



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

**BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME
YÖNTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

MUHAMMED ENES BAYRAKDAR

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ALİ ÇALHAN**

DÜZCE, 2017

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME
YÖNTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Muhammed Enes BAYRAKDAR tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Ali ÇALHAN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Ali ÇALHAN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Celal ÇEKEN

Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Resul KARA

Düzce Üniversitesi

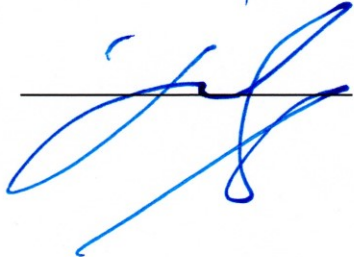
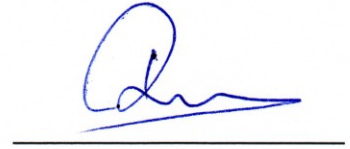
Doç. Dr. Halil YİĞİT

Kocaeli Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Fatih KAYAALP

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 24 / 07 / 2017



BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

24 Temmuz 2017



Muhammed Enes BAYRAKDAR



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımından dolayı değerli Hocam Yrd. Doç. Dr. Ali ÇALHAN'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemeyerek çalışmalarına çok değerli katkılar sağlayan değerli tez jürisi Hocalarım Doç. Dr. Resul KARA'ya ve Prof. Dr. Celal ÇEKEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimden itibaren bütün çalışmalarımda beni motive eden ve desteğini hiç esirgemeyen çok değerli eşim Sümeyye BAYRAKDAR'a ve varlığıyla hayatımıza neşe katan çok değerli kızım Asel BAYRAKDAR'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde sonsuz emeği olan ve maddi-manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, BİDEB 2228-B Son Sınıf Yüksek Lisans Öğrencileri için Doktora Burs Programı kapsamında sağlamış olduğu maddi destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi 2015.07.02.329 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

24 Temmuz 2017

Muhammed Enes BAYRAKDAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ	VII
ÇİZELGE LİSTESİ	IX
KISALTMALAR.....	X
SİMGELER	XIII
ÖZET	XV
ABSTRACT	XVI
EXTENDED ABSTRACT	XVII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. AMAÇ VE KAPSAM	1
1.2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARININ TEMELLERİ	17
2.1. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI.....	17
2.1.1. IEEE 802.22 Kablosuz Bölgesel Alan Ağları.....	20
2.1.2. IEEE 802.11af Standardı	21
2.2. SPEKTRUM YÖNETİMİ.....	23
2.3. ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLLERİ	26
2.3.1. Çekişme Tabanlı Protokoller	28
2.3.2. Çekişmesiz Protokoller	33
2.4. SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İŞLEMİ	36
2.4.1. Sezme Tabanlı Spektrum El Değiştirme.....	39
2.4.2. Önceden Tanımlı Spektrum El Değiştirme	40
2.5. YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ	40
2.6. KUYRUKTA ÖNCELİK SINIFLARI.....	43
3. SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İŞLEMİNİN ANALİTİK MODELİ	47
3.1. ORTAM ERİŞİM TEKNİKLERİNİN ANALİZİ	47
3.1.1. TDMA Tekniğinin Performans Değerlendirmesi	48
3.1.2. Slotted Aloha Tekniğinin Performans Değerlendirmesi	51

