

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA
İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE KANAL ATAMA
PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Murat KISA

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Sercan DEMİRCİ

II. Danışman

Doç. Dr. Selçuk ASLAN

SAMSUN
2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Murat KISA tarafından, Dr. Öğr. Üyesi Sercan DEMİRCİ ve Doç. Dr. Selçuk ASLAN danışmanlığında hazırlanan “BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE KANAL ATAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 5.9.2022 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Doç. Dr. Tansel DÖKEROĞLU Çankaya Üniversitesi Yazılım Mühendisliği Bölümü		☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Sercan DEMİRCİ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAYHAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐

Hayır ☒

İmza

05/09/2022

Murat KISA

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE KANAL ATAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 23.06.2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 8

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza

05/09/2022

Dr. Öğr. Üyesi Sercan DEMİRCİ

ÖZET

BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE KANAL ATAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

Murat KISA
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans, Eylül/2022
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sercan DEMİRCİ

İlk kez 2019 yılında Çin'in Wuhan eyaletinde görülen yeni korona virüs (COVID-19) tüm dünyayı hızla etkilemiş ve hala devam eden bir pandemiye sebep olmuştur. Ortaya çıkan bu sağlık krizini çözmek için önerilen tedavi ve teşhis yöntemleri doğrudan tıp bilimleri ile alakalı olsa da, bilgisayar ve veri bilimlerinden de araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu ilginin beklenen sonucu olarak, geçtiğimiz yıllarda konvalesan veya immün plazma adı verilen tedavi yönteminin temel işlem adımlarını referans noktası alan İmmün Plazma algoritması (Immune Plasma algorithm – IP algorithm veya IPA) önerilmiştir.

Bu tez kapsamında, IP algoritması, bilişsel radyo ağlarında kanal atama probleminin özellikleri dikkate alınarak güncellenmiştir. Ayrıca, IP algoritmasına yardımcı olacak bir düzenleme metodu geliştirilerek, bilişsel radyo ağlarında kanal atama probleminin çözümü gerçekleştirilmiştir. IP algoritmasının performansının incelenmesi için aralarında Yapay Arı Koloni algoritması, Ateş Böceği algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyon algoritması, Genetik algoritma ve Gri Kurt Optimizasyon algoritması olan bir dizi meta-sezgisel algoritma ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, test senaryolarının genelinde IP algoritmasının bahsedilen diğer algoritmalara kıyasla daha başarılı çözümler ürettiğini göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Meta-sezgiseller, Kanal Atama, İmmün Plazma Algoritması.

ABSTRACT

SOLVING CHANNEL ASSIGNMENT PROBLEM IN COGNITIVE RADIO NETWORKS WITH IMMUNE PLASMA ALGORITHM

Murat KISA

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Computer Engineering

Master, September/2022

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Sercan DEMİRCİ

The new corona virus (COVID-19) that is seen first in the Wuhan city of China at the beginning of 2020 has effected the whole world quickly and caused a pandemic still ongoing. Even though the treatment and diagnostic techniques proposed for handling the mentioned health crisis are directly related with the medical sciences, they also gathered researchers' interests from computer and information sciences. As an expected result of this interest, Immune Plasma algorithm (IP algorithm or IPA) referencing the fundamental steps of a treatment method called convalescent or immune plasma has been proposed recently.

In this thesis, IP algorithm was modified by considering the properties of the channel assignment problem in cognitive radio networks. Moreover, a fixing method that supports IP algorithm was introduced and channel assignment problem in cognitive radio networks was solved. In order to investigate the performance of the IP algorithm, comparative studies with a set of meta-heuristics including Artificial Bee Colony algorithm, Firefly algorithm, Particle Swarm Optimization algorithm, Genetic algorithm and Grey Wolf Optimizer algorithm were carried out. The results obtained from the comparative studies showed that IP algorithm is capable of finding more qualified solutions for the vast majority of the test scenarios when the mentioned algorithms are considered.

Keywords: Meta- heuristics, Channel Assignment, Immune Plasma Algorithm.

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında zorlukları aşmam için desteğini ve yardımını esirgemeyen ihtiyaç duyduğum her anda yardımcı olan danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Sercan DEMİRCİ ve Doç. Dr. Selçuk ASLAN'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu uzun süreç boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı annem Ayten KISA'ya, babam Yusuf KISA'ya ve aileme sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca tez sürecimdeki bütün destekleri için Ceren ÇUBUKCU'ya sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Kocaeli Üniversitesi Teknopark'ında bulunan Teknoarge Teknoloji firmasında birlikte çalıştığım iş arkadaşlarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Murat KISA

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon ve Katkı	4
1.2. Literatür Araştırması	5
2. GENEL BİLGİLER	9
2.1. Kanal Atama Problemi	9
2.2. Düzenleme Metodu	12
2.3. Kontrol Metodu	14
3. YÖNTEM	16
3.1. İmmün Plazma Algoritması	16
3.1.1. Popülasyonun Oluşturulması	20
3.1.2. Enfeksiyonun Yayılması ve Bağışıklık Cevabı	21
3.1.3. Plazma Transferi	25
3.2. Ateş Böceği Algoritması	28
3.3. Yapay Arı Koloni Algoritması	30
3.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu	33
3.5. Genetik Algoritma	34
3.6. Gri Kurt Optimizasyon Algoritması	37
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	39
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKÇA	67
EKLER	70
ÖZ GEÇMİŞ	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

GA	: Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
ABC	: Yapay Arı Koloni (Artificial Bee Colony)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
FA	: Ateş Böceği Algoritması (Firefly Algorithm)
GWO	: Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (Grey Wolf Optimizer Algorithm)
IP	: İmmün Plazma (Immune Plasma)
IPA	: İmmün Plazma Algoritması (Immune Plasma Algorithm)
COVID-19	: Korona Virüs (Corona Virus)
CR	: Bilişsel Radyo (Cognitive Radio)
CRN	: Bilişsel Radyo ağı (Cognitive Radio Network)
PU	: Birincil Kullanıcı (Primary User)
SU	: İkincil Kullanıcı (Secondary User)
PS	: Popülasyon Büyüklüğü (Population Size)
NoR	: Alıcı Sayısı (Number of Receiver)
NoD	: Donör Sayısı (Number of Donor)
DEPSO	: Diferansiyel Gelişime Dayalı Parçacık Sürü Optimizasyonu
V-CoTS	: Kısıtlı Geçici Thompson Sampling (Volatile Constrained Thompson Sampling)
IW-DR	: Artan Ağırlıklar - Azalan Oranlar Algoritması
ACO	: Karınca Koloni Optimizasyonu (Ant Colony Optimization)
DS	: Değerlendirme Sayısı
NFL	: No Free Lunch
NFLT	: No Free Lunch Teorem
LSVM	: Lagrangian Support Vector Machines

ŞEKİLLER DİZİNİ

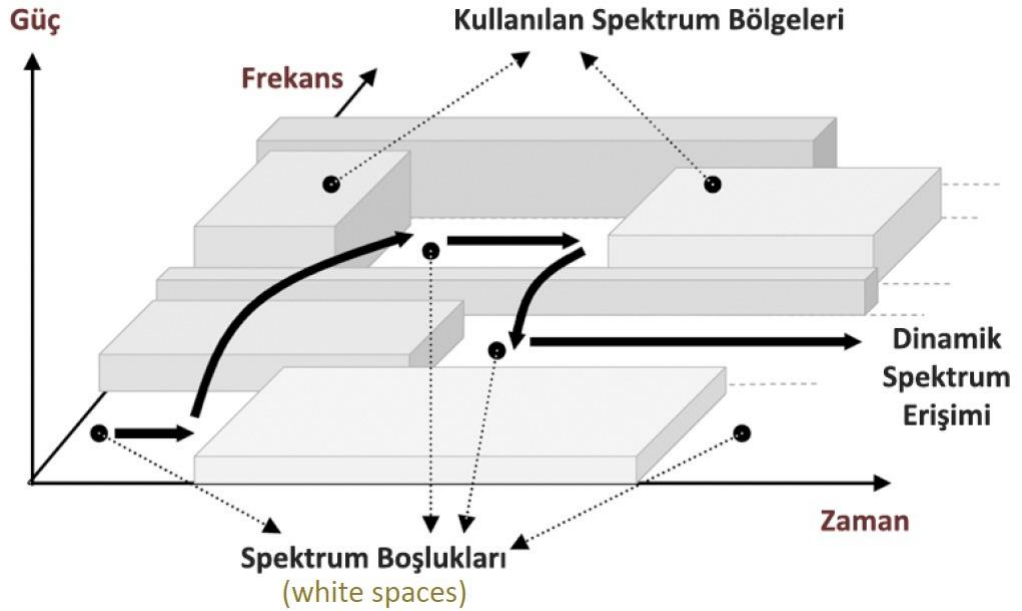
Şekil 1.1. Spektrum boşluk yapısı (Akyildiz vd., 2006)	1
Şekil 1.2. Bilişsel çevrim (Akyildiz vd., 2006)	2
Şekil 1.3. CRN mimarisi (Akyildiz vd., 2006)	3
Şekil 2.1. Tasarlanan bilişsel radyo ağ modeli (Demirci ve Gözüpek, 2019)	11
Şekil 3.1. İmmün Plazma algoritması akış şeması	18
Şekil 3.2. FA ile kanal ataması akış şeması	29
Şekil 3.3. ABC ile kanal ataması akış şeması	32
Şekil 3.4. PSO ile kanal ataması akış şeması	34
Şekil 3.5. GA ile kanal ataması akış şeması	36
Şekil 3.6. GWO ile kanal ataması akış şeması	38
Şekil 4.1. IPA yöntemlerinin CR 5 ve DS 45000'e göre yakınsama grafikleri	45
Şekil 4.2. IPA yöntemlerinin CR 10 ve DS 45000'e göre yakınsama grafikleri	46
Şekil 4.3. IPA yöntemlerinin CR 15 ve DS 45000'e göre yakınsama grafikleri	47
Şekil 4.4. IPA yöntemlerinin CR 20 ve DS 45000'e göre yakınsama grafikleri	48
Şekil 4.5. Meta-sezgisel algoritmaların DS 45000'e göre yakınsama grafikleri	54
Şekil 4.6. Meta-sezgisel algoritmaların DS 15000'e göre yakınsama grafikleri	59
Şekil 4.7. Meta-sezgisel algoritmaların DS 30000'e göre yakınsama grafikleri	63

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 4.1. Swap IPA yönteminin değerlendirilmesi	40
Tablo 4.2. Swap IPA yönteminin çalışma sürelerinin değerlendirilmesi.....	41
Tablo 4.3. Fix IPA yönteminin değerlendirilmesi	42
Tablo 4.4. Fix IPA yönteminin çalışma sürelerinin değerlendirilmesi	43
Tablo 4.5. Algoritma parametreleri.....	49
Tablo 4.6. Swap IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 45000) 50	
Tablo 4.7. Swap IPA yönteminin çalışma sürelerinin kıyaslanması (DS: 45000).....	51
Tablo 4.8. Fix IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 45000)....	52
Tablo 4.9. Fix IPA yönteminin çalışma sürelerinin kıyaslanması (DS: 45000)	53
Tablo 4.10. Swap IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 15000).....	56
Tablo 4.11. Fix IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 15000) .	57
Tablo 4.12. Swap IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 30000).....	61
Tablo 4.13. Fix IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 30000) .	62

1. GİRİŞ

Bilişsel radyolar (Cognitive Radio - CR), yayın yapılabilen sınırlı sayıdaki frekansı ya da spektrumu daha etkili bir şekilde kullanabilmek için umut verici bir teknoloji olarak önerilmiştir (Mitola ve Maguire, 1999). Çevresindeki ortamı sezen lisanslı (birincil) ve lisanssız (ikincil) kullanıcıların etkileşimlerini kontrol eden, alıcı ve vericisini etkin bir şekilde değiştirerek verimli yayın yapabilen, akıllı bir kablosuz sistemdir. Bilişsel radyo ağları (Cognitive Radio Networks - CRN), belirli bir spektrumu lisanslı (birincil) kullanıcıya tahsis etmek şartıyla, lisanssız (ikincil) kullanıcıların müsait frekansları kullanmasına izin vererek bu farklı kullanıcıları birlikte bulundurabilmektedir. Lisanslı kullanıcı, kendisine ait lisanslı frekans üzerinden yayın yapma hakkına doğrudan sahiptir. Lisanssız kullanıcı ise, belirlenen kısıtlamalar dahilinde, lisanslı kullanıcıların yaptıkları yayınları etkilemeden, fırsatçı olarak yayın yapmaktadır. CR, kullanılmayan frekanslara dinamik ve fırsatçı bir şekilde erişerek en uygun yayın kanallarının seçilmesine olanak sağlamaktadır. Bilişsel radyonun asıl amacı, bilişsel yeteneklerden faydalanarak en iyi yayın kanalını elde edebilmektir.

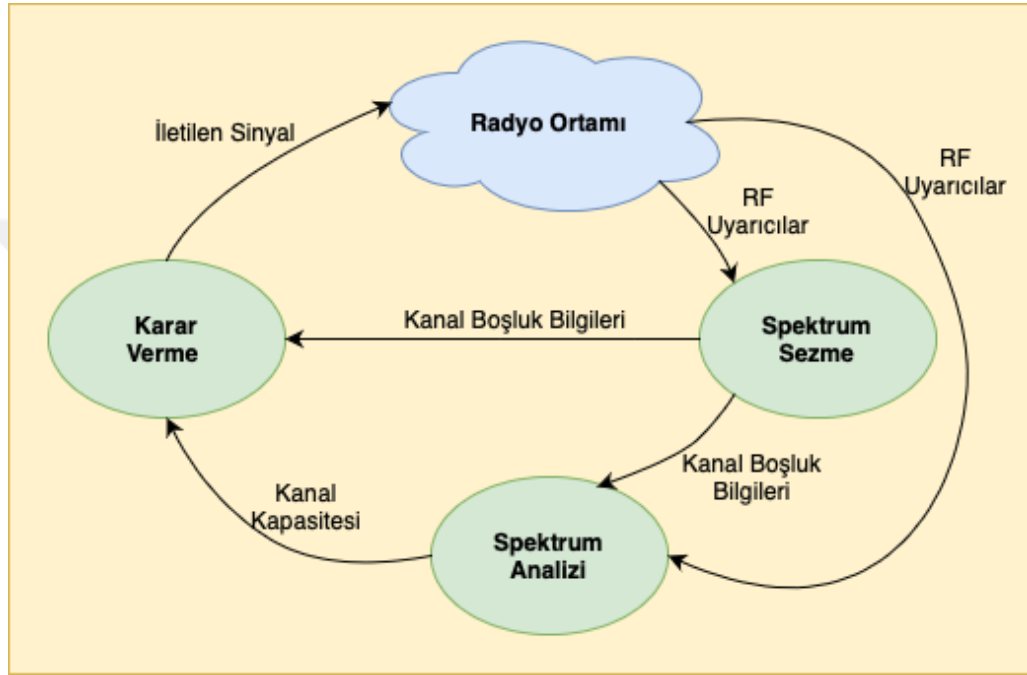


Şekil 1.1. Spektrum boşluk yapısı (Akyildiz vd., 2006)

Bilişsel radyo, beyaz boşluk (white space) ya da spektrum boşluğu olarak adlandırılan ve atıl durumdaki spektrum kaynaklarının kullanılmasını sağlamaktadır (Haykin, 2005). Lisanslı bir kullanıcı spektrumu kullanıyorsa, lisanssız kullanıcı,

başka spektrum boşluğuna geçerek, ağ üzerinde girişim olmayacak şekilde yaptığı yayını sürdürebilir.

CRN için en önemli durum, birincil kullanıcıların yayın talebinde bulunduğu, bu talebinin karşılanmasıdır. Yayın talebinin doğru bir şekilde karşılanması için spektrum sezme, yönetimi, değişimi ve paylaşımı olmak üzere sıralanan bu dört özelliğe sahip olmalıdır (Bayhan ve Alagoz, 2012).

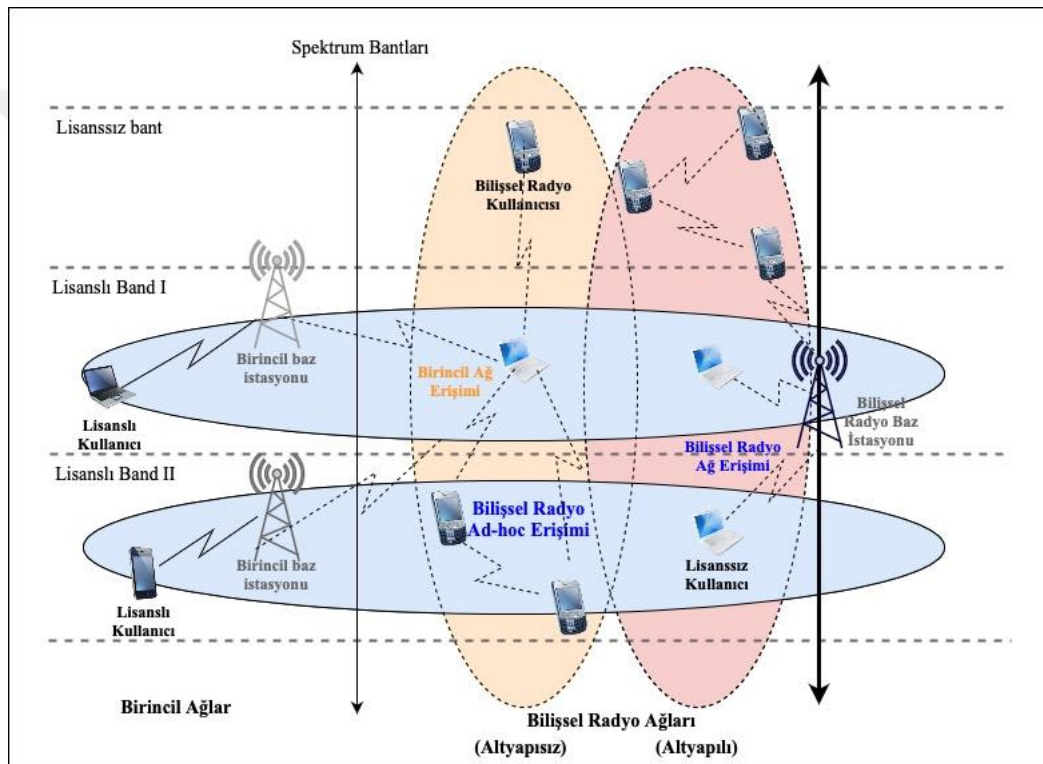


Şekil 1.2. Bilişsel çevrim (Akyildiz vd., 2006)

- Spektrum sezme: Kullanılmayan spektrumun tespit edilerek bu spektrum kaynağının, ağ üzerindeki diğer kullanıcıların yayınlarını olumsuz etkilemeyecek şekilde tahsis edilmesidir.
- Spektrum yönetimi: Ağ üzerindeki kullanıcıların, yayın taleplerini en verimli şekilde karşılayacak spektrumun seçilmesidir.
- Spektrum değiştirme: Kullanıcıların birbirleriyle olan girişimlerini engellemek için ihtiyaç duyulduğunda, kullanılan spektrumdan başka bir spektruma geçilmesidir.
- Spektrum paylaşma: CR ağındaki lisanssız kullanıcıların yaptıkları yayınların eşit ve adaletli bir şekilde gerçekleşmesidir.

CRN üzerinde birincil kullanıcı (Primary User - PU), lisanslı spektruma sahip olduğu için spektrum erişim önceliğine sahiptir (Wang vd., 2013). Sahip olduğu

lisanslı spektrum üzerinden herhangi bir kısıt olmadan yayın yapabilmektedir. İkincil kullanıcı (Secondary User - SU) ya da CR kullanıcıları ise, lisanssız spektrum kaynaklarına erişebilmektedir. Ayrıca birincil kullanıcıların yayın yapmadığı zamanlarda, tüm lisanslı spektrum kaynaklarına da erişim izni verilmektedir. Birincil kullanıcının yaptığı yayını etkilemeyecek şekilde, yayın yapabilen CR kullanıcısı, yayın yaptığı spektrumı değiştirmek zorunda kaldığında, müsait spektrumları sezilmektedir ve müsait spektrumlar arasından en uygun olanı belirlenmektedir. Belirlenen yeni spektrum için CR kullanıcısının alıcı-vericisi ayarlanarak yayınına devam etmesi sağlanmaktadır (Akan vd., 2009).



Şekil 1.3. CRN mimarisi (Akyildiz vd., 2006)

Şekil 1.3'te CRN mimarisi gösterilmektedir. Birincil ağ üzerinde, lisanslı kullanıcılar ve birincil baz istasyonları bulunmaktadır. Birincil kullanıcılar, sahip oldukları lisanslı bant üzerinden, birincil baz istasyonlarına istedikleri anda erişebilirler. Birincil baz istasyonları ya da lisanslı baz istasyonları, spektrum lisansına sahip, sabit alt yapılı ağ bileşenidir. CR kullanıcıları ile spektrum paylaşmak gibi bir yeteneği bulunmamaktadır. Fakat bir CR kullanıcısının, ağa erişimi için gereken protokollere ve CR protokollerine cevap verebilmektedir. Bilişsel radyo ağlarında ise, CR kullanıcıları ve bilişsel baz istasyonu bulunmaktadır. Bilişsel radyo ağları, altyapılı ve altyapısız olarak iki farklı sistemde olabilmektedir.

Altyapılı bilişsel radyo ağları, bilişsel baz istasyonunu kullanarak CR kullanıcılarına spektrum kullanım fırsatı sunmaktadır. Altyapısız bilişsel radyo ağlarında ise, bilişsel baz istasyonu bulunmadığından, CR kullanıcıları çevrelerindeki birincil baz istasyonlarından ya da bilişsel baz istasyonlarından yararlanarak spektrum kullanabilirler.

1.1. Motivasyon ve Katkı

Bilişsel radyolar, kablosuz ağlardaki kısıtlı frekans kaynaklarını verimli bir şekilde kullanılması için önerilmişlerdir (Tang ve Li, 2016). Sürekli uygun frekans tespiti yaparak, mevcut frekansların verimli olarak kullanılması sağlanmaktadır. CR çevresiyle sürekli iletişim halinde kalmaktadır. Dinamik frekans erişimi yeteneklerini kullanarak frekansların en uygun şekilde kullanılmasını sağlamaktadır (Ahmed vd., 2014).

CRN üzerinde lisanslı ve lisanssız kullanıcıların aynı anda bulunmasına izin verilmektedir. Fakat bilişsel radyo kullanıcıları, lisanslı kullanıcıların yaptığı yayına zarar vermemelidir. Eğer CR kullanıcısı, lisanslı bir frekans üzerinden yayın yapıyorsa lisanslı kullanıcı, bu frekansı talep ettiği anda, CR kullanıcısının yayın yaptığı frekansı bırakarak müsait olan başka bir frekansa geçmesi gerekmektedir. Ağ üzerinde yapılan bu frekans değişiklikleri, CR kullanıcısının alıcı ve vericisini tekrardan ayarlamasını gerektirdiğinden, ortaya bir kanal atama maliyeti çıkarmaktadır. Bu maliyetin, minimizasyonu için geçtiğimiz yıllarda farklı meta-sezgisel algoritmalarından çözüm yöntemi olarak faydalanılmıştır. No Free Lunch (NFL) teoremine göre bir meta-sezgisel algoritma, diğer meta-sezgisel algoritmaların tamamını farklı türdeki problemlerin hepsi göz önüne alındığında, geçeceğini garanti edemez. Problemin tipinin değişmesi, algoritmanın performansını ve çözümlerinin kalitesini değiştirebilmektedir (Wolpert ve Macready, 1997), (Coşar, 2021). Bu sebeple literatüre kazandırılan her yeni meta-sezgisel algoritmanın, önce mevcut haliyle performansının değerlendirilmesi ve diğer algoritmalarla kıyasla nasıl sonuçlar ürettiğinin analiz edilmesi uygun olacaktır. İmmün Plazma algoritması (Immune Plasma algorithm – IP algorithm veya IPA), 2020 yılında literatüre kazandırılmış, tıbbi bir tedavi yöntemini referans alan, ilk meta-sezgisel algoritma olarak dikkat çekmektedir (Aslan ve Demirci, 2020).

Tez kapsamında, IP algoritmasının kanal atama problemini çözebilmesi için temel işlem adımlarını değiştirmeyen güncellemeler yapılmış ve ağ üzerinde oluşabilecek girişimleri (interference) engelleyecek bir düzenleme metoduyla desteklenmesi hedeflenmiştir. Literatürden alınan veri setindeki (Kunz, 1991) frekans kaynaklarının, ağ üzerindeki kullanıcılar tarafından verimli bir şekilde kullanılması amacıyla önerilen IPA temelli yöntemin başarımı incelenmiştir. Ayrıca IPA ile elde edilen sonuçlar, Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony - ABC) algoritması, Ateş Böceği algoritması (Firefly Algorithm - FA), Parçacık Sürü Optimizasyon (Particle Swarm Optimization - PSO) algoritması, Genetik algoritma (Genetic Algorithm - GA) ve Gri Kurt Optimizasyon (Grey Wolf Optimizer - GWO) algoritmasıyla elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

1.2. Literatür Araştırması

Bilişsel radyo ağlarında kanal atama probleminin zorluğu sebebiyle, verimli ve tamamlanma süresi performansının iyi olduğu kanal atamasını gerçekleştirmek için evrimsel yöntemler, yapay zeka, lineer programlama ve meta-sezgisel algoritmaların da bulunduğu çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır.

