



**T.C.  
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA  
SPEKTRUM ALGILAMA TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI**

**RÜSTEM YILMAZEL**

**ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. Nihat İNANÇ**

**KIRIKKALE - 2022**

Rüstem YILMAZEL tarafından hazırlanan “BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM ALGILAMA TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Nihat İNANÇ

Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Başkan : Prof. Dr. Tamer EREN

Endüstri Mühendisliği, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye : Prof. Dr. Ali KARA

Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye : Doç. Dr. Özgür ERTUĞ

Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye : Doç. Dr. Murat LÜY

Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Savunma Tarihi: 24/06/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Recep ÇALIN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

# ETİK İLKELERE UYGUNLUK BİLDİRİMİ

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

24.06.2022  
Rüstem YILMAZEL



# ÖZET

## BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM ALGILAMA TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nihat İnanç

Haziran 2022, 119 Sayfa

Bu tez çalışmasının amacı; önerilen yeni bir yaklaşımla, Bilişsel Radyo (BR) ağlarındaki spektrum algılama yöntemlerinin, yeni nesil sistemlere uygulanmasını sağlamaktır. BR ağlarındaki spektrum algılama yöntemleri sayesinde, spektrumun verimli kullanımında büyük bir avantaj elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında, spektrum algılama yöntemi ile genetik algoritma yöntemi birleştirilerek sisteme uygulanmıştır. Spektrum algılama yöntemleri; Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code division multiple Access - CDMA), Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal frequency-division multiplexing - OFDM) ve Çoklu Taşıyıcı Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Multi-carrier code-division multiple Access - MC-CDMA) sistemlerine uygulanmıştır. Lisanslı kullanıcıların varlığı, spektrum algılama yöntemleri sayesinde tespit edilmiştir. Farklı sinyal gürültü oranları (Signal To Noise Ratio - SNR), kanallar, kullanıcı sayıları gibi sistemi etkileyecek parametreler incelenmiştir. Önerilen yeni yaklaşımın, ortamdaki gürültü değeri arttığında dahi, yüksek tahmin doğruluğu sağladığı gözlemlenmiştir. Bu yüksek tahmin doğruluğu sayesinde, sistem aynı anda daha fazla kullanıcıya haberleşme için olanak sağlamıştır. Böylece spektrumun daha verimli kullanıldığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilişsel Radyo Ağları, Spektrum Algılama Yöntemleri, OFDM, CDMA, İşbirlikçi Spektrum Algılama, Enerji Algılama Yöntemi.

# ABSTRACT

## IMPLEMENTATION OF SPECTRUM SENSING TECHNIQUES IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering, Ph.D thesis

Supervisor: Prof. Dr. Nihat İnanç

June 2022, 119 Pages

The aim of this thesis is to integrate spectrum sensing techniques into new generation systems with a proposed new approach. Thanks to the spectrum sensing techniques in cognitive radio networks, a great advantage has been obtained in the efficient use of the spectrum. In this thesis, spectrum detection technique and genetic algorithm technique are combined and applied to the system. Spectrum sensing techniques have been applied to code division multiple access (CDMA), Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) and multi-carrier code-division multiple access (MC-CDMA) systems. The presence of licensed users was detected by spectrum sensing techniques. Features that will affect the system such as different signal to noise ratios (Signal To Noise Ratio - SNR), channels, number of users have been examined. It has been observed that the proposed new approach provides high estimation accuracy even when the noise value in the environment increases. Thanks to this high prediction accuracy, the system allowed more users to communicate at the same time. Thus, it has been observed that the spectrum is used more efficiently.

**Keywords:** Cognitive Radio Networks, Spectrum Sensing Techniques, OFDM, CDMA, Cooperative Spectrum Sensing, Energy Detection Technique.

## TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimin son aşaması olan bu çalışmanın hazırlanmasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, değerli düşünceleri ile beni doğruya yönlendiren danışmanım Prof. Dr. Sayın Nihat İNANÇ'a gönülden teşekkürlerimi arz ederim.

Doktora tez çalışmalarım süresince ilk andan itibaren değerli fikirlerini, yardımlarını, bilgilerini esirgemeyen, örnek aldığım Prof. Dr. Sayın Tamer EREN'e ve Doç. Dr. Sayın Murat LÜY'e, tezimin izlenmesi ve değerlendirilmesi süresince desteklerini esirgemeyen hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca her konuda yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Doktora çalışmamın başından sonuna kadar beni gönülden destekleyen değerli eşime ve öğrenimim boyunca büyük fedakârlıklarda bulunan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bilişsel Radyo Ağları .....	3
1.2. Bilişsel Radyo Ağ Mimarisi.....	5
1.2.1. Spektrum Algılama .....	7
1.2.1.1. Verici Algılama Yöntemi .....	8
1.2.1.2. İşbirlikçi Algılama Yöntemi.....	9
1.2.1.3. Girişim Tabanlı Algılama Yöntemi.....	9
1.2.2. Spektrum Yönetimi .....	10
1.2.3. Spektrum Paylaşımı.....	10
1.2.4. Spektrum Hareketliliği .....	12
1.3. Literatür Taraması.....	12
1.4. Literatür Katkısı .....	20
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>21</b>
2.1. CDMA Yöntemi.....	21
2.1.1. CDMA Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları.....	22
2.1.2. CDMA Ağı.....	23
2.1.3. Tırmık Alıcısı .....	23
2.1.4. Walsh Kodu.....	24
2.1.5. DS-CDMA .....	27
2.2. OFDM Yöntemi .....	29
2.2.1. OFDM Sisteminin Çalışma Mantığı .....	30
2.3. MC-CDMA Yöntemi .....	34



2.3.1. MC-CDMA Verici Yapısı .....	34
2.3.2. MC-CDMA Alıcı Yapısı .....	36
2.3.3. MC-CDMA Yönteminde IFFT'nin Kullanılması .....	37
2.4. Enerji Algılama Yöntemi .....	39
2.4.1. Enerji Algılama Yönteminin Matematiksel Modeli .....	40
2.5. İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi .....	43
2.5.1. Merkezi İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi .....	43
2.5.2. Dağınık İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi .....	44
2.5.3. MC-CDMA Yöntemine İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin Uygulanması .....	45
<b>3. ÖNERİLEN YÖNTEM .....</b>	<b>49</b>
3.1. Bilişsel Radyo Ağlarının OFDM Yöntemine Uygulanması.....	49
3.2. Bilişsel Radyo Ağları İçin Genetik Algoritma .....	51
3.3. Bilişsel Radyo Ağları İçin Parçacık Sürü Optimizasyonu .....	56
<b>4. SONUÇLAR .....</b>	<b>59</b>
4.1. Bilişsel Radyo Ağlarının CDMA Yöntemine Uygulanması .....	59
4.1.1. Enerji Algılama Yönteminin CDMA Yöntemine Uygulanması .....	59
4.1.2. İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin CDMA Yöntemine Uygulanması .....	62
4.1.3. CDMA Yöntemine Uygulanan İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi ile Enerji Algılama Yönteminin Karşılaştırılması.....	64
4.2. Bilişsel Radyo Ağlarının MC-CDMA Yöntemine Uygulanması.....	65
4.2.1. MC-CDMA Yapısına Önerilen Yönteminin Uygulanması .....	65
4.2.2. Önerilen Yöntem ile Uyumlu Filtre Yönteminin Karşılaştırılması .....	66
4.2.3. MC-CDMA Yöntemine Enerji Algılama Yönteminin Uygulanması... ..	67
4.2.4. MC-CDMA Yöntemine İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin Uygulanması .....	68
4.2.5. MC-CDMA Yöntemine Uygulanan İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi ile Enerji Algılama Yönteminin Karşılaştırılması.....	70
4.3. Bilişsel Radyo Ağlarının OFDM Yöntemine Uygulanması.....	72
4.3.1. Enerji Algılama Yönteminin OFDM Yapısına Uygulanması .....	72
4.3.2. İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin OFDM Yapısına Uygulanması .....	73

4.3.3. OFDM Yöntemine Uygulanan İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi ile Enerji Algılama Yönteminin Karşılaştırılması.....	74
4.3.4. İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin CDMA, MC-CDMA ve OFDM Yöntemlerinde Karşılaştırılması.....	75
4.3.5. Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Yönteminin OFDM Yöntemine Uygulanması.....	76
4.3.6. OFDM Yöntemi İçin Önerilen Yöntemin CSS Yöntemi ile Kıyaslanması.....	78
4.4. Tartışma .....	81
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>98</b>



# ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
3.1 Sinyal gücüne karşılık gelen değer tablosu .....	53
3.2 Hata oranına karşılık gelen değer tablosu .....	53
3.3 Frekansın değerine karşılık gelen değer tablosu .....	54
3.4 Veri hızına karşılık gelen değer tablosu .....	55
3.5 Genlerin yüzde ağırlığı.....	55
3.6 Çaprazlama.....	56
3.7 Mutasyon.....	56



# ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
1.1 Bilişsel radyoda dinamik spektrum erişimi [4] .....	5
1.2 Bilişsel radyo döngüsü. ....	7
1.3 Lisanslı ve lisanssız kullanıcıların iç içe geçmiş olarak iletilmesi [21] .....	11
1.4 Lisanssız kullanıcının, spektrumu altına yayma yaklaşımı ile kullanması [21] ...	11
2.1. CDMA yönteminin teknik özellikleri. ....	22
2.2 Tırmık alıcısının blok diyagramı [71] .....	24
2.3. Çoklama işleminin Walsh Kodu kullanılarak yapılması [71] .....	25
2.4. DS-CDMA sistemi ileri bağlantı şeması [73] .....	27
2.5. CDMA sistemi ters bağlantı şeması [73] .....	27
2.6. Yayılma kodunun uygulanması [73] .....	28
2.7 Geleneksel çok taşıyıcılı yöntem ve OFDM yönteminin gösterimi [75] .....	30
2.8 OFDM alıcı-vericisinin genel blok diyagramı .....	31
2.9 Üç yoldan geçen iki sembolün ISI etkisi.....	33
2.10 CP Eklenmesi .....	33
2.11 MC-CDMA sistemi blok diyagramı.....	34
2.12. MC-CDMA verici yapısının blok diyagramı [81].....	35
2.13. Bant genişliğinin verimli kullanımı [82].....	36
2.14 MC-CDMA alıcı yapısının blok diyagramı [82].....	36
2.15 MC-CDMA yönteminde IFFT'nin kullanılması [83] .....	37
2.16 Rayleigh kanalda MC-CDMA gösterimi [84].....	38
2.17 Enerji algılama yönteminin blok diyagramı.....	40
2.18 Merkezi işbirlikçi spektrum algılama yöntemi [88].....	43
2.19 Dağınık işbirlikçi spektrum algılama yöntemi [89] .....	44
2.20 İşbirlikçi spektrum algılama yönteminin MC-CDMA yöntemine uygulanmasının blok diyagramı [90] .....	45
3.1 OFDM tabanlı BR blok diyagramı.....	50
3.2 Genetik algoritma için akış diyagramı .....	52
3.3. Parçacık sürü optimizasyonu akış diyagramı .....	58

<b>4.1.</b> SNR = 15 dB için doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.....	59
<b>4.2.</b> SNR = 20 dB için doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.....	60
<b>4.3.</b> Farklı SNR değerlerine göre doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.....	61
<b>4.4.</b> SNR = 15 dB için doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.....	62
<b>4.5.</b> Farklı SNR değerlerine göre doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.....	63
<b>4.6.</b> İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi ile enerji algılama yönteminin karşılaştırılması.....	64
<b>4.7</b> Önerilen yöntem ile referans alınan eşik değerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	65
<b>4.8.</b> Önerilen Yöntem ile Uyumlu filtre yönteminin karşılaştırılması.....	66
<b>4.9.</b> Enerji algılama yönteminin MC-CDMA yöntemine uygulanması.....	67
<b>4.10</b> Farklı SNR değerlerinde CSS yöntemi için elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	68
<b>4.11.</b> İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi ve enerji algılama yönteminin karşılaştırılması.....	70
<b>4.12</b> CSS ile ED yöntemleri arasındaki SNR-BER performansının karşılaştırması ..	71
<b>4.13.</b> Enerji algılama yönteminin OFDM yöntemine uygulanması.....	73
<b>4.14.</b> İşbirlikçi spektrum algılama yönteminin OFDM yöntemine uygulanması.....	74
<b>4.15.</b> İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi ve enerji algılama yönteminin karşılaştırılması.....	75
<b>4.16.</b> İşbirlikçi spektrum algılama yönteminin CDMA, MC-CDMA ve OFDM üzerindeki sonuçlarının karşılaştırılması.....	76
<b>4.17</b> Genetik algoritma kullanılarak elde edilen doğru algılama olasılığı.....	77
<b>4.18</b> Parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak elde edilen doğru algılama olasılığı.78	
<b>4. 19.</b> Önerilen yeni yöntem ile diğer yöntemler arasındaki doğru algılama olasılıklarının karşılaştırılması.....	79
<b>4.20.</b> PSO ve GA için adım sayılarının karşılaştırılması.....	80
<b>4.21</b> Önerilen yeni yöntem ile diğer yöntemler arasındaki SNR-BER performansının karşılaştırması.....	81

## KISALTMALAR DİZİNİ

<b>ADC</b>	Analog To Digital Converter
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BK</b>	Birincil Kullanıcı
<b>BR</b>	Bilişsel Radyo
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CP</b>	Cyclic Prefix
<b>CS</b>	Cyclic Suffix
<b>CSS</b>	Cooperative Spectrum Sensing
<b>DS-CDMA</b>	Direct Sequence Code Division Multiple Access
<b>ED</b>	Energy Detection
<b>EXGPCSA</b>	Extended Generalized Predictive Channel Selection Algorithm
<b>FCC</b>	Federal Communications Commission
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>GA</b>	Genetik Algoritma
<b>ICI</b>	Inter Carrier Interference
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform
<b>ISI</b>	Inter Symbol Interference
<b>İK</b>	İkincil Kullanıcı
<b>MC-CDMA</b>	Multi-Carrier Code-Division Multiple Access
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
<b><math>P_D</math></b>	Probability of Detection
<b><math>P_{FA}</math></b>	Probability of False Alarm
<b>PN</b>	Pseudo-random Noise
<b>PSO</b>	Particle Swarm Optimization
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>SNR</b>	Signal-To-Noise Ratio
<b>SSDF</b>	Spectrum Sensing Data Falsification
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>YTR</b>	Yazılım Tabanlı Radyo



# 1. GİRİŞ

Günümüzde kullanımı artan kablosuz haberleşme sistemi, sınırlı bir band aralığına sahip frekans spektrumunu verimli bir şekilde kullanmayı zorunlu hale getirmiştir. Dünyadaki ülkelerin çoğu, var olan spektrumdaki kanalları tahsis etmeye başlamışlardır. Hali hazırda kullanılan band aralıkları bütün servislere tahsis edildiği için, spektrumda yeterli bir alan kalmamıştır. Spektrumun kullanımına sahip olan lisanslı kullanıcıların, bu kanalı kullanması sağlanmıştır. Bu yüzden, spektrum aralığı boş olsa bile; ikincil (lisanssız) kullanıcıların kanalı kullanması engellenmiştir. Bu nedenle, frekans bandının etkin bir şekilde kullanılması zorlaşmıştır. Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte, spektrum bandına erişim sağlayan kullanıcılarda büyük bir artış meydana gelmiştir. Oluşan bu artış, frekans bandının etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Frekans bandını etkin kullanmak için spektrum algılama yöntemleri geliştirilmiştir.

Erişim yöntemleri olarak sağlayan BR ağları, spektrumun maksimum verimlilikte kullanılmasını sağlayan yeni bir teknolojidir. BR ağları; sürekli olarak spektrum bandını taraması sayesinde, anlık olarak hangi frekans aralığının boş olduğunu saptamaktadır. Bu özelliği sayesinde; lisanslı kullanıcının olmadığı anlarda, kanalı lisanssız kullanıcılara tahsis edebilmektedir. BK adına tahsis edilmiş lisanslı spektrumu, lisanssız olarak ikincil kullanıcılara (İK) açan bu teknoloji; spektrum algılama yöntemleri yardımıyla, az olan spektrum band aralığının verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. BR ağlarının özel kılan durum, spektrumu algılamasıdır. BR ağları, belirli aralıkla frekans bandını tarayarak, lisanslı kullanıcının varlığını algılamaya çalışan bir teknolojidir. BR ağlarının alıcı ve verici tarafı, frekans boşluğunu algılayarak, uygun erişim yöntemleri ile lisanslı kullanıcılara zarar vermeden spektrumu kullandırmaktadır.

Tezin birinci bölümünde; spektrum yönetiminden bahsedilmiştir. Dinamik olarak spektruma erişim sağlayan bir yapı üzerinde durulmuştur. BR ağları hakkında bilgi



verilmiş, spektrum algılama yöntemlerinden bahsedilmiştir. BR hakkında literatür taraması yapılmış, geçmişten günümüze gelen bilişsel radyo ağlarının, nasıl bir gelişim izlediği gözlemlenmiştir. Birinci bölümün sonunda, tezin literatüre yaptığı katkıya değinilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde; spektrum algılama yöntemlerinin uygulandığı sistemler incelenmiştir. Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code division multiple Access - CDMA) sistemine, BR ağlarının nasıl uygulandığı açıklanmıştır. CDMA sisteminin, alıcı ve verici taraflarındaki yapılar incelenmiştir. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal frequency-division multiplexing - OFDM) sistemine, BR ağlarının nasıl uygulandığı anlatılmıştır. OFDM sisteminin yapısı hakkında bilgi verilmiş, CDMA sistemine göre daha fazla kullanıcıya nasıl olanak sağladığı anlatılmıştır. Daha sonra; Çoklu Taşıyıcı Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Multi-carrier code-division multiple Access - MC-CDMA) sistemine, BR ağlarının uygulanmasından bahsedilmiş, MC-CDMA sisteminin yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Bu bölümün sonunda; kullanılan spektrum algılama yöntemleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Spektrum algılama yöntemlerinin, hangi durumlarda daha verimli olduklarından bahsedilmiştir. Enerji algılama ve işbirlikçi spektrum algılama (Cooperative Spectrum Sensing - CSS) yöntemlerinin yapısı irdelenmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde; önerilen yeni yöntem detaylı olarak anlatılmıştır. Spektrum algılama yöntemlerine, yapay zekânın nasıl entegre edildiğinden bahsedilmiştir. Yapay zekâ yöntemlerinden olan genetik algoritma yapısının, adım adım uygulanışı hakkında bilgi verilmiştir. Bu yöntem ile nasıl daha hızlı ve doğru algılama işleminin yapıldığından bahsedilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde ise, elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Farklı uygulama alanlarında, spektrum algılama yöntemlerinin başarısı incelenmiştir. Önerilen yöntem ile klasik yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her alan için, elde edilen sonuçlar ayrı ayrı yorumlanmıştır. BR ağlarına genetik algoritma uygulandığında, ortaya çıkan sonuçlar irdelenmiştir. Bu sayede yapay zekâ da sisteme eklenerek, çalışmaya farklı bir bakış açısı getirilmiştir.

## 1.1 Bilişsel Radyo Ağları

Günümüzde kablosuz haberleşmenin kesintisiz yapılması için, mevcut olan frekans bandı arttırılması gerekir. Kullanılan her bir uygulamanın sorunsuz çalışabilmesi için, frekans bandında ayrı ayrı bant aralıkları tahsis edilmelidir. Uygulanan bu süreç, yürürlükte olan farklı kablosuz iletişim çeşitlerinin kullanımı için oldukça önemlidir.

Frekans spektrumu, frekans aralıklarına göre farklı elektromanyetik dalgalara tahsis edilmiştir. 3KHz - 300MHz aralığı radyo dalgalarına, 300 MHz – 300 GHz aralığı mikro dalgalarına, 300 GHz – 400 THz aralığı kızılötesi (IR) ışınlarına, 400 THz – 770 THz aralığı görünür ışık dalgalarına, 30 PHz – 750 THz aralığı morötesi ışınlarına, 30 EHz – 30 PHz aralığı x-ray ışınlarına, 15 EHz'den büyük olan kısımlar ise gama ışınlarına tahsis edilmiştir. Dünyada kullanılan spektrum bandına ait bütün bilgileri ve sorumlulukları, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği organize etmektedir. Günümüzde kablosuz haberleşmedeki artış çok büyük boyutlara ulaştığı için, mevcut olan frekans aralıkları lisanslı ve lisanssız kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılayamaz hale gelmiştir [1]. Federal Haberleşme Komisyonunun (Federal Communications Commission - FCC) elde ettiği bulgulara göre; gün geçtikçe artan kullanıcı sayısı, spektrumun kullanımında bir yoğunluk meydana getirmiştir [2].

Artan kullanıcı sayısı spektrumun verimsiz kullanılmasına sebep olmuştur. Spektrumu daha etkin ve verimli kullanmak için, Mitola tarafından 1999 yılında BR ağları önerilmiştir. BR ağları; frekans spektrumunu sürekli olarak algılayan, öğrenme algoritmaları ile kendiliğinden çıkarım yapan ve radyo ortamının koşullarına göre parametrelerde değişiklik yapabilen kablosuz haberleşme yöntemi olarak ortaya çıkmıştır [3].

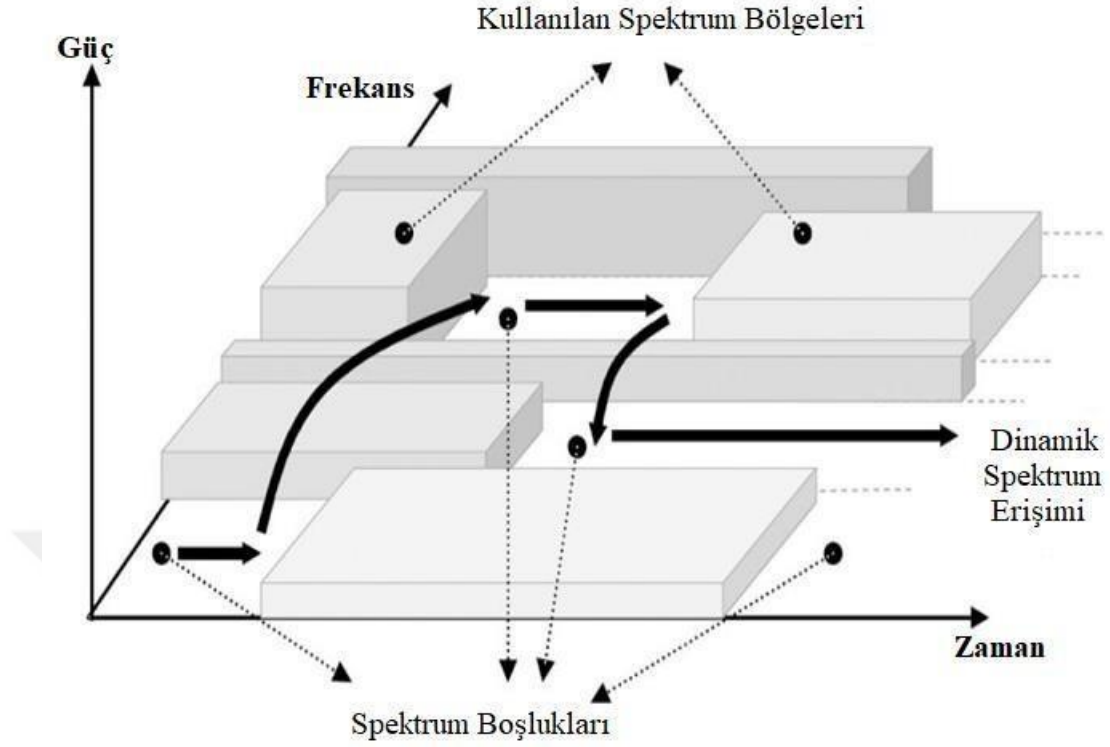
Bilişsel radyo; lisanslı kullanıcılara tahsis edilen frekans spektrumunu, lisanssız kullanıcıların da kullanmasına olanak sağlar. Frekans spektrumunun kullanım durumunu algılamak için spektrum algılama yöntemleri kullanılır. Bu algılama yöntemleri sayesinde; birincil kullanıcıların (BK) varlığı algılanır ve anlık olarak frekans bandına erişimi sağlanır. Böylece; ikincil kullanıcıların (İK) frekans bandını kullanmasına olanak tanır. Yetersiz düzeyde olan mevcut spektrum bandı, verimli bir şekilde kullanılmış olur.

Spektrum algılama algoritmaları sayesinde; BR, kullanıcılarına maksimum frekans aralığı tahsis etmeyi hedefler. Bu işlemi yaparken, frekans aralığında oluşan hızlı değişiklikler ve farklı servis kaliteleri (Quality of Service, QoS) gibi zorluklar ile karşılaşır. Karşılaşılan bu engeller ile başa çıkmak için kullanıcılara bazı görevler düşmektedir [4].

- Frekans aralığının periyodik olarak taranması sayesinde, boş olan spektrum aralıklarının anlık olarak tespitinin yapılması gerekmektedir.
- Lisanssız kullanıcıların durumuna göre, en müsait olan kanal seçilmelidir.
- Birden fazla lisanssız kullanıcı olduğu düşünülerek, kanalın kullanımı için diğer kullanıcılar ile koordinasyon sağlanmalıdır.
- Lisanslı kullanıcının varlığı algılandığında, kanalın lisanssız kullanıcı tarafından anında boşaltmasının sağlanması gerekmektedir.

Lisanslı kullanıcı, spektrumdaki frekans aralığının sahibi olan kullanıcıdır. Lisanssız kullanıcı ise; lisanslı kullanıcı, bandı kullanmadığı zaman, o frekans aralığını dolduran İK'dır. Kablosuz haberleşme ortamındaki lisanssız kullanıcılar; lisanslı kullanıcı, kanalını kullanmaya başlayınca kadar frekans aralığında kalır. Eğer lisanslı kullanıcı, o bandı kullanacaksa; İK, acilen bandı terk etmek zorundadır [5].

BR ağları, yapısında iki ana özelliği barındırır. Birincisi; kablosuz haberleşme ortamıyla reel zamanlı iletişim sonucunda, boş olan bir frekans aralığını bulan bilişsel kabiliyettir. Şekil 1.1'de; BR ağları, frekans alanında kullanılmayan spektrum boşluklarını yani BK tarafından boş bırakılan alanları algılar. Bu sayede, en uygun olan spektrum boşluğunu tahsis ederek, lisanssız kullanıcının iletişim yapmasını sağlar. Burada asıl hedef, BK'ya herhangi bir anda girişim yapılmadan frekans aralığının kullanılmasıdır. İkincisi ise; BR ağlarının farklı frekansları kullanabilmesi ve çeşitli erişim yöntemleriyle sisteme adapte edilmesidir. Bu adapte edilme sayesinde; en uygun frekansın kullanılması ve parametrelerin bulunmasına, yeniden yapılandırma denir [6].



Şekil 1.1 Bilişsel radyoda dinamik spektrum erişimi [4].

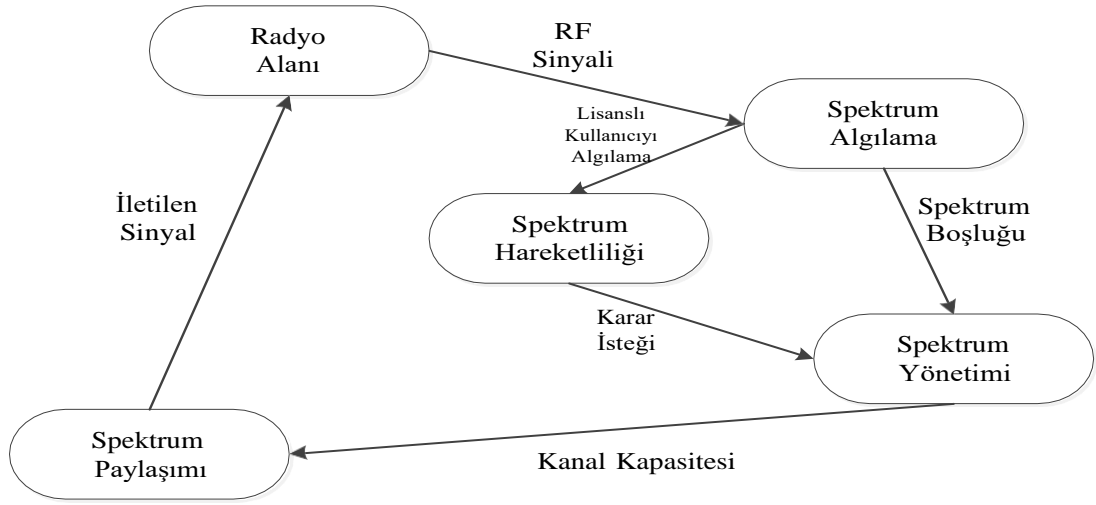
## 1.2. Bilişsel Radyo Ağ Mimarisi

BR ağlarının temelinde, üç değişik yöntem vardır [7]; Birinci yöntem, alt sınırlı yaklaşımdır. Veri iletimi sırasında, lisanslı kullanıcının zarar görmemesi gerekmektedir. Lisanssız kullanıcının, kanalı kullanması için bir eşik değeri belirlenir. Eğer güç değeri, bu eşik değerinin üstünde ise; lisanslı kullanıcıya zarar vereceği için, kanalı kullanmasına müsaade edilmez. İkinci yöntem, yer paylaşımli yaklaşım yöntemidir. Bu yöntemde; birinci kullanıcının, sisteme giriş yapması tespit edilir. Eğer sisteme giriş yaptığında, lisanssız kullanıcı kanalı kullanıyorsa; lisanslı kullanıcıya zarar vermeden, başka bir kanala ataması yapılır. Alt sınırlı yaklaşımdan farkı, ikincil kullanıcının frekansı kullanmasına izin verilmesidir. Son yöntem, iç içe yaklaşım yöntemidir. Eğer lisanslı kullanıcı, spektrumu kullanmıyorsa; lisanssız kullanıcının, sisteme girişine izin verilir. İç içe yaklaşım yöntemi; fırsatçı bir yapı ile spektrumdan faydalandırmayı amaçlar. Bu yöntemin yapısında, bütün kullanıcıların spektrumu sürekli olarak taraması vardır. Buldukları spektrum boşluklarına erişim sağlamaları gerekir. Lisanslı kullanıcı sistemi kullanacak ise, spektrum algılama metotları ile lisanslı kullanıcıyı tespit etmeleri gerekir. Lisanslı kullanıcıya zarar vermemesi ve

performans azalmasına neden olmaması gerekmektedir. Diğer iki yaklaşımdan farkı ise sürekli olarak frekans bandını taramasıdır. Böylece ikincil kullanıcı, dinamik olarak farklı frekans bantlarına geçiş yapabilmektedir. Literatür incelendiği zaman, en çok bu yapı kabul görmüştür. Bu yöntem 3G, 4G ve 4.5G gibi haberleşme sistemlerine entegre edilmeye çalışılmıştır [8].

BR ağları, belli bir sistematik yapı üzerine kuruludur. Bu yapıda; alıcı-verici, spektrum çözümleyici, öğrenme ve karar verme, frekansın yönetimi ve verici güç kontrolü vardır. Alıcı-verici kısmı; yazılım tabanlı radyonun (YTR), veri alış verişini oluşturur. Aynı zamanda, frekans ortamında meydana gelen değişiklikleri takip eder. Hem alıcı hem de vericideki değerleri değiştirdiği için, radyonun ön tarafı YTR yapısındadır. YTR yapısında kullanılan protokoller; lisanslı kullanıcının, hangi frekans aralıklarında spektrumu kullandığını takip eder. Spektrum çözümleyici ise; frekans aralığının hangi zaman dilimlerinde kullanıldığını belirler. Lisanslı kullanıcıya girişim olmadan, lisanssız kullanıcılara spektrumu tahsis eder. Frekansın ne kadar kullanıldığını tespit etmek için, işaret işleme yöntemleri kullanılır. Bilişsel radyoda, öğrenme; frekans spektrumunun uygunluk durumunu tespit etme sürecidir. Spektrumun uygunluk durumu, frekansın kullanım süresinden elde edilen verilere göre bulunur. Öğrenme işlemi; genetik algoritma, bulanık mantık, yapay sinir ağları gibi algoritmalar kullanılarak yapılır. Karar verme kısmı ise; frekans kullanımı ile ilgili verilere ulaşıldıktan sonra, frekansa erişim için verilen karardır [9].

Frekans yönetimi; spektrumdaki en uygun aralığın seçilmesi durumudur. Spektrum algılama algoritmalarından elde edilen verilere göre, verinin iletimi için hangi kanalın seçileceği belirlenir. Çok fazla sayıda bilişsel radyo kullanıcısı olduğu için, oluşan girişimi en az seviyeye indirmek gerekir. Bunun için frekans yönetimi yapılmaktadır. Alınan verilerden elde edilen bilgilere göre, kanalların hangi zamanlarda uygun oldukları belirlenir. Uygun kanal atanması eldeki bilgilere göre yapılır. Vericideki güç kontrolü kısmı ise, verici tarafındaki gücün belirlenme sürecidir. Vericide yapılan güç kontrolü; dinamik olarak değişen ortam durumlarında, girişimi önlemek ve güvenilir iletim adına önemlidir. Burada amaç; ortamdaki gürültü seviyeleri ve kanal durumuna göre, gücü arttırıp azaltmaktır. Örneğin; gürültünün düşük olduğu ya da kanalda zayıflama ve sönmülmenin olmadığı gibi durumlarda, iletim için düşük güç seviyesi belirlenir [10].



**Şekil 1.2** Bilişsel radyo döngüsü.

BR ağları; Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, kullanıcıların dört ana işlev aracılığıyla spektrum bantlarına erişmelerini sağlar. Bilişsel döngünün adımları; spektrum algılama, spektrum yönetimi, spektrum paylaşımı ve spektrum hareketliliğidir.

### 1.2.1. Spektrum Algılama

Spektrumun doğru bir şekilde algılanması, BR ağlarında hayati önem taşır. Spektrumu algılamadaki hedef; belli aralıklarla algılama işlemi yapılarak, BK'nın hareketlerini ve spektrumun uygunluğunu tespit etmektir. Bu teknolojide, alıcı ve verici tarafın görevi, boş olan frekans aralığını ve lisanslı kullanıcıya ait spektrum boşluklarını algılamaktır. Böylece, lisanslı kullanıcıya herhangi bir parazit oluşturmadan, spektrumun nasıl tahsis edileceği belirlenir [11].

BR ağlarının en önemli özelliği, spektrumdaki uygun yerleri bulmak ve kanalların hangi zaman diliminde müsait olduklarını algılamaktır. Bu algılama işlemi yapmak için belli yöntemler kullanılır. Bu yöntemler; ortamın durumuna ve lisanslı kullanıcıya göre değişiklik göstermektedir. Frekans aralığında algılama yaparken karşılaşılan en önemli problem, radyo ortamında var olan gürültülerdir. En uygun spektrum algılama yöntemini seçerken, ne kadar hızlı cevap verdiğine bakılır. Ayrıca; bu yöntemlerle elde edilen doğru algılama olasılığının yüksekliği de oldukça önemlidir. Algılama olasılığının yüksek olmasında; frekans çözünürlüğü, yan kulakçık sayısı ve ne kadarlık bir güç verileceğinin tespiti çok önemlidir.

### 1.2.1.1. Verici Algılama Yöntemi

Bu yöntem, BR ağlarındaki kullanıcıların elde ettikleri veriler ışığında, vericilerden yapılan iletimin algılanması esasına göre çalışır. Verici algılama, belli başlıklar altında değerlendirilir.

- Uyumlu Filtreleme: Bu yöntemdeki en temel özellik, iletim yapılacak olan radyo frekansı (RF) sinyalinin tespitidir. Eğer RF sinyali biliniyorsa, lisanslı kullanıcıyı algılamak çok kolay olur. RF sinyalinin özelliklerine göre oluşturulan filtre sayesinde, lisanslı kullanıcı rahatlıkla tespit edilir. Buradaki en önemli etken; elde edilen sinyalin, SNR değeridir. Bu yöntem kullanılıyorsa, yanlış algılama olasılığının çok düşük seviyede olması beklenir. Bu yöntemin kullanılması için bazı sistem parametrelerinin bilinmesi gerekir. Bunlar; lisanslı kullanıcının band aralığı, çalıştığı merkez frekans değeri, hangi modülasyon türünü kullandığı gibi özelliklerdir. Tüketilen güç miktarı çok fazla olduğu için çok tercih edilen bir yöntem değildir [12].
- Enerji Algılama (Energy Detection - ED): Eğer bilişsel radyonun alıcı tarafı, lisanslı kullanıcı ile ilgili fazla bir veriye sahip değilse; kullanılması en uygun yöntem, enerji algılama yöntemidir [13]. SNR değerine göre belirlenen bir eşik seviyesi vardır. Bu değer ile alınan enerji değeri arasında bir karşılaştırma yapılır. Alınan sinyalin enerji değeri, eşik seviyesinin üstünde ise; lisanslı kullanıcı, spektruma dahil olmuş demektir. Eğer eşik seviyesinin altında kalmışsa; lisanslı kullanıcı, spektruma dahil olmamış demektir. En sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde, lisanslı kullanıcı için belirlenen eşik değerinin doğru tespit edilmesi gerekir. Eğer eşik değeri doğru tespit edilemezse, lisanslı kullanıcının varlığını algılamak zorlaşmaktadır. Buna ek olarak; spektrumda var olan başka sinyaller de yanlışlıkla algılanabilir. Bu dedektörün; gürültü yüzünden lisanslı kullanıcı sinyallerini ayırt edememesi, olumsuz yönünü oluşturur.
- Dalga Şekli Tabanlı Algılama: Buradaki temel hedef, bilinen sinyallerin korelasyonudur. Bu yöntem; lisanslı kullanıcının, pilot işareti gibi örüntülerden oluştuğu durumlarda kullanılmaktadır ve enerji algılama yöntemine göre daha iyi sonuç vermektedir. Bu yöntemlerde; işaretin uzunluğu ne kadar çok ise, sistem performansı da o kadar iyidir [14].