3.2. SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İŞLEMİNDE ÖNCELİK SINIFLARI	52
3.2.1. Öncelik Sınıfları	52
3.2.2. Düşük Öncelikli Paketler için Bekleme Zamanı İyileştirmesi	55
3.2.3. Kanal Birleştirme.....	56
3.3. YAPAY ZEKA TABANLI SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İŞLEMİ	57
3.3.1. Bulanık Mantık Tabanlı Spektrum El Değiştirme	57
3.3.2. Yapay Sinir Ağları Tabanlı Spektrum El Değiştirme	60
3.3.3. Yapay Arı Kolonisi Tabanlı Spektrum El Değiştirme	61
4. BENZETİM MODELİ VE GRAFİKSEL SONUÇLAR.....	65
4.1. BENZETİM MODELİNİN TASARIMI	65
4.1.1. Sezme Tabanlı Yaklaşım	65
4.1.2. Öncelik Tabanlı Yaklaşım	66
4.1.3. Kanal Birleştirme Tabanlı Yaklaşım	68
4.1.4. Yapay Zeka Tabanlı Yaklaşım	70
4.2. PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ	73
4.3. BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ.....	74
4.3.1. Sezme Tabanlı Yaklaşım	74
4.3.2. Öncelik Tabanlı Yaklaşım	75
4.3.3. Kanal Birleştirme Tabanlı Yaklaşım	81
4.3.4. Yapay Zeka Tabanlı Yaklaşım	87
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
6. KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Bilişsel radyo sisteminin aşamaları.	17
Şekil 2.2. Kablosuz bilişsel radyo ağ ortamı.	19
Şekil 2.3. Bilişsel radyo ağ yapısı.	20
Şekil 2.4. IEEE 802.11af ağ ortamı.	22
Şekil 2.5. Bilişsel radyo ağlarında spektrum yönetimi.	24
Şekil 2.6. Ortam erişim kontrol protokollerinin sınıflandırılması.	26
Şekil 2.7. HRMA protokolünün zaman dilimi ve çerçeve yapısı.	32
Şekil 2.8. Bilişsel radyo ortamında spektrum el değiştirme işlemi.	37
Şekil 2.9. Spektrum el değiştirme yaklaşımları.	38
Şekil 2.10. Bulanık mantık örnek blok diyagramı.	41
Şekil 3.1. TDMA zaman dilimi yapısı.	49
Şekil 3.2. Aloha ve slotted Aloha teknikleri.	51
Şekil 3.3. Önerilen kuyruk modelinin blok diyagramı.	53
Şekil 3.4. Birincil ağın çerçeve yapısı.	53
Şekil 3.5. İkincil ağın çerçeve yapısı.	54
Şekil 3.6. İkincil ağın kuyruk yapısı.	54
Şekil 3.7. Düşük öncelikli ikincil kullanıcılar için yaşlandırma çözümü.	55
Şekil 3.8. Kanal birleştirme mekanizması.	56
Şekil 3.9. Birincil kullanıcı ortam kullanım olasılığı üyelik fonksiyonları.	58
Şekil 3.10. İkincil kullanıcıların veri oranını gösteren üyelik fonksiyonları.	58
Şekil 3.11. İkincil kullanıcı SNR değerlerini gösteren üyelik fonksiyonları.	59
Şekil 3.12. Sistemde kullanılan yapay sinir ağı yapısı.	60
Şekil 3.13. Yapay arı kolonisi.	62
Şekil 3.14. Kablosuz bilişsel radyo ağı.	62
Şekil 4.1. Riverbed yazılımında ikincil baz istasyonunun işlem seviyesi modeli.	67
Şekil 4.2. Riverbed yazılımında ikincil kullanıcının işlem modeli.	67
Şekil 4.3. İkincil baz istasyonunun işlem modeli.	69
Şekil 4.4. İkincil kullanıcının işlem modeli.	70
Şekil 4.5. Önceden tanımlı yaklaşım için toplam el değiştirme süreleri.	74
Şekil 4.6. $\mu=0.4$ olduğunda önerilen yöntemlerin karşılaştırılması.	75
Şekil 4.7. Önceden tanımlı el değiştirmede kümülatif el değiştirme gecikmesi.	76
Şekil 4.8. Kümülatif el değiştirme gecikme sonuçlarının karşılaştırılması.	76
Şekil 4.9. Öncelik sınıflarına göre kümülatif el değiştirme gecikme sonuçları.	77
Şekil 4.10. Düşük birincil kullanıcı yüklerine göre engel olma olasılığı sonuçları.	77
Şekil 4.11. Yüksek birincil kullanıcı yüklerine göre engel olma olasılığı sonuçları.	78
Şekil 4.12. Düşük birincil kullanıcı yükleri için zorunlu bitirme olasılığı.	79
Şekil 4.13. Yüksek birincil kullanıcı yükleri için zorunlu bitirme olasılığı.	79
Şekil 4.14. Kümülatif el değiştirme sayısı sonuçları.	80
Şekil 4.15. Acil veri paketleri için kümülatif el değiştirme gecikmesi sonuçları.	81
Şekil 4.16. Gerçek zamanlı veri paketleri için el değiştirme gecikmesi sonuçları.	82
Şekil 4.17. Gerçek zamanlı olmayan veri paketleri için el değiştirme gecikmesi.	82
Şekil 4.18. Gerçek zamanlı paketler için engel olma olasılığı sonuçları.	83
Şekil 4.19. Gerçek zamanlı olmayan paketlerin $G_p=0.45$ için engel olma olasılığı.	84
Şekil 4.20. Gerçek zamanlı paketler için zorunlu bitirme olasılığı sonuçları.	85
Şekil 4.21. Acil paketler için $G_p=0.45$ olduğunda zorunlu bitirme olasılığı.	85