Lee ve Akyildiz (2010), tarafından yapılan çalışmada, spektrum bantlarının uygulama gereksinimleri değerlendirilerek bir dizi spektrum bandının belirlenmesi için spektrum karar çerçevesi önerilmiştir. Ayrıca spektrum kararını uygun bir şekilde yönetmek için zamana göre değişen CRN kapasitesine bağlı olan, dinamik bir çerçeve geliştirilmiştir. Değerlendirme sonuçları ile sistem gereksinimleri karşılanırken verimli bant genişliği kullanımı sağlanmıştır. (Le, 2012) Kısıtlı donanımına sahip CR kullanıcıları için kanal atama problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü için CR kullanıcısının, spektrumun beyaz boşluk adı verilen, müsait durumdaki spektrum kaynaklarını kullandığı varsayılarak optimal kaba kuvvet arama algoritması önerilmiş ve elde edilen sonuçları doğrulamak için sayısal sonuçlar sunulmuştur. (Dokuz, 2014) Bölge ve zamana dayalı bilişsel radyo spektrum atama probleminin çözümünde kullanılmak üzere, ABC algoritması temelli bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışmada geliştirilen yöntem, Karınca Koloni Optimizasyon (Ant Colony Algorithm - ACO) algoritması ile karşılaştırılmıştır ve iki algoritmayla da elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, ABC algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Qin vd. (2016), çok kullanıcı ve çok radyolu bilişsel radyo ağındaki kanal belirsizliği özellikleri, dikkate alınarak doğrusal olmayan

programlama optimizasyon modeli sunulmuştur. İlgilenilen problemin çözümünün kolaylaştırılması amacıyla bilişsel radyo ağlarında kanalları atamak için iletim süresini ve kanalın mevcut süresini hesaba katan bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Bu önerilen yeni sezgisel yöntemin, geleneksel yönlendirme ve klasik atama yöntemiyle karşılaştırıldığında daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bayrakdar ve Çalhan (2018), spektrum el değiştirme gecikmesini minimize etmek için müsait kanal tespitini arttırmak amacıyla, ABC algoritması tabanlı spektrum el değiştirme algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan ABC algoritmasında, arıların görev fazlarında spektrum kullanılabilirlik özelliği gözlemlenerek ikincil kullanıcılar için spektrum el değiştirme gecikmesi büyük oranda azaltılmıştır. Salameh vd. (2018), çalışmasında proaktif ve reaktif saldırı altında olan bir kanal atama problemini incelemiştir. CR kullanıcılarının, paket aktarımlarının başarı oranını en üst düzeye çıkarmayı hedefleyen, olasılık tabanlı yeni bir kanal atama algoritması geliştirilmiştir. Güvenlik, kullanılabilirlik ve kaliteye duyarlı bu yeni kanal atama algoritmasıyla, ağ performansı önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Wei ve Hu (2018), dağıtılmış bilişsel radyo ağları için adaletli ve çok kanallı atama şeması önerilmiştir. Önerilen yöntemdeki temel amaç, lisanssız kullanıcılar için en yüksek adalet seviyesine sahip kanal tahsisini gerçekleştirmektir. Şemanın kapsamlı değerlendirme sonuçları, diğer spektrum atama şemalarıyla karşılaştırıldığında daha başarılı sonuçlar vermektedir. Demirci ve Gözüpek (2019), bilişsel ağlardaki CR cihazları için kullanılan frekanstan farklı bir frekansa geçiş yaparken ortaya çıkan enerji maliyeti probleminin çözümü için polinom zamanlı bir algoritma önerilmiştir. Endüstriyel kablolu ağlarda, frekans ataması yapılırken frekans değişikliği olduğunda, ortaya çıkan enerji maliyetinin en aza indirgenmesi için frekans atama ve çizelgeleme problemi modellenmiştir. Ranjan vd. (2020), bilişsel radyolar arasında oluşan girişimi, en aza indirgeyerek sistem kapasitesini en üst düzeye çıkarmak hedeflenmiştir. Önerilen yöntemi doğrulamak için girişim endeksinin tanıtılmasıyla, bilişsel radyo ağ kapasitesinde %60 oranında bir kazanç sağlayan algoritma, kapsamlı bir şekilde kullanılmıştır. Rahim vd. (2020), bilişsel radyo ağlarında en uygun eşleşmeleri belirlemek amacıyla Gale Shapley eşleştirme teorisi kullanılmıştır. Geliştirilen teoriyle, CR kullanıcılarının ihtiyaçlarını karşılamak için en uygun kanallar seçilmiştir. Önerilen teorinin performansı, Monte-Carlo simülasyonları kullanılarak değerlendirilmiş ve diğer güncel yöntemlerle kıyaslandığında, lisanssız kullanıcı için kanal tahsisinde gelişme göstermiştir.

Qureshi ve Tekin (2020), tarafından yapılan çalışmada geliştirilen algoritma, (V-CoTS) kanal durum bilgisi olmadığında ve kanal koşulları bilinmediğinde, hız uyarlama ve fırsatçı olarak spektrumun beyaz boşluklarından faydalanma yetenekleri kullanılmaktadır. V-CoTS ile elde ettikleri değerlendirme sonuçları, modern modellerin sonuçları ile kıyaslandığında, daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. (Raj, 2020) Dinamik spektrum tahsis modeline sahip olan bir oyun teorisi tabanlı CRN önerilmiştir. Önerilen teori için Artan ağırlıklar-Azalan oranlar (IW-DR) algoritması kullanılmıştır. Ayrıca spektrum tahsis verimliliğini ve ağın yeniden yapılandırılması için regresyon modellerinden faydalanılmıştır. Latif vd. (2021), kanal atamasındaki zorluğu aşmak amacıyla, bir tür biyolojik evrim tekniğine dayanan, yeni bir evrimsel optimizasyon algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma, onarım süreci ile Diferansiyel Gelişime Dayalı Parçacık Sürü Optimizasyonu (DEPSO) olarak adlandırılmıştır. Salameh ve Khasawneh (2021) spektrum kullanımının zamanla değişen yapısı incelenerek kaynak ve hedef çifti arasındaki paket teslim oranını en üst seviyeye çıkarmaya çalışan bir yönlendirme şeması sunulmuştur. Önerilen bu yönlendirme şemasını üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Uygulanabilir rotayı belirlemek için yol keşfi yapılmıştır. Belirlenen yol boyunca kanalları atamak için kanal seçimi gerçekleştirilmiştir. En yüksek yolu seçmek için yol seçimi aşaması kullanılmıştır. Geliştirilen bu yeni şema ile spektrum kullanılabilirliğinin farkında olmanın performansı arttırabileceği gösterilmiştir. Sanka vd. (2021), kanal atama probleminin çözümü için Brownian tabanlı Dragonfly algoritması kullanılmıştır. Chen vd. (2018), CR kullanıcıları için maksimum-toplam ve maksimum-minimum çıktılarını, lisanslı kullanıcılar üzerindeki kısıtlamalarla, ortak kanal ve güç tahsis problemlerini optimize etmek amaçlanmıştır. Maksimum-toplam problemi için maksimum ağırlıklı eşleştirmeye dayalı toplam verim maksimizasyon (STM) algoritması önerilmiştir. Maksimum-minimum problemi için optimal röle ataması (ORA) tabanlı yöntem önerilmiştir. CR kullanıcılarına yenilemeli olarak kanallar atamak için polinom zamanlı, optimal kanal atama algoritması (OCAA) geliştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları ile geliştirilen algoritmaların etkinlikleri gösterilmiştir. Tlouyamma ve Velepini (2020), tarafından yapılan çalışmada, CRN üzerinde lisanslı kullanıcıların yayın yapma olasılığının olduğu kanallar değerlendirilerek, CR kullanıcılarının yayın yapacağı kanallara karar verilmiştir. Bu geliştirilen yaklaşımla, gecikmeler büyük ölçüde azaltılmıştır. Devi vd. (2021), atıl durumdaki kanalları daha verimli kullanmak amacıyla, bilişsel radyo

ağında kanal ataması için açık arttırmayı model alan bir yöntem sunulmuştur. Bu açık arttırma yönteminde müzayedeci, CR kullanıcılarından toplanan tekliflere göre, en yüksek teklifi veren CR kullanıcıyı belirleyip müsait durumdaki kanalların kullanılması sağlanmıştır. Yılmazel ve Inanç (2021), tarafından yapay zeka tekniklerini kullanılarak, CR kullanıcılarına frekans tahsisi sağlanmıştır. Sistemin başlangıç değerleri, giriş parametresi verilerek, kanal tespit olasılığı incelenmiştir. Geliştirdikleri bu yeni yöntemle, boş frekansların sürekli taranması sağlanmıştır ve birincil kullanıcıları etkilemeden doğru bir biçimde kanal ataması yapılmıştır. Jothiraj vd. (2021), Dragonfly optimizasyon algoritması ve uyarlanabilir eşik süreci birlikte kullanılarak, CRN için optimize edilmiş verimli bir spektrum atama tekniği geliştirilmiştir. Önerdikleri teknik, PSO ve LSVM gibi geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında daha iyi performans göstermiştir. Agarwal vd. (2021), geliştirilmiş ABC algoritmasıyla, bilişsel ağdaki birincil kullanıcıların yayın yaptıkları kanallar belirlenmiştir. Kullanılan kanalların belirlenmesi avantajından faydalanan CR kullanıcıları için kanal tahsisinin daha doğru yapılması sağlanmış ve ağın verimliliği arttırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kanal Atama Problemi

Kablosuz ağlarda verimli bir şekilde frekans kullanımı için dinamik kanal atama çözümleri tasarlanmalıdır. Dinamik kanal atama çözümleri tasarlanırken çevresel koşullara uygun stratejiler geliştirmek önemlidir. Bu doğrultuda PU ve CR kullanıcılarının yayın kaliteleri korunmalıdır. PU ve CR kullanıcıları arasında frekans girişimi olmamalıdır. Ayrıca frekans kullanımı sırasında oluşan maliyetlere de dikkat edilmelidir (He ve Zhang, 2012).

Kanal atama problemi, CR kullanıcılarına müsait frekanslar içerisinde, en uygun frekansın kullanım için atanmasıdır. PU kullanıcılarının varlığı ilgili problemi zorlaştırmaktadır. Lisanslı kullanıcılar, lisanslı bir frekansa sahip olduğundan, hiçbir kısıtlama olmadan herhangi bir zaman diliminde, kendi lisanslı frekansı üzerinden yayın yapmaya başlayabilir. Eğer lisanslı kullanıcının lisanslı frekansında herhangi bir CR kullanıcısı yayın yapıyorsa, CR kullanıcısı, kullandığı frekansı bırakarak müsait başka bir frekans ile değiştirmelidir. CR kullanıcısı için frekans seçimi yapılırken seçilen frekansın diğer CR kullanıcıları tarafından da kullanmaması gerekmektedir. Eğer CR kullanıcıları, aynı zaman diliminde, aynı frekansı kullanırsa, frekans girişimi gerçekleşir ve CR kullanıcıları yayın yapamazlar. Bir CR kullanıcısının yayın yaptığı frekansı değiştirmek, kullanıcıya atanan yeni frekansa ayarlanmasını gerektirdiğinden, donanımsal frekans gecikmesine ve yayın kalitesinin azalmasına sebep olmaktadır (Demirci ve Gözüpek, 2019).

Kanal atama problemindeki temel amaç, birden fazla CR kullanıcısının yayın taleplerini en iyi şekilde değerlendirerek ve olası girişimleri kontrol ederek ağ üzerindeki frekans kullanımını en üst düzeye çıkarmaktır. Kanal atama problemi çözülürken ağ üzerindeki CR kullanıcılarına yapılan frekans atamalarının doğruluğunu tespit etmek ve göstermek için Eşitlik 2.1 ile hesaplanabilen skordan faydalanılmıştır.

$$C_k = \sum_{i=1}^{CR} \sum_{j=1}^{N-1} f_k[i][j] \quad (2.1)$$

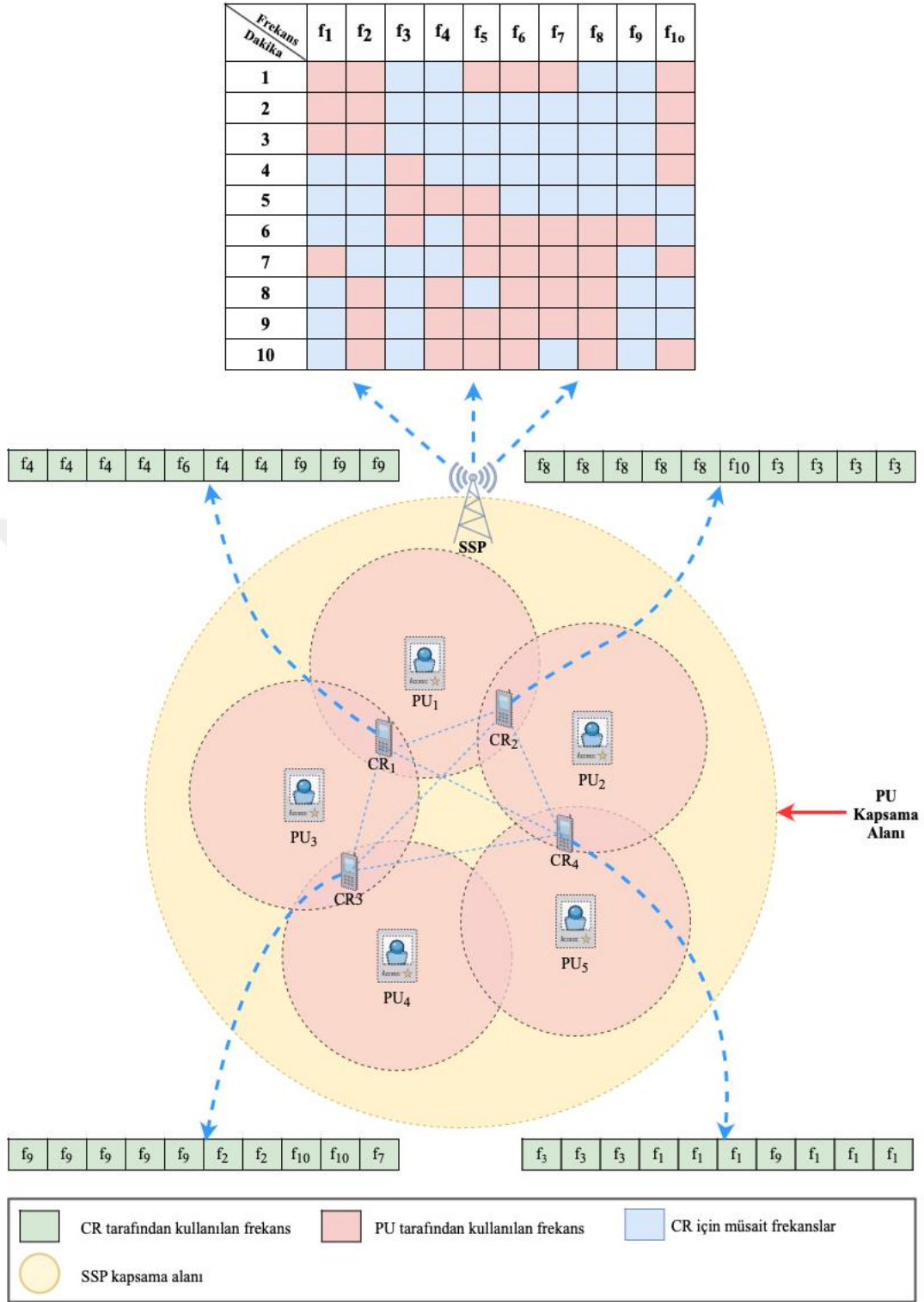
Eşitlik 2.1 ile gösterilen matematiksel modelde CR değeri, ağ üzerindeki bilişsel radyo kullanıcı sayısına karşılık gelmektedir. N değeri, yayın yapılabilen

dakikaları veya baz istasyonlarını ifade etmektedir. $f_k[i][j]$ değerinin belirlenme yöntemi Algoritma 1. üzerinde gösterilmiştir.

Algoritma 1. Uygunluk fonksiyonu hesaplanması

```
1  // CR: Ağdaki bilişsel radyo sayısı
2  // N: Yayın yapılabilen dakika veya baz istasyon sayısı
3  // toplam: Uygunluk fonksiyonu sonucu, başlangıçta 0 belirlenir
4
5  for  $i \leftarrow 0 \dots CR$  do
6      for  $j \leftarrow 0 \dots N$  do
7          if  $f_k[i][j] \neq f_k[i][j + 1]$  then
8               $toplam \leftarrow toplam + 1$ 
9          end if
10      end for
11 end for
12 return toplam
```

Algoritma 1'deki $f_k[i][j]$ değeri hesaplanırken her bir CR için N parametresi kadar dakika veya baz istasyonu dikkate alınmıştır. $f_k[i][j]$ her bir çözümün i 'nci CR deki ve j 'inci zamandaki frekansına denk gelmektedir. Eğer j 'inci dakikadaki frekans, $j+1$ 'inci dakikadaki frekans değerinden farklıysa, $f_k[i][j]$ değeri 1 olarak belirlenmektedir. Aksi halde ise, frekans değişikliği olmadığından, frekans değiştirme maliyeti oluşmamaktadır ve 0 olarak belirlenmektedir. Tüm döngülerin tamamlanması ile ortaya çıkan $toplam$ değeri ise, frekans değiştirme maliyetini vermektedir.



Şekil 2.1. Tasarlanan bilişsel radyo ağ modeli (Demirci ve Gözüpek, 2019)

Kanal atama probleminin çözümü için önerilen CRN modeli Şekil 2.1 üzerinde gösterilmiştir. Model üzerinde lisanslı kullanıcılar ve dört adet CR bulunmaktadır. CR kullanıcıları, PU kullanıcılarının kullanmadığı lisanslı frekansları kullanarak on dakika boyunca yayın yapmışlardır. Ayrıca CR kullanıcıları arasında da ortak frekans

kullanımı olmamasına dikkat edilmiştir. Şekilde 2.1’de, CR kullanıcıları için frekans kullanımları dikkate alındığında, CR₁ kullanıcısı için f_4 frekansından f_6 , f_6 frekansından f_4 , f_4 frekansından f_9 frekansına geçilerek 3 kez frekans değişikliği yapılmıştır. CR₂ kullanıcısı için f_8 frekansından f_{10} , f_{10} frekansından f_3 frekansına geçilerek 2 frekans değişimi yapılmıştır. CR₃ kullanıcısı için f_9 frekansından f_2 frekansına, f_2 frekansından f_{10} frekansına, f_{10} frekansından f_7 frekansına geçilerek 3 frekans değişimi yapılmıştır. CR₄ kullanıcısı için f_3 frekansından f_1 , f_1 frekansından f_9 , f_9 frekansından tekrar f_1 frekansına geçilmiştir. CR₄ kullanıcısı, toplamda 3 frekans değişikliği yapmıştır. Eşitlik 2.1’de açıklanan uygunluk fonksiyonu ile hesaplama yapıldığında, toplam frekans değiştirme maliyeti 3, 2, 3 ve 3 değerlerinin toplanmasıyla 11 olarak hesaplanmaktadır.

Problemin çözümü için geliştirilen iki farklı IPA metodu, öncelikle kendi arasında maliyet ve çalışma süreleri dikkate alınarak kıyaslanmıştır. IPA temelli yöntemlerin performansını daha iyi analiz etmek amacıyla ABC, FA, PSO, GA ve GWO gibi meta-sezgisel algoritmalar, kanal atama probleminin çözümü için çalıştırılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Kıyaslama işlemleri gerçek bir veri seti Tablo Ek 1 kullanılarak (Kunz, 1991) gerçekleştirilmiştir.

2.2. Düzenleme Metodu

Ağdaki CR kullanıcıları aynı zaman diliminde, farklı frekansı kullanmalılardır. Bir CR kullanıcısı, bir frekans üzerinden yayın yapıyorsa, diğer CR kullanıcılarının bu frekansa erişememeleri gerekmektedir. Eğer CR kullanıcısı tarafından kullanılan bir frekansa, PU kullanıcısı haricinde bir başka kullanıcı erişmeye çalışırsa, ağ üzerinde girişim olarak adlandırılan durum meydana gelir ve bozulmalar oluşur. Bu durum, kanal atama problemini daha karmaşık bir hale getirmektedir. Bu karmaşıklığı çözmek için bir düzenleme metodu önerilmiştir. Düzenleme metodu, kanal atama problemini çözen algoritmalara yardımcı olarak CR kullanıcıları arasında oluşabilecek girişimleri kontrol etmektedir ve tespit etmesi durumunda girişimi düzenlemektedir. İşlem adımları Algoritma 2’de gösterilmiştir.

Algoritma 2. Düzenleme Metodu

```
1  // TS: toplam zaman dilimi veya baz istasyonu sayısı
2  // CR: lisanssız kullanıcı sayısı
3  // B: her bir CR kullanıcısının TS boyunca kullandığı frekans değer dizisi
4  // F: dakikaya veya baz istasyonuna göre müsait frekanslar dizisi
5  // F_T: bulunulan dakika CR kullanıcıları tarafından kullanılan frekanslar dizisi
6  // F_A: bulunulan dakika CR kullanıcıları tarafından kullanılmayan frekanslar dizisi
7  // c: kullanılan müsait frekans sırasını takip eder
8  for i ← 0 ... TS do
9      F = müsaitFrekanslariGetir(i) // i'inci baz istasyonundaki müsait frekanslar
10     for j ← 0 ... CR do
11         F_T.add(B[j][i])
12     end for
13     for b ← 0 ... lenght(F) do
14         if F[b] not in F_T then
15             F_A.add(F[b])
16         end if
17     end for
18     c = 0
19     for j ← 0 ... CR do
20         for k ← 0 ... CR do
21             if j != k then
22                 if B[j][i] = B[k][i] then
23                     M[k][i] ← F_A[c]
24                     c ← c + 1
25                 end if
26             end if
27         end for
28     end for
29     F_T.clear()
30     F_A.clear()
31 end for
32 return M
```

Algoritma 2 ile sözde kodu verilen düzenleme metodunda, 10. satırda veri setindeki i 'nci zaman dilimindeki müsait frekanslar F dizisine aktarılmıştır. F dizisi içerisinde, CR kullanıcıları tarafından kullanılan frekanslar, F_T dizisine aktarılmıştır. F dizisi ve F_T dizisi kıyaslanarak, CR kullanıcıları tarafından da

kullanılmayan frekanslar belirlenerek F_A dizisi oluşturulmuştur. CR kullanıcıları için i 'nci zaman diliminde, her bir CR kullanıcısı için kullanılan frekanslar karşılaştırılmıştır. Eğer ortak frekans ataması tespit edilirse, F dizisi içerisinde, c sayacı değerine göre seçim yapılarak frekans girişimi ortadan kaldırılmıştır ve c değeri 1 arttırılmıştır. i 'nci dakikadan $i+1$ 'inci dakikaya geçilirken F_T ve F_A dizileri temizlenmiştir. Tüm dakikalar için kontrol yapıldıktan sonra, M değerine karşılık gelen aday çözümün düzenlenmiş hali elde edilmiştir.

2.3. Kontrol Metodu

CRN üzerinde, kanal ataması yapılırken yanlış frekans ataması ya da bir CR tarafından kullanılan frekansın, başka bir CR kullanıcısına atanması, ağı olumsuz etkilemektedir. Bu durum, lisanslı ve lisanssız tüm kullanıcıları, yayın yapamaz hale getirebilir. Bu ihtimalin aşılması için, frekans kontrol metodu önerilmiştir. Kontrol algoritması, CR kullanıcılarının tüm frekans atamalarını kontrol ederek hata payını ortadan kaldırmak için geliştirilmiş ve Algoritma 3 ile gösterilmiştir.

Algoritma 3. Frekans kontrol metodu

```
1  // B: CR kullanıcılarına atanan frekanslar dizisi
2  // TS: Yayın süresi veya baz istasyonu
3  // CR: Lisanssız kullanıcı sayısı
4  // DS: müsait frekanslar veri seti
5
6  for i ← 0...TS do
7    for j ← 0...CR do
8      if B[j][i] not in DS[i] then
9        print("Hatalı Frekans Kullanımı: " CR: j, TS: i)
10      end if
11      for x ← 0...CR do
12        if j != x then
13          if M[j][i] == B[x][i] then
14            print("Aynı Frekans Kullanımı: "CR: j, CR2: x TS: i)
15          end if
16        end if
17      end for
18    end for
19  end for
```

Algoritma 3 ile, tüm zaman dilimleri için her bir CR kullanıcılarına atanan frekansın, satır 8’de müsaitliği kontrol edilmiştir. Eğer hata varsa, hatalı frekans kullanma girişiminde bulunan CR ve zaman dilimi yazdırılmıştır. Satır 13’te CR kullanıcıları için zaman dilimine göre ortak frekans kullanımı kontrol edilmiştir. Eğer ortak frekans kullanımı tespit edilirse, ortak frekansı kullanan CR kullanıcıları ve zaman dilimi veya baz istasyonu yazdırılmaktadır.

3. YÖNTEM

Meta-sezgiseller işletme, mühendislik, ekonomi ve bilimin çeşitleri alanlarındaki önemli uygulamalara, kaba kuvvet yöntemlere göre daha kısa çalışma zamanlarında, yüksek kalitede çözümler sunan yöntemlerdir (Voß, 2000). Bu yöntemler ile optimizasyon problemleri için uygulanabilir çözümler elde edilebilir. Meta-sezgisel yöntemler, kısıtlı zaman dilimi veya durdurma kriteri kontrolüyle birlikte, iyi çözümler bulmaya çalıştığından, optimum sonucu garanti etmemektedir. Problemlere uyarlanabilirliği açısından esnek ve tek bir probleme bağlı değildir. Karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan bu yöntemler, genellikle doğadaki canlıları, canlı gruplarını veya doğal metaforları taklit eder. Örnek olarak bağışıklık sistemi, arı kolonisi, parçacık sürüsü, ateş böcekleri, türlerin evrimi ve gri kurt sürüleri gibi yöntemler gösterilebilir.

3.1. İmmün Plazma Algoritması

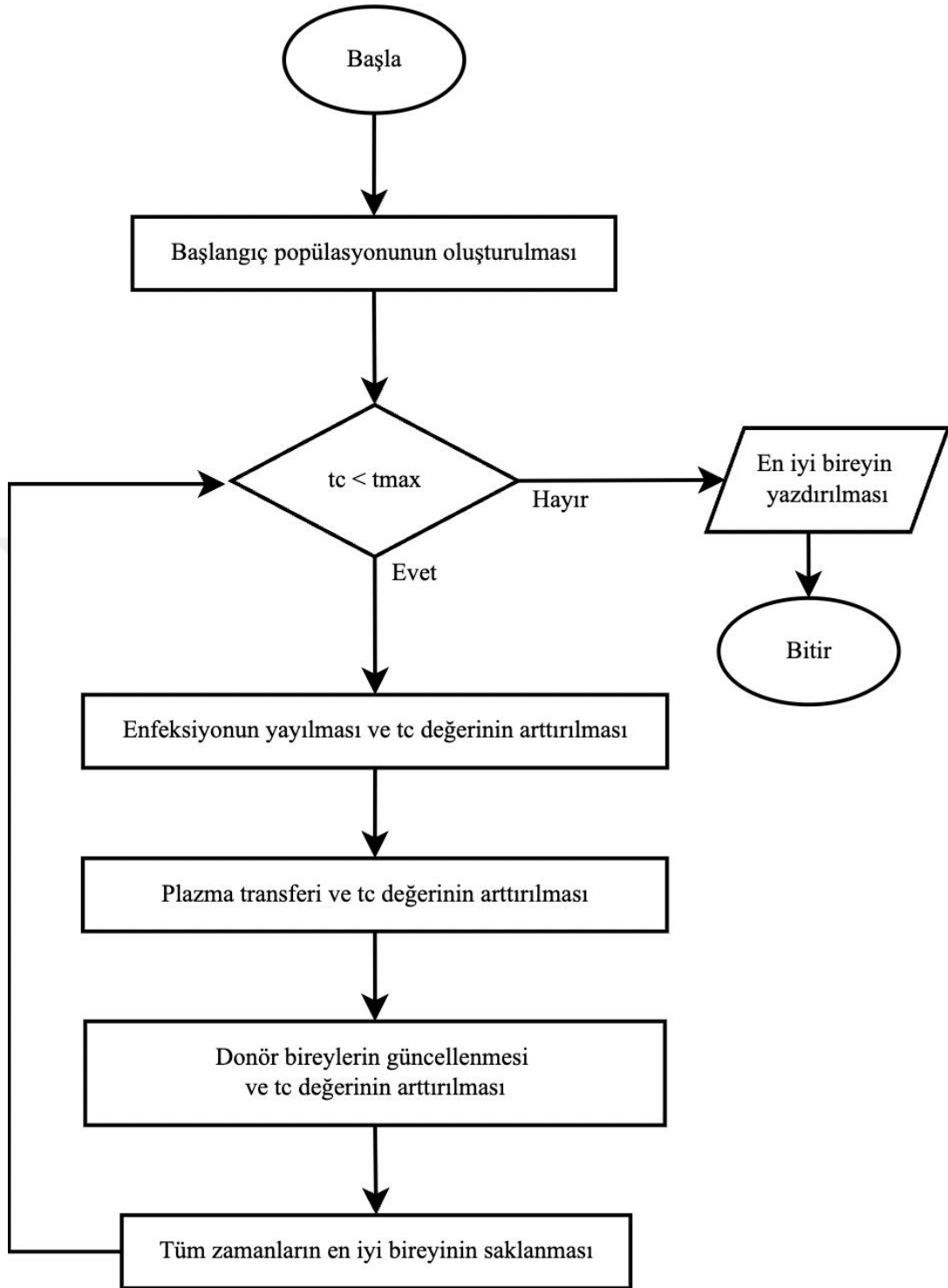
Bağışıklık sistemi, vücudu enfeksiyonlara karşı savunan önemli görevlere sahip hücre ve moleküllerin birleşimidir (Delves ve Riott, 2000). Başlayan bir enfeksiyona karşı antikor üreterek yanıt verir, enfeksiyona neden olan yabancı organizmaları yok eder ve canlıyı korur (U.S. Department of Health and Human Services, 2007). Antikorların B ve T hücreleri kullanılarak sentezlenebilmesi, bağışıklık sisteminin enfeksiyona karşı koymak için işleme aldığı mekanizmalardandır. Enfeksiyona sebep olan bileşenlere bağlanarak diğer sağlıklı hücreleri etkilemelerine engel olmaktadır. Ancak bireyin bağışıklık sisteminin ne kadar güçlü veya zayıf olduğuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Eğer bireyin bağışıklık sistemi zayıfsa, antikor sentezi yetersiz kalabilir ve enfeksiyona neden olan yabancı organizma bireyden uzaklaştırılmaz. Böyle bir ihtimal söz konusu olduğu zaman, immün plazma tedavisi bireyi enfeksiyona karşı korumak için kullanılabilir. İmmün plazma tedavisi, enfeksiyonu daha önce atlatmış bireylerin kanlarının veya kanların plazma olan kısmının hasta bireylere aktararak tedavi edilmesidir (Aslan ve Demirci, 2020).