- Döngüsel Durağan Özellik Algılama: Lisanslı kullanıcıları tespit ederken, yine onlardan elde edilen sinyallerin döngüsel durağan özelliği kullanılır. Bu yöntemin en etkin özelliği, lisanslı kullanıcı ile gürültüyü karıştırmamasıdır. Bu yüzden, enerji algılama yöntemine göre daha iyi sonuç verir. Fazladan hesaplama çokluğu oluşması, bu yöntemin dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır [15].

### **1.2.1.2. İşbirlikçi Algılama Yöntemi**

Bu yöntemlerde; radyo ortamında bulunan bütün kullanıcılar, frekans bandını, hangi zaman aralığında ve hangi frekanslarda kullandıklarını birbirleri ile paylaşırlar. Radyo ortamında oluşan gürültü bilinmezliği, sönmüleme ve gölgeleme gibi sorunları çözmek için en ideal yöntemdir [16]. İşbirlikçi algılama yönteminde iki temel yaklaşım vardır. Bunlardan birincisi, merkezi işbirlikçi algılamadır. Bu yöntemde; hub görevi gören birim, bütün kullanıcılardan gelen algılama verilerini toplar ve uygun olan frekans bandını belirler. Topladığı bilgiler ışığında, elde ettiği bilgileri diğer cihazlara gönderir ya da direkt olarak bilgi alışverişini tek elden yönetir. Bütün bilgileri tek elde toplamadaki amaç, kanalda oluşabilecek sönmülemeyi minimuma indirmek ve algılama olasılığını arttırmaktır [17]. Diğer yöntem ise, dağıtık işbirlikçi yöntemidir. Bu yöntemde, yine bütün kullanıcılar topladıkları veriyi paylaşırlar. Bilişsel radyo kullanıcısı; frekans bandında hangi aralığı seçeceğine kendisi karar verir [18]. Bu yöntem, merkezi işbirlikçi yöntemine göre daha uygun maliyetlidir. Ayrıca, ilave altyapı ihtiyacı doğurmaması da bir diğer avantajıdır [19].

### **1.2.1.3. Girişim Tabanlı Algılama Yöntemi**

Federal Haberleşme Komisyonu'na göre, girişim esnasında ortaya çıkan sıcaklık, bu esnada kullanılan bant genişliği ile güç değerinin bir yansımasıdır. İletim anındaki başka bir veri alışverişi sırasında, belirlenen sıcaklığın üstünde bir gürültü meydana gelirse, sistem bu durumdan olumsuz etkilenmektedir. Lisanssız kullanıcı veri alışverişinde bulunurken, lisanslı kullanıcıyı etkileyecek sıcaklık sınırını geçmemelidir. Güç kullanımında, minimum güç tüketimi yapmalıdır. Lisanslı kullanıcıyı etkilemeden iletim yapması gerekmektedir [20].



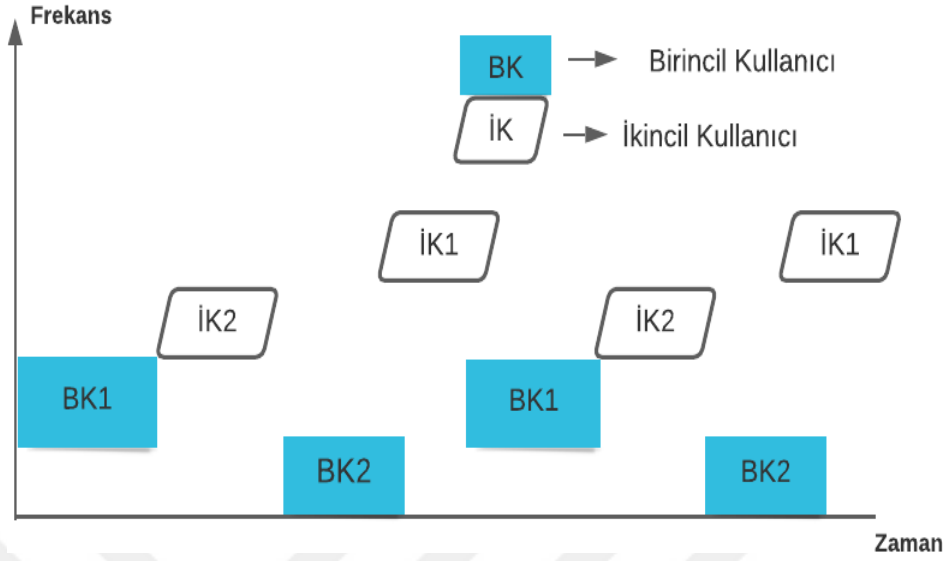
### 1.2.2. Spektrum Yönetimi

BR ağlarında kullanılacak olan spektruma karar verilirken; girişim, gecikme, lisanssız kullanıcının durumu gibi parametreler dikkate alınır. BR kullanıcıların, hangi spektrumu kullanacağı belirlenirken iki husus dikkate alınır. Birincisi; kullanıcıların kendi verilerine ek olarak, lisanslı kullanıcıların frekans bandını kullanma durumuna göre de hareket edilmesidir. İkincisi ise; lisanssız kullanıcı bilgilerine göre, en uygun kanalın seçilmesidir. Spektrum yönetiminde ortaya çıkan en büyük güçlük, SNR bilgisinin eksik kalmasıdır [21].

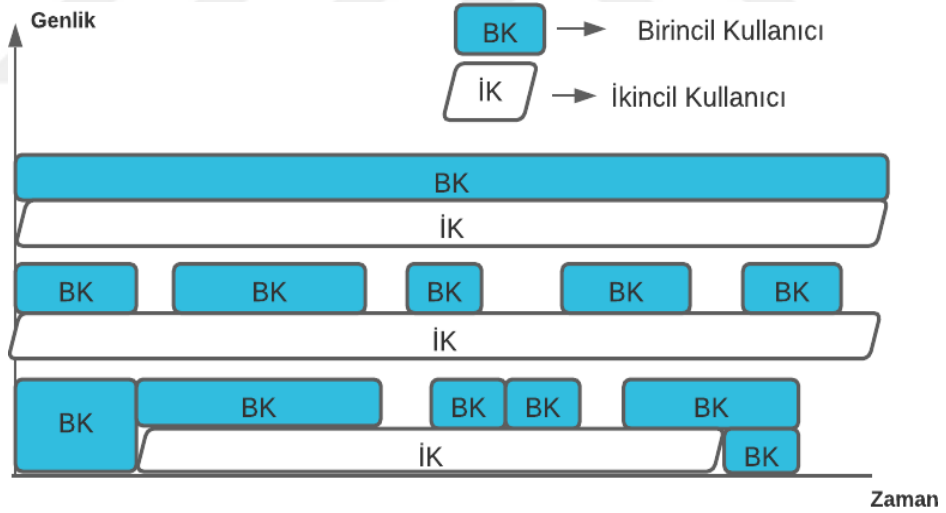
### 1.2.3. Spektrum Paylaşımı

Spektrum paylaşımında amaç; belirlenen kanala atama yapılırken, diğer kullanıcılar ile de iletişime geçilmesidir. Böylece, birbirleri arasında senkronizasyon sağlanır. Var olan frekans bandının etkin kullanılmaması ve kullanıcı sayısının artış göstermesi, spektrum paylaşımını zorunlu hale getirmiştir. Frekans bandının paylaşılmasında; işbirlikçi spektrum algılama yönteminin, diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Güç tüketimi bakımından, daha az güç tükettiği de belirlenmiştir [22]. Spektrum paylaşımına göre, üç farklı yaklaşım mevcuttur. Birinci yaklaşım, boşluk kovalama yöntemidir. Bu yöntemde; lisanssız kullanıcılar, frekans bandındaki spektrum boşluklarını uygun oldukça kullanırlar.

Şekil 1.3'te görüldüğü gibi; lisanslı kullanıcılar tarafından kullanılmayan boşluklara, lisanssız kullanıcıların yerleştirilmesi yapılmaktadır. Lisanslı kullanıcılar frekans zaman ekseninin kontrolünü sağlarken; aynı anda lisanssız kullanıcılar, lisanslı kullanıcılara göre kendi frekans-zaman ekseninin koordinasyonunu yapmaktadır. Lisanslı kullanıcılara tahsis edilen kanalın kullanımı sürekli değiştiği için, alıcılar her zaman geniş bir spektrumu taramak durumunda kalmaktadırlar. Böylece, bazen tarama hızı istenilen seviyelere ulaşmamaktadır.



Şekil 1.3 Lisanslı ve lisanssız kullanıcıların iç içe geçmiş olarak iletilmesi [21].



Şekil 1.4 Lisanssız kullanıcının, spektrumu altına yayma yaklaşımı ile kullanması [21].

İkinci yaklaşım, altına yayma yaklaşımıdır. Bu yöntemde önemli olan durum, girişim seviyesinin, belirlenen sıcaklık değerinin üstüne çıkmamasıdır. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi; lisanslı ve lisanssız kullanıcı, aynı anda bandı kullanmaktadır. Lisanslı kullanıcıya etki etmeyecek olan girişim sınırı kullanılır. Eğer bu girişim sıcaklığında aşma olmazsa, lisanssız kullanıcı bandı rahatlıkla kullanabilir [22].

Son yaklaşım ise, üzerine bindirme yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın temel noktası; lisanslı kullanıcının alıcıya ilettiği veriden, lisanssız kullanıcı vericisinin haberdar olmasıdır. Lisanssız kullanıcının sistemi kullanabilmesi için, gücünün belli bölümünü, lisanslı kullanıcıya tahsis etmesi gerekmektedir. Böylece, lisanslı kullanıcının kalitesi artmaktadır. Bu yöntem; lisanssız kullanıcının, lisanslı kullanıcının kanal ve güç bilgilerini bilmesine dayanır [23].

#### **1.2.4. Spektrum Hareketliliği**

Spektrum hareketliliği, frekans aralıklarındaki sürekli değişim sırasında bağlantının kesintiye uğramamasını sağlar. Optimum frekans aralığı seçildikten sonra, BR kullanıcıların değişikliği olabilir. Bu değişiklik, spektrum hareketliliği olarak adlandırılır.

Kullanıcının çalıştığı frekans değerinin her değişimi, kullanmış olduğu protokolleri de değiştirecektir. Bu durum, çalıştığı parametrede değişikliğe yol açacaktır. Yer değişiminde süre oldukça önemlidir. Süre bilgisi, algılama yöntemleri ile elde edilir. Ortaya çıkan en büyük sorun, kullanıcılar için yeterli hizmet kalitesinin oluşmamasıdır. Diğer bir problem ise; kullanıcıların sürekli yer değiştirmesidir.

### **1.3. Literatür Taraması**

Kim ve Shin (2008) tarafından yapılan çalışma; BK'lara ait olan kanalların ne zaman yoğun kullanıldığı ve bu kullanım süresinin ne uzunlukta olduğunun belirlenmesini kapsamıştır. Yapmış oldukları yaklaşım sayesinde; spektrumun sürekli taranarak, boşlukların verimli bir biçimde tespit edilmesi sağlanmıştır. Önerdikleri yöntemin optimizasyonunu yaparak, frekans bandının daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamışlardır [24]. Wang L. ve Wang C. (2008) ise, spektrumlar arasındaki geçişleri incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmanın temelinde, reaktif ve proaktif yapıları incelemişlerdir. Reaktif frekans yer değiştirmede elde edilen sonuçlar, seçilen frekans bandlarının doğruluğunu göstermiştir. Bu algılamada sürenin uzun olması, dezavantaj olarak görülmüştür. Proaktif frekans yer değiştirmede ise, algılama zamanının oldukça kısa olduğu saptanmıştır. Reaktif yapının tersine, frekans bandlarının doğruluğunun uygun olmayabileceği görülmüştür. Bu iki spektrum el değiştirme yönteminde; algılama zamanının durumuna göre, hangisinin kullanılacağına karar vermek için M/G/1 yapısı (önleyici özgeçmiş önceliği) tasarlanmıştır [25].

Lee ve Jang'ın (2009) birlikte yapmış olduğu çalışmada; frekans spektrumunu algılama sırasında, algılama olasılığının yanlış olmasından kaynaklanan spektrum yer değiştirmeleri incelenmiştir. Yanlış algılamaya sebep olan gürültü aralığını en aza indirmeye çalışmışlardır. Buna ek olarak, sistem sürekli olarak tarayarak en uygun frekans algılama zamanını bulmuşlardır [26].

Han, Wu ve Yin (2010) tarafından yürütülen çalışmada ise, anlık olarak dinamik spektrum yer değişimi yapılmıştır. Bu yer değiştirmeyi yapabilmek için; farklı bir alıcı ilave edilmesi ve frekans havuzu oluşturulması gibi iki farklı yöntem tavsiye edilmiştir [27]. Yoon ve Ekici'nin (2010) yapmış olduğu çalışma sayesinde, isteğe bağlı olarak spektrum yer değişimi olarak adlandırılan bir frekans yönetim metodu ileri sürülmüştür. Karşılıklı iletişimde bir duraksama olmaksızın, farklı frekans kanallarının kullanımını önermişlerdir. Haberleşmeyi rahatlatmak için, mecburi olmayan frekans yer değişimi amaçlanmıştır. Bu sayede, spektrumda ortaya çıkacak yoğunluğun önüne geçilmek istenmiştir [28]. Kannappa ve Saquib'nin (2010) yapmış olduğu çalışmada ise; Markov zinciri, farklı bir yöntem ile sunulmuştur. Lisanslı kullanıcının varlığını doğru algılama olasılığına göre, spektrum yer değiştirme yapılmıştır [29].

Kaur, Udin, Khosla (2011) tarafından yapılan çalışmada ise; dinamik spektrum erişimi için, bulanık mantık yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem ile bilişsel radyo ağlarında; lisanslı kullanıcılar frekansa giriş yaptığında bir çakışma olmaması için, lisanssız kullanıcıların iletim gücü seviyesinde düzenleme yapılmıştır. Bulanık mantık yöntemi sayesinde; iletim gücü için bir değer belirlenmiştir. Eğer bu değer aşılsa; frekans kanalları arasında spektrum yer değişimi sağlanmıştır. Bu çalışmada; lisanssız kullanıcıların iletim gücü kontrolü yapılmıştır. Aynı zamanda; bu yöntemin lisanslı kullanıcıyı etkilememesi için, lisanssız kullanıcının başka bir spektrum bandına geçiş yapması sağlanmıştır [30]. Lertsinsrubtavee, Malouch ve Fdida (2011) tarafından yapılan çalışmada; spektrum el değiştirmenin olup olmayacağına karar vermek için, önceden toplanan verilere dayanan birikimli tahmin esaslı, yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Gereksiz yapılan spektrum yer değişiminin önüne geçmeyi amaçlamışlardır. Elde edilen verilere göre, kanal değişimi için bir eşik değeri belirlenmiştir. Eşik değeri aşılmaz ise, lisanssız kullanıcının kanal değişimi yapmaması gerekmektedir. Bu sayede; önceki tahmin sistemleri kullanılsa bile, anlık alınan kararların gerçek cevaplara karşılık veremeyeceği saptanmıştır. Bu sorunu biraz

da olsa minimize etmek için, kısa zaman aralıklarıyla destek frekans bandlarının kullanımı tavsiye edilmiştir [31].

Liu, Xu, Guo, Zhang W., Zhang D. ve Li (2012) tarafından yapılan çalışmada; lisanssız kullanıcıların, spektruma ulaşma sırasında yapmış oldukları frekans yer değiştirmeleri incelenmiştir. Bulanık mantık yöntemiyle, frekans kanalına erişim olasılığı hesaplanmıştır. Böylece; frekans yer değiştirme yapıldığında, lisanssız kullanıcının hızlı olarak frekans kanalına ulaşması sağlanmıştır [32]. Lertsinsrubtavee, Malouch ve Fdida'nın (2012) yaptıkları çalışmada; geç kalma süresi dikkate alınarak, boşa yapılan spektrum yer değişim işlemi incelenmiştir. Gereksiz yer değişimini minimum düzeye getirmek için yeni bir spektrum yer değişimi metodu sunulmuştur. Tahmin edilen gecikme süresini, frekans bandı ile ilişkilendiren bir fonksiyon tasarlanmıştır. Böylece, boşa yapılan spektrum yer değişimini azaltmayı başarmışlardır [33].

Wang L., Wang C. ve Chang (2012) tarafından yapılan çalışmada; frekans yer değişiminde geç kalma süresini ölçmek için, BR ağlarında yeni bir model tasarlanmıştır. Lisanslı kullanıcının sisteme girmesi ile oluşacak çakışmayı engellemek için, spektrum yer değişimi yapılması önerilmiştir. Bu değişimi yapmak için, alternatif kanallara ihtiyaç olduğu saptanmıştır. Alternatif kanalların bulunabilmesi için üç farklı parametre üzerinde çalışılmıştır. Bu parametreler: lisanslı ve lisanssız kullanıcıların sistemi ne kadar zaman kullandıkları, sürekli yer değişimi sırasında alternatif kanalların tespiti ve lisanssız kullanıcıların alternatif kanallara atanırken kendi aralarında oluşan gecikmesidir. Bu kritik özellikler sayesinde; frekans bandının kullanım durumunu belirlemek için yeni bir model yapısı ileri sürülmüştür [34].

Zahed, Awan ve Cullen (2013) tarafından yapılan çalışmada; spektrum yer değişimi ve toplam kullanım zamanını kısaltmak için araştırma yapılmıştır. Bunun için iki farklı spektrum yer değişimi üzerinde çalışılmıştır. Önerilen bu yaklaşımlar sayesinde; veri iletimi yaparken, kesintiye uğrayan kullanıcılara öncelik sağlanmıştır. İletişimi kesintiye uğramayan kullanıcılara öncelik sağlamak için, yeni bir modelleme yapılmıştır. Bu modellemenin spektrum yer değişimi sonuçları analiz edilmiş ve diğer yer değiştirme yöntemleri ile kıyaslanarak, olumlu yönleri ön plana çıkarılmıştır [35]. Potdar ve Patil'in (2013) çalışmasında; iletim sırasında öne çıkan servis kalitesi baz alınmıştır. Bu servis kalitesine göre, spektrum yer değişim yöntemi önerilmiştir. Sunulan bu yöntemde amaç, lisanssız kullanıcıların hareketliliğidir. Lisanssız

kullanıcının yer değiştirmesine göre, buldukları ağ içi ve ağ dışı yer değişimi belirlenmiştir. [36].

Konishi, Masuyama, Kasahara ve Takahashi (2013) tarafından yapılan çalışmada; lisanssız kullanıcılara tahsis edilen alt kanalların, tek bir çatı altında toplanması önerilmiştir. Çok kanallı ve çok sunuculu yapı kullanılarak sunulan model; engelleme olasılığı, mecburi bitirme olasılığı ve lisanssız kullanıcı sayısı hesap edilerek yapılmıştır. Mecburi bitirme olasılığında, iki farklı model ortaya konulmuştur. Birincisi; çok sayıda alt kanal tahsis edilen lisanssız kullanıcıların, veri iletimini bitirmeye çalışmaktır. İkincisi ise; minimum sayıda alt kanal tahsis edilen lisanssız kullanıcının, veri iletişimini hızlandırmaya çalışmaktır [37].

Pham, Tran, Do, Moon ve Hong (2014) yaptıkları çalışmada; spektrum yer değişim yoentemini verimli olarak uygulamak için, kanalların anlık kullanımının incelemesini önermişlerdir. Hidden Markov yapısını temel alan frekans yer değiştirme yapısını önermişlerdir [38]. Hasegawa, Hirai, Nagano, Harada ve Aihara'nin (2014) yapmış oldukları çalışmada, frekans atamasına karar vermek için yeni bir yoentem geliştirilmiştir. Merkezi yoetime sahip ağlar için, ozuun optimal olduğu yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. önerilen algoritma; herhangi bir merkezi hesaplama olmaksızın, yanlış algılamayı en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Tüm ağı optimize etmek için her kullanıcı kendi karar mekanizmasını oluşturmaktadır [39].

Muralidharan, Venkateswaran, Ajay, Prakash, Arora ve Kirthiga (2015) yaptıkları çalışmada; sistemdeki kullanıcıların sayısı ve gürültü seviyesine göre, ayarlanabilir bir eşik değeri üzerinde çalışmışlardır. Standart sapma eşiğini sabitlemek için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Sistem, daha önce değişen karar istatistiklerine bağlı olarak, kendini dinamik olarak eğitmiştir. Bu sayede, lisanslı kullanıcının varlığı daha doğru tespit edilmiştir [40]. Pandya, Durvesh ve Parekh (2015) tarafından yapılan çalışmada, spektrum algılama yoentemleri incelenmiştir. Enerji algılama yoentemi uygulanarak, sistemin verimliliği olulmuştur. Radyo ortamındaki sinyallerden, lisanslı kullanıcının sinyalini tespit etmeyi amaçlamışlardır [41].

Ivanenko ve Bezruk'un (2016) yapmış olduğu çalışmada; BR ağlarında, bilinmeyen sinyalleri tespit etme yoentemleri incelenmiştir. önerilen yoentemler, frekans kanalındaki bir sinyalin varlığını tespit ederken kullanılmıştır. Algılama yaparken

ortaya çıkabilecek sönümlenme, gölgeleme gibi sorunları ortadan kaldırmayı amaçlamışlardır [42]. Shinde ve Jadhav (2016) tarafından yapılan çalışmada, lisanslı kullanıcıyı tespit etmek için enerji algılama yöntemi kullanılmıştır. Sistemin algılama kapasitesini daha da artırmak ve gölgeleme, sönümlenme gibi problemlerin üstesinden gelmek için merkezileştirilmiş ortak spektrum algılama yöntemi kullanılmıştır. Önerilen yöntem; ortamın gürültülü olduğu durumlarda, doğru karar vermek için tasarlanmıştır. Bilişsel düğümler ve servis sağlayıcı arasındaki iletişim bağı olarak, boş frekans kanalının ataması yapılmıştır [43].

El-Toukhey, Ammar, Tantawy ve Tarrad (2017) tarafından yapılan çalışmada, iki farklı klasik kanal erişim yöntemi ile birincil ve ikincil kullanıcıları algılamak için üç boyutlu Markov modeli önerilmiştir. Kanal atama hızı ve hizmet kalitesi gibi parametrelerin değiştirilmesiyle oluşabilecek etki incelenmiştir. Bu etkilerin sistem performansını nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Önerilen yöntem ile lisanssız kullanıcılar gruplara ayrılarak, en uygun kanal atamasının yapılması sağlanmıştır [44]. Avila, Rudra ve Reddy'nin (2017) yapmış olduğu çalışmada, frekans spektrumundaki şartlara göre değişen eşik değeri incelenmiştir. Spektrum algılama yöntemi olarak da enerji algılama yöntemi kullanılmıştır. Radyo ortamındaki gürültü değeri ve kullanıcıların oluşturmuş olduğu parazit seviyesine göre, dinamik olarak değişen eşik değeri hesaplanmıştır. Bu eşik değeri, lisanslı kullanıcının güç değeri ile kıyaslanarak doğru algılama yapılması amaçlanmıştır [45]. Satria, Mustika ve Widyawan (2018) tarafından yapılan çalışmada, karınca kolonisi algoritması kullanılarak bilişsel radyo ağı için kaynak tahsisi çözümü önerilmiştir. Önerilen çözüm, kanal seçimine karar vermek için karıncalar tarafından kullanılan yoldaki feromon yoğunluğuna dayanmıştır. Uygulanan yöntem ile, BR kullanıcılarına en uygun kanal tahsisi yapılmıştır [46].

Avirup ve Nabanita (2019) tarafından yapılan çalışmada; önerilen yaklaşımın, dinamik spektrum erişimi sağladığı görülmüştür. Böylelikle lisanslı ve lisanssız kullanıcının birbirine karışması önlenmiştir [47]. Papadopoulos, Chatzidiamantis ve Georgiadis (2020) yaptıkları çalışmada; kanal ve veri hızı bilgisi olmadan, kanal ataması yapmayı önermişlerdir. Ayrıca, ağın çıkışındaki bilgileri arttıran ikinci bir ağ kodlama algoritması sunmuşlardır. Ancak ikinci algoritma; lisanslı kullanıcıya ait bilgilerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır [48]. Salama ve Taha (2020) tarafından yapılan çalışmada; işbirlikçi spektrum algılama yönteminin, diğer yöntemlere göre daha iyi

olduğu gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarında; tespit olasılıklarının, diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu görülmüştür. Gölgeleme ve sönümlenme gibi problemlerde bile, bu yöntemin oldukça iyi çalıştığı belirtilmiştir [49].

Chavan ve Junnarkar (2020) tarafından yapılan çalışmada; BR ağları için, işbirliğine dayalı çevre tabanlı bir spektrum algılama ağı oluşturulması önerilmiştir. Analiz, doğru tespit değerine ve az enerji tüketimine bağlı olarak çalışmaktadır. Çalışmanın amacı; dağıtılmış ortam ve mobil radyo ağı için, hassas bir ortam tasarlanmasıdır. Bu çalışma, kalıcı spektrum algılama verilerinde sahtecilik saldırılarını (Spectrum Sensing Data Falsification - SSDF) önlemek için tasarlanmıştır [50]. Dinh-Thuan, Anh-Tu ve Lee (2020) tarafından yapılan çalışmada; bilişsel radyo ağları için tam çift yönlü çalışma modlarına odaklanılmıştır. Ayrıca CR tabanlı nesnelerin interneti ve kablosuz sensör ağları için güncel spektrum tahsisi yapılmış ve hizmet kalitesini düşürmeden kesinti olasılığına bakılmıştır. Verim açısından sistem analizi yapılarak hem rayleigh sönümlenmesi hem de nakagami-m sönümlenmesi üzerinden ikincil ağdaki kullanıcıların performansı analiz edilmiştir. Önerilen sistem; enerji harcama protokolünde, güç tahsisi yaparak optimum güç yönetimi yapmıştır [51]. Babu, Deepan ve Rebekka (2020), ortogonal olmayan çoklu erişim (NOMA) şemasını kullanan tam çift yönlü röle (FDR) destekli CR ağının performansını incelemiştir. Bu sistemde, ikincil ve birincil kullanıcılar NOMA protokolüne göre eşleştirilmiş ve kullanıcılar ortak iletim için aynı röleyi paylaşmışlardır. Kesinti olasılığı ve ikincil kullanıcının ortalama verimi için tam kapalı form ifadeleri türetilmiştir. Sonuçlara göre önerilen yöntemin, sistem performansını önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. Daha fazla başarı elde etmek için, mevcut yarı çift yönlü senaryo üzerinden sistemin güç tüketimi de incelenmiştir [52].

Haitham, Iftekhar, Daryoush ve Phung (2020); CR tekniğinin güç tüketimini azaltan ve gönderilen verilerin gizlilik düzeyine göre güvenlik önlemlerini artıran bir model önermişlerdir. Böylece enerji ve güvenlik bilincine sahip bir CR tabanlı iletişim yaklaşımı geliştirilmiştir. Ayrıca; önerilen yaklaşımda, kullanıcının pil seviyesi, veri türü, kullanılmayan bantların sayısı ve güvenlik açığı seviyesi gibi faktörler de dikkate alınmıştır. Sistem, bu parametrelere göre optimizasyon yaparak en uygun frekans bandını seçmiştir. Önerilen yaklaşımın; enerji tüketimini %18'e kadar azaltabildiği ve kullanıcı verimini de %20'ye kadar artırabildiği gözlemlenmiştir [53]. Gaurav, Sonal



ve Sudakar (2020) yaptıkları çalışmada, işbirlikçi spektrum algılamanın en uygun çözüm olduğunu ileri sürmüşlerdir. Birden fazla ikincil kullanıcının, spektrumu toplu olarak algılamasına izin verilmiş ve bu toplu kararlar optimal çözüme ulaşılmıştır. Önerilen yöntemde, zaman-bant genişliği analizi yapılmıştır. Minimum toplam hata oranını elde etmek için zaman-bant genişliğine göre algılama olasılıkları incelenmiştir [54].

Kandaurova ve Chirov (2020) tarafından, zaman içinde spektrum doluluğunu tahmin etmek için bir model oluşturmuş, üç aşamadan oluşan spektrum doluluk modellerine dayalı tahmin ile dinamik spektrum erişimini uygulamak için bir algoritma önerilmiştir. Saha deneyinin sonuçları, geliştirilen yazılımın gün boyunca spektrumun boş kısımlarını bulmak için kullanılmıştır. Bu bilgiyi kullanarak, güncel bir spektrum doluluk tahmin modeli geliştirilmiştir [55]. Ngoc, Khuong, Thiem, Son ve Pham-Ngoc (2021) yaptıkları çalışmada, üst üste bindirme yöntemini önermişlerdir. Önerilen yöntemde, lisanslı kullanıcının enerjisi verimli bir şekilde kullanılmış ve radyo ortamındaki bozucu sinyaller en aza indirgenmiştir. Hem lisanslı hem de lisanssız ağların sorunsuz haberleşmesi için, BR kullanıcılarının kesinti olasılık formülleri hesaba katılmıştır. Bu sayede, girişimi en az indirmeyi başarmışlardır [56].

Todor ve Iliev (2021); sinyal, kanal ve gürültü gücü hakkında önceden bilgi gerektirmeyen kanal aktivite analizi yöntemlerini incelemişlerdir. Temel bileşen analizi ve çeşitli kümeleme yöntemleri (toplulaştırma, k-ortalamlar ve k-medoidler) sayesinde hem doğru algılama olasılığı iyileşmiş hem de donanım ve yazılım gereksinimleri azaltılmıştır. Önerilen yöntem ile; BR sistemleri için spektrum boşluğu tahsisinde veri işleme için en uygun parametreleri, ön işleme ve küme analizini kullanarak bulmayı amaçlamışlardır [57]. Kandaurova ve Chirov (2021); ikincil kullanıcılara, spektrumun uygun aralığını tahsis etmek için iki algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritmalar arasındaki fark, spektrum doluluk durumunun orijinal matrisini temsil etme ve onunla etkileşime girme yaklaşımlarına dayanmıştır. Algoritmaların performansını karşılaştırmak için yapılan deney sonuçları, kullanıcının oturum başlamadan en az 6.54 ms önce spektrumun boş bir bölümünü aramak için bir istek göndermesi gerektiğini göstermiştir [58].

Huan, Ruiquan, Jun, Min ve Changchun (2021) tarafından yapılan çalışmada; derin pekiştirmeli öğrenmede bir derin Q-ağ (DQN) algoritması önerilmiştir. Bu algoritma, kanal işgali, kanal kazancı ve enerji değeri gibi dinamik özellikleri göz önüne almıştır.

Farklı kanal doluluk durumları altında, bilişsel radyo ortamının değişimine göre uygun çalışma modunun ve iletim gücünün değerinin seçebildiği görülmüştür [59]. Tlouyamma ve Velepini (2021) tarafından yapılan çalışmada; lisanslı ve lisanssız kullanıcılar arasındaki etkileşimlerin etkisi incelenmiştir. Lisanssız kullanıcıların, kanalı en etkin şekilde kullanması için; veri aktarımı sırasında, bir sonraki kullanılabilir kanalın en kısa sürede hazır hale getirilmesi amaçlanmıştır. Daha fazla aktarım fırsatını keşfetmek ve çok sayıda boş kanalı tespit etmek için, paralel bir tespit yöntemi kullanılmıştır. Önerilen genişletilmiş genelleştirilmiş öngörücü kanal seçim algoritmasının (Extended Generalized Predictive Channel Selection Algorithm - EXGPCSA); veri hızı, hizmet süresi ve algılama olasılığı açısından, diğer çalışmalara göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [60].

Haiyong, Xu, Yufei, Zhongxiang ve Lizhen (2022), çok taşıyıcılı bilişsel radyo ağları için ortak-ortogonal olmayan çoklu erişim (C-NOMA) ile hiyerarşik bir iletim stratejisi önermişlerdir. Bu yöntemde; karşılıklı ve ortak iletim modları, birincil ağda ve ikincil ağda kullanılmıştır. Hem birincil ağ hem de ikincil ağ iletişime yardımcı olmak için, bazı ikincil kullanıcıların gücünü kullanmaya çalışmış, sistem verimini daha da iyileştirmek için alt taşıyıcı ataması ve güç tahsisi yapılmıştır [61]. Min, Zhou, Zhiyong ve Yu (2022) tarafından yapılan çalışmada; BR ağlarında kanal ayarlama adımlarını en aza indirmek amacıyla güç kontrol problemi analiz edilmiştir. Bu problemi çözmek için derin takviyeli öğrenme modelleri önerilmiştir. Önerilen güç kontrol algoritması, ikincil kullanıcının önceden tanımlanmış hizmet kalitesi gereksinimlerini karşılayan ve bir eşiğin altında lisanslı kullanıcıya karşı oluşabilecek parazitleri engelleyen optimal bir iletim gücü aramasına dayanmıştır [62].

Maram, Mohamed ve Mahmoud (2022); ikincil kullanıcılar için kabul edilebilir algısal kalitede sürekli video oynatmayı garanti etmek amacıyla LTE tabanlı BR ağları önermişlerdir. Bu amaca ulaşmak için, farklı ikincil kullanıcıların kanal doluluklarının yanı sıra, bu kanalların kalitesini de göz önünde bulundurmuşlardır. Mevcut kanalları ikincil kullanıcılara uyarlamalı olarak atamak için farklı kaynak tahsis şemaları geliştirmişlerdir. Ayrıca, ikincil kullanıcılar tarafından geri beslenen kanal durum bilgisine dayalı olarak uyarlamalı modülasyon kullanmışlardır [63]. Haj-Ahmed ve Hawa (2022) tarafından, yeni bir yönlü karşılaştırma engelleme pilot aktarma şeması önerilmiştir. Önerilen şema, iletim hattı koruması için kullanılan mesafe röleleri

arasında pilot sinyalleri iletmek için nispeten ucuz, ancak güvenilir iletişim teknolojisi kullanmıştır. Farklı sistem dolulukları ve kanal kullanılabilirliği altında önerilen şemanın güvenilirliğini sağlamak için iletişim kanalı ve parametreleri de incelenmiştir [64].

#### **1.4. Literatür Katkısı**

Tezin literatür katkıları aşağıda belirtilmiştir.

- Bilişsel radyo ağlarında; spektrum algılama yöntemleri, literatürde sıklıkla geleneksel yöntemler kullanılarak uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında; spektrum algılama yöntemlerine, genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimizaitaion - PSO) yöntemi gibi yapay zeka yöntemleri uygulanarak, daha iyi sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir.
- Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak; BR ağlarında, BK'yı tespit etme işleminde, İK'lardan elde edilen veriler de dikkate alınarak sistem geliştirilmiştir.
- Literatürdeki çalışmalara ek olarak; spektrum algılama yöntemleri, yeni nesil sistemlere (CDMA, OFDM, MC-CDMA) uygulanarak, bu sistemler üzerindeki doğruluğu araştırılmıştır.
- Önerilen yeni yöntemle, mevcut frekans spektrumunun verimsiz kullanılması gibi problemler ortadan kaldırılmıştır. Lisanslı kullanıcıyı doğru algılamadaki oranın artması ile spektrum bandı etkin ve verimli bir şekilde kullanılmıştır.

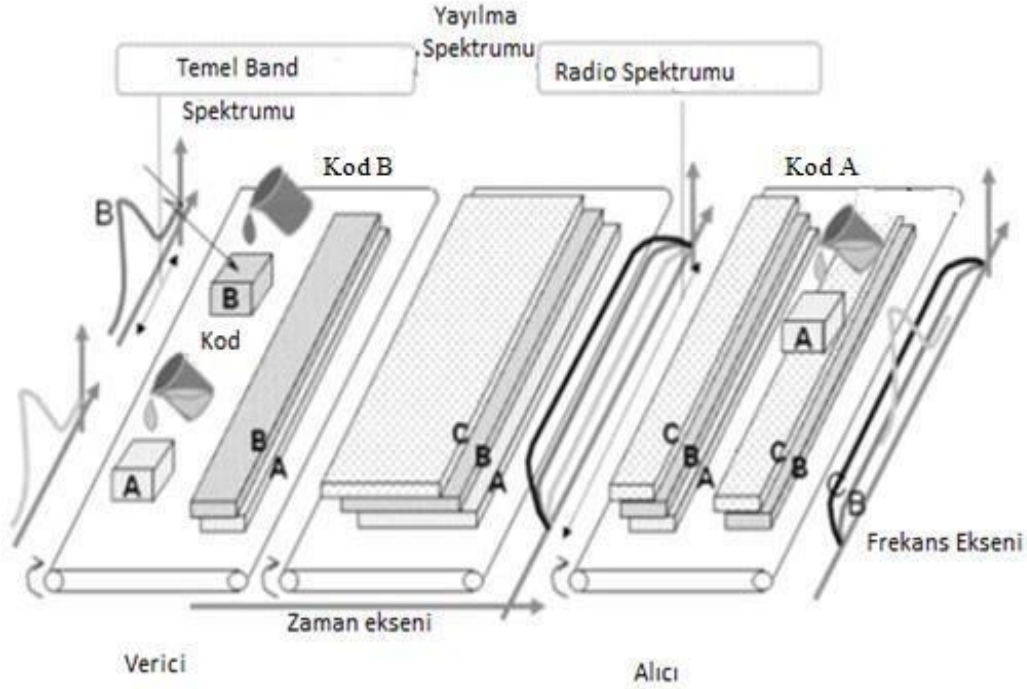
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. CDMA Yöntemi

CDMA; çeşitli sinyallerin, tek bir iletim kanalını kullanmasını kolaylaştıran çoğullama yöntemidir. Mevcut bant genişliğinin kullanımını optimize eder. CDMA, yaygın olarak ultra yüksek frekanslı (Ultra High Frequency - UHF) hücreli telefon sistemlerinde yani 800 MHz ve 1,9 GHz bant aralığında kullanılır. CDMA sistemi, zaman ve frekans çoğullamadan çok farklıdır. Bu sistemdeki bir kullanıcı, tüm süre boyunca bütün bant genişliğine erişebilir. Sistemin avantajı; kullanıcıları ayırt etmek için farklı CDMA kodları kullanmasıdır [65].

Genel olarak iki tip yapı kullanılır. Bunlar; Doğrudan Sıralı Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Direct Sequence Code Division Multiple Access - DS-SS) ve Frekans Atlamalı Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Hopping Code Division Multiple Access - FH-SS) sistemidir. CDMA'de, geniş bir banda yayılan bir sinyal üretilir. Herbir kullanıcı için, yayma kodu adı verilen bir kod kullanılır. Bu kodlar, birbirine dik olan grup kodlarıdır. Grup kodları, bant genişliğini verimli kullanmak için gereklidir. Herbir sinyal için farklı kod kullanımı, kullanıcıları birbirinden ayırt etmek için de kullanılır. CDMA'de, kod sayısı arttıkça kullanıcı sayısı da artar [66].