Şekil 4.22. İkincil ağın iş çıkarma oranı.	86
Şekil 4.23. Birincil kullanıcı ortam kullanım yoğunluğuna göre olasılıklar.	87
Şekil 4.24. Birincil kullanıcı ortam kullanım yoğunluğuna göre olasılık değerleri.	88
Şekil 4.25. İkincil kullanıcı veri oranlarına göre olasılık değerleri.	88
Şekil 4.26. İkincil kullanıcı veri oranlarına göre el değiştirme olasılıkları.	89
Şekil 4.27. Ortamdaki gürültü etkisine göre spektrum el değiştirme olasılıkları.	89
Şekil 4.28. Ortamdaki gürültü etkisine göre spektrum el değiştirme olasılıkları.	90
Şekil 4.29. Sistemin hata oranları.	90
Şekil 4.30. Giriş ve çıkış parametreleri.....	91
Şekil 4.31. Uygun kanal seçme olasılığı.	91



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. IEEE 802.11af protokolündeki cihazlar.	23
Çizelge 2.2. Kendall notasyonu.	43
Çizelge 2.3. Dağılım türleri.	43
Çizelge 3.1. Kural tablosundan örnekler.	58
Çizelge 3.2. Eğitim setinden örnekler.	61
Çizelge 4.1. Benzetim parametreleri.	66
Çizelge 4.2. Kanal birleştirme tabanlı yaklaşımda benzetim parametreleri.	68
Çizelge 4.3. Ses trafiği için örnek giriş ve çıkış değerleri.	70
Çizelge 4.4. Video trafiği için örnek giriş ve çıkış değerleri.	71
Çizelge 4.5. Yapay arı kolonisi ve kablosuz bilişsel radyo ağı.	72
Çizelge 4.6. Spektrum el değiştirme işlemi için kullanılan başarımlar parametreleri.	73
Çizelge 4.7. Benzetim modeli sonuçlarından örnekler.	87

