



T.C.

**GAZİANTEP İSLAM BİLİM VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

SEZGİSEL ALGORİTMA YÖNTEMLERİYLE KANAL KESTİRİMİ

Yüksek Lisans Tezi

Mustafa ŞİMŞEK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yüksel TOKUR BOZKURT

İkinci Danışman

Doç. Dr. Hakan AÇIKGÖZ

GAZİANTEP

2025

T.C.
GAZİANTEP İSLAM BİLİM VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

SEZGİSEL ALGORİTMA YÖNTEMLERİYLE KANAL KESTİRİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ŞİMŞEK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yüksel TOKUR BOZKURT

İkinci Danışman

Doç. Dr. Hakan AÇIKGÖZ

GAZİANTEP

2025

Tez Kabul ve Onayı

Mustafa ŞİMŞEK tarafından, Dr. Öğr. Üyesi Yüksel TOKUR BOZKURT danışmanlığında hazırlanan *Sezgisel Algoritma Yöntemleriyle Kanal Kestirimi* başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 30.06.2024 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği/oy çokluğu ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Unvanı, Adı/Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan		☐ Kabul
Prof. Dr. Osman BİLGİN		☐ Ret
Üye		☐ Kabul
Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ARSLAN		☐ Ret
Üye		☐ Kabul
Doç. Dr. Hakan AÇIKGÖZ		☐ Ret
Üye		☐ Kabul
Dr. Öğr. Üyesi Yüksel TOKUR BOZKURT		☐ Ret

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

ONAY

... / ... / ...

(Unvanı, Adı-
Soyadı)

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

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

İmza

... / ... / 20...

Mustafa ŞİMŞEK

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : Sezgisel Algoritma Yöntemiyle Kanal Kestirimi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 30.07.2025 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 15

Tek kaynak oranı : %8 çıkmıştır.

İmza

... / ... / 20...

Dr. Öğr. Üyesi Yüksel TOKUR BOZKURT

ÖZET

SEZGİSEL ALGORİTMA YÖNTEMLERİYLE KANAL KESTİRİMİ

Mustafa ŞİMŞEK

Gaziantep İslam Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi

Yüksek Lisans Bitirme Tezi, Haziran 2025

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yüksel TOKUR BOZKURT

İkinci Danışman: Doç. Dr. Hakan AÇIKGÖZ

Günümüzün hızla gelişen kablosuz haberleşme teknolojileri, yüksek veri hızı, düşük gecikme ve güvenilir iletişim gibi temel gereksinimleri karşılamak üzere sürekli olarak yenilikçi çözümlere ihtiyaç duymaktadır. Bu kapsamda, Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) sistemleri, çoklu yol etkisine karşı dayanıklılık, spektral verimlilik ve modülasyon/demodülasyon kolaylığı gibi avantajları nedeniyle modern iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, OFDM sistemlerinin performansı, kanalın zamana ve frekansa bağlı değişken yapısından ötürü ciddi ölçüde etkilenmekte; bu da kanal kestirimi problemini sistemin başarımı açısından kritik hale getirmektedir.

Bu tez çalışmasında, OFDM sistemlerinde kanal kestirimi problemi sezgisel algoritmalar kullanılarak ele alınmış ve çözüm yolları geliştirilmiştir. Geleneksel kestirim yöntemleri olan En Küçük Kareler (Least Squares - LS) ve Minimum Ortalama Kare Hatası (Minimum Mean Square Error - MMSE) algoritmaları, istatistiksel varsayımlara ve kanalın önceden bilinen özelliklerine dayanmakta olup, gerçek zamanlı ve dinamik kanal ortamlarında yeterli performansı her zaman sağlayamamaktadır. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla doğadan esinlenen, problem çözme gücü yüksek olan sezgisel ve meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları değerlendirilmiştir.

Bu tezde; İstilacı Yabancı Ot (İYO), Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA), Öğretmen-Öğrenci Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) ve Mors Optimizasyon Algoritması (MOA) gibi güçlü sezgisel algoritmalar kanal kestirimi amacıyla uygulanmıştır. Her bir algoritmanın OFDM sistemine entegrasyonu detaylandırılmış ve kestirim sürecinde karşılaşılan optimizasyon problemleri, ilgili algoritmaların yapısal özelliklerine göre çözülmüştür.

Simülasyon çalışmaları MATLAB ortamında gerçekleştirilmiş olup, sezgisel algoritmaların performansları Bit Hata Oranı (Bit Error Rate - BER), Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error - MSE) ve yakınsama süreleri gibi ölçütlerle değerlendirilmiştir. Ayrıca bu sezgisel algoritmaların elde ettiği sonuçlar, klasik LS ve MMSE kestirim yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, önerilen sezgisel yöntemlerin özellikle karmaşık ve gürültülü kanal ortamlarında daha düşük hata oranlarıyla daha yüksek doğrulukta kestirim sağladığını ortaya koymaktadır.

Bu çalışma ile hem kanal kestirimi alanında yapay zekâ tabanlı alternatif çözüm

önerileri sunulmuş, hem de OFDM sistemlerinin sezgisel optimizasyon algoritmalarıyla desteklenerek daha etkin ve güvenilir hâle getirilmesi amaçlanmıştır. Bu yönüyle tez, kablosuz haberleşme sistemleri, kanal modelleme ve optimizasyon temelli kestirim alanlarında literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir.



Anahtar Kelimeler: OFDM, Kanal Kestirimi, Sezgisel Algoritmalar, İYO, KKSA, ÖÖTA, MOA, Kablosuz Haberleşme, MATLAB, Optimizasyon

ABSTRACT

CHANNEL ESTIMATION USING HEURISTIC ALGORITHM METHODS

Mustafa ŞİMŞEK

Gaziantep Islam Science and Technology University

Master's Thesis

June 2025

Thesis Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yüksel TOKUR BOZKURT

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan AÇIKGÖZ

With the increasing demands of modern wireless communication systems for high data rates, low latency, and reliable transmission, innovative solutions have become essential. In this context, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) has emerged as a dominant technique due to its high spectral efficiency, robustness against multipath fading, and simplified modulation/demodulation processes. However, the performance of OFDM systems is significantly affected by the time-varying and frequency-selective nature of wireless channels, making channel estimation a critical issue.

This thesis addresses the problem of channel estimation in OFDM systems using heuristic optimization algorithms. Traditional estimation methods such as Least Squares (LS) and Minimum Mean Square Error (MMSE) rely heavily on statistical assumptions and prior knowledge of the channel, which may not be feasible under dynamic real-time conditions. To overcome these limitations, bio-inspired heuristic algorithms, known for their ability to solve complex optimization problems, have been investigated.

The study focuses on the implementation of Invasive Weed Optimization (IWO), Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA), Teaching Learning Based Optimization (TLBO), and Walrus Optimization Algorithm (WOA) for improving channel estimation in OFDM-based systems. Each algorithm is mathematically modeled and integrated into the channel estimation process based on its natural behavior and optimization structure.

Simulation studies are carried out in MATLAB to evaluate and compare the performance of these algorithms in terms of Bit Error Rate (BER), Mean Square Error (MSE), and convergence characteristics. The simulation results are also benchmarked against conventional LS and MMSE methods. Findings reveal that the proposed heuristic methods outperform traditional approaches in scenarios with complex and noisy channel conditions, offering enhanced estimation accuracy and system reliability.

This thesis contributes to the literature by presenting AI-supported novel solutions for channel estimation and demonstrates that OFDM systems can significantly benefit from heuristic optimization techniques in terms of performance and robustness.



Keywords: OFDM, Channel Estimation, Heuristic Algorithms, IWO, SFL, TLBO, WOA, Wireless Communication, MATLAB, Optimization

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince tüm bilgilerini benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan, Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi öğretim üyelerinden danışman hocam, sayın Dr. Öğr. Üyesi Yüksel TOKUR BOZKURT'a, Doç. Dr. Hakan AÇIKGÖZ'e ve eğitim öğretim hayatım boyunca her daim yanımda olan aileme ve tüm öğrenim hayatım boyunca emekleri olan hocalarıma sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.



Mustafa ŞİMŞEK

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
GİRİŞ	1
1. Tezin Literatürdeki Yeri	1
2. BÖLÜM: OFDM'DE KANAL KESTİRİM YÖNTEMLERİ.....	4
2.1. Giriş	4
2.2. Çoklu Erişim Teknikleri	4
2.2.1. TDMA – Zaman Bölmeli Çoklu Erişim	5
2.2.2. FDMA – Frekans Bölmeli Çoklu Erişim	6
2.2.3. CDMA – Kod Bölmeli Çoklu Erişim	7
2.3. Çok Taşıyıcı İletim	8
2.3.1. OFDM – Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama	9
2.3.1.4. OFDM Verici Yapısı Şeması	12
2.3.1.5. OFDM Alıcı Yapısı.....	12
2.4. OFDM’de Kanal Kestirimi Yöntemleri	14
2.4.1. Pilot Sembol Eklemeli Kanal Kestirimi Yöntemleri.....	15
2.4.1.1. Blok Tip Kanal Kestirimi	16
2.4.1.1.1. LS Kestirimci (En Küçük Kareler Kestirimi)	16
2.4.1.1.2. MMSE Kestirimci (Minimum Ortalama Kare Hata Kestirimi)	16
2.4.1.2.1. Doğrusal Aradeğerleme	16
2.4.1.2.2. İkinci Dereceden Aradeğerleme.....	16
2.4.1.2.3. Alçak Geçişli Aradeğerleme	17
2.4.1.2.4. Parçalı Kübik	17
2.4.1.2.5. Zaman Domeni Aradeğerleme	17
3.1. SEZGİSEL ALGORİTMALAR.....	18
3.1. Giriş	18
3.1.2 Meta-Sezgisel Algoritmaların Genel Yapısı ve Mantığı.....	18
3.1.3 Tez Kapsamında İncelenen Başlıca Sezgisel Algoritmalar.....	19
3.2. İstilacı Yabancı Ot (İYO) Algoritması.....	20

3.2.1. İYO'nun İşleyiş Adımları	20
3.3. Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA)	22
3.4 Öğretmen-Öğrenci Tabanlı Optimizasyon (TLBO / ÖÖTO)	24
3.5. Mors Optimizasyon Algoritması (DAA)	24
3.6. Sezgisel Algoritmalar İçin Simülasyonlarda Kullanılan OFDM Yapısı	25
4.BÖLÜM: SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	28
4.1. Giriş	28
4.2. Sezgisel Algoritma Yöntemleri İçin OFDM Sistem Parametreleri.....	29
4.3.Sezgisel Algoritmalar Kullanarak Kanal Kestirimi	29
4.3.1. İstilacı Yabancı Ot (İYO) Algoritması Kullanarak Kanal Kestirimi	29
4.3.2. Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA) Kullanarak Kanal Kestirimi	33
4.3.3.ÖÖTO Algoritması Kullanarak Kanal Kestirimi	36
4.3.4. Mors Optimizasyon (MOA) Algoritması Kullanarak Kanal Kestirimi.....	38
4.4 Meta Sezgisel Algoritmaların Karşılaştırılması	42
SONUÇ	45
KAYNAKLAR	47
ÖZ GEÇMİŞ.....	51

KISALTMALAR

Kısaltma	Türkçe Açılımı	İngilizce Açılımı
ABC	Yapay Arı Kolonisi	Artificial Bee Colony
AWGN	Eklemeli Beyaz Gauss Gürültüsü	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Hata Oranı	Bit Error Rate
CDMA	Kod Bölmeli Çoklu Erişim	Code Division Multiple Access
CP	Çevrimsel Önek	Cyclic Prefix
CPU	Merkezi İşlem Birimi	Central Processing Unit
MOA	Mors Optimizasyon Algoritması	Whale Optimization Algorithm
dB	Desibel	Decibel
DE	Farksal Gelişim	Differential Evolution
FDMA	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim	Frequency Division Multiple Access
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü	Fast Fourier Transform
GA	Genetik Algoritma	Genetic Algorithm
IFFT	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü	Inverse Fast Fourier Transform
ISI	Semboller Arası Girişim	Inter-Symbol Interference
İYO	İstilacı Yabancı Ot Algoritması	Invasive Weed Optimization
KKSA	Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması	Shuffled Frog Leaping Algorithm
LOS	Doğrudan Görüş Hattı	Line of Sight
LPI	Alçak Geçişli Aradeğerleme	Low Pass Interpolation
LS	En Küçük Kareler	Least Squares
MIMO	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış	Multiple Input Multiple Output

Kısaltma	Türkçe Açılımı	İngilizce Açılımı
MMSE	Minimum Ortalama Kare Hata	Minimum Mean Square Error
MSE	Ortalama Kare Hata	Mean Squared Error
NLOS	Doğrudan Görüş Olmayan	Non-Line of Sight
OFDM	Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Particle Swarm Optimization
QAM	Genlik-Faz Modülasyonu	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Dikgen Faz Kaydırmalı Anahtarlama	Quadrature Phase Shift Keying
SCI	Parçalı Kübik Aradeğerleme	Spline Cubic Interpolation
SFL	Sıçramalı Kurbağa Algoritması	Shuffled Frog Leaping
SNR	Sinyal Gürültü Oranı	Signal to Noise Ratio
SOI	İkinci Dereceden Aradeğerleme	Second Order Interpolation
TDI	Zaman Domeni Aradeğerleme	Time Domain Interpolation
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim	Time Division Multiple Access

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. TDMA'nın blok diyagramı	6
Şekil 2.2 FDMA'nın blok diyagramı	7
Şekil 2.3. CDMA'nın blok diyagramı	8
Şekil 2.5. OFDM verici blok diyagramı (Özdemir, G., 2009).	12
.....	13
Şekil 2.6. OFDM verici blok diyagramı blok diyagramı blok diyagramı blok diyagramı (Özdemir, 2009).	13
Şekil 2.7 (a) Blok tip kanal tahmini,(b) tarak tip kanal tahmini pilot sembol yerleşimi (Jiang, vd., 2019).	15
Şekil 3.1. Meta sezgisel algoritmaların genel blok diyagramı (Talbi, 2009).	20
Şekil 3.2. İstilacı yabancı ot algoritması çalışması (Mehrabian, 2006).	21
Şekil 3.3. İstilacı yabancı ot algoritmalı kanal kestiriminin akış şeması (Mehrabian, 2006)	22
Şekil 3.4. KKSA Akış Şeması (Eusuff, vd.,2003)	23
Şekil 3.5. Kanal Kestirimli OFDM sisteminin genel alıcı-verici diyagramı	25
Şekil 4.1. İYO algoritmalı kanal kestiriminin QPSK ve 16QAM modülasyonu için LS ve MMSE algoritmalarıyla kıyaslanmasının SNR değerlerine karşılık gelen BER	31
Şekil 4.2. İYO algoritmalı kanal kestiriminin QPSK modülasyonu için LS ve MMSE algoritmalarıyla kıyaslanmasının SNR değerlerine karşılık gelen MSE değerleri	32
Şekil 4.3. 16QAM için KKSA tabanlı kanal kestiriminin LS ve MMSE ile BER-SNR karşılaştırması	35
Şekil 4.4. 16QAM için KKSA tabanlı kanal kestiriminin LS ve MMSE ile MSE-SNR karşılaştırması	36
Şekil 4.5. ÖÖTO algoritmalı kanal kestiriminin 16QAM modülasyonu için LS ve MMSE algoritmalarıyla kıyaslanmasının SNR değerlerine karşılık gelen BER ve MSE	38
Şekil 4.6. MOA-tabanlı kanal kestiriminin LS ve MMSE ile SNR'ye karşı BER karşılaştırması	40
Şekil 4.7 MOA, İYO ve KKSA kanal kestiriminin BER VE SNR karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.8 ÖÖTA, MOA, İYO ve KKSA tabanlı kanal kestiriminin BER ve SNR karşılaştırması.....	42

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1 OFDM sisteminin benzetim parametreleri	29
Tablo 4.2 İYO Optimizasyon Algoritmasıyla Kanal Kestiriminde Kullanılan Parametreler	30
Tablo 4.3 KKSA tabanlı Kanal Kestiriminde Kullanılan Parametreler	34
Tablo 4.4 ÖÖTO tabanlı Kanal Kestirimi Parametreler	37
Tablo 4.5 MOA tabanlı Kanal Kestiriminde Kullanılan Parametreler	39
Tablo 4.6 ÖÖTO, KKSA, İYO ve MOA algoritmaları kanal kestiriminin artan SNR'a karşı BER değerleri	42
Tablo 4.7 ÖÖTO, KKSA, İYO ve MOA algoritmaları kanal kestiriminin Tablo 4.6'daki BER için çalışma süreleri.....	43



GİRİŞ

1. Tezin Literatürdeki Yeri

Haberleşme sistemlerinde temel amaç, bilginin bir noktadan başka bir noktaya güvenilir bir şekilde aktarılmasını sağlamaktır. Bu süreçte kaynak, hedef ve haberleşme kanalı olmak üzere üç ana unsur yer alır. Haberleşme kanalı, bilgi taşıyan sinyallerin iletiildiği ortamı temsil eder ve ortamın fiziksel özelliklerine göre farklı şekillerde tanımlanabilir. Kablosuz iletişimde bu kanal genellikle hava veya vakum iken, kablolu sistemlerde bakır teller veya optik lifler kullanılabilir (Stuber, 2001).

Kablosuz haberleşme teknolojilerinin tarihçesi, 19. yüzyılın sonlarında Maxwell'in elektromanyetik dalga teorisi ve Hertz'in deneysel çalışmalarıyla başlamış; Marconi'nin ilk kablosuz telgraf iletişimi ile somut hale gelmiştir. 20. yüzyılın ortalarından itibaren analog sistemlerden dijital sistemlere geçişle birlikte, veri iletiminde daha verimli çözümler ortaya çıkmıştır. Özellikle hücresel teknolojilerin gelişimi ile GSM, 3G, 4G ve 5G gibi sistemler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır (Rappaport, 2010).

Bu gelişmelerle birlikte, yüksek veri hızları ve daha esnek sistem ihtiyacı doğrultusunda çok taşıyıcılı iletim teknikleri ön plana çıkmıştır. Bu tekniklerden biri olan Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM), geniş bantlı ve frekans seçici kanallarda üstün performans sergileyen bir modülasyon yöntemi olarak öne çıkmaktadır. OFDM, çoklu yol yayılımına karşı dayanıklı yapısı ve yüksek spektral verimliliği sayesinde LTE, 5G, Wi-Fi ve DVB-T gibi birçok standartta kullanılmaktadır (Nee vd., 2000; Hwang vd., 2008).

OFDM sistemlerinde kanalın değişken doğası nedeniyle kanal kestirimi, sistemin başarımını doğrudan etkileyen bir faktördür. Literatürde En Küçük Kareler (LS) ve Minimum Ortalama Kare Hata (MMSE) gibi klasik kestirim yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler, kanalın istatistiksel bilgilerine olan bağımlılıkları ve yüksek hesaplama karmaşıklıkları nedeniyle dinamik ortamlarda yeterli doğruluk sağlamayabilir (Coleri vd., 2002).