Farklı yayılma kodlarına sahip sinyaller, birçok kullanıcının desteklenmesine izin vermek için kullanılır. Bu yüzden, aynı taşıyıcı sinyal üzerinden modüle edilir. Farklı ortogonal kodlar kullanıldığında, sinyaller arasındaki girişim (Inter Symbol Interference - ISI) minimum düzeyde olur. Bu durum, kullanıcıların birbirini etkilemeden veri alış verişi yapmasına olanak sağlar. CDMA sisteminin teknik özellikleri Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Veri iletimi esnasında, tüm kullanıcıların sinyalleri karıştırılarak gönderilir. Böylece, bütün sinyaller, alıcı tarafa birlikte ulaşmış olur. Alıcı tarafa gönderilen sinyallerin yayılma kodları farklıdır. Her kullanıcının bilgi sinyali, kullandıkları yayma kodlarına göre çıkarılır.



**Şekil 2.1.** CDMA yönteminin teknik özellikleri.

CDMA yönteminin kapasitesini etkileyen faktörler vardır. Bu faktörler; sistem kazancı, sinyal gürültü oranı, ses etkinliği faktörü ve frekansı yeniden kullanma verimliliğidir. CDMA; her frekansta, çok sayıda kullanıcıya iletim yapma imkânı sunar. Bu durum; CDMA teknolojisinin, gürültünün fazla olduğu bir ortamda çalışabildiğini gösterir [67]. Komşu hücreler aynı frekansları kullanır. Bu durum, frekansın yeniden kullanım verimliliğini düşürür.

CDMA, yayılmış bir spektrum yöntemidir. Her veri biti, bir kod dizisi ile yayılır. Bu, bit başına düşen enerjinin de arttığı anlamına gelir ve bir kazanç elde edilir. Elde edilen kazanç eşitlik 2.1’de gösterilmiştir.

$$P (\text{kazanç}) = 10 \log (S / R) \quad (2.1)$$

Burada; S, yayılma oranını temsil ederken, R ise, veri hızını gösterir.

### 2.1.1. CDMA Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

CDMA'nın avantajları;

- Alıcı taraftan elde edilen tüm sinyaller, yaklaşık olarak eşit güce sahip olmalıdır. Baz istasyonunun yakınlarında, yüksek güçle iletim yapan bir kullanıcı varsa; düşük güç değerine sahip kullanıcıyı bastırır. Bu durumu

engellemek için, CDMA sistemlerinde, güç kontrolünü sağlayan devreler kullanılır.

- Sinyal alımını iyileştirmek için tırmık alıcıları kullanılır. Çok yollu sinyallerin gecikmeli zaman versiyonları toplanır ve bit seviyesinde kararlar almak için kullanılır. Böylece; bütün sinyallerin verileri dikkate alınarak, frekans ataması yapılır.
- Mobil baz istasyonları, operatörü değiştirmeden geçiş yapabilir. İki baz istasyonu, mobil sinyali alır ve buradan dağıtımını yapar. Bu durum; farklı baz istasyonları arasında iletişim kurulmasına olanak sağlar.

CDMA'nın dezavantajları ;

- Kod uzunluğu dikkatlice seçilmelidir. Eğer büyük bir kod uzunluğu seçilirse, gecikmeye veya parazite neden olabilir.
- Sinyaller arasında zaman senkronizasyonu gereklidir. Eğer zaman senkronizasyonu doğru yapılmaz ise, alıcı taraftaki sinyallerin bilgileri karışabilir.
- Bir baz istasyonundan alınan ve iletilen gücün toplamı, sürekli sıkı güç kontrolüne tabi tutulur. Bu yüzden zaman kaybı yaşanabilir [68].

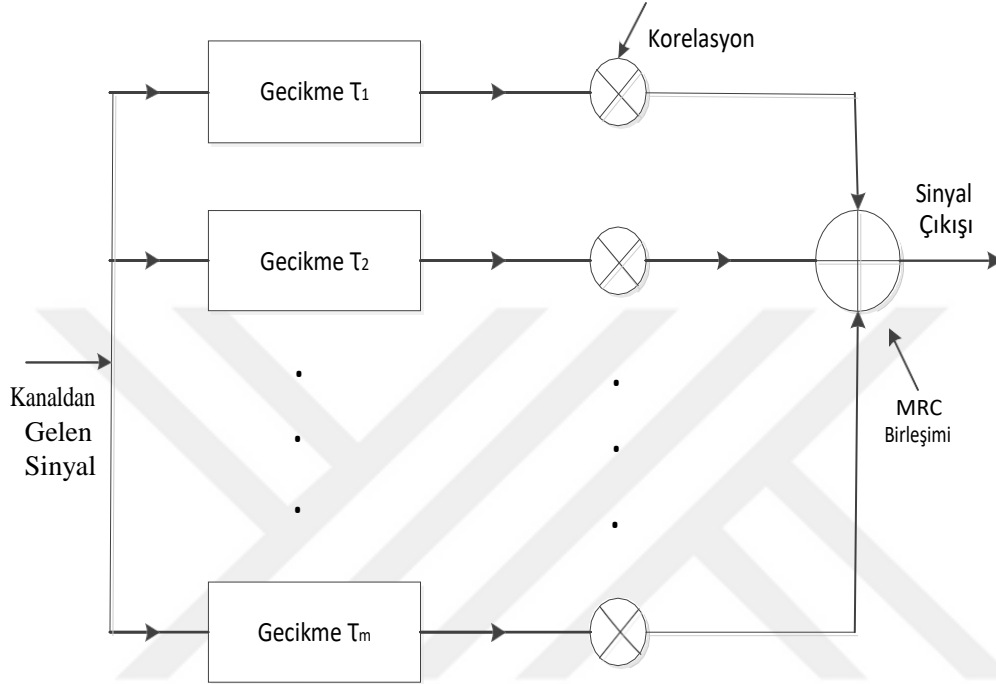
### 2.1.2. CDMA Ağı

Baz istasyonu, CDMA ağının temel bir unsurudur ve hücre adı verilen küçük bir coğrafi alanı kapsar. Bir hücre, çok yönlü veya sektörel olabilir. Her baz istasyonunda, bir verici anten ile iki alıcı anten bulunur. Uzamsal çeşitlilik amacıyla, hücre başına iki alıcı anten kullanılır. Birçok uygulamada, birkaç baz istasyonunu kontrol eden bir baz istasyonu denetleyicisi bulunur.

### 2.1.3. Tırmık Alıcısı

Radyo kanalı; birbirinden farklı genlik, faz ve gecikmeyle iletilen sinyallerden oluşabilir. Sinyal bileşenleri, birbirlerinden farklı zamanlarda alıcıya ulaşır. Farklı zamanlarda ulaşan sinyalleri ayarlamak ve birleştirmek için bir tırmık alıcısı kullanılır. Tırmık alıcısı, birden çok yol boyunca bir çeşitlilik ilkesi kullanır [69].

Tırmık alıcısının blok diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Tırmık alıcısı, çok yollu sinyal bileşenlerini işler. Daha iyi iletişim performansı ve güvenilirlik elde etmek için kullanılır. Tek bir korelasyon temelindeki bit kararı, gürültü nedeniyle zarar görebilir. Bu nedenle; işlenen sinyallerde, büyük bir bit hata oranı oluşabilir [70].



Şekil 2.2 Tırmık alıcısının blok diyagramı [71].

#### 2.1.4. Walsh Kodu

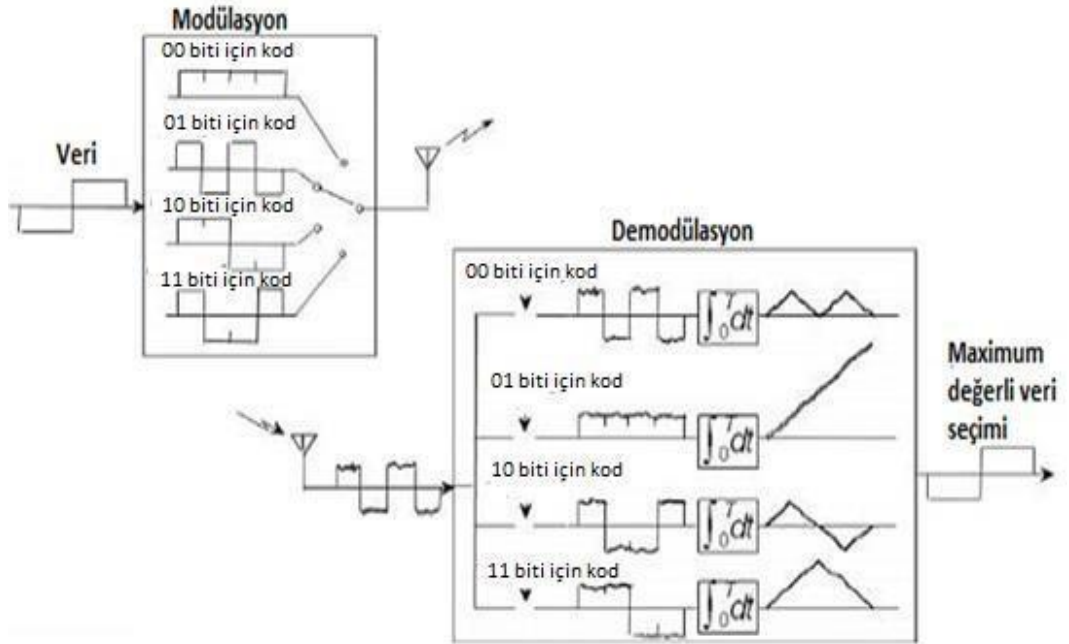
Walsh Kodları, en yaygın olarak CDMA uygulamalarının ortogonal kodlarında kullanılır. Bu kodlar, Hadamard matrisi adı verilen özel bir kare matrisin satırlarına karşılık gelir. CDMA ağlarında, genellikle 64 Walsh fonksiyon matrisi kullanılır. Bu matrisin ilk satırı, bit 0 ve 1’in farklı kombinasyonlarını içerir. Satırların her biri, tümü sıfırlardan oluşan bir diziyi içerir. CDMA sistemi ile uygulandığında; her mobil kullanıcı, matristeki 64 sıra dizisinden birini yayma kodu olarak kullanır. Diğer tüm kullanıcılar arasında, sıfır çapraz korelasyon sağlar. Bu matris, eşitlik 2.2’deki gibi öz yinelenmeli olarak tanımlanır.

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & -1 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Burada  $n$ , 2'nin bir gücüdür.  $W$  Walsh matrisini temsil eder ve matrisin farklı boyutlarını belirtir.  $W_n$  matrisindeki  $n$  ifadesi, bu matristeki tüm bitler üzerindeki mantık NOT işlemini temsil eder. Üç matris;  $W_2$ ,  $W_4$  ve  $W_8$  sırasıyla boyut 2, 4 ve 8 için Walsh matrisinin farklı fonksiyonunu gösterir.

64 Walsh matrisinin; 64 her satırı, bir kanal numarasına karşılık gelir. Kanal numarası 0, Walsh matrisinin ilk satırına eşlenir. Bu kanal aynı zamanda, pilot kanal olarak da bilinir. Diziler arasında çapraz korelasyon hesaplaması yapılır. Bunu yaparken,  $\pm 1$  değerleri oluşturmak için bitler matrise dönüştürülür. Böylece aynı CDMA kanalındaki tüm kullanıcılar, ortak bir uzun PN dizisi kullanarak senkronize edilir. Aynı zamanda, bir veri karıştırıcı olarak da işlev görür [71].

Walsh Kodu, iyi bir otokorelasyon ve zayıf çapraz korelasyon özelliklerine sahip bir yayma kodları grubudur. Walsh kodları, CDMA sisteminde tek tek kanalları geliştirmek için kullanılır. Pilot olarak "0" kodu kullanılır. Senkronizasyon için de "32" kodu kullanılır. 1'den 7'ye kadar olan kodlar, kontrol kanalları için kullanılır. Kalan kodlar, trafik kanalları için kullanılır.



**Şekil 2.3.** Çoklama işleminin Walsh Kodu kullanılarak yapılması [71].

CDMA; farklı radyo konfigürasyonlarının veri hızlarını ve yayılma faktörlerini barındırmak için, uzunlukları değişen çok sayıda Walsh kodu içerir. Walsh kodları,



her bir iletim için gönderilen verileri temsil eder. 64 kodun tümü, kanal tarafından bilgi taşımak için kullanılır. Şekil 2.3'te, çoklama işleminin Walsh Kodu kullanılarak nasıl yapıldığı gösterilmiştir.

Çoklama işlemi, Toplamsal Beyaz Gauss Gürültü (Additive White Gaussian Noise - AWGN) kanalında, daha fazla güç ve bant genişliği verimliliği için kullanılır. Bant genişliği sınırlı bir kaynak olduğundan, iletim için gereken bant genişliğinin en aza indirilmesi gerekir. Bu nedenle çoklama işlemi yapılır.

Yaygın spektrum yönteminin avantajı; birçok kullanıcının aynı bant genişliğini, birbirleriyle etkileşime girmeden aynı anda kullanabilmesidir. Bu nedenle, kullanıcı sayısı daha az olduğunda, yayılma spektrumu ekonomik değildir. Yayılmış spektrum, iletilen sinyalin frekansında değişiklik yaparak sinyali gönderir. Bunun amacı, daha yüksek bant genişliğine olanak sağlamasıdır.

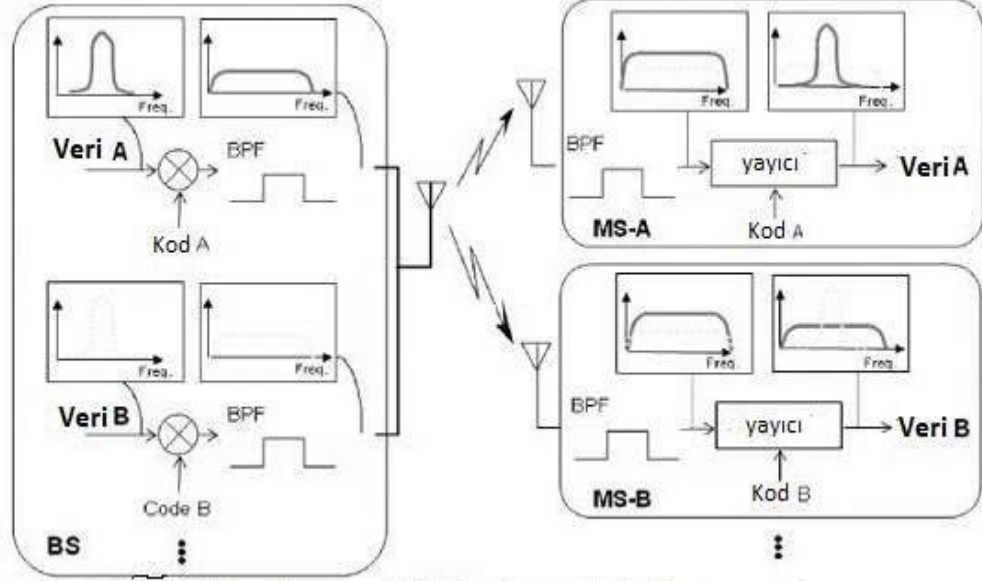
Yayılma spektrumu, kanal kapasitesini aşmadan işlem yapmak zorundadır. Kanal kapasitesi ise; eşitlik 2.3'de verilen formül ile hesaplanır.

$$C = B \times \log_2 (1 + S / N) \quad (2.3)$$

Verilen eşitlikde; C, teorik bir bit hata oranı (Bit Error Rate - BER) için maksimum veri hızı olan kanal kapasitesidir. B ise, Hz cinsinden gerekli kanal bant genişliğidir. S / N ise, sinyalin gürültüye göre güç oranıdır. Yayılmış spektrum; algılanması, kesilmesi veya demodüle edilmesi zor olan sinyaller kullanır. Ek olarak, yayılı spektrum sinyallerinin sıkışması, dar bant sinyallerine göre daha zordur. Yayılı spektrum sinyalleri çok geniş olduğundan, dar bantlı vericilerden çok daha düşük bir spektral güç yoğunluğunda iletilirler. Yayılı spektrum ve dar bant sinyalleri, çok az parazitte veya hiç parazit olmadan aynı bandı kullanırlar. Bu özellik, günümüzde yayılmış spektrumun sıkça kullanılmasını sağlamıştır [72].

## 2.1.5. DS-CDMA

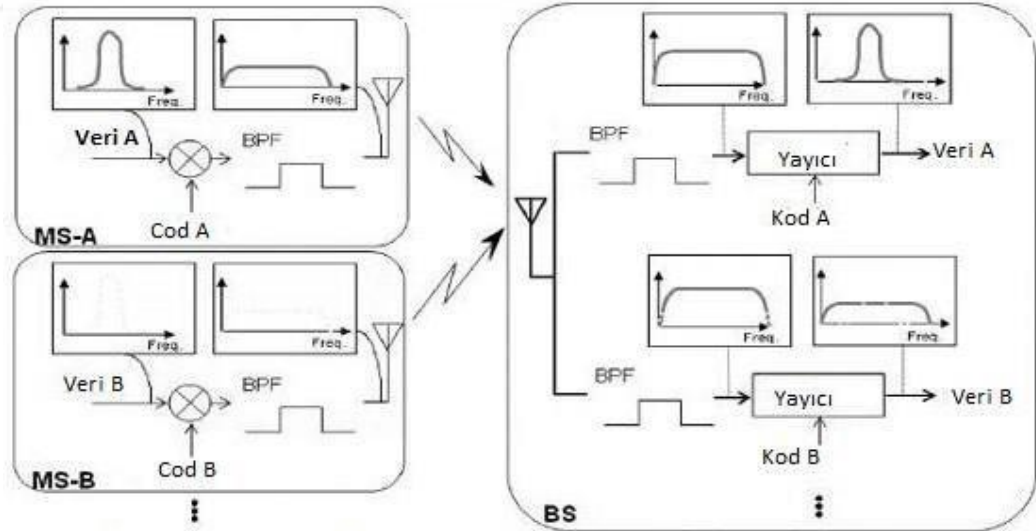
### DS-CDMA Sistemi - İleri Bağlantı



her iletişim yolu arasındaki fark sadece yayılan koddur

Şekil 2.4. DS-CDMA sistemi ileri bağlantı şeması [73].

### DS-CDMA Sistemi - Ters Bağlantı



her iletişim yolu arasındaki fark sadece yayılan koddur

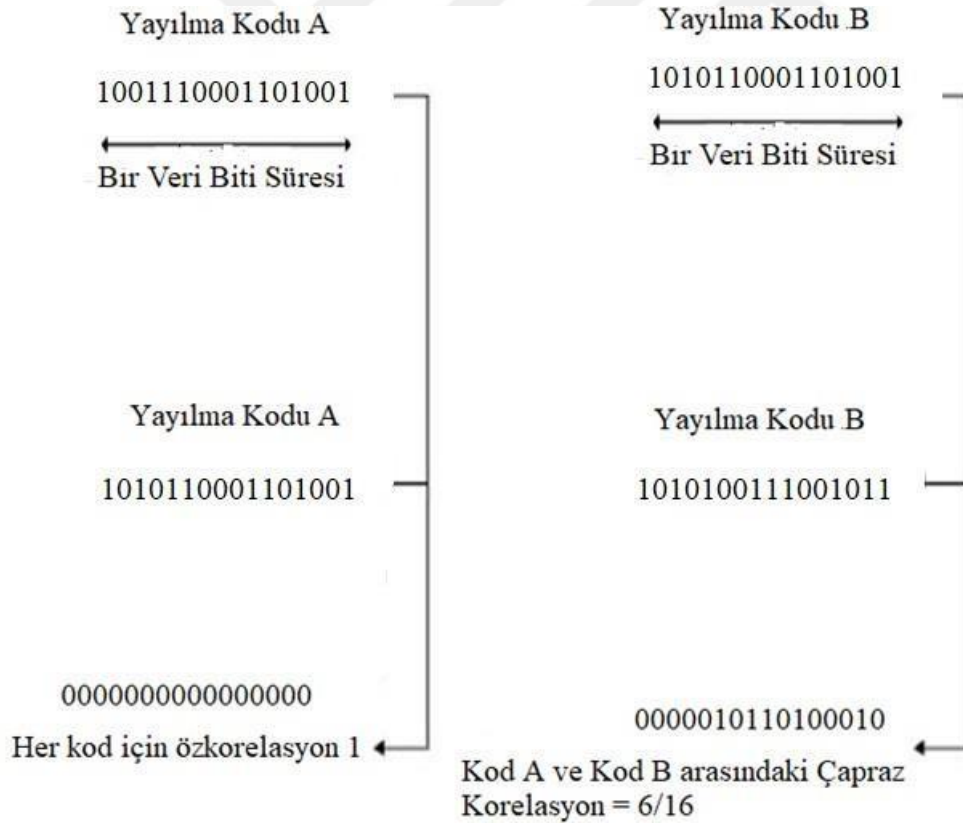
Şekil 2.5. CDMA sistemi ters bağlantı şeması [73].

Yaygın spektrum olan sinyal, yalnızca iletim için kullanılan bir kodla demodüle edilir. Bunu kullanarak; her kullanıcının iletim sinyali, sinyali aldığı anda ayrı bir kodla tanımlanır. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te verilen örnekte; A kullanıcısının, A kodundaki

yayılma sinyali ile B kullanıcısının, B kodundaki dağınmık sinyali verilmiştir. Alınan sinyallerin her biri karıştırılır.

CDMA yönteminde, her kullanıcıya farklı bir kod atanır. Kullanıcı tarafından atanan veya seçilen kod, CDMA sisteminin performansı ile ilgili olduğu için sinyali modüle etmekte çok önemlidir. Kullanıcıların sinyalleri arasında net bir fark olduğunda, en iyi performans elde edilir. Bu fark, lokal olarak üretilen sinyal kodu ile alınan sinyallerin ilişkilendirilmesiyle yapılır. Sinyal ile kullanıcının kodu eşleşirse, korelasyon işlevi yüksek olur. Kullanıcının istediği kodun, sinyalle hiçbir ortak yanı yoksa; korelasyon mümkün olduğu kadar sıfıra yakın olmalıdır [73].

Yayma kodu A ile yayma kodu B arasındaki korelasyonun nasıl olduğu Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu örnekte, yayma kodu A (1010110001101001) ile yayma kodu B'nin (1010100111001001) korelasyonu gösterilmiştir. Çapraz korelasyon değeri 6 / 16'ya gelmiştir.



Şekil 2.6. Yayılma kodunun uygulanması [73].

CDMA'nın en büyük kapasite avantajı, kullanıcıya tahsis edilen frekansı yeniden kullanmasıdır. Analog hücreli sistemlerde; üç sektörlü, yedi hücreli bir tekrar faktörü

vardır. Bu, her sektör için her 21 kanaldan yalnızca birinin kullanılabilir olduğu anlamına gelir. CDMA yöntemi ise, hücrenin her sektöründe aynı frekansı paylaşacak şekilde tasarlanmıştır. CDMA yöntemindeki kodlamayı kullanan her kullanıcı için sistem daha verimlidir.

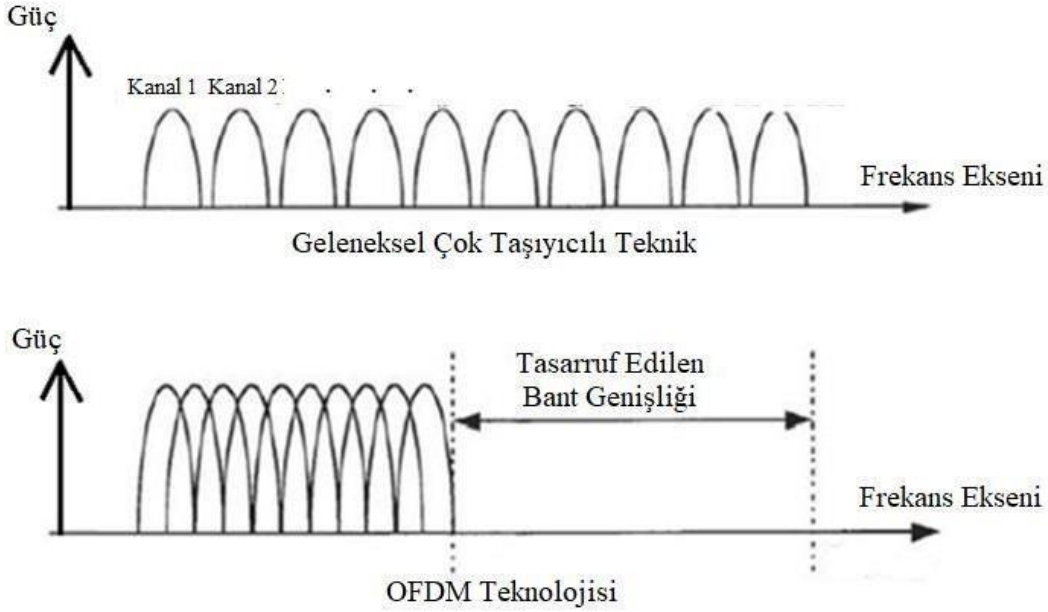
Frekans bölmeli çoklu erişim veya zaman bölmeli çoklu erişim sistemlerinde; radyo kaynağı, komşu hücreler arasında karışma olmaması için tahsis edilir. Komşu hücreler, aynı frekans bandını veya zaman dilimini kullanamaz. Karmaşık radyo yayılımı ve düzensiz hücre tahsisi nedeniyle, frekansı veya zaman dilimini uygun şekilde tahsis etmek kolay değildir. Buna karşı CDMA sisteminde; tüm kullanıcılar aynı frekansı paylaştığından, frekans düzenlemesi kolaylıkla yapılmaktadır. Bu durum, CDMA yönteminin en büyük avantajıdır. CDMA'de, tüm hücreler tek kaynağı kullanabilir. Çünkü CDMA kanalları, aynı anda aynı frekansı kullanır. CDMA'da frekans tahsisi gerekli değildir. Bu yüzden, CDMA hücresel sistemin tasarımı oldukça kolaydır.

## **2.2. OFDM Yöntemi**

Kablosuz haberleşmenin gelişimi; spektrum, bant genişliği gibi sınırlı kaynakların limitlerini zorlamıştır. Bu gelişim, çok kullanıcıli iletişim sistemlerinde yüksek performans ve kapasite talebinin artmasına sebep olmuştur. Mobil İletişim İçin Küresel Sistem (Global System for Mobile Communications - GSM) tarafından sağlanan bant genişliği, oldukça artan yüksek veri içeren uygulamaları (örneğin, multimedya uygulamaları) iletmek için yetersiz kalmıştır. Bu nedenle OFDM; daha düşük veri hızının avantajlarıyla, yüksek veri içeren iletimlere izin veren ve ISI'nın etkilerini en aza indiren çoklu taşınmalı bir aday modülasyon sistemi olarak ortaya çıkmıştır [74].

Sayısal iletişim sistemlerinde; çok yollu sönmleme, ISI'ya karşı yüksek veri hızı ve güvenilirlik gibi ihtiyaçlar ortaya çıkmıştır. Bu durum, çok taşıyıcıli iletimin özel bir durumu olan OFDM sistemine geçilmesine neden olmuştur. Alt taşıyıcılar arasındaki dikenlik, OFDM yönteminin temelini oluşturmuştur. Böylece; spektrum daha verimli kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel çok taşıyıcıli yöntem ile OFDM yönteminin spektrum kullanımı, Şekil 2.7'de sırasıyla gösterilmiştir. Alt taşıyıcılar arasında dikgenliği sağlamak için Ters Ayrık Fourier Dönüşümü / Ayrık Fourier Dönüşümü

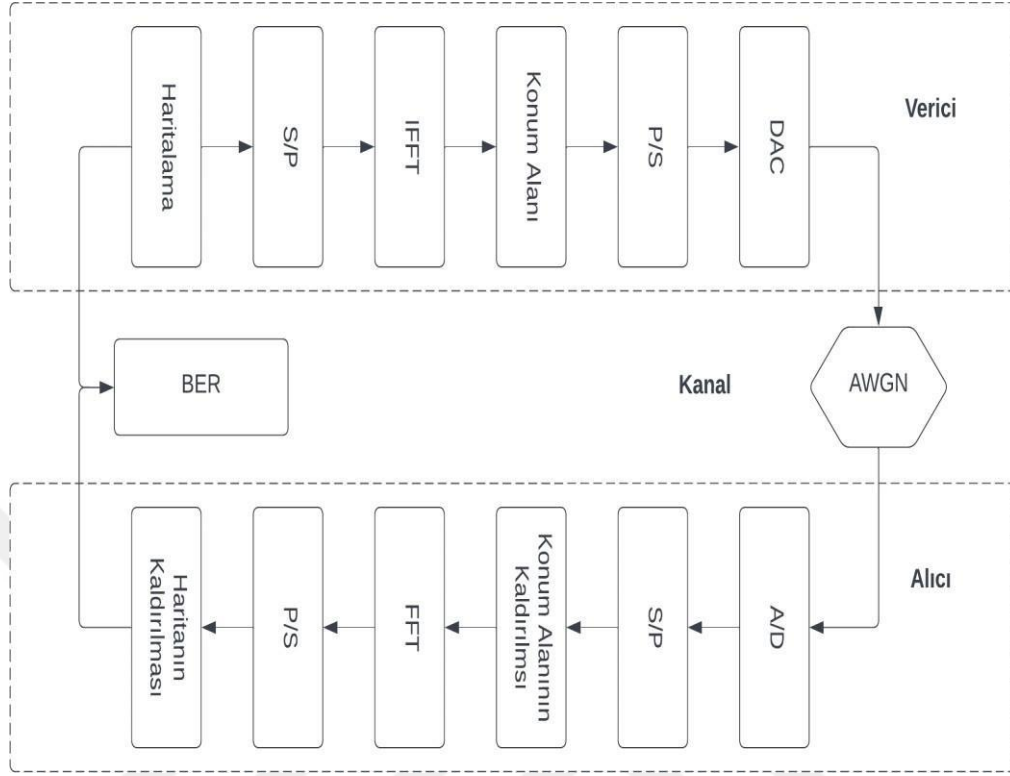
(DFT / IDFT) uygulanmıştır. DFT / IDFT, sırasıyla Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform - FFT) ve Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT) olarak adlandırılan işlem ise; hızlı algoritmalar kullanarak, spektrumu verimli kullanmayı sağlamıştır [75].



Şekil 2.7 Geleneksel çok taşıyıcı yöntem ve OFDM yönteminin gösterimi [75].

### 2.2.1. OFDM Sisteminin Çalışma Mantığı

OFDM sisteminin alıcı verici kısmını içeren blok diyagramı Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Verici tarafındaki haritalama işleminde; M-ary faz kaydırma anahtarlama (M-PSK) ve M-ary quadrature genlik modülasyonu (M-QAM) gibi haritalama yöntemleri kullanılarak, verilerin haritalandırma işlemi yapılmıştır. Veri, seriden paralele dönüştürme (S/P) ile paralel hale getirilmiştir. Dönüştürme, alt taşıyıcıların sayısına bağlı olduğu için IFFT işlemi iletilen sinyali modüle etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, spektrumun verimli kullanımı için bitişik alt taşıyıcılar arasında dikgenlik oluşturmuştur. IFFT, sinyali frekans alanından zaman alanına dönüştürmek için uygulanmıştır. Koruma aralığı (Guard interval - GI); çok yollu sönmlemenin neden olduğu ISI'nın üstesinden gelmek için, IFFT'nin çıkışına eklenmiştir. Koruma aralığı, sembolün önüne eklenmiştir. Paralelden seriye dönüştürme (P/S) işlemi, paralel sembolleri seri simgelere çevirmek için kullanılmıştır. Daha sonra P / S 'nin çıkışı, simgeleri ikili veriler halinde ortam üzerinden iletmiştir. Daha sonra bu veriler, dijital analog dönüştürücüye (Digital Analog Converter - DAC) verilmiştir.



**Şekil 2.8** OFDM alıcı-vericisinin genel blok diyagramı.

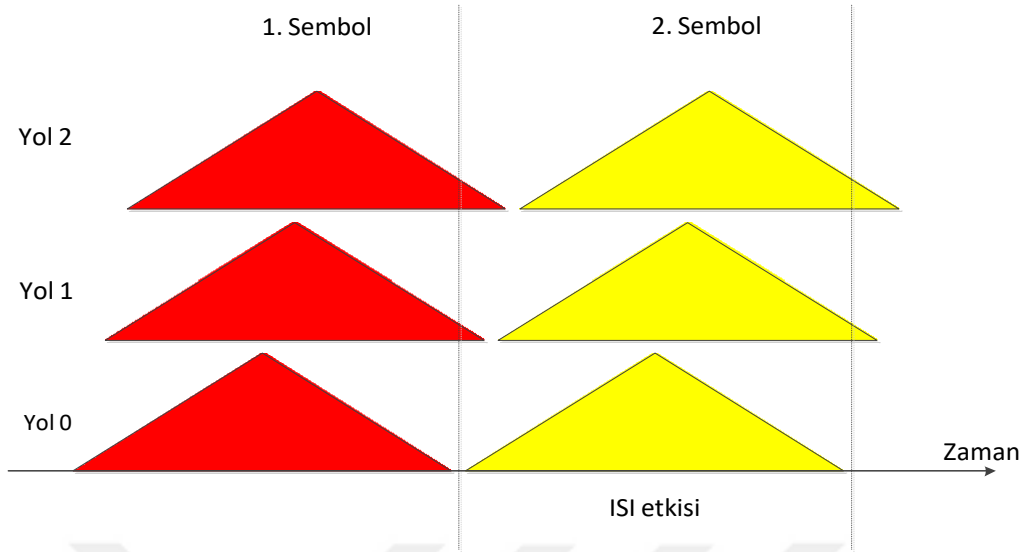
OFDM sinyali, kanalın ve ortamdaki süreçlerin neden olduğu zayıflamalardan olumsuz etkilenir. Bu yüzden, AWGN gürültüsü, OFDM sinyaline eklenir. Alıcı tarafta ise; alınan sinyaller, ikili sayı sistemine dönüştürülür. Bunun için analog dijital dönüştürücüye (Analog to Digital Converter - ADC) ihtiyaç vardır. Ardından seri halde gelen verileri, alt taşıyıcılar için paralel hale getirmek amacıyla sinyal S/P bloğuna gönderilir. OFDM sinyalinden, çevrimsel öntakıyı (Cyclic Prefix - CP) kaldırmak gerekir. Bunun için; sinyal, koruma aralığı kaldırma bloğuna gönderilir. FFT bloğu, OFDM sinyalini demodüle etmek için kullanılır. Aynı zamanda; sinyali, zaman alanından frekans alanına dönüştürmek için de kullanılır. P/S bloğu ise, paralel verileri seri hale getirir. Gürültülü iletilen veriler, eşleştirici tarafından geri yüklenir. BER; iletilen ve alınan verileri karşılaştırarak, OFDM sisteminin performansını değerlendirmek için kullanılır. BER'in artırılması, sistemin performansının düşmesine neden olur. BER'in artması, gönderilen veride hata sayısını arttıracığı için SNR değerinin düşmesine neden olacaktır.

OFDM sisteminin temelini, bitişik alt taşıyıcılar arasındaki dikgenlik oluşturur. Alt taşıyıcıların, sinüs ve kosinüs dalgaları olduğu bilinmektedir. Bu alt taşıyıcıların, bir sembol periyodu altındaki alanları dikkate alınır. Bu alanın integrali sifıra eşit olduğunda, alt taşıyıcılar arasında dikgenlik oluşur [75].

Seriden paralele dönüştürmek işlemi sırasında; OFDM geniş bant aralığı, N adet alt taşıyıcıya bölünmüştür. S/P dönüştürme işlemi; M-ary kodlamasına bağlı olarak ortaya çıkan semboller (bit grubu), alt taşıyıcılardan oluşan bit bloklarına dönüştürmek için kullanılır [76].

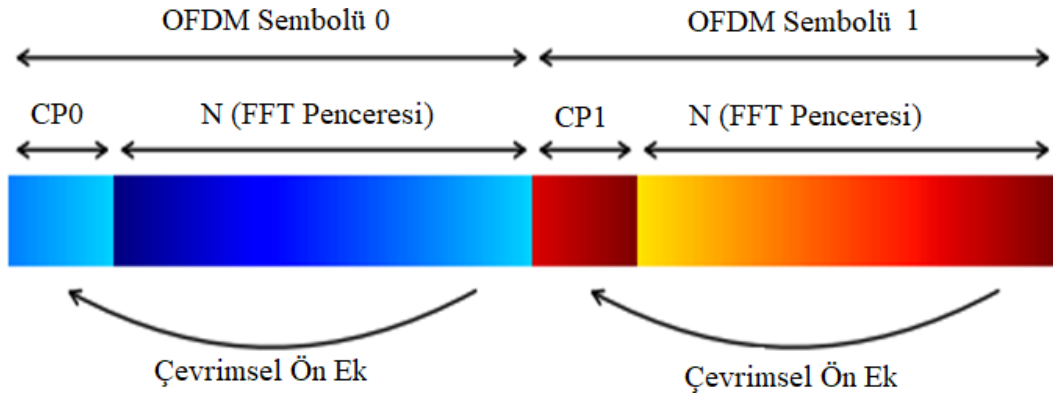
IFFT/FFT kısmında ise; OFDM alıcı-vericisinde, Ters Hızlı Fourier Dönüşümü ve Hızlı Fourier Dönüşüm işlemleri yapılır. Verici ve alıcı uçlarında, karmaşık osilatörler ve filtreler kullanılır. OFDM sinyalinin modülasyonu ve demodülasyonu işleminde; hassasiyet, esneklik ve iletim hızı oldukça önemlidir [77]. IFFT / FFT, OFDM sinyal modülasyonu ve demodülasyonu için verimli bir uygulamadır. Düşük güç tüketimi ve bant genişliği için verimli kullanım sağlar. IFFT, bitişik alt taşıyıcılar arasında dikgenliği sağlar ve sinyali frekans alanından zaman alanına dönüştürür. Alıcı tarafında yapılan FFT işlemi ise, OFDM sinyalini demodüle eder ve sinyali zaman alanından frekans alanına dönüştürür.