KISALTMALAR

ABC	Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony)
ACK	Alındığını Bildirme (Acknowledgement)
AP	Erişim Noktası (Access Point)
BB	Siyah Patlama (Black Burst)
BTMA	Meşgul Mesajı Çoklu Erişim (Busy Tone Multiple Access)
CBR	Sabit Bit Hızı (Constant Bit Rate)
CDMA	Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access)
CPE	Müşteri Öncül Ekipman (Customer Premises Equipment)
CPM	Kanal Güç Yönetimi (Channel Power Management)
CSMA	Taşıyıcı Sezme Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access)
CSMA / CA	Taşıyıcı Sezme Çoklu Erişim / Çarpışma Kaçınma (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)
CTS	Ortam Temiz Mesajı (Clear To Send)
CVS	Bağlantı Doğrulama Sinyali (Contact Verification Signal)
D-ACK	Veri ACK (Data ACK)
D-PKT	Veri Paketi (Data Packet)
DBTMA	Çoklu Meşgul Mesajı-Çoklu Erişim (Dual Busy Tone-Multiple Access)
DCA	Dinamik Kanal Atama (Dynamic Channel Assignment)
DCA-PC	Dinamik Kanal Atama-Güç Kontrol (Dynamic Channel Assignment-Power Control)
DCF	Dağıtık Koordinasyon Fonksiyonu (Distributed Coordination Function)
DCF-PC	DCF Öncelik Sınıfları ile (DCF with Priority Classes)
DFS	Dağıtık Adil Çizelgeleme (Distributed Fair Scheduling)
DIFS	Dağıtık IFS (Distributed IFS)
DPSM	Dinamik Güç Koruma Mekanizması (Dynamic Power Saving Mechanism)
DS	Dağıtık Spektrum (Distributed Spectrum)
DSE	Dinamik İstasyon Yetkilendirmesi (Dynamic Station Enablement)
DSSS	Direkt Sıralı Geniş Spektrum (Direct Sequence Spread Spectrum)
EDCF	Geliştirilmiş DCF (Enhanced DCF)
FCFS	İlk Gelen İlk Hizmet Alır (First Come First Served)
FCC	Federal Haberleşme Komisyonu (Federal Communications Commission)
FDMA	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)
FHSS	Frekans Atlamalı Geniş Spektrum (Frequency Hopping Spread Spectrum)
FIFO	İlk Giren İlk Çıkar (First In First Out)
G/G/1	Genel / Genel / Bir (General / General / One)
G/M/1	Genel / Markov / Bir (General / Markovian / One)
GAMA-PS	Grup Tahsis Çoklu Erişim-Paket Sezme ile (Group Allocation Multiple Access-with Packet Sensing)
GDB	Coğrafi Konum Veritabanı (Geolocation Database)
GSM	Mobil Haberleşme için Evrensel Sistem (Global System for Mobile Communications)
HCF	Hibrid Koordinasyon Fonksiyonu (Hybrid Coordination Function)

HRMA	Atlama - Rezervasyon Çoklu Erişim (Hop Reservation Multiple Access)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IFS	Çerçevelerarası Boşluk (Interframe Space)
ISM	Endüstriyel Bilimsel Tıbbi (Industrial Scientific Medical)
M/D/1	Markov / Deterministik / Bir (Markovian / Deterministic / One)
M/G/1	Markov / Genel / Bir (Markovian / General / One)
M/M/1	Markov / Markov / Bir (Markovian / Markovian / One)
M/M/2	Markov / Markov / İki (Markovian / Markovian / Two)
M/M/C	Markov / Markov / Çoklu (Markovian / Markovian / Multiple)
MAC	Ortam Erişim Kontrolü (Media Access Control)
MACA	Çoklu Erişim Çarpışmadan Kaçınma (Multiple Access Collision Avoidance)
MACA-BI	Çoklu Erişim Çarpışmadan Kaçınma-Davet ile (Multiple Access Collision Avoidance-By Invitation)
MACA-PR	Çoklu Erişim Çarpışma Kaçınma-Rezervasyon ile (Multiple Access Collision Avoidance-Piggy backed Reservation)
MACAW	Çoklu Erişim Çarpışmadan Kaçınma Kablosuz (Multiple Access Collision Avoidance Wireless)
MMAC	Çoklu Kanal Ortam Erişim Kontrol (Multi Channel Media Access Control)
NAV	Ağ Tahsis Vektörü (Network Allocation Vector)
OSAB	Destek Kanalları ile Fırsatçı Spektrum Erişimi (Opportunistic Spectrum Access with Backup Channels)
PAMAS	Enerji Tabanlı Çoklu Erişim Kontrol - Sinyal ile (Power Aware Multi Access Control – with Signalling)
PCF	Nokta Koordinasyon Fonksiyonu (Point Coordination Function)
PCL	Tercih edilen Kanal Listesi (Preferred Channel List)
PCM	Güç Kontrol-Ortam Erişim Kontrolü (Power Control-Media Access Control)
PCMA	Güç Kontrollü Çoklu Erişim (Power Controlled Multiple Access)
PIFS	Nokta Koordinasyon Fonksiyonu IFS (Point Coordination Function IFS)
PRP	Engelsiz Devam Eden Öncelikli (Preemptive Resume Priority)
QoS	Hizmet Kalitesi (Quality of Service)
R-ACK	Rezervasyon ACK (Reservation ACK)
R-PKT	Rezervasyon Paketi (Reservation Packet)
RES	Rezervasyon (Reservation)
RI-BTMA	Alıcı Başlatmalı-Meşgul Tonlu Çoklu Erişim (Receiver Initiated-Busy Tone Multiple Access)
RT-MAC	Gerçek Zamanlı MAC (Real Time MAC)
RTR	Almak için Hazır (Ready To Receive)
RTS	Gönderme İsteği (Request To Send)
SINR	Sinyal Girişim Gürültü Oranı (Signal to Interference plus Noise Ratio)
SIFS	Kısa IFS (Short IFS)
SNR	Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
SRMA/PA	Yumuşak Rezervasyon Çoklu Erişim / Öncelik Atama ile (Soft Reservation Multiple Access / with Priority Assignment)
STA	İstasyon (Station)