İmmün Plazma algoritması, plazma tedavisinin bahsedilen özellikleri temel dayanak noktası alınarak oluşturulmuş popülasyon temelli bir algoritmadır. IP algoritmasında, her bir birey ilgili problemin çözümünü temsil etmektedir. Popülasyondaki bireylerin bağışıklık seviyeleri, uygunluk fonksiyonuyla hesaplanan

kalite ile tanımlanmıştır. Kalitesi düşük bireyler alıcı, yüksek olan bireyler ise donör olarak belirlenir. Belirlenen durdurma kriteri sağlanana kadar enfeksiyonun yayılması, bağışıklık seviyelerinin hesaplanması, bağışıklık seviyelerine göre donör ve alıcı bireylerin seçilmesi ve son olarak plazma tedavisinin başlatılması aşamaları tekrar ederek problemin en iyi çözümü elde edilmeye çalışılmıştır (Aslan ve Demirci, 2020).

Tez kapsamında, kanal atama probleminin çözümü için önerilen yöntem, IP algoritmasıdır. IP algoritmasının temel işlem adımları, Şekil 3.1'deki akış şemasında sunulmaktadır.





Şekil 3.1. İmmün Plazma algoritması akış şeması

Tez kapsamında kullanılan, IP algoritmasının temel işlem adımlarının sözde kodu ayrıntılı bir şekilde Algoritma 4 ile gösterilmiştir.

Algoritma 4. IPA temel işlem adımları

```
1 // PS: popülasyon boyutu
2 // NoR: alıcı sayısı
3 // NoD: donör sayısı
4 //  $t_c$ : Başlangıç değeri  $T = PS$  olarak belirlenir
5 //  $t_m$ : maksimum iterasyon sayısı
6 //  $x_{best}$ : Popülasyondaki en iyi birey
7 while  $t_c < t_m$  do
8     for  $k \leftarrow PS$  do // Enfeksiyonun yayılması
9         if  $t_c < t_m$  then
10              $x_k^{inf} \leftarrow x_k + rand(-1,1)(x_k - x_m)$ 
11              $t_c \leftarrow t_c + 1$ 
12             if  $f(x_k^{inf}) < f(x_k)$ 
13                  $x_k \leftarrow x_k^{inf}$ 
14                 if  $f(x_{best}) > f(x_k)$  then
15                      $x_{best} \leftarrow x_k$ 
16                 end if
17             end if
18         end if
19     end for
20 // Kritik bireyler için plazma transferi
21 //  $doz_{kontrol}[1...NoR]$ : her bir değer için 1 atanır
22 //  $d_{indeks}[1...NoD]$ : donörlerin indekslerini al
23 //  $r_{indeks}[1...NoR]$ : alıcıların indekslerini al
24 //  $tedavi_{kontrol}[1...NoR]$ : her bir değer için 1 atanır
25 for  $i \leftarrow 1...NoR$  do
26      $k \leftarrow r_{indeks}[i]$ 
27      $m \leftarrow a$  //  $d_{indeks}$  'ten rasgele seçilir
28      $x_k^{rcv}, x_m^{dnr}$  //  $k$ . ve  $m$ . bireyler popülasyon içerisinde seçilerek atanır
29     while  $doz_{kontrol}[i] == 1$  do
30         if  $t_c < t_m$  then
31              $x_k^{rcv-p} = x_k^{rcv} + rand(-1,1)(x_k^{rcv} - x_m^{dnr})$ 
32              $t_c \leftarrow t_c + 1$ 
33             if  $doz_{kontrol}[i] == 1$  then
34                 if  $f(x_k^{rcv-p}) < f(x_m^{dnr})$  then
35                      $doz_{kontrol}[i] \leftarrow doz_{kontrol}[i] + 1$ 
36                      $x_k^{rcv} \leftarrow x_k^{rcv-p}$ 
37                 else
38                      $x_k^{rcv} \leftarrow x_k^{rcv-p}$ 
39                      $tedavi_{kontrol}[i] \leftarrow 0$ 
40                 end if
41             else
```

```

42         if  $f(x_k^{rcv-p}) < f(x_m^{rcv})$  then
43              $x_k^{rcv} \leftarrow x_k^{rcv-p}$ 
44         else
45              $tedavi_{kontrol}[i] \leftarrow 0$ 
46         end if
47     end if
48     if  $f(x_{best}) > f(x_k^{rcv})$  then
49          $x_{best} \leftarrow x_k^{rcv}$ 
50     end if
51 end while
52 end for
53 for  $i \leftarrow 1 \dots NoD$  do // Donör güncellemesi
54     if  $t_c < t_m$  then
55          $t_c \leftarrow t_c + 1$ 
56          $x_m^{dnr}$  m. birey popülasyon içerisinde seçilerek atanır
57         if  $(t_c/t_m) > rand(0,1)$ 
58              $x_m^{dnr} \leftarrow x_m^{dnr} + rand(-1,1)x_m^{dnr}$ 
59         else
60              $x_k = x_{cj}^{max} + rand(0,1)(x_{cj}^{max} - x_{cj}^{min})$ 
61         end if
62         if  $f(x_{best}) > f(x_k^{rcv})$  then
63              $x_{best} \leftarrow x_m^{dnr}$ 
64         end if
65     end if
66 end for
67 end while

```

3.1.1. Popülasyonun Oluşturulması

Diğer meta-sezgisel yöntemler gibi IP algoritmasının da ilk adımı, başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıdır. Popülasyon büyüklüğü PS, parametre sayısı D ve CR sayısı A olan bir problem için x_k bireyinin c 'inci parametresinin j 'inci değeri, Eşitlik 3.1 kullanılarak oluşturulur.

$$x_{kcj} = round \left(x_{cj}^{min} + rand(0,1)(x_{cj}^{max} - x_{cj}^{min}) \right) \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1 üzerinde x_{cj}^{max} ve x_{cj}^{min} x_k bireyinin c 'inci parametresinin j 'inci değerinin alabileceği en büyük ve en küçük değerleri ifade etmektedir. $rand(0,1)$ 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı üretmektedir. Kanal atama probleminin çözümü için elde edilen sonuç, $round$ kullanılarak aşağıya veya yukarıya yuvarlanarak tam sayı

haline getirilmiştir. Elde edilen tam sayı için frekans müsaitlik kontrolü yapılmıştır. Sonuca karşılık gelen frekans müsaitse, herhangi bir işlem uygulanmadan kullanılmıştır. Eğer sonuca karşılık gelen frekans müsait değilse, yani bir PU tarafından kullanılıyorsa, Algoritma 5 ile gösterildiği üzere frekans ataması gerçekleştirilmiştir.

Algoritma 5. Frekans seçim metodu

```

1  // i: ilgili baz istasyonu
2  // T_A: i'nci baz istasyonundaki müsait frekanslar dizisi
3  // D_S: veri seti dizisi
4  // S: seçilen frekans konumu
5
6  for j ← 0...length(D_S[i]) do
7      if D_S[i][j] == 0 then
8          T_A.add(D_S[i][j])
9      end if
10 end for
11 S ← random_int(0, length(T_A))
12 return T_A[S]

```

Algoritma 5, parametre olarak gönderilen baz istasyonundaki müsait frekansları belirler. Başlangıç değeri 0 ile seçilen frekans dizisinin boyutu dikkate alınarak ve müsait frekansları içeren bir dizi oluşturulur. Bu dizi içerisindeki müsait frekanslar arasından, rastgele bir seçim yapılarak seçilecek frekansın dizi içerisindeki konumu belirlenir ve bu değer x_k bireyinin c 'inci parametresinin j 'inci değerine atanır. Oluşturulan bireyler, Algoritma 2 üzerinde açıklanan metot kullanılarak CR kullanıcıları arasında oluşabilecek frekans girişimleri kontrol edilerek düzenlenir.

3.1.2. Enfeksiyonun Yayılması ve Bağışıklık Cevabı

IP algoritması, bu aşamada enfekte olan bir bireyin, başka bir bireyi nasıl etkilediğini ve bağışıklık sisteminin nasıl bir yanıt verdiğini araştırmak için enfeksiyonun popülasyondaki bireyler arasında yayılmasını sağlar. Enfeksiyonu popülasyon içerisinde yaymak için kullanılan model, algoritmanın araştırma uzayında yeni çözümler keşfetmesine (exploration) olanak sağlayacak ve araştırma

uzayının farklı bölgelerine geçişini kolaylaştıracaktır (Aslan ve Demirci, 2020). Enfeksiyonun yayılmasını IPA, Eşitlik 3.2 ile gösterilen model ile gerçekleştirir.

$$x_{kcj}^{inf} = \text{round} \left(x_{kcj} + \text{rand}(-1,1)(x_{kcj} - x_{mcj}) \right) \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2 ile gösterilen matematiksel modelde x_{kcj}^{inf} değeri, PS boyutlu popülasyon içerisinde x_m bireyi ile enfekte edilen x_k bireyinin rastgele seçilen c 'inci parametresinin rastgele seçilen j 'inci değeridir. x_m bireyi seçilirken x_k bireyinden farklı olacak şekilde, PS boyutlu popülasyon içerisinde rastgele olarak seçim yapılmaktadır. Enfeksiyon sonrasında, sadece rastgele seçim yapılan c 'inci parametrenin rastgele seçilen j 'inci değeri etkilenmelidir. Bireyin diğer parametrelerinin değerleri, enfeksiyon öncesi değerleri ile aynı olmalıdır. $\text{rand}(-1,1)$ -1 ile +1 arasında rastgele bir sayı üretmektedir. Eşitlik 3.2 ile elde edilen sonuç, kanal atama probleminin çözümü için tam sayıya çevrilmiştir. Tam sayıya çevrilen sonuca limit kontrolü yapılmaktadır. Eğer limit değerlerini aşırsa, aşılacak limit değeriyle güncellenmektedir. Tüm işlemlerin ve kontrollerin tamamlanmasıyla elde edilen değere karşılık gelen frekans, müsait değilse x_{kcj}^{inf} değeri enfeksiyon önceki değeri ile güncellenir ve değişiklik yapılmaz. Eğer frekans müsaitse, frekans değeri, diğer CR kullanıcıları tarafından kullanılma durumu kontrol edilmelidir. IP algoritması, frekans kontrol adımı, eğer Algoritma 6 ile gösterilen metodu kullanılırsa Swap IPA, Algoritma 7 ile açıklanan metodu kullanırsa, Fix IPA olarak adlandırılmıştır.

Algoritma 6. CR kullanıcıları yer değiştirme metodu

```
1 //  $x_{kcj}$ : enfeksiyon öncesi değer
2 // CR: lisanssız kullanıcı sayısı
3 //  $x_{kcj}^{inf}$ : enfeksiyon sonrası değer
4 // c: rastgele seçilen c parametresi
5 // j: rastgele seçilen c parametresinin rastgele seçilen j'inci değeri
6 // F_A: j'inci değerdeki müsait frekanslar
7 //  $x_k$ : enfeksiyon öncesi birey
8
9 if  $x_{kcj} == x_{kcj}^{inf}$  then
10     return  $x_k$ 
11 end if
12  $F\_A \leftarrow \text{get\_available\_frequency}(j)$ 
13 for  $x \leftarrow 0 \dots \text{lenght}(F\_A)$  do
14     if  $x_{kcj}^{inf} == F\_A[x]$  then
15         for  $y \leftarrow 0 \dots CR$  do
16             if  $x_{kcj}^{inf} == x_k[y][j]$  then
17                  $x_k[y][j] \leftarrow x_{kcj}$ 
18                  $x_k[c][j] \leftarrow x_{kcj}^{inf}$ 
19                 return  $x_k$ 
20             end if
21         end for
22     end for
23      $x_k[c][j] \leftarrow x_{kcj}^{inf}$ 
24     return  $x_k$ 
25 end if
26 end for
27 return  $x_k$ 
```

Algoritma 6 ile gösterilen metot, ilk olarak enfeksiyon öncesi ve sonrası elde edilen sonucun karşılık geldiği frekansları karşılaştırmaktadır. Eğer aynıysa, devam edilmeden sonraki işlem adımlarına geçilmesi gerekmektedir. Aksi durumda F_A değişkenine müsait frekanslar dizisi aktarılmıştır. F_A dizisindeki tüm frekanslar, enfekte değerin karşılık geldiği frekans ile kıyaslanmıştır. Frekans başka bir CR

tarafından kullanılıyorsa, enfekte edilen CR ile enfekte olmayan CR ile takas işlemi uygulanarak enfekte x_k bireyi belirlenmiştir. Aksi durumda, müsait olan frekans, müsait kabul edilerek $x_k[C][J]$ değeri x_{kcj}^{inf} değeri ile güncellenmiştir. Frekans müsait değilse x_k bireyinde değişiklik yapılmamıştır.

Algoritma 7. CR kullanıcıları düzenleme metodu

```

1  //  $x_{kcj}$ : enfeksiyon öncesi değer
2  // CR: lisanssız kullanıcı sayısı
3  //  $x_{kcj}^{inf}$ : enfeksiyon sonrası değer
4  // c: rastgele seçilen c parametresi
5  // j: rastgele seçilen c parametresinin rastgele seçilen j'inci değeri
6  // F_A: j'inci değerdeki müsait frekanslar
7  //  $x_k$ : enfeksiyon öncesi birey
8  //DF: düzenleme metodu (Algoritma 2)
9
10 if  $x_{kcj} == x_{kcj}^{inf}$  then
11     return  $x_k$ 
12 end if
13 F_A  $\leftarrow$  get_available_frequency(j)
14 for x  $\leftarrow$  0...length(F_A) do
15     if  $x_{kcj}^{inf} == F\_A[x]$  then
16          $x_k[c][j] \leftarrow x_{kcj}^{inf}$ 
17     return DF( $x_k$ )
18     end if
19 end for
20 end for
21 return  $x_k$ 

```

Algoritma 7’de, Algoritma 6’ya benzer bir şekilde frekansın enfeksiyon öncesi ve sonrası değerlerinin aynı olma durumu kontrol edilmektedir. Bu kontrol, CR kullanıcıları arasında gereksiz yere frekans müsaitlik kontrolünün gerçekleştirilmesi ve Algoritma 2’deki düzenleme metodu çalıştırılırken oluşacak olan, tüm frekansların kontrol işlemlerinden kaçınmak için önemlidir. Eğer enfeksiyon öncesi frekans değerinden farklı bir değer elde edilirse, frekansın müsaitliği kontrol edilmiştir ve müsaitse Algoritma 2’deki düzenleme metodu kullanılarak olası frekans

girişimlerinin önüne geçilmiştir. Algoritma 6 ve Algoritma 7'deki bu farklı frekans kontrol işlemi, IP algoritması temelli iki farklı yöntemin kullanılmasını mümkün kılmıştır.

IP algoritmasıyla uygunluk fonksiyonu f olan bir minimizasyon problemi çözülmektedir. x_k bireyi için $f(x_k)$ enfeksiyon öncesi, $f(x_k^{inf})$ ise enfeksiyon sonrası bağışıklık değeri ile ifade edilir. Eşitlik 3.3 ile gösterilen matematiksel model ile bağışıklık hafızası güncellenir.

$$x_{kcj} = \begin{cases} x_{kcj}^{inf}; & \text{if } (f(x_k^{inf}) < f(x_k)) \\ x_{kcj}; & \text{if } (f(x_k^{inf}) \geq f(x_k)) \end{cases} \quad (3.3)$$

Eşitlik 2.1 ile gösterilen uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirme yapıldığında, $f(x_k^{inf})$ değeriyle $f(x_k)$ değerinden daha küçük bir sonuç elde edilirse, enfekte bireyin bağışıklık cevabı daha yüksek kabul edilerek x_{kcj} değeri x_{kcj}^{inf} ile güncellenmektedir. Aksi durumda ise x_{kcj} değeri güncellenmeden bırakılmaktadır.

3.1.3. Plazma Transferi

PS boyutlu popülasyon içerisinde, enfeksiyonun yayılıp bütün bireyleri etkilemesinin ardından IP algoritması, bireylerin bağışıklık cevaplarına göre hangisi veya hangilerinin donör ve alıcı birey olarak seçileceğini belirler (Aslan ve Demirci, 2020). Donör bireylerin sayısı NoD, alıcı bireylerin sayısı ise NoR parametrelerine atanan değerler ile belirlenmektedir. NoD birey ya da bireyler belirlenirken popülasyon içerisinde bağışıklık cevapları en iyi olan bireyler arasından seçim yapılmaktadır. NoR birey ya da bireyler seçilirken NoD bireylerin aksine, bağışıklık seviyesi en kötü olan bireyler arasından seçilmiştir. Algoritmanın bu aşamasında, enfeksiyonu kısa süre önce atlatan donör birey ya da bireylerden alınan plazma ya da plazmaların, kritik birey ya da bireylere aktarılması sağlanarak plazma transferi gerçekleştirilir. Bu sayede, donör birey ve bu bireyle temsil edilen çözümün komşuluğu araştırılarak algoritmanın mevcut iyi çözümden faydalanma (exploitation) özelliğine katkı sağlanmaktadır (Aslan ve Demirci, 2020). Plazma transferi Eşitlik 3.4 ile gösterilen matematiksel model ile gerçekleştirilmektedir.

$$x_{kcj}^{rcv-p} = \text{round} \left(x_{kcj}^{rcv} + \text{rand}(-1,1)(x_{kcj}^{rcv} - x_{mcj}^{dnr}) \right) \quad (3.4)$$

Plazma transferi, bireyin tüm parametrelerinin değerini etkilemektedir. Eşitlik 3.4 ile hesaplanan x_{kcj}^{rcv-p} değeri x_k^{rcv} bireyinin plazma transferi sonrası $\{0,1, \dots, CR\}$ kümesinden sırasıyla seçilen c ve $\{0,1, \dots, D\}$ kümesinden sırasıyla seçilen j parametrelerinin yeni değeridir. $\text{rand}(-1,1)$ -1 ile +1 arasında bir değer üretmektedir. x_{kcj}^{rcv-p} değeri ilgilenilen probleminin çözümü için round kullanarak en yakın tam sayıya yuvarlanmıştır. Elde edilen tam sayı değeri için limit kontrolü yapılarak bir limit aşımı söz konusuysa, aşılan limit değerine eşitlenmiştir. Algoritma 8 ile açıklanan metot çalıştırılarak, frekans müsaitlik kontrolleri yapılmıştır.

Algoritma 8. Plazma transferi metodu

```

1  // i: ilgili zaman dilimi
2  // F_A: i'nci zaman dilimindeki müsait frekanslar dizisi
3  // M: veri seti dizisi
4  // S: seçilen frekans konumu
5  // last: enfeksiyon sonrası değer
6  // first: enfeksiyon öncesi değer
7
8  for i ← 0...CR do
9      for j ← 0...TS do
10         if last == first then
11             M[i][j] = first
12         end if
13         for x ← 0...length(F_A) do
14             if last == F_A[x] then
15                 M[i][j] ← last
16             end if
17         end for
18     end for
19 end for
20 return M

```

Algoritma 8 ile öncelikle 10. satırda plazma transferi öncesi ve sonrası değer kontrol edilmiştir. Eğer aynıysa, ilgili bireyin c 'inci parametresinin j 'inci değeri plazma öncesi değer olarak kalmıştır. Aksi durumdaysa, sonucun karşılık geldiği frekansın müsaitlik durumu kontrol edilmiştir. Eğer müsaitse, ilgili bireyin c 'inci parametresinin j 'inci değeri plazma transferi sonrası değer ile güncellenmiştir. Bireyin tüm parametreleri için kontroller sağlandıktan sonra, elde edilen birey için düzenleme metodu çalıştırılarak CR kullanıcıları arasında ortaya çıkabilecek olası frekans girişimleri ortadan kaldırılmıştır. x_{kcj}^{rcv} alıcı bireyinin plazma tedavisi sonrası bağışıklık cevabı x_{kcj}^{rcv-p} değeri ile gösterilmiştir. Eğer $f(x_{kcj}^{rcv-p})$ değeri, $f(x_{kcj}^{rcv})$ değerinden daha küçükse, birey bağışıklık sonrası değeri ile güncellenmektedir ve ikinci doz plazma hazırlanmaktadır (Aslan ve Demirci, 2020). Aksi durumda ise x_k^{rcv} bireyi ile x_m^{dnr} bireyi değiştirilerek tek doz plazma transferi gerçekleştirilmektedir.

Tedaviye cevap vermeyen ve kritik seviyelerde seyreden bireylerin, tedavisine plazma donörü olarak destek veren bireylerin bağışıklık seviyeleri zamanla değişebilir. IPA donör bireylerin bağışıklık seviyelerinin değişimini t_c ve t_{max} değerlerine bağlı olarak modeller. Değerlendirme sayısı t_c , t_{max} ise maksimum değerlendirme sayısına karşılık gelmektedir. Tanımlanan bu değerler eşliğinde x_m^{dnr} bireyine uygulanacak değişime karar verilmektedir. Eğer t_c/t_{max} oranından elde edilen sonuç 0 ile 1 arasında rastgele belirlenen sayıdan küçükse, x_m^{dnr} bireyi Eşitlik 3.1 ve Algoritma 5 kullanılarak yeniden oluşturulmaktadır. Eğer 0 ile 1 arasında rastgele belirlenen sayıdan büyükse, Eşitlik 3.5 kullanılarak sınırlı olarak değiştirilmektedir. Bu sayede, eğer donör birey ile temsil edilen çözüm problemin bir yerel optimumuna karşılık gelirse, popülasyondan çıkartılmış ve yerine yeni bir aday çözüm getirilmiş olur.

$$x_{mcj}^{dnr} = \text{round}(x_{mcj}^{dnr} + \text{rand}(-1,1)x_{mcj}^{dnr}) \quad (3.5)$$

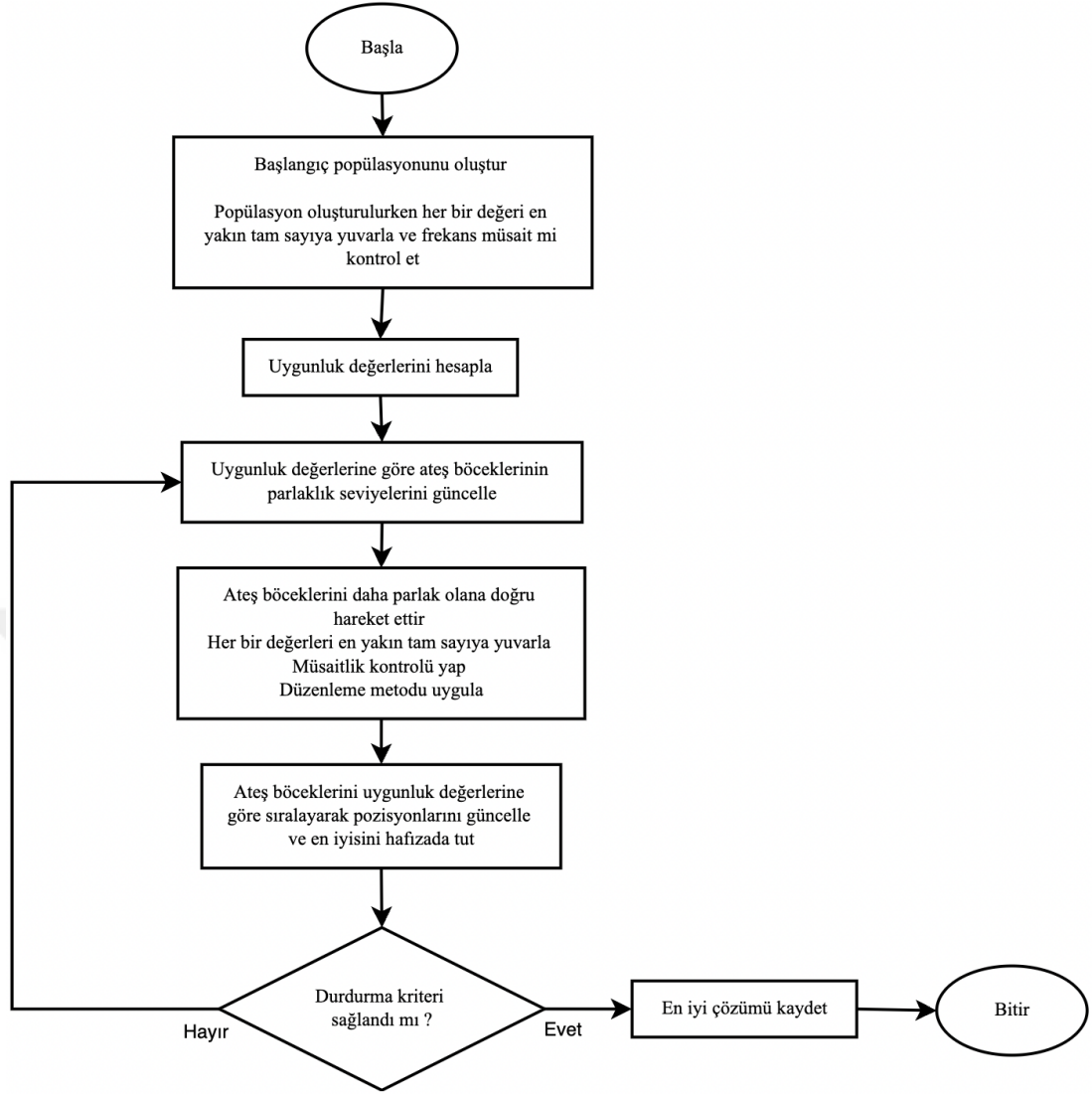
Eşitlik 3.5 ile hesaplanan değer, kanal atama probleminin çözümü için *round* kullanılarak en yakın tam sayıya yuvarlanmıştır. Alt veya üst limit değeri aşıldıysa, aşılın limit değerine güncellenerek frekans müsaitlik kontrolü yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu işlem adımları, durdurma kriteri sağlanana kadar tekrar edilerek problemin en iyi çözümü aranmaktadır.

3.2. Ateş Böceği Algoritması

Ateş böceği algoritması (Firefly Algorithm - FA), ateş böceklerinin yanıp sönme davranışlarına dayanarak geliştirilmiştir (Yang, 2009). Temelinde üç kurala göre hareket edilir. Bu kurallara göre ateş böceklerinin cinsiyetleri önemsenmeden bir ateş böceği, diğer ateş böceklerine çekilmektedir. Çekicilik tamamıyla parlaklıkla ifade edilmektedir. Ateş böceklerinin arasındaki mesafe arttıkça, parlaklık azalacağı için çekicilik de azalmaktadır. Böylelikle daha az parlak olan ateş böcekleri, daha parlak olan ateş böceklerine doğru hareket edecektir. Ateş böceklerinin parlaklıkları uygunluk fonksiyonuyla hesaplanan değere göre hesaplanmaktadır. FA, aşağıda verilen işlem adımları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. (Yu vd., 2015).

1. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması
2. Uygunluk fonksiyonuna göre başlangıç ışık şiddeti belirlenmesi
3. Popülasyondaki ateş böceklerinin, daha parlak ateş böceklerine hareket ettirilmesi
4. Uzaklığa göre çekiciliklerin değiştirilmesi
5. Elde edilen çözümlerin değerlendirilmesi ve popülasyondaki ateş böceklerinin ışık şiddetlerinin güncellenmesi
6. Ateş böceklerinin sıralanması ve en iyi sonucun belirlenmesi
7. Maksimum değerlendirme kontrolü sağlanana kadar 3. adıma gidilmesi

Ateş böceği algoritması yoğunluğun ve çekiciliğin ne şekilde değiştiği faktörlerine dayanmaktadır (Arora vd., 2014). Ateş böceğinin parlaklığı ya da çekiciliğini hesaplamak için uygunluk fonksiyonu ile tanımlanan matematiksel modelden faydalanılmaktadır. Hesaplanan parlaklık değerlerine göre ateş böceklerinin hangi ateş böceğine doğru hareket edeceğine karar verilmektedir. Az ışık yayan, ateş böcekleri daha parlak ateş yayan ateş böceğine doğru hareket etmektedir. FA ile kanal atama probleminin çözüm aşamalarını belirten akış şeması Şekil 3.2 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.2. FA ile kanal ataması akış şeması

Kanal atama problemini çözmek için temel işlem adımları değiştirilmeden FA üzerinde güncellemeler yapılmıştır. FA için başlangıç ateş böcekleri oluşturulurken her bir değerin bir frekansa karşılık geldiği düşünülmüş, üretilen değerler en yakın tam sayıya çevrilmiş ve değerlerin müsaitlik kontrolleri yapılmıştır. Müsait değilse, yeni değer yerine frekans seçim yöntemi kullanılarak müsait bir frekans atanmıştır. Ateş böceklerinin parlaklık seviyeleri, Eşitlik 2.1'deki matematiksel model ile hesaplanmıştır ve ateş böcekleri, daha parlak ateş böceklerine doğru hareket ettirilmiştir. Tüm hareketler tamamlandıktan sonra yeni çözümler için frekans müsaitlik kontrolleri yapılmıştır. Eğer frekansa karşılık gelen değerimiz müsait değilse, eski değer kullanılarak devam edilmiştir. Son olarak Algoritma 2'deki düzenleme metodu uygulanarak CR kullanıcıları arasında oluşabilecek frekans girişimleri kontrol edilmiş ve karşılaşılması durumunda düzeltilmiştir.

3.3. Yapay Arı Koloni Algoritması

Yapay arı koloni (Artificial Bee Colony - ABC) algoritması, bal arılarının yiyecek arama davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir, çok boyutlu ve çok modlu optimizasyon problemlerinin çözülmesi sağlanmıştır (Karaboga, 2005). Yiyecek arayan arıların hareketleri incelenmiştir. Bal arılarının akıllı davranışlarından ilham alınarak popülasyona dayalı bir arama metodolojisi kurulmuştur (Dokeroglu vd., 2019) ve arıların kendi aralarında gerçekleştirdiği etkileşimin, optimizasyon problemlerinin çözümü için simüle edilebileceği görülmüştür. Simüle edilen bu modelde, her bir çözüm bir yiyecek kaynağına denk gelmektedir (Akay, 2013). İşçi, gözcü ve kaşifler olmak üzere üç tip arıdan oluşmaktadır. ABC algoritmasının temel işlem adımları (Karaboga ve Basturk, 2007):

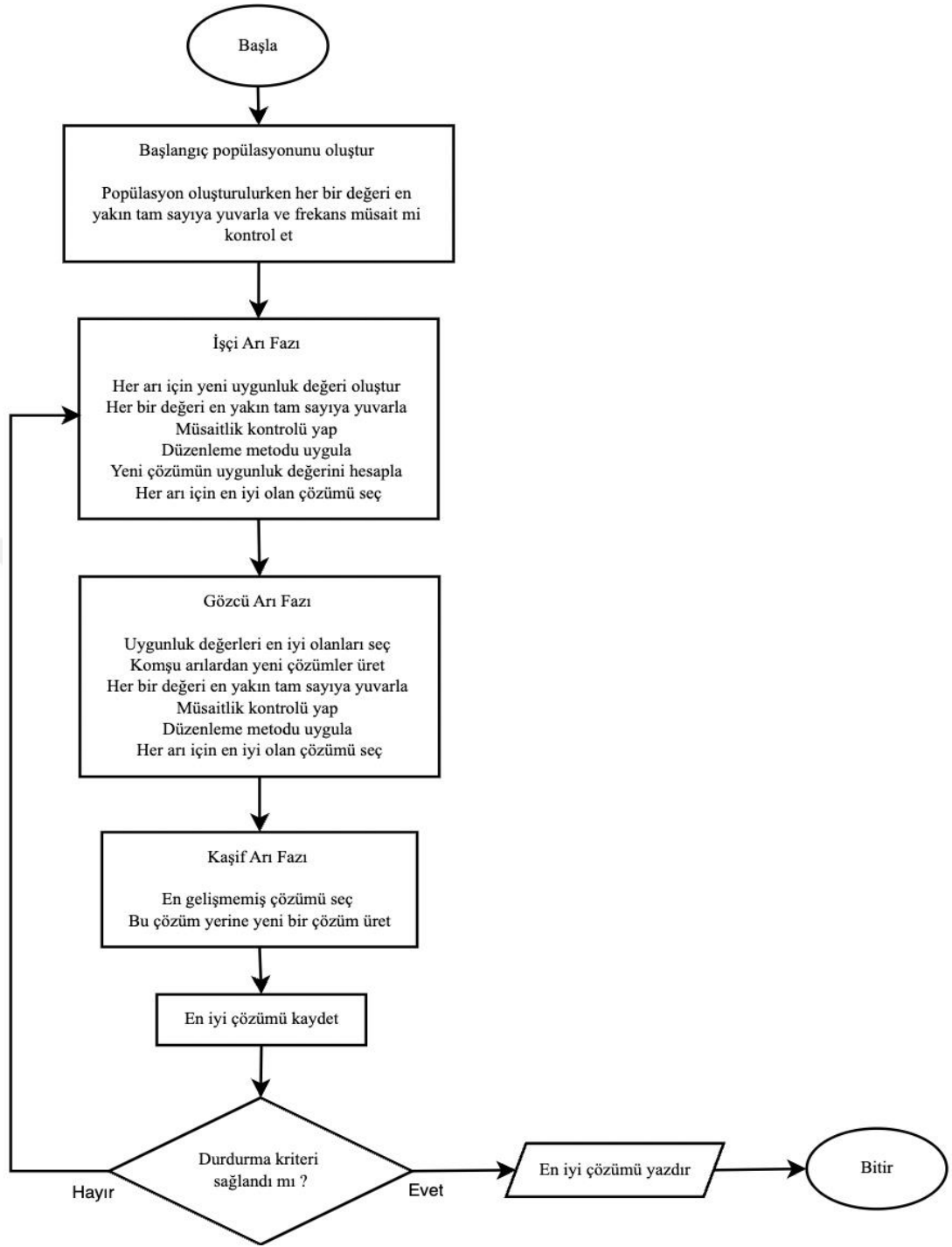
1. Başlangıç yiyecek kaynağı alanlarının üretilmesi
2. Yiyecek kaynaklarına işçi arıların gönderilerek yiyecek kaynağının komşuluk değerlerinin ve kalitesinin belirlenmesi
3. İşçi arılardan gelen bilgilere göre olasılık değerlerinin hesaplanması
4. Hesaplanan olasılık değerlerine göre gözcü arıların yiyecek kaynağı seçimi, yiyecek kaynağının komşuluk değerlerinin ve kalitesinin belirlenmesi
5. Limit ve kaşif arı üretim sayısına göre yiyecek kaynağının bırakılması
6. Belirlenen en iyi yiyecek kaynağının hafızada tutulması
7. Maksimum değerlendirme kontrolü sağlanana kadar 2. adıma gidilmesi

İşçi arılar, yiyecek kaynaklarına giderek yiyecek kaynaklarının bilgilerini getirmektedir. Ayrıca eldeki yiyecek kaynağı, rastgele bir yiyecek kaynağı ile birleştirilerek yeni yiyecek kaynağı oluşturulmaktadır. Gözcü arı, işçi arı tarafından getirilen yiyecek kaynağı bilgisine göre kaynağın kalitesini hesaplanmaktadır. Yiyecek kaynaklarının kalitesi, toplam yiyecek kaynaklarının toplam kalite değerine oranlanarak yiyecek kaynaklarının seçilme ihtimalleri belirlenmektedir. Belirlenen seçilme olasılıkları kıyaslanarak en kaliteli yiyecek kaynağı tespit edilmektedir. İyi sonuçların daha da iyi hale getirilmesi için gözcü arı rastgele bir değerle karşılaştırılarak yiyecek kaynaklarına gönderilmektedir. İşçi ve gözcü arı adımlarında, elde edilen yiyecek kaynakları değerlendirilmektedir. Değerlendirme sonucunda, kalitesi düşük yiyecek kaynakları terk edilmektedir. Terk edilen kaynaklara ait olan işçi ve gözcü arılar, yeni bir yiyecek kaynağı aramaktadırlar. Limit parametresi ile temsil edilen, geliştirilmeme sayısı algoritmanın küresel

minimumu bulabilmesi için önemlidir. İşlem adımları, takip edilerek optimizasyon problemlerinin çözümleri için iyi bir performans sergilenmektedir (Dokuz, 2014).

Kanal atama probleminin çözümü için ABC algoritmasının temel işlem adımları matematiksel formüller üzerinde, değişiklik yapılmadan kontroller eklenmiştir. Şekil 3.3 üzerinde, kanal atama probleminin çözümü için düzenlenen ABC algoritmasının akış şeması gösterilmiştir.





Şekil 3.3. ABC ile kanal ataması akış şeması

Şekil 3.3 ile gösterilen akış şemasında, başlangıç popülasyonu oluşturulurken her bir değer bir frekansa karşılık geldiği düşünülmüştür ve üretilen değer, en yakın tam sayıya çevrilmiştir ve değer karşılık geldiği frekansın müsaitlik kontrolü yapılmıştır. Frekans müsaitse, doğrudan kullanılmıştır. Müsait değilse, frekans seçim metodu kullanılarak müsait frekans ataması gerçekleştirilmiştir. İşçi arı fazında, her arı için yeni uygunluk değerleri tanımlanırken her bir değer, müsait frekans kontrolü

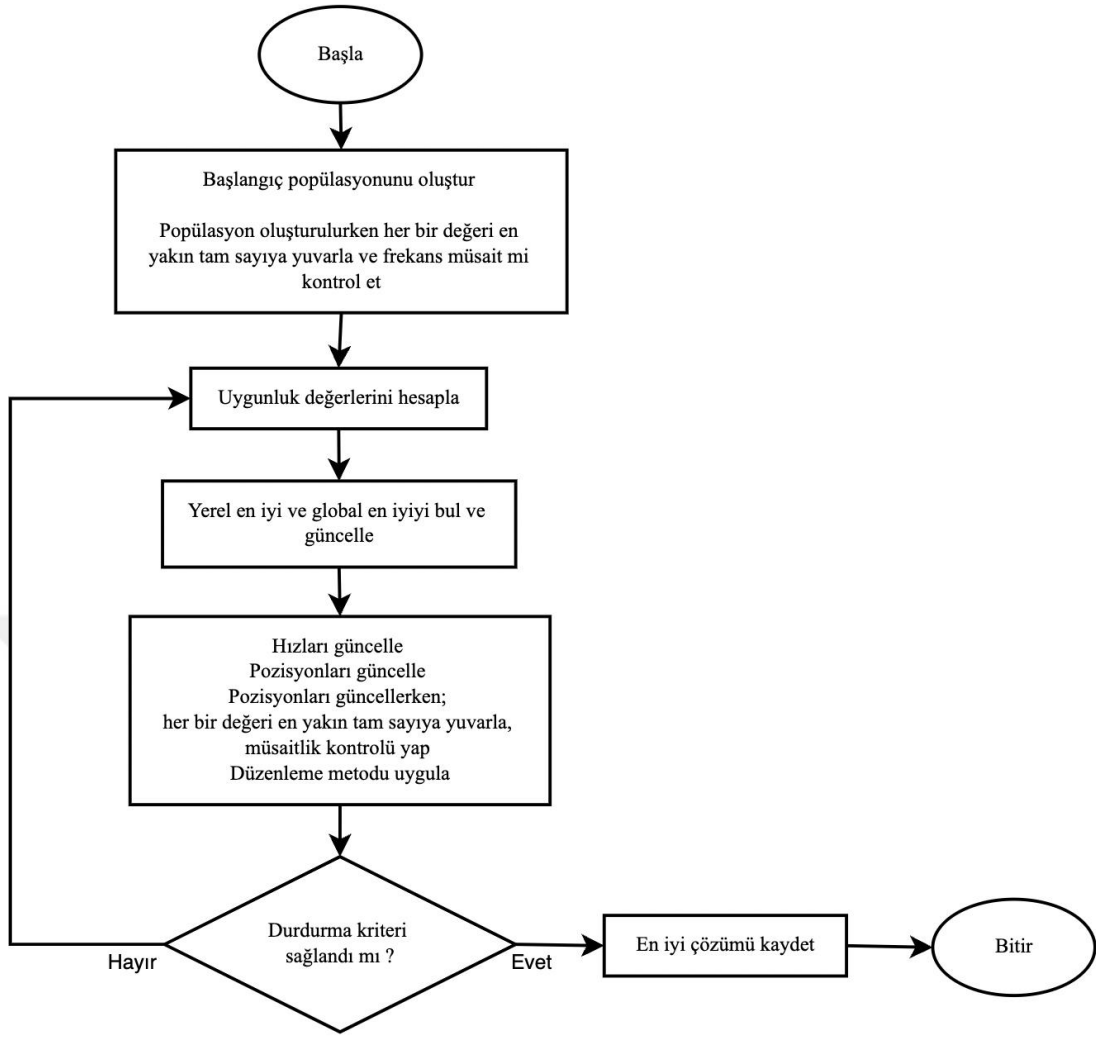
için en yakın tam sayıya yuvarlanmıştır. Olası frekans girişimlerini düzenlemek için Algoritma 2 ile gösterilen düzenleme metodu çalıştırılmıştır. Üretilen yeni çözümlerin uygunluk değerlerinin hesaplanması için Eşitlik 2.1’de gösterilen matematiksel model kullanılmıştır. Hesaplanan uygunluk değerleri, eski çözümlerin uygunluk değerleriyle kıyaslanmıştır ve daha iyi olan çözüm seçilmiştir. Gözcü arı fazında, komşu arılardan yeni çözümler üretilirken müsait frekans kontrolü yapabilmek için her bir değer, en yakın tam sayıya yuvarlanmıştır. Algoritma 2 kullanılarak olası frekans girişimleri düzenlenmiştir. Kâşif arı fazında, kötü çözümlerin yeniden oluşturulması için popülasyon oluşturulurken uygulanan yöntem uygulanmıştır. Her adım için en iyi çözüm kaydedilmiştir. Adım sayısı tamamlanana kadar devam edilerek en iyi çözüm elde edilmeye çalışılmıştır.

3.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) algoritması, sürü halinde hareket eden hayvanların, yiyecek bulmak ve temel ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirdiği hareketlerin, sürüdeki diğer bireyleri etkileyerek, sürünün amaca daha hızlı ve kolay bir şekilde ulaşılmasından etkilenerek geliştirilmiştir. PSO algoritmasının işlem adımları aşağıdaki gibidir:

1. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması
2. Parçacıkların uygunluk fonksiyonuna göre hesaplanması
3. Sonuçlara göre yerel en iyi ve global en iyinin belirlenmesi
4. Parçacıkların yeni hız ve pozisyon değerlerinin güncellenmesi
5. Maksimum değerlendirme kontrolü sağlanana kadar 2. adıma gidilmesi
6. En iyi sonucun elde edilmesi

Parçacık sürü optimizasyonu, diğer evrimsel yöntemler gibi optimizasyon problemlerini ya da optimizasyon problemlerine dönüştürülebilen problemleri çözmek için uygulanmaktadır (Shi, 2001). PSO, bir rasgele çözüm popülasyonunun oluşturulmasıyla başlamaktadır. Her potansiyel çözüme rasgele bir hız değeri atanır ve potansiyel çözümler, arama uzayında değerlendirilmeye başlanır. Parçacıklarla temsil edilen her bir çözüm, elde ettiği en iyi sonuç ile popülasyon içerisinde tutulmaktadır. PSO algoritmasında her bir parçacık sürüsü, tüm sonuçların en iyi değeri olan global en iyi ile kontrol edilmektedir. Şekil 3.4’te PSO algoritmasıyla, kanal atama probleminin çözümü için nasıl bir yol izlendiği gösterilmiştir (Shi, 2001).



Şekil 3.4. PSO ile kanal ataması akış şeması

PSO'nun temel işlem adımlarında, herhangi bir güncelleme yapmadan popülasyonun oluşturulması ve pozisyonların güncellendiği adımlarda, kontroller gerçekleştirilmiştir. Pozisyonların güncellendiği adımda elde edilen her değer, en yakın tam sayıya yuvarlanmıştır. Müsaitlik kontrolü yapılmış ve uygun olmayan bir frekans kullanımı varsa, eski değeri kullanılmıştır. Son olarak Algoritma 2 kullanılarak olası frekans girişimleri düzenlenmiştir.

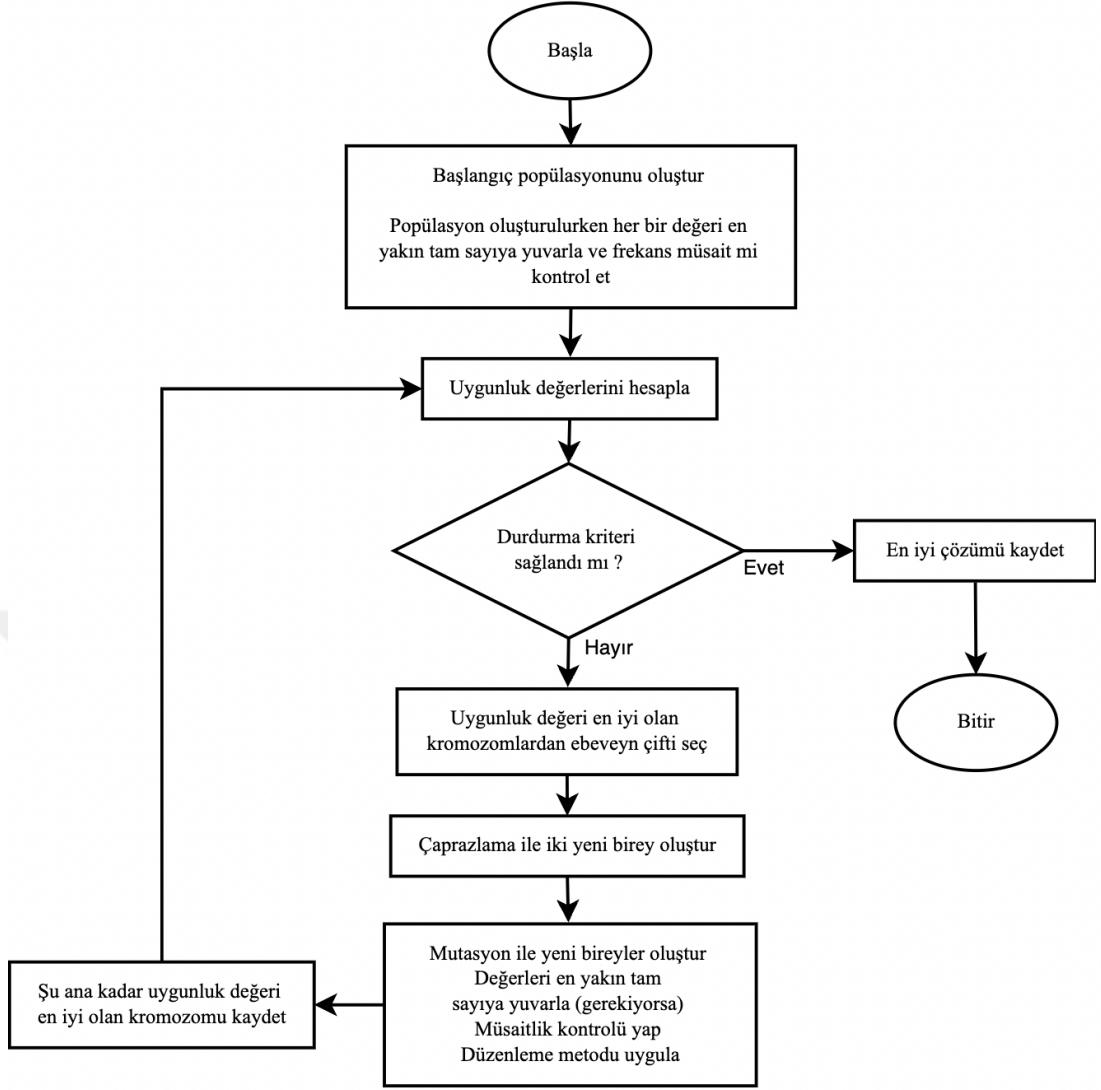
3.5. Genetik Algoritma

Genetik Algoritma (Genetic Algorithm - GA), Darwin'in evrim teorisindeki en iyi olanın yaşayıp zayıf olanın ise, elenmesi prensibine dayalı olarak modellenmiştir. Geliştirildiği yıllardaki geleneksel optimizasyon yöntemlerinin çözmekte zorlandığı, çok değişkenli problemlerin çözümü için önerilmiştir (Öztürk, 2007). GA değerlendirme sayısı arttıkça, popülasyon içerisindeki aday çözümleri çaprazlama ve

mutasyon operatörlerinden faydalanarak iyileşen sonuçlar üretmekte ve kötü olan sonuçlar elenmektedir. Bu özellikleri ile ideal bir optimizasyon yöntemidir. Genetik algoritmanın temel işlem adımları aşağıdaki gibidir:

1. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması
2. Uygunluk fonksiyonuna göre kromozomları değerlendirilmesi
3. Kromozom çiftlerinin seçimi ve yeni popülasyonun oluşturulması
4. Popülasyon üzerinde çaprazlama ve mutasyon gibi evrimsel işlemlerin gerçekleştirilmesi
5. Maksimum değerlendirme kontrolü sağlanana kadar 2. adıma gidilmesi
6. En uygun sonucun elde edilmesi

İlk olarak, ilgili probleme özel ya da rastgele olarak başlangıç popülasyonu oluşturularak bir çözüm grubu elde edilir. Popülasyon boyutunun seçimi önemlidir. Büyük seçilirse, çözüme ulaşmak için işlem sayısının arttırılması gerekmektedir. Küçük seçildiğinde ise, çeşitlilik fazla olmayacaktır. Çözüm grubu içerisindeki en başarılı bireyler seçilir. Popülasyon boyutunun korunması için başarısız çözümlerin elenmesi gerekmektedir. Başarılı bireylere, çaprazlama ve mutasyon işlem adımları uygulanarak yeni bir çözüm grubu oluşturulur. Çaprazlama, iki çözümün parçalarının değiş tokuş işlemiyle gerçekleştirilmesidir. Çaprazlama sonrasında, eski iki çözümden iki yeni çözüm meydana gelmektedir. Mutasyonsa, bir çözümün rastgele olarak değiştirilmesidir. Optimizasyon probleminin sonlanma kriteri sağlanana kadar bu işlem adımları tekrarlanmaktadır. Belirlenen kriter sağlandığında, çözülen optimizasyon probleminin belirlenen parametrelere göre en uygun sonuçları elde edilmektedir (Çetin, 2002).



Şekil 3.5. GA ile kanal ataması akış şeması

Bu çalışmada, genetik algoritma ile kanal atama probleminin çözülmesi için genetik algoritmanın temel işlem adımları değiştirilmeden düzenlemeler yapılmıştır. Düzenlemeler yapılırken adil bir yaklaşım uygulanmıştır. Şekil 3.5'teki akış şeması üzerinde yapılan değişiklikler gösterilmiştir. Başlangıç popülasyonu oluşturulurken her bir değer, tam sayıya yuvarlanmıştır. Eğer müsait değilse, müsait frekanslar arasından seçim yapılarak tamamlanmıştır. Eşitlik 2.1 kullanılarak uygunluk değerleri hesaplanmıştır. Uygunluk fonksiyonuna göre elde edilen sonuçlar sıralanmış ve rulet çarkı kullanılarak çaprazlanacak kromozomlar seçilmiştir. Çaprazlama adımında, seçilen kromozomlar, ortadan bölünerek çaprazlanmış ve iki bireyden iki yeni birey oluşturulmuştur (Hermawanto, 2013). Çaprazlama sonucu elde edilen yeni birey, zaten müsait frekansları içerdiği için Algoritma 2'deki

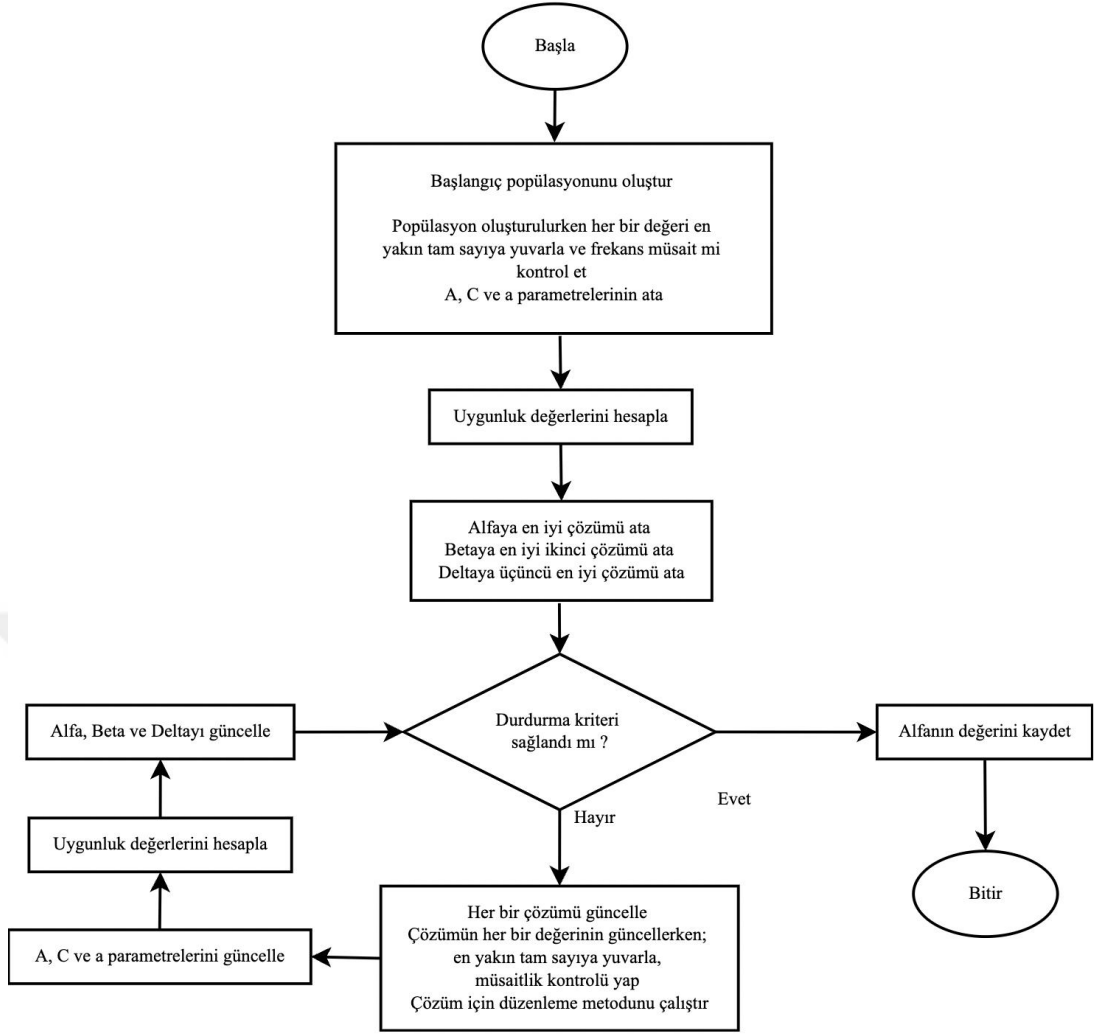
düzenleme metodu tekrar uygulanmamıştır. Mutasyon adımı, mutasyon oranı, CR, PS ve D parametreleri dikkate alınarak değişiklik yapılacak frekans sayısı belirlenmiştir. Belirlenen bu sayı adeti kadar frekans, rastgele seçilerek rastgele frekanslarla değiştirilmiştir (Hermawanto, 2013). Frekanslara karşılık gelen her bir değer için müsaitlik kontrolü yapılmıştır. Eğer müsait değilse değeri değiştirilmemiştir. Frekans girişimlerini ortadan kaldırmak için Algoritma 2 kullanılmıştır. Tamamlanma koşulları sağlanana kadar Şekil 3.5 üzerindeki işlem adımları takip edilmiştir.

3.6. Gri Kurt Optimizasyon Algoritması

Gri Kurt Optimizasyon (Grey Wolf Optimizer - GWO) Algoritması, gri kurt sürülerinden esinlenerek geliştirilmiştir. Sürüdeki liderlik hiyerarşisi simüle edilmiştir. Alfa, beta, delta ve omega olarak ayrılan dört farklı gri kurt kullanılmıştır. Sırasıyla baskınlık alfa, beta, delta ve omega şeklindedir. Baskınlık, alfadan omegaya doğru azalmaktadır. Alfa, problemin en iyi çözümünü temsil etmektedir. Beta, alfadan sonraki en iyi çözüme karşılık gelmektedir. Delta ise, betadan sonraki en iyi çözüme denk gelmektedir. Eğer alfadan daha iyi bir çözüm ortaya çıkarsa, eski alfa çözümü betaya, eski beta çözümü ise deltaya aktarılır. Gri Kurt optimizasyon algoritmasının temel işlem adımları aşağıdaki gibidir (Mirjalili vd., 2014):

1. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması
2. A, C ve a parametrelerinin oluşturulması
3. Uygunluk fonksiyonuna göre her bir aday çözümün değerlendirilmesi
4. Alfa için en iyi çözümün atanması, beta için en iyi ikinci çözümün atanması, delta için en iyi üçüncü çözümün atanması
5. Her bir çözümü güncellenmesi
6. A, C ve a parametrelerini güncellenmesi
7. Uygunluk fonksiyonuna göre her bir aday çözümü değerlendirilmesi
8. Alfa, beta ve deltayı güncellenmesi
9. Maksimum iterasyon kontrolü sağlanana kadar 7. adıma gidilmesi
10. En iyi sonucun elde edilmesi

Burada A ve C parametreleri rastgele değerlerdir. Birbirinden farklı yarıçaplara sahip hiper kürelerdir ve aday çözüme yardımcı olması için kullanılmaktadır. Parametre a ise, A parametresiyle uyarlanarak GWO'nun keşif ve kullanım arasında sorunsuz bir geçiş yapmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.6. GWO ile kanal ataması akış şeması

Bu tez çalışmasında, GWO ile kanal atama probleminin çözümü için algoritmanın, temel işlem adımları değiştirilmeden kanal atama probleminin özellikleri dahilinde düzenlemeler yapılmıştır. Başlangıç popülasyonu oluşturulurken elde edilen değerler, en yakın tam sayıya yuvarlanmıştır. Her bir çözüm güncellenirken, her bir değeri kontrol edilerek öncelikle en yakın tam sayıya yuvarlanmış ve müsaitlik kontrolü yapılmıştır. Eğer güncellenen değer, müsait olmayan bir frekansa karşılık geliyorsa, eski değeri kullanılarak güncellenmeden devam edilmiştir. Ortaya çıkabilecek frekans girişimlerini önlemek için geliştirilen Algoritma 2 ile gösterilen düzenleme metodu çalıştırılarak olası frekans girişimleri önlenmiştir. Durdurma kriteri sağlanana kadar Şekil 3.6 üzerindeki işlem adımları takip edilmiştir.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Algoritmaların performanslarının değerlendirilmesi için öncelikle veri seti seçimi yapılmıştır (Kunz, 1991). Seçilen veri setinde, 25 baz istasyonu ve her bir baz istasyonu için $[0,74]$ arasındaki frekansları içermektedir. Tablo Ek 1 üzerinde gösterilen frekanslar, ilgili baz istasyonundaki lisanslı kullanıcılar tarafından kullanılan frekansları tanımlamaktadır. Tabloda gösterilmeyen frekanslar, her bir baz istasyonunda lisanssız kullanıcıların kullanabileceği frekanslar, yani müsait olan frekanslar olarak belirtmektedir. IP algoritmasıyla kanal atama problemi çözümünü gerçekleştirmek için değiştirme metodu ve düzenleme metodu gibi iki farklı yöntem önerilmiştir. Değiştirme metodu kullanılan Swap IPA, düzenleme metodu kullanılan Fix IPA olarak adlandırılmışlardır. Bu yöntemler arasındaki performans farkının analizi amacıyla Tablo Ek 1'deki veri setiyle Swap IPA ve Fix IPA ayrı ayrı çalıştırılmışlardır. IP algoritmasının farklı yöntemleri çalıştırılırken ayrıca, CR sayısına göre performansın nasıl etkilendiği de incelenmiştir. CR sayısı sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 seçilmiştir. Belirlenen CR parametreleri, popülasyon sayısına karşılık gelen PS parametresinin değeri 30, 50 ve 100 için değerlendirilmiştir. Ayrıca alıcı sayısı (Number of Receiver – NoR) ve donör sayısının (Number of Donor - NoD) farklı CR parametre değerlerinde nasıl performans göstereceğini incelemek için NoR ve NoD parametreleri 1 ve 2'nin kombinasyonları kullanılarak test edilmiştir. IPA belirlenen tüm senaryolarda, ortalamasını ve standart sapmasını hesaplayabilmek için 30 farklı sefer, 45000 değerlendirme sayısı ile çalıştırılmıştır. Ayrıca her senaryo için uygulanan 30 farklı değerlendirmenin her birinin çalışma zamanları kaydedilerek ortalaması ve standart sapması hesaplanmış, bu sayede saniye biriminde zaman bazlı bir kıyaslama da yapılmıştır. Algoritmalar 30 farklı sefer çalıştırılırken her bir değerlendirme sayısındaki en iyi uygunluk fonksiyonu sonuçları kaydedilmiştir. Kaydedilen bu sonuçlar kullanılarak yakınsama grafikleri çizdirilmiş ve algoritmaların kanal atama problemini yakınsama performansları incelenmiştir.

Tablo 4.1. Swap IPA yönteminin değerlendirilmesi

CR	PS	Sonuçlar	NoR 1 NoD 1	NoR 1 NoD 2	NoR 2 NoD 1	NoR 2 NoD 2
5	30	Ort.	73.3000	76.9000	90.5666	73.6666
		Std.	6.0063	1.7194	5.7369	5.1077
		Sıra	1	3	4	2
	50	Ort.	77.8666	77.6333	97.5666	79.6000
		Std.	7.1074	1.8345	3.9385	6.4166
		Sıra	2	1	4	3
	100	Ort.	84.5000	79.3333	98.5000	83.6333
		Std.	5.2073	1.8678	5.6847	5.8337
		Sıra	3	1	4	2
10	30	Ort.	169.7000	192.1666	191.5333	172.2000
		Std.	6.1435	1.3682	8.4488	5.0622
		Sıra	1	4	3	2
	50	Ort.	179.8000	193.2666	201.6666	181.9333
		Std.	4.4301	1.8061	8.1581	4.8299
		Sıra	1	3	4	2
	100	Ort.	193.5000	194.4000	207.9000	194.7333
		Std.	3.9895	2.3180	7.2403	4.7953
		Sıra	1	2	4	3
15	30	Ort.	276.6333	309.4666	303.4333	281.4000
		Std.	5.5526	1.5860	7.3967	6.6111
		Sıra	1	4	3	2
	50	Ort.	292,0666	310.7333	315.7000	293.6333
		Std.	3.7142	2.2350	7.5637	5.3881
		Sıra	1	3	4	2
	100	Ort.	309.7333	311.9666	322.0666	311.0000
		Std.	3.1396	2.5753	6.8844	4.8442
		Sıra	1	3	4	2
20	30	Ort.	388.5000	427.3333	420.2666	395.0333
		Std.	5.2329	1.8678	9.3378	5.5766
		Sıra	1	4	3	2
	50	Ort.	406.7666	428.6333	432.2666	411.9666
		Std.	5.2324	1.9745	6.7326	5.2375
		Sıra	1	3	4	2
	100	Ort.	429.7333	431,3000	441.5000	428.7333
		Std.	13.0988	1.7540	7.0225	4.9324
		Sıra	2	3	4	1
Sıra Ortalaması			1.4166	2.4166	3.7500	2.0833
Genel Sıra			1	3	4	2

Swap IPA, tüm senaryolar için çalıştırıldığında, Tablo 4.1 ile gösterilen sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 4.1’de gösterilen sonuçlar değerlendirildiğinde, PS parametresinin değeri 30 ve NoR ve NoD parametrelerinin değerinin 1 olarak seçildiği senaryoda, CR parametresinin değeri 5, 10, 15 ve 20 olduğu durumların hepsinde en iyi sonuç elde edilmiştir. Kanal atama probleminin özellikleri ve IPA için belirlenen değerlendirme sayısının üst limitine göre popülasyondaki birey

sayısının daha az seçildiği senaryoda, başlangıç çözüm çeşitliliğinin azlığı sayesinde, bireylerin komşuluk çevrelerini daha uzun araştırma fırsatı bulabildiği için popülasyondaki birey sayısının fazla seçildiği senaryoya göre daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca tablodan çıkarılacak bir diğer sonuç da NoR ve NoD parametrelerine atanan değerlerin algoritmanın verdiği sonucu nasıl etkilediğidir, NoR ve NoD parametrelerinin değerleri aynı olduğunda, PS parametresinin değeri 30 ve 50 olduğu senaryolarda, NoD parametresi, NoR parametresinden küçük seçildiğinde, PS parametresi değerinin 100 olduğu senaryoda daha iyi sonuç alınmıştır.

Tablo 4.2. Swap IPA yönteminin çalışma sürelerinin değerlendirilmesi

CR	PS	Sonuçlar	NoR 1 NoD 1	NoR 1 NoD 2	NoR 2 NoD 1	NoR 2 NoD 2
5	30	Ort.	17.8551	24.1566	20.2120	27.1851
		Std.	0.7108	0.5939	0.5869	0.5487
	50	Ort.	12.3600	16.4501	14.0530	18.6904
		Std.	0.5565	0.1990	0.2842	0.3231
	100	Ort.	9.4422	10.9437	9.1521	11.7970
		Std.	0.2889	0.0575	0.1250	0.1243
10	30	Ort.	32.8091	47.0167	36.9334	49.5764
		Std.	0.5028	0.4267	0.5181	0.2947
	50	Ort.	23.0056	31.6146	25.2843	33.8526
		Std.	0.4653	0.1732	0.4226	0.1938
	100	Ort.	15.5332	20.1479	16.6496	21.4684
		Std.	0.1092	0.0644	0.1922	0.1455
15	30	Ort.	50.3445	71.9529	57.3399	77.6845
		Std.	2.0109	0.2600	0.5373	0.1993
	50	Ort.	34.1218	48.1881	39.0826	52.5511
		Std.	0.2292	0.2928	0.5273	0.3104
	100	Ort.	23.1674	30.5598	25.2444	32.6608
		Std.	0.0706	0.4051	0.2271	0.6577
20	30	Ort.	67.1443	100.3278	80.2620	105.9259
		Std.	0.1720	3.1987	2.0084	0.2688
	50	Ort.	46.1790	65.9040	53.9098	71.4334
		Std.	0.2466	0.2316	0.4444	0.2808
	100	Ort.	31.0073	40.9542	34.7055	44.1626
		Std.	0.2128	0.2255	0.5410	0.1799

Tablo 4.2’de saniye biriminden Swap IPA yönteminin ortalama tamamlanma süreleri ve standart sapmaları gösterilmiştir. Tablo 4.2 üzerindeki sonuçlar değerlendirildiğinde, CR parametresinin değeri arttıkça, iyileştirilebilecek CR sayısı arttığı için çalışma süresi de doğru orantılı olarak artmıştır. Popülasyon sayısının küçük seçildiği durumlarda, plazma transferinin daha fazla gerçekleşmesi sebebiyle,

algoritmanın tamamlanma süreleri artmıştır. Ayrıca plazma transferinin gerçekleşme sayısı, NoR ve NoD parametrelerine bağlı olduğundan, bu parametrelerin değerleri çalışma sürelerini etkilediği görülmektedir.

Tablo 4.3. Fix IPA yönteminin değerlendirilmesi

CR	PS	Sonuçlar	NoR 1 NoD 1	NoR 1 NoD 2	NoR 2 NoD 1	NoR 2 NoD 2
5	30	Ort.	70.7333	77.03333	90.4666	73.2000
		Std.	4.6183	1.3034	4.9243	4.8675
		Sıra	1	3	4	2
	50	Ort.	77.5333	77.8333	94.3333	78.1666
		Std.	4.8355	1.8089	5.7927	4.3211
		Sıra	1	2	4	3
	100	Ort.	85.5333	78.7333	96.8666	85.9000
		Std.	4.3338	1.5902	4.6168	4.1980
		Sıra	2	1	4	3
10	30	Ort.	175.8666	192.2666	195.4000	180.0666
		Std.	4.2483	1.5477	5.2763	4.7953
		Sıra	1	3	4	2
	50	Ort.	187.1333	192.5000	202.3666	188.1333
		Std.	4.2247	1.9278	5.7415	5.4998
		Sıra	1	3	4	2
	100	Ort.	199.0000	194.4333	206.5000	196.9000
		Std.	3.4832	2.1084	5.4083	5.0487
		Sıra	3	1	4	2
15	30	Ort.	291.1666	309.1666	307.9000	294.7000
		Std.	4.4051	1.4161	6.6999	6.1272
		Sıra	1	4	3	2
	50	Ort.	302.866	310.1333	317.2666	305.3333
		Std.	3.7303	2.2469	4.9526	5.0881
		Sıra	1	3	4	2
	100	Ort.	317.5666	311.8666	324.5000	316.7666
		Std.	4.4172	1.6679	5.4878	4.1767
		Sıra	3	1	4	2
20	30	Ort.	408.2333	428.1666	426.2666	414.3000
		Std.	5.4325	1.7336	6.0494	5.8203
		Sıra	1	4	3	2
	50	Ort.	423.2666	428.6000	437.3666	424.9000
		Std.	4.3888	2.2000	5.4557	4.6213
		Sıra	1	3	4	2
	100	Ort.	437.2666	429.8333	440.7333	436.0000
		Std.	2.9769	2.6087	5.5091	3.9916
		Sıra	3	1	4	2
Sıra Ortalaması			1.5833	2.4166	3.8333	2,1666
Genel Sıra			1	3	4	2

Algoritma 2 ile gösterilen düzenleme metodu kullanılarak çalıştırılan Fix IPA için değerlendirme sonuçları, Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Değiştirme metodunu kullanan Swap IPA yönteminde olduğu gibi NoD ve NoR parametrelerinin değeri 1,

PS parametresinin değeri 30 olan senaryoların hepsinde daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Donör sayısını temsil eden NoD ve alıcı sayısını temsil eden NoR sayısının aynı seçildiği senaryolar, farklı seçildiği senaryolara göre Fix IPA yönteminin daha iyi performans gösterdiği, genel sıraya bakıldığında ortaya çıkmaktadır. Fakat popülasyondaki elaman sayısını temsil eden PS parametresinin 100 seçildiği senaryolarda, NoD sayısının NoR sayısından büyük seçilmesinin daha avantajlı olduğu Tablo 4.3'te açıkça görülmektedir. NoR sayısının NoD sayısından fazla seçildiğinde ise elde edilen sonuçların performansı, diğer senaryolardaki performanslardan geride kalmaktadır.

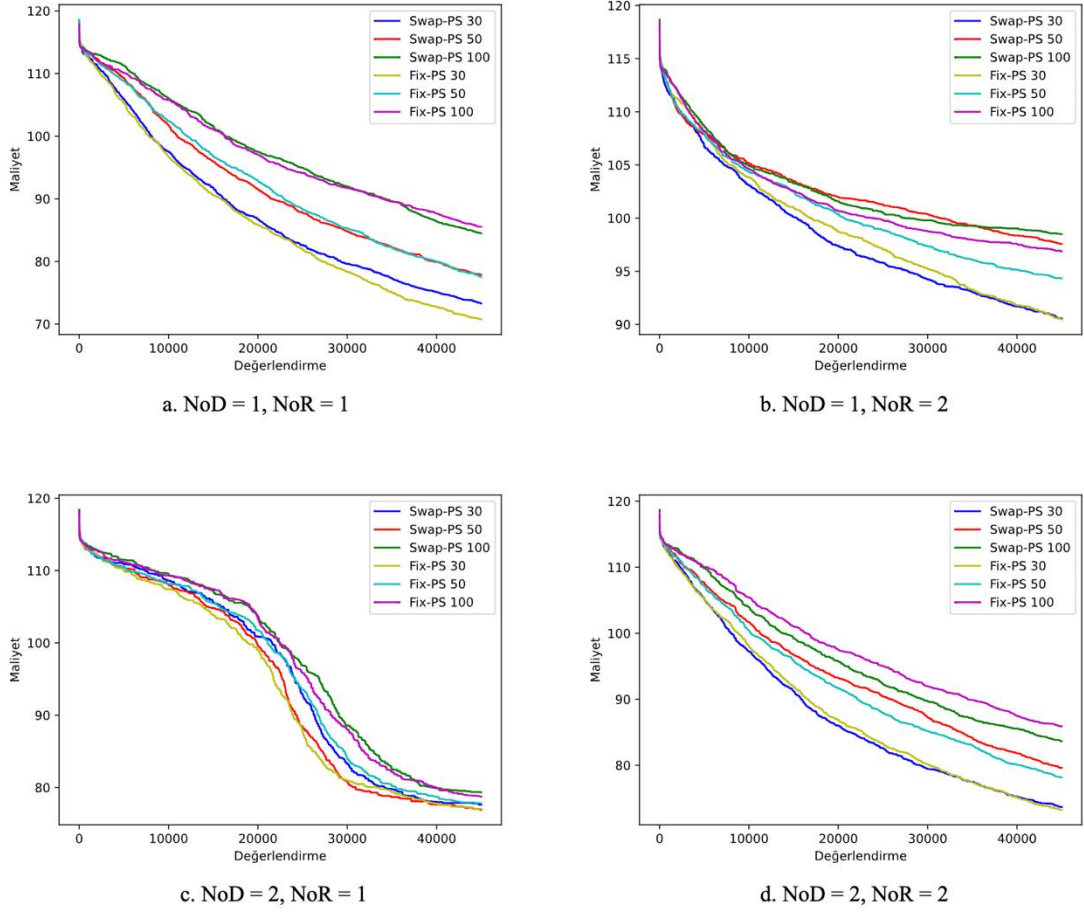
Tablo 4.4. Fix IPA yönteminin çalışma sürelerinin değerlendirilmesi

CR	PS	Sonuçlar	NoR 1 NoD 1	NoR 1 NoD 2	NoR 2 NoD 1	NoR 2 NoD 2
5	30	Ort.	67.6242	71.0610	24.9292	63.1287
		Std.	6.1547	1.4969	0.6175	4.3644
	50	Ort.	67.1148	66.4262	19.9305	59.3298
		Std.	4.7261	0.5973	0.9602	2.9493
	100	Ort.	72.4010	66.8754	24.3680	59.8096
		Std.	3.4307	0.9244	2.5230	2.8043
10	30	Ort.	120.5530	146.7522	48.2022	131.2510
		Std.	4.5824	0.8784	1.7092	3.5974
	50	Ort.	129.3114	137.2807	37.1673	123.4213
		Std.	4.3396	0.7375	1.2748	2.8773
	100	Ort.	135.2529	134.4933	45.6152	119.6482
		Std.	2.9379	0.8183	4.9396	2.3901
15	30	Ort.	186.9811	219.8000	69.6275	191.6834
		Std.	3.3227	1.0249	2.8314	6.7385
	50	Ort.	179.0382	205.4605	54.4032	185.9389
		Std.	2.7229	0.9992	2.59331	14.4233
	100	Ort.	180.7335	198.6060	62.5262	173.6508
		Std.	2.8690	0.7866	7.3930	2.9957
20	30	Ort.	275.7669	307.5937	93.2216	287.9904
		Std.	7.3631	6.2029	2.8558	7.4008
	50	Ort.	263.7684	286.4902	73.2686	271.1230
		Std.	6.0371	1.3227	3.7919	6.1087
	100	Ort.	263.3315	275.3924	87.3178	262.2304
		Std.	3.4703	1.5422	10.9415	3.7914

Enfeksiyonun yayılması adımı, olası frekans girişimini önlemek için Algoritma 6'yı kullanan Swap IPA ve Algoritma 6 içerisindeki frekans değiştirme işlemi yerine, Algoritma 2 ile gösterilen düzenleme metodunu kullanan Fix IPA Tablo 4.1 ve Tablo 4.3 üzerindeki sonuçlar kıyaslandığında, her iki yöntemin de aynı amaca hizmet etmesinden kaynaklı olarak yakın sonuçlar elde edilmiştir. CR parametresinin değerinin 5, PS parametresinin değerinin 30 seçildiği senaryolarda,

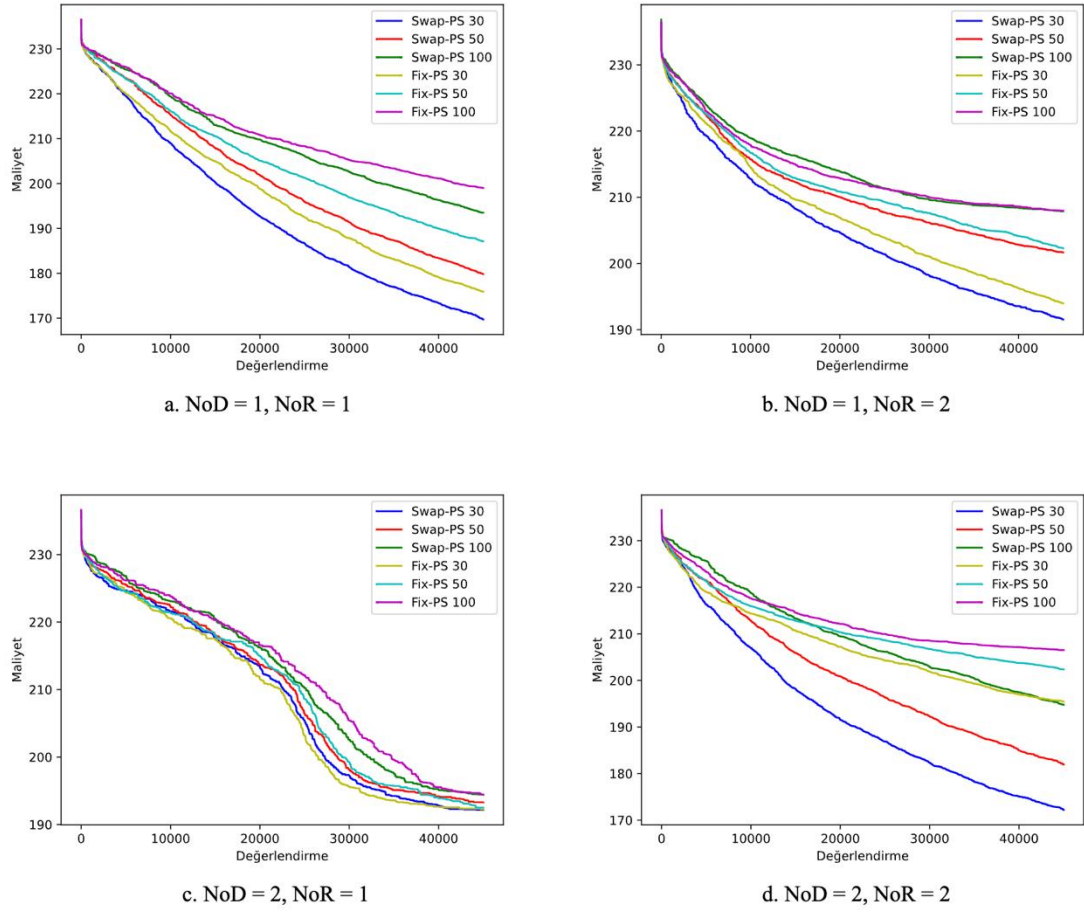
Fix IPA daha iyi sonuçlar vermiştir; fakat 50 ve 100 seçildiği durumlarda oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebebi, Fix IPA yönteminin ağdaki müsait frekans sayısının fazla olduğu durumlarda daha iyi sonuç vermesinden kaynaklanmasıdır. CR parametresinin değeri 10 olarak seçildiğinde, PS parametresinin 30, 50 ve 100 olduğu senaryolarda, NoD ve NoR sayısının aynı olması durumunda, Swap IPA daha iyi performans göstermektedir. NoD ve NoR sayısı farklı seçildiğinde ise, yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. CR parametresi 15, PS parametresi 30, 50 ve 100 değerlerine sahip olduğunda, NoD ve NoR sayısının eşit seçildiği senaryolarda, Swap IPA, Fix IPA yöntemine göre daha iyi sonuçlar vermektedir. NoD ve NoR sayısının farklı olduğu senaryolarda elde edilen sonuçlar birbirine yakındır. Son olarak, CR parametresinin değerinin 20 olduğu senaryolar incelendiğinde, diğer senaryolara benzer şekilde NoD ve NoR sayısı eşit seçildiğinde, Swap IPA daha iyi sonuç vermektedir. Diğer senaryolardaysa yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Tablo 4.1 ve Tablo 4.3 geneli değerlendirildiğinde, yakın sonuçlar elde edildiği ortaya çıkmaktadır.