Koruma alanı kısmında ise; çok yollu ortamda sinyaller, sönümleme ve ISI'dan olumsuz etkilenir. ISI'nin etkisi, veri hızının artmasıyla artar. ISI; ardışık OFDM sembollerini arasına, koruma aralığı yerleştirilerek aşılır. Koruma aralığı, kanalın maksimum gecikmesinden büyük olmalıdır. OFDM sisteminde, sinyal sönümlemesinin etkisini azaltmak için, her bir alt taşıyıcı üzerindeki iletim hızı düşük olarak ayarlanmıştır. Şekil 2.9'da, üç yoldan geçen iki sembolün ISI etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 2.9** Üç yoldan geçen iki sembolün ISI etkisi.

CP, mevcut OFDM sembolünün son bitlerini içeren koruma aralığıdır. ISI'nin üstesinden gelmek için mevcut OFDM sembolünün başına eklenir. Eğer bir girişim olur ise, CP zarar görür. Böylece, iletilen veriye zarar gelmez. Çevrimsel sonda (Cyclic Suffix - CS), CP gibidir ancak OFDM sembolünün ilk örneklerinin kopyasıdır. OFDM sembolünün alt bilgisine eklenir [78]. OFDM sisteminde CP ve CS çok önemlidir. ISI'nin etkisini ortadan kaldırır ve bitişik alt taşıyıcılar arasındaki dikkenliği korurlar. Şekil 2.10'da, CP eklenmesi gösterilmiştir.



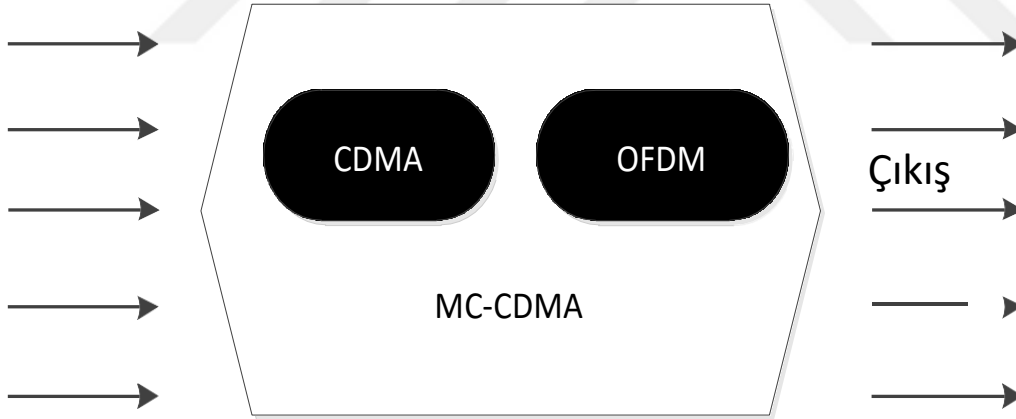
**Şekil 2.10** CP Eklenmesi.



## 2.3. MC-CDMA Yöntemi

OFDM yöntemi; frekans tahsisinde oldukça etkili ve ISI'ya karşı duyarlı olan bir sistemdir. CDMA yöntemi ise; mobil olarak yapılan haberleşmede diğer çoklu erişim yöntemleri ile kıyaslandığında, kapasite olarak fazlasıyla etkili bir yapıdadır. Kullanıcı sayısı arttıkça, birbirleri arasında oluşabilecek girişime izin vermemektedir. Fakat veri miktarı arttığı zaman, bunu gösterememektedir. Bunun başlıca sebebi; aşırı veri gönderiminde, senkronizasyon sorununun olması ve bunun getirdiği ISI problemidir. Bu sorunları ortadan kaldırmak için, OFDM ve CDMA yöntemlerinin bir araya gelmesiyle MC-CDMA yöntemi ortaya çıkmıştır [79].

MC-CDMA yönteminin blok diyagramı, Şekil 2.11'de gösterilmiştir. OFDM yönteminde alt taşıyıcılı sistem kullanılmaktadır. CDMA yönteminde ise, her kullanıcıya ait yayma kodu kullanılır. Yayma kodları kullanılırken, kullanıcılara kıyasla dikgenlik göstermesi gerekir. Senkron olarak iletim yapıldığı zaman, kanallarda genellikle Walsh-Hadamard kodları tercih edilir [80]. Bu sistemde çok sayıda kullanıcıya çoğullama işlemi yapılabilmektedir.



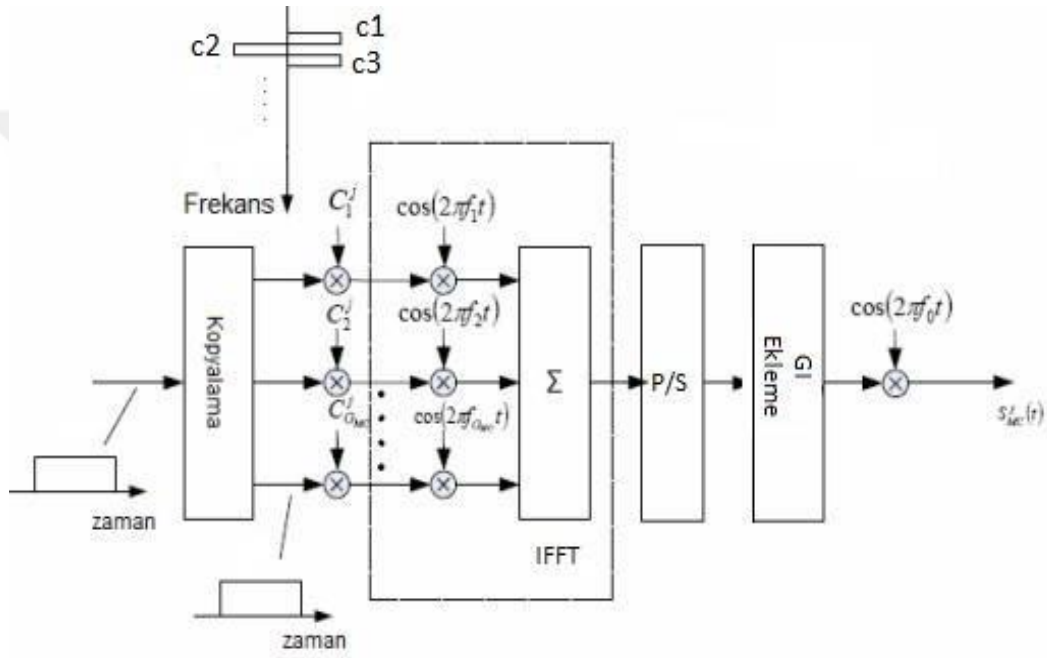
Şekil 2.11 MC-CDMA sistemi blok diyagramı.

### 2.3.1. MC-CDMA Verici Yapısı

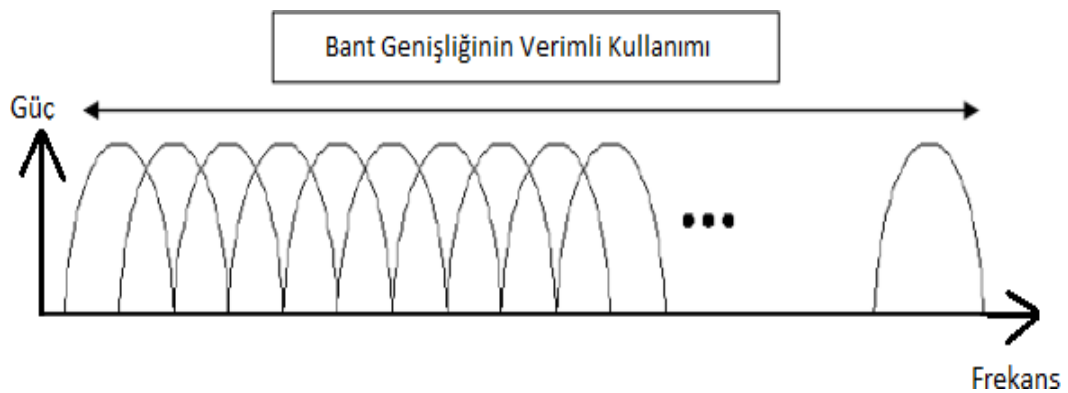
MC-CDMA yöntemine ait verici blok diyagramı, Şekil 2.12'de gösterilmiştir. MC-CDMA yönteminde, k sayıdaki kullanıcının vermiş olduğu bilgiler, ilk olarak CDMA yöntemine gelmektedir. CDMA yönteminde; gelen bilgiler, yayma kodları ile

birleştirilir. Ardından, oluşan yeni veri, frekans kanalından gönderilir. Gönderilen veriler, OFDM kısmına ulaşır. OFDM kısmında; gelen bilgiler, birbirine dik olan alt taşıyıcılar ile gönderilir [81,82].

Verici kısmında; gönderilen bilgi hangi kullanıcıya ait ise, o kullanıcıya özgü yayma kodu ile veri, alıcı tarafa yollanır. Bu uygulamadan sonra, IFFT işlemi yapılır. Burada sinyal, zaman eksenine dönüştürülür. Sisteme paralel olarak gelen bu sinyaller, seri hale getirilir. Böylece, bilgilerin senkronizasyonu yapılmış olur ve veriler haberleşme kanalına iletilir.



Şekil 2.12. MC-CDMA verici yapısının blok diyagramı [81].



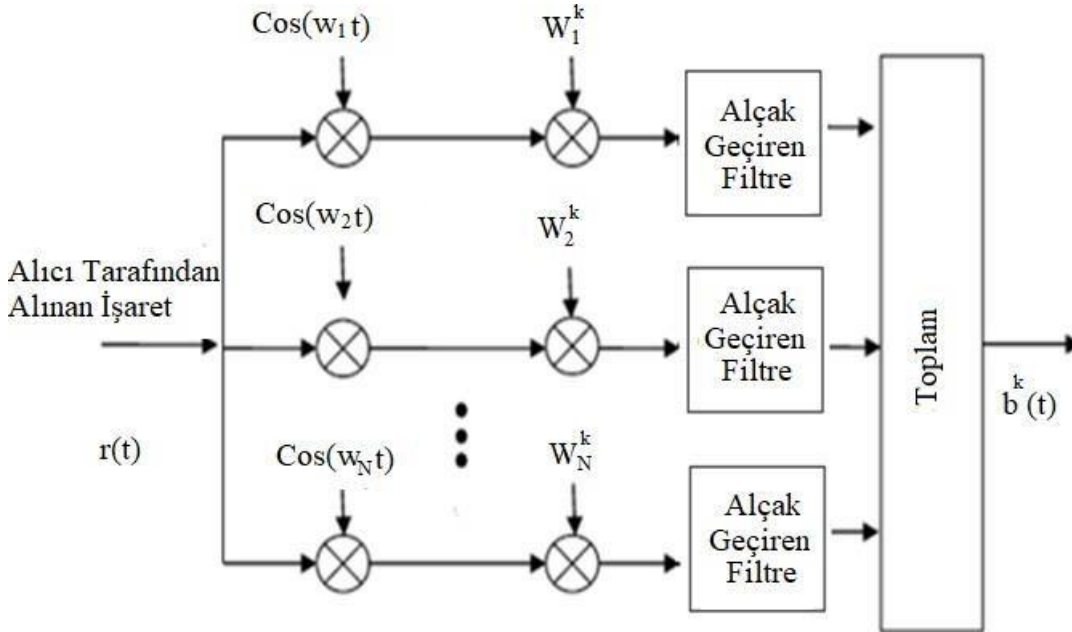
Şekil 2.13. Bant genişliğinin verimli kullanımı [82].

MC-CDMA yönteminde frekans spektrumunun etkin bir şekilde nasıl kullanıldığını gösteren yapı, Şekil 2.13'te sunulmuştur. OFDM sisteminin içinde barındırdığı alt taşıyıcılı iletim sayesinde, dikgenlik özelliği kullanılarak, bant genişliğinde verimli kullanım sağlanmıştır [82].

### 2.3.2. MC-CDMA Alıcı Yapısı

MC-CDMA yönteminin alıcı kısmı, Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Veriler alıcıya gelirken seri halde gönderildiği için, ilk olarak gelen bilgiler paralel olarak değiştirilmelidir. Daha sonra, verilere FFT işlemi uygulanır. Böylelikle, zaman ekseninden frekans eksenine geçiş yapılmış olur. Frekans ekseninde paralel halde olan bilgi, seri hale dönüştürülür. Bu işlemden sonra demodulasyon yapılarak, bilgi sinyali elde edilir.

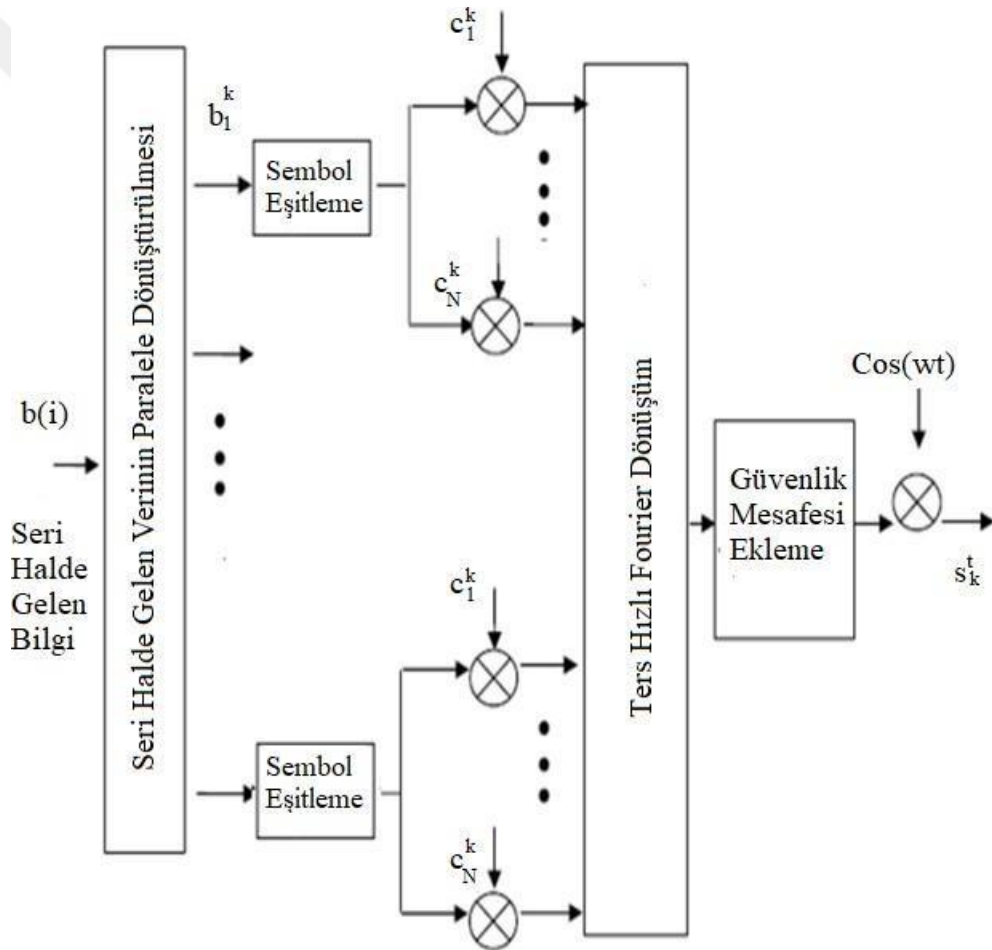
Bu sistemde önemli durumlardan biri, dikgenliğin bozulmamasıdır. Bu yüzden alt taşıyıcılar ayrılır.  $T/T_s$  sürelik zaman ile ayırma işlemi yapılır. Alt taşıyıcıların birbirine yaklaştığı en yakın zaman,  $T/T_s$  değerinin 1'e eşit olduğu zamandır. Bu süre; bant genişliğinin, en verimli kullanıldığı zaman olduğu için de önemlidir. Bu durum, MC-CDMA yönteminin diğer sistemlere göre en büyük avantajlarından biridir.



Şekil 2.14 MC-CDMA alıcı yapısının blok diyagramı [82].

### 2.3.3. MC-CDMA Yönteminde IFFT'nin Kullanılması

MC-CDMA yönteminde; frekans spektrumundaki yayılma durumunu en aza indirmek için, veriye IFFT işlemi uygulanır. Böylece veriler biraz sıkıştırılarak, spektrum daha verimli hale getirilir. IFFT işleminden sonra, bilgiye güvenlik mesafesi eklenir. Bu mesafe, iki işaretin arasına gelecek şekilde yerleştirilir. MC-CDMA verici yapısında; bilgi, yayma koduyla birlikte gönderilir. Daha sonra, OFDM sistemi ile de alt taşıyıcılara ayrılarak modülasyonu yapılır. MC-CDMA yönteminde IFFT'nin kullanılması, Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15 MC-CDMA yönteminde IFFT'nin kullanılması [83].

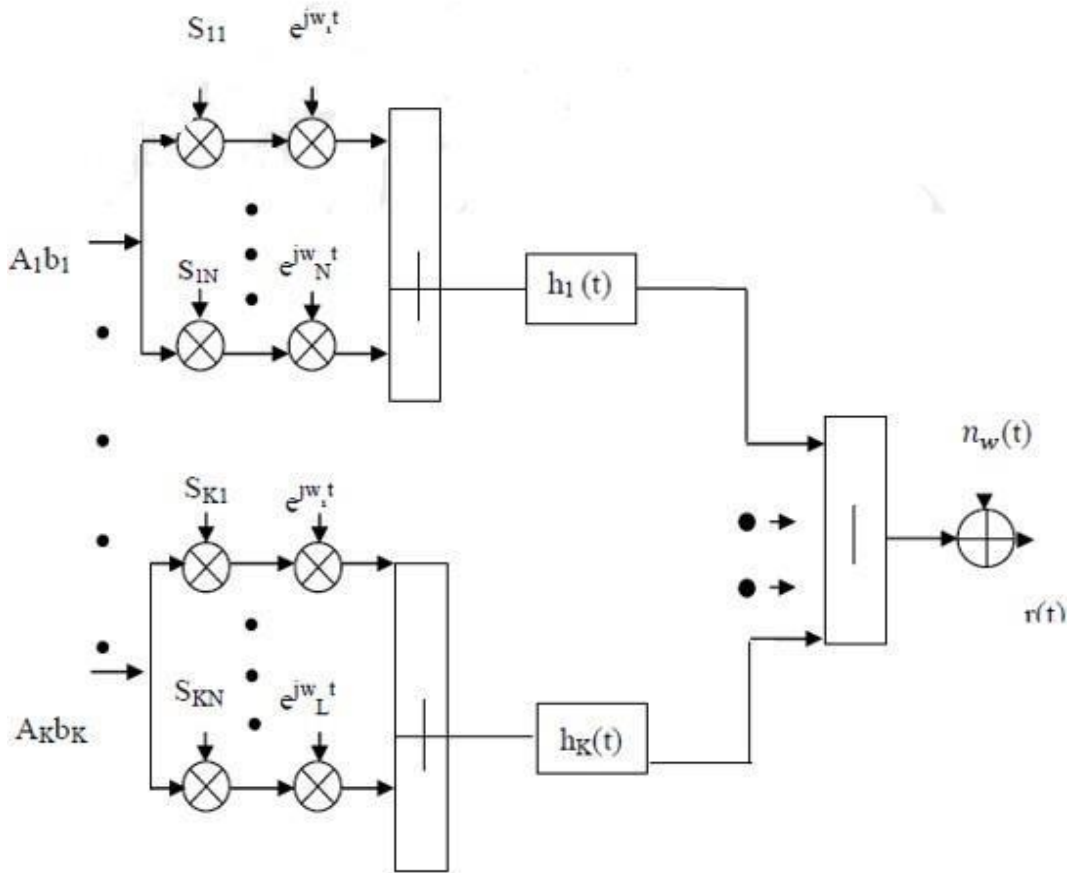
K adet kullanıcıya sahip bir sistemde, N adet alt taşıyıcı varsa ve bu yapının çıkışı gösterilmek istenirse; çıkış, eşitlik 2.4'deki gibi olur [83,84].

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k \sum_{n=1}^N S_k(t) e^{jw_n t} + n_w(t) \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4'de;  $n_w(t)$  ifadesi, iletim esnasında veriye kanal tarafından gelen AWGN gürültüsüdür.  $S_k(t)$  ifadesi ise; yayma kodunu göstermektedir.  $K$ . kullanıcıya ait bilgi yapısını göstermek için de  $b_k$  kullanılır.  $S_k(t)$  eşitlik 2.5'teki gibi tanımlanır.

$$S_k(t) = \sum_{l=1}^L a_k h(t - T_s) \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5'de, veri bitinin ne kadar uzun olduğunu göstermek için  $L$  ifadesi kullanılmıştır. Dürtü cevabını temsil etmek için  $h(t - T_s)$  kullanılmıştır.  $T_s$ , sembol zamanını göstermiştir.  $S_k(t)$  ifadesi,  $[0, T]$  dışında sıfır olarak alınmıştır. Böylece, olası ISI problemi ortadan kaldırılmıştır. Şekil 2.16'da, rayleigh kanalda MC-CDMA sisteminin nasıl olduğu gösterilmiştir.



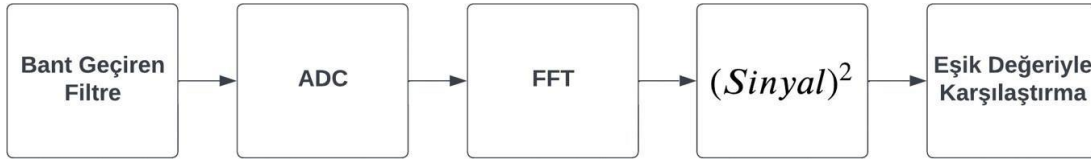
Şekil 2.16 Rayleigh kanalda MC-CDMA gösterimi [84].

## 2.4. Enerji Algılama Yöntemi

Enerji algılama yöntemi, spektrum algılama yöntemleri arasında en yaygın olanıdır. Donanım yapısı karmaşık değildir ve lisanslı kullanıcı için ekstra bilgi olmadan kullanmak mümkündür. Enerji algılayıcısının çıkış değeri, gürültü sinyalinin varyansına göre bir eşik değeri ile karşılaştırılır. Elde edilen değere göre, lisanslı kullanıcının sinyali tespit edilir. Enerji algılama yönteminin de bazı dezavantajları vardır. En önemli dezavantajı, eşik değerinin yanlış belirlenmesidir. Başka bir sorun ise, ortam gürültüsünün tespit edilememesidir. Bu durumda, lisanslı ve lisanssız kullanıcı arasında girişim meydana gelebilir.

Enerji algılama yönteminde; lisanslı kullanıcıların varlığı, lisanssız kullanıcıların sinyal gücüne göre belirlenir. Algılama süreci, sinyalin SNR değerine bağlı olarak değişir. Bu sebeple; gürültü sinyalinin belirsizliği, sistem performansını etkileyecektir. Enerji algılama yöntemi, Neyman-Pearson (NP) yaklaşımına dayanmaktadır. Bu yaklaşımın amacı, yanlış alarm olasılığına bağlı olarak tespit olasılığını arttırmaktır. Lisanslı kullanıcı frekansı kullanmaya başladığında; lisanslı kullanıcının sinyal gücünün, belirlenen eşik değerinden daha büyük olması istenir. Bu duruma, doğru algılama olasılığı (Probability of Detection -  $P_d$ ) denir. Yanlış alarm olasılığı ( $P_f$ ) ise; lisanslı kullanıcının frekansı kullanmadığı zaman, çıkış sinyalinin eşik değerinden daha büyük olduğu durumdur. Tamamlanmamış algılama olasılığı ( $P_m = 1 - P_d$ ) ise; lisanssız kullanıcının, lisanslı kullanıcıyı tespit edememesidir [85].

Enerji algılama yöntemi; lisanslı kullanıcının sinyal bilgisi, lisanssız kullanıcılar tarafından bilinmediği zaman tercih edilen en uygun yoldur. Belirli bir gözlem süresi boyunca, alınan sinyalin enerji değeri kullanılır [86]. Enerji algılama yönteminde; bir bant geçiren filtreye, bir ADC'ye ve bir entegratöre ihtiyaç vardır. İlk olarak; giriş sinyalleri, bir bant geçiren filtre aracılığıyla sınırlandırılır. Filtrelenen sinyaller, ADC'den geçirilir. Elde edilen sinyaller, FFT işlemine tabi tutulur. Burada amaç, sinyallerin frekans eksenindeki değerine ulaşmaktır. Elde edilen sinyallerin karesi alınarak güç değerleri hesaplanır. Son olarak; entegratörün çıkışı, birincil sinyalin var olup olmadığına karar vermek için kullanılır. Burada, ortamdaki gürültü değerine göre belirlenen bir eşik değeri ile karşılaştırma yapılır [87]. Enerji algılamanın blok diyagramı Şekil 2.17'de gösterilmektedir.



Şekil 2.17 Enerji algılama yönteminin blok diyagramı.

#### 2.4.1. Enerji Algılama Yönteminin Matematiksel Modeli

Spektrum algılama ile ilgili makalelerde; lisanslı kullanıcının doğru algılama olasılığına bakılır. Bu algılama olasılığı ( $P_d$ ), yanlış alarm olasılığı ( $P_{fa}$ ) ile karşılaştırılır. Algılama olasılığının yüksek olması, spektrumun verimli kullanıldığını gösterir. Eğer algılama olasılığı düşük ise, lisanslı kullanıcının tespiti yanlış yapılmış demektir. Böylece; BR, bu spektrum bantlarını kullanmaz. Dolayısıyla spektrum kullanımının verimliliği düşer. Belirli bir verimlilik seviyesi için bir sistemin algılama performansını analiz etmek önemlidir.

$H_1$  ve  $H_0$ , eşitlik 2.6 ve 2.7’de gösterilmiştir ve sırasıyla sinyal yokluğu ve varlığı için algılama durumlarıdır. Burada  $x(n)$ ; lisanssız kullanıcılar tarafından alınan sinyaldir. Eşitlik 2.6’daki  $s(n)$  ifadesi, lisanslı kullanıcının iletilen sinyalini gösterir. Kanal katsayısı  $h$  ile ifade edilir. Eşitlik 2.6 ve 2.7’deki  $w(n)$  ise,  $\sigma_w^2$  varyanslı AWGN sinyalidir.

$$H_1 : \quad x(n) = h * s(n) + w(n) \quad (2.6)$$

$$H_0 : \quad x(n) = w(n) \quad (2.7)$$

$H_0$ , lisanslı kullanıcının iletişim kurmadığını belirtir veya kanala giriş yapmadığındaki durumunu temsil eder.  $H_1$  ise; lisanslı kullanıcının, sisteme giriş yaptığındaki varlığını gösteren durumdur. Algılanan sinyal için üç olası durum tanımlanabilir:

- $P_d$ ; lisanslı kullanıcı sisteme giriş yaptığında, lisanslı kullanıcının varlığını tespit etmek.
- $P_m$ ; lisanslı kullanıcı sisteme giriş yaptığında, lisanslı kullanıcının varlığını tespit edememek.
- $P_{fa}$ ; Lisanslı kullanıcı sisteme giriş yapmadığında, lisanslı kullanıcı sisteme giriş yaptı gibi algılamak.

Sinyal dedektörünün amacı, her zaman doğru algılamayı sağlamaktır. Ancak; problemin istatistiksel doğası nedeniyle, pratikte bu asla mükemmel bir şekilde başarılamaz. Bu nedenle; sinyal dedektörleri, öngörülen minimum hata seviyeleri dahilinde çalışmak üzere tasarlanmıştır. Burada amaç, yanlış alarm olasılığını olabildiğince düşük tutmaktır. Böylece, sistemde oluşan tüm frekans boşlukları kullandırılır.

Yanlış alarm olasılığı; bilişsel radyonun boş kanalının, kullanıcılar tarafından kullanılmaması anlamına gelir.

$$x(n) = w(n); H_0 \text{ durumu altında} \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8'deki  $w(n)$  ise; rastgele değişkenler olarak dağıtılan sıfır ortalamalı bir AWGN gürültüsüdür. Gaussian denklemi eşitlik 2.9' te verilmiştir. .

$$f(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2}} e^{-\frac{w^2}{2\sigma_w^2}} \quad (2.9)$$

Daha sonra elde edilen sinyal, bir ADC'ye ve ardından enerji dedektörüne eşitlik 2.10 ve 2.11'deki gibi uygulanır.

$$\Xi_{\text{time}} = \sum_{n=1}^N |x(n)|^2 \quad (2.10)$$

$$\Xi_{\text{time}} = \sum_{n=1}^N |w(n)|^2 ; H_0 \text{ durumu altında} \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.11'deki  $N$  ifadesi, sembol uzunluğunu ifade eder.  $H_0$  hipotezi altında; enerji detektörünün çıkışı, Gauss değişkenlerinin toplamıdır. Böylece çıktının dağılımı, eşitlik 2.12' deki halini alır.

$$f_{\Xi_{\text{time}}}(\xi) = \frac{1}{\sigma_w^2 \Gamma(\frac{N}{2})} \xi^{\frac{N}{2}-1} e^{-\frac{\xi}{\sigma_w^2}} \quad \forall \xi \geq 0 \text{ için} \quad (2.12)$$

Yanlış alarm olasılığı; lisanslı kullanıcının sistemde varmış gibi algılanma durumudur. Dolayısıyla; lisanslı kullanıcı sisteme giriş yapmadığında ortamdaki güç değeri hesaplanır. Enerji dedektörünün çıkışı, eşitlik 2.13'teki gibi olur;

$$\Xi_{\text{time}} > \lambda ; H_0 \text{ durumu altında} \quad (2.13)$$



Böylece; zaman alanındaki  $P_{fa}$ ; eşitlik 2.14'ten türetilerek, eşitlik 2.16'daki denkleme dönüştürülür.

$$P_{F(\text{time})} = \Pr \left\{ \xi_{\text{time}} > \lambda / H_0 \right\} \quad (2.14)$$

$$P_{F(\text{time})} = \int_{\lambda}^{\infty} f_{\xi_{\text{time}}}(\xi) d\xi \quad (2.15)$$

$$P_{F(\text{time})} = \int_{\frac{\lambda}{2\sigma_w^2}}^{\infty} \frac{1}{\sigma_w^N 2^{N/2} \Gamma\left(\frac{N}{2}\right)} \frac{\xi^{(N/2)-1}}{\lambda} e^{-\frac{\xi}{2\sigma_w^2}} d\xi \quad (2.16)$$

Eşitlik 2.16'yi çözmek için, eşitlik 2.17'den 2.19'a kadar olan değişken dönüşümlerini uygulanır.

$$\frac{\xi}{2\sigma_w^2} = t \quad (2.17)$$

$$d\xi = 2\sigma_w^2 dt \quad (2.18)$$

$$\lambda = \frac{\lambda}{2\sigma_w^2} \quad (2.19)$$

Yapılan değişken dönüşümleri yardımıyla, eşitlik 2.20 ve eşitlik 2.21'deki ifadeler elde edilir.

$$P_{F(\text{time})} = \frac{1}{\sigma_w^N 2^{N/2} \Gamma\left(\frac{N}{2}\right)} \int_{\frac{\lambda}{2\sigma_w^2}}^{\infty} (2\sigma_w^2)^{(N/2)-1} t^{(N/2)-1} e^{-t} 2\sigma_w^2 dt \quad (2.20)$$

$$P_{F(\text{time})} = \frac{1}{\sigma_w^N 2^{N/2} \Gamma\left(\frac{N}{2}\right)} \int_{\frac{\lambda}{2\sigma_w^2}}^{\infty} 2^{N/2} \sigma_w^N t^{(N/2)-1} e^{-t} dt \quad (2.21)$$

Eksik gama fonksiyonu  $\Gamma(\zeta, a) = \int_{\zeta}^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$  olduğuna göre, denklemin son hali eşitlik

2.22'deki gibi olur.

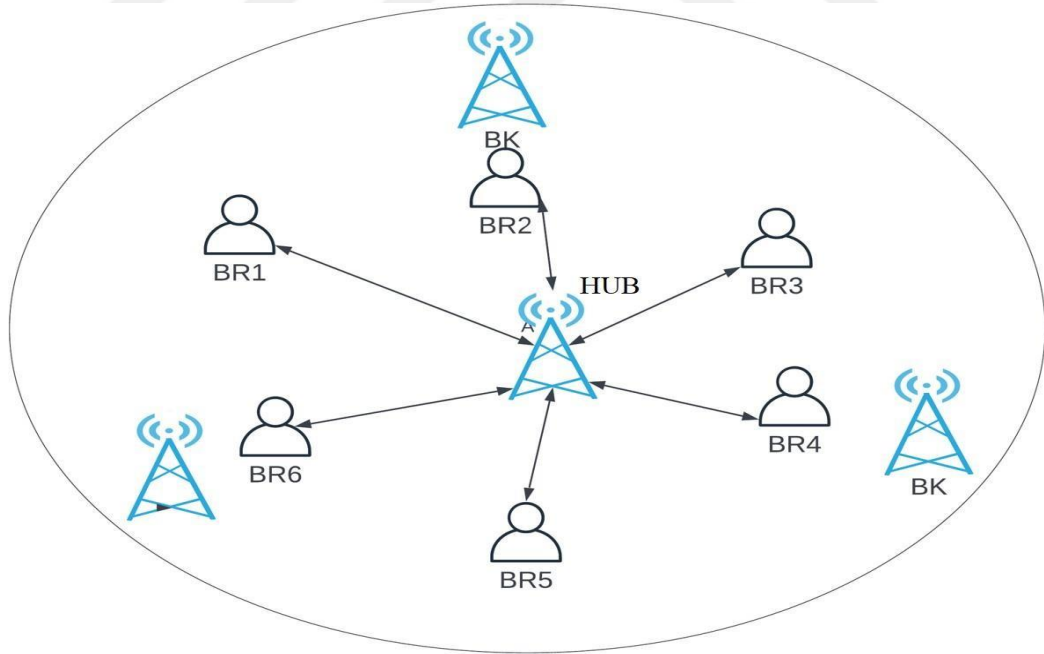
$$P_{F(\text{time})} = \frac{\Gamma\left(\frac{N}{2}, \frac{\lambda}{2\sigma_w^2}\right)}{\Gamma\left(\frac{N}{2}\right)} \quad (2.22)$$

## 2.5. İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi

Spektrum tespiti, bir BR kullanıcısı tarafından gerçekleştirilebilir. İşbirlikçi spektrum algılama yönteminin amacı, BR kullanıcıları tarafından elde edilen verileri birleştirmektir. Elde edilen veriler; çoğunlukla birçok kullanıcı tarafından oluşturulduğu için, gölgeleme ve solma problemlerini ortadan kaldırır. Böylece, yanlış alarm olasılığı ve tespit süresi azaltılır [88]. İşbirlikçi spektrum algılama, merkezi veya dağınık olmak üzere, iki farklı yapıda algılama yönteminden oluşur.

### 2.5.1. Merkezi İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi

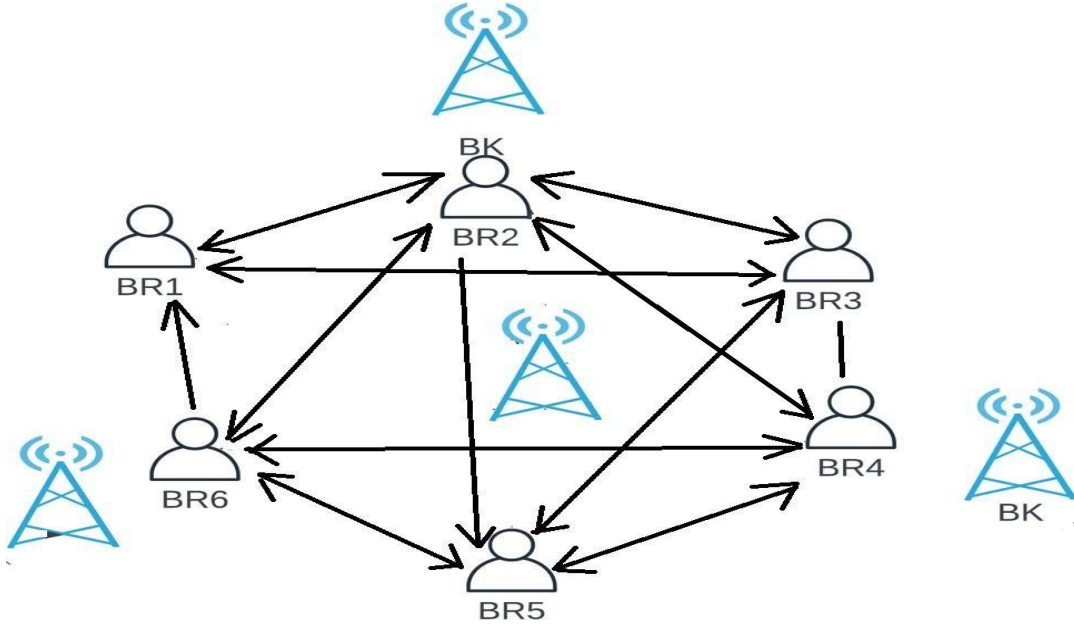
Merkezi işbirlikçi spektrum algılama yöntemi Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Bu algoritmada; merkezde bulunan bir düğüm, BK varlığını algılamak için BR kullanıcılarından toplanan bilgileri kullanır. Bu bilgileri, diğer BR kullanıcılarına gönderir. Bu yöntemin amacı; sistemin gölgelemesini ve solmasını azaltarak, algılama performansını iyileştirmektir [88].



Şekil 2.18 Merkezi işbirlikçi spektrum algılama yöntemi [88].

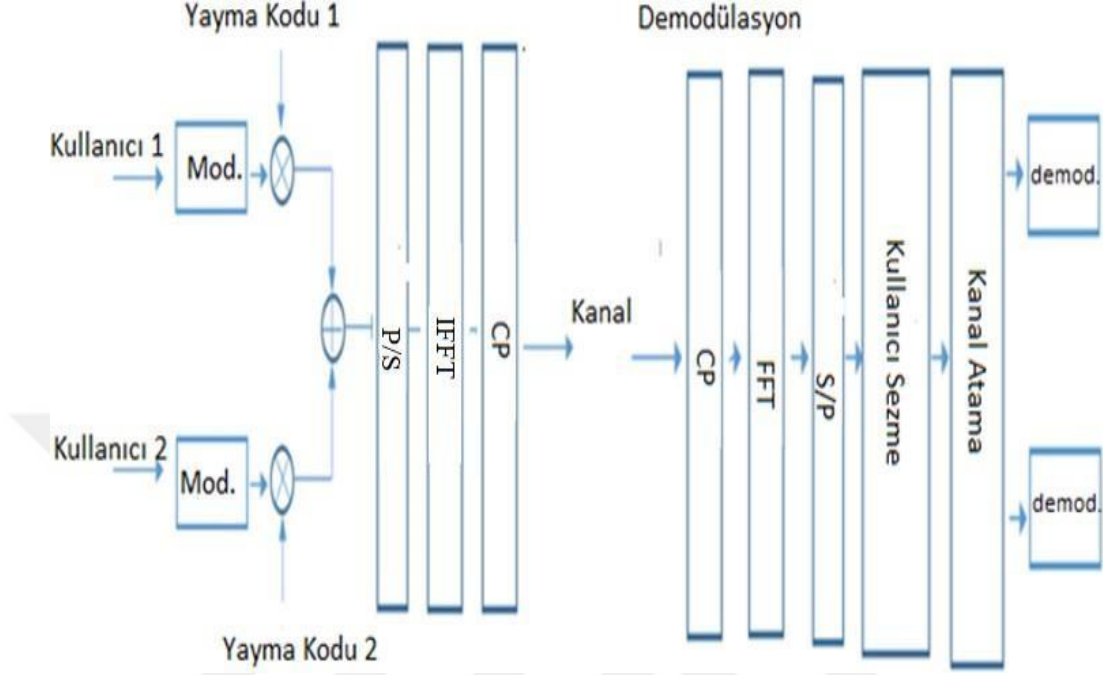
## 2.5.2. Dağınık İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi

Dağınık işbirlikçi spektrum algılama yöntemi Şekil 2.19’da gösterilmiştir. Diğer yöntemlerden farklı olarak; bütün kullanıcılar, bilgileri merkezi bir yapıya göndermeden kendi aralarında paylaşırlar. Bu süreç; işbirlikçi spektrum algılaması, genel kararı verene kadar tekrarlanır [89].



Şekil 2.19 Dağınık işbirlikçi spektrum algılama yöntemi [89].

### 2.5.3. MC-CDMA Yöntemine İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin Uygulanması



Şekil 2.20 İşbirlikçi spektrum algılama yönteminin MC-CDMA yöntemine uygulanmasının blok diyagramı [90].

BR'nin sisteme nasıl uygulandığı Şekil 2.20'de gösterilmiştir. MC-CDMA sistemi, CDMA ve OFDM sistemlerinin birleşiminden oluşur. MC-CDMA sistemi ile OFDM sistemini ayıran en önemli fark; MC-CDMA'nın, aynı sembolü farklı alt taşıyıcılarla gönderme işlemidir. OFDM sistemi; sembolleri, farklı alt taşıyıcılar üzerinden, farklı semboller ile iletmektedir. Gönderme bölümünde; gelen veriler, alt parçaların sayısı kadar paralel parçaya kopyalanır.

$$t = [c_1^j \ c_2^j \ \dots \ c_{G_{MC}}^j] \quad (2.23)$$

Eşitlik 2.23'teki ifade, kullanıcının yayılma kodunu ifade eder.  $G_{MC}$  ise işlem kazancını gösterir. Ayrıca, yayılma etkisi olarak da adlandırılır.  $G_{MC}$  uzunluk yayılma kodu, girişten gelen veri dizisi ile çarpılır [90]. Tüm alt taşıyıcılar, koddaki her ifade tarafından ayrı ayrı modüle edilir. Alt taşıyıcı sayısı  $N = G_{MC}$ 'dir. Kullanıcılara, birbirinden bağımsız kodlar tahsis edilir. Alt taşıyıcıların hepsinde veriler aynıdır ve bu veriler IFFT bloğu tarafından modüle edilir. IFFT bloğu, ortogonal alt taşıyıcıların

oluşturulmasını sağlar [91]. Frekans ekseninde faaliyet göstermek, sistemin karmaşıklığını azaltan en önemli faktörlerden biridir. IFFT bloğundaki veriler, seriden paralele (S / P) dönüştürülür. ISI'yi ve taşıyıcı arası girişimi (Inter Carrier Interference - ICI) önlemek için sembollerin arasına bir CP eklenir. Son olarak, sinyal iletmek için dijital formdan analog forma dönüştürülür [92].

Alıcı kısımda, CP çıkarılır. Geri kalan veriler, m-alt taşıyıcının bileşenlerini elde etmek için S / P bloğuna gönderilir. Alt taşıyıcılar, FFT çalışması ile demodüle edilir ve daha sonra spektrum alanına yayılan sinyalin enerjisini toplamak için kazanımla çarpılır [93]. Karar değişkeni eşitlik 2.24'teki ifade ile verilir.

$$D^j = \sum_{m=1}^{G_{MC}} q_m y_m \quad (2.24)$$

Eşitlik 2.24'teki  $y_m$  ifadesi, alıcı tarafından elde edilen sinyalin karmaşık temel bant bileşenini temsil eder. BK'nın varlığını hisseden BR kullanıcıları varsa, sistemin matematiksel ifadesi eşitlik 2.25 'de gösterilmiştir.

$$x_{ij} = \frac{m_{ij}, H_0}{\sqrt{P_{av,i} a_i} + m_{ij}, H_1} \quad (2.25)$$

$P_{(av,i)}$ ; lisanslı kullanıcı sinyalini temsil eder.  $P_{av,i} a_i$  ise; lisanslı kullanıcının, ortalama gücünü ifade eder.  $H_0$ ; lisanslı kullanıcının, sisteme giriş yapmadığını gösterir.  $H_1$ ; lisanslı kullanıcının, frekans bandını kullandığını belirtir. Bilişsel radyo düğümünün test istatistiği, eşitlik 2.26'da gösterilmiştir.

$$Z_i = \sum_{j=1}^s \frac{c_{i0}, H_0}{(1+P_{av,i})c_{i1}, H_1} x_{ij}^2 \quad (2.26)$$

Eşitlik 2.26'daki  $c_{i0}$  ve  $c_{i1}$  ; tüm BR kullanıcılarından karar için bilgi toplamını ifade eder. Karar aşaması, NP yaklaşımına dayanmaktadır. Bu yöntemle göre, yanlış alarm olasılığı ve tespit olasılığı eşitlik 2.27 ve 2.28 'de gösterilmiştir.

$$P_f(i) = 1 - \prod_{f} \left( 1 - Q \left( \frac{z_i - 1}{\sigma_{n(i)}} \sqrt{\delta_{fs}} \right) \right) \quad (2.27)$$

$$P_d(i) = 1 - \prod_{d} \left( 1 - Q \left( \frac{z_i - y_{ij} - 1}{\sigma_{n(i)}} \sqrt{\frac{\delta_{fs}}{(2y_{ij} + 1)}} \right) \right) \quad (2.28)$$

Q işlevi, Gaussian fonksiyonunun dağıtım işlevidir.  $\delta_{fs}$ , spektrum tespit süresi boyunca örnekleri ifade eder.  $\frac{\delta_{fs}}{(2y_{ij} + 1)}$ ; Bant genişliği olarak belirtilir.  $y_{ij} = \left| g_{ij} \right| \frac{\sigma_{s(i)}^2}{\sigma_{n(i)}^2}$ ; ortalama kanal kazancını verir.



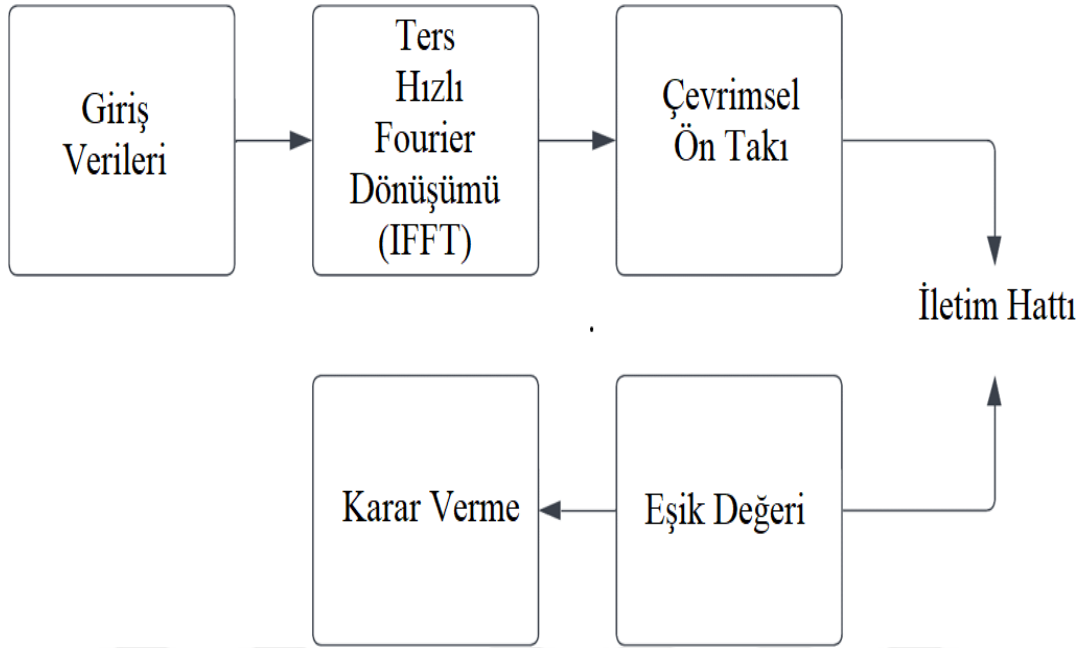
## 3. ÖNERİLEN YÖNTEM

### 3.1. Bilişsel Radyo Ağlarının OFDM Yöntemine Uygulanması

OFDM, verileri çoklu taşıyıcı frekanslarında kodlayan ve yüksek hızlı veri iletişimi sunan bir sistemdir. Üretilen veriler, düşük hızlı parçalara bölünür ve farklı alt taşıyıcılarla iletilir. Bu parçalanma, alt taşıyıcıları dikey olarak hareket ettirerek sembol süresini uzattığı için, yakın sembollerin birbirini etkilemesine neden olabilir. ISI adı verilen bu girişim, CP ile yok edilmeye çalışılır. Bu yöntem; yüksek veri hızlarında, çok yollu kanalların neden olduğu dağılımı azaltır. OFDM'de; bilgi sinyalini, zaman spektrumundan frekans spektrumuna dönüştürmek için FFT kullanılır. Şekil 3.1'de OFDM tabanlı BR blok diyagramı gösterilmiştir.

Spektrum algılama yöntemleri, hangi spektrumun ve hangi alt taşıyıcıların boş olduğunu belirlemek için kullanılır. Boş frekans aralığını bulduktan sonra, sinyallerin uygun frekanslara yerleştirilmesi yapılır. Bunu yapabilmek için; sinyalleri, frekans ekseninde analiz etmek gerekir. Bunun için IFFT kullanılır. [94].





Şekil 3.1 OFDM tabanlı BR blok diyagramı.

OFDM için spektrum algılama algoritması aşağıda belirtildiği gibidir.

- İletim için veri oluşturma.  $(I_m(0), \dots, I_m(N_d-1))$
- SNR değerinin elde edilmesi  $(snr\_avg = power(10, snr\_avgdB/10))$
- QPSK modülasyonunun uygulanması  $(qpsk\_mod\_data = pskmod(data, 4))$
- Sinyalin frekans yanıtı için IFFT uygulanması

$(ifft\_login\_information(:, i) = ifft((login\_information(:, i)), ifft\_spots))$

- Çevrimsel öntakı (CP) eklenmesi (CP)  $(CP\_Length = ceil(0.25 * L))$
- BK oluşturulması

$(ofdm\_generation = sqrt(SNR) * randn(1, L); signal1 = ofdm\_generation + Noise1;)$

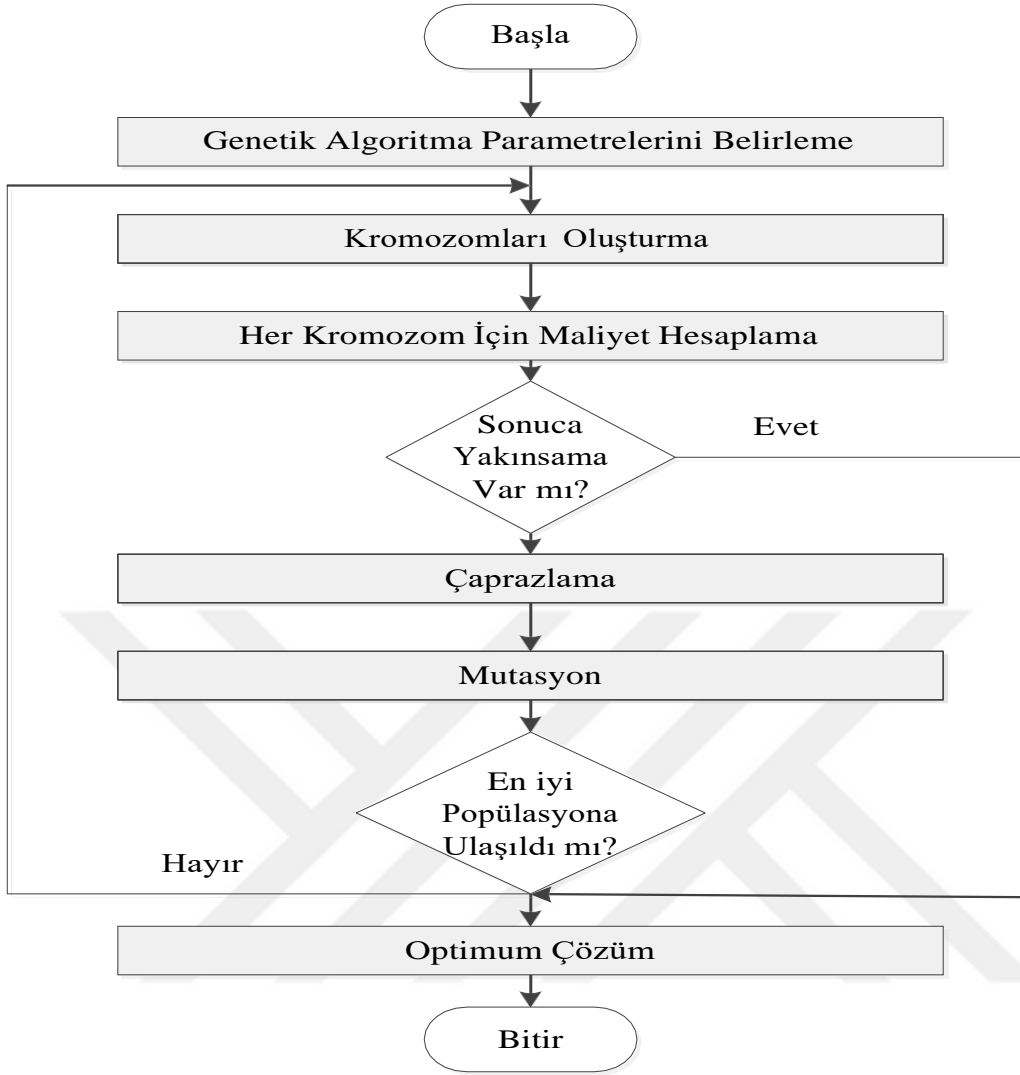
- Test değerinin oluşturulması  $(trial\_data = (1/L) * sum(energy))$
- Eşik değeri ile karşılaştırma ve Karar verme

$(Th(i) = (qfuncinv(Pf(i)) / sqrt(L)) + 1;)$

### 3.2. Bilişsel Radyo Ağları İçin Genetik Algoritma

Kablosuz haberleşmenin yapay zekâ alanlarında geniş uygulamaları vardır. Yapay zekâ alanında kullanılan genetik algoritma (GA) yönteminin diğer yöntemlere göre en büyük avantajı, çok amaçlı işleme yeteneğidir. GA; karar verme için daha fazla birey kullanan bir arama uzayında kullanılır. Bu nedenle, mevcut diğer karar verme yöntemleri gibi yerel bir uç noktada sabitleme olasılığı daha düşüktür. GA hesaplaması, belirli özellikleri ortaya çıkaran ve kromozomlar olarak bilinen, rastgele oluşturulmuş birkaç birey popülasyonunun seçiminden başlar ve nesiller boyunca devam eder. Her nesilde, popülasyondaki tüm bireylerin uygunluğu, çaprazlama ve mutasyona dayalı olarak değerlendirilir. Böylece yeni neslin popülasyonunun eskisinden daha iyi olacağı beklentisiyle, yeni bir popülasyon üretilir. Daha sonra, ulaşılan maksimum nesil sayısı veya optimal çözüm gibi yakınsama kriterleri karşılanana kadar, süreci nesilden nesile sürdürmek için yinelemeli bir algoritma izlenir [95].

GA için genel akış şeması Şekil 3.2'de gösterilmiştir. BR alıcısı, ortamdaki radyo sinyallerini algılar ve İK'ya uygun bir frekans aralığı tahsis etmeye başlar. Bunun için de frekans spektrumu taranır. Bu yöntem; bant genişliği, veri hızı ve güç kullanımı gibi parametrelere göre karar verir. Parametrelerden elde edilen verilere göre karar verme süreci başlar. Karar verme sürecini, RF ortamından alınan diğer İK'lar belirler. Bütün ikincil kullanıcılardan alınan veriler incelenir. Çevreden algılanan bilgiler, genetik algoritma için başlangıç popülasyonu olarak hizmet eder. Başlangıç popülasyonu olarak, RF ortamından alınan bilgi ile populasyonlar oluşturulur. Daha sonra en iyi çözüm ile frekans tahsis kararı alınır.



**Şekil 3.2** Genetik algoritma için akış diyagramı.

GA; BR kullanıcılarının, gerçek zamanlı olarak RF ortamına uyum sağlamasına olanak tanır. Karar verme işlemini optimize etmek için kullanılan GA yaklaşımı, optimize edilmiş çözüme yönelik yakınsama davranışı nedeniyle çok amaçlı işlevler için uygundur. Ayrıca, telsizlerin karar verme sürecine uyum sağlamasına imkan sağlar. Kromozomlar ve amaç fonksiyonları uygun şekilde tanımlanırsa, problem kısa sürede ve daha az iterasyon sayısında çözülür. GA yaklaşımı, en uygun çözümü bulmaya çalışır [96].

Kromozom, optimizasyonu sağlamak için kullanıcıların özelliklerinden oluşur. Bu çalışmada kromozom özellikleri; sinyal gücü, frekans, veri hızı ve hata oranı olarak tanımlanmıştır. Bir sinyalin gücü; BR’da, kullanıcıları tespit etmek için en önemli girdi verisidir. Aşırı alınan veya yetersiz alınan güç, sinyal algılamada sorunlara neden

olabilir. Kullanıcıların düzgün bir şekilde iletişim kurması için belirli bir güç aralığı gereklidir. Sinyal gücündeki belirli artışlar da hata oranında artmaya yol açabilir. Kablosuz iletişim ağlarında, genellikle düşük güçlü sinyallerin kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada -25 dBm ile 38 dBm arasındaki güç aralığı incelenmiştir. Her 1 dBm aralığı, sıfırdan 63'e kadar bir değer aralığına yerleştirilmiştir. Örneğin; güç değeri 38 dBm ise, 63 değeri girilecektir. Çizelge 3.1'de her dBm değerine karşılık gelen değer gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1** Sinyal gücüne karşılık gelen değer tablosu

Değer	0	1	2	3	4	...	62	63
dBm	-25	-24	-23	-22	-21	...	37	38

Bu çalışmada hata oranı, kromozomu oluşturan genlerden biridir ve alıcıdan alınan veride hatalı gelen bit sayısını gösterir. Uygulamanın türüne göre değişiklik gösterebilir. Kablosuz ağlarda iletim yapılacaksa, hata oranının daha yüksek olması beklenir. Bunun nedeni; gürültü gibi olumsuz etkilerin, radyo ortamının performansını olumsuz etkilemesidir. Farklı kodlama yöntemleri uygulayarak veya sinyal gücünde değişiklik yaparak, hata oranını en aza indirmek mümkündür. Hata oranı olarak  $10^0$ - $10^{-15}$  aralığı seçilmiştir. Bunun nedeni, aralığın dışındaki değerlerin sistemi fazla etkilememesidir. Çizelge 3.2'de her hata oranına karşılık gelen değer tablosu gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2** Hata oranına karşılık gelen değer tablosu

Değer	0	1	2	3	...	14	15
Hata Oranı	$10^0$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	...	$10^{-14}$	$10^{-15}$

Kromozomu oluşturan bir diğer gen ise frekanstır. İletim sırasında, veriler belirli bir frekans bandı üzerinden iletilir. Bu tezde; iletimin gerçekleştirildiği frekans aralığı, 0 ile 25.6 MHz arasında alınmaktadır. Bu frekans aralığının kullanılmasının nedeni, trafik yoğunluğunun çoğunlukla bu aralık içinde olmasıdır. Frekans bandı, belirli

frekans aralıklarına bölünmüştür. 25.6 MHz çalışma alanı; 50 KHz alanlara bölünerek, 512 frekans aralığı oluşturulması hedeflenmiştir. 512 kullanıcı; bu frekans bandını, serbest frekans aralığında, parazitsiz olarak kullanır. Kullanıcılara atanacak frekans aralığı, gendeki değere göre belirlenir. Değer 0 ise, 0 ile 50 KHz arasındaki frekans değerine atanır. Çizelge 3.3'te, her frekans aralığına karşılık gelen değer tablosu gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3** Frekansın değerine karşılık gelen değer tablosu

Değer	0	1	2	...	510	511
Frekans	0-50KHz	51-100KHz	101-150KHz	...	25.501-25.55Mhz	25.551-25.6Mhz

Veri hızı, popülasyonu oluşturmak için tasarlanmış kromozom genlerinden biridir. Bu tezde; veri hızı, saniyede iletilen bit sayısını temsil etmek için kullanılmıştır. Yapılan araştırmalara göre; kablosuz iletişimde, ortalama veri hızı yaklaşık 4 Mbps olarak ölçülmüştür. 0-4 Mbps aralığı, veri hızı olarak alınmıştır. Her bir aralık değeri, 128 Kbps olarak alınmıştır. Algoritmadaki her bir aralık değerini temsil etmek için 1'den 32'ye kadar sayılar kullanılmıştır. Örneğin; 0'ın ondalık değeri, 0 Kbps ile 128 Kbps aralığında alınmıştır. Aynı şekilde; 1 ondalık değeri için, 129 Kbps ile 256 Kbps aralığına karşılık gelen veri hızı atanmıştır. Son olarak; 31 ondalık değer için, veri hızı olarak 3.872 Mbps ile 4Mbps aralığına atanmıştır. Tüm ondalık değerlere karşılık gelen tablo Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.4** Veri hızına karşılık gelen değer tablosu

Değer	0	1	2	...	510	511
Veri Hızı	0Kbps	129Kbps	257Kbps	...	3.745Mbps	3.873Mbps
	128Kbps	256Kbps	384Kbps		3.872Mbps	4.000 Kbps

Genlerin bit sayıları, ondalık değerlere göre hesaplanmıştır. Oluşturulan tüm genlere göre, bir kromozom 24 bittten oluşur. Ağırlık yüzdeleri, kromozom üzerindeki bit sayısına göre hesaplanmıştır. Genlerin yüzdelik değerleri Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.5** Genlerin yüzde ağırlığı

Gen	Değer	Bit	Ağırlık Yüzdesi
1. Veri Hızı	0-32	5	0.20
2. Sinyal Gücü	0-63	6	0.25
3. Hata Oranı	0-15	4	0.16
4. Frekans	0-512	9	0.39

İlk bulunan popülasyon içinden en iyi bireyler alınarak, bir sonraki adımda oluşacak popülasyona aktarılır. En iyi bireylerin aktarılma işlemi, rulet çarkı ile yapılır. Rulet çarkı; her kromozomun, çark üzerindeki yüzdeleriyle orantılı bir değere sahip olduğu yöntemdir. Bir kromozomu seçme olasılığı, kromozomun değer sayısının, toplam değer sayısına bölünerek elde edilen yüzdelik oranına göre hesaplanır [97]. Uygun kromozomlar bulunduktan sonraki adım, rastgele belirlenen kromozomlar üzerinde yapılan çaprazlama yöntemidir. Çaprazlama, yeni kromozomlar oluşturmak için eski kromozomların özelliklerini değiştirme işlemidir. Çaprazlamada, birden fazla yöntem kullanılır. Yapılan araştırmalara göre; iki nokta yönteminde, diğer yöntemlere göre çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [98]. Bu nedenle, bu tezde 2 nokta yöntemi kullanılmıştır. Bu işlemde, rulet çarkına giren popülasyondan en iyi bireyler seçilir. Bu bireylerin farklı sıralarındaki genleri yer değiştirilir.

**Çizelge 3.6** Çaprazlama

Kromozom 1	Veri Hızı	Sinyal Gücü	Hata Oranı	Frekans
Kromozom 2	Veri Hızı	Sinyal Gücü	Hata Oranı	Frekans

Çizelge 3.6’da çaprazlamanın nasıl yapıldığı gösterilmiştir. Herhangi iki nokta seçilmiştir. Bu noktaların arasında kalan genler yer değiştirilmiştir. Genetik çeşitliliği sağlamak için çaprazlamadan sonra mutasyon işlemi de kullanılır. Mutasyon, kromozom üzerindeki bitler arasında geçiş yapılarak elde edilir. Yeni kromozom yapısında, olası büyük bir hatayı önlemek için mutasyon oranı çok yüksek seçilmemelidir. Araştırmalardan elde edilen bulgulara göre, algoritmanın %1 ile %5 arasında olması en uygun olanıdır. Bu nedenle bu tezde mutasyon oranı %3 olarak seçilmiştir [99]. Mutasyon işleminin nasıl olduğu Çizelge 3.7’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.7** Mutasyon

Veri Hızı	Sinyal Gücü	Hata Oranı	Frekans
1 0 0 1 1	1 0 1 0 1 1	1 0 1 1	1 1 0 1 0 1 1 0 1
Veri Hızı	Sinyal Gücü	Hata Oranı	Frekans
1 0 0 1 1	1 0 1 0 1 1	1 0 1 1	1 1 0 1 1 1 0 1

### 3.3. Bilişsel Radyo Ağları İçin Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), kuş veya balık topluluklarının hareketlerine dayanarak oluşturulan popülasyon kaynaklı bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma; kuş ve balık gibi toplu halde hareket eden hayvanların, temel ihtiyaç kaynağı bulma, saldırılardan kurtulmak gibi ortam uyum süreçlerinde popülasyon içindeki haberleşmeyi sağlamasından dolayı ortaya çıkmıştır. Burada amaç, doğruyu bulma hızlarını ve ihtimallerini arttırmaktadır.

PSO; bulanık mantık, GA gibi yapay zeka teknikleri ile benzerlikler gösterir. Algoritma, rastgele çözümleri içeren bir sistem popülasyonu ile başlar ve her iterasyonda en iyi sonucu içeren popülasyonlar üzerinde arama yapar. PSO, mutasyon ve çaprazlama gibi fonksiyonları kullanmaz. Bu algortmada, her bir çözüme parçacık

adı verilir ve bu parçacıklar o iterasyondaki en uygun çözümü takip ederek sonuca ulaşır [100]. PSO'nun GA göre avantajı, uygulanmasının kolay olmasıdır. Çünkü düzenlenmesi gereken parametre sayısı azdır.

Popülasyonu oluşturan parçacıkların, bir uygunluk değeri vardır ve bunlar kendi fonksiyonları tarafından değerlendirilir. Her bir hareketini belirten hız bilgileri vardır. Parçacıklar, popülasyondaki en iyi sonucu takip ederek hareket eder. Bu belirtilen durum, en iyi sonuca yaklaşıncaya kadar devam eder. Her bir iterasyonda, parçacığın o ana kadar bulduğu en iyi değer pbest adı altında saklanır. İkinci en uygun sonuç ise popülasyondaki başka parçacıkların bulduğu değerdir. Bu değer ise gbest adı altında saklanır ve global olarak en iyi sonucu veren değerdir.

$$X = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1D} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & \dots & a_{nD} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Matris, eşitlik 3.1'deki gibi tanımlanır. Bu matris, popülasyon matrisidir ve (D x n) boyutundadır.

$$x_i = [x_{i1} \quad x_{i2} \quad \dots \quad x_{iD}] \quad (3.2)$$

Her bir iterasyondaki i. derecedeki matris ise eşitlik 3.2'deki gibi tanımlanır. Her bir iterasyonda oluşan pbest ve gbest değerleri bulunur.

$$pbest_i = [p_{i1} \quad p_{i2} \quad \dots \quad p_{iD}] \quad (3.3)$$

$$gbest_i = [g_{i1} \quad g_{i2} \quad \dots \quad g_{iD}] \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.3 ve 3.4'teki gibi en iyi değerler, matris formunda bulunur. İterasyondaki en uygun değerler bulunduktan sonra, parçacık hızı ve konumu eşitlik 3.5 ve 3.6'daki fonksiyona göre güncellenerek hesaplanır.

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 \text{rand}_1^k (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \text{rand}_2^k (gbest_i^k - x_i^k) \quad (3.5)$$

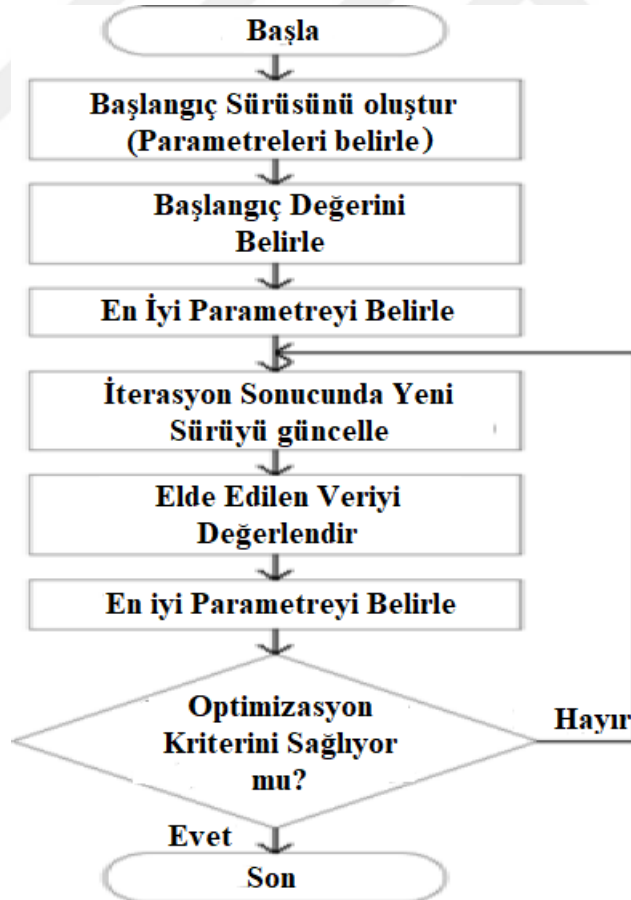
$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3.6)$$

Eşitliklerde gösterilen i değeri, parçacık numarasını temsil etmektedir. Adım sayısını göstermek için de k kullanılmıştır. Öğrenme faktörlerini temsil etmek için ise c<sub>1</sub> ve c<sub>2</sub> parametreleri kullanılmıştır. Bu parametreler, pbest ve gbest değerlerini doğru yöne



yönlendirmek için kullanılır. Parçacığın kendi durumuna göre aldığı değer ise  $c_1$  ile gösterilmiştir. Sürüyü oluşturan diğer parçacıklarının hareketini tanımlamak için de  $c_2$  değeri kullanılmıştır. Bu parametreler düşük seçilirse, parçacıklar ulaşmak istediği noktadan daha uzak kısımlarda hareket eder. Bu da istenilen yere yaklaşma zamanını etkiler. Eğer yüksek seçilirse, istenilen yere ulaşma fırsatını kaçırmış olabilir. Bu yüzden, literatürde genellikle  $c_1$  değerinin 1.5 ile 2 aralığında seçilmesi önerilir. Diğer sabit  $c_2$  için ise bu değer 2 ile 2.5 arasında değişir [101]. Bu tez kapsamında, her iki değer de 2 olarak kullanılmıştır.

PSO kullanılarak yapılan yöntemin akış diyagramı Şekil 3.3'te gösterilmiştir. İlk olarak başlangıç durumu, hız ve yönü belirtilmiştir. Bu değişkenlere göre parametreler belirlenerek başlangıç sürüsü oluşturulmuştur. İlk olarak, başlangıç sürüsünün uygunluk değerleri seçilir. İterasyon sonucunda, her bir parçacık için en iyi olan belirlenir ve en iyilere göre pbest ve gbest değerleri bulunur. En iyi duruma göre, hız ve yön vektörleri yeniden hesaplanır. İterasyon sonucunda oluşan yeni durum; sonuca yaklaşmış ise, döngü bitirilir. Aksi halde en başa dönerek işlemler yeniden yapılır.



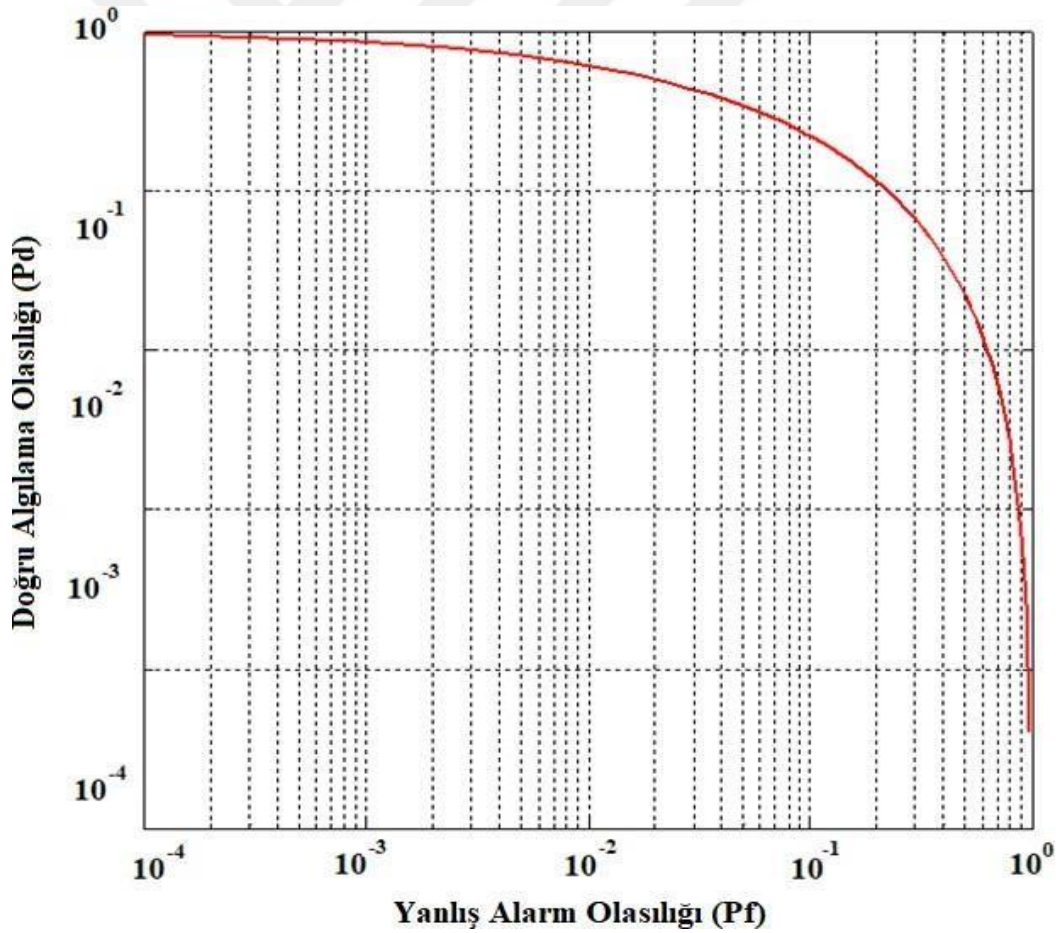
Şekil 3. 3. Parçacık sürü optimizasyonu akış diyagramı

## 4. SONUÇLAR

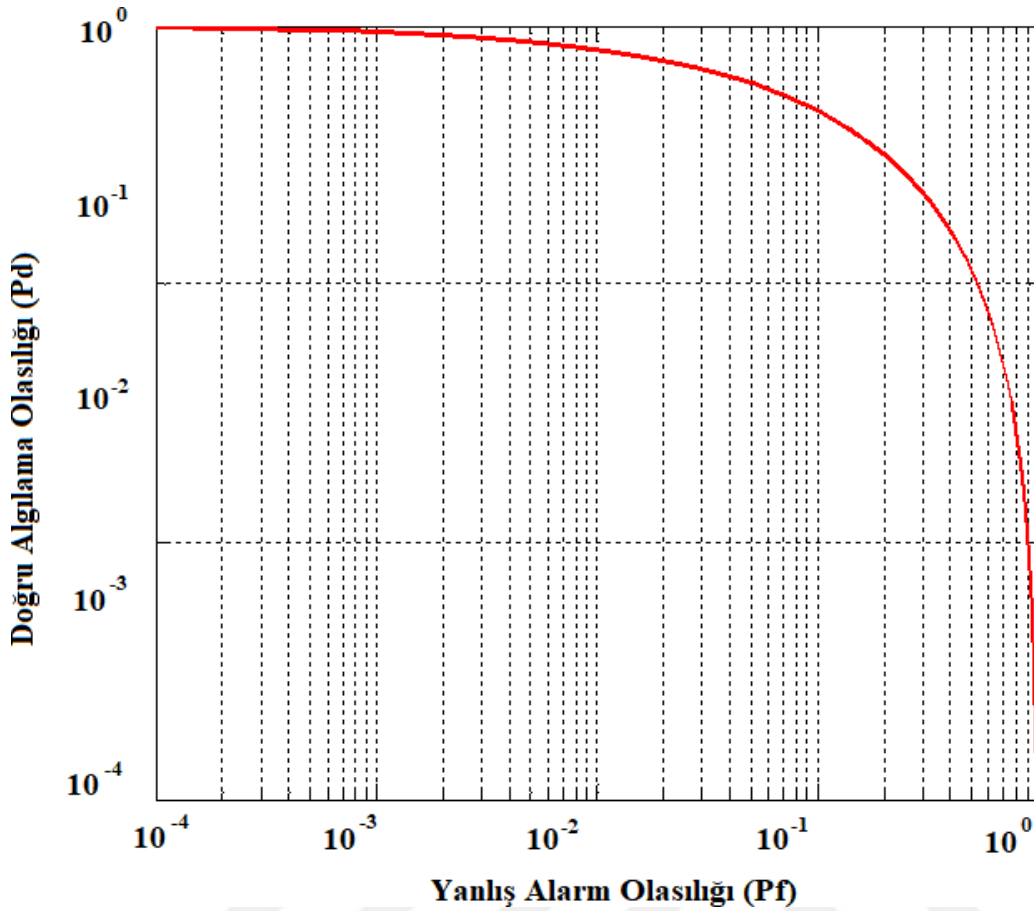
### 4.1. Bilişsel Radyo Ağlarının CDMA Yöntemine Uygulanması

#### 4.1.1. Enerji Algılama Yönteminin CDMA Yöntemine Uygulanması

Bu çalışmada; sistem analizi için AWGN kanalı kullanılmıştır. Değişen SNR değerlerinin, CDMA sistemini nasıl etkilediği incelenmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de, yanlış alarm olasılığına karşı doğru algılama olasılığı karşılaştırılmıştır.

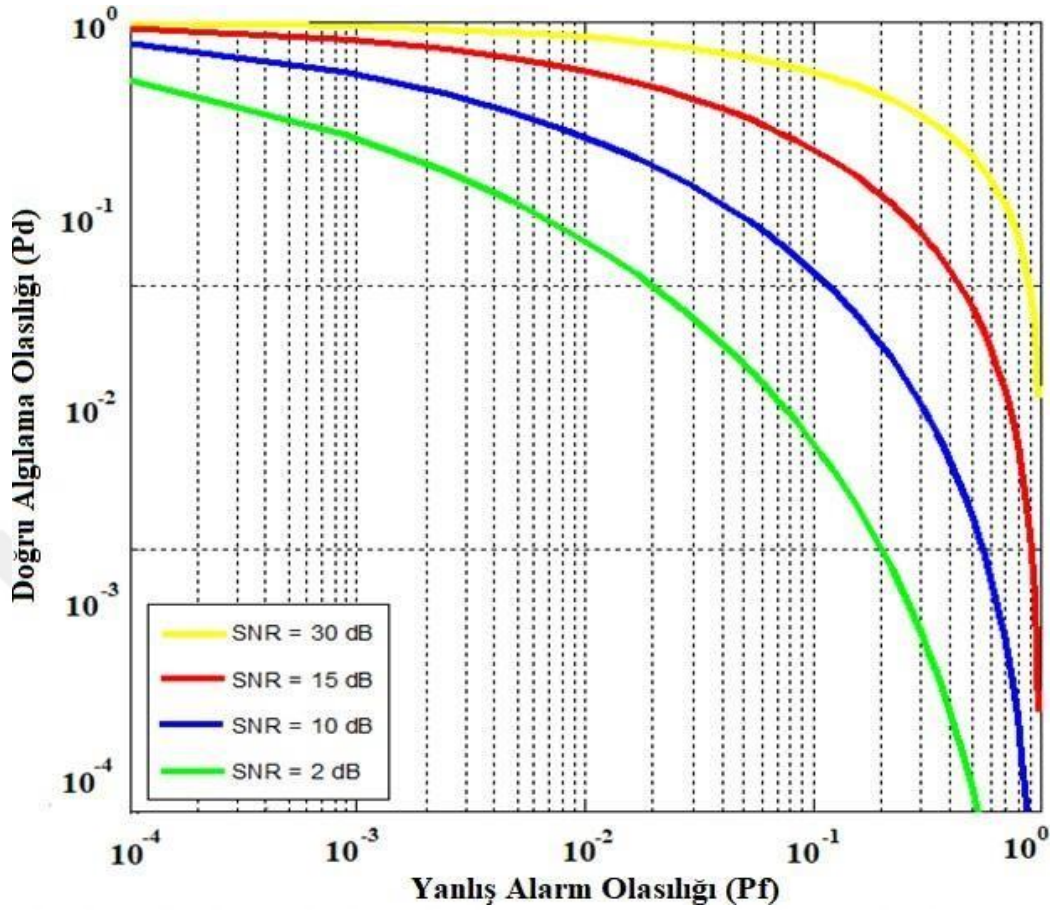


Şekil 4.1. SNR = 15 dB için doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.



Şekil 4.2. SNR = 20 dB için doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.

Her iki şekilde farklı SNR değerleri sisteme uygulanmıştır. 15dB ve 20 dB SNR değerlerine karşı sonuçlar ayrı ayrı gösterilmiştir. NP yaklaşımına göre; yanlış alarm olasılığına karşın doğru algılama olasılığı artıyorsa, sistem başarılı bir sonuç vermiş demektir. Simülasyonlardan elde edilen veriler NP yaklaşımını desteklemiştir. NP kuralına göre elde edilen sonuçlar, doğru algılama olasılığı  $P_d$  ve yanlış alarm olasılığı  $P_f$  için değerlendirilmiştir. Şekil 4.1'de  $p_f=0.0729$  iken  $p_d$  değeri 0.07865 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.2'de ise  $p_f=0.0729$  iken  $p_d$  değeri 0.1176 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; SNR değeri 20 dB olduğunda, algılama olasılığının %33,378 arttığı gözlemlenmiştir. Bu da uygulanan algılama yönteminin iyi sonuç verdiğini göstermiştir.

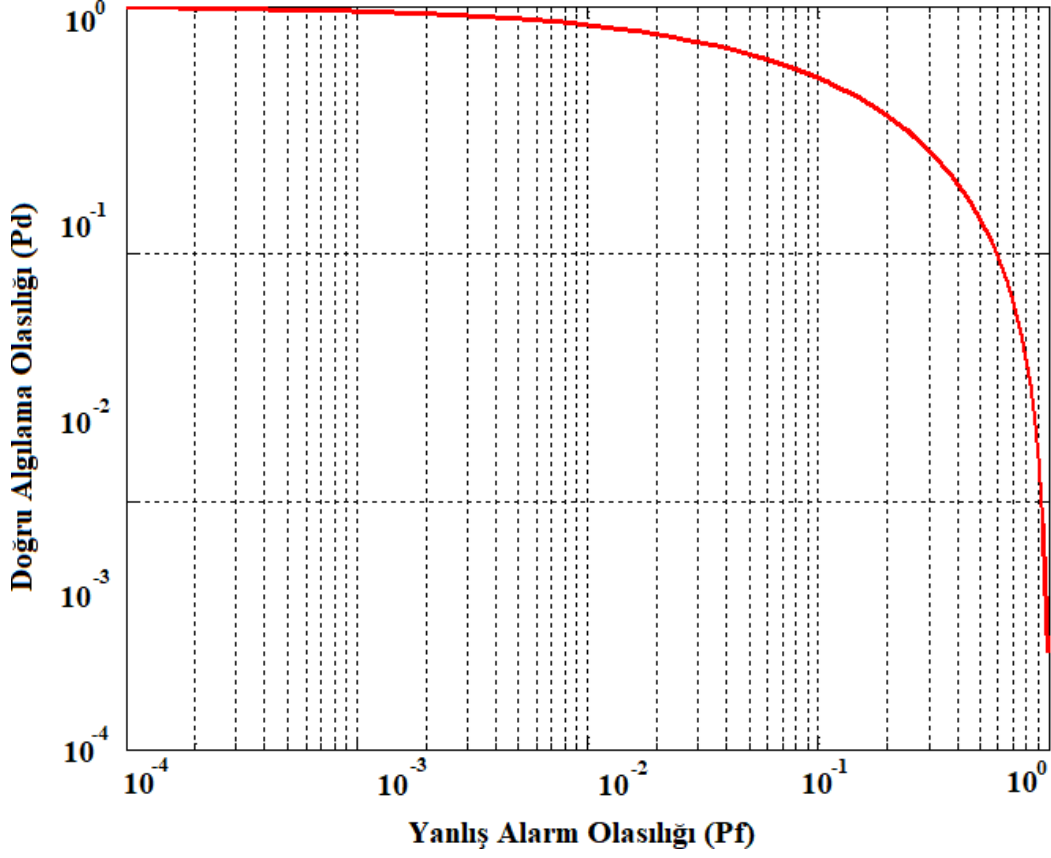


Şekil 4.3. Farklı SNR değerlerine göre doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.

Şekil 4.3'te gösterilen grafikte; farklı SNR değerlerine göre, yanlış alarm olasılığının, doğru algılama olasılığına göre analizi yapılmıştır. SNR değeri arttıkça, algılama olasılığının arttığı gözlemlenmiştir. SNR değerindeki artış, ortam gürültüsündeki azalmaya tekabül etmektedir. Ortamdan alınan gürültü ne kadar az olursa; sistem çıkışında, birinci kullanıcıyı algılamak da o kadar kolay olur. SNR değeri 2 dB ortamdaki gürültünün en fazla olduğunu, SNR değeri 30 dB gürültünün en az olduğunu göstermek için seçilmiştir. Şekil 4.3'de; SNR değeri 2dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.00000055 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 10dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.0000598 olarak hesaplanmıştır. SNR değeri 15dB alındığında ise,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.07865 olarak bulunmuştur. Son olarak SNR değeri 30dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.1595 olarak hesaplanmıştır. SNR değeri 30 dB ve 15 dB için elde edilen verilere göre , algılama olasılığı %50,78 artmıştır. Ortamdaki

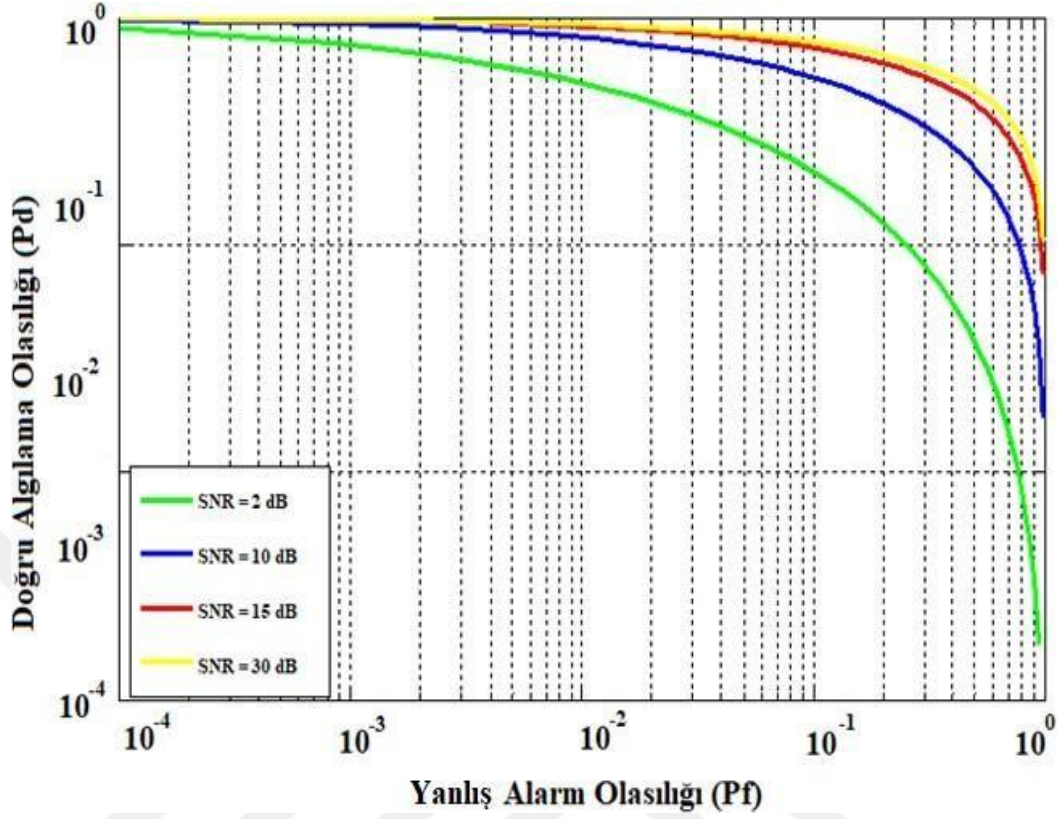
gürültü değeri artış gösterse bile, algılama olasılığı iyi sonuç vermiştir. Uygulanan yöntemin sistem üzerindeki başarısı açık bir şekilde görülmüştür.

#### 4.1.2. İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin CDMA Yöntemine Uygulanması



Şekil 4.4. SNR = 15 dB için doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.

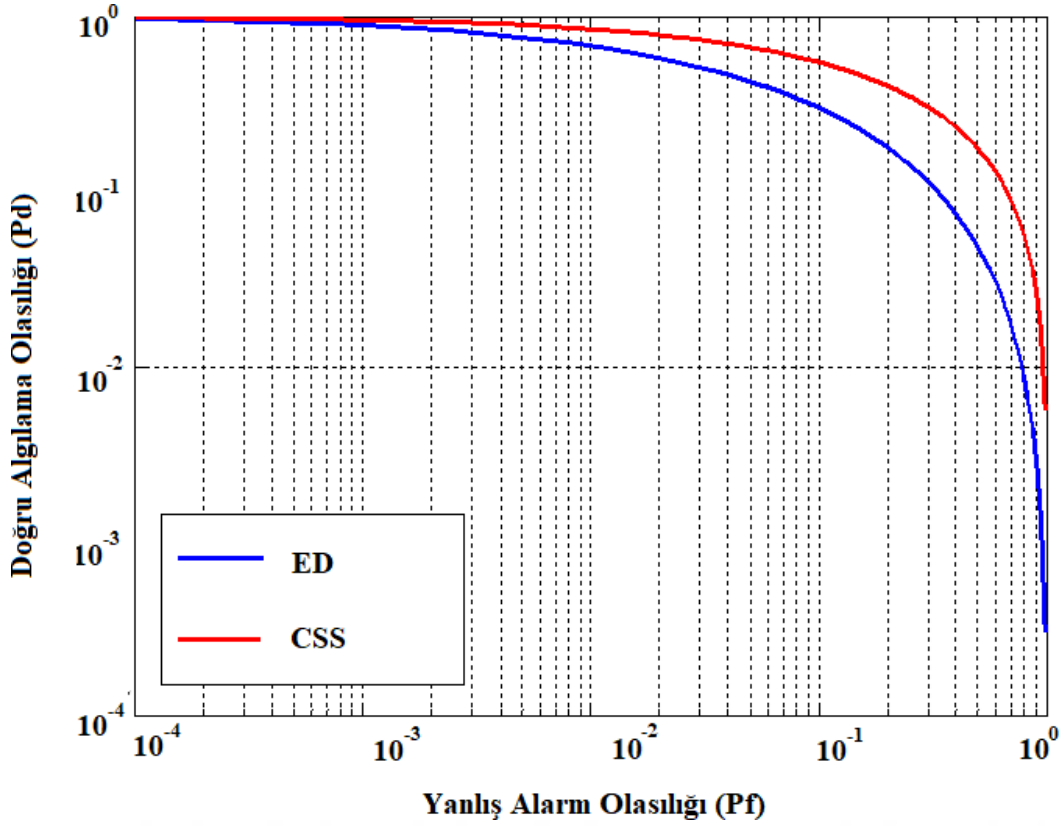
İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi ilk defa; bu çalışmada, CDMA yöntemine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'te gösterilmiştir. SNR değeri 20 dB olarak alındığında elde edilen sonuçlar sistemin doğru algılama performansını açıkça göstermiştir. NP yaklaşımına göre; yanlış alarm olasılığına karşın doğru algılama olasılığı artıyorsa, sistem başarılı bir sonuç vermiş demektir. Şekil 4.4'teki veriler de bu yaklaşımı desteklemektedir.



Şekil 4.5. Farklı SNR değerlerine göre doğru algılama olasılığının yanlış alarm olasılığına göre analizi.

Farklı SNR değerlerine göre elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te gösterilmiştir. SNR değeri düşük olduğunda bile, ortamdaki lisanslı kullanıcının doğru algılandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre; gürültü oranı azaldıkça, lisanslı kullanıcının varlığı daha doğru algılanmıştır. SNR değeri 2 dB ise, ortamdaki gürültü yoğunluğu oldukça fazladır. Eğer SNR değeri 30 dB ise, ortamdaki gürültü yoğunluğu azdır. Şekil 4.5'de; SNR değeri 2 dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.001017 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 10 dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.0767 olarak hesaplanmıştır. SNR değeri 15 dB alındığında ise,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.218 olarak bulunmuştur. Son olarak SNR değeri 30 dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.2869 olarak hesaplanmıştır. SNR değeri 30 dB ve 15 dB için elde edilen verilere göre, algılama olasılığı %24,01 artmıştır. Ortamdaki gürültü değeri artış gösterse bile, algılama olasılığı iyi sonuç vermiştir. Uygulanan yöntemin sistem üzerindeki başarısı açık bir şekilde görülmüştür.

### 4.1.3. CDMA Yöntemine Uygulanan İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi ile Enerji Algılama Yönteminin Karşılaştırılması



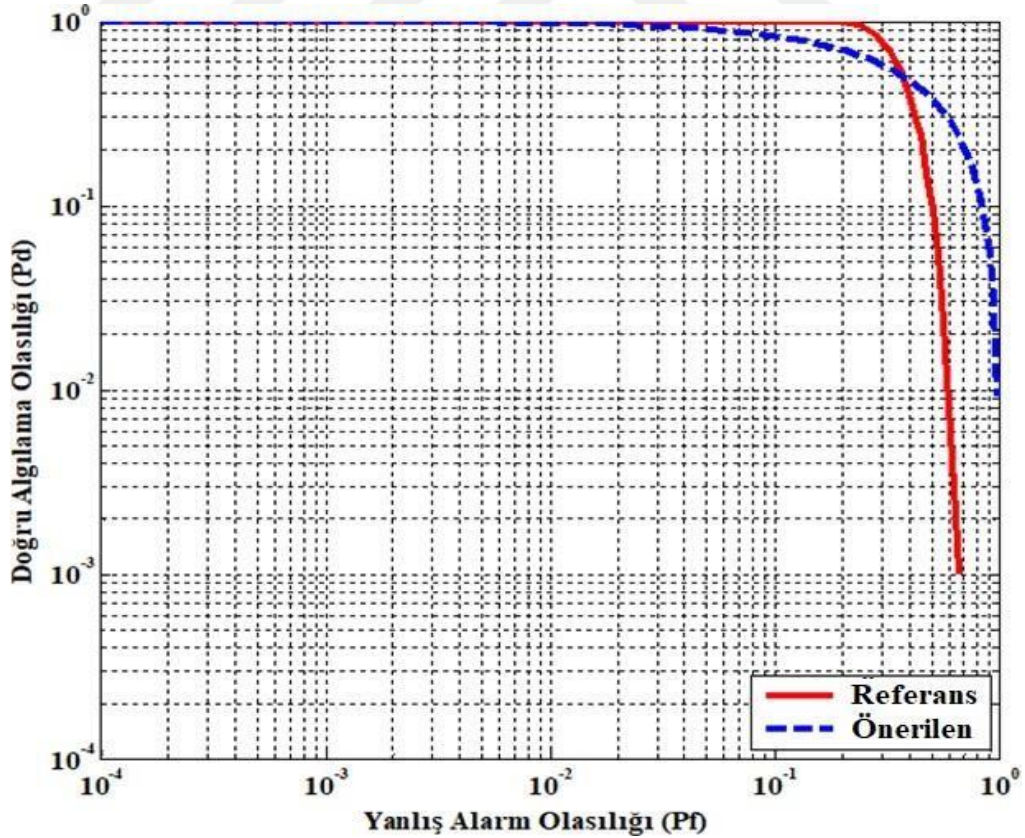
Şekil 4.6. İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi ile enerji algılama yönteminin karşılaştırılması.

Enerji algılama yöntemi ile işbirlikçi spektrum algılama yöntemi karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Burada ortamdaki SNR değeri 15 dB olarak seçilmiştir. Enerji algılama yönteminde,  $P_f$  değeri 0.0729 iken  $P_d$  değeri 0.07865 olarak ölçülmüştür. İşbirlikçi spektrum algılama yönteminde ise,  $P_f$  değeri 0.00729 iken  $P_d$  değeri 0.218 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 15 dB iken; işbirlikçi spektrum algılama yöntemi, enerji algılama yöntemine göre %63,92 oranında daha iyi sonuç vermiştir.

## 4.2. Bilişsel Radyo Ağlarının MC-CDMA Yöntemine Uygulanması

### 4.2.1. MC-CDMA Yapısına Önerilen Yönteminin Uygulanması

MC-CDMA için işbirlikçi spektrum algılama yöntemi uygulanmış ve sonuçları bu bölümde analiz edilmiştir. Sonuçlar; Rayleigh kanalı boyunca, Walsh-Hadamard yayma kodu kullanılarak bulunmuştur. Referans ve önerilen yöntemin sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Algılama esnasında sabit bir eşik değeri kullanılmıştır [76]. Önerilen yöntem sonuçlarında ise; eşik değeri, yanlış alarm olasılığına göre değiştirilerek optimize edilmiştir. Böylece, sistemin doğru algılama yapması sağlanmıştır. Radyo ortamından alınan güç değeri, gürültü gücünün değerine göre uyarlanarak hesaplanmıştır. Lisanslı kullanıcının frekans kanalını kullanması veya kullanmaması durumuna göre, ortamdan alınan güç değeri ile eşik değeri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Toplam güç değeri, eşik değerini aşarsa; sistem lisanslı kullanıcının frekansını kullandığını kabul etmiştir. Aksi halde, lisanslı kullanıcının, frekans bandını kullanmadığı varsayılmıştır.

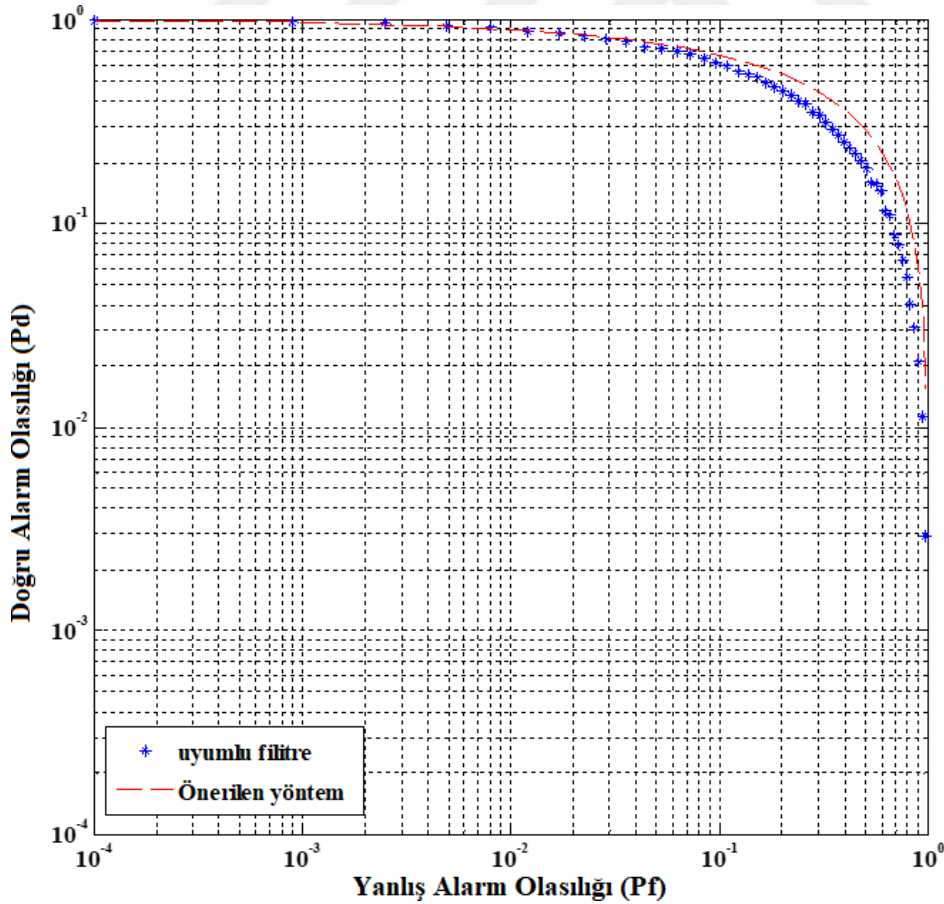


Şekil 4.7 Önerilen yöntem ile referans alınan eşik değerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.



Şekil 4.7’de elde edilen veriler; önerilen yöntemin sonuçlarının, sabit olarak alınan eşik değerine göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Önerilen yöntem sonuçlarında, eşik değeri gürültü seviyesine göre değiştirilmiştir. SNR değeri 10 dB iken sonuçlar alınmıştır. Sabit eşik değerinde,  $P_f$  değeri 0.0729 iken  $P_d$  değeri 0.218 olarak ölçülmüştür. Önerilen yöntemde ise,  $P_f$  değeri 0.0729 iken  $P_d$  değeri 0.2265 olarak ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre; SNR değeri 15 dB ve  $P_f$  değeri 0.0729 iken, önerilen yöntem %3.89 daha iyi sonuç vermiştir. Yanlış algılama durumuna karşın, eşik değeri optimize edildiği için daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sabit olarak alınan eşik değerinde ise, ortamın değişen gürültü ve sönümlenme durumları göz ardı edilmiştir. Sabit bir eşik değeri alındığından, lisanslı kullanıcının bazen yanlış algılandığı görülmüştür. Ortamın gürültü durumuna göre değişen eşik değeri alındığında, lisanslı kullanıcıyı ayırt etmek daha kolay olmuştur.

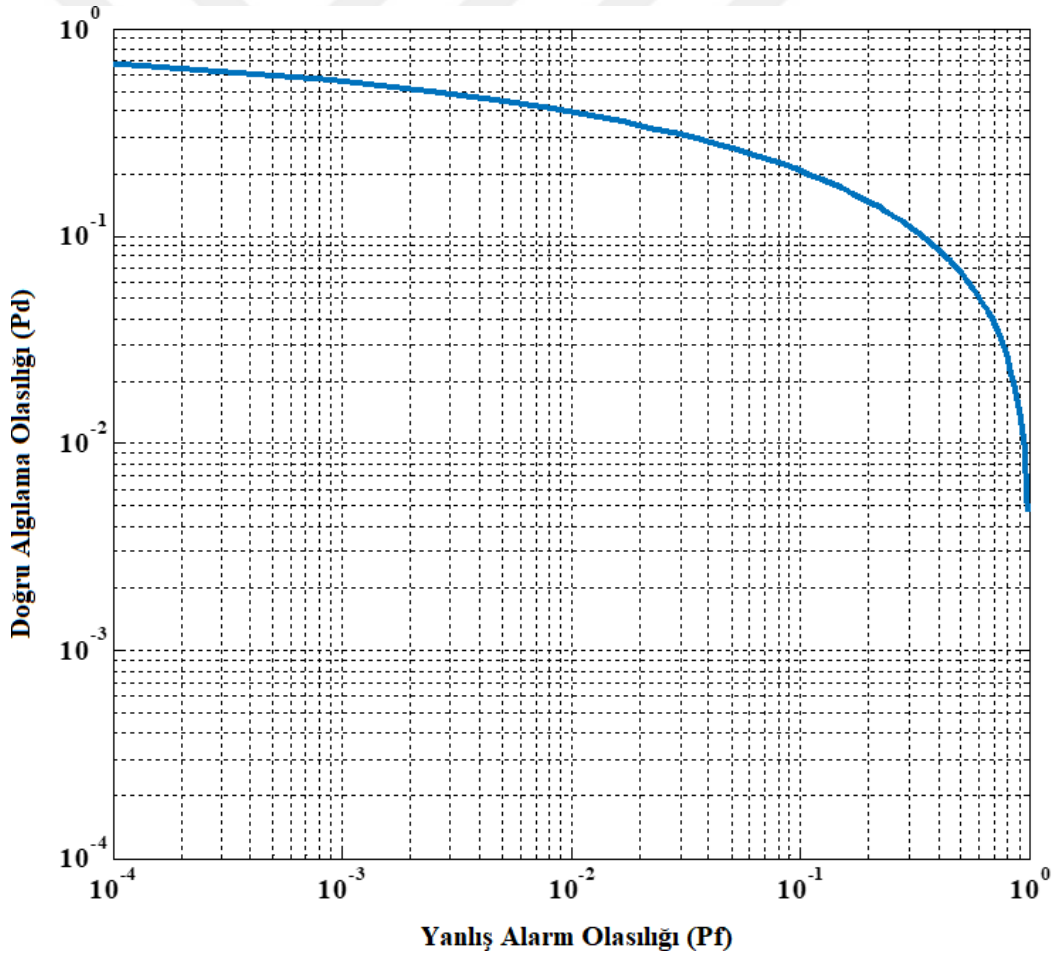
#### 4.2.2. Önerilen Yöntem ile Uyumlu Filtre Yönteminin Karşılaştırılması



Şekil 4.8. Önerilen Yöntem ile Uyumlu filtre yönteminin karşılaştırılması

Şekil 4.8’de önerilen yöntem ile uyumlu filtre yönteminin karşılaştırılması yapılmıştır. Önerilen yöntemde ise,  $P_f$  değeri 0.0729 iken  $P_d$  değeri 0.2265 olarak ölçülmüştür. Uyumlu filtre yönteminde ise,  $P_f$  değeri 0.0729 iken  $P_d$  değeri 0.2136 olarak ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre; SNR değeri 15 dB ve  $p_f$  değeri 0.0729 iken, önerilen yöntem %5,65 daha iyi sonuç vermiştir. Yanlış algılama durumuna karşın, eşik değeri optimize edildiği için daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sabit olarak alınan eşik değerinde ise, ortamın değişen gürültü ve sönümleme durumları göz ardı edilmiştir.

#### 4.2.3. MC-CDMA Yöntemine Enerji Algılama Yönteminin Uygulanması

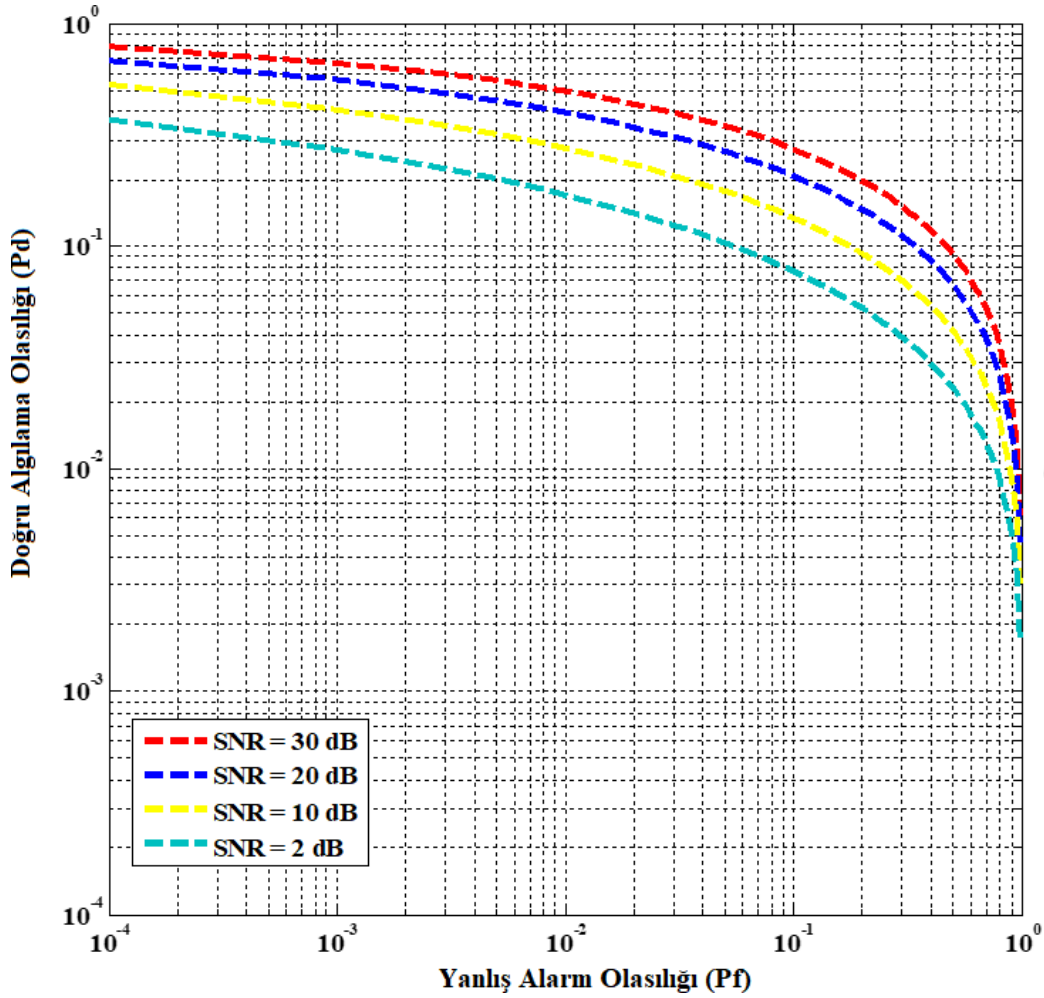


Şekil 4.9. Enerji algılama yönteminin MC-CDMA yöntemine uygulanması.

Enerji Algılama Yönteminin MC-CDMA yöntemine uygulanması Şekil 4.9’da gösterilmiştir. SNR değeri 20 dB alınarak işlemler yapılmıştır. NP yaklaşımına göre;

yanlış alarm olasılığına karşın doğru algılama olasılığı artıyorsa, sistem başarılı bir sonuç vermiş demektir. Şekil 4.9'dan elde edilen verilere göre,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.2219 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.9'a göre ortaya çıkan sonuçlar, NP yaklaşımını desteklemiştir. NP kuralına göre elde edilen sonuçlar, doğru algılama olasılığı  $P_d$ , ve yanlış alarm olasılığı  $P_f$  için değerlendirilmiştir.

#### 4.2.4. MC-CDMA Yöntemine İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin Uygulanması

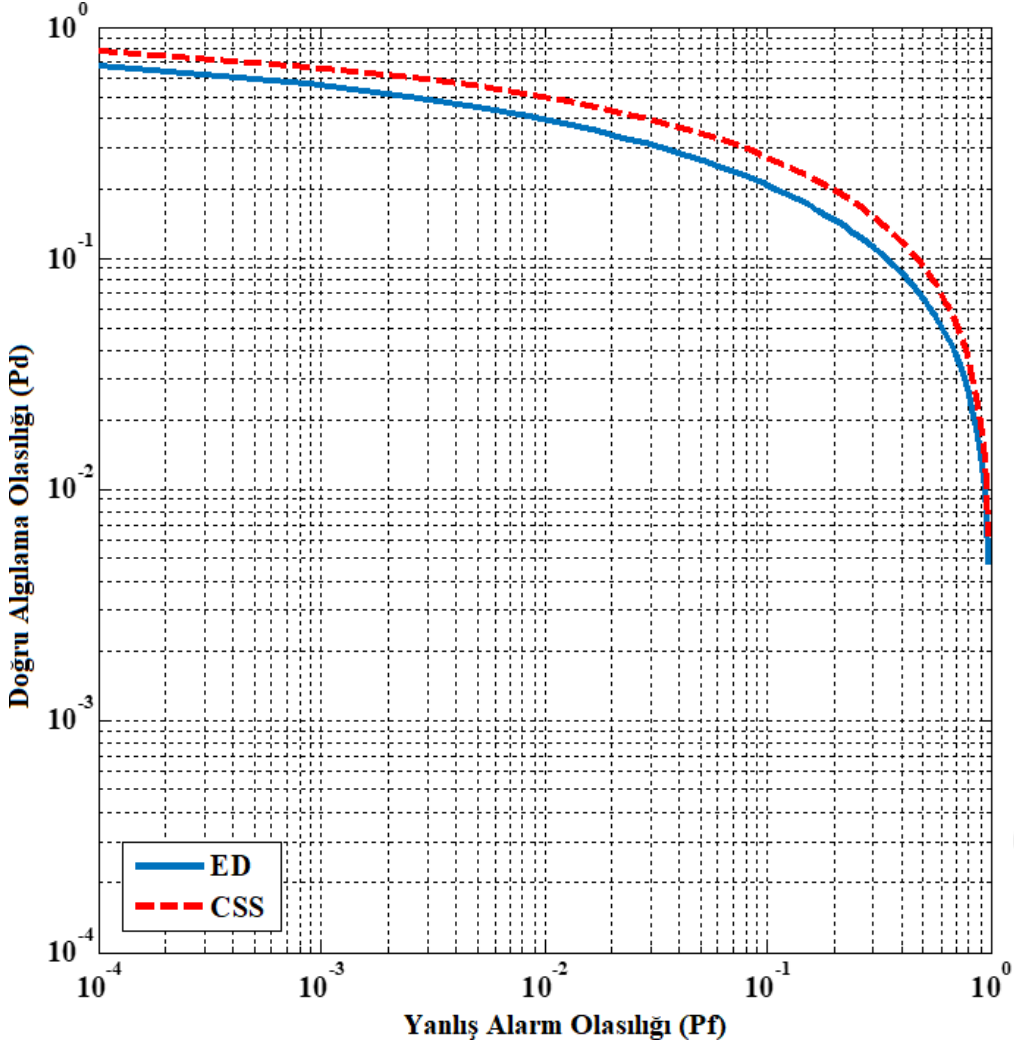


Şekil 4.10 Farklı SNR değerlerinde CSS yöntemi için elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Şekil 4.10'da; farklı SNR değerleri için CSS yönteminin doğru algılama performansı incelenmiştir. SNR değeri 2 dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.08914 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 10 dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.1531 olarak hesaplanmıştır. SNR değeri 20 dB alındığında ise,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.2341

olarak bulunmuştur. Son olarak SNR değeri 30 dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.3071 olarak hesaplanmıştır. SNR değeri yüksek olduğu zaman, lisanslı kullanıcının doğru algılanmasında artış gözlemlenmiştir. SNR değerinin yüksek olması, radyo ortamındaki gürültünün az olması anlamına gelmektedir. Bu yüzden, SNR değeri ne kadar çok artarsa, CSS yöntemi daha doğru algılama yapabilmektedir. CSS yönteminde; SNR değerleri düştükçe, lisanslı kullanıcıyı tespit etmesi zorlaşmaktadır. Bazen, lisanslı kullanıcı frekans spektrumunu kullanıyormuş gibi algılama yapabilmektedir. Analiz yaparken en uygun SNR değeri 10 dB olarak kabul edilmiştir. Bu değer arttıkça, sistemde doğru algılamanın arttığı görülmüştür. Bu çalışmada, 2 dB ile başlayıp 30 dB'ye kadar olan simülasyon sonuçları incelenmiştir.

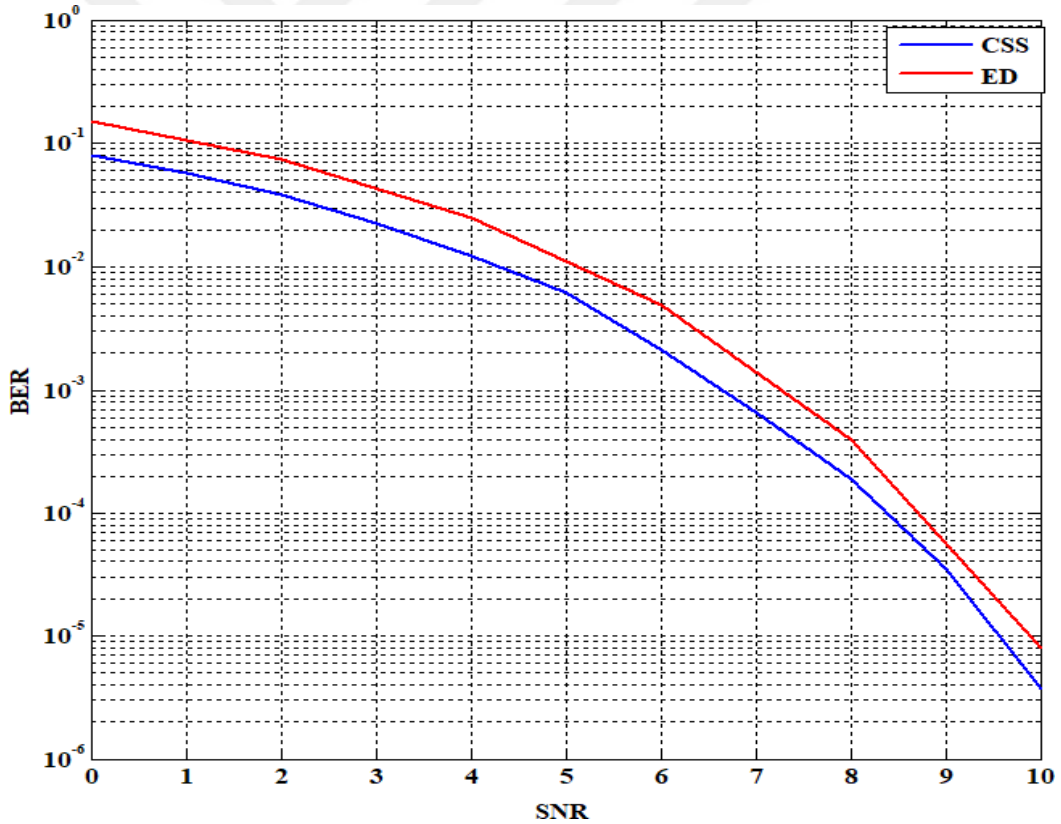
#### 4.2.5. MC-CDMA Yöntemine Uygulanan İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi ile Enerji Algılama Yönteminin Karşılaştırılması



Şekil 4.11. İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi ve enerji algılama yönteminin karşılaştırılması.

Şekil 4.11’de, CSS ve ED yöntemleri karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Her iki çalışmada SNR değeri 2 dB olarak alınmıştır. Bunun sebebi; SNR değeri 2 dB olduğunda, ortamdaki gürültü değeri oldukça fazladır. Her iki spektrum algılama yöntemi için de gürültünün fazla olduğu ortam şartları göz önüne alınmıştır. Ayrıca, her iki yöntem için de örnekleme zamanları eşit olarak alınmıştır. Böylece; ortamın gürültü ve sönümlenme değerlerinin, her iki algılama yöntemine de eşit olarak etki etmesi düşünülmüştür. Şekil 4.11’den elde edilen verilere göre; enerji algılama yönteminde,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.08264 olarak ölçülmüştür. İşbirlikçi spektrum algılama yönteminde ise,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.08914 olarak

ölçülmüştür. SNR değeri 2 dB ve  $P_f=0.0729$  değeri alındığında, CSS yöntemi ED yöntemine göre %7,29 daha iyi sonuç vermektedir. Burada daha iyi sonuç alınmasının sebebi; CSS yönteminin, diğer BR kullanıcıları ile de iletişim halinde olmasıdır. Bu iletişim sayesinde, ortaya çıkabilecek sönmüleme ve gölgeleme problemleri ortadan kaldırılmıştır. ED yöntemi kullanıldığında; radyo ortamındaki fazla gürültü, lisanslı kullanıcının yanlış algılanmasına sebep olmuştur. Ortamdaki fazla gürültünün, bazen eşik değerini aştığı görülmüştür. Bu durumda; algılama yöntemi, ortamda lisanslı kullanıcı varmış gibi sonuç vermiştir. Diğer bir yanlış algılama sebebi de gölgeleme problemidir. ED yönteminde; gölgeleme sebebiyle, lisanslı kullanıcının varlığı doğru tespit edilememiştir. Bu durum, lisanslı ve lisanssız kullanıcıların çakışmasına sebep olmuştur.



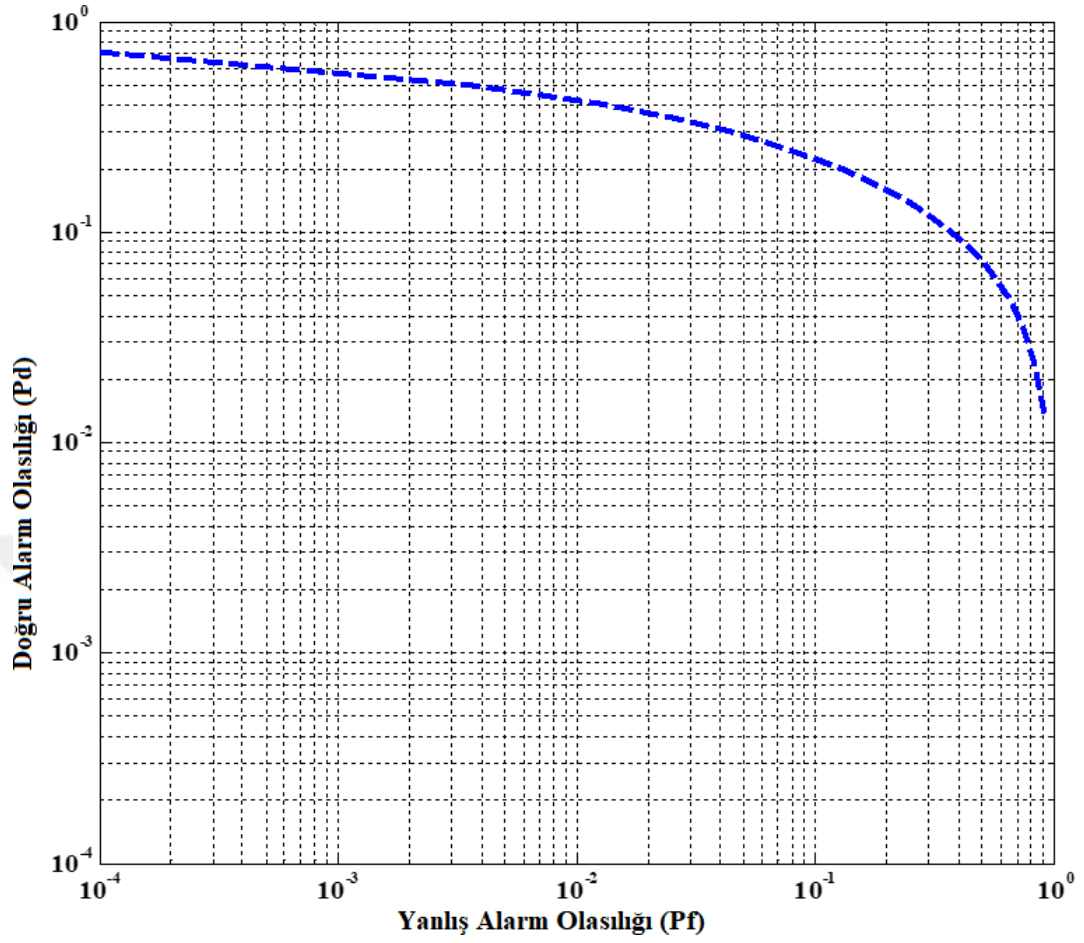
Şekil 4.12 CSS ile ED yöntemleri arasındaki SNR-BER performansının karşılaştırması.

Şekil 4.12’de işbirlikçi spektrum algılama yöntemi ile enerji algılama yönteminin SNR-BER performansları karşılaştırılmıştır. SNR değeri 0 ile 10 dB aralığında seçilmiştir. Bu SNR değerleri aralığında, iletilen bitlerdeki hata oranlarına bakılmıştır. SNR değeri 6 dB iken, CSS yönteminde BER değeri  $2.13 \times 10^{-3}$  bulunmuştur. Aynı SNR değerinde, ED yöntemindeki BER değeri  $4.8 \times 10^{-3}$  olarak ölçülmüştür. SNR değeri 10 dB alındığında ise; CSS yönteminde BER değeri  $3.71 \times 10^{-6}$  iken, ED yönteminde BER değeri  $8.1 \times 10^{-6}$  olarak bulunmuştur. Elde edilen hata oranlarına bakıldığında, CSS yönteminde hatalı bit sayısının %22,7 daha az olduğu görülmüştür. Bu uygulamada; BR ağlarının, MC-CDMA yöntemine nasıl uyarlandığı gösterilmektedir. Tanımlanan performans ölçümlerine göre, farklı SNR değerleri için önerilen yöntemin tespit ve tahmin performansı ölçülmüştür. Spektrumun, haberleşme parametreleri hakkında önceden bilgi sahibi olmadan algılanabilmesi nedeniyle; önerilen yöntem, geniş spektrumlu bantlarda algılanması beklenen BR’lar için, aday bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu tezde, bir ağdaki birçok bilişsel radyonun; gölgelendirme, sönümleme ve gürültü belirsizliği gibi etkilerin azaltılması için işbirlikçi algılama yaklaşımı önerilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre; işbirlikçi spektrum algılama yöntemi, MC-CDMA sisteminde iyi performans göstermiştir.

### **4.3. Bilişsel Radyo Ağlarının OFDM Yöntemine Uygulanması**

#### **4.3.1. Enerji Algılama Yönteminin OFDM Yapısına Uygulanması**

Enerji algılama yönteminin OFDM yöntemine uygulanması Şekil 4.13’te gösterilmiştir. SNR değeri olarak 20 dB seçilmiştir. Şekil 4.13’ten elde edilen verilere göre; enerji algılama yönteminde,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.2587 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 20 dB olarak alındığında elde edilen sonuçlar sistemin doğru algılama performansını açıkça göstermiştir. NP yaklaşımına göre; yanlış alarm olasılığına karşın doğru algılama olasılığı artıyorsa, sistem başarılı bir sonuç vermiş demektir. Şekil 4.12’teki veriler de bu yaklaşımı desteklemektedir.

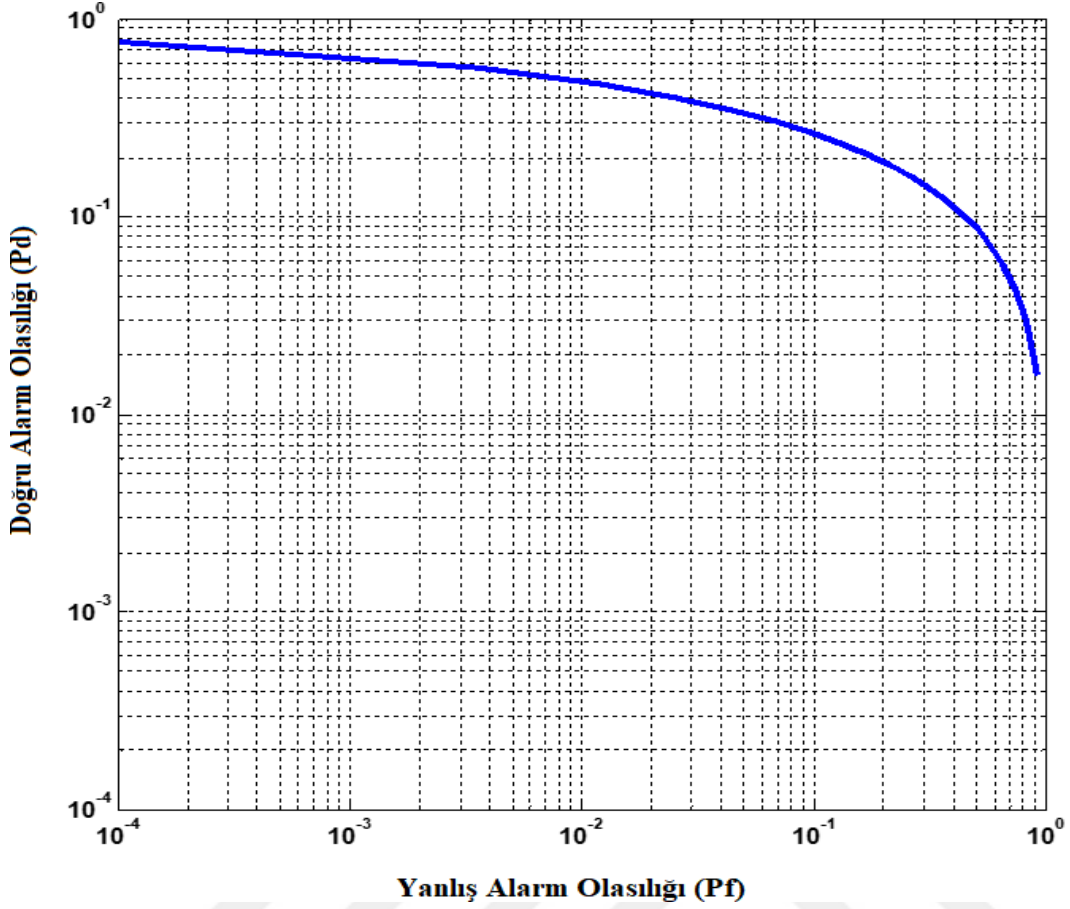


Şekil 4.13. Enerji algılama yönteminin OFDM yöntemine uygulanması.

#### 4.3.2. İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin OFDM Yapısına Uygulanması

İşbirlikçi spektrum algılama yönteminin OFDM yöntemine uygulanması Şekil 4.14'te gösterilmiştir. SNR değeri 20 dB alınarak işlemler yapılmıştır. Şekil 4.14'ten elde edilen verilere göre; CSS yönteminde,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.315 olarak ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre, OFDM yönteminde işbirlikçi spektrum algılama yöntemi daha iyi sonuç vermiştir.

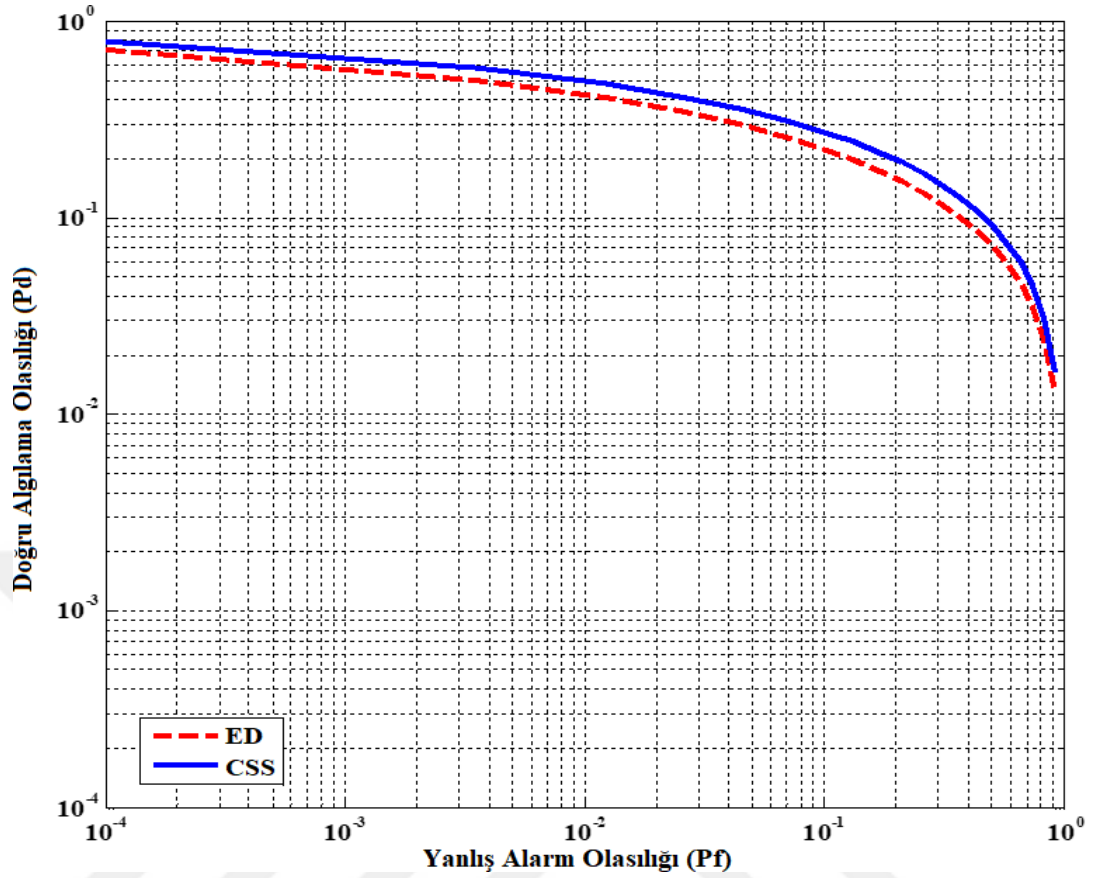




Şekil 4.14. İşbirlikçi spektrum algılama yönteminin OFDM yöntemine uygulanması.

#### 4.3.3. OFDM Yöntemine Uygulanan İşbirlikçi Spektrum Algılama Yöntemi ile Enerji Algılama Yönteminin Karşılaştırılması

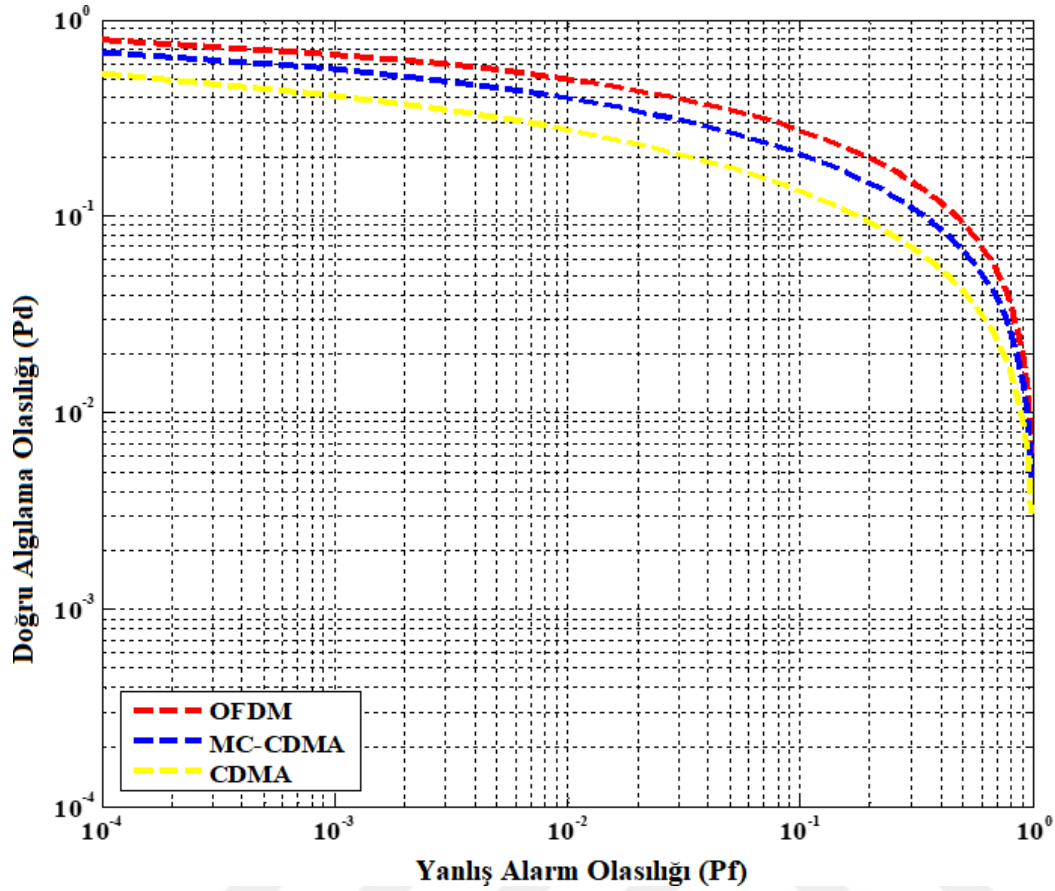
İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi ile enerji algılama yönteminin karşılaştırılması Şekil 4.15'te gösterilmiştir. SNR değeri 20 dB olarak alınmıştır. Şekil 4.15'ten elde edilen verilere göre; enerji algılama yönteminde,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.2587 olarak ölçülmüştür. CSS yönteminde ise,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.315 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 20 dB ve  $P_f=0.676$  alındığında, elde edilen sonuçlara göre; CSS yöntemi, ED yönteminden %17,2 daha iyi sonuç vermiştir. Burada daha iyi sonuç alınmasının sebebi; CSS yönteminin, diğer BR kullanıcıları ile de iletişim halinde olmasıdır. Bu iletişim sayesinde, ortaya çıkabilecek sönümlenme ve gölgeleme problemleri ortadan kaldırılmıştır. ED yöntemi kullanıldığında; radyo ortamındaki fazla gürültü, lisanslı kullanıcının yanlış algılanmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.15. İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi ve enerji algılama yönteminin karşılaştırılması.

#### 4.3.4. İşbirlikçi Spektrum Algılama Yönteminin CDMA, MC-CDMA ve OFDM Yöntemlerinde Karşılaştırılması

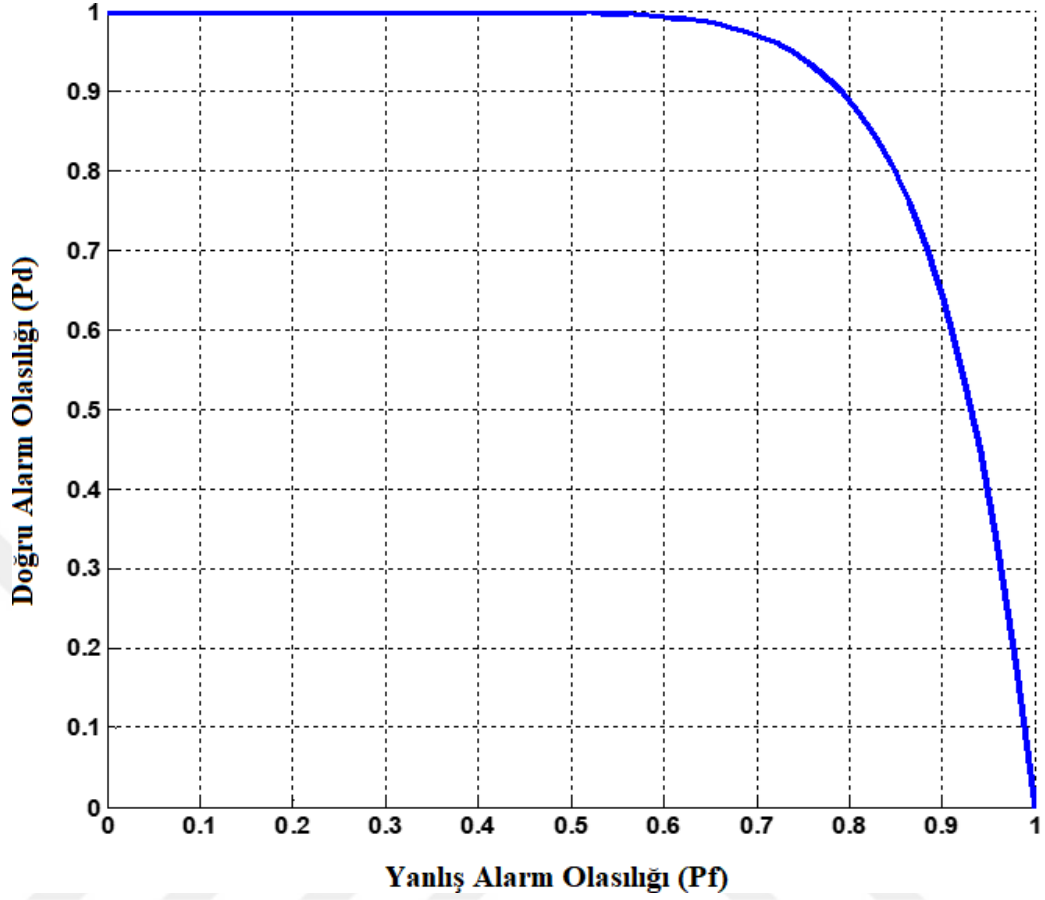
İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi CDMA, MC-CDMA ve OFDM yöntemlerine ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekil 4.16'daki sonuçlara göre; CDMA yönteminde,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.2865 olarak ölçülmüştür. MC-CDMA yönteminde ise,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.2994 olarak ölçülmüştür. OFDM yönteminde,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.315 olarak ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre; OFDM yönteminde işbirlikçi spektrum algılama yöntemi, MC-CDMA yöntemine göre %4,95 daha iyi sonuç vermiştir. CDMA yöntemiyle kıyaslandığında bu oran %9 olarak bulunmuştur. Bu verilere dayanarak, yapay zekâ tekniği OFDM yöntemine uyarlanmıştır.



Şekil 4.16. İşbirlikçi spektrum algılama yönteminin CDMA, MC-CDMA ve OFDM üzerindeki sonuçlarının karşılaştırılması

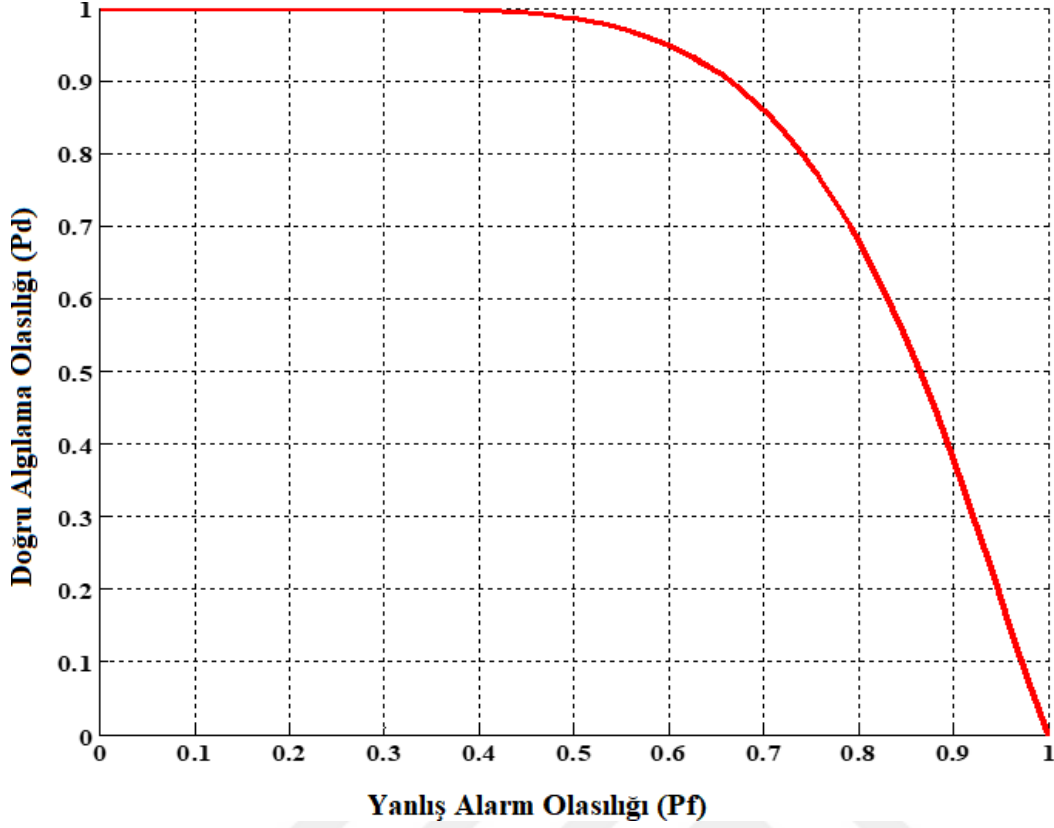
#### 4.3.5. Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Yönteminin OFDM Yöntemine Uygulanması

GA ve parçacık sürüsü optimizasyonu (particle swarm optimization - PSO) kullanılarak elde edilen sonuçlar, Şekil 4.17'de ve Şekil 4.18'de ayrı ayrı gösterilmiştir. Sisteme uygulanan GA yönteminin doğruluğunu test edebilmek için, PSO yöntemi sisteme uyarlanmıştır. GA yöntemi kullanıldığında; klasik yöntemlere göre, daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapay zekâ kullanılarak elde edilen sonuçlarda, genetik algoritma ile yapılan tespit yöntemi oldukça başarılı olmuştur.



Şekil 4.17 Genetik algoritma kullanılarak elde edilen doğru algılama olasılığı.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de, elde edilen sonuçlara göre; yapay zekânın, spektrum algılama yöntemleri ile birleştirilen yeni yöntemde, kanal tahsisi bakımından oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Bu yöntemde, SNR değerleri 15 dB olarak alınmıştır. Şekil 4.17'den elde edilen sonuçlara göre; GA yöntemi için,  $P_f=0.7056$  iken  $P_d$  değeri 0.8867 olarak ölçülmüştür. PSO yöntemi için,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.8522 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 15 dB ve  $P_f=0.7056$  alındığında, GA yöntemi PSO yöntemine göre %3,89 daha iyi sonuç vermiştir. NP yaklaşımına göre, yanlış algılama olasılığı arttıkça ( $P_f$ ), doğru algılama olasılığının da artması gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar, NP yaklaşımını desteklemektedir. Önerilen yöntemde; lisanssız kullanıcılar, lisanslı kullanıcıya zarar vermeden, frekans bandını kullanabilmektedirler.

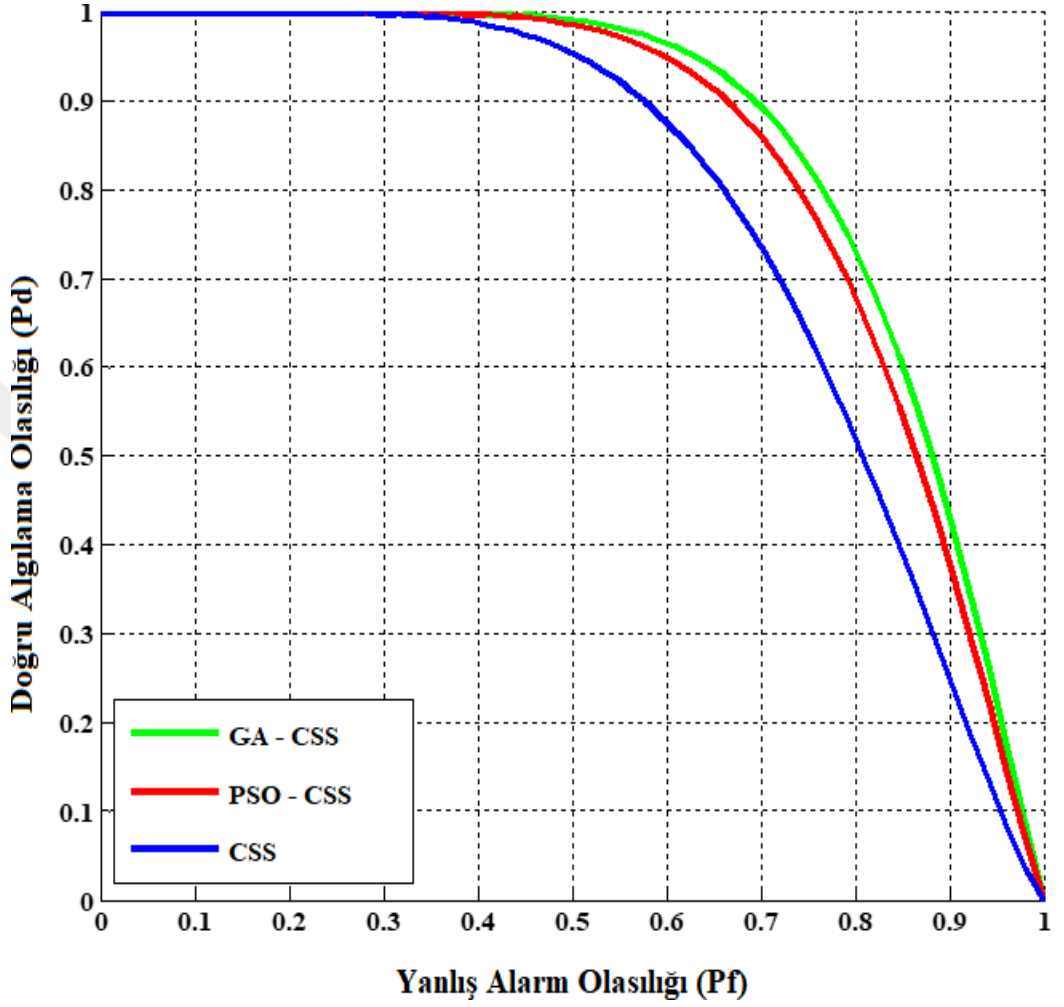


Şekil 4.18 Parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak elde edilen doğru algılama olasılığı.

#### 4.3.6. OFDM Yöntemi İçin Önerilen Yöntemin CSS Yöntemi ile Kıyaslanması

Şekil 4.19’de PSO, GA ve CSS yöntemleri, karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. PSO ve GA yöntemleri, CSS yöntemine entegre edilmiştir. Şekil 4.19’den elde edilen verilere göre; GA yöntemi için,  $P_f=0.7056$  iken  $P_d$  değeri 0.8867 olarak ölçülmüştür. PSO yöntemi için,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.8522 olarak ölçülmüştür. CSS yöntemi için,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.7259 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 15 dB ve  $P_f=0.7056$  alındığında, GA yöntemi PSO yöntemine göre %3.89 daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca SNR değeri 15 dB ve  $P_f=0.7056$  alındığında; GA-CSS yöntemi, CSS yöntemine göre %18.13 daha iyi sonuç vermiştir. Elde edilen verilere göre en fazla doğru algılama olasılığı, GA yönteminde elde edilmiştir. Yapay zekâ sisteme uygulandığında, elde edilen başarı oranı artmıştır. Yeni yaklaşım olmadan, lisanslı kullanıcı için algılama olasılığının düşük olduğu görülmüştür. Bu nedenle, kanal tahsisi sırasında, çakışma olma ihtimali ortaya çıkmaktadır. Önerilen bu yöntem sayesinde, algılama olasılığında büyük bir artış gözlemlenmektedir. Böylece; sistemin

lisanssız kullanıcıyı yanlış algılamasında, büyük bir azalma olmuştur. Lisanslı ve lisanssız kullanıcılar, aynı spektrumu çakışma olmadan rahatlıkla kullanabilmektedir.

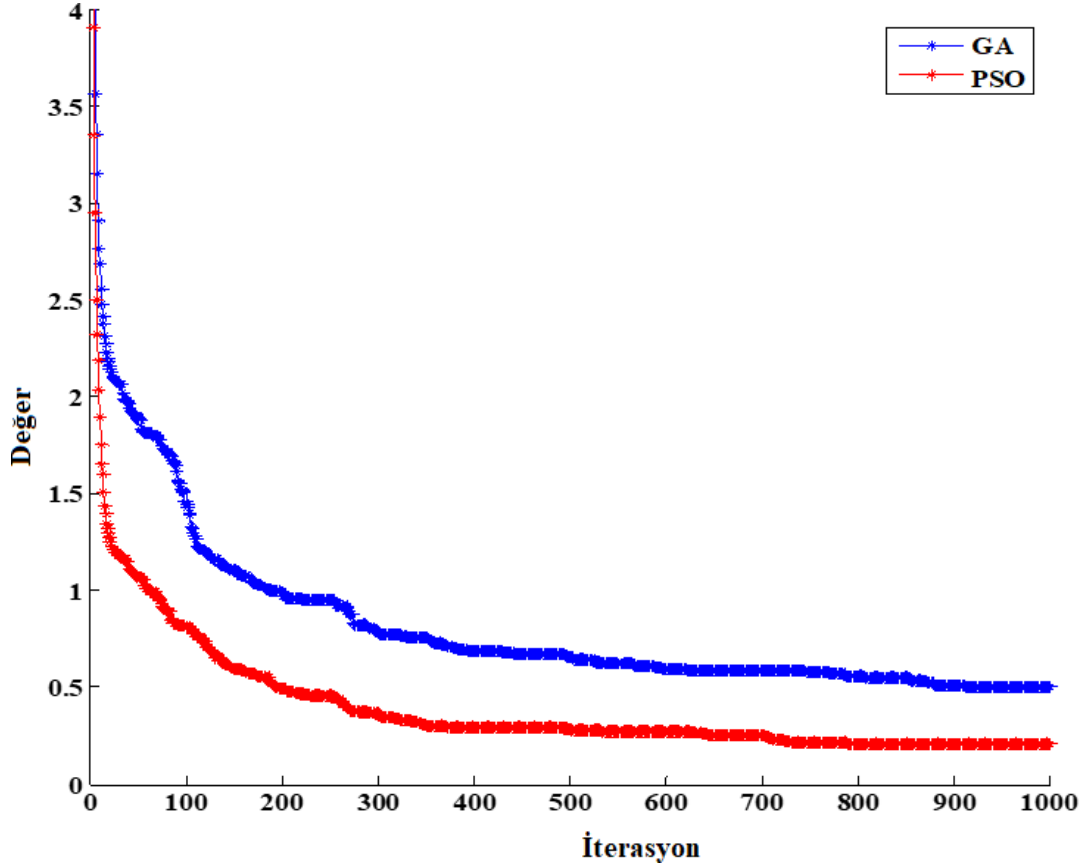


Şekil 4.19. Önerilen yeni yöntem ile diğer yöntemler arasındaki doğru algılama olasılıklarının karşılaştırılması.