SVM	Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines)
TCP	İletim Kontrol Protokolü (Transmission Control Protocol)
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
TV	Televizyon (Television)
UMTS	Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi (Universal Mobile Telecommunications System)
VBR	Değişken Bit Hızı (Variable Bit Rate)
WiMAX	Mikrodalga Erişim için Evrensel Birlikte Çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
WRAN	Kablosuz Bölgesel Alan Ağı (Wireless Regional Area Network)
WSD	Beyaz Boşluk Cihazları (White Space Devices)



SİMGELER

A	Varışlar Arası Zaman Dağılımı
B_c	Kanal Bant Genişliği
B_g	Koruma Bandı
B_t	Toplam Spektrum Tahsisi
CU	Kanal Kullanımı
D	Sabit Tanımlı Dağılım
D_p	Birincil Ağ Gecikmesi
D_s	İkincil Ağ Gecikmesi
DR	Veri Oranı
$E[T]$	Ortalama Servis Süresi
$E[W]$	Ortalama Bekleme Süresi
$F_S(x)$	Servis Süresi Dağılımı
G	Genel Dağılım
G_{bs}	Her Bir Erişim Noktasının İş Yüğü
G_g	Ortalama Maliyet
G_p	Birincil Ağa Sunulan Toplam Yüğü
G_s	İkincil Kullanıcıların Yüğü
H	Ortalama Zaman Maliyeti
K	Giriş Kaynağının Boyutu
L	Little Teoremi
m	Sunucu Sayısı
M	Üstel Dağılım
M_a	Her Bir Çıkışın Aday Değeri
n_m	Her Bir Frekans Kanalının Desteklediği Maksimum Kullanıcı Sayısı
N	Kuyrukta Bekleyebilecek Maksimum Müşteri Sayısı
N_M	Kullanıcı Sayısı
N_p	Birincil Kullanıcı Sayısını
N_s	İkincil Kullanıcı Sayısı
$N(t)$	Sistemde Bulunan Müşteri Sayısı
P	Öncelik
P_b	İkincil Ağdaki Engel Olma Olasılığı
P_{ft}	İkincil Ağdaki Zorunlu Bitirme Olasılığı
P_i	i. Aday Değeri
P_m	Yanlış Sezme Olasılığı
P_t	Başarılı Paket İletim Olasılığı
P_{fa}	Yanlış Alarm Olasılığı
$Q(t)$	Kuyruk Boyutu
$\bar{Q}$	Ortalama İşlem Süresi
S	Servis Zamanı Dağılımı
S_p	Birincil Kullanıcıların için İş Çıkarma Oranı
S_s	İkincil Ağ için İş Çıkarma Oranı
t_s	Spektrum Sezme Zamanı
T_s	İkincil Kullanıcıların Ortalama Servis Süresi
$u(x)$	Adım Fonksiyonu
W	Bekleme Süresi
X	Varışlar Arası Süre
y^k	k Değerinin Bulanık Mantık Çıkışı

z	Spektrum El Değiştirme Gecikmesi
λ	Ortalama Varış Suresi
μ^{-1}	Servis Suresi
ρ	Utilizasyon Faktörü



ÖZET

BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME YÖNTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Muhammed Enes BAYRAKDAR