Bu noktada, yapay zekâ tabanlı optimizasyon algoritmaları kanal kestirimi için alternatif çözümler sunmaktadır. Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yapay Arı Koloni (ABC) ve Deniz Aygırı Algoritması (WOA) gibi sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler, optimizasyon problemi olarak ele alınan

kanal kestirimi sürecinde daha esnek ve etkili çözümler sağlayabilmektedir (Zhao vd., 2006; Kennedy vd., 1995).

Bu yöntemler arasında Öğretmen-Öğrenci Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTA veya TLBO) algoritması, parametre ayarlamaya gerek duymaması ve hızlı yakınsama kabiliyeti ile literatürde dikkat çeken tekniklerden biridir. TLBO algoritması, öğretmen ve öğrenci etkileşimini taklit ederek çözüm uzayında arama yapar ve özellikle yüksek boyutlu problemlerde başarılı sonuçlar vermektedir.(Rao vd.,2011).

Bu tez çalışması, TLBO algoritmasını OFDM sistemlerinde kanal kestirimi amacıyla uygulamayı ve bu yaklaşımı diğer sezgisel algoritmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, klasik yöntemlerle kıyaslandığında sezgisel yöntemlerin daha düşük hata oranları ve daha hızlı yakınsama özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Tez ayrıca MATLAB ortamında geliştirilen simülasyonlarla desteklenmiş ve performans değerlendirmeleri çeşitli metriklerle yapılmıştır. Sonuç olarak, bu tez hem kanal kestirimi probleminin çözümünde alternatif bir yaklaşım sunmakta, hem de sezgisel algoritmaların iletişim sistemlerine entegrasyonu konusunda literatüre katkı sağlamaktadır.

Bu tez toplam beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, çalışmanın genel çerçevesi sunulmuş; problemin tanımı, amaç ve hedefler belirtilmiş; çalışmanın literatürdeki yeri ile özgün katkıları ele alınmıştır. İkinci bölümde, kanal kestirimi ile doğrudan ilişkili olan OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) sistemlerinin yapısı ayrıntılı bir şekilde açıklanmış; çok taşıyıcılı iletim teknikleri, pilot sembol tabanlı kanal kestirim yöntemleri ve bu yöntemlerin LS (En Küçük Kareler), MMSE (Minimum Ortalama Kare Hatası) gibi klasik kestirimci algoritmalarla uygulanması detaylandırılmıştır. Üçüncü bölümde, sezgisel algoritmaların temel prensipleri ve bu algoritmaların OFDM kanal kestiriminde kullanım potansiyeli ele alınmış; özellikle Genetik Algoritma, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Farksal Gelişim, Yapay Arı Koloni, İstilacı yabancı ot, Sıçramalı kurbağa ve Mors optimizasyon algoritmalarının teorik altyapısı ve uygulanabilirliği tartışılmıştır. Dördüncü bölümde ise, sezgisel algoritmaların kanal kestirim performansını değerlendirmek üzere geliştirilen MATLAB tabanlı simülasyon çalışmaları yer almakta olup, farklı algoritmaların çeşitli kanal koşullarındaki performansları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Beşinci ve son bölümde, elde edilen

bulgular özetlenmiş ve çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlar doğrultusunda önerilerde bulunulmuştur. Bu bölüm ayrıca gelecekte yapılabilecek çalışmalara da ışık tutacak şekilde yapılandırılmıştır.



2. BÖLÜM: OFDM'DE KANAL KESTİRİM YÖNTEMLERİ

2.1. Giriş

Kablosuz iletişim sistemlerinde artan veri hızı taleplerine karşılık verebilmek için geliştirilen çok taşıyıcılı iletim yöntemleri, özellikle frekans seçici kanallar üzerinde yüksek verimlilik sağlamaktadır. Bu yöntemler arasında, Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), sağladığı yüksek spektral verimlilik, çok yollu yayılıma dayanıklılık ve düşük karmaşıklıkla alıcı tasarımı gibi avantajlar nedeniyle modern iletişim sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Nee vd., 2000; Hwang vd., 2008).

OFDM, geniş bantlı kanalı birçok dar bant taşıyıcıya bölerek her alt taşıyıcının düzlemsel bir kanal gibi davranmasını sağlar. Bu yapı, frekans seçici kanal etkilerini azaltmakta ve alıcı tasarımını sadeleştirmektedir. Her bir alt taşıyıcı, yüksek hızlı veri iletimine katkıda bulunurken, kanal içindeki çok yollu girişim etkilerini minimuma indirir. (Rappaport, 2010).

Bununla birlikte, taşıyıcılar arasındaki ortogonalliğin korunması ve kanal etkilerinin doğru şekilde tahmin edilmesi, sistem performansı açısından kritik bir rol oynamaktadır. (Coleri vd., 2002).

Kanal kestirimi, kablosuz sistemlerde sinyalin iletim ortamında uğradığı bozulmaların giderilmesi amacıyla, kanal karakteristiklerinin tahmin edilmesini amaçlayan bir tekniktir. Etkili bir kanal kestirimi, doğru veri alma oranını artırırken, hata oranlarını da önemli ölçüde azaltmaktadır (Tufvesson vd., 1997).

Bu bağlamda, bu bölümde OFDM sistemlerinde kanal kestirimi problemini anlamaya temel teşkil edecek şekilde öncelikle çoklu erişim teknikleri tanıtılacak, ardından çok taşıyıcılı iletim ve OFDM yapısı detaylandırılacaktır. Son olarak, OFDM sistemlerinde kullanılan kanal kestirim yöntemleri kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır.

2.2. Çoklu Erişim Teknikleri

Kablosuz iletişim sistemlerinde birden fazla kullanıcının aynı ortamı paylaşarak veri iletimi yapabilmesi için çeşitli çoklu erişim teknikleri geliştirilmiştir. Çoklu erişim teknikleri, kullanıcıların zaman, frekans veya kod gibi kaynakları paylaşmasını sağlar ve iletim kaynaklarının daha verimli kullanımına olanak tanır. Bu bölümde en yaygın kullanılan çoklu erişim yöntemleri olan Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA), Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA) ve Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA)

sistemleri tanıtılmaktadır.

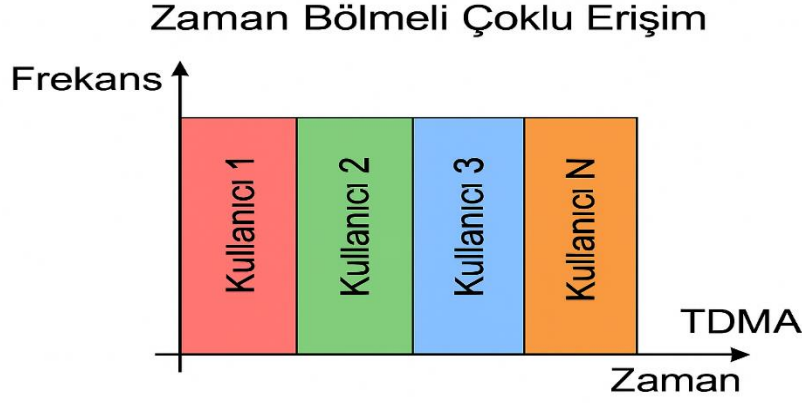
2.2.1. TDMA – Zaman Bölmeli Çoklu Erişim

Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA), kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir çoklu erişim yöntemidir. TDMA'nın temel prensibi, mevcut bant genişliğini kullanıcılar arasında zaman dilimleri (zaman aralıkları) halinde bölmektir. Böylece her kullanıcıya belirli bir süre boyunca kanala erişim hakkı tanınır ve aynı frekans bandı, farklı zamanlarda birden fazla kullanıcı tarafından paylaşılabilir (Rappaport, 2010).

Şekil 2.1'de gösterildiği üzere, her kullanıcı için belirli bir zaman aralığı (time slot) tahsis edilmiştir. Bu zaman aralıkları, veri iletiminden önce bir “koruma süresi (guard time)” ile ayrılmıştır. Koruma süresi, ardışık kullanıcıların sinyallerinin çakışmasını (inter-symbol interference) önlemek ve senkronizasyonu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Her zaman dilimi, kullanıcıya ait verilerle birlikte başlık (header) bilgilerini de içermektedir.

TDMA sistemleri, özellikle 2G mobil iletişim sistemleri (örneğin GSM) gibi standartlarda etkin olarak kullanılmıştır. Bu sistemde uplink (yukarı bağlantı) ve downlink (aşağı bağlantı) kanalları, ayrı zaman dilimlerinde planlanmakta ve kullanıcılar sırayla veri iletimine izin verilecek şekilde planlanmaktadır. Bu yapı sayesinde spektrum verimli bir biçimde kullanılırken, her kullanıcı sistem tarafından yönetilen bir zaman çerçevesinde erişim sağlamaktadır (Stallings, 2009,).

TDMA'nın avantajları arasında kanal paylaşımının deterministik olması, senkronizasyonun merkezi olarak yönetilebilmesi ve donanım karmaşıklığının düşük olması yer alır. Ancak, zamanlama hatalarına karşı hassas olması ve eşzamanlı veri iletiminin mümkün olmaması gibi sınırlamaları da bulunmaktadır (Stallings, 2009).



şekil 2.1. TDMA'ın blok diyagramı

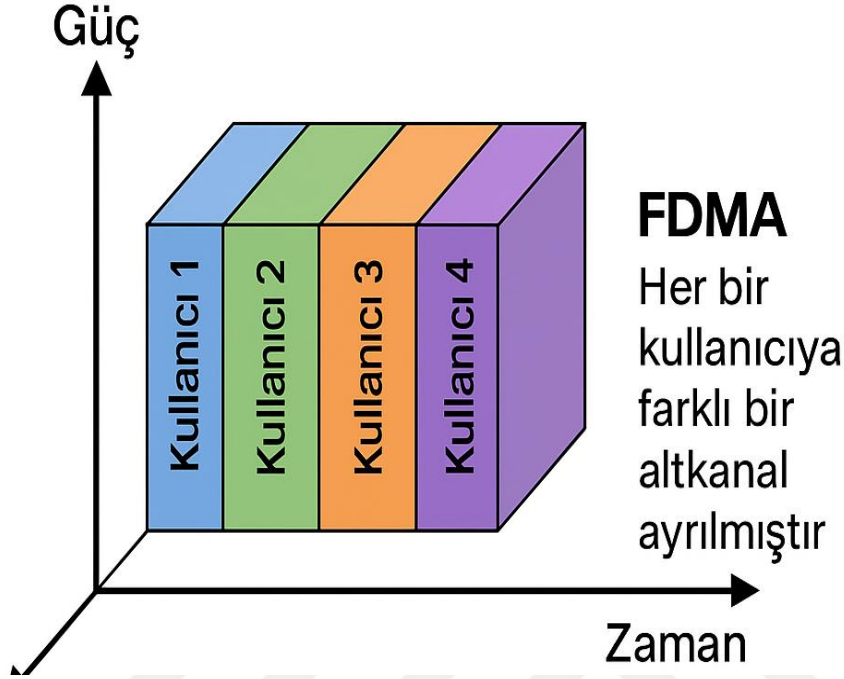
2.2.2. FDMA – Frekans Bölmeli Çoklu Erişim

Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA), çoklu erişim tekniklerinden biri olup, iletişim sistemlerinde birden fazla kullanıcının aynı fiziksel ortamı paylaşmasına olanak tanır. FDMA'nın temel prensibi, toplam kullanılabilir bant genişliğini kullanıcılar arasında farklı frekans kanalları olarak bölmektir. Her kullanıcı, bu frekans bandı içerisinde kendisine tahsis edilen sabit bir alt taşıyıcı üzerinde veri iletir ve alır (Rappaport, 2010).

şekil 2.2'de görüldüğü üzere, her kullanıcıya ayrılmış olan alt frekans bantları zaman boyunca sabit kalmaktadır. Bu yapı, kullanıcılar arasında frekans tabanlı izolasyon sağlayarak parazitlenmenin önüne geçer. Kullanıcılar eşzamanlı olarak, ancak farklı frekanslarda iletişim kurar. Bu nedenle FDMA, senkronizasyon gereksinimini azaltırken, iletişimin sürekliliğini mümkün kılar (Stallings, 2009).

FDMA, analog hücresel sistemler başta olmak üzere ilk nesil (1G) mobil ağı teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak her kullanıcıya sabit bir frekans bandı tahsis edilmesi, spektral verimliliği düşürmekte ve frekans kaynaklarının esnek kullanımını engellemektedir. Ayrıca sistem, kullanıcı sayısının artmasıyla birlikte frekans planlaması açısından karmaşık hale gelmektedir (Myung, 2007).

Modern sistemlerde FDMA yapısı genellikle diğer çoklu erişim teknikleri ile birlikte (örneğin OFDMA) karma sistemlerin bir parçası olarak uygulanmakta ve kullanıcı trafiğiyle orantılı dinamik frekans tahsisi yapılabilmektedir.



Şekil 2.2 FDMA'nın blok diyagramı

2.2.3. CDMA – Kod Bölmeli Çoklu Erişim

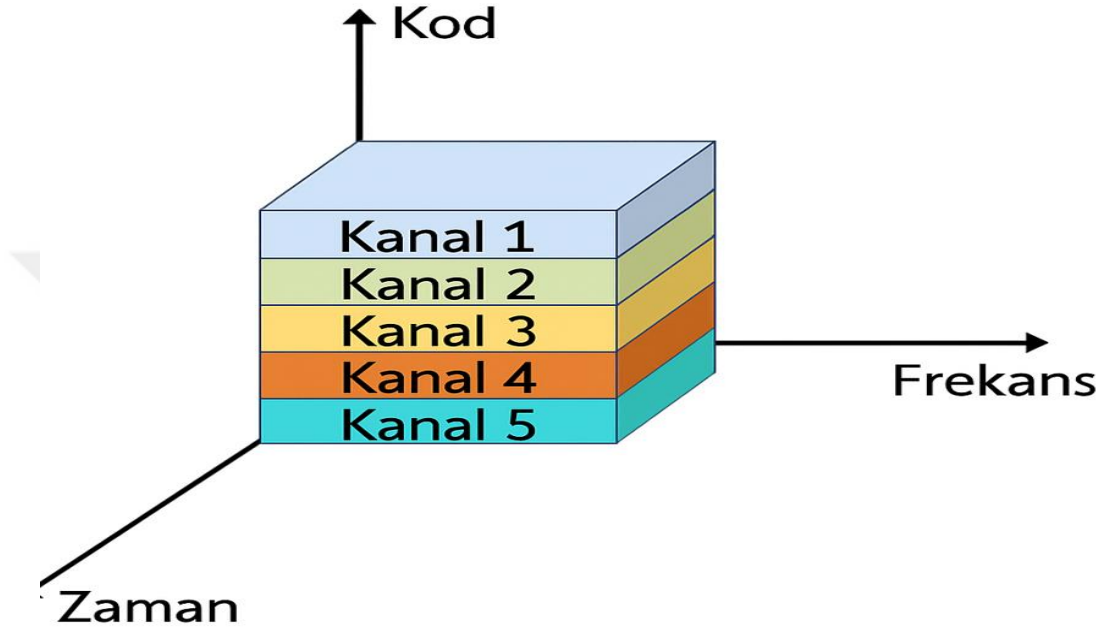
Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA), aynı zaman ve frekans kaynaklarını paylaşan çok sayıda kullanıcının birbirinden ayrılmasını sağlayan bir çoklu erişim yöntemidir. CDMA'nın temel prensibi, her kullanıcıya özgü bir kod dizisi atayarak iletim yapılan sinyalleri ayırtmaktır. Böylece tüm kullanıcılar aynı bant genişliği içinde, aynı anda veri iletebilir. (Rappaport, 2010).

Şekil 2.3'te yer alan CDMA diyagramı, kullanıcıların (şemada "kanallar") zaman ve frekans eksenlerinde örtüşmesine rağmen, üçüncü bir boyut olan "kod" eksenini üzerinden ayrıldığını göstermektedir. Her kullanıcıya (veya kanala), ortogonal ya da düşük korelasyonlu bir yayılım kodu tahsis edilmiştir. Bu kodlar, iletilen veriyi geniş bant sinyale dönüştürerek, diğer kullanıcıların sinyallerinden ayrılmasına olanak tanır (Rappaport, 2010).

CDMA sistemlerinde tüm kullanıcılar aynı zaman ve frekans kaynaklarını paylaşmasına rağmen, alıcı tarafında kullanılan kod çözümü (despreading) işlemi sayesinde her kullanıcının verisi ayrıştırılır. Bu yapı, spektral verimliliği artırmakla birlikte kullanıcı sayısının artırılmasına da olanak tanır. Aynı zamanda CDMA,

frekans çeşitliliği ve çok yönlü yayılım ortamlarında sinyalin bütünlüğünü korumada da başarılıdır (Rappaport, 2010).

CDMA teknolojisi, 2G ve 3G sistemlerinin önemli bir parçası olmuştur. Özellikle IS-95 ve UMTS (3G) sistemlerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, CDMA temelli teknikler, askeri haberleşme uygulamaları gibi yüksek güvenlik ve parazit bağımsızlığı gerektiren sistemlerde de tercih edilmektedir.



Şekil 2.3. CDMA'ın blok diyagramı

2.3. Çok Taşıyıcılı İletim

Çok taşıyıcılı iletim, yüksek veri hızlarının istendiği ve kanalın frekans seçici özellik gösterdiği haberleşme sistemlerinde kullanılan bir iletim tekniğidir. Bu yöntemde, geniş bant bir veri akışı, daha dar bantlara bölünerek birden fazla alt taşıyıcı üzerinden paralel olarak iletilir. Her bir alt taşıyıcı, nispeten daha düzlemsel (flat fading) bir kanal üzerinden çalıştığı için, sistemin genel dayanıklılığı ve alıcı tarafındaki işlem karmaşıklığı azaltılmış olur (Nee VD., 2000).

Çok taşıyıcılı iletim teknikleri özellikle çok yollu yayılımın neden olduğu girişimlerin etkilerini azaltmak, sembol süresini uzatarak semboller arası girişimi (ISI) önlemek ve spektrum verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu yaklaşımın temel avantajı, karmaşık kanal denkleştirme işlemlerine gerek bırakmadan, her alt taşıyıcı için basit kestirim ve modülasyon işlemlerinin yeterli olmasıdır (Hwang vd., 2008).

Çok taşıyıcılı iletim sistemleri arasında en yaygın kullanılan yöntem, Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) sistemidir. OFDM, hem iletim hem de alım tarafında hızlı Fourier dönüşümleri (FFT/IFFT) kullanılarak düşük işlem karmaşıklığı ile çalışabilmekte ve bu sayede gerçek zamanlı uygulamalarda tercih edilmektedir. OFDM'nin başarısı, çok taşıyıcılı iletimin avantajlarını maksimum düzeyde yansıtmamasından kaynaklanmaktadır (Rappaport, 2010).

Ayrıca, çok taşıyıcılı iletim yöntemleri, kablosuz LAN'lerden (802.11a/g/n/ac), hücresel sistemlere (LTE, 5G NR) ve dijital yayıncılığa (DVB-T) kadar pek çok modern haberleşme standardının temelini oluşturmaktadır. Bu sistemlerde, kanal modellemesi, pilot sembollerle kanal kestirimi ve zaman/frekans senkronizasyonu gibi destekleyici teknikler, çok taşıyıcılı yapının başarılı şekilde çalışmasını sağlamaktadır (Stuber, 2004).