Swap IPA ve Fix IPA için Tablo 4.2 ve Tablo 4.4 üzerinde çalışma süreleri gösterilen sonuçlar kıyaslandığında, yaklaşık olarak 4 kat fark ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi ise, Algoritma 2 ile gösterilen düzenleme metodunun maliyetli bir yöntem olmasından kaynaklanmaktadır. Düzenleme metodu, işlem yapılan çözümün tüm baz istasyonlarındaki frekanslarını kontrol ederken değiştirme metodu sadece ilgili frekansın müsaitlik durumunu kontrol etmektedir. Eğer frekans kullanılıyorsa, yeni frekansı kullanan CR için eski frekans değeri atanarak, yeni frekans değerinin kullanımına olanak sağlanmaktadır. Değiştirme metodunun kullanımı, IP algoritmasında enfeksiyonun yayılması adımı, rastgele seçilen sadece bir frekans için işlem yapılmakta ve bu işlem takip edilebildiği için kullanımı mümkündür. Tüm aday çözüm güncellendiğinde, frekans değişikliklerinin takibinin mümkün olmadığı ya da düzenleme metodundan daha maliyetli olacağı durumlarda, düzenleme metodu kullanılmıştır. Bu kullanım, aradaki çalışma zamanı farkını ortaya çıkarmıştır.



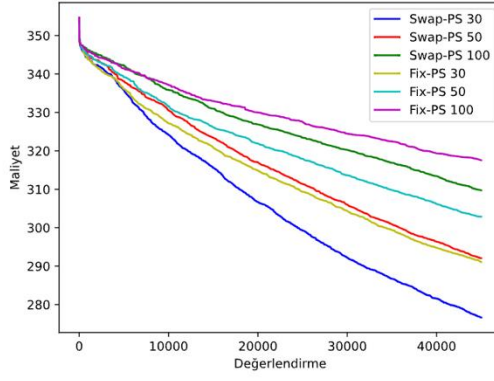
Şekil 4.1. IPA yöntemlerinin CR 5 ve DS 45000'e göre yakınsama grafikleri

Swap IPA ve Fix IPA yöntemleri, 30 farklı kez çalıştırılırken her bir değerlendirme işleminde, hesaplanan en iyi uygunluk fonksiyonu sonuçları kaydedilmiştir. Tüm senaryolarda, 45000 değerlendirme sayısı için [30,45000] değere sahip diziler üzerinden, yakınsama grafikleri çizdirilmiştir. Swap IPA ve Fix IPA yöntemlerinin, yakınsama performanslarının kıyaslanması Şekil 4.1-4 üzerinde bir arada gösterilmiştir. CR sayısı 5 için çizdirilen Şekil 4.1'de senaryo a, b, c ve d'deki yakınsama grafiklerinde, en yüksek yakınsama, yaklaşık 120 olmuştur. Swap IPA ve Fix IPA yöntemleri temelindeki işlem mantığı aynı olduğundan, farklı PS parametresindeki yakınsama sonuçları oldukça yakındır. CR 5 için tüm senaryolarda IPA'nın farklı yöntemleri, problemin kanal atama maliyetini optimize ederken bir kesintiye uğramamaktadır, değerlendirme sayısı arttıkça daha da iyi sonuç vermektedir.

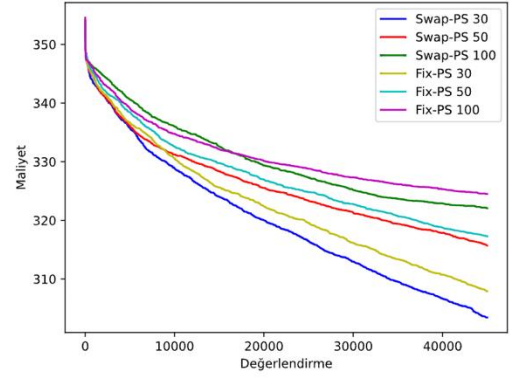


Şekil 4.2. IPA yöntemlerinin CR 10 ve DS 45000'e göre yakınsama grafikleri

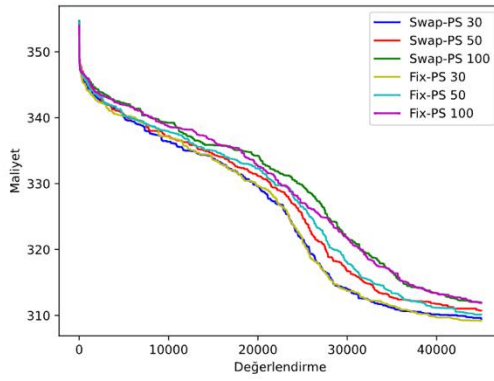
CR sayısı 10 olarak belirlendiğinde, Şekil 4.2'deki yakınsama grafikleri çizdirilmiştir. En yüksek yakınsama ortalaması 235 seviyesindedir. Senaryo a'da donör ve alıcının 1 seçildiğinde, Swap IPA'nın Fix IPA'ya göre aynı değerlendirme sayısında daha hızlı yakınsadığı ortaya çıkmaktadır. En iyi yakınsama 170 seviyesindedir. Senaryo b'de PS 50 ve 100 için IPA'nın farklı yöntemlerinin yakınsama sonuçları yaklaşık olarak aynıdır. Fakat PS 30 için Swap IPA yaklaşık 175 seviyelerine kadar yakınsayabilmiştir. CR 10 için donör sayısının, alıcı sayısından fazla seçildiği senaryonun yakınsama grafiği, senaryo c'de gösterilmiştir. PS 30, 50 ve 100 için yakınsama oldukça yakındır. Fakat düşük bir oran olsa da PS sayısı arttıkça, yakınsama hızı yavaşlamıştır. En küçük yakınsama, yaklaşık olarak 190 seviyesindedir. CR 10 için yapılan son çalıştırma için yakınsama sonuçları senaryo d'de gösterilmiştir. Burada Swap IPA'nın yakınsama performansının daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. En yüksek yakınsama seviyesi 235'in yaklaşık olarak 170 seviyelerine kadar indirildiği görülmektedir.



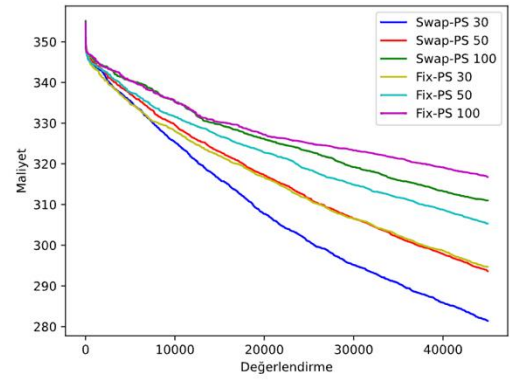
a. NoD = 1, NoR = 1



b. NoD = 1, NoR = 2



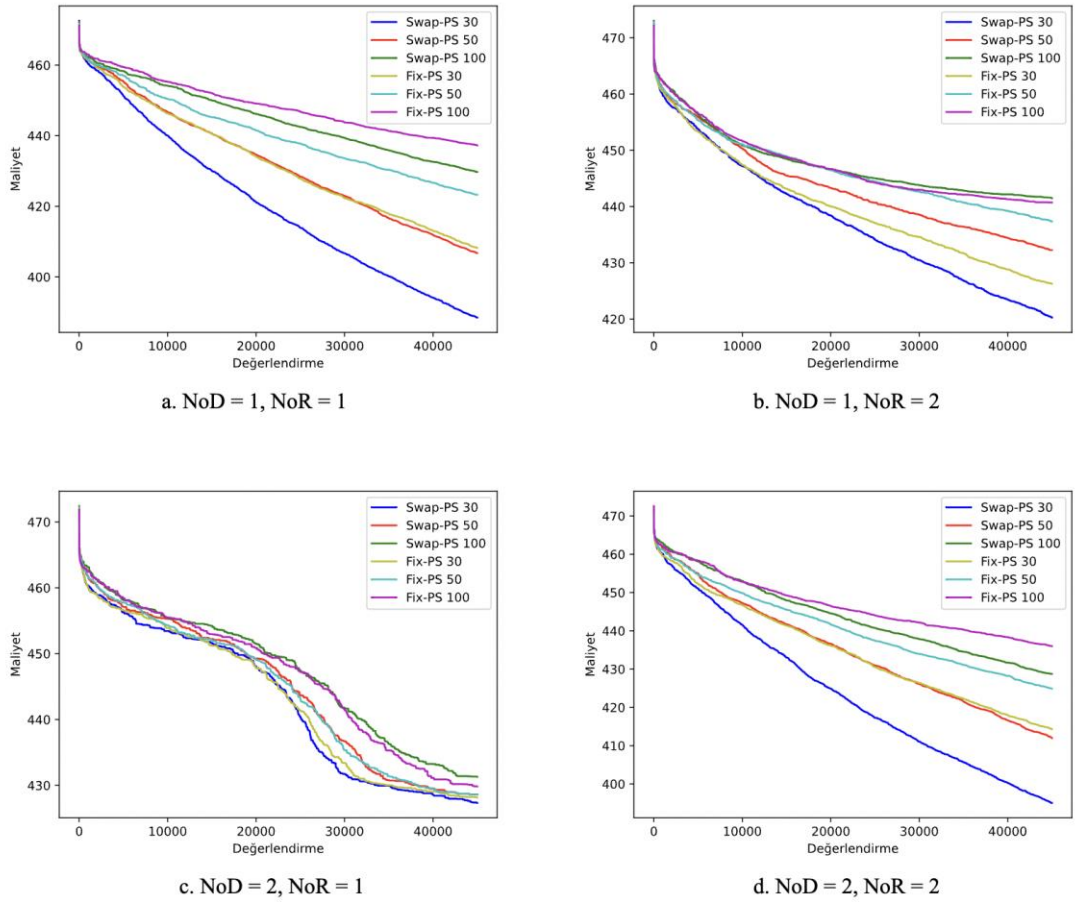
c. NoD = 2, NoR = 1



d. NoD = 2, NoR = 2

Şekil 4.3. IPA yöntemlerinin CR 15 ve DS 45000'e göre yakınsama grafikleri

CR 15 için Şekil 4.3 değerlendirildiğinde, ortalama en yüksek yakınsama 360 seviyesindedir. PS parametre değeri büyüdükçe, yakınsama hızı yavaşlamıştır. Swap IPA yönteminin, Fix IPA yöntemine göre daha hızlı yakınsadığı senaryo a, b ve Şekil d üzerinde açıkça görülmektedir. Senaryo c değerlendirdiğinde, Fix IPA, donör sayısının 2, alıcı sayısının 1 olarak seçildiği senaryoda, Swap IPA yöntemine göre oldukça yakın olsa da daha iyi bir yakınsama değeri yakalamıştır. CR 15 için en düşük yakınsama değeri, Swap IPA ile yaklaşık olarak 275 seviyesinde, a'da görülmektedir.



Şekil 4.4. IPA yöntemlerinin CR 20 ve DS 45000'e göre yakınsama grafikleri

CR 20 için yakınsama sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Ortalama en yüksek yakınsama değeri 475 seviyesindedir. CR sayısının 20 olduğu senaryolarda Swap IPA, problemi Fix IPA yöntemine göre daha hızlı yakınsamıştır. Donör sayısının 2, alıcı sayısının 1 olarak seçildiği senaryo, c'de gösterilmiştir. Burada, IP algoritmasının farklı yöntemlerinin yakınsamaları oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yakınsama grafiklerinin tümü incelendiğinde, ağ üzerindeki CR sayısı arttıkça, Swap IPA yönteminin problemi, Fix IPA yöntemine göre daha hızlı yakınsadığı görülmektedir. Swap IPA ve Fix IPA arasında CR, PS, NoD ve NoR parametrelerinin çeşitli kombinasyonları üzerinden hazırlanan senaryolar ile yapılan değerlendirmelerin tümü göz önünde bulundurulduğunda, IP algoritmasının kanal atama probleminin çözümü için PS parametresinin değerinin küçük, donör ve alıcı sayısının eşit seçildiği senaryolarda ise daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, Swap IPA yönteminin, Fix IPA yöntemine göre daha iyi ya da yakın sonuçlara daha kısa çalışma sürelerinde ulaştığı belirlenmiştir.

Swap IPA ve Fix IPA ile elde edilen sonuçlara göre performansının daha iyi analiz edilebilmesi için ABC, FA, PSO, GA ve GWO gibi meta-sezgisel yöntemlerle elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Algoritmalar, kanal atama probleminin çözümü için çalıştırılırken Fix IPA yönteminde olduğu gibi CR kullanıcıları arasında oluşabilecek olası frekans girişimlerini önlemek için Algoritma 2 ile sözde kodu verilen düzenleme metodu kullanılmıştır. Değerlendirme işleminde, CR parametresi sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 olarak belirlenmiştir. CR sayısının 5 olduğu durumda, popülasyondaki birey sayısını temsil eden PS parametresinin değeri sırasıyla, 30, 50 ve 100 olarak belirlenmiştir. CR sayısının 10, 15 ve 20 olduğu durumlardaysa, PS parametresinin değeri 30 olarak belirlenmiştir. Her bir algoritma, 45000 değerlendirme sayısı ile 30 kez çalıştırılmıştır. Bu 30 farklı çalışmanın sonuçlarıyla, ortalama en iyi uygunluk değerleri ve saniye cinsinden tamamlanma sürelerinin ortalamaları elde edilmiştir.

Tablo 4.5. Algoritma parametreleri

Algoritma	Parametre(ler)	Değer(ler)
IPA	NoD, NoR	[1,1]
FA	α	0.2
	β	1
	γ	1
ABC	Limit	(PS/2) * D
	Popülasyon	PS/2
PSO	W_{max}, W_{min}	[0.9, 0.2]
	C_1, C_2	[0.9, 0.9]
GA	Mutasyon Oranı	0.015
	Çaprazlama Oranı	0.85
	Seçim Mekanizması	Rulet Çarkı
GWO	A	2'den 0'a

Belirli parametreler eşliğinde çalıştırılan algoritmalar için kullanılan değerler Tablo 4.5 üzerinde gösterilmiştir. IPA temelli yöntemlerin, meta-sezgisel algoritmalarla kıyaslandığı senaryoların tümünde Tablo 4.5 üzerindeki parametreler ve değerler kullanılmıştır.

Tablo 4.6. Swap IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 45000)

CR	PS	Fn.	Swap IPA	ABC	GA	PSO	FA	GWO
5	30	Ort.	73.3000	85.2666	89.5000	80.7333	92.8000	100.9000
		Std.	6.0063	3.2242	1.8027	5.3847	2.6633	8.1459
		Sıra	1	3	4	2	5	6
	50	Ort.	77.8666	88.4666	88.3000	78.9666	95.3000	104.1666
		Std.	7.1074	2.0612	1.9174	4.5202	2.0190	4.3595
		Sıra	1	4	3	2	5	6
	100	Ort.	84.5000	95.5000	87.8333	79.9666	96.4666	106.0666
		Std.	5.2073	1.9450	2.1615	5.5646	2.7656	2.3795
		Sıra	2	4	3	1	5	6
10	30	Ort.	169.7000	186.3333	177.4333	170.7000	201.4666	199.8666
		Std.	6.1435	2.9702	2.7770	5.1778	3.0630	15.8066
		Sıra	1	4	3	2	6	5
15	30	Ort.	276.6333	296.8000	274.2000	278.5333	315.4666	322.8666
		Std.	5.5526	3.4871	4.4601	7.5839	2.8836	7.4508
		Sıra	2	4	1	3	5	6
20	30	Ort.	388.5000	406.8000	376.6000	406.6666	431.2333	438.7333
		Std.	5.2329	3.8244	5.3078	20.1384	4.4021	5.7788
		Sıra	2	4	1	3	5	6
Sıra Ortalaması			1.6666	3.8333	3.0000	2.5000	5.1666	5.8333
Genel Sıra			1	4	3	2	5	6

Swap IPA ve diğer meta-sezgisel yöntemlere ait 45000 değerlendirme sayısı ile 30 farklı koşmanın ortalaması ve standart sapması hesaplanarak elde edilen sonuçlar Tablo 4.6 üzerinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre CR sayısının 5, popülasyon sayısının 30 ve 50 seçildiği durumlarda, Swap IPA yönteminin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Fakat PS parametresinin değeri arttığında Swap IPA yönteminde plazma transferi daha az uygulandığı için, PSO algoritması, Swap IPA yönteminden daha başarılı sonuç vermektedir. CR sayısının 10 olduğu senaryoda Swap IPA, diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. CR sayısının 15 ve 20 olduğu senaryolarda GA, Swap IPA ve PSO algoritmasını geride bırakarak daha iyi sonuçlar vermiştir. Bunun sebebi, GA'nın işlem adımlarından olan mutasyon işleminde, değiştirilecek frekans sayısının, mutasyon oranı PS, CR ve her bir aday çözümün boyutuna karşılık gelen D parametresinin, çarpımıyla elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. CR sayısı arttıkça, değiştirilecek frekans sayısının artması, GA'nın performansını olumlu etkilemiştir. GA'nın hemen ardından, Swap IPA bu senaryolar için oldukça yakın sonuçlar ile ikinci en iyi performansı sergilemiştir. Sıra ortalamasına göre genel sıra hesaplandığında, Swap IPA, genel sıralamaya göre en iyi sonuçları üretmiştir. Swap IPA yöntemini sırasıyla PSO, GA, ABC, FA ve GWO takip etmiştir.

Tablo 4.7. Swap IPA yönteminin çalışma sürelerinin kıyaslanması (DS: 45000)

CR	PS	Fn.	Swap IPA	ABC	GA	PSO	FA	GWO
5	30	Ort.	17.8551	77.5243	96.3390	163.6541	610.4210	212.0559
		Std.	0.7108	0.5240	1.1827	2.2038	10.8690	5.3292
	50	Ort.	12.3600	79.7999	99.0775	162.7684	931.0027	213.1644
		Std.	0.5565	0.4741	2.2972	4.9122	8.6414	3.6319
	100	Ort.	9.4422	81.4487	102.8139	165.1781	1854.7016	216.1439
		Std.	0.2889	0.4967	2.8758	3.0380	73.1712	4.0264
10	30	Ort.	32.8091	133.5465	163.2101	305.5711	1266.4933	397.5232
		Std.	0.5028	1.3638	3.0840	3.6841	6.7441	7.7408
15	30	Ort.	50.3445	198.4754	266.4322	582.3888	1968.3284	640.8069
		Std.	2.0109	1.2183	4.8652	5.9206	11.6905	5.8957
20	30	Ort.	67.1443	288.1975	350.1127	890.8956	2676.5766	894.4309
		Std.	0.1720	7.8235	2.3795	5.8912	11.53882	8.2956

Çalışma sürelerinin saniye biriminde kıyaslanması, Tablo 4.7 üzerinde gösterilmiştir. Algoritmaların tümü 45000 değerlendirme sayısı ile çalıştırılmıştır. Swap IPA yönteminde, Algoritma 2'deki düzenleme metodu yerine, değiştirme metodu kullanılmaktadır. Bu yöntemle, müsait frekans kıyaslama işlemi ile birlikte oluşan çalışma maliyetinden kaçınıldığı için diğer algoritmalarla göre daha hızlı bir şekilde tamamlanmıştır. ABC algoritması hariç PSO, FA ve GWO algoritmalarında, aday çözümün değerlerinin güncellendiği adımda, aday çözümün tamamı güncellendiğinden, frekans değişikliklerinin takibi düzenleme metoduyla yapılmıştır. GA için mutasyon sayısına göre değişiklik yapıldığı için birden fazla frekans değişikliği gerçekleştiğinden, direkt düzenleme metodu uygulanmıştır. Bu açıklanan sebeplerden dolayı, aradaki çalışma süresi farkı ortaya çıkmaktadır. Farklı metotlar kullanılarak CR kullanıcıları arasındaki frekans girişimleri önlendiğinden, bir kıyas işlemi yapmak doğru olmayacaktır.

Swap IPA için yapılan kıyaslamanın ardından, meta-sezgisel algoritmalar, Fix IPA ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama yapılırken kullanılan algoritmaların tümünde, Algoritma 2 ile açıklanan düzenleme metodu kullanılmıştır. Değerlendirme sayısı 45000 olarak belirlenmiştir. CR sayısı 5 için PS parametre değeri 30, 50 ve 100, CR sayısı 10, 15 ve 20 için de PS parametre değeri 30 olarak belirlenmiştir. Algoritmalar, bu parametreler eşliğinde, 30 farklı kez çalıştırılarak ortalama uygunluk fonksiyonu sonuçları ve bu sonuçlara ait, standart sapmalar hesaplanmıştır. Aynı zamanda, bu 30 farklı koşturaya ait çalışma zamanlarının, saniye bazında ortalaması alınmış ve standart sapması hesaplanmıştır.

Tablo 4.8. Fix IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 45000)

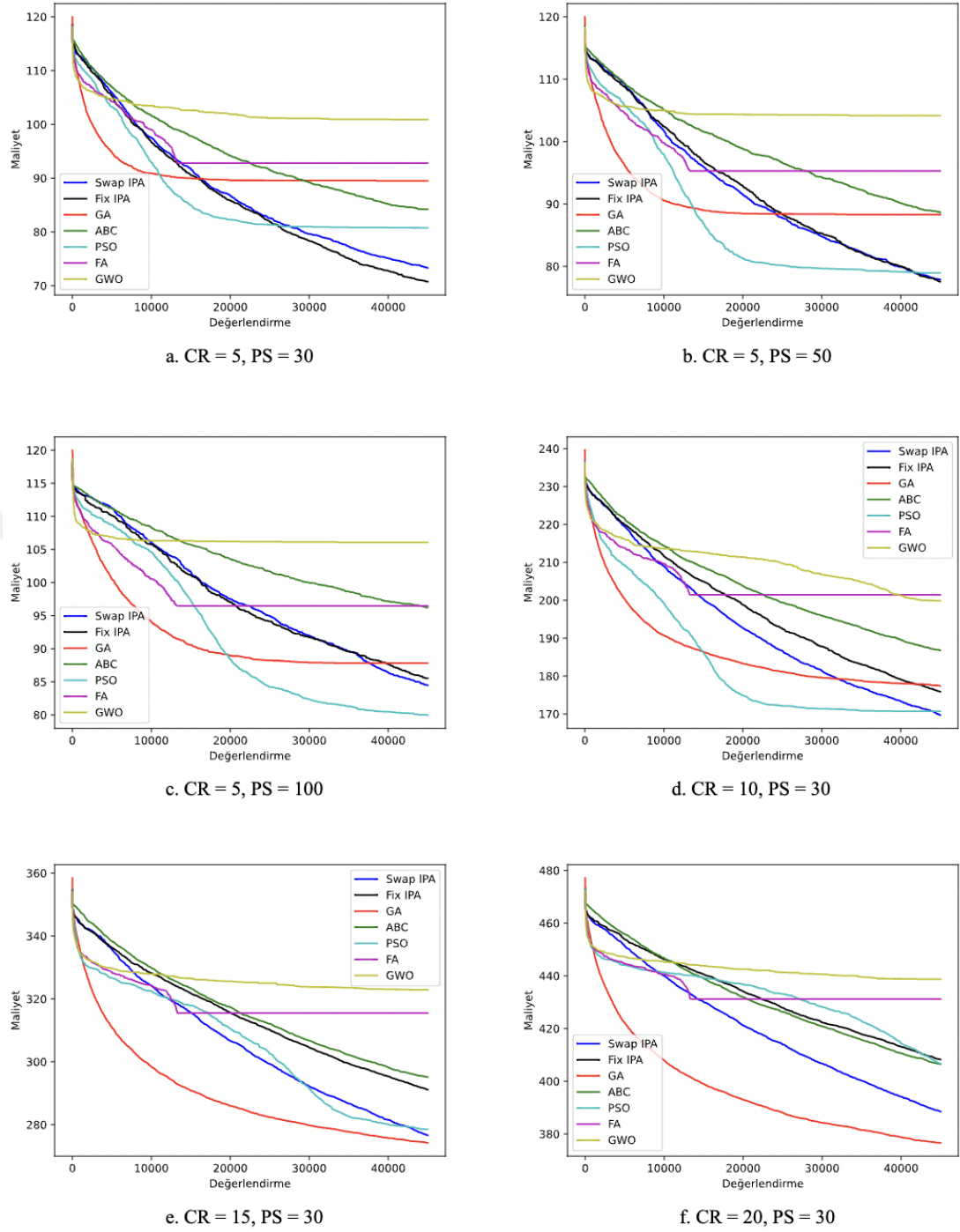
CR	PS	Fn.	Fix IPA	ABC	GA	PSO	FA	GWO
5	30	Ort.	70.7333	85.2666	89.5000	80.7333	92.8000	100.9000
		Std.	4.6183	3.2242	1.8027	5.3847	2.6633	8.1459
		Sıra	1	3	4	2	5	6
	50	Ort.	77.5333	88.4666	88.3000	78.9666	95.3000	104.1666
		Std.	4.8355	2.0612	1.9174	4.5202	2.0190	4.3595
		Sıra	1	4	3	2	5	6
	100	Ort.	85.5333	95.5000	87.8333	79.9666	96.4666	106.0666
		Std.	4.3338	1.9450	2.1615	5.5646	2.7656	2.3795
		Sıra	2	4	3	1	5	6
10	30	Ort.	175.8666	186.3333	177.4333	170.7000	201.4666	199.8666
		Std.	4.2483	2.9702	2.7770	5.1778	3.0630	15.8066
		Sıra	2	4	3	1	6	5
15	30	Ort.	291.1666	296.8000	274.2000	278.5333	315.4666	322.8666
		Std.	4.4051	3.4871	4.4601	7.5839	2.8836	7.4508
		Sıra	3	4	1	2	5	6
20	30	Ort.	408,2333	406.8000	376.6000	406.6666	431.2333	438.7333
		Std.	5,4325	3.8244	5.3078	20.1384	4.4021	5.7788
		Sıra	4	3	1	2	5	6
Sıra Ortalaması			2.1666	3.5000	2.5000	1.6666	5.1666	5.8333
Genel Sıra			2	4	3	1	5	6

Diğer meta-sezgisel yöntemlerin, Fix IPA yönteminin ortalama en iyi uygunluk değeri ile kıyaslanma sonuçları Tablo 4.8 üzerinde gösterilmiştir. CR sayısının 5 olarak seçildiği senaryoda Fix IPA yönteminde, Swap IPA yönteminde olduğu gibi, PS parametresinin değeri 30 ve 50 olarak belirlendiği durumlarda, diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. PSO algoritması, PS sayısının 100 seçildiği senaryoda IP algoritmasından daha iyi sonuç vermiştir. Popülasyon boyutunun büyük seçildiği durumda, PSO algoritması, Fix IPA dahil tüm yöntemlerden daha iyi sonuç vermiştir. CR sayısı 10 için değerlendirme yapıldığında, PSO algoritmasının, PS parametre değeri 30 için daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. CR sayısı 15 ve 20 için Genetik algoritma, diğer yöntemlerin tümünden daha iyi sonuç vermektedir. CR sayısının artmasıyla birlikte, mutasyon aşamasında daha fazla frekansta değişiklik yapılması, algoritmanın performansını iyileştirmektedir. Sıra ortalamalarına bakılarak algoritmaların performansları sıralandığında Fix IPA, PSO algoritmasının gerisinde kalmıştır. Genel sıralamada Fix IPA yönteminin ardından GA, ABC, FA ve GWO gelmektedir.

Tablo 4.9. Fix IPA yönteminin çalışma sürelerinin kıyaslanması (DS: 45000)

CR	PS	Fn.	Fix IPA	ABC	GA	PSO	FA	GWO
5	30	Ort.	67.6242	77.5243	96.3390	163.6541	610.4210	212.0559
		Std.	6.1547	0.5240	1.1827	2.2038	10.8690	3.0623
	50	Ort.	67.1148	79.7999	99.0775	162.7684	931.0027	213.1644
		Std.	4.7261	0.4741	2.2972	4.9122	8.6414	3.6319
	100	Ort.	72.4010	81.4488	102.8139	165.1781	1854.7016	216.1439
		Std.	3.4307	0.4948	2.8758	3.0380	73.1712	4.0264
10	30	Ort.	120.5530	133.5465	163.2101	305.5711	1266.4933	397.5232
		Std.	4.5824	1.3638	3.0840	3.6841	6.7441	7.7408
15	30	Ort.	186.9811	198.4754	266.4322	582.3888	1968.3284	640.8069
		Std.	3.3227	1.2183	4.8652	5.9206	11.6905	5.8957
20	30	Ort.	275.7669	288.1975	350.1127	890.8956	2676.5766	894.4309
		Std.	7.3631	7.8235	2.3795	5.8912	11.53882	8.2956

Fix IPA ve diğer meta-sezgisel yöntemlerin çalışma zamanlarının, saniye biriminde ortalaması ve standart sapmaları Tablo 4.9 üzerinde gösterilmiştir. Tüm algoritmalarda, frekansların olası girişimlerini önlemek için Algoritma 2 ile açıklanan düzenleme metodu kullanılmıştır. Tablo 4.9 üzerindeki sonuçlar incelendiğinde Fix IPA, PSO algoritmasıyla elde edilen sonuçlara göre kötü olmasına rağmen, yakın sonuçları daha kısa çalışma zamanlarında tamamlamıştır. Fix IP ve ABC algoritmalarında kısıtlı bir şekilde frekans değişikliği yapıldığından çalışma sürelerine göre yakın sonuçlar yakalanmıştır. ABC algoritması, genellikle aynı çalışma zamanlarında değerlendirme sayısını tamamladığı için standart sapması, diğer yöntemlere göre daha düşük hesaplanmıştır. GA için mutasyon sayısına göre frekans değişimi yapılmaktadır. Mutasyon sayısı değeri CR, PS ve ağdaki baz istasyonu sayısına göre değiştiği için parametrelerin değerleri arttıkça, daha fazla frekans değişimi gerçekleştiğinden, algoritmanın çalışma süresi artmıştır. FA, PSO ve GWO algoritmalarıyla, arada oluşan çalışma zamanı farkı, aday bireyin güncellenmesi aşamasında, her bir frekansın değişmesinden kaynaklanmaktadır. Fix IPA, ABC ve GA için frekans değişikliği kısıtlı olarak yapılırken PSO, FA ve GWO için tüm frekanslar değişmektedir. Herhangi bir frekansın değişimi yapıldığında, değiştirilen frekansın müsait bir frekans olma durumu kontrol edilmelidir. Tüm frekanslar değiştirildiğinde, daha fazla frekans müsaitlik kontrolü yapıldığından, aradaki çalışma zamanı farkı ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.5. Meta-sezgisel algoritmaların DS 45000'e göre yakınsama grafikleri

IP algoritmasının farklı yöntemleri ve ABC, GA, PSO, FA ve GWO değerlendirme sayısı 45000 için 30 farklı sefer çalıştırılırken, her bir işlem değerlendirme adımındaki en iyi uygunluk fonksiyon sonuçları kaydedilerek, her bir algoritma için [30,45000] şeklinde diziler elde edilmiştir. Elde edilen bu diziler üzerinden, Şekil 4.5'teki yakınsama grafikleri, kıyaslanan tüm algoritmalar için toplu bir şekilde çizdirilmiştir.

CR sayısının 5, PS parametre değerinin 30 seçildiği senaryonun sonuçları, a’da gösterilmiştir. Algoritmaların ortalama en yüksek yakınsama değerinin, yaklaşık olarak 120 olduğu görülmektedir. Swap IPA ve Fix IPA diğer algoritmalarla göre problemi daha hızlı yakınsamışlardır ve yatay bir eğilim göstermemişlerdir. FA yaklaşık 12500 değerlendirme sonrasında, uygunluk fonksiyon sonucunu daha fazla iyileştiremediği için yatay bir çizgi halinde olduğu, a’da görülmektedir. Yakınsama hızı en yavaş olan GWO algoritmasıdır. Fakat, GWO, FA gibi yatay bir eğilim gösterse de daha fazla değerlendirme için uygunluk fonksiyon sonucunu iyileştirebilmiştir. PSO ve GA, IPA yöntemlerine göre problemi daha yavaş yakınsamışlardır ve diğer algoritmalar gibi belirli bir değerlendirme sonrasında, yakınsamaları yatay bir eğilim göstermiştir. Senaryo b üzerinde CR sayısı 5, PS değeri 50 için yakınsama sonuçları gösterilmiştir. Senaryo b değerlendirildiğinde, FA ve GWO’nun yakınsamaları aynı şekilde devam etmiştir. GA’nın yakınsama performansı, PS 30 seçilen senaryoya göre iyileşerek ABC algoritmasına göre daha iyi sonuç vermiştir. PSO algoritması yakınsama performansını iyileştirmiş ve IPA yöntemlerine göre belirli bir değerlendirme sayısına kadar daha hızlı yakınsamıştır. PSO değerlendirme sayısı 45000 tamamlandığında, daha kötü yakınsamış; fakat oldukça yakın bir yakınsama değeri elde etmiştir. CR 5, PS 100 için yakınsama grafiği, c’de gösterilmiştir. PSO algoritması, bu senaryo için diğer algoritmalarla göre daha hızlı bir şekilde yakınsayarak yaklaşık 80 seviyesinde, en düşük yakınsama sonucuna ulaşmıştır. PS değeri arttıkça ABC algoritmasının, problemi yakınsama performansı azalmış ve belirli bir değerlendirme sayısından sonra, yatay bir eğilim gösteren FA’ya yakın bir sonuca ulaşmıştır. Ayrıca c’de, IPA yöntemlerinin, PS değerine bağlı olarak yakınsama performansının azaldığı görülmüştür. CR 10 için sadece PS parametre değeri 30 ile değerlendirme yapılmıştır ve yakınsama sonuçları, d üzerinde gösterilmiştir. GWO algoritması, CR sayısının 5 seçildiği senaryolardaki yatay eğiliminin dışına çıkmış ve daha dalgalı bir yakınsama yakalamıştır. Swap IPA, diğer yöntemlerin tümünden daha iyi yakınsama sonucu yakalamıştır. GA yakınsama performansını arttırmış ve belirli değerlendirme sayısına kadar diğer yöntemlerden daha hızlı yakınsayarak yatay bir eğilim göstermiştir. PSO algoritmasının yakınsama performansı Fix IPA, ABC, GA ve GWO’dan daha iyidir. Swap IPA’ya göre geride kaldığı görülmektedir. CR sayısı 15 için e değerlendirildiğinde, GA yaklaşık 275 değeri ile en iyi yakınsama sonucuna ulaşmıştır. ABC ve Fix IPA yönteminin, yakın bir şekilde yakınsadıkları

görülmektedir. PSO algoritmasının yakınsama performansı, CR değerinin artmasına bağlı olarak yavaşlamıştır. Swap IPA, sadece GA'nın gerisinde kalmıştır. Senaryo f üzerinde CR 20, PS 30 için elde edilen sonuçların yakınsama grafiği gösterilmiştir. GA algoritmasının, CR sayısı arttıkça daha iyi performans verdiği kesinleşmiştir. CR sayısı arttıkça, PSO algoritmasının yakınsama performansı oldukça düşmüştür. Fix IPA ve ABC ile yaklaşık olarak aynı yakınsama sonucuna ulaşmıştır. FA ve GWO algoritmaları, yatay bir eğilim göstermişlerdir ve yaklaşık en yüksek yakınmasa değeri 475'i diğer algoritmalarla göre daha az yakınsayabilmişlerdir.

Algoritmaların değerlendirme sayısı değişimine göre performanslarının analizi amacıyla 15000 ve 30000 değerlendirme sayısı ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Değerlendirme sayısının değerine bağlı parametresi bulunmayan GA ve ABC için 45000 değerlendirme sayısında kaydedilen skorlar, 15000 ve 30000 değerlendirme sayısı ile sadece okunmuştur. Swap IPA, Fix IPA, PSO, FA ve GWO gibi yöntemler ise 15000 ve 30000 değerlendirme sayısı ile 30 farklı kez tekrardan çalıştırılarak her bir değerlendirmenin en iyi sonuçları kaydedilmiştir. Kaydedilen bu en iyi sonuçların ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmıştır. Karşılaştırma işlemi yapılırken CR sayısının 5 olduğu senaryoda, PS parametresi değeri 30, 50 ve 100 seçilmiştir. CR sayısı 10, 15 ve 20 olan senaryolar için PS parametre değeri, 30 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.10. Swap IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 15000)

CR	PS	Fn.	Swap IPA	ABC	GA	PSO	FA	GWO
5	30	Ort.	82.0000	97.9000	90.0000	87.3666	99.2000	106.5000
		Std.	4.1392	2.1962	1.6733	5.8792	2.1509	2.3345
		Sıra	1	4	3	2	5	6
	50	Ort.	89.0333	101.6000	89.0000	86.6000	100.5333	106.8666
		Std.	4.4831	1.2806	1.8973	6.3435	2.1406	2.8134
		Sıra	3	5	2	1	4	6
	100	Ort.	94.5333	105.7000	90.6000	90.3666	103.6333	106.6000
		Std.	4.1128	1.4177	1.9595	5.6183	1.9576	2.4440
		Sıra	3	5	2	1	4	6
10	30	Ort.	191.3666	208.7333	186.4000	177.4000	208.0000	212.5666
		Std.	4.4682	2.6574	2.7030	4.8069	3.0441	10.4679
		Sıra	3	5	2	1	4	6
15	30	Ort.	308.4666	323.4000	290.8333	292.3000	323.4333	327.5666
		Std.	2.9970	2.2000	2.9335	12.2151	3.4514	6.6617
		Sıra	3	4	1	2	5	6
20	30	Ort.	426.4333	439.1000	398.9333	422.8333	438.2333	444.7666
		Std.	4.4920	3.4578	5.0526	11.6764	2.7286	4.3945
		Sıra	4	5	1	2	4	6
Sıra Ortalaması			2.8333	4.6666	1.8333	1.5	4.3333	6.0000
Genel Sıra			3	5	2	1	4	6

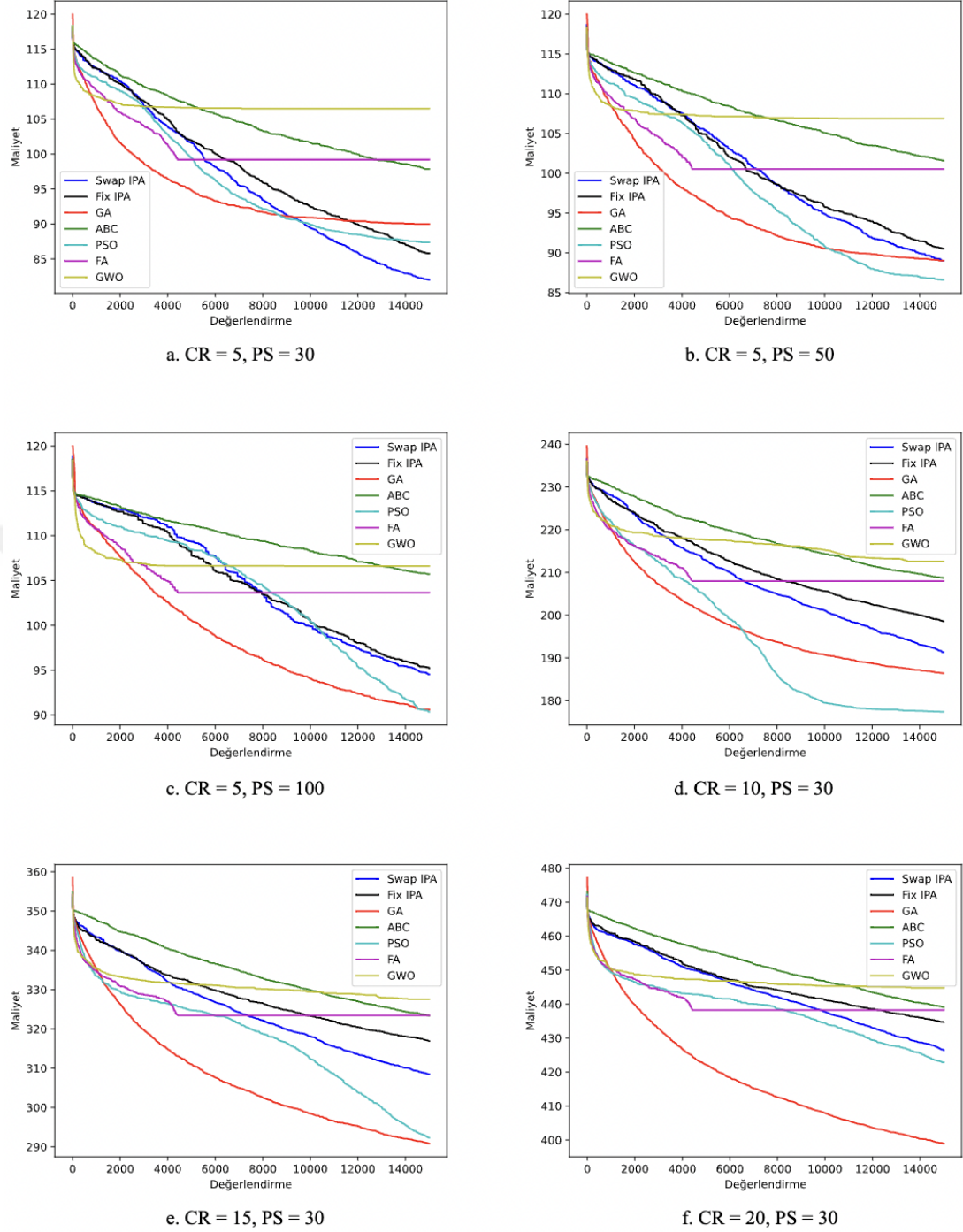
Swap IPA, ABC, GA, PSO, FA ve GWO gibi meta-sezgisel yöntemlerin, 15000 değerlendirme sayısı eşliğinde yapılan çalıştırmaların, ortalama en iyi uygunluk fonksiyon sonuçları ve standart sapmaları Tablo 4.10 üzerinde gösterilmiştir. CR sayısı 5 ve PS değeri 30 seçildiğinde, Swap IPA yaklaşımının diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. PS değeri 50 ve 100 seçildiğinde, PSO ve GA daha başarılı olmuştur. CR sayısı 5 seçildiği zaman, Swap IPA için popülasyon sayısının küçük seçilmesi, Swap IPA yaklaşımının performansının daha iyi olmasını sağlamıştır. CR 10 için PSO daha başarılı olmaktadır. Fakat CR 15 ve 20 olduğunda GA, Swap IPA ve PSO'dan daha başarılı olmaktadır. CR sayısı arttıkça, GA daha iyi sonuçlar vermektedir. Genel sıralamaya bakıldığında, 15000 değerlendirme sayısı için Swap IPA, GA ve PSO gibi yöntemlerin gerisinde kalmıştır.

Tablo 4.11. Fix IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 15000)

CR	PS	Fn.	Fix IPA	ABC	GA	PSO	FA	GWO
5	30	Ort.	85.8000	97.9000	90.0000	87.3666	99.2000	106.5000
		Std.	3.4486	2.1962	1.6733	5.8792	2.1509	2.3345
		Sıra	1	4	3	2	5	6
	50	Ort.	90.5333	101.6000	89.0000	86.6000	100.5333	106.8666
		Std.	3.8706	1.2806	1.8973	6.3435	2.1406	2.8134
		Sıra	3	5	2	1	4	6
	100	Ort.	95.2000	105.7000	90.6000	90.3666	103.6333	106.6000
		Std.	4.4825	1.4177	1.9595	5.6183	1.9576	2.4440
		Sıra	3	5	2	1	4	6
10	30	Ort.	198.5666	208.7333	186.4000	177.4000	208.0000	212.5666
		Std.	3.9130	2.6574	2.7030	4.8069	3.0441	10.4679
		Sıra	3	5	2	1	4	6
15	30	Ort.	316.9333	323.4000	290.8333	292.3000	323.4333	327.5666
		Std.	3.1084	2.2000	2.9335	12.2151	3.4514	6.6617
		Sıra	3	4	1	2	5	6
20	30	Ort.	434.7000	439.1000	398.9333	422.8333	438.2333	444.7666
		Std.	3.3778	3.4578	5.0526	11.6764	2.7286	4.3945
		Sıra	3	5	1	2	4	6
Sıra Ortalaması			2.6666	4.6666	1.8333	1.5	4.3333	6.0000
Genel Sıra			3	5	2	1	4	6

Değerlendirme sayısı 15000 eşliğinde, IP algoritması Algoritma 2'deki düzenleme metodu kullanılarak çalıştırılan Fix IPA yöntemi, diğer meta-sezgiseller ile ortalama en iyi uygunluk fonksiyonu sonuçları ve standart sapmalarına göre kıyaslanması Tablo 4.11 üzerinde gösterilmiştir. Fix IPA, CR sayısı 5, PS parametre değerinin 30 olduğu senaryoda, diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç vermiştir. CR sayısı 5 için popülasyon sayısı 30'dan büyük seçildiğinde, PSO ve GA, Fix IPA'ya

göre daha iyi sonuç vermiştir. Buradan 15000 değerlendirme için CR sayısı 5 belirlendiğinde, Fix IPA yönteminin popülasyon sayısının küçük seçildiği durumlarda, GA ve PSO için ise büyük seçildiği durumlarda, daha iyi performans elde edilmektedir. CR sayısı artarken Fix IPA önde olduğu ABC, FA ve GWO'ya göre sıralamasını koruyabilmiştir. CR sayısının artışı göz önünde bulundurulduğunda, GA daha iyi performans göstermiş ve PSO algoritmasıyla elde edilen sonuçları geride bırakmıştır. Sıralama ortalamasına göre hesaplanan genel sıra değerlendirildiğinde, PSO ilk sıradadır. Fakat GA ile oldukça yakın bir ortalamaya sahiptir. GA ve PSO algoritmasının gerisinde sıralama Fix IPA, ABC, FA ve GWO şeklinde olmuştur. Değerlendirme sayısı 15000 ile belirlenen senaryolara göre elde edilen sonuçlar incelendiğinde, IP algoritmasının farklı yöntemleri, genel sıralamada aynı performansı göstererek, PSO ve GA yöntemlerinin gerisinde kalmıştır. ABC, FA ve GWO yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar elde etmiştir.



Şekil 4.6. Meta-sezgisel algoritmaların DS 15000'e göre yakınsama grafikleri

Swap IPA, Fix IPA, ABC, GA, PSO, FA ve GWO için değerlendirme sayısı 15000 için yakınsama grafikleri Şekil 4.6 üzerinde gösterilmiştir. En iyi uygunluk fonksiyon sonuçlarını içeren [30,15000] diziyi oluşturmak için GA ve ABC algoritmasında değerlendirme sayısı 45000 içerisinde ilk 15000 değer seçilmiştir. Diğer yöntemler, değerlendirme sayısını parametre olarak kullandığı için her biri değerlendirme sayısı 15000 ile tekrardan 30 farklı sefer çalıştırılmıştır. CR 5, PS 30

senaryosunun yakınsama grafiği, a'da gösterilmiştir. IP algoritmasının farklı yöntemleri, diğer algoritmalarla göre problemi, daha iyi yakınsamışlardır. GA belirli bir değerlendirme sayısına kadar diğer algoritmalarla göre problemi daha hızlı yakınsamıştır; fakat sonrasında FA ve GWO gibi yatay bir eğilim göstermiştir ve Swap IPA, Fix IPA ve PSO algoritmasının gerisinde kalmıştır. IPA yöntemleri ve ABC yatay bir eğilim göstermemektedir, problemi daha iyi yakınsamaları için daha fazla değerlendirmeye ihtiyacı olduğu senaryo a'dan çıkarılmaktadır. CR 5 için PS sayısı artırıldığında Swap IPA, Fix IPA ve ABC'nin yakınsama performansının düştüğü ve PSO'nun yakınsama hızının yavaşladığı, b ve c'de görülmektedir. CR 10 için PS 30 ile değerlendirme yapılmıştır ve algoritmaların problemi yakınsama performansları, d üzerinde gösterilmiştir. Senaryo d incelendiğinde, PSO algoritması en küçük yakınsama değerine ulaşmıştır. IPA yöntemi her iki yöntemi de PSO ve GA'nın gerisinde kalmışlardır. CR sayısı 15 ve 20'ye çıkarıldığında, yakınsama performansları, Senaryo e ve f'de gösterilmiştir. CR sayısı artırıldığında, GA problemi diğer algoritmalarla göre daha fazla yakınsamıştır. FA ve GWO, diğer senaryolara benzer bir yakınsama performansı göstermiştir. IPA yöntemlerinin yakınsama performansı, CR sayısı arttıkça müsait frekans sayısının azalmasına bağlı olarak düşmektedir.

Değerlendirme sayısı 30000 için öncelikle Swap IPA yönteminin performansı, diğer meta-sezgisel yöntemlerin performansı ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonuçları Tablo 4.12'de gösterilmiştir. Tablo 4.12 üzerindeki sonuçlar değerlendirildiğinde CR sayısının 5, PS sayısı 30 olduğunda, Swap IPA daha iyi sonuç vermiştir. CR sayısının ve popülasyondaki üye sayısının daha az olduğu durumlarda, az değerlendirme sayısında Swap IPA, diğer algoritmalarla göre daha iyi sonuç vermektedir. PS parametre değeri 50 ve 100 seçildiğinde, PS 50 için Swap IPA, PSO'nun gerisinde ve PS 100 için PSO ve GA'nın gerisinde kalmıştır. İlk üç sıralamanın haricinde, diğer algoritmalarla sıralama ABC, FA ve GWO şeklindedir. CR 10 için PSO algoritması, Swap IPA yönteminden daha iyi sonuç vermiştir. CR 15 ve 20 için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, CR değeri arttıkça GA'nın performansı yükselmiştir. Bunun sebebi, GA'nın işlem adımlarından biri olan, mutasyon işlemi gerçekleştirilirken değiştirilen frekans sayısının, CR parametresinin değerine bağlı olmasıdır. Fakat mutasyon aşamasında yapılan frekans değişiklikleri arttıkça, frekans kontrol maliyeti arttığından, algoritmanın çalışma süresi de artacaktır. CR sayısı daha da artırıldığında, PSO'nun performansının azaldığı

görülmektedir. CR 15 için PSO algoritması ikinci sıradayken CR sayısı 20 seçildiğinde Swap IPA yönteminin gerisinde kalarak üçüncü sırada değerlendirilmiştir. Sıralama ortalamasına göre genel sıra sonuçları elde edildiğinde, Swap IPA yönteminin ikinci sırada olduğu görülmektedir. Değerlendirme sayısı 30000 için Swap IPA değerlendirme sayısı 15000'e göre daha iyi bir sıralama elde ederken değerlendirme sayısı 45000'e göre daha kötü bir sıralama elde etmiştir. Bu değerlendirmelerin sonucunda, Swap IPA yönteminin performansı, değerlendirme sayısının artışına göre doğru orantılı bir şekilde arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Değerlendirme sayısı 30000 ile yapılan çalıştırma için sıralama PSO, Swap IPA, GA, ABC, FA ve GWO şeklindedir.