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ali ÇALHAN

Temmuz 2017, 107 sayfa

Bilişsel radyo tabanlı ağlarda, lisanslı (birincil) kullanıcıların ikincil kullanıcıların yol açabileceği herhangi bir girişim (interference) riski altında olmamaları gerekmektedir. Birincil kullanıcılara girişimde bulunulmaması, bilişsel radyo sistemi tarafından mutlaka sağlanması gereken bir koşuldur. Spektrumda bir ikincil kullanıcı iletişim yaparken, kanal birincil kullanıcı tarafından kullanılacaksa ilgili spektrumun boşaltılması gerekmektedir. İkincil kullanıcının spektrum kanalını boşaltmak amacıyla iletişimini kesmesi ya da başka bir spektruma geçiş yaparak iletişimini sürdürmesi gerekmektedir. İkincil kullanıcının spektrum kanalını boşaltmak için bir spektrumdan başka bir spektruma geçiş yaparak iletişimini sürdürmesi spektrum el değiştirme olarak ifade edilmektedir. El değiştirme işlemi için kullanılan çeşitli teknik ve yöntemler bulunmaktadır. Bu teknik ve yöntemler yardımı ile ikincil kullanıcıların iletişimleri kesilmeden başka spektrumlara geçiş yapmaları sağlanmaktadır. El değiştirme işleminde, dikkat edilmesi gereken bir durum da kuyruk yapısındaki öncelik sınıflarıdır. Öncelik sınıfları, bilişsel radyo kullanıcıları arasında iletişim sırasını belirlemektedir. Başka bir ifadeyle, önceliği en yüksek olan kullanıcı ilk sırada iletişim yapma hakkına sahiptir. Öncelik sınıfları ile ilgili olarak göz önünde bulundurulması gereken diğer bir konu da engelli (preemptive) ya da engelsiz (non-preemptive) öncelik tekniği kullanılmasıdır. Engelli öncelik tekniğinde, spektrumdaki düşük öncelikli iletişim kesilerek yüksek öncelikli iletişime başlanmaktadır. Engelsiz öncelik tekniğinde ise, spektrumdaki düşük öncelikli iletişimin bitmesi beklenmekte ve iletişim tamamlandıktan sonra yüksek öncelikli iletişime başlanmaktadır. El değiştirme işleminde öncelik sınıfları, güncel ve önü açık bir çalışma konusu olduğundan dolayı tez konusu olarak seçilmiştir. Yaptığımız tez çalışmasında, ikincil kullanıcıların öncelik sınıfları göz önüne alınarak el değiştirme işleminin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır ve birden fazla parametrelili karar verme süreçlerinde yapay zeka tekniklerinden yararlanılmıştır. Geliştirilen kanal birleştirme ve öncelik tabanlı spektrum el değiştirme yöntemi sayesinde, ağın toplam iş çıkarma oranı artırılarak el değiştirme sayısı ve kümülatif el değiştirme gecikmesi en aza indirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Bilişsel radyo, Öncelik kuyrukları, Spektrum el değiştirme, Spektrum yönetimi, Yapay zeka.

ABSTRACT

MODELING AND ANALYSIS OF SPECTRUM HANDOFF METHODS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Muhammed Enes BAYRAKDAR

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronic
and Computer Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ali ÇALHAN

July 2017, 107 pages

In cognitive radio networks, a licensed (primary) user must not be exposed of any interference by unlicensed users. Not damaging licensed users is a situation that cognitive radio must certainly provide. While an unlicensed user makes transmission in a frequency channel, the channel must be emptied if it is going to be used by a licensed user. The unlicensed user is required either to stop transmission or to continue transmission on another channel in order to free up the frequency channel. Channel changing of unlicensed users for emptying the frequency channel of licensed users is known as spectrum handoff. Various methods and techniques for performing spectrum handoff are available. By means of these methods and techniques, transmissions of unlicensed users can be transferred to another channel without interruption. In spectrum handoff process, a situation that should be taken into consideration is the priority classes. Priority classes determine the order of transmission among users. In other words, a user which has the highest priority has the right to transmit first. Another case that should be known about priority classes is utilizing either preemptive or non-preemptive priority techniques. In preemptive priority, high priority transmission is started by interrupting low priority transmission in the spectrum. In non-preemptive priority, a low priority transmission is waited to be finished, and high priority transmission is started after completion of low priority transmission. Priority classes in spectrum handoff process are chosen as thesis topic because it is an up to date and open workspace area. In this thesis, the design of the spectrum handoff process with priority classes for secondary users is provided, and in multi parameter decision making processes artificial intelligence techniques are utilized. With the help of designed channel bonding and priority based spectrum handoff method, the total number of handoff and the cumulative handoff delay are minimized while the total network throughput is increased.