Aynı SNR değerleri baz alındığında, kanal atamasının daha hızlı yapıldığı Şekil 4.19'da gösterilmiştir. SNR değeri olarak 15 dB alınmıştır. 10 dB'nin altındaki değerlerde; gürültü seviyesi çok yüksek olduğundan, doğru algılama olasılığı zorlaşmaktadır. Bu nedenle SNR değeri 15 dB olarak seçilmiştir. Optimizasyon yöntemi sayesinde, hatalı tespit olasılığının daha az olduğu ortaya çıkmıştır.

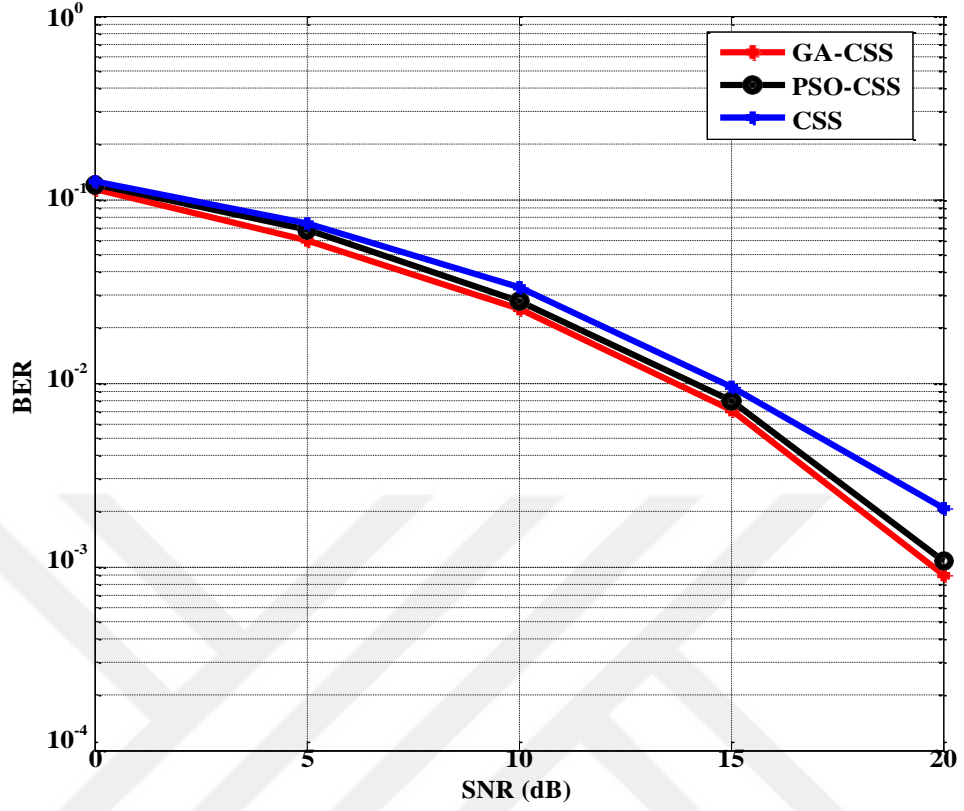
Şekil 4.20'de gösterilen grafikte; doğru algılama olasılığına, hızlı ve doğru bir şekilde, kaç adımda ulaşıldığı gösterilmiştir. Burada amaç; hem doğru hem de kısa süre içinde,

doğru bir algılama yapmaktır. Genetik algoritma ile uygulanan yöntemin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. GA ile yapılan optimizasyon sürecinde, adım süreçleri de karşılaştırılmıştır. GA ile elde edilen adım sayılarının, PSO'ya göre daha az olduğu görülmüştür. Bu sonuç, kanal atama ve lisanslı kullanıcıyı algılamanın daha hızlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.20. PSO ve GA için adım sayılarının karşılaştırılması.

Önerilen genetik algoritma tabanlı spektrum algılama yöntemi ile diğer yöntemler arasındaki BER-SNR performansının karşılaştırması Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Böylece; lisanslı kullanıcı doğru tespit edildiğinde, kanal kullanımındaki hata oranının oldukça düşük seviyede olduğu görülmüştür. İlk olarak, kanal tahsisi için ED ve CSS yöntemleri karşılaştırılmıştır. CSS yönteminden elde edilen sonuçlar daha iyi olduğu için yapay zekâ yöntemleri uygulanmıştır. Aynı SNR değerleri üzerinden BER değerleri karşılaştırıldığında; GA kullanılarak elde edilen BER sonuçları, diğer yöntemlere göre daha az olmuştur. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi, GA-CSS yöntemi ile en az hata oranına ulaşılmıştır.



Şekil 4.21 Önerilen yeni yöntem ile diğer yöntemler arasındaki SNR-BER performansının karşılaştırması.

#### 4.4. Tartışma

Günümüz kablosuz iletişimde, her teknoloji için sabit bir spektrum atama politikası uygulanmaktadır. Farklı teknolojilerin gelişmesi ve kullanıcı taleplerinin artması, sınırlı spektrumun verimsiz kullanılmasına yol açmıştır. Bu tez çalışmasında; spektrum algılama yöntemleri kullanılarak, mevcut spektrumun verimli kullanılması sağlanmıştır. Sadece lisanslı kullanıcıya ait olan spektrum bandı, lisanssız kullanıcılara da tahsis edilerek, spektruma daha fazla kullanıcının erişmesi sağlanmıştır. Spektrum algılama yöntemleri, yeni nesil teknolojilere (CDMA, MC-CDMA ve OFDM ) uygulanmıştır.

Bilişsel radyo ağları, ilk olarak CDMA sistemine uygulanmıştır. CDMA yöntemine, enerji algılama yöntemi ile işbirlikçi spektrum algılama yöntemi uygulanmıştır. Doğru algılama olasılığının, yanlış alarm olasılığına göre sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuçlar,



Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da detaylı olarak sunulmuştur. Farklı sinyal gürültü oranlarına göre analizleri yapılmıştır. Enerji algılama yönteminde; SNR değeri 2dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.00000055 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 10dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.0000598 olarak hesaplanmıştır. SNR değeri 15dB alındığında ise,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.07865 olarak bulunmuştur. Son olarak SNR değeri 30dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.1595 olarak hesaplanmıştır. İşbirlikçi spektrum algılama yönteminde ise; Şekil 4.5’de; SNR değeri 2dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.001017 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 10dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.0767 olarak hesaplanmıştır. SNR değeri 15dB alındığında ise,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.218 olarak bulunmuştur. Son olarak SNR değeri 30dB alındığında,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.2869 olarak hesaplanmıştır. SNR değeri 15 dB iken; işbirlikçi spektrum algılama yöntemi, enerji algılama yöntemine göre %63,92 oranında daha iyi sonuç vermiştir. Elde edilen değerlere göre; işbirlikçi spektrum algılama yönteminin, enerji algılama yöntemine göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, NP yaklaşımına göre spektrum algılama performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Doğru algılama olasılığının, çok düşük SNR değerlerinde (genellikle 10 dB ve daha az değerler için) biraz azaldığı görülmektedir. Bunun ana sebebi, gizli BK problemidir. BK, İK’nın konumu nedeniyle sönümleme, bloke etme gibi eylemlere sıkça maruz kalmaktadır. Bu durum, lisanssız kullanıcıların spektrumda yer almasını zorlaştırmıştır. Bu çalışmada, spektrumdaki boş frekans bantlarının tespiti için enerji algılama yöntemi önerilmiş ve yanlış tespit olasılığı azaltılmıştır. Bu yöntemle, özellikle düşük SNR değerine sahip kanallar için bile etkili spektral algılama yapılabilmektedir.

İkinci olarak; BR ağları, MC-CDMA sistemine uygulanmıştır. MC-CDMA yöntemine, enerji algılama yöntemi ile işbirlikçi spektrum algılama yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar; Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de detaylı olarak sunulmuştur. Bu yöntemde, bütün kullanıcıların üzerindeki verilere ulaşılarak; sönümleme, gölgeleme gibi problemlerin önüne geçilmiştir. Tanımlanan performans ölçümlerine göre, farklı sinyal gürültü oranları ve gürültü belirsizlik değerleri için, önerilen yöntemin tespit ve tahmin performansı ölçülmüştür. Önerilen yöntem ile referans olarak alınan sabit eşik değeri Şekil 4.7’de kıyaslanmıştır. Önerilen yöntemde ortamın gürültü durumuna göre eşik değeri

değiştirilmiştir. Böylece lisanslı kullanıcıyı doğru bir şekilde algılamak mümkün olmuştur. Şekil 4.7’de elde edilen sonuçlara göre, önerilen yöntem daha başarılı sonuç vermiştir. Şekil 4.8’de ise enerji algılama yöntemi MC-CDMA yöntemine uygulanmıştır. Şekil 4.9’da ise işbirlikçi spektrum algılama yöntemi MC-CDMA yöntemine uygulanmıştır. Enerji algılama yönteminde,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.08264 olarak ölçülmüştür. İşbirlikçi spektrum algılama yönteminde ise,  $P_f=0.0729$  iken  $P_d$  değeri 0.08914 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 2 dB ve  $P_f=0.0729$  değeri alındığında, CSS yöntemi ED yöntemine göre %7,29 daha iyi sonuç vermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, işbirlikçi spektrum algılama yöntemi daha başarılı olmuştur. MC-CDMA yönteminde çok fazla kullanıcı bulunmaktadır. Bu sebeple; diğer kullanıcılardan bilgi alınabildiği için işbirlikçi spektrum algılama yöntemi daha başarılı bir sonuç vermiştir. Spektrumun, haberleşme parametreleri hakkında önceden bilgi sahibi olmadan algılanabilmesi nedeniyle; yöntem, geniş spektrumlu bantlarda, algılanması beklenen bilişsel radyo kullanıcıları için aday bir çözüm olarak sunulmuştur. Bu tezde, bir ağdaki birçok bilişsel kullanıcının; gölgelendirme, sönümleme ve gürültü belirsizliği gibi etkilerin azaltılması için işbirlikçi algılama yaklaşımıyla daha etkili bir algı oluşturabileceği önerilmiştir. SNR değeri, kullanıcı sayısı gibi kriterler her iki yöntem için de eşit olarak alınmıştır. Sistemi etkileyebilecek her türlü gürültü durumu hesaplanarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Son olarak bilişsel radyo ağları, OFDM yöntemine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar; Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 , Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de detaylı olarak sunulmuştur. Enerji algılama yöntemi ile işbirlikçi spektrum algılama yöntemi OFDM yöntemine uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; işbirlikçi algılama yöntemi daha iyi sonuç vermiştir. İşbirlikçi spektrum algılama yöntemi, CDMA yönteminde,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.2865 olarak ölçülmüştür. MC-CDMA yönteminde ise,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.2994 olarak ölçülmüştür. OFDM yönteminde,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.315 olarak ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre; OFDM yönteminde işbirlikçi spektrum algılama yöntemi, MC-CDMA yöntemine göre %4,95 daha iyi sonuç vermiştir. CDMA yöntemiyle kıyaslandığında bu oran %9 olarak bulunmuştur. Elde edilen verilere göre, OFDM yönteminde işbirlikçi spektrum algılama yöntemi daha iyi

sonuç vermiştir. Bu verilere dayanarak, yapay zekâ tekniği OFDM yöntemine uyarlanmıştır. Bu çalışmada, İK'lar için genetik algoritma ile eksik tespit ve kanal tahsisi olasılığını en aza indirmenin daha iyi olduğu, elde edilen sonuçlardan açıkça görülmektedir. Aynı SNR değerlerinde, elde edilen algılama olasılığını optimize etmek için, işbirlikçi spektrum algılama yöntemi ile genetik algoritma yöntemi birleştirilmiştir. GA yöntemi için,  $P_f=0.7056$  iken  $P_d$  değeri 0.8867 olarak ölçülmüştür. PSO yöntemi için,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.8522 olarak ölçülmüştür. CSS yöntemi için,  $P_f=0.676$  iken  $P_d$  değeri 0.7259 olarak ölçülmüştür. SNR değeri 15 dB ve  $P_f=0.7056$  alındığında, GA yöntemi PSO yöntemine göre %3.89 daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca SNR değeri 15 dB ve  $P_f=0.7056$  alındığında; GA-CSS yöntemi, CSS yöntemine göre %18,13 daha iyi sonuç vermiştir. Elde edilen verilere göre en fazla doğru algılama olasılığı, GA yönteminde elde edilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi; genetik algoritma ile optimizasyon işleminde, tespit olasılığının diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu görülmüştür. Kullanıcı sayısı çok olduğu için spektrumun verimli kullanılmasına katkısı büyük olmuştur. Burada PSO ile bir karşılaştırma yapılmış ve sonuçların PSO'ya göre daha iyi olduğu görülmüştür. Aynı SNR değerleri incelendiğinde, kanal atamasının daha iyi olduğu simülasyon sonuçlarında açıkça görülmüştür. Aynı optimizasyon çalışması, yanlış alarm olasılığı durumunda da görülmüştür. Burada optimizasyon yöntemi sayesinde hatalı tespit olasılığının daha az olduğu anlaşılmıştır. GA ile yapılan optimizasyon sürecinde, iterasyon sayıları da karşılaştırılmıştır. GA ile elde edilen sonuç, PSO'ya göre daha az adımda tamamlanmıştır. Bu sonuç; kanal atama ve lisanslı kullanıcı tespitinin daha hızlı olduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda; lisanslı kullanıcının tespiti için hibrit modeller kullanılabileceği düşünülmektedir. Birden fazla spektrum algılama yönteminin, birbirleriyle entegrasyonu sağlanarak daha hızlı lisanslı kullanıcı tespiti yapılması gerçekleştirilebilir. Bunu yaparken optimizasyon yöntemleri de eklenerek daha iyi sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu sistemlerin; 6G ve 7G gibi ileri düzey teknolojilere de entegre edilmesi muhtemeldir.

## KAYNAKLAR

- [1] akır, A. C. (2016). Çoklu Antenli Bilişsel Radyoda Spektrum Algılama Tekniklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [2] Akyildiz, I.F., Lee, W., Vuran, M.C., Mohanty, S. (2006). Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey. *Computer Networks*, 50(1), 2127–2159.
- [3] Haykin, S. (2005). Cognitive Radio: Brain Empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23 (2), 201–220.
- [4] Akyildiz, I. F., Lee, W.Y., Vuran, M. C. ve Mohanty, S. (2008). A Survey On Spectrum Management in Cognitive Radio Networks. *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, 40–48.
- [5] FCC (Federal Communications Commission). (2005). Notice of Proposed Rule Making and Order: Facilitating Opportunities For Flexible, Efficient, And Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies. *ET Docket*, No. 03-108.
- [6] Haykin, S. (2005). Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, 201–220.
- [7] Srinivasa, S., Jafar, S.A. (2007). The Throughput Potential of Cognitive Radio: A Theoretical Perspective. *IEEE Communication Magazine*, 45(5):73-79.

- [8] Goldsmith, A., Jafar, S.A., Maric, I., Srinivasa, S. (2009). Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective. *Proceedings of the IEEE*, 97(5): 894-914.
- [9] Hossain, E., Niyato D. ve Han Z. (2009). Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks. Cambridge University Press.
- [10] Matinmikko, M., Mustonen, M., Sarvanko, H., Hoyhtya, M., Hekkala, A., Mammela, A., Katz, M. ve Kiviranta, M. (2008). A Motivating Overview Of Cognitive Radio: Foundations, Regulatory Issues And Key Concepts. *Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management (CogART 2008)*, 1-5.
- [11] Tuna, E., Karagöz, M. (2012). Gelecek Nesil Ağlar İçin Spektrum Tahsisinde Yeni Bir Yaklaşım: Bilişsel Radyo. *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.4, No.1.
- [12] Saha, A., Hoven, N., Tandra, R. (2004). Some Fundamental Limits In Cognitive Radio. Allerton Conf. on Commun., *Control and Computing*.
- [13] Cabric, D., Mishra, S., Brodersen R. (2004). Implementation Issues In Spectrum Sensing For Cognitive Radio. *Asilomar conference on signals, systems and computers*, vol. 1, p. 772–6.
- [14] Khalid, L., Anpalagan, A. (2010). Emerging Cognitive Radio Technology: Principles, Challenges And Opportunities. *Computer and Electrical Engineering*, 36(1), 358-366.
- [15] Ghasemi, A., Sousa, E. (2005). Collaborative Spectrum Sensing For Opportunistic Access In Fading Environment. *IEEE international symposium on new frontiers in dynamic spectrum access Networks*, p. 131–6.
- [16] Arslan, H. (2007). Cognitive Radio, Software Defined Radio, And Adaptive Wireless Systems. Netherlands, Springer.
- [17] Tang, H. (2005). Some Physical Layer Issues Of Wideband Cognitive Radio Systems. *IEEE international symposium on new frontiers in dynamic spectrum access Networks*, p. 151–9.

- [18] Ganesan, G., Li, Y. (2005). Cooperative Spectrum Sensing In Cognitive Radio Networks. *IEEE international symposium on new frontiers in dynamic spectrum access Networks*, p. 137– 43.
- [19] Federal Communications Commission (FCC). (2002). Spectrum Policy Task Force. *ET Docket*, no. 02-135.
- [20] Wang, C., Liu, N. (2020). Research on Software Defined Spectrum Sharing Cognitive Multi-Beam Satellite Communication System. 2019 *IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*, Shenyang, China, 22-24 Kasım.
- [21] Jahja, B. (2015). Bilişsel Radyo Ağlarında Spektrum Paylaşma. Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [22] John, T., Donald, R. (2007). Interference Temperature Limits of IEEE 802.11 Protocol Radio Channels. *IEEE International Conference On Electro/Information Technology, Chicago, USA, 17–20 Mayıs*.
- [23] Wu, Z., Natarajan, B. (2007). Interference Tolerant Agile Cognitive Radio: Maximize Channel Capacity Of Cognitive Radio. *4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, USA, 11-13 Ocak.
- [24] Kim, H. and Shin, K. G. (2008). Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC Layer Sensing in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, no. 5, pp. 533-545.
- [25] Wang, L. C. and Wang, C. W. (2008). Spectrum Handoff for Cognitive Radio Networks: Reactive Sensing or Proactive Sensing. Conference Proceedings, *IEEE International Performance, Computing and Communications Conference*, Austin, Texas, pp. 343 – 348.
- [26] Lee, D. J. and Jang, M. S. (2009). Optimal Spectrum Sensing Time considering Spectrum Handoff due to False Alarm in Cognitive Radio Networks. *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 2, pp. 899-901.

- [27] Han, H., Wu, Q. and Yin, H. (2010). Spectrum Sensing for Real Time Spectrum Handoff in CRNs. Conference Proceedings, *IEEE International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, Chengdu, pp. V1-480 – V1-484.
- [28] Yoon, S. U. and Ekici, E. (2010). Voluntary Spectrum Handoff: A Novel Approach to Spectrum Management in Cognitive Radio Networks. Conference Proceedings, *IEEE International Conference on Communications*, Cape Town, pp. 1 – 5.
- [29] Kannappa, S. M. and Saquib, M. (2010). Performance Analysis of A Cognitive Network with Dynamic Spectrum Assignment to Secondary Users. Conference Proceedings, *IEEE Conference on Communications*, Cape Town, pp. 1 – 5.
- [30] Kaur, P., Udin, M. and Khosla, A. (2011). An Efficient Spectrum Mobility Management Strategy in Cognitive Radio Networks. Conference Proceedings, *IEEE UK-India International Workshop on Cognitive Wireless Systems*, New Delhi, pp. 1 – 6.
- [31] Lertsinsruttavee, A., Malouch, N. and Fdida, S. (2011). Spectrum Handoff Strategy using Cumulative Probability in Cognitive Radio Networks. Conference Proceedings, *IEEE International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*, Budapest, pp. 1 – 7.
- [32] Liu, F., Xu, Y., Guo, X., Zhang, W., Zhang, D. and Li, C. (2012). A Spectrum Handoff Strategy based on Channel Reservation for Cognitive Radio Networks. Conference Proceedings, *IEEE International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, Zhangjiajie, pp. 179 – 182.
- [33] Lertsinsruttavee, A., Malouch, N. and Fdida, S. (2012). Controlling Spectrum Handoff with A Delay Requirement in Cognitive Radio Networks. Conference Proceedings, *IEEE International Conference on Computer Communications and Networks*, Munich, pp. 1 – 8.
- [34] Wang, L. C., Wang C. W. and Chang, C. J. (2012). Modeling and Analysis for Spectrum Handoffs in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 9, pp. 1499-1513.

- [35] Zahed, S., Awan, I. and Cullen, A. (2013). Analytical Modeling for Spectrum Handoff Decision in Cognitive Radio Networks. *Simulation Modelling Practice And Theory Journal*, vol. 38, pp. 98-114.
- [36] Potdar, S. M. and Patil, K. P. (2013). Efficient Spectrum Handoff in CR Network based on Mobility, QoS and Priority using Fuzzy Logic and Neural Networks. Conference Proceedings, *IEEE International Conference on Contemporary Computing*, Noida, pp. 53 – 58.
- [37] Konishi, Y., Masuyama, H., Kasahara, S. and Takahashi, Y. (2013). Performance Analysis of Dynamic Spectrum Handoff Scheme with Variable Bandwidth Demand of Secondary Users for Cognitive Radio Networks. *Wireless Networks Journal*, vol. 19, no. 5, pp. 607- 617.
- [38] Pham, C., Tran, N. H., Do, C. T., Moon, S. and Hong, C. S. (2014). Spectrum Handoff Model based on Hidden Markov Model in Cognitive Radio Networks. Conference Proceedings, *IEEE International Conference on Information Networking*, pp. 406 – 411.
- [39] Hasegawa, M., Hirai, H., Nagano, K., Harada, H., Aihara K. (2014). Optimization for Centralized and Decentralized Cognitive Radio Networks. *Proceedings of the IEEE*, Volume: 102, Issue: 4.
- [40] Ashish M., Prajwal V., Ajay, S.G., Prakash, D.A., Mohandeep A., Kirthiga, S. (2015). An Adaptive Threshold Method For Energy Based Spectrum Sensing In Cognitive Radio Networks. *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, Kumaracoil, India, 18-19 Aralık.
- [41] Pandya, P., Durvesh, A., Parekh N. (2015). Energy Detection Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio Network. *2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, Gwalior, India, 4-6 Nisan.



- [42] Ivanenko, S., Bezruk V. (2016). Methods Of Detecting Of Unknown Signals In Cognitive Radio Networks. *2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 4-6 Ekim.
- [43] Shinde, S.C., Jadhav, A. N. (2016). Centralized Cooperative Spectrum Sensing With Energy Detecion In Cognitive Radio And Optimization. *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, Bangalore, India, 20-21 Mayıs.
- [44] El-Toukhey, A.T., Ammar, A.A., Tantawy, M. M., Tarrad I. F. (2017). Performance Analysis Of Different Opportunistic Access Based On Secondary Users Priority Using Licensed Channels In Cognitive Radio Networks. *2017 34th National Radio Science Conference (NRSC)*, Alexandria, 13-16 Mart.
- [45] Avila, J., Rudra, S., Reddy, K. M. (2017). Enhanced Adaptive Threshold For Cognitive Radio. *2017 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, Coimbatore, India, 5 -7 Ocak.
- [46] Satria, M.B., Mustika, I. W., Widyanawan (2008). Resource Allocation in Cognitive Radio Networks Based on Modified Ant Colony Optimization. *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, Yogyakarta, Indonesia, 7- 8 Ağustos.
- [47] Das, A., Das, N. (2019). Cooperative Cognitive Radio for Wireless Opportunistic Networks. *2019 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*, Bengaluru, India, 7-11 Haziran.
- [48] Papadopoulos, A., Chatzidiamantis, N. D., Georgiadis, L. (2020). Network Coding Techniques for Primary-Secondary User Cooperation in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Volume: 19, Issue: 6, p. 4195 – 4208.

- [49] Salama, G. M., Taha, S. A. (2020). Cooperative Spectrum Sensing and Hard Decision Rules for Cognitive Radio Network. *2020 3rd International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, Riyadh, Saudi Arabia, 19-21 Mart.
- [50] Chavan, A. S., Junnarkar, A. (2020). Dynamic Spectrum Sensing Method For Mobile Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *2020 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, Pune, India, 6-8 Mart.
- [51] Dinh-Thuan, D., Anh-Tu, L., Byung, M. L. (2020). NOMA in Cooperative Underlay Cognitive Radio Networks Under Imperfect SIC. *IEEE Access*, Volume: 8, 6 Mart.
- [52] Babu, V. S., Deepan, N., Rebekka, B. (2020). Performance Analysis of Cooperative Full Duplex NOMA system in Cognitive Radio Networks. *2020 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, India, 4-6 Agustus.
- [53] Haitham, K., Iftekhar, A., Daryoush, H., Quoc, V, P. (2020). A Secure and Energy-Aware Approach For Cognitive Radio Communications. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Volume: 1, p 900-915.
- [54] Gaurav, V., Sonal, S., Sudakar, S. C. (2020). Analysis of Time-Bandwidth Product in Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Network. *2020 International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE)*, Las Vegas, NV, USA, 22-24 Haziran.
- [55] Kandaurova, E. O., Chirov, D.S. (2020). Algorithm and Software for Intelligent Analysis of the Frequency Spectrum for Cognitive Radio Systems. *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Svetlogorsk, Russia, 1-3 Temmuz

- [56] Ngoc, P. T. D., Khuong H. V., Thiem D. D., Son V. Q., Son P. N. (2021). Security for Jamming-Aided Energy Harvesting Cognitive Radio Networks. *2021 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*. Ho Chi Minh, Vietnam, 15-16 Nisan.
- [57] Todor, D. T., Ilia G. I. (2021). Channel Activity Analysis of Cognitive Radio with PCA Preprocessing and Different Clustering Methods. *2021 29th National Conference with International Participation (TELECOM)*. Sofia, Bulgaria, 28-29 Kasım.
- [58] Kandaurova, E. O., Chirov, D. S. (2021). Intelligent Algorithms for Dynamic Spectrum Access a Secondary User in Cognitive Radio Systems. *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. Kaliningrad, Russia, 30 Haziran – 2 Temmuz.
- [59] Huan, X., Ruiquan L., Jun W., Min Z., Changchun C. (2021). Power Allocation of Energy Harvesting Cognitive Radio Based on Deep Reinforcement Learning. *2021 5th International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS)*. Chongqing, China, 15-17 Ekim.
- [60] Tlouyamma, J., Velempini, M. (2021). Investigative analysis of channel selection algorithms in cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *SAIEE Africa Research Journal*, Volume: 112, Issue: 1, p 4-14.
- [61] Haiyong, Z., Xu, Z., Yufei J., Zhongxiang, W., Lizhen, C. (2022). Hierarchical Symbiotic Transmission Strategy With Cooperative-NOMA for Cognitive Radio Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, Volume: 11, Issue: 3, p. 558 – 562.
- [62] Min, L., Bin, Z., Zhiyong B., Yu Z. (2022). A Learning Approach Towards Power Control in Full-Duplex Underlay Cognitive Radio Networks. *2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Austin, TX, USA, 10-13 Nisan.
- [63] Maram, H., Mohamed. S. H., Mahmoud, H. I. (2022). Spectrum Allocation Techniques for Cognitive Radio Networks. *IEEE Access*, Volume: 10. p. 28180 – 28193.

- [64] Mohammed, A. H., Mohammed, H. (2022). Cognitive Radio-Based Directional Comparison Blocking Relaying Scheme. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Volume: 58, Issue: 2, p. 1879 – 1887.
- [65] Arzykulov, S., Nauryzbayev, G., Tsiftsis, T. A., Maham, B. (2019). Performance Analysis of Underlay Cognitive Radio Nonorthogonal Multiple Access Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Volume: 68, Issue: 9, p. 9318 - 9322.
- [66] Farzamnia, A., Mariappan, M., Thangasalvam, R., MOUNG, E. G. (2018). Comparison of Bit Error Rate Performance for CDMA Systems in Different Fading and AWGN Channels. *2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET)*, Kota Kinabalu, Malaysia, 8 Kasim.
- [67] Tanskanen, J. M. A., Huang, A., Hartimo, I. O. (1998). Predictive power estimators in CDMA closed loop power control. *Proc. of 48th IEEE Vehicular Technology Conference*, Ontario, Canada, p. 1091–1095.
- [68] Wang, J., Lu, Z., Li, Y. (2016). A New CDMA Encoding/Decoding Method for on-Chip Communication Network. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, Volume: 24, Issue: 4, p. 1607-1611.
- [69] Tasneem, A., Majumder, S. P. (2016). BER performance analysis of a MC-DS-CDMA wireless communication system with rake receiver employing MRC under Nakagami — m fading”, *2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, Dhaka, Bangladesh, 22-24 Ekim.
- [70] Chang, P. R., Wang B. C. (1996). Adaptive fuzzy proportional integral power control for a cellular CDMA system with time delay. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, No.9, pp. 1818-1829.
- [71] Lau, F.C.M, Tam, W.M. (2001). Predictive closed-loop power control in CDMA mobile systems. *Electronics Letters*, vol.37, no:1, 52-54.

- [72] Sarkar, Ma., Sikder, S., Ghosh, S. (2018). Development of Architecture for Secured Data Transmission in OCDMA System with Designed Modified Walsh Code. *2018 Fifteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, Kolkata, India, 2-4 Şubat.
- [73] Ardalani, N., Khoogar, A., Roohi, H. (2005). A Comparison of Adaline and MLP Neural Networkbased Predictors in SIR Estimation in Mobile DS/CDMA Systems. *World Academy Of Science, Engineering And Technology*, Volume 9, pp 145-150.
- [74] Mahmud, Md. H., Hossain, MD. M., Khan, A. A., Ahmed, S., Mahmud, M. A., Islam, Md. H. (2020). Performance Analysis of OFDM, W-OFDM and F-OFDM Under Rayleigh Fading Channel for 5G Wireless Communication. *3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, Thoothukudi, India, 3-5 Aralık.
- [75] Prasad, R. (2004). OFDM for Wireless Communications Systems. *Artech House*, London.
- [76] Cho, Y., Kim, J., Yang, W., Kang, C., (2010). MIMO-Ofdm Wireless Communications. *Wiley and Sons*, p. 111-250.
- [77] Panda, M., Mishra, S. (2017). Performance analysis of concomitant synchronization algorithms for OFDM and non-contiguous OFDM systems. *2017 2nd International Conference on Man and Machine Interfacing (MAMI)*, Bhubaneswar, India, 21-23 Aralık.
- [78] Agrawal, M., Raut, Y. (2012). Evaluating the Impact of Guard Period on the Performance of MIMO-OFDM System. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 1(4), 2105-2110.
- [79] Sakib, Md. S., Ferdous, Md. R. (2018). Performance evaluation of MC-CDMA system for the next generation wireless networks. *2018 International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET)*, Dhaka, Bangladesh, 27-28 Aralık.

- [80] Fuwa, Y., Okamoto, E., Iwanami, Y. (2009). Resource Allocation Scheme with Proportional Fairness for Multi-user Downlink MIMO-OFDMA-CDM Systems, *IEEE International Symposium on Communications and Information Technology*, p. 588-593.
- [81] Tulino, A.M., Li, L., Verdu, S. (2005). Spectral Efficiency of Multicarrier CDMA, *IEEE Transactions on Information Theory*. 51(2), 479-505.
- [82] Hara, S., Prasad, R. (1997). Overview of multicarrier CDMA, *IEEE Communications Magazine*, 35(12), 126-133.
- [83] Wang, X., Mao, Z. (2005). Multiuser Detection for MC-CDMA Systems Using an RQP Approach. *IEICE Transactions Communications*, E88-B(11), 4394-4397.
- [84] Kase, Y., Tanaka, M., Seki, T. (2017). Study on characteristics of MC-CDMA communication system. *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, 6-8 Ekim.
- [85] Saçaklı, B. (2015). Çok Taşıyıcılı Kod Bölmeli Çoklu Erişim (MC-CDMA) Sistemlerinde Alt Taşıyıcı Tahsisi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Kırıkkale.
- [86] Alom, Md. Z., Godder, T. K., Morshed, M. N., Maali, A. (2017). Enhanced spectrum sensing based on Energy detection in cognitive radio network using adaptive Threshold. *2017 International Conference on Networking, Systems and Security (NSysS)*, Dhaka, Bangladesh, 5-8 Ocak.
- [87] Eslami, A., Karamzadeh, S. (2016). Memory based energy detection spectrum sensing method in cognitive radio driven hospitals. *2016 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, Riga, Latvia, 3-4 Kasım.
- [88] Alhamad, R., Wang, H. and Yao, Y. (2017). Cooperative Spectrum Sensing With Random Access Reporting Channels in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, no. 8.

- [89] Sharma, G., Sharma, R. (2017). Distributed Cooperative Spectrum Sensing over different Fading Channels in Cognitive Radio. *2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix)*, Jaipur, India, 1-2 Temmuz.
- [90] Işık, Y., Taşpınar, N. (2017). Multiuser detection with neural network and PIC in CDMA systems for AWGN and Rayleigh fading asynchronous channels. *Wireless Personal Communications*, 4-43, p. 1185-1194.
- [91] Seyman, M.N., Saçaklı, B. (2016). A Novel Subcarrier Allocation Algorithm for MC-CDMA Systems. *Journal of Electrical Engineering*, vol.67, No.5, p. 371-376.
- [92] Seyman, M.N. (2017). Adaptive arrangement of cyclic prefix length for MC-CDMA systems via multi-objective bat algorithm. *Neural Computing and Applications*, p. 1-8.
- [93] Henrique, C., Tavares, A. and Abrão, T. (2017). Bayesian estimators for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks. *In Proc. of the URUCON*, Montevideo Uruguay, 23-25 Ekim.
- [94] Batra, A., Balakrishnan, J., Aiello, G.R., Foerster, J.R., Dabak, A. (2004). Design of a Multiband OFDM System for Realistic UWB Channel Environments. *IEEE Trans.Microwave Theory Tech.*, vol. 52, no. 9, pp. 2123–38.
- [95] Yezid, D., Ramón, F. (2016). Multi-Objective Optimization in Computer Networks Using Metaheuristics. New York, Auerbach Publications.
- [96] Gnanaprasanambikai, L., Munusamy, N. (2017). Survey of genetic algorithm effectiveness in intrusion detection. *2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2)*, Coimbatore, India, 23-24 Temmuz.
- [97] Rharrasa, A. E., Saberab, M., Chehric, A., Saadanea, R., Hakemd, N., Jeone, G. (2020). Optimization of Spectrum Utilization Parameters in Cognitive Radio Using Genetic Algorithm. *Procedia Computer Science*, Volume 176, p. 2466-2475.

- [98] Yang, Y., Zhang, Q., Wang, Y., Emoto, T., Akutagawa, M., Konaka, S. (2019). Adaptive resources allocation algorithm based on modified PSO for cognitive radio system. *China Communications*, Volume: 16, Issue: 5, p. 83 - 92.
- [99] Gul, N., Khan, M. S., Kim, J., Kim, S. M. (2020). Robust Spectrum Sensing via Double-Sided Neighbor Distance Based on Genetic Algorithm in Cognitive Radio Network. *Personal Communication Technologies for Smart Spaces*, Volume 2020, p. 10-20.
- [100] Eberhart, R. C., Kennedy, J. (1995). A New Optimizer Using Particle Swarm Theory. *In Symposium on Micro Machine and Human Science*. Nagoya, Piscataway, Japan, 4-6 Kasim.
- [101] Stender, Matthew, Yanjun Y., Karayaka, H. B., Peter T., Robert A. (2017). Simulating Micro-Robots to Find a Point of Interest under Noise and with Limited Communication Using Particle Swarm Optimization. *SoutheastCon 2017*, Concord, NC, USA, 30 Mart.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Rüstem YILMAZEL

Doğum Tarihi

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu :

Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği  
2009

Yüksek Lisans : Bülent Ecevit Üniversitesi Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği 2014

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

Vodafone Mühendis 2011 Ocak-2011 Eylül

UDEC Mühendis 2011-2012

Bülent Ecevit Üniversitesi Araştırma Görevlisi 2012-2015

Kırıkkale Üniversitesi Öğretim Görevlisi 2015-Halen

Yayımları (SCI) :

İ. Alışkan, R. Yilmazel (2016), Pure fuzzy Hall effect sensors for permanent magnet synchronous motor , Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 24 (5), 3597-3608

R. Yilmazel, N. İnanç (2021) A Novel Approach for Channel Allocation In OFDM Based Cognitive Radio Technology, Wireless Personal Communications, 1-15

Yayımları (Diğer) :

- R. Yilmazel, N. İnanç (2020). Channel Optimization By Using Spectrum Sensing Techniques In Cognitive Radio Network, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi 12 (2), 693-699
- R. Yilmazel, M.N. Seyman, T. Eyüp (2018). Energy Detection Approach for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi 10 (2), 1-9
- I. Aliskan, R. Yilmazel (2014). Impact of Controller on Current Harmonics of Power Line. The Global Electrical Engineers, 2014, 1, 13-20
- R. Yilmazel, İ. Alışkan (2014). Fuzzy Algorithm Based Speed Control for PMSM at Power Electronic Area. 2014 International Conference on Mechanism Science and Control Engineering (MSCE 2014)ISBN: 978-1-60595-183-6
- R. Yilmazel, M.N. Seyman (2018). Cooperative spectrum sensing method for MC-CDMA systems in cognitive radio networks, 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)