Tablo 4.12. Swap IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 30000)

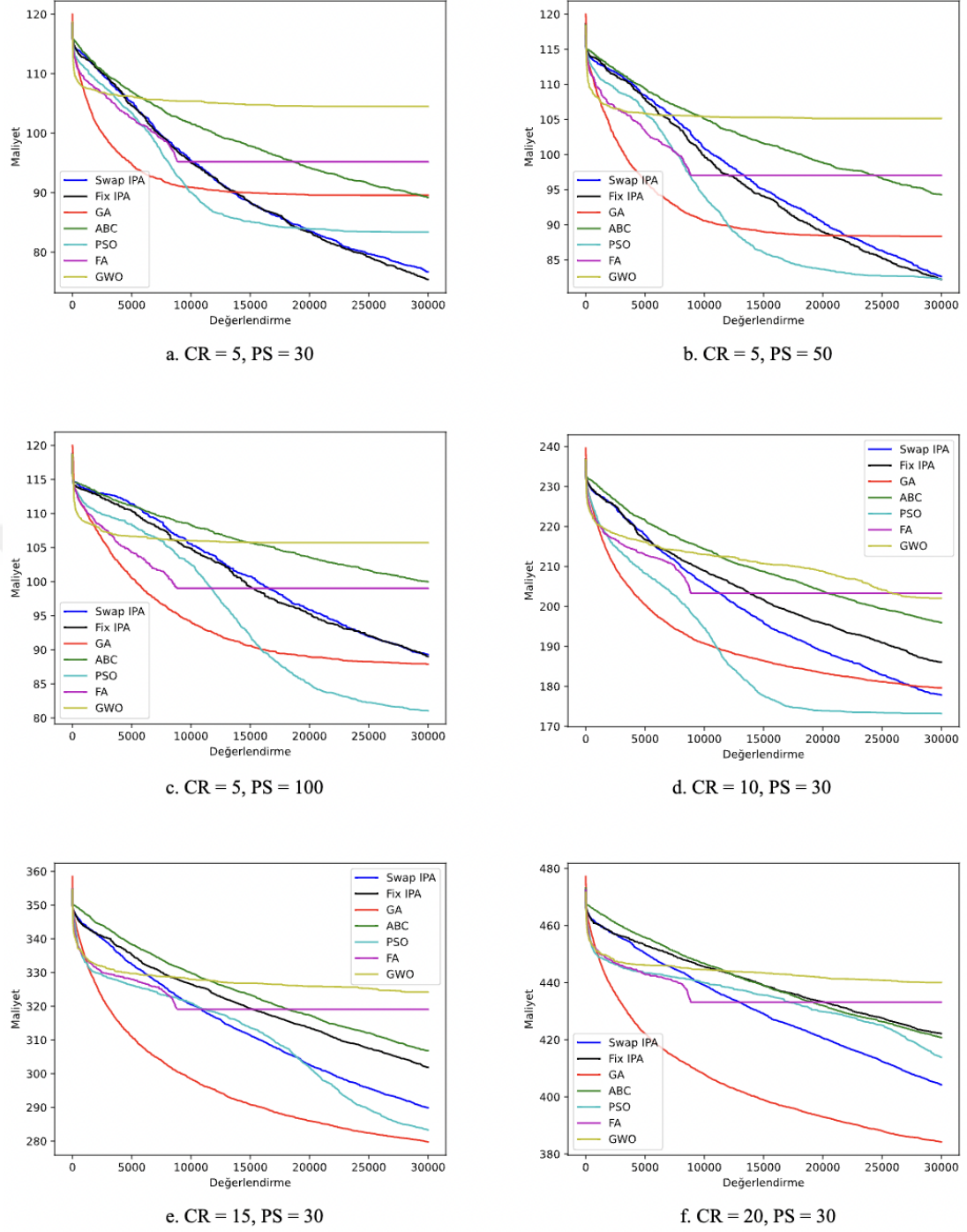
CR	PS	Fn.	Swap IPA	ABC	GA	PSO	FA	GWO
5	30	Ort.	76.7000	89.5000	89.5666	83.3666	95.2000	104.5000
		Std.	5.2861	2.3202	1.8381	4.4308	2.8913	3.7036
		Sıra	1	3	4	2	5	6
	50	Ort.	82.6333	94.3000	88.3666	82.2333	97.0666	105.1333
		Std.	6.0689	1.9000	1.9058	4.7657	2.7194	3.1488
		Sıra	2	4	3	1	5	6
	100	Ort.	89.3000	100.0000	87.9000	81.0666	99.0333	105.7333
		Std.	5.1065	1.7701	2.1656	6.1042	1.6017	3.4149
		Sıra	3	5	2	1	4	6
10	30	Ort.	177.8333	195.9333	179.6000	173.2000	203.3000	202.0333
		Std.	5.0005	2.8859	2.7999	4.0282	3.2777	16.8215
		Sıra	2	4	3	1	6	5
15	30	Ort.	289.8666	306.8000	279.7666	283.3	319.1000	324.2000
		Std.	4.3261	3.2903	3.9470	6.6890	3.1764	6.6151
		Sıra	3	4	1	2	5	6
20	30	Ort.	404.2000	420.8333	384.2333	413.8666	433.1666	440.0666
		Std.	4.1505	3.3274	5.8062	15.3812	3.6975	5.3971
		Sıra	2	4	1	3	5	6
Sıra Ortalaması			2.1666	4.0000	2.3333	1.6666	5.0000	5.8333
Genel Sıra			2	4	3	1	5	6

Son olarak değerlendirme sayısı 30000 için Fix IPA yönteminin performansı Tablo 4.13 üzerindeki sonuçlar üzerinden ABC, GA, PSO, FA ve GWO gibi meta sezgisel algoritmalarla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, değerlendirme sayısı 15000 ile elde edilen sonuçlara göre senaryoların tümünde algoritmaların performanslarının iyileştiği görülmektedir. CR sayısı 5 için PS parametresinin değeri 30 ve 50 seçildiğinde, Fix IPA ile daha iyi sonuç elde edilmiştir. PS değeri 30 için değerlendirme sayısı 30000 olarak çalıştırıldığında, popülasyon sayısı küçük olduğunda ABC, PSO algoritmasına göre kötü; fakat GA'ya göre daha iyi sonuç vermiştir. PS sayısı arttıkça, ABC algoritmasının performansı

azalmaktadır. Popülasyon sayısı artırıldığında, GA performansını doğru orantılı bir şekilde arttırmıştır. PS 100 için GA, Fix IPA yönteminden daha iyi sonuç vermiştir. CR sayısı 10, 15 ve 20 seçildiğinde PSO ve GA, Fix IPA yöntemine göre daha başarılı olmuştur. CR sayısı 15 ve 20 seviyelerine ulaştığında GA optimizasyon başarısını arttırmıştır. GA için mutasyon sayısına göre frekans değişimi yapılmaktadır. Mutasyon sayısı değeri CR, PS ve ağdaki baz istasyonu sayısına göre değiştiği için parametrelerin değerleri arttıkça, daha fazla frekans değişimi gerçekleştiğinden, algoritmanın performansı iyileşmiştir. Değerlendirme sayısı 30000 için genel sıralama değerlendirildiğinde Fix IPA, sırasıyla GA ve PSO algoritmalarının gerisinde kalmıştır. Fakat ABC, FA ve GWO algoritmalarına göre daha iyi bir sıralamaya sahiptir.

Tablo 4.13. Fix IPA yönteminin meta-sezgisel algoritmalar ile kıyaslanması (DS: 30000)

CR	PS	Fn.	Fix IPA	ABC	GA	PSO	FA	GWO
5	30	Ort.	75.4000	89.5000	89.5666	83.3666	95.2000	104.5000
		Std.	5.5892	2.3202	1.8381	4.4308	2.8913	3.7036
		Sıra	1	3	4	2	5	6
	50	Ort.	82.2000	94.3000	88.3666	82.2333	97.0666	105.1333
		Std.	3.9106	1.9000	1.9058	4.7657	2.7194	3.1488
		Sıra	1	4	3	2	5	6
	100	Ort.	89.0333	100.0000	87.9000	81.0666	99.0333	105.7333
		Std.	3.5728	1.7701	2.1656	6.1042	1.6017	3.4149
		Sıra	3	5	2	1	4	6
10	30	Ort.	186.1000	195.9333	179.6000	173.2000	203.3000	202.0333
		Std.	4.5412	2.8859	2.7999	4.0282	3.2777	16.8215
		Sıra	3	4	2	1	6	5
15	30	Ort.	301.8666	306.8000	279.7666	283.3	319.1000	324.2000
		Std.	3.5093	3.2903	3.9470	6.6890	3.1764	6.6151
		Sıra	3	4	1	2	5	6
20	30	Ort.	422.2000	420.8333	384.2333	413.8666	433.1666	440.0666
		Std.	4.0199	3.3274	5.8062	15.3812	3.6975	5.3971
		Sıra	3	4	1	2	5	6
Sıra Ortalaması			2.8333	3.8333	2.1666	1.6666	5.0000	5.8333
Genel Sıra			3	4	2	1	5	6



Şekil 4.7. Meta-sezgisel algoritmaların DS 30000'e göre yakınsama grafikleri

Değerlendirme sayısı 30000 için en iyi uygunluk fonksiyon sonuçları [30,30000] dizisi, değerlendirme sayısı 15000 ile aynı şekilde elde edilmiştir. Algoritmaların farklı senaryolarda problemi yakınsama performansları Şekil 4.7'de gösterilmiştir. CR sayısı 5, PS 30, 50 ve 100 için sırasıyla senaryo a, b ve c üzerinde gösterilmiştir. PS parametresi arttıkça, Swap IPA, Fix IPA, ABC, FA ve GWO için problemi yakınsama performansı azalırken, PSO ve GA performanslarını

iyileşmiştir. PS parametre değerinin sabit tutulup, CR 10, 15 ve 20 için senaryo d, e ve f incelendiğinde, GA'nın problemi yakınsama performansı artarken, diğer algoritmaların yakınsama performanslarının azaldığı görülmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının öncelikle ilk bölümde bilişsel radyolar ve bilişsel radyo ağlarının genel özelliklerine ve mimarisine değinilmiştir. Daha sonrasında, ikinci bölümde kanal atama problemi anlatılmıştır. Ayrıca CR kullanıcılarına atadığımız frekansların doğruluğunu belirlemek için kullandığımız uygunluk fonksiyonu ve tasarladığımız ağ modeli sunulmuştur. Üçüncü bölümde, kanal atma problemini çözmek için önerdiğimiz IPA ve IP algoritmasını güncelleyerek geliştirdiğimiz yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca IPA temelli yöntemlerle kıyaslanan meta-sezgisel algoritmalarından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise, önerilen yöntemlerin performansları çeşitli parametreler eşliğinde oluşturulan senaryolar ile kıyaslanarak incelenmiştir.

Tez kapsamında, kanal atama probleminin çözülmesi için İmmün plazma algoritması önerilmiştir. Önerilen bu algoritmayla CR kullanıcılarına doğru frekansları atayarak frekans değişimiyle oluşan frekans gecikmelerinin azaltılmasıyla, ağdaki frekansların verimli bir şekilde kullanılması hedeflenmiştir. CR kullanıcıları arasındaki frekans girişimlerini engellemek amacıyla, önerilen algoritmaya yardımcı olarak çalışan düzenleme metodu geliştirilmiştir. Elde edilecek çözümlerin kalitesini arttırabilmek adına Swap IPA ve Fix IPA olarak adlandırdığımız iki farklı IPA yöntemi önerilmiştir. IPA temelli yöntemler öncelikle kendi arasında, sonrasında ise ABC, FA, PSO, GA ve GWO gibi meta-sezgisel algoritmalar ile performansları kıyaslanmıştır. Algoritmaların performanslarını test etmek üzere CR, PS ve DS parametreleriyle senaryolar oluşturulmuştur. Senaryoların çözümleri gerçekleştirildiğinde, IPA temelli yöntemlerde bilişsel radyolar arasındaki etkileşimin takip edilebilirliği sayesinde, senaryoların genelinde daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

İmmün Plazma algoritması temelli yöntemlerin, genel bir değerlendirmesi yapılarak avantajlı ve dezavantajlı yönlerine değinilmiştir. IPA temelli yöntemlerin, en önemli avantajı bilişsel radyolar arasındaki etkileşimi kontrol ederek ve daha az frekans kıyası yaparak, daha kısa sürede çalışmasıdır. Ayrıca popülasyon sayısının küçük olduğu senaryolarda diğer meta-sezgisel algoritmalarla göre oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Değerlendirme sayısı arttıkça, IP algoritmasının performansı da doğru orantılı olarak artmıştır. Çizdirilen yakınsama grafiklerine göre değerlendirme sayısının, belirlediğimiz senaryolardaki değerlendirme sayısının, daha da üstüne

çıkılsa bile algoritmanın yatay bir eğilimi kısa sürede göstermeyeceği görülmektedir. Önerdiğimiz yöntemin dez avantajları da bulunmaktadır. Popülasyondaki birey sayısı arttıkça, donör ve alıcı birey ya da bireyler arasında plazma transferinin daha az gerçekleşmesinden kaynaklı olarak, algoritmanın performansı azalmaktadır. Ayrıca CR kullanıcılarının sayısının artmasıyla, ağdaki müsait frekans sayısının azalması, performansı olumsuz bir şekilde etkilediği görülmektedir.

IPA, GA ve PSO ile yapılan kıyaslamalar, çalışmanın daha önceki bölümlerinde incelenmiş ve farklı senaryolarda algoritmaların daha iyi performanslar gösterdiğine ulaşılmıştı. GA ve PSO algoritmalarının avantajlı yönleri üzerinden araştırmalar yapılarak, IPA temelli yöntemlerin en iyi çözümü bulmasına katkı sağlayacak düzenlemeler yapılması ve farklı meta-sezgisel algoritmaların bir arada kullanılarak, hibrit yapıların oluşturulması hedeflenmektedir.

Ayrıca kanal atama probleminin çözülmesi için meta-sezgisel yöntemlere yardımcı olarak çalışan ve Algoritma 2 ile açıklanan düzenleme metodunun geliştirilmiş bir versiyonu, tez çalışmasında kullanılan algoritmalar ve veri setiyle birlikte daha gelişmiş bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak, performansın analiz edilmesi, gelecekte yapılması hedeflenen çalışmalar arasındadır.

KAYNAKÇA

- Agarwal, S., Vijay, S. and Bagwari, A. (2021). "An Enhanced Spectrum Allocation Algorithm for Secondary Users in Cognitive Radio Networks". <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-381522/v1>, (02.06.2021).
- Ahmed, E., Gani, A., Abolfazli, S., Yao, L. J. and Khan, S. U. (2014). "Channel Assignment Algorithms in Cognitive Radio Networks: Taxonomy, Open Issues, and Challenges", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 18(1). 795-823.
- Akan, O.B., Karli, O.B. and Ergul, O., (2009). "Cognitive Radio Sensor Networks", *IEEE Network*. 23(4). 34-40.
- Akay, B. (2013). "A Atudy on Particle Swarm Optimization and Artificial Bee Colony Algorithms for Multilevel Thresholding", *Applied Soft Computing*. 13(6). 3066-3091.
- Akyildiz, I.F., Lee, W.Y., Vuran, M.C. and Mohanty, S. (2006). "Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey", *Computer Networks*. 50(13). 2127-2159.
- Arora, S., Singh, S., Singh, S. and Sharma, B. (2014, December). "Mutated Firefly Algorithm", In *2014 International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing*, (s. 33-38).
- Aslan, S. and Demirci, S. (2020). "Immune Plasma Algorithm: A Novel Meta-Heuristic for Optimization Problems", *IEEE Access* (C 8, 220227- 220245).
- Bayhan, S. and Alagoz, F. (2012). "Scheduling in Centralized Cognitive Radio Networks for Energy Efficiency", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 62(2). 582-595.
- Bayrakdar, M. E. and Çalhan, A. (2018). "Artificial Bee Colony-Based Spectrum Handoff Algorithm in Wireless Cognitive Radio Networks". *International Journal of Communication Systems*. 31(5). e3495.
- Chen, L., Huang, L., Xu, H. and Guo, H. (2018). "Optimal Channel Allocation for Multi-PU and Multi-SU Pairs in Underlay Cognitive Radio Networks", *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*. 27(1). 19-33.
- Coşar, B. M. (2021). "New Greedy Algorithms to Optimize The Curriculum-Based Course Timetabling Problem", Master's Thesis, (s. 1-104) Atılım University, Ankara
- Çetin, N. (2002). "Genetik Algoritma", Yüksek Lisans Tezi. (s. 1-111) Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Delves, P. J. and Roitt, I. M. (2000). "The Immune System", *New England Journal of Medicine*. 343(1). 37-49.
- Demirci, S. and Gözüpek, D. (2019). "Switching Cost-Aware Joint Frequency Assignment and Scheduling for Industrial Cognitive Radio Networks", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 16(7). 4365-4377.
- Devi, M., Sarma, N. and Deka, S. K. (2021). "Multi-Winner Spectrum Allocation in Cognitive Radio Networks: A Single-Sided Auction Theoretic Modelling Approach with Sequential Bidding". *Electronics*. 10(5). 602.
- Dokeroglu, T., Sevinc, E., and Cosar, A. (2019). "Artificial Bee Colony Optimization for the Quadratic Assignment Problem", *Applied Soft Computing*. 76. 595-606.
- Dokuz, Y. (2014). "Bilişsel Radyo Uygulamaları için En Uygun Frekansın Zamansal ve Mekansal Olarak Yapay Arı Koloni Algoritması ile Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi. (s. 1-82). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

- Haykin, S. (2005). "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 23(2). 201-220.
- He, Q., and Zhang, P. (2012, September). "Dynamic Channel Assignment Using Ant Colony Optimization for Cognitive Radio Networks", In *2012 IEEE Vehicular Technology Conference* (s. 1-5).
- Hermawanto, D. (2013). "Genetic Algorithm for Solving Simple Mathematical Equality Problem", *arXiv preprint arXiv:1308.4675*.
- Jothiraj, S., Balu, S. and Rangaraj, N. (2021). "An Efficient Adaptive Threshold-Based Dragonfly Optimization Model for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks", *International Journal of Communication Systems*. 34(10). e4829.
- Karaboga, D. (2005). "An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization", *Technical Report-tr06* (C. 200, 1-10), Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.
- Karaboga, D. and Basturk, B. (2007). "A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm". *Journal of Global Optimization*. 39(3). 459-471.
- Kunz, D. (1991). "Channel Assignment for Cellular Radio Using Neural Networks". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 40(1). 188-193.
- Latif, S., Akraam, S., Malik, A. J., Abbasi, A. A., Habib, M. and Lim, S. (2021). "Improved Channel Allocation Scheme for Cognitive Radio Networks". *Intelligent Automation And Soft Computing*. 27(1). 103-114.
- Le, L. B. (2012). "Channel Assignment with Access Contention Resolution for Cognitive Radio Networks". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 61(6). 2808-2823.
- Lee, W. Y. and Akyildiz, I. F. (2010). "A Spectrum Decision Framework for Cognitive Radio Networks". *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 10(2). 161-174.
- Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. (2014). "Grey Wolf Optimizer", *Advances in Engineering Software* (C 69, 46-61). <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>, (04.2014)
- Mitola, J., and Maguire, G. Q. (1999). "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", *IEEE Personal Communications*. 6(4). 13-18.
- Öztürk, A. (2007). "Güç Sistemlerindeki Gerilim Kararlılığının Genetik Algoritma ile İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi. (s. 1-188). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Qin, Y., Zhong, X., Yang, Y., Li, L. and Ye, Y. (2016). "Combined Channel Assignment and Network Coded Opportunistic Routing in Cognitive Radio Networks", *Computers and Electrical Engineering*, (C 52, 293-306).
- Qureshi, M. A. and Tekin, C. (2020). "Rate and Channel Adaptation in Cognitive Radio Networks Under Time-Varying Constraints", *IEEE Communications Letters*. 24(12). 2979-2983.
- Rahim, M., Alfakeeh, A. S., Hussain, R., Javed, M. A., Shakeel, A., Israr, A. and Malik, S. A. (2020). "Efficient Channel Allocation Using Matching Theory for QoS Provisioning in Cognitive Radio Networks". *Sensors*. 20(7). 1872.
- Raj, J. S. (2020). "Machine Learning Implementation in Cognitive Radio Networks with Game-Theory Technique", *Journal: IRO Journal on Sustainable Wireless Systems*. 2(2). 68-75.

- Ranjan, R., Agrawal, N. and Joshi, S. (2020). "Interference Mitigation and Capacity Enhancement of Cognitive Radio Networks Using Modified Greedy Algorithm/Channel Assignment and Power Allocation Techniques", *IET Communications*. 14(9). 1502-1509.
- Salameh, H. A. B., Almajali, S., Ayyash, M. and Elgala, H. (2018). "Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks for Internet-of-Things Delay-Sensitive Applications Under Jamming Attacks", *IEEE Internet of Things Journal*. 5(3). 1904-1913.
- Salameh, H. B. and Khasawneh, H. (2021). "Routing in Cognitive Radio Networks with Full-Duplex Capability Under Dynamically Varying Spectrum Availability", *ICT Express*. 7(1). 115-120.
- Sanka, S. N., Yarram, T. R., Yenumala, K. C., Anumandla, K. K. and Dabbakuti, J. K. (2021). "Dragonfly Algorithm Based Spectrum Assignment for Cognitive Radio Networks", *Materials Today: Proceedings* (s. 1-4).
- Shi, Y. (2001, May). "Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources", In *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)* (C 1, 81-86).
- Tang, F. and Li, J. (2016). "Joint Rate Adaptation, Channel Assignment and Routing to Maximize Social Welfare in Multi-Hop Cognitive Radio Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 16(4), 2097-2110.
- Tlouyamma, J. and Velempini, M. (2021). "Channel Selection Algorithm Optimized for Improved Performance in Cognitive Radio Networks", *Wireless Personal Communications*, (s. 1-18).
- U.S. Department of Health and Human Services (2007), "Understanding The Immune System How It Works", *Tech. Rep.* 07-5423 (s. 1-63). Nat. Inst. Allergy Infectious Diseases, Washington, DC, USA.
- Voß, S. (2000, August). "Meta-Heuristics: The State of The Art". In *Workshop on Local Search for Planning and Scheduling* (s. 1-23). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Wang, S., Cao, F. and Fan, Z. (2013). "Periodic Partial Soft Sensing and Spectrum Handoff in Cognitive Relay Networks", *Conference Proceedings, IEEE International Conference on Communications* (s. 2683 – 2688), Budapest.
- Wei, Z. H., and Hu, B. J. (2018). "A Fair Multi-Channel Assignment Algorithm with Practical Implementation in Distributed Cognitive Radio Networks", *IEEE Access* (C 6, 14255-14267).
- Wolpert, D. H., and Macready, W. G. (1997). "No Free Lunch Theorems for Optimization". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1). 67-82.
- Xu, J., and Zhang, J. (2014). "Exploration-Exploitation Tradeoffs in Metaheuristics: Survey and Analysis", In *Proceedings of the 33rd Chinese control conference* (s. 8633-8638). IEEE.
- Yang, X. S. (2009). "Firefly Algorithms for Multimodal Optimization", In *International Symposium on Stochastic Algorithms*, Springer (s. 169-178), Berlin, Heidelberg.
- Yilmazel, R. and Inanç, N. (2021). "A Novel Approach for Channel Allocation In OFDM Based Cognitive Radio Technology", *Wireless Personal Communications* (s. 1-15).
- Yu, S., Zhu, S., Ma, Y. and Mao, D. (2015). "A Variable Step Size Firefly Algorithm for Numerical Optimization", *Applied Mathematics and Computation* (C. 263, 214-220).

EKLER

Düzenleme Metodu: CR kullanıcıları arasında oluşabilecek olası frekans girişimlerini tespit edilip ortadan kaldırması için kullanılmaktadır.

```
def fix_algorithm(m):

    available_freq_temp = []
    available_freq = []
    for v in range(TS):

        freq = get_available_frequency(v)

        for a in range(CR):
            available_freq_temp.append(m[a][v])
        for b in range(len(freq)):
            if freq[b] not in available_freq_temp:
                available_freq.append(freq[b])
        counter = 0
        for x in range(CR):
            if v == 0:
                for y in range(CR):
                    if (x != y):
                        if m[x][v] == m[y][v]:
                            m[y][v] = available_freq[counter]
                            counter += 1
            else:
                for y in range(CR):
                    if (x != y):
                        if m[x][v] == m[y][v]:
                            m[y][v] = available_freq[counter]
                            counter += 1

        available_freq_temp.clear()
        available_freq.clear()

    return m
```

Frekans kontrol algoritması: Ağ üzerindeki frekans kullanımını denetler ve hataların konumlarını gösterir.

```
def frequency_controller_function(m, pop_pos):  
  
    for aa in range(TS):  
        for bb in range(CR):  
            if m[bb][aa] not in get_available_frequency(aa):  
                print("Hatalı Frekans var -> Population = ", pop_pos, " CR = ", bb, " TS = ", aa)  
  
            for yy in range(CR):  
                if bb != yy:  
                    if m[bb][aa] == m[yy][aa]:  
                        print("Aynı Frekans Kullanımı -> Population = ", pop_pos, " CR = ", bb, " TS = ", aa)
```

Uygunluk Fonksiyonu: Problemin çözümü için belirlenen uygunluk fonksiyonunu göstermektedir.

```
def fitness_function(x):  
    TS = len(x[0])  
    CR = len(x)  
    total = 0  
    for a in range(CR):  
        for b in range(TS - 1):  
            if x[a][b] != x[a][b + 1]:  
                total += 1  
  
    return total
```

Müsait Frekanslar Fonksiyonu: Parametre olarak gönderilen baz istasyonunu parametre olarak müsait frekanslar dizisini getirmektedir.

```
def get_available_frequency(time_slot):  
    temp_data_set = []  
    for a in range(len(data_set[time_slot])):  
        if data_set[time_slot][a] == 0:  
            temp_data_set.append(a)  
  
    return temp_data_set
```

Tablo Ek 1. Veri Seti (Kunz. 1991)

Baz İstasyonları	PU Kullanıcıları Tarafından Kullanılan Frekanslar
0	1, 21, 25, 27, 30, 32, 34, 36, 51, 62
1	4, 10, 15, 17, 19, 39, 42, 44, 46, 57, 68
2	0, 2, 5, 9, 14, 33, 38, 41, 45
3	1, 10, 17, 34, 44
4	11, 28, 35, 37, 47, 50, 55, 65, 67
5	1, 25, 42, 68
6	16, 28, 35, 37, 50
7	11, 47, 52, 55, 63, 65, 70
8	3, 26, 69, 71
9	6, 13, 20, 23, 40, 43, 60, 70
10	27, 36, 39, 42, 62, 64, 66, 68
11	7, 12, 49, 53, 58, 61, 64, 66, 72
12	3, 8, 18, 26, 29, 31, 54, 56, 69, 71
13	16, 22, 24, 48, 52, 59, 63
14	0, 2, 9, 14, 38, 41, 61
15	5, 10, 12, 17, 19, 34
16	27, 62, 64, 68
17	1, 28, 40, 43, 67
18	11, 23, 50, 58, 70
19	6, 15, 32, 55, 60, 65, 72
20	3, 5, 8, 40, 44, 59
21	10, 34, 44, 59
22	7, 29, 38, 41, 63
23	0, 5, 9, 12, 14, 32, 58
24	13, 43, 55, 65, 70

ÖZ GEÇMİŞ

Murat KISA, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nden 2018 yılında mezun oldu. 2018 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans programına girdi. 2018 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Teknoparkında faaliyet gösteren ve Türkiye’nin ilk yerli mobil ultrason cihazı geliştiren firmasında çalışma hayatına başladı. 2020 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Teknopark’ında bulunan ve turizm alanında yazılım geliştirmekte olan bir firmada yazılım geliştirici olarak çalışmaktadır. Temel ilgi alanları, Bilgisayar Yazılımı, Bilgisayar ve İletişim Ağlarıdır. (05/09/2022).

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0003-2054-9677

Yayınlar:

1. Kısa, M., Aslan, S. ve Demirci, S. (2021). “İmmün Plazma Algoritması ile Bilişsel Radyo Ağlarında Çok Kullanıcılı Kanal Atama Probleminin Çözülmesi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Özel Sayı 2021 (ISMSIT)*, (s. 304-310). doi: 10.31590/ejosat.1024761
2. M. Kısa, S. Demirci, S. Arslan and S. Aslan (2021). “Solving Channel Assignment Problem in Cognitive Radio Networks with Immune Plasma Algorithm”, *2021 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, (s. 818-822). doi: 10.1109/UBMK52708.2021.9558950.