Keywords: Cognitive radio, Priority queues, Spectrum handoff, Spectrum management, Artificial intelligence.

EXTENDED ABSTRACT

MODELING AND ANALYSIS OF SPECTRUM HANDOFF METHODS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Muhammed Enes BAYRAKDAR

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronic
and Computer Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ali ÇALHAN

July 2017, 107 pages

1. INTRODUCTION

Cognitive radio based network structure has developed as a new technology in order to increase spectrum efficiency and utilization. Unutilized portions of radio and TV frequency spectrum have revealed because of fixed spectrum allocations utilized in traditional networks. In cognitive radio based networks, users which utilize licensed spectrum are named as primary users, and users which use unlicensed spectrum are named as secondary users. Cognitive radio network technology intends to exploit unused or empty parts of the spectrum in an opportunistic way by allowing secondary users to detect the available spectrum.

It is very significant for performance of cognitive radio based networks that secondary users must not generate any interference to the licensed users. In case of reallocation of the spectrum holes that has assigned to secondary users beforehand, it is necessary for secondary users to carry on their communications in a different spectrum hole. This process performed by cognitive radio users is defined as spectrum handoff. There are many studies about the spectrum handoff process. However, there is not found any work in the literature that takes priority class into account in analytical modeling and simulation modeling.

In this thesis, network structure design of analytical and simulation models for spectrum handoff process done by secondary users according to priority classes in cognitive radio network with RIVERBED software and MATLAB software is aimed. Moreover, deciding on the most suitable spectrum handoff process by using artificial intelligence

techniques in multi parameter decision making processes is also among the objectives of the thesis.

2. MATERIAL AND METHODS

A spectrum handoff process that is designed as analytical and simulation models are developed specifically for cognitive radio networks with the priority classes. Priority classes are divided into three different groups including emergency data packets, real-time data traffics, and non-real time data traffics. The spectrum channels of the primary users are continuously sensed by secondary users, and spectrum handoff process is carried out to an available spectrum channels.

Priority classes are taken into account when performing process of spectrum handoff to idle spectrum channels. In this way, the users with the emergency data packet perform spectrum handoff before any other communications. Furthermore, artificial intelligence techniques are utilized when multiple parameters should be considered before the spectrum handoff process.

In this thesis, network structure design of analytical and simulation models for spectrum handoff process done by secondary users according to priority classes in cognitive radio network with RIVERBED software is aimed. Moreover, deciding on the most suitable spectrum handoff process by using artificial intelligence techniques in multi parameter decision making processes is also among the outcome of the thesis.

In this thesis, spectrum handoff process is carried out by using priority based non-preemptive M/G/1 queueing model. With the aim of increasing spectrum handoff utilization for secondary users, channel bonding mechanism with starvation mitigation is exploited. It is of crucial importance to detect action of licensed users in advance, because spectrum handoff offers an opportunity to secondary users for continuing their communication. Priority based data traffic with aging solution to starvation problem is exploited to meet requirements of the cognitive radio users in the queueing model.

Priority of the packet is increased in aging mechanism in case when the packet of low priority cognitive radio user waits in the queue more than three frame times. In the queue, packets of cognitive radio users are classified into three distinct priority classes, namely, urgent, real time, and non-real time where urgent data packets have the highest priority while non-real time data packets have the lowest priority. Merging two subsequent time slots if the size of the packet is bigger than one time slot is defined as

channel bonding mechanism. Empty time slots for channel bonding process are detected utilizing both reactive and proactive decision based spectrum handoff techniques. First of two subsequent time slot is sensed exploiting reactive decision based scheme before starting spectrum handoff process with proactive decision based scheme.

