıç popülasyonu uygunluk miktarlarıyla birlikte tamamen oluşturulduktan sonra algoritmanın ana döngüsüne girilir. Ana döngüde belirtilen işlemler yineleme sayısı kadar devam etmektedir. İteratif süreç tamamlandığında elde edilen pozisyon, iletim sisteminde bulunan en iyi bara düzeni olarak değerlendirilmektedir. Genetik algoritma dışında kullandığımız diğer yaklaşımların tamamında başlangıçta sürekli arama uzayında pozisyon ve hız güncellemesi yapılmaktadır. Sürekli uzayda elde edilen hız ve konum bilgisinin Bölüm 5.1'de detaylı şekilde anlatılan transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı kullanılarak ayrık arama uzayındaki karşılığı elde edilmektedir. Ayrık uzayda elde edilen bilgiler ile bireylerin pozisyonları güncellenir. Yeni bireylerin oluşmasıyla birlikte başlangıç popülasyonunda uygulanan kümeleme-taşıma-uygunluk kontrolü süreci aynı şekilde işlemektedir. Burada fiderlerin pozisyon bilgisine uygun şekilde bara değiştirebilmesi için sezgi-üstü algoritma yine pozisyon değiştirme modülüne başvurmaktadır.

Sezgi-üstü algoritmaların esnek bir şekilde farklı optimizasyon problemlerinde kaliteli çözümler keşfedebilmesinin sebebi bir kara kutu mantığıyla işlem yapmasıdır. Bu algoritmalar problemin ne olduğuyla ilgilenmez ve problemin yapısını bilmezler. Algoritmalar için önemli olan kullanıcılar tarafından hazırlanan giriş bilgilerinin verilmesi ve çıkışta ne istendiğinin doğru ve etkili biçimde tanımlanmasıdır. Sezgi-üstü algoritmalar ile gerçek bir problemin optimal çözümünü elde edebilmek için tasarlayıcının probleme hâkim olması gerekir. Giriş bilgilerinin ne olması gerektiği ve çıkışta istenen bilginin ne olduğu sezgi-üstü algoritmaya öğretilmez ise beklenen sonuçları almak mümkün değildir.

Şekil 5.17'de kara kutu olarak gösterilen modül, kullanılan herhangi bir sezgi-üstü algoritmayı temsil etmektedir. Giriş bilgilerinin birçoğu her algoritmanın ihtiyaç duyduğu bilgiler iken bazıları algoritmaya özel olarak girilmelidir. Örneğin genetik algoritma ile BBO optimizasyonu yapılacak ise çaprazlama ve mutasyon oranlarının

mutlaka girilmesi gerekir fakat transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı bilgisine ihtiyaç yoktur. Diğer taraftan, ikili kâşif algoritması kullanılacak ise herhangi bir özel parametre girmeye gerek yok iken transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı bilgileri muhakkak girilmelidir. Pozisyon çeşitliliğini kaybetmemek için üst ve alt sınır bilgilerinin girilmesi faydalı olmaktadır.



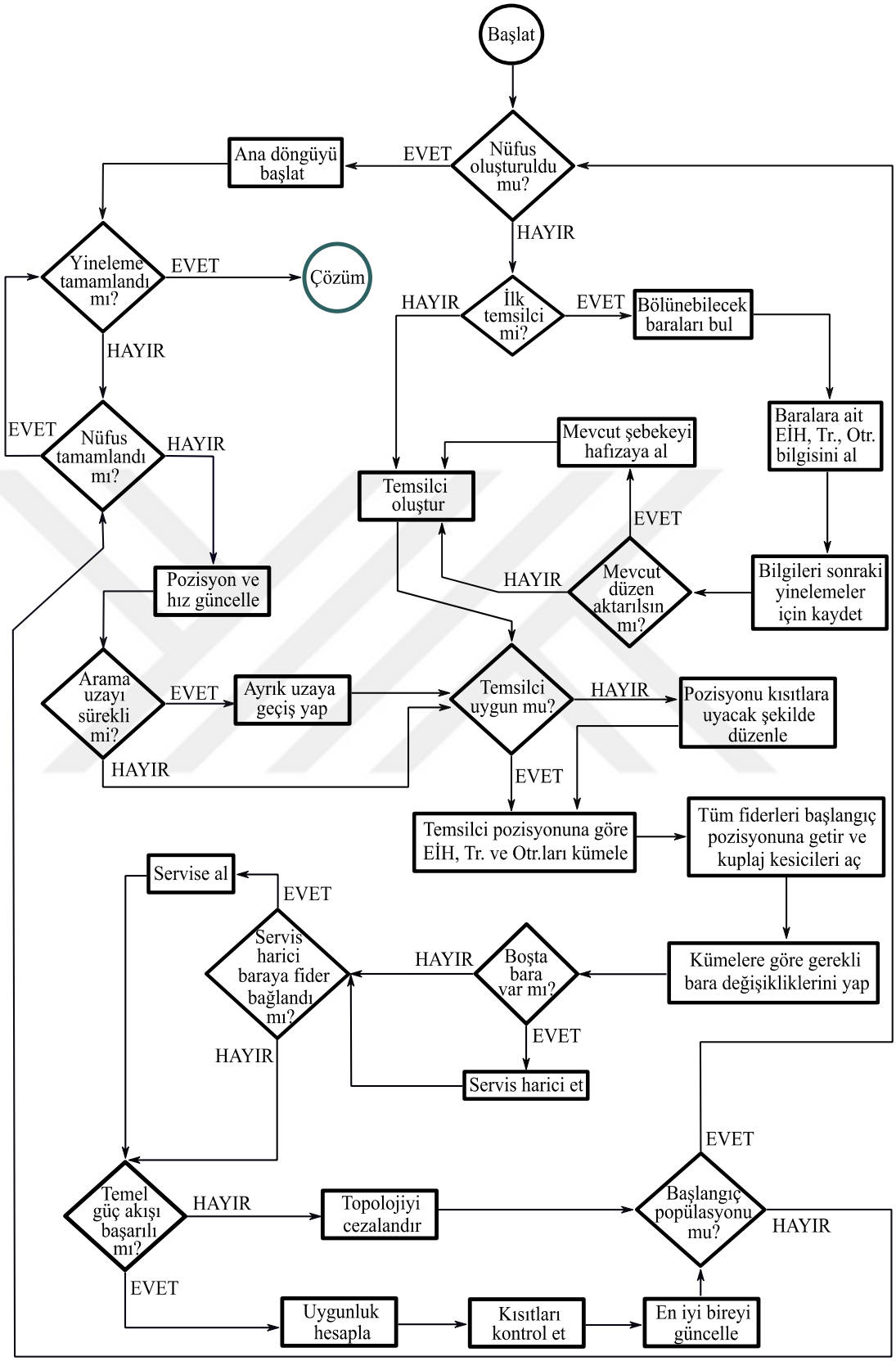
Şekil 5.17. Kara kutuya girişler ve çıkış

Sezgi-üstü algoritmalar problemin çözüm uzayında çok farklı noktalarda optimale yakın kaliteli sonuçlar elde edebilir. Bu sebeple, önerilen yeni bara düzeni mevcut işletme şeklinden çok farklı olabilir. İSO'ların en büyük yardımcısı yıllarca işlettikleri sistemden edindikleri bilgi ve tecrübelerdir. Başka bir ifadeyle, İSO'lar mevcut işletme rejimine hakimdir ve arızalar karşısında yapılması gerekeni öngörebilmektedir. Sezgi-üstü algoritma ile önerilen yeni topoloji, arz güvenliği açısından mevcut işletme düzeninden çok daha iyi olsa bile İSO'ların bu yeni sisteme adapte olması zaman alabilir. Dolayısıyla, mevcut işletme rejiminden radikal bir şekilde uzaklaşmamak amacıyla sezgi-üstü algoritmaların başlangıç popülasyonuna mevcut sistem, bir birey olarak atanabilir. Dahası, bu uygulama algoritmaların çözüm uzayında nispeten iyi bir noktadan başlamasını sağlamış olur.

Kullanılan modüllerin tanıtılmasıyla birlikte uygulanan yaklaşımın daha açık bir şekilde anlaşılması amacıyla BBO probleminin çözümü için geliştirilen algoritma Şekil 5.18'de verilmiştir. Açıklanan algoritma kullanılan sezgi-üstü algoritmaların tamamı için geçerlidir ve arzu edilirse farklı sezgi-üstü yöntemlerle de aynı şekilde uygulanabilir.

Algoritma başlatılmadan önce kara kutunun ihtiyaç duyduğu bilgiler verilmelidir. Algoritma öncelikle başlangıç popülasyonunu oluşturmaktadır. Başlangıç nüfusunun ilk temsilcisi oluşturulurken mevcut işletme düzeninin popülasyona eklenip eklenmemesi durumu sorgulanmaktadır. Ayrıca ilk temsilci oluşturulurken bölünebilecek baralar ve bu baralara bağlı ilgili ekipmanların tespit edilmesi ve hafızaya alınması gerekmektedir. İlk temsilcide yapılması gereken sorgulamalar ve işlemler tamamlandıktan sonra 0 ve 1 kodlarından oluşan ilk birey oluşturulur. Oluşturulan bireyler başarısız transfer işlemlerinin oluşmasını önlemek amacıyla birey kontrolü safhasından geçirilir. Bir baraya bağlı sadece bir iletim hattı atanması veya bank şeklinde çalışan Otr.lerin farklı baralara atanması gibi güç sisteminin yapısına uymayacak işlemler tespit edilir ve düzeltilir. Yani, oluşturulan bireye müdahale edilir.

Birey kontrolü yapıldıktan sonra PSS/E ortamında gerekli bara değişiklikleri yapılmalıdır. Ekipmanların baralar arası transfer işlemini gerçekleştirmek için önerilen kümeleme yöntemi kullanılmaktadır. Kümeleme yönteminde daha önce de bahsedildiği gibi ekipmanlar geçiş kümelerine atanır. Örneğin, her iki taraftan bara değişimine maruz kalacak bir EİH'nin önceki pozisyonu her iki TM'de de bara-2 iken sonraki pozisyonu her iki TM'de de bara-1 olacaksa gönderileceği küme (1,1,0,0) kümesi olacaktır. Dolayısıyla, kümeleme yapabilmek için t anındaki mevcut işletme düzeni bilinmelidir. Başlangıç konumlarının değişken olması durumunda 16 farklı küme seçeneği bulunurken sabit olması halinde sadece 4 küme seçeneği bulunacaktır. Bunun dışında PSS/E programında referans alınan sıralamaya göre ikili kod oluşturulmaktadır. Örneğin, iki barası bulunan bir temsilci düşünelim. Bu bireyin gösterimi [[[0,0,1,1],[1,1],[1,0]],[[0,0,0,0],[0,0],[0,0]]] şeklinde olur. Burada 1. baranın 1. ve 2. EİH'si 0 kodunu alarak bara-1'e bağlanırken 3. ve 4. EİH'si 1 kodunu alarak bara-2'ye bağlanır. Burada bahsedilen 1. EİH'nin her yinelemede PSS/E'deki karşılığı aynı olmalıdır. Burada oluşabilecek hataların önüne geçebilmek ve küme sayısını azaltabilmek adına kümeleme yapmadan önce tüm teçhizatlar bara-1'e alınmaktadır. Bu nedenle, hepsinin başlangıç pozisyonu bara-1 olacaktır. Şunu belirtmek gerekir, tüm fiderler bara-1'e alınmadan da sıralama kaybı olmadan işlem yapılabilir ve böyle bir yaklaşım Bölüm 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.18. BBO problemi için oluşturulan algoritma

Geçiş yapılacak ekipmanların kümelere atanmasından sonra gerekli bara değişikleri uygulanır. Temsilcide bulunan ikili kodlara uygun olacak şekilde yapılan bara değişiklikleri neticesinde bazı baralarda hiç fider kalmayabilir veya servis harici olan bir baranın üzerine fider atanmış olabilir. Burada oluşacak hataların önüne geçmek amacıyla belirtilen durumların kontrolü yapılarak, ilgili baralar tespit edilir ve gerekli değişiklikler uygulanır. Baralar servise alınırken baranın orijinal karakteristiği P-V ise bu durum muhakkak belirtilmelidir. Aksi halde güç sistemi reaktif güç ve gerilim bozulması açısından olması gerektiği gibi kontrol edilmemiş olur.

Güç akışına hazır hale getirilen topolojinin temel güç akışı performansı sorgulanır. Burada topolojinin hata vermesinin ana sebebi bara bölme işleminden sonra sistemde izole bölgelerin oluşmasıdır. Böyle bir durumun oluşması halinde ilgili topoloji büyük bir sayı ile çarpılarak cezalandırılır ve sonraki popülasyondaki etkinliği azaltılır. Bunun dışında N-1 analizi kapsamında servis harici edilen önemli bir ekipmanın tekrar servise alınması esnasında temel güç akışı çözülemeyebilir. Böyle bir durumda güç akışı için farklı yöntemlerin denenmesinde fayda bulunmaktadır. Örneğin, gerilimlerin genlik ve faz açılarını birim değere getirerek güç akışını tekrarlamak problemi büyük oranda çözdüğü gözlemlenmektedir.

Temel güç akışı uygun olan bireyin uygunluk hesabı yapılır. Bir topolojinin uygun olması demek N-1 analizi ve kısa devre analizinde başarılı sonuçlar vermesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, uygunluk değerlendirmesi yapılırken yeni topolojinin statik analizleri yapılmakta ve değerlendirmeye uygun bir formata dönüştürülmektedir. Uygunluk kontrolü yapılan bir topoloji kısıtlar açısından uygun değilse yine büyük bir sayı ile çarpılarak cezalandırılır. Örneğin, oluşan topoloji N-1 analizi neticesinde hem gerilim bozulmaları açısından hem de aşırı yüklenmeler açısından çok başarılı sonuçlar verse bile kısa devre akımları belirlenen sınır değerin üzerinde hesaplanıyorsa bu bireyin uygun olması söz konusu değildir.

Başlangıç popülasyonu için bahsedilen süreçlerin hepsi yapıldıktan sonra artık sezgi-üstü algoritma operatörlerinin kullanılacağı ana döngü içerisine girilmektedir. Ana döngüde belirtilen işlemler kullanıcı tarafından belirtilen yineleme sayısı tamamlanana kadar devam etmektedir. Her yinelemede yapılacak işlemler, yine sayısı kullanıcı tarafından belirtilen popülasyondaki her bireye uygulanmaktadır.

Sezgi-üstü algoritmanın yapısına göre farklı operatörler kullanılarak bireylerin pozisyon ve hız bilgileri güncellenir. Eğer güncellenen bilgiler sürekli arama uzayında ise bunların ayrık arama uzayındaki karşılıkları belirlenmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi farklı metotlar bulunsa da çalışmamız kapsamında çeşitli transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralları bu geçiş işlemini uygulayabilmek için kullanılmıştır.

Güncellenen bireyler başlangıç popülasyonu oluşturulurken uygulanan değerlendirme sürecinin aynısından geçmektedir. Algoritmanın önerdiği yeni pozisyon temel güç akışı açısından değerlendirilir ve problem olmaması halinde uygunluk miktarı elde edilir. Uygunluk değeri elde edilen bireylerden biri o ana kadar elde edilen en uygun çözümden daha iyi sonuçlar vermişse popülasyonun en uygun pozisyonu ve uygunluk miktarı güncellenmektedir. Yineleme sayısı bittiğinde elde edilmiş olan en uygun topoloji çözüm olarak sunulmaktadır. Akış şeması verilen ve detaylı şekilde açıklanan algoritma doğrultusunda yapılan analizlerin sonuçları 6. Bölümde sunulmaktadır.

5.4. Fider Transferi için Alternatif Bir Yaklaşım: Etiketleme Yöntemi

Önceki bölümde PSS'ten veri çekme, elde edilen verileri sezgi-üstü optimizasyon algoritmalarının doğasına uygun şekilde işleme ve transformatör merkezlerinde bulunan fiderlerin algoritmalardan gelen ikili kodlara göre ilgili baralara transferini gerçekleştirme işlemleri detaylı şekilde açıklanmıştır. Bu bölüm içeriğinde geçiş işlemlerini sadeleştirmek amacıyla kümeleme yöntemine alternatif olacak etiketleme yöntemi önerilmiştir.

İletim sistemi operatörü işletme tecrübesi edindiği çalışma düzeninden tamamen farklı bir bara dağılımıyla sistem işletmeye başlamak istemeyebilir ya da optimize edilecek bölgenin çözüm uzayı, sezgi-üstü algoritmaların kabul edilebilir bir süre içerisinde kaliteli çözüm sağlayamayacağı kadar büyük olabilir. Böyle bir durumda optimize edilecek bölgede bulunan ototransformatör ve transformatörler önceden belirlenmiş baralara dağıtılarak optimizasyon sürecinden çıkarılmak istenebilir. Bu esnekliği sağlayacak temsilci, etiketleme yöntemi kapsamında sunulmuştur.

Kümeleme yöntemi kapsamında gerçekleştirilen transfer işlemlerinde algoritmalardan gelen pozisyon bilgilerine göre geçiş işlemlerini yapabilmek için tüm fiderler

başlangıç pozisyonuna çekilmektedir. Başka bir ifadeyle, pozisyon değiştirilmeden önce baralarda bulunan fiderlerin tamamı bara-1'e alınmaktadır. PSS/E sav dosyasında belirlenmiş bara numaralarının son hanesi, ilgili ekipmanın hangi baraya bağlı olduğunu göstermektedir. Örneğin, ilgili ekipmanın gönderen tarafta bara-1'e bağlı olması durumunda gönderen taraf bara numarasının son hanesi 1 olurken bara-2'ye bağlanması durumunda 2 olmaktadır. Bu durum PSS/E sav dosyasındaki fiderlerin sıralamasında değişikliğe neden olmaktadır. Ancak ikili kodlara karşılık gelen ekipmanların değişmesi, ilgili ekipmanın maliyet fonksiyonu üzerindeki etkisini görebilmeyi engellemektedir. Ayrıca, kaliteli çözümler elde edilse bile hangi ikili kodun hangi ekipmana karşılık geldiğini bilmeden, elde edilen sonucu yorumlamak ve uygulamak mümkün değildir. Bu durumun önüne geçebilmek için geçiş esnasında tüm fiderler bara-1'e alınarak ikili koda karşılık gelen fider sıralamasının aynı kalması sağlanmıştır. Oluşturulan temsilcide bulunan ikili kodlara karşılık gelen ekipmanların aynı sırada bulunmasını sağlayabilmek için ekipman isminin başına ilgili fiderin sıra numarasını verecek bir etiket eklenmiştir. Yani, bir transformatör merkezinde bulunan iletim hatları, ototransformatör ve transformatörlerin tamamına sıra etiketi atanmıştır. Bu yaklaşımla birlikte ekipmanların sav dosyasındaki sıra numaraları değişse bile ikili koda karşılık gelen ekipmanın sıra etiket değeri değişmemektedir.

5.4.1. Hedef baralara bağlı fider listesinin oluşturulması ve etiket numaralarına göre sıralanması

Sezgi-üstü algoritmaların yineleme süreçlerine başlayabilmesi için kullanılacak bireyin yapısı ve hangi karar değişkeninin hangi ekipmana karşılık geldiği dikkatle belirlenmelidir. Etiketleme yönteminde, BBO yapılacak hedef TM'lerde bulunan fiderleri aynı sıralamada tutacak kimlik numaraları atanmaktadır. Örneğin, A TM'sinde bulunan fiderlerin tamamına etiket değerleri atandığını varsayalım ve bu fiderleri etiket numaralarına göre sıralayalım. Bu durumda A TM'nin B TM ile olan bağlantısına atanan etiket değerin sırası 3 ise sezgi-üstü algoritmaların kullanacağı bireyde de ilgili fiderin sırası 3 olacaktır ve bu sıra hiçbir döngüde değişmeyecektir. Bu yaklaşımı sergileyebilmek için hedef baralar belirlenmeli, bu baralara bağlı fider listeleri oluşturulmalı ve hedef TM'lerde bulunan fiderlerin etiket değerleri çekilerek sıralanmalıdır.

```
def fiderler(hedef_tm, tr_dahil = True, otr_dahil = True):
    fr_no_secilen, to_no_secilen, id_secilen = [], [], []
    for fr_to in hedef_tm:
        psspy.bsysinit(2), psspy.bsysinit(3)
        fr_no_scln, to_no_scln, id_scln = [], [], []
        psspy.bsyso(2,int(str(fr_to)[:6])), psspy.bsyso(3,int(str(fr_to)[6:]))
        fr_no_secilen_bara1, to_no_secilen_bara1, id_secilen_bara1 =
        psspy.abrnint(2, 1, 3, 4, 1, 'FROMNUMBER')[1][0], psspy.abrnint(2, 1, 3, 4, 1, 'TONUMBER')[1][0],
        psspy.abrnchar(2, 1, 3, 4, 1, 'ID')[1][0]
        fr_no_secilen_bara2, to_no_secilen_bara2, id_secilen_bara2=
        psspy.abrnint(3, 1, 3, 4, 1, 'FROMNUMBER')[1][0], psspy.abrnint(3, 1, 3, 4, 1, 'TONUMBER')[1][0],
        psspy.abrnchar(3, 1, 3, 4, 1, 'ID')[1][0]
        fr_no_scln_bus1 = [fr_no_secilen_bara1[i] for i in range(len(fr_no_secilen_bara1))
        if int(str(fr_no_secilen_bara1[i])[:5]) != int(str(to_no_secilen_bara1[i])[:5])]
        to_no_scln_bus1 = [to_no_secilen_bara1[i] for i in range(len(to_no_secilen_bara1))
        if int(str(fr_no_secilen_bara1[i])[:5]) != int(str(to_no_secilen_bara1[i])[:5])]
        id_scln_bus1 = [id_secilen_bara1[i] for i in range(len(id_secilen_bara1))
        if int(str(fr_no_secilen_bara1 [i])[:5]) != int(str(to_no_secilen_bara1[i])[:5])]
        fr_no_scln_bus2= [fr_no_secilen_bara2[i] for i in range(len(fr_no_secilen_bara2))
        if int(str(fr_no_secilen_bara2[i])[:5]) != int(str(to_no_secilen_bara2[i])[:5])]
        to_no_scln_bus2 = [to_no_secilen_bara2[i] for i in range(len(to_no_secilen_bara2))
        if int(str(fr_no_secilen_bara2[i])[:5]) != int(str(to_no_secilen_bara2[i])[:5])]
        id_slctd_bus2 = [id_secilen_bara2[i] for i in range(len(id_secilen_bara2))
        if int(str(fr_no_secilen_bara2[i])[:5]) != int(str(to_no_secilen_bara2[i])[:5])]
        [fr_no_scln.append(fr_nmb) for fr_nmb in fr_no_scln_bus1],
        [fr_no_scln.append(fr_nmb2) for fr_nmb2 in fr_nmb_slctd_bus2]
        [to_no_scln.append(t_nmb) for t_nmb in to_no_scln_bus1],
        [to_no_scln.append(t_nmb2) for t_nmb2 in to_no_scln_bus2]
        [id_scln.append(id_nmb) for id_nmb in id_slctd_bus1],
        [id_scln.append(id_nmb2) for id_nmb2 in id_slctd_bus2]
        fr_no_secilen.append(fr_no_scln)
        to_no_secilen.append(to_no_scln)
        id_secilen.append(id_scln)
    fr_to_no_secilen_baralar = [[int(str(fr_no_secilen [i][j])+str(to_no_secilen[i][j])+ id_secilen[i][j])
    for j in range(len(fr_no_secilen [i]))] for i in range(len(fr_no_secilen))]
    if tr_include == False:
        tr_idx = [[j for j in range(len(fr_to_no_secilen_baralar[i]))
        if int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[4]) > 2 or int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[10]) > 2]
        for i in range(len(fr_to_no_secilen_baralar))]
        [[fr_to_no_secilen_baralar[i].remove(fr_to_no_secilen_baralar[i][tr_idx[i][-j-1]])
        for j in range(len(tr_idx[i]))] for i in range(len(tr_idx))]
    if otr_include == False:
        otr_idx = [[j for j in range(len(fr_to_no_secilen_baralar[i]))
        if int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[4]) == 1 and int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[10]) == 2]
        for i in range(len(fr_to_no_secilen_baralar))]
        [[fr_to_no_secilen_baralar[i].remove(fr_to_no_secilen_baralar[i][otr_idx[i][-j-1]])
        for j in range(len(otr_idx[i]))] for i in range(len(otr_idx))]
    isim_sozlugu = [[{psspy.brnnam(int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[:6]),
    int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[6:12]), str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[12])[1].strip()[:4]:
    psspy.brnnam(int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[:6]), int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[6:12]),
    str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[12])[1].strip()[4:]} for j in range(len(fr_to_no_secilen_baralar[i]))]
    for i in range(len(fr_to_no_secilen_baralar))]
    return fr_to_no_secilen_baralar, isim_sozlugu
```

Şekil 5.19. Hedef TM'lerde bara konumu optimize edilecek ekipmanların belirlenmesi ve isim sözlüğünün oluşturulması

Şekil 5.19'da verilen Python koduyla iletim sisteminde optimize edilecek hedef baralara bağlı fiderlerin nasıl elde edildiği gösterilmektedir. Fonksiyon girdisini hedef baralar ile Tr. ve Otr.lerin optimizasyon sürecine dahil edilip edilmeyeceğini kullanıcının belirleyeceği ikili değişkenler oluşturmaktadır. Fonksiyon çıktısında gönderen bara, alıcı bara ve ilgili ekipmanın kimlik numarasını içeren bir liste ile ekipmanların sıra numaraları ve numaraların ait olduğu ekipmanların isimlerini içeren isim sözlüğü verilmektedir. Sıra numaralarını içeren isim sözlüğü, bireyin etiket yapısını oluşturan fonksiyona girdi olacaktır.

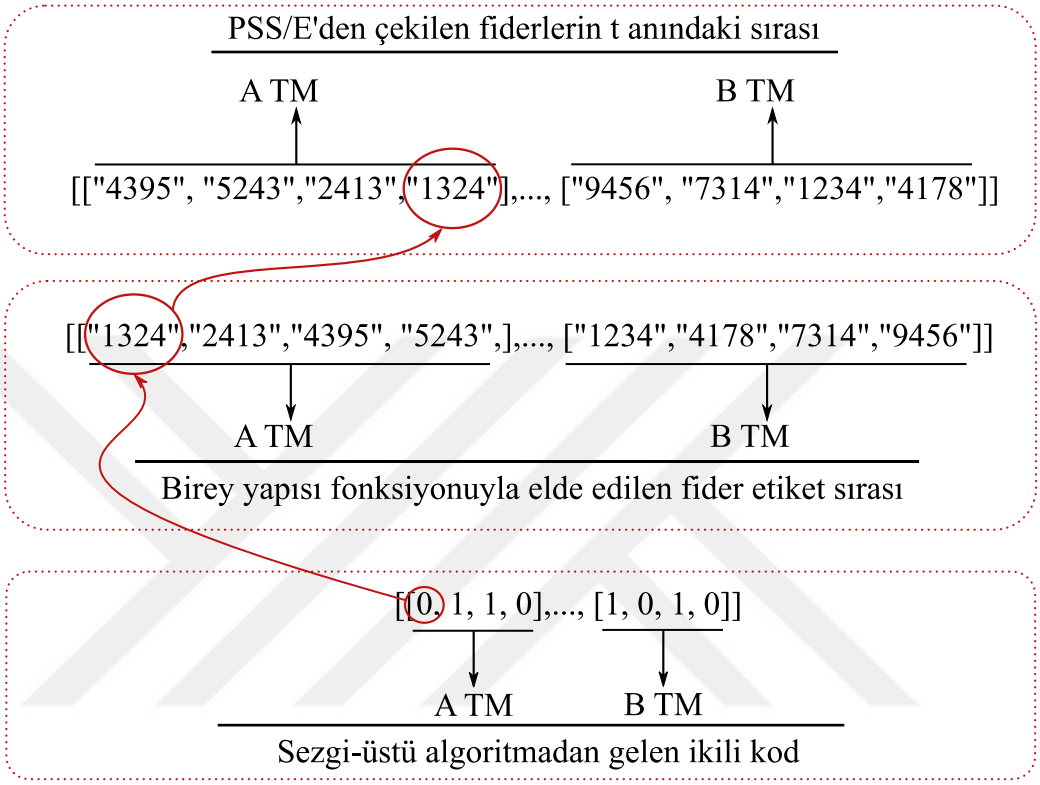
Temsilci oluşturulurken ekipmanların sıra takibini yapabilmek için oluşturulmuş fonksiyon Şekil 5.20'de verilmiştir. Her ekipman isminin başında bu ekipmanın sırasını bulabileceğimiz numaralar bulunmaktadır. Fiderler isimli fonksiyonla oluşturulan isim sözlüğünde ekipmanlar karışık düzende sıralanmaktadır ve fiderlerin bara numaraları değiştikçe sıradaki konumları da değişmektedir. Ancak birey_yapisi fonksiyonu içeriğinde bir temsilciye ait baraların tamamında, fiderler etiket numarasına göre küçükten büyüğe doğru sıralanmaktadır. Fonksiyon çıktısında etiket numaralarına göre sıralanmış bir temsilci yapısı elde edilmektedir.

```
def birey_yapisi(isim_sozlugu):
    """
    birey_yapisi fonksiyonuna isim_sozlugu girdisi gerekir. PSS/E sav dosyasında isimlerin başına
    atanan etiket değerlerinin çekilerek bu fonksiyona girdi olarak sağlanması gerekir. Isim
    sozlugunun yapısına örnek; [[{"1243":154 kV A – C EİH}, ...,{"1234":154 kV A – B EİH}],...,
    [{"2143":154 kV B – D EİH},...,{"2134":154 kV B – A EİH}]]
    """
    isim_sozlugu_anahtari=[[int(isim_sozlugu [i][j].keys()[0]) for j in
    range(len(isim_sozlugu[i]))] for i in range(len(isim_sozlugu))]
    siralanmis_isim_sozlugu_anahtari = [sorted(anahtar) for anahtar in isim_sozlugu_anahtari]
    """
    birey_etiket_no listesi ikili kodlara karşılık gelen ekipmanların transfer işlemi esnasında
    kullanılacak ekipman etiket numaralarını sıralanmış şekilde içermektedir.
    [[{"1234", "1243"}, ..., {"2134", "2143"}]
    """
    birey_etiket_no = [[str(siralanmis_isim_sozlugu_anahtari[i][j])
    for j in range(len(siralanmis_isim_sozlugu_anahtari[i]))]
    for i in range(len(siralanmis_isim_sozlugu_anahtari))]
    return birey_etiket_no
```

Şekil 5.20. Temsilci yapısı Python kodu

Etiket numarası kullanılarak yapılan sıra takibiyle sezgi-üstü algoritmalardan gelen ikili kod bilgisine karşılık gelen fiderler elde edilmektedir. Şekil 5.21'de birey yapısı

fonksiyonuyla elde edilen çıktının kullanım amacı özetlenmektedir. Algoritmalardan gelen temsilcilerin içeriğinde hedef transformatör merkezleri için fider konumlarını belirten ikili kodlar bulunmaktadır. Şekilde verilen temsilcide bulunan A TM'de 1. fiderin konumu 0'dır ve bu durum ilgili fiderin bara-1'e bağlanacağı anlamına



Şekil 5.21. Etiket numarasıyla sıra takibi

gelmektedir. Temsilcinin 1. iç liste (A TM), 1. sıradaki ikili kodu birey yapısıyla elde edilen sıralanmış fider etiket listesinin 1. iç liste 1. etiketine karşılık gelmektedir. PSS/E sav dosyasından çekilen fider listesinde ise "1324" etiket numaralı fiderin konumu 4. sıradadır ve bu nedenle A TM'ye bağlı olan 4. fider sezgi-üstü algoritmadan gelen temsilciye göre bara-1'e transfer edilecektir. Sonuç olarak, fiderlerin bara değişimi esnasında tüm fiderlerin bara-1'e alınması durumu bu yaklaşımla birlikte ortadan kaldırılmıştır.

5.4.2. Etiketleme tabanlı fider transferi

Sezgi-üstü algoritmadan gelen pozisyon bilgisine göre her TM'deki ilgili fiderlerin bara değişimleri yapılmalıdır. Eğer mevcut işletme koşulları başlangıç nüfusuna dahil edilecekse sistemin bara düzeni ikili kod formatında çekilmelidir. Transfer işlemi

yapılmadan önce algoritmadan gelen ikili kodların güç sisteminin doğasına uyup uymadığı kontrol edilmeli ve kuplaj kesicilerin servise alınıp alınmayacağına karar verilmelidir.

Sezgi-üstü algoritmaları arama uzayında herhangi bir noktadan başlatmak yerine arama sürecini nispeten iyi bir noktadan başlatmak, daha kaliteli sonuçlar elde etmek açısından faydalı olmaktadır. Bu nedenle optimize edilecek bölgenin mevcut bara dağılımı algoritmanın başlangıç nüfusuna dahil edilebilir. Bu durum daha önce de bahsedildiği gibi İSO'ların alışkın olduğu işletme düzeninden tamamen farklı bir topolojinin oluşmasını da nispeten önlemektedir. Bu amaç doğrultusunda, sistemin mevcut pozisyonunu ekipman etiket numaralarına göre çeken fonksiyonun Python kodu Şekil 5.22'de verilmiştir.

```
def baslangic_pozisyonu(hedef_tm, fr_to_no_secilen_baralar, isim_sozlugu):
    mevcut_sira = [[psspy.brnnam(int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[:6]),
    int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[6:12]),
    str(fr_to_no_secilen_baralar[i][j])[12])[1].strip()[:4] for j in
    range(len(fr_to_no_secilen_baralar[i]))] for i in range(len(fr_to_no_secilen_baralar))]
    bas_poz = []
    for i in range(len(isim_sozlugu)):
        temp_poz = []
        for j in range(len(isim_sozlugu[i])):
            idx = mevcut_sira[i].index(isim_sozlugu[i][j])
            """
            Hedef TM'de pozisyonu alınacak ekipmanın barası gönderen tarafta veya alıcı tarafta
            olabilir. Bu nedenle pozisyonun alınacağı yön belirlenmelidir.
            """
            if (int(str(hedef_tm[i])[:6]) == int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][idx])[:6]))
            or (int(str(hedef_tm[i])[6:12]) == int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][idx])[:6])):
                bara_konumu = int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][idx])[5])
            else:
                bara_konumu = int(str(fr_to_no_secilen_baralar[i][idx])[11])
            temp_pos.append(connected_bus)
        bas_poz.append(temp_pos)
    return bas_poz
```

Şekil 5.22. BBO yapılacak bölgede fiderlerin mevcut pozisyonunu algılama

Algoritmaların yinelemeler boyunca oluşturduğu çeşitli topolojilerde tüm fiderler bir baraya toplanabilir. Bu senaryonun oluşması halinde üzerinde fider kalmayan baraların tespit edilmesi ve servis harici edilmesi gerektiğinden Bölüm 5.2.3'te bahsedilmiştir. Bu noktada alternatif bir yaklaşım daha bulunmaktadır. Eğer bir bara üzerinde ekipman kalmadıysa ilgili TM'de kuplaj kesici kapatılarak fidersiz bara oluşmasının önüne geçilmektedir. Bir TM'de kuplaj kesicinin pozisyonunu belirleyen

yazılım Şekil 5.23'te verilmiştir. Taşıma işlemleri gerçekleştirilmeden önce güç sistemindeki kuplaj kesici konumları, kuplaj kontrol fonksiyonunun sonuçlarına göre değiştirilmelidir. Şekilde verilen yazılım, optimizasyon sürecine sadece hatların dahil edildiği durumda kullanılabilir. Eğer Tr. ve Otr.ler sürece dahil edilirse kuplaj kesicinin pozisyon kontrolü yapılırken temsilci içeriğinde iletim hatlarına karşılık gelen ikili kodlar ayrıştırılmalıdır.

```
def kuplaj_kontrol(pozisyon):
    kuplaj_durumu = []
    for poz in pozisyon:
        pozisyon_1 = np.where(1 == np.array(poz))
        pozisyon_2 = np.where(2 == np.array(poz))
        if pozisyon_1[0].shape[0] == 0 or pozisyon_2[0].shape[0] == 0:
            kuplaj_durumu.append(1)
        else:
            kuplaj_durumu.append(0)
    return kuplaj_durumu
```

Şekil 5.23. Kuplaj kesici pozisyonunun belirlenmesi

İletim sisteminde N-1 kuralı, sistemden bir ekipmanın eksilmesi halinde tüketicinin etkilenmemesini sağlamaktadır. Bara dağılımı yapılırken bir baranın radyal bırakılması, başka bir ifadeyle sadece bir enerji iletim hattıyla güç sistemine bağlanması, N-1 kuralını ihlal etmek anlamına gelmektedir. Sezgi-üstü algoritmalar yeni bir topoloji oluştururken bu kısıtın ayrımını yapamayacağı için algoritmadan gelen bara dağılımı bilgisi kontrol edilmeli ve uygun olmayan senaryolar düzeltilmelidir. Şekil 5.24'te verilen pozisyon kontrolü fonksiyonu, bir baraya kaç adet iletim hattının bağlandığını tespit etmekte ve baraya bağlı sadece bir adet hat bulunuyorsa, diğer baradan rastgele seçeceği bir iletim hattını radyal kalmış baraya geçirerek topolojik hatayı düzeltmektedir. Kuplaj kesicinin pozisyonunu belirleyen fonksiyonda olduğu gibi pozisyon kontrolü için sunulmuş yazılım da optimizasyon sürecine sadece iletim hatlarının dahil edildiği durum için geçerlidir. Optimize edilecek ekipman listesine Tr. ve Otr.ler dahil edilecekse, öncelikle ekipman sıra numaralarını içeren etiket bilgileri kullanılarak, temsilci içeriğindeki iletim hatlarının pozisyonları çekilmeli, daha sonra pozisyon kontrolü yapılmalıdır. Şunu belirtmek gerekir, lineer olmayan kısıt analizi için PSS/E versiyon 34'te oluşturulan dağılım faktörleri tekli kesintiler için oluşturulabilmektedir. Bu nedenle bank şeklinde çalışan Otr.lerin ardışık açmalarını PSS/E dfax dosyasına yansıtmak YTBS'den indirilen sav

dosyasında mümkün değildir. Bu problemi çözmek için bank şeklinde çalışan iki Otr.ü bir Otr.e dönüştüren yazılım oluşturulmalıdır. Neticede bu işlemle birlikte pozisyon kontrolünde Bank şeklinde çalışan Otr.lerin her ikisinin de aynı barada olup olmadığını kontrol etmeye ihtiyaç kalmamıştır.

```
def pozisyon_kontrol(pozisyon)
   for poz in pozisyon:
      pozisyon1 = np.where(1 == np.array(poz))
      pozisyon2 = np.where(2 == np.array(poz))
      """
     Eğer barada sadece 1 hat bulunuyorsa,
     diğer baradan rastgele seçilen bir hat bu baraya eklenir.
     """
      while pozisyon1[0].shape[0] == 1:
         poz[pozisyon2[0][randint(0,(pozisyon2[0].shape[0]-1))]] = 1
         pozisyon1 = np.where(1 == np.array(poz))
         pozisyon2 = np.where(2 == np.array(poz))
      while pozisyon2[0].shape[0] == 1:
         poz[pozisyon1[0][randint(0,(pozisyon1[0].shape[0]-1))]] = 2
         pozisyon1 = np.where(1 == np.array(poz))
         pozisyon2 = np.where(2 == np.array(poz))
   return pozisyon
```

Şekil 5.24. İletim hattı pozisyon kontrolü

```
def transfer(sav_ismi, ytim, bolge, dosya_yolu, hedef_TM, pozisyon, tr_dahil = True, atr_dahil = True):
fr_to_no_secilen_baralar, isim_sozlugu = fiderler(hedef_TM, tr_dahil = tr_dahil, otr_dahil = otr_dahil)
birey = birey_yapisi(isim_sozlugu)
for j in range(len(fr_to_no_secilen_baralar)):
fr_to_no_secilen_baralar, isim_sozlugu= fiderler(hedef_TM, tr_dahil = tr_dahil, otr_dahil = otr_dahil)
sira_no=[[int(isim_sozlugu [i][j].keys()[0]) for j in range(len(isim_sozlugu[i]))]
for i in range(len(isim_sozlugu))]
for i in range(len(pozisyon[j])):
fider_id = sira_no[j].index(birey[j][i])
if (int(str(hedef_TM[j])[:6]) == int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[:6]))
or (int(str(hedef_TM[j])[6:12]) == int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[:6])):
if pozisyon[j][i] != int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[5]):
yeni_fr_no= int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[:5]+str(pozisyon[j][i]))
to_no, from_no, id_no = int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[6:12]),
int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[:6]), str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[12]
transfer_kontrol = psspy.movebrn(to_no, from_no, id_no, yeni_fr_no, id_no)
else:
if pozisyon[j][i] != int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[11]):
yeni_to_no = int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[6:11]+str(pozisyon[j][i]))
to_no, from_no, id_no = int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[6:12]),
int(str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[:6]), str(fr_to_no_secilen_baralar[j][fider_id])[12]
transfer_kontrol = psspy.movebrn(from_no, to_no, id_no, yeni_to_no, id_no)
psspy.save(dosya_yolu+"\\"+sav_ismi+".sav")
return transfer_kontrol
```

Şekil 5.25. Fiderleri ilgili pozisyonlara taşıyan Python kodu

Şekil 5.25'te algoritmadan gelen pozisyon bilgilerine uygun olarak hedef TM'lerde bulunan fider pozisyonlarını değiştiren yazılım sunulmuştur. Daha önce paylaşılan fiderler ve birey yapısı fonksiyonları kullanılarak, hedef TM'lerde bulunan ekipmanların listesi ve bu ekipmanların sıra takibini yapabilmek için kullanılan etiket değerleri elde edilmektedir. Burada birey yapısı fonksiyonundan elde edilen bireyin içindeki etiket numaralarının sırası, algoritmaların kullandığı ikili kodların sırasıyla aynıdır. Transfer yazılımı içeriğinde verilen "fider_id = sira_no[j].index(birey[j][i])" ifadesiyle sezgi-üstü algoritmalardan gelen ikili kodların karşılık geldiği fiderler elde edilmektedir. Uygulanan bu yaklaşımın görselleştirilmiş hali Şekil 5.21'de verilmiştir. Bir fideri transfer etmeden önce hangi tarafta pozisyon değişeceği bilinmelidir. Yazılımda verilen if/else koşulları ekipman transferinin gerçekleşeceği yönü bulmak için kullanılmıştır. Şunu belirtmekte fayda var, eğer transfer edilecek barada ekipmanın aynısından varsa (paralel hat veya Otr.), transfer işlemini başarısız kılacak kimlik çakışmasını önlemek için ek bir yazılım kullanılabilir.

5.5. Bölüm Değerlendirmesi

Çalışmamız kapsamında kullanılan sezgi-üstü algoritmalar 4. Bölümde ayrıntılarıyla açıklanmıştır. Çalışmamızın amacı olan bara bölme optimizasyonu ise 2. ve 3. Bölümlerde hem mantıksal açıdan hem de matematiksel yaklaşımlarla detaylı bir şekilde aktarılmıştır. Bu bölüm içerisinde sezgi-üstü algoritmaları kullanarak bir BBO probleminin nasıl çözüleceğiyle ilgili detaylı bilgiler sunulmuştur.

Kullandığımız algoritmalardan, Genetik Algoritma hariç tüm yaklaşımlar sürekli arama uzayında gözlem yapmaktadır. Kombinasyonel ikili bir problem olan BBO problemi ise ayrık arama uzayına sahiptir. Dolayısıyla çeşitli transfer fonksiyonları ve pozisyon güncelleme kuralları tanıtılarak sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına nasıl geçildiği aktarılmıştır. Tez çalışmamız kapsamında VTF4(x) ve VTF6(x) transfer fonksiyonları ilk defa önerilmiştir.

Kullanılan sezgi-üstü algoritmaların hiçbirisi kısa devre akımlarını sınırlandırmak ve hem aşırı yüklenmeler hem de gerilim bozulmaları açısından N-1 güvenliğini sağlamak için daha önce kullanılmamıştır. Bu nedenle, sürekli arama uzayında keşif yapan algoritmaların her birine, 5 farklı transfer fonksiyonu ve 2 farklı pozisyon güncelleme kuralı olmak üzere 10 farklı senaryo farklı test sistemleri üzerinde 10'larca

kere uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu yönüyle, BBO probleminde hangi algoritma hangi transfer fonksiyonuyla ve pozisyon güncelleme kuralıyla daha iyi sonuç vermektedir sorusunun cevabı sunulmuştur.

Her ne kadar daha önce BBO probleminde kullanılmamış olsalar da Kâşif Algoritması hariç diğer tüm algoritmaların ikili formatı önceki çalışmalarda mevcuttur. Çalışmamız kapsamında henüz ikili versiyonu bulunmayan kâşif algoritmasının da çeşitli transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralları ile birlikte farklı test sistemleri üzerinde kullanılarak performansı test edilmiştir. Sonuç olarak kâşif algoritmasının ikili formatı ilk defa tez çalışmamız kapsamında BBO problemini çözmek için önerilmiş olup, sezgi-üstü algoritma olması sebebiyle farklı gerçek dünya problemleri için de uygulanmasının mümkün olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla, benchmark fonksiyonları, IEEE 14, 57 ve 118-baralı test sistemleri ve gerçek iletim sistemi üzerinde yapılan analizler, Kâşif Algoritmasının hangi fonksiyonlar ve güncelleme kurallarıyla başarılı sonuçlar verdiğini göstermesi açısından farklı alanlarda kullanımı için detaylı bir veri seti sağlamıştır.

Sezgi-üstü algoritmalar problemlerin iç yapısıyla ilgilenmezler. Bu algoritmalara girdiler ve kurallar tanımlayarak kaliteli çıktılar vermesi beklenir. Dolayısıyla sezgi-üstü algoritmayı kullanmak isteyen bir tasarımcı çözmek istediği problemin içeriğine hâkim olmalıdır. Örneğin, güç sisteminde iletim hattının bulunmadığı bir baraya tüketim bölgesinin bağlı olduğu bir transformatörün tek başına bağlanması söz konusu değildir. Ancak sezgi-üstü algoritmalar problemin bu yapısını bilmeyeceği için stokastik arama süreci içerisinde bu tür senaryoların oluşmasına müsaade edecektir. Bu nedenle sezgi-üstü algoritmalara güç sisteminde istenmeyen durumların oluşmasını engelleyecek modüller adapte edilmiş ve bu bölüm altında ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

Trafo merkezlerinde bulunan fiderlerin algoritmalardan gelen bilgilere göre baralar arası transferini yapabilmek için kümeleme yaklaşımı önerilmiştir. Normal şartlarda iki tarafından da bara değişimi mümkün olan bir EİH'nin dahil olabileceği 16 muhtemel küme bulunuyorken, bara geçişlerinden hemen önce tüm fiderlerin başlangıç konumuna, yani bara-1'e, alınmasıyla birlikte küme sayısı 4'e düşürülmüştür. Ayrıca baralar arası geçişler yapılmadan önce tüm fiderlerin bara-1'e alınması, bir referans nokta olması sebebiyle mevcut fiderler ile temsilci pozisyonunda

tanımlanmış ikili kodlar arasında oluşabilecek muhtemel uyumsuzluklara da çözüm olmuştur.

Bölüm içerisinde ekipmanların kimlik çakışması gibi kullanılan programın yapısıyla ilgili veya Otr.lerin bank şeklinde kullanılması gibi iletim sistemiyle ilgili özel durumlar sebebiyle oluşabilecek sorunlarla nasıl başa çıkıldığı sunulmuştur. Problem için tasarlanan modüllerin başlıca görevleri ile sezgi-üstü algoritmalarla birlikte nasıl kullanıldıkları görsel materyallerle desteklenerek açıklanmış ve sezgi-üstü algoritmanın kara kutu modeli sunulmuştur. Ayrıca, problemin çözümünde kullanılan işleyişi daha net gösterebilmek amacıyla tasarlanan genel algoritma sunulmuş ve açıklanmıştır.

Bara değişim işlemlerini sadeleştirmek amacıyla kümeleme yöntemine alternatif olarak etiketleme yöntemi önerilmiştir. Bu yaklaşımda, fiderlerin algoritmadan gelen ikili koda göre transfer edilmesi esnasında tüm fiderlerin referans noktasına (bara-1'e) taşınması işlemi yapılmamaktadır. Dolayısıyla bu yaklaşımda çözüm süresinden tasarruf edilmektedir. Ayrıca tasarlanan yöntemde topoloji düzenlemesine dahil edilecek ekipman tipinin belirlenmesi esnekliği sağlanmıştır. Özellikle çözüm uzayının çok büyük olduğu bölgelerde, Tr. ve Otr.lerin bara dağılımı manuel olarak düzenlenip, sadece iletim hatlarının bara dağılımı optimizasyonu yapılabilir. Bu bölüm içeriğinde Python programlama dili ile yapılan yazılımların bir bölümü paylaşılmıştır. Yazılım içeriğinde "numpy" ve PSS/E programının "psspy" kütüphaneleri kullanılmış olup listelerin önemli bir bölümü "list comprehension" olarak bilinen yöntemle oluşturulmuştur.

6. ANALİZ SONUÇLARI

Geliştirilen tekniklerin performans analizlerini yapabilmek için test sistemleri kullanılmaktadır. Bu test sistemleri, veri setinin açık kaynak olarak sunulması nedeniyle önerilen yöntemlerin tekrarlanabilir mahiyette olmasına imkân vermektedir. Bu alanda IEEE'nin 9-baralıdan 300-baralıya kadar yaygın şekilde kullanılan test sistemleri bulunmaktadır. Bunun dışında Roy Billinton sistemi ile Cigre'nin çeşitli test sistemleri bulunmaktadır [143]. Bu test sistemleri çeşitli gerilim ve güç seviyelerinde tasarlanmış ve doğrulanmıştır. Test sistemleri güç sistemi güvenilirliği, koruma, planlama, güç kalitesi ve optimizasyon gibi çeşitli alanlarda geliştirilen tekniklerin değerlendirilebilmesi için kullanılmaktadır.

Gerçek bir iletim sistemine ait veri setini bilimsel çalışmalar kapsamında yayınlamak, sistem güvenliği nedeniyle mümkün olmamaktadır. Sistem bilgilerini kısıtlanmış sınırlar içerisinde paylaşmak ihtimal dahilindedir fakat doğrulanmamış kısıtlı bir veri setiyle önerilen yöntemin tekrarlanabilirliği sağlanmış olmaz. Bu nedenle test sistemlerinin kullanımı yaygın şekilde talep görmektedir. Gerçek bir iletim sistemi mevcut problemlerin tamamını ihtiva ederken test sistemleri bu sorunların hepsini tam olarak yansıtamamaktadır. Dolayısıyla, farklı problemlerin çözümü için farklı test sistemleri geliştirilmiştir. Ancak yine de problemlerin mahiyeti test sisteminin içinde bulunmayabileceği için araştırmacılar test sistemlerinde değişiklikler yapmakta ve bu değişiklikleri de paylaşarak çözümün tekrarlanabilme özelliğini sürdürmektedir.

Tez çalışmamızın amacı, iletim sistemi operatörlerine güç sistemini yönetirken karşılaştıkları bir problemin çözümünde yardımcı olacak bilimsel yaklaşımları sunmaktır. Ancak seçilen sezgi-üstü algoritmaların farklı problemlere karşı gösterdikleri performansı görebilmek için öncelikle çeşitli benchmark fonksiyonları çözdürülmüştür. Farklı fonksiyonları başarılı bir şekilde çözen algoritmalarla IEEE 14 ve 57-baralı test sistemleri üzerinde BBO problemi çözülmüştür. Bara bölme optimizasyonu yapılmadan önce problemin doğasına uygun olması amacıyla test sistemlerinde bazı değişiklikler yapılmış ve yapılan değişiklikler açıklanmıştır.

Ayrıca, çalışmamız kapsamında önerdiğimiz İKA tekniğiyle IEEE 118-baralı test sisteminde BBO yapılmıştır. Geliştirilen yaklaşımların gerçek bir iletim sisteminde kullanılmadan önce daha küçük çaplı sistemlerde kullanılması, hangi metodun daha uygun olduğuna dair bir ön elemeden geçirilmesine imkân sağlamıştır.

Test sisteminde gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra her bir algoritmanın BBO problemini eşit şartlarda çözmesi sağlanmıştır. IEEE 57-baralı test sisteminde kullanılacak başarılı algoritmaları seçebilmek amacıyla IEEE 14-baralı test sisteminde çeşitli analizler yapılmış ve elde edilen istatistiksel verilerle karşılaştırmalar yapılmıştır. IEEE 14-baralı sistemde başarı gösteren algoritmalar gerçek iletim sisteminde kullanılmadan önce IEEE-57 baralı test sistemi üzerinde ikinci bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur. BBO problemi çözülürken IEEE 14-baralı test sisteminde algoritmaların her birine birbirinden bağımsız 30 farklı çözüm sağlanırken IEEE 57-baralı test sisteminde başarılı algoritmalarla 20 bağımsız çalıştırma yapılmıştır. Gerçek sistemde BBO problemi çözülmeden önce ise IEEE 118-baralı test sisteminde sadece önerilen İKA tekniğiyle optimal bara düzeni elde edilmiştir.

Algoritmalardan bağımsız çalıştırmalar ile elde edilen en iyi çözümlerin kalitesini anlayabilmek amacıyla minimum, maksimum, ortalama ve ortanca değerleri ile standart sapmaları hesaplanmıştır. Bu istatistiksel göstergelerle algoritmaların elde edebildiği en iyi sonucun yanı sıra ne kadar güvenilir sonuçlar verdiği de görülmektedir. Çünkü bir algoritma 30 bağımsız çözümden birisinde diğer algoritmalara göre daha iyi bir performans göstermiş olsa bile geri kalan 29 çözümdeki başarısı son derece önemlidir. Bağımsız çözümlerle aynı kaliteli çözüm elde ediliyorsa algoritmadan alınan sonuçların standart sapması küçük olmaktadır. Bu nedenle istatistiksel veriler incelenerek hangi algoritmanın daha güvenilir ve kaliteli sonuçlar verdiği tespit edilebilmektedir. Ayrıca belirtilen istatistiksel göstergelerin yanı sıra parametrik olmayan işaretli sıra testiyle de algoritmalar karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerin tamamı 16 GB RAM'e sahip 2.60 GHz PC üzerinde Python ve PSS/E versiyon 34 kullanılarak yapılmıştır.

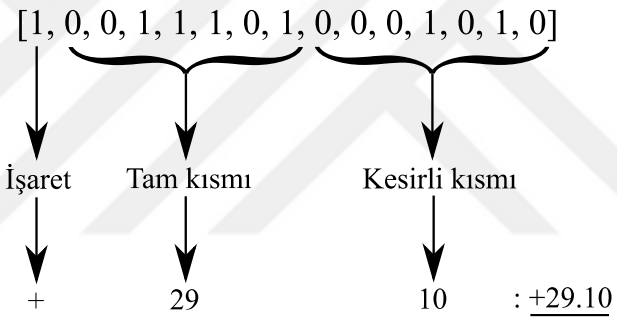
6.1. Benchmark Fonksiyonları ve Sonuçları

Çalışmamız kapsamında önerilen İkili Kâşif Algoritmasının performansını değerlendirebilmek ve seçilen yöntemlerin farklı problemleri çözebilme kabiliyetini

izleyebilmek amacıyla farklı senaryolara sahip algoritmalar çeşitli benchmark fonksiyonları üzerinde test edilmiştir. Algoritmaların tamamı için 30 farklı çözümden elde edilen en iyi değerlerin ortalaması ve en iyi değerlerin standart sapması hesaplanmış olup, yakınsama karakteristikleri de paylaşılmıştır.

6.1.1. Kullanılan benchmark fonksiyonları

Tablo 6.1'de çalışmamız kapsamında kullanılan benchmark fonksiyonları gösterilmektedir [67,102,144,145]. Burada d, bir fonksiyonun boyutunu ve u_s, karar değişkenleri için izin verilen sınır değerleri temsil etmektedir. Çözümü yapılan fonksiyonlar üç çeşittir: Birincisi, sadece bir adet optimal noktası bulunan tek-modlu fonksiyonlardır; ikincisi, birçok yerel optimale sahip çok-modlu fonksiyonlardır; üçüncüsü, ikili arama uzayına sahip maksimizasyon problemleridir.



Şekil 6.1. İkilik tabandan onluk tabana geçiş

Tek-modlu ve çok-modlu benchmark fonksiyonlarının çözüm uzayları süreklidir. Çalışmamız kapsamında ayrık optimizasyon yapıldığı için bu fonksiyonların çözümü ikili tabanda elde edilip onluk tabana çevrilmektedir. Şekil 6.1'de ikili kodların sürekli zamanda temsil ettiği değere ilişkin bir örneklendirme yapılmıştır. Her bireyin ilk hanesi ondalık tabanda oluşturulacak sayının işaretini vermektedir. Örneğin burada ilk hane 0 olsaydı, ilgili sayı -29.10 olurdu. Geriye kalan 14 bitlik kısım ise sayının tam ve kesirli bölümlerini ifade etmek için kullanılmaktadır. Tam kısım veya kesirli kısım için ayrılan bölümler karar değişkenleri için belirlenen sınır değerlere uygun olacak şekilde problemin tipine göre değişmektedir. Burada sınır değerlerin [-100,100] olduğu düşünülerek tam ve kesirli kısımlar için 7'şer bit verilmiştir. Sınır değer aralığı genişlerse tam kısım için ayrılan bit sayısı da buna paralel olarak artacak iken kesirli kısım için ayrılan bit sayısı da azalacaktır.

Tablo 6.1. Tek-modlu, çok-modlu ve ayrık benchmark fonksiyonları

Fonksiyonlar	u_s
Tek-modlu	
$f_1=\sum_{i=1}^{d} x_i^2$	$[-100,100]^d$
$f_2=\sum_{i=1}^{d}\left(\sum_{j=1}^{i} x_j\right)^2$	$[-100,100]^d$
$f_3=\sum_{i=1}^{d} ix_i^2$	$[-10,10]^d$
$f_4=\sum_{i=1}^{d}\left(\sum_{j=1}^{i} x_j\right)^2 *(1+0.4\lvert N(0,1)\rvert)$	$[-100,100]^d$
$f_5=\sum_{i=1}^{d}\lvert x_i\rvert+\prod_{i=1}^{d}\lvert x_i\rvert$	$[-10,10]^d$
Çok-modlu	
$f_6=d*418.9829+\sum_{i=1}^{d} -x_i\sin(\sqrt{\lvert x_i\rvert})$	$[-500,500]^d$
$f_7=\sum_{i=1}^{d} x_i^2+\left(\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{d} ix_i\right)^2+\left(\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{d} ix_i\right)^4$	$[-5,10]^d$
$f_8=-20\exp\left\{-0.2\sqrt{\frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d} x_i^2}\right\}-\exp\left\{\frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d}\cos(2\pi x_i)\right\}+20+e$	$[-32,32]^d$
$f_9=\frac{1}{4000}\sum_{i=1}^{d} x_i^2-\prod_{i=1}^{d}\cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)+1$	$[-600,600]^d$
$f_{10}=1-\cos\left(2\pi\sqrt{\sum_{i=1}^{d} x_i^2}\right)+0.1\sqrt{\sum_{i=1}^{d} x_i^2}$	$[-100,100]^d$
İkili arama uzayında maksimizasyon	
$f_{11}=\sum_{i=1}^{d} x_i$	$[\{0,1\}]^d$
$f_{12}=\sum_{i=1}^{\frac{d}{8}}\left(\prod_{j=8(i-1)+1}^{8i} x_j\right)$	$[\{0,1\}]^d$

Tek-modlu ve çok-modlu problemler için sürekli zamandaki boyut 5 seçilmiştir ve bu boyut ikili tabanda arama yapıldığı için 75 ikili kod anlamına gelmektedir. İkili maksimizasyon fonksiyonlarında ise boyut miktarının çözüm üzerindeki etkisi gözlenmek istenmiştir. Bu doğrultuda, her iki problem için boyut 120 ve 160 olarak seçilmiştir.

6.1.2. Benchmark fonksiyonlarından elde edilen sonuçlar

Sürü zekâsı ve fizik-tabanlı konseptlerine dahil algoritmalar için 5 transfer fonksiyonu ve 2 pozisyon güncelleme kuralı kullanılarak oluşturulan 10 farklı senaryo denenmiştir. Daha adil bir karşılaştırma için her algoritmaya aynı başlangıç popülasyonu verilmiştir. Görüldüğü üzere istatistiksel olarak hangi algoritmanın hangi senaryoyla daha iyi sonuç verdiğini tespit edebilmek için toplam 29,820 farklı çözüm elde edilmiştir. Her çözüm için 30 popülasyon büyüklüğü ve 500 yineleme olduğu için 447,300,000 fonksiyon çözümü yapılmıştır. Elde edilen en iyi sonuçların ortalaması ile standart sapması Tablo 6.2 – 6.25'te gösterilmektedir.

Tablo 6.2. İPSO'nun f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f1	f2	f3	f4	f5
STF3(x)	1	ort. en iyi	5,09E+00	1,49E+00	2,50E-01	1,82E+00	1,05E+00
		std	2,59E+00	1,29E+00	8,41E-02	1,49E+00	1,55E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	3,38E+01	1,20E+02	4,07E+00	1,17E+02	6,97E-01
		std	8,74E+01	2,12E+02	7,53E+00	2,13E+02	9,14E-01
VTF2(x)		ort. en iyi	1,92E+01	8,48E+00	9,22E-01	2,97E+01	5,42E-01
		std	3,44E+01	1,11E+01	2,52E+00	6,63E+01	4,99E-01
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	2,38E+03	8,64E+02	3,38E+01	1,03E+03	1,46E+01
		std	1,01E+03	3,97E+02	1,78E+01	5,28E+02	4,54E+00
STF3(x)	2	ort. en iyi	7,77E+03	3,67E+03	1,65E+02	4,36E+03	9,11E+01
		std	1,73E+03	8,50E+02	3,52E+01	1,39E+03	2,96E+01
VTF1(x)		ort. en iyi	6,28E-03	1,11E-02	2,00E-03	1,09E-02	1,08E-02
		std	1,04E-02	1,02E-02	7,92E-03	1,56E-02	4,24E-02
VTF2(x)		ort. en iyi	2,02E-02	1,24E-02	2,63E-02	1,68E-02	1,23E-01
		std	1,39E-02	8,02E-03	2,94E-02	8,16E-03	1,34E-01
VTF3(x)		ort. en iyi	3,27E-02	2,12E-02	4,12E-02	9,97E-02	3,07E-01
		std	1,14E-02	9,43E-03	2,84E-02	2,57E-01	1,19E-01
VTF4(x)		ort. en iyi	2,33E+02	7,32E+01	3,15E+00	1,19E+02	3,76E+00
		std	1,55E+02	5,31E+01	1,63E+00	6,93E+01	9,50E-01

Tek-modlu ve çok-modlu fonksiyonlardan elde edilmesi gereken optimal sonuç 0'dır. Diğer yandan f11 ve f12 maksimizasyon problemleri için en iyi çözüm, boyutun 120

olması durumunda sırasıyla 120 ve 15; boyutun 160 olması durumunda sırasıyla 160 ve 20'dir.

Tablo 6.2'de İkili Parçacık Sürüsü Optimizasyonundan tek-modlu fonksiyonlar için elde edilen en iyi sonuçların ortalaması ve standart sapması verilmiştir. Tek-modlu transfer fonksiyonlarının tamamında en iyi sonuç VTF3(x) – PGK-1 senaryosuyla elde edilmiştir.

Tablo 6.3. İDKPSO'nun f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f1	f2	f3	f4	f5
STF3(x)	1	ort. en iyi	3,53E+02	1,40E+02	3,38E+00	1,44E+02	3,85E+00
		std	1,71E+02	7,08E+01	1,73E+00	8,54E+01	9,55E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	2,29E+01	7,94E+00	5,65E-01	1,23E+01	1,64E+00
		std	1,64E+01	8,80E+00	2,50E-01	9,97E+00	3,25E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	5,78E+02	1,69E+02	6,76E+00	2,36E+02	6,21E+00
		std	2,27E+02	8,68E+01	3,61E+00	1,51E+02	1,51E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	8,32E-01	7,14E-02	6,00E-02	2,65E-01	3,51E-01
		std	1,27E+00	1,35E-01	6,46E-02	8,66E-01	1,82E-01
VTF2(x)		ort. en iyi	6,28E+00	9,56E-01	1,13E-01	1,74E+00	6,83E-01
		std	7,87E+00	1,60E+00	1,19E-01	4,22E+00	4,09E-01
VTF3(x)		ort. en iyi	2,29E+01	3,55E+00	3,59E-01	3,66E+00	9,41E-01
		std	2,31E+01	4,63E+00	2,78E-01	5,33E+00	4,55E-01
VTF4(x)		ort. en iyi	6,13E+02	1,65E+02	7,27E+00	2,74E+02	5,82E+00
		std	2,73E+02	8,24E+01	4,08E+00	1,51E+02	1,46E+00

Tablo 6.3'te f1-f5 fonksiyonları için İkili Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu tekniğiyle elde edilen optimal sonuçlar gösterilmektedir. Görüldüğü gibi farklı senaryolarda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. VTF1(x), VTF2(x) ve VTF3(x) ile PGK-1 kombinasyonları İDKPSO'da optimal sonucu keşfetmeyi başarmıştır.

Tablo 6.4. İYAKA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f1	f2	f3	f4	f5
STF3(x)	1	ort. en iyi	4,48E-02	1,13E+00	5,52E-02	3,72E+00	4,38E-01
		std	5,52E-03	1,85E+00	1,76E-02	3,99E+00	6,92E-02
VTF1(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	3,33E-04	**0,00E+00**	2,61E-03	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	1,80E-03	**0,00E+00**	4,88E-03	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	3,33E-04	**0,00E+00**	6,72E-04	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	1,80E-03	**0,00E+00**	2,51E-03	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	2,03E-03	1,26E-02	**0,00E+00**	1,90E-02	**0,00E+00**
		std	4,07E-03	6,23E-03	**0,00E+00**	8,50E-03	**0,00E+00**
STF3(x)	2	ort. en iyi	3,61E-02	5,11E-01	2,50E-02	2,26E-01	3,40E-01
		std	6,92E-03	1,66E+00	1,50E-02	3,57E-01	4,42E-02
VTF1(x)		ort. en iyi	1,00E-03	5,26E-03	**0,00E+00**	1,52E-02	**0,00E+00**
		std	3,00E-03	5,39E-03	**0,00E+00**	1,23E-02	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	4,59E-03	**0,00E+00**	9,98E-03	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	5,40E-03	**0,00E+00**	6,24E-03	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	1,10E-02	2,67E-02	**0,00E+00**	1,12E-01	6,51E-02
		std	7,88E-03	1,84E-02	**0,00E+00**	2,26E-01	6,56E-02

Tablo 6.4'te verilen İYAKA sonuçlarına göre f2'de 1, f4'te 2, f1'de 5, f5'te 7 ve f3'te 8 farklı senaryoyla optimal sonuçlar elde edilmiştir. İYAKA'da tek-modlu fonksiyon sonuçlarına göre bazı problemler için hangi senaryonun kullanıldığı önemli olurken bazılarında ise senaryoların büyük çoğunluğu başarılı olmuştur.

Tablo 6.5'te İkili Yerçekimsel Arama Algoritmasıyla elde edilen istatistiksel göstergeler sunulmuştur. İDKPSO'da olduğu gibi PGK-1 ile birlikte kullanılan VTF1(x), VTF2(x) ve VTF3(x) senaryolarından en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6.6'da verilen Genetik Algoritma sonuçları incelendiğinde, algoritmanın tek-modlu fonksiyonlarda optimal sonucu elde edemediği görülmektedir. Ancak şunu belirtmek gerekir: GA'da adaptif mutasyon oranı, ayrık çaprazlama tekniği ve rulet tekerleği seçim yöntemi kullanılmış olmasına rağmen parametre ayarı yapılmamıştır. Dolayısıyla, çaprazlama oranı, maksimum ve minimum mutasyon oranı gibi

parametrelerin ayarlanması halinde GA'dan daha iyi sonuçlar alınabileceği bilinmelidir.

Tablo 6.5. İYAA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f1	f2	f3	f4	f5
STF3(x)	1	ort. en iyi	6,42E+02	2,15E+02	8,16E+00	2,62E+02	6,80E+00
		std	2,49E+02	1,04E+02	4,84E+00	1,42E+02	1,59E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	3,83E+01	9,25E+00	6,78E-01	1,83E+01	1,87E+00
		std	2,07E+01	7,07E+00	2,69E-01	1,45E+01	3,93E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	1,12E+03	3,87E+02	1,43E+01	5,43E+02	9,00E+00
		std	3,64E+02	2,04E+02	7,23E+00	2,80E+02	2,08E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	7,91E+01	5,93E+01	1,15E+01	7,51E+01	1,34E+00
		std	1,79E+02	8,73E+01	9,96E+00	9,50E+01	1,15E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	3,37E+01	3,31E+01	7,36E+00	5,23E+01	1,28E+00
		std	7,40E+01	7,96E+01	5,50E+00	7,48E+01	9,37E-01
VTF3(x)		ort. en iyi	3,47E+02	3,41E+02	9,30E+00	1,67E+02	7,23E+00
		std	4,58E+02	2,95E+02	1,04E+01	1,92E+02	5,29E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	5,71E+02	2,13E+02	8,27E+00	2,97E+02	6,36E+00
		std	2,74E+02	1,22E+02	4,32E+00	1,38E+02	1,87E+00

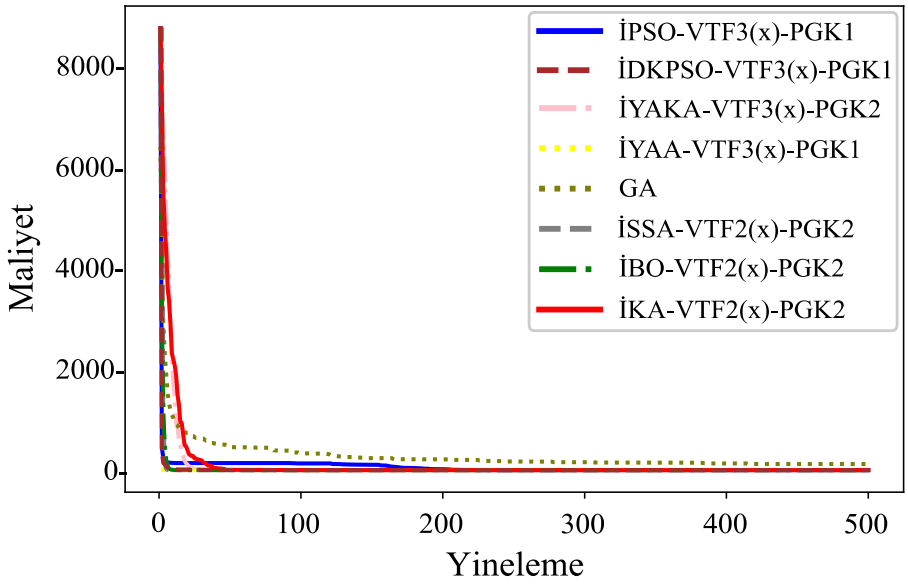
Tablo 6.6. GA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f1	f2	f3	f4	f5
N/A	N/A	ort. en iyi	1,12E+02	6,66E+02	4,20E+00	8,78E+02	5,79E-01
		std	1,05E+02	5,12E+02	4,87E+00	7,35E+02	1,36E-01

Tablo 6.7'de İkili Salp Sürüsü Algoritmasıyla tek-modlu problemlerden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. İSSA'da kullanılan VTF1(x), VTF2(x) ve VTF3(x) transfer fonksiyonları hem PGK-1 hem de PGK-2 ile tüm tek-modlu problemlerde en iyi sonucu elde etmeyi başarmıştır.

Tablo 6.7. İSSA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f1	f2	f3	f4	f5
STF3(x)	1	ort. en iyi	6,10E+02	4,59E+02	7,92E+00	6,30E+02	4,48E+00
		std	5,43E+02	3,88E+02	7,53E+00	4,90E+02	2,79E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	6,49E+01	1,74E+01	9,10E-01	2,75E+01	2,08E+00
		std	4,60E+01	1,23E+01	4,12E-01	1,93E+01	4,88E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	3,35E+02	1,11E+02	3,37E+00	1,53E+02	3,91E+00
		std	1,56E+02	6,09E+01	2,21E+00	9,85E+01	9,50E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	2,52E+02	8,07E+01	3,30E+00	9,45E+01	4,02E+00
		std	1,21E+02	5,20E+01	2,03E+00	5,35E+01	1,08E+00



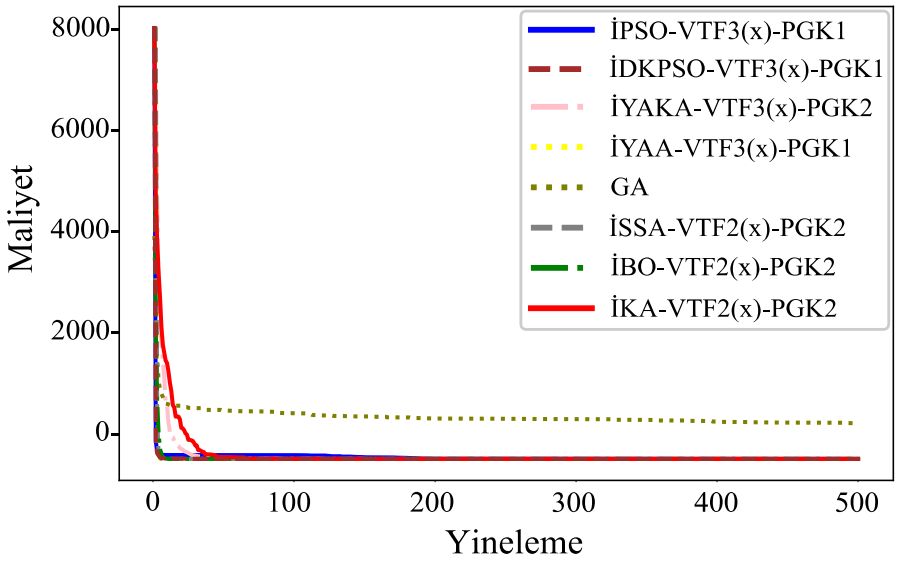
Şekil 6.2. Algoritmaların f1 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri

Tablo 6.8'de İkili Bozkurt Optimizasyonunun f1-f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans verilmiştir. İSSA'da olduğu gibi İBO'dan tüm fonksiyonlar için 6 farklı senaryoda, başlangıç noktası aynı olan 30 farklı çözümde, 0 standart sapmayla en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

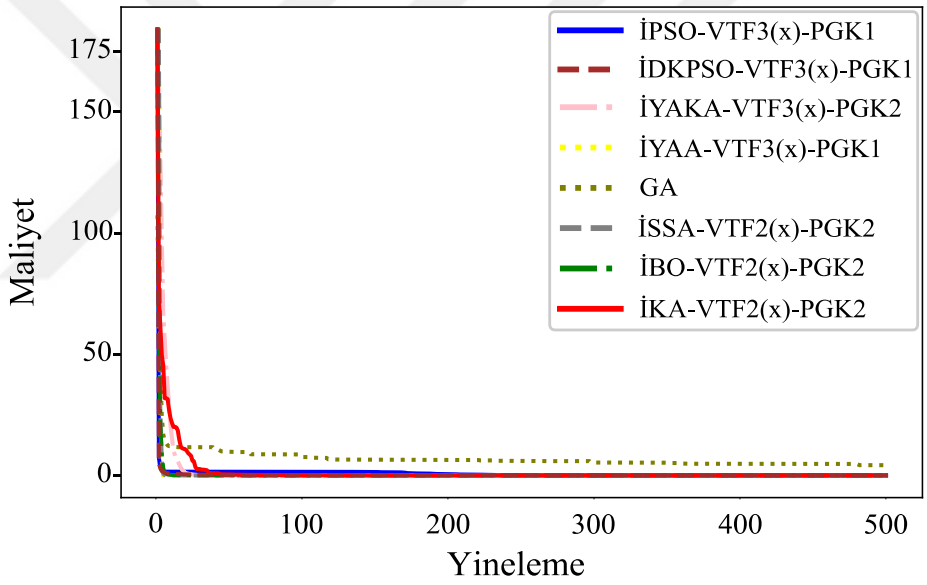
Tablo 6.8. İBO'nun f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f1	f2	f3	f4	f5
STF3(x)	1	ort. en iyi	2,17E+03	9,33E+02	2,67E+01	1,06E+03	1,52E+01
		std	5,75E+02	3,14E+02	1,12E+01	3,96E+02	4,22E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	6,75E+01	2,49E+01	9,16E-01	3,24E+01	2,16E+00
		std	4,04E+01	1,70E+01	4,47E-01	2,02E+01	4,37E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	6,67E+02	1,95E+02	8,49E+00	2,74E+02	5,87E+00
		std	2,57E+02	1,03E+02	5,17E+00	1,02E+02	1,75E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	3,69E+02	2,00E+02	4,93E+00	1,87E+02	4,85E+00
		std	2,02E+02	7,95E+01	2,18E+00	1,10E+02	1,18E+00

Tablo 6.9'da çalışmamız kapsamında önerilen İkili Kâşif Algoritmasının tek-modlu fonksiyonlar üzerinde gösterdiği performans sunulmuştur. PGK-1 ile STF3(x), VTF1(x), VTF2(x), VTF3(x) ve PGK-2 ile VTF1(x), VTF2(x) transfer fonksiyonları optimal sonucu keşfedebilmiştir. Tek-modlu fonksiyonlar üzerinde yapılan performans analizlerine göre İKA, sadece bir yerel optimali bulunan problemlerde optimal çözümü sunabilmektedir. Üstelik bu keşifleri 30 bağımsız çözümde 0 standart sapmayla elde ederek güvenilirliğini kanıtlamaktadır.

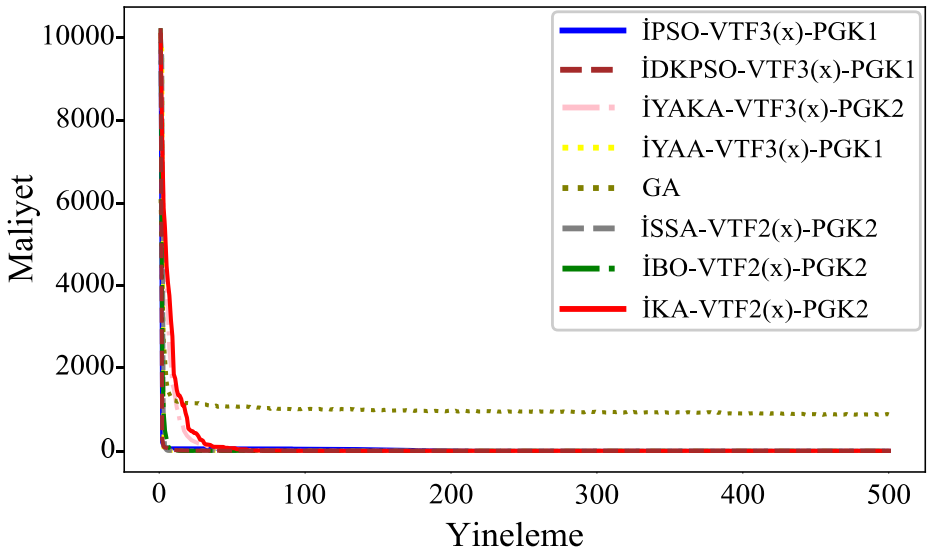


Şekil 6.3. Algoritmaların f2 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri

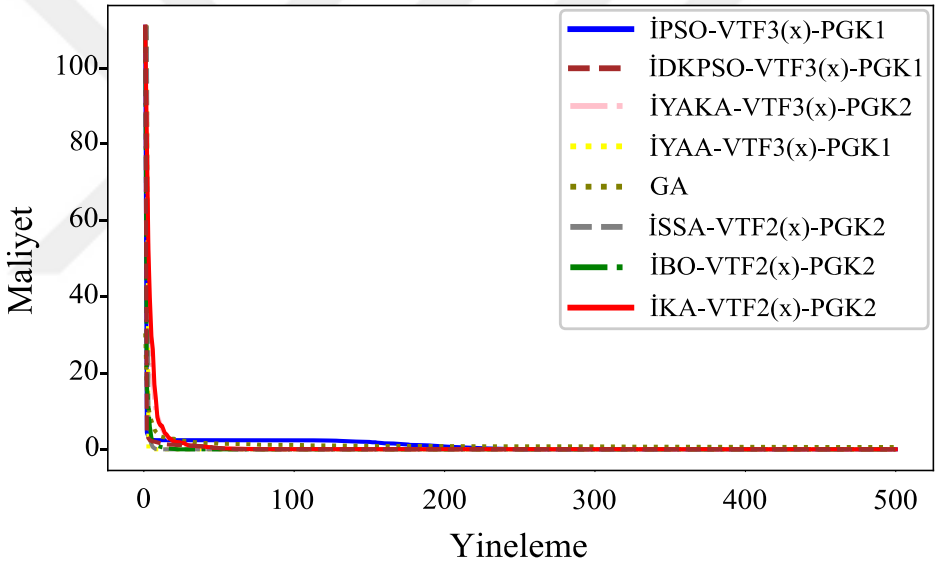


Şekil 6.4. Algoritmaların f3 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri

Şekil 6.2 – 6.6'da algoritmaların tek-modlu fonksiyonlarda gösterdiği ortalama yakınsama eğrileri sunulmuştur. Bu eğriler, algoritmaların birbirinden bağımsız 30 farklı çözümde gösterdiği yakınsama karakteristiklerinin ortalamasıdır. Ortalama yakınsama eğrileri sadece her algoritmanın en başarılı senaryosu için verilmiştir. Tek-modlu f1-f5 fonksiyonlarında GA dışındaki algoritmaların hepsi en az bir senaryoda otuz bağımsız çözümün otuzunda da optimal noktaya ulaşmayı başarmıştır. GA ise sadece f5 fonksiyonunda optimal çözüme yaklaşabilmiştir.



Şekil 6.5. Algoritmaların f4 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri



Şekil 6.6. Algoritmaların f5 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri

Çok-modlu fonksiyonlarda optimal noktayı elde etmek tek-modlulara göre daha karmaşık bir işlemdir. Çünkü bu problemlerin birçok yerel optimali bulunmaktadır ve algoritmanın bu yerel noktalardan kaçınabilmesi gerekir. Sezgi-üstü algoritmalar yerel optimal bölgelerden kaçınabilmek için keşfetme safhasını kullanmaktadır. GA'da mutasyon operatörü, YAKA'da kaşif arı, PSO'da atalet katsayısı, YAA'da zamana bağımlı olarak azalan K_{best} listesi, BO'da $\vec{C}$ vektörü, SSA'da c_1 değişkeni ve son olarak KA'da α ve β etkileşim katsayıları ile ε titreşim vektörü ve A salınım vektörü kullanılarak keşfetme safhası işletilmekte ve yerel optimal bölgelerden

uzaklaşılmaktadır. Çok-modlu problemlerde algoritmaların keşfetme ve faydalanma safhalarını ne kadar başarılı kullanabildikleri test edilmektedir. Bu doğrultuda, Tablo 6.10-6.17'de, algoritmaların farklı senaryolarda çok-modlu problemlere karşı gösterdikleri performanslar sunulmuştur.

Tablo 6.9. İKA'nın f1 - f5 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f1	f2	f3	f4	f5
STF3(x)	1	ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF1(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	2,37E+02	1,05E+02	3,28E+00	1,04E+02	3,58E+00
		std	1,54E+02	7,32E+01	1,56E+00	1,00E+02	1,17E+00
STF3(x)	2	ort. en iyi	8,76E-02	2,90E+01	8,61E-02	2,74E+01	4,60E-01
		std	5,05E-02	3,31E+01	3,24E-02	2,75E+01	1,38E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	2,12E-03	1,96E-02	1,33E-03	3,05E-02	1,83E-02
		std	9,39E-03	3,25E-02	4,99E-03	6,97E-02	5,15E-02
VTF4(x)		ort. en iyi	4,37E+02	2,21E+02	6,86E+00	2,25E+02	5,26E+00
		std	2,39E+02	1,35E+02	4,17E+00	1,40E+02	1,65E+00

Tablo 6.10'da İPSO'nun çok-modlu problemlerde gösterdiği performans sunulmuştur. İPSO algoritması tek-modlu fonksiyonlarda olduğu gibi VTF3(x) – PGK-1 senaryosuyla f7, f9 ve f10'da optimal noktayı elde etmiştir. Çok-modlu problemler için sunulan tabloların hepsi incelendiğinde, f8 fonksiyonunda algoritmaların elde edebildiği en iyi sonucun 4,44E-16 olması nedeniyle VTF3(x) – PGK-1 senaryosu burada da rekabetçi sonuçlar sunmuştur. Ancak bu senaryo, f6 probleminde önemli miktarda sapma göstermiştir. Bu problem için İPSO'da kullanılan hiçbir senaryo optimal noktayı elde edemese de optimale en yakın senaryo VTF2(x) – PGK-2 olmuştur. Diğer yandan STF3(x)-PGK-1 senaryosu nispeten düşük standart

sapmasıyla ve optimal bölgeye yakınsamasıyla başarılı olan başka bir senaryodur. İPSO algoritması f6 probleminde İYAKA'dan sonra ikinci sırada gelmektedir.

Tablo 6.11'den görüldüğü gibi İDKPSO algoritmasında tek-modlu problemlerde başarı gösteren senaryolar, f6 problemi hariç tüm çok-modlu fonksiyonlarda iyi performans göstermiştir. Ancak İPSO'da olduğu gibi İDKPSO, f6 probleminde optimal noktaya yaklaşamamıştır ve bu problemde nispeten daha iyi sonuç veren senaryosu STF3(x)- PGK-1 olmuştur.

Tablo 6.10. İPSO'nun f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f6	f7	f8	f9	f10
STF3(x)	1	ort. en iyi	2,57E+01	3,67E-01	2,32E+00	5,52E-01	5,52E-01
		std	1,46E+01	1,42E-01	3,29E-01	1,71E-01	1,20E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	3,32E+02	3,33E+00	2,97E+00	6,71E-01	9,01E-01
		std	1,01E+02	7,92E+00	2,88E+00	7,10E-01	9,08E-01
VTF2(x)		ort. en iyi	2,74E+02	6,53E-01	1,94E+00	5,80E-01	4,42E-01
		std	9,47E+01	9,17E-01	2,00E+00	4,84E-01	4,36E-01
VTF3(x)		ort. en iyi	4,71E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,55E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	4,56E+02	5,65E+01	1,38E+01	1,01E+01	5,30E+00
		std	7,94E+01	1,98E+01	1,52E+00	3,07E+00	1,24E+00
STF3(x)	2	ort. en iyi	5,30E+02	2,02E+02	1,87E+01	3,29E+01	1,02E+01
		std	9,54E+01	1,97E+01	6,37E-01	5,39E+00	1,31E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	3,56E+01	5,47E-03	2,13E-01	2,13E-02	9,33E-02
		std	4,53E+01	1,12E-02	1,89E-01	3,58E-02	3,59E-02
VTF2(x)		ort. en iyi	**9,40E+00**	1,93E-02	2,72E-01	4,57E-02	1,20E-01
		std	**2,23E+01**	2,03E-02	2,49E-01	5,43E-02	4,76E-02
VTF3(x)		ort. en iyi	2,17E+01	6,60E-02	6,74E-01	9,31E-02	1,44E-01
		std	4,97E+01	2,59E-02	2,50E-01	7,16E-02	6,25E-02
VTF4(x)		ort. en iyi	3,64E+02	7,18E+00	7,44E+00	1,98E+00	2,04E+00
		std	9,11E+01	2,95E+00	1,13E+00	4,93E-01	4,47E-01

Tablo 6.12'de İYAKA ile çok-modlu problemlerde elde edilen istatistiki göstergeler sunulmuştur. İYAKA, çok-modlu problemlerin hepsinde en rekabetçi çözümleri sunan algoritma olmuştur. Özellikle f6 probleminde İYAKA'da kullanılan VTF1(x) – PGK-1 kombinasyonu, tüm algoritmalar arasında optimale en çok yaklaşan senaryo

olmuştur. Dolayısıyla İYAKA, hem tek-modlu hem de çok-modlu problemlerde en iyi performansı göstermiştir.

Tablo 6.11. İDKPSO'nun f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f6	f7	f8	f9	f10
STF3(x)	1	ort. en iyi	**3,93E+02**	7,88E+00	7,64E+00	2,38E+00	2,36E+00
		std	8,95E+01	3,43E+00	1,32E+00	5,28E-01	4,55E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	6,52E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,29E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	6,43E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,34E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	1,21E+03	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	6,20E+01	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	6,07E+02	1,27E+00	3,47E+00	9,40E-01	9,58E-01
		std	1,50E+02	6,92E-01	8,58E-01	1,34E-01	1,75E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	4,81E+02	1,42E+01	9,67E+00	3,10E+00	3,03E+00
		std	1,01E+02	6,42E+00	1,47E+00	8,59E-01	5,25E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	5,88E+02	2,04E-01	6,63E-01	2,20E-01	3,37E-01
		std	1,14E+02	1,23E-01	6,13E-01	2,29E-01	2,47E-01
VTF2(x)		ort. en iyi	5,66E+02	4,28E-01	9,44E-01	5,86E-01	4,76E-01
		std	1,12E+02	3,60E-01	9,43E-01	2,88E-01	3,10E-01
VTF3(x)		ort. en iyi	7,24E+02	1,13E+00	1,87E+00	8,38E-01	7,95E-01
		std	1,44E+02	6,80E-01	1,68E+00	2,90E-01	3,63E-01
VTF4(x)		ort. en iyi	4,82E+02	1,53E+01	1,01E+01	3,31E+00	3,01E+00
		std	1,02E+02	6,51E+00	1,37E+00	1,07E+00	5,65E-01

Tablo 6.13'te İYAA'nın çok-modlu problemlerde gösterdiği performans paylaşılmıştır. İPSO ve İDKPSO'da olduğu gibi İYAA'da f7-f10 problemleri üzerinde başarı gösteren senaryolar, tek-modlu problemlerde uygun çözüm verenler ile aynıdır. Ancak bu algoritma da f6 probleminde yerel optimale takılarak en iyi sonucu elde etmeyi başaramamıştır. Bu problemde nispeten daha iyi sonuç gösteren senaryo ise VTF2(x) – PGK-2 senaryosu olmuştur. Genel itibariyle İYAA'nın şu ana kadar irdelenen 10 problemden 9'unda rekabetçi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 6.14'te GA ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur. GA'nın çalışma prensibi zaten ikili düzende olduğu için sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına geçişi sağlayan senaryoların burada kullanılması söz konusu değildir. GA, çok-modlu problemlerde

de en iyi sonuçları elde edememiş ve diğer algoritmaların gerisinde kalmıştır. Ancak tablolar dikkatle incelendiğinde, diğer algoritmalarda önemli miktarda sapma gözlemlenen f6 probleminde GA'nın gösterdiği performans İYAKA ve İPSO algoritmalarından sonra üçüncü sırada gelmektedir. GA'nın çok-modlu problemlerin hepsinde optimal noktayı elde edemese de en iyi noktaya yakın sonuçlar elde ederek konveks olmayan problemlerde başarı gösterdiği söylenebilir. Dahası, algoritma performansı üzerinde faydalanma safhasının işletildiği çaprazlama oranının ve keşfetme safhasının gerçekleştiği mutasyon oranının önemli miktarda etkisi bulunduğu için GA'da parametre ayarı yapılarak daha iyi sonuçların elde edilebileceği unutulmamalıdır. Benzer şekilde algoritma içeriğinde bulunan seçim prosedürü ve seçkincilik yöntemleri, performansı yükseltmek için ayarlanabilecek diğer yaklaşımlardır.

Tablo 6.12. İYAKA'nın f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f6	f7	f8	f9	f10
STF3(x)	1	ort. en iyi	2,77E+00	8,87E-02	9,50E-01	1,41E-01	3,30E-01
		std	2,44E+00	1,37E-02	7,60E-02	5,31E-02	8,46E-02
VTF1(x)		ort. en iyi	**7,81E-01**	**0,00E+00**	**4,44E-16**	1,05E-03	7,66E-02
		std	1,80E+00	**0,00E+00**	**0,00E+00**	4,21E-03	4,22E-02
VTF2(x)		ort. en iyi	1,61E+00	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	5,66E-02
		std	2,17E+00	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	4,95E-02
VTF3(x)		ort. en iyi	3,01E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	6,05E+01	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	1,66E+01	**0,00E+00**	9,33E-03	1,09E-02	1,03E-01
		std	3,06E+01	**0,00E+00**	5,03E-02	8,95E-03	3,14E-02
STF3(x)	2	ort. en iyi	6,71E+00	6,56E-02	7,14E-01	8,47E-02	2,29E-01
		std	5,77E+00	1,77E-02	1,31E-01	3,98E-02	5,66E-02
VTF1(x)		ort. en iyi	3,68E+00	**0,00E+00**	**4,44E-16**	3,21E-03	9,99E-02
		std	3,42E+00	**0,00E+00**	**0,00E+00**	6,00E-03	1,48E-04
VTF2(x)		ort. en iyi	4,75E+00	**0,00E+00**	**4,44E-16**	2,51E-03	8,99E-02
		std	4,11E+00	**0,00E+00**	**0,00E+00**	4,24E-03	3,00E-02
VTF3(x)		ort. en iyi	1,54E+01	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	2,64E+01	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	1,99E+01	1,19E-02	2,20E-01	3,81E-02	1,57E-01
		std	2,63E+01	8,72E-03	1,65E-01	2,73E-02	5,75E-02

Tablo 6.15'te İSSA'nın f6-f10 fonksiyonları üzerinde her bir senaryo için 30 farklı çözümünden elde edilen en iyi sonuçların ortalamaları ve standart sapmaları gösterilmektedir. İSSA'nın gösterdiği performans İPSO, İDKPSO ve İYAA'da elde edilen sonuçlara benzemektedir. İSSA'da kullanılan senaryolardan tek-modlu problemlerde başarı gösterenler, çok-modlu problemlerde de başarılı olmuşlardır. Ancak İSSA algoritması da f6 problemini çözmeyi başaramamıştır. Bu problem için nispeten iyi sonuç veren senaryo ise STF3(x) – PGK-1 olmuştur.

Tablo 6.13. İYAA'nın f6 ve f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f6	f7	f8	f9	f10
STF3(x)	1	ort. en iyi	4,62E+02	1,98E+01	1,03E+01	3,85E+00	3,20E+00
		std	1,01E+02	8,75E+00	1,40E+00	1,23E+00	7,03E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	6,37E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	7,91E+01	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	7,02E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	8,10E+01	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	1,15E+03	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	8,28E+01	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	6,81E+02	1,65E+00	4,14E+00	1,05E+00	1,05E+00
		std	1,10E+02	6,91E-01	9,73E-01	1,94E-01	3,12E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	3,96E+02	2,66E+01	1,22E+01	5,61E+00	3,99E+00
		std	1,01E+02	8,91E+00	1,75E+00	1,67E+00	6,05E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	2,67E+02	1,64E+00	3,04E+00	5,01E-01	6,23E-01
		std	1,53E+02	3,70E+00	2,35E+00	4,01E-01	4,37E-01
VTF2(x)		ort. en iyi	**2,15E+02**	4,02E-01	2,84E+00	4,01E-01	6,81E-01
		std	1,35E+02	5,17E-01	1,56E+00	6,14E-01	5,37E-01
VTF3(x)		ort. en iyi	3,97E+02	8,03E+00	3,75E+00	1,78E+00	1,06E+00
		std	1,41E+02	9,88E+00	2,76E+00	1,66E+00	9,53E-01
VTF4(x)		ort. en iyi	5,04E+02	1,78E+01	9,70E+00	3,58E+00	3,05E+00
		std	9,58E+01	6,03E+00	1,69E+00	1,22E+00	5,54E-01

Tablo 6.14. GA'nın f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f6	f7	f8	f9	f10
N/A	N/A	ort. en iyi	1,32E+01	1,74E+00	1,24E+00	1,01E+00	8,48E-01
		std	8,78E+00	1,34E+00	2,91E-01	4,81E-01	2,73E-01

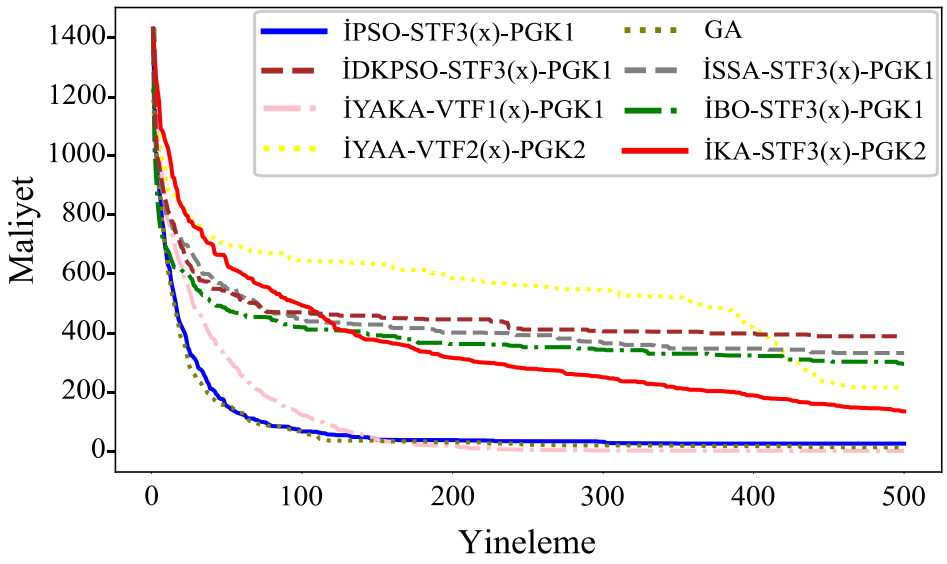
Tablo 6.15. İSSA'nın f6 ve f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f6	f7	f8	f9	f10
STF3(x)	1	ort. en iyi	**3,32E+02**	1,24E+01	1,02E+01	2,88E+00	2,75E+00
		std	8,95E+01	1,13E+01	3,08E+00	1,86E+00	1,03E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	8,27E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,26E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	8,38E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,06E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	1,22E+03	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,52E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	6,50E+02	2,10E+00	4,28E+00	1,14E+00	1,16E+00
		std	9,23E+01	8,83E-01	8,35E-01	1,35E-01	3,14E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	5,63E+02	6,04E+00	7,96E+00	2,06E+00	2,21E+00
		std	8,42E+01	2,86E+00	1,67E+00	5,46E-01	4,37E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	9,26E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,35E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	8,90E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,56E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	1,02E+03	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,25E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	5,45E+02	7,22E+00	7,28E+00	1,86E+00	1,99E+00
		std	9,78E+01	3,05E+00	1,23E+00	4,63E-01	5,31E-01

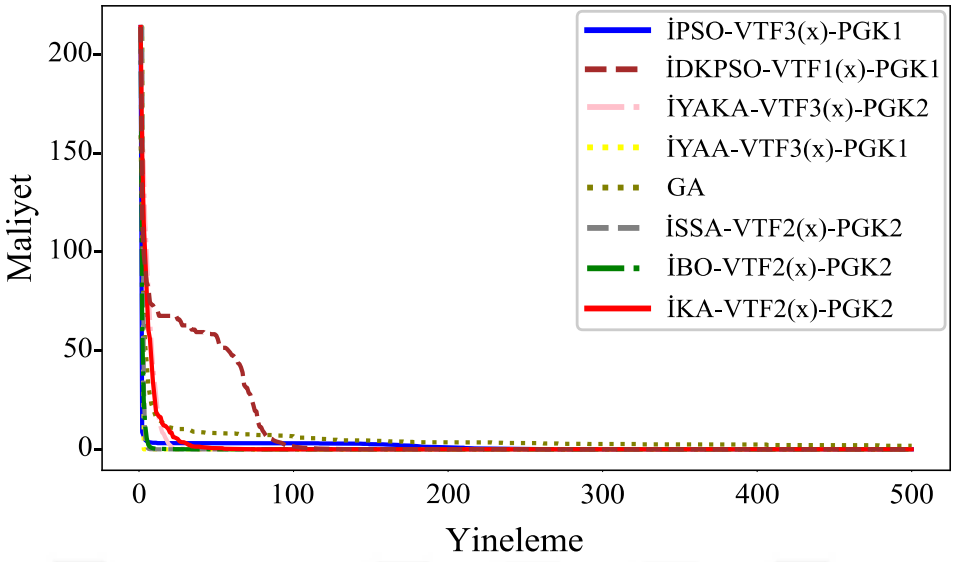
Tablo 6.16'da İBO algoritmasının çok-modlu problemleri çözebilme kabiliyeti istatistiksel olarak gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar İSSA'nın verdiği çözümlere tamamen benzemektedir. Çok-modlu problemler arasında f6 fonksiyonu İBO algoritması için diğer algoritmalarda olduğu gibi zorlu bir problem olmuştur ve algoritma optimal bölgeden ciddi oranda sapma göstermiştir. Ancak genel itibariyle konveks ve konveks olmayan problemlerde gösterdikleri başarılara göre hem İBO algoritması hem de İSSA algoritması başarılı çözümler sunmayı başarmıştır. Bu algoritmalar en az bir senaryoda sekiz farklı problemde gerçekleştirilen otuz bağımsız çözümde sıfır standart sapmayla optimal çözümü sunabilmiştir. Diğer taraftan f8 fonksiyonunda zaten hiçbir algoritma optimal çözümü sunamamış fakat bu noktaya çok yaklaşmıştır. Bu nedenle, İBO ve İSSA algoritmalarının on problemden dokuzunda rekabetçi çözümler sunabilmesinden hareketle BBO problemini çözme kabiliyeti açısından da irdelenmesinde fayda olduğu düşünülmektedir.

Tablo 6.16. İBO'nun f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans

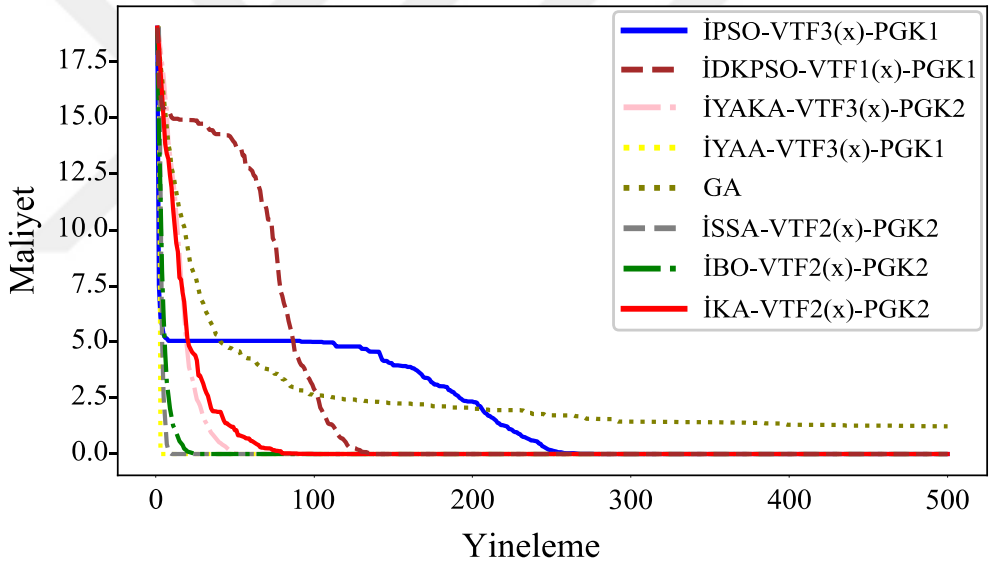
Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f6	f7	f8	f9	f10
STF3(x)	1	ort. en iyi	**2,96E+02**	4,32E+01	1,39E+01	8,82E+00	5,02E+00
		std	8,71E+01	1,17E+01	1,69E+00	2,16E+00	8,07E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	8,35E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,49E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	9,33E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,85E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	1,43E+03	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	4,55E-13	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	6,24E+02	2,49E+00	4,77E+00	1,20E+00	1,31E+00
		std	6,99E+01	1,12E+00	1,10E+00	2,31E-01	3,51E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	4,85E+02	1,38E+01	9,50E+00	3,59E+00	3,17E+00
		std	9,14E+01	6,90E+00	1,14E+00	1,27E+00	4,33E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	8,48E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,34E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	8,52E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,36E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	6,87E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	7,89E+01	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	4,96E+02	1,17E+01	8,63E+00	2,61E+00	2,38E+00
		std	8,66E+01	4,56E+00	1,41E+00	7,77E-01	6,05E-01



Şekil 6.7. Algoritmaların f6 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri



Şekil 6.8. Algoritmaların f7 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri

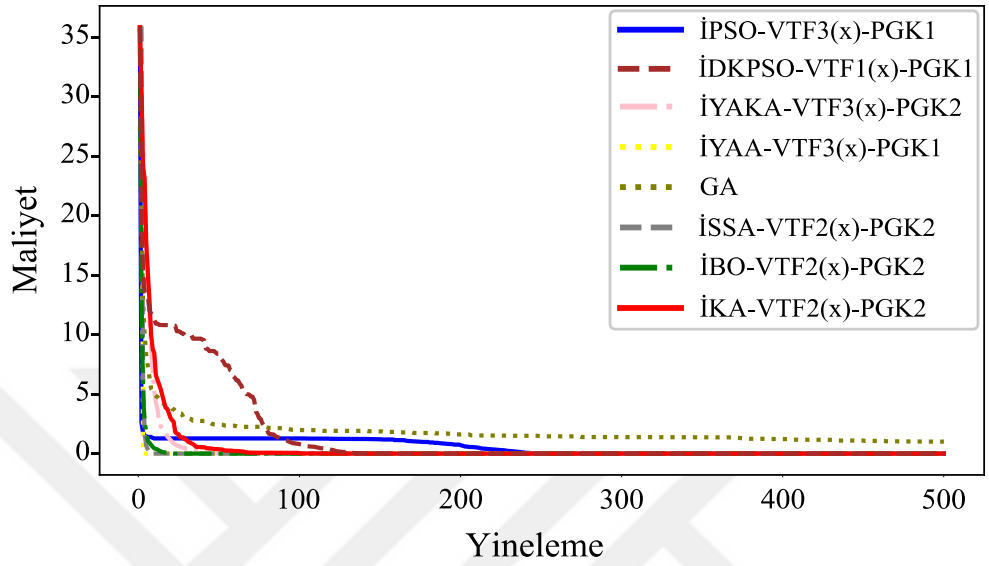


Şekil 6.9. Algoritmaların f8 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri

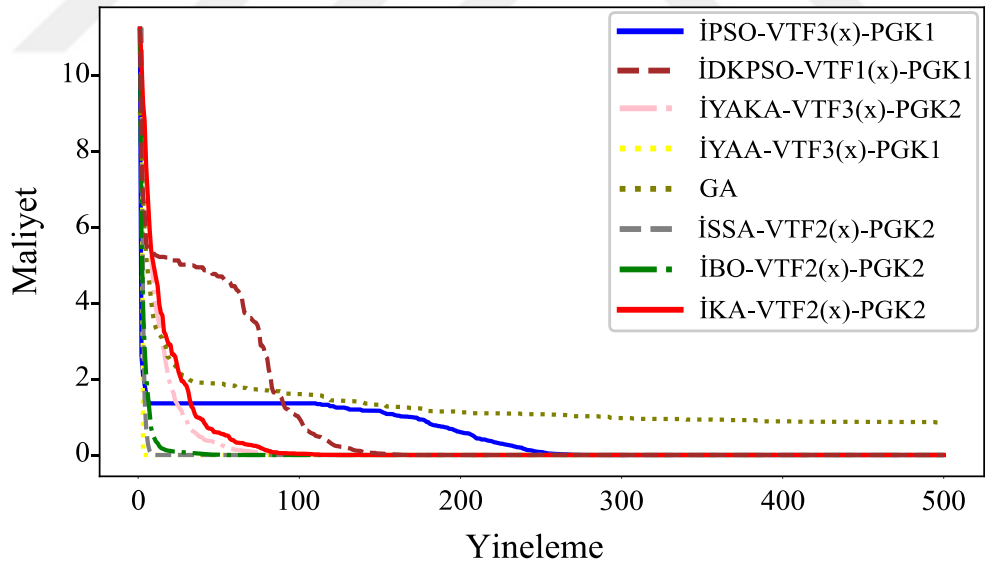
Tablo 6.17 incelendiğinde, çalışmamız kapsamında önerilen İKA yönteminin f6 problemi hariç diğer fonksiyonlarda başarılı sonuçlar sunduğu görülmektedir. Tek-modlu problemlerde başarı gösteren senaryolar, f7-f10 problemlerinde de iyi performans göstermiştir. Dolayısıyla, İKA yönteminin sadece tek-modlu problemlerde değil aynı zamanda çok-modlu problemlerde de rekabetçi çözümler sunduğu görülmektedir.

Şekil 6.7 – 6.11'de algoritmalar için çok-modlu problemler üzerinde yakınsama karakteristiği iyi olan senaryoların ortalama çözüm eğrileri gösterilmektedir. Özellikle

f6 fonksiyonu için elde edilen çözümlerde optimal sonuca ulaşamayan İKA ve İYAA algoritmalarının yakınsamaya devam ettiği görülmektedir. Eğer yineleme sayısı artırılırsa İKA ve İYAA optimale yakın bir sonuç elde etme potansiyeline sahiptir.



Şekil 6.10. Algoritmaların f9 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri



Şekil 6.11. Algoritmaların f10 fonksiyonunda ortalama yakınsama karakteristikleri

Çalışmamız kapsamında kullanılan algoritmaların tek-modlu ve çok-modlu fonksiyonlar üzerinde gösterdikleri performanslar düşünüldüğünde, en iyi performans İYAKA'dan elde edilirken en kötü performansı da GA göstermiştir. Problemleri çözerken kullanılan çeşitli senaryoların, algoritmaların problemi çözme kabiliyetlerini ne kadar derinden etkilediği de görülmektedir. Örneğin, İYAKA'da f6 probleminde

tüm algoritmaların tüm senaryoları arasında en iyi performansı gösteren VTF1(x) – PGK-1 senaryosu f2, f4, f9 ve f10 problemlerinde en iyi sonucu sunamamıştır. Diğer taraftan, VTF3(x) – PGK-1 senaryosu hangi algoritmayla birlikte kullanılırsa kullanılsın 9 farklı problemde en iyi sonuçları sunmayı başarırken, f6 probleminde kayda değer sapmalara neden olmuştur. Bu nedenle, sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına geçiş sürecinde kullanılan transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı kombinasyonlarının, problemleri çözebilmek için ayarlanması gereken bir hiper parametre olduğu düşünülebilir. Çünkü bu senaryolar çözüm kalitesini kayda değer derecede etkilemektedir.

Tablo 6.17. İKA'nın f6 - f10 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f6	f7	f8	f9	f10
STF3(x)	1	ort. en iyi	4,94E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,25E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF1(x)		ort. en iyi	3,35E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,11E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	3,63E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	3,33E-03
		std	1,13E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	1,80E-02
VTF3(x)		ort. en iyi	3,76E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	8,77E+01	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF4(x)		ort. en iyi	4,23E+02	6,89E+00	7,19E+00	1,98E+00	2,24E+00
		std	9,75E+01	4,06E+00	1,47E+00	6,65E-01	6,81E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	**1,34E+02**	1,14E-01	1,06E+00	2,57E-01	6,72E-01
		std	7,74E+01	3,18E-02	2,08E-01	1,38E-01	2,07E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	6,50E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	8,76E+01	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	5,99E+02	**0,00E+00**	**4,44E-16**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
		std	1,52E+02	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	2,54E+02	8,70E-03	3,82E-02	3,27E-02	8,76E-02
		std	1,49E+02	2,49E-02	1,17E-01	6,27E-02	3,44E-02
VTF4(x)		ort. en iyi	5,44E+02	1,35E+01	9,85E+00	2,88E+00	2,74E+00
		std	1,18E+02	6,89E+00	1,75E+00	1,22E+00	6,23E-01

Her ne kadar sürekli arama uzayına sahip problemler olan tek-modlu ve çok-modlu fonksiyonlarda çeşitli çözümler elde edilmiş olsa da asıl odaklanılması gereken problem çeşidi ayrık arama uzayına sahip maksimizasyon problemleridir. Çünkü

çalışmamız kapsamında çözülmesi planlanan BBO problemi, doğası gereği ayrık bir problemdir. Bu nedenle hem problem çeşidinin hem de karar değişkeni boyutunun çözüm kalitesine etkisini araştırabilmek için iki farklı ayrık maksimizasyon problemi iki farklı boyutta tüm algoritmalara çözdürülmüştür. Bu çözümlerden elde edilen istatistiksel göstergeler Tablo 6.18 – 6.25'te gösterilmektedir.

Tablo 6.18'de İPSO'nun ayrık maksimizasyon problemlerinde gösterdiği performans sunulmuştur. Tek-modlu ve çok-modlu fonksiyonlarda İPSO ile birlikte başarılı sonuçlar veren VTF3(x)-PGK-1 senaryosunun maksimizasyon problemlerinde ilerleme kaydedemediği görülmektedir. İPSO algoritması f11 ve f12 problemlerinde herhangi bir boyutta optimal sonucu elde edememiştir ancak STF3(x) – PGK2 senaryosu nispeten başarılı sonuçlar göstermiştir.

Tablo 6.18. İPSO'nun f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f11		f12	
			d:120	d:160	d:120	d:160
STF3(x)	1	ort. en iyi	9,86E+01	1,26E+02	4,63E+00	5,00E+00
		std	1,96E+00	2,68E+00	5,47E-01	4,47E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	1,03E+02	1,35E+02	7,03E+00	7,87E+00
		std	1,49E+00	1,51E+00	5,47E-01	6,70E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	**1,16E+02**	**1,54E+02**	**1,01E+01**	**1,32E+01**
		std	1,50E+00	1,69E+00	1,31E+00	2,03E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	8,45E+01	1,09E+02	3,37E+00	3,80E+00
		std	1,52E+00	2,12E+00	5,47E-01	4,76E-01

Tablo 6.19'da f11 ve f12 fonksiyonları üzerinde İDKPSO algoritmasından elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. İPSO'da olduğu gibi burada da ilk 10 fonksiyonda iyi sonuçlar veren senaryoların başarı gösteremediği görülmektedir. İDKPSO'da kullanılan herhangi bir senaryo optimal sonuca ulaşamamış olup, VTF2(x) – PGK-2 senaryosu nispeten daha iyi sonuç vermiştir. Benchmark fonksiyonlarında gösterdikleri performanslar düşünüldüğünde hem İPSO'nun hem de İDKPSO'nun optimale yakın sonuçlar verebileceği görülmektedir ancak her ikisinde de yerel optimal noktalara takılma problemi olduğu aşikardır. Özellikle ayrık maksimizasyon problemlerinde optimal noktaya göre %35'e kadar sapma gösterebilecekleri dikkate alınması gereken bir durumdur.

Tablo 6.19. İDKPSO'nun f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f11		f12	
			d:120	d:160	d:120	d:160
STF3(x)	1	ort. en iyi	8,49E+01	1,09E+02	3,40E+00	3,73E+00
		std	2,52E+00	2,44E+00	4,90E-01	5,73E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	9,08E+01	1,21E+02	5,30E+00	6,03E+00
		std	2,66E+00	2,64E+00	6,40E-01	7,06E-01
VTF2(x)		ort. en iyi	8,79E+01	1,16E+02	4,57E+00	5,70E+00
		std	2,20E+00	3,12E+00	6,67E-01	1,04E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,60E+00	1,67E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	4,90E-01	4,71E-01
VTF4(x)		ort. en iyi	8,89E+01	1,16E+02	4,67E+00	5,07E+00
		std	1,65E+00	2,31E+00	6,50E-01	6,80E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	9,76E+01	1,27E+02	5,23E+00	5,97E+00
		std	2,09E+00	2,01E+00	9,20E-01	8,36E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	1,03E+02	1,46E+02	1,06E+01	1,76E+01
		std	5,65E+00	6,00E+00	7,57E-01	1,02E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	**1,03E+02**	**1,48E+02**	**1,05E+01**	**1,76E+01**
		std	4,94E+00	6,88E+00	6,19E-01	9,55E-01
VTF3(x)		ort. en iyi	9,51E+01	1,42E+02	1,01E+01	1,73E+01
		std	3,41E+00	2,90E+00	5,39E-01	8,14E-01
VTF4(x)		ort. en iyi	8,18E+01	1,05E+02	3,33E+00	3,53E+00
		std	1,70E+00	1,46E+00	4,71E-01	4,99E-01

Tablo 6.20'de İYAKA'nın ayrık maksimizasyon problemlerinde gösterdiği performans sunulmaktadır. İYAKA, bu problemlerden en iyi sonuçları VTF3(x) – PGK2 senaryosu ile elde etmiştir. İYAKA, f11 probleminde her iki boyutta da optimal

noktaya ulaşabilmeyi başarmıştır. Ancak f12 fonksiyonunda aynı başarıyı gösterememiş ve neredeyse %50 oranında sapma göstermiştir. Burada problemlerin yapısı değiştikçe algoritmaların çözüm kalitesinin de önemli miktarda değişebileceği açıkça görülmektedir. Dolayısıyla, BBO problemini çözmek amacıyla çeşitli algoritmalarda çeşitli senaryoların karşılaştırmalı olarak kullanılmasının ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 6.20. İYAKA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f11		f12	
			d:120	d:160	d:120	d:160
STF3(x)	1	ort. en iyi	**1,20E+02**	1,59E+02	6,10E+00	7,53E+00
		std	**0,00E+00**	5,47E-01	5,97E-01	9,21E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	1,10E+02	1,37E+02	3,87E+00	4,87E+00
		std	9,87E-01	1,31E+00	4,27E-01	7,18E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	1,17E+02	1,51E+02	5,43E+00	6,67E+00
		std	6,51E-01	1,23E+00	7,16E-01	7,45E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	1,16E+02	1,49E+02	4,90E+00	5,77E+00
		std	8,70E-01	1,09E+00	3,96E-01	6,67E-01
VTF2(x)		ort. en iyi	1,15E+02	1,47E+02	4,87E+00	5,83E+00
		std	1,04E+00	1,56E+00	5,62E-01	7,78E-01
VTF3(x)		ort. en iyi	**1,20E+02**	**1,60E+02**	**7,17E+00**	**1,02E+01**
		std	**0,00E+00**	3,40E-01	1,10E+00	1,13E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	1,15E+02	1,47E+02	4,93E+00	5,70E+00
		std	8,36E-01	1,49E+00	6,29E-01	5,86E-01

Tablo 6.21'de İYAA'nın f11 ve f12 problemlerinden elde ettiği sonuçların istatistiksel sonuçları sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde İYAKA'da elde edilen başarının tersi söz konusudur. Yani İYAA algoritması f12 fonksiyonunda her iki boyutta da optimal sonucu 30 farklı çözümde de bulmayı başarırken f11 fonksiyonunda yerel optimale takılmıştır. STF3(x) – PGK1 senaryosuyla f12 probleminde optimal nokta elde edilirken optimal noktaya ulaşılamayan f11 fonksiyonunda nispeten STF3(x) – PGK-2 senaryosu daha iyi sonuç vermiştir. Şunu belirtmek gerekir, İYAA yöntemini öneren

E. Rashedi vd. [102], çalışmamız kapsamında VTF1(x) – PGK-2 olarak belirtilen senaryoyla her iki problemde de optimal sonucu elde etmeyi başardığını gösteren istatistiki veri sunmuştur. Yaptığımız kodlamada hata olması durumunda f12 problemini ve sürekli zamanda çözdürülen diğer fonksiyonları başarılı şekilde çözemeyeceği düşüncesinden hareketle [102]'de sunulan veriler yerine çalışmamız kapsamında elde ettiğimiz sonuçlar paylaşılmıştır.

Tablo 6.21. İYAA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f11		f12	
			d:120	d:160	d:120	d:160
STF3(x)	1	ort. en iyi	8,06E+01	1,05E+02	**1,50E+01**	**2,00E+01**
		std	1,71E+00	1,87E+00	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF1(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	**1,50E+01**	1,93E+01
		std	0,00E+00	0,00E+00	**0,00E+00**	4,42E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	**8,78E+01**	**1,12E+02**	2,87E+00	3,07E+00
		std	2,19E+00	2,16E+00	4,27E-01	3,59E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	8,16E+01	1,05E+02	3,30E+00	3,67E+00
		std	1,60E+00	1,74E+00	4,58E-01	5,37E-01

Tablo 6.22'de GA'dan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her iki ayrık maksimizasyon problem tipinde de optimal sonuca ulaşamadığı görülmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi GA kullanarak makul sonuçlar elde edebilmek için parametre optimizasyonu yapılmalıdır.

Tablo 6.23'te İSSA'nın VTF1(x) – PGK1 fonksiyonuyla f11 probleminde göz ardı edilebilecek bir standart sapmayla optimal sonuca ulaşabildiği ve f12 probleminde

optimal sonuca önemli derecede yaklaştığı görülmektedir. Tek-modlu ve Çok-modlu fonksiyonların 9'unda rekabetçi çözümler sunan İSSA, ikili maksimizasyon problemlerinde de başarılı bir performans göstermiştir. Diğer taraftan Tablo 6.24 incelendiğinde, İBO algoritmasının ayrık çözüm uzayına sahip maksimizasyon problemlerinde başarı gösteremediği görülmektedir.