2.3.1. OFDM – Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama

Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM), çok taşıyıcılı bir iletim yöntemi olarak kablosuz iletişim sistemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. OFDM, geniş bant bir veri akışını çok sayıda dar bant alt taşıyıcıya böler ve her taşıyıcıyı ortogonal olarak yerleştirerek paralel veri iletimi sağlar. Bu yapı, frekans seçici kanal etkilerinin daha etkili yönetilmesine ve semboller arası girişimin (ISI) azaltılmasına olanak tanır (Goldsmith, 2005).

Modern iletişim sistemlerinde özellikle Wi-Fi (IEEE 802.11a/n/ac/ax), LTE, 5G NR ve DVB-T OFDM'in sunduğu yüksek spektral verimlilik ve kanal dayanıklılığı büyük avantaj sağlamaktadır. OFDM, zaman domenindeki işlemleri frekans domenine taşıyarak kanal denkleştirme işlemlerini basitleştirir. Ayrıca, çevrimsel önek (cyclic prefix) kullanımı ile çok yollu yayılımdan kaynaklanan gecikmelerin önüne geçilmesi sağlanır (Molisch, 2012).

OFDM'nin en önemli avantajlarından biri, çok yol etkilerine karşı doğal bir dayanıklılık sunması ve hızlı Fourier dönüşümü (FFT) tekniklerinin kullanımıyla düşük işlem karmaşıklığı sağlamasıdır. Ayrıca, kanalın doğrusal olmayan bozulmalarına karşı da çeşitli dengeleme (equalization) teknikleriyle kolayca uyarlanabilir (Zhou vd., 2006).

Bununla birlikte, OFDM sistemleri frekans ofsetlerine ve zaman senkronizasyon hatalarına karşı hassastır. Bu sorunları azaltmak amacıyla pilot sembollerle kanal kestirimi, zaman-frekans senkronizasyon algoritmaları ve faz gürültüsü azaltma teknikleri kullanılmaktadır. Özellikle kanal tahmini için yapay zekâ destekli yöntemlerin son yıllarda büyük ilgi gördüğü görülmektedir (Jiang, 2019).

2.3.1.1. OFDM'nin Gelişimi

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) teknolojisi, çok taşıyıcılı modülasyon prensibine dayanan ve modern dijital haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu teknolojinin temelleri, 1966 yılında Chang'ın çok taşıyıcılı iletim üzerine yaptığı öncü çalışmalarla atılmıştır. Bu çalışmalar, daha sonra 1971 yılında Weinstein ve Ebert'in FFT (Fast Fourier Transform) tabanlı alıcı yapısını tanıtmalarıyla önemli bir dönüm noktasına ulaşmıştır. Bu yaklaşım, OFDM'nin teorik olarak mümkün olduğunu göstermiş ve pratik uygulamalara geçiş için önemli bir altyapı oluşturmuştur (Chaurasia, 2022).

1980'li ve 1990'lı yıllarda, dijital sinyal işleme tekniklerinin ve donanım mimarilerinin gelişmesiyle birlikte OFDM, akademik ve endüstriyel çevrelerde daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Bu dönemde OFDM, öncelikle DSL (Digital Subscriber Line) teknolojilerinde kullanılmaya başlanmış, ardından DVB (Digital Video Broadcasting) ve DAB (Digital Audio Broadcasting) gibi sayısal yayıncılık standartlarına entegre edilmiştir. Bu uygulamalarda OFDM'nin frekans seçici kanallardaki yüksek başarımı, spektral verimliliği ve çok yollu yayılıma karşı olan dayanıklılığı ön plana çıkmıştır. (Hwang vd., 2008).

1999 yılında IEEE tarafından tanımlanan 802.11a standardı ile birlikte, OFDM kablolu yerel alan ağlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Bunu takiben 802.11g ve 802.11n gibi standartlar da bu teknolojiyi benimsemiştir. OFDM'nin bu sistemlerde tercih edilme sebebi, yüksek veri hızlarını destekleyebilmesi ve dinamik kanal koşullarına uyum sağlayabilmesidir. Bunun yanı sıra, LTE (Long Term Evolution) ve

WiMAX gibi geniş bant kablosuz erişim sistemlerinde de temel modülasyon yöntemi olarak kullanılması, OFDM'nin endüstrideki önemini daha da artırmıştır (Myung vd., 2007).

Günümüzde 5G ve ötesi haberleşme sistemlerinde, OFDM'nin daha gelişmiş varyantları (örn. filtered-OFDM, windowed-OFDM) geliştirilmekte ve yüksek mobilite ile düşük gecikme gibi yeni nesil gereksinimlere uyumlu hâle getirilmektedir. Bu bağlamda, OFDM teknolojisi hem teorik altyapısı hem de pratik uygulama sahasıyla, sayısal haberleşme alanında evrimini sürdüren güçlü ve esnek bir modülasyon tekniği olarak varlığını korumaktadır.

2.3.1.2. OFDM'nin Tarihçesi

Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) teknolojisinin temelleri, 1960'lı yıllarda çok taşıyıcılı modülasyon sistemleri üzerine yapılan teorik araştırmalarla atılmıştır. Başlangıçta analog iletişim sistemlerinde değerlendirilmek üzere önerilen bu teknoloji, dijital işaret işleme donanımındaki ilerlemeler sayesinde, 1970'li yıllarda dijital sistemlere entegre edilebilir hâle gelmiştir. Bu bağlamda, 1971 yılında Weinstein ve Ebert tarafından sunulan çalışmada, OFDM alıcısının hızlı Fourier dönüşümü (FFT) tabanlı bir yapıyla gerçekleştirilmesi önerilmiş ve bu öneri, sistemin pratik uygulanabilirliğini büyük ölçüde artırmıştır (Chaurasia, 2022)

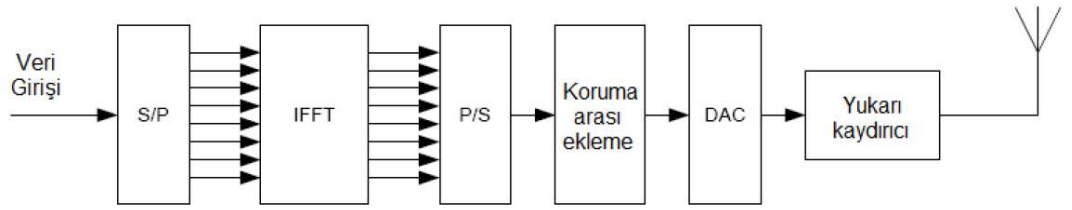
1990'lı yıllarda artan kablosuz iletişim gereksinimleri ve yüksek veri hızına duyulan ihtiyaç, OFDM'yi yeniden gündeme getirmiştir. OFDM, bu dönemde önce sabit hatlar üzerinden veri iletimi yapan ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) sistemlerinde kullanılmaya başlanmış; ardından dijital ses yayını (DAB), dijital video yayını (DVB-T) ve IEEE 802.11a/g/n gibi kablosuz yerel alan ağı standartlarında kendine yer bulmuştur (Nee vd., 2000).

2000'li yıllarda ise, dördüncü nesil (4G) mobil haberleşme sistemleri ile birlikte OFDM, mobil iletişim altyapısının temel modülasyon tekniği hâline gelmiştir. LTE (Long Term Evolution) sisteminde kullanılan OFDM, yüksek spektral verimlilik, çoklu yol ortamına karşı dayanıklılık ve adaptif modülasyon özelliği ile veri iletim performansını büyük ölçüde artırmıştır. Günümüzde ise 5G NR (New Radio) sistemlerinde kullanılan OFDM varyantları sayesinde daha düşük gecikme süresi ve daha yüksek kapasite gibi avantajlar elde edilmektedir (Dahlman vd., 2020).

OFDM'nin bu geniş çaplı benimsenmesi, sistemin özellikle frekans seçici kanallarda sunduğu avantajlar, donanımda FFT'nin verimli biçimde uygulanabilmesi ve çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) sistemleriyle doğal bir entegrasyon imkânı sunmasıyla doğrudan ilişkilidir. Bu yönleriyle OFDM, günümüzde hem kablosuz hem de kablolu haberleşme teknolojilerinin temel yapı taşlarından biri hâline gelmiştir.

2.3.1.4. OFDM Verici Yapısı Şeması

Kablosuz haberleşme sisteminden vericiden bir veri iletimi Şekil 2.5' te bir OFDM vericinin temel blokları şeklindeki sıralamayla gerçekleşmektedir. Giriş verisi ilk etapta seri bilgiden paralel bilgiye dönüştürülür. Daha sonra dönüştürücünün N adet paralel çıkışı, ters hızlı Fourier transformu (IFFT) uygulayarak OFDM sembolünü üretilir. OFDM sembolün alt-taşıyıcı frekanslarında birbirine karışmaz çünkü alt taşıyıcıların hepsi birbirine dikgendir.



Şekil 2.5. OFDM verici blok diyagramı (Özdemir, G., 2009).

Daha sonra IFFT' si hesaplanan N karmaşık çıkışı paralelden bilgiden seri bilgiye çevrilir ve çevrimsel ön ek eklenir. Koruma arası eklemenin sebebi ise taşıyıcılar arası girişim ve semboller arası girişim ve bozulmalarla mücadele edebilmektir. Son olarak, koruma arası ekleme bloğunun çıkışındaki sembol, dijitalden analog çeviriciden (DAC) geçerek her bir reel ve sanal kısım için alçak-geçiren süzgeçten geçirilir. Dijitalden analoğa çeviriciden geçen sembollerin çıkışı iletim için yukarı kaydırıcı bloğunda kaydırılır ve bir bant-geçiren süzgeç yardımıyla antene gönderilir. (Proakis vd., (2001).

2.3.1.5. OFDM Alıcı Yapısı

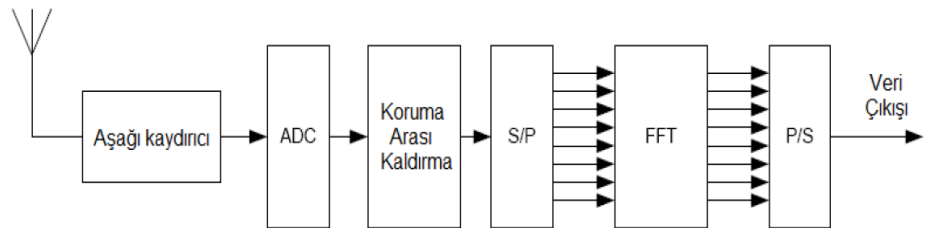
OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) alıcısı, çok taşıyıcılı olarak modüle edilmiş sinyalin doğru şekilde çözümlenebilmesi amacıyla bir dizi dijital işaret işleme aşamasını içeren karmaşık bir yapıya sahiptir. İlk adımda, anten tarafından alınan analog sinyal bir radyo frekansı (RF) taşıyıcısından aşağı frekansa kaydırılır ve sayısallaştırma için ADC (Analog to Digital Converter) ile örnekleme işlemine tabi tutulur (Nee vd., 2000).

Sayısallaştırılan bu seri veri, paralel taşıyıcılarda işlenebilmesi amacıyla seri-paralel dönüşüm sürecinden geçirilir. Verici tarafında her OFDM sembolünün başına eklenen çevrimsel önek (Cyclic Prefix – CP), alıcıda kaldırılarak semboller arası girişim (Inter-Symbol Interference – ISI) etkisi azaltılır. Bu işlem sonucunda elde edilen saf OFDM sembolleri, frekans alanına dönüştürülmek üzere FFT (Fast Fourier Transform) işlemi ile analiz edilir. FFT işlemi, zaman domenindeki çok taşıyıcılı sinyali frekans domenine çevirerek her alt taşıyıcı bileşenini ayırır (Li vd., 2006).

Frekans domeninde elde edilen alt taşıyıcı sinyalleri üzerinde kanal kestirimi işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem, verici tarafından yerleştirilen pilot semboller yardımıyla yapılır. Pilot taşıyıcılar, kanalın frekans cevabını tahmin etmek ve varsa taşıyıcı frekans ofsetlerini düzeltmek için referans görevi görür (Rappaport, 2010). Kanal kestirimi sonucunda kanalın bozucu etkileri tahmin edilir ve bu bilgilere dayanarak kanal eşitleme (equalization) işlemi uygulanır. Bu adımda, sinyallerin genlik ve faz bozulmaları giderilerek her alt taşıyıcının taşıdığı bilgi mümkün olan en doğru biçimde geri elde edilir (Stojanovic, 1999).

Eşitlenmiş taşıyıcılar üzerinde yer alan semboller, kullanılan modülasyon şemasına (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM vb.) göre demodüle edilir. Demodülasyon işlemi sonucunda her alt taşıyıcıdaki sinyal, ikili (binary) veri bit dizilerine dönüştürülür. Son olarak, paralel veri akışları paralel-seri dönüşüm işlemine tabi tutulur ve orijinal veri akışı yeniden oluşturularak iletişim tamamlanmış olur (Stuber, 2004).

Bu süreç, özellikle frekans seçici çok yol etkilerine maruz kalan kablosuz iletişim kanallarında, OFDM sistemlerinin güvenilir ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlayan temel işleyişi yansıtır.



Şekil 2.6. OFDM verici blok diyagramı (Özdemir, 2009).

Şekil 2.6’ da bir OFDM alıcının temel blok diyagramı görülmektedir. Alıcının anten kısmına iletilmiş olan sinyal, iletilen dizi ile kanal dürtü yanıtının konvolüsyonu şeklindedir.

Bu aşamada, ilk olarak antenden alınan sinyal daha sonraki işlemler için geçiş-bandından temel-banda dönüştürmek amacıyla aşağı kaydırıcıyı kullanılarak aşağı kaydırılır ve analog sinyalden dijitale dönüştürmek için çeviriciye (ADC) gönderilir. Daha sonra semboller arası girişimi engelleyen koruma arası kaldırma işlemi gerçekleştirilir. Çevrimsel ön takı çıkarıldıktan sonra iletilen veri seri bilgiden paralel bilgiye dönüştürülür ve demodülasyon işlemi gerçekleştirilir. Demodülasyon bloğunda Hızlı Fourier transformu (FFT) işlemiyle kanal dürtüsü ve ilave gürültü tarafından genlik ve fazları bozulmuş verileri eldilir. Çıkış veri dizisi FFT bloğunun çıkışındaki veriler paralel bilgiden seri bit dizisine dönüştürülmesiyle elde edilir. Böylece, girişten iletilen veri etkili ve verimli bir biçimde sezgisel algoritmali akıllı kanal kestirimi aşamasından sonraki alıcı kısımda çıkış veri dizisi şeklinde elde edilmiş olur (Özdemir, 2009).

2.4. OFDM’de Kanal Kestirimi Yöntemleri

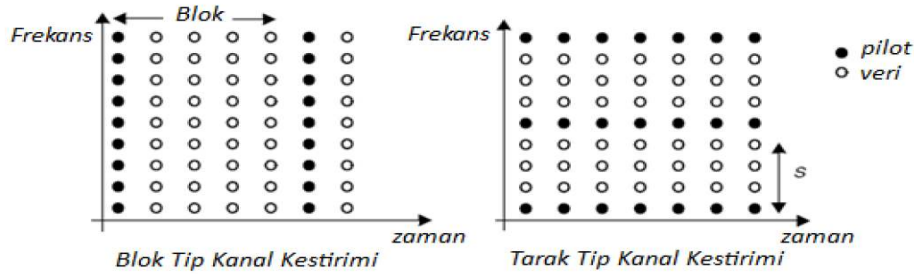
Gezgin radyo haberleşme sistemleri, radyo kanalında meydana gelen çok yolluluk özelliğinden dolayı zaman ve frekans seçiciliği gibi etkilerden olumsuz etkilenir. Bu sebeple, alıcı tarafında alınan verinin en yüksek doğruluk ve en az hata ile elde edilmesi ve kanallar arası girişimin önlenmesi amacıyla kanal tahmininin yapılması gereklidir. Kanal tahmini için literatürde kullanılan iki temel yöntem bulunmaktadır. İlk yöntem, ‘kör’ olarak adlandırılan kanal kestirimidir. Bu yöntemde, kanal hakkında hiçbir bilgiye sahip olmadan ve gönderilen veriye ek bir bilgi katmadan kanal kestirimi gerçekleştirildiği için bu isim verilmiştir. Fakat kör kanal tahmini, özellikle yüksek veri oranlarının iletildiği kablosuz iletişim sistemleri için genellikle yeterli olmamaktadır. İleticiden iletilen veriye dair herhangi bir bilgi olmadan kanal

kestirimi yapmaya çalışan kör yöntemler, alıcıda yeterli miktarda veri toplandığında daha etkili hale gelmektedir (Cho, vd., 2010).

İkinci kanal tahmini yöntem ise ‘pilot sembol eklemeli kanal tahmini’ olarak adlandırılır. Bu yöntemde, verici tarafından kanala gönderilen veri içerisine belirli aralıklarla, alıcı tarafından bilinen pilot semboller eklenir. Alıcıya ulaşan pilot sembollerde meydana gelen bozulma derecesi kullanılarak kanal kestirimi gerçekleştirilir. Çok fazla pilot sembol olarak ilave bit kullanmadan sistemin faz ve

genlik bilgilerini doğru bir şekilde tahmin edebilmek, pilot sembol eklemeli kanal kestiriminin temel amacıdır. Yaygın olarak kullanılan pilot semboller eklemeli kanal yöntemiyle verinin içine belirli aralıklarla yerleştirilir ve daha sonra bu semboller, her bir alıcıda OFDM sembolündeki kanal bilgisini tahmin etmek amacıyla kullanılır.

Filtreleme veya ara değerlendirme işlemleri yapılarak ilave bitler olan bu pilot semboller sayesinde oluşturulan bilgiler aracılığıyla kanal durum bilgisi belirlenir. Böylece, verici tarafından iletilen veriye eklenen pilot sembollerin yerleştirilme biçimi, pilot sembol eklemeli kanal tahmini yönteminin türünü belirlemektedir. Şekil 2’de gösterildiği üzere pilot sembollerin eklemeli kanal kestirimi yöntemi a) blok tip, b) tarak tip pilot sembol eklemeli kanal tahmini olarak iki farklı türe ayrılmaktadır (Jiang, vd., 2019).



Şekil 2.7 (a) Blok tip kanal tahmini, (b) tarak tip kanal tahmini pilot sembol yerleşimi (Jiang, vd., 2019).

Kablosuz iletişim sistemlerinde, sinyaller iletilirken çok yönlü yayılım, frekans seçici zayıflama ve gürültü gibi etkiler nedeniyle sinyal bozulmaya uğrar. Bu bozulmaların telafi edilmesi ve verinin doğru bir şekilde çözülebilmesi için, alıcı tarafın iletim kanalının karakteristiklerini doğru bir şekilde tahmin etmesi gerekmektedir. Bu işleme kanal kestirimi adı verilir. Özellikle OFDM sistemlerinde, alt taşıyıcılar arası ortogonalite nedeniyle kanalın doğru bir şekilde kestirilmesi kritik bir öneme sahiptir. Hatalı kanal kestirimi, alt taşıyıcılar arasında girişim oluşmasına ve sistem performansının ciddi şekilde düşmesine neden olur. OFDM sistemlerinde kanal kestirimi genel olarak pilot sembol eklemeli yöntemler ile gerçekleştirilir. (Li, vd., 2006).