A cognitive wireless network which comprises of licensed users, secondary users, and access points is designed for our cognitive radio network model. Primary users utilize their time slots at any time with the advantage of having license for their communications using TDMA (Time Division Multiple Access) as medium access control protocol. When idle time slots are detected, cognitive radio users make communication via the base station exploiting slotted Aloha as a medium access technique. For simulating channel bonding and aging mechanisms, Riverbed Modeler simulation software is utilized. Simulation results are shown to be very close to the analytical results acquired for different network load and packet arrival rates. This thesis has exposed that by exploiting channel bonding mechanisms and aging solution to starvation, the throughput of cognitive radio users may be improved considerably.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

For both proactive decision scheme and reactive decision scheme, the performance assessment of our spectrum handoff process with aging solution and channel bonding has been performed using simulation scenarios. Blocking probability, cumulative handoff delay, throughput of cognitive radio users, and forced termination probability are taken into account for assessing the proposed spectrum handoff technique because of their importance. Simulation and analytical results of our proposed cognitive radio network are acquired from integration of Riverbed simulation software and Matlab software, respectively.

Mean service time of licensed users is given as 0.9 for cumulative handoff delay results. In the graphics of cumulative spectrum handoff delay results, results for urgent data packets are shown when packet arrival rate of primary users is increased from 0.02 to 0.2. As it is understood from the cumulative spectrum handoff delay results graphic, when aging solution is utilized cumulative spectrum handoff delay for non-real time data packets is lower. However, aging solution is non-useful for urgent data packets since urgent data packets have the highest priority. When aging solution is not exploited cumulative spectrum handoff delay of urgent data packets is lower. Nonetheless, by

exploiting aging solution whole spectrum handoff delay is considerably reduced for cognitive radio network.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

In this thesis, spectrum handoff process is designed by using priority based non-preemptive M/G/1 queueing model. In order to increase spectrum handoff utilization for cognitive radio users, channel bonding mechanism with starvation mitigation is exploited. It is of great importance to detect action of primary users, because spectrum handoff presents an opportunity to cognitive radio users for keeping on their transmission. Priority based data traffic with aging solution to starvation is exploited to compensate necessities of the cognitive radio users in the queueing model. Packets of cognitive radio users are classified into three distinct priority classes, namely, urgent, real time, and non-real time where non-real time data packets possess the lowest priority while urgent data packets have the highest priority. Channel bonding mechanism is described as merging two consecutive time slots if the size of the packet is bigger than one time slot. Empty time slots for channel bonding process are detected using both reactive and proactive decision based spectrum handoff mechanisms. For simulating aging solution and channel bonding technique, Riverbed Modeler simulation software is utilized. Analytical results are seen to be close to the simulation results obtained under various network load and packet arrival rates. It has also exposed that by utilizing aging solution to starvation and channel bonding technique the throughput of cognitive radio users may be increased considerably. Moreover, deciding on the most suitable spectrum handoff process by using artificial intelligence techniques in multi parameter decision making processes is also among the objectives of the project.

In future works, for making spectrum handoff decisions different artificial intelligence techniques may be used. Besides, various starvation mitigation solutions for priority classes may be taken into consideration.

1. GİRİŞ

1.1. AMAÇ VE KAPSAM

Son zamanlarda, kablosuz teknolojileri kullanan cihaz sayısındaki artışla birlikte kablosuz ağ kullanımında da önemli artışlar meydana gelmiştir [1], [2]. Kablosuz kullanıcı sayısındaki artışla birlikte, kablosuz spektrumların yetersizliği problemi gün yüzüne çıkmıştır [3]. Yapılan araştırmalar sonucunda, kablosuz spektrum yetersizliğinin aslında mevcut spektrumların verimli bir şekilde kullanılmamasından kaynaklandığı anlaşılmıştır [4]. Verimli bir biçimde kullanılmadığı için boşta kalan kablosuz spektrumlar spektrum boşluğu veya beyaz boşluk olarak isimlendirilmektedir [5], [6]. Kablosuz spektrumda yer alan beyaz boşlukları daha etkili bir şekilde kullanmak için dinamik spektrum erişimi kavramı ortaya atılmıştır [7]. Günümüzde, dinamik spektrum erişimi sağlayan kablosuz ağ teknolojilerinin başında bilişsel radyo ağları gelmektedir [8], [9]. Bilişsel radