



T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OFDM-AIM İLETİM TEKNİĞİ İÇİN PARÇACIK SÜRÜ
OPTİMİZASYON TABANLI ALT-BLOK SET TASARIMI

YUSUF ÜNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mahmut YILDIRIM

ŞUBAT – 2024

YOZGAT

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**OFDM-AIM İLETİM TEKNİĞİ İÇİN PARÇACIK SÜRÜ
OPTİMİZASYON TABANLI ALT-BLOK SET TASARIMI**

YUSUF ÜNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mahmut YILDIRIM

ŞUBAT – 2024

YOZGAT



YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU

T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 70111520007 numaralı öğrencisi Yusuf ÜNAL'ın hazırladığı “**OFDM-AIM İletim Tekniği İçin Parçacık Sürü Optimizasyon Tabanlı Alt-Blok Set Tasarımı**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 20/02/2024 Salı günü saat 11:00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği ile karar verilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı AKKAYA
Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Mahmut YILDIRIM
(Danışman)
Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Hakan KIŞIOĞLU

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

...../...../.....

Prof. Dr. Ümit BUDAK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yusuf ÜNAL

20/02/2024

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, OFDM-AIM iletim tekniği için parçacık sürü optimizasyon tabanlı alt-blok set tasarımı amaçlanmış ve bu doğrultuda simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Çalışma süresince, en başta farklı bakış açıları sunarak bana yardımcı olan ve çalışmamı gerçekleştirirken bilgisini, deneyimini benden esirgemeyen çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mahmut YILDIRIM'a en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Son olarak yanımda dimdik duran her konuda beni cesaretlendiren; yardımını, desteğini benden esirgemeyen canım eşim Safa ÜNAL ve canım oğlum Mert Çağrı'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yusuf ÜNAL

20/02/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OFDM-AIM İLETİM TEKNİĞİ İÇİN PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYON TABANLI ALT-BLOK SET TASARIMI

YUSUF ÜNAL

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ MAHMUT YILDIRIM

5G (Beşinci Nesil) ötesi iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinden biri olan İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM-IM) üzerinde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Tüm İndeks Modülasyonlu OFDM (OFDM-AIM) tekniği de OFDM-IM'nin spektral verimliliğinin artırılması amacı ile geliştirilmiş bir tekniktir. OFDM-IM tekniğinde boş alt-taşıyıcılar bulunmakta iken OFDM-AIM tekniğinde tüm alt-taşıyıcılar aktif duruma getirilmiştir. Bu tez çalışmasında OFDM-AIM'in bit hata oranı (BHO) performansının iyileştirilmesi amacıyla Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritması tabanlı bir alt-blok set tasarımı önerilmiştir (PSO-OFDM-AIM). Önerilen PSO-OFDM-AIM tekniğinde veri bitleri, çeşitlilik kazancının artırılması amacıyla QAM takımyıldızı uzayının tamamı ile olası eşleştirme noktası olarak değerlendirilirken bu durum OFDM-AIM tekniğinde sadece QAM takımyıldızı noktaları ile eşleştirilmektedir. PSO-OFDM-AIM tekniğinde en yüksek uygunluk değerine sahip eşleştirme deseni PSO algoritması tarafından belirlenerek alt-blok seti oluşturulur. Simülasyon çalışmalarında PSO-OFDM-AIM tekniği; literatürde yer alan diğer teknikler olan OFDM, OFDM-IM, OFDM-AIM, koordinat serpiştirmeli OFDM-IM (KS-OFDM-IM), Karınca Koloni Optimizasyon algoritması tabanlı OFDM-AIM (KKO-OFDM-AIM) ve Yapay Arı Kolonisi algoritması tabanlı OFDM-AIM (YAK-OFDM-AIM) teknikleri ile kıyaslanmıştır.

2024, xv+56 Sayfa

Anahtar kelimeler: Kablosuz haberleşme sistemleri, OFDM, OFDM-IM, OFDM-AIM, Zeki optimizasyon teknikleri, Pso

ABSTRACT

MASTER THESIS

PARTICLE SWARM OPTIMIZATION BASED SUB-BLOCK SET DESIGN FOR OFDM-AIM TRANSMISSION TECHNIQUE

YUSUF ÜNAL

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF ELEKTIK-ELEKTRONIK**

SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. MAHMUT YILDIRIM

Many studies have been carried out on Index Modulated Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM-IM), which is one of the candidate transmission techniques for beyond 5G (Fifth Generation) communication systems. All Index Modulated OFDM (OFDM-AIM) technique is a technique developed to increase the spectral efficiency of OFDM-IM. While there are empty sub-carriers in the OFDM-IM technique, all sub-carriers are activated in the OFDM-AIM technique. In this thesis study, a sub-block set design based on the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is proposed to improve the bit error rate (BER) performance of OFDM-AIM (PSO-OFDM-AIM). In the proposed PSO-OFDM-AIM technique, the data bits are evaluated as possible matching points with the entire QAM constellation space in order to increase the diversity gain, while in the OFDM-AIM technique, they are matched only with the QAM constellation points. In the PSO-OFDM-AIM technique, the matching pattern with the highest fitness value is determined by the PSO algorithm and a sub-block set is created. PSO-OFDM-AIM technique in simulation studies; Other techniques in the literature are OFDM, OFDM-IM, OFDM-AIM, coordinate interleaved OFDM-IM (CI-OFDM-IM), Ant Colony Optimization algorithm based OFDM-AIM (ACO-OFDM-AIM) and Artificial Bee Colony algorithm based It was compared with OFDM-AIM (YAK-OFDM-AIM) techniques.

2024, xv+56 Page

Keywords: Wireless communication systems, OFDM, OFDM-IM, OFDM-AIM, Intelligent optimization techniques, Pso

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAY SAYFASI.....	ii
TEZ BEYANI.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
DENKLEMLER LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
1. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	1
1.1. Genel Bilgiler.....	1
1.2. Tezin Literatürdeki Yeri	2
1.3. Tezin Amacı ve Önemi	3
2. KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ	5
2.1. Giriş	5
2.2. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)	5
2.3. İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM-IM)	11
2.4. Tüm İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM-AIM) ...	14
3. OFDM-AIM TEKNİĞİ İÇİN ALT-BLOK SET TASARIMINDA KULLANILAN ZEKİ OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ	16
3.1. Literatürde Alt Blok Set Tasarımında Kullanılan Zeki Optimizasyon Teknikleri ..	16
3.1.1. Yapay Arı Kolonisi (YAK) Algoritması.....	16
3.1.1.1. YAK Algoritmasının Yapısı:.....	20
3.1.2. Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO) Algoritması	22
3.1.2.1. Karınca Koloni Optimizasyonu Algoritması Parametreleri	26
3.1.3. Genetik Algoritma Optimizasyonu	29
3.1.3.1. Çaprazlama İşleminin Uygulanması	32
3.1.3.2. Mutasyon İşleminin Uygulanması.....	32
3.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması.....	33
4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI.....	38
4.1. Giriş	38
4.2. Simülasyonlarda Kullanılan Sistem Parametreleri	39

	<u>Sayfa</u>
4.3. PSO Tabanlı Alt-Blok Seti Tasarım Aşamaları	40
4.4. OFDM-AIM ve PSO-OFDM-AIM için Alt-Blok Set Örnekleri	42
4.5. Simülasyon Sonuçları	45
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	50
6. KAYNAKLAR	51
DİZİN	56



TABLÖLER LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. OFDM tekniğinin avantaj ve dezavantajları.....	11
Tablo 2.2. OFDM-IM için alt-taşıyıcı şablonu ($n = 4, k = 2, p_1 = 2$ için)	12
Tablo 2.3. OFDM-AIM için alt-blok şablonu ($n = 4, p = 4$)	15
Tablo 3.1. Uygunluk fonksiyonu hesabı için başlangıç çözüm denklemi	37
Tablo 4.1. Sistem parametreleri	40
Tablo 4.2. PSO tabanlı alt-blok seti tasarım parametreleri	41
Tablo 4.3. OFDM-AIM Sisteminde $p = 4$ bit giriş verisi ve $K = 4$ adet alt-taşıyıcıya sahip bir alt-blok için alt-taşıyıcıların Gray kodlamalı 16-QAM eşleşme noktaları..	42



ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Döngüsel önek (Cyclic Prefix-CP)	6
Şekil 2.2. N adet alt taşıyıcıya sahip OFDM tekniğinde bant genişliği kazancı, (a) FDM sisteminde alt taşıyıcıların yerleşimi, (b) OFDM tekniğinde dikgen alt taşıyıcıların yerleşimi.	6
Şekil 2.3. OFDM tekniğinde dikgen alt taşıyıcı işaretler: (a) Zaman domeni görüntüsü, (b) Frekans domeni görüntüsü	7
Şekil 2.4. OFDM tekniğini kullanan bir sistemin blok diyagramı.	9
Şekil 2.5. OFDM-IM iletim tekniğinin blok diyagramı.	12
Şekil 2.6. OFDM-AIM iletim tekniğinin blok diyagramı.	14
Şekil 3.1. YAK algoritması akış şeması.....	19
Şekil 3.2. Arılarda yiyecek arama döngüsü (Kaynak: Karaboğa, 2011).....	22
Şekil 3.3. Karıncaların en kısa yolu tercih etmeleri	25
Şekil 3.4. Karınca koloni optimizasyonu (KKO) algoritması akış şeması (Kaynak: Yıldırım, 2021: 483)	26
Şekil 3.5. Genetik algoritma optimizasyonu blok diyagramı.....	31
Şekil 3.6. Tek noktalı çaprazlama	32
Şekil 3.7. İki noktalı çaprazlama	32
Şekil 3.8. Tek noktalı mutasyon.....	33
Şekil 3.9. Ekleme mutasyon	33
Şekil 3.10. Yer değişikliği mutasyonu	33
Şekil 3.11. PSO blok diyagramı	35
Şekil 4.1. PSO tabanlı Alt-Blok set tasarımının gerçekleştirildiği sistemin blok diyagramı.....	38
Şekil 4.2. OFDM-AIM sisteminde $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için Gray kodlamalı 16 QAM eşleştirmeleri	43
Şekil 4.3. PSO-OFDM-AIM sisteminde $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için PSO algoritması tarafından optimize edilen eşleştirme noktaları.	44
Şekil 4.4. OFDM-AIM ve PSO-OFDM-AIM sistemlerinde $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için örnek eşleştirme noktaları	44
Şekil 4.5. PSO-OFDM-AIM, literatürdeki diğer yöntemler olan GA-OFDM-AIM, KKO-OFDM-AIM ve YAK-OFDM-AIM sistemlerinin ABEP performanslarının karşılaştırılmaları.	45
Şekil 4.6. PSO-OFDM-AIM'nun klasik yöntemler olan OFDM, OFDM-IM ve OFDM-AIM ile BHO/İGO performanslarının $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ için karşılaştırılması....	46
Şekil 4.7. PSO-OFDM-AIM'nun zeki optimizasyon yöntemleri olan GA-OFDM-AIM, KKO-OFDM-AIM ve YAK-OFDM-AIM ile BHO/İGO performanslarının $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ için karşılaştırılması.....	46

Sekil**Sayfa**

- Şekil 4.8.** PSO-OFDM-AIM'nun klasik yöntemler olan OFDM, CI-OFDM-IM ve OFDM-AIM ile BHO/İGO performanslarının $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ için karşılaştırılması.... 47
- Şekil 4.9.** PSO-OFDM-AIM'nun zeki optimizasyon yöntemleri olan GA-OFDM-AIM, KKO-OFDM-AIM ve YAK-OFDM-AIM ile BHO/İGO performanslarının $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ için karşılaştırılması..... 47
- Şekil 4.10.** Çeşitli PS ve I değerlerinin $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ ve $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ spektral verimliliklerde PSO-OFDM-AIM'in BHO/İGO performansına etkisi..... 48
- Şekil 4.11.** $PS = 8$ ve çeşitli I değerlerinin $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ ve $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ spektral verimliliklerde PSO-OFDM-AIM'in BHO/İGO performansına etkisi. 48



DENKLEMLER LİSTESİ

<u>Denklem</u>	<u>Sayfa</u>
Denklem 2.1. OFDM işaretinin sürekli zaman gösterimi.	7
Denklem 2.2. Ayrık zamanlı $x[n]$ işareti.	8
Denklem 2.3. FFT işlemi ile veri sembollerinin tekrar elde edilmesi.	9
Denklem 2.4. N uzunluğuna sahip işaret dizisi	13
Denklem 2.5. Dönüşüm sonrası herbir alt-blok	13
Denklem 2.6. OFDM bloğu için etkin indislerin konumlarıyla taşınan bitlerin toplam sayısı	13
Denklem 2.7. M’li işaret uzayların elemanlarıyla taşınan bitlerin toplam sayısı	14
Denklem 3.1. Gözcü arıların kendi arama yönlerini belirleme formülü.....	22
Denklem 3.2. i ve j iki merkez arasındaki mesafe	28
Denklem 3.3. Feromon güncellemesi.	28
Denklem 3.4. Feromon miktarı.	28
Denklem 3.5. Hız değişimi formülü.	35
Denklem 3.6. Bireylerin yeni konum vektörü	35
Denklem 3.7. Atalet ağırlığı.....	36
Denklem 3.8. Uygunluk fonksiyonu.	37
Denklem 4.1. Spektral verimlilik.....	39
Denklem 4.2. Bir S_i alt-blok seti çözümünün uygunluk değeri.	40
Denklem 4.3. Bir OFDM-AIM iletim tekniğinde ABEP değeri.....	41
Denklem 4.4. Hatalı tespit edilen S_{gi} alt-bloğun UPEP değeri.	41

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

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

Simgeler

Açıklamalar

X_k	: İletilecek olan karmaşık QAM veya PSK sembolleri
X	: İletilecek olan giriş işareti
K	: İletilen OFDM sembolünün ve Alt taşıyıcıların indisi
N	: Alt taşıyıcı sayısı
$e^{j2\pi k\Delta f t}$	: k. Alt taşıyıcı
f_c	: En düşük alt taşıyıcı frekansı
Δf	: Alt taşıyıcılar arasındaki frekans aralığı
T	: OFDM işaretinin süresi
B	: OFDM işaretinin toplam bant genişliği
x	: OFDM işareti
Y	: Haberleşme sistemi alıcı kısmında elde edilen çıkış işareti
L	: Yukarı örnekleme sayısı
$\max[\cdot]$	: OFDM işaretinin tepe gücü
$E[\cdot]$	: OFDM işaretinin ortalama gücü

Kısaltmalar

Açıklamalar

ABEP	: Ortalama Bit Hata Olasılığı (Average Bit Error Probabilities, ABEP)
ADC	: Analog Sayısal Dönüştürücü (Analoque Digital Converter)
AFD	: Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform, DFT)
AS	: Araştırma Sayısı
BHO	: Bit Hata Oranı (Bit Error Ratio, BER)

Kısaltmalar**Acıklamalar**

CP	: Döngüsel Ön Ek (Cyclic Prefix)
DAB	: Sayısal Ses Yayıncılığı (Digital Audio Broadcasting)
DAC	: Sayısal Analog Dönüştürücü (Digital Analogue Converter)
DM-OFDM-IM	: Dual-Mode İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
DVB	: Sayısal Video Yayıncılığı (Digital Video Broadcasting)
FDM	: Frekans Bölmeli Çoğullama
FDM-IM	: İndeks Modülasyonlu Frekans Bölmeli Çoğullama
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FM	: Frekans Modülasyonu
GA	: Genetik Algoritma
GA-OFDM-AIM	: Genetik Algoritma Tabanlı Tüm İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
IFFT	: Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform)
İGO	: İşaret Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio, SNR)
KKO	: Karınca Koloni Optimizasyonu
KKO-OFDM-AIM	: Karınca Koloni Optimizasyon Algoritması Tabanlı Tüm İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
KS-OFDM-IM	: Koordinat Serpiştirmeli İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
LLR	: Logaritmik Olabilirlik Oranı
ML	: Maksimum Olabilirlik
OFDM	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Kısaltmalar**Acıklamalar**

OFDM-IM	: İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (İndeks Modulation Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OFDM-AIM	: Tüm İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (All Indeks Modulation Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
PAPR	: Tepe Gücü/Ortalama Güç Oranı (Peak to Average Power Ratio)
PSK	: Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
SAG	: Semboller Arası Girişim (Inter Symbols Interference, ISI)
SV	: Spektral Verimlilik (Spectral Efficiency, SE)
YAK	: Yapay Arı Koloni Algoritması
YAK-OFDM-AIM	: Yapay Arı Koloni Algoritması tabanlı Tüm İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
YGK	: Yüksek Güç Kuvvetlendirici (High Power Amplifier, HPA)
QAM	: Karesel genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Keying)
WLAN	: Kablosuz Yerel Alan Ağları (Wireless Local Area Network)

1. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Genel Bilgiler

Alt taşıyıcıların uygun frekans aralıklarıyla yerleştirilerek birbirleri üzerine herhangi bir bozucu girişim yapmaması, dikgenlik olarak ifade edilmektedir. Aday iletim tekniklerinin yeni nesil iletişim sistemleri açısından geliştirilmesinde çoğunlukla dikgen frekans bölmeli çoğullama referans alınarak yapılması bu alandaki çalışmaların sürdürülebilmesinde büyük önem arz etmektedir.

Kullanılmayan alt-taşıyıcıların varlığı İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM-IM) tekniğinin performansını etkileyen en büyük etkenlerden birisi haline gelmiştir. Literatürdeki son yıllarda yapılan çalışmalar bu dezavantajın giderilmesine yönelik olmuştur.

Tüm İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM-AIM) tekniğinde, OFDM-IM temel alınarak geliştirilmiş ve alt-taşıyıcıların tamamının kullanılmıştır. Dolayısıyla bit hata olasılığı (BHO) performansının iyileştirilmesi ile birlikte çeşitlilik kazancı artırılmıştır. Çeşitlilik kazancı, alt-taşıyıcıların birbirlerine benzememesi olarak açıklanabilir.

Mevcut olan bant genişliğinin birden fazla alt kanala bölünerek verinin tek bir taşıyıcı yerine birbirine dik olan alt taşıyıcılar tarafından paralel olarak taşınan iletişim teknolojisine Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) denilmektedir. Başka bir deyişle her taşıyıcı diğer taşıyıcıya dik olacak şekilde taşıyıcı aralığı tanımlanmış çok taşıyıcılı modülasyondur. OFDM sisteminde, iletme girecek veriler, birbirlerine yakın olacak şekilde yerleştirilen alt taşıyıcılar arasında paylaştırılıp, paralel iletme tabi tutulurlar. OFDM tekniğinde, her bir alt taşıyıcının bant genişliğinin çok dar olması ve işaret, birçok alt taşıyıcı tarafından iletildiği için işaret hızı düşük olması neticesinde sembol periyodu artmaktadır. Bu da işaretin direncini, çok yollu yayılım gecikmesine karşı artırmaktadır. Tek taşıyıcılı sistemlerde tek bir girişim ya da sönüm bütün bir hattı zayıflatmaktadır. OFDM gibi çok taşıyıcılı sistemlerde ise sönümlenme olması durumunda, toplam verinin çok küçük bir kısmı her bir taşıyıcı üzerinde bulunduğu için, alt taşıyıcıların ve sonuç olarak toplam verinin az bir yüzdesi bu durumdan etkilenmektedir. OFDM bu özelliği sayesinde frekans seçici sönümlenmeye karşı daha da dayanıklı hale gelmektedir (Şimşir, 2015; 15).

Dikgen frekans bölmeli çoğullama sistemi, çok taşıyıcılı haberleşme sistemlerinden biri olarak pek çok kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu alanda kullanılmasının sebeplerinden bazıları şunlardır; yüksek hızlı veri haberleşmesine imkân sağlaması, bant genişliğini etkin kullanması ve yankı gecikmelerine karşı dayanıklılığıdır. OFDM sisteminde, sembol süresinin uzatılması için yüksek bit hızlı veri, daha düşük hızlı veriye dönüştürülür. Farklı bir alt taşıyıcı kullanılarak, paralel veriye dönüştürülen her bir veri, iletim kanalına iletilir (Prasad, 2004; 12).

Mesaj bit bloğu; OFDM-IM tekniğinde, indeks ve veri bitleri olarak ikiye ayrılmaktadır. İndeks biti, alt-taşıyıcı indekslerinin oluşturulmasında hangi alt taşıyıcının aktif veya pasif olacağını belirler. Bu bitlerinin iletimi alt-taşıyıcı indeksleri yoluyla sağlanır. Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK)/ Karesel genlik Modülasyonu(QAM) takımyıldızı eşleştirilmeleri yapıldıktan sonra, aktif alt-taşıyıcılar tarafından iletilen bitler ise veri bitleridir.

1.2. Tezin Literatürdeki Yeri

Başar (2015) çalışmasında, Koordinat Serpiştirme İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (KS-OFDM-IM) tekniği ile uzay-zaman blok kodlarını birleştirerek KS-OFDM-IM'ı elde ederek, çeşitlilik kazancını artırmayı başarmış ve bu şekilde sistemin BHO başarısının yükselmesini sağlamıştır.

Başar, (2016) çalışmasında OFDM-IM'in OFDM'ye göre üstünlükleri arasında; sahip olduğu düşük bir Tepe Gücünün Ortalama Güce Oranı (PAPR), geliştirilmiş bit hata oranı performansı, kanallar-arası girişime karşı dayanıklılık ve enerji verimliliği gibi özellikleri vurgulamıştır.

Xiao vd. (2014) çalışmalarında, OFDM-IM'nin performansını sınırlayan en büyük etkenlerden birisi olan kullanılmayan alt-taşıyıcılar değinmişler ve sistemin BHO performansını artırmak için en uygun aktif alt-taşıyıcı sayısını araştırmışlardır.

Mao vd., (2017) çalışmalarında, OFDM-IM'nin boş alt taşıyıcılarının varlığından dolayı ortaya çıkan nispeten düşük spektral verimliliğinin artış gösterilmesi amacıyla çift modlu OFDM-IM (DM-OFDM-IM) önerilmiştir. DM-OFDM-IM'de mesaj bit bloğu, OFDM-IM'de olduğu gibi veri bitleri ve indeks bitlerine bölünürken alt-taşıyıcıların tamamı da

aktif hale getirilmiştir. PSK/QAM takımyıldızı seçimi indeks bitleri ile gerçekleştirilirken, tamamı aktif olan alt-taşıyıcılar vasıtasıyla veri bitleri iletilirler.

Shi vd., (2019) çalışmalarında, genetik algoritma tabanlı bir tüm indeks modülasyonlu OFDM (GA-OFDM-AIM) tekniğinde, çeşitlilik kazancının daha da artırılmasını hedeflemişlerdir. Bu çalışmada genetik algoritma yardımıyla OFDM-AIM tekniğinde sabit olan PSK/QAM takımyıldızı noktaları, çeşitlilik kazancının daha da yükseltilmesi amaçlanarak çözüm uzayında farklı noktalar aranarak optimize edilmiştir. En iyi BHO değerine sahip olarak oluşturulan yeni takımyıldızı noktaları optimum alt-blok seti olarak belirlenmiştir.

Yıldırım (2020) çalışmasında Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması kullanılarak OFDM-AIM üzerinde farklı bir alt-blok set tasarımı gerçekleştirmiştir (YAK-OFDM-AIM). Bu çalışmada önerilen YAK-OFDM-AIM ve paralel YAK (PYAK) algoritması tabanlı OFDM-AIM (PYAK-OFDM-AIM) şemalarının BHO performansları açısından OFDM-IM, OFDM-AIM, koordinat serpitirmeli OFDM-IM (KS-OFDM-IM) ve GA-OFDM-AIM'den daha üstün performansa sahip olduğu ortaya konulmuştur.

Yıldırım (2021) çalışmasında ise Karınca Kolonisi Optimizasyon (KKO) algoritması tabanlı OFDM-AIM (KKO-OFDM-AIM) tekniğini önermiştir. YILDIRIM'ın bu çalışmasında, KKO-OFDM-AIM ile elde ettiği ortalama bit hata olasılığı (ABEP) performansı, diğer bir optimizasyon yöntemi olan GA-OFDM-AIM ile kıyaslamış ve daha düşük ABEP değeri elde etmiştir. KKO-OFDM-AIM'in bit hata oranı (BHO) performansı, diğer modülasyon teknikleri ile kıyaslanmış ve en düşük BHO değerine sahip olduğu görülmüştür.

1.3. Tezin Amacı ve Önemi

Beşinci Nesil (5G) ve ilerisi iletişim sistemleri için, aday iletim tekniklerinden biri olan OFDM-IM üzerinde birçok çalışma mevcuttur. OFDM-AIM tekniği de OFDM-IM'nin spektral verimliliğinin artırılması amacı ile geliştirilmiş bir tekniktir. OFDM-IM tekniğinde boş alt-taşıyıcılar bulunmakta iken OFDM-AIM tekniğinde alt-taşıyıcıların tamamı aktif hale getirilmiştir.

Bu tez çalışmasında çeşitlilik kazancının artırılması sonucunda daha iyi bir BHO performansına sahip OFDM-AIM elde edebilmek amacıyla Parçacık Sürü optimizasyonu (PSO) algoritması tabanlı bir alt-blok set tasarımı önerilmiştir (PSO-OFDM-AIM).

OFDM-AIM tekniğinde giriş veri bit dizileri sadece klasik QAM takımyıldızı noktaları ile eşleştirilirken, önerilen bu teknikte ise, QAM takımyıldızı uzayının tamamı ile olası eşleştirme noktası olarak değerlendirilmiş ve optimum alt-taşıyıcı noktaları araştırılmıştır. Bu işlemin amacı, çeşitlilik kazancını artırarak sistemin BHO performansının iyileştirilmesidir.

ABEP değeri PSO algoritmasının eğitilmesi sırasındaki amaç fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Eğitim sırasında elde edilen ABEP değerinin en düşük olduğu nokta en uygun alt-blok setinin elde edildiği anlamına gelmektedir. BHO performans kriteri ise PSO algoritması tarafından elde edilen en uygun alt-blok setiyle oluşturulan PSO-OFDM-AIM yönteminin literatürde mevcut olan diğer yöntemlerle başarısının kıyaslanması amacıyla kullanılmaktadır. Simülasyon çalışmalarında PSO-OFDM-AIM tekniği; literatürdeki diğer çalışmalar olan GA-OFDM-AIM, KKO-OFDM-AIM, YAK-OFDM-AIM ve diğer klasik iletim teknikleri ile kıyaslaması yapılmıştır.

2. KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

2.1. Giriş

Kablosuz haberleşme sistemleri, günümüz çağında hemen her aşamada ihtiyaç duyulan sistemler haline gelmiştir. Bu sistemleri kullanırken daha hızlı ver seri bir iletişimin yanında sağlıklı bir veri iletişiminin sağlanması kullanıcılar tarafından önem arz etmeye başlamıştır. Kablosuz haberleşmede kullanıcı sayısının artması ile birlikte ihtiyaç duyulan bant genişliği ve kapasite artmaktadır. Mevcut bant genişliğini etkin bir şekilde kullanmasından dolayı OFDM tekniği yeni nesil haberleşme sistemlerinde çoğullama yöntemi olarak vazgeçilmez hale gelmiştir. OFDM, çoklu yol bozulmaları, anlık gürültülerden kaçınma ve verimli bant genişliği kullanımı özelliklerine sahiptir.

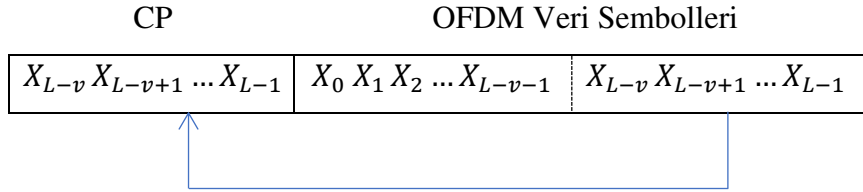
2.2. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)

Çoğullama tekniklerinden OFDM, günümüz iletişim sistemlerinin en çok tercih edilenlerinden birisi haline gelmiştir. Bunun neticesi olarak kanallar-arası girişim ve semboller-arası girişim gibi problemlerin çözümleri daha da basit hale gelmiştir.

OFDM tekniği; gönderilen sinyalin genişbantlı bir taşıyıcıda gönderilmesi yerine darbantlı, birbirine dik birçok taşıyıcıda gönderilmesi olarak tanımlanabilir. Haberleşme kanalının frekans seçiciliği sebebiyle ortaya çıkabilecek verimsiz iletimin önüne geçebilmek adına bu teknik geliştirilmiştir. Gönderilen sinyalin alıcıya birçok yoldan gecikmeli olarak ulaşmasına neden olan kanal etkileri noktasından tedbir alınmazsa SAG ortaya çıkabilmektedir. FFT ve IFFT algoritmaları kullanılarak oluşturulan alt-taşıyıcılara sahip olan OFDM’de, bu algoritmalar kullanılmamış olsaydı, her bir alt-taşıyıcıya ait bir osilatör cihazı gerekli olacaktı ki bu hem sistem karmaşıklığına hem de güç tüketiminin yüksek olmasına neden olacaktı. (Yaz, 2018; 6).

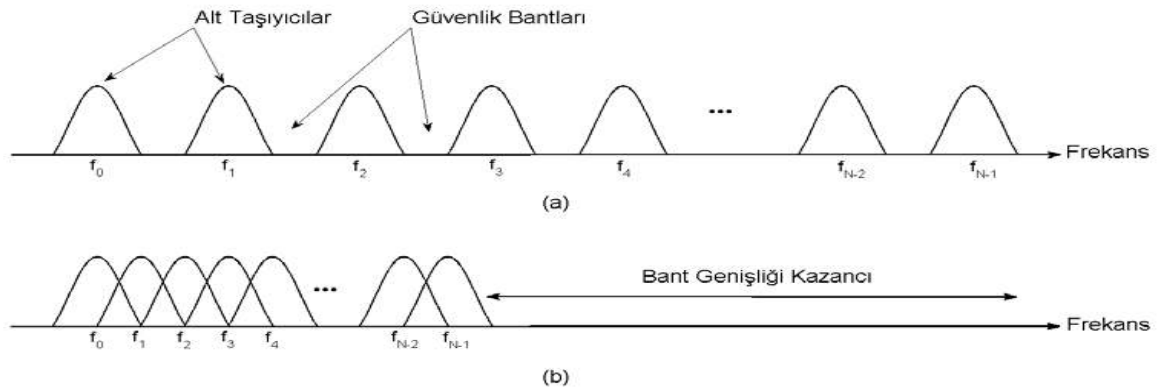
OFDM, d uzunluğa sahip yüksek hızlı veri dizisini, her birinin veri oranı d/N olan N adet dikgen alt taşıyıcı üzerinden eşzamanlı olarak ve toplam hız değişmeyecek şekilde, alt bantlardan düşük hızda iletilmesini sağlayan bir modülasyon ve çoğullama tekniği olarak da ifade etmek mümkündür. Tek taşıyıcılı sistemlere göre alt taşıyıcıların sembol sürelerinin artması, OFDM sembollerinin çok yollu yayılım sonucu meydana gelen SAG gibi haberleşme kanallarının bozucu etkilerine karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlamaktadır. OFDM sembolleri için döngüsel önek (CP) adı verilen bir koruma zamanı

eklenerek SAG problemi neredeyse tamamen çözülür. CP uzunluğu, kanal darbe yanıtı (KDY) için çok kısa olduğunda, SAG nedeniyle bir OFDM tekniğini kullanan sistemlerin performansı düşer. Başka bir deyişle bu sistemlerde, alttaşıyıcılar zaman dağıtıcı kanal içerisinde geçerken SAG etkileşiminden ötürü dikgenliklerini kaybeder (Batariere vd. 2004: 543). CP ise oluşan bu dikgenlik kaybının önüne geçer. CP eklenmesi şu şekildedir:



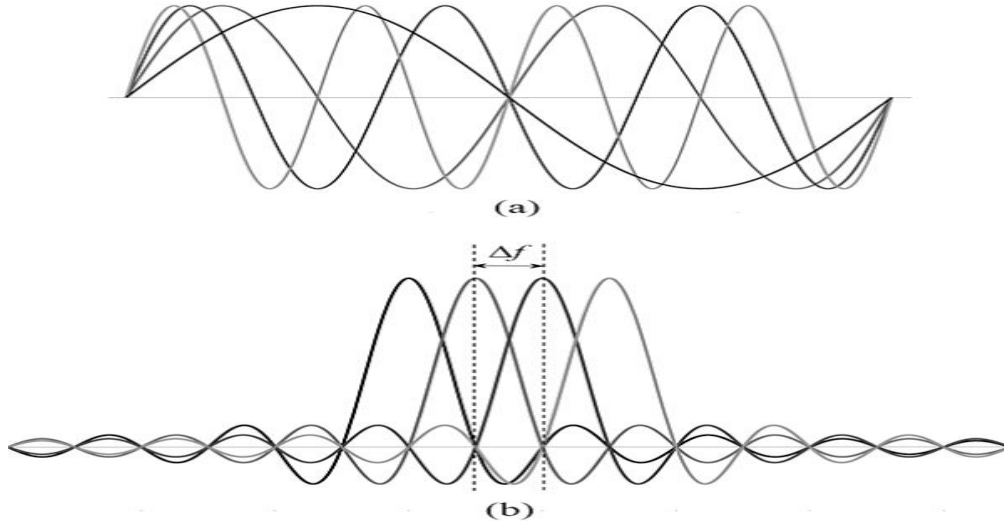
Şekil 2.1. Döngüsel önek (Cyclic Prefix-CP)

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi OFDM tekniğinde alt-taşıyıcıların birbirine dikgen olması ve taşıyıcı spektrumlarının birbiri üzerine binmesi sayesinde mevcut bant genişliği, frekans bölmeli çoğulama (FDM) tekniği ile kıyaslandığında daha verimli bir şekilde kullanıldığı ve iletim kapasitesinin arttığı görülmektedir.



Şekil 2.2. N adet alt taşıyıcıya sahip OFDM tekniğinde bant genişliği kazancı, (a) FDM sisteminde alt taşıyıcıların yerleşimi, (b) OFDM tekniğinde dikgen alt taşıyıcıların yerleşimi.

Ayrık fourier dönüşümü (AFD) kullanılarak OFDM tekniğinde alt taşıyıcıların birbirine dik olacak şekilde üst üste bindirilmesi işlemi sağlanmaktadır. Bir OFDM işaretinde T aralığı boyunca her bir alt taşıyıcının periyot sayısının tam sayıya sahip olması durumunda alt taşıyıcıların birbirine dikgen olması sağlanmaktadır Şekil 2.3 (a)’da OFDM işaretinin zaman domeni görüntüsü görülürken Şekil 2.3 (b)’de ise OFDM işaretinin frekans domeni görüntüsü görülmektedir.



Şekil 2.3. OFDM tekniğinde dikgen alt taşıyıcı işaretler: (a) Zaman domeni görüntüsü, (b) Frekans domeni görüntüsü

Bir OFDM işaretinde T aralığı boyunca her bir alt taşıyıcının periyot sayısının tam sayıya sahip olması durumunda alt taşıyıcıların birbirine dikgen olması sağlanmaktadır.

İlk geliştirilen OFDM tekniğinde, dikgen alt taşıyıcılar kadar yerel osilatör kullanılmaktaydı. Ancak bu yöntem, eşgüdüm gibi uygulama sorunları ile birlikte sistemin daha karmaşık bir yapıda olmasına ve fiyat olarak pahalalanmasına yol açmaktaydı. Bu problem AFD tekniğinin günümüz elektronik devreleri üzerinde gerçekleştiriliyor olması sayesinde ortadan kaldırılmıştır.

Δf alt taşıyıcılar arasındaki frekans aralığını ifade etmek üzere, bir OFDM işaretinin sürekli zaman gösterimi matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi(f_c + k\Delta f)t}, \quad 0 \leq t \leq T \\
 &= e^{j2\pi f_c t} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k\Delta f t} \\
 &= e^{j2\pi f_c t} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \varphi_k(t) \\
 \varphi_k(t) &= \begin{cases} e^{j2\pi k\Delta f t} & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Denklem 2.1. OFDM işaretinin sürekli zaman gösterimi.

Burada;

X_k : QAM veya PSK sembollerini temsil eder,

k : Alt taşıyıcıların ve OFDM sembolünün indisini,

N : Alt taşıyıcı sayısını,

$e^{j2\pi k\Delta f t}$: k . alt taşıyıcıyı,

f_c : en düşük alt taşıyıcı frekansını,

Δf : Alt taşıyıcılar arasındaki frekans aralığını,

T : OFDM işaretinin süresi.

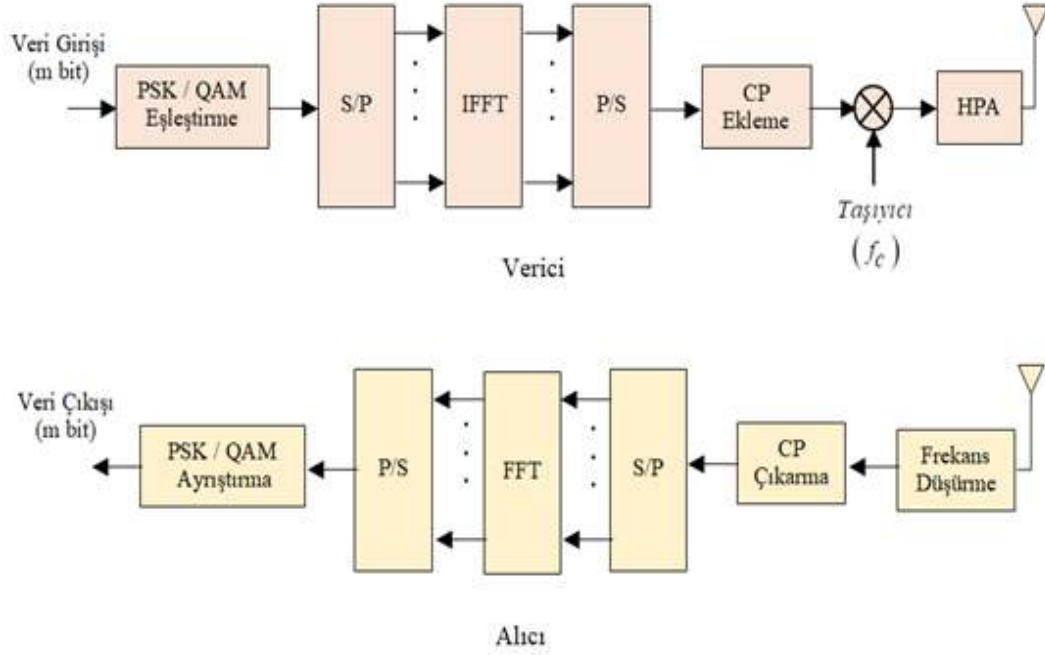
Alt taşıyıcılar arasındaki dikgenlik $\Delta f = B/N = 1/T$ olması durumunda sağlanmaktadır. Burada OFDM sinyalinin toplam bant genişliği B ile gösterilmiştir. Dikgenlik koşulu altında $t = n \frac{T}{N}$ noktalarında örnek alınacak olursa ayrık zamanlı $x[n]$ işareti şu şekilde ifade edilebilir:

$$x[n] = \frac{B}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{j2\pi kn}{N}} = IDFT\{X\}, \quad 0 \leq k \leq N-1,$$

Denklem 2.2. Ayrık zamanlı $x[n]$ işareti.

burada n ayrık örnekleme noktalarıdır. OFDM tekniğinde dikgen alt taşıyıcıların üretilmesinde ters AFD (TAFD)'nin hesaplama karmaşıklığını azaltmak için IFFT algoritması kullanılmaktadır.

Şekil 2.4'te FFT temelli bir OFDM tekniğini kullanan bir sistemin verici ve alıcı birimlerine ait blok diyagram görülmektedir. Sistemin verici biriminde, ilk olarak sayısal mesaj dizisi PSK/QAM eşleştirmesi yapıldıktan sonra veriler seri formdan paralel forma dönüştürülerek IFFT işlemi gerçekleştirilir. IFFT ile ayrık frekans ekseninden ayrık zaman eksenine dönüşüm sağlanmaktadır. Bu aşamadan sonra SAG'a karşı dayanıklılığı ve OFDM işaretlerinin periyodikliğini sağlamak için CP eklenir. İşaretler üzerinde sayısal/analog dönüşümü (DAC) yapıldıktan sonra alt taşıyıcıların iletilecek olan f_c taşıyıcı frekansına yükseltilmeleri sağlanır. Vericide gerçekleştirilen son işlem ise işaretlerin yüksek güç kuvvetlendiricisi (YGK) tarafından kuvvetlendirilmesiyle haberleşme kanalına bırakılmasıdır (Yıldırım, 2021; 480).



Şekil 2.4. OFDM tekniğini kullanan bir sistemin blok diyagramı.

Sistemin alıcı kısmında ise öncelikle frekans düşürme işlemi ile alt taşıyıcıların temel bant seviyesine indirgenmesi sağlanmaktadır. CP çıkarma işleminden sonra elde edilen veri dizisine FFT uygulanarak PSK/QAM eşleştirmeleri yapılan veri sembolleri elde edilmektedir. FFT işlemi ile veri sembollerinin tekrar elde edilmesi matematiksel olarak aşağıda gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
 Y &= FFT \{X[n]\} \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi nk/N} \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{d=0}^{N-1} X_d e^{j2\pi n(d-k)/N} \\
 &= \sum_{d=0}^{N-1} X_d \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi n(d-k)/N} \\
 &= \sum_{d=0}^{N-1} X_d N \delta [d - k] \\
 &= X
 \end{aligned}$$

Denklem 2.3. FFT işlemi ile veri sembollerinin tekrar elde edilmesi.

OFDM tekniği; dar bantlı girişime, SAG etkilerine ve frekans seçici sönümlemeye karşı dayanaklılık, eş zamanlama ve gecikme hatalarını tolere edebilme özelliklerine sahiptir. Bu avantajlarından dolayı, sayısal ses yayını (DAB), sayısal video yayını (DVB), kablosuz yerel ađ şebekeleri, 4. Nesil (4G) mobil sistemler gibi iletişim standartlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte OFDM temelli sistemlerde, senkronizasyon hataları ile işaretlerin yüksek PAPR'a sahip olması iki ana dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Senkronizasyon hataları, zamanlama hataları, taşıyıcı faz gürültüsü ve frekans hataları olarak kendisini göstermektedir. Yüksek PAPR ise doğrusal olmayan YGK, DAC ve ADC gibi elemanların kullanılmasından dolayı iletilecek olan işaretler üzerinde bozulmalara yani bilgi kayıplarına sebep olmaktadır.

FDM, klasik filtreler ve demodölatörler kullanılarak gönderilen sinyali alıcıda yeniden elde edebilmek için taşıyıcılar arasında boşluklar bırakılmaktadır. Fakat koruma bandı olarak isimlendirilen bu boşluklar bırakıldığında ise spektrum verimliliğini düşürmektedir. Dikgen taşıyıcılar kullanılarak taşıyıcı spektrumlarının birbirine çakışması sağlanan OFDM tekniğinde ise, taşıyıcılar birbirine dik olduğundan, frekans uzayında birbirleri ile akışsalarda alıcı tarafında doğru olarak özümlenebilirler. Böylelikle klasik FDM'de bırakılan koruma aralığına gerek kalmadan frekans spektrumu daha verimli kullanılabilir (şimşir, 2015; 15-16).

Çok taşıyıcılı haberleşme sistemlerindeki ilerlemelerin ortaya çıkmasında haberleşme sistemlerindeki mevcut veri hızlarının artışı büyük önem arz etmektedir. Bu sistemlerde iletişimin gerçekleştirilmesi, seri ve yüksek hızlı olan veri dizileri, paralel ve daha düşük hızlı olan alt dizilere bölünerek sağlanmaktadır. Böylelikle aynı kanaldan daha fazla verinin taşınması gerçekleşmiş olur. Bunun neticesinde ise bant genişliği daha verimli kullanılır ve daha hızlı veri aktarımı sağlanmış olur. Kablosuz haberleşme sistemlerinde büyük öneme sahip olan OFDM, yaygın bir şekilde birçok telekomünikasyon standardında kullanılmaktadır. Bu telekomünikasyon standartlarına örnek olarak, ADSL, VDSL, dijital kablo TV standardı ve DVB-C2 gösterilebilir. Kablosuz sistemler örnek ise, DVB-H, T-DMB, WLAN, IEEE 802.11a/g/n/ac, DVB-T ve ISDB-T ve 4G LTE gösterilebilir (Yıldız, 2015; 25).

OFDM Tekniğinin avantaj ve dezavantajlarına örnek olarak aşağdakiler verilebilir (Yıldız, 2015; 28-29):

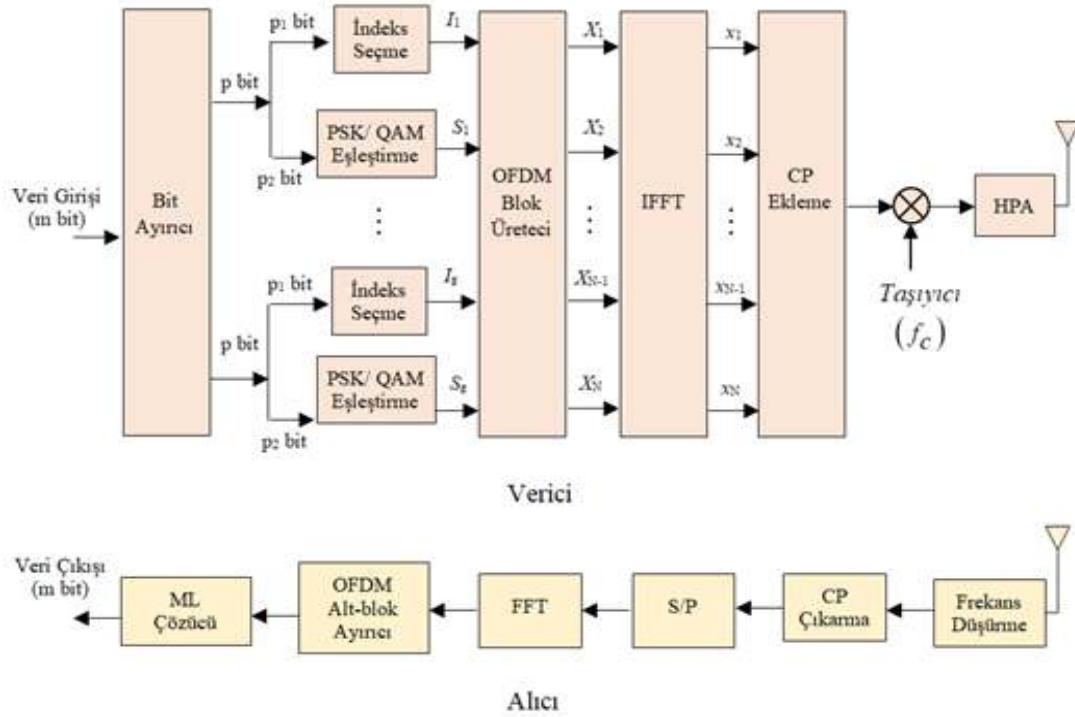
Tablo 2.1. OFDM tekniğinin avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Spektrumun daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak için alt taşıyıcıların üst üste binmesine izin verir.	Zamanlama kaymalarına karşı tek taşıyıcılı sistemlere göre daha az hassastır.
Çoklu yol etkisine başarılı bir şekilde karşı koyabilir.	Faz gürültüsüne ve yardımcı kanal girişimlerine karşı daha az duyarlıdır.
Kanalı düz sönümlü, dar bantlı alt kanallara bölmesi tek taşıyıcılı sistemlere göre frekans seçimli sönümlemeye karşı daha fazla dirençli hale gelmesini sağlar.	Alıcıda senkronizasyonun oluşturulması biraz daha zordur.
Periyodik ön ek kullanımı ile SAG'ı yok eder.	Yüksek Tepe Güç/Ortalama Güç Oranı (PAPR)
Frekans seçicilik yüzünden kaybolan sembollerin yeniden oluşturulabilmesi için uygun bir kanal kodlama kullanmaktadır.	Katı senkronizasyon ihtiyacından dolayı ek sinyal kullanımı (Zhang ve ark., 2015).
FFT teknikleri kullanılarak az bir karmaşıklıkta maksimum olasılıklı kod çözmeye olanak sağlayarak modülasyon ve demodülasyon fonksiyonlarını ortaya çıkmasını sağlar.	
OFDM faz gürültüsüne ve frekans kaymasına karşı daha fazla duyarlılık gösterir	
Bant genişliği verimliliğinin ve SNR'ın düşmesine sebep olan koruma aralığı kullanımı mevcuttur.	

2.3. İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM-IM)

Şekil 2.5'te 5G ötesi aday iletim tekniklerinden birisi olarak, yeni nesil iletişim sistemleri için son zamanlarda üzerinde birçok çalışma gerçekleştirilen indeks modülasyonlu dikgen frekans bölmeli Çoğullama (OFDM-IM)'nın blok şeması görülmektedir. OFDM-IM

sembolü, toplamda N adet alt-taşıyıcı içermektedir. Her birinin içerisinde n adet alt-taşıyıcı içeren G adet alt-bloğun birleşmesi sonucu OFDM-IM işareti oluşmaktadır. Bir OFDM-IM tekniğinde, toplam m adet veri biti her birinde p bit olmak üzere G adet gruba ayrılmaktadır ($m = G * p$). Her bir p bit, (p_1) indeks bitleri ve (p_2) veri bitleri olmak üzere tekrar iki gruba ayrılır. Bir alt-bloktaki aktif ya da pasif hale gelecek olan alt-taşıyıcıların belirlenmesi indeks bitleri tarafından tayin edilir (Yıldırım, 2021; 481).



Şekil 2.5. OFDM-IM iletim tekniğinin blok diyagramı.

Tablo 2.2. OFDM-IM için alt-taşıyıcı şablonu ($n = 4, k = 2, p1 = 2$ için)

İndeks bitleri (p_1)	Alt-taşıyıcı İndeksi	Alt-taşıyıcılar
[0 0]	[1,2]	$[S_{A1}, S_{A2}, S_{P1}, S_{P2},]$
[0 1]	[2,3]	$[S_{P1}, S_{A1}, S_{A2}, S_{P2},]$
[1 0]	[3,4]	$[S_{P1}, S_{P1}, S_{A2}, S_{A2},]$
[1 1]	[1,4]	$[S_{A1}, S_{P1}, S_{P2}, S_{A2},]$

Tablo 2.2’de alt-taşıyıcı sayısı $n = 4$, aktif alt-taşıyıcı sayısı $k = 2$ ve pasif alt-taşıyıcı sayısı $l = 2$ olan bir alt-blok yapısı görülmektedir. $p1 = 2$ için toplam $2^{p1} = 2^2 = 4$ adet alt-blok olmakla beraber S_A = aktif ve S_P = pasif alt-taşıyıcıları ifade etmektedir. Böylece indeks bitleri, aktif ve pasif alt-taşıyıcıların konumu aracılığıyla iletilmiş olurlar.

OFDM blok üretici ile üretilen G adet alt-blok, N adet alt-taşıyıcı dizisi şeklinde tekrar birleştirilir. Daha sonra OFDM-IM sembolleri; ters hızlı fourier dönüşümü, CP ekleme ve işaret kuvvetlendirme işlemleri neticesinde sırasıyla iletişim kanalına iletilir. Bu aşamadan sonra sistemin alıcı birimine ulaşan $N + LCP$ uzunluğa sahip işaret dizisi; frekans düşürme, döngüsel önek çıkarma, S/P dönüştürme ve hızlı fourier dönüşüm işlemlerine sırasıyla tabi tutulur ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$y = Xh + w$$

Denklem 2.4. N uzunluğuna sahip işaret dizisi

Burada; sistem verici birimindeki OFDM blok üretici tarafından oluşturulan işaret dizisini X olarak ifade etmekle beraber h ; kanal vektörü ve w ; kanal gürültü vektörüdür. Bu aşamadan sonra OFDM alt-blok ayırıcı tarafından G adet alt-bloka dönüştürülen y sonrasında, her bir alt-blok şu şekilde gösterilebilir:

$$y_g = S_g h_g + w_g, \quad g = 1, \dots, G$$

Denklem 2.5. Dönüşüm sonrası herbir alt-blok

Burada S_g sistem verici biriminde oluşturulan G adet alt-bloktan her birini ifade eder. Son olarak, vericide üretilen alt-bloklar ve mesaj bit bloğu, Maksimum Olabilirlik (ML) işlemi ile belirlenmeye çalışılır (Yıldırım, 2021; 481).

$$\hat{S}_g = \arg \min_{S_g} \|y_g - S_g h_g\|^2$$

Burada, $\arg \min_{S_g} \|\cdot\|_{S_g}$ ise öklid normunun minimum değerini temsil ederken $\|\cdot\|$ ise öklid normunun kendisini ifade eder.

Her β alt-bloğu için gelen p_1 bit, n olası indisten k adetini seçen indis seçiciye aktarılmaktadır. Seçilen indisler

$$I_\beta = \{I_\beta, 1, \dots, I_\beta, k\},$$

şeklinde olup, burada $I_\beta, \gamma \in [1, \dots, n]$, $\beta = 1, \dots, g$ ve $\gamma = 1, \dots, k'$ dir. Dolayısı ile OFDM bloğu için etkin indislerin konumlarıyla taşınan bitlerin toplam sayısı

$$m_1 = p_1 g = [\log_2(C(n, k))]g$$

Denklem 2.6. OFDM bloğu için etkin indislerin konumlarıyla taşınan bitlerin toplam sayısı

olmaktadır. Başka bir ifadeyle $I_{\beta,c} = 2^{p_1}$ farklı bir şekilde gerçekleşebilir. Önerilen istemde N alt-taşıyıcıdan $K = kg$ tanesi etkin olduğundan, M 'li işaret uzayların elemanlarıyla taşınan bitlerin toplam sayısı ise

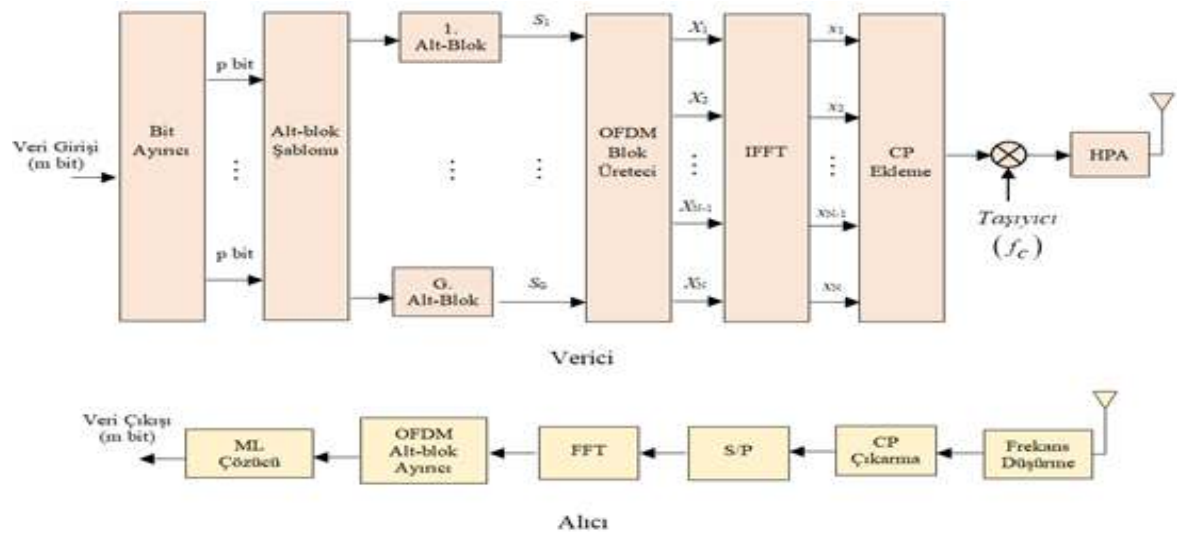
$$m_2 = p_2 g = k(\log_2(M))g$$

Denklem 2.7. M 'li işaret uzayların elemanlarıyla taşınan bitlerin toplam sayısı

olmaktadır. Sonuç olarak toplam $m = m_1 + m_2$ bitler, OFDM-IM şemasının tek bir bloğu tarafından iletilmektedir. Eşleyici çıkışındaki simge vektörü $s_{\beta} = [s_{\beta}(1) \dots s_{\beta}(k)]$ ile gösterilecek olursa $s_{\beta}(\gamma) \in S, \beta = 1, \dots, g, \gamma = 1, \dots, k'$ dir. OFDM blok yapıcı öncelikle $\beta = 1, \dots, g$ için I_{β} ve s_{β} 'yi göz önüne alarak tüm alt-blokları oluşturur ve bu alt-blokları birleştirerek $N \times 1$ 'lik ana OFDM bloğu elde edilmiş olur (Başar, vd. 2013: 1-2).

2.4. Tüm İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM-AIM)

Tüm İndeks Modülasyonlu OFDM (OFDM-AIM) tekniği, OFDM-IM tekniğinden esinlenerek geliştirilmiş olup, alt-taşıyıcılarının tümünün aktif olması nedeniyle çeşitlilik kazancı açısından OFDM-IM'ye göre fazladır. Şekil 2.6'da; her birinde n adet alt-taşıyıcı bulunan G adet alt-bloktan oluşan N uzunluğundaki bir OFDM-AIM sembolü gösterilmektedir. OFDM-AIM sembolü üretiminde öncelikle m adet mesaj bit bloğu, p uzunluğundaki veri, bit ayırıcı tarafından bit dizilerine ayrılır. Ayrılan bu veri bitleri, n adet çoğullanmış vaziyette QAM takımyıldızı tarafından eşleştirilerek bir alt-taşıyıcı tarafından aktarılır.



Şekil 2.6. OFDM-AIM iletim tekniğinin blok diyagramı.

Tablo 2.3. OFDM-AIM için alt-blok şablonu ($n = 4, p = 4$)

Veri bitleri (p)	Alt-taşıyıcılar
[0 0 0 0]	$[S_{T1}, S_{T1}, S_{T1}, S_{T1}]$
[0 0 0 1]	$[S_{T2}, S_{T2}, S_{T2}, S_{T2}]$
...	...
[1 1 1 0]	$[S_{T15}, S_{T15}, S_{T15}, S_{T15}]$
[1 1 1 1]	$[S_{T16}, S_{T16}, S_{T16}, S_{T16}]$

Tablo 2.3'te bir alt-blok şablonu görülmektedir. Bu şablonda veri bit sayısı $p = 4$, alt-taşıyıcı sayısı $n = 4$ değerlerine sahiptir. G adet alt-blok, yeniden N adet alt-taşıyıcı dizisi şeklinde OFDM blok üretici ile birleştirilir. Bundan sonra, kanal korelasyonunu kaldırabilen bir $g \times n$ blok serpiştirici kullanılır. Blok serpiştirici $g \times n$ matrisini satır satır alt-bloklarla doldururken yeni serpiştirilmiş alt-blokları sütun sütun gönderir. Ardından OFDM-AIM sembollerinin elde edilebilmesi için sırasıyla IFFT, CP ekleme, frekans yükseltme ve işaret kuvvetlendirme işlemleri uygulanır. OFDM-AIM tekniği, OFDM-IM tekniği ile birçok alt işlemlerde benzer bir yapıya sahipken alt-blok üretme işleminde farklılık gösterir. (Yıldırım, 2021; 482)

İndeks seçiciden sonra, n adet alt-taşıyıcıdan oluşan alt-bloklar şu şekilde sunulabilir:

$$X_{\beta} = [X_{\beta,1} X_{\beta,2}, \dots, X_{\beta,n}], \beta = 1, \dots, G$$

3. OFDM-AIM TEKNİĞİ İÇİN ALT-BLOK SET TASARIMINDA KULLANILAN ZEKİ OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ

Günümüzde teknoloji ve bilim her geçen gün yükselen bir ivme ile gelişmesine devam etmektedir. Bu gelişmelerin yanısıra birçok problem ile karşılaşilmektedir. Optimizasyon, bu problemlerin başında gelmektedir.

Optimizasyon, maksimize ve minimize işlemlerinin genel bir ismi olup, işletmeler, ekonomi, tasarım ve üretim gibi hemen her bilim dalının ilgi alanına girmiştir. İşletmelerde kazancın en yüksek olması veya maliyetin en aza indirgenmesi, tasarım mühendisliğinde en optimum boyutlarda cihaz üretimi, en az enerji kullanan cihazların tasarlanması optimizasyon işlemlerine birer örnek sayılabilir. Sezgisel araştırma yöntemlerinin gelişmesinde optimizasyon yöntemlerinin kullanımı büyük rol oynamaktadır. Zira klasik yöntemlerin gerçek hayatta problemlerin çözümünde yetersiz kaldığı aşikârdır. Bununla beraber karşılaşılan sorunlar neticesinde problem boyutuyla orantılı olarak artan çözüm süreleri ve çözüm karmaşıklığı klasik yöntemlerin dezavantajları haline gelmiştir. Bilim adamlarının araştırmalarına konu olan tüm canlı türlerinin ekosistemde optimum bir tasarıma sahip olarak var olması, yiyecek bulma davranışlarında optimum çözüme ulaşmaları ve sezgisel algoritmaların kullanımının artışına sebep olmaktadır. Tezin bu kısmında ise literatürdeki diğer sezgisel algoritmalarından alt-blok set tasarımında kullanılan bazı teknikler ele alınmıştır.

3.1. Literatürde Alt Blok Set Tasarımında Kullanılan Zeki Optimizasyon Teknikleri

3.1.1. Yapay Arı Kolonisi (YAK) Algoritması

Yiyecek arama sürecinde birlikte sürü halinde yaşayan arıların sergilemiş oldukları sosyal davranışlar araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Bu sosyal davranışlardan bazıları şunlardır:

- Sürünün hiçbir dış etken olmaksızın kendi aralarında organize olabilmeleri,
- Arıların kendi aralarında bir iş dağılımı yapması,
- Değişen şartlara göre de gerektiğinde iş bölümlerinde değişiklikler yapmaları,
- Besin kaynağının kalitesini belirlemeleri ve birbirleriyle iletişim halinde olarak bulunan kaynaklar hakkında bilgi paylaşımında bulunmalarıdır.

Son yıllarda oldukça popüler olan bir optimizasyon tekniği haline gelen YAK algoritması, buna benzer zeki davranışları aslına uygun bir şekilde modellemektedir.

Yapay arı kolonisi algoritmasında; üç tür arıdan oluşan bir yapay arı kolonisi mevcuttur. Bu arılar; kâşif arılar, görevli arılar ve gözcü arılar olarak ayrılırlar.

Görevli Arılar: Buldukları yiyecek kaynağından nektar depolayıp kovana getirmekle görevlidirler. Bu arıların asıl görevleri nektar taşıma işlemidir ve nektar depoladığı yiyecek kaynağı bellidir. Ayrıca kovanda bekleyen gözcü arılara bulmuş olduğu yiyecek kaynağı hakkında bilgi verirler. Bu bilgi verme işlemini arılar yapmış olduğu dansla gerçekleştirirler. Bulunan yiyecek kaynağının kalitesi yapılan bu dansın süresi ile orantılıdır. Yani arıların yaptıkları bu dans ne kadar uzun sürerse keşfedilen yiyeceğin kaynağı da o kadar kaliteli demektir.

Gözcü Arılar: Görevli arıların yaptıkları bu dansı izleyerek yiyecek kaynağı hakkında bilgi edinen arılara ise gözcü arılar denir. Bu izleme neticesinde gözcü arılar yiyecek kaynağının kalitesi hakkında değerlendirme yaparlar. Bu kaynak kullanılmaya karar verilirse gözcü arılar görevli arılara yardıma giderler.

Kaşif Arılar: Başka bir noktada yeni kaynaklar aramaya başlayan arılara ise kâşif arılar denilir. Bu kaşif arılar önceki görevli arılar arasından seçilirler ve kaynaktan nektar toplamakla da görevlidirler. Toplanan bu nektarlar sonucunda kaynak yetersiz görülürse görevli arı kaşif arı olmuş olur ve yeni kaynaklar için keşfe çıkarlar.

Yapay arı koloni algoritması son zamanlarda oldukça çok tercih edilen bir optimizasyon algoritması haline gelmiştir. Kontrol parametresinin daha az olması ve uygulanabilirlik açısından daha kolay olması durumundan kaynaklı problemlerin çözümünde kullanılması noktasında tercih sebebi olmaya devam etmektedir. Bal arılarının besin arama davranışlarını modellemekte olan algoritma, ilk olarak 2005 yılında, Karaboğa tarafından ortaya atılmıştır. YAK algoritması; kısıtlı optimizasyon problemleri, bakır şerit üretim maliyeti optimizasyonu, yapay sinir ağlarının eğitilmesi, farklı filtre tasarımları ve gezgin satıcı problemlerinin çözümü gibi çeşitli optimizasyon problemlerinin çözümünde ön plana çıkan bir algoritma haline gelmiştir.

Bir optimizasyon algoritması iki temel mekanizma içermektedir: İlki, yeni çözümleri keşfedebilme mekanizması yani arama uzayında ulaşılmayan çözümlere ulaşabilmesidir. Diğeri ise, bulunan yerel kaynakların en faydalı şekilde kullanılabilmesini sağlamasıdır. Algoritmanın optimum çözüme ulaşmasında bahsedilen bu yapıların birbirine uyum

içerisinde çalışması önem arz etmektedir. Bu iki mekanizmanın arasındaki uyumlu çalışma ne kadar maksimum olursa algoritmanın başarısı da o kadar artmaktadır.

Daha önce yapılan araştırmalarda YAK algoritması çalışmasında bazı kabullenmeler yapılmaktadır. Bu kabullnemelerden bazıları; toplam yiyecek kaynağı ile görevli arı sayısı birbirine eşittir, işçi arılar ile gözcü arıların sayısı da eşit kabul edilmiştir. Ayrıca nektarı biten kaynaktaki görevli arı, modelde kaşif arı olarak görevine devam eder. Kaynakların nektar miktarları sonuçların kalitesine, yiyecek kaynaklarının yerleri ise optimizasyona ait olasılık sonuçlarına karşılık gelmektedir. Bu kabullerden yola çıkıldığında YAK algortimasında en fazla nektara sahip kaynağın yeri bulunmaya çalışılarak uzaydaki sonuçlardan problemin minimumu ya da maksimumuna ulaşılan en uygun değer bulunmaya çalışılmaktadır (Akay, 2009; 58).

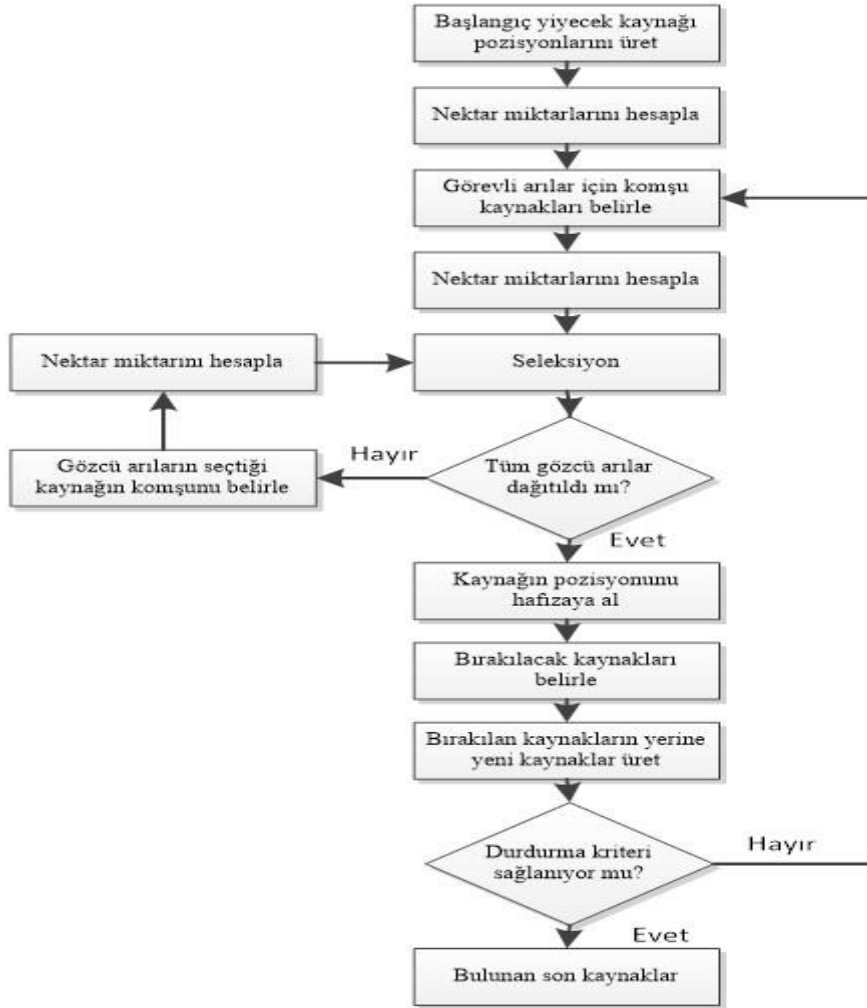
YAK algoritmasının temel aşamaları;

1. Besin kaynağı alanlarının üretilmesi,
2. Tekrar,
3. İşçi arıların yiyecek kaynaklarına yönlendirilmesi,
4. Görevli arılarca getirilen bilgi paylaşımına göre olasılık değerlerinin çıkartılması,
5. Bu olasılık değerlerine göre gözcü arıların yiyecek kaynağı alanlarını seçmeleri,
6. Kaynağı bırakma kriteri: Limit ve kâşif arı üretimi sayısı,
7. Kontrol=Maksimum çevrim.

YAK algoritmasında kullanılan popsize ve limit olarak adlandırılan iki temel kontrol parametresi bulunmaktadır. Popsiz, algortimada kullanılacak popülasyon sayısını ifade eder. Daha önce de bahsedildiği gibi besin kaynakları ile görevli arıların ve gözcü arıların sayısı (NS) birbirine eşit kabul edilir ve sayılar aynı zamanda “ $NS = \text{popsize}/2$ ” olarak belirlenir. Limit parametresi ise bir kaynaktan artık vazgeçilip geçilmeyeceğini belirleyen eşik değeri ifade eder. Ayrıca algortimada bir görevli arının kâşif arı olarak devam etmesi için kullanılan önemli bir parametredir. Yine bazı sonlandırma kriterleri olan algoritmanın kaç çevrim sürdürüleceği veya maliyet fonksiyonu gibi kriterler de giriş parametresi olarak tanımlanabilir.

Algoritma, arama uzayındaki sonuçlara karşılık gelen yiyecek kaynaklarını ve parametrelerin alt ve üst sınırları arasındaki yerleşim yerlerini rastgele üretmektedir. Bu

süreçten sonra kaynağı bırakma kriteri sağlanıncaya kadar yiyecek kaynakları; işçi arı, kâşif arı ve gözcü arı aşamalarından geçirilerek en uygun değer bulunmaya çalışılır. Besin kaynağının komşuluğunda yeni bir kaynak belirlenir. Bulunan yeni kaynak öncekine göre daha zengin ise işçi arı veya gözcü arı bu kaynağı hafızasına alır ve geliştirilememe sayacı sıfırlanır. Eğer yeni kaynak öncekine göre daha iyi değilse geliştirilememe sayacı bir artırılır (Kaya ve Eke, 2020; 106) (Akay, 2009: 12-25).



Şekil 3.1. YAK algoritması akış şeması

Arıların sahip oldukları bazı özellikler; besin arama davranışı, ezberleme, bilgi paylaşımı ve öğrenme özellikleridir. Bu özellikler son zamanlarda yapılan sürü zekâsına dayalı farklı araştırma alanlarının temelini oluşturmaktadır. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar son yıllarda bir artış eğilimi içerisindedir.

Doğal bir arı kolonisinde arılar arasında yapılacak işlere göre bir görev dağılımı söz konusudur. Bu görev dağılımları merkezi bir birim olmadan arıların kendi kendilerine

gerçekleştirdikleri bir durumdur. Sürü zekâsının iki temel özelliği olarak görev dağılımı ve kendi kendine organize olabilme özellikleri ortaya çıkmaktadır (Akyol & Alataş, 2012: 45).

Arıların yiyecek kaynaklarının arayışı içerisinde olmaları bal, polen veya nektar bulmak içindir. Bulunan yiyeceklerin kalitesi; yuvaya yakınlığı, çeşidi, nektar yoğunluğu, nektarın çıkarılmasının basitliği gibi etkenlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Görevli işçi arılar; nektarın, kâşif arılarca bulunmuş olan belirli kaynaklardan yuvaya getirilmesi ile sorumludurlar. Ayrıca buldukları kaynağın verimliliği ve yeriyle ilgili bilgileri de toplayarak kovadaki diğer arılarla bu bilgiyi paylaşmaktadırlar. Görevsiz işçi arıların görevi ise nektarı toplanabilecek yeni yiyecek kaynakları bulmaktır. İçsel bir dürtüye veya dış bir etmene bağlı olarak rastgele kaynak arayışında olan kâşif arılar ve kovanda bekleyip görevli arıları izleyerek onlardan gelecek bilgiyi kullanıp yeni bir yiyecek kaynağına yönelen gözcü arılar olarak adlandırılan arılarda mevcuttur. Kâşif arıların sayısı kovadaki diğer arılara oranı yüzde 5 ila 10 arasındadır (Karaboğa ve Akay, 2009: 111-112).

Arılar arasındaki bilgi paylaşımı ortaklaşa bilginin oluşumundaki en önemli etmendir. Kovadaki dans alanında yiyecek kaynağının yeri ve kalitesi hakkındaki bilgi paylaşımı yapılır. Dans eden arıya diğer arılar, kaynağın kokusu ve tadı hakkında bilgi almak için antenleri aracılığıyla dokunurlar. Arıların yiyecek arama davranışlarını modelleyerek geliştirilen en güncel algoritma YAK'dır. Bu algoritmayı temel alan modelde bazı kabullerin yapılması onun daha basit olmasını sağlayacaktır. Buna göre: kaynak sayısı, görevli arı sayısı ve işçi arıların sayısı birbirlerine eşit olarak belirlenmektedir ve nektarı tükenmiş kaynaktaki görevli arılar kâşif arıya dönüşmektedir. Yiyecek kaynaklarındaki nektar miktarları kaynaklarla ilgili çözümlerin uygunluğuna karşılık gelmektedir. Ayrıca bu kaynakların yerleri optimizasyon problemine ait olası çözümleri ifade etmektedir. YAK algortimasında en fazla nektara sahip yiyecek kaynağının yeri bulunmaya çalışılarak uzaydaki çözümlerden problemin minimum ve maksimumunu veren çözüm bulunmaya çalışılır (Karaboğa, 2005: 3-4).

3.1.1.1. YAK Algoritmasının Yapısı:

YAK algoritmasına dayalı alt-blok küme tasarımı, aşağıdaki algoritmada özetlenmiştir. YAK algoritmasında, bir alt-blok kümesi S^i ve bunun uygunluk değeri $fit(S^i)$ bir

yiyecek kaynağının arama uzayındaki konumunu ve ilişkili yiyecek kaynağındaki nektar miktarını temsil eder. Bir alt-blok kümesi; $S^i = [S^{i,(1)}S^{i,(2)}S^{i,(2^P)}]$ $i = 1, 2, \dots, Pop$, şeklinde gösterilir, burada Pop popülasyonun büyüklüğünü belirtir (Yildirim, 2020; 2927).

Algoritma: YAK Algoritmasına Dayalı Alt-Blok Set Tasarımı:

- 1: Giriş: m bilgi biti,
- 2: Çıkış: Optimum alt-blok seti S^{best} ,
- 3: Başlatma: L_{YAK} , Pop , LV 'yi belirle ve bir aday alt-blok S^{ini} 'yi rastgele ayarla,
- 4: S^{ini} 'nin uygunluğunu değerlendir,
- 5: tekrar et,
- 6: Görevli arılar: tarafından yeni S^i 'nin uygunluğunu araştır ve değerlendirilir,
- 7: Gözcü arılar: yeni besin kaynakları seç. Yeni S^i 'yi araştır ve değerlendir,
- 8: LV 'ye ulaşılmazsa 7. adıma git, aksi takdirde devam et,
- 9: Keşif arıları: yeni S^i 'yi rastgele ara,
- 10: En iyi faz sırasını ezberle S^{best} ,
- 11: döngü = L_{YAK} (Maksimum döngü sayısı) olana kadar devam et.

Başlangıçta, S^i rastgele oluşturulur ve uygunluk değeri şu şekilde hesaplanır:

$$fit(S^i) = \frac{1}{1 + ABEP(S^i)}$$

Burada, $ABEP(S^i)$, S^i 'nin ABEP değerini belirtir. Görevli arılar, mevcut S^i kaynağının komşuluğunda daha kaliteli kaynaklar bulmak için yeni besin kaynakları ararlar.

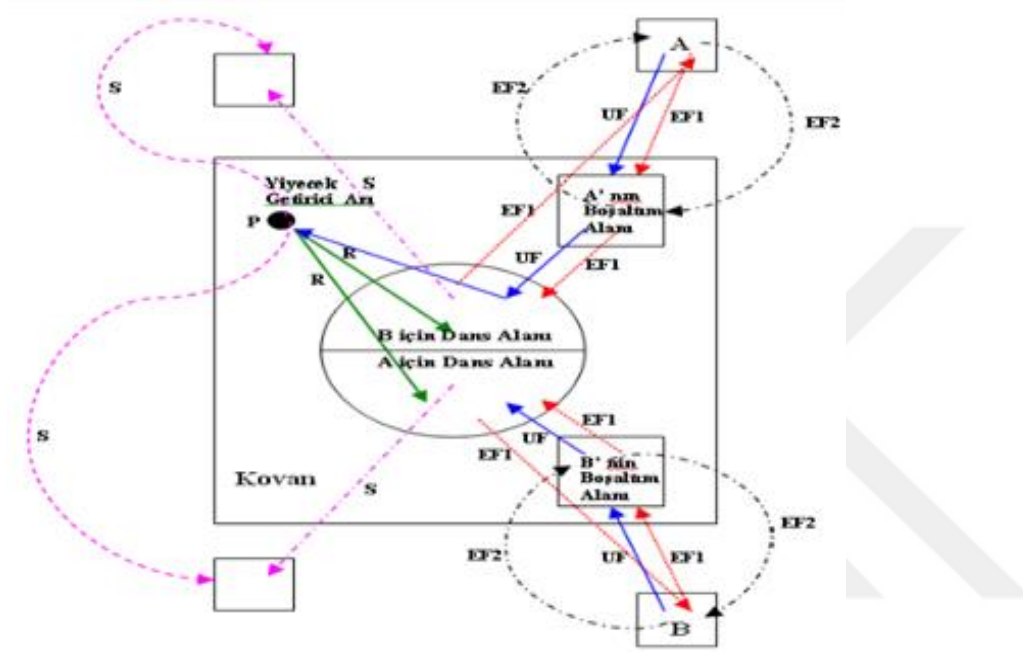
$$YAK: S^{next} = S^i + \phi_i(S^i - S^{Nb})$$

Burada, S^{Nb} , S^i 'nin komşuluğu içindeki bir çözümdür. ϕ_i , Aramanın adım boyutunu belirleyen $[-1, 1]$ aralığında rastgele bir sayıdır. S^{next} 'in uygunluk değeri hesaplanır ve $fit(S^{next}) > fit(S^i)$ durumunda S^{best} adayı olarak S^i yerine sonraki kaynak hafızaya alınır. Daha sonra görevli arılar her bir S^i 'nin uygunluk değerini gözcü arılarla paylaşır ve gözcü arılar aşağıdaki formülle kendi arama yönlerini belirler (Karaboğa ve Öztürk, 2011: 654):

$$P_i = \frac{fit(S^i)}{\sum_{i=1}^{Pop} fit(S^i)}$$

Denklem 3.1. Gözcü arıların kendi arama yönlerini belirleme formülü

Gözcü arılar, işçi arılar aşamasında olduğu gibi yeni kaynakları araştırır ve ezberler. Son olarak, görevli ve gözcü arıların LV sınır değeri içinde başarısız olması durumunda kaşif arılar, rastgele yeni kaynaklar ararlar.



Şekil 3.2. Arılarda yiyecek arama döngüsü (Kaynak: Karaboğa, 2011)

3.1.2. Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO) Algoritması

İlk kez MarcoDorigo tarafından temel ilkeleri ortaya konulmuş olan Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO) algoritması, kendi aralarında işbirlik yaparak en iyi çözüme ulaşan yapay bir karınca kolonisinin arama uzayını etkin ve verimli bir şekilde incelemesini amaçlayan yöntemdir (Dorigo vd., 1991: 2). Karıncalar için koloni halinde yaşayan sosyal canlılar da denilebilir. Karınca kolonileri yuvası ile yiyecek kaynağı arasındaki en kısa yolu bulma becerisine sahiptirler. Bu konuda yapılan araştırmalar bu becerinin karıncalar arasındaki kokuya dayalı bir tür kimyasal haberleşmenin sonucu olduğunu göstermektedir.

Karınca kolonilerinin davranışlarının matematiksel modeller üzerine dayandırıldığı karınca kolonisi algoritmalarının ilk kez kullanıldığı alan olan gezgin satıcı problemidir

ve araştırmada olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen olumlu sonuçlar neticesinde bu algoritmalar diğerk araştırmacılar tarafından da problem çözümlünde kullanılmaya başlanılmıştır. Böylelikle günümüzde optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan bir yapay zekâ tekniğı haline gelmiştir (Dorigo vd.,1991: 2-4).

Yapay Karınca Sisteminin esinlenmiş olduğı durum, gerçek karıncaların yuva ve besin kaynağı arasındaki en kısa yolu bulmak için ortaya koydukları davranış biçimi olmuştur. Bazı hayvanların kendi cinslerinden olan diğerk hayvanları etkilemek için kullandıkları bir tür kimyasal salgı bulunmaktadır ve bu feromon olarak adlandırılmıştır. Karıncaların besin kaynağı yolunu bulmak için kullandıkları kimyasal koku bırakma yöntemine, feromon bırakma olayı denilmektedir. Karıncalar yiyecek arayışı içindeyken, depoladıkları feromonları, gıdaya giderken tercih ettikleri güzergaha bırakarak, kendilerinden sonraki karıncaların feromonun daha fazla olduğı yolu az olan yola tercih etmelerini sağlarlar (Yücesan, 2015: 21).

Zamanla buharlaşıp yok olma özelliğı olan bu feromonlar, bir yiyecek kaynağının, yuvadan uzaklığı yani algoritmadaki uygunluk değeri hakkında kolonideki diğerk karıncalara bilgi vermektedir. Feromon yoğunluğunun çok olduğı rotadaki yiyecek kaynağı yuvaya daha yakın yani yüksek uygunluk değeriine sahip olduğunu, feromon yoğunluğunun az olduğı rotadaki yiyecek kaynağın ise yuvaya uzak olduğı yani düşük uygunluk değeriine sahip olduğı anlamına gelmektedir.

Tüm karıncalar turlarını tamamladıktan sonra çözüm uzayının taranması amacıyla feromon güncellemesi yapılmaktadır. Bu güncelleme ise iki tarzda yapılmaktadır. İlki; belirlenen oranda tüm yollardaki feromonların buharlaştırma işleminin yapılması, diğeri ise; karıncaların geçmiş oldukları yollardaki feromon miktarlarının, o yolu tercih eden karıncanın yol uzunluğuyla ters orantılı olarak arttırılması ile yapılmaktadır. Feromon artışının yol uzunluğuyla ters orantılı olarak sağlanması iyi çözümlerin öneminin arttırılması sonucunu verir.

KKO algoritmasının diğerişik versiyonlarında farklı feromon yenileme kuralları kullanılmıştır. Bunlar lokal ve global feromon güncellemesi olarak iki düzeyde gerçekleşmekte olup bir yoldaki toplam feromon düzeyi; lokal ve global feromon düzeyinin toplamını oluşturmaktadır. Lokal feromon güncellemesi içerisinde, geçiş yapılan yollar daha cazip hale getirilmesi amacıyla turlar dinamik olarak diğeriştirilir. Karıncalar diğerişen feromon miktarlarına bağılı olarak her iterasyonda turlarını da

değiştirmektedirler. Böylelikle sürekli olarak daha kısa turları bulmak amaçlanmaktadır (Keskintürk ve Söyler, 2013; 691).

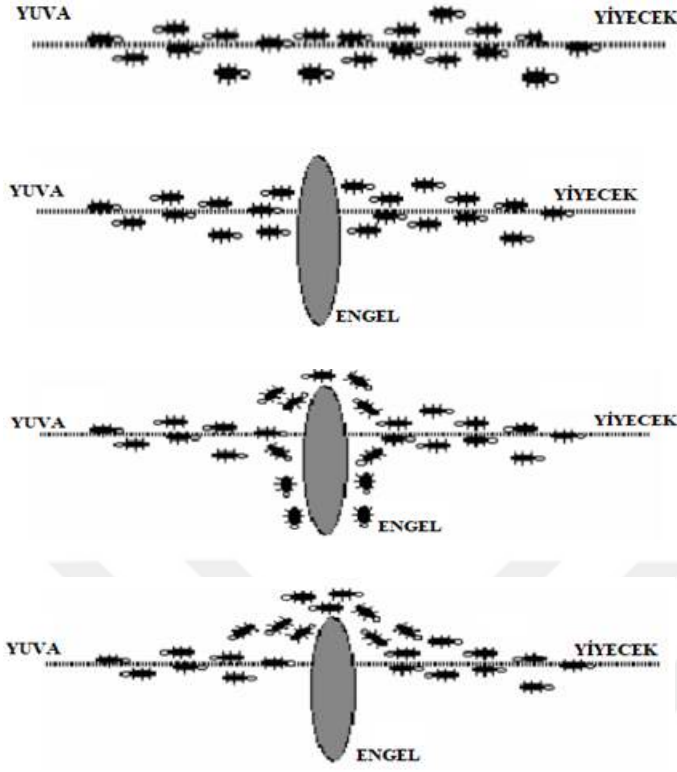
Tüm karıncalar turlarını tamamladıktan sonra, eski feromon miktarları belli bir miktarda buharlaştırılır, her bir karıncanın turu boyunca geçiş yapmış olduğu yollarda belli bir miktarda feromon artışı sağlanır.

Geçerli iterasyondaki en iyi sonuca sahip karıncanın izlediği yolun feromon düzeyinin artırılmasından oluşan Global Feromon Güncellemesi, iterasyonlarda bulunan en iyi sonuçların belli bir oranda ileriki iterasyonlara aktarılmasını sağlar.

Önerilen algoritmaların uygulanmasında kullanılan yapay karıncalar gerçek karıncalara göre bazı bakımlardan farklılıklar gösterebilmektedir. Yapay karıncalarda hafıza özelliği bulunmaktadır. Gerçek karıncalar hemen hemen kör olmalarına karşın yapay karıncalar görme yeteneğine sahiptir. Ayrıca yapay karıncalar, gerçek karıncalardan farklı olarak ayrı bir araştırma uzayında yer alırlar. Gerçek karıncalar, yuvasına götürecek yiyecekleri ararken sürekli bir araştırma uzayı varsayılan yeryüzünde sayısız noktadan ve yoldan geçebilirken; yapay karıncalar, hafıza ve zaman kısıtlamasından dolayı sınırlı sayıda ayrı veri kümesinden oluşan araştırma uzayında çözüm aramaktadırlar (Sarıkoç, 2004; 25).

Yuvalarından yiyeceğin kaynağına giden en kısa yolu, herhangi bir görsel ipucu kullanmadan bulabilme yeteneğine sahip olan karıncalar ayrıca, çevrelerindeki değişikliklere uyum sağlama konusunda çok iyi yetiye de sahiptir. Bir yiyeceğe giden yolda karşılaştıkları herhangi bir problemde veya yolun kullanılamaz bir halde olması durumunda, yeniden kestirme bir yol bulmaya çalışmaları bu konuya örnek gösterilebilir. İzlediği yol herhangi bir engelle bozulan karınca, o engeli en kestirme şekilde hangi taraftan aşacağına ya da güzergahın tamamını nasıl bitireceğine dair bir bilgiye sahip değildir. Engellerden hangisinin diğer tarafa göre yolu uzattığını başlangıç noktasında bilemez. Ancak birim uzunluk başına düşen feromon yoğunluğunun fazlalığı engeli en kısa güzergahtan aşan tarafta karıncaların hangi yolu tercih edeceğine dair yol gösterici olmaktadır. Fakat arkadan gelen karıncalar için kısa taraf yani feromonun yoğun olduğu kısım daha çok tercih edilecektir. Gerçek karıncalarda, çevrelerinde oluşan değişimlere doğru yönde uyum sağlama açısından feromon salgısıyla birlikte mesafe bilgisi de etkili olmaktadır.

Karınca kononisinin karşılaştığı engel karşısında feromon bırakarak en kısa yolu tercih etme şekilleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

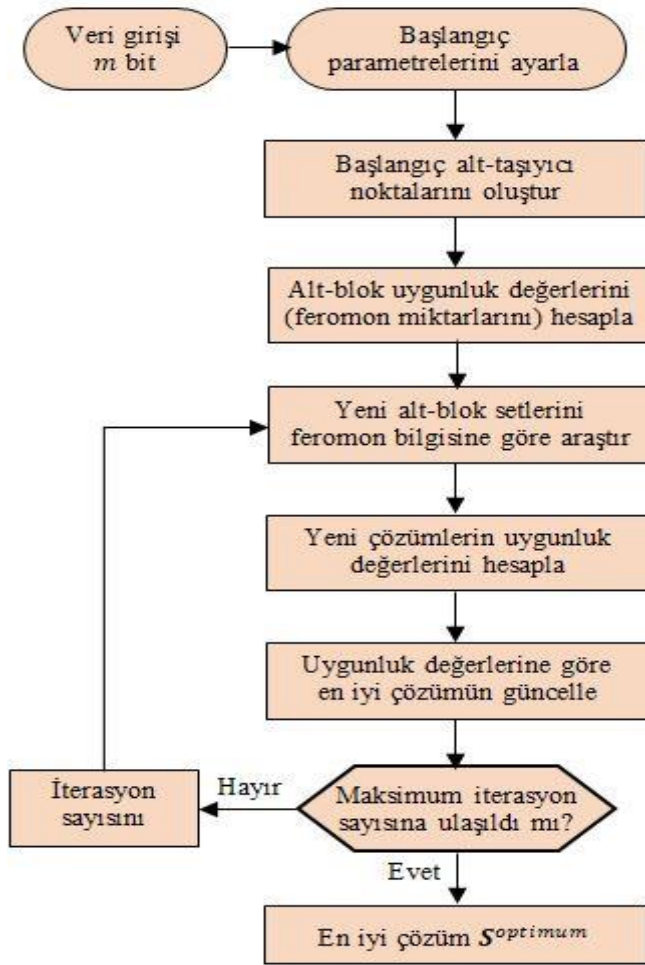


Şekil 3.3. Karıncaların en kısa yolu tercih etmeleri

Gerçek bir karıncanın zeki davranış biçimi göstermesi beklenemez. Fakat yapay karınca sürüsü, bütün bir şekilde karşısına çıkan engellere adaptif bir yapı sergileyerek güzergâh/yol problemini çözüme ulaştırabilmektedir. Dolayısı ile gerçek karınca kolonisini taklit eden karınca algoritmasının yapay zeka özelliği taşıdığı söylenebilir (Sarikoç, 2004: 26).

Karıncalar, esin kaynağından yuvalarına giden en kısa yolu görme duyularını kullanmaksızın bulabilme yeteneğine sahiptirler. Aynı zamanda, çevredeki değişime uyum sağlama yetenekleri vardır. Dış etkenler neticesinde takip ettikleri mevcut yol artık en kısa yol olmadığını anladıklarında yeni en kısa yolu bulabilmektedirler (Dorigo ve Gambardella, 1997: 53).

Bir engel durumu ile karşılaşan gerçek karınca sürüsüne bakıldığında tamamının feromonun en yoğun olduğu yeri tercih etmediği, azınlık bir kısmının da istisnai bir şekilde feromonun az olduğu yolu seçebildikleri söylenebilmektedir. Yapılan gözlemlerden karıncaların, feromonun yoğunluğunun daha fazla olduğu yerlerden büyük bir olasılıkla daha fazla geçtiği kabul edilir. Bu da karıncaların davranışının olasılık tabanlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.4. Karınca koloni optimizasyonu (KKO) algoritması akış şeması (Kaynak: Yıldırım, 2021: 483)

3.1.2.1. Karınca Koloni Optimizasyonu Algoritması Parametreleri

Kolonide kaç adet karıncanın olacağını belirleyen parametre “Karınca Sayısı”dır. Arama işleminin kaç iterasyon (adım) devam edeceğini belirleyen parametre ise “İterasyon Sayısı”dır. “Feromon Kuvvetlendirme Oranı (α)” ise düğümler arasındaki feromon miktarlarının önem derecesinin belirlendiği parametredir. Düğümler arasındaki mesafenin önem derecesi “Sezgisellik Kuvvetlendirme Oranı (β)” ile belirlenir. Her adımın sonunda düğümler arasındaki feromonların hangi miktarda buharlaşacağını belirleyen parametreye de “Feromon Buharlaşma Oranı (ρ)” denilir.

Yapay feromon izlerinin güncelleştirilmesiyle yenilenen bir yapıya sahip olan Karınca Koloni Algoritmasının çalışma sürecinde, karıncalar tarafından güncellenen feromon miktarlarını, iyi bir çözüme ulaşılabilmesi için bilgi oluşturulmaktadır. Ayrıca her

iterasyonda da bu bilgiler güncellenmektedir.

Algoritmanın çalışma sürecinde temel adımlar;

- Yapay karıncaların yaptıkları turların sonunda geçmiş oldukları yollardaki feromon miktarlarının arttırılması,
- Belirli bir miktarda feromon buharlaşma olayının gerçekleştirilmesi,
- En iyi çözümün bulunmasına bağlı olarak da global feromon güncellemesinin yapılması,
- Karıncaların yenilenmiş bu feromon miktarlarına göre yeni turlarını gerçekleştirmeleri olarak aşamalandırılabilir.

KKO algoritmasında bir tur boyunca, i noktasındaki k karıncası için, bir sonraki j noktasını seçerken, gidebileceği yollar içerisinde feromon miktarına bağlı olarak, hesaplanan seçim değerlerinden maksimum olanını seçmesi ilk alternatiftir. Diğer bir alternatifte ise yollardaki feromon miktarı göz önüne alınarak oluşturulan olasılık dağılımına bağlı olarak yollar seçilir. İlk alternatifi seçme olasılığı (q_0) % 90'dır.

Karınca sayısının arttırılması, çözümde iyileşmeye yardımcı olurken hesaplamaların artmasına da sebep olacaktır. Bu da karınca miktarının fazla arttırılması ile işlem zamanlarının uzamasına neden olacaktır. Problemin büyüklüğüne ve uygulama alanına göre karınca sayısı değişkenlik gösterirken GSP problemlerinde yapılan denemeler neticesinde, karınca sayısının şehir sayısına eşit alınmasının daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır (Dorigo vd., 1999: 142-143).

Karınca algoritmalarında karınca sayısı, q_0 , α ve β ayarlanabilir temel parametrelerdir. Algoritmanın performansında iyileşme sağlanabilmesi için parametrelerin etkin ve yerinde seçilmesi gerekmektedir.

En iyi çözümün sonraki iterasyonlara aktarılması olasılığını belirleyen q_0 değeridir. q_0 değeri gezgin satıcı problemlerinde çoğunlukla %90 olarak alınmıştır. Bu şu anlama gelmektedir; mevcut karıncalar %90 olasılıkla en iyi çözümü sağlayan yolu takip ederken, feromon izlerine bağlı olarak güzergahlarını belirlemeleri de %10 olasılıkla olacaktır. α değeri, önceki iterasyonların sonuçlarının bir sonraki iterasyonlara aktarılmasını sağlamakla birlikte ilgili yolun feromon miktarının ne denli olduğunu belirlemektedir. Feromonun yoğun olduğu yolların seçilme olasılığını arttırılması için α değeri yüksek seçilir ve bu seçim tesadüfiliği de azaltmaktadır. Yol uzunluklarının, bir sonraki noktayı

seçmelerindeki etkisini belirlemek için de β değeri kullanılır. β 'nın düşük olması alternatif çözümlerin araştırılması olasılığını azalttığı gibi yüksek alınırsa da bir sonraki yolun seçiminde tesadüfilik değeri artmaktadır (Dorigo et al., 1996: 30-32). Problemin özelliğine göre değişen α ve β parametreleri için denemeler yapılarak en etkin parametrelerin belirlenmesi gerektiğinden bu parametreleri birbirinden bağımsız düşünmemek gerekir (Keskintürk ve Söyler, 2013: 692).

Karınca kolonisinde i ve j iki merkez arasındaki mesafeyi bulmak için öklit teoremi olarak kullanılan formül aşağıdaki gibidir:

$$d_{ij} = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Denklem 3.2. i ve j iki merkez arasındaki mesafe

Kolonideki her bir karınca, geçiş yapılan şehirlerin listesi tabu listesine kaydedilmektedir. Böylelikle ziyaret edilen şehirlerin tekrar ziyaret edilmesi bu tabu listesi sayesinde engellenmiş olur. Karıncalar n adet iterasyon ardından feromon güncellemesi yaparlar. Feromon güncellemesinin matematiksel formülü de şu şekildedir:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t+1)$$

Denklem 3.3. Feromon güncellemesi.

Burada; $\rho \in (0,1]$ değerini alır ve buharlaşma katsayısıdır. $\Delta\tau_{ij}^k$ ise k . karıncanın t ve $t+1$ zamanındaki (i,j) yolu için bıraktığı feromon miktarıdır. t . iterasyondaki feromon düzeyi ise şu şekilde hesaplanır:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t+1) = \frac{1}{L_k(t+1)}, \quad L_k(t+1) = k \text{ karıncasının toplam yol uzunluğudur.}$$

Denklem 3.4. Feromon miktarı.

KKO algoritması ile alt-blok set tasarımı, ilgili alt-blok setinin feromon miktarı yani uygunluk değeri ABEP değerini, her bir yiyecek kaynağının güzergahı ise bir alt-blok setini temsil etmektedir.

3.1.3. Genetik Algoritma Optimizasyonu

1976 yılında John Holland tarafından “En iyi olan hayatta kalır.” görüşüne dayanarak çözüm üretilen bir algoritmadır. Temel ilkelerinin ortaya konulmasıyla beraber, genetik algoritmalarla ilgili bir çok bilimsel çalışma yayımlanmıştır. Bu algoritmada bir başlangıç popülasyonu ile çözüme başlanılarak popülasyon içerisinde en iyi bireyler seçilir. Ardından bu bireylerden çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonucunda sonraki popülasyonlar üretilir.

Genetik algoritma alanında yapılan çalışmaların bir kısmı algoritmanın kendine yönelik iyileştirme çalışmalarının yanında genellikle adaptiflik, başka bir optimizasyon algoritması ile içi içe çalışma, çaprazlama ve mutasyonda yenilik gibi konular üzerinde durulmuştur. Araç rotalama problemi, astronomi ve astrofizik, elektromanyetik, yapay sinir ağları eğitimi, elektrik yük dağıtım problemleri Genetik Algoritma ile çözülen diğer problem alanları olarak sıralanabilir (Erdoğan, 2016: 294).

Genetik algoritma parametreleri aynı zamanda kontrol parametreleri olarak da adlandırılır. Bunlardan bazıları; popülasyon büyüklüğü, çaprazlama olasılığı, mutasyon olasılığı, kuşak aralığı, seçim stratejisi ve fonksiyon ölçeklemesi olarak sıralanabilir (Yeniay, 2001: 37-38).

Çözümlerin ikili kodlar ile oluşturulması ve çaprazlama işlemi ile çözüm uzayının çok iyi taranması genetik algoritmanın önemli bir üstünlüğü olarak söylenebilir. Çözüm uzayının taranması işleminde uzayın tamamının değil belirli bir kısmının taranması neticesinde etkin bir arama yapılarak çok daha kısa bir sürede çözüme ulaşılmış olur (Goldberg, 1989: 14). Diğer bir önemli üstünlük ise çözümlerden oluşan popülasyonun eş zamanlı incelemesi sonucunda yerel en iyi çözümlere takılmamalarıdır.

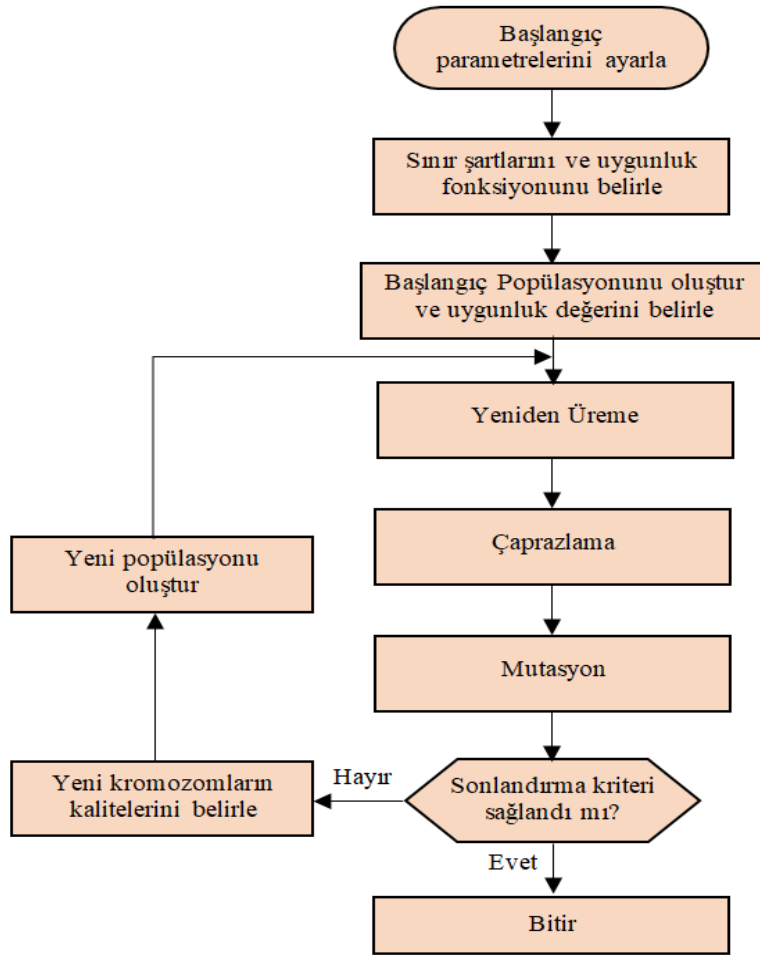
Genetik algoritma parametrelerin kodlarıyla uğraşmaktadır. Genetik algoritma tek bir yerden değil de, bir grup çözüm içinden arama yapar. Genetik algoritma ne yaptığı konusunda bilgi içermemekle beraber sadece nasıl yaptığını bilir. Bu nedenle bir kör arama metodu denilebilir. Dolayısı ile genetik algoritmalar, olasılık kurallarına göre çalışmaktadırlar.

Genetik algoritmalar, çeşitli karmaşık problemleri optima en yakın olarak hızlı çözüm üretebilen algoritmalarlardır. Geleneksel yöntemlerle taranan büyük çözüm uzaylarında hesaplama zamanı artmaktadır. Ancak bu tip karmaşık ve çözüm uzayı geniş problemlerde, genetik algoritmalar ile daha makul sürede çözümler bulunabilmektedir

(Gonzales & Fernandez, 2000: 685-686).

Genetik hesaplamada kullanılan en temel elemanlar gen ve kromozomdur. Matematiksel olarak düşünüldüğünde n değişkenli bir sistemde her değişken bir gen olarak düşünülebilirken tüm değişken seti ise kromozom olarak düşünülebilir. Algoritma, kromozomlardan oluşan bir grup çözüm setini içermektedir. Oluşturulan bu çözüm setlerinden karşılaşılan probleme göre seçilen çözüm setleri üreme yolu ile yeni nesillere taşınır. Başarılı bireylerde daha fazla üreme özellikleri oluşabilir.

Rastsal bir çözüm kümesi seçilerek başlangıç popülasyonu oluşturulur. Arama uzayında bulunan mümkün olan tüm çözümler dizi olarak kodlanır. Kodlanan her bir dizi için bir uygunluk değeri hesaplanır ve hesaplanan uygunluk değerleri dizilerin çözüm kalitesini gösterir. Rastsal olarak belirli bir olasılık değerine göre seçilen bir grup dizi çoğalma işlemine tabi tutulur. Çoğalma sonucu oluşan yeni bireylerin uygunluk değerleri hesaplanır ve sonrasında çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanır. Belirlenen kuşak sayısına ulaşıncaya iterasyon işlemi sonlandırılır. Belirlenen amaç fonksiyonuna göre en uygun olan dizi seçilir. Genetik algoritmalar çözüm uzayındaki bir uygunluk değeri olan her noktayı, kromozom vasıtasıyla ikili bit dizisi ile kodlar. Genetik algoritmada popülasyon olarak noktalar kümesi muhafaza edilir. Mutasyon ve çaprazlama gibi genetik operatörler algoritma tarafından her kuşakta kullanılarak yeni bir popülasyon oluşturur. Böylelikle birkaç kuşak sonrasında popülasyon, daha iyi uygunluk değerine sahip üyeleri içermiş olur. Çoğalma, çaprazlama ve mutasyon, çözümlerin kodlanması, uygunlukların hesaplanması gibi birçok operatörün uygulanması genetik algoritmalar ile yapılabilmektedir (Jang vd., 1997: 1482) (Engin & Fırlı, 2002: 3-4).



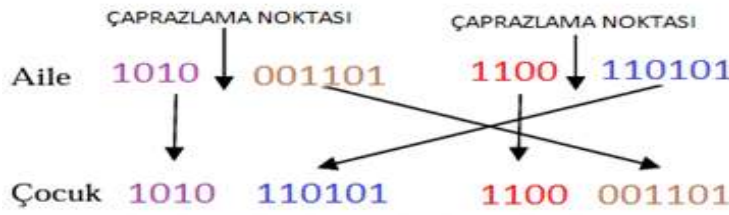
Şekil 3.5. Genetik algoritma optimizasyonu blok diyagramı

Genetik algoritmanın blok diyagramından da anlaşılacağı üzere öncelikle probleme göre n kromozondan oluşan bir set oluşturulur. Sonra x genlerinden oluşan her kromozonun $f(x)$ uyum değeri tüm nüfus için hesaplanır. Toplam nüfustan içerisinde uyumları göz önünde bulundurularak bir anne baba çifti seçilir, bu seçimde uyum daha fazla ise seçim olasılıkları da buna göre fazlalaşır. Üreme yoluyla yeni bir nesil üretip anne babalarıyla bu yeni nesil değiştirilir. Eğer üreme olmadı ise eski nesil korunur. Belli bir olasılık içinde mutasyonlar oluşturulur. Yeni bireyler nüfusa eklenir. Yeni nesil aynı şekilde tekrar yeni nesiller elde etmek için kullanılır. Eğer istenilen şartlar oluşmuşsa simülasyon durdurulur aksi durumda geri dönerek işleme devam edilir.

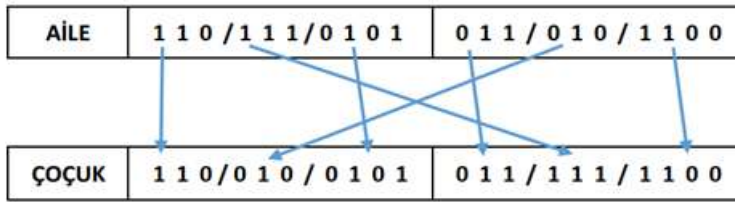
GA'da itibar işlemi çaprazlama ve mutasyon olmak üzere iki şekilde kullanılır.

3.1.3.1. Çaprazlama İşleminin Uygulanması

Mevcut gen havuzunun potansiyelini araştırmak üzere, bir önceki kuşaktan daha iyi özellikler içeren yeni kromozomlar oluşturmak çaprazlama operatörünün ana kullanım amacıdır. Bu operator, genellikle verilen çaprazlama oranına eşit olasılıkla seçilen aile çeşitlerine uygulanmaktadır (Jang vd, 1997: 1482). Çaprazlama, genetik algoritmanın performansını etkileyen önemli bir parametrelerdir. Çoğalma işlemi sonucunda elde edilen yeni popülasyondan random olarak iki kromozom seçilir ve karşılıklı çaprazlama işlemine tabi tutulur. k tamsayısı $1 \leq k \leq L-1$ aralığında seçilmektedir. Burada L dizi uzunluğunu ifade etmektedir. Bu tamsayı değerine göre dizi çaprazlamaya tabi tutulur. En basit çaprazlama yöntemi olan tek noktalı çaprazlama yönteminde, her iki kromozomun da aynı gen uzunluğunda olması gerekmektedir. İki noktalı çaprazlamada, kromozom iki noktadan kesilerek pozisyonlar karşılıklı olarak yer değiştirilir (Fırlı & Engin, 2002: 39).



Şekil 3.6. Tek noktalı çaprazlama

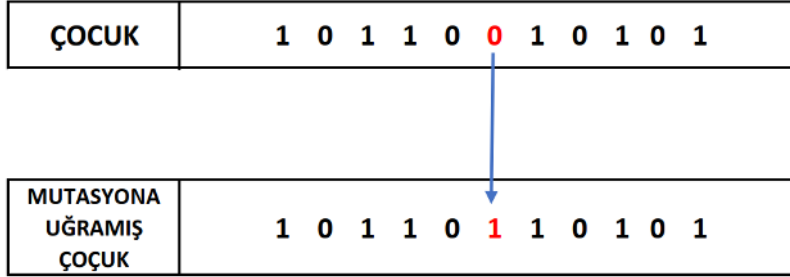


Şekil 3.7. İki noktalı çaprazlama

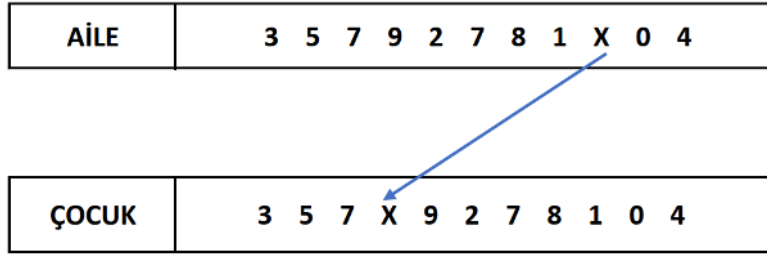
3.1.3.2. Mutasyon İşleminin Uygulanması

Mevcut gen potansiyellerini araştırmak için kullanılan çaprazlamada, popülasyon gereken kodlanmış bilginin tamamını içermez ise istenilen kalitede bir çözüm üretilmemiş olur. Bu sebeple, mevcut kromozomlardan yeni kromozomlar üretme yeteneğine sahip olan mutasyon denilen işleme ihtiyaç duyulmaktadır (Goldberg, 1989: 14). Mutasyon; özellikle ikili kodlama sisteminin kullanıldığı problemlerde uygulanmakla beraber düşük

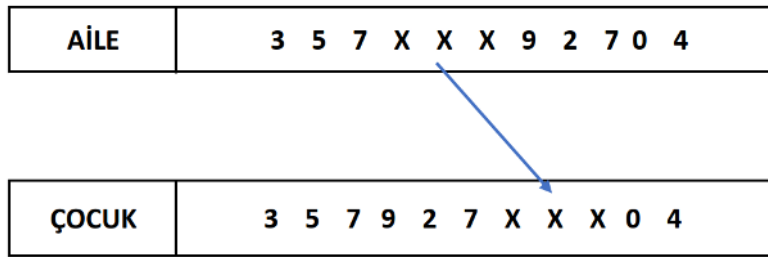
bir olasılık değeri altında 0 veya 1 olan bit değerini diğer bit değerine dönüştürür. Tek noktalı mutasyon, ekleme mutasyonu, yer değiştirme mutasyonu gibi değişik türleri bulunan mutasyonlarda genel amaç, genetik çeşitliliği sağlamaktır (Bräysy, 2003: 347).



Şekil 3.8. Tek noktalı mutasyon



Şekil 3.9. Ekleme mutasyon



Şekil 3.10. Yer değişikliği mutasyonu

3.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması

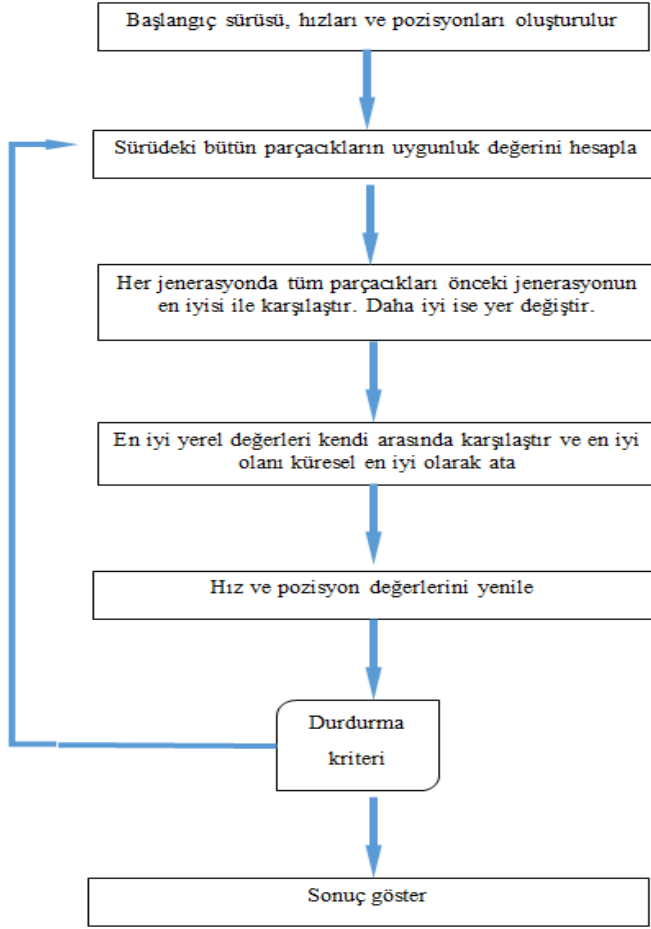
1995 yılında Russell Eberhart ve James Kennedy tarafından bulunan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO); popülasyon tabanlı, sürü zekâsına dayalı bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu modelin esin kaynağı; kuş ve balık sürülerinin tehlikeden kaçışları esnasında ve yiyecek arayışları sürecinde gösterdikleri toplu hareketlerdir. Bu model

uygulamalarında az parametre gerektirmesi ve hızlı sonuç bulması sebebiyle diğer birçok algoritmaya üstünlük sağlamıştır.

İçgüdüsel olarak sürüdeki her bir parçacık; sürünün tamamı için en iyi pozisyon (G_{best})'e yaklaşma ve kendi en iyi pozisyonu (P_{best})'i koruma eğilimi olmak üzere 2 şekilde hareket etme eğilimi gösterir.

PSO algoritmasının genel adımlarını şu şekilde ifade etmek mümkün olacaktır (Demirci, 2014: 10);

- 1) Her bir parçacığın hızı ve başlangıç değeri rastlantısal bir şekilde atanarak popülasyon oluşturulur.
- 2) Verilen amaç fonksiyonuna göre her bir parçacığın uygunluk değeri hesaplanır.
- 3) İkinci adımda parçacığın belleğinde bulunan en iyi kişisel değer (P_{best}) ile hesaplanan uygunluk değeri karşılaştırılarak parçacıklara ait en iyi değer bulunmaya çalışılır. Eğer bir önceki adımda elde edilen sonuç mevcut " P_{best} " sonucundan daha iyi ise yeni sonuç " P_{best} " ile değiştirilir.
- 4) Yine ikinci adımda belirtilen parçacıkların her biri için hesaplanan uygunluk değeri programın hafızasında bulunan küresel en iyi çözüm (G_{best}) ile karşılaştırılarak küresel en iyi parçacık bulunur. Daha iyi bir sonuç mevcutsa bu sonuç " G_{best} " ile değiştirilir. Bütün parçacıklar için bu karşılaştırma işlemi ayrı ayrı yapılır.
- 5) Her bir parçacık için hız değişkenleri ve konumları ilgili formüle göre ayarlanarak ayrı ayrı bulunur.
- 6) Belirlenen durdurma şartı ya da şartları sağlanıncaya kadar 2 - 5 adımları arasındaki işlemler tekrar edilerek sürece devam edilir.



Şekil 3.11. PSO blok diyagramı

Parçacık sürü optimizasyonunda Kennedy ve Eberhart tarafından önerilen PSO'nun ilk halinde atalet ağırlığı (w) bulunmamaktayken Eberhart ve Shi'nin daha sonra yaptığı bir çalışmada hız güncelleme formülünde atalet ağırlığı (w) bir çarpan olarak eklenmiş olup hız değişimi formülü aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Ortakçı, 2011: 10):

$$V_{ij}^{k+1} = wV_{ij}^k + c_1r_1 \left(P_{best\ ij}^k - x_{ij}^k \right) + c_2r_2 (G_{best} - x_{ij}^k)$$

Denklem 3.5. Hız değişimi formülü.

Bireylerin yer değiştirmesi yani yeni konum vektörü, eski konum vektörüne yeni konum değeri eklenerek aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1}$$

Denklem 3.6. Bireylerin yeni konum vektörü

Formüllerdeki k , iterasyon sayısıdır. V_{ij}^k , k . iterasyondaki $j=1, \dots, n$ boyutunda i . parçacığın hızı, x_{ij}^k , k . iterasyondaki j boyutunda i . parçacığın pozisyonu, c_1 ve c_2 hızlandırma katsayıları, r_1 ve r_2 $[0,1]$ aralığında üretilmiş rastgele sayılardır ve w atalet ağırlığıdır. P_{best} parçacığın kendi en iyi pozisyonu, G_{best} sürünün en iyi pozisyonudur.

c_1 parçacıkların P_{best} değerine, c_2 ise G_{best} değerlerine doğru çekilmesini kontrol eden hızlandırma katsayılarıdır. c_1 parçacığın kendi tecrübesine göre hareket etmesini (bilişsel) ve c_2 ise sürüdeki diğer parçacıkların tecrübelerine göre (sosyal) hareket etmesini etkileyen parametreleri ifade eder. Hızlandırma katsayılarının küçük değerler alması, parçacıklarda hareket kısıtlanmasına ve çözüm uzayının yeterince taranamamasına neden olurken, büyük değerler alması da parçacıkların birbirinden uzaklaşıp ayrılmasına sebep olmaktadır. Hızlandırma katsayıları problemin cinsine göre değişik değerler alabilirken çoğu zaman her iterasyonda sabit kalır ve genellikle 2,0'ye yakın bir değer seçilir.

Hız ve konum denklemlerinde belirlenen tüm değişkenler yerlerine yazılarak parçacığın iterasyon sonundaki hız ve konum değerlerine ulaşılır. Bu işlemler blok diyagramında da gösterildiği gibi durdurma kriterlerine bağlı olarak belirli iterasyon sayısı sağlanana kadar devam ettirilir.

Parçacığın bir önceki hızının yeni hızına etkisini kontrol altına almak amacıyla atalet ağırlığı (w) kullanılmıştır. Parçacığın çözüm uzayında daha bölgesel aramalar yapması ve G_{best} ve P_{best} değerlerinden daha fazla faydalanarak en uygun çözüme yaklaşması bu atalet ağırlığının küçük değerler almasına bağlıdır.

Atalet ağırlığı, başlangıçta büyük değer alınarak başlar, iterasyon adımları ilerledikçe azaltılır. Böylelikle dinamik olarak kullanılabildiği gibi bütün arama işlemi boyunca sabit bir değer olarak da tutulabilir. Genel olarak uygulamalarda atalet ağırlığı $0,4 < w < 0,9$ arasında alınarak aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min})}{\text{iterasyon sayısı}} * t \quad , t \text{ hali hazırdaki iterasyon}$$

Denklem 3.7. Atalet ağırlığı.

Kısıtlara uygun bir şekilde her bir parçacık için başlangıç değerleri üretilir. Üretilen bu başlangıç değerleri ilk P_{best} 'leri oluşturacaktır. Parçacığın en iyi konumu (P_{best}) belirlendikten sonra G_{best} belirlenir. Konum vektörleri, hesaplanan G_{best} ve P_{best} değerlerine ve atanan başlangıç değerlerine göre belirlenir. Sonrasında parçacıkların hız

vektörleri belirlenir. Normalde bir önceki iterasyona göre şekillenecek olan bu vektör, ilk iterasyonda sıfır olarak kabul edilir yani kuşların başlangıçta durdukları varsayılır.

“n” adet (genelde 20 ile 40 arasında seçilir) parçacık ile N değişkenli bir problemin uygunluk fonksiyonu hesabı için bir başlangıç çözümü denklemi şu şekilde oluşturulabilir:

Tablo 3.1. Uygunluk fonksiyonu hesabı için başlangıç çözüm denklemi

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nN} \end{pmatrix}$$

Bu matristen yola çıkarak *i*. parçacık için uygunluk fonksiyonu denklemi de şu şekilde oluşturulabilir:

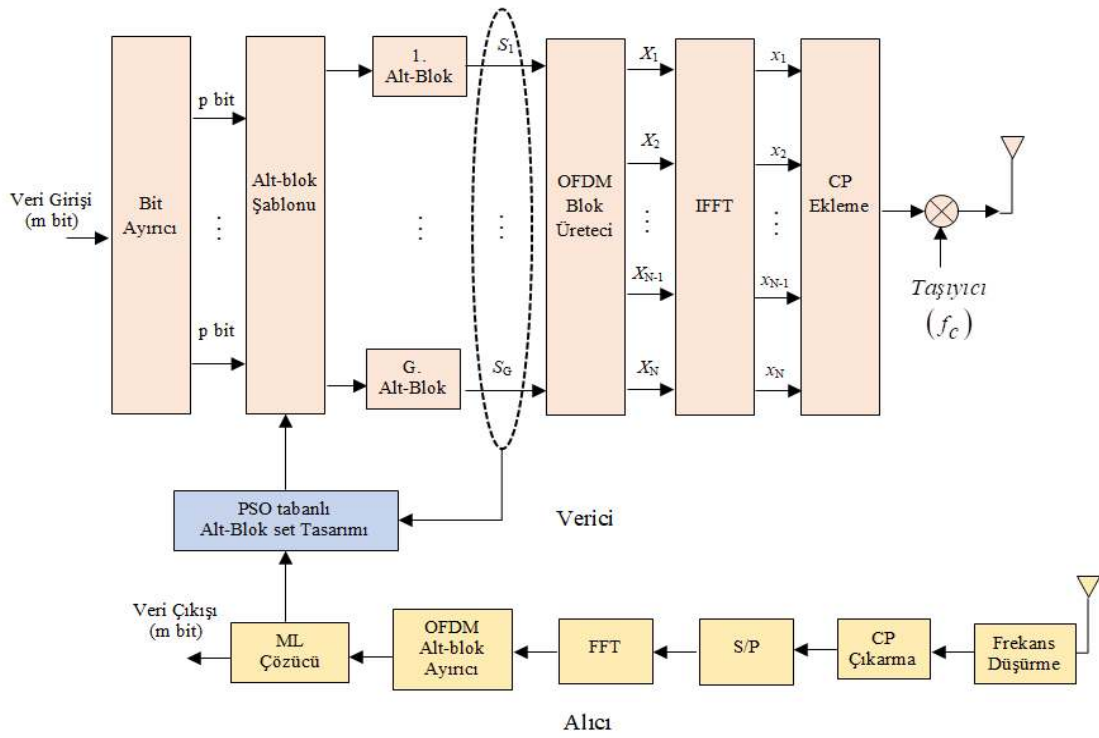
$$f_{fitness} = f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iN})$$

Denklem 3.8. Uygunluk fonksiyonu.

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

4.1. Giriş

Tez çalışmasında, son yıllarda 5G ötesi haberleşme sistemleri için kullanıma potansiyeli olan indeks modülasyonlu dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM-IM) yönteminden esinlenerek geliştirilen tüm indeks modülasyonlu OFDM (OFDM-AIM) yöntemi temel alınarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de OFDM-AIM için önerilen PSO tabanlı alt-blok set tasarımının gerçekleştirildiği sistemin blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 4.1. PSO tabanlı Alt-Blok set tasarımının gerçekleştirildiği sistemin blok diyagramı

Bu tez çalışmasında önerilen sistemde ilk olarak, bir OFDM-AIM sembolünde iletilecek olan m adet veri bitinin bir bit ayırıcı ile G adet gruba bölünmesi işlemi gerçekleştirilir. Burada G aynı zamanda bir OFDM-AIM sembolündeki toplam alt-blok sayısını da temsil etmektedir. Dolayısıyla her bir alt-blok $p = m/G$ adet veri biti içermektedir. Her bir alt-blok K adet alt-taşıyıcıdan oluşmaktadır. Dolayısıyla bir OFDM-AIM sembolü toplam $N = G * K$ adet alt-taşıyıcıdan meydana gelmektedir. Bitlerin ayrılması işleminden sonra her bir bit grubu, Tablo 4.2 ile Şekil 4.2’de gösterilen ve PSO algoritması tarafından eşleştirme noktaları optimize edilen alt-taşıyıcılar ile temsil edilirler. Her biri $S_g, g =$

$1, \dots, G$ ile temsil edilen G adet alt-blok bir dizi şeklinde birleştirilir. IFFT işlemi ile frekans eksenindeki işaretlerin zaman eksenine dönüşümü sağlanmasından sonra simgeler arası girişimin önüne geçilebilmesi için L_{cp} uzunluğundaki döngüsel önek (CP) işlemi uygulanmaktadır. f_c taşıyıcı frekansı ile frekans değeri yükseltile OFDM-AIM sembolü iletilmek üzere kanala verilmektedir. Simülasyon çalışmalarında L_{ch} uzunluğuna sahip bir frekans seçici Rayleigh sönümlenmeli kanal dikkate alınmıştır.

Sistemin alıcısında ise sırasıyla frekans düşürme, döngüsel ön ek çıkarma, FFT işlemi ve alt-blok ayırma işlemleri uygulanmaktadır. Daha sonrasında ise en yüksek olabilirlik (ML) algoritması ile veri çıkış bitleri elde edilmektedir. Burada amaç veri çıkış bitlerinin mümkün olduğunca veri giriş bitleriyle aynı olmasıdır. Bu amaç doğrultusunda bu tez çalışmasında PSO temelli bir alt-blok seti önerilmektedir.

Bu tez çalışmasında önerilen PSO-OFDM-AIM yönteminin başarımının test edilmesi amacıyla aşağıdaki iki temel performans kriteri dikkate alınarak daha önceden literatürde önerilmiş yöntemler ile karşılaştırılmıştır.

- Bit hata oranı (BHO)
- Ortalama bit hata olasılığı (ABEP)

ABEP değeri PSO algoritmasının eğitilmesi sırasında amaç fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Eğitim sırasında elde edilen ABEP değerinin en düşük olduğu nokta en uygun alt-blok setinin elde edildiği anlamına gelmektedir. BHO performans kriteri ise PSO algoritması tarafından elde edilen en uygun alt-blok setiyle oluşturulan PSO-OFDM-AIM yönteminin literatürde mevcut olan diğer yöntemlerle başarısının kıyaslanması amacıyla kullanılmaktadır.

4.2. Simülasyonlarda Kullanılan Sistem Parametreleri

Bölüm 4.1.'de ayrıntılı bir şekilde açıklanan ve değerleri Tablo 4.1.'de verilmiş olan sistem parametreleri için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Spektral verimlilik (SV), kullanılan sistem için bir OFDM-AIM sembolünde iletilen toplam bit sayısı olan m ile orantılıdır ve Denklem 4.1 ile ifade edilmektedir.

$$SV = \frac{m}{N}, bps/Hz$$

Denklem 4.1. Spektral verimlilik.

Tablo 4.1. Sistem parametreleri

Parametre	Değer
Bir alt-bloktaki alt-taşıyıcı sayısı	$K = 4$
Alt-blok sayısı	$G = 32$
Toplam Alt-taşıyıcı	$N = G * K = 128$
Bir sembolde iletilen bit sayısı	$m = G * p = 128, \quad p = 4 \text{ için}$ $m = G * p = 256, \quad p = 8 \text{ için}$
Döngüsel önek (CP)	$L_{CP} = N/8 = 16$
Rayleigh kanal için kanal uzunluğu	$L_{ch} = 10$
OFDM-AIM için modülasyon derecesi	16QAM, $p = 4 \text{ için}$ 256QAM, $p = 8 \text{ için}$
Spektral verimlilik (SV)	$SV = 1 \text{ bps/Hz}, m = 128 \text{ için}$ $SV = 2 \text{ bps/Hz}, m = 256 \text{ için}$

4.3. PSO Tabanlı Alt-Blok Seti Tasarım Aşamaları

Alt-blok tasarımında i . parçacığın en iyi alt-blok set çözümü $\mathbf{P}_{best} = \mathbf{S}^i = [\mathbf{s}^{i(1)} \mathbf{s}^{i(2)} \dots \mathbf{s}^{i(2^p)}]$ ile ifade edilirken bu çözümün uygunluk değeri ise $fit(\mathbf{S}^i)$ ile ifade edilmektedir, burada $i = 1, 2, \dots, PS_{PSO}$, PS_{PSO} parçacık sayısını ifade etmektedir. Her bir alt-blok seti, 2^p adet alt-bloktan oluşurken her bir alt-bloкта ise K adet alt-taşıyıcı mevcuttur. Bu durumda, PSO algoritması toplamda $2^p K$ adet farklı eşleştirme noktası için araştırma yapmaktadır ve bu sebeple alt-blok set tasarımı problemi $2^p \times K$ boyutundadır. Her bir parçacık tarafından bulunan yeni bir $\mathbf{S}^i$ çözümünün uygunluğu ABEP değeri yardımıyla ölçülür ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$fit(\mathbf{S}^i) = \frac{1}{1 + ABEP(\mathbf{S}^i)}$$

Denklem 4.2. Bir $\mathbf{S}^i$ alt-blok seti çözümünün uygunluk değeri.

Burada amaç $ABEP(\mathbf{S}^i)$ değerini olabilecek en düşük değer olan 0 (sıfır) değerine yaklaştıracak olan alt-blok setinin ($\mathbf{P}_{best} = \mathbf{S}^{en\ iyi}$) PSO algoritması tarafından tespit edilmesidir. PSO algoritması tarafından bulunan herhangi bir $\mathbf{S}^i$ çözümünün ABEP değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{ABEP} = \frac{1}{pn_{S_g^i}} \sum_{S_g} \sum_{\widehat{S}_g} P_U(S_g^i \rightarrow \widehat{S}_g) \in (S_g^i, \widehat{S}_g)$$

Denklem 4.3. Bir OFDM-AIM iletim tekniğinde ABEP değeri.

Bu formülde; $\in (S_g^i, \widehat{S}_g)$; vericide üretilen S_g^i alt-bloğunun alıcıda hatalı çözülmesi ($\widehat{S}_g$) durumundaki hatalı bit sayısını ifade ederken, olası tüm S_g^i alt-blok sayısı $= n_{S_g^i} = 2^p$ olarak ifade edilebilir. Ayrıca $P_U(S_g^i \rightarrow \widehat{S}_g)$ ise Koşulsuz İkili Hata Olasılığını (UPEP) ifade eder (Başar, vd. 2013; 1) ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$P_U(S_g \rightarrow \widehat{S}_g) \approx \frac{1/12}{\det(\mathbf{I}_n + A_n \mathbf{\Upsilon} / 4N_{0,F})} + \frac{1/12}{\det(\mathbf{I}_n + A_n \mathbf{\Upsilon} / 4N_{0,F})}$$

Denklem 4.4. Hatalı tespit edilen S_g^i alt-bloğun UPEP değeri.

Burada $\mathbf{I}_n$ birim matris, A_n korelasyon matrisi, $\mathbf{\Upsilon} = (S_g^i - \widehat{S}_g)^H (S_g^i - \widehat{S}_g)$ ve $(\cdot)^H$ herititan matrisidir.

PSO algoritması ile alt-blok set tasarımında kullanılan parametre değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. PSO tabanlı alt-blok seti tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Giriş: veri bit dizisi (m)	$m = G * p = 32 * 4 = 128$ $m = G * p = 32 * 8 = 256$
Çıkış: En iyi alt-blok seti	Sen iyi
Amaç fonksiyonu (ABEP)	Optimum değeri sıfır (0)’dır
Parçacık sayısı (PS_{PSO})	$PS_{PSO} = 4, 8, 20$
İterasyon sayısı (I_{PSO})	$I_{PSO} = 50, 125, 250$
Hızlandırma katsayıları (c_1, c_2)	$c_1 = c_2 = 0.2$
Atalet ağırlığı (W)	$W = 0.8$
Araştırma Sayısı (AS)	$AS = PS_{PSO} * I_{PSO} = 400, 1000, 2000$

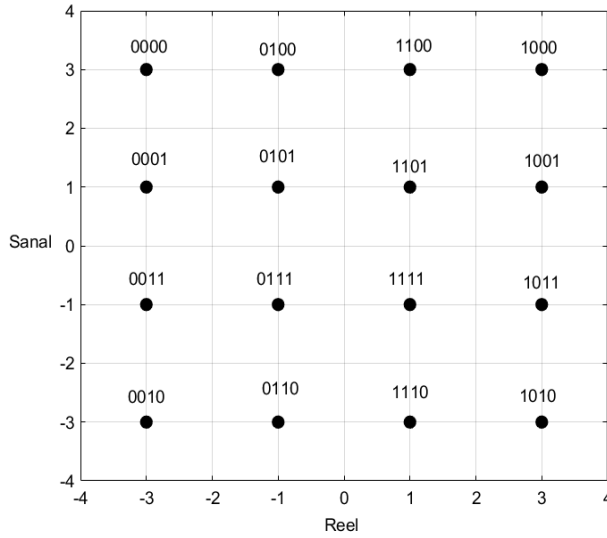
4.4. OFDM-AIM ve PSO-OFDM-AIM için Alt-Blok Set Örnekleri

Simülasyonlarda dikkate alınan OFDM-AIM sisteminde m giriş veri bitleri $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ için $m = 128$ ve bitleri $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ için $m = 256$ değerlerini almaktadır. Burada kullanılan $G = 32$ alt bloktan her biri $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ için $p = 128/32 = 4$ bit ve $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ için $p = 256/32 = 8$ bit veri içermektedir. Tablo 4.1’de belirtildiği gibi $p = 4$ için 16QAM ve $p = 8$ için 256QAM eşleştirmeleri kullanılmaktadır. Tablo 4.3 ve Şekil 4.2’de OFDM-AIM sisteminde $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için alt-taşıyıcılar ile Gray kodlamalı 16QAM eşleştirme noktaları görülmektedir.

Tablo 4.3. OFDM-AIM Sisteminde $p = 4$ bit giriş verisi ve $K = 4$ adet alt-taşıyıcıya sahip bir alt-blok için alt-taşıyıcıların Gray kodlamalı 16-QAM eşleşme noktaları

Bit Dizini	1. Alt-Taşıyıcı Eşleşme Noktası	2. Alt-Taşıyıcı Eşleşme Noktası	3. Alt-Taşıyıcı Eşleşme Noktası	4. Alt-Taşıyıcı Eşleşme Noktası
0000	-3.00 + 3.00i	-3.00 + 3.00i	-3.00 + 3.00i	-3.00 + 3.00i
0001	-3.00 + 1.00i	-3.00 + 1.00i	-3.00 + 1.00i	-3.00 + 1.00i
0010	-3.00 - 3.00i	-3.00 - 3.00i	-3.00 - 3.00i	-3.00 - 3.00i
0011	-3.00 - 1.00i	-3.00 - 1.00i	-3.00 - 1.00i	-3.00 - 1.00i
0100	-1.00 + 3.00i	-1.00 + 3.00i	-1.00 + 3.00i	-1.00 + 3.00i
0101	-1.00 + 1.00i	-1.00 + 1.00i	-1.00 + 1.00i	-1.00 + 1.00i
0110	-1.00 - 3.00i	-1.00 - 3.00i	-1.00 - 3.00i	-1.00 - 3.00i
0111	-1.00 - 1.00i	-1.00 - 1.00i	-1.00 - 1.00i	-1.00 - 1.00i
1000	3.00 + 3.00i	3.00 + 3.00i	3.00 + 3.00i	3.00 + 3.00i
1001	3.00 + 1.00i	3.00 + 1.00i	3.00 + 1.00i	3.00 + 1.00i
1010	3.00 - 3.00i	3.00 - 3.00i	3.00 - 3.00i	3.00 - 3.00i
1011	3.00 - 1.00i	3.00 - 1.00i	3.00 - 1.00i	3.00 - 1.00i
1100	1.00 + 3.00i	1.00 + 3.00i	1.00 + 3.00i	1.00 + 3.00i
1101	1.00 + 1.00i	1.00 + 1.00i	1.00 + 1.00i	1.00 + 1.00i
1110	1.00 - 3.00i	1.00 - 3.00i	1.00 - 3.00i	1.00 - 3.00i
1111	1.00 - 1.00i	1.00 - 1.00i	1.00 - 1.00i	1.00 - 1.00i

Tablo 4.3’de görüldüğü gibi bir alt-bloğu oluşturan tüm alt-taşıyıcılar aynı 16QAM noktası ile eşleştirilmektedir. Diğer bir deyişle aynı bit dizini $K = 4$ kez iletilmektedir. Bu sayede sistemin alıcısında uygulanan ML işaret tespit algoritmasının başarımı artırılarak sistemin veri bitlerini daha doğru bir şekilde kullanıcıya ulaştırılması sağlanmaktadır.

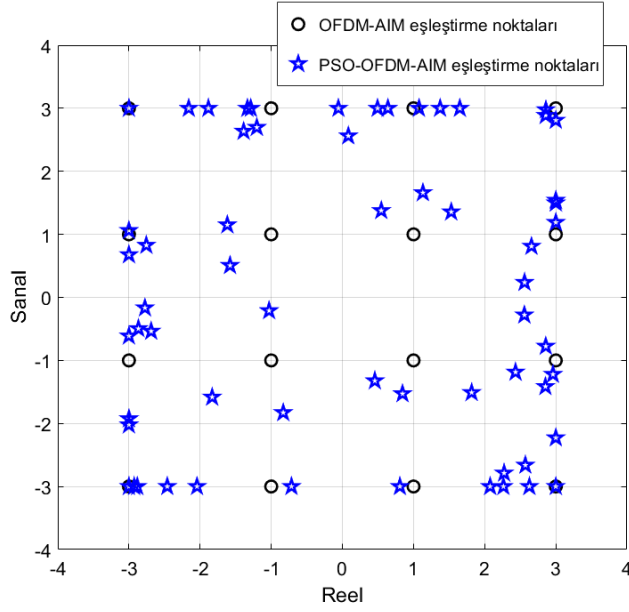


Şekil 4.2. OFDM-AIM sisteminde $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için Gray kodlamalı 16QAM eşleştirmeleri

Tablo 4.4 ve Şekil 4.3’de PSO-OFDM-AIM sisteminde $p = 4$ ve $K = 4$ değerlerinde alt-taşıyıcılar için PSO algoritması tarafından optimize edilen eşleştirme noktaları görülmektedir. OFDM-AIM alt-blok setinden farklı olarak, PSO-OFDM-AIM alt-blok setinde her bir alt-taşıyıcı için farklı eşleştirme noktaları bulunmaktadır. Dolayısıyla PSO OFDM-AIM için toplam $2^p K$ adet farklı eşleştirme noktası bulunmaktadır.

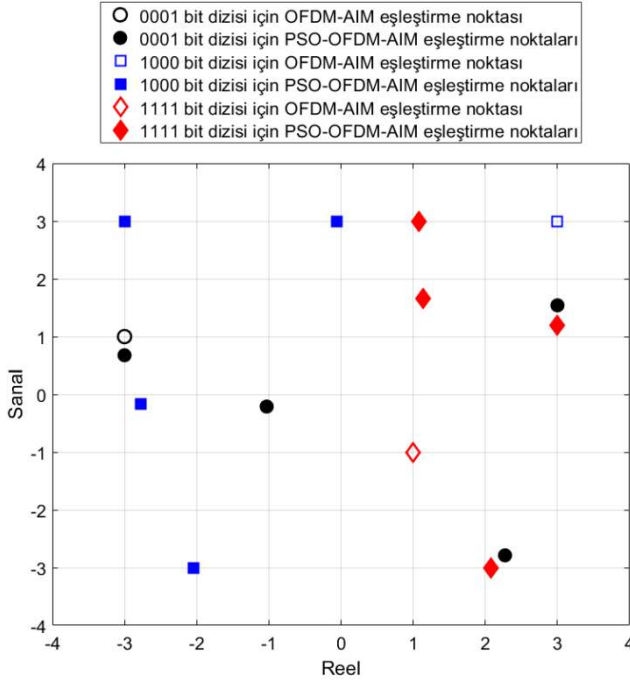
Bit Dizini	1. Alt-Taşıyıcı Eşleşme Noktası	2. Alt-Taşıyıcı Eşleşme Noktası	3. Alt-Taşıyıcı Eşleşme Noktası	4. Alt-Taşıyıcı Eşleşme Noktası
0000	$0.45 - 1.32i$	$2.26 - 3.00i$	$2.65 + 0.81i$	$-1.28 + 3.00i$
0001	$3.00 + 1.54i$	$-3.00 + 0.67i$	$-1.03 - 0.21i$	$2.27 - 2.78i$
0010	$-2.68 - 0.53i$	$3.00 + 1.49i$	$1.53 + 1.35i$	$1.81 - 1.50i$
0011	$-1.33 + 3.00i$	$-3.00 + 3.00i$	$2.85 - 1.41i$	$-2.75 + 0.82i$
0100	$-2.46 - 3.00i$	$-3.00 + 1.061i$	$-1.83 - 1.58i$	$1.65 + 3.00i$
0101	$2.96 - 1.22i$	$-1.57 + 0.50i$	$3.00 - 3.00i$	$-3.00 - 3.00i$
0110	$-1.20 + 2.69i$	$0.84 - 1.52i$	$-2.15 + 3.00i$	$-2.88 - 3.00i$
0111	$-1.38 + 2.63i$	$0.08 + 2.56i$	$2.55 - 0.27i$	$3.00 - 3.00i$
1000	$-3.00 + 3.00i$	$-2.77 - 0.16i$	$-2.04 - 3.00i$	$-0.05 + 3.00i$
1001	$-2.92 - 3.00i$	$2.56 + 0.23i$	$0.64 + 3.00i$	$2.86 + 2.97i$
1010	$-1.61 + 1.15i$	$2.62 - 3.00i$	$-0.71 - 3.00i$	$2.85 - 0.77i$
1011	$2.57 - 2.66i$	$3.00 - 2.22i$	$3.00 + 2.80i$	$2.43 - 1.18i$
1100	$-2.86 - 0.49i$	$-3.00 - 2.02i$	$2.85 + 2.88i$	$1.37 + 3.00i$
1101	$0.80 - 3.00i$	$-1.88 + 3.00i$	$0.49 + 3.00i$	$-3.00 - 1.92i$
1110	$3.00 - 3.00i$	$-3.00 - 0.61i$	$-0.83 - 1.82i$	$0.54 + 1.37i$
1111	$3.00 + 1.18i$	$1.07 + 3.00i$	$2.07 - 3.00i$	$1.13 + 1.66i$

Tablo 4.4. PSO-OFDM-AIM sisteminde $p = 4$ bit giriş verisi ve $K = 4$ adet alt-taşıyıcıya sahip bir alt-blok için alt-taşıyıcıların eşleşme noktaları



Şekil 4.3. PSO-OFDM-AIM sisteminde $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için PSO algoritması tarafından optimize edilen eşleştirme noktaları.

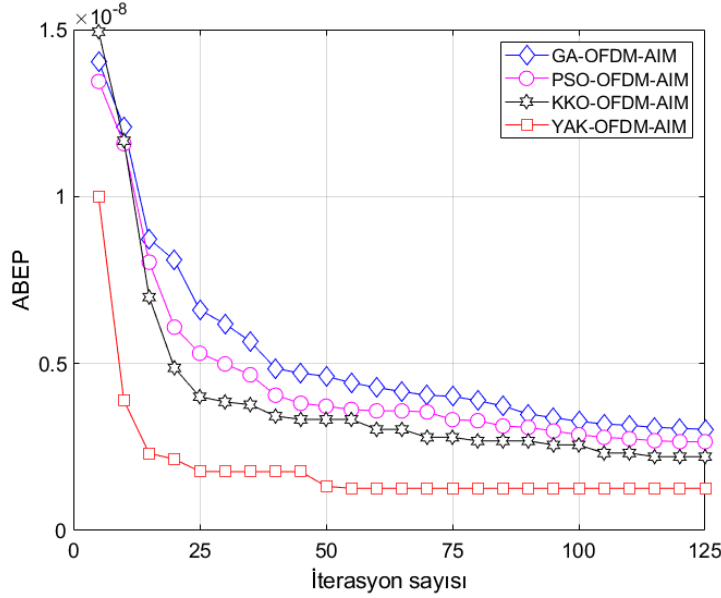
Şekil 4.4. ise OFDM-AIM ve PSO-OFDM-AIM sistemlerinde $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için örnek eşleştirme noktaları gösterilmektedir. Dikkat edileceği gibi OFDM-AIM’de bir alt-blok içerisindeki tüm alt-taşıyıcılar sadece bir adet eşleştirme noktasına sahipken PSO-OFDM-AIM’de her bir alt-taşıyıcı için ayrı eşleştirme noktaları vardır.



Şekil 4.4. OFDM-AIM ve PSO-OFDM-AIM sistemlerinde $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için örnek eşleştirme noktaları

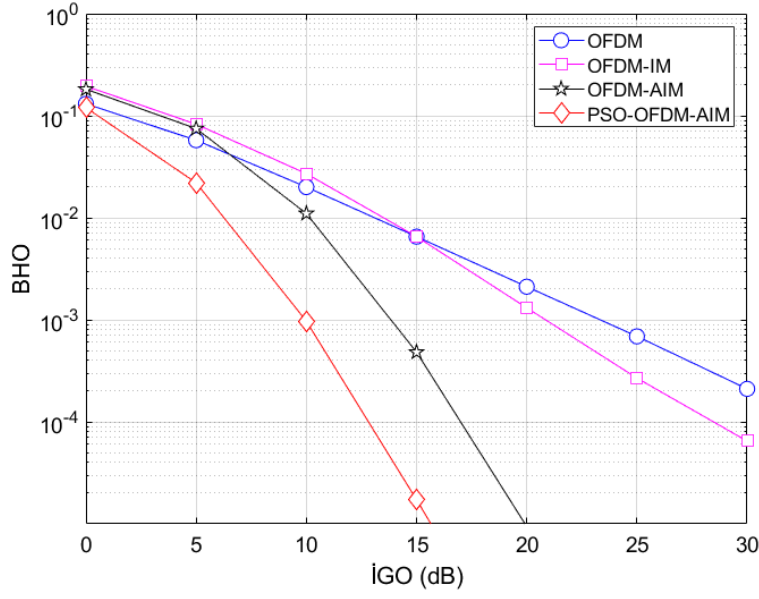
4.5. Simülasyon Sonuçları

Simülasyon çalışmaları, Tablo 4.1. ve Tablo 4.2.'de verilmiş olan parametre değerleri için gerçekleştirilmiş olup, önerilen PSO-OFDM-AIM sisteminin diğer sistemlere kıyasla başarı ölçütleri olarak ABEP ve BER performans kriterleri dikkate alınmıştır.

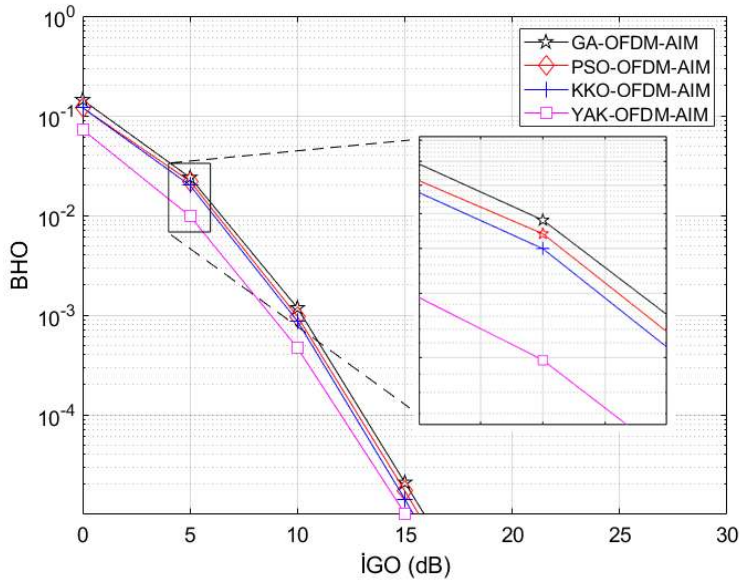


Şekil 4.5. PSO-OFDM-AIM, literatürdeki diğer yöntemler olan GA-OFDM-AIM, KKO-OFDM-AIM ve YAK-OFDM-AIM sistemlerinin ABEP performanslarının karşılaştırılmaları.