Tablo 6.22. GA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans

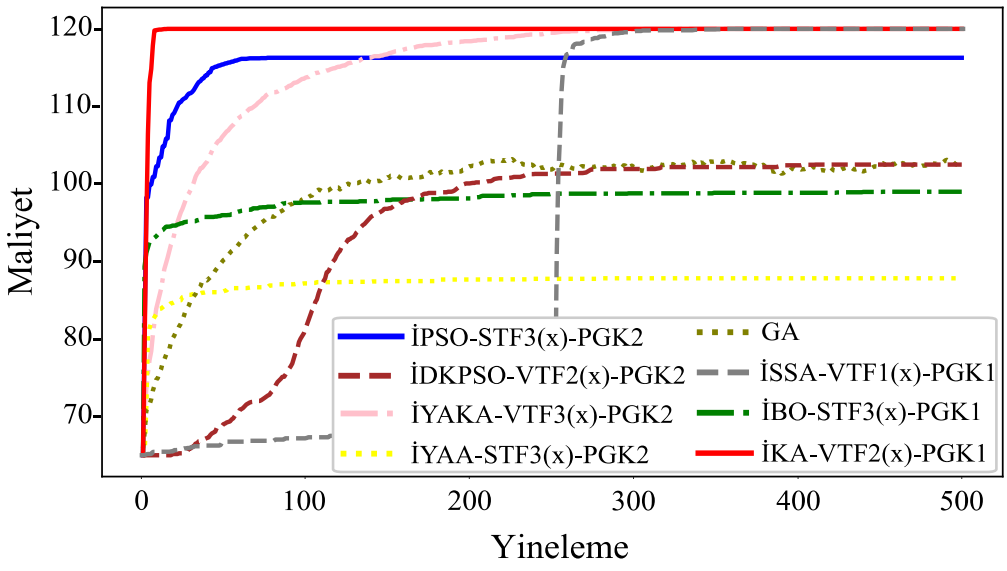
Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f11		f12	
			d:120	d:160	d:120	d:160
N/A	N/A	ort. en iyi	1,02E+02	1,31E+02	3,67E+00	4,27E+00
		std	4,56E+00	5,51E+00	6,99E-01	8,92E-01

Tablo 6.23. İSSA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans

Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f11		f12	
			d:120	d:160	d:120	d:160
STF3(x)	1	ort. en iyi	1,15E+02	1,54E+02	1,18E+01	1,48E+01
		std	1,52E+00	1,20E+00	8,83E-01	1,28E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	**1,20E+02**	**1,60E+02**	**1,49E+01**	**1,95E+01**
		std	2,49E-01	4,99E-01	3,00E-01	5,62E-01
VTF2(x)		ort. en iyi	1,16E+02	1,53E+02	1,13E+01	1,47E+01
		std	9,78E-01	1,80E+00	1,13E+00	1,66E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	6,75E+01	8,80E+01	1,40E+00	1,53E+00
		std	2,51E+00	2,52E+00	4,90E-01	4,99E-01
VTF4(x)		ort. en iyi	8,90E+01	1,17E+02	2,73E+00	3,20E+00
		std	2,85E+00	3,39E+00	5,73E-01	6,00E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	7,57E+01	9,79E+01	3,07E+00	3,03E+00
		std	1,57E+00	1,84E+00	2,49E-01	1,80E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	1,11E+02	1,48E+02	9,63E+00	1,31E+01
		std	3,20E+00	4,88E+00	1,89E+00	1,80E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	1,08E+02	1,45E+02	8,60E+00	1,07E+01
		std	3,47E+00	5,54E+00	2,22E+00	1,91E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	9,05E+01	1,19E+02	1,43E+00	1,53E+00
		std	5,30E+00	5,59E+00	4,96E-01	4,99E-01
VTF4(x)		ort. en iyi	8,09E+01	1,06E+02	3,00E+00	3,07E+00
		std	2,68E+00	2,71E+00	2,58E-01	2,49E-01

Tablo 6.24. İBO'nun f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans

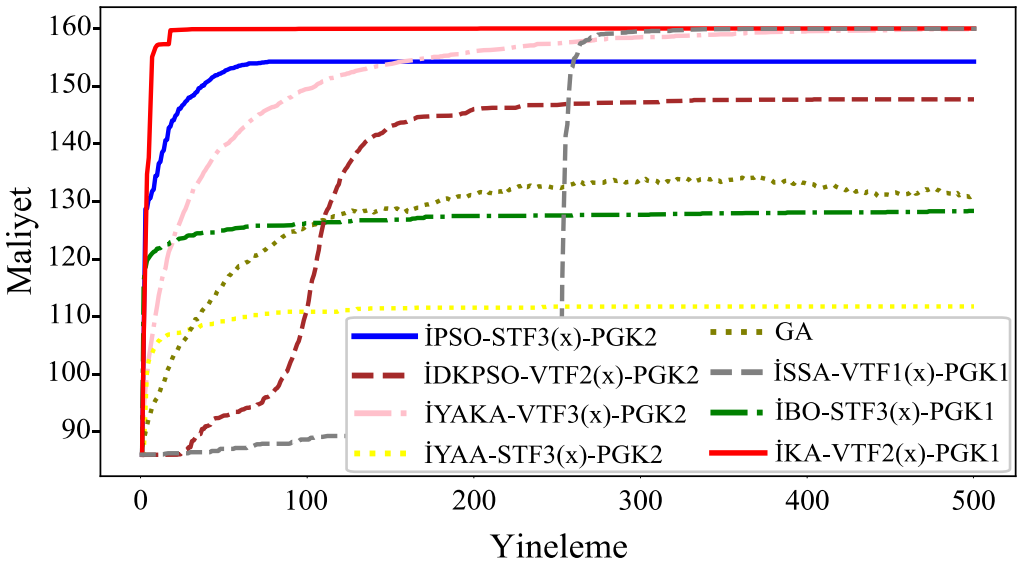
Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f11		f12	
			d:120	d:160	d:120	d:160
STF3(x)	1	ort. en iyi	**9,90E+01**	**1,28E+02**	**5,67E+00**	**6,50E+00**
		std	1,75E+00	1,32E+00	5,96E-01	5,63E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	6,96E+01	8,86E+01	2,23E+00	2,37E+00
		std	1,25E+00	1,62E+00	4,23E-01	4,82E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	8,19E+01	1,05E+02	3,20E+00	3,53E+00
		std	1,61E+00	2,30E+00	4,00E-01	5,62E-01
VTF1(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,00E+00	1,00E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	8,07E+01	1,04E+02	3,13E+00	3,40E+00
		std	1,39E+00	1,38E+00	3,40E-01	4,90E-01



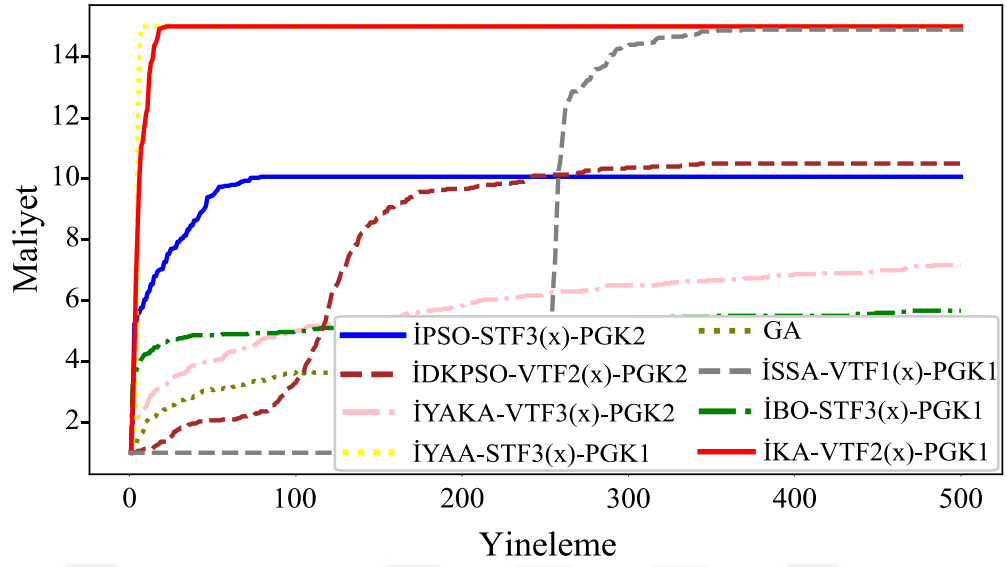
Şekil 6.12. Algoritmaların f11, d:120 fonksiyonunda ortalama yakınsama eğrileri

Tablo 6.25. İKA'nın f11 ve f12 fonksiyonlarında gösterdiği performans

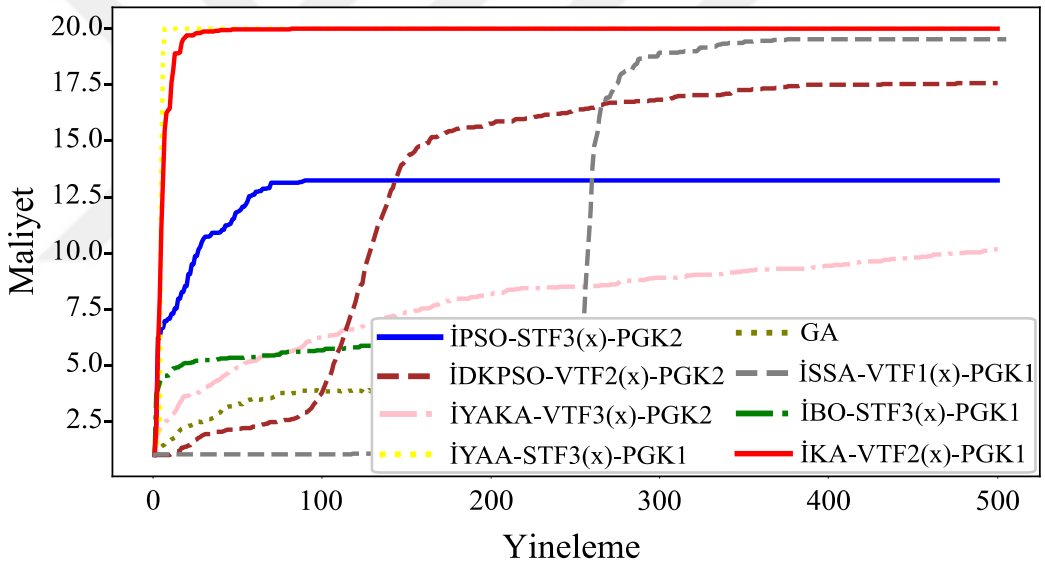
Transfer Fonksiyonu	Pozisyon Güncelleme Kuralı		f11		f12	
			d:120	d:160	d:120	d:160
STF3(x)	1	ort. en iyi	**1,20E+02**	**1,60E+02**	**1,50E+01**	**2,00E+01**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF1(x)		ort. en iyi	**1,20E+02**	**1,60E+02**	**1,50E+01**	**2,00E+01**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF2(x)		ort. en iyi	**1,20E+02**	**1,60E+02**	**1,50E+01**	**2,00E+01**
		std	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**	**0,00E+00**
VTF3(x)		ort. en iyi	6,50E+01	8,60E+01	1,93E+00	2,73E+00
		std	0,00E+00	0,00E+00	2,39E+00	3,48E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	1,14E+02	1,50E+02	1,11E+01	1,34E+01
		std	8,36E-01	7,18E-01	5,39E-01	8,79E-01
STF3(x)	2	ort. en iyi	8,36E+01	8,95E+01	6,00E+00	6,77E+00
		std	1,86E+01	1,31E+01	1,21E+00	1,12E+00
VTF1(x)		ort. en iyi	1,09E+02	1,45E+02	6,93E+00	8,27E+00
		std	5,85E+00	6,14E+00	2,13E+00	2,58E+00
VTF2(x)		ort. en iyi	1,10E+02	1,45E+02	6,73E+00	8,40E+00
		std	6,21E+00	7,93E+00	1,67E+00	2,65E+00
VTF3(x)		ort. en iyi	1,18E+02	1,56E+02	8,80E+00	1,26E+01
		std	1,37E+00	2,23E+00	2,96E+00	4,77E+00
VTF4(x)		ort. en iyi	8,45E+01	1,10E+02	3,23E+00	3,73E+00
		std	2,23E+00	2,75E+00	4,23E-01	5,73E-01



Şekil 6.13. Algoritmaların f11, d:160 fonksiyonunda ortalama yakınsama eğrileri



Şekil 6.14. Algoritmaların f12, d:120 fonksiyonunda ortalama yakınsama eğrileri



Şekil 6.15. Algoritmaların f12, d:160 fonksiyonunda ortalama yakınsama eğrileri

Tablo 6.25'te İKA'nın f11 ve f12 fonksiyonları üzerindeki 30 bağımsız çözümünden elde edilen en iyi sonuçların ortalaması ve standart sapması sunulmuştur. İKA, f11 ve f12 fonksiyonlarında, farklı boyutlarda, 30 bağımsız çözümün 30'unda da optimal sonucu elde etmeyi başarmıştır. Üstelik bu başarı STF3(x) – PGK-1, VTF1(x) – PGK-1 ve VTF2(x) – PGK-1 olmak üzere üç farklı senaryoda elde edilmiştir. Sonuç olarak, tek-modlu ve çok-modlu fonksiyonların 9'unda başarılı sonuçlar elde eden İKA yöntemi, ikili maksimizasyon problemlerinde üç farklı senaryoyla diğer algoritmalara üstün gelmiştir.

Şekil 6.12 – 6.15'te ayrık maksimizasyon problemlerinde algoritmaların gösterdiği yakınsama karakteristikleri sunulmuştur. Problemlerin her ikisinde de İKA yöntemi başlangıç yinelemelerde optimal sonucu elde edebilirken, İSSA yaklaşımı yaklaşık 250 yinelemeden itibaren optimal çözüme yakınsamaya başlamaktadır. Sürekli problemlerde başarı gösteren İYAKA yönteminin yakınsama eğimi bu problemlerde oldukça küçüktür. İPSO algoritması yinelemelerin başlarında yerel optimal bölgelere takılmış ve bu bölgelerin dışına çıkamamıştır.

Benchmark fonksiyon çözümleri çalışmamız kapsamında BBO problemini çözmek için kullanılan algoritmaların karşılaştırmalı analizi açısından önemli veriler sağlamaktadır. Öncelikle bahsedilen algoritmaların her biri BBO problemini çözebilme potansiyeline sahiptir çünkü birçok problemle başa çıkmayı başarmışlardır. Ancak İYAKA, İYAA, İSSA ve İKA yöntemleri ayrık çözüm uzayına sahip problemlerde gösterdikleri başarıyla bir adım öne çıkmışlardır.

6.2. Wilcoxon İşaretli Sıra Testi (Wilcoxon Signed-Rank Test)

Sezgi-üstü algoritmaların performans değerlendirmesinde minimum, maksimum ve standart sapma gibi istatistiksel verilerin incelenmesi önemli olmasına rağmen yeterli değildir. Bu nedenle, J. Derrac ve diğ. tarafından sezgi-üstü algoritmaları karşılaştırabilmek amacıyla bir yöntem olarak parametrik olmayan istatistiksel testlerin kullanımıyla ilgili bir pratik çalışma yapılmıştır [146]. Bu çalışma içerisinde bulunan Wilcoxon işaretli sıra testinin ikili karşılaştırmalarda etkili sonuçlar veren güvenilir bir parametrik olmayan istatistiksel gösterge olduğu görülmektedir.

Çıkarım yönteminin kullanıldığı istatistiksel yaklaşımda, verilen datalardan belirli çıkarımlar yapabilmek için iki hipotez tanımlanmaktadır. Bunlar, geçersiz hipotez (null hypotesis, H_0) ve alternatif hipotez (H_1) olarak isimlendirilirler. Geçersiz hipotez karşılaştırılan veri setleri arasında kayda değer bir farklılık bulunmadığı çıkarımını yaparken; alternatif hipotez sonuçlar arasında önemli sapmalar tespit edildiğini gösterir. Geçersiz hipotezin reddedilmesi, veri setleri arasındaki farklılığı ispatlamaktadır. Ancak, bir hipotezi reddedebilmek için bir göstergeye ihtiyaç duyulur. Hipotezin hangi seviyede reddedilebileceğini belirlemek için α önem seviyesi kullanılmaktadır.

Önceden belirlenmiş bir önem seviyesini kullanmak yerine geçersiz hipotezin reddine sebep olacak en küçük seviyenin hesaplanması da mümkündür. Başlangıçta önem seviyesi belirtilmeden veri setinin benzerliği hakkındaki en küçük önem seviyesini verebilen yaklaşım p-değeri[1] (p-value) olarak adlandırılmaktadır. Bahsedilen p-değeri ne kadar küçük olursa, geçersiz hipotezin reddedilmesi de o kadar güçlü olmaktadır. Başka bir ifadeyle iki farklı algoritmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılırken kullanılan veri setleriyle bir p-değeri elde edilmektedir. Hesaplanan p-değeri ne kadar küçük çıkarsa algoritmalar arasındaki performans farkı da o kadar yüksek demektir. Örneğin, bahsedilen p-değerinin 0.01 çıktığını varsayarsak veri setlerinin birbirlerine benzeme olasılığının %1 olduğu sonucuna ulaşırız. Yani, %99 ihtimalle bu iki veri seti birbirinden farklıdır çıkarımını yapmış oluruz.

Wilcoxon işaretli sıra testi verilen iki farklı popülasyon arasında gerçekten kayda değer bir fark olup olmadığını gösteren ve parametrik olmayan ikili karşılaştırma yöntemidir. Algoritmaların performansı arasında önemli bir fark bulunup bulunmadığını görebilmek için kullanılabilecek etkili bir istatistiksel çıkarım göstergesidir. Bu yöntemde temel olarak iki veri setinin farkı alınır ve elde edilen sonuçlar mutlak değer içinde sıralanır. Daha sonra sıra numaraları toplanmaya başlanır. Burada ilgili sırada hangi algoritma daha üstün gelmiş ise sıra numarası o algoritmanın hanesinde toplanır. Eğer iki veri setinin bazı sonuçları arasındaki farklar 0 ise ilgili sıralamaların yarısı her iki veri setine de atanır. Yöntemin matematiksel ifadesi Eşitlik (6.1) ve (6.2)'de verilmiştir.

$$S^{+}=\sum_{f_i>0} \text{sıra}(f_i)+\frac{1}{2}\sum_{f_i=0} \text{sıra}(f_i) \tag{6.1}$$

$$S^{-}=\sum_{f_i<0} \text{sıra}(f_i)+\frac{1}{2}\sum_{f_i=0} \text{sıra}(f_i) \tag{6.2}$$

S^{+} birinci algoritmanın ikinci algoritmaya üstün geldiği sıralamaların toplamını, f_i iki algoritmanın i. sonuçları arasındaki farkı, sıra(f_i) elde edilen farkın diğer tüm farklar ile karşılaştırılarak sıralanmasıyla belirlenen sıra numarasını ve S^{-} ikinci algoritmanın birinciden daha iyi olduğu sıralamaların toplamını temsil etmektedir.

[1] Burada bahsedilen p-value, probability-value teriminin kısaltması olup bir olasılık değeridir.

Tablo 6.26. Wilcoxon sıralama testine basit bir örnek

Sıra No	Wilcoxon Sıra No	A Algoritmasından elde edilen en iyi sonuçlar	B Algoritmasından elde edilen en iyi sonuçlar	Fark	Üstünlük Durumu	Mutlak Değer Fark
1	-	30	45	-15	A B'den üstün	15
2	-	35	48	-13	A B'den üstün	13
3	-	40	68	-28	A B'den üstün	28
4	-	32	25	7	B A'dan üstün	7
5	-	52	75	-23	A B'den üstün	23
6	-	70	35	35	B A'dan üstün	35
7	-	38	90	-52	A B'den üstün	52
4	**1**	32	25	7	B A'dan üstün	7
2	**2**	35	48	-13	A B'den üstün	13
1	**3**	30	45	-15	A B'den üstün	15
5	**4**	52	75	-23	A B'den üstün	23
3	**5**	40	68	-28	A B'den üstün	28
6	**6**	70	35	35	B A'dan üstün	35
7	**7**	38	90	-52	A B'den üstün	52

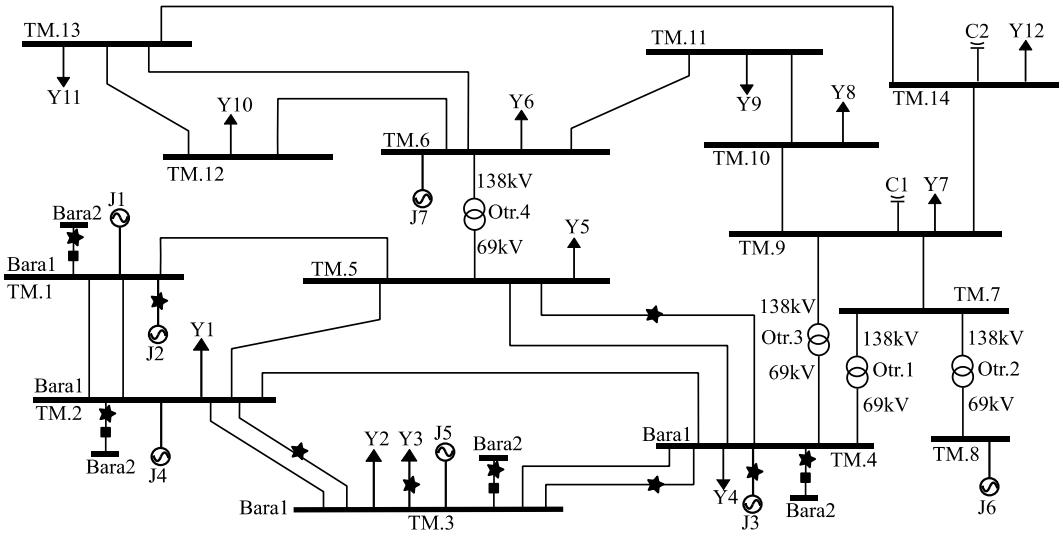
Wilcoxon testinde işleyen sürecin daha iyi anlaşılması amacıyla Tablo 6.26'da verilen veri seti incelenecektir fakat normal şartlarda sadece 7'şer elemanı bulunan iki veri setinin karşılaştırılması uygun değildir. Veri setlerinde 20 ila 30 eleman bulunması testin doğruluğu için daha uygun olmaktadır. Ancak bu örnekte yöntemin anlaşılması amacıyla veri seti dar tutulmuştur. Burada 7 bağımsız çalıştırmayla A ve B algoritmalarından elde edilen en iyi sonuçlar ilk 7 satırda verilmiştir. Sonuçların farkı alınmış ve hangisinin daha üstün geldiği belirtilmiştir. Sonuçlar arasındaki farkların işaretleri kaldırılmıştır. Mutlak değer sütununda bulunan değerlere göre veri seti tekrar sıralanmıştır. Bu sıralama tablonun ikinci 7 satırında görülmektedir. Görüldüğü gibi ikinci 7 satırda tekrar sıralanan veri setine Wilcoxon sıralama numarası atanmıştır. Tablonun ikinci bölümünde A'nın B'den üstün geldiği 2., 3., 4., 5. ve 7. satırlarda bulunan Wilcoxon sıralama numarasının toplamı $S^{+} = 21$ olarak hesaplanmaktadır. Diğer taraftan, sadece 1. ve 6. satırlarda B A'dan üstün gelmiş ve $S^{-} = 7$ olarak hesaplanmıştır.

Wilcoxon sıralama testi tablosunda veri setinde bulunan eleman sayısına ve α önem derecesine göre verilmiş referans değerler bulunmaktadır. Veri setimizden elde

ettiğimiz S^+ ve S^- sonuçlarından küçük olanı alınarak bu tabloda bulunan ilgili değerle karşılaştırılır. Eğer elde edilen sonuç, tabloda verilen değerden daha küçük veya eşit ise bu iki veri seti arasında kayda değer bir farklılık vardır sonucu ortaya çıkarak geçersiz hipotez reddedilir. Örneğimizde küçük olan $S^- = 7$ değeri Wilcoxon tablosunda hem tek kuyruklu test (one-tailed) hem de çift kuyruklu test (two-tailed) değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. A ve B algoritmaları yalın haliyle incelendiğinde A veri setinin B veri setinden çok daha iyi sonuçlar verdiği görülebilir. Ancak istatistiksel olarak geçersiz hipotez, bir başka ifadeyle sıfır hipotezi, reddedilememiştir. Bunun anlamı bu iki veri seti arasında kayda değer bir farkın bulunmadığıdır.

6.3. IEEE 14-Baralı Test Sistemi ve Sonuçlar

IEEE 14-baralı test sisteminde 138 kV ve 69 kV olmak üzere iki gerilim seviyesi bulunmaktadır. Bu iki gerilim seviyesi arasındaki bağlantı bara-5 - bara-6, bara-4 - bara-9 ve bara-4 – bara-7 arasına yerleştirilen Otr.ler aracılığıyla sağlanmaktadır. [147]'den alınan verilere göre normalde 5 adet jeneratör bulunmakta olup, bunların sadece iki tanesi üretim yapmaktadır. Diğer üç jeneratör ise sisteme reaktif güç desteği sağlamaktadır. Sistemde bara-1'e bağlı olan jeneratör yaklaşık 230 MW üretim yapmakta iken bara-2'ye bağlı jeneratörde 40 MW'lık bir üretim miktarı bulunmaktadır. Görüldüğü üzere üretim açısından IEEE 14-baralı test sistemi bara bölme ve düzenleme işlemi için uygun bir sistem değildir çünkü 230 MW'lık bir üretim birimini hangi baraya alırsak alalım kısıt analizinde başarı sağlanamayacaktır. Diğer taraftan, toplam 11 adet tüketim birimi bulunan sistemde en büyük yük bara-3'e bağlı ve 97 MW güç çekmektedir. Güç akışları incelendiğinde bu şekilde büyük bir yükle bara düzenlemesi yapmanın aşırı yüklenmeler sebebiyle uygun olmayacağı görülmektedir. Sistemde bara-9'a bağlı bir şönt kapasitör bulunurken sistemin tamamında 17 adet EİH bulunmaktadır. Bara bölme işleminden sonra baralarda ikiden daha az EİH bağlantısı bulunmaması gerekir. Bu nedenle BBO problemini çözebilmek için sisteme EİH eklenmesine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Sistemde bulunan jeneratör ve yüklere bağlanan transformatörlerin eşdeğer empedansı sırasıyla %9 ve %12,5 olarak ayarlanmıştır.



Şekil 6.16. Değiştirilmiş IEEE 14-baralı test sistemi

Belirtilen değişiklikler yapılmadığı taktirde herhangi bir algoritmayla makul sonuçlar alınamayacağı için karşılaştırma yapılamayacaktır. Dolayısıyla Bara Bölme Optimizasyonu probleminde kullanabilmek için IEEE 14-baralı test sisteminde bazı değişiklikler yapılmıştır. Yapılan değişiklerin daha iyi anlaşılması amacıyla Şekil 6.16'da değiştirilmiş IEEE 14-baralı test sistemi sunulmuştur [148]. Öncelikle orijinal sistemde bara-1, bara-2 vb. şekilde yapılan adlandırmalar, trafo merkezinin kısaltması olan TM olarak isimlendirilmiştir. Jeneratörlerin barasını değiştirerek güvenli bir sistem işletimi sağlanabileceğini gösterebilmek amacıyla TM-1'e bağlı büyük jeneratörün üretim miktarı 80 MW'a düşürülmüş ve 1 adet 80 MW üretimi bulunan jeneratör ayrıca eklenmiştir. Bunun dışında TM-4'e de bir adet 80 MW'lık jeneratör dahil edilmiştir.

Test sisteminde bara yerine TM notasyonu kullanılmasının nedeni iki baralı TM'ler oluşturulmasıdır. Bu doğrultuda, TM-1, TM-2, TM-3 ve TM-4 iki baralı TM olarak tasarlanmıştır. Yani, sadece bu TM'lerin baralarında kuplaj bölme ihtimali bulunmaktadır. TM-1 – TM-2, TM-2 – TM-3, TM-3 – TM-4 ve TM-4 - TM-5 arasına EİH eklemesi yapılmıştır. Eklenen tüm EİH'ler paralelindeki hat ile tamamen özdeş yapılmıştır. Eklenen EİH'ler ile birlikte TM-1'e bağlanan üç adet EİH bulunmaktadır ve bu nedenle TM-1 algoritmalar tarafından bölünebilecek baralar listesinin dışına alınmalıdır. Dolayısıyla değiştirilmiş IEEE-14 baralı test sisteminde sadece 3 TM'de bara bölme işlemi uygulanacaktır. Bunların dışında TM-3'e bağlı olan 94 MW'lık

büyük tüketim birimi ikiye bölünmüştür. Yapılan güncellemelerin tamamı Şekil 6.16'da yıldız işareti ile gösterilmiştir. IEEE 14-baralı test sisteminde iletim hatlarının yüklenme sınırları tanımlanmamıştır. Ancak, N-1 analizi esnasında sistemin performansını değerlendirebilmek için EİH termal yüklenme sınırlarının belirtilmesi gerekmektedir. BBO probleminde kullanılmak üzere eklenen EİH yüklenme sınırları ile birlikte karakteristik bilgiler Tablo 6.27'de verilmiştir.

Tablo 6.27. Değiştirilmiş IEEE 14-baralı test sistemi EİH bilgileri

Başlangıç Barası	Bitiş Barası	Direnç	Reaktans	Süseptans	Yüklenme Sınırı
TM-1	TM-2	0,01938	0,05917	0,0528	120
TM-1	TM-2	0,01938	0,05917	0,0528	120
TM-1	TM-5	0,01938	0,05917	0,0528	120
TM-2	TM-4	0,05811	0,17632	0,034	65
TM-2	TM-5	0,05695	0,17388	0,0346	50
TM-2	TM-3	0,04699	0,19797	0,0438	25
TM-2	TM-3	0,04699	0,19797	0,0438	25
TM-3	TM-4	0,06701	0,17103	0,0128	65
TM-3	TM-4	0,06701	0,17103	0,0128	65
TM-4	TM-5	0,01335	0,04211	0	60
TM-4	TM-5	0,01335	0,04211	0	60
TM-6	TM-11	0,09498	0,1989	0	18
TM-6	TM-12	0,12291	0,25581	0	32
TM-6	TM-13	0,06615	0,13027	0	32
TM-7	TM-9	0	0,11001	0	55
TM-9	TM-10	0,03181	0,0845	0	32
TM-9	TM-14	0,12711	0,27038	0	32
TM-10	TM-11	0,08205	0,19207	0	12
TM-12	TM-13	0,22092	0,19988	0	12
TM-13	TM-14	0,17093	0,34802	0	12

IEEE 14-baralı test sisteminde simetrik olmayan arızaların analizini yapabilmek için ihtiyaç duyduğumuz simetrili bileşen reaktansları bulunmamaktadır. Dengeli arıza tipi olan üç faz kısa devre akımlarını hesaplayarak, algoritmaların performansını değerlendirebileceğimiz için simetrili bileşen reaktanslarının eklenmesine ihtiyaç duyulmamıştır. Şekil 6.16'da verilen değiştirilmiş IEEE 14-baralı test sisteminde TM-2, TM-3 ve TM-4'te bara bölme ve düzenleme işlemi yapılarak kısa devre akımları N-1 kriterleri dahilinde sınırlandırılabilir. Başlangıçta kuplaj kesicilerin hepsi kapalı iken

sistemde hesaplanan kısa devre akımlarından 9 kA'i aşan baralar Tablo 6.28'de verilmiştir.

Tablo 6.28. Değiştirilmiş IEEE 14-baralı test sisteminde tüm kuplaj kesiciler kapalı iken hesaplanan 3-faz kısa devre arıza akımları

Bara Adı (69 kV)	3-Faz Arıza (Amper)
TM-1	**15365,1**
TM-2	13764
TM-3	9665,6
TM-4	13127,5
TM-5	11894,2

Tablo 6.28'de görüldüğü gibi TM-1'de kısa devre akımları 15.365 kA seviyesinde çıkmaktadır. Böyle bir sistemde TM'lerde bulunan kesicilerin maksimum akım kesme kapasitesinin 14 kA olduğunu varsayalım. Bu varsayımla birlikte TM-1'de hesaplanan KDA seviyesi kabul edilebilir sınır içerisinde değildir. Dolayısıyla, böyle bir sistemde mutlaka önlem alınması gerekir. TM-1'de kuplaj kesici bulunmasına rağmen yeterli sayıda EİH bulunmadığı için bara bölme işlemi gerçekleşemeyecektir. Bunun anlamı, TM-1'de hesaplanan KDA'nın farklı TM'lerde bölünen baralar ile sınırlandırılabileceğidir.

TM-2'de 6 EİH, 4 Tr., TM-3'de 4 EİH 3 Tr. ve TM-4'te 5 EİH, 2 Tr., 2 Otr. bulunmaktadır. Her TM'de bir adet Tr.ün konumu sabitlendiği taktirde TM-2'de 50, TM-3'de 12 ve TM-4'te 80 farklı bara düzeni oluşturulabilir. Bara düzenleri eş zamanlı olarak değiştirilebileceği için bu üç TM'de 48,000 bara düzeni senaryosundan bahsedebiliriz. Elbette bu senaryolar içerisinde sistem durumunu önemli derecede etkilemeyen küçük çaplı bir transformatörün bara değişimi de bulunmaktadır fakat neticede bu ihtimalin de değerlendirilmesi olasılıklar dahilinde olmalıdır. Bu kadar basit bir sistemde dahi karşılaşılan senaryo miktarı, manuel olarak denenmesi mümkün olmayan bir seviyededir. Dolayısıyla, KDA'yı sınırlandırırken N-1 kriterlerine dikkat etme konusunda geliştirilen yöntemlerin ISO'lara karar süreçlerinde etkin faydaları olacağı düşünülmektedir.

Tablo 6.29. Sezgi-üstü algoritmalarda kullanılan parametreler

Parametreler	GA	İPSO	İDKPSO	İYAKA	İYAA	İBO	İSSA	İKA
Popülasyon Sayısı	30	30	30	30	30	30	30	30
Yineleme Sayısı	100	100	100	100	100	100	100	100
Çaprazlama Oranı	0,8	-	-	-	-	-	-	-
Maks. ve Min. Çaprazlama Oranı	0,02 ve 0,005	-	-	-	-	-	-	-
Mutasyon Oranı için Maks. ve Min. Tekrarlama Sayısı	8 ve 2	-	-	-	-	-	-	-
Maks. ve Min. Atalet Ağırlığı	-	0,65 ve 0,1	0,4 ve 0,1	-	-	-	-	-
C1 ve C2 katsayıları	-	2,05 ve 2,05	2,05	-	-	-	-	-
Alt Sınır	-	-4	-4	-4	-6	-	0	-4
Üst Sınır	-	4	4	4	6	-	1	4
Başarısızlık Sınırı	-	-	-	60	-	-	-	-
İşçi ve Gözcü Arı	-	-	-	%50 - %50	-	-	-	-
Epsilon	-	-	-	-	0,01	-	-	-
ke, mu1,mu2, C1b, C1p	-	-	0,2 - 5 - 3,9617 - 1,6 - 0,4	-	-	-	-	-

Tablo 6.29'da çalışma kapsamında kullanılan sezgi-üstü algoritmalarda belirlenmiş parametrelerin değerleri gösterilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi İYAA, İBO, İSSA ve İKA algoritmalarında ayarlanması gereken parametre sayısı yok denecek kadar azdır. Tüm algoritmalarda çözüm uzayının büyüklüğüne göre popülasyon ve yineleme sayılarının belirlenmesi gerekir. Ancak, GA, İPSO, İDKPSO ve İYAKA metotlarında ayarlanması gereken parametre sayısı fazladır. Çalışmamız kapsamında parametre değerlerinin maksimum faydayı sağlayacak şekilde belirlenmesine gayret gösterilmiştir. Bununla birlikte parametreleri optimize edecek bir yaklaşıma başvurulmamıştır. Benchmark fonksiyonlarında başarılı sonuçlar sunmalarına rağmen IEEE 14-baralı test sisteminde başarılı sonuçlar alınamayan İYAKA algoritması için [107]'de belirtilen özel teknikler kullanılırken; İYAA algoritması için [138]'de önerilen yaklaşımlardan faydalanılmıştır.

IEEE 14-baralı test sisteminde yapılan analizlerde maliyet hesabı yapılırken N-1 durumunda meydana gelen yüklenme miktarları ve gerilim bozulmaları görünür güç ve reaktif güç performans endekslerine göre yapılmıştır. Ayrıca, bara bölme maliyeti

bölünme başına 25 puan olarak seçilmiştir. Yani iki TM'de bara bölünmesi durumunda maliyete katkısı 50 puan olacaktır. Bölüm 3'te anlatılan kademeli maliyet hesabı burada kullanılmamıştır. Yani EİH'lerin açma sınırını geçmesiyle daha yüksek bir üstel ifadeye maruz kalması durumu burada yansıtılmamıştır. Çünkü, IEEE 14-baralı test sisteminde yaptığımız analizlerdeki amacımız tam güvenli bir güç sisteminin oluşturulması değildir. Burada uygulanan analizlerin amacı, BBO probleminin arama uzayında eşit şartlarda keşif yapan algoritmaların ne kadar iyi yakınsadığını görebilmektir. Başka bir ifadeyle, oluşturulan topolojinin kusursuz olması beklenmemekte ve sorunsuz olmasa bile iyi topolojiler elde edebilen algoritmaların tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

6.3.1. İkili kâşif algoritmasıyla IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

İKA kullanılarak yapılan 30 elemanlı ve 100 yinelemeli bağımsız analizler neticesinde farklı senaryolar için elde edilen en iyi çözümler Tablo 6.30 – 6.49'da verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi çalışmamız kapsamında 1 adet S-Şekilli ve 4 adet V-Şekilli transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyonların her biri için iki farklı pozisyon güncelleme kuralı denenmiştir. Bu sebeple, bir algoritma için 10 farklı senaryo oluşmuş ve dolayısıyla 300 farklı çözüm elde edilmiştir. Şunu belirtmek gerekir: Eşitlik 4.51'de verilen $D_{ij}=\|x_i-x_j\|$ ifadesinde ikili düzende temsilcilerin ilgili boyutları arasındaki fark kullanılabileceği gibi hamming mesafesi (hamming distance) olarak adlandırılan teknik de kullanılabilmektedir. Hamming mesafesi iki veri setinin tüm boyutları arasındaki toplam farkı göstermektedir. Yapılan ön analizler neticesinde D_{ij} mesafesinin İKA performansını kayda değer şekilde etkilediği görülmüştür. Bu nedenle, diğer algoritmalarda 10 senaryo test edilirken Kâşif Algoritmasında hamming mesafeli ve normal mesafeli D_{ij} değişkeninin farkını görebilmek amacıyla 20 senaryo kullanılmıştır.

Hamming mesafesi kullanılan İKA (HİKA) algoritmasının IEEE 14-baralı test sisteminde bulabildiği en başarılı çözüm Tablo 6.39'da yer alan 185,78'dir. Bu kalitedeki bir cevap çalışmamız kapsamında ilk defa önerilen VTF4(x) transfer fonksiyonuyla ve PGK-2 pozisyon güncelleme kuralıyla elde edilmiştir.

Tablo 6.30. Hamming mesafeli KA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	196,00	7	328,55	13	679,11	19	1348,25	25	2523,67
2	215,59	8	333,26	14	702,71	20	1348,25	26	2736,32
3	215,59	9	333,26	15	749,42	21	1350,82	27	3261,39
4	216,45	10	333,26	16	1163,99	22	1455,84	28	7563,56
5	222,37	11	333,26	17	1163,99	23	1729,05	29	7755,98
6	223,60	12	640,29	18	1249,82	24	2143,02	30	8625,11

Tablo 6.31. Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189,66	7	215,59	13	223,60	19	622,00	25	6948,76
2	213,63	8	215,59	14	235,92	20	715,31	26	7492,38
3	213,63	9	215,59	15	263,13	21	749,42	27	7957,70
4	213,63	10	216,45	16	296,95	22	1188,93	28	8655,88
5	215,59	11	222,37	17	296,95	23	1583,00	29	8655,88
6	215,59	12	223,60	18	331,34	24	2639,69	30	8763,72

Tablo 6.30'da STF3(x) ile PGK-1 kullanılarak oluşturulmuş HİKA'nın 30 farklı çözümü gösterilmektedir. Elde edilen en iyi sonucu sağlayan bara düzeninin maliyeti 196 iken en kötü topoloji 8625,11 olmuştur. 30 farklı çözümün yaklaşık olarak sadece 3'te 1'i optimale yakın sonuç vermiştir.

Tablo 6.32. Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	198,93	7	216,45	13	270,94	19	437,80	25	2247,16
2	213,63	8	216,45	14	333,26	20	1188,93	26	2841,78
3	213,63	9	223,60	15	333,26	21	1516,62	27	6477,44
4	213,63	10	223,60	16	333,26	22	1541,63	28	7355,12
5	215,59	11	223,60	17	333,26	23	2228,53	29	7755,98
6	215,59	12	226,81	18	359,85	24	2237,81	30	7755,98

Tablo 6.31'de VTF1(x) ile PGK-1 kullanılarak oluşturulmuş HİKA'nın 30 farklı çözümü gösterilmektedir. Elde edilen en iyi sonuç 189,66 iken en kötü sonuç 8763,72 olmuştur. 30 farklı çözümün yaklaşık olarak yarısı optimale yakın sonuç vermiştir.

Tablo 6.32'de VTF2(x) ile PGK-1 ile birlikte tasarlanan HİKA'nın 30 farklı çözümünden elde edilen en iyi sonuçlar gösterilmektedir. Elde edilen en iyi sonuç 198,93 iken en kötü sonuç 7755,98 olmuştur. 30 farklı çözümün yaklaşık olarak 3'te 2'si optimale yakın sonuç vermiştir.

Tablo 6.33. Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	211,96	7	215,59	13	223,60	19	333,26	25	1729,05
2	211,96	8	215,59	14	223,60	20	333,26	26	2223,05
3	213,63	9	215,59	15	226,81	21	333,26	27	3261,39
4	213,63	10	215,59	16	296,95	22	625,10	28	3263,14
5	213,63	11	219,66	17	296,95	23	652,18	29	4858,60
6	213,63	12	223,60	18	313,45	24	1048,43	30	7498,26

Tablo 6.33'te VTF3(x) ile PGK-1 ile birlikte tasarlanan HİKA'nın 30 farklı çözümünden elde edilen en iyi sonuçlar gösterilmektedir. Elde edilen en iyi topolojide hesaplanan maliyet miktarı 211,96 iken en kötü performans 7498,26 olmuştur. 30 farklı çözümün yaklaşık olarak 3'te 2'si optimale yakın sonuç vermiştir.

Tablo 6.34. Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	196,00	7	215,59	13	229,52	19	333,26	25	1262,12
2	211,96	8	215,59	14	241,29	20	348,48	26	1506,13
3	213,63	9	215,59	15	320,30	21	432,59	27	1733,47
4	213,63	10	216,45	16	333,26	22	672,32	28	1733,47
5	213,63	11	223,60	17	333,26	23	749,42	29	7755,98
6	213,63	12	223,60	18	333,26	24	1163,99	30	8245,29

Tablo 6.34'te VTF4(x) ile PGK-1 kullanılarak tasarlanan HİKA'nın 30 farklı çözümünden elde edilen en iyi sonuçlar gösterilmektedir. En iyi senaryoda hesaplanan maliyet miktarı 196,00 iken algoritmanın en kötü çözümünden elde edilen maliyet miktarı 8245,29 olmuştur. 30 farklı çözümün yaklaşık olarak 3'te 2'si optimale yakın sonuç vermiştir.

Tablo 6.35. Hamming mesafeli KA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189,66	7	195,20	13	211,96	19	219,51	25	317,91
2	189,66	8	196,00	14	211,96	20	219,51	26	335,67
3	190,63	9	197,20	15	212,24	21	219,75	27	336,64
4	192,17	10	202,56	16	216,45	22	240,45	28	348,48
5	194,60	11	203,35	17	216,84	23	283,28	29	1493,56
6	194,60	12	203,47	18	217,54	24	316,01	30	7334,26

Tablo 6.36. Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189,72	7	218,37	13	226,81	19	333,26	25	1222,97
2	195,20	8	219,51	14	248,13	20	333,26	26	1348,25
3	199,70	9	221,13	15	277,25	21	595,18	27	1511,81
4	199,70	10	223,60	16	277,25	22	618,02	28	2713,55
5	211,96	11	223,60	17	283,28	23	619,19	29	7571,34
6	215,59	12	226,81	18	283,60	24	1163,99	30	9241,28

Tablo 6.37. Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	187,62	7	203,35	13	223,60	19	296,63	25	1048,43
2	187,62	8	205,44	14	235,92	20	313,41	26	1163,99
3	198,08	9	218,37	15	241,29	21	319,09	27	1420,56
4	201,56	10	219,16	16	260,58	22	219,51	28	1516,92
5	202,56	11	219,51	17	271,35	23	260,58	29	4403,86
6	203,35	12	221,13	18	295,90	24	319,09	30	7733,88

Tablo 6.35'de sigmoid fonksiyonuyla birlikte PGK-2 güncelleme kuralı kullanılmıştır. Algoritmadan elde edilen en iyi senaryoda hesaplanan maliyet miktarı 189,66 olmuştur. Görüldüğü gibi çözümlerin tamamına yakını optimale yakın bölgededir. Normal şartlarda STF3(x) fonksiyonu PGK-1 ile yaygın olarak kullanılmaktadır fakat HİKA'nın BBO problemini çözmedeki başarısı üzerinde sigmoid ile PGK-2'nin daha etkin ve güvenilir sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Tablo 6.36'da VTF1(x) ve PGK-2 kombinasyonu uygulanmıştır. Bu yaklaşım ile oluşturulan HİKA algoritmasının sunduğu en iyi çözümün maliyeti 189,72 olmuştur. Çözümlerin yaklaşık olarak üçte ikisi optimal bölgeye yakınsamıştır. Elde edilen sonuçlar VTF1(x) ve PGK-1 yaklaşımının sunduğu çözümler ile benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla, hiperbolik tanjant fonksiyonuyla birlikte farklı pozisyon güncelleme kurallarının kullanılması, çözüm kalitesi üzerinde beklenen etkiyi göstermemiştir.

Tablo 6.37'de VTF2(x) ile PGK-2 kuralı birlikte kullanılmıştır. En iyi çözümün maliyeti 187,62 olarak bulunsa bile sonuçların beşte biri kabul edilebilir değildir. Buna rağmen VTF2(x) fonksiyonu PGK-2 ile birlikte kullanıldığında PGK-1'de elde edilen sonuçlardan daha güvenilir olmuştur.

Tablo 6.38. Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	191,59	7	213,63	13	224,13	19	248,13	25	319,09
2	194,03	8	213,63	14	227,16	20	271,35	26	333,26
3	197,09	9	221,13	15	235,92	21	299,99	27	758,04
4	197,20	10	222,37	16	240,45	22	304,83	28	795,64
5	197,20	11	223,60	17	241,29	23	315,42	29	1197,97
6	211,96	12	223,60	18	248,13	24	316,01	30	4303,55

Tablo 6.39. Hamming mesafeli KA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	197,20	13	203,47	19	217,54	25	271,35
2	185,78	8	197,20	14	205,44	20	219,16	26	277,31
3	189,72	9	198,08	15	205,62	21	221,13	27	328,55
4	191,59	10	199,70	16	205,62	22	226,81	28	336,64
5	193,08	11	202,56	17	214,00	23	248,13	29	636,45
6	196,00	12	203,47	18	214,00	24	270,94	30	1266,15

Tablo 6.38'de VTF3(x) ile PGK-2'nin sonuçları verilmiştir. Bu yaklaşımla çözümlerin yaklaşık olarak %85'i optimal bölgeye yakınsayarak güvenilir bir davranış göstermiştir. Pozisyon güncelleme kuralının değişimi fonksiyonun algoritma üzerindeki etkisini değiştirerek gösterdiği performansı yükseltmiştir.

Tablo 6.40. Normal mesafeli KA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	211,96	7	211,96	13	213,63	19	215,59	25	223,60
2	211,96	8	213,63	14	213,63	20	215,59	26	296,95
3	211,96	9	213,63	15	213,63	21	215,59	27	296,95
4	211,96	10	213,63	16	213,63	22	215,59	28	333,26
5	211,96	11	213,63	17	213,63	23	213,63	29	1729,05
6	211,96	12	213,63	18	215,59	24	222,37	30	3261,39

Tablo 6.41. Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	211,96	7	213,63	13	215,59	19	222,37	25	296,95
2	211,96	8	213,63	14	215,59	20	223,60	26	296,95
3	213,63	9	213,63	15	215,59	21	223,60	27	296,95
4	213,63	10	213,63	16	215,59	22	223,60	28	296,95
5	213,63	11	213,63	17	215,59	23	296,95	29	333,26
6	213,63	12	215,59	18	216,45	24	296,95	30	3261,39

Tablo 6.42. Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	211,96	7	211,96	13	213,63	19	215,59	25	223,60
2	211,96	8	211,96	14	213,63	20	215,59	26	296,95
3	211,96	9	213,63	15	213,63	21	215,59	27	296,95
4	211,96	10	213,63	16	213,63	22	222,37	28	326,69
5	211,96	11	213,63	17	215,59	23	222,37	29	749,42
6	211,96	12	213,63	18	215,59	24	223,60	30	1249,82

Son olarak Tablo 6.39'dan görüldüğü üzere çalışmamız kapsamında önerilen VTF4(x) fonksiyonu ile PGK-2'nin birlikte kullanımı neticesinde HİKA'dan diğer kombinasyonlara kıyasla en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu yaklaşım ile hem en iyi çözüm elde edilmiştir hem de sonuçların %90'ından fazlası optimale yakınsamıştır. Bağımsız yapılan çalıştırmalarda optimal bölgeye yakınsama oranı düşünüldüğünde en güvenilir performansı VTF4(x) ve PGK-2 birleşimi vermiştir.

Normal mesafe yönteminin kullanıldığı İKA'dan (NİKA) elde edilen veriler Tablo 6.40'tan 6.49'a kadar verilmiştir. Görüldüğü gibi HİKA'da PGK-2 ile kullanılan transfer fonksiyonları daha başarılı olurken NİKA'dan elde edilen verilerde PGK-1 ile oluşturulan kombinasyonların daha başarılı olduğu görülmektedir. Tablo 6.40'da PGK-1 kullanılan sigmoid fonksiyonundan elde edilen sonuçların yaklaşık olarak %93'ü optimal bölgeye yakınsayarak çok başarılı bir performans sergilemiştir.

Tablo 6.43. Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	201,56	13	205,44	19	348,48	25	865,63
2	185,78	8	203,35	14	220,11	20	359,85	26	1163,99
3	185,78	9	203,35	15	220,11	21	532,97	27	1175,03
4	194,60	10	204,31	16	261,05	22	532,97	28	1175,82
5	196,00	11	204,31	17	296,26	23	715,17	29	1237,12
6	197,20	12	204,37	18	320,30	24	865,63	30	2222,16

Tablo 6.44. Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189,66	7	213,63	13	222,37	19	317,60	25	866,79
2	190,63	8	215,59	14	223,60	20	328,55	26	1237,92
3	194,60	9	218,37	15	226,81	21	359,85	27	1729,05
4	197,09	10	221,07	16	226,81	22	378,02	28	2849,82
5	209,44	11	222,37	17	226,81	23	432,59	29	3252,78
6	211,96	12	222,37	18	298,29	24	760,92	30	7726,05

Tablo 6.41'de hiperbolik tanjant fonksiyonunun kullanıldığı VTF1(x) ile PGK-1 kombinasyonu yalnızca 1 çözümde yerel optimale takılarak en başarılı sonucu vermiş olsa bile sapma miktarı yüksek olduğu için standart sapma ve ortalama değer açısından en iyi performansı verememektedir. Tablo 6.42'de verilen VTF2(x)-PGK-1 senaryolu NİKA'da ise sigmoid fonksiyonundan elde edilen sonuçlara benzer şekilde yaklaşık olarak %93 oranında optimale yakınsama başarısı gösterilmiştir fakat burada yaşanan sapmaların boyutu nispeten düşük olmuştur. Tablo 6.43 ve 6.44'de verilen VTF3(x) ve VTF4(x) ile PGK-1 kombinasyonlarından elde edilen çözümlerin neredeyse üçte biri yerel optimale takıldığı için performansları nispeten düşük kalmıştır.

Tablo 6.45. Normal mesafeli KA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	193,08	13	203,47	19	222,37	25	357,29
2	187,62	8	198,93	14	205,62	20	229,41	26	552,23
3	188,40	9	199,70	15	213,63	21	229,41	27	684,11
4	188,40	10	201,56	16	217,13	22	248,13	28	1166,71
5	189,66	11	202,56	17	219,72	23	296,70	29	1249,82
6	190,63	12	203,35	18	222,37	24	299,99	30	1420,56

Tablo 6.46. Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	187,62	7	194,03	13	197,20	19	211,96	25	219,51
2	187,62	8	194,03	14	203,35	20	211,96	26	229,41
3	188,40	9	194,60	15	205,44	21	212,24	27	242,65
4	188,40	10	195,20	16	205,62	22	214,00	28	296,41
5	192,17	11	196,00	17	205,62	23	215,59	29	416,87
6	194,03	12	197,09	18	211,96	24	216,45	30	2792,80

Tablo 6.47. Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	198,93	13	214,00	19	229,41	25	461,52
2	190,63	8	202,56	14	214,00	20	241,29	26	595,18
3	191,59	9	203,35	15	216,84	21	263,13	27	696,28
4	194,03	10	203,35	16	218,37	22	264,74	28	865,31
5	197,20	11	211,96	17	219,16	23	277,25	29	1175,03
6	197,20	12	212,24	18	220,11	24	326,76	30	2222,13

Normal mesafeli İKA'da Tablo 6.45'te verilen STF3(x)-PGK-2 sonuçlarına göre %80'in üzerinde kaliteli çözüm sunulmuş olsa bile sigmoid fonksiyonu ile PGK-1 senaryosunda alınan düzeyde bir başarı elde edilememiştir. Tablo 6.46'da verilen VTF1(x)-PGK-2 sonuçlarına bakıldığında ilgili senaryonun standart sapma, ortalama değer ve güvenilirlik açısından birçok senaryodan daha başarılı sonuçlar sunduğu görülmektedir. Tablo 6.49 incelendiğinde Hamming mesafesiyle yüksek düzeyde başarı elde edilen VTF4(x)-PGK-2 kombinasyonunun, normal mesafe kullanıldığında çözümlerin üçte ikisinde yerel optimale takıldığı görülmektedir.

Tablo 6.48. Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	188,40	7	214,00	13	222,37	19	335,36	25	717,47
2	190,63	8	215,59	14	224,13	20	373,47	26	785,60
3	195,20	9	218,63	15	229,52	21	461,73	27	890,77
4	199,70	10	219,75	16	235,92	22	576,77	28	1166,71
5	204,37	11	221,13	17	296,41	23	595,18	29	1504,78
6	214,00	12	221,13	18	315,42	24	622,00	30	1646,94

Tablo 6.49. Normal mesafeli KA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

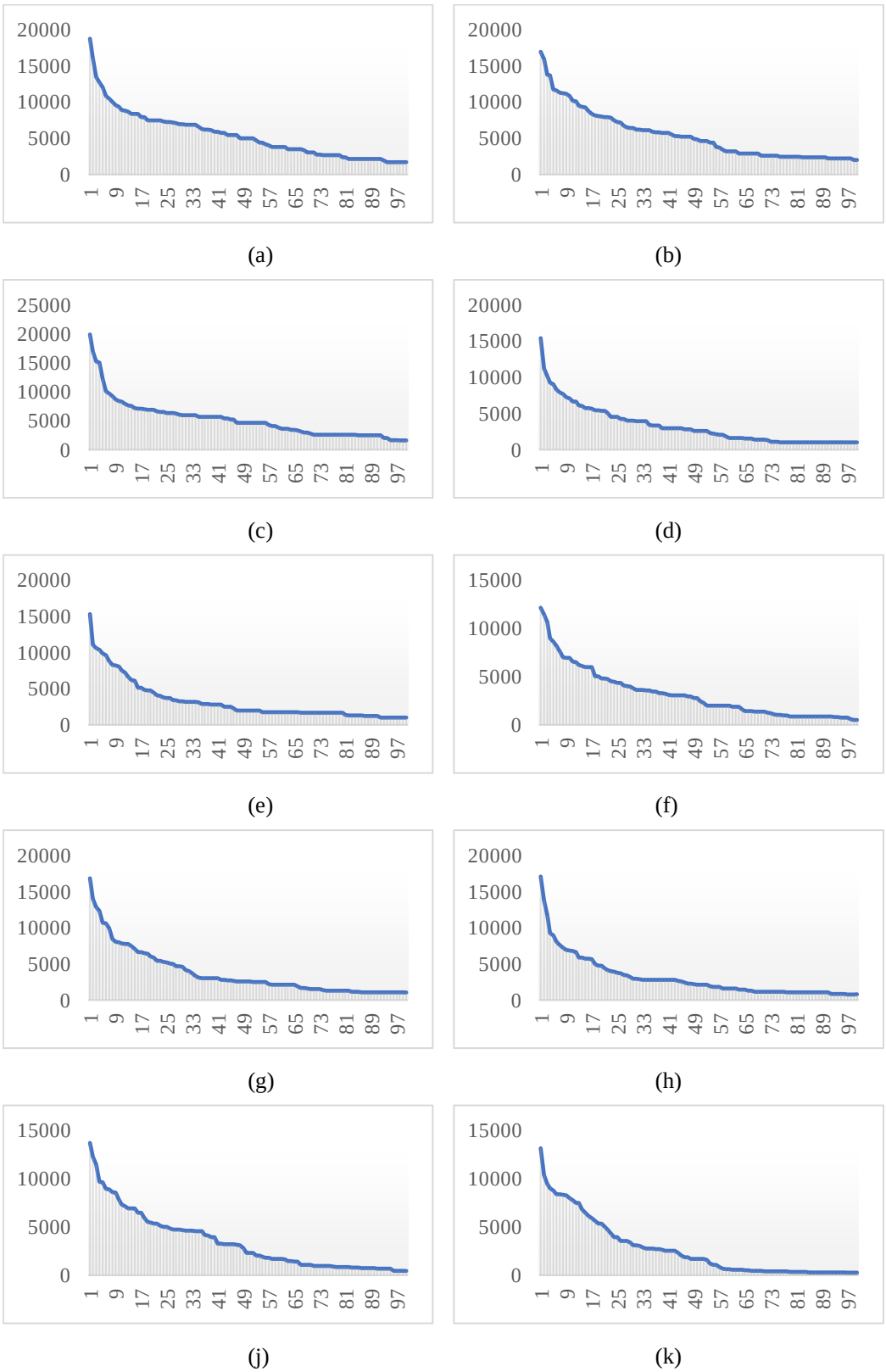
Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	201,56	7	296,41	13	707,29	19	1218,79	25	2457,55
2	201,56	8	296,95	14	748,87	20	1313,24	26	2544,03
3	204,37	9	319,26	15	865,63	21	1348,25	27	2570,02
4	209,44	10	320,30	16	888,89	22	1704,05	28	4314,29
5	212,24	11	636,45	17	890,77	23	1744,12	29	7282,49
6	222,37	12	707,29	18	1175,31	24	2053,03	30	7885,45

En iyi sonuçların yanında bu sonuçlara nasıl ulaşıldığını gösterebilmek amacıyla yakınsama eğrileri kullanılmaktadır. Başlangıç yinelemesinde elde edilen kalitesiz çözümlerin yinelemeler boyunca nasıl geliştiğini görebilmek amacıyla kullanılan bu eğriler, algoritmaların yerel optimal bölgelerden nasıl kurtulduğu hakkında bir fikir vermektedir. Her bir senaryo için 30 farklı çalıştırma yapılmış ve dolayısıyla 30 farklı yakınsama eğrisi çıkmıştır. Uygulanan transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kurallarının genel davranışlarını görebilmek amacıyla bağımsız yakınsama eğrileri kullanılarak ortalama yakınsama eğrisi üretilmiştir. Şekil 6.17'de HİKA'dan ve Şekil 6.19'da NİKA'dan elde edilen verilerle her bir senaryo için ayrı ayrı üretilen ortalama yakınsama eğrileri verilmiştir. Algoritmaların tamamı 10,000 ile 20,000 gibi kötü bir noktadan başlayarak daha iyi çözüm bölgelerine yakınsamıştır. HİKA yöntemiyle elde edilen sonuçlardan üretilmiş grafikler incelendiğinde güvenilir olarak belirtilen VTF4(x) ve PGK-2 yaklaşımının yakınsama hızı açısından da en iyisi olduğu görülmektedir. NİKA'nın ortalama yakınsama eğrileri incelendiğinde ise PGK-1 kuralıyla oluşturulan senaryolarda keskin inişler gerçekleşirken PGK-2 kullanılanlarda diğer senaryolarda olduğu gibi kademe kademe yakınsama profili oluşmuştur.

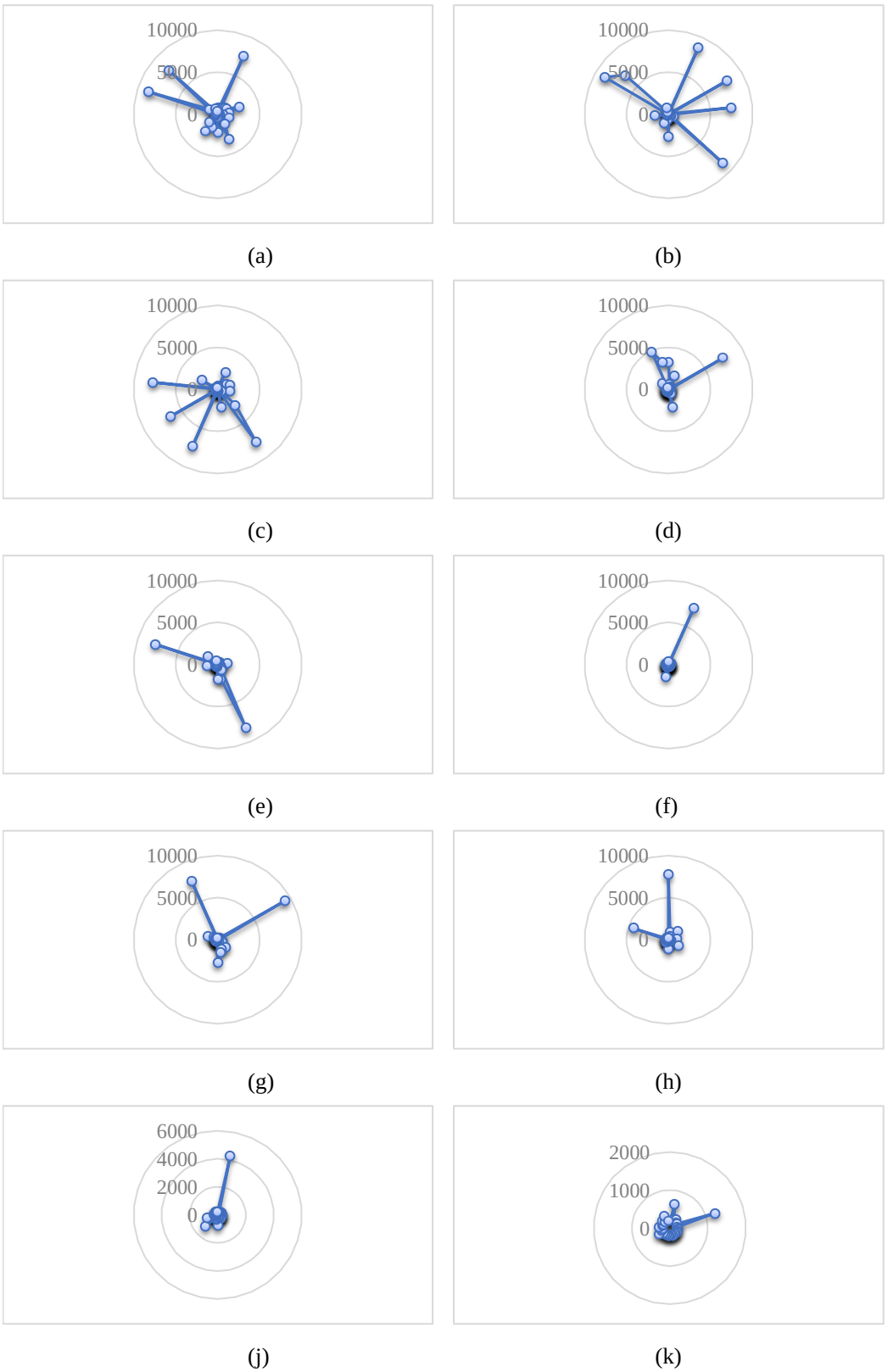
Hamming mesafesi ve normal mesafe kullanılan İKA'nın 10 farklı senaryo için 30 bağımsız çözümünden elde edilen en iyi sonuçların radar grafik üzerindeki gösterimleri sırasıyla Şekil 6.18 ve 6.20'de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde maliyet açısından ve nicelik bakımından sapma miktarı en küçük olan senaryonun Şekil 6.18 (k) ve Şekil 6.20 (c)'de gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 6.18 (f) bölümünde STF3(x) ve PGK-1 kombinasyonundan ve Şekil 6.20 (b) bölümünde VTF1(x) ve PGK-1 senaryosundan çıkan sonuçların neredeyse tamamının optimale yakınsamış gibi görünmesinin nedeni bir adet sapmanın çok yüksek miktarda gerçekleşmesi üzerine ölçeğin küçülmesidir. Yine de Tablo 6.35 ve Tablo 6.46'da verilen sonuçlar incelendiğinde bu yaklaşımların kaliteli sonuçlar verdiği görülmektedir.

Elde edilen sonuçlardan daha kıymetli olan yaklaşımları görebilmek için verilerin istatistiksel olarak ne anlama geldiğine bakılmalıdır. Bu doğrultuda Tablo 6.50'de HİKA'da ve Tablo 6.52'de NİKA'da uygulanan yaklaşımların minimum, maksimum, ortalama ve ortanca değerleri ile standart sapmaları verilmiştir. HİKA'da VTF4(x)-PGK-2 yaklaşımı tüm istatistiksel göstergelerde en iyi sonuçları verirken NİKA'da VTF2(x)-PGK-1 senaryosu en kaliteli çözümleri sunmuştur. Bununla birlikte HİKA'da VTF4(x)'ten sonra en küçük ortalama ve standart sapma VTF3(x)-PGK-2 ile elde edilirken NİKA'da ikinci başarılı performansı VTF1(x)-PGK2 kombinasyonu göstermiştir.

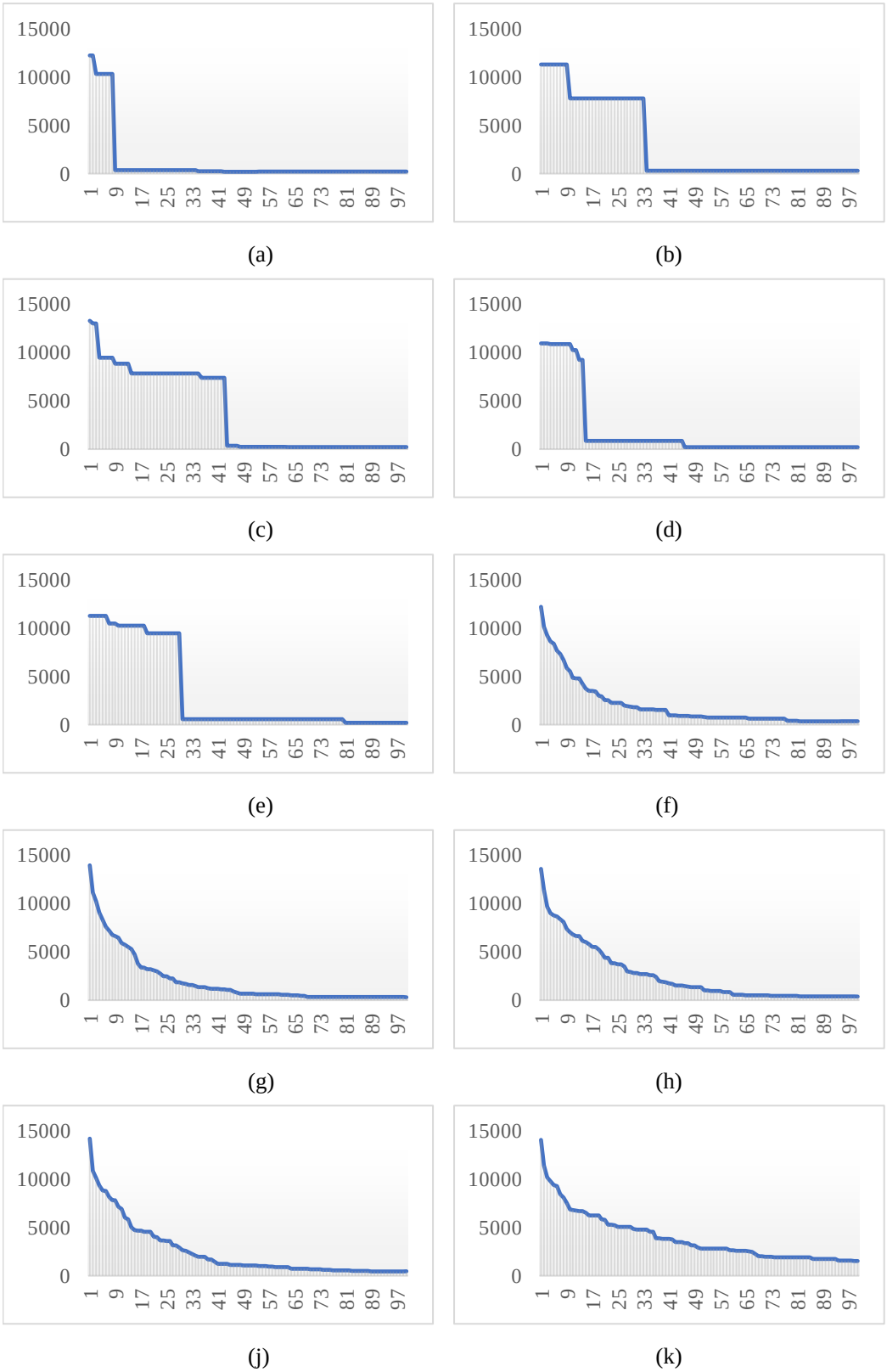
Hamming mesafeli İKA'da, çalışmamız kapsamında önerilen VTF4(x)-PGK-2 yaklaşımının yakınsama eğrileri, sapma grafikleri ve tüm istatistiksel göstergeler incelendiğinde en iyi sonuçları sunduğu ortaya çıkmaktadır. Normal mesafeli İKA'da ise VTF2(x)-PGK-1 yaklaşımının istatistiksel olarak en iyi performansı sunduğu görülmektedir. Ancak daha önce de bahsedildiği gibi yaklaşımlar arasında gerçekten önemli bir fark olduğu gerçeğini net bir şekilde görebilmek için en iyi sonuçların elde edildiği veri seti ile diğer veri setleri parametrik olmayan bir ikili karşılaştırma yöntemi ile kıyaslanmalıdır. Buna göre oluşturulan Tablo 6.51'de VTF4(x)-PGK-2 ve Tablo 6.53'te VTF2(x)-PGK-1 yaklaşımlarıyla elde edilen veri setlerinin diğer senaryolar ile ikili karşılaştırması Wilcoxon işaretli sıra testi ile yapılarak sonuçları sunulmuştur. Bu tablolarda belirtilen olasılık değeri (p-değeri) ne kadar küçük olursa geçersiz hipotezin reddi de o kadar güçlü olmaktadır.



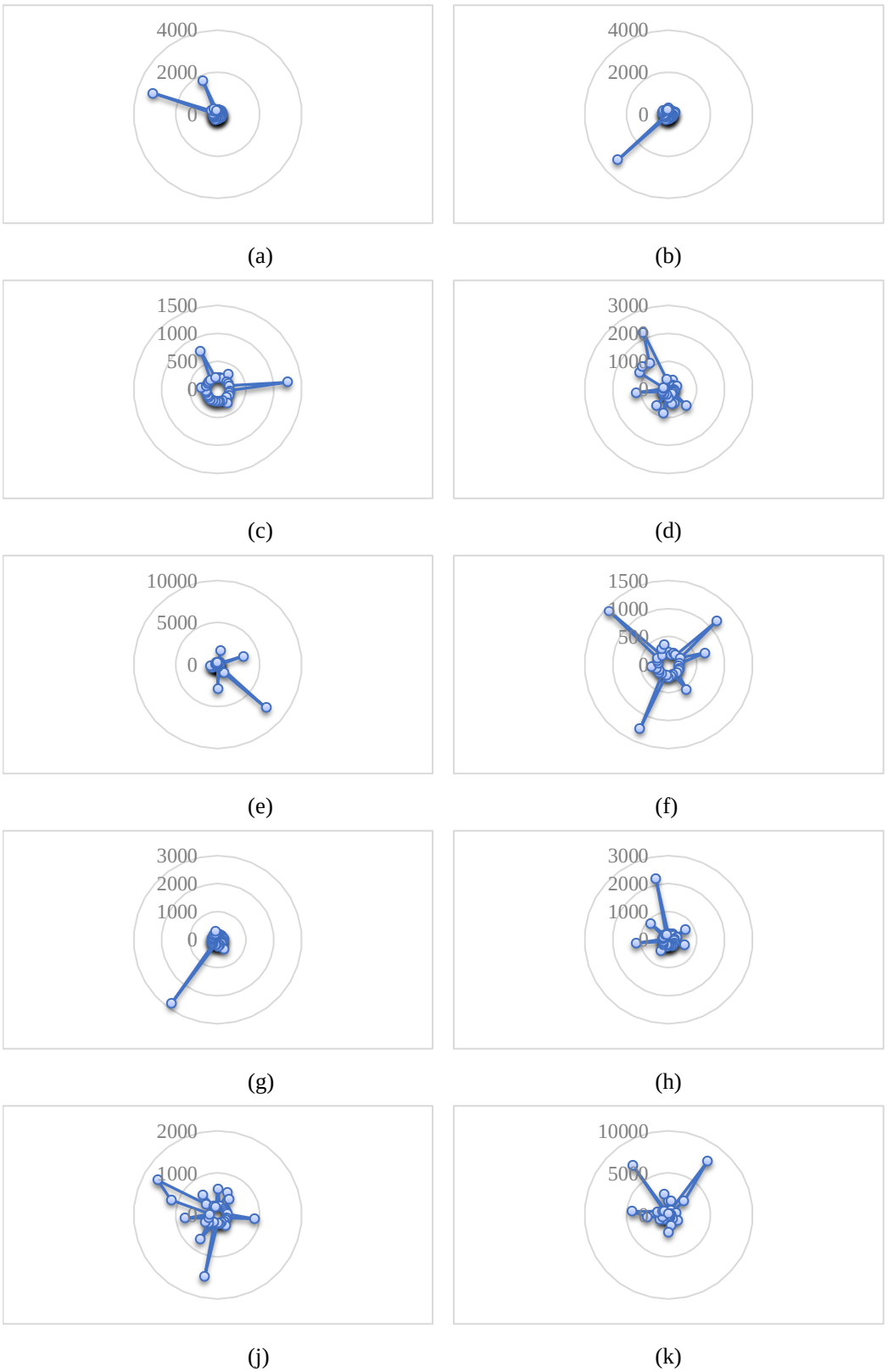
Şekil 6.17. Farklı senaryolarda HİKA'nın ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2



Şekil 6.18. Farklı senaryolarla HİKA'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafikleri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2



Şekil 6.19. Farklı senaryolarda NİKA'nın ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2



Şekil 6.20. Farklı senaryolarla NİKA'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafikleri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2

Tablo 6.50. Hamming mesafeli İKA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları

Pozisyon Güncelleme Kuralı	Transfer Fonksiyonu	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
PGK-1	STF3(x)	1,9600E+02	8,6251E+03	1,7047E+03	9,5671E+02	2,2454E+03
	VTF1(x)	1,8966E+02	8,7637E+03	2,0064E+03	2,8004E+02	3,0930E+03
	VTF2(x)	1,9893E+02	7,7560E+03	1,6050E+03	3,3326E+02	2,3782E+03
	VTF3(x)	2,1196E+02	7,4983E+03	1,0108E+03	2,6188E+02	1,6495E+03
	VTF4(x)	1,9600E+02	8,2453E+03	1,0100E+03	3,2678E+02	1,9261E+03
PGK-2	STF3(x)	1,8966E+02	7,3343E+03	5,1004E+02	2,1434E+02	1,2882E+03
	VTF1(x)	1,8972E+02	9,2413E+03	1,0471E+03	2,7725E+02	2,0531E+03
	VTF2(x)	1,8762E+02	7,7339E+03	8,0008E+02	2,5094E+02	1,5186E+03
	VTF3(x)	1,9159E+02	4,3036E+03	4,4625E+02	2,3818E+02	7,4789E+02
	VTF4(x)	**1,8578E+02**	**1,2661E+03**	**2,7028E+02**	**2,0562E+02**	**2,0295E+02**

Tablo 6.51. HİKA'da kullanılan VTF4(x)-PGK-2 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
VTF4(x)-PGK-2 ile STF3(x)-PGK1	451,00	14,00	2,05E-07
VTF4(x)-PGK-2 ile VTF1(x)-PGK1	368,00	97,00	5,28E-03
VTF4(x)-PGK-2 ile VTF2(x)-PGK1	406,00	59,00	3,60E-04
VTF4(x)-PGK-2 ile VTF3(x)-PGK1	400,00	65,00	5,60E-04
VTF4(x)-PGK-2 ile VTF4(x)-PGK1	367,00	98,00	5,60E-03
VTF4(x)-PGK-2 ile STF3(x)-PGK2	269,00	196,00	**4,53E-01**
VTF4(x)-PGK-2 ile VTF1(x)-PGK2	359,00	106,00	9,32E-03
VTF4(x)-PGK-2 ile VTF2(x)-PGK2	360,00	105,00	8,80E-03
VTF4(x)-PGK-2 ile VTF3(x)-PGK2	344,50	120,50	2,14E-02

Tablo 6.51'de verilen HİKA sonuçları incelendiğinde VTF4(x)-PGK-2 yönteminin STF3(x)-PGK-2 yaklaşımıyla karşılaştırılması sonucunda p-değerinin 0,453 olarak

hesaplandığı görülmektedir. Bu değer iki veri setinin %45,3 ihtimalle benzer olduğunu ve iki yaklaşım arasında kayda değer bir farklılık bulunmadığını göstermektedir.

Tablo 6.52. Normal mesafeli İKA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları

Pozisyon Güncelleme Kuralı	Transfer Fonksiyonu	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
PGK-1	STF3(x)	2,1196E+02	3,2614E+03	3,7584E+02	2,1363E+02	6,0068E+02
	VTF1(x)	2,1196E+02	3,2614E+03	3,3754E+02	2,1559E+02	5,4420E+02
	VTF2(x)	2,1196E+02	**1,2498E+03**	**2,7648E+02**	2,1363E+02	**2,0570E+02**
	VTF3(x)	**1,8578E+02**	2,2222E+03	5,0282E+02	2,4058E+02	4,7244E+02
	VTF4(x)	1,8966E+02	7,7260E+03	8,0571E+02	2,2681E+02	1,4867E+03
PGK-2	STF3(x)	**1,8578E+02**	1,4206E+03	3,5228E+02	2,1538E+02	3,2864E+02
	VTF1(x)	1,8762E+02	2,7928E+03	3,0061E+02	**2,0553E+02**	4,6478E+02
	VTF2(x)	**1,8578E+02**	2,2221E+03	3,7698E+02	2,1761E+02	4,1024E+02
	VTF3(x)	1,8840E+02	1,6469E+03	4,5677E+02	2,3272E+02	3,8566E+02
	VTF4(x)	2,0156E+02	7,8854E+03	1,5180E+03	8,7726E+02	1,8737E+03

Tablo 6.53. NİKA'da kullanılan VTF2(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
VTF2(x)-PGK-1 ile STF3(x)-PGK1	227.50	237.50	**9.26E-01**
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK1	284.50	180.50	**2.89E-01**
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF3(x)-PGK1	329.00	136.00	4.73E-02
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF4(x)-PGK1	352.00	113.00	1.44E-02
VTF2(x)-PGK-1 ile STF3(x)-PGK2	235.00	230.00	**9.68E-01**
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK2	342.00	123.00	2.50E-02
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF2(x)-PGK2	247.00	218.00	**7.77E-01**
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF3(x)-PGK2	342.00	123.00	2.34E-02
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF4(x)-PGK2	424.00	41.00	1.82E-05

Diğer taraftan en iyi ikinci standart sapma ve ortalama değere sahip VTF3(x)-PGK-2 yaklaşımı ile VTF4(x)-PGK-2 yönteminin karşılaştırılması ile p-değeri 0,0214 olarak hesaplanmış olup, bu değerle birlikte iki veri seti arasında 0.05 önem derecesine göre kayda değer bir farklılık bulunduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. VTF3(x)-PGK-2, istatistiksel veriler olan standart sapma ile ortalama değerler açısından STF3(x)-PGK-2 yaklaşımından daha iyi olmasına rağmen Wilcoxon testine göre VTF4(x)-PGK-2 ile VTF3(x)-PGK-2 arasında önemli derecede fark bulunurken VTF4(x)-PGK-2 ile STF3(x)-PGK-2 arasında kayda değer bir farklılık bulunmadığı sonucu ortaya çıkmıştır. Tespit edilen bu sonuç doğrultusunda elde edilen verilerin parametrik olmayan karşılaştırma testlerinden geçirilmesinin önemi görülmektedir.

Diğer taraftan NİKA'da kullanılan VTF2(x)-PGK-1 senaryosu ile diğer yaklaşımların karşılaştırıldığı Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçlarının verildiği Tablo 6.53'e göre, VTF2(x)-PGK-1 yaklaşımının STF3(x)-PGK-1 senaryosuyla %92,6, VTF1(x)-PGK-1 yöntemiyle %28,9, STF3(x)-PGK-2 yaklaşımıyla %96,8 ve VTF2(x)-PGK-2 metoduyla %77,7 oranında benzerlik gösterdiği görülmektedir. Dolayısıyla VTF2(x)-PGK-1 yöntemi her ne kadar istatistiksel olarak başarılı görünse de özellikle STF3(x)-PGK-1 ve PGK-2 ile yüksek oranda benzerlik göstermektedir. Ayrıca pozitif ve negatif işaretli sıralamalar toplamı olan W+ ve W- verileri incelendiğinde STF3(x)-PGK-1'in VTF2(x)-PGK-1'den biraz daha üstün olduğu görülmektedir. Sonuç olarak her iki yöntemin de farklı bara sistemlerinde test edilmesi gerekmektedir.

6.3.2. İkili salp sürüsü algoritmasıyla IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

İSSA'dan elde edilen sonuçlar İKA'da sunulan tablo ve şekiller ile aynı formatta gösterilmektedir. Tablo 6.54'de sürekli arama uzayında çalışan Salp Sürüsü Algoritmasında, sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına sigmoid fonksiyonu ve 1. pozisyon güncelleme kuralı kullanılarak geçildiğinde, 30 farklı çözüm ile elde edilen en iyi sonuçlar gösterilmektedir. Görüldüğü gibi sonuçların üçte biri optimal bölgeden uzak kalarak yerel optimal noktalardan kurtulamamıştır. Dolayısıyla bu tekniğin gerçek sistemde kullanılması durumunda sonuçların güvenilirliği detaylı şekilde sorgulanmalıdır.

Tablo 6.54. SSA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	211,96	7	216,45	13	296,95	19	333,26	25	3183,70
2	213,63	8	223,60	14	333,26	20	333,26	26	7492,38
3	213,63	9	229,52	15	333,26	21	557,97	27	7755,98
4	213,63	10	296,95	16	333,26	22	1350,82	28	7755,98
5	213,63	11	296,95	17	333,26	23	1442,51	29	7755,98
6	215,59	12	296,95	18	333,26	24	1729,05	30	7806,76

Tablo 6.55. SSA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	198,08	7	215,59	13	226,81	19	333,26	25	2550,06
2	205,44	8	215,59	14	229,52	20	333,26	26	3213,21
3	213,63	9	215,59	15	229,52	21	401,88	27	3224,84
4	213,63	10	226,81	16	296,41	22	1356,92	28	6405,19
5	213,63	11	226,81	17	316,01	23	1553,17	29	7588,56
6	214,00	12	226,81	18	328,55	24	1729,05	30	7806,76

Tablo 6.56. SSA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189,66	7	215,59	13	223,60	19	333,26	25	333,26
2	213,63	8	215,59	14	223,60	20	333,26	26	333,26
3	213,63	9	215,59	15	226,81	21	333,26	27	1493,56
4	215,59	10	215,59	16	226,81	22	333,26	28	2248,05
5	215,59	11	219,72	17	296,95	23	333,26	29	2390,90
6	215,59	12	223,60	18	333,26	24	333,26	30	3261,39

Tablo 6.55'de V-şekilli fonksiyon ailesinden seçilen transfer fonksiyonu VTF1(x) ile tekrarlanan analizler sunulmuştur. Görüldüğü gibi Tablo 6.54'de olduğu gibi burada da çözümlerin üçte biri optimal bölgeye yaklaşamamıştır. Yaklaşık olarak %33 ihtimalle yerel optimalden kurtulamayan bir algoritmanın gerçek bir sistemde kullanılması uygun olmayabilir.

Tablo 6.56'da verilen VTF2(x) fonksiyonu ile PGK-1'in kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar nispeten daha iyi gibi görünse bile 4 çözümde majör sapmalar görülmektedir.

Bu yaklaşımın, çözümlerin yaklaşık olarak %14'ünde kalitesiz bara düzenleri sunulma ihtimali göz önünde bulundurularak gerçek bir sistemde kullanılabileceği düşünülmektedir.

Tablo 6.57. SSA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	197,20	7	241,29	13	408,13	19	750,71	25	1844,19
2	198,08	8	241,29	14	597,34	20	1163,99	26	2504,42
3	212,24	9	241,29	15	636,45	21	1212,92	27	2696,39
4	215,59	10	248,13	16	715,31	22	1212,92	28	2802,99
5	219,75	11	271,35	17	715,31	23	1303,05	29	3237,31
6	224,13	12	296,26	18	717,47	24	1701,86	30	3245,71

Tablo 6.57'de sunulan VTF3(x) sonuçlarına göre bu senaryodan beklenen düzeyde bir başarı elde edilememiştir. Algoritmanın bu fonksiyon ve PGK-1 ile sunduğu çözümlerin yarıdan fazlası kabul edilebilir sonuçlar değildir. Dolayısıyla bu yaklaşım ile gerçek bir güç sisteminde bara bölme optimizasyonu yapılması uygun değildir.

Tablo 6.58. SSA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189,72	7	222,37	13	296,41	19	701,39	25	2240,87
2	216,84	8	223,60	14	325,14	20	748,57	26	3262,31
3	218,63	9	227,16	15	401,88	21	748,87	27	3623,41
4	221,13	10	229,52	16	618,02	22	865,63	28	4336,29
5	222,37	11	241,29	17	622,00	23	1653,33	29	6196,96
6	222,37	12	271,35	18	672,32	24	2211,80	30	8209,77

Tablo 6.59. SSA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	198,08	7	219,75	13	356,99	19	1073,99	25	2526,60
2	198,93	8	227,16	14	356,99	20	1222,97	26	2696,39
3	203,35	9	264,74	15	619,20	21	1302,10	27	2713,55
4	209,44	10	274,89	16	750,71	22	1443,77	28	3207,49
5	214,00	11	313,41	17	770,72	23	1449,98	29	3248,11
6	219,72	12	315,42	18	777,63	24	1627,24	30	9226,00

Tablo 6.60. SSA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	204,37	13	242,51	19	642,78	25	1447,73
2	189,66	8	205,44	14	271,35	20	865,13	26	1475,72
3	190,63	9	212,24	15	335,67	21	1250,40	27	3207,49
4	198,93	10	212,24	16	373,47	22	1356,00	28	3248,11
5	201,56	11	216,45	17	461,73	23	1420,56	29	3405,54
6	204,31	12	241,29	18	619,20	24	1440,39	30	6553,52

Tablo 6.58'de çalışmamız kapsamında VTF3(x) fonksiyonunun değiştirilmiş hali olan VTF4(x)'in PGK-1 ile kullanılmasıyla elde edilen en iyi 30 çözümün maliyet miktarları gösterilmektedir. Görüldüğü gibi VTF3(x)'de olduğu gibi burada da çözüm kalitesi oldukça düşüktür.

Tablo 6.59-6.63'te, kullanılan pozisyon güncelleme kuralı PGK-2 olarak düzenlendiğinde transfer fonksiyonlarının verdiği sonuçlar gösterilmektedir. Buna göre Tablo 6.59'da verilen sigmoid fonksiyonu STF3(x)'in PGK-2 ile uyumlu bir çalışma gösteremediği görülmektedir.

Tablo 6.61. SSA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	188,40	7	224,13	13	320,30	19	652,18	25	1355,11
2	194,03	8	226,81	14	378,02	20	717,47	26	1417,71
3	204,37	9	235,92	15	378,02	21	724,43	27	1597,85
4	211,96	10	271,35	16	575,36	22	748,87	28	6455,76
5	218,63	11	313,41	17	576,77	23	788,12	29	8258,09
6	219,66	12	318,77	18	618,00	24	1348,25	30	9263,97

Tablo 6.62. SSA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	191,59	7	205,44	13	296,26	19	715,31	25	1197,97
2	194,60	8	211,96	14	336,64	20	724,43	26	1237,12
3	197,20	9	212,24	15	373,48	21	748,49	27	2544,03
4	201,56	10	212,24	16	416,87	22	785,06	28	2639,69
5	203,47	11	215,59	17	636,45	23	881,57	29	6621,03
6	204,31	12	264,74	18	715,17	24	1194,81	30	8254,60

Tablo 6.60'ta VTF1(x), 6.61'de VTF2(x), 6.62'de VTF3(x) ve 6.63'te VTF4(x) ile PGK-2'nin birlikte kullanılmasıyla sürekli arama uzayından ayrık arama uzayına geçiş yapılmıştır. Tablolardan görüldüğü gibi senaryolardan elde edilen sonuçların hiç birisi beklenen düzeyde güvenilir olmamıştır.

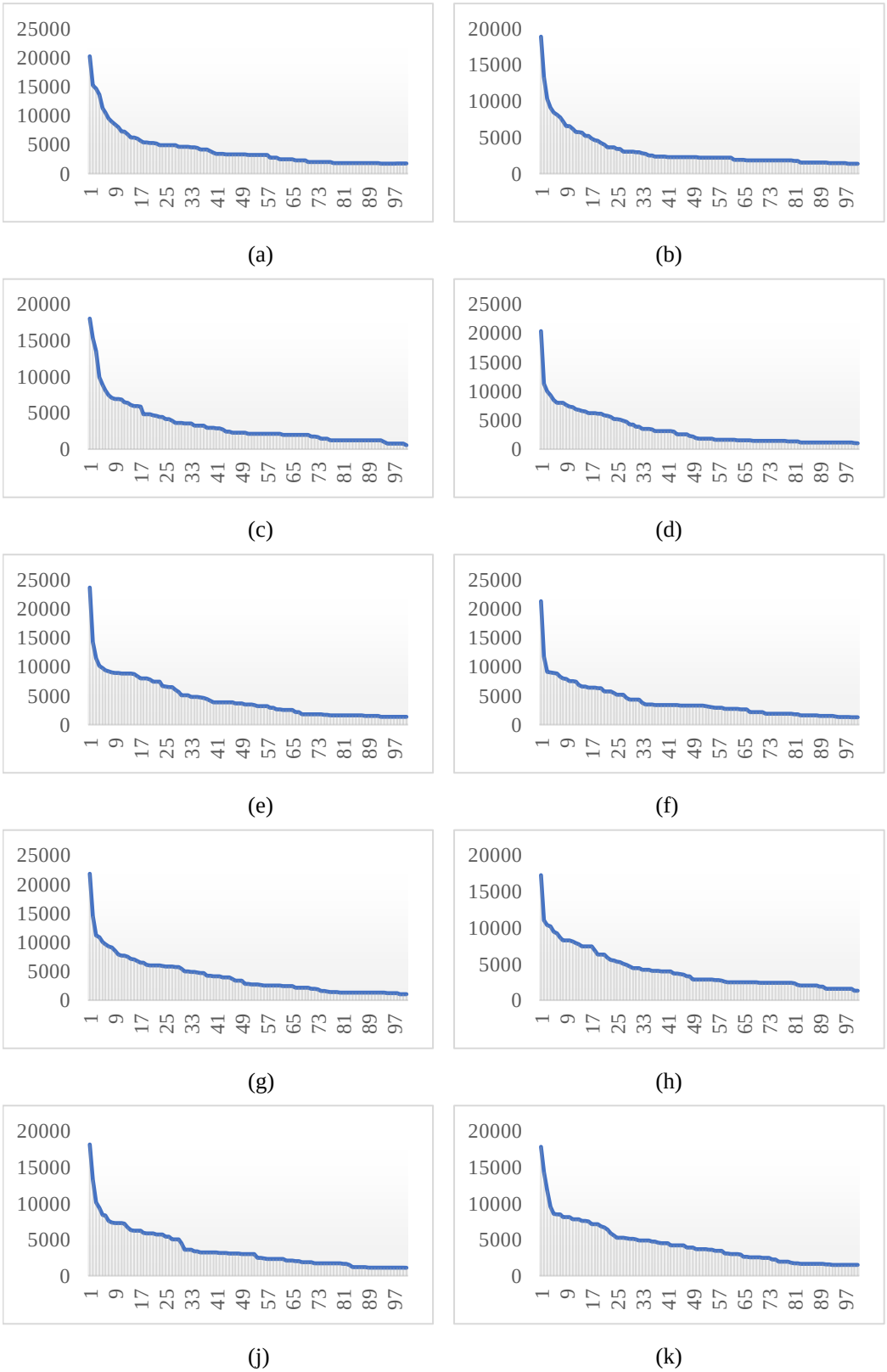
Tablo 6.63. SSA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	193,08	7	408,13	13	1175,82	19	1387,50	25	2247,13
2	205,44	8	595,18	14	1200,03	20	1420,56	26	2418,16
3	216,45	9	595,24	15	1212,92	21	1455,84	27	3230,00
4	220,11	10	622,34	16	1212,92	22	1646,94	28	3238,02
5	261,05	11	891,26	17	1214,04	23	1708,47	29	4829,44
6	295,90	12	1073,99	18	1357,60	24	1961,85	30	6225,43

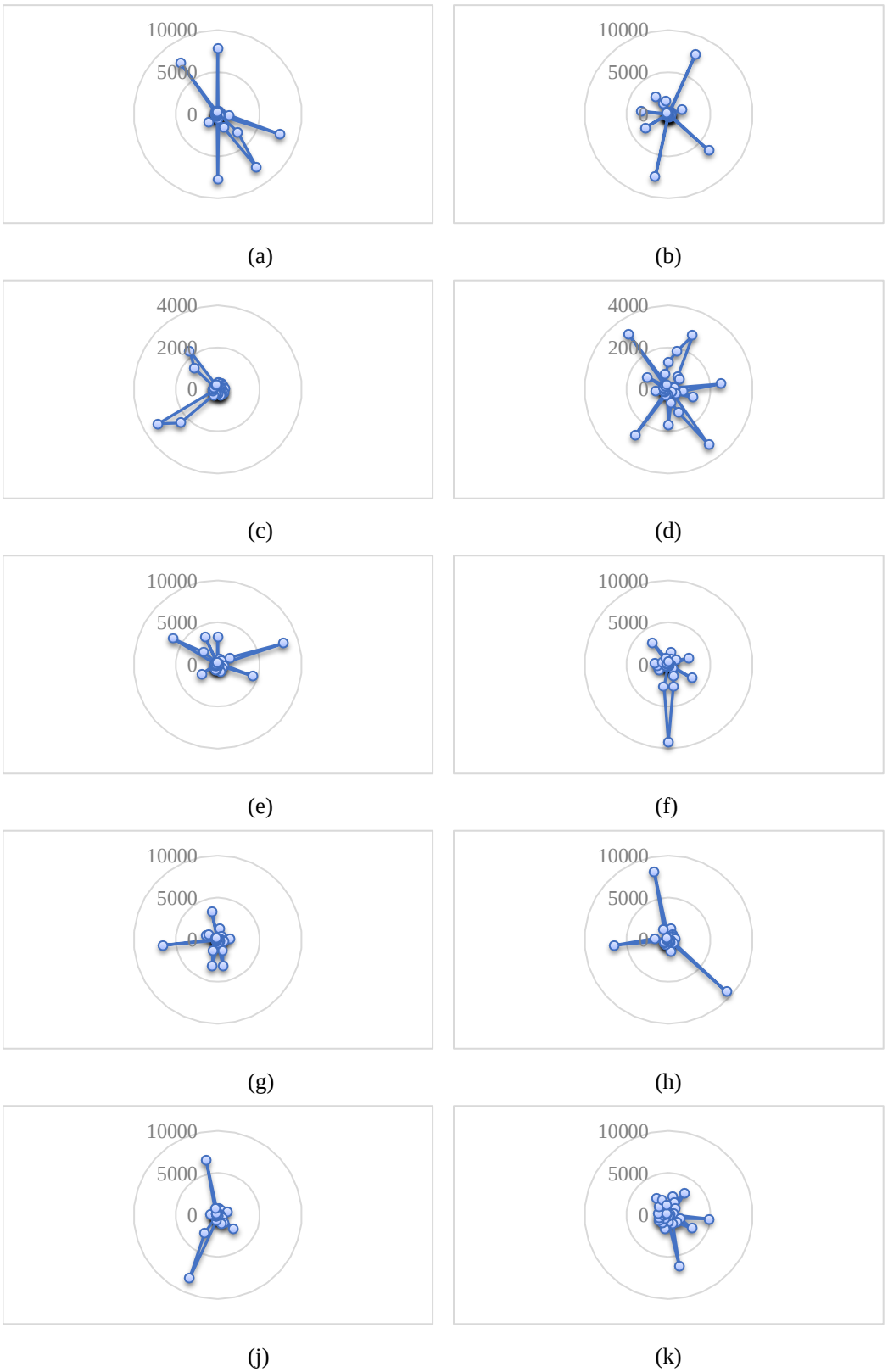
İSSA'dan elde edilen 300 farklı çözüm genel olarak incelendiğinde algoritmanın PGK-1 ile daha uyumlu çalıştığı görülmektedir. En güvenilir sonuç VTF2(x) ile elde edilmiş olsa bile STF3(x) ve VTF1(x)'in de temkinli şekilde kullanılması mümkündür. Çalışmamız kapsamında önerilen VTF4(x) fonksiyonu yine çalışmamız kapsamında önerilen İKA'da en iyi sonucu vermesine rağmen SSA'da beklenen performansı göstermemiştir. Bu noktada bir algoritma ile uyumlu çalışabilen fonksiyonun ve pozisyon güncelleme kuralının farklı bir algoritmada kabul edilemez sonuçlar verdiği açık bir şekilde görülmektedir.

İKA ile İSSA karşılaştırıldığında İKA'nın çok daha güvenilir sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle VTF4(x) ile PGK-2'nin kullanıldığı İKA senaryosu %94'ün üzerindeki optimal bölgeye yakınsama oranıyla bara bölme optimizasyonu problemi için güvenilir bir sezgi-üstü algoritma olduğunu göstermektedir.

Her bir senaryo için uygulanan 30 farklı çözümün birinci yinelemeden sonuncu yinelemeye kadar nasıl bir yol izlediğini gösteren ortalama yakınsama eğrileri Şekil 6.21'de verilmiştir. Şekil 6.22'de ise en iyi çözümlerin optimal bölgeden ne kadar saptığını görebildiğimiz radar grafikler sunulmuştur. İSSA'nın en iyi performansını veren VTF2(x)-PGK-1 kombinasyonu iki şekilde de (c) şıkkında gösterilmiştir.



Şekil 6.21. Farklı senaryolarda İSSA'nın ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2



Şekil 6.22. Farklı senaryolarla İSSA'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafikleri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2

Tablo 6.64. SSA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları

Pozisyon Güncelleme Kuralı	Transfer Fonksiyonu	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
PGK-1	STF3(x)	2,1196E+02	7,8068E+03	1,7434E+03	3,3326E+02	2,7402E+03
	VTF1(x)	1,9808E+02	7,8068E+03	1,3570E+03	2,6296E+02	2,1617E+03
	VTF2(x)	1,8966E+02	3,2614E+03	**5,3868E+02**	**2,2681E+02**	**7,4775E+02**
	VTF3(x)	1,9720E+02	**3,2457E+03**	1,0091E+03	6,7588E+02	9,6357E+02
	VTF4(x)	1,8972E+02	8,2098E+03	1,3480E+03	5,0995E+02	1,9241E+03
PGK-2	STF3(x)	1,9808E+02	9,2260E+03	1,2743E+03	6,8495E+02	1,7563E+03
	VTF1(x)	**1,8578E+02**	6,5535E+03	1,0360E+03	3,5457E+02	1,3857E+03
	VTF2(x)	1,8840E+02	9,2640E+03	1,3001E+03	4,7669E+02	2,2947E+03
	VTF3(x)	1,9159E+02	8,2546E+03	1,0945E+03	3,9517E+02	1,8150E+03
	VTF4(x)	1,9308E+02	6,2254E+03	1,4907E+03	1,2129E+03	1,3589E+03

Tablo 6.65. İSSA'da kullanılan VTF2(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
VTF2(x)-PGK-1 ile STF3(x)-PGK1	320,00	145,00	**7,35E-02**
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK1	286,50	178,50	**2,54E-01**
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF3(x)-PGK1	364,00	101,00	6,94E-03
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF4(x)-PGK1	336,00	129,00	3,41E-02
VTF2(x)-PGK-1 ile STF3(x)-PGK2	350,00	115,00	1,55E-02
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK2	299,00	166,00	**1,71E-01**
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF2(x)-PGK2	324,00	141,00	**6,01E-02**
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF3(x)-PGK2	326,00	139,00	**5,49E-02**
VTF2(x)-PGK-1 ile VTF4(x)-PGK2	395,00	70,00	8,40E-04

Kâşif Algoritmasında yapıldığı gibi Salp Sürüsü Algoritmasında da çeşitli istatistiksel göstergelerden ve ikili karşılaştırma yönteminden yararlanılmıştır. Tablo 6.64'te

verilen değerlere göre ortalama ve ortanca değerler ile standart sapmada en iyi sonucu VTF2(x)-PGK-1 kombinasyonu sunarak daha önce paylaşılan en iyi sonuçlar tablolarını, yakınsama eğrilerini ve radar grafiklerini destekler nitelikte olmuştur. Standart sapma ve ortalama değer açısından ikinci en iyi performans ise VTF3(x)-PGK-1 yaklaşımından elde edilmiştir.

Elde edilen veriler ışığında VTF2(x)-PGK-1 yönteminin diğer tüm senaryolarla ikili karşılaştırma testine tabi tutulması uygun görülmüş olup Wilcoxon test sonuçları Tablo 6.65'te sunulmuştur. Tablo incelendiğinde şu ana kadar incelenen istatistiksel göstergelerden elde edilen sonuçlarla yapılan çıkarımları reddeden veriler bulunduğu görülmektedir. Elde edilen p-değerleri incelendiğinde 0,05 önem dereceli çift kuyruk yaklaşımına göre VTF2(x)-PGK-1 yaklaşımının aslında STF3(x)-PGK1, VTF1(x)-PGK1, VTF1(x)-PGK2, VTF2(x)-PGK2 ve VTF3(x)-PGK2 yöntemlerinden önemli derecede farklı olmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

6.3.3. İkili bozkurt optimizasyonu kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

İkili Kâşif Algoritması ve ikili salp sürüsü algoritmasında olduğu gibi İkili Bozkurt Algoritmasında da 5 farklı fonksiyon ve 2 farklı pozisyon güncelleme kuralı ile oluşturulan 10 farklı senaryonun her birinde 30 bağımsız çözüm yapılarak toplam 300 kere BBO problemi çözülmüştür. Çözümlerden elde edilen her bir senaryonun en iyi bara düzenlerini temsil eden maliyet miktarları tablolarda verilmiştir. Ayrıca ortalama yakınsama eğrileri ile radar grafikleri de sunulmuştur.

Tablo 6.66. BO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	211,96	7	215,59	13	223,60	19	296,95	25	333,26
2	213,63	8	215,59	14	223,60	20	333,26	26	333,26
3	213,63	9	221,07	15	283,28	21	333,26	27	1350,82
4	213,63	10	222,37	16	283,60	22	333,26	28	1354,07
5	213,63	11	222,37	17	296,95	23	333,26	29	2550,07
6	213,63	12	223,60	18	296,95	24	333,26	30	3261,39

Tablo 6.67. BO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	197,09	7	215,59	13	226,81	19	334,56	25	1516,62
2	203,47	8	219,16	14	229,52	20	338,63	26	2053,03
3	203,47	9	221,07	15	229,52	21	557,97	27	2531,53
4	211,96	10	221,13	16	240,45	22	672,32	28	3550,59
5	214,00	11	223,60	17	314,83	23	718,08	29	3643,09
6	215,59	12	223,60	18	333,26	24	785,60	30	7298,92

Tablo 6.68. BO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	211,96	7	213,63	13	215,59	19	296,95	25	1249,82
2	211,96	8	213,63	14	221,07	20	296,95	26	1442,51
3	211,96	9	213,63	15	223,60	21	333,26	27	3224,84
4	211,96	10	214,00	16	223,60	22	333,26	28	7572,66
5	211,96	11	215,59	17	296,95	23	513,48	29	7755,98
6	213,63	12	215,59	18	296,95	24	749,42	30	8210,66

Tablo 6.69. BO'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	437,80	13	717,47	19	1175,82	25	1961,85
2	185,78	8	552,11	14	748,49	20	1188,93	26	2588,69
3	194,60	9	636,45	15	764,18	21	1194,81	27	2802,99
4	240,45	10	636,45	16	865,63	22	1302,10	28	3158,50
5	241,29	11	636,45	17	865,63	23	1493,56	29	3241,72
6	248,13	12	636,45	18	1163,99	24	1624,67	30	8222,51

Tablo 6.66'da birinci pozisyon güncelleme kuralı ile sigmoid fonksiyonunu temsil eden STF3(x)'in birlikte kullanıldığı yaklaşım sonuçları sunulmuştur. Bu yaklaşımın BO'da kullanımıyla elde edilen sonuçlar, İSSA VTF2(x)-PGK-1 kombinasyonuyla benzer bir çalışma karakteristiği göstermiştir. Üretilen sonuçların %85'inden fazlası optimal bölgeye yaklaşmıştır. Ancak yine de algoritmanın faydalanma safhasını gerektiği gibi yapamadığı, bulabildiği en iyi sonucun 211,96 olmasından anlaşılmaktadır. Diğer taraftan Tablo 6.67'de kullanılan VTF1(x)-PGK-1

yaklaşımında sonuçların üçte biri yerel optimalden kurtulamamıştır. Tablo 6.31 ve 6.55 incelendiğinde İKA ve İSSA'da bu yaklaşımın aynı problemle karşılaştığı görülmektedir.

İSSA'da en iyi performansı gösteren VTF2(x)-PGK-1 birleşimi Tablo 6.68'de görüldüğü gibi İBO için aynı kalitede sonuçlar üretememiştir. Ancak yine de Tablo 6.32 incelenirse İKA'da elde edilen sonuçlardan daha güvenilir olduğu görülecektir. Bununla birlikte Tablo 6.69'da verilen VTF3(x) fonksiyonu her ne kadar iki çözümünde faydalanma safhasını etkin şekilde kullanabilmiş olsa da sonuçlardaki yüksek sapmalar sebebiyle gerçek bir sistemde kullanımı uygun görünmemektedir. Burada elde edilen çözümlerin sadece %20'si optimal bölgeye yakınsama başarısını gösterebilmiştir. PGK-1 ile birlikte kullandığımız son fonksiyon VTF4(x)'in de Tablo 6.70'te gösterilen sonuçları, yaklaşımın arzu edilen seviyede güvenilir olmadığını göstermektedir.

Tablo 6.70. BO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	198,08	7	226,81	13	333,26	19	707,29	25	1486,81
2	198,08	8	226,81	14	359,85	20	788,12	26	1569,45
3	198,93	9	271,35	15	378,58	21	1188,93	27	1701,86
4	213,63	10	283,60	16	642,78	22	1218,81	28	1917,59
5	222,37	11	299,99	17	684,11	23	1266,74	29	2390,88
6	223,60	12	304,83	18	701,39	24	1406,74	30	3550,50

Tablo 6.71. BO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189,72	7	212,24	13	296,63	19	785,60	25	2580,56
2	191,59	8	219,51	14	654,85	20	1073,99	26	2823,15
3	193,08	9	219,51	15	658,51	21	1188,93	27	3227,78
4	204,31	10	221,13	16	664,89	22	1236,67	28	3331,38
5	205,62	11	240,45	17	697,30	23	1406,74	29	8333,17
6	211,96	12	240,64	18	749,42	24	1406,74	30	8380,75

PGK-1 ile nispeten başarılı sonuçlar gösteren STF3(x) fonksiyonu Tablo 6.71'de görülebileceği gibi PGK-2 ile aynı başarıyı göstermekten uzak kalmıştır. Elde edilen

en iyi maliyet miktarı 189,72 olsa bile çözümlerin yarıdan fazlası yerel optimallerden kurtulabilmeyi başaramamıştır.

Tablo 6.72. BO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	187,62	7	216,45	13	328,55	19	866,79	25	1506,13
2	189,72	8	218,63	14	416,87	20	1144,81	26	1511,81
3	192,17	9	219,75	15	513,48	21	1222,97	27	2292,95
4	198,08	10	221,07	16	552,23	22	1238,21	28	3550,50
5	203,47	11	224,13	17	575,36	23	1241,49	29	4290,48
6	204,31	12	240,45	18	717,47	24	1276,10	30	6564,28

Tablo 6.73. BO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189,66	7	217,54	13	642,78	19	1276,10	25	2721,39
2	194,60	8	283,60	14	695,49	20	1436,94	26	3273,43
3	197,09	9	313,10	15	718,08	21	1463,21	27	7355,36
4	211,96	10	335,36	16	748,49	22	1546,97	28	7492,38
5	213,63	11	432,59	17	795,84	23	2390,88	29	7550,82
6	214,00	12	461,73	18	904,10	24	2445,61	30	8657,07

Tablo 6.74. BO'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	190,63	7	242,65	13	359,85	19	1218,79	25	2123,62
2	204,37	8	270,94	14	557,97	20	1218,79	26	2589,91
3	205,62	9	283,60	15	702,71	21	1241,74	27	3225,99
4	205,62	10	296,41	16	795,64	22	1396,08	28	4469,43
5	209,44	11	304,83	17	904,10	23	1667,14	29	7733,88
6	242,65	12	328,55	18	1096,65	24	1747,75	30	8353,87

Tablo 6.72, 6.73, 6.74 ve 6.75'te V-şekilli transfer fonksiyonlarının PGK-2 ile birlikte kullanılmasıyla elde edilen İBO sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde V-şekilli transfer fonksiyonları, PGK-2 ile birlikte kullanıldığında kaliteli çözümler üretmede yetersiz kalmıştır. Üretilen çözümlerin yaklaşık olarak yarısının yerel

optimale takıldığı görülmüştür. Uygulanan yaklaşımların ortalama yakınsama eğrileri ve radar grafikleri sırasıyla Şekil 6.23 ve 6.24'te verilmiştir.

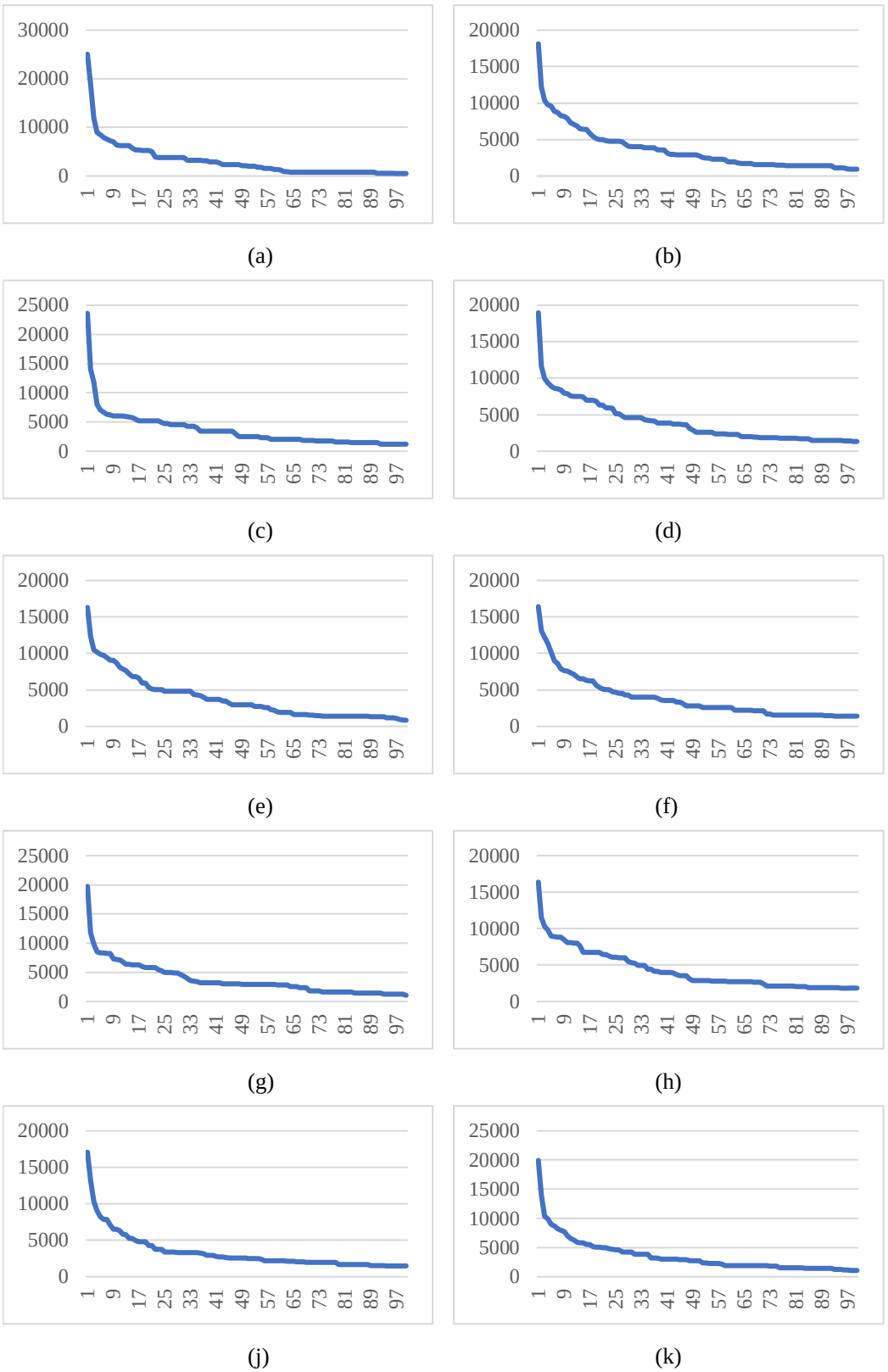
Tablo 6.75. BO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	188,40	7	219,66	13	263,13	19	619,20	25	1521,95
2	191,59	8	219,66	14	304,83	20	625,10	26	2314,40
3	198,08	9	223,60	15	334,56	21	795,84	27	2569,03
4	205,44	10	235,92	16	348,48	22	865,13	28	2639,69
5	213,63	11	240,64	17	432,59	23	1218,79	29	3474,04
6	214,00	12	248,13	18	595,18	24	1363,54	30	9446,78

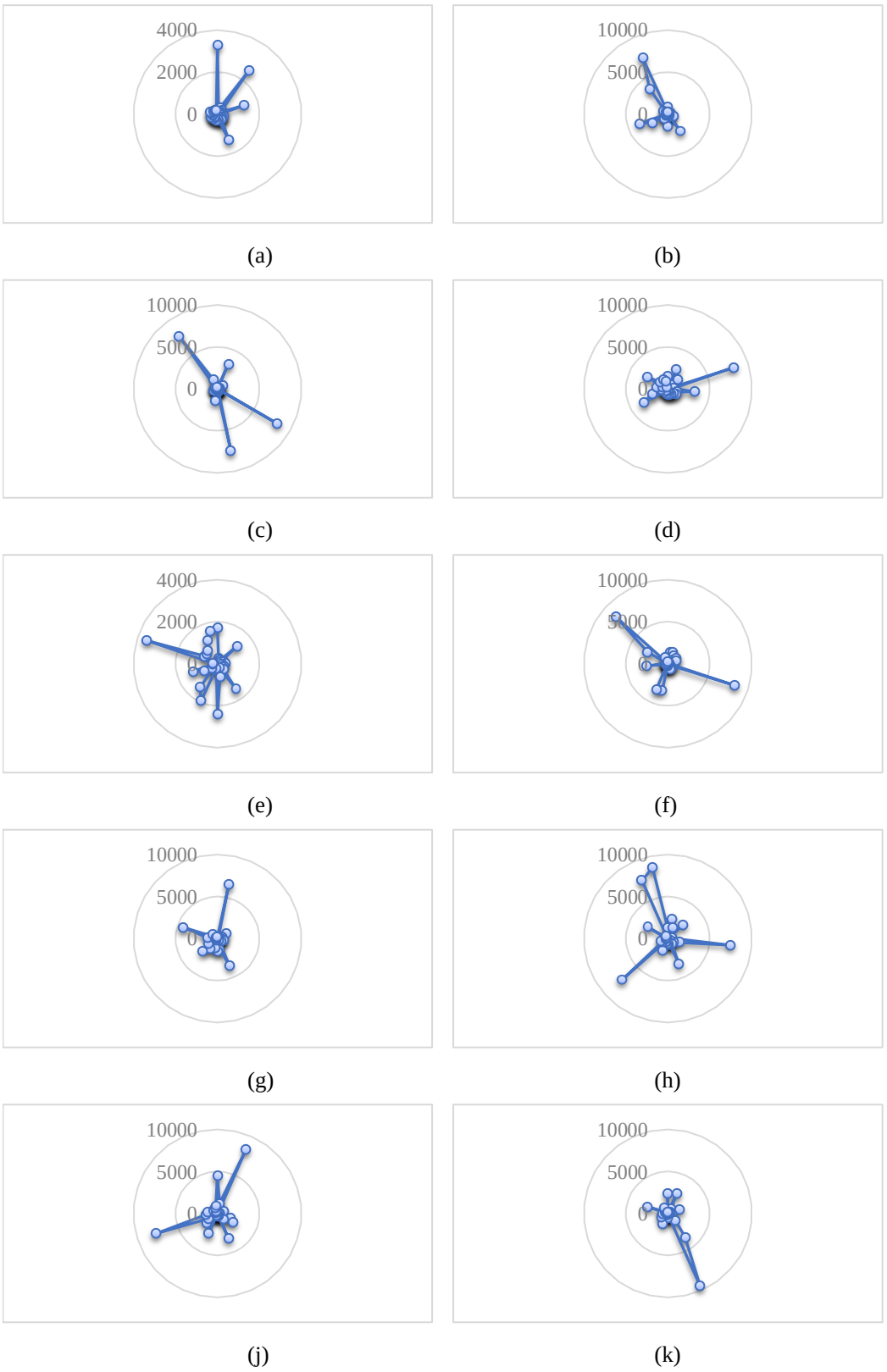
Tablo 6.76. BO algoritmasını sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları

Pozisyon Güncelleme Kuralı	Transfer Fonksiyonu	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
PGK-1	STF3(x)	2,1196E+02	**3,2614E+03**	**5,1183E+02**	2,8344E+02	**7,0250E+02**
	VTF1(x)	1,9709E+02	7,2989E+03	9,3817E+02	2,3499E+02	1,5141E+03
	VTF2(x)	2,1196E+02	8,2107E+03	1,2006E+03	**2,2360E+02**	2,2939E+03
	VTF3(x)	**1,8578E+02**	8,2225E+03	1,3304E+03	8,1490E+02	1,5395E+03
	VTF4(x)	1,9808E+02	3,5505E+03	8,3873E+02	5,1068E+02	7,8591E+02
PGK-2	STF3(x)	1,8972E+02	8,3807E+03	1,4016E+03	6,6170E+02	2,0700E+03
	VTF1(x)	1,8762E+02	6,5643E+03	1,0775E+03	5,3285E+02	1,4091E+03
	VTF2(x)	1,8966E+02	8,6571E+03	1,8460E+03	7,3328E+02	2,4659E+03
	VTF3(x)	1,9063E+02	8,3539E+03	1,4796E+03	7,4917E+02	2,0180E+03
	VTF4(x)	1,8840E+02	9,4468E+03	1,0777E+03	3,4152E+02	1,7768E+03

STF3(x)-PGK-1 ve VTF4(x)-PGK-1 yaklaşımlarının diğerlerine kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Tablo 6.76'da verilen istatistiksel göstergeler de bu tespitimizi destekler niteliktedir. Ancak daha önce de bahsedildiği gibi uygulanan yöntemler arasında gerçekten kayda değer bir farkın olduğunu görebilmek için Wilcoxon işaretli sıra testine göre geçersiz hipotez reddini elde etmek önemlidir.



Şekil 6.23. Farklı senaryolarda İBO'nun ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2



Şekil 6.24. Farklı senaryolarla İBO'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafikleri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2

Tablo 6.77. İBO'da kullanılan STF3(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
STF3(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK1	274,00	191,00	**3,99E-01**
STF3(x)-PGK-1 ile VTF2(x)-PGK1	251,00	214,00	**7,11E-01**
STF3(x)-PGK-1 ile VTF3(x)-PGK1	385,50	79,50	1,71E-03
STF3(x)-PGK-1 ile VTF4(x)-PGK1	325,00	140,00	**5,77E-02**
STF3(x)-PGK-1 ile STF3(x)-PGK2	309,00	156,00	**1,19E-01**
STF3(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK2	341,50	123,50	2,56E-02
STF3(x)-PGK-1 ile VTF2(x)-PGK2	373,00	92,00	2,99E-03
STF3(x)-PGK-1 ile VTF3(x)-PGK2	375,00	90,00	3,49E-03
STF3(x)-PGK-1 ile VTF4(x)-PGK2	327,00	138,00	**5,32E-02**

STF3(x)-PGK-1 ile diğer tüm senaryolar karşılaştırıldığında elde edilen p-değerleri Tablo 6.77'de verilmiştir. Görüldüğü gibi STF3(x)-PGK-1 yaklaşımı %39,9 olasılıkta VTF1(x)-PGK-1'e, %71,1 olasılıkta VTF2(x)-PGK-1'e, %5,77 olasılıkta VTF4(x)-PGK-1'e, %11,9 olasılıkta STF3(x)-PGK-2'ye ve %5,32 olasılıkta VTF4(x)-PGK-2'ye benzemektedir. Yani, STF3(x)-PGK-1 yaklaşımıyla oluşturulan İBO algoritmasından elde edilen sonuçlar ile VTF1(x)-PGK-1, VTF2(x)-PGK-1, VTF4(x)-PGK-1, STF3(x)-PGK-2 ve VTF4(x)-PGK-2 yöntemleriyle oluşturulan İBO'nun sonuçları arasında önemli derecede fark yoktur.

6.3.4. İkili yerçekimsel arama algoritması kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

Yerçekimsel arama algoritması sürekli arama uzayına sahip problemlerde başarılı sonuçlar veren ve yaygın şekilde kullanılan başarılı bir algoritmadır. Ayrık problemler için önceki çalışmalarda geliştirilmiş olan ikili versiyonunun bazı ikili problemlerde başarı sağladığı görülmektedir. Dolayısıyla İYAA algoritmasının ikili versiyonu BBO probleminde kullanılarak performansı test edilmiştir.

Yapılan analizlerde yalın haliyle İYAA'dan başarılı sonuçlar alınamamıştır ve bu nedenle çeşitli alternatif yaklaşımlar denenmiştir. Bölüm 5.1.2'de V-Şekilli transfer fonksiyonları içeriğinde anlatılan M. Khanesar ve D. Branson [138] tarafından yapılan

çalışmada belirtilen XOR ikili YAA yaklaşımından nispeten iyi sonuç alınsa da genel olarak algoritmanın BBO problemini çözmedeki başarısı çok sınırlı kalmıştır.

Tablo 6.78. YAA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	218,17	7	2938,58	13	8540,78	19	8540,78	25	9117,36
2	298,70	8	3416,02	14	8540,78	20	8540,78	26	9388,69
3	354,63	9	7292,74	15	8540,78	21	8540,78	27	9712,85
4	576,77	10	8208,94	16	8540,78	22	8540,78	28	9752,15
5	2339,72	11	8317,40	17	8540,78	23	8554,07	29	10214,57
6	2840,86	12	8402,44	18	8540,78	24	8567,33	30	10232,39

Tablo 6.79. YAA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	215,59	7	1206,33	13	1880,38	19	8211,56	25	10181,89
2	271,86	8	1245,31	14	1926,76	20	8717,06	26	10203,72
3	289,72	9	1246,05	15	2783,47	21	8722,62	27	10203,82
4	296,41	10	1264,66	16	3105,79	22	9235,44	28	10204,91
5	541,92	11	1509,42	17	3299,77	23	10086,40	29	10215,65
6	619,93	12	1555,96	18	3553,16	24	10165,66	30	10218,27

Tablo 6.80. YAA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	223,60	7	2247,86	13	5750,27	19	8540,78	25	8763,72
2	532,97	8	2563,14	14	7292,74	20	8540,78	26	8939,11
3	769,06	9	2564,33	15	8148,17	21	8540,78	27	9117,36
4	1504,78	10	3158,50	16	8183,38	22	8554,07	28	10190,76
5	1729,05	11	3551,26	17	8317,40	23	8554,07	29	10214,95
6	1733,47	12	3554,94	18	8540,78	24	8591,06	30	10220,44

Tablo 6.78, 6.79, 6.80, 6.81 ve 6.82'de birinci pozisyon güncelleme kuralı PGK-1 ile STF3(x), VTF1(x), VTF2(x), VTF3(x) ve VTF4(x) fonksiyonlarının birlikte kullanımıyla XOR ikili YAA'nın 30 bağımsız çözümünden elde edilen en iyi sonuçlar sırasıyla gösterilmektedir. Tablolar incelendiğinde çalışmamız kapsamında önerilen

VTF4(x) fonksiyonuyla kullanımı diğerlerine göre nispeten iyi sonuçlar verse bile sonuçların hala yarıdan fazlası optimal bölgeye yaklaşamamıştır.

Tablo 6.81. YAA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	1122,04	13	1170,24	19	3108,84	25	8563,28
2	218,03	8	1122,04	14	1170,24	20	3263,14	26	10199,82
3	218,03	9	1122,04	15	1170,24	21	4205,10	27	10203,97
4	249,45	10	1170,24	16	1170,24	22	4237,37	28	10211,79
5	285,55	11	1170,24	17	2176,30	23	4308,69	29	10228,14
6	317,36	12	1170,24	18	3108,84	24	7757,23	30	10234,38

Tablo 6.82. YAA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	218,03	7	311,68	13	538,52	19	1207,24	25	2156,28
2	218,03	8	319,81	14	541,90	20	1212,15	26	3201,01
3	230,40	9	319,81	15	1187,17	21	1215,98	27	4236,47
4	253,92	10	345,07	16	1201,79	22	1215,98	28	4237,37
5	274,45	11	365,96	17	1203,01	23	1370,55	29	4237,37
6	277,57	12	369,59	18	1203,19	24	1649,80	30	7914,26

Tablo 6.83. YAA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	292,41	7	1263,94	13	2719,49	19	8234,70	25	10195,95
2	317,36	8	1294,84	14	2938,58	20	9178,45	26	10202,18
3	1170,24	9	1459,62	15	3049,27	21	9308,07	27	10204,79
4	1207,15	10	1664,87	16	3144,06	22	9388,69	28	10207,89
5	1221,05	11	1664,87	17	4305,79	23	10167,17	29	10210,95
6	1253,65	12	2652,33	18	4445,96	24	10177,32	30	10214,43

İkinci pozisyon güncelleme kuralı PGK-2 ile STF3(x), VTF1(x), VTF2(x), VTF3(x) ve VTF4(x) fonksiyonlarının birlikte kullanımıyla sürekli uzaydan ayrık uzaya geçiş yapılan XOR ikili YAA'nın 30 bağımsız çözümünden elde edilen en iyi sonuçlar ise sırasıyla Tablo 6.83, 6.84, 6.85, 6.86 ve 6.87'de gösterilmektedir. Tablolar incelendiğinde PGK-2 ile kullanılan hiçbir fonksiyonun başarılı olamadığı

görülmektedir. Literatürde PGK-2 güncelleme kuralı V-şekilli transfer fonksiyonu ailesi ile birlikte kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Ancak YAA yöntemiyle normalde uyumlu çalışması beklenen bu senaryoların gerek benchmark fonksiyonlarında gerekse BBO probleminin çözümünde olumlu bir yakınsama grafiği gözlemlenmemiştir. Dolayısıyla hangi algoritmanın hangi transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı kombinasyonuyla hangi problemde kaliteli çözümler sunacağıyla ilgili kesin bir beyanda bulunmanın doğru olmayacağı görülmektedir.

Tablo 6.84. YAA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	3167,63	7	10175,35	13	10200,43	19	10211,17	25	10241,70
2	3424,60	8	10177,98	14	10201,70	20	10214,23	26	10251,41
3	4295,96	9	10183,46	15	10201,97	21	10217,65	27	10254,10
4	4808,17	10	10185,20	16	10207,90	22	10223,69	28	10255,94
5	8356,71	11	10198,71	17	10210,80	23	10224,25	29	10311,93
6	9469,10	12	10200,39	18	10210,80	24	10237,76	30	10328,11

Tablo 6.85. YAA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	1048,46	7	3525,06	13	10202,58	19	10219,95	25	10242,78
2	1185,89	8	4488,92	14	10202,69	20	10220,07	26	10246,54
3	1691,81	9	8608,89	15	10209,33	21	10222,58	27	10250,82
4	2776,78	10	10185,89	16	10209,49	22	10226,37	28	10252,71
5	3227,51	11	10191,22	17	10210,07	23	10238,37	29	10253,26
6	3346,70	12	10198,66	18	10214,86	24	10239,59	30	10256,42

Tablo 6.86. YAA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	697,30	7	3599,94	13	10206,00	19	10217,26	25	10250,53
2	760,92	8	9326,37	14	10209,23	20	10217,35	26	10256,12
3	1844,19	9	9771,86	15	10211,95	21	10217,42	27	10262,43
4	2419,11	10	10199,66	16	10212,61	22	10224,06	28	10264,92
5	3105,79	11	10205,12	17	10213,92	23	10229,95	29	10287,28
6	3212,52	12	10205,88	18	10216,29	24	10247,90	30	10311,55

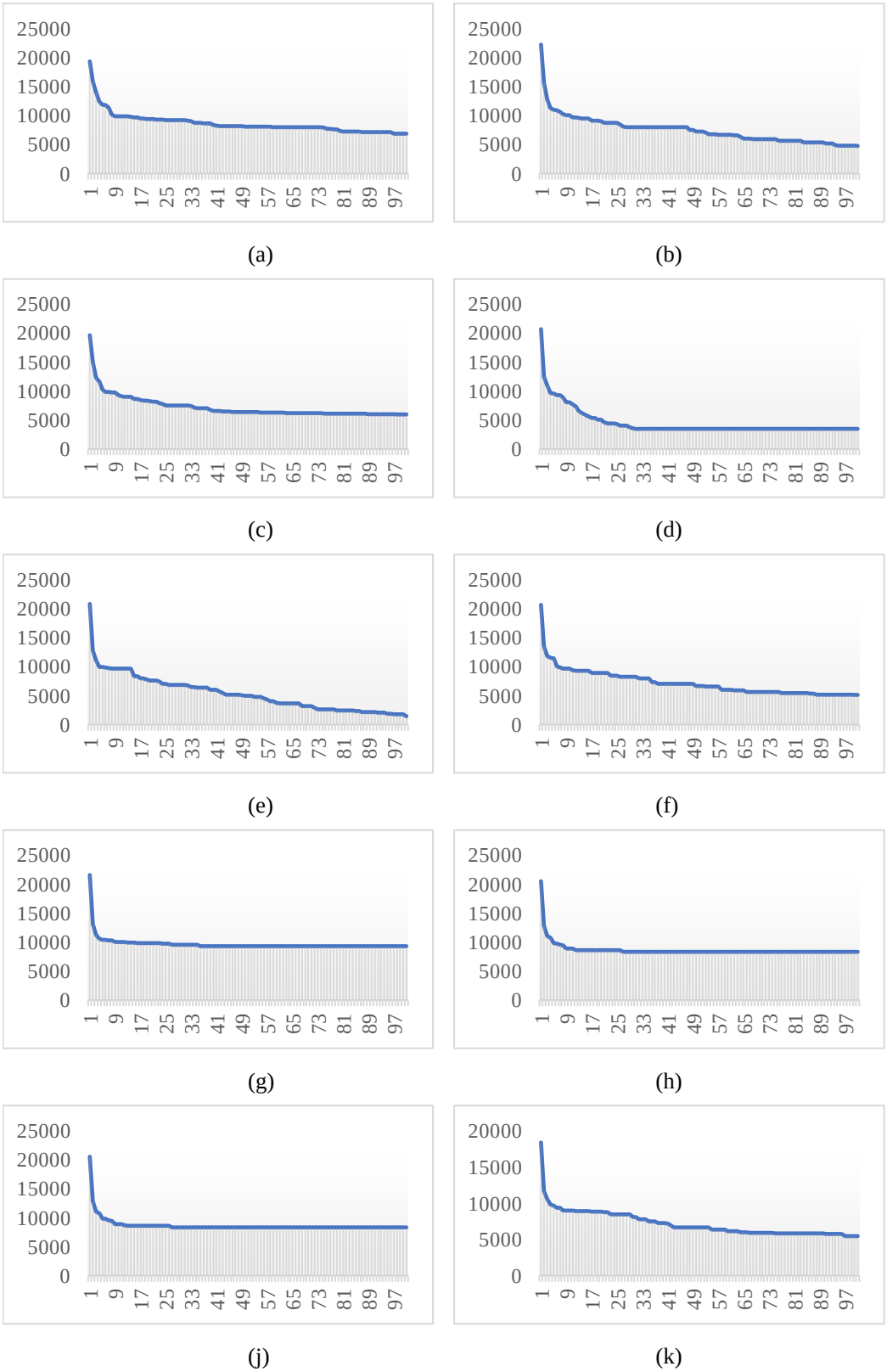
Tablo 6.87. YAA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	315,80	7	1225,58	13	1372,02	19	8363,71	25	10199,74
2	349,49	8	1228,65	14	3226,87	20	8403,57	26	10201,52
3	416,36	9	1238,17	15	6411,77	21	9193,64	27	10204,87
4	1200,03	10	1242,93	16	7757,23	22	9213,24	28	10206,95
5	1222,64	11	1246,86	17	8226,33	23	9443,29	29	10215,80
6	1223,52	12	1322,67	18	8259,22	24	10170,47	30	10230,06

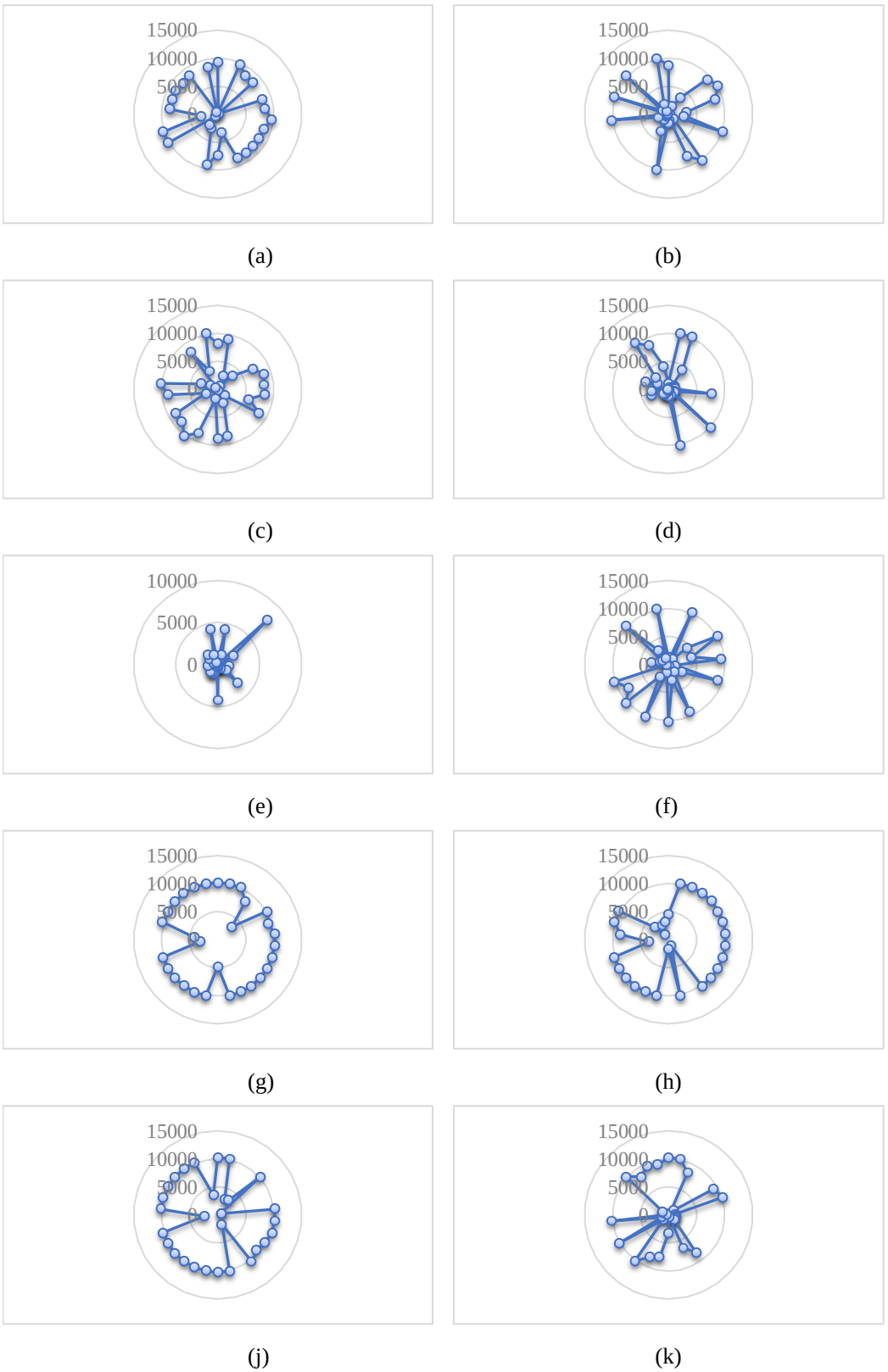
Tablo 6.88. YAA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları

Pozisyon Güncelleme Kuralı	Transfer Fonksiyonu	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
PGK-1	STF3(x)	2,1817E+02	1,0232E+04	6,8717E+03	8,5408E+03	3,2861E+03
	VTF1(x)	2,1559E+02	1,0218E+04	4,7727E+03	2,9446E+03	4,1285E+03
	VTF2(x)	2,2360E+02	1,0220E+04	5,9711E+03	8,1658E+03	3,3970E+03
	VTF3(x)	**1,8578E+02**	1,0234E+04	3,4946E+03	**1,1702E+03**	3,6129E+03
	VTF4(x)	2,1803E+02	**7,9143E+03**	**1,4411E+03**	1,1945E+03	**1,7025E+03**
PGK-2	STF3(x)	2,9241E+02	1,0214E+04	5,1252E+03	3,0967E+03	3,9510E+03
	VTF1(x)	3,1676E+03	1,0328E+04	9,2950E+03	1,0205E+04	2,1501E+03
	VTF2(x)	1,0485E+03	1,0256E+04	8,1531E+03	1,0209E+04	3,3770E+03
	VTF3(x)	6,9730E+02	1,0312E+04	8,3202E+03	1,0212E+04	3,4032E+03
	VTF4(x)	3,1580E+02	1,0230E+04	5,4511E+03	7,0845E+03	4,0837E+03

Çalışmamız kapsamında çeşitli transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralları uygulanmasına rağmen İYAA'da keşfetme ve faydalanma safhaları arasındaki denge kurulamamıştır. Şekil 6.25'te verilen İYAA'nın ortalama yakınsama eğrileri ve Şekil 6.26'da verilen radar grafikleri algoritmanın kalitesiz yerel noktalara takıldığını, arama uzayını yeterince araştırıp faydalanamadığını göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde sadece önerdiğimiz VTF4(x) fonksiyonunun PGK-1 ile birlikte kullanımında, algoritmanın nispeten daha başarılı yakınsama gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.25. Farklı senaryolarda İYAA'nın ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2



Şekil 6.26. Farklı senaryolarla İYAA'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafikleri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2, k) VTF4(x) ve PGK-2

Tablo 6.89. İYAA'da kullanılan VTF4(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
VTF4(x)-PGK-1 ile STF3(x)-PGK1	444	21	8,33E-07
VTF4(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK1	395	70	4,60E-04
VTF4(x)-PGK-1 ile VTF2(x)-PGK1	441	24	1,42E-06
VTF4(x)-PGK-1 ile VTF3(x)-PGK1	357,5	107,5	1,04E-02
VTF4(x)-PGK-1 ile STF3(x)-PGK2	409	56	1,11E-04
VTF4(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK2	461	4	2,74E-06
VTF4(x)-PGK-1 ile VTF2(x)-PGK2	454	11	5,47E-06
VTF4(x)-PGK-1 ile VTF3(x)-PGK2	459	6	2,61E-08
VTF4(x)-PGK-1 ile VTF4(x)-PGK2	420	45	3,05E-05

Bilindiği gibi YAA algoritmasının ikili versiyonunu elde etmek için uygulanan çeşitli transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralları kullanılarak elde edilen sonuçların istatistiksel karşılaştırılması yapılmalı ve hangisinin daha iyi olduğu net bir şekilde belirlenmelidir. Bu amaç doğrultusunda şu ana kadar 30 bağımsız çözümden elde edilen minimum, maksimum, ortalama, ortanca değerleri ile standart sapmaları Tablo 6.88'de verilmiştir. İlgili istatistiksel sonuçlar yakınsama eğrilerini destekleyerek yine VTF4(x)-PGK-1 kombinasyonunu öne çıkarmaktadır fakat diğer fonksiyonlar ile arasında kayda değer bir fark olup olmadığının tespiti Tablo 6.89'da verilen ikili karşılaştırma yöntemiyle yapılmıştır. Diğer istatistiksel veriler ile önde çıkan VTF4(x)-PGK-1, kullanılan tüm fonksiyon ve pozisyon güncelleme kurallarıyla birer birer karşılaştırılmış ve p-değerleri hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere olasılıksal olarak karşılaştırılan veri setlerinin birbirine benzeme ihtimalini gösteren tüm p-değerleri 0.05 önem derecesinden daha düşük çıkarak VTF4(x)-PGK-1'in diğerlerinden önemli derecede üstün olduğu gerçeğini desteklemiştir.

6.3.5. İkili yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

Sürekli optimizasyon problemlerinde başarılı sonuçlar veren YAKA'nın ikili versiyonları da test fonksiyonları ve gerçek problemler üzerinde rekabetçi sonuçlar

vermiştir [107, 108, 116, 122, 129, 136, 137] ve bu nedenle BBO probleminde kullanılarak gösterdiği performans incelenmiştir. Tablo 6.90'da STF3(x)-PGK1 senaryosu şu ana kadar karşılaşılan en kötü performansı göstermiştir. Üstelik Tablo 6.91, 6.92, 6.93 ve 6.94 incelendiğinde sigmoid fonksiyonunun yanı sıra V-Şekilli transfer fonksiyonlarının hiçbirinde PGK-1 ile başarı sağlanamadığı görülmektedir. Benchmark problemlerinde başarılı sonuçlar sunan senaryolar, BBO probleminde yerel optimal noktalara takılmıştır.

Tablo 6.90. YAKA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	298,29	7	2211,80	13	9267,24	19	10200,38	25	10216,76
2	1187,58	8	2264,43	14	9310,69	20	10202,13	26	10220,23
3	1223,07	9	4600,10	15	10185,13	21	10203,13	27	10220,87
4	1254,92	10	4640,48	16	10192,51	22	10205,38	28	10226,76
5	1430,84	11	7605,15	17	10196,88	23	10210,92	29	10234,67
6	1914,24	12	7611,54	18	10198,47	24	10211,92	30	10332,65

Tablo 6.91. YAKA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	274,89	7	1347,73	13	9036,60	19	10212,56	25	10243,01
2	338,63	8	6590,52	14	9915,54	20	10215,61	26	10243,20
3	461,73	9	6615,69	15	10177,38	21	10215,90	27	10267,55
4	1237,12	10	7453,55	16	10198,75	22	10217,86	28	10288,53
5	1288,32	11	8502,70	17	10205,55	23	10231,47	29	10379,77
6	1332,67	12	8955,84	18	10207,19	24	10236,72	30	10829,31

Tablo 6.92. YAKA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	196,00	7	2655,75	13	6279,31	19	10189,91	25	10211,83
2	196,00	8	2655,75	14	9253,81	20	10193,98	26	10213,31
3	217,54	9	4403,86	15	9356,21	21	10197,19	27	10213,31
4	1305,74	10	4446,78	16	9489,42	22	10204,55	28	10235,49
5	1798,86	11	4826,88	17	9539,32	23	10208,63	29	10238,28
6	2636,83	12	6257,73	18	10187,33	24	10210,75	30	10241,42

Tablo 6.93. YAKA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	240,64	7	1367,06	13	10180,75	19	10195,06	25	10203,66
2	296,26	8	1773,95	14	10185,13	20	10198,66	26	10205,84
3	315,42	9	2211,80	15	10185,13	21	10199,19	27	10222,03
4	640,29	10	2413,25	16	10192,90	22	10199,99	28	10234,86
5	1242,11	11	3333,71	17	10194,24	23	10202,87	29	10267,55
6	1366,16	12	8343,84	18	10194,25	24	10203,54	30	10542,35

Tablo 6.94. YAKA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	216,84	7	1263,33	13	6290,11	19	10186,77	25	10214,68
2	220,11	8	1487,37	14	8284,02	20	10187,36	26	10216,02
3	295,90	9	2123,62	15	8509,18	21	10200,86	27	10216,91
4	335,36	10	2576,43	16	9551,66	22	10209,07	28	10216,95
5	336,64	11	2713,55	17	10178,45	23	10210,98	29	10231,29
6	881,57	12	4808,17	18	10179,43	24	10213,68	30	10326,84

Tablo 6.95. YAKA'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	242,51	7	1223,07	13	5170,09	19	10207,28	25	10219,47
2	247,58	8	1254,81	14	9255,54	20	10207,88	26	10227,44
3	315,42	9	1348,27	15	10186,03	21	10208,90	27	10228,75
4	638,16	10	1583,00	16	10194,39	22	10209,23	28	10244,24
5	755,39	11	1611,70	17	10199,68	23	10212,16	29	10246,28
6	1175,31	12	2567,21	18	10202,87	24	10217,95	30	10490,96

Tablo 6.96. YAKA'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	218,37	7	2538,65	13	8357,06	19	10199,80	25	10212,99
2	224,13	8	3568,81	14	8482,61	20	10201,37	26	10215,21
3	1288,86	9	4655,34	15	10181,48	21	10205,02	27	10217,64
4	1412,33	10	5525,37	16	10187,40	22	10206,94	28	10218,14
5	1448,99	11	7279,13	17	10193,31	23	10208,83	29	10227,28
6	2514,00	12	7604,58	18	10198,29	24	10211,27	30	10238,87

Sigmoid fonksiyonunun PGK-2 ile kullanılmasıyla YAKA'dan elde edilen sonuçlar Tablo 6.95'te görüldüğü gibi yine başarı sağlayamamıştır. PGK-2 ile Tablo 6.96'da VTF1(x), Tablo 6.97'de VTF2(x), Tablo 6.98'de VTF3(x) ve Tablo 6.99'da VTF4(x) kullanılmıştır. Nispeten VTF3(x)-PGK-2 yaklaşımı daha iyi performans sağlamış olsa bile gerçek bir güç sisteminde bara düzeni optimizasyonu yapabilecek düzeyde güvenilir görünmemektedir.

Tablo 6.97. YAKA'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	187,62	7	881,57	13	6279,31	19	10203,19	25	10216,70
2	194,03	8	1301,92	14	9245,43	20	10203,67	26	10223,63
3	219,72	9	1704,05	15	10168,40	21	10205,12	27	10224,00
4	224,13	10	1773,95	16	10197,63	22	10210,22	28	10235,25
5	532,97	11	2655,75	17	10199,80	23	10212,20	29	10257,47
6	595,24	12	4839,21	18	10202,33	24	10212,66	30	10404,09

Tablo 6.98. YAKA'da kullanılan VTF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	188,40	7	1222,99	13	2264,43	19	7524,83	25	10187,89
2	194,60	8	1224,82	14	3275,12	20	8211,40	26	10194,24
3	240,64	9	1254,92	15	3279,78	21	8333,17	27	10195,06
4	348,48	10	1412,33	16	3448,49	22	8655,88	28	10195,32
5	373,47	11	1519,55	17	3550,59	23	8657,98	29	10202,58
6	664,89	12	2222,16	18	7398,07	24	8955,84	30	10211,53

Tablo 6.99. YAKA'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

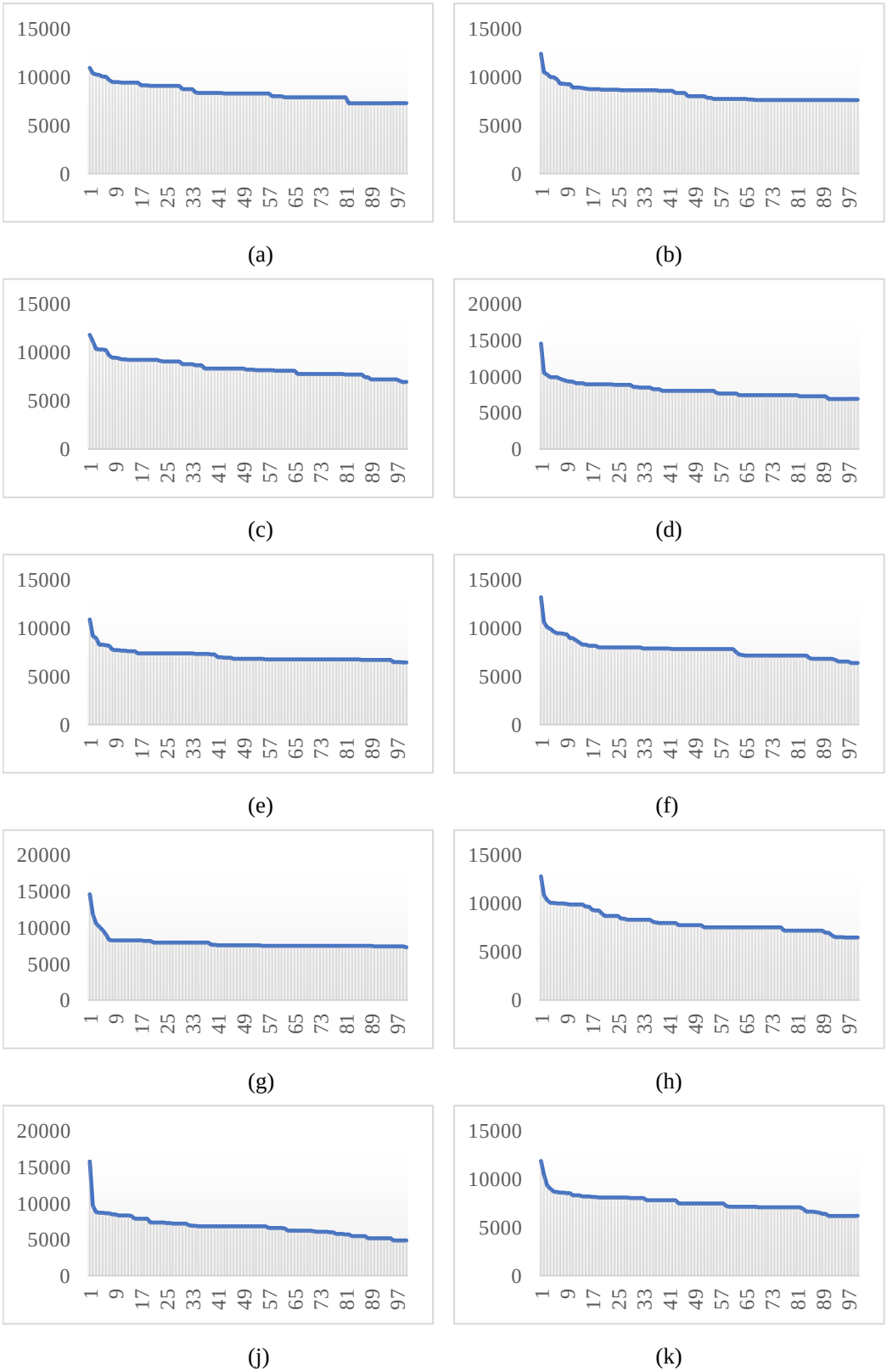
Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	194,60	7	1260,64	13	2736,32	19	10194,66	25	10213,21
2	315,42	8	1396,15	14	7398,07	20	10195,32	26	10217,54
3	373,47	9	1984,33	15	8343,84	21	10198,72	27	10218,04
4	640,29	10	2381,91	16	8657,07	22	10208,43	28	10220,48
5	724,42	11	2545,02	17	10181,48	23	10212,08	29	10243,42
6	1144,81	12	2642,34	18	10187,33	24	10212,16	30	10317,88

YAKA'da kullanılan senaryoların ortalama yakınsama eğrileri Şekil 6.27'de gösterilmiş olup her senaryo için uygulanan 30 bağımsız çözümden elde edilen en iyi sonuçların hangi bölgede kümelendiğini ve optimal bölgeden ne kadar saptığını görebilmeye yardımcı olması amacıyla oluşturulmuş olan radar grafikler de Şekil 6.28'de verilmiştir. Her iki şekilde de VTF3(x)-PGK-2 kombinasyonundan elde edilen sonuçların nispeten daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

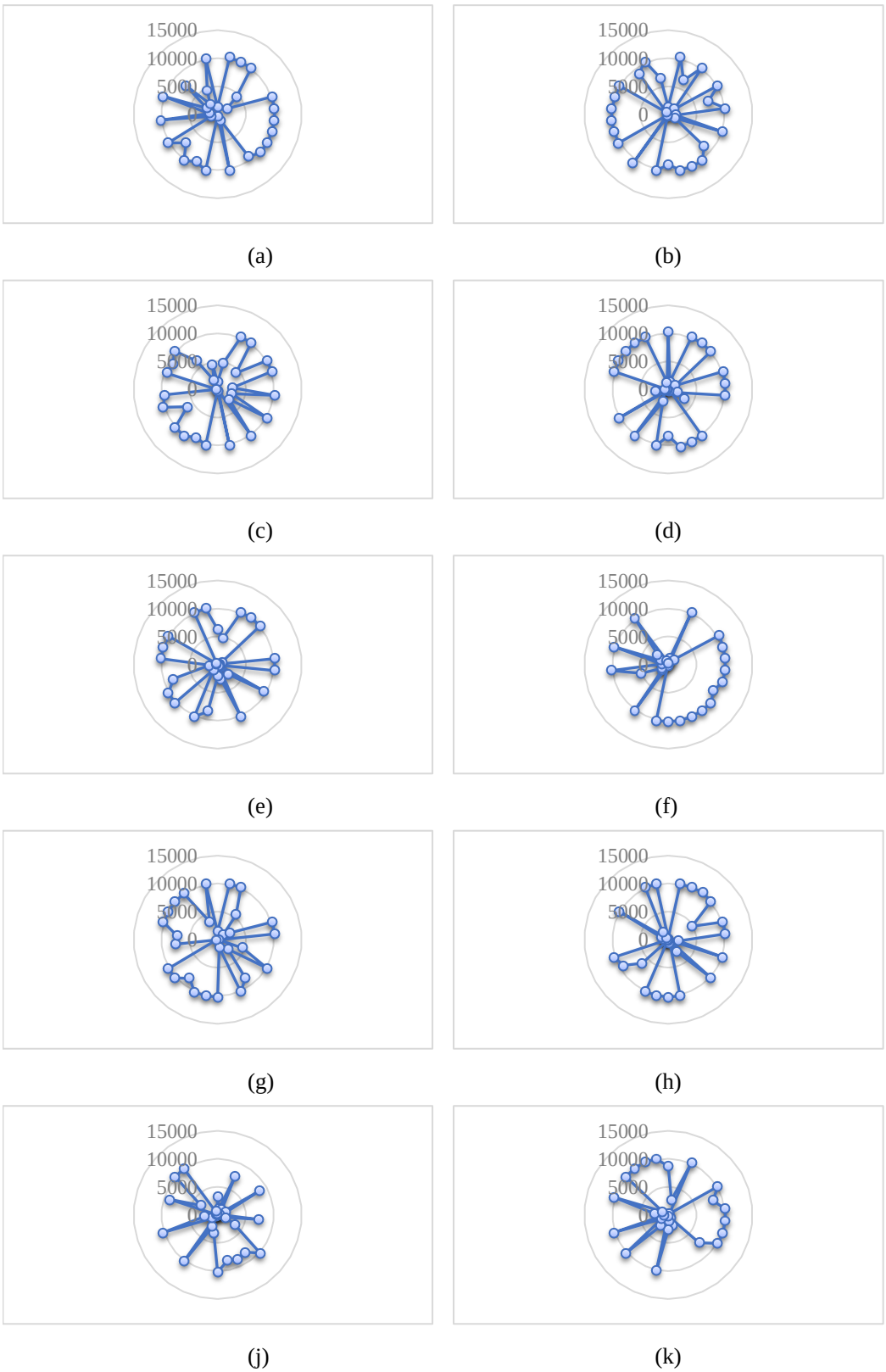
Tablo 6.100'de verilen istatistiksel göstergelere göre VTF3(x)-PGK-2 yaklaşımıyla 188,4 değerinde başarılı bir sonuç elde edilmiş olsa bile standart sapma ve ortalama değerlerin tüm yaklaşımlarda oldukça yüksek çıktığı görülmektedir. Tablo 6.101'de verilen parametrik olmayan işaretli sıra testi sonuçları incelendiğinde VTF3(x)-PGK-2 yaklaşımı nispeten iyi görünmüş olsa da aslında VTF2(x)-PGK-2 ve VTF4(x)-PGK-2 senaryolarına göre kayda değer bir farklılık göstermediği görülmektedir. Çeşitli transfer fonksiyonları, pozisyon güncelleme kuralları ve literatürde bulunan YAKA'ya özel geliştirilmiş yöntemler denenmesine rağmen YAKA'dan BBO problemini çözebilme açısından beklenen performans alınamamıştır.

Tablo 6.100. YAKA'yı sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları

Pozisyon Güncelleme Kuralı	Transfer Fonksiyonu	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
PGK-1	STF3(x)	2,9829E+02	1,0333E+04	7,2760E+03	1,0189E+04	3,7995E+03
	VTF1(x)	2,7489E+02	1,0829E+04	7,5907E+03	1,0188E+04	3,8419E+03
	VTF2(x)	1,9600E+02	1,0241E+04	6,9421E+03	9,4228E+03	3,7909E+03
	VTF3(x)	2,4064E+02	1,0542E+04	6,9184E+03	1,0189E+04	4,2652E+03
	VTF4(x)	2,1684E+02	1,0327E+04	6,4294E+03	9,0304E+03	4,2378E+03
PGK-2	STF3(x)	2,4251E+02	1,0491E+04	6,3697E+03	1,0190E+04	4,4323E+03
	VTF1(x)	2,1837E+02	1,0239E+04	7,2814E+03	1,0184E+04	**3,7093E+03**
	VTF2(x)	**1,8762E+02**	1,0404E+04	6,4737E+03	1,0183E+04	4,3963E+03
	VTF3(x)	1,8840E+02	**1,0212E+04**	4,8536E+03	**3,3641E+03**	3,9213E+03
	VTF4(x)	1,9460E+02	1,0318E+04	**6,1920E+03**	8,5005E+03	4,2692E+03



Şekil 6.27. Farklı senaryolarda İYAKA'nın ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2



Şekil 6.28. Farklı senaryolarla İYAKA'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafikleri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF3(x) ve PGK-1 e) VTF4(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF3(x) ve PGK-2 k) VTF4(x) ve PGK-2

Tablo 6.101. İYAKA'da kullanılan VTF3(x)-PGK-2 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
VTF3(x)-PGK-2 ile STF3(x)-PGK1	333,00	132,00	3,84E-02
VTF3(x)-PGK-2 ile VTF1(x)-PGK1	343,00	122,00	2,21E-02
VTF3(x)-PGK-2 ile VTF2(x)-PGK1	353,00	112,00	1,20E-02
VTF3(x)-PGK-2 ile VTF3(x)-PGK1	357,00	108,00	9,30E-03
VTF3(x)-PGK-2 ile VTF4(x)-PGK2	300,00	165,00	**1,71E-01**
VTF3(x)-PGK-2 ile STF3(x)-PGK2	345,00	120,00	1,97E-02
VTF3(x)-PGK-2 ile VTF1(x)-PGK2	340,00	125,00	2,62E-02
VTF3(x)-PGK-2 ile VTF2(x)-PGK2	298,00	167,00	**1,84E-01**
VTF3(x)-PGK-2 ile VTF4(x)-PGK2	296,00	169,00	**1,98E-01**

6.3.6. İkili dinamik kontrollü parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

Dinamik kontrollü PSO yaklaşımı, geleneksel PSO algoritmasında yaşanan yerel optimalden kaçınma problemine çözüm olabilmesi için önerilmiştir. DKPSO, şu ana kadar bahsedilen diğer sezgi-üstü algoritmalarda olduğu gibi sürekli arama uzayında araştırma yapmaktadır ve bu nedenle ayrık uzaya geçişi sağlanmalıdır. PSO yönteminde yaygın olarak kullanılan sigmoid fonksiyonuyla ayrık uzaya geçilmesi halinde elde edilen en iyi sonuçlar Tablo 6.102'de gösterilmektedir. Algoritma STF3(x)-PGK-1 yaklaşımıyla birlikte çözümlerin neredeyse üçte ikisinde optimal bölgeye yakınsamıştır.

Tablo 6.102. DKPSO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	192,17	7	209,44	13	242,65	19	348,48	25	1350,82
2	196,00	8	209,44	14	317,60	20	401,88	26	1629,56
3	197,20	9	219,51	15	317,60	21	408,13	27	3312,64
4	198,93	10	222,37	16	317,60	22	672,32	28	4468,94
5	199,70	11	241,29	17	328,55	23	764,18	29	9211,86
6	205,62	12	241,29	18	328,55	24	904,10	30	9250,95

Tablo 6.103. DKPSO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	203,35	7	296,14	13	1212,92	19	4290,50	25	8250,84
2	211,96	8	296,95	14	1241,15	20	4290,50	26	8253,40
3	215,59	9	333,26	15	1443,90	21	4290,50	27	8625,11
4	217,54	10	333,26	16	2588,69	22	4833,47	28	8625,11
5	223,60	11	333,26	17	3261,39	23	7330,52	29	8625,11
6	241,29	12	750,71	18	4290,50	24	7346,96	30	8655,88

Tablo 6.104. DKPSO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	197,09	7	270,94	13	638,16	19	2719,49	25	7355,12
2	197,20	8	333,26	14	750,71	20	3105,65	26	7492,38
3	215,59	9	333,26	15	1163,99	21	3157,86	27	7695,86
4	219,66	10	333,26	16	1194,81	22	3158,70	28	7695,86
5	223,60	11	359,85	17	2143,02	23	4290,48	29	7928,89
6	226,81	12	636,45	18	2679,69	24	4290,48	30	8551,15

V-şekilli transfer fonksiyonları ve PGK-1 ile kullanımı Tablo 6.103, 6.104, 6.105 ve 6.106'da gösterilmektedir. Görüldüğü gibi algoritmanın V-şekilli fonksiyon ve PGK-1 kombinasyonuyla kullanımı neticesinde yakınsama problemi bulunmaktadır. VTF3(x) fonksiyonuyla birlikte kullanılması halinde elde edilen sonuçların çok daha başarısız olması sebebiyle bu fonksiyon yerine VTF6(x) fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon hala yerel optimale takılma problemi yaşamasına rağmen sigmoid fonksiyonunda karşılaşılan büyük çaplı sapmalar göstermemiştir.

Tablo 6.105. DKPSO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	190,63	7	241,29	13	638,16	19	865,63	25	1175,82
2	194,60	8	242,65	14	640,29	20	1026,25	26	1212,92
3	196,00	9	348,48	15	640,29	21	1163,99	27	1303,05
4	204,31	10	595,24	16	715,17	22	1163,99	28	1443,77
5	241,29	11	636,45	17	717,47	23	1163,99	29	3158,50
6	241,29	12	636,45	18	837,04	24	1163,99	30	7877,67

Tablo 6.107'de verilen sigmoid fonksiyonu ve PGK-2 kombinasyonu sonuçları incelendiğinde, algoritmanın STF3(x)-PGK-1'de gösterdiği performansı yakalayamadığı görülmektedir. Elde edilen sonuçların yarıdan fazlası optimal bölgeye yakınsayamamış ve yerel optimal noktalara takılma sorunu yaşamıştır.

Tablo 6.106. DKPSO'da kullanılan VTF6(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	213,63	7	296,95	13	636,45	19	1163,25	25	1213,04
2	215,59	8	333,26	14	640,29	20	1163,99	26	1303,05
3	222,37	9	348,48	15	652,18	21	1163,99	27	1303,05
4	223,60	10	408,13	16	658,51	22	1175,31	28	1729,05
5	229,52	11	619,20	17	749,42	23	1194,81	29	2719,49
6	247,58	12	636,45	18	785,60	24	1194,81	30	3178,27

Tablo 6.107. DKPSO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	197,09	7	214,00	13	333,26	19	1554,31	25	2569,03
2	197,20	8	218,63	14	619,19	20	1554,31	26	3189,11
3	198,93	9	219,16	15	623,47	21	1621,94	27	3262,31
4	201,56	10	219,66	16	654,85	22	1654,57	28	4453,31
5	214,00	11	319,09	17	672,32	23	1773,95	29	6258,79
6	214,00	12	329,60	18	750,71	24	2314,40	30	8300,10

Tablo 6.108. DKPSO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	320,30	13	1218,81	19	3261,39	25	9227,19
2	185,78	8	365,82	14	1301,92	20	7423,84	26	9252,84
3	187,62	9	642,78	15	1305,74	21	7488,96	27	9441,21
4	194,60	10	717,47	16	1448,50	22	7536,03	28	9790,87
5	204,31	11	866,79	17	1867,11	23	8294,15	29	10190,18
6	314,83	12	1144,81	18	3201,93	24	8296,43	30	10196,42

Tablo 6.108, 6.109 ve 6.110 incelendiğinde PGK-1'de olduğu gibi VTF1(x), VTF2(x) ve VTF4(x) fonksiyonları beklenenden uzak bir performans sergilemişlerdir. Tablo

6.111'de verilen VTF6(x)'in gösterdiği performans da beklenen düzeyde olmasa bile diğer fonksiyonlarda gözlemlenen büyük sapmaların yaşanmadığı görülmektedir.

Tablo 6.109. DKPSO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	296,95	13	836,45	19	2609,90	25	8240,28
2	199,70	8	314,83	14	1218,79	20	3178,27	26	8853,31
3	202,56	9	490,76	15	1220,22	21	3312,71	27	9228,75
4	216,84	10	672,32	16	1223,84	22	3333,74	28	9285,64
5	219,51	11	717,22	17	1350,82	23	5194,56	29	10198,47
6	270,94	12	784,46	18	1448,31	24	8214,70	30	10212,02

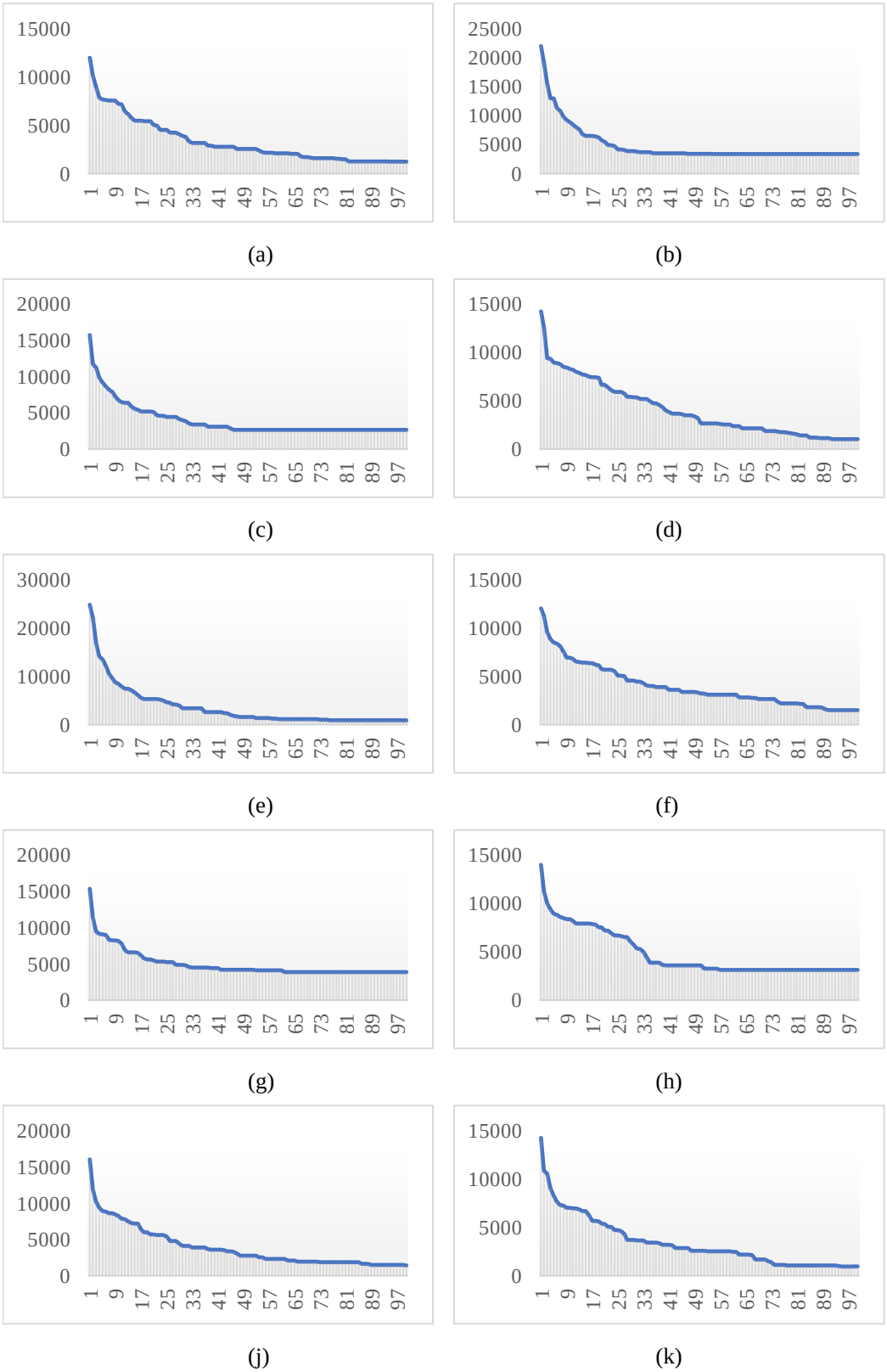
Tablo 6.110. DKPSO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	192,17	7	242,51	13	432,59	19	1519,55	25	2564,91
2	198,08	8	271,35	14	672,32	20	1541,63	26	2676,31
3	214,00	9	314,83	15	1144,81	21	1629,56	27	2803,06
4	219,51	10	372,67	16	1175,31	22	1747,75	28	2816,78
5	229,41	11	380,54	17	1253,23	23	2237,81	29	4808,17
6	240,64	12	401,88	18	1264,66	24	2545,02	30	6197,55

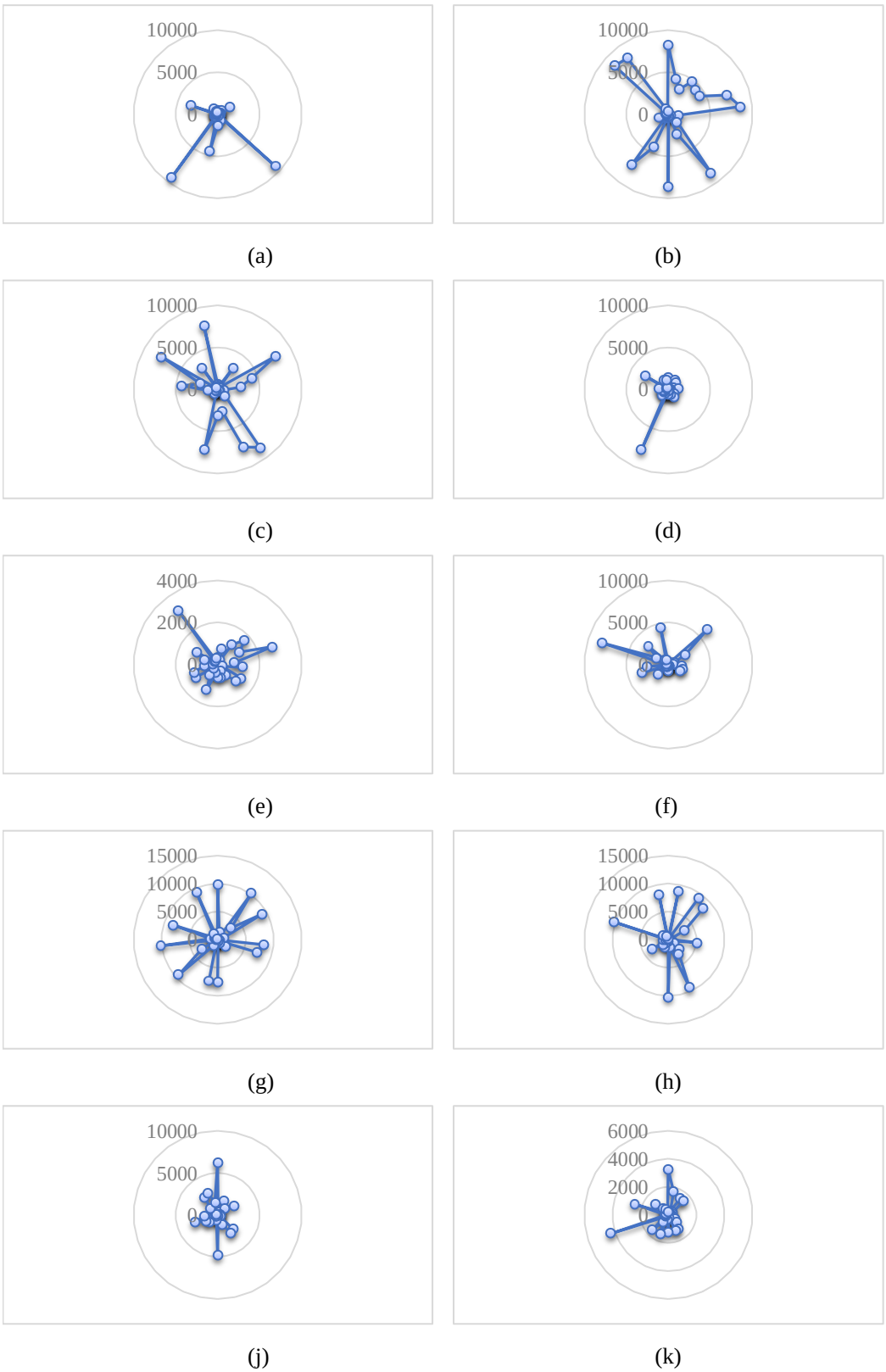
Tablo 6.111. DKPSO'da kullanılan VTF6(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189,66	7	224,13	13	359,85	19	1166,71	25	1476,89
2	190,63	8	227,55	14	416,87	20	1222,97	26	1583,00
3	196,00	9	247,58	15	532,97	21	1222,97	27	1704,05
4	219,51	10	315,42	16	575,36	22	1241,98	28	2514,00
5	221,07	11	317,38	17	642,78	23	1440,39	29	3248,11
6	222,37	12	331,34	18	788,12	24	1463,21	30	4303,55

Şekil 6.29'da verilen ortalama yakınsama eğrileri ve Şekil 6.30'da verilen radar grafikler incelendiğinde VTF6(x) fonksiyonuyla elde edilen sonuçların daha kaliteli olduğu görülmektedir. Bu durumu Tablo 6.112'de verilen istatistiksel veriler de desteklemektedir. Bu nedenle, Tablo 6.113'te Wilcoxon testinde ikili karılaştırmaların merkezine VTF6(x)-PGK-1 yaklaşımı alınmıştır.



Şekil 6.29. Farklı senaryolarda İDKPSO'nun ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF4(x) ve PGK-1 e) VTF6(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF4(x) ve PGK-2 k) VTF6(x) ve PGK-2



Şekil 6.30. Farklı senaryolarla İDKPSO'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafikleri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF4(x) ve PGK-1 e) VTF6(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF4(x) ve PGK-2 k) VTF6(x) ve PGK-2

Tablo 6.112. DKPSO'yu sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları

Pozisyon Güncelleme Kuralı	Transfer Fonksiyonu	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
PGK-1	STF3(x)	1,9217E+02	9,2509E+03	1,2370E+03	**3,1760E+02**	2,3337E+03
	VTF1(x)	2,0335E+02	8,6559E+03	3,3704E+03	2,0163E+03	3,2762E+03
	VTF2(x)	1,9709E+02	8,5511E+03	2,6520E+03	1,1794E+03	2,8533E+03
	VTF4(x)	1,9063E+02	7,8777E+03	1,0292E+03	6,7773E+02	1,3993E+03
	VTF6(x)	2,1363E+02	**3,1783E+03**	**8,8731E+02**	6,5534E+02	**6,9445E+02**
PGK-2	STF3(x)	1,9709E+02	8,3001E+03	1,4968E+03	6,3916E+02	1,9129E+03
	VTF1(x)	**1,8578E+02**	1,0196E+04	3,8691E+03	1,3771E+03	3,8942E+03
	VTF2(x)	**1,8578E+02**	1,0212E+04	3,1244E+03	1,2220E+03	3,5495E+03
	VTF4(x)	1,9217E+02	6,1975E+03	1,4103E+03	1,1601E+03	1,4228E+03
	VTF6(x)	1,8966E+02	4,3036E+03	9,6021E+02	5,5417E+02	9,6808E+02

Tablo 6.113. İDKPSO'da kullanılan VTF6(x)-PGK-1 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
VTF6(x)-PGK-1 ile STF3(x)-PGK1	179,00	286,00	**2,80E-01**
VTF6(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK1	379,00	86,00	1,86E-03
VTF6(x)-PGK-1 ile VTF2(x)-PGK1	352,00	113,00	1,28E-02
VTF6(x)-PGK-1 ile VTF4(x)-PGK1	240,00	225,00	**8,87E-01**
VTF6(x)-PGK-1 ile STF3(x)-PGK2	272,00	193,00	**4,28E-01**
VTF6(x)-PGK-1 ile VTF1(x)-PGK2	362,00	103,00	6,64E-03
VTF6(x)-PGK-1 ile VTF2(x)-PGK2	373,00	92,00	2,99E-03
VTF6(x)-PGK-1 ile VTF4(x)-PGK2	304,00	161,00	**1,46E-01**
VTF6(x)-PGK-1 ile VTF6(x)-PGK2	233,00	232,00	**1,00E+00**

Parametrik olmayan Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçlarına göre VTF6(x)-PGK-1 ile VTF6(x)-PGK-2 yaklaşımları arasında bir fark bulunmadığı görülmektedir. VTF6(x)-

PGK-1 yaklaşımının STF3(x)-PGK-1 ile %28 oranında, VTF4(x)-PGK-1 ile %88,7 oranında, STF3(x)-PGK-2 ile %42,8 oranında ve VTF4(x)-PGK-2 ile %14,6 oranında benzer olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, DKPSO'da kullanılan senaryoların hiçbiri BBO problemini çözebilecek kabiliyette değildir.

6.3.7. İkili parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması kullanılarak IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

İkili PSO yöntemi, sürü zekâsı konseptine bağlı olarak araştırma yapan sezgi-üstü yaklaşımlar arasında en çok bilinen ve yaygın şekilde kullanılan algoritmalardan biridir. İPSO yönteminin çeşitli versiyonları araştırmacılar tarafından önerilmiştir [103-106, 125, 140]. Ancak BBO problemi için hangi yaklaşımın daha faydalı olacağını görebilmek adına diğer metotlarda olduğu gibi burada da 10 farklı senaryoda 30 bağımsız çözüm işlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.114. PSO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185.78	7	192.17	13	213.63	19	227.16	25	365.82
2	187.62	8	193.08	14	216.84	20	227.55	26	652.18
3	189.66	9	194.03	15	221.07	21	229.41	27	664.89
4	189.66	10	194.03	16	221.07	22	283.28	28	750.71
5	191.59	11	194.03	17	222.37	23	316.01	29	785.60
6	191.59	12	196.00	18	223.60	24	325.14	30	2272.40

Tablo 6.114'de verilen sonuçlar incelendiğinde STF3(x)-PGK-1 kombinasyonuyla PSO yaklaşımının BBO probleminde başarılı çözümler üretebildiği görülmektedir. Çözümlerin yaklaşık olarak %80'i optimal bölgeye yakınsama başarısını gösterirken en iyi bara düzeni maliyeti 12 çözümde 200'ün altına düşmeyi başarmıştır. Bu yaklaşımda keşif safhasının etkin şekilde kullanılmasının yanında faydalanma safhasının da işlediği görülmektedir. Keşif ve faydalanma safhaları arasında kurulan başarılı denge ile birlikte BBO problemi için IEEE 14-baralı test sisteminden gelecek vadeden sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Tablo 6.115'de verilen VTF1(x)-PGK-1 ve Tablo 6.116'da verilen VTF2(x)-PGK-1 yaklaşımlarının sigmoid fonksiyonundan elde edilen sonuçlar kadar olmasa bile

başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Tablo 6.117'de verilen VTF4(x)-PGK-1 kombinasyonunda ise sonuçların neredeyse yarısının optimal bölgeye yakınsayamadığı görülmektedir.

Tablo 6.115. PSO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	189.66	7	215.59	13	223.60	19	333.26	25	1348.25
2	195.20	8	221.07	14	226.81	20	333.26	26	1354.07
3	211.96	9	221.07	15	270.94	21	359.85	27	2247.16
4	211.96	10	222.37	16	313.45	22	359.85	28	2603.73
5	213.63	11	223.60	17	328.55	23	684.11	29	2828.06
6	215.59	12	223.60	18	333.26	24	1200.58	30	7755.98

Tablo 6.116. PSO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	202.56	7	213.63	13	226.81	19	316.01	25	669.43
2	209.44	8	213.63	14	226.81	20	329.60	26	1348.25
3	211.96	9	214.00	15	240.45	21	333.26	27	1662.67
4	211.96	10	221.07	16	240.45	22	461.73	28	1797.44
5	211.96	11	222.37	17	242.51	23	557.97	29	2526.60
6	211.96	12	222.37	18	296.70	24	622.00	30	3261.39

Tablo 6.117. PSO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	187.62	7	222.37	13	274.51	19	760.92	25	2676.31
2	191.59	8	222.37	14	296.41	20	788.12	26	2823.15
3	197.20	9	224.13	15	333.26	21	891.63	27	2827.99
4	201.56	10	227.55	16	597.34	22	913.46	28	4484.99
5	211.96	11	240.64	17	724.42	23	1400.24	29	4668.00
6	215.59	12	271.35	18	748.57	24	1653.33	30	4869.72

Tablo 6.118'de verilen VTF6(x)-PGK-1 çözümlerinin neredeyse üçte ikisinin optimal bölgeye yakınsamayı başardığı görülmektedir. PGK-1 ile başarılı sonuçlar veren sigmoid fonksiyonu, Tablo 6.119'da görülebileceği gibi PGK-2 ile aynı başarıyı gösterememektedir.

Tablo 6.118. PSO'da kullanılan VTF6(x) fonksiyonu ve PGK-1 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	211.96	7	215.59	13	223.60	19	296.95	25	1350.82
2	211.96	8	215.59	14	229.52	20	333.26	26	1555.96
3	213.63	9	219.16	15	229.52	21	333.26	27	1765.81
4	213.63	10	221.07	16	229.52	22	622.00	28	3452.54
5	214.00	11	221.13	17	296.95	23	701.39	29	3649.31
6	215.59	12	223.60	18	296.95	24	1249.82	30	7453.55

Tablo 6.119. PSO'da kullanılan STF3(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	211.96	7	216.45	13	296.95	19	788.12	25	2550.07
2	211.96	8	221.07	14	333.26	20	888.89	26	3224.84
3	211.96	9	223.60	15	333.26	21	1225.51	27	6012.67
4	213.63	10	223.60	16	333.26	22	1244.58	28	7355.12
5	213.63	11	229.52	17	622.00	23	1350.82	29	7355.12
6	213.63	12	296.95	18	758.04	24	1546.97	30	8176.46

Tablo 6.120. PSO'da kullanılan VTF1(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	187.62	7	188.40	13	209.44	19	219.51	25	638.16
2	187.62	8	188.40	14	211.96	20	313.45	26	638.16
3	187.62	9	193.08	15	211.96	21	335.36	27	638.16
4	188.40	10	195.20	16	216.84	22	532.97	28	652.18
5	188.40	11	197.09	17	218.37	23	532.97	29	865.63
6	188.40	12	209.44	18	219.51	24	557.97	30	1234.51

Tablo 6.121. PSO'da kullanılan VTF2(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185.78	7	188.40	13	194.60	19	211.96	25	620.63
2	185.78	8	188.40	14	194.60	20	216.45	26	636.45
3	187.62	9	188.40	15	194.60	21	218.37	27	638.16
4	187.62	10	188.40	16	196.00	22	218.37	28	638.16
5	188.40	11	189.72	17	209.44	23	219.51	29	865.63
6	188.40	12	193.08	18	209.44	24	620.63	30	2349.78

Tablo 6.120 ve Tablo 6.121'de verilen VTF1(x) ve VTF2(x) ile PGK-2 kombinasyonu, yine BBO problemi için gelecek vadeden yaklaşımlar olarak görünmektedir. Tablo 6.122'de PGK-1 ile beklenenden uzak bir performans sergileyen VTF4(x)'in PGK-2 ile nispeten iyileştiği görülmektedir.

Tablo 6.122. PSO'da kullanılan VTF4(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

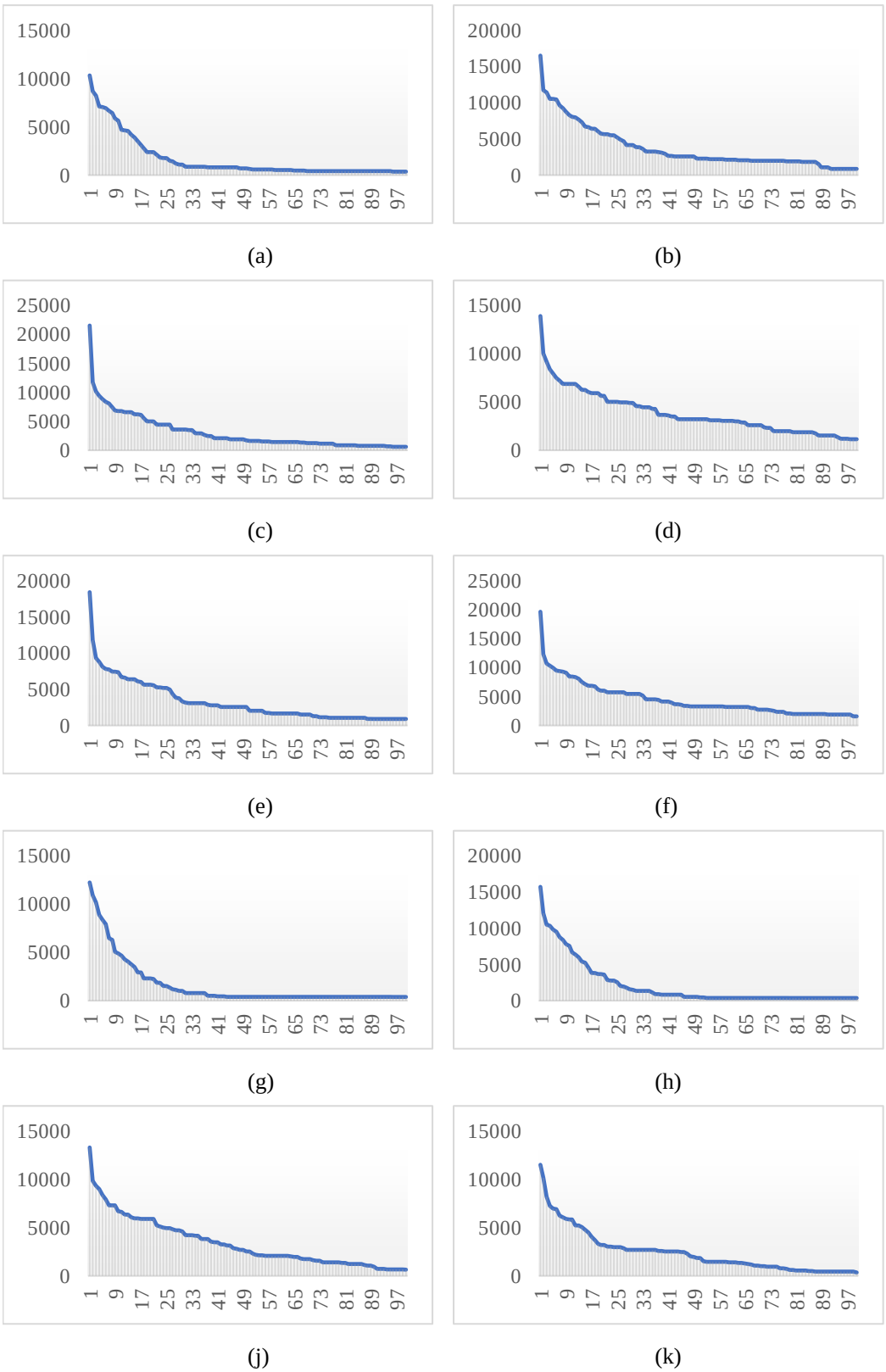
Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	187.62	7	203.47	13	221.07	19	318.77	25	1026.30
2	189.66	8	203.47	14	240.45	20	331.34	26	1048.43
3	189.72	9	212.24	15	264.74	21	513.48	27	1383.60
4	191.59	10	213.63	16	264.74	22	557.97	28	1882.40
5	193.08	11	215.59	17	271.35	23	750.71	29	2219.47
6	202.56	12	218.63	18	317.38	24	770.72	30	4306.83

Tablo 6.123. PSO'da kullanılan VTF6(x) fonksiyonu ve PGK-2 ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

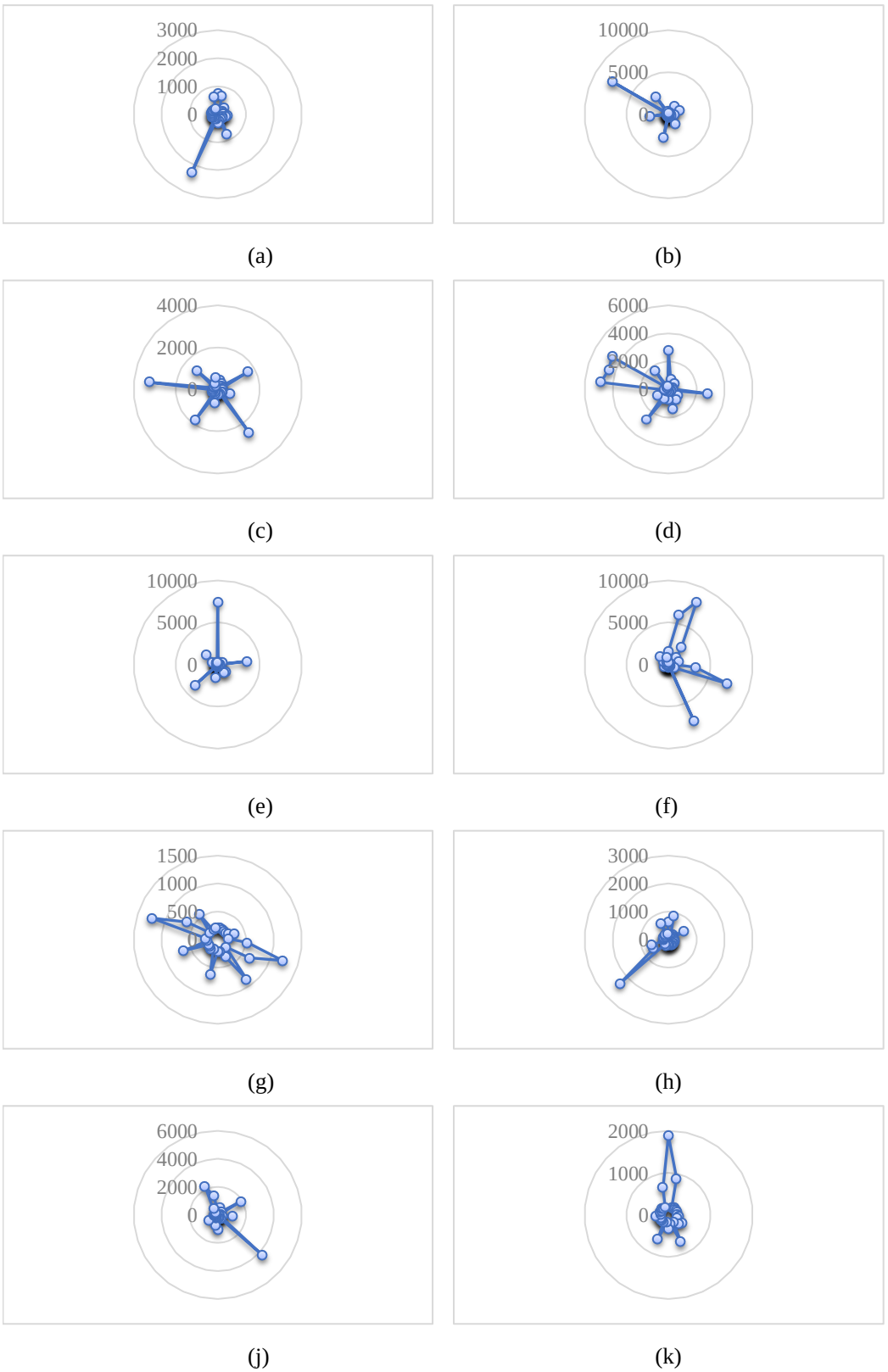
Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185.78	7	195.20	13	213.63	19	221.07	25	373.47
2	189.66	8	199.70	14	214.00	20	227.55	26	618.02
3	189.66	9	205.44	15	215.59	21	247.58	27	658.51
4	192.17	10	205.62	16	216.45	22	295.90	28	702.71
5	193.08	11	209.44	17	217.54	23	313.45	29	890.77
6	194.60	12	213.63	18	219.75	24	338.63	30	1882.40

Tablo 6.123'te verilen VTF6(x)-PGK-2 yaklaşımının STF3(x)-PGK-1 kombinasyonundan elde edilen sonuçlar kadar iyi performans sergilediği görülmektedir. Şekil 6.31 ve 6.32'de farklı senaryolarla İPSO algoritmasının ortalama yakınsama eğrileri ve radar grafikleri gösterilmektedir.

Yöntemlerin niceliksel olarak daha etkin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan istatistiksel göstergeler Tablo 6.124'te verilmiştir. İPSO yöntemi genel olarak BBO problemini çözmede başarı gösteren etkili bir sezgi-üstü yöntemdir. Gerek şu ana kadar bahsedilen tablolar gerekse Şekil 6.31 ve 6.32'de verilen ortalama yakınsama eğrileri ve radar grafikler incelendiğinde ikili karşılaştırmaya sokulabilecek birden fazla yaklaşım olduğu görülmekte olsa bile VTF2(x)-PGK-2 sonuçlarının nispeten daha iyi olması nedeniyle ikili karşılaştırmadaki ana unsur olmasına karar verilmiştir.



Şekil 6.31. Farklı senaryolarda İPSO'nun ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF4(x) ve PGK-1 e) VTF6(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF4(x) ve PGK-2 k) VTF6(x) ve PGK-2



Şekil 6.32. Farklı senaryolarla İPSO'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafikleri a) STF3(x) ve PGK-1 b) VTF1(x) ve PGK-1 c) VTF2(x) ve PGK-1 d) VTF4(x) ve PGK-1 e) VTF6(x) ve PGK-1 f) STF3(x) ve PGK-2 g) VTF1(x) ve PGK-2 h) VTF2(x) ve PGK-2 j) VTF4(x) ve PGK-2 k) VTF6(x) ve PGK-2

Tablo 6.124. PSO'yu sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürmek için kullanılan yöntemlerin istatistiksel sonuçları

Pozisyon Güncelleme Kuralı	Transfer Fonksiyonu	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
PGK-1	STF3(x)	**1,8578E+02**	2,2724E+03	3,5727E+02	2,2107E+02	3,9535E+02
	VTF1(x)	1,8966E+02	7,7560E+03	8,5567E+02	2,9220E+02	1,4731E+03
	VTF2(x)	2,0256E+02	3,2614E+03	5,9757E+02	2,4045E+02	7,4643E+02
	VTF4(x)	1,8762E+02	4,8697E+03	1,1449E+03	4,6530E+02	1,4053E+03
	VTF6(x)	2,1196E+02	7,4536E+03	8,9559E+02	2,2952E+02	1,5032E+03
PGK-2	STF3(x)	2,1196E+02	8,1765E+03	1,5695E+03	3,3326E+02	2,3444E+03
	VTF1(x)	1.8762E+02	**1.2345E+03**	3.8089E+02	2.1440E+02	**2.9503E+02**
	VTF2(x)	**1,8578E+02**	2,3498E+03	3,6376E+02	**1,9530E+02**	4,1601E+02
	VTF4(x)	1,8762E+02	4,3068E+03	6,3703E+02	2,6474E+02	8,5178E+02
	VTF6(x)	**1,8578E+02**	1,8824E+03	**3,4803E+02**	2,1602E+02	3,3493E+02

Tablo 6.125. İPSO'da kullanılan VTF2(x)-PGK-2 ile diğer fonksiyon ve PGK kombinasyonlarının Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
VTF2(x)-PGK-2 ile STF3(x)-PGK1	274,00	191,00	**4,04E-01**
VTF2(x)-PGK-2 ile VTF1(x)-PGK1	323,00	142,00	**6,41E-02**
VTF2(x)-PGK-2 ile VTF2(x)-PGK1	334,00	131,00	3,64E-02
VTF2(x)-PGK-2 ile VTF4(x)-PGK1	378,00	87,00	2,02E-03
VTF2(x)-PGK-2 ile VTF6(x)-PGK1	371,00	94,00	4,53E-03
VTF2(x)-PGK-2 ile STF3(x)-PGK2	393,00	72,00	5,55E-04
VTF2(x)-PGK-2 ile VTF1(x)-PGK2	293.50	171.50	**2.13E-01**
VTF2(x)-PGK-2 ile VTF4(x)-PGK2	356,00	109,00	9,93E-03
VTF2(x)-PGK-2 ile VTF6(x)-PGK2	305,00	160,00	**1,40E-01**

Tablo 6.125'te gösterilen Wilcoxon testi sonuçlarına göre VTF2(x)-PGK-2 kombinasyonu STF3(x)-PGK-1 ile %40,4 oranında, VTF1(x)-PGK-1 ile %6,41

oranında, VTF1(x)-PGK-2 ile %21,3 oranında ve VTF6(x)-PGK-2 ile %14 oranında benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla bu yöntemler arasında kayda değer bir farklılık bulunmamaktadır. Benchmark fonksiyonlarında diğer algoritmalara göre daha zayıf bir performans gösteren İPSO yöntemi, bara bölme optimizasyonu için rekabetçi sonuçlar üretmeyi başarmıştır.

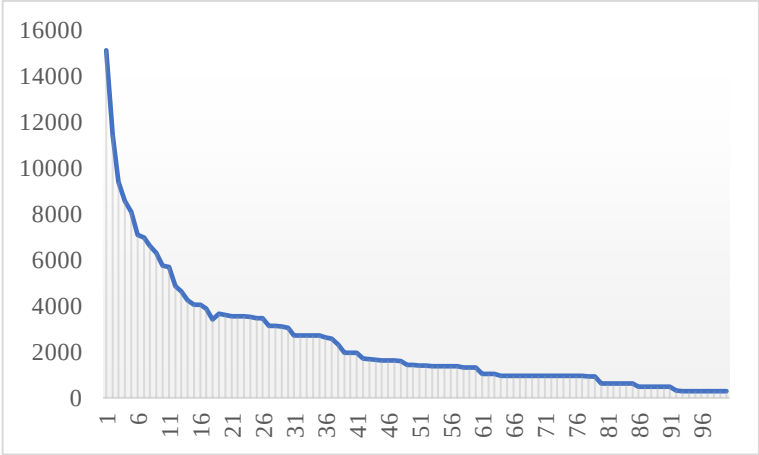
6.3.8. Genetik algoritmayla IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

Genetik algoritma ikili kodlarla işleyen, evrimsel kavramlardan ilham alarak oluşturulmuş operatörler vasıtasıyla ayrık düzende arama yapan, köklü ve etkili bir sezgi-üstü algoritmadır. GA'nın içeriğinde bulunan çaprazlama operatörüyle bir sezgi-üstü operatöründe muhakkak bulunması gereken faydalanma safhası icra edilirken, mutasyon operatörüyle keşfetme safhası işletilmektedir. Bu operatörler arasındaki hassas dengenin etkili bir şekilde tesis edilmesi gerektiği için çaprazlama ve mutasyon oranlarının doğru belirlenmesi gerekmektedir. GA birçok optimizasyon problemini çözebilme kabiliyetine sahip olsa bile ayarlanması gereken parametrelerin olması tasarımcıları zorlayan bir konu olmaktadır. Bununla birlikte probleme özel iyi ayarlanmış parametrelerle birlikte çeşitli optimizasyon problemlerinin başarılı bir şekilde çözülebildiği görülmektedir.

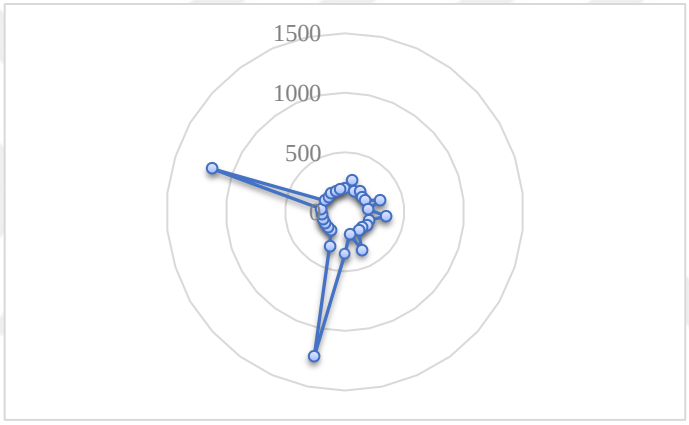
Tablo 6.126'da GA'nın IEEE 14-baralı test sistemi üzerinden elde ettiği en iyi bara düzenlerinin maliyetleri sunulmuştur. Görüldüğü gibi sonuçların yaklaşık %93'ü optimal bölgeye yakınsayarak çok başarılı bir performans göstermiştir. GA'dan elde edilen bu performans neredeyse Tablo 6.39 ve 6.42'de verilen KA'nın performansları kadar başarılıdır.

Tablo 6.126. GA ile 30 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	185,78	7	191,59	13	196,00	19	196,00	25	314,83
2	187,62	8	191,59	14	196,00	20	217,54	26	348,48
3	187,62	9	192,17	15	196,00	21	217,54	27	348,48
4	187,62	10	194,03	16	196,00	22	219,51	28	348,48
5	189,72	11	194,03	17	196,00	23	274,51	29	1175,03
6	191,59	12	194,60	18	196,00	24	313,45	30	1237,12



Şekil 6.33. GA'nın IEEE 14-baralı test sistemindeki ortalama yakınsama eğrisi



Şekil 6.34. IEEE 14-baralı test sisteminde GA'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafiği

GA'nın 30 bağımsız çözümünden elde edilen ortalama yakınsama eğrisi Şekil 6.33'te verilmiş olup radar dağılım grafiği Şekil 6.34'te verilmiştir. Ortalama yakınsama eğrisinden görüldüğü üzere çözümlerin kalitesi sürekli olarak iyileşmiştir. Böyle bir yakınsama grafiğinde iterasyon sayısının artırılması halinde faydalanma sürecinin devam edeceği ve daha iyi sonuçlara yakınsayabileceği görülmektedir. Radar grafik üzerinden de algoritmanın 30 bağımsız çözümden sadece iki tanesinde yerel optimale takıldığı görülmektedir.

GA'dan elde edilen en küçük değer 185,78, en büyük değer 1237,11, ortalama değeri 289,16, ortanca değeri 196,00 ve standart sapması 250,85 olarak hesaplanmıştır. Benchmark fonksiyonları üzerinde gösterdiği performansla en başarısız algoritma olan

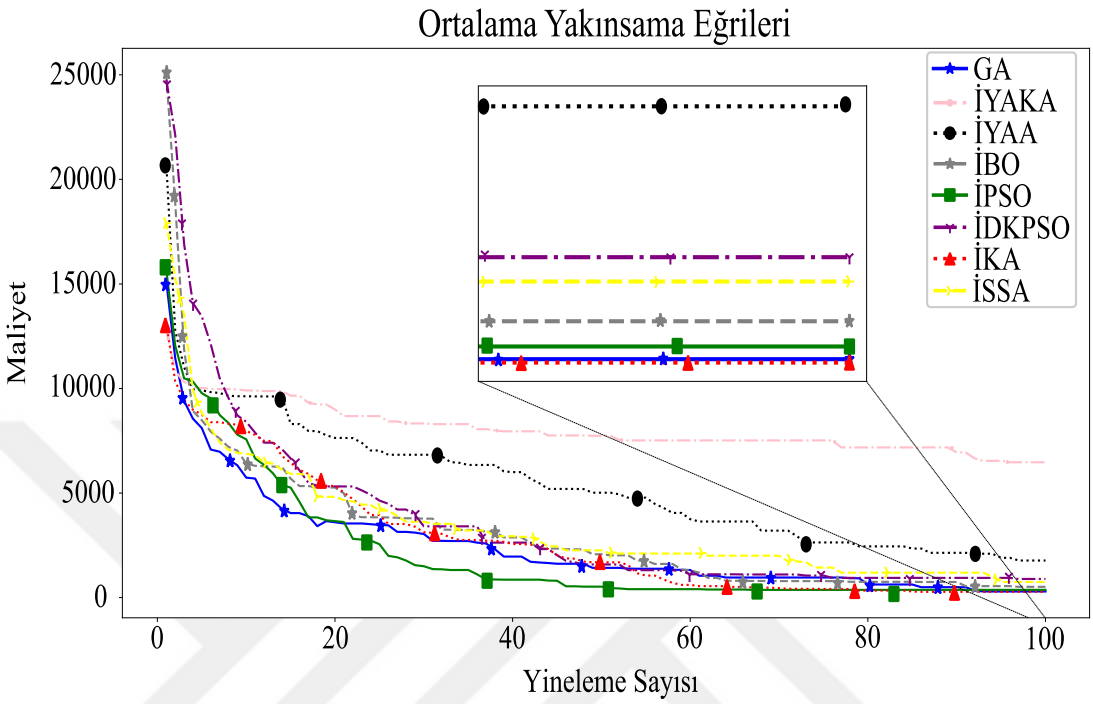
GA, hem yakınsama karakteristiği hem de güvenilirliği ile BBO problemini çözmede önemli bir başarı ortaya koymuştur.

6.3.9. Uygulanan sezgi-üstü algoritmaların IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde gösterdiği performansların karşılaştırılması

Bara bölme optimizasyonu problemini IEEE 14-baralı test sisteminde çözebilmek amacıyla şu ana kadar bahsedilen 8 farklı sezgi-üstü algoritma kullanılmış ve detaylı sonuçları paylaşılmıştır. Kullanılan algoritmaların GA hariç hepsinde 10 farklı senaryoda 30 bağımsız çözüm uygulanarak elde edilen en iyi sonuçların istatistiksel göstergeleri sunulmuş ve yorumlanmıştır. Bir transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı kombinasyonu, bir algoritmada çok başarılı sonuçlar verirken başka bir algoritmada kalitesiz çözümler sunmaktadır. Farklı senaryoların uygulanma amacı BBO problemi için sürekli arama uzayından ayrık uzaya geçiş için kullanılacak olan en iyi transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralını algoritmaya özel belirlemektir. NFL [75] teoremine göre sezgi-üstü algoritmaların her türlü problemi optimize edecek kabiliyetinin olmadığı bilindiği için IEEE 14-baralı test sisteminde elde edilen başarının farklı bara sistemlerinde gösterilemeyebileceği unutulmamalıdır. Ancak IEEE 14-baralı test sisteminde tasarlanan BBO probleminde başarı göstermiş algoritmaların daha büyük güç sistemlerinde başarı gösterme ihtimali yüksek olacağı için test sisteminden elde edilen veriler referans olmaktadır. Ayrıca burada başarısız olduğu ifade edilen algoritmalar, daha yüksek iterasyon sayıları kullanıldığında kaliteli sonuçlar üretebilmektedir fakat zaten fazla olan çözüm sürelerinin daha yüksek seviyelere çıkmasına neden olacağı için daha şeffaf bir değerlendirme olması amacıyla yineleme sayısı her algoritmada eşit olacak şekilde kullanılmıştır.

Genetik Algoritma dışında 10 farklı senaryo uygulanan sezgi-üstü algoritmalar parametrik ve parametrik olmayan istatistiksel göstergeler vasıtasıyla karşılaştırılmış olup her bir algoritma için en iyi performans gösteren senaryo belirlenmiştir. Buna göre; İkili Kâşif Algoritması için hamming mesafeli yaklaşımda kullanılan VTF4(x)-PGK-2, İkili Salp Sürüsü Algoritması için VTF2(x)-PGK-1, İkili Bozkurt Algoritması için STF3(X)-PGK-1, İkili Yerçekimsel Arama Algoritması için VTF4(x)-PGK-1, İkili Yapay Arı Kolonisi Algoritması için VTF3(x)-PGK-2, İkili Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu için VTF6(x)-PGK-1 ve İkili Parçacık Sürüsü

Optimizasyonu için VTF2(x)-PGK-2 kombinasyonları algoritmalardan elde edilen en etkili senaryolar olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.35. Sezgi-üstü algoritmaların IEEE 14-baralı test sisteminde gösterdiği performansların karşılaştırılması

Şekil 6.35'te algoritmalarda en iyi performans gösteren senaryoların ortalama yakınsama eğrileri görülmektedir. Görüldüğü gibi 30 elemanlı bir nüfus ile 100 yinelemede elde edilen ortalama yakınsama eğrileri arasında önemli farklılıklar ortaya çıkmıştır. En kötü yakınsama performansını İYAKA göstermiş olup en iyi sonuçlar İKA'dan elde edilmiştir. GA yöntemi İKA'dan sonraki en iyi performansı gösterirken ardından İPSO yaklaşımı gelmiştir.

Ortalama yakınsama eğrilerinin yanı sıra algoritmalardan elde edilen minimum, maksimum, ortanca değer ve standart sapma verileri Tablo 6.127'de gösterilmektedir. İKA, GA ve İPSO yöntemleri 185,78 maliyet miktarına sahip optimal bara düzenini elde etmiş sezgi-üstü yöntemler olarak görülmektedir. Algoritmalardan elde edilen maksimum değer, o yöntemin marjinal sapma miktarı hakkında bilgi vermektedir ve en küçük sapma miktarını GA ve İKA yöntemleri göstermiştir. Ortalama değerde 270,28 ile en iyi performansın alındığı algoritma İKA iken 6473,7 maliyet miktarıyla en kalitesiz çözümü İYAKA göstermiştir. Algoritmalardan alınan minimum değerlere

bakıldığında hepsinin 30 bağımsız çözümden en az birinde optimal bölgeye yakınsadığı görülmektedir. Ancak, algoritmanın güvenilirliği ortalama değeri ile standart sapması incelendiğinde ortaya çıkmaktadır. Bu açıdan bakıldığında standart sapması en düşük olan algoritma İKA iken en yüksek olan algoritma İYAKA'dır. İstatistiksel göstergeler IEEE 14-baralı test sisteminde BBO problemini çözmede en başarılı yöntemin İKA olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.127. Sezgi-üstü algoritmaların IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde gösterdiği performansların karşılaştırılması

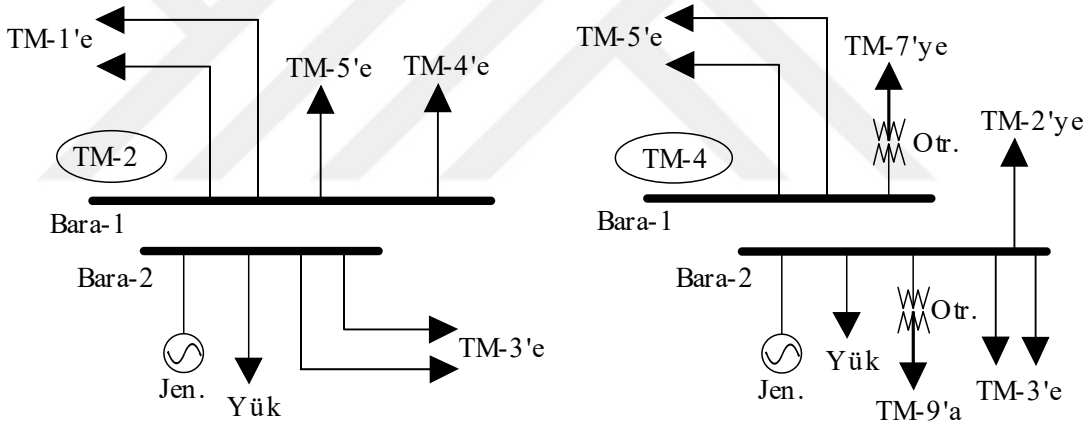
Algoritma	Pozisyon Güncelleme Kuralı	Transfer Fonksiyonu	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
GA	-	-	**1,8578E+02**	**1,2371E+03**	2,8916E+02	1,9600E+02	2,5085E+02
İKA	PGK-2	VTF4(x)	**1,8578E+02**	1,2661E+03	**2,7028E+02**	2,0562E+02	**2,0295E+02**
İSSA	PGK-1	VTF2(x)	1,8966E+02	3,2614E+03	5,3868E+02	2,2681E+02	7,4775E+02
İBO	PGK-1	STF3(x)	2,1196E+02	3,2614E+03	5,1183E+02	2,8344E+02	7,0250E+02
İYAA	PGK-1	VTF4(x)	2,1803E+02	7,9143E+03	1,4411E+03	1,1945E+03	1,7025E+03
İYAKA	PGK-2	VTF3(x)	1,8762E+02	1,0404E+04	6,4737E+03	1,0183E+04	4,3963E+03
İDKPSO	PGK-1	VTF6(x)	2,1363E+02	3,1783E+03	8,8731E+02	6,5534E+02	6,9445E+02
İPSO	PGK-2	VTF2(x)	**1,8578E+02**	2,3498E+03	3,6376E+02	**1,9530E+02**	4,1601E+02

Parametrik olmayan istatistiksel gösterge Wilcoxon işaretli sıra testinde İKA ile diğer algoritmalar karşılaştırılarak p-değerleri hesaplanmış ve Tablo 6.128'de gösterilmiştir. Tez çalışmamız kapsamında önerilen İKA yöntemi istatistiksel göstergelere göre en başarılı sonuçları sunmuştur fakat Tablo 6.128 incelendiğinde GA ve İPSO algoritmaları ile İKA arasında kayda değer bir farklılık bulunmadığı ortaya çıkmıştır. Yapılan ikili karşılaştırmalara göre İKA yöntemi ile PSO %80,8 oranında benzerken GA ile %28 oranında benzemektedir. Wilcoxon testinde bulunan pozitif ve negatif işaretli sıralama galibiyetlerinde GA İKA'dan üstün gelmiştir. İKA yöntemi ortalama ve standart sapma değerleri açısından en iyi değerleri vermiş olsa bile GA'dan elde edilen sonuçların sıralama testinde daha başarılı olduğu görülmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki GA'dan elde edilen başarılı sonuçlar için parametre ayarları doğru yapılmalıdır ve bu düzenlemeler tasarımcılar için önemli zaman kayıplarına yol

açmaktadır. İKA algoritmasında herhangi bir parametre ayarı yapılmadığı için tasarım aşamasında istenmeyen zaman kayıpları yaşanmamaktadır.

Tablo 6.128. Sezgi-üstü algoritmaların Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
İKA ile GA	179.00	286.00	**2.80E-01**
İKA ile İYAKA	460.00	5.00	1.86E-08
İKA ile İYAA	440.00	25.00	1.68E-06
İKA ile İBO	399.00	66.00	3.13E-04
İKA ile İDKPSO	446.00	19.00	5.72E-07
İKA ile İPSO	245.00	220.00	**8.08E-01**
İKA ile İSSA	365.00	100.00	5.38E-03

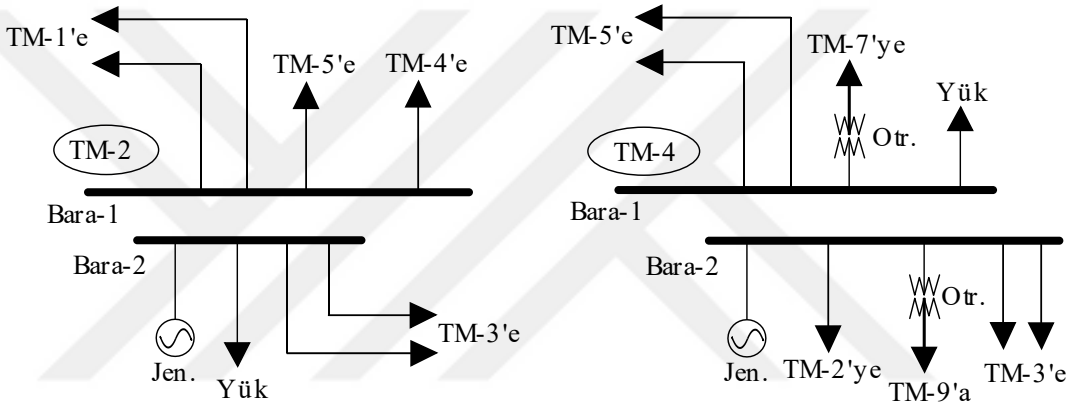


Şekil 6.36. IEEE 14-baralı test sisteminde GA'dan elde edilen en iyi bara düzeni

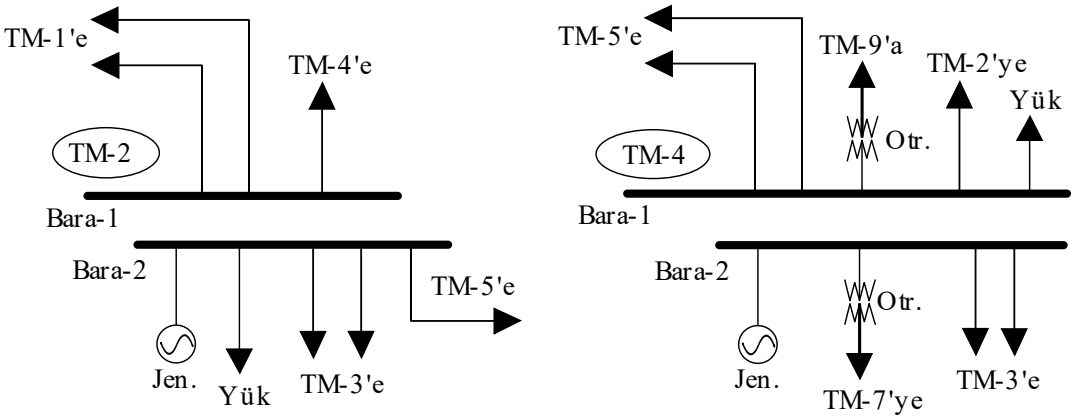
İKA yöntemi çalışmamız kapsamında kullanılan sürü zekâsı konseptine dayalı diğer tüm algoritmalardan üstün gelmiştir. Evrimsel tabanlı bir algoritma olan GA'dan küçük bir farkla geri kalmasına rağmen fiziksel tabanlı Yerçekimsel Arama Algoritmasından çok daha başarılı sonuçlar vermiştir. İKA yönteminin hem standart sapma ve ortalama değer hem de Wilcoxon sıralama testi açısından birçok algoritmaya göre kayda değer farklılığı bulunduğu ve son derece rekabetçi çözümler verdiği görülmektedir.

IEEE 14-baralı test sisteminde bara bölme işlemi yapılabilecek 3 adet TM bulunmaktadır. Algoritmaların en kaliteli çözümleri incelendiğinde bu TM'lerden

TM-2 ve TM-4'te bara bölme işleminin yapıldığı görülmektedir. Elde edilen en iyi bara düzenleri sezgi-üstü algoritmaların optimal noktayı kesin olarak bulmayı garanti edememesi sebebiyle küçük farklılıklar göstermektedir. Şekil 6.36'da GA'dan elde edilen en iyi çözümde TM-2 ve TM-4'te oluşturulan bara düzeni gösterilmekte iken Şekil 6.37'de İKA'nın bulduğu en kaliteli çözüm görülmektedir. Bara dağılımları incelendiğinde ikisi arasındaki tek farkın TM-4'te bulunan yükün konumu olduğu görülmektedir. İYAKA'nın elde ettiği en iyi bara düzeni Şekil 6.38'de verilmiş olup şekil incelendiğinde küçük farklılıklar olsa bile İKA'nın bulduğu çözüme oldukça benzediği görülmektedir.



Şekil 6.37. IEEE 14-baralı test sisteminde İKA'dan elde edilen en iyi bara düzeni



Şekil 6.38. IEEE 14-baralı test sisteminde İYAKA'dan elde edilen en iyi bara düzeni

Elde edilen bilgiler ışığında kullanılan algoritmaların tamamının 30 bağımsız çözümden en az birinde optimal bölgeye yakınsadığı fakat aynı kalitede çözüm üretme noktasında GA, İKA ve İPSO yöntemlerinin üstün geldiği görülmektedir. Bölüm

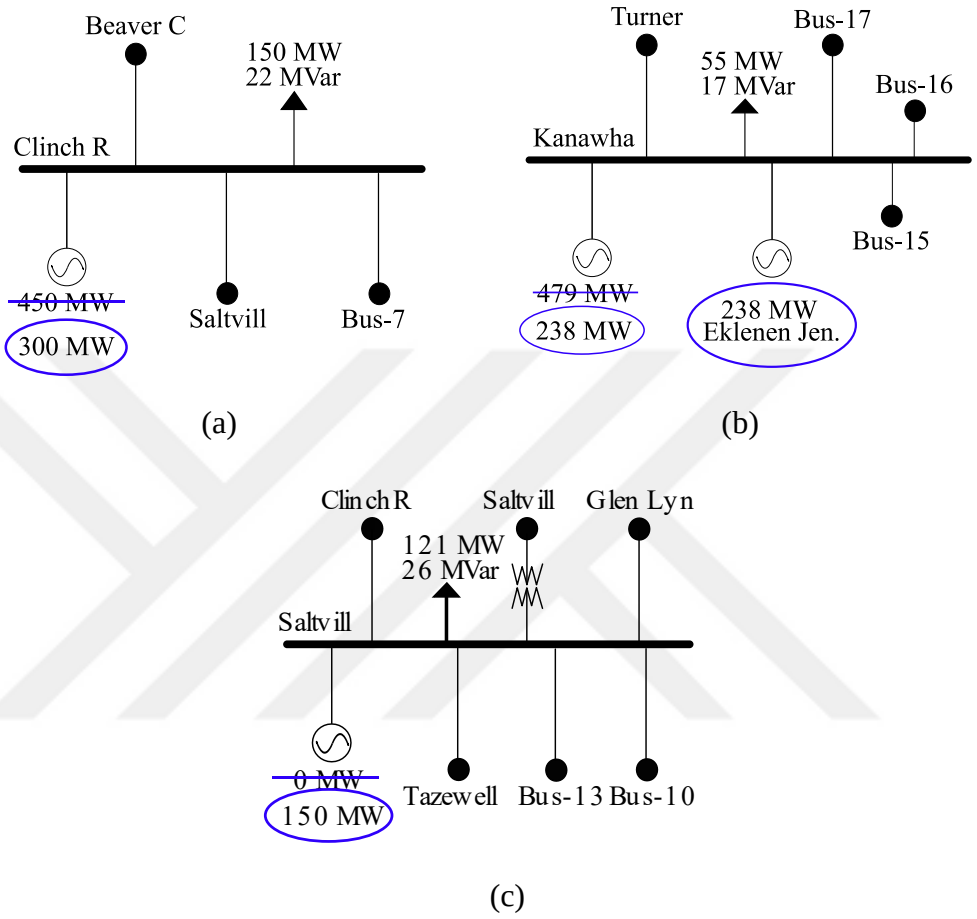
6.1.2'de algoritmaların benchmark fonksiyonları üzerinde gösterdikleri performanslar paylaşılmış ve İYAKA, İYAA, İSSA ve İKA yöntemlerinin yüksek kalitede çözüm üretebildiği sonucuna varılmıştır. Ancak bu bölüm altında yapılan analizlerde görülmektedir ki benchmark fonksiyonlarında başarılı olan İYAKA, İYAA ve İSSA algoritmaları bara bölme optimizasyonu probleminde kaliteli sonuçlar sunamamıştır. Bu durum farklı problemlerde algoritmalardan alınan performansın önemli miktarda değişeceğini açıkça göstermektedir. Şunu belirtmek gerekir, sadece problemin yapısı değil aynı zamanda problemin boyutu da algoritmaların performansını derinden etkilemektedir. Bu nedenle IEEE 14-baralı test sisteminde başarılı olduğu görülen algoritmalar gerçek bir sistemde kullanılmadan önce IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde uygulanmış ve elde edilen istatistiksel veriler değerlendirilmiştir.

6.4. IEEE 57-Baralı Test Sistemi ve Sonuçlar

IEEE 57-baralı test sisteminde 138 kV gerilim seviyesinde 57 trafo merkezi, 64 iletim hattı, 14 ototransformatör ve 7 adet senkron jeneratör bulunmakta olup jeneratörlerden 3'ü senkron kompensatör olarak çalışmaktadır. Sistemde jeneratörler tarafından 1279 MW aktif güç üretimi yapılırken tüketim birimlerinin tamamı 1250 MW aktif güce ve 336 MVar reaktif güce ihtiyaç duymaktadır [149]. IEEE 14-baralı test sisteminde olduğu gibi bu sistemde de mevcut durumda iletim hatlarının termal kapasitesi bulunmadığı için N-1 analizi kapsamında sistem güvenliğini izleyebilmek amacıyla tüm iletim hatlarının termal kapasitesinin 150 MVA olduğu varsayılmıştır.

IEEE 57-baralı test sistemi mevcut haliyle N-1 analizi açısından önemli problemler ihtiva etmektedir ve bu problemlerin çözümü bara bölme metoduyla giderilebilecek düzeyde değildir. Dolayısıyla güç akış eşitliklerinin yakınsama problemlerini ortadan kaldırmak ve sistemin güvenilirliğini artırabilmek amacıyla basit değişiklikler yapılmıştır ve Şekil 6.39'da gösterilmiştir. Kanawha TM'sinde 479 MW aktif güce sahip bir jeneratör ve 4 adet EİH bulunmaktadır ve bu istasyonda bara bölünmesi halinde her baraya sadece iki adet EİH bağlanmaktadır. Bu nedenle Kanawha TM'de iki EİH ve 479 MW'lık jeneratörün bağlandığı barada temel durumda bile ilgili EİH'ler 150 MVA'nın üzerinde yüklenmektedir. Bara bölme işlemi yapıldığında hangi bara dağılımı yapılırsa yapılsın temel durumda bile başarı sağlayamayan bir güç sisteminde algoritma performanslarının karşılaştırılması mümkün değildir.

Dolayısıyla Kanawha istasyonunda bir adet 479 MW gücünde jeneratör bulunuyorken, değiştirilmiş sistemde aynı TM'de bu jeneratör yerine iki adet 238 MW gücünde jeneratör yerleştirilmiştir.



Şekil 6.39. IEEE 57-baralı test sisteminde yapılan değişiklikler a) Kanawha TM'sinde b) Clinch-R TM'sinde c) Saltvill TM'sinde

Diğer taraftan, Clinch R TM'sinde bulunan 450 MW'lık aktif güç sebebiyle özellikle Clinch R – Saltvill EİH aşırı yüklenmelere maruz kalmaktadır. Temel durumda ilgili EİH üzerinde 179 MW ve 19,7 MVar güç akışı bulunmaktadır ve bu yüklenme seviyesi EİH'ler için belirlenen 150 MVA'lık termal yüklenme sınırını aşmaktadır. Bu nedenle Clinch R istasyonunda bulunan jeneratörün gücü 450 MW'tan 300 MW'a düşürülerek, Saltvill TM'sinde bulunan ve normalde senkron kompanzatör olarak çalışan jeneratörün aktif güç miktarı da 150 MW'a çekilmiştir. Böylece Clinch R – Saltvill EİH'nin yüklenme seviyesi azaltılmıştır.

Bahsedilen konulara ek olarak, normal şartlarda sistemin salınım barası Kanawha TM'si iken bara bölme optimizasyonu problemini çözme kapsamında yapılan analizler boyunca salınım barası Turner istasyonu olarak belirlenmiştir. Çünkü Kanawha TM'si bara bölünme ihtimali olan bir istasyondur ve bara bölündüğünde salınım barası olması sebebiyle baraya bağlı jeneratörün üretim seviyesi değişken olmaktadır. Kanawha TM'sine yakın olan Turner TM'si salınım barası yapılarak bu problemin önüne geçilmiştir. Yapılan basit değişiklikler sayesinde IEEE 57-baralı test sisteminde BBO problemi çözülebilecek düzeye getirilmiştir.

IEEE 57-baralı test sisteminde Glen Lyn, Kanawha, Bara 15, Beaver C, Bara 38, Bara 13 ve Saltvill TM'ler sahip oldukları EİH sayısı itibariyle bara bölme işlemine uygun trafo merkezleri olarak görülmektedir. IEEE 14-baralı test sisteminde sadece 3 TM'de bara bölme işlemi yapılabilirken IEEE 57-baralı test sisteminde 7 TM'de bara bölme ihtimali bulunmaktadır. Bu noktada çözüm uzayının üstel şekilde artacağı açıktır. Nitekim, IEEE 57-baralı test sisteminde uygulanabilecek milyarlarca seçenek bulunmaktadır. Herhangi bir ekipmanın konumu sabit tutulmaz ise IEEE 14-baralı test sisteminde $3{,}84x10^{5}$ adet bara düzeni oluşturulabilirken IEEE 57-baralı test sisteminde uygulanabilecek $2{,}304x10^{10}$ ihtimalle karşılaşılmaktadır.

IEEE 57-baralı test sisteminde simetrili bileşen reaktans bilgileri bulunmadığı için yalnızca dengeli arıza tipi olan üç faz kısa devre arıza akımlarının hesabı yapılmıştır. Sistemde bulunan kesicilerin kısa devre kesme kapasitesinin 3500 A olduğu varsayılmıştır. IEEE 14-baralı test sisteminde amaç fonksiyonu oluşturulurken toplama metodu kullanılarak görünür güç, reaktif güç ve kısa devre performans endekslerinden faydalanılmıştır. IEEE 57-baralı test sisteminde ise amaç fonksiyonunu oluşturmak için Ɛ-kısıtlama yaklaşımı kullanılırken görünür ve reaktif güç performans endekslerini içerisinde barındıran ve Bölüm 3'te detayları açıklanan güvenilirlik performansı yöntemi kullanılmıştır. Bu test sisteminde amacımız tamamen sorunsuz bir güç sistemi elde etmek değil, daha büyük bir güç sisteminde algoritmaların performansını incelemektir ve bu nedenle sadece %50'nin üzerinde yüklenme miktarına sahip iletim hatları kısıt analizi kapsamına alınmıştır.

IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde birbirinden bağımsız 2400'ün üzerinde analiz gerçekleştirilmiş olup, hangi algoritmanın hangi transfer fonksiyonu ve pozisyon

güncelleme kuralıyla daha kaliteli sonuçlar sunduğu ortaya çıkarılmıştır. IEEE 57-baralı test sisteminde IEEE 14-baralı sistemde başarılı sonuçların elde edildiği düşünülen yaklaşımlar ile bara düzeni optimizasyonu yapılmıştır. Normal mesafeli İKA algoritmasında VTF2(x)-PGK-1, hamming mesafeli İKA'da VTF4(x)-PGK-2, PSO'da STF3(x)-PGK-1 ve VTF2(x)-PGK-2 ve son olarak Genetik Algoritma, IEEE 57-baralı test sisteminde topoloji optimizasyonu için kullanılan yöntemler olmuşlardır.

6.4.1. İkili kâşif algoritmasıyla IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

Kâşif algoritması, liderlik hiyerarşisine sahip ve fakat bir o kadar da demokratik davranışlarda bulunan bir sezgi-üstü algoritma olarak bara düzeni optimizasyonu probleminde başarılı sonuçlar vermiştir. Sürekli problemlerin çözümü için önerilen KA'nın ikili formatı tez çalışmamız kapsamında önerilmiş olup BBO problemini çözmede hangi fonksiyon ve kuralların daha etkili olduğu ayrıntılı olarak açıklanmıştır. KA'da liderin besin arama stratejisi ile sürüde bulunan diğer temsilcilerin keşif yöntemi birbirinden oldukça farklıdır. KA'da her bir birey hem komşu temsilciyle etkileşmekte hem de liderini takip etmektedir. Bunun ötesinde titreşim vektörü ε sayesinde tesadüfi arayış kabiliyetine de sahiptir.

Titreşim vektörü, içerisinde rastgele üretilmiş bir sayıyı bulundururken aynı zamanda komşu temsilciyle mevcut birey arasındaki mesafenin farkını içermekte olup yineleme sayısı yükseldikçe etkisini yitirmektedir. Titreşim vektörü sayesinde temsilciler başlangıçta arama uzayında büyük adımlar atarak keşfedilmemiş kaliteli bölgeleri yakalamaya çalışmaktadırlar ve yineleme sayısı arttıkça tesadüfi adım genişlikleri azalmakta ve keşfedilmiş bölgenin yerel optimalini bulmaya çalışmaktadırlar. KA'da temsilcilerin tamamı her yinelemede lider temsilci olmaya adaydır ve bu yönüyle diğer liderlik hiyerarşisine sahip algoritmalardan ayrışmaktadır. Titreşim vektörü içerisinde bulunan iki komşu birey arasındaki mesafe farkı iki şekilde yapılabilmektedir: Birincisi, bireylerin sadece ilgili boyutlarındaki elemanların farkı alınarak yapılır ve bu yöntem normal mesafeli İKA olarak isimlendirilmiştir; ikincisi, bireylerin birbirleriyle tamamen aynı olabilmesi için kaç 1'in 0'a ve kaç 0'ın 1'e dönmesi gerektiğini hesaplayarak bu dönüşümlerin toplamını iki bireyin mesafe farkı olarak değerlendiren hamming mesafesi yöntemidir. Kâşif algoritmasının BBO

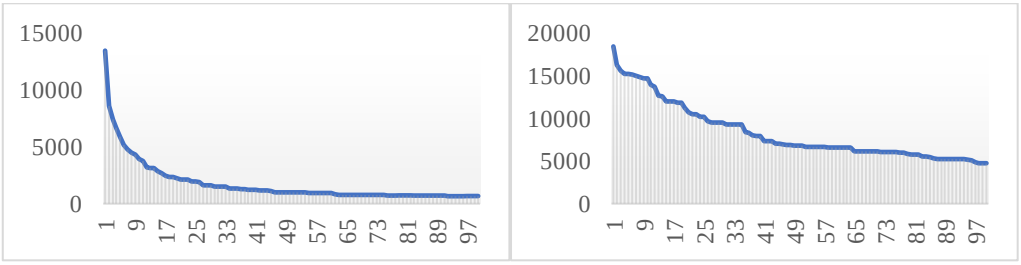
problemindeki başarısı, temsilcilerin son derece aktif şekilde çözüm uzayını arayabilmesiyle yakından ilgilidir ve lider olmayan bireylerin davranışlarını önemli derecede etkileyen titreşim vektöründe bulunan bu mesafe farkının hesaplanma şekli çözüm kalitesini etkileyebileceği için IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde her iki mesafe çeşidiyle de tüm senaryolar uygulanmıştır.

Tablo 6.129. NİKA VTF2(x)-PGK-1 ile IEEE 57-baralı test sisteminde 20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	499,25	6	572,01	11	590,28	16	881,96
2	499,25	7	572,01	12	609,07	17	886,85
3	572,01	8	572,33	13	609,07	18	936,88
4	572,01	9	579,19	14	609,07	19	965,20
5	572,01	10	588,46	15	629,07	20	1022,41

Tablo 6.130. HİKA VTF4(x)-PGK-2 ile IEEE 57-baralı test sisteminde 20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	2575,24	6	3455,87	11	4665,72	16	5842,45
2	2585,23	7	3696,99	12	4987,45	17	6475,97
3	2602,35	8	4186,92	13	5265,42	18	6948,48
4	2755,09	9	4528,95	14	5289,64	19	7610,90
5	3116,78	10	4631,42	15	5487,83	20	7844,73



(a) (b)

Şekil 6.40. İKA'nın IEEE 57-baralı test sistemindeki ortalama yakınsama eğrileri a) NİKA-VTF2(x)-PGK-1, b) HİKA-VTF4(x)-PGK2

Tablo 6.129'da normal mesafeli İKA'da en başarılı senaryo olarak değerlendirilen VTF2(x)-PGK-1 yaklaşımının IEEE 57-baralı test sisteminde BBO problemi için

sunduğu en kaliteli çözümlerin maliyetleri bulunmaktadır. Tablo 6.130'da ise hamming mesafesinin kullanıldığı İKA'da en başarılı senaryo olarak değerlendirilen VTF4(x)-PGK-2 yaklaşımının IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde çözülen 20 bağımsız sonucu gösterilmektedir. Tablolar incelendiğinde NİKA'nın HİKA'ya göre çok daha başarılı sonuçlar gösterdiği aşikardır.



(a) (b)

Şekil 6.41. İKA ile IEEE 57-baralı test sisteminden elde edilen sonuçların radar grafikleri a) NİKA- VTF2(x)-PGK-1, b) HİKA- VTF4(x)-PGK2

Şekil 6.40'da verilen ortalama yakınsama eğrileri ile Şekil 6.41'de verilen radar grafikler incelendiğinde HİKA'nın 30 elemanlı bir nüfus ile 100 iterasyonda kaliteli çözümler sunamadığı görülmektedir. Ancak dikkatli incelenmesi halinde HİKA'nın arayış süreci henüz bitmemiştir ve yineleme sayısının artırılması halinde daha kaliteli bölgelere yakınsayacağı düşünülmektedir. NİKA yaklaşımı ise IEEE 57-baralı test sisteminde son derece başarılı bir yakınsama performansı göstermiştir.

6.4.2. İkili parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasıyla IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

İPSO algoritmasında uygulanan çeşitli senaryoların IEEE 14-baralı test sisteminde başarılı sonuçlar sunması nedeniyle algoritmanın çözüm uzayı çok daha geniş bir problemdeki arama kabiliyetini görebilmek amacıyla IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde 20 bağımsız analiz yapılmıştır. Sigmoid fonksiyonu ve PGK-1 ile VTF2(x) ve PGK-2 yaklaşımlarıyla sürekli uzaydan ayrık uzaya geçişi sağlanan İPSO algoritmasının daha başarılı olduğu görülmüş ve IEEE 57-baralı test sisteminde de kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 6.131 ve 6.132'de sırasıyla STF3(x)-PGK-1 ve VTF2(x)-PGK-2 yaklaşımlarının IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde gösterdiği performansların

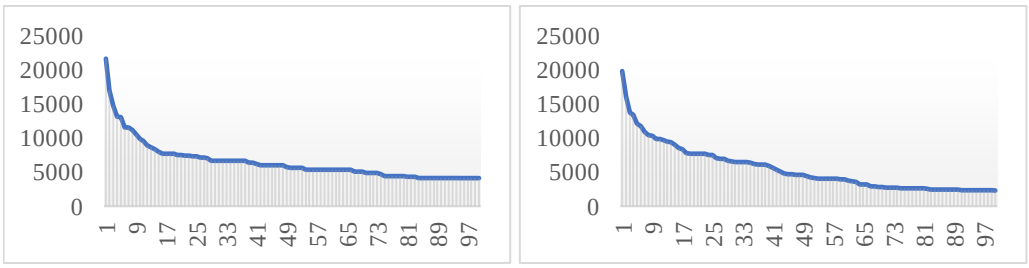
sonuçları görülmektedir. Her iki yöntemde de 20 bağımsız analizden en az 1'inde optimale yakınsama davranışı gerçekleşmiştir fakat NİKA'dan elde edilen başarılı sonuçlara göre İPSO'nun sunduğu çözümlerin yetersiz kaldığı ortaya çıkmaktadır.

Tablo 6.131. İPSO STF3(x)-PGK-1 ile IEEE 57-baralı test sisteminde 20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	503,08	6	2166,67	11	4697,56	16	6340,42
2	827,91	7	2235,32	12	4783,05	17	6359,77
3	1428,07	8	3047,72	13	5629,27	18	6415,02
4	1796,16	9	3703,56	14	5829,06	19	6790,99
5	2089,85	10	4189,33	15	5865,58	20	7580,81

Tablo 6.132. İPSO VTF2(x)-PGK-2 ile IEEE 57-baralı test sisteminde 20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	500,54	6	1284,76	11	1740,65	16	3587,32
2	963,77	7	1494,84	12	1799,83	17	3625,71
3	1149,94	8	1621,32	13	1945,70	18	3762,76
4	1149,99	9	1631,51	14	3372,57	19	4262,59
5	1185,64	10	1659,36	15	3543,38	20	5715,49



(a) (b)

Şekil 6.42. İPSO'nun IEEE 57-baralı test sistemindeki ortalama yakınsama eğrileri a) STF3(x)-PGK-1, b) VTF2(x)-PGK-2

Şekil 6.42'de verilen ortalama yakınsama grafikleri İPSO algoritmalarının yineleme sayısının artması halinde daha kaliteli çözümler verebileceğini gösterirken, Şekil 6.43'te sunulan radar grafikler 20 bağımsız çözümün hangi bölge çevresinde kümelendiğini göstermektedir. Tablo ve şekiller incelendiğinde 30 nüfuslu 100

yinelemeli bir analizde İPSO algoritmalarının IEEE 57-baralı test sisteminde BBO problemini çözme kabiliyeti olmadığı görülmektedir. Ancak popülasyon ve yineleme sayısının yükseltilmesi durumunda kaliteli çözümeler elde edilebileceği unutulmamalıdır.



(a) (b)

Şekil 6.43. İPSO ile IEEE 57-baralı test sisteminden elde edilen sonuçların radar grafikleri a) STF3(x)-PGK-1, b) VTF2(x)-PGK2

6.4.3. Genetik algoritmayla IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde yapılan analiz sonuçları

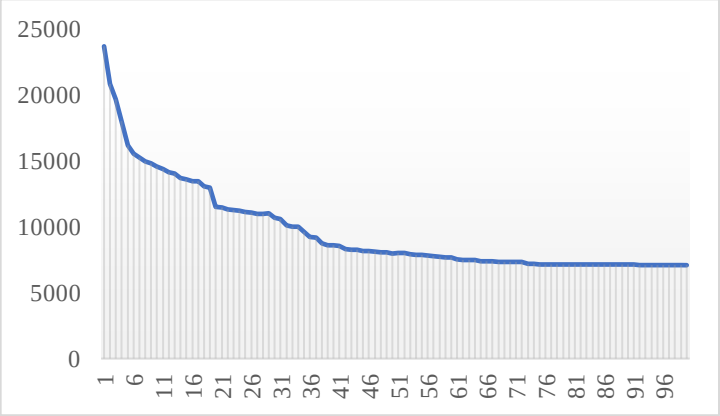
Genetik algoritma IEEE 14-baralı test sisteminde KA ile birlikte en kaliteli çözümleri üretebilmiş ve birçok algoritmaya göre BBO problemini çözme açısından önemli miktarda üstün olduğunu göstermiştir. Ancak bu algoritmanın benchmark fonksiyonları üzerinde en kötü performansı gösterdiği unutulmamalıdır.

Tablo 6.133. GA ile IEEE 57-baralı test sisteminde 20 bağımsız çalıştırmadan elde edilen en iyi çözümlerin maliyet sonuçları

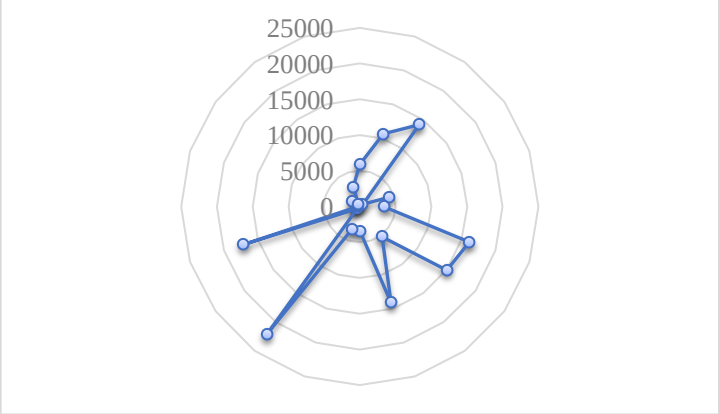
Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç	Sıra No	Sonuç
1	345,15	6	1282,66	11	4335,68	16	14175,00
2	391,23	7	2845,14	12	5242,11	17	15100,00
3	473,95	8	3378,49	13	5906,47	18	16125,00
4	518,67	9	3390,54	14	10685,16	19	17125,00
5	518,97	10	3398,28	15	14150,00	20	22100,00

BBO probleminin boyutu büyüdüğü için genetik algoritmanın mutasyon, çaprazlama, elit boyut parametrelerinin tekrar ayarlanması gerekebilir. IEEE 57-baralı test sisteminde GA ile yapılan analizlerde, IEEE 14-baralı test sisteminde kullanılan parametrelerin aynısı kullanılmıştır. Buna göre yapılan analizlerin neticesi Tablo

6.133'te paylaşılmıştır ve tablo incelendiğinde IEEE 14-baralı test sisteminde elde edilen başarının IEEE 57-baralı test sisteminde gösterilemediği görülmektedir.



Şekil 6.44. GA'nın IEEE 57-baralı test sistemindeki ortalama yakınsama eğrisi



Şekil 6.45. IEEE 57-baralı test sisteminde GA'dan elde edilen en iyi sonuçların radar grafiği

IEEE 57-baralı test sisteminde elde edilen en başarılı çözümün maliyeti 345,15 değerinde olup GA tarafından üretilmiştir ancak çözümlerin sadece %25'i optimal bölgeye yakınsamıştır. Şekil 6.44'de verilen ortalama yakınsama eğrisi ve 6.45'te verilen radar grafik incelendiğinde yerel optimale takılma problemi yaşandığı görülmektedir. Ancak Genetik Algoritmada mutasyon ve çaprazlama oranı gibi parametrelerin uygun şekilde ayarlanması, nüfus ve yineleme sayısının doğru seçilmesi gibi faktörlerin, algoritmanın yerel optimalden kaçınma becerisi açısından oldukça önemli olduğu unutulmamalıdır.

6.4.4. IEEE 57-baralı test sisteminde uygulanan sezgi-üstü algoritmaların karşılaştırılması

Bara bölme optimizasyonu problemi öncelikle IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde 8 farklı sezgi-üstü yaklaşımla çözülmüş ve yorumlanmıştır. Sürekli çözüm uzayındaki problemleri çözmek için tasarlanmış 7 farklı algoritma için 10 farklı senaryo test edilmiştir. BBO problemini çözebilme yeteneği olan algoritma ve senaryo kambinasyonları belirlenerek IEEE 57-baralı test sisteminde kullanılmış ve sonuçları sunulmuştur. İkili Kâşif Algoritmasında normal mesafede VTF2(x)-PGK-1 kombinasyonu seçilirken; hamming mesafesinde VTF4(x)-PGK-2 senaryosu tercih edilmiştir. İkili Parçacık Sürüsü Optimizasyonu algoritmasında ise VTF1(x)-PGK-1 ve VTF2(x)-PGK-2 yöntemleri seçilmiştir.

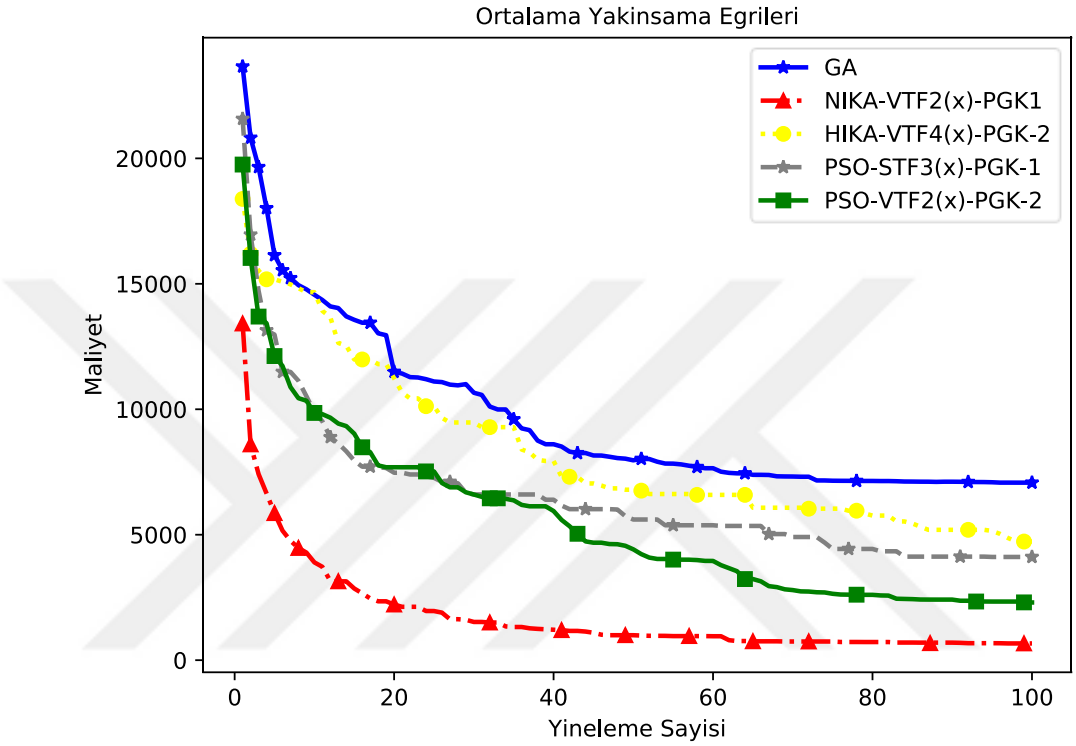
Tablo 6.134. IEEE 57-baralı test sisteminde kullanılan sezgi-üstü algoritmaların istatistiksel sonuçları

Sezgi-üstü Algoritma	Yöntem	Minimum	Maksimum	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
NİKA	VTF2(x)-PGK-1	4,9925E+02	**1,0224E+03**	**6,6692E+02**	**5,8937E+02**	**1,6190E+02**
HİKA	VTF4(x)-PGK-2	2,5752E+03	7,8447E+03	4,7277E+03	4,6486E+03	1,6087E+03
İPSO	STF3(x)-PGK-1	5,0308E+02	7,5808E+03	4,1140E+03	4,4434E+03	2,1532E+03
İPSO	VTF2(x)-PGK-2	5,0054E+02	5,7155E+03	2,2999E+03	1,7000E+03	1,3484E+03
GA	-	**3,4515E+02**	2,2100E+04	7,0744E+03	3,8670E+03	6,7472E+03

Tablo 6.135. NİKA'da kullanılan VTF2(x)-PGK-1 ile İPSO ve GA yöntemlerinin Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları (0,05 önem dereceli çift-kuyruklu test)

Karşılaştırma	W+	W-	p-değeri
NİKA VTF2(x)-PGK-1 ile HİKA VTF4(x)-PGK-2	210.00	0.00	1.91E-06
NİKA VTF2(x)-PGK-1 ile İPSO STF3(x)-PGK1	209.00	1.00	3.81E-06
NİKA VTF2(x)-PGK-1 ile İPSO VTF2(x)-PGK2	207.00	3.00	9.54E-06
NİKA VTF2(x)-PGK-1 ile GA	195.00	15.00	2.61E-04

İKA, İPSO ve GA'nın IEEE 57-baralı test sisteminde uygulanmasıyla elde edilen verilerin istatistiksel göstergeleri Tablo 6.134'te verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere, minimum değerde en başarılı bara düzeni GA tarafından sağlanırken en düşük maksimum, ortalama ve ortanca değerler ile standart sapma NİKA-VTF2(x)-PGK-1 yöntemiyle elde edilmiştir.

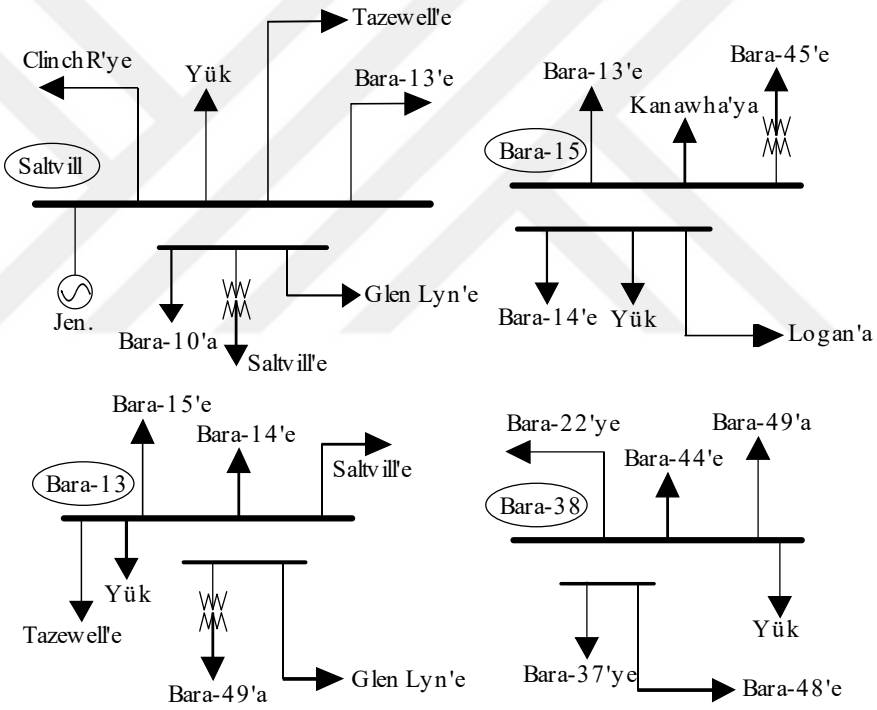


Şekil 6.46. Sezgi-üstü algoritmaların IEEE 57-baralı test sisteminde gösterdiği performansların karşılaştırılması

Elde edilen en iyi sonuçların verildiği tablolar, ortalama yakınsama eğrileri, radar grafikler ve parametrik istatistiksel göstergeler incelendiğinde NİKA VTF2(x)-PGK-1 yaklaşımının daha üstün olduğu görülmektedir. Ancak IEEE 14-baralı test sisteminde yapıldığı gibi burada da parametrik olmayan istatistiksel test yönteminden faydalanılmıştır. NİKA yönteminin IEEE 57-baralı test sisteminde BBO problemini çözebilme kabileyeti açısından diğer algoritmalar ile arasında kayda değer bir farkın olduğu Tablo 6.135'te verilen Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçlarından anlaşılmaktadır. Tabloda verilen olasılık değerleri incelendiğinde yöntemin diğer algoritmalardan 0,01 önem derecesinde dahi üstün olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle NİKA algoritmasının sunduğu çözümlerin yapısı diğer algoritmaların sonuçlarıyla %1'in altında benzerlik göstermektedir. Böylece geçersiz hipotez güçlü

bir şekilde reddedilerek NİKA algoritmasının sunduğu sonuçların kalitesi Wilcoxon parametrik olmayan işaretli sıra testine göre de teyit edilmiş olmaktadır.

Şekil 6.46'da kullanılan algoritmaların ortalama yakınsama eğrileri verilmiştir. Verilen eğriler incelendiğinde algoritmaların tamamında yakınsama işleminin gerçekleştiği görülmektedir. Her ne kadar NİKA-VTF2(x)-PGK-1 yaklaşımı diğerlerine göre çok daha üstün sonuçlar vermiş olsa bile örneğin HİKA-VTF4(x)-PGK-2 yönteminde yineleme sayısının artırılmasıyla yakınsamanın devam edeceği görülmektedir. Dolayısıyla, IEEE 14-baralı test sisteminde başarılı olan ve fakat IEEE 57-baralı test sisteminde kalitesiz çözümler sunan diğer algoritmaların da gerçek güç sisteminde performans testine tabi tutulmasında fayda olduğu düşünülmektedir.

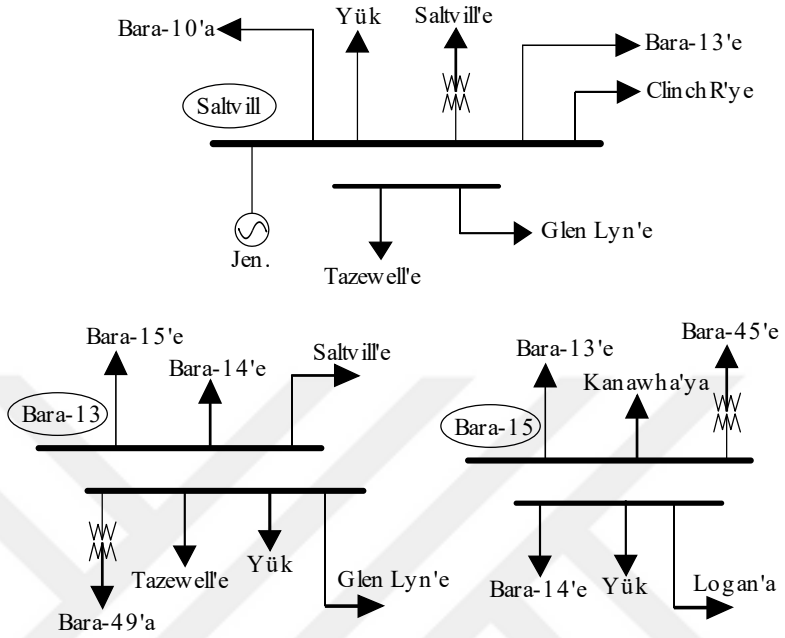


Şekil 6.47. IEEE 57-baralı test sisteminde GA'dan elde edilen en iyi bara düzeni

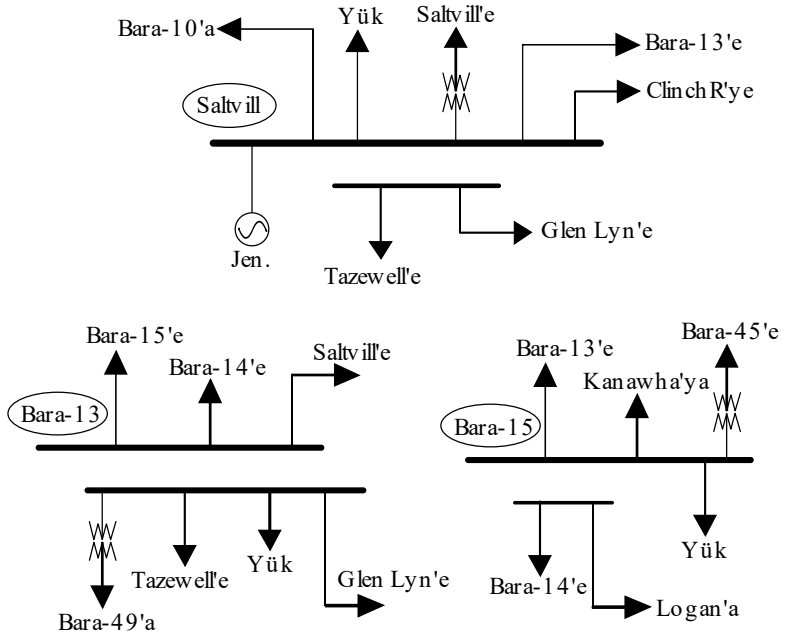
IEEE 57-baralı test sisteminde Şekil 6.47'de GA'dan, 6.48'de İKA'dan ve 6.49'da İPSO'dan elde edilen en iyi bara düzenleri gösterilmektedir. En kaliteli bara düzenini sunan GA'da 4 adet TM'de kuplaj kesicisi açılırken İKA ve İPSO'da 3 adet TM'de bara bölme işlemi gerçekleşmiştir.

Algoritmalardan elde edilen kaliteli bara düzenlerinin tamamında Saltvill, Bara-13 ve Bara-15'te kuplaj kesicinin açıldığı ve neredeyse tamamen aynı fider dağılımlarının

yapıldığı görülmektedir. Dolayısıyla, IEEE 57-baralı test sisteminde kısa devre ve N-1 güvenliğinin sağlanması için en azından bu üç TM'de bara bölme işleminin yapılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.48. IEEE 57-baralı test sisteminde İKA'dan elde edilen en iyi bara düzeni



Şekil 6.49. IEEE 57-baralı test sisteminde İPSO'dan elde edilen en iyi bara düzeni

6.5. Önerilen İKA Algoritmasıyla IEEE 118-Baralı Test Sisteminde BBO Probleminin Çözümü

İKA algoritması sadece benchmark problemlerinde değil aynı zamanda IEEE 14 ve 57-baralı test sisteminde başarılı sonuçlar vermiştir. Benchmark fonksiyonlarında başarılı performans gösteren İYAKA, İYAA ve İSSA algoritmaları bara bölme optimizasyonu probleminde iyi bir performans sergileyememiştir. Ancak benchmark fonksiyonlarında başarılı olamayan İPSO ve GA yöntemleri IEEE 14-baralı test sisteminde kaliteli çözümler sunabilirken problem boyutunun genişlediği IEEE 57-baralı test sisteminde İKA yöntemine göre oldukça geri kalmışlardır.

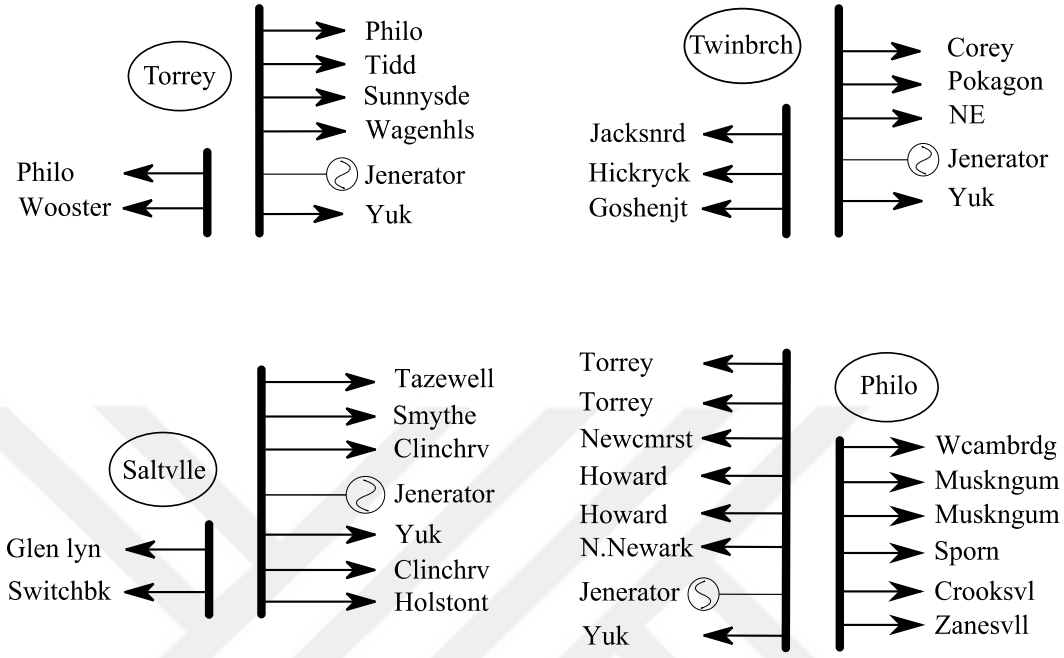
Yapılan analizlerden anlaşıldığı üzere, sezgi-üstü algoritmaların sunduğu çözümlerin kalitesini sadece problemin yapısı değil aynı zamanda boyutu da önemli miktarda etkilemektedir. Bu nedenle, gerçek güç sisteminde gerekli analizler yapılmadan önce İKA'nın performansını inceleyebilmek için algoritmanın IEEE 118-baralı test sisteminde bara bölme optimizasyonu problemini çözmesi sağlanmıştır.

IEEE 118-baralı test sisteminde normal şartlarda iletim hatlarının termal kapasite bilgileri bulunmamaktadır ancak [150]'de paylaşılan PSS/E sav dosyasında paylaşılan yüklenme kapasiteleri BBO problemini çözmek için kullanılmıştır. Bu sistemde bulunan kesicilerin kısa devre akım kesme kapasitesinin 5 kA olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle İKA yöntemi kısa devre akımlarının sınırı aşmayacağı ve N-1 güvenliğinin sürdürüleceği bir topolojiyi oluşturmalıdır.

IEEE 118-baralı test sisteminde bara bölünme işlemi yapıldığında bazı baralarda önemli gerilim bozulmaları gerçekleşmektedir. Bu durum daha güvenli bir güç sistemi elde etmek için gerilim bozulmalarının dikkate alınmasının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu sistemde DA güç akışlarıyla yapılan bir kısıt analizinde başarılı olduğu düşünülen bir topoloji, aslında ciddi gerilim bozulmalarına neden olabilmektedir.

BBO problemini çözebilmek amacıyla popülasyon büyüklüğü ve yineleme sayısı sırasıyla 30 ve 300 seçilmiştir. Yapılan analizlerde normal mesafeli İKA'nın VTF2(x) – PGK-1 ve VTF2(x) – PGK-2 senaryolarının her ikisinde de kısa devre akımlarının

sınırlandırıldığı, N-1 durumunda gerilim bozulmaları ve aşırı yüklenmelerin meydana gelmediği, uygun bir topoloji sunabilmektedir.



Şekil 6.50. İKA ile IEEE 118-baralı test sisteminde elde edilen bara dağılımı

Şekil 6.50'de İKA algoritmasının IEEE 118-baralı test sisteminde elde ettiği bara dağılımı görülmektedir. Bu sistemde 4 TM'de bara dağılımı yapılarak güç sisteminin statik güvenliği temin edilmiştir. Bölünebilecek bara sayısı önemli miktarda arttığından dolayı çözüm uzayı buna paralel olarak artmıştır ve bu nedenle problem 2,7336 saatte çözülmüştür. IEEE 118-baralı test sisteminde 30'dan fazla bölünebilecek bara bulunmaktadır. Aslında elektriksel olarak uzak bölgelerin birbirlerini önemli derecede etkilemeyeceği için baraların tamamını çözüm uzayına eklemeye gerek yoktur. Ne kadar az bara bölme, o kadar çok dinamik kararlılık felsefesinden hareketle çözüm uzayını küçük tutmanın geçici durum olayları açısından da fayda sağlayacağı açıktır. Bu nedenle, İSO'lar BBO problemini çözecekleri bölgede bölünecek hedef baraları belirlemelidir. Bu yaklaşımla birlikte çözüm uzayı küçüleceği için algoritmaların elde edeceği çözümün kalitesi de yükselecektir. Eğer hedef baralarla kabul edilebilir bara düzeni elde edilemezse, BBO problemi hedef bara miktarı artırılarak tekrar çözülmelidir.

6.6. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Örnek Olay Analizleri

Türkiye iletim şebekesinde özellikle 154 kV gerilim seviyesinde hesaplanan kısa devre akımları, kesicilerin arıza akımı kesme kapasitesinden daha yüksektir. İSO'lar kısa devre akımlarını sınırlandırabilmek amacıyla çift baralı TM'lerde kuplaj kesicileri açarak fiderleri bara-1 ve bara-2'ye aktarmakta ve yeni topolojinin arz güvenliğini kontrol ederek iki problemi eş zamanlı çözmeye çalışmaktadır. Test sistemlerinde bile milyarca seçeneğin bulunması, İSO'ların çözmeye çalıştığı problemin ne kadar karmaşık ve zorlayıcı bir işlem olduğunu göstermektedir. Enerjiye olan talebin gün geçtikçe artması ve buna paralel olarak iletim sisteminin yeni iletim hattı, ototransformatör ve jeneratör eklenerek genişletilmesi, İSO'ların karşılaştığı kompleks bara bölme probleminin çözüm uzayını üstel şekilde yükseltmektedir.

Tez çalışmamızın amacı, İSO'ların Türkiye Elektrik İletim Sisteminde yaşadığı gerçek bir problem olan bara bölme problemiyle ilgili alacakları kararlarda, onlara yardımcı olabilecek bilimsel yaklaşımların kullanılması ve türetilmesidir. Bu yönüyle tez çalışmamız, günlük hayatımızın her anında ihtiyaç duyduğumuz enerjinin kesintisiz şekilde tüketiciye ulaştırılması yolunda üreticiyle tüketiciyi birleştiren iletim sisteminde yaşanabilecek bazı problemlerin çözümünü sunacak mahiyette olarak teknik bilgiyi pratikte uygulayabilmiştir.

Aşırı kısa devre akımları, tüketim miktarının önemli derecede yükseldiği yaz ve kış aylarında özellikle İstanbul ve Bursa gibi sanayinin ve nüfusun yoğun olduğu metropol şehirlerde yaşanan ve mutlaka çözüm getirilmesi gereken başlıca problemlerdendir. KDA'yı sınırlandırabilmek için KDA'sı yüksek olan baralara reaktör eklenmesi veya kesicilerin kesme kapasitesi daha yüksek kesicilerle değiştirilmesi gibi önlemler alınması mümkün olsa bile bara bölme yöntemi herhangi bir ek maliyete gerek kalmadan problemin çözülebildiği etkili bir metottur. Bara bölme yöntemiyle kısa devre akımlarının sınırlandırılması etkin bir yöntem olmakla birlikte sistem N-1 güvenliği açısından tehlike oluşturabilecek bir yaklaşımdır. Statik analizlerin yanı sıra geçici hal kararsızlığı üzerinde de olumsuz etkisi olabilecek topoloji değişimi, gerekli analizler yapılmadan uygulanmamalıdır. Başka bir ifadeyle, statik açıdan başarılı bulunan ve algoritmalar tarafından önerilen bara düzenlerinin geçici durum analizlerinin yapılması tavsiye edilmektedir.

Çalışmamız kapsamında IEEE 14, 57 ve 118-baralı test sistemlerinde kullanılan algoritmalardan başarılı olduğu görülen yöntemler Türkiye Elektrik İletim Sisteminin 2. Bölge Müdürlüğü (Bursa) sınırları içerisinde kalan belirli bir bölümünde ve 4. Bölge Müdürlüğü (İstanbul Anadolu Yakası) sorumluluğunda bulunan, demir çelik sanayinin yoğun olduğu bir bölgesinde kullanılmıştır. IEEE 14, 57 ve 118-baralı test sistemlerinde problemin içeriği aynı olsa bile çözüm uzayında meydana gelen büyümenin algoritma performansını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bunun ötesinde, işlem yapılan güç sisteminin yapısında bulunan dinamiklerin de çözüm kalitesini etkilediği aşikardır. Başka bir ifadeyle, güç sisteminin ağ yapısının, çözüm uzayını artırabildiği gibi yerel optimal bölgelerin zorluk derecesini de yükseltebildiği gözlemlenmektedir. Çalışmamız kapsamında geliştirilen İKA yöntemi, IEEE 14, 57 ve 118-baralı test sistemlerinde N-1 güvenliğini sürdürürken kısa devre akımlarını sınırlandıran topolojiler sunmayı başarmıştır. Dolayısıyla İKA yönteminin gerçek güç sisteminde de kaliteli çözümler sunması beklenmektedir. Yine IEEE 14-baralı test sisteminde başarı göstermesine rağmen IEEE 57-baralı test sisteminde yetersiz kalan İPSO ve GA tekniklerinin de parametre ayarlamasıyla birlikte gerçek güç sisteminde kaliteli çözümler üreteceği düşünülmektedir.

BBO problemi çözülecek Bursa Bölgesinde 5 adet TM'de bara düzenlemesi yapılabilmekte olup, bu TM'lere bağlı olan fiderlerin dağılım kombinasyonları düşünüldüğünde $1{,}044062208 \text{x} 10^{11}$ adet topoloji konfigürasyonu oluşturulabileceği görülmektedir. İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde ise 11 TM'de kuplaj kesici bölünebilirken $6{,}95784701952 \text{x} 10^{21}$ adet farklı bara dağılımı seçeneği bulunmaktadır. Anlaşıldığı üzere Bursa Bölgesinin çözüm uzayı boyut açısından IEEE 57-baralı test sistemine benzemektedir.

Çözüm uzayı daha büyük olan İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde, algoritmaların yakınsama karakteristiklerini iyileştirebilmek adına popülasyon ve iterasyon sayıları artırılabilir ya da çözüm uzayını küçültecek yaklaşımlar uygulanabilir. Örneğin, İstanbul Bölgesinde her TM'de transformatörlerden birinin konumunu sabit tutarak yapılacak araştırma için çözüm uzayı boyutu $3{,}39738624 \text{x} 10^{18}$'e düşerken tüm transformatörlerin makul şekilde baralara dağıtılması suretiyle sadece iletim hatlarının çözüm uzayında bulunması halinde araştırılacak boyut $2{,}025 \text{x} 10^{9}$'a kadar

azalmaktadır. Birbirinde bağımsız yapılan analizlere göre 10^{26} boyutlu bir çözüm uzayında, 50 üyeli bir sürünün 300 yinelemede optimal bölgeye bazı analizlerde yakınsayabildiği görülmekte iken 100 üyeli bir popülasyon 500 iterasyonda daha güvenilir sonuçlar vererek bağımsız analizlerin büyük bir çoğunluğunda optimale yakın sonuçlar sunmaktadır. Çözüm uzayının 10^{38} boyutuna yükselmesi halinde ise iterasyon ve popülasyon sayısının daha fazla yükselmesi gerekeceği için çözüm süresi açısından kabul edilebilir sonuçlar elde etmek mümkün olmayabilir. Bu nedenle, mevcut teknolojiyle kaliteli sonuçlar elde edebilmek için sezgi-üstü algoritmalarla yapılacak bara bölme optimizasyonunun çözüm uzayı 10^{30}'un üzerine çıkarılmamalıdır. Böyle bir durum söz konusu ise bölünebilecek hedef baralar seçilmeli ve çözüm uzayı sınırlandırılmalıdır.

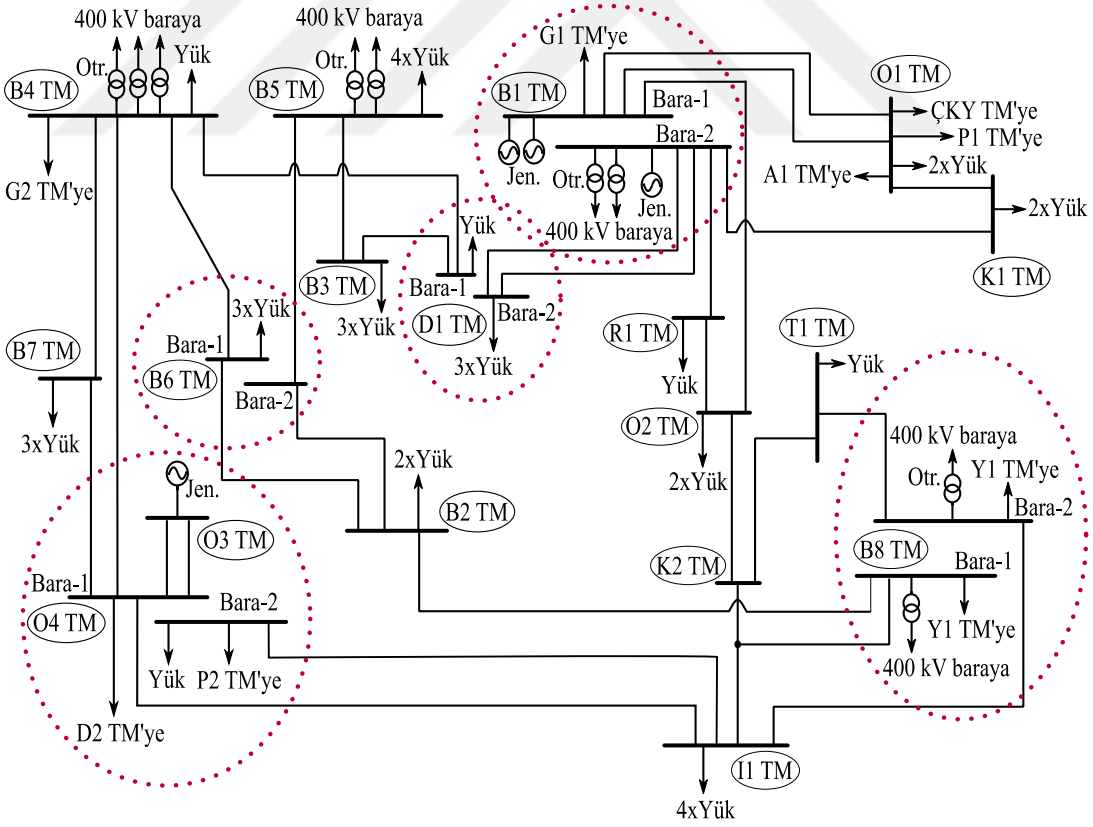
6.6.1. Bursa bölgesinde bara bölme optimizasyonu

Bursa bölgesinde mevcut işletme koşullarında kısa devre akımlarını sınırlandırabilmek için 2 Transformatör Merkezinde uygun bara dağılımı yapılarak kuplaj kesiciler servis harici edilmiştir. Buna rağmen KDA'nın arzu edilen seviyeye gelmemesi nedeniyle bir adet iletim hattı ilave olarak servis harici edilmiştir. Bilgi güvenliği nedeniyle iletim sisteminin mevcut işletme koşullarında gösterdiği N-1 güvenliği ve kısa devre performanslarıyla ilgili detaylı bilgi verilmeyecektir. Ancak algoritmalardan elde edilen sonuçların iletim sistemini başarılı bir şekilde işletme yönünde ne kadar doğru kararlar olduğunu gösterebilmek adına, başlangıç durumunda 154 kV gerilim seviyesinde işletme gereği servis harici edilmiş olan iletim hattı ve kuplaj kesiciler servise alınmış ve bu durumda sistemde meydana gelebilecek kısa devre akım değerleri Tablo 6.136'da verilmiştir.

Tablo 6.136 incelendiğinde B1 TM'de 48 kA'in üzerinde kısa devre akımı oluşacağı hesaplanırken B4 ve D1 TM'lerde 31,5 kA'in üzerindeki akımların meydana geleceği görülmektedir. Hesaplanan KDA'nın mutlaka 31,5 kA'in altına indirilmesi gerekmektedir ve bu doğrultuda tez çalışmamız kapsamında önerilen ikili kâşif algoritması yöntemiyle yapılan analizler neticesinde Şekil 6.51'de verilen bara düzeninin oluşturulması durumunda Tablo 6.137'den görüldüğü üzere aşırı kısa devre akımları sınırlandırılabilmektedir.

Tablo 6.136. Kuplaj kesicilerin tamamı serviste iken Bursa Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları

Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)	Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)
B1	Bara-1	**41770,4**	**48335,4**	D1	Bara-2	**34787,5**	28303,6
B1	Bara-2	**41770,4**	**48335,4**	K2	-	23699,5	16850,2
B4	-	**38498,9**	**33449,4**	Y1	-	15586,2	9946
B5	-	30344,6	25257,6	İ1	-	15252,7	9668,5
K1	-	15929,1	10810,6	P2	-	6490,4	3845,9
G1	-	14596,4	9533	T1	-	23793,8	17389,7
O1	-	19082,5	13371,4	D2	-	8052,1	5817,8
O2	-	23659,3	16743,4	B8	Bara-1	30443,6	25231,7
B2	-	26049,6	19338,7	B8	Bara-2	30443,6	25231,7
B3	-	28222,5	22154,3	R1	-	7988,3	5172,5
B7	-	25328,3	18473,1	B6	Bara-1	22018,4	15587
O3	-	18602,8	17610,2	B6	Bara-2	29881,6	24247,5
G2	-	13807,2	10356,5	O4	Bara-1	18668,3	17628,6
D1	Bara-1	**34787,5**	28303,6	O4	Bara-2	18668,3	17628,6



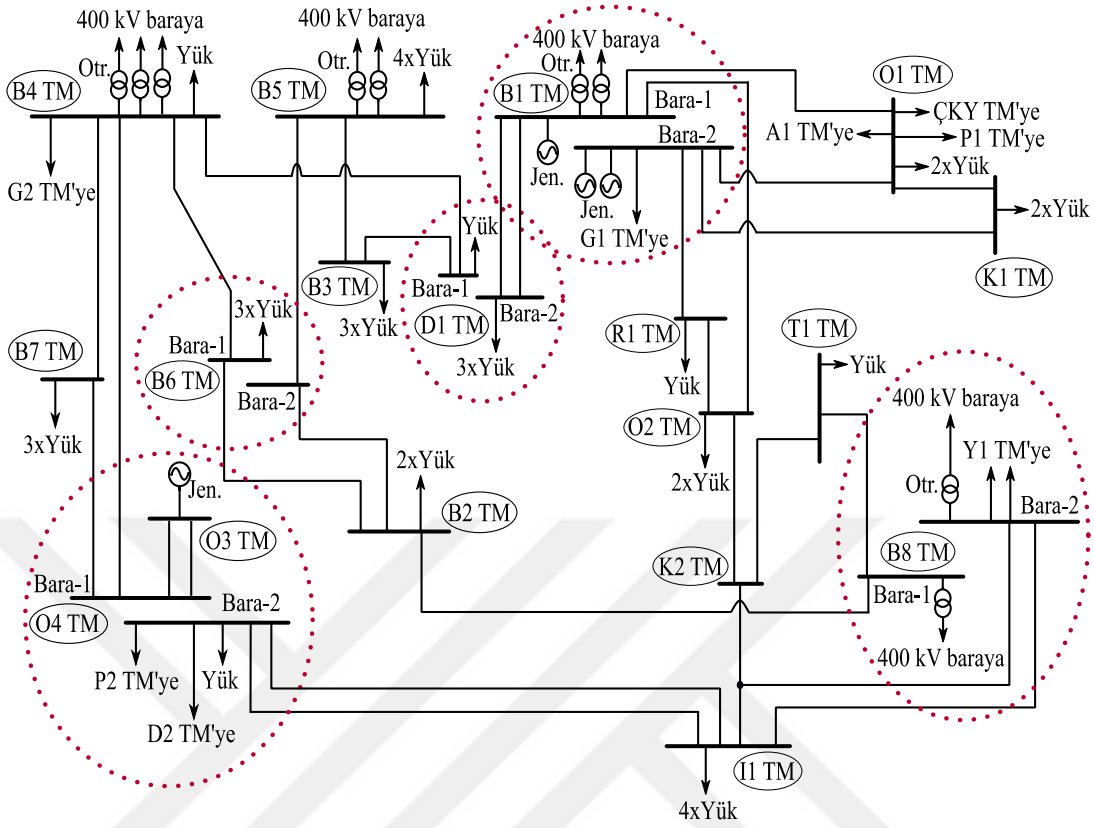
Şekil 6.51. Bursa Bölgesinde İKA ile elde edilen optimal bara düzeni

Şekil 6.51'de B1, D1, B6, O4 ve B8 TM'lerinde uygun bara dağılımları yapılarak hem N-1 güvenliği sürdürülmüş hem de KDA sınırları içerisine getirilmiştir. Tablo 6.137'den görüldüğü üzere TM'lerin tamamında KDA istenen seviyeye çekilmiştir. İKA ile elde edilen en büyük kısa devre akımı 30.88 kA olarak hesaplanmış olup önerilen bara düzeninde N-1 durumunda ardışık açmalara neden olacak aşırı yüklenmeler de meydana gelmemektedir.

Tablo 6.137. İKA ile elde edilen bara düzeniyle Bursa Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları

Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)	Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)
B1	Bara-1	26842,2	28803,5	D1	Bara-2	16208,0	13148,1
B1	Bara-2	19932,3	23651,7	K2	-	23398,8	16622,2
B4	-	30879,8	26781,4	Y1	-	15533,8	9904,3
B5	-	24816,5	20570,8	İ1	-	14026,2	8818,3
K1	-	13755,8	10002,7	P2	-	6435,2	3826,6
G1	-	11343,0	8283,0	T1	-	19670,8	14344,2
O1	-	16815,2	12525,6	D2	-	5589,2	4069,4
O2	-	22321,9	16257,5	B8	Bara-1	20994,9	16613,2
B2	-	23521,2	17368,1	B8	Bara-2	24138,5	18894,4
B3	-	23220,5	18254,5	R1	-	18838,6	14348,6
B7	-	21847,1	16390,1	B6	Bara-1	22745,4	18661,0
O3	-	15387,5	15086,8	B6	Bara-2	21563,9	15253,4
G2	-	13010,5	9940,0	O4	Bara-1	4998,5	3139,8
D1	Bara-1	21264,1	15502,6	O4	Bara-2	15429,1	15089,8

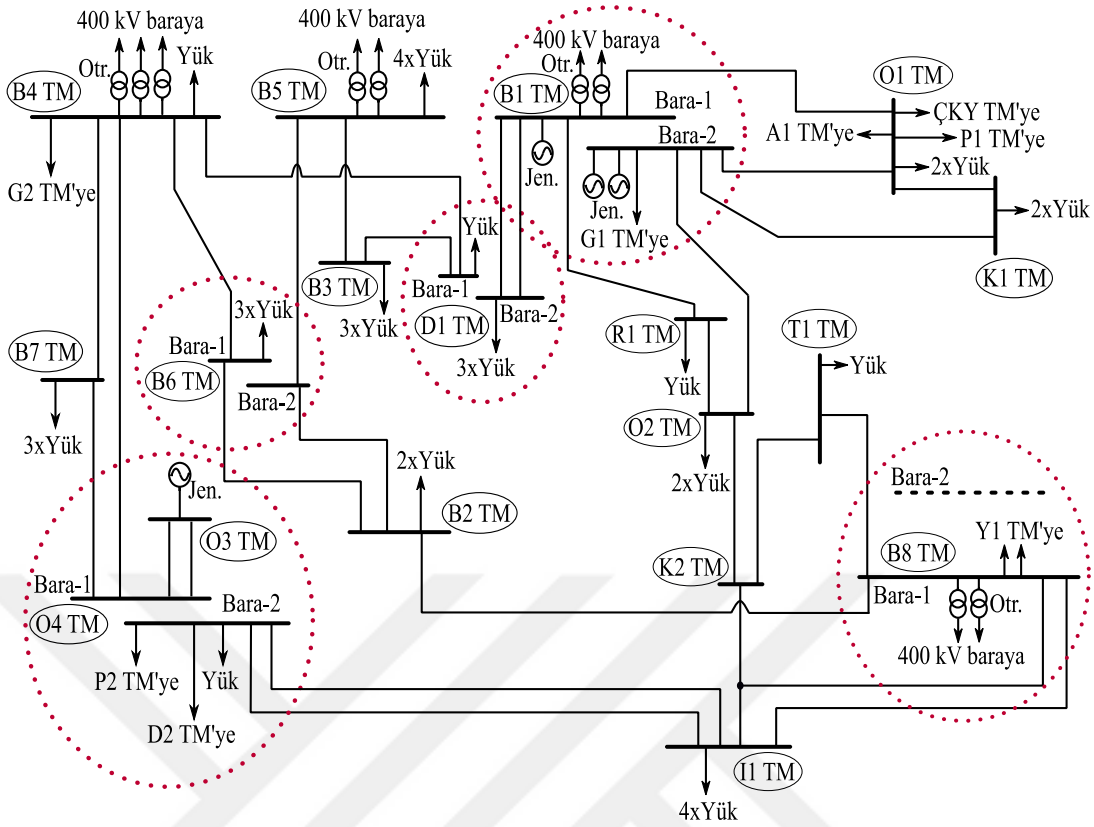
Bursa bölgesi için bir başka işletme düzeni örneği de Şekil 6.52'de gösterilen ikili parçacık sürüsü optimizasyonu tekniği ile elde edilmiş topolojidir. Sezgi-üstü algoritmalar, daha önce de bahsedildiği gibi optimal sonucu garanti etmemekte olup, optimal bölgeye yakınsayarak en iyiye yakın olan kaliteli çözümler ürettiği için İPSO ile İKA sonuçları arasında farklılıklar görülmektedir. Örneğin, İKA'da B1 TM'nin bara-1'ine O1,O1,G1,O2 iletim fiderleri ile iki jeneratör fideri bağlanmışken, İPSO'da aynı barada D1,D1,O1,O2 fiderleri, iki ototransformatör fideri ve bir jeneratör fideri bulunmaktadır. İPSO ile elde edilen çözümün kısa devre performansı Tablo 6.138'de gösterilmektedir.



Şekil 6.52. Bursa Bölgesinde İPSO ile elde edilen optimal bara düzeni

Tablo 6.138. İPSO ile elde edilen bara düzeniyle Bursa Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları

Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)	Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)
B1	Bara-1	26811,8	28811,0	D1	Bara-2	16186,7	13143,9
B1	Bara-2	19922,8	23643,8	K2	-	23175,2	16409,5
B4	-	29650,7	26153,3	Y1	-	13423,0	8742,5
B5	-	24371,1	20334,6	İ1	-	12732,1	7866,5
K1	-	13752,0	10020,0	P2	-	5467,9	3184,9
G1	-	11340,7	8284,1	T1	-	20511,4	14884,7
O1	-	16808,2	12545,0	D2	-	6130,7	4383,1
O2	-	22260,1	16208,9	B8	Bara-1	21730,8	17195,9
B2	-	22901,7	17047,1	B8	Bara-2	20597,5	16287,0
B3	-	22823,6	18067,7	R1	-	18809,7	14328,1
B7	-	20786,5	15971,7	B6	Bara-1	21160,8	15115,9
O3	-	11895,1	12365,8	B6	Bara-2	22247,0	18403,7
G2	-	12939,5	9911,0	O4	Bara-1	7421,4	4604,0
D1	Bara-1	20793,4	15331,0	O4	Bara-2	11916,7	12359,6



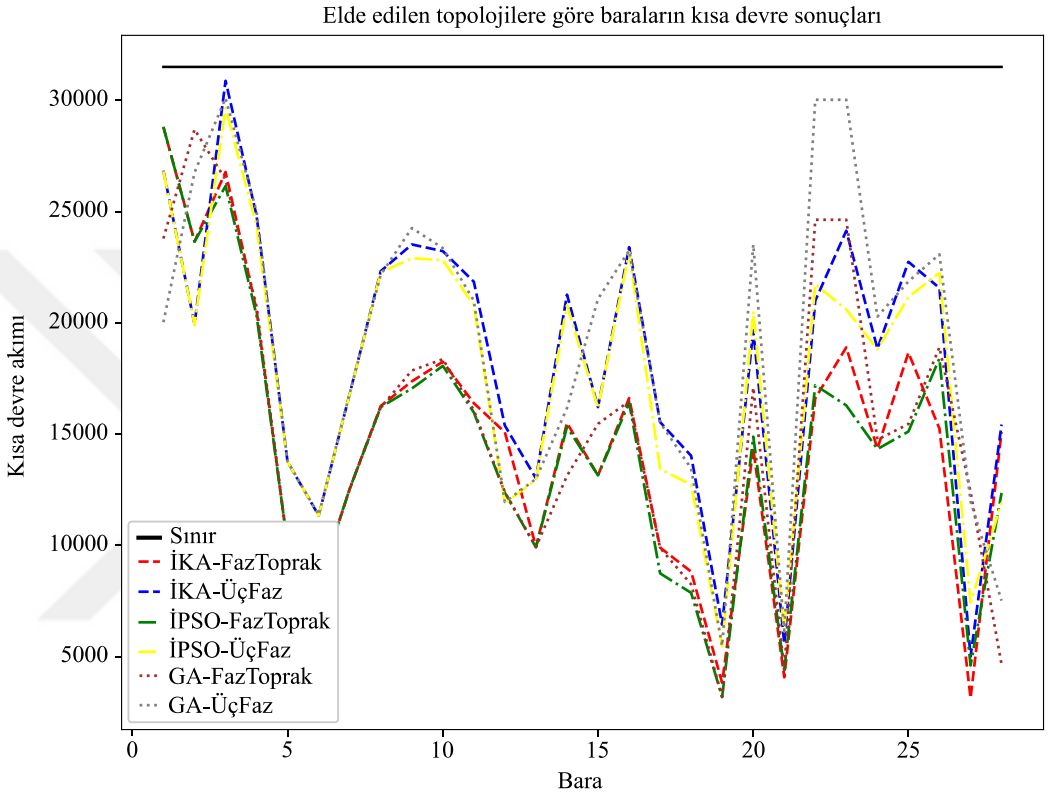
Şekil 6.53. Bursa Bölgesinde GA ile elde edilen optimal bara düzeni

Tablo 6.139. GA ile elde edilen bara düzeniyle Bursa Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları

Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)	Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)
B1	Bara-1	20029,7	23787,9	D1	Bara-2	21071,6	15457,7
B1	Bara-2	26759,5	28692,5	K2	-	23251,5	16474,1
B4	-	30100,3	26438,6	Y1	-	15517,5	9887,5
B5	-	25003,1	20729,7	İ1	-	13463,0	8245,4
K1	-	13771,6	10011,2	P2	-	5483,2	3191,5
G1	-	11366,4	8295,3	T1	-	23524,2	17092,1
O1	-	16829,8	12533,9	D2	-	6158,4	4397,7
O2	-	22153,8	16190,9	B8	Bara-1	30027,6	24635,8
B2	-	24259,3	17856,2	B8	Bara-2	-	-
B3	-	23356,2	18365,8	R1	-	20276,3	14753,2
B7	-	20997,7	16070,6	B6	Bara-1	21861,7	15448,9
O3	-	11947,9	12403,3	B6	Bara-2	23078,9	18901,8
G2	-	12986,7	9930,9	O4	Bara-1	11969,7	12397,2
D1	Bara-1	16167,9	13120,7	O4	Bara-2	7516,4	4650,3

Son olarak Bursa Bölgesinde Genetik Algoritma tekniği kullanılarak elde edilen bara düzeni Şekil 6.53'te verilmiş olup ilgili topolojide meydana gelebilecek kısa devre

akımları Tablo 6.139'da gösterilmektedir. GA'dan elde edilen çözüm incelendiğinde diğer çözümler ile arasındaki en önemli farkın daha az bara bölerek KDA'yı istenen düzeye getirmesi olduğu anlaşılmaktadır. İKA ve İPSO çözümlerinde B8 TM'sinde bara bölme işlemi gerçekleşirken GA tekniğinde bu baranın bölünmesine ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 6.54. Bursa Bölgesinde sezgi-üstü yöntemler kullanılarak elde edilen bara düzenlerinde hesaplanan kısa devre akımları

Tez çalışmamız kapsamında İKA, İPSO ve GA sezgi-üstü optimizasyon algoritmalarıyla Bursa Bölgesinde yaşanan kısa devre problemini çözen ve sistem arz güvenliğini sürdüren kaliteli sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6.54'te görüldüğü gibi sezgi-üstü algoritmalar ile elde edilen bara düzenlerinde hiçbir baranın kısa devre akımı dengeli ve dengesiz arıza tipinde belirlenen sınır değeri aşmamıştır. Şunu belirtmek gerekir ki Bursa Bölgesinde sistem durumu, Bursa, Balıkesir ve İzmir gibi bölgelerde bulunan rüzgâr türbinlerinden elde edilen üretim miktarına göre önemli derecede değişmektedir. Bu nedenle Bursa bölgesinde üretim profilinin değişme durumu dikkate alınarak BBO problemi çözülmelidir. Bu doğrultuda yapılan analizlerle elde edilen bara düzenlerinden birisi Bursa Bölgesine uygulanmış ve

başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Uygulanan bara düzeni, yine bilgi güvenliği nedeniyle paylaşılmamaktadır fakat Türkiye Elektrik İletim Sisteminin Bursa Bölgesinde, iletim sisteminin yapay zekâ optimizasyon algoritmalarının önerileri doğrultusunda işletilmesi, tez çalışmamızın amacına ulaşması noktasında önemli bir adımdır.

6.6.2. İstanbul Anadolu Yakası bölgesinde bara bölme optimizasyonu

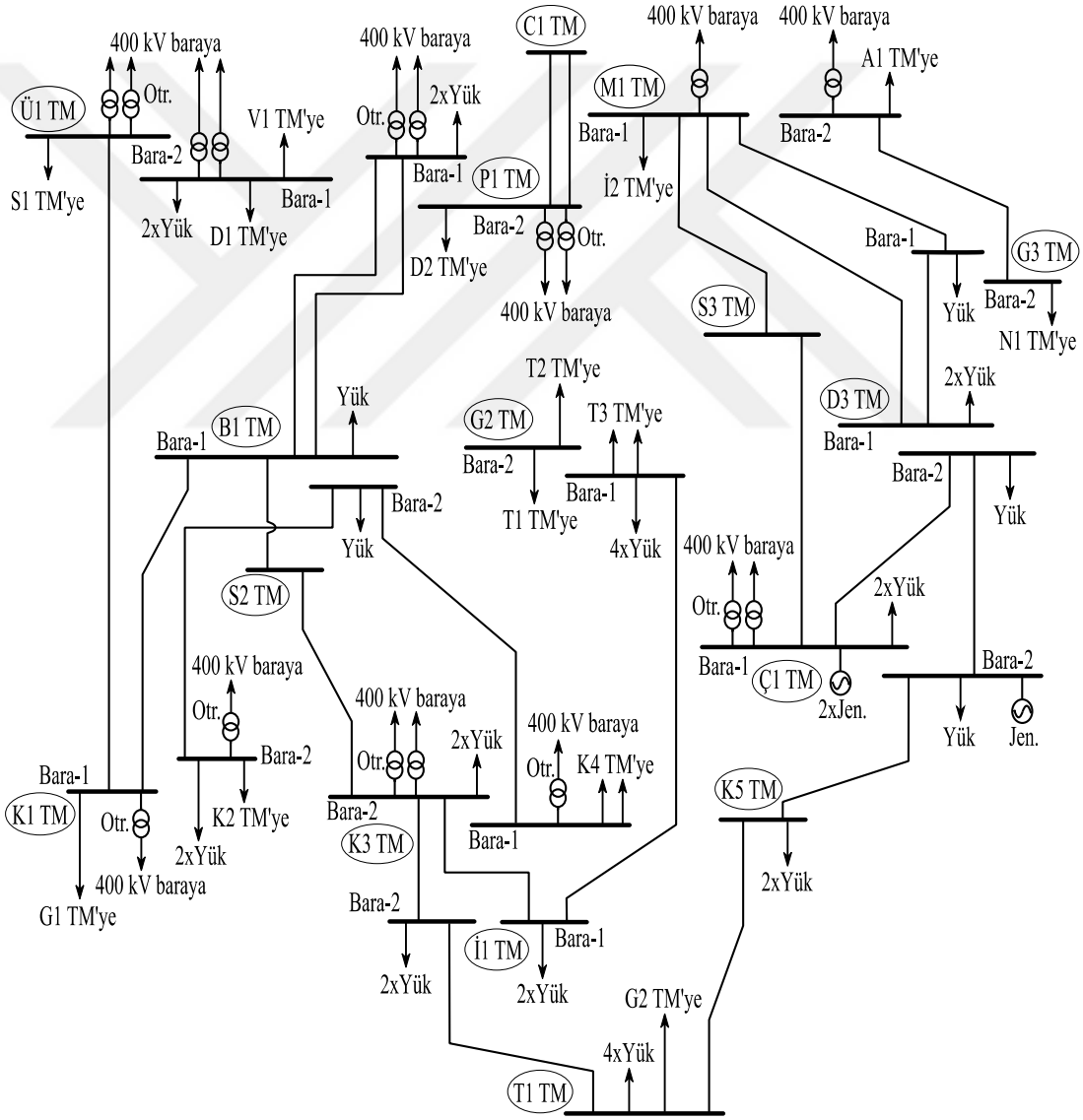
Türkiye Elektrik İletim Sisteminin İstanbul Anadolu Yakası Bölgesi, Gebze-Dilovası alanında bulunan sanayi sektörünü ve Kadıköy, Ümraniye ve Küçük Bakkalköy gibi meskenlerin yoğun bulunduğu yerleşim merkezlerini beslemektedir. Demir-çelik fabrikalarında bulunan ark ocakları önemli miktarda darbeli yük çekerek tüketim tarafında belirsizliğe yol açmaktadır. Bir demir-çelik fabrikası sistemden 100 MVA çekerken aniden 300 MVA tüketim miktarına ulaşabilir. Şebeke işletmecisi, demir-çelik fabrikalarının yapabileceği en büyük tüketim miktarının eş zamanlı gerçekleşme ihtimalini mutlaka dikkate almalıdır. Başka bir ifadeyle, İSO'lar bu bölgede tüketim belirsizliğiyle baş etmek zorundadır.

Tablo 6.140. Kuplaj kesicilerin tamamı serviste iken İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları

Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)	Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)
Ü1	Bara-1	**45411,2**	**43214,8**	Ç1	Bara-2	**36783,2**	**38672,8**
Ü1	Bara-2	**45411,2**	**43214,8**	İ1	Bara-1	**37480,9**	**33875,6**
T2	-	**37899,5**	**33179,4**	İ1	Bara-2	**37480,9**	**33875,6**
T3	-	**34468,4**	29580,4	G2	Bara-1	**37061,2**	29283,7
P1	Bara-1	**47786,4**	**43096,3**	G2	Bara-2	**37061,2**	29283,7
P1	Bara-2	**47786,4**	**43096,3**	K4	-	**36207,8**	29344
S1	-	**37279,3**	**35958,9**	D2	-	**43602,2**	**41738,3**
G1	-	**34636,5**	**33380,4**	V1	-	28336,6	28177,4
K1	Bara-1	**44166,5**	**40887,6**	D3	Bara-1	**35257,6**	**33949,1**
K1	Bara-2	**44166,5**	**40887,6**	D3	Bara-2	**35257,6**	**33949,1**
B1	Bara-1	**44876,9**	**36586,1**	M1	Bara-1	**34858,5**	31391,7
B1	Bara-2	**44876,9**	**36586,1**	M1	Bara-2	**34858,5**	31391,7
S2	-	**32907,7**	24076,5	K2	-	**37700,3**	**36134,6**
K3	Bara-1	**45133,3**	**40825,2**	G3	Bara-1	**31511**	26020,2
K3	Bara-2	**45133,3**	**40825,2**	G3	Bara-2	**31511**	26020,2
T1	-	30456,7	24304,3	S3	-	25556,8	22754
K5	-	28429,1	21748,5	C1	-	20355	13842,6
Ç1	Bara-1	**36783,2**	**38672,8**	D1	-	**42671,8**	**41282,8**

İstanbul Anadolu Yakasında çözüm uzayı Bursa Bölgesine göre daha büyüktür. Bu nedenle, Bölüm 3.1'de anlatılan lineer olmayan ve lineer kısıt analizlerinin her ikisi de uygulanmıştır. Lineer olmayan kısıt analizi yaklaşımını kullanarak İKA, İPSO ve GA yöntemleriyle problem çözülürken; lineer kısıt analiziyle sadece GA yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Lineer kısıt analizinin kullanıldığı çözümde Bölüm 5'te anlatılan kümeleme yaklaşımı yerine etiketleme yöntemi kullanılmış ve sadece iletim hatlarının optimizasyonu yapılmıştır.

Lineer olmayan kısıt analizinin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar;

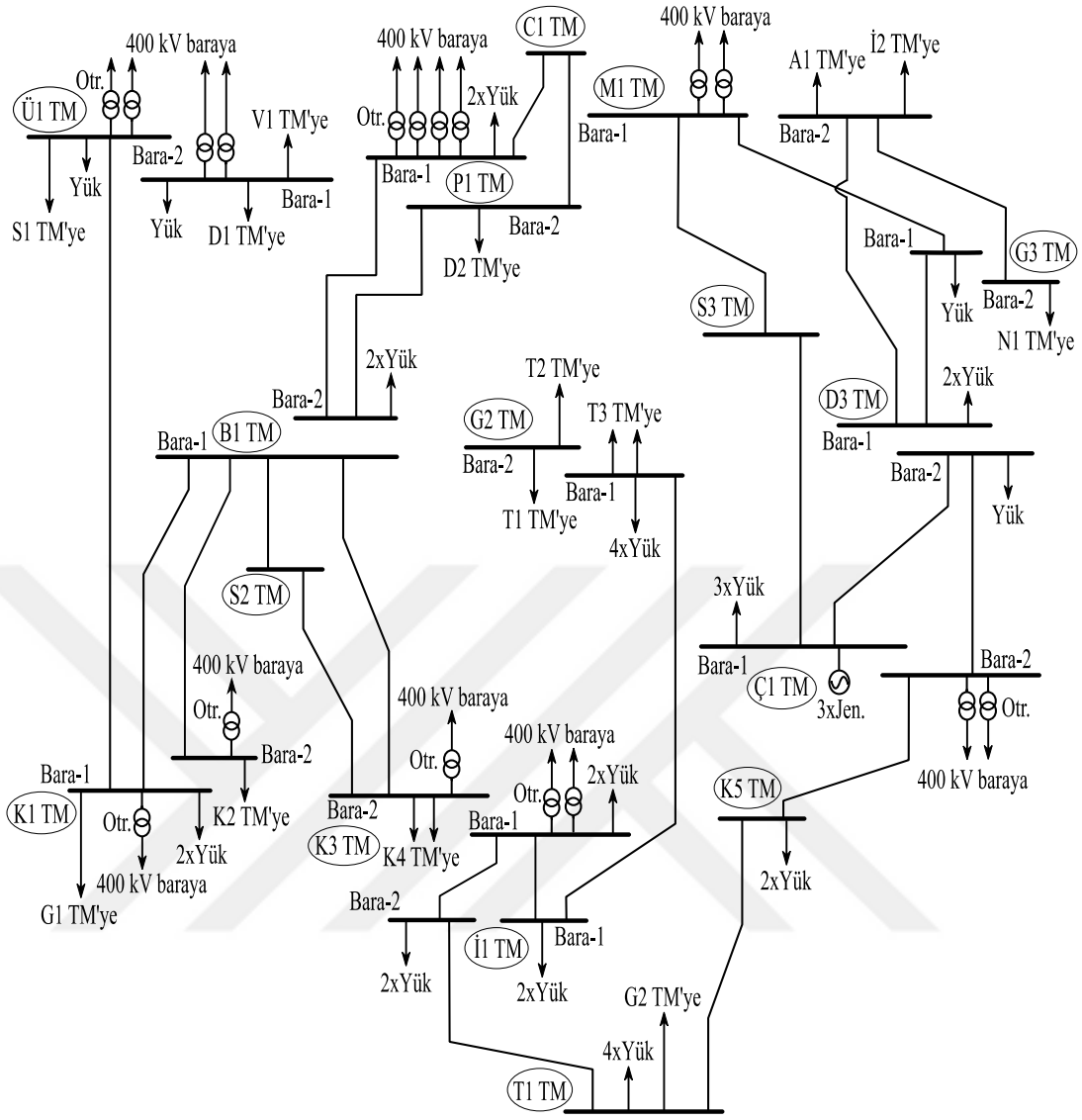


Şekil 6.55. İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde İKA ile elde edilen optimal bara düzeni

Bursa Bölgesinde olduğu gibi İstanbul Bölgesinde de bilgi güvenliği nedeniyle mevcut işletme koşullarıyla ilgili detaylı bilgi verilmeyecek olup, referans olarak ilgili bölgeye ait tüm kuplaj kesici ve iletim hatlarının serviste olması senaryosu alınmıştır. Tablo 6.140'da görüldüğü gibi İstanbul Anadolu Yakası Bölgesi iletim sisteminde 154 kV gerilim seviyesinde bulunan kısa devre akımlarının neredeyse tamamı 31,5 kA'in üzerinde hesaplanmıştır. İKA tekniği kullanılarak elde edilen ve Şekil 6.55'de sunulan topoloji incelendiğinde 11 adet trafo merkezinde bara dağılımı yapıldığı görülmektedir. Tablo 6.141, İKA ile elde edilen kaliteli çözümün kısa devre performansını göstermekte olup herhangi bir barada 31.5 kA'i aşan bir kısa devre akımı görülmemektedir. Burada K3 TM bara-2'de görülen 31.424 A'lik akım 31.5 kA'e çok yaklaşması nedeniyle tehlikeli bir işletme koşuludur. Böyle bir durumun oluşmaması amacıyla 31.5 kA'in altında belirli bir aralığın yasak bölge olarak tayin edilmesini önermekteyiz.

Tablo 6.141. İKA ile elde edilen bara düzeniyle İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları

Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)	Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)
Ü1	Bara-1	30362,2	28615,9	Ç1	Bara-2	26831,2	29233,3
Ü1	Bara-2	23763,0	22255,5	İ1	Bara-1	24923,9	21993,3
T2	-	28549,9	26052,8	İ1	Bara-2	24600,2	21717,1
T3	-	30505,7	26961,4	G2	Bara-1	24242,2	19226,8
P1	Bara-1	28176,7	24556,1	G2	Bara-2	20378,0	14244,9
P1	Bara-2	25939,6	24209,1	K4	-	25503,3	21741,4
S1	-	28952,4	27734,7	D2	-	27028,8	25200,3
G1	-	27442,9	26416,7	V1	-	18056,7	17524,5
K1	Bara-1	30378,9	28460,5	D3	Bara-1	12200,9	8842,6
K1	Bara-2	29112,7	26537,4	D3	Bara-2	24400,7	24009,7
B1	Bara-1	21040,5	15183,4	M1	Bara-1	13095,1	11637,5
B1	Bara-2	29525,3	23691,2	M1	Bara-2	17214,0	14673,1
S2	-	26709,8	20088,9	K2	-	29602,4	28245,6
K3	Bara-1	26171,9	23084,5	G3	Bara-1	11321,2	8801,2
K3	Bara-2	31424,6	27541,9	G3	Bara-2	13389,6	10088,8
T1	-	21417,4	14844,4	S3	-	21302,0	20041,6
K5	-	20616,3	14162,9	C1	-	15043,0	11100,4
Ç1	Bara-1	22712,0	21544,6	D1	-	26187,9	24566,6



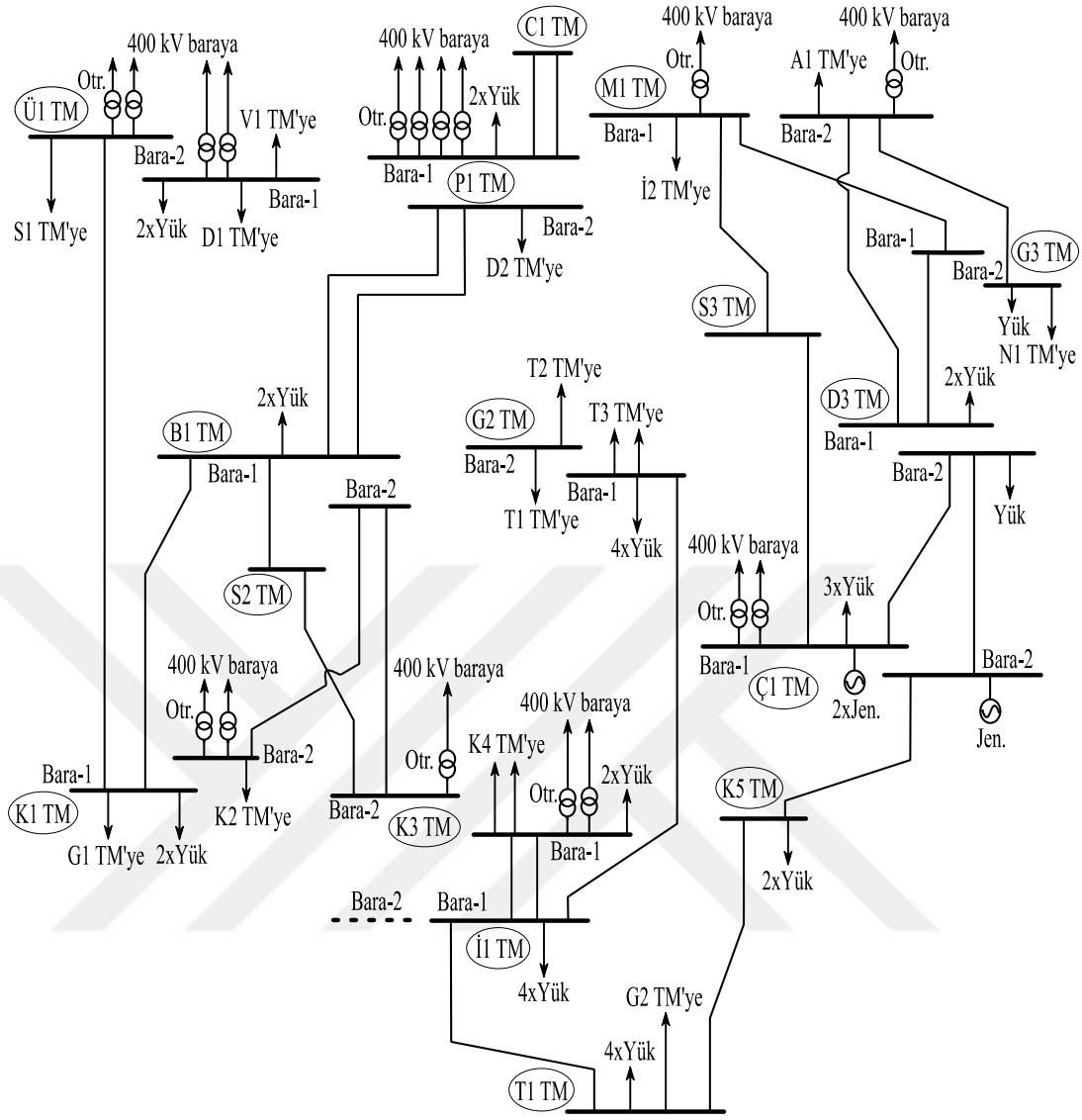
Şekil 6.56. İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde İPSO ile elde edilen optimal bara düzeni

Şekil 6.56'da verilen bara düzeni İPSO algoritmasından elde edilmiştir. İPSO ile elde edilen bara düzeni ile İKA'dan elde edilen topoloji arasında önemli farklılıklar bulunmasına rağmen iki bara dağılımı da sistem güvenliğini tesis edebilmektedir. Örneğin, İPSO düzeninde K3 TM'de bara-2'ye B1, S2, K4, K4 EİH'leri ile bir adet Otr. bağlanırken, İKA tekniğiyle elde edilen bara düzeninde aynı baraya S2, İ1, İ1 EİH'leri, iki adet Otr. ve iki adet tüketim transformatörü bağlanmaktadır. Diğer taraftan, İKA yöntemi P1 TM'de bara-1'e B1, B1 EİH'leri, 2 adet Otr. ve 2 adet Tr. bağlamışken, İPSO yaklaşımında ilgili baraya B1, C1 EİH'leri, 4 adet Otr. ve 2 adet Tr. yerleştirilmiştir. P1 TM'nin bağlandığı D2 TM ile Ü1 TM'nin bağlandığı D1 TM arasında bağlantı bulunmaktadır. Bunun anlamı, P1 TM'nin D2 TM ile bağlantısı olan

baranın D1 TM'nin Ü1 TM'ye bağlandığı barayla paralel çalıştığıdır. Dolayısıyla, P1 TM'de D2 TM'nin ve Ü1 TM'de D1 TM'nin bağlandığı baraya algoritmalar tarafından 2'den fazla Otr. konulmamıştır. Çünkü sistem şartlarına bağlı olarak değişmekle birlikte bir Otr.ün kısa devre katkısı 5 kA'den daha yüksek olmaktadır. Bunun dışında P1 TM ile K1 TM arasında B1 TM üzerinden yakın bağlantı bulunmaktadır ve bu durumda K1 TM'de bulunan Otr.lerin de P1 ve Ü1 TM'lerinde hesaplanan kısa devre akımlarına etkisi bulunmaktadır. Güç sisteminde 6 Otr.ün elektriksel olarak yakın çalıştırılması zaten kısa devre akımlarını 31,5 kA'in üzerine çıkaracağı için algoritmaların sunduğu çözümlerde böyle bir topoloji oluşturulmayarak, P1, Ü1 ve K1 TM'lerin hepsinde bara bölme işlemi yapılmıştır. Tablo 6.142'de verilen İPSO çözümünde hiçbir barada 31,5 kA'in üzerinde kısa devre akımı oluşmadığı gösterilmektedir. Ancak İKA'da K3 TM bara-2'de olduğu gibi İPSO'da da sınır 31,5 kA olarak belirtildiği için P1 TM bara-1'de 31,488 kA'lik bir kısa devre akımı hesaplanmaktadır.

Tablo 6.142. İPSO ile elde edilen bara düzeniyle İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları

Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)	Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)
Ü1	Bara-1	27735,5	26494,5	Ç1	Bara-2	24485,3	26845,5
Ü1	Bara-2	23607,1	20744,1	İ1	Bara-1	21792,4	19734,4
T2	-	28536,4	25944,2	İ1	Bara-2	22080,3	19988,7
T3	-	30436,0	26702,5	G2	Bara-1	24038,7	19071,8
P1	Bara-1	31488,5	28522,4	G2	Bara-2	20371,0	14199,4
P1	Bara-2	25604,1	21318,7	K4	-	25926,3	21803,2
S1	-	25930,0	25228,5	D2	-	26783,0	22650,2
G1	-	24865,1	24265,0	V1	-	17968,5	16611,6
K1	Bara-1	27819,3	26377,1	D3	Bara-1	15827,1	10593,5
K1	Bara-2	25339,7	23567,7	D3	Bara-2	25415,3	25193,7
B1	Bara-1	25390,0	20124,9	M1	Bara-1	23175,1	20900,4
B1	Bara-2	24095,1	18375,7	M1	Bara-2	15381,4	9515,7
S2	-	22009,8	16673,2	K2	-	26301,5	25523,8
K3	Bara-1	26891,7	23195,9	G3	Bara-1	18230,3	13428,2
K3	Bara-2	26127,5	23856,2	G3	Bara-2	12776,6	7657,9
T1	-	21423,1	14805,0	S3	-	20388,3	19445,2
K5	-	20718,0	14170,9	C1	-	17508,8	12446,5
Ç1	Bara-1	26825,5	25634,3	D1	-	25966,6	22241,4

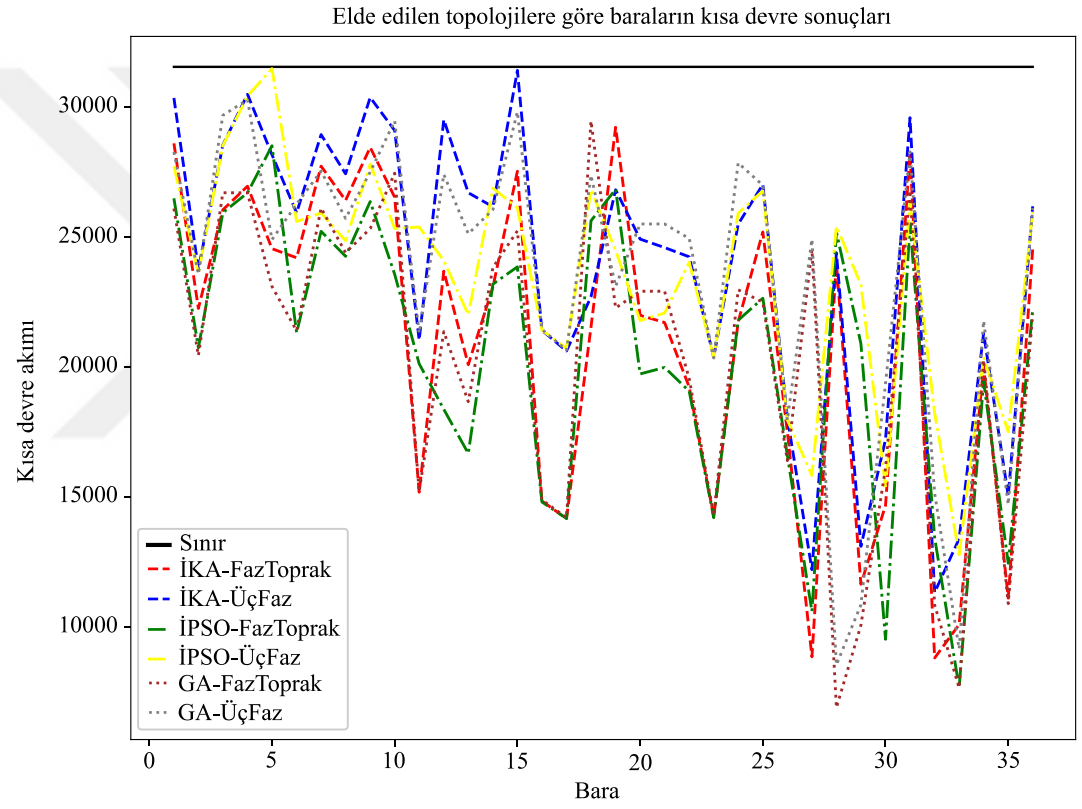


Şekil 6.57. İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde GA ile elde edilen optimal bara düzeni

Genetik algoritma ile elde edilen en iyi bara düzeni Şekil 6.57'de gösterilmektedir. Bursa bölgesinde İKA ve İPSO algoritmalarıyla elde edilen topolojilerde 5 TM'de kuplaj bölünürken GA ile elde edilen bara düzeninde 4 TM'de bara bölünme işlemi yapılmıştır. İstanbul Bölgesinde de GA diğer iki tekniğe göre bir adet daha az kuplaj bölme işlemi yaparak İ1 TM'yi kuplaj kesici kapalı konumda işletmeyi önermiştir. GA'nın önerdiği bara düzeninde hesaplanan kısa devre akımları Tablo 6.143'te gösterilmektedir. Tablo incelendiğinde kısa devre akımlarının istenen seviyeye çekildiği görülmektedir.

Sezgi-üstü algoritmalarla oluşturulan topolojilerde İstanbul Anadolu Yakası baralarında meydana gelebilecek üç-faz ve faz-toprak kısa devre akımlarının miktarı

Şekil 6.58'de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde bulunan hiçbir barada KDA miktarı kesicilerin kesme kapasitesi olan 31,5 kA'i geçmemektedir. İPSO ve İKA ile elde edilen bara düzenlerinde dengeli arıza tipinde iki farklı barada kısa devre akımının sınır değere çok yakın olduğu görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi eğer sınır değer 31,5 kA konuluyorsa, sezgi-üstü algoritmalar 31,499 kA'i tehlikeli olarak sınıflandırmayacaktır. Bu nedenle sınır değer belirlenirken belirli bir marjın konulması veya belirli aralıklara uygun değil, çok tehlikeli, tehlikeli, uygun gibi etiketler atanarak tehlike sınıfına göre farklı ceza katsayılarının kullanılması tercih edilebilir.



Şekil 6.58. İstanbul Bölgesinde sezgi-üstü yöntemler kullanılarak elde edilen bara düzenlerinde hesaplanan kısa devre akımları

Normal işletme koşullarında İstanbul Anadolu Yakası Bölgesi, İSO'lar tarafından uygun bara dağılımları yapıldıktan sonra gerekli görülen kuplaj kesici ve iletim hatları servis harici edilerek başarılı şekilde işletilmektedir. Sistem işletmesiyle geçen yıllar İSO'lara sistem dinamiklerini tahmin edebilecekleri güçlü bir işletme tecrübesi sağlamaktadır fakat iletim sisteminin hızla genişlemesi, karşılaşılan sorunların çözümünü zorlaştırmaya başlamaktadır. Örneğin, ilgili bölgeye yeni eklenen 450 MVA gücündeki 400/154 kV bir ototransformatör, sistemin eşdeğer empedansını

azaltmıştır. Bunun üzerine 2020'nin başından itibaren baca gazı filtresi uygun olmayan bazı santrallerin kapatılması nedeniyle İstanbul Anadolu Yakasında bazı doğalgaz ünitelerinin üretim yapmaya başlaması, ilgili bölgenin kısa devre akımlarını kabul edilemeyecek seviyelere getirmiştir. Bu durumda aşırı kısa devre akımlarını sınırlandırırken N-1 güvenliğini sağlayabilmek amacıyla tez çalışmamız kapsamında kullanılan algoritmalar ile uygun bara dağılımı elde edilerek İstanbul Anadolu Yakasında kullanılmıştır. Teorik ve pratik sonuçlar göstermektedir ki yapay zekâ optimizasyon algoritmaları iletim sistemimizde her gün yaşanan gerçek ve zorlayıcı bir problemin çözümü olmaktadır.

Tablo 6.143. GA ile elde edilen bara düzeniyle İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları

Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)	Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)
Ü1	Bara-1	28284,8	26104,4	Ç1	Bara-2	23107,0	22277,1
Ü1	Bara-2	23574,9	20441,9	İ1	Bara-1	25506,8	22917,8
T2	-	29691,5	26714,1	İ1	Bara-2	-	-
T3	-	30293,0	26709,0	G2	Bara-1	24952,3	19552,6
P1	Bara-1	24908,9	23105,9	G2	Bara-2	20346,3	14277,8
P1	Bara-2	26274,2	21394,9	K4	-	27856,8	22977,4
S1	-	27548,1	26124,8	D2	-	27001,2	22493,5
G1	-	25722,2	24406,5	V1	-	17958,0	16397,6
K1	Bara-1	27510,1	25329,5	D3	Bara-1	24918,8	24527,6
K1	Bara-2	29481,0	27464,1	D3	Bara-2	8535,2	6887,6
B1	Bara-1	21304,5	15208,3	M1	Bara-1	10844,7	10056,6
B1	Bara-2	27420,2	21368,0	M1	Bara-2	19376,0	16110,4
S2	-	25133,1	18664,9	K2	-	28286,2	26802,1
K3	Bara-1	26063,7	23833,1	G3	Bara-1	15142,4	10841,1
K3	Bara-2	29828,5	25245,8	G3	Bara-2	9149,4	7648,5
T1	-	21451,1	14886,6	S3	-	21779,1	20273,2
K5	-	20657,5	14208,8	C1	-	14711,6	10892,8
Ç1	Bara-1	27385,6	29470,4	D1	-	26119,7	22050,3

Lineer kısıt analizinin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar;

Dağılım faktörlerinin kullanıldığı vektörize edilmiş lineer kısıt analizi, problemin çözüm süresinde önemli miktarda iyileşme sağlamıştır. Ancak bu yaklaşımla elde edilen çözümlerde bara gerilim bozulmaları ve reaktif güç akışlarının sistem

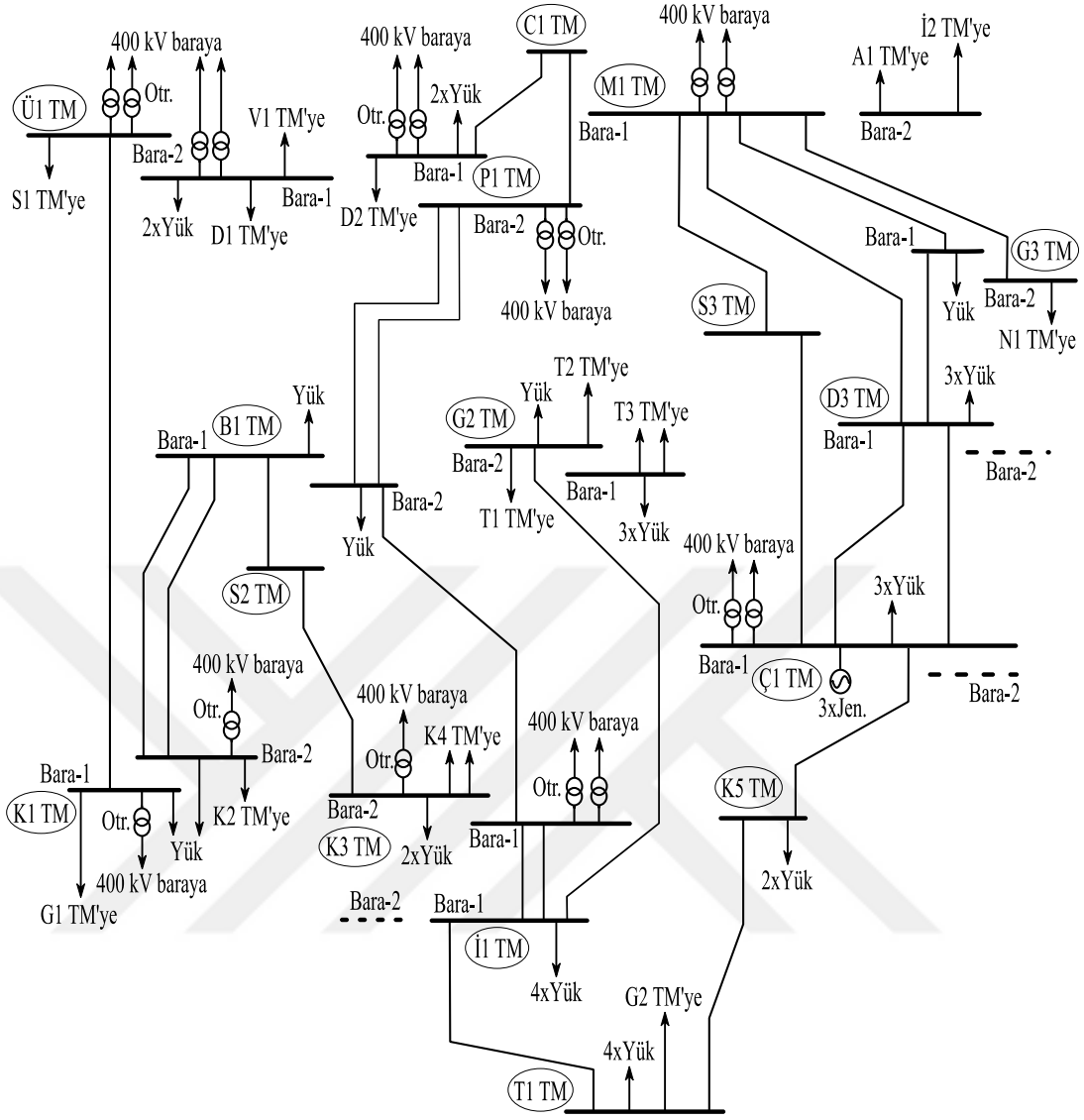
performansına etkisini test etmek için lineer olmayan kısıt analizine tabi tutulması gereklidir.

Lineer kısıt analizi, etiketleme yöntemi ve sadece iletim hatlarının optimizasyon sürecine dahil edilmesi opsiyonu, İstanbul Anadolu Yakası gibi çözüm uzayı geniş olan bölgelerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. BBO uygulanan bölgeler sadece 154 kV gerilim seviyesiyle sınırlı tutulduğu için lineer kısıt analiziyle elde edilen sonuçların gerilim açısından önemli sapmalara neden olmadığı görülmektedir. Çünkü bu gerilim seviyesi, ihtiyaç duyduğu reaktif enerji rezervini farklı lokasyonlara konumlandırılmış Otr.ler ile 400 kV gerilim seviyesinden alabilmektedir. Dolayısıyla yöntemin gün içi problemlerde kullanımı zaman bakımından da uygulanabilir olmuştur.

GA yaklaşımı ve lineer kısıt analiziyle sadece iletim hatlarının bara konumları optimize edilerek oluşturulmuş topoloji Şekil 6.59'da verilmiştir. Bu topolojide hesaplanan kısa devre akımları Tablo 6.144'te verilmiştir.

Tablo 6.144. GA ve lineer kısıt analizi kullanılarak elde edilen bara düzeniyle İstanbul Bölgesinde hesaplanan kısa devre akımları

Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)	Transformatör Merkezi	Bara	3-Faz Arıza (A)	Faz-Toprak (A)
Ü1	Bara-1	25793,5	24146,8	Ç1	Bara-2	-	-
Ü1	Bara-2	23073,7	22332,8	İ1	Bara-1	25829,5	22966,2
T2	-	23246,3	21699,5	İ1	Bara-2	-	-
T3	-	29510,3	25757,3	G2	Bara-1	18301,3	14846,3
P1	Bara-1	28507,5	26115,9	G2	Bara-2	23106,4	16672,6
P1	Bara-2	26215,8	22915,6	K4	-	22809,7	19883,5
S1	-	22612	22108,5	D2	-	28914	26891,1
G1	-	21421,2	21065,8	V1	-	19212,8	18663,6
K1	Bara-1	22660,3	21950,7	D3	Bara-1	28093,8	25708,5
K1	Bara-2	23354,9	21977,5	D3	Bara-2	-	-
B1	Bara-1	24208,1	19249,5	M1	Bara-1	27002,7	24211,3
B1	Bara-2	20255,5	15926,5	M1	Bara-2	7154,4	3835,9
S2	-	20514,3	16001,7	K2	-	23089,1	22506,8
K3	Bara-1	27922,2	24911,3	G3	Bara-1	18798,6	13504
K3	Bara-2	23921,2	21586,6	G3	Bara-2	23017,9	18469,2
T1	-	22503,9	16353,1	S3	-	21749,5	19329,7
K5	-	21659,3	15459	C1	-	18408,1	12907,9
Ç1	Bara-1	29292,2	28304,1	D1	-	28053,1	26286,6



Şekil 6.59. İstanbul Anadolu Yakası Bölgesinde GA ve lineer kısıt analizi kullanılarak elde edilen optimal bara düzeni

Tablodan görüldüğü üzere trafo merkezlerinin tamamında kısa devre akımları 31.5 kA seviyesinin altındadır. Şekil 6.59'da 8 adet TM'de gerekli bara dağılımı yapılarak kuplaj kesicinin servis harici edildiği görülmektedir. Özellikle P1, B1, K3 ve M1 TM'lerinde oluşturulan bara düzenleri normal işletme düzenine göre ilginç farklılıklar barındırmaktadır ancak oluşturulan topoloji İSO'ların işletme tecrübesiyle oluşturduğu bara düzeninden önemli miktarda uzaklaşmamıştır. Dolayısıyla İSO'ların oluşan yeni topolojiye adaptasyon sorunu yaşaması söz konusu değildir. P1 TM'de iki bara arasındaki kuplaj bağlantısı C1 TM ile kurulurken; K1 TM'nin bara-2'si, B1 TM'nin bara-1'i ve K3 TM'nin bara-2'si paralel çalıştırılmaktadır. Bu topolojide M1 TM'nin bara-2'si Sakarya bölgesine bırakılarak 154 kV gerilim seviyesinde bölgenin diğer

bölgelerle irtibatının kurulduğu tek bağlantı G3 TM'nin N1 fideri olmuştur. Algoritma bu düzeni Sakarya bölgesindeki yakın baralardan gelen yüksek kısa devre akımı katkısını sönümlemek amacıyla oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere sezgi-üstü algoritmalar İSO'lara sadece iletim hatlarının bara düzenlemesini optimize ederek de manuel düzenlemeyle keşfedilemeyecek çeşitlilikte topoloji önerisi sunabilmektedir.

BBO yöntemi sadece N durumu işletme düzeni için değil aynı zamanda planlı çalışmaların yönetilmesi amacıyla da kullanılabilecek etkinliktedir. Normal şartlarda önemine binaen tatil günleri dışında çalışma izni verilemeyecek bir teçhizatın BBO yöntemi kullanılarak tatil günleri haricinde verilmesi de mümkündür. Özellikle çalışmanın mahiyeti acilse BBO yöntemi kullanılarak ilgili teçhizatın servis harici edilecek konuma getirilmesi yöntemin bir başka kazanımıdır.

6.7. Bölüm Değerlendirmesi

Çalışmamız kapsamında önerilen İkili Kâşif Algoritmasının performansını çeşitli problemler üzerinde karşılaştırmalı olarak görebilmek için bazı benchmark fonksiyonları tüm algoritmalara çözdürülmüştür. Önerilen İKA yönteminin özellikle ayrık çözüm uzayına sahip maksimizasyon problemlerinde öne çıktığı görülmüştür. Daha sorna sezgi-üstü algoritmaların bara bölme optimizasyonu problemini çözebilmesi için oluşturulan ikili formatların performanslarını değerlendirebilmek amacıyla üç farklı test sisteminde çeşitli analizler yapılmıştır. Öncelikle IEEE 14-baralı test sistemi üzerinde kullanılan her algoritmanın sürekli uzaydan ayrık uzaya geçmek için tercih edilen 10 farklı teknikle performansları değerlendirilmiştir. Kullanılan yöntemlerin kalitesini dürüst şekilde değerlendirebilmek için her bir teknik için 30 farklı analiz çalıştırılmıştır. Parametrik ve parametrik olmayan istatistiksel göstergelere göre değerlendirilen tekniklerden daha kaliteli olanlar IEEE 57-baralı test sisteminde kullanılmış ve yine sonuçlar istatistiksel açılardan karşılaştırılmıştır. Nihayetinde, problem boyutunun etkisini görebilmek amacıyla İKA yöntemiyle IEEE 118-baralı test sisteminde BBO problemi çözülmüştür.

Başarılı olan algoritmalar, İKA, İPSO ve GA, Türkiye Elektrik İletim Sisteminin iki önemli bölgesinde kullanılmış ve teoride elde edilen kaliteli çözümler pratikte kullanılmıştır. Bilgi güvenliği nedeniyle sistemin mevcut işletme düzeni, sezgi-üstü algoritmaların verdiği sonuca göre işletilen yeni düzenler, iletim hatlarının empedans

bilgileri, transformatör merkezi isimleri gibi önemli bilgiler paylaşılmamıştır. Ancak önerilen algoritmaların kullanılan IEEE sistemleri üzerinde tekrarlanarak test edilmesi mümkündür. Sonuç olarak, tez çalışmamız kapsamında önerilen sezgi-üstü algoritmalar ile İstanbul Anadolu Yakası ve Bursa Bölgelerinde hem kısa devre akımlarını sınırlandıran hem de N-1 güvenliğini sağlayan bara düzenleri oluşturulmuş ve uygulanmıştır. Yöntemin sadece gün öncesi planlamada değil aynı zamanda gün içi sistem değerlendirmesinde de kullanılabilir olması için alternatif olarak lineer kısıt analizine dayalı BBO çözümü sunulmuştur. Gerçek şebekede yapılan analizlerde görülmektedir ki çözüm uzayı büyük olan bölgelerde sadece iletim hatlarının bara dağılımı optimizasyonu yapılarak uygulanabilir topolojiler elde edilebilmektedir. İletim sistemi sürekli genişlemeye devam ettiği için sezgi-üstü algoritmalara olan ihtiyacın her geçen gün artacağı düşüncesiyle gerek uygulanan bölgelerde gerek henüz uygulanmamış iletim sisteminin diğer alanlarında tez çalışmamız kapsamında uygulanan yaklaşımların sıklıkla kullanılacağı öngörülmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İSO'ların sistem işletirken alacağı kararlara destek olması amacıyla tez çalışmamız kapsamında *Genetik Algoritma, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Kâşif Algoritması, Bozkurt Optimizasyonu, Salp Sürüsü Algoritması, Dinamik Kontrollü Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Yerçekimsel Arama Algoritması* ve *Yapay Arı Kolonisi* algoritmaları ilk defa bara bölme optimizasyonu problemini çözmek için kullanılmıştır. Bu algoritmaların ilham aldığı kavramlar ve kullandığı matematiksel yaklaşımlar ayrıntılı olarak anlatılmış ve sözde kodları paylaşılmıştır.

Sürü zekâsından ve fizik yasalarından ilham alan algoritmaların ayrık çözüm uzayına sahip problemleri çözebilmesi için kullanılan transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralları, çözüm kalitesini önemli miktarda etkilemektedir. Bu nedenle hangi senaryonun hangi algoritmayla daha iyi çözümler sunacağını görebilmek için 10 farklı transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı kombinasyonu hem çeşitli benchmark fonksiyonları hem de çeşitli güç sistemleri üzerinde test edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Oluşturulan senaryolarda literatürde daha önce kullanılmış bazı transfer fonksiyonlarının yanı sıra çalışmamız kapsamında önerilen VTF4(x) ve VTF6(x) isimli transfer fonksiyonları da kullanılmıştır. Özellikle V-Şekilli fonksiyonlar ailesine dahil olan VTF6(x) fonksiyonu, sezgi-üstü algoritmaların tamamında bulunan keşfetme safhasına destek olacak bir çalışma mantığı içerdiği için yaklaşımın farklı problemlerin çözümünde kullanılabileceği düşünülmektedir.

Yapıcı ve Çetinkaya'nın 2019 yılında önermiş olduğu Kâşif (Pathfinder) algoritması, BBO problemini çözebilecek düzeyde geliştirilmiştir. İkili Kâşif Algoritması olarak adlandırdığımız sezgi-üstü optimizasyon algoritması ilk defa tez çalışmamız kapsamında önerilmiştir. İKA'nın genel performansını test edebilmek için 5 tek-modlu, 5 çok-modlu ve 2 ayrık çözüm uzayına sahip maksimizasyon problemi olmak üzere 12 benchmark fonksiyonu kullanılmıştır. Adil bir karşılaştırma olması için algoritmaların tamamıyla bu problemler üzerinde 29,820 bağımsız çözüm yapılmıştır.

Bağımsız çözümlerden elde edilen en iyi sonuçların ortalamaları ve standart sapmaları incelendiğinde, İKA yönteminin tek-modlu problemlerin hepsinde ve çok-modlu problemlerin dördünde optimal bölgeye yakınsayarak farklı problemlere güvenilir sonuçlar verdiği görülmektedir. Diğer taraftan ayrık uzaya sahip problemlerden elde edilen çözümlerin gerek istatistiksel sonuçlarına gerekse ortalama yakınsama karakteristiklerine bakıldığında, İKA yönteminin bu problem türünde en iyi sonuçları vererek öne çıkmayı başardığı görülmektedir. BBO problemi ikili kombinasyonel bir problem olarak ayrık çözüm uzayına sahip olduğu için İKA'nın bu tür problemlerde öne çıkması, BBO problemi için daha uygun bir algoritma olduğu hakkında fikir verebilir. Ancak NFL teoremine göre henüz her problemle başa çıkabilen bir sezgi-üstü algoritma olmadığı için İKA'nın ve diğer algoritmaların çeşitli test sistemleri üzerinde gösterdiği performanslar değerlendirilmiştir.

Algoritmaların benchmark problemlerini çözebilme kabiliyetleri incelendiğinde transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı senaryolarının çözüm kalitesini önemli miktarda etkilediği görülmektedir. Örnek vermek gerekirse, genel itibariyle algoritmalar VTF3(x) – PGK-1 senaryosuyla kaliteli çözümler sunabilmiştir ama bu senaryo f6 probleminde algoritmaların yerel optimal noktalara takılmasına neden olmuştur. Diğer taraftan ayrık çözüm uzayına sahip maksimizasyon problemlerinde VTF1(x) – PGK-1 senaryosuyla İKA ve İSSA algoritmaları kaliteli çözümler sunabilirken diğer algoritmalar bu kombinasyonla optimal bölgeye yaklaşamamıştır. Bu doğrultuda çalışmamız kapsamında gerçekleştirilen on binlerce analiz neticesinde, sürekli çözüm uzayına sahip problemler için tasarlanmış algoritmaların ayrık bir problemi çözerken ihtiyaç duyduğu transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kurallarının çözüm kalitesi üzerinde ne kadar etkili olduğu görülmektedir.

Test fonksiyonlarında gösterdikleri performanslara göre İKA, İYAKA, İYAA ve İSSA yöntemlerinin BBO problemini çözebilme potansiyeli açısından öne çıktıkları görülmektedir. Ancak problemin yapısıyla algoritma performansı arasında öngörülemeyen bir ilişki bulunduğu için kullanılan algoritma ve senaryoların tamamıyla IEEE 14-baralı test sisteminde BBO problemi çözülmüştür. İKA yönteminde 20, GA'da 1 ve geri kalan altı algoritmada 10'ar senaryo ile 30 bağımsız çözüm yapılmış olup IEEE 14-baralı test sisteminde toplam 2,430 farklı analiz yapılmıştır. Yapılan analizlerin her yinelemesinde kısa devre ile kısıt analizleri

yapılmıştır ve hesaplanan performans verileri amaç fonksiyonuna toplama yöntemine (aggregating method) göre yansıtılmıştır. Toplama yönteminde kullanılmak üzere oluşturulan ve sistemin N-1 performansını değerlendirmek için kullanılan aktif ve reaktif güç performans endeksleriyle kısa devre performansının benzer skalada değerlendirilebilmesi amacıyla kısa devre performans endeksi denklemi önerilmiştir. Bu yöntem kullanılarak her bir algoritmanın her bir senaryosundan elde edilen çözümlerin maksimum, minimum, ortanca ve ortalama değerleri ile standart sapmaları ayrı ayrı sunulmuş ve ortalama yakınsama karakteristikleri ile radar grafikleri paylaşılmıştır. Her ne kadar bu istatistiksel göstergeler algoritmaların davranışları hakkında bir fikir veriyor olsa da hangi algoritmada hangi senaryonun daha iyi olduğu veya bunlar arasında gerçekten kayda değer bir farklılığın bulunup bulunmadığı noktasında net bir bilgi verememektedir. Bu doğrultuda hangi yöntemin kayda değer bir üstünlük sağladığını tespit edebilmek için Wilcoxon işaretli sıra testi kullanılmıştır.

Gerek bahsedilen parametrik istatistiksel göstergeler gerekse Wilcoxon test sonuçları incelendiğinde, benchmark fonksiyonlarında kaliteli çözümler sunan İYAKA, İYAA ve İSSA algoritmalarının BBO probleminde optimal çözüme yakınsayamadıkları gözlemlenmektedir. Diğer taraftan test fonksiyonlarında yerel optimal noktalardan kaçınamayan GA, BBO probleminde rekabetçi çözümler üretmiştir. Ayrıca, test fonksiyonlarında nispeten başarı gösterse de diğer algoritmaların gerisinde kalan İPSO'nun BBO probleminde öne çıktığı görülmektedir. Şunu belirtmekte fayda var; algoritmalar benchmark fonksiyonlarında optimal çözümü elde edebilmek için her bir fonksiyonda 30 popülasyon büyüklüğü ve 500 yinelemeyle 15,000 çözüm yaparken IEEE 14-baralı test sistemindeki BBO problemi için 30 nüfus büyüklüğü ve 100 iterasyonla 3,000 çözüm gerçekleştirmiştir. Bu durumun önemini bir örnekle açıklayalım: İSSA'nın ayrık çözüm uzayına sahip maksimizasyon problemlerinde gerçekleştirdiği ortalama yakınsama karakteristikleri incelendiğinde, 250 yinelemeden sonra optimal bölgeye yakınsamaya başladığı görülmektedir ve bu davranış yineleme sayısının önemini vurgulamaktadır. BBO problemi kapsamında kullanılan kısıt analizinin çözüm süresi IEEE 14-baralı test sisteminde problem olmamakla beraber gerçek bir güç sisteminde önemli miktarda yükselmektedir. Algoritmalardan beklenen karakteristik, daha az yinelemeye rağmen kaliteli çözümler sunabilmesidir ve bu nedenle algoritmaların yineleme miktarı artırılmamıştır.

IEEE 14-baralı test sisteminde başarı gösteren İKA, İPSO ve GA yöntemlerinin daha geniş bir güç sisteminde neler yapabildiğini irdeleyebilmek için IEEE 57-baralı test sistemi üzerinde BBO problemi çözülmüştür. Bu sistemde BBO probleminin amaç fonksiyonu ε-kısıtlama (ε-constraint) yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Çok-amaçlı problemlerde amaçların kısıta çevrilerek problemin tek amaçlı formata dönüştürüldüğü bu yöntemde kullanılması amacıyla sistem performansının hem aşırı yüklenmeler açısından hem de gerilim bozulmaları açısından değerlendirilmesine imkân tanıyan güvenilirlik performansı isimli denklem önerilmiştir. IEEE 57-baralı test sisteminde BBO problemi bu amaç fonksiyonuyla İKA'da 2, İPSO'da 2 ve GA'da 1 senaryo kullanılarak çözülmüştür. IEEE 14-baralı test sisteminde olduğu gibi burada da popülasyon boyutu 30 ve yineleme sayısı 100 seçilmiştir. Hem ortalama yakınsama eğrileri ile maksimum, minimum, ortanca, ortalama ve standart sapma değerleri hem de Wilcoxon işaretli sıra testi sonuçları incelendiğinde, GA ve İPSO'nun yerel optimalden kurtulamadığı, diğer taraftan İKA'nın güvenilir sonuçlar sunduğu görülmektedir. Başarılı olan algoritma sayısının düşmesine; yineleme sayısının küçük tutulmasının, IEEE 57-baralı test sisteminin sahip olduğu çözüm uzayında yerel optimallerin daha zorlayıcı olmasının ve problemin çözüm uzayındaki genişlemenin etki ettiği düşünülmektedir. Ek olarak GA ve İPSO'da algoritmaların performansını etkileyen parametrelerin optimize edilmesiyle de daha kaliteli çözümlerin elde edileceği öngörülmektedir.

Gerçekleştirilen çeşitli analizlerin ışığında İKA yönteminin BBO probleminde kaliteli ve güvenilir sonuçlar sunduğu görülmektedir. Ancak gerçek güç sistemi üzerinde gerekli analizler yapılmadan önce İKA yönteminin daha geniş bir güç sistemi olan IEEE 118-baralı test sistemindeki performansı da gözlemlenmiştir. Diğer test sistemlerinde kısıt analizi kapsamında iletim hatlarının termik sınırları belirleyici etken olurken; IEEE 118-baralı test sisteminde BBO yapılması durumunda meydana gelen gerilim bozulmaları çözüme ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla N-1 analizinde reaktif güç akışları ve gerilim bozulmalarını dikkate almanın ne kadar önemli olduğu bu sistem üzerinde görülmektedir. İKA yöntemi güç sisteminin çözüm uzayı genişlemesine rağmen yaklaşık 3 saat içerisinde IEEE 118-baralı test sisteminde uygun bir bara dağılımı sunmayı başarmıştır.

Gerçek bir güç sisteminde birbirine elektriksel uzaklığı büyük olan baraların birbirlerini yüksek miktarda etkilemeleri beklenmez. Dolayısıyla bara bölme optimizasyonu yapılacak hedef bölgenin önceden belirlenerek çözüm uzayının küçültülmesi hem analiz doğruluğunu bozmamakta hem de çözüm süresini azaltmaktadır. Yine de kısıt analizinin kabul edilebilir seviyede olmaması nedeniyle çalışmamız kapsamında N-1 analiz süresini azaltacak çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir.

Türkiye Elektrik İletim Sisteminin Bursa ve İstanbul Anadolu Yakası bölgelerinde İKA, İPSO ve GA teknikleri kullanılarak bara bölme optimizasyonu yapılmış ve kaliteli çözümler elde edilmiştir. Güvenlik gerekçesiyle detaylı bilgiler paylaşılamasa da ilk defa şebekemizde bölgesel işletme noktasında yapay zekâ optimizasyon algoritmalarının çıktıları kullanılmıştır. Gerçek sistem üzerinde yapılan analizler neticesinde sadece İKA yönteminin değil aynı zamanda parametre ayarı yapmak şartıyla GA ve İPSO tekniklerinin de rekabetçi çözümler sunduğu görülmüştür. Dolayısıyla bu algoritmaların güç sistemimizde BBO problemini güvenilir şekilde çözebilecek kabiliyete sahip olduğu görülmektedir.

BBO problemini çözebilmek için gerekli olan kodlama Python programlama dili kullanılarak yazılmış olup, güç akışı ve kısa devre akım bilgileri PSS/E programının uygulama program ara-yüzünden (application program interface) çekilmiştir. Sezgi-üstü algoritmalar bir yandan elde edilen kaliteli çözümleri takip ederken diğer yandan henüz hiç keşfedilmemiş bölgeleri rastgele tarayarak umut vadeden yerel bölgeleri bulmaya çalışır. Uygulanan stokastik süreçler güç sisteminin doğasıyla uyumlu olmayan bara düzenlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu tür durumların önüne geçebilmek amacıyla elde edilen bara düzenlerini şebeke ihtiyaçlarını karşılama noktasında değerlendirmek için başarısız transfer işlemini ayıklayan ve topoloji kontrolünü gerçekleştiren modüller geliştirilmiştir. Hedef transformatör merkezlerinde bulunan fiderleri sezgi-üstü algoritmadan gelen pozisyon bilgilerine göre uygun baralara transfer edebilmek için kümeleme ve etiketleme yöntemleri olmak üzere iki farklı yaklaşım önerilmiştir. Neticede problemi çözebilecek yazılım altyapısını kurabilmek amacıyla sezgi-üstü algoritmalar, PSS/E'den veri çekme, nüfus yönetimi, pozisyon değiştirme, uygunluk kontrolü, transfer fonksiyonu ve pozisyon güncelleme kuralı sınıfları oluşturulmuştur.

Yapılan çeşitli analizler düşünüldüğünde tez çalışmamız kapsamında kullanılan *Genetik Algoritma, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu* ve *Kâşif Algoritmasının* bara bölme optimizasyonu problemini çözebilecek kabiliyette olduğu görülmektedir. Bu noktada, önerdiğimiz *İkili Kâşif Algoritmasının* BBO problemini çözme açısından son derece rekabetçi sonuçlar verdiği açıktır. Test sistemleri ve gerçek şebekede BBO problemini başarılı şekilde çözebilen İKA tekniğimizin, gelecek çalışmalarda diğer zorlayıcı problemlerde de kullanılacağı öngörülmektedir.

Detaylı şekilde anlatıldığı gibi BBO problemi çok amaçlı bir optimizasyon problemidir ve optimize edilmeye çalışılan amaç miktarı genişletilebilir. Çalışmamız kapsamında sıklıkla görülen aşırı kısa devre akımı problemine çözüm olması amacıyla sadece 154 kV gerilim seviyesinde BBO problemi çözülmüştür. Bu kapsamda KDA küçültülürken sistemdeki güç kayıpları artacağı için amaç fonksiyonuna kayıplar ile KDA arasındaki dengeyi kuracak şekilde güç kayıplarını minimize edecek eşitlikler eklenebilir. Eğer 400 kV gerilim seviyesinde BBO problemi çözülmek istenirse, amaç fonksiyonuna işletme maliyetlerini minimize edecek denklemler eklenebilir. Çalışmamız kapsamında 154 kV gerilim seviyesinde aşırı kuplaj bölme işleminin önüne geçebilmek amacıyla kuplaj bölme işlemi bir ceza katsayısıyla çarpılmaktadır. Ancak 400 kV gerilim seviyesinde yapılacak BBO işleminde ilgili ceza katsayısı hassas şekilde ayarlanmalı ve hatta iletim sisteminde oluşturulan optimal topolojilerin geçici rejim analizleri yapılmalıdır.

Yapay zekâ optimizasyon algoritmalarından bazıları, sınırlarını çizdiğimiz BBO problemini çözmede başarılı sonuçlar sunmuştur ve iyi bir başlangıç pozisyonuyla birlikte 2 saat içerisinde kaliteli çözümler elde edilebilmektedir. Her ne kadar tez çalışmamız kapsamında analiz sürelerini azaltacak birçok teknik uygulanmış olsa bile başlangıç popülasyonuna mevcut çalışma düzeninin aktarılmadığı durumlarda ve 10^{20} seçenek bulunan bir çözüm uzayında kaliteli sonuçlar elde edebilmek için 5 saatlik bir zaman gerekmektedir. Bu nedenle gelecek çalışmalarda çözüm süresini kısaltmak amacıyla yapay sinir ağları (artificial neural networks) ve büyük veri (big data) gibi teknikler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Taha H. A., *Operations Research-An Introduction*, 8nd ed., Pearson Prentice Hall, USA, 2007.

[2] Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A., Grey Wolf Optimizer, *Advances in Engineering Software*, 2014, **69**, 46–61.

[3] Holland J. H., Genetic Algorithms, *Scientific American*, 1992, **267**(1), 66–72.

[4] Eberhart R., Kennedy J., A New Optimizer Using Particle Swarm Theory, *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japonya, 4-6 Ekim 1995.

[5] Rizk-Allah R. M., Hassanien A. E., Elhoseny M., Gunasekaran M., A new binary salp swarm algorithm: development and application for optimization tasks, *Neural Computing and Applications*, 2019, **31**(5), 1641–1663.

[6] Sherali H. D., Driscoll P. J., Evolution and state-of-the-art in integer programming, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2000, **124**(1-2), 319-340.

[7] Bacher R., Glavitsch H., Network topology optimization with security constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1986, **1**(4), 103-111.

[8] Mazi A. A., Wollenberg B. F., Hesse M. H., Corrective Control of Power System Flows By Line and Bus-Bar Switching, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1986, **1**(3), 258-264.

[9] Wrubel J. N., Rapcienski S. M. P. S., Lee K. L., Practical experience with corrective switching algorithm for on-line applications, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, **11**(1), 415-421.

[10] Rolim J. G., Machado L. J. B., A study of the use of corrective switching in transmission systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999, **14**(1), 336-341.

[11] Heidarifar M., Doostizadeh M., Ghasemi H., Optimal transmission reconfiguration through line switching and bus splitting, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, National Harbor, ABD, 27-31 Temmuz 2014.

[12] Heidarifar M., Ghasemi H., A network topology optimization model based on substation and node-breaker modeling, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, **31**(1), 247–255.

[13] Xiao R., Xiang Y., Wang L., Xie K., Power system reliability evaluation incorporating dynamic thermal rating and network topology optimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, **33**(6), 6000–6012.

[14] Nasrolahpour E., Ghasemi H., Khanabadi M., Optimal transmission congestion management by means of substation reconfiguration, in *ICEE 2012 - 20th Iranian Conference on Electrical Engineering*, Tahran, İran, 15-17 Mayıs 2012.

[15] Yang Z., Zhong H., Xia Q., Kang C., Optimal Transmission Switching with Short-Circuit Current Limitation Constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, **31**(2), 1278–1288.

[16] Namchoat S., Hoonchareon N., Optimal bus splitting for short-circuit current limitation in metropolitan area, *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2013*, Krabi, Tayland, 15-17 Mayıs 2013.

[17] Del Castillo M. Y., Song H., Tabu search based topology modification for reduction of fault current level in power systems, *6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems, SCIS/ISIS 2012*, Kobe, Japonya, 20-24 Kasım 2012.

[18] Granelli G., Montagna M., Zanellini F., Bresesti P., Vailati R., Innorta M., Optimal network reconfiguration for congestion management by deterministic and genetic algorithms, *Electric Power Systems Research*, 2006, **76**(6-7), 549-556.

[19] Vovos P. N., Song H., Cho K. W., Kim T. S., A network reconfiguration algorithm for the reduction of expected fault currents, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Vancouver, Canada, 21-25 Temmuz 2013.

[20] Song H., Vovos P., Cho T. S. K. K. W., Decision making of bus splitting for reduction fault current level using a novel network reconfiguration algorithm with rerun optimizer, *J Electr Eng Technol.*, 2016, **11**(1), 76-85.

[21] Flores B. J. M. H., Song H., Determining countermeasures against fault currents using a decomposition method based on fuzzy fault level constrained optimal power flow, *Applied Sciences (Switzerland)*, 2019, **9**(2), 274, doi: 10.3390/app9020274.

[22] Fritz W., Haubrich H.-J., Practical Evaluation of Operational Topology Optimization for Loss Reduction in High Voltage Grids, *IFAC Proceedings Volumes*, 1997, **30**(17),123-129.

[23] Lobato E., Echavarren F., Rouco L., Navarrete M. I., Casanova R., López G., A mixed-integer LP based network topology optimization algorithm for overload alleviation, *2003 IEEE Bologna PowerTech - Conference*, Bologna, İtalya, 23-26 Haziran 2003.

[24] Zaoui F., Fliscounakis S., Gonzalez R., Coupling OPF and topology optimization for security purposes, *15th Power Systems Computation Conference*, Versailles, Fransa, 2005.

[25] Fisher E. B., O'Neill R. P., Ferris M. C., Optimal transmission switching, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**(3), 1346-1355.

[26] Khodaei A., Shahidehpour M., Transmission switching in security-constrained unit commitment, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, **25**(4), 1937-1945.

[27] Hedman K. W., Ferris M. C., O'Neill R. P., Fisher E. B., Oren S. S., Co-optimization of generation unit commitment and transmission switching with N-1 reliability, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, **25**(2), 1052-1063.

[28] Barrows C., Blumsack S., Transmission Switching in the RTS-96 Test System, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, **27**(2), 1134-1135.

[29] Fuller J. D., Ramasra R., Cha A., Fast heuristics for transmission-line switching, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, **27**(3), 1377-1386.

[30] Liu C., Wang J., Ostrowski J., Heuristic prescreening switchable branches in optimal transmission switching, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, **27**(4), 2289-2290.

[31] Ostrowski J., Wang J., Liu C., Exploiting symmetry in transmission lines for transmission switching, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, **27**(3), 1708-1709.

[32] Hedman K. W., O'Neill R. P., Fisher E. B., Oren S. S., Optimal transmission switching with contingency analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, **24**(3), 1577-1586.

[33] Khanabadi M., Ghasemi H., Doostizadeh M., Optimal transmission switching considering voltage security and N-1 contingency analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, **28**(1), 542-550.

[34] Ostrowski J., Wang J., Liu C., Transmission switching with connectivity-ensuring constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, **29**(6), 2621-2627.

[35] Soroush M. and Fuller J. D., Accuracies of optimal transmission switching heuristics based on DCOPF and ACOPF, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, **29**(2), 924-932.

[36] Bai Y., Zhong H., Xia Q., Kang C., A Two-Level Approach to AC Optimal Transmission Switching with an Accelerating Technique, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, **32**(2), 1616-1625.

[37] Hagh M. T., Gargari M. Z., Pakdel M. J. V., Sequential analysis of optimal transmission switching with contingency assessment, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2018, **12**(6), 1390–1396.

[38] Pourahmadi F., Jooshaki M., Hosseini S. H., A dynamic programming-based heuristic approach for optimal transmission switching problem with N-1 reliability criterion, *2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Beijing, Çin, 16-20 Ekim 2016.

[39] Nojavan M., Seyedi H., Mohammadi-Ivatloo B., Voltage stability margin improvement using hybrid non-linear programming and modified binary particle swarm optimisation algorithm considering optimal transmission line switching, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2018, **12**(4), 815-823.

[40] Henneaux P., Kirschen D. S., Probabilistic security analysis of optimal transmission switching, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, **31**(1), 508-517.

[41] Dehghanian P., Kezunovic M., Probabilistic impact of transmission line switching on power system operating states, *IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, Dallas, ABD, 3-5 Mayıs 2016.

[42] Zhang C., Wang J., Optimal transmission switching considering probabilistic reliability, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, **29**(2), 974-975.

[43] Hedman K. W., Oren S. S., O'Neill R. P., Optimal transmission switching: Economic efficiency and market implications, *Journal of Regulatory Economics*, 2011, **40**, 111-140.

[44] Golshannavaz S., Afsharnia S., Aminifar F., Smart distribution grid: Optimal day-ahead scheduling with reconfigurable topology, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, **5**(5), 2402-2411.

[45] Villumsen J. C., Brønmo G., Philpott A. B., Line capacity expansion and transmission switching in power systems with large-scale wind power, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, **28**(2), 731-739.

[46] Gharibpour H., Aminifar F., Bashi M. H., Short-circuit-constrained transmission expansion planning with bus splitting flexibility, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, **12**(1), 217–226.

[47] Liu C., Wang J., Fu Y., Koritarov V., Multi-area optimal power flow with changeable transmission topology, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2014, **8**(6), 1082-1089.

[48] Escobedo A. R., Moreno-Centeno E., Hedman K. W., Topology control for load shed recovery, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, **29**(2), 908-916.

[49] Stanković A. M., Sarić A. T., Dynamic Voltage Stability Assessment in Large Power Systems With Topology Control Actions, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, **31**(4), 2892-2902.

[50] Ziaee O., Choobineh F., Optimal Location-Allocation of TCSCs and Transmission Switch Placement under High Penetration of Wind Power, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, **32**(4), 3006-3014.

[51] Sang Y., Sahraei-Ardakani M., The Interdependence between Transmission Switching and Variable-Impedance Series FACTS Devices, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, **33**(3), 2792-2803.

[52] Alhazmi M., Dehghanian P., Wang S., Shinde B., Power Grid Optimal Topology Control Considering Correlations of System Uncertainties, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, **55**(6), 5594–5604.

[53] Qiu F., Wang J., Chance-constrained transmission switching with guaranteed wind power utilization, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, **30**(3), 1270–1278.

[54] Taheri M. H., Dehghan S., Heidarifar M., Ghasemi H., Adaptive Robust Optimal Transmission Switching Considering the Uncertainty of Net Nodal Electricity Demands, *IEEE Systems Journal*, 2015, **11**(4), 2872-2881.

[55] Ding T., Sun K., Yang Q., Khan A. W., Bie Z., Mixed Integer Second Order Cone Relaxation with Dynamic Simulation for Proper Power System Islanding Operations, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2017, **7**(2), 295-306.

[56] Kamali S., Amraee T., Capitanescu F., Controlled network splitting considering transient stability constraints, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2018, **12**(21), 5639-5648.

[57] Dehghanian P., Wang Y., Gurrala G., Moreno-Centeno E., Kezunovic M., Flexible implementation of power system corrective topology control, *Electric Power Systems Research*, 2015, **128**, 79–89.

[58] Amraee T., Saberi H., Controlled islanding using transmission switching and load shedding for enhancing power grid resilience, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2017, **91**, 135–143.

[59] Saharuddin N. Z., Abidin I. Z., Mokhlis H., Abdullah A. R., Naidu K., A power system network splitting strategy based on contingency analysis, *Energies*, 2018, **11**(2), doi: 10.3390/en11020434.

[60] Fernández-Porras P., Panteli M., Quirós-Tortós J., Intentional controlled islanding: When to island for power system blackout prevention, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2018, **12**(14), 3542–3549.

[61] Demetriou P., Kyriacou A., Kyriakides E., Panayiotou C., System splitting strategy considering power system restoration, *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, İngiltere, 18-22 Haziran 2017.

[62] Ding T., Zhao C., Robust optimal transmission switching with the consideration of corrective actions for N - k contingencies, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2016, **10**(13), 3288–3295.

[63] Jadoun V. K., Gupta N., Niazi K. R., Swarnkar A., Dynamically controlled particle swarm optimization for large-scale nonconvex economic dispatch problems, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2015, **25**(11), 3060-3074.

[64] Karaboga D., Basturk B., A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of Global Optimization*, 2007, **39**(3), 459–471.

[65] Rashedi E., Nezamabadi-pour H., Saryazdi S., GSA: A Gravitational Search Algorithm, *Information Sciences*, 2009, **179**(13), 2232–2248.

[66] Mirjalili S., Gandomi A. H., Mirjalili S. Z., Saremi S., Faris H., Mirjalili S. M., Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems, *Advances in Engineering Software*, 2017, **114**, 163–191.

[67] Yapici H. Cetinkaya N., A new meta-heuristic optimizer: Pathfinder algorithm, *Applied Soft Computing Journal*, 2019, **78**, 545–568.

[68] Hanson A**.,** Grigsby L., *Systems, Controls, Embedded Systems, Energy, and Machines*, e-book, CRC Press, Boca Raton, 2017.

[69] SIEMENS, Application Program Interface., *Siemens Power Technologies International*, 2018.

[70] Ejebe G. C., Wollenberg B. F., Automatic contingency selection, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979, **PAS-98**(1), 97-109, doi: 10.1109/TPAS.1979.319518.

[71] EPRI, *Power Systems Dynamics Tutorial*, EPRI, 1016042, Palo Alto, 2009.

[72] Saadat H., *Power System Analysis*, 3rd ed., PSA Publishing, USA, 2010.

[73] Coello C. C. E., Romero C. A. M., *Evolutionary Algorithms and Multiple Objective Optimization*, Editörler: Ehrgott M., Gandibleux X. *Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Surveys*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.

[74] Rashedi E., Rashedi E., Nezamabadi-pour H., A comprehensive survey on gravitational search algorithm, *Swarm and Evolutionary Computation*, 2018, **41**, 141–158.

[75] Wolpert D. H., Macready W. G., No free lunch theorems for optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, **1**(1), 67-82.

[76] Storn R., Price K., Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, 1997, **11**, 341-359.

[77] Yao X., Liu Y., Lin G., Evolutionary programming made faster, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, **3**(2), 82-102.

[78] Simon D., Biogeography-based optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, **12**(6), 702-713.

[79] Webster B., Bernhard P. J., A local search optimization algorithm based on natural principles of gravitation, *Florida Institute of Technology*, 2003, CS-2003-10, 1-18.

[80] Alatas B., ACROA: Artificial Chemical Reaction Optimization Algorithm for global optimization, *Expert Systems with Applications*, 2011, **38**(10), 13170-13180.

[81] Hatamlou A., Black hole: A new heuristic optimization approach for data clustering, *Information Sciences*, 2013, **222**, 175-184.

[82] Kaveh A., Khayatazad M., A new meta-heuristic method: Ray Optimization, *Computers and Structures*, 2012, **112-113**, 283-294.

[83] Du H., Wu X., Zhuang J., Small-world optimization algorithm for function optimization, in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2006, 4222, 264-273.

[84] Hosseini H. S., Principal components analysis by the galaxy-based search algorithm: a novel metaheuristic for continuous optimisation, *International Journal of Computational Science and Engineering*, 2011, **6**, 136-140.

[85] Dorigo M., Birattari M., Stutzle T., Ant Colony Optimatization, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, **1**(4), 28-39.

[86] Yang X. S., A new metaheuristic Bat-inspired Algorithm, *Computational Intelligence*, 2010, **284**, 65-74.

[87] Neshat M., Sepidnam G., Sargolzaei M., Toosi A. N., Artificial fish swarm algorithm: a survey of the state-of-the-art, hybridization, combinatorial and indicative applications, *Artificial Intelligence Review*, 2014, **42**, 965-997.

[88] Mucherino A., Seref O., Monkey search: A novel metaheuristic search for global optimization, in *AIP Conference Proceedings*, 2007, **953**(1), 162-173.

[89] Yang X. S., Deb S., Cuckoo search via Lévy flights, *2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, Coimbatore, Hindistan, 9-11 Aralık 2009.

[90] Yang X. S., Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2010, **2**(2), 78-84.

[91] Umbarkar A.J., Sheth P.D., Crossover Operators in Genetic Algorithms: a Review, *ICTACT Journal on Soft Computing*, 2015, **6**(1), 1083–1092.

[92] Kora P., Yadlapalli P., Crossover Operators in Genetic Algorithms: A Review, *International Journal of Computer Applications*, 2017, **162**(10), 34-36.

[93] Karaboğa D., *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, 4th ed., Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2018.

[94] Ratnaweera A., Halgamuge S. K., Watson H. C., Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, **8**(3), 240–255.

[95] Chaturvedi K. T., Pandit M., Srivastava L., Self-organizing hierarchical particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**(3), 1079–1087.

[96] Wang Y., Zhou J., Zhou C., Wang Y., Qin H., Lu Y., An improved self-adaptive PSO technique for short-term hydrothermal scheduling, *Expert Systems with Applications*, 2012, **39(**3), 2288–2295.

[97] Mohammadi-Ivatloo B., Moradi-Dalvand M., Rabiee A., Combined heat and power economic dispatch problem solution using particle swarm optimization with time varying acceleration coefficients, *Electric Power Systems Research*, 2013, **95**, 9–18.

[98] Karaboga D., An idea based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, *Erciyes University, Technical Report TR06,* 2005.

[99] Peynirci N. Ö., Approaches for multiobjective combinatorial optimization problems, Doktora, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 177575.

[100] Luo K., Zhao Q., A binary grey wolf optimizer for the multidimensional knapsack problem, *Applied Soft Computing Journal*, 2019, **83**, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105645.

[101] Shi X. H., Liang Y. C., Lee H. P., Lu C., Wang Q. X., Particle swarm optimization-based algorithms for TSP and generalized TSP, *Information Processing Letters*, 2007, **103**(5), 169–176.

[102] Rashedi E., Nezamabadi-Pour H., Saryazdi S., BGSA: Binary gravitational search algorithm, *Natural Computing*, 2010, **9**(3), 727–745.

[103] Mirjalili S., Lewis A., S-shaped versus V-shaped transfer functions for binary Particle Swarm Optimization, *Swarm and Evolutionary Computation*, 2013, **9**, 1–14.

[104] Kennedy J., Eberhart R. C., Discrete binary version of the particle swarm algorithm, *the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Orlando, ABD, 12-15 Ekim 1997.

[105] Lee S., Soak S., Oh S., Pedrycz W., Jeon M., Modified binary particle swarm optimization, *Natural Science*, 2008, **37**(6-7), 583-589.

[106] Too J., Abdullah A. R., Saad N. M., A new co-evolution binary particle swarm optimization with multiple inertia weight strategy for feature selection, *Informatics*, 2019, **6**(2), doi: 10.3390/informatics6020021.

[107] Santana C. J., Macedo M., Siqueira H., Gokhale A., Bastos-Filho C. J. A., A novel binary artificial bee colony algorithm, *Future Generation Computer Systems*, 2019, **98**, 180–196.

[108] Ozturk C., Hancer E., Karaboga D., A novel binary artificial bee colony algorithm based on genetic operators, *Information Sciences*, 2015, **297**, 154–170.

[109] Emary E., Zawbaa H. M., Hassanien A. E., Binary grey wolf optimization approaches for feature selection, *Neurocomputing*, 2016, **172**, 371–381.

[110] Faris H. vd., An efficient binary Salp Swarm Algorithm with crossover scheme for feature selection problems, *Knowledge-Based Systems*, **154**, 43–67, 2018.

[111] Al-Tashi Q., Kadir S. J. A., Rais H. M., Mirjalili S., Alhussian H., Binary Optimization Using Hybrid Grey Wolf Optimization for Feature Selection, *IEEE Access*, 2019, **7**, 39496-39508.

[112] Behjat A. R., Mustapha A., Nezamabadi-Pour H., Sulaiman M. N., Mustapha N., Feature subset selection using binary gravitational search algorithm for intrusion detection system, *Intelligent Information and Database Systems. ACIIDS 2013. Lecture Notes in Computer Science*, 2013, **7803**, 377-386.

[113] Nagpal S., Arora S., Dey S., Shreya S., Feature Selection using Gravitational Search Algorithm for Biomedical Data, *Procedia Computer Science*, 2017, **115**, 258-265.

[114] Jain I., Jain V. K., Jain R., Correlation feature selection based improved-Binary Particle Swarm Optimization for gene selection and cancer classification, *Applied Soft Computing Journal*, 2018, **62**, 203-215.

[115] Cervante L., Xue B., Zhang M., Shang L., Binary particle swarm optimisation for feature selection: A filter based approach, *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Brisbane, Avusturalya, 10-15 Haziran 2012.

[116] Ozger Z. B., Bolat B., Diri B., A comparative study on binary Artificial Bee Colony optimization methods for feature selection, *the 2016 International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications*, Sinaia, Romanya, 2-5 Ağustos 2016.

[117] Schiezaro M. and Pedrini H., Data feature selection based on Artificial Bee Colony algorithm, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2013, **47**(2013), doi: 10.1186/1687-5281-2013-47.

[118] Chantar H., Mafarja M., Alsawalqah H., Heidari A. A., Aljarah I., Faris H., Feature selection using binary grey wolf optimizer with elite-based crossover for Arabic text classification, *Neural Computing and Applications*, 2019, **32**, 12201-12220.

[119] Hegazy A. E., Makhlouf M. A., El-Tawel G. S., Feature Selection Using Chaotic Salp Swarm Algorithm for Data Classification, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, **44**, 3801-3816.

[120] Hegazy A. E., Makhlouf M. A., El-Tawel G. S., Improved salp swarm algorithm for feature selection, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2020, **145**, 113-122.

[121] Yuan X., Ji B., Zhang S., Tian H., Hou Y., A new approach for unit commitment problem via binary gravitational search algorithm, *Applied Soft Computing Journal*, 2014, **22**, 249–260.

[122] Chandrasekaran K., Hemamalini S., Simon S. P., Padhy N. P., Thermal unit commitment using binary/real coded artificial bee colony algorithm, *Electric Power Systems Research*, 2012, **84**(1), 109–119.

[123] Panwar L. K., Reddy S. K, Verma A., Panigrahi B. K., Kumar R., Binary Grey Wolf Optimizer for large scale unit commitment problem, *Swarm and Evolutionary Computation*, 2018, **38**, 251–266.

[124] Chandrasekaran K., Simon S. P., Binary/real coded particle swarm optimization for unit commitment problem, *2012 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation*, Thrissur, Kerala, Hindistan, 3-6 Ocak 2012.

[125] Yuan X., Nie H., Su A., Wang L., Yuan Y., An improved binary particle swarm optimization for unit commitment problem,"*Expert Systems with Applications*, 2009, **36**(4), 8049-8055.

[126] Reddy K. S., Panwar L. K., Panigrahi B. K., Kumar R., Optimal scheduling of uncertain wind energy and demand response in unit commitment using binary grey Wolf optimizer (BGWO), *2016 IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering*, Varanasi, Hindistan, 9-11 Aralık 2017.

[127] Reddy S., Panwar L., Panigrahi B. K., Kumar R., AlSumaiti A. S., An Application of Binary Grey Wolf Optimizer (BGWO) Variants for Unit

Commitment Problem, *Applied Nature-Inspired Computing: Algorithms and Case Studies. Springer Tracts in Nature-Inspired Computing,* 2020, 97-127.

[128] A. Saad Al-Sumaiti S. R. K, Gupta V., Kumar R., Saxena A., An Improved Binary Grey Wolf Optimizer (IBGWO) for Unit Commitment Problem in Thermal Generation, *2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS)*, Jaipur, Hindistan, 20-22 Aralık 2020.

[129] Srinivasa Rao M. R. R., Narasimham S.V.L., Optimization of Distribution Network Configuration for Loss Reduction Using Artificial Bee Colony Algorithm, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2008, **2**, 1964-1970.

[130] Narimani M. R., Vahed A. A., Azizipanah-Abarghooee R., Javidsharifi M., Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2014, **8**(1), 55–69.

[131] Jin X., Zhao J., Sun Y., Li K., Zhang B., Distribution network reconfiguration for load balancing using binary particle swarm optimization, *2004 International Conference on Power System Technology*, Singapur, 21-24 Kasım 2004.

[132] Selvaraj G., Rajangam K., Multi-objective grey wolf optimizer algorithm for combination of network reconfiguration and D-STATCOM allocation in distribution system, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2019, **29**(11).

[133] Yodphet D., Onlam A., Chatthaworn R., Surawanitkun C., Siritaratiwat A., Khunkitti P., Network reconfiguration and capacitor placement for power loss reduction using a combination of Salp Swarm Algorithm and Genetic Algorithm, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2018, **11**, 1383-1396.

[134] Othman A. M., El-Fergany A. A., Abdelaziz A. Y., Optimal Reconfiguration Comprising Voltage Stability Aspect Using Enhanced Binary Particle Swarm Optimization Algorithm, *Electric Power Components and Systems*, 2015, **43**(14), 1656-1666.

[135] Kumar N., Mahajan V., Reconfiguration of Distribution Network for Power Loss Minimization Reliability Improvement using Binary Particle Swarm Optimization, *8th IEEE Power India International Conference*, Kurukshetra, Hindistan, 10-12 Kasım 2018.

[136] Chaweewat P., Singh J. G., Ongsakul W., Srivastrava A. K., Economic and environmental impact assessment with network reconfiguration in microgrid by using artificial bee colony, *the 2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy*, Bangkok, Tayland, 14-16 Eylül 2016.

[137] Kiran M. S., The continuous artificial bee colony algorithm for binary optimization, *Applied Soft Computing Journal*, 2015, **33**, 15–23.

[138] Khanesar M. A., Branson D., XOR binary gravitational search algorithm, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Bari, İtalya, 6-9 Ekim 2019.

[139] Shen Q., Jiang J. H., Jiao C. X., Shen G. L., ve Yu R. Q., Modified particle swarm optimization algorithm for variable selection in MLR and PLS modeling: QSAR studies of antagonism of angiotensin II antagonists, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2004, **22**(2-3), 145-152.

[140] Wang L., Wang X., Fu J., Zhen L., A novel probability binary particle swarm optimization algorithm and its application, *Journal of Software*, 2008, **3**(9), 28-35.

[141] Menhas M. I., Fei M. R., Wang L., Fu X., A novel hybrid binary PSO algorithm, *Advances in Swarm Intelligence. ICSI 2011. Lecture Notes in Computer Science*, 2011, **6728**(1), 93–100.

[142] Doğan E., Yörükeren N., Binary pathfinder algorithm for bus splitting optimisation problem, *IET Generation, Transmission & Distribution*, doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0729.

[143] Peyghami S., Davari P., Fotuhi-Firuzabad M., Blaabjerg F., Standard Test Systems for Modern Power System Analysis: An Overview, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2019, **13**(4), 86-105.

[144] Suganthan P., Hansen N., Liang J., Deb K., Chen Y., Auger A., Tiwari S., Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2005 Special Session on Real- Parameter Optimization, *Tech. Rep, Nanyang Technological University*, **2005005**, Singapore, 2005.

[145] Salomon R., Re-evaluating Genetic Algorithm Performance Under Corodinate Rotation of Benchmark Functions: A Survey of Some Theoretical and Practical Aspects of Genetic Algorithms, *BioSystems*, 1996, **39**(3), 263-278.

[146] Derrac J., García S., Molina D., Herrera F., A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms, *Swarm and Evolutionary Computation*, 2011, **1**(1), 3–18.

[147] 'IEEE 14-Bus Test System', https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-14-bus-system/, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019).

[148] Doğan E., Yörükeren N., Optimal Bus Layout in Transmission System by Using Meta-heuristic Approaches, *Electric Power Components and Systems*, 2020, **48**(12-13), 1390-1400.

[149] 'The IEEE 57-Bus Test System', https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-57-bus-system, (Ziyaret Tarihi: 11 Nisan 2020).

[150] ‘The IEEE 118-Bus Test System’, https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-118-bus-system, (Ziyaret Tarihi: 11 Nisan 2020).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Doğan E.**, Yörükeren N., Binary pathfinder algorithm for bus splitting optimisation problem, *IET Generation, Transmission & Distribution*, doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0729.

[2] **Doğan E.**, Yörükeren N., Optimal Bus Layout in Transmission System by Using Meta-heuristic Approaches, *Electric Power Components and Systems*, 2020, **48**(12-13), 1390-1400.

[3] **Doğan E.**, Yörükeren N., Optimal Transmission Line Switching with Genetic Algorithm to Restrict Short Circuit Current in Istanbul Anatolian Side, *CIGRE 2020 e-session*, C2-119, 24 Ağustos – 3 Eylül 2020.

[4] **Doğan E.**, Yörükeren N., Investigation of control of power flow by using phase shifting transformers: Turkey case study, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2019, **27**(3), 2259-2275.

[5] **Doğan E.**, Yörükeren N., Elektrik Şebekelerinde Bara Düzeni Optimizasyonu, *Güç Sistemleri Konferansı*, Ankara, Türkiye, 15-16 Kasım 2018.

[6] **Doğan E.**, Yörükeren N., Tam Sayılı Lineer Programlama ile Kısa Devre Akımlarının Sınırlandırılması, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Kasım 2018.

[7] **Doğan E.**, Yörükeren N., Influence of Load Harmonics on Transformer Temperature, *8th International Advanced Technology Symposium*, Elazığ, Türkiye, 19-22 Ekim 2017.

[8] **Doğan E.**, Kekezoğlu B., Power transformer noise, noise tests, and example test results, *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2016, **10**(1), 57-61.

ÖZGEÇMİŞ

2007 yılında Elâzığ Anadolu Lisesinden mezun olarak Fatih Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü tam burslu olarak kazandı. Lisans öğrenimine devam ederken 2008 yılında çift anadal programıyla Endüstri Mühendisliğini okumaya başladı. 2011 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisliğinden ve 2012 yılında Endüstri mühendisliğinden mezun oldu. 2011-2015 yılları arasında 4 yıl özel sektörde Elektrik Mühendisi olarak çalıştıktan sonra 2015 yılında Türkiye Elektrik İletim AŞ'de vardiya mühendisi olarak göreve başladı. 2017 yılında TEİAŞ'ın Kuzey Batı Anadolu Yük Tevzi İşletme Müdürlüğünde sistem işletme mühendisi olarak görevlendirildi. 2013 yılında okumaya hak kazandığı Yıldız Teknik Üniversitesi yüksek lisans programını 2016 yılında tamamladı. 2016 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında doktora öğrenimine devam eden ve halen TEİAŞ bünyesinde görev yapan Doğan evli ve iki çocuk babasıdır.