2.4.1. Pilot Sembol Eklemeli Kanal Kestirimi Yöntemleri

Pilot semboller, iletim öncesinde bilinen semboller olup kanalın etkilerini tahmin etmek amacıyla kullanılır. OFDM sistemlerinde pilot tabanlı kanal kestirimi temel olarak iki ana yaklaşıma ayrılır; Blok Tip Kanal Kestirimi ve Tarak Tip Kanal Kestirimi (Rugini, vd., 2005).

2.4.1.1. Blok Tip Kanal Kestirimi

Blok tip kanal kestiriminde, pilot semboller tüm alt taşıyıcıları kapsayacak şekilde yerleştirilir. Yani belirli aralıklarla gönderilen tüm taşıyıcılara ait pilot semboller sayesinde kanalın frekans tepkisi tam olarak ölçülür. Bu yöntem, kanalın yavaş değiştiği sistemlerde (yani durağan kanal koşullarında) kullanılır. Pilot iletiminden sonra kanalın sabit kaldığı varsayılarak, kalan veri taşıyıcıları için aynı kestirim kullanılır.

Blok tip pilot yerleşimi, aşağıdaki adımlar ile kanal kestirimi sağlar; Pilot taşıyıcılar üzerinde doğrudan kanal kestirimi yapılır. Veri taşıyıcılar için bu kestirim kullanılır. Blok tip kanal kestiriminde, genellikle LS ve MMSE kestiriciler kullanılır.

2.4.1.1.1. LS Kestirimi (En Küçük Kareler Kestirimi)

LS kestirimi, OFDM sistemlerinde kanal etkisinin kestirilmesi amacıyla kullanılan en temel ve en basit yöntemlerden biridir. LS yöntemi, alıcı tarafında bilinen pilot semboller kullanılarak kanalın frekans yanıtını doğrudan tahmin eder. (Rugini, vd., 2005).

2.4.1.1.2. MMSE Kestirimi (Minimum Ortalama Kare Hata Kestirimi)

MMSE kestirimi, OFDM sistemlerinde kanal kestirimi için kullanılan gelişmiş ve etkili bir yöntemdir. MMSE, LS kestiriciden farklı olarak, kanalın istatistiksel özelliklerini ve gürültü gücünü de dikkate alarak daha doğru tahminler üretmeyi amaçlar. (Coleri vd., 2002).

2.4.1.2.1. Doğrusal Aradeğerleme

Doğrusal aradeğerleme, en yaygın ve basit kanal tahmin yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, iki pilot taşıyıcı arasında kalan veri taşıyıcıların kanal cevabı, bu iki nokta arasında doğrusal bir çizgi varsayılarak hesaplanır. Yani kanal cevabı lineer bir fonksiyonla modellenir. Hesaplama karmaşıklığının düşük olması sayesinde özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda avantaj sağlar. Ancak kanalın hızlı değiştiği senaryolarda bu yaklaşım yetersiz kalabilir ve kestirim hataları artabilir (Coleri vd., 2002).

2.4.1.2.2 İkinci Dereceden Ara değerleme

Bu yöntem, doğrusal tahmine kıyasla daha yüksek bir doğruluk hedefler. Üç veya daha fazla pilot taşıyıcı kullanılarak ikinci dereceden bir polinom yardımıyla kanal cevabı tahmin edilir. Kanal tepkisinde meydana gelen eğilim ve kavisleri daha

doğru modelleyebilir. Ancak bu yöntem, daha yüksek hesaplama gücü gerektirdiğinden, uygulama karmaşıklığını da beraberinde getirir (Li vd., 2000).

2.4.1.2.3. Alçak Geçişli Ara değerlendirme

Alçak geçişli aradeğerleme tekniği, pilot taşıyıcılar üzerinde elde edilen kanal tepkisini bir düşük geçiren filtreye genişletir. Bu sayede yüksek frekanslı bozulmalar ve gürültüler filtrelenerek daha kararlı bir tahmin yapılır. Bu yaklaşım özellikle gürültüye karşı dayanıklıdır. Ancak kanalın hızlı değiştiği durumlarda detay kaybı meydana gelebilir (Li, vd., 2000).

2.4.1.2.4. Parçalı Kübik

Spline aradeğerleme, pilot taşıyıcılar arasındaki geçişleri üçüncü dereceden polinomlarla ifade eder. Her aralık için farklı bir polinom tanımlanarak daha yumuşak ve esnek bir geçiş elde edilir. Bu yöntem, kanal tepkisinin karmaşık ve ani değişimler gösterdiği durumlarda yüksek doğruluk sağlar. Bununla birlikte, spline interpolasyonun uygulama maliyeti yüksektir (Molisch, 2012).

2.4.1.2.5. Zaman Domeni Aradeğerleme

Bu yöntemde, kanalın zaman domenindeki davranışı dikkate alınarak pilot verilerden zaman ekseninde aradeğerleme yapılır. Kanalın zamanla değişkenliğinin önemli olduğu senaryolarda avantaj sağlar. Zaman-domeni temelli modeller, özellikle mobil kullanıcılar için daha güvenilir sonuçlar üretir. Ancak, zaman çözünürlüğünün artırılması uygulama karmaşıklığını da artırır (Goldsmith, 2005).

3.1. SEZGİSEL ALGORİTMALAR

3.1. Giriş

Sezgisel algoritmalar (heuristic algorithms), doğadaki süreçlerden ve fenomenlerden ilham alarak geliştirilmiş, karmaşık optimizasyon problemlerine çözüm bulmak için kullanılan güçlü yöntemlerdir. Bu algoritmalar, çözüm uzayında küresel en iyi çözümü bulmaya çalışırken, yerel minimumlara takılmadan ilerleyebilme yetenekleriyle öne çıkarlar (Talbi, 2009).

Geleneksel optimizasyon yöntemleri, genellikle problemin matematiksel formülasyonuna ve belirli varsayımlara dayanırken, sezgisel algoritmalar bu tür katı kısıtlamalara ihtiyaç duymadan çalışabilir. Özellikle; yüksek boyutlu, doğrusal olmayan, gürültülü ve karmaşık çözüm uzaylarına sahip problemler için uygundur.

Sezgisel algoritmaların en belirgin özellikleri: Başlangıç popülasyonu veya başlangıç çözüm seti oluştururlar, Evrimsel, doğadan esinlenen veya sürü zekası gibi mekanizmalarla çözüm geliştirme süreci yürütürler, Optimum çözüme ulaşana kadar yinelemeli olarak çalışırlar. Bu tez kapsamında incelenen başlıca sezgisel algoritmalar şunlardır: İstilacı yabancı ot (İYO), Öğretmen öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması (ÖÖTO) Karıştırılmış kurbağa sıçrama algoritması (KKSA), Mors optimizasyon algoritması (MOA) (Mirjalili, 2022).

Her bir algoritma, doğadaki farklı mekanizmaları modelleyerek çözüm arayışında kendine özgü stratejiler uygular. Aşağıdaki alt bölümlerde bu algoritmalar detaylı şekilde tanıtılacaktır. Yang, (2010).

3.1.2 Meta-Sezgisel Algoritmaların Genel Yapısı ve Mantığı

Meta-sezgisel algoritmalar, klasik optimizasyon yöntemlerinin çözmekte zorlandığı doğrusal olmayan, çok boyutlu ve karmaşık problemlerde esnek ve güçlü çözüm stratejileri sunan, doğadan ilham alan optimizasyon teknikleridir. Bu algoritmalar, belirli bir probleme özgü olmadan geniş problem kümelerinde uygulanabilirlikleri ve global çözüme yakın sonuçlar üretebilmeleri nedeniyle mühendislikten biyoinformatiğe kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu algoritmaların genel sınıflandırması Şekil 3.1’de gösterildiği üzere kullanılan doğa temelli modellemeye göre dört ana grupta toplanmaktadır:

Sürü Tabanlı Algoritmalar: Bu sınıftaki algoritmalar, bireylerin grup hâlinde organize hareketinden esinlenir. Örneğin; Parçacık sürü optimizasyonu, Kuşların sürü davranışı temel alınır. Yapay arı koloni algoritması; arıların nektar arama süreci modellenir. Balık sürüsü algoritması; balıkların yem arama davranışlarını yansıtır.

Doğadan Esinlenen Algoritmalar: Bitkiler, hayvanlar ya da doğal evrim süreçlerinden ilham alır. Örneğin; İstilacı yabancı ot Algoritması (İYO): Bitkilerin çevreye yayılma ve rekabet süreçlerine dayanır. Mors optimizasyon algoritması; Mors avlanma davranışlarını simüle eder. Yarasa Algoritması ve Guguk Kuşu Algoritması gibi algoritmalar bu grupta yer alır.

Biyocoğrafyaya Tabanlı Algoritmalar: Canlıların yaşam alanlarının oluşumu, göç ve adaptasyon mekanizmalarını temel alır. Örneğin: Gri kurt optimizasyonu; Kurtların avlanma stratejilerine dayanır. Dendritik hücre algoritması; Bağışıklık sisteminin savunma mekanizmalarını örnek alır.

Fizik Tabanlı Algoritmalar: Fiziksel sistemler ve doğa yasaları kullanılarak geliştirilmiştir. Örneğin; simüle tavlama; Metalürjideki ısıtma işlem süreçlerinden esinlenir. Kara delik ve merkez kuvvet algoritmaları fiziksel çekim etkilerine dayanır (Yang, 2010).

3.1.3 Tez Kapsamında İncelenen Başlıca Sezgisel Algoritmalar

Bu tez kapsamında incelenen ve OFDM sistemlerinde kanal kestirimi amacıyla uygulanan başlıca sezgisel algoritmalar şunlardır:

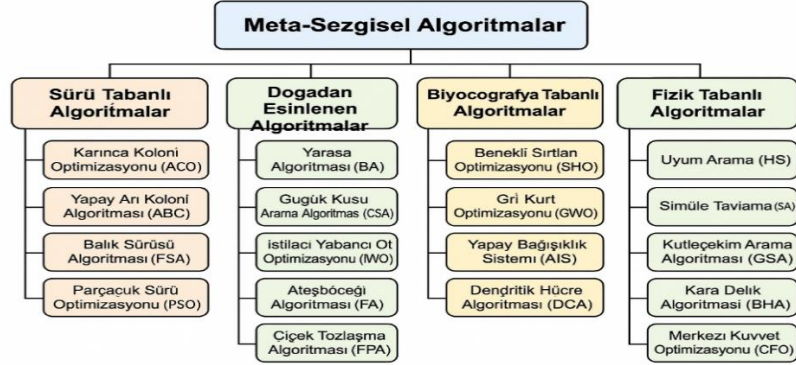
İstilacı Yabancı Ot Optimizasyonu (İYO): Çözüm uzayında bitki kolonilerinin yayılma ve çevreye uyum süreçlerini simüle eder. Popülasyon dinamiklerine dayalı etkili bir keşif ve sömürü dengesi sağlar. (Mehrabian, vd., (2006))

Öğretmen-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO): Öğrenci ve öğretmen etkileşimi üzerinden bilgi aktarımını modelleyen, parametresiz ve sade yapıya sahip bir algoritmadır (Rao, vd., 2011).

Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA): Farklı memeplexler içindeki kurbağaların zıplama ve yer değiştirme süreçleriyle global arama gerçekleştirilir (Eusuff, vd. 2003).

Mors Optimizasyon Algoritması (MOA): Avlanma davranışına göre spiral hareket ile çözüm uzayında yakınsama sağlar. (Tokur Bozkurt, 2025).

Bu algoritmalar doğadaki farklı mekanizmaları modelleyerek, kanal kestirimi gibi doğrusal olmayan optimizasyon problemlerine etkin ve yenilikçi çözümler sunmaktadır. Aşağıdaki bölümlerde, bu algoritmaların yapıları, matematiksel modelleri ve uygulama adımları detaylı şekilde incelenecektir.



Şekil 3.1. Meta sezgisel algoritmaların genel blok diyagramı (Talbi, 2009).

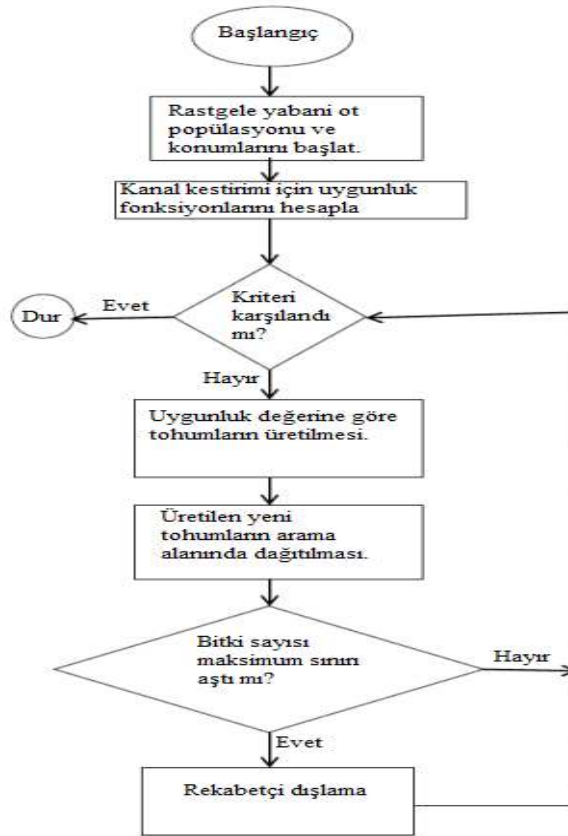
3.2. İstilacı Yabancı Ot (İYO) Algoritması

İstilacı Yabancı Ot Optimizasyonu Mehrabian ve Lucas tarafından 2006 yılında geliştirilmiş doğadan esinlenen sezgisel bir algoritmadır. Bu algoritma, istilacı yabancı otların bir alanda yayılma ve çoğalma davranışlarını taklit ederek optimum çözümler arar. İYO, dinamik bir popülasyon sistemi kullanarak zamanla çözüm uzayında daha iyi bölgelerde yoğunlaşır. Başlangıçta rastgele yerleştirilen tohumlar, zaman içinde çoğalarak ve yayılma yoğunluğunu artırarak daha uygun çözümler üretir (Mehrabian, 2006).

3.2.1. İYO'nun İşleyiş Adımları

İstilacı yabancı ot algoritması, doğadaki yabancı otlar topluluğunun sağlamlığını, uyum sağlama yeteneğini ve rastgeleliğini taklit etmeye çalışır. Yabancı otları bu kadar özel yapan şey nedir? Yabancı otlar ilk hareket edenler olma eğilimindedir ve çeşitli mekanizmalar aracılığıyla her yere yayılırlar. Bu nedenle, nadiren nesli tükenmekte olan türler kategorisine girerler. Yabancı otların hayatta kalmaya yönelik adaptasyon özelliklerinin çoğuna sahiptir. Genetik, arı ve diğer bazı algoritmaların aksine bir yabancı ot kolonisinin ayırt edici özelliği, istisnasız olarak kolonideki tüm bitkiler tarafından tohum ekiminin garanti olmasıdır. Bu, en kötü adapte olmuş bitkilerin bile yavru bırakmasını mümkün kılar, çünkü her zaman en kötü olanın global ekstremuma en yakın olma olasılığı sıfır değildir. Yabancı otların her biri mümkün olan minimum miktardan mümkün olan maksimum miktara kadar olan

şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.3. İstilacı yabancı ot algoritmali kanal kestiriminin akış şeması (Mehrabian, 2006)

Başlangıç Popülasyonu: Rastgele seçilmiş bireylerden oluşan bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her birey bir tohum olarak kabul edilir.

Uygunluk Değerlendirmesi: Her tohumun uygunluk değeri değerlendirilir.

Tohumların Üremesi: Yüksek uygunluk değerine sahip bireyler daha fazla sayıda yeni tohum üretir. Her bireyin oluşturacağı tohum sayısı, uygunluk fonksiyonuna bağlıdır.

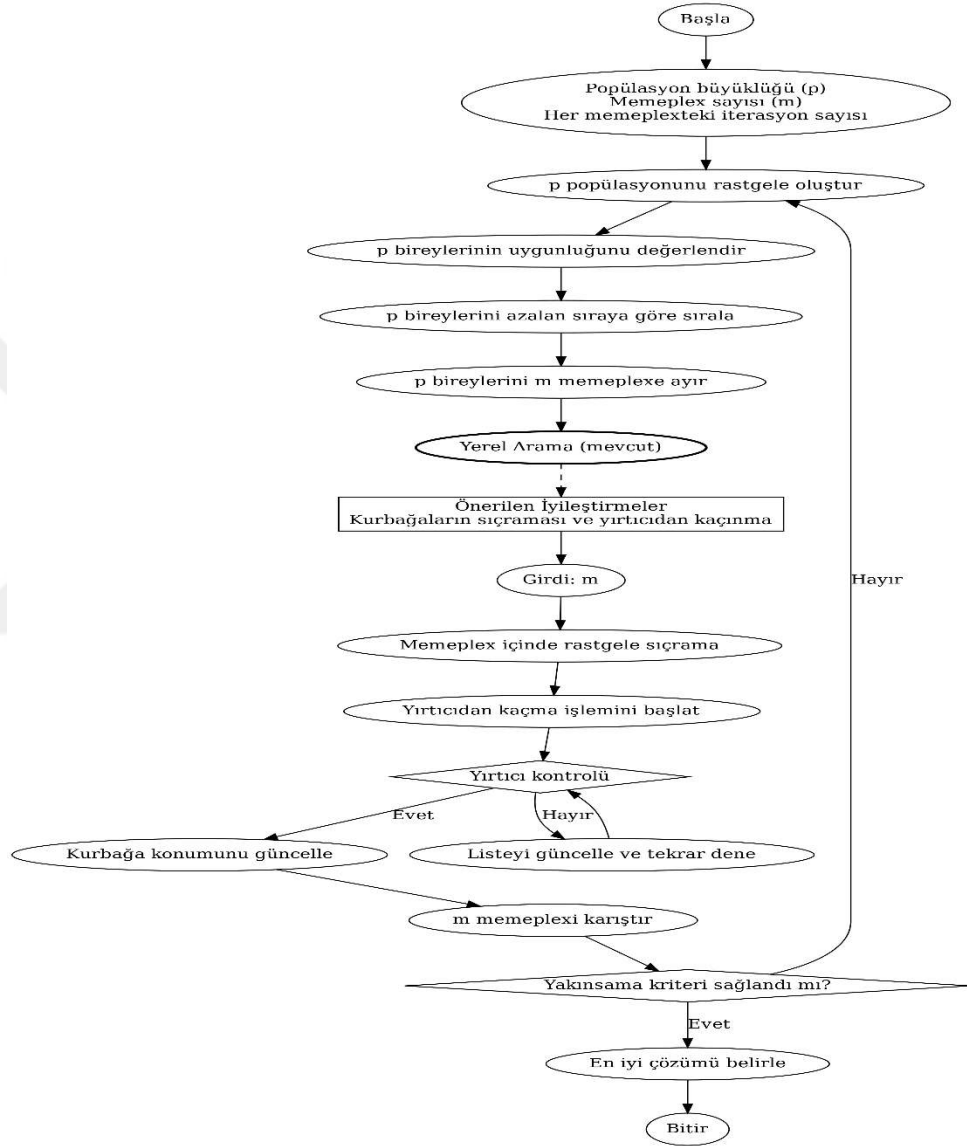
Yayılma: Yeni tohumlar, mevcut bireyin etrafına belirli bir varyansla yerleştirilir. Bu yayılma, Gauss dağılımı veya normal dağılım üzerinden yapılabilir. Yayılma bölgesi iterasyon ilerledikçe daralır ve yakınsama sağlanır.

Seçilim: Belirli bir popülasyon sınırına ulaşıldığında, en uygun bireyler seçilerek sonraki nesle aktarılır.

3.3. Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA)

KKSA, bir grup kurbağanın potansiyel olarak en fazla miktarda yiyeceğe sahip

bir noktayı aramak için hareket ederken sergiledikleri davranışa dayanan sezgisel bir optimizasyon yöntemidir (Eusuff, vd., 2006). KKSA popülasyonunu oluşturan kurbağaların her biri, problemin amaç fonksiyonu ve kısıtlamalarına dayalı bir çözümü temsil eder. Bu değişkenler, her bir bireyin problemin çözüm uzayındaki konumunu belirler. Şekil 3.4'te simülasyonda kullanılan KKSA algoritmasının akış şeması sunulmuştur



Şekil 3.4. KKSA Akış Şeması (Eusuff, vd.,2003)

Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA), 2003 yılında Eusuff ve Lansey tarafından geliştirilmiş, popülasyon temelli ve memetik (hibrit) bir sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. KKSA, kurbağa topluluklarının bir su kaynağına ulaşmak için birbirleriyle bilgi paylaşarak arayışta bulunmalarını simüle eder.

Bu algoritma, Parçacık sürü optimizasyonu ve memetik algoritmaların bir

kombinasyonudur. Hem küresel hem yerel arama kabiliyetini bünyesinde barındırır ve çözüm uzayında etkili bir keşif yapar.

3.4. Öğretmen-Öğrenci Tabanlı Optimizasyon (TLBO / ÖÖTO)

Öğretmen-Öğrenci Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) algoritması, 2011 yılında Rao ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş olan bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. TLBO'nun temelinde, bir sınıf ortamında öğretmen ile öğrenciler arasındaki etkileşim ve öğrenciler arası öğrenme süreçleri yer almaktadır. Algoritma, herhangi bir kontrol parametresine ihtiyaç duymaması ve sade yapısıyla dikkat çekmektedir (Rao vd., 2011).

ÖÖTO algoritması iki ana aşamadan oluşur:

Öğretmen Aşaması: Bu aşamada öğretmen, sınıfın genel bilgi seviyesini artırmak için çaba sarf eder. Tüm öğrencilerin (çözümlerin) ortalamasını öğretmenin seviyesine yaklaştırmak hedeflenir. Öğretmen, en iyi çözüm olarak tanımlanır ve diğer çözümler buna göre güncellenir.

Güncelleme formülü şu şekildedir:

$$X_{\text{yeni}} = X_{\text{mevcut}} + r * (X_{\text{öğretmen}} - T_F * X_{\text{ortalama}}) \quad (1.1)$$

burada; r rastgele sayı, T_F öğretmen faktörüdür (1 veya 2 olabilir), X_{ortalama} mevcut sınıf ortalamasını gösterir.

Öğrenci Aşaması: Bu aşamada öğrenciler birbirlerinden öğrenerek bilgilerini geliştirirler. Rastgele seçilen iki çözüm karşılaştırılır, daha iyi olanın bilgisi diğerine aktarılır. Eğer yeni çözüm mevcut çözümden daha iyiye, güncellenir.

3.5. Mors Optimizasyon Algoritması (MOA)

Mors Optimizasyon Algoritması (MOA), ilk olarak 2016 yılında Mirjalili ve Lewis tarafından geliştirilen doğadan esinlenen bir sezgisel algoritmadır. Bu algoritma, Morse potansiyel fonksiyonu adı verilen fiziksel bir modelden türetilmiştir. Morse potansiyeli, atomlar arası bağ kuvvetlerini ve bu kuvvetlerin atomların uzaklıklarına göre nasıl değiştiğini matematiksel olarak ifade eder. Bu özelliği ile MOA, çözüm uzayındaki noktalar arasındaki etkileşimleri benzeterek optimizasyon problemlerinde küresel çözümlere ulaşmayı hedefler.

MOA, klasik sürü tabanlı algoritmaların aksine, her çözümün diğer çözümlerle olan etkileşimini Morse potansiyeline göre hesaplar. Böylece çözümler, ya birbirlerini

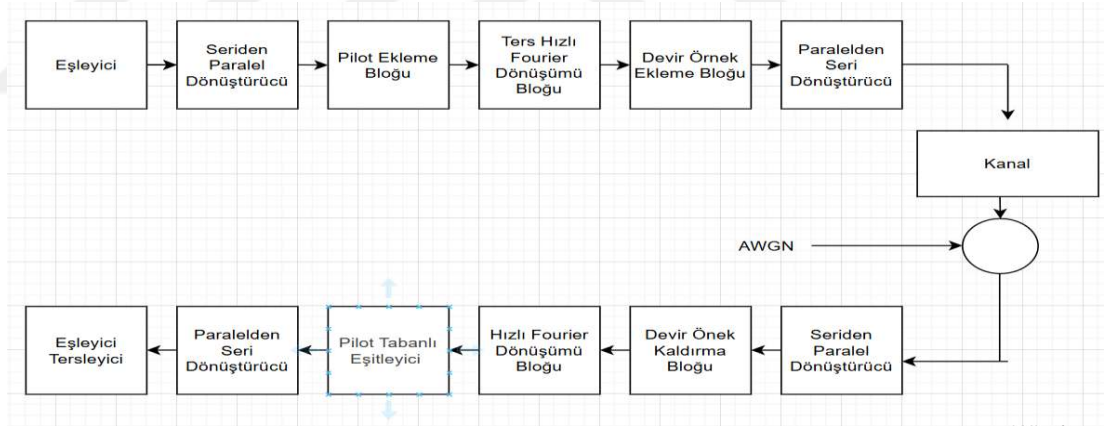
iter ya da çeker; bu mekanizma sayesinde hem keşif (exploration) hem de sömürü (exploitation) süreçleri dengeli bir şekilde yürütülür. Bu yöntem, lokal minimumlara sıkışma riskini azaltarak daha etkili bir optimizasyon süreci sağlar.

MOA, özellikle yüksek boyutlu ve karmaşık problem uzaylarında başarılı sonuçlar göstermektedir. Literatürde mühendislik optimizasyonları, sinyal işleme, makine öğrenmesi ve yapay zekâ tabanlı sistemlerde uygulamaları yaygındır (Mirjalili, vd., 2016).

3.6. Sezgisel Algoritmalar İçin Simülasyonlarda Kullanılan OFDM Yapısı

Sezgisel algoritmaların OFDM sistemlerinde kanal kestirimi amacıyla kullanılabilmesi için, uygun şekilde modellenmiş bir simülasyon ortamı gereklidir. Bu ortam, hem fiziksel katmandaki kanal koşullarını hem de sayısal işleme adımlarını doğru yansıtarak algoritmaların performansını objektif şekilde karşılaştırmaya olanak tanır.

Bu tez kapsamında sezgisel algoritmaların karşılaştırmalı olarak test edildiği OFDM simülasyon yapısı aşağıdaki ana bileşenlerden oluşmaktadır:



Şekil 3.5. Kanal Kestirimli OFDM sisteminin genel alıcı-verici diyagramı

Bu çalışmada, sezgisel algoritmaların kablosuz haberleşme sistemlerinde kanal kestirimindeki performanslarını değerlendirebilmek amacıyla detaylı şekilde modellenmiş bir OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) simülasyon yapısı kullanılmıştır. OFDM, frekans seçici kanallarda yüksek veri hızlarında etkinlik sağlayan çok taşıyıcılı bir modülasyon tekniğidir. Simülasyon ortamında kullanılan yapı, gerçek dünyadaki kanal koşullarını olabildiğince yansıtan bir biçimde hazırlanmıştır. Özellikle çok yollu yayılım, doppler etkisi, zamanla değişen kanal karakteristikleri gibi kablosuz kanal etkileri göz önünde bulundurulmuş ve sistem

parametreleri bu koşullara uygun şekilde yapılandırılmıştır. Bu yapı sezgisel algoritmaların adaptif davranışlarını ve kanal tahmini başarımını karşılaştırmalı olarak incelemek için temel bir altyapı sağlamaktadır.

Tasarlanan sistem, bir eşleyici ile başlamakta olup, veri sembollerinin oluşturulması bu blokta gerçekleşmektedir. Bu aşamadan sonra, semboller seriden paralel dönüştürücü aracılığıyla paralel veri akışına dönüştürülmektedir. Paralel veri akışına, kanal kestirimi ve eşitleme işlemleri için gerekli olan pilot bilgilerinin eklendiği pilot ekleme bloğu entegre edilmiştir.

Veri akışı, frekans alanından zaman alanına dönüştürmek amacıyla ters hızlı Fourier dönüşümü bloğu üzerinden geçirilir. Ardından, devir ön ek ekleme bloğu ile çok yollu yayılım kaynaklı semboller arası girişimi (ISI) azaltmak için koruma aralığı eklenir. Elde edilen veriler, paralelden seri dönüştürücü yardımıyla seri forma dönüştürülür ve kanal üzerinden iletilir. Bu aşamada, sisteme AWGN eklenerek gerçekçi kanal koşulları simüle edilir.

Alıcı tarafında, iletilen sinyal önce seriden paralel dönüştürücü ile paralel formata dönüştürülür. Ardından, eklenen koruma aralığı devir ön ek kaldırma bloğu tarafından kaldırılır. Zaman alanında bulunan sinyal, frekans alanına dönüştürülmek üzere hızlı Fourier dönüşümü bloğu 'ndan geçirilir. Bu noktada, kanal etkilerinin giderilmesi amacıyla pilot tabanlı eşitleyici uygulanır.

Eşitlenmiş veri akışı, paralelden seri dönüştürücü tarafından tekrar seri forma dönüştürülür ve orijinal bilgilere ulaşmak için eşleyici tersleyici bloğu ile işlem tamamlanır.

Simülasyon ortamında kullanılan OFDM sisteminin ana parametreleri; taşıyıcı frekans, bant genişliği, alt taşıyıcı sayısı, modülasyon formatı (BPSK, QPSK, 16-QAM), çevrimsel önek uzunluğu ve sembol süresi gibi birçok teknik değişkeni kapsamaktadır. Veri iletim süreci, seri-paralel dönüşümle başlayan ve ardından modülasyon, pilot sembollerin yerleştirilmesi, IFFT işlemi, çevrimsel önek eklenmesi ve kanal modeli üzerinden iletim gibi adımlarla devam eden bir dizilime sahiptir. Kanal modeli olarak Rayleigh sönümlemeli çok yollu kanal tercih edilmiş; bu model zamanla değişen ve çeşitli yansımalarla maruz kalan sinyallerin geçişini ifade ederek sezgisel algoritmaların zorluk düzeyini artırmıştır.

Alıcı tarafında çevrimsel önek çıkarıldıktan sonra FFT işlemi uygulanarak sinyal tekrar frekans domenine dönüştürülmüştür. Pilot taşıyıcılar yardımıyla kanal tahmini

gerçekleştirilmiş ve burada önerilen sezgisel algoritmalar devreye alınmıştır. Bu algoritmalar örneğin İYO, KKSA, MOA ve ÖÖTA pilot bilgilerinden yola çıkarak kanalın genlik ve faz parametrelerini tahmin etmiş, daha sonra bu tahminler eşitleme bloğunda kullanılarak demodülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonlar sonucunda elde edilen çıktı verileri, Bit Hata Oranı, Ortalama Karesel Hata ve Hesaplama Zamanı gibi metrikler kullanılarak analiz edilmiştir. Böylece her bir sezgisel algoritmanın farklı kanal koşullarındaki başarımı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve avantaj-dezavantaj analizleri yapılmıştır. Bu yaklaşım, özellikle yeni geliştirilen ve klasik kestirim yöntemlerine alternatif olarak öne çıkan yapay zekâ tabanlı algoritmaların iletişim sistemlerine entegrasyonu açısından önemli bir zemin oluşturmaktadır.

4.BÖLÜM: SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

4.1. Giriş

Kablosuz iletişim sistemlerinde kanal kestirimi, sinyal kalitesini ve sistem performansını doğrudan etkileyen kritik bir süreçtir. Geleneksel yöntemler olan En Küçük Kareler (LS) ve Minimum Ortalama Kare Hatası (MMSE), basitlikleri ve matematiksel sağlamlıkları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, LS yöntemi gürültüye karşı hassasiyetiyle bilinirken, MMSE yöntemi önceden kanal istatistik bilgisine ihtiyaç duyması nedeniyle pratik uygulamalarda kısıtlayıcı olabilmektedir. Bu sınırlamalar, meta-sezgisel algoritmaların kanal kestirimi problemlerine uygulanmasını cazip hale getirmiştir. Meta-sezgisel yöntemler, doğadan esinlenen optimizasyon teknikleriyle karmaşık problemlere etkili çözümler sunabilmekte ve geleneksel yöntemlerin dezavantajlarını aşmada önemli bir potansiyel taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, dört farklı meta-sezgisel algoritma; İstilacı Yabancı Ot Optimizasyonu (İYO), Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) ve Mors Optimizasyon Algoritması (MOA), OFDM sistemlerinde kanal kestirimi performanslarını artırmak amacıyla incelenmiştir. Bu algoritmalar, doğadaki biyolojik veya sosyal süreçlerden ilham alarak geliştirilmiş olup, karmaşık arama uzaylarında global optimuma yakın çözümler bulma yetenekleriyle öne çıkmaktadır. Özellikle yüksek SNR bölgelerinde geleneksel yöntemlerle karşılaştırılabilir veya daha iyi performans sergileyebilmeleri, bu algoritmaların 5G ve ötesi yüksek veri hızı senaryolarında kullanımını desteklemektedir. Ayrıca, bu yöntemlerin önceki kanal istatistik bilgisine ihtiyaç duymaması, pratik uygulamalarda önemli bir esneklik sağlamaktadır.

Çalışmanın bir diğer önemli katkısı, farklı modülasyon teknikleri (QPSK ve 16QAM) ve pilot yoğunlukları altında algoritmaların performanslarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesidir. Bu sayede, her bir algoritmanın güçlü ve zayıf yönleri ortaya konmuş, hangi senaryolarda daha etkili oldukları belirlenmiştir. Örneğin, İYO ve KKSA algoritmalarının yüksek SNR bölgesinde MMSE'ye kıyasla daha düşük BER ve MSE değerleri sergilemesi, bu yöntemlerin yüksek veri hızı gerektiren uygulamalarda tercih edilebileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, MOA'nın dinamik adaptasyon yeteneği ve gruplar halinde çalışma stratejisi, değişken kanal koşullarında bile tutarlı bir performans sergilemesini sağlamıştır.

4.2. Sezgisel Algoritma Yöntemleri İçin OFDM Sistem Parametreleri

Sezgisel algoritmali kanal kestiriminin benzetim çalışmaları için kullanılması planlanan örnek parametreler aşağıdaki Tablo 4.1’de gösterilmektedir. Benzetim çalışmalarında farklı modülasyon teknikleri ve pilot yoğunluklarının, belirli bir kanal ve gürültü modeli altında sinyal kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. İletim sistemi, 4096 FFT boyutu ve 1024 uzunluğunda ön ek kullanılarak yapılandırılmıştır. Pilot düzenleme olarak tarak yapısı tercih edilmiş olup, pilot yoğunluğu 1/6 oranlarında değerlendirilmiştir. Modülasyon teknikleri olarak QPSK ve 16QAM kullanılmış ve 30 kHz alt taşıyıcı aralığı seçilmiştir. Kanal gürültü modeli olarak AWGN esas alınmıştır. Performans değerlendirmesi için (SNR) aralığı 0-30 dB arasında, 1 dB adımlarla analiz edilmiştir.

Tablo 4.1 OFDM sisteminin benzetim parametreleri

Parametreler	Değer
FFT boyutu	4096
CP uzunluğu	1024
Pilot düzenleme	Tarak
Pilot yoğunluğu	1/6
Modülasyon	QPSK, 16QAM
Alt taşıyıcı aralığı	30 kHz
Gürültü modeli	AWGN
SNR aralığı	0-30 dB

4.3. Sezgisel Algoritmalar Kullanarak Kanal Kestirimi

4.3.1. İstilacı Yabancı Ot (İYO) Algoritması Kullanarak Kanal Kestirimi

Meta-sezgisel algoritmalarından biri olan İYO optimizasyon algoritması, doğadan ilham alan popülasyon algoritmalarındandır ve sınırlı bir alandaki yabancı otların sınırlı bir süre boyunca hayatta kalma mücadelesindeki davranışlarını yansıtır. Yabancı otlar, saldırgan büyümeleriyle mahsuller için ciddi bir tehdit oluşturan güçlü otlardır. Çok dayanıklıdırlar ve çevresel değişikliklere uyum sağlayabilirler. Bu özellikleri göz önünde bulundurarak bu çalışmada, güçlü bir optimizasyon algoritması olan İYO optimizasyonunun kablosuz iletişim sistemlerinde kanal kestirimi için nasıl kullanılabileceği araştırılmıştır. İstilacı yabancı ot optimizasyonun kanal tahmini üzerindeki performansı değerlendirilmiş ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

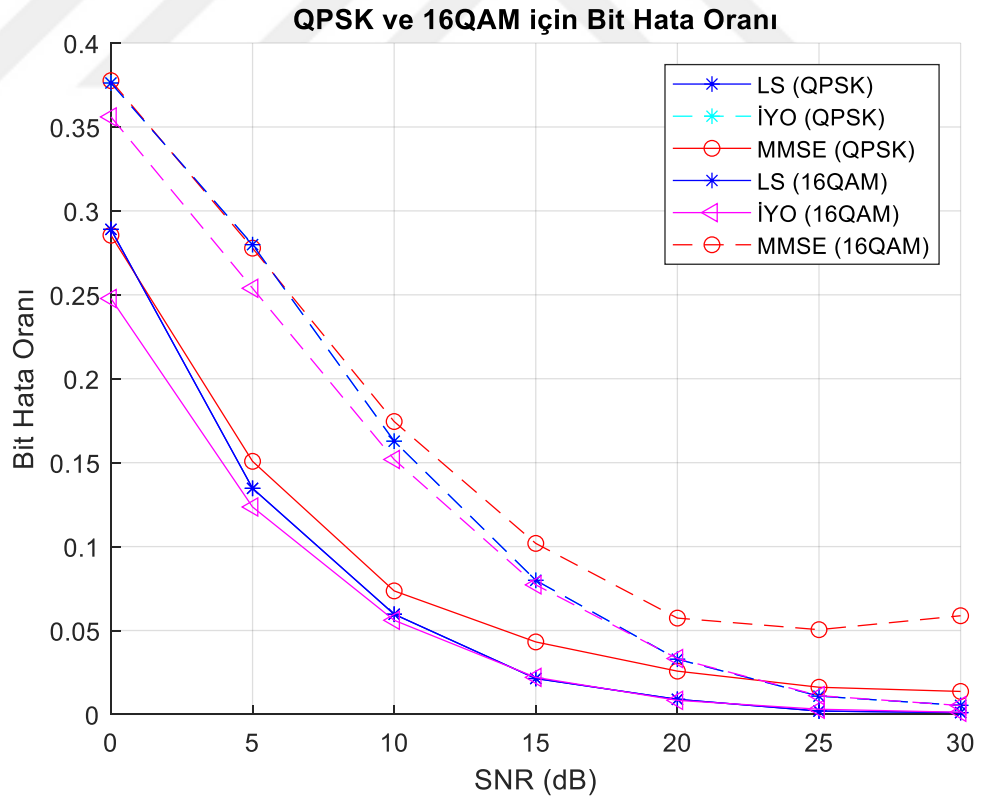
Tablo 4.2 İYO Optimizasyon Algoritmasıyla Kanal Kestiriminde Kullanılan Parametreler

Parametre	Değer	Açıklama
MaxIt	10	Algoritmanın çalışacağı maksimum iterasyon sayısı.
nPop0	10	Başlangıç popülasyonundaki birey (yabancı ot) sayısı.
nPop	25	Popülasyonun ulaşabileceği maksimum birey sayısı.
Smin	0	Bir yabancı otun üretebileceği minimum tohum sayısı.
Smax	5	Bir yabancı otun üretebileceği maksimum tohum sayısı.
Exponent	2	Standart sapmanın iterasyonla nasıl azalacağını belirleyen üs değeri.
sigma_initial	0.5	Tohum dağılımı için başlangıç standart sapma değeri.
sigma_final	0.001	Tohum dağılımı için son standart sapma değeri.
nVar	3	Optimizasyon probleminin boyutu (bilinmeyen değişken sayısı).
Var _{max}	[50, 100, 400]	Her bir değişkenin üst sınırı (ub).
Var _{min}	[0, 20, 0]	Her bir değişkenin alt sınırı (lb).

İYO algoritmasının kanal kestirimi problemine uygulanmasında, algoritmanın optimizasyon performansını ve kestirim doğruluğunu doğrudan etkileyen çeşitli kontrol parametreleri tanımlanmıştır. Bu parametreler arasında algoritmanın maksimum iterasyon sayısını belirleyen MaxIt, başlangıç popülasyonu büyüklüğü olan nPop0 ve popülasyonun ulaşabileceği en yüksek birey sayısını ifade eden *nPop* yer almaktadır. Ayrıca, her bir bireyin üretebileceği minimum ve maksimum tohum sayısını belirleyen Smin ve Smax parametreleri, popülasyonun çeşitliliğini ve adaptif davranışını kontrol etmede kritik rol oynamaktadır. İlgili parametrelerin tümü, değerleriyle birlikte Tablo 4.2’de sunulmaktadır. Tohumların çözüm uzayında nasıl dağıtılacağını belirlemek amacıyla kullanılan sigma_initial ve sigma_final parametreleri, algoritmanın arama sürecinde başlangıçtaki keşif (exploration) davranışından zamanla daha dar bir sömürü (exploitation) bölgesine geçişini sağlar. Bu geçişin iteratif yapısı, Exponent parametresi ile kontrol edilir. Optimizasyon

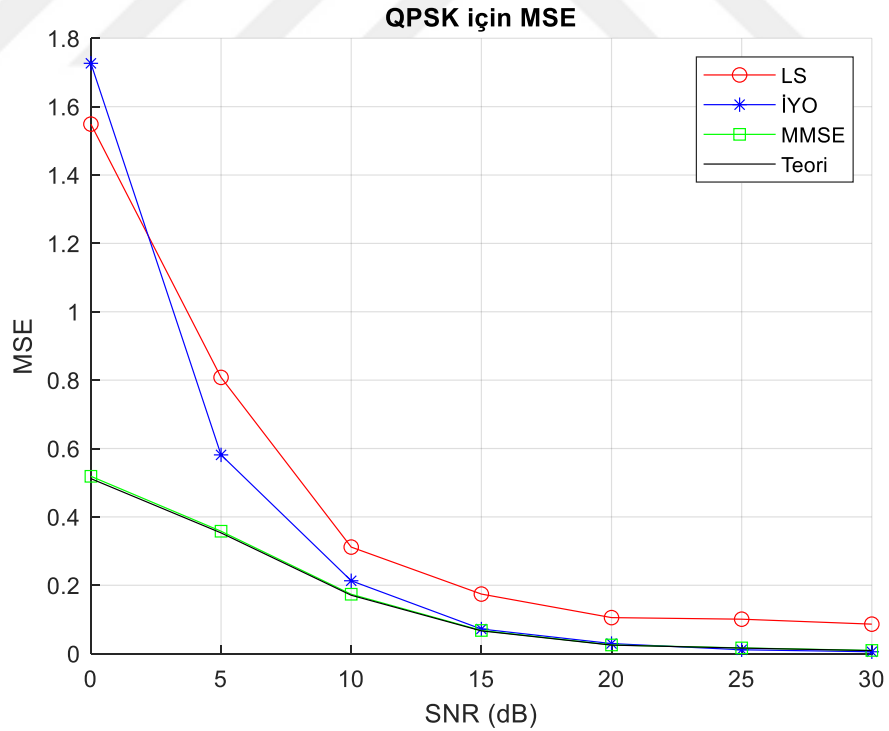
problemine ilişkin çözülmesi gereken bilinmeyen parametre sayısı n_{Var} ile tanımlanırken; bu parametrelerin alt ve üst sınırları ise sırasıyla Var_{min} ve Var_{max} ile belirlenmiştir.

Parametrelerin uygun biçimde seçilmesi, algoritmanın küresel minimuma yakınsama kapasitesini artırmakta ve çözüm uzayında dengesiz arama davranışlarını önlemektedir. Tezin simülasyon çalışmalarında, İYO tabanlı kanal kestirim yönteminin başarımı; BER ve SNR değerlendirme ölçütleri üzerinden kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen algoritmanın hem QPSK hem de 16-QAM modülasyon tipleri altında test edilmesiyle detaylandırılmıştır. Simülasyonlar sonucunda, İYO algoritması kullanılarak yapılan kanal kestirimi, özellikle yüksek SNR bölgelerinde MMSE algoritmasına oldukça yakın bir performans sergilerken, LS algoritmasına kıyasla her iki modülasyon türünde de belirgin üstünlük göstermiştir. Bu bulgular, İYO algoritmasının kanal tahmini problemlerinde güçlü bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.1. İYO algoritmali kanal kestiriminin QPSK ve 16QAM modülasyonu için LS ve MMSE algoritmalarıyla kıyaslanmasının SNR değerlerine karşılık gelen BER

Genel olarak Şekil 4.1 incelendiğinde, MMSE ve İYO eğrileri birbirine yakın bir seyir izlerken, LS eğrisinden belirgin bir şekilde ayrılmaktadır. Daha ilginç bir şekilde, MMSE ve İYO algoritmaları kanal kestiriminin performansının SNR değerlerine bağlı olarak hafif bir farklılık gösterdiği gözlemlenebilir. Özellikle, 20 dB üzeri yüksek SNR bölgesinde İYO algoritması MMSE algoritmasından daha iyi performans gösterirken, düşük SNR bölgesinde durum tam tersidir. Bunun nedeni, İYO algoritmasının hedef fonksiyonunun MSE'yi azaltmayı değil, kanal eşitleme sonrası alınan sinyalin 'en net' şekilde kümelenmesini sağlayarak BER'i düşürmeyi hedeflemesidir. Düşük SNR koşullarında sinyal, gürültüden ciddi şekilde etkilenir ve kümelenmeyi sağlamak neredeyse imkânsız hale gelir. Bu, hedef fonksiyonun gürültünün çok büyük olduğu durumlarda etkili çalışmadığı anlamına gelir. Öte yandan, SNR arttıkça sinyal, kümeler içinde nispeten iyi bir şekilde dağılır ve bu da 'istilacı yabancı otların', eşitleme sonrası sinyalin ideal kümelenmeye en yakın olacağı uygun bir konum bulmasına olanak tanır. Yüksek SNR koşullarında noktalar ideal konumlarına daha yakın kümelenir, bu da daha iyi performans anlamına gelir.



Şekil 4.2. İYO algoritmaları kanal kestiriminin QPSK modülasyonu için LS ve MMSE algoritmalarıyla kıyaslanmasının SNR değerlerine karşılık gelen MSE değerleri

Şekil 4.2'deki İYO algoritmaları kanal kestiriminin QPSK modülasyonu için LS ve MMSE algoritmalarıyla kıyaslanmasının SNR değerlerine karşılık gelen MSE

değerleri gösterilmektedir. MMSE teori ile neredeyse aynı sonucu gösterirken İYO algoritmali kanal kestiriminin MSE değeri LS algoritmasına göre çok daha iyi bir performans göstermiştir. MMSE algoritmasının önceki kanal istatistik bilgisine ihtiyaç duyarken İYO algoritmali kanal kestiriminde önceki kanal istatistik bilgisine ihtiyaç yoktur.

4.3.2. Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA) Kullanarak Kanal Kestirimi

Bu çalışmada, doğadan ilham alan meta-sezgisel yöntemlerden biri olan Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA), kanal kestirimi problemini çözmek üzere yapılandırılmıştır. KKSA, popülasyonu memeplex adı verilen alt gruplara ayırarak hem küresel hem de yerel arama yeteneklerini birleştirmeyi amaçlayan güçlü bir optimizasyon yaklaşımıdır. Bu özellikleri sayesinde, kanal eşitleme sürecinde yüksek çözünürlüklü kestirimlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. KKSA'nın uygulama başarımını doğrudan etkileyen kontrol parametreleri Tablo III'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu parametreler, algoritmanın konverjans davranışı, çeşitliliği koruma yeteneği ve çözüm uzayında etkili gezinimi gibi kritik özellikleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. KKS algoritmasının kanal kestiriminde uygulanmasında, çözüm kalitesini doğrudan etkileyen çeşitli kontrol parametreleri yapılandırılmıştır.

Bu parametreler arasında maksimum iterasyon sayısı (MaxIt), memeplex sayısı (nMemeplex), her memeplex'teki birey sayısı (nPopMemeplex) ile bireylerin yeni çözüm üretme kapasitesini belirleyen alpha ve algoritmanın yerel iyileştirme adım sayısını ifade eden beta gibi değerler bulunmaktadır. MaxIt, algoritmanın toplam çalışma süresini belirlerken; nMemeplex ve nPopMemeplex, çözüm uzayının daha verimli taranmasını sağlamak üzere popülasyonun yapısal organizasyonunu tanımlar. Alpha, her bir kurbağanın üreteceği yavru sayısını, beta ise lokal iyileştirme sürecinde yapılacak maksimum iterasyon adedini göstermektedir.

Ayrıca, çözüm uzayında yapılan sıçramaların boyutunu belirleyen sigma ve bu sıçramaların adaptif olarak kontrol edilmesini sağlayan sigma_initial ile sigma_final parametreleri, arama stratejisinin hem keşif (exploration) hem de sömürü (exploitation) yönlerini dengelemeye yönelik olarak belirlenmiştir. Optimizasyon problemi üç bilinmeyenli bir yapıdadır ($nVar = 3$) ve bu değişkenlerin alabileceği sınırlar VarMin ve VarMax ile tanımlanmıştır. Bu parametrelerin tümü, KKS

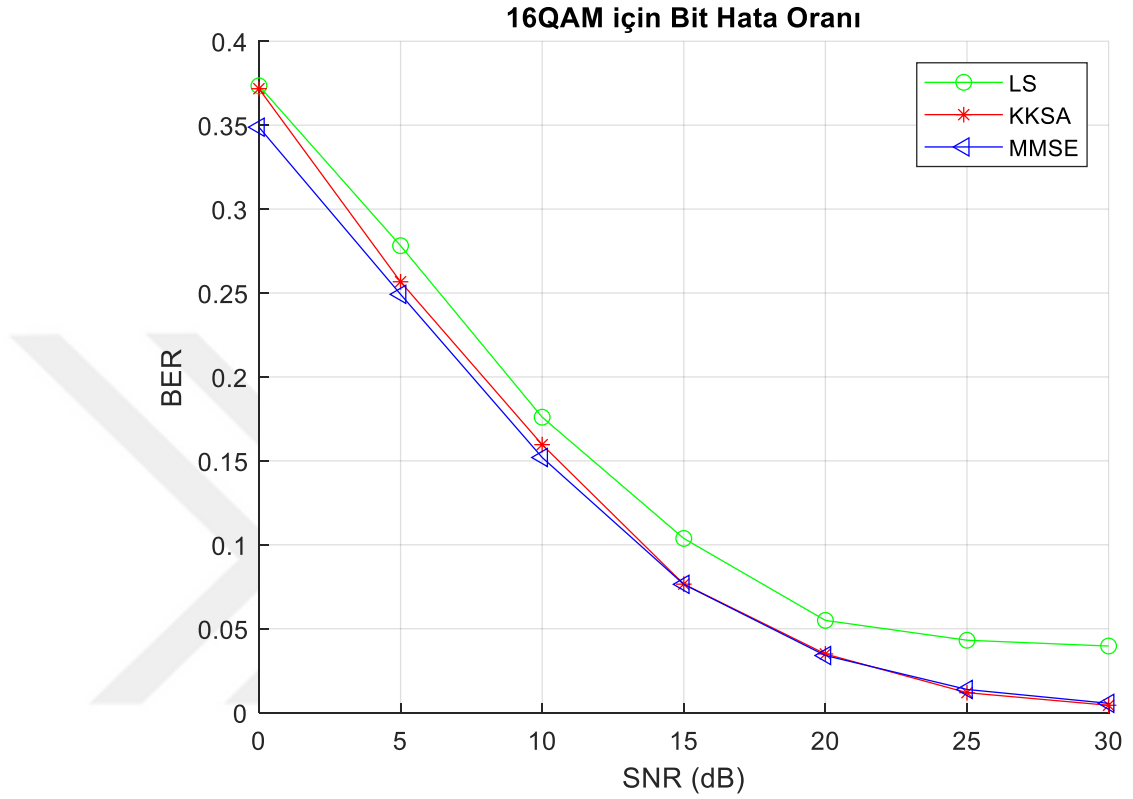
algoritmasının kanal kestirimindeki başarımına doğrudan etki etmekte olup, detaylı değerleri Tablo 4.3'te sunulmuştur.

Tablo 4.3 KKSA tabanlı Kanal Kestiriminde Kullanılan Parametreler

Parametre	Değer	Açıklama
MaxIt	10	Algoritmanın çalışacağı maksimum iterasyon sayısı
nPopMemeplex	10	Her bir memepleksin birey (kurbağa) sayısı
nMemeplex	5	Toplam memepleks (alt grup) sayısı
Alpha	3	Her iterasyonda üretilecek yeni birey (offspring) sayısı
Beta	5	Her memeplekste uygulanacak maksimum yerel arama iterasyon sayısı
Sigma	2	Kurbağaların sıçrama mesafesini belirleyen adım büyüklüğü
sigma_initial	0.5	Başlangıçtaki standart sapma değeri (tohum dağılımı için)
sigma_final	0.001	Son aşamadaki standart sapma değeri
nVar	3	Optimizasyon probleminde çözülecek bilinmeyen değişken sayısı
VarMax	[50, 100, 400]	Her bir değişkenin alabileceği üst sınırlar (ub)
VarMin	[0, 20, 0]	Her bir değişkenin alabileceği alt sınırlar (lb)

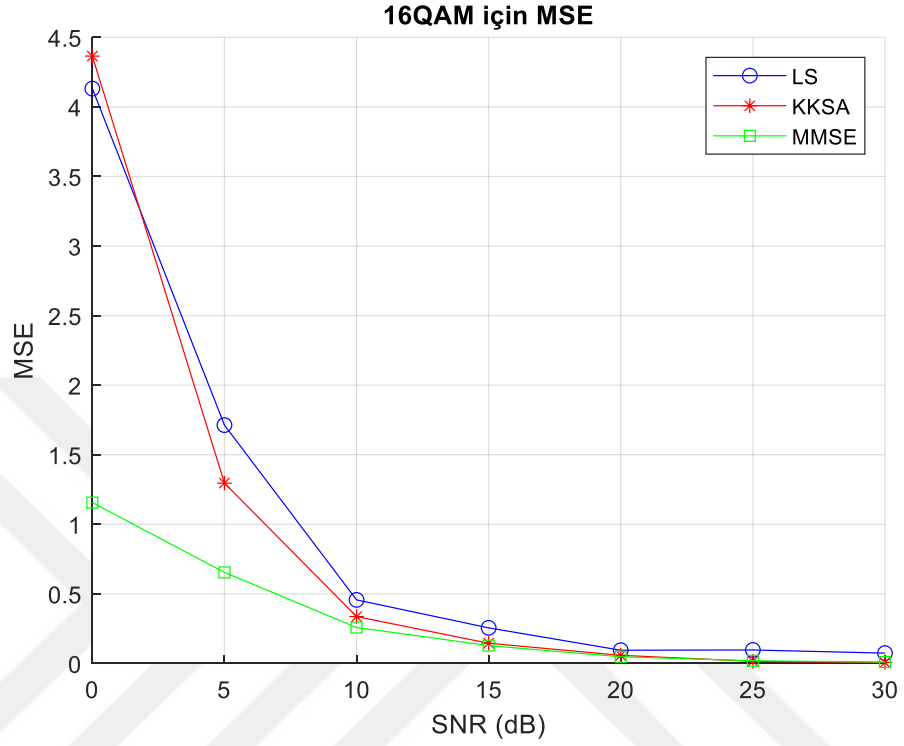
KKSA tabanlı kanal kestirim yöntemi, farklı SNR koşullarında geleneksel algoritmalar olan LS ve MMSE ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Şekil 4.3'te görülebileceği üzere, 16-QAM modülasyonu altında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarında, MMSE ve KKSA algoritmalarının BER eğrileri benzer bir eğilim sergilemekte; buna karşın LS algoritması, belirgin şekilde daha düşük başarımlar göstermektedir. Özellikle, yüksek SNR bölgesi olarak tanımlanan 15 dB üzerindeki

değerlerde, KKSA tabanlı yaklaşımın MMSE yöntemine göre daha düşük BER sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, KKSA'nın amaç fonksiyonunun geleneksel MSE'yi en aza indirmekten ziyade, kanal eşitlemesi sonrası elde edilen sembollerin daha belirgin kümeler oluşturmasını sağlamaya odaklanmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.3. 16QAM için KKSA tabanlı kanal kestiriminin LS ve MMSE ile BER-SNR karşılaştırması

Düşük SNR koşullarında ise sinyal ciddi ölçüde bozulduğundan, KKSA'nın bu kümelenmeyi sağlama kabiliyeti sınırlanmakta, dolayısıyla performans düşmektedir. Ancak SNR değeri yükseldikçe, sinyalin daha net hale gelmesiyle birlikte algoritma, daha tutarlı ve doğru kanal tahminleri üretebilmektedir. Bu eğilim, Şekil 4.4'te MSE-SNR ilişkisini gösteren grafik üzerinden de teyit edilmektedir. MMSE algoritması, teorik referans değerleriyle büyük oranda örtüşen sonuçlar verirken; KKSA, LS'ye kıyasla belirgin şekilde daha düşük MSE değerleriyle öne çıkmaktadır. MMSE'nin yüksek performansı, önceki kanal istatistiksel bilgisine duyduğu gereksinime dayanırken; KKSA tabanlı yöntemin bu tür ön bilgiye ihtiyaç duymadan rekabetçi sonuçlar üretebilmesi, algoritmanın pratik uygulamalardaki potansiyelini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.4. 16QAM için KKSA tabanlı kanal kestiriminin LS ve MMSE ile MSE-SNR karşılaştırması

Şekil 4.4'te QAM için en küçük kareler (LS) ve minimum ortalama kare hata (MMSE) algoritmalarına kıyasla KKSA tabanlı kanal tahmini için sinyal-gürültü oranına (SNR) karşı ortalama kare hata (MSE) değerlerini göstermektedir. MMSE algoritması teoriyle neredeyse aynı sonuçlara ulaşırken, KKSA tabanlı kanal tahmini LS algoritmasına kıyasla önemli ölçüde daha iyi MSE performansı göstermektedir. MMSE algoritmasının, KKSA tabanlı kanal tahmin yöntemi tarafından karşılanmayan bir gereklilik olan önceki kanal istatistiksel bilgisine ihtiyaç duyması kayda değerdir.

4.3.3.ÖÖTO Algoritması Kullanarak Kanal Kestirimi

ÖÖTO algoritmasına dayalı kanal kestirim yaklaşımında kullanılan temel kontrol parametreleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Bu parametreler arasında maksimum iterasyon sayısı (MaxIt), popülasyon büyüklüğü (nPop), optimizasyon problemine ait bilinmeyen parametre sayısı (nVar) ve arama alanı sınırları (VarMin, VarMax) yer almaktadır. MaxIt, algoritmanın toplam döngü sayısını; nPop, her iterasyonda değerlendirilecek birey sayısını tanımlar. VarMin ve VarMax ise, her bir karar

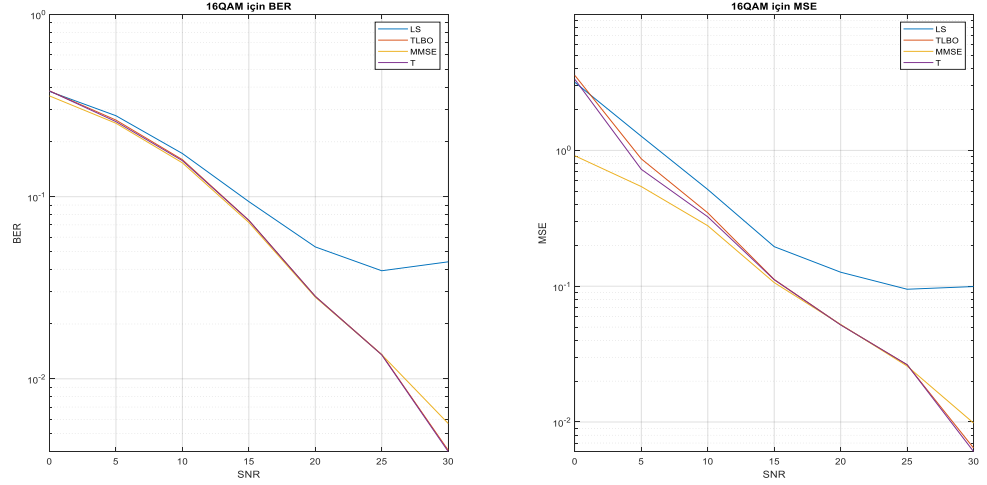
değişkeni için alt ve üst sınırları belirleyerek çözüm uzayını sınırlandırır.

Tablo 4.4 ÖÖTO tabanlı Kanal Kestirimi Parametreler

Parametre	Değer	Açıklama
Max_{it}	10	Maksimum iterasyon sayısı
N_{pop}	10	Popülasyon büyüklüğü
n_{var}	3	Bilinmeyen parameter sayısı
Var_{min}	[0, 20, 0]	Altı sınır vektörü
Var_{max}	[50, 100, 400]	Üst sınır vektörü

ÖÖTO algoritması, öğretmen ve öğrenci aşamalarından oluşan iki temel fazla çalışmakta olup, popülasyon içindeki bireylerin eğitim düzeyine göre yönlendirilmesini esas alır. Bu yapı, algoritmanın hem çözüm uzayını etkin şekilde taramasını hem de yerel minimumlara takılmadan küresel optimuma yaklaşmasını sağlar. Simülasyon ortamında, 16QAM modülasyon şeması ve 1/6 pilot yoğunluğuna sahip OFDM çerçevesi kullanılmıştır. Kanal modeli olarak Gauss dağılımlı beyaz gürültü (AWGN) ortamı esas alınmış, SNR aralığı ise 0-30 dB olarak belirlenmiş ve her bir adımda 1 dB artış uygulanarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.5'te gösterilen sonuçlara göre, ÖÖTO algoritmasının BER-SNR performansı, özellikle orta ve yüksek SNR aralıklarında MMSE algoritmasıyla karşılaştırılabilir düzeyde olup, LS algoritmasına kıyasla kayda değer bir iyileşme sağlamıştır. Düşük SNR koşullarında her üç algoritmanın performansları birbirine yakın seyretmekle birlikte, SNR'nin artmasıyla birlikte ÖÖTO algoritmasının üstünlüğü daha belirgin hale gelmektedir.



Şekil 4.5. ÖÖTO algoritmali kanal kestiriminin 16QAM modülasyonu için LS ve MMSE algoritmalarıyla kıyaslanmasının SNR değerlerine karşılık gelen BER ve MSE

Buna ek olarak, Şekil 4.5'te sunulan MSE-SNR grafiği, ÖÖTO algoritmasının ortalama kare hata açısından LS yöntemine kıyasla oldukça düşük hata değerleri ürettiğini ortaya koymaktadır. MMSE, kanal istatistiklerine duyduğu ihtiyaç sayesinde teorik olarak en düşük MSE değerlerine ulaşabilmektedir; buna karşın ÖÖTO algoritması, herhangi bir ön kanal bilgisini gerektirmeksizin benzer düzeyde bir başarı elde etmiştir. Bu özellik, ÖÖTO'nun pratik uygulamalarda özellikle kanal bilgisi önceden bilinmeyen veya değişkenlik gösteren sistemlerde kullanım potansiyelini öne çıkarmaktadır.

4.3.4. Mors Optimizasyon (MOA) Algoritması Kullanarak Kanal Kestirimi

MOA algoritmasının kanal kestirimi problemine uygulanmasında, çözüm kalitesi ve optimizasyon başarımı üzerinde doğrudan etkili olan temel kontrol parametreleri tanımlanmıştır. maxIter parametresi, algoritmanın gerçekleştireceği maksimum iterasyon (jenerasyon) sayısını belirlerken; numAgent değeri, aynı anda çözüm uzayında arama gerçekleştiren ajan (mors) sayısını ifade eder. dim parametresi, çözüm uzayının boyutunu yani optimize edilmesi gereken değişkenlerin sayısını belirtmektedir. Karar değişkenlerine ilişkin arama sınırları lb ve ub vektörleri ile belirlenmiş olup, bu sınırlamalar algoritmanın geçerli çözüm alanı içinde kalmasını sağlamaktadır. Bu parametrelerin tamamı ve değerleri Tablo 4.5'te özetlenmiştir.

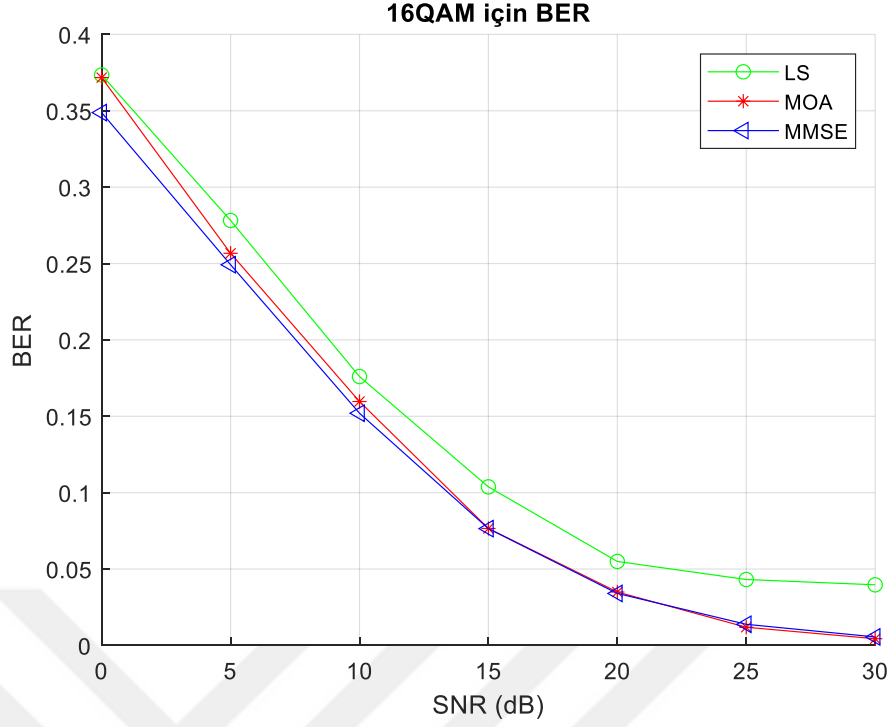
Algoritmanın başlangıç konumları positions matrisi üzerinden tanımlanmış ve bu konumlar, ilgili alt ve üst sınırlar arasında rastgele oluşturulmuştur. Böylece çözüm uzayının geneline yayılmış bir başlangıç popülasyonu elde edilmiştir. MOA'ya özgü

olarak entegre edilen dinamik tusk uzunluğu adaptasyonu ve düşük seviyeli mutasyon oranı (%0.2) gibi ek parametreler sayesinde, algoritmanın hem küresel arama kapasitesi (exploration) hem de yerel iyileştirme yeteneği (exploitation) dengelenmiştir. Ayrıca, göç fazı eşikleri ile ajanların konum güncellemeleri hassas biçimde yönetilmekte, bu da algoritmanın yerel minimumlara takılma riskini azaltırken genel yakınsama başarımını artırmaktadır. MOA tabanlı kanal tahmin yaklaşımının performansı, MSE, BER ve SNR gibi ölçütler aracılığıyla değerlendirilmiş ve geleneksel LS/MMSE yöntemlerinin yanı sıra diğer sezgisel algoritmalarla da karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.5 MOA tabanlı Kanal Kestiriminde Kullanılan Parametreler

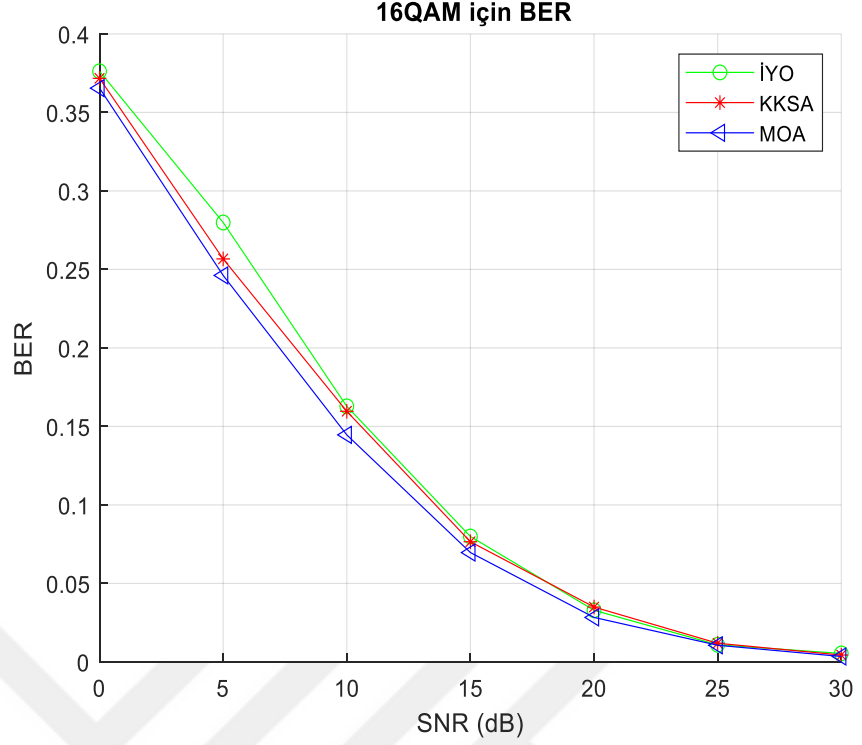
Parametre	Değer	Açıklama
max	10	Algoritmanın çalışacağı maksimum jenerasyon (iterasyon) sayısı
numAgent	8	Optimizasyon sürecinde kullanılan arama ajanı (mors) sayısı
Dim	3	Çözüm uzayındaki değişken (boyut) sayısı
lb	[0, 20, 0]	Karar değişkenleri için alt sınırlar (lower bounds)
ub	[40, 100, 400]	Karar değişkenleri için üst sınırlar (upper bounds)

MOA'nın temel avantajı, paralel alt taşıyıcı tahmininde morsların iş birliğine dayalı gruplar oluşturması ve kaynak tahsisinde, yiyecek arama davranışlarından ilham alan dinamik yöntemler kullanmasıdır. Bu çalışma, MOA tabanlı kanal kestiriminin hem gürültülü hem de seyrek pilot kullanılan değişken kanallarda uyum sağlayarak performansını koruyup koruyamadığını ele almaktadır. Aynı zamanda, algoritmanın yüksek mertebeden modülasyon teknikleri karşısındaki esnekliğini derinlemesine değerlendirmektedir.



Şekil 4.6. MOA-tabanlı kanal kestiriminin LS ve MMSE ile SNR'ye karşı BER karşılaştırması

MOA tabanlı kanal kestiriminin akıllı kanal tahmini üzerindeki başarımı, çeşitli SNR düzeylerinde gerçekleştirilen BER analizleriyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 4.6, SNR değişimine bağlı olarak MOA tabanlı kanal kestirim yönteminin BER ve MSE performansını LS ve MMSE ile karşılaştırmalı biçimde sunmaktadır. Elde edilen BER analizleri, MOA tabanlı kanal kestiriminin LS tahmin edicisine kıyasla belirgin bir performans artışı sağladığını ve MMSE yöntemine yakın doğruluk sunduğunu göstermektedir. Sonuçlar, MOA tabanlı kanal kestiriminin zor koşullarda bile tahmin performansını artırabildiğini ve güvenilir sonuçlar verdiğini doğrulamaktadır.

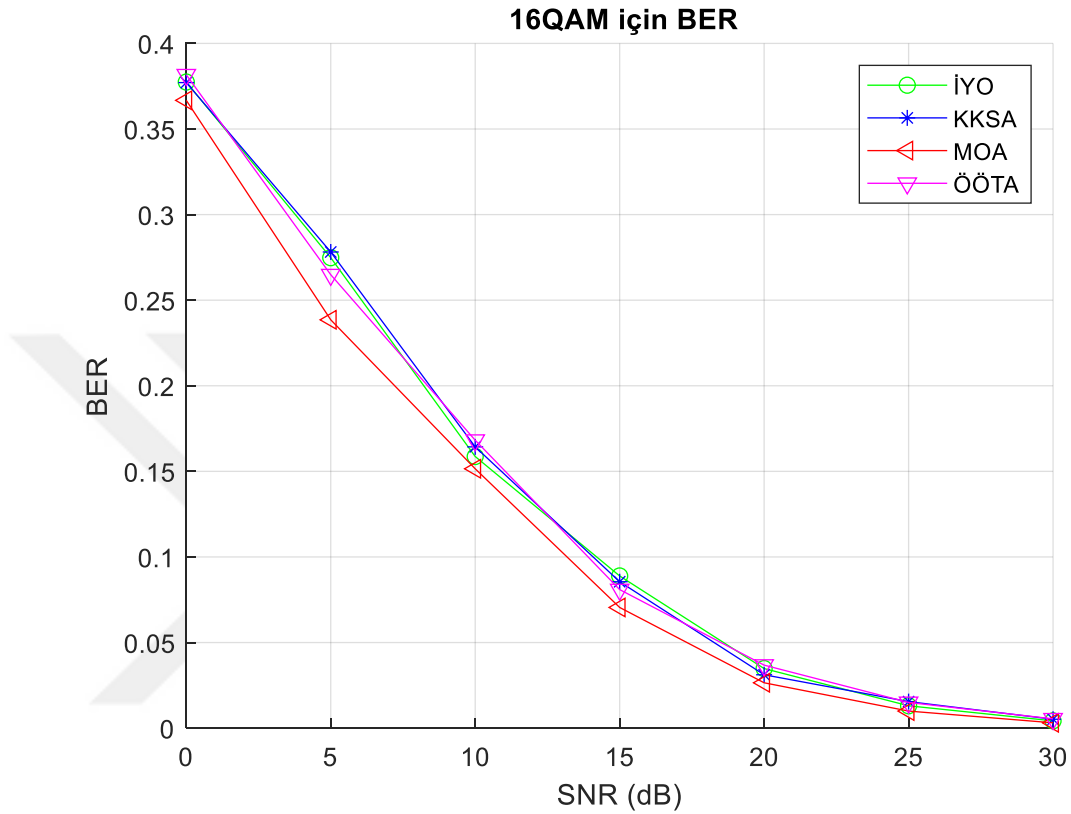


Şekil 4.7 MOA, İYO ve KKSA kanal kestiriminin BER VE SNR karşılaştırılması

Şekil 4.7’de, 16QAM modülasyonu altında İstilacı Yabancı Ot Algoritması (İYO), Karışık Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA) ve Mors Optimizasyon Algoritması (MOA) olmak üzere üç farklı optimizasyon algoritmasının bit hata oranı (BER) performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Sonuçlara göre, MOA tüm SNR seviyelerinde en düşük BER değerlerini vererek en iyi performansı göstermiştir. Bu bulgu, MOA’nın hem keşif (exploration) hem de sömürü (exploitation) aşamalarında dengeli bir strateji izleyerek değişken kanal ortamlarına etkin biçimde uyum sağladığını göstermektedir. KKSA, orta SNR aralıklarında (5–20 dB) etkili sonuçlar sunmuş; bu bölgede İYO’ya göre daha başarılı bir BER performansı elde etmiştir. Ancak, iki sistem arasındaki performans farkı daha yüksek SNR seviyelerinde (25 dB ve üzeri) önemli ölçüde azalmıştır. Tersine, İYO algoritması diğer algoritmalarla kıyasla tüm SNR seviyelerinde yüksek BER değerleri vermiştir ve bu da optimizasyon verimliliğinin nispeten azaldığını göstermektedir. Sonuç olarak, 16QAM modülasyonu kullanan iletişim sistemleri için, MOA algoritması kanal kodlama ve hata oranı optimizasyonu için en etkili yöntem olarak belirlenmiştir.

4.4 Meta Sezgisel Algoritmaların Karşılaştırılması

Donanım Platformu: Tüm simülasyon ölçümleri, Intel (R) Core i3-3240 CPU @3.40 GHz işlemciye ve 8 GB DDR4 RAM'e sahip bir sistemde MATLAB R2023a kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 ÖÖTA, MOA, İYO ve KKSA tabanlı kanal kestiriminin BER ve SNR karşılaştırması.

Tablo 4.6 ÖÖTO, KKSA, İYO ve MOA algoritmali kanal kestiriminin artan SNR'a karşı BER değerleri

SNR (dB)	ÖÖTO	KKSA	İYO	MOA
0	0.38167	0.37744	0.37711	0.36674
5	0.26488	0.27482	0.27816	0.23854
10	0.16819	0.15868	0.16430	0.15188
15	0.08094	0.08890	0.08552	0.07050
20	0.03681	0.03480	0.03118	0.02649
25	0.01501	0.01305	0.01550	0.00997
30	0.00448	0.00426	0.00520	0.00311

Yukarıdaki analizden elde edilen bulgulara göre, MOA sistemi genel olarak en düşük hata oranlarını üretmiş ve tüm SNR seviyelerinde en iyi performansı göstermiştir. Özellikle orta ve düşük SNR seviyelerinde sağladığı istikrar, bu sistemin

gürültüye karşı bağışıklığının yüksek olduğunu göstermektedir. ÖÖTO, KKSA ve İYO sistemleri benzer performanslar göstermesine rağmen, MOA'ya kıyasla daha yüksek hata oranlarına sahiptir. Sonuç olarak, iletişim sistemlerinin tasarımında MOA temelli modellerin, düşük sinyal koşullarında bile daha güvenilir veri iletimi sağlayabileceği sonucuna varılabilir. Bu durum, özellikle yüksek hata toleransı gerektiren uygulamalarda (örneğin savunma, tıbbi iletişim sistemleri, uzay haberleşmesi) MOA sisteminin tercih edilmesini anlamlı kılmaktadır.

Bu tabloda yer alan sistemlerin (ÖÖTO, KKSA, İYO, MOA) çalışma süreleri (t, saniye cinsinden) karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Değerler aşağıdaki gibidir:

Tablo 4.7 ÖÖTO, KKSA, İYO ve MOA algoritmali kanal kestiriminin Tablo 4.6'daki BER için çalışma süreleri

Çalışma süreleri	ÖÖTO	KKSA	İYO	MOA
t (sn)	2617.60	18428.59	7317.80	4474.02

Dört sistem arasında en düşük çalışma süresi ÖÖTO sistemine aittir. 2617.60 s, bu da onu işlem verimliliği açısından en avantajlı sistem olarak göstermektedir. Buna karşılık, en yüksek süre KKSA sistemine aittir. 18428.59 s ve bu sistemin işlem süreçlerinde ciddi anlamda kaynak veya zaman tükettiği anlaşılmaktadır. Bu oranlara göre: MOA sisteminin ÖÖTO'ya göre yaklaşık %71 daha uzun sürede işlem yaptığı, İYO sisteminin yaklaşık 2.8 kat daha uzun sürede işlem yaptığı, KKSA sisteminin ise ÖÖTO'ya göre yaklaşık 7 kat daha uzun sürede işlem yaptığı tespit edilmiştir.

Çalışma süreleri açısından bakıldığında, ÖÖTO sistemi, tüm sistemler içinde en düşük işlem süresine sahip olmasıyla öne çıkmaktadır. Bu durum, ÖÖTO'nun işlem süreleri açısından en optimize edilmiş yapıya sahip olduğunu göstermektedir. MOA sistemi orta düzeyde bir süreye sahip olup, ÖÖTO'ya göre daha yavaş, ancak İYO ve KKSA'ya göre daha hızlı bir performans sergilemiştir.

İYO sisteminin yaklaşık üç katlık süre artışı, sistemin işlem yükü, işlem algoritmalarının verimliliği ya da sistem içi işlem karmaşıklığı ile ilişkilendirilebilir. KKSA sisteminin süre açısından en düşük performansı sergilemesi, bu sistemdeki işlem süreçlerinin ciddi bir şekilde iyileştirme gerektirdiğini düşündürmektedir.

Sonuçlar:

ÖÖTO algoritması, en kısa çalışma süresine 2617.60 s'ne sahip sistemdir. BER

değeri MOA'ya göre biraz daha yüksek olsa da, BER başına harcanan zaman açısından en verimli sistemdir. Bu yönüyle özellikle zaman kritik uygulamalarda örneğin gerçek zamanlı haberleşme tercih edilebilir.

KKSA algoritması, hem ÖÖTO ile neredeyse aynı BER üretmiş hem de bu işlemi yaklaşık 7 kat daha uzun sürede gerçekleştirmiştir. Bu durum, KKSA'nın hesaplama açısından verimsiz bir yapıya sahip olduğunu, performans-kazanç oranının oldukça düşük olduğunu göstermektedir.

İYO, ÖÖTO ve KKSA arasında konumlanmakta, hem çalışma süresi hem de BER açısından ortalama düzeyde kalmaktadır. Ancak BER değeri, ÖÖTO'ya göre daha kötü iken, süresi yaklaşık 3 kat daha uzundur. Bu da İYO'nun zaman açısından dezavantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

MOA algoritması, tüm sistemler arasında en düşük BER değerini üretmiş ancak bunu ortalama bir çalışma süresi olan 4474.02 s içinde gerçekleştirmiştir. Özellikle BER'nin önemli olduğu (örneğin güvenilir veri iletiminin kritik olduğu) uygulamalarda MOA, verimli ve dengeli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

SONUÇ

Bu tez çalışmasında, kablosuz iletişim sistemlerinde kanal kestirimi performansını artırmak amacıyla dört farklı meta-sezgisel algoritma (İstilacı Yabancı Ot Optimizasyonu (İYO), Karıştırılmış Kurbağa Sıçrama Algoritması (KKSA), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO) ve Mors Optimizasyon Algoritması (MOA)) incelenmiş ve geleneksel yöntemler olan En Küçük Kareler (LS) ile Minimum Ortalama Kare Hatası (MMSE) ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, meta-sezgisel algoritmaların özellikle yüksek SNR bölgelerinde geleneksel yöntemlerle rekabet edebilir hatta bazı durumlarda daha üstün performans sergileyebilir olduğunu ortaya koymuştur.

İYO algoritması, düşük SNR koşullarında MMSE'ye kıyasla daha düşük performans göstermesine rağmen, yüksek SNR bölgelerinde (20 dB üzeri) MMSE ile benzer hatta daha iyi BER değerleri elde etmiştir. Bu durum, İYO'nun hedef fonksiyonunun sinyal kümelenmesine odaklanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, İYO'nun önceki kanal istatistik bilgisine ihtiyaç duymaması, pratik uygulamalarda önemli bir avantaj sağlamaktadır.

KKSA algoritması, 16QAM modülasyonu altında yapılan testlerde, özellikle orta ve yüksek SNR aralıklarında (15 dB üzeri) MMSE'ye yakın BER değerleri üretmiş ve LS algoritmasını belirgin şekilde geride bırakmıştır. KKSA'nın popülasyonu alt gruplara ayırarak hem küresel hem de yerel arama yeteneklerini birleştirmesi, bu başarının temelini oluşturmaktadır. Ayrıca, KKSA'nın da önceki kanal bilgisine ihtiyaç duymaması, dinamik kanal koşullarında esnek bir çözüm sunmaktadır.

ÖÖTO algoritması, öğretmen-öğrenci etkileşimine dayalı yapısı sayesinde, özellikle orta ve yüksek SNR bölgelerinde MMSE ile karşılaştırılabilir BER ve MSE performansı sergilemiştir. ÖÖTO'nun en dikkat çekici özelliği, herhangi bir ön kanal bilgisi gerektirmeden bu performansı sağlayabilmesidir. Bu da algoritmayı, kanal istatistiklerinin önceden bilinmediği veya hızla değiştiği senaryolarda etkili bir seçenek haline getirmektedir.

MOA algoritması, diğer meta-sezgisel yöntemler arasında en iyi performansı göstererek, tüm SNR seviyelerinde en düşük BER değerlerini elde etmiştir. MOA'nın dinamik adaptasyon yeteneği ve gruplar halinde çalışma stratejisi, değişken kanal koşullarında bile tutarlı bir performans sergilemesini sağlamıştır. Özellikle yüksek

mertebeden modülasyon teknikleri (16QAM) kullanıldığında, MOA'nın üstünlüğü daha belirgin hale gelmektedir.

Genel olarak, bu çalışma meta-sezgisel algoritmaların kanal kestirimi probleminde geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir. Özellikle, bu algoritmaların önceki kanal istatistik bilgisine ihtiyaç duymaması, pratik uygulamalarda büyük bir esneklik sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek SNR bölgelerinde MMSE ile karşılaştırılabilir veya daha iyi performans sergilemeleri, 5G ve ötesi yüksek veri hızı senaryolarında kullanımlarını cazip hale getirmektedir.

Sonuç olarak, İYO, KKSA, ÖÖTO ve MOA gibi meta-sezgisel algoritmalar, kablosuz iletişim sistemlerinde kanal kestirimi için umut vaat eden yöntemlerdir. Özellikle MOA'nın üstün performansı, bu algoritmanın gelecekteki araştırmalarda daha detaylı incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmanın bulguları, kanal kestirimi alanında yeni araştırma yönlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacak ve endüstriyel uygulamalara yol gösterecektir.

Çalışma süreleri ile BER birlikte değerlendirildiğinde: ÖÖTO, en kısa sürede işlem yapan ve kabul edilebilir BER değerleri üreten sistem olarak yüksek verimliliğiyle öne çıkar. MOA, düşük hata oranı ve makul süreleriyle kalite–performans dengesi en iyi algoritmadır. KKSA, en yavaş algoritma olup, BER kazancı sunmaması nedeniyle zayıf performans göstermektedir. İYO, hem BER hem de süre açısından arada kalmakta, ancak yüksek işlem süresi nedeniyle verimlilik açısından soru işaretleri barındırmaktadır.

KAYNAKLAR

- Asharjabi, S., Sakran, H., & Al-nahari, A. (2022). Time-Domain Channel Estimation Scheme for OFDM over Fast Fading Channels. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022(1), 7839430.
- Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., & Kang, C. G. (2010). *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. John Wiley & Sons.
- Coleri, S., Ergen, M., Puri, A., & Bahai, A. (2002). Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems. *IEEE Transactions on broadcasting*, 48(3), 223-229.
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2020). *5G NR: The next generation wireless access technology*. Academic Press.
- de Araújo, G. T., de Almeida, A. L., & Boyer, R. (2021). Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted MIMO systems: A tensor modeling approach. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 15(3), 789-802.
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms* John Wiley & Sons. Inc., New York, NY.
- Eusuff, M. M., & Lansey, K. E. (2003). Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources planning and management*, 129(3), 210-225.
- Özdemir, G., (2009). *Çok taşıyıcılı-kod bölmeli çoklu erişim (MC-CDMA) sistemlerinde kanal kestirimi*, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge university press.
- Hammoodi, A., Audah, L., & Taher, M. A. (2019). Green coexistence for 5G waveform candidates: a review. *IEEE Access*, 7, 10103-10126.
- Hassan, S., Farhana, U., & Newaz, M. K. (2024). A hybrid meta-heuristic approach for channel estimation in OFDM MIMO. *arXiv preprint arXiv:2405.07189*.
- Hwang, T., Yang, C., Wu, G., Li, S., & Li, G. Y. (2008). OFDM and its wireless applications: A survey. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 58(4), 1673-1694.
- IEEE Computer Society LAN MAN Standard Committee. (1997). *Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications*. IEEE Std. 802.11-1997.
- Jiang, R., Wang, X., Cao, S., Zhao, J., & Li, X. (2019). Deep neural networks for channel estimation in underwater acoustic OFDM systems. *IEEE access*, 7, 23579-23594.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks (Vol. 4,*

pp. 1942-1948). IEEE.

Khelifi, A., & Bouallegue, R. (2016). An accurate and very low complexity LMMSE channel estimation technique for OFDM systems. *Wireless Personal Communications*, 88(4), 911-922.

Kumar, D., Gandhi, B. R., & Bhattacharjya, R. K. (2020). Introduction to invasive weed optimization method. In *Nature-inspired methods for metaheuristics optimization: algorithms and applications in science and engineering* (pp. 203-214). Cham: Springer International Publishing.

Li, F., Zheng, K., Zhao, H., & Xiang, W. (2018). QAM signal transmission based on matrix model in filter-bank multicarrier systems. *IEEE Access*, 6, 63987-63998.

Li, Y. (2000). Pilot-symbol-aided channel estimation for OFDM in wireless systems. *IEEE transactions on vehicular technology*, 49(4), 1207-1215.

Li, Y. G., & Stuber, G. L. (Eds.). (2006). *Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications*. Springer Science & Business Media.

Masmoudi, A., & Le-Ngoc, T. (2017). Subspace-based self-interference cancellation for full-duplex MIMO transceivers. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017(1), 55.

Mehrabian, A. R., & Lucas, C. (2006). A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization. *Ecological informatics*, 1(4), 355-366.

Mirjalili, S. (Ed.). (2022). *Handbook of moth-flame optimization algorithm: variants, hybrids, improvements, and applications*. CRC Press.

Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 95, 51-67.

Mody, A. N., & Stuber, G. L. (2001, May). Parameter estimation for OFDM with transmit receive diversity. In *IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Spring 2001. Proceedings (Cat. No. 01CH37202)* (Vol. 2, pp. 820-824). IEEE.

Molisch, A. F. (2012). *Wireless communications* (Vol. 34). John Wiley & Sons.

Myung, H. G., Lim, J., & Goodman, D. J. (2007). Single carrier FDMA for uplink wireless transmission. *IEEE vehicular technology magazine*, 1(3), 30-38.

Nee, R. V., & Prasad, R. (2000). *OFDM for wireless multimedia communications*. Artech House, Inc..

Proakis, J. G., & Salehi, M. (2001). *Digital communications* (Vol. 4, pp. 593-620). New York: McGraw-hill.

Processing Letters, 8(10), 269-272.

Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization

problems. Computer-aided design, 43(3), 303-315.

Rappaport, T. S. (2010). Wireless communications: Principles and practice, 2/E. Pearson Education India.

Rugini, L., Banelli, P., & Leus, G. (2005). Simple equalization of time-varying channels for OFDM. IEEE communications letters, 9(7), 619-621.

Stallings, W. (2009). *Wireless communications & networks*. Pearson Education India.

Stojanovic, M., Freitag, L., & Johnson, M. (1999). Channel-estimation-based adaptive equalization of underwater acoustic signals. In Oceans' 99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 99CH37008) (Vol. 2, pp. 985-990). IEEE.

Stuber, G. L., Barry, J. R., McLaughlin, S. W., Li, Y., Ingram, M. A., & Pratt, T. G. (2004). Broadband MIMO-OFDM wireless communications. Proceedings of the IEEE, 92(2), 271-294.

S. ve Kumar, A. (2022). OFDM (Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama) Simülasyonu Matlab Uygulanarak. *Elektronik ve İletişim Mühendisliğindeki İlerleme Bildirileri*.

Stueber, G.L. (2001) Principles of Mobile Communication. 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Sun, Q., Cox, D. C., Huang, H. C., & Lozano, A. (2002, March). Estimation of continuous flat fading MIMO channels. In 2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. WCNC 2002 (Cat. No. 02TH8609) (Vol. 1, pp. 189-193). IEEE.

Talbi, E. G. (2009). Metaheuristics: from design to implementation. John Wiley & Sons.

Tokur Bozkurt Y, Simsek M. (2025). Channel Estimation in OFDM System Using Walrus Optimization Algorithm. 9th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS2025), June 27-28, 2025.

Tokur Bozkurt Y. (2024). Channel Estimation in OFDM System Using Invasive Weed Algorithm. 4th International Congress on Scientific Advances (ICONSAD'24), pp. 233-240.

Tokur Bozkurt Y. (2024). Channel Estimation in OFDM System Using The Shuffled Frog Leaping Algorithm. 14th International Istanbul Scientific Research Congress, pp. 233-240.

Tokur Bozkurt Y. (2024). Channel Estimation in OFDM System Using The Teaching-Learning Based Optimization. 14th International Istanbul Scientific Research Congress, pp. 233-240.

Tufvesson, F., & Maseng, T. (1997, May). Pilot assisted channel estimation for OFDM in mobile cellular systems. In 1997 IEEE 47th Vehicular Technology Conference. Technology in Motion (Vol. 3, pp. 1639-1643). IEEE.

Tuna, E., Seyman, M. N., Özyazgan, G., & Taşpınar, N. OFDM Sistemlerinde Pilot Ton Eklemeli Kanal Kestirim Yöntemleri. XII. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi, s, 14-18.

Weinstein, S., & Ebert, P. (2003). Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform. IEEE transactions on Communication Technology, 19(5), 628-634.

Yang, X. S. (2010). Nature-inspired metaheuristic algorithms. Luniver press.

Zhou, S., & Giannakis, G. B. (2002). Space-time coding with maximum diversity gains over frequency-selective fading channels. IEEE Signal Processing Letters, 8(10), 269-272.

Zhou, Y., & Giannakis, G. B. (2006). "Finite-Alphabet Based Channel Estimation for OFDM and Related Multicarrier Systems." IEEE Transactions on Communications, 54(8), 1361-1366.

S. ve Kumar, A. (2022). OFDM (Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama) Simülasyonu Matlab Uygulanarak. *Elektronik ve İletişim Mühendisliğindeki İlerleme Bildirileri* .



ÖZ GEÇMİŞ

Mustafa ŞİMŞEK Gaziantep Emine Konukoğlu Anadolu Lisesini bitirdikten sonra Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde üniversiteye başladı. Haziran-2020 döneminde lisans eğitimini tamamladı. Eylül-2022 döneminde Gaziantep İslam Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans eğitimine Başladı. Lisansüstü eğitiminde 9.Uluslararası Akıllı Teknolojilerde Yenilikçi Yaklaşımlar Sempozyumu(ISAS2025) Mors optimizasyon algoritması ile ofdm sistemlerde kanal kestirimi konusu ile sempozyuma kabul görüldü. Aynı zamanda enerji sektöründe güneş enerji santralleri(GES) projelerinde kariyerini sürdürdü. Temel ilgi alanları inovaktif mühendislik çalışmaları seyahat etmek ve fotoğrafçılıktır.