Şekil 4.5.'de PSO algoritmasının ABEP amaç fonksiyonu performansı diğer popülasyon tabanlı yöntemler olan GA, KKO ve YAK algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar $SV = 1 \text{ bps/Hz}$, $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için gerçekleştirilmiştir. Burada iterasyon sayısı $I = 125$ olarak sınırlandırılmış olup toplam araştırma sayıları: GA için $AS = PS_{GA} * I_{GA} = 100 * 125 = 12500$, PSO için $AS = 8 * 125 = 1000$, KKO için $AS = 10 * 100 = 1000$ ve YAK için $AS = 8 * 125 = 1000$ 'dir. Şekil 4. 5.'de gösterildiği gibi PSO'nun ABEP performansı GA'dan daha iyi olmakla birlikte KKO ve YAK algoritmalarından daha kötü olduğu ortaya çıkmaktadır.



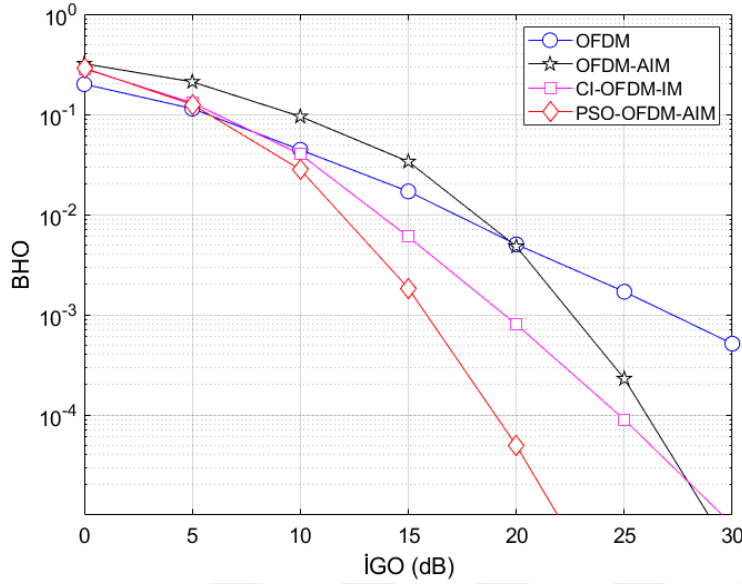
Şekil 4.6. PSO-OFDM-AIM'nun klasik yöntemler olan OFDM, OFDM-IM ve OFDM-AIM ile BHO/İGO performanslarının $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ için karşılaştırılması.



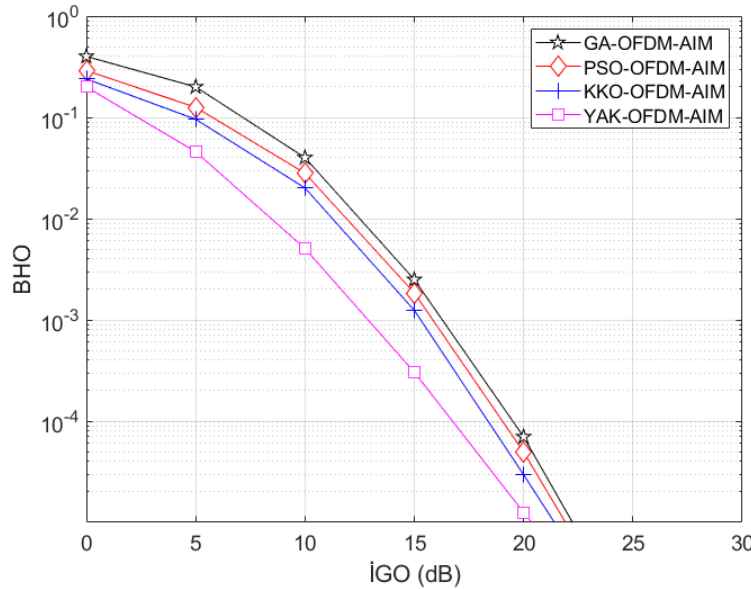
Şekil 4.7. PSO-OFDM-AIM'nun zeki optimizasyon yöntemleri olan GA-OFDM-AIM, KKO-OFDM-AIM ve YAK-OFDM-AIM ile BHO/İGO performanslarının $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ için karşılaştırılması.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de PSO-OFDM-AIM sisteminin diğer klasik ve zeki optimizasyon yöntemleri ile BHO-İGO performans kriterine göre karşılaştırılması $SV = 1 \text{ bps/Hz}$, $p = 4$ ve $K = 4$ değerleri için yapılmıştır. PSO-OFDM-AIM standart QAM takımıyla eşleştirmelerini kullanan klasik sistemlere göre daha yüksek performans sergilerken, GA-

OFDM-AIM'dan daha yüksek, KKO-OFDM-AIM ve YAK-OFDM-AIM daha düşük bir performans sergilemektedir. Burada zeki optimizasyon yöntemleri için kullanılan araştırma sayıları Şekil 4.5.'deki ABEP karşılaştırılmasında kullanılan araştırma sayıları ile aynıdır.

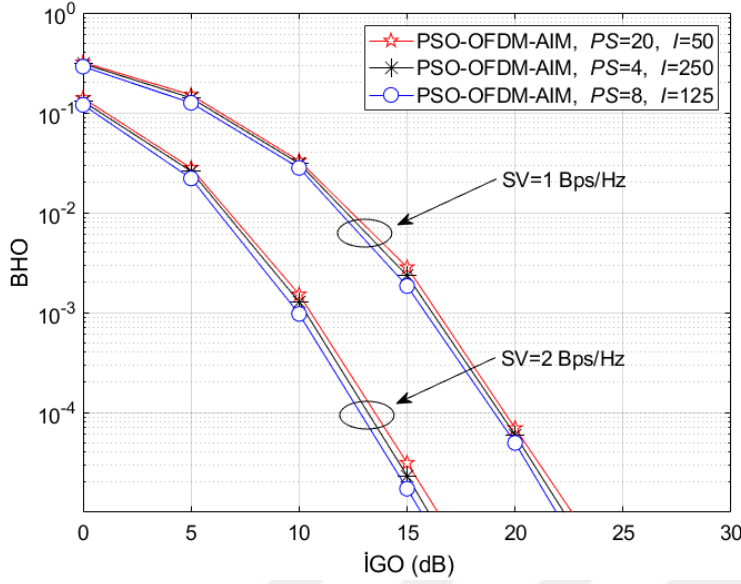


Şekil 4.8. PSO-OFDM-AIM'nun klasik yöntemler olan OFDM, CI-OFDM-IM ve OFDM-AIM ile BHO/İGO performanslarının $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ için karşılaştırılması.

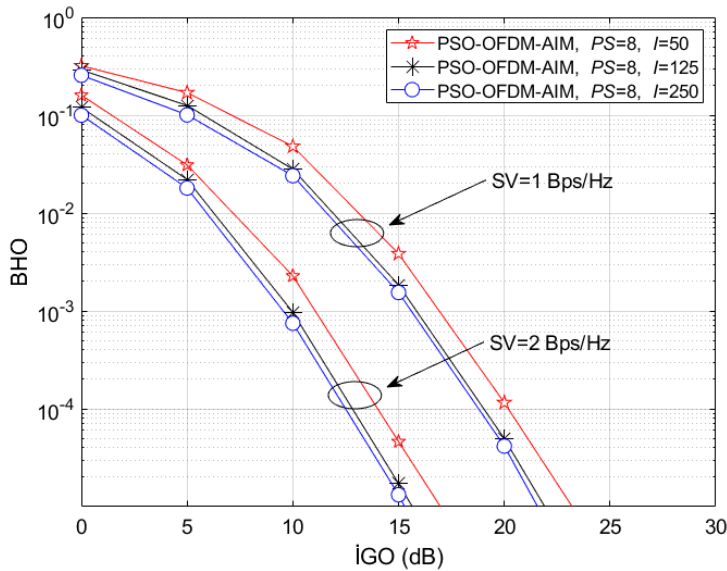


Şekil 4.9. PSO-OFDM-AIM'nun zeki optimizasyon yöntemleri olan GA-OFDM-AIM, KKO-OFDM-AIM ve YAK-OFDM-AIM ile BHO/İGO performanslarının $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ için karşılaştırılması.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da PSO-OFDM-AIM sisteminin diğer klasik ve zeki optimizasyon yöntemleri ile BHO performans kriterine göre karşılaştırılması $SV = 2 \text{ bps/Hz}$, $p = 8$ ve $K = 4$ değerleri için gerçekleştirilmiştir. Sistemlerin BHO performanslarının birbirlerine göre başarılarının $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ ve $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ için benzer oldukları görülmüştür.



Şekil 4.10. Çeşitli PS ve I değerlerinin $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ ve $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ spektral verimliliklerde PSO-OFDM-AIM’in BHO/İGO performansına etkisi.



Şekil 4.11. $PS = 8$ ve çeşitli I değerlerinin $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ ve $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ spektral verimliliklerde PSO-OFDM-AIM’in BHO/İGO performansına etkisi.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de PSO algoritmasının çeşitli PS parçacık sayısı ve I iterasyon sayısı değerlerindeki BHO performansı $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ ve $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ spektral verimlilik değerleri için karşılaştırılmıştır. Şekil 4.10’dan görüleceği gibi $AS = 1000$ araştırma sayısı için çeşitli PS ve I sayıları için sistemin BHO performansı kayda değer ölçüde değişmemektedir. Şekil 4.11’de $AS = 1000$ ve 2000 araştırma sayılarının performansı birbirine yakın olurken $AS = 400$ araştırma sayısının performansının $BHO=10^{-5}$ değeri için diğer iki araştırma sayısına kıyasla yaklaşık 1.5 dB daha yüksek olduğu görülmektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, QAM sınırları içerisinde optimum alt taşıyıcı noktalarının bulunması için PSO algoritması üzerine geliştirilen OFDM-AIM (PSO-OFDM-AIM) tabanlı alt-blok set tasarımı önerilmiştir. Haberleşme sistemlerinde işaretlerin ortalama bit hata olasılıkları olan ABEP değeri, amaç fonksiyonu olarak PSO'nun eğitilmesinde kullanılmıştır. ABEP amaç fonksiyonu performansı diğer popülasyon tabanlı yöntemler olan; Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması, Karınca Koloni Optimizasyon (KKO) algoritması ve Genetik algoritma (GA) ile karşılaştırılmaları yapılmıştır. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi PSO'nun ABEP performansı GA'dan daha iyi olmakla birlikte KKO ve YAK algoritmalarından daha kötü olduğu ortaya çıkmaktadır.

Önerilen bu sistemde alt-blok set tasarımı yapıldıktan sonra ise sistem bit hata olasılığı olan BHO performansı açısından PSO-OFDM-AIM'nun klasik yöntemler olan OFDM, OFDM-IM ve OFDM-AIM ile karşılaştırılması yapılmış olup PSO algoritması, diğer klasik yöntemlere göre daha iyi bir sonuç elde etmiştir.

BHO performansı açısından PSO-OFDM-AIM'nun diğer zeki optimizasyon yöntemleri olan GA-OFDM-AIM, KKO-OFDM-AIM ve YAK-OFDM-AIM karşılaştırılması hem $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ ile hem de $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ baz alınarak yapılmıştır. PSO-OFDM-AIM, GA-OFDM-AIM'e göre daha iyi bir BHO performansına sahipken diğer yöntemler göre ise daha yüksek bir BHO değerine sahiptir. Bu karşılaştırmada $SV = 1 \text{ bps/Hz}$ ile yapılan kıyaslama ile $SV = 2 \text{ bps/Hz}$ ile yapılan kıyaslama birbirine benzerlik göstermektedir.

Yine PSO-OFDM-AIM'nun klasik yöntemler olan OFDM, OFDM-AIM, ve CI-OFDM-IM ile BHO/İGO performansları karşılaştırılması yapılmıştır. PSO-OFDM-AIM açısından genele bakıldığında bu kıyaslamadaki diğer yöntemlere göre üstünlük sağlanmış olduğu görülmektedir. Dolayısı ile bu kıyaslamada PSO-OFDM-AIM daha iyi bir BHO performansına sahiptir.

Bu çalışma OFDM-AIM tekniği için alt blok set tasarımında PSO algoritması tabanlı önerilerde bulunulmuştur. İleride yapılacak çalışmalarda önerilecek olan alt-blok set tasarımları, OFDM-AIM dışındaki diğer teknikler için de kullanılabilir. Örneğin OFDM-IM, Dual-Mode DM-OFDM-IM (Mao vd., 2017) gibi teknikler için de PSO tabanlı alt-blok set tasarımı önerilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Akay, B. (2009), *Nümerik optimizasyon problemlerinde yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony) Algoritmasının Performans Analizi*. (Doktora tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akyol, S. & Alataş, B. (2012). Güncel sürü zekası optamizasyon algoritmaları. *Nevşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1).
- Başar, E. (2016). On multiple-input multiple-output OFDM with index modulation for next generation wireless networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(15), 3868-3878.
- Başar, E., Aygözü, Ü. & Panayırıcı, E. (2013, April). A new technique for OFDM: OFDM-index modulation. *Signal Processing and Communications Applications Conference*, 1-4.
- Başar, E., Aygözü, Ü., Panayırıcı, E. & Poor, H. V. (2013). Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation. *IEEE Transactions On Signal Processing*, 61(22), 5536-5549.
- Batariere, M., Baum, K. & Krauss, T. P. (2004). Cyclic prefix length analysis for 4G OFDM systems. In *IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, 543-547.
- Bliley Technologies. (2016). Ultimate guide to understanding phase noise (2024, Ocak 26). <http://blog.bliley.com/ultimate-guide-to-phase-noise>.
- Bräysy, O. (2003). A reactive variable neighborhood search for the vehicle-routing problem with time windows. *Inform Journal on Computing*, 15(4), 347-368.
- Chen, W. & Zhang, J. (2013). Ant colony optimization for software project scheduling and staffing with an event-based scheduler. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 39(1), 1-17.
- Demirci, H. (2014). *Parçacık sürü optimizasyonu ve çoğalan sürü algoritmasının yüzey geri çatımı probleminde uygulanması ve karşılaştırılması*. (Yüksek lisans tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dorigo, M., Di Caro, G. & Gambardella, L. M. (1999). Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial life*, 5(2), 137-172.

- Dorigo, M. & Gambardella, L. M. (1997). Ant colonies for the travelling salesman problem. *Biosystems*, 43(2), 53-66.
- Dorigo, M., Maniezzo, V. & Colormi, A. (1991). The ant system: An autocatalytic optimizing process. *Technical Report* 91-016
- Dorigo, M., Maniezzo, V. & Colormi, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics)*, 26(1), 29-41.
- Eberhart, R. & Kennedy, J. (1995). Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95, *International Conference on Neural Networks*, 1942-1948.
- Eberhart, R.C., Shi, Y. (2000) Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. *IEEE congress evolutionary computation*, 84-88.
- Emel, G. G. & Taşkın, Ç. (2002). Genetik algoritmalar ve uygulama alanları. *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(1), 129-152.
- Engin, O. & Fırlı, A. (2002). Akış tipi çizelgeleme problemlerinin genetik algoritma ile çözüm performansının artırılmasında deney tasarımı uygulaması. *Endüstri Mühendisliği*, 13(3), 2-7.
- Erdoğan, P. (2016). Doğadan esinlenen optimizasyon algoritmaları ve optimizasyon algoritmalarının optimizasyonu. *Düzce üniversitesi bilim ve teknoloji dergisi*, 4(1), 293-304.
- Fırlı, A. & Engin, O. (2002). Genetik algoritmalarla akış tipi çizelgelemede üreme yöntemi optimizasyonu. *İTÜ Dergisi Seri D: Mühendislik*, 1(1), 35-41.
- Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning, Pearson Education. *Low Price Edition, Delhi*.
- Gonzales E. L. ve Fernandez M.A.R. (2000). Genetic optimisation of a fuzzy distribution model. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 7(8), 681-696.
- Greenwood, D. & Hanzo, L. (1994). Characterization of mobile radio channels. Chapter 2, Mobile Radio Communications. *Pentech Press-IEEE Press*, London.
- Jang, J. S. R., Sun, C. T., & Mizutani, E. (1997). Neuro-fuzzy and soft computing-a computational approach to learning and machine intelligence. *IEEE Transactions*

- on automatic control*, 42(10), 1482-1484.
- Karaboğa, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization 1-10.
- Karaboğa, D. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization* Technical report-tr06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 1-10
- Karaboğa, D. (2011). Yapay zeka optimizasyon algoritmaları, Nobel Yayın Dağıtım, Genişletilmiş 2. Basım, 205.
- Karaboğa, D. & Öztürk, C. (2011). A novel clustering approach: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. *Applied soft computing*, 11(1), 652-657.
- Karaboğa, D. & Görkemli, B. (2011). A combinatorial artificial bee colony algorithm for traveling salesman problem. *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, 50-53.
- Karaboğa, D. & Akay, B. (2009). A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Applied mathematics and computation*, 214(1), 108-132.
- Kaya, B. & Eke, İ. (2020). Yapay arı kolonisi algoritması ile yapılan geliştirmeler ve sonuçları. *Verimlilik Dergisi*, 1(1), 99-115.
- Keskintürk, T. & Söyler, H. (2013). Global karınca kolonisi optimizasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(4).
- Keysight Technologies. TB. Concepts of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN (2024, Ocak 26).
- http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm.
- Kurnaz, C., Engiz, B. K., Gökalp, H. & Sezgin, H. (2012). Dikgen frekans bölmeli çoğullama sisteminde en uygun pilot aralığının kanal değişkenleri ile ilişkilendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 17(1), 79–92.
- López González, E. & Rodríguez Fernández, M. A. (2000). Genetic optimisation of a fuzzy distribution model. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 30(7/8), 681-696.
- Mao, T., Wang, Z., Wang, Q., Chen, S. & Hanzo, L. (2017). Dual-Mode Index Modulation

Aided OFDM. *IEEE Access*, 5, 50-60

Ortakçı, Y. (2011). *Parçacık sürü optimizasyonu yöntemlerinin uygulamalarla karşılaştırılması*. (Yüksek lisans tezi), Karbük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özkan, S. (2010). *Gezgin satıcı probleminin çözümüne yönelik algoritmik yaklaşımlar*. (Yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Prasad, R. (2004). *OFDM for wireless communications systems*. Artech House, Inc.

Proakis, J.G., (1995) *Digital Communications*, McGraw-Hill, New York, 0-070-51726-6.

Rappaport, T. S. (2002). Wireless communications--principles and practice, (The Book End). *Microwave Journal*, 45(12), 128-129.

Sarikoç, F. (2004). *Paralel karınca kolonisi optimizasyon algoritması ve test problemlerindeki performansının incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Shi, Y., Lu, X., Gao, K., Zhu, J. & Wang, S. (2019). Subblocks set design aided orthogonal frequency division multiplexing with all index modulation. *IEEE Access*, 7, 52659-52668.

Şimşir, Ş. & Taşpınar, N. (2014). Channel estimation using neural network in orthogonal frequency division multiplexing-interleave division multiple access (OFDM-IDMA) system. *In 2014 International Telecommunications Symposium (ITS)*, 1-5.

Şimşir, Ş. (2015). *Dikgen frekans bölmeli çoğullama-serpştirme bölmeli çoklu erişim (OFDM-IDMA) sistemlerinde yapay zeka teknikleri ile kanal kestirimi*. (Yüksek lisans tezi), Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tereshko, V. (2000). Reaction-diffusion model of a honeybee colony's foraging behaviour. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1917, 807–816.

Yeniay, Ö. (2001). An overview of genetic algorithms. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(1), 37-49.

Yıldırım, M. (2020). ABC algorithm-based subblocks set design for OFDM with all index modulation. *IEEE Communications Letters*, 24(12), 2926–2930.

- Yıldırım, M. (2021). OFDM-AIM iletim tekniği için karınca kolonisi optimizasyon algoritması tabanlı alt-blok set tasarımı. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(2), 478–488.
- Yıldız, H. (2015). *Dikgen frekans bölmeli çoğullama sistemleri için önek tasarımı*. (Doktora tezi), İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yücesan, Ö. (2015). *Personel çizelgeleme probleminin sezgisel algoritmalarla gerçekleştirimi*. (Yüksek lisans tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü.
- Zou, Q., Tarighat, A. & Sayed, A. H. (2007). Compensation of phase noise in OFDM wireless systems. *IEEE transactions on signal processing*, 55(11), 5407-5424.
- Xiao, Y., Wang, S., Dan, L., Lei, X., Yang, P. & Xiang, W. (2014). OFDM with interleaved subcarrier-index modulation. *IEEE Communications Letters*, 18(8), 1447-1450.

DİZİN

Kablosuz haberleşme sistemleri, v, 5
OFDM, 1, i, ii, iv, v, vi, vii, viii, ix, x, xi, xii,
xiii, xiv, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12,
13, 14, 15, 16, 38, 39, 40, 41, 42, 45, 47,
48, 49

OFDM-AIM, v, vi, viii, xi, 2, 3, 14, 15, 38,
40, 41, 42

OFDM-IM, v, vi, 1, 2, 3, 11, 13, 14, 15

Pso, v, vi

Zeki optimizasyon teknikleri, v





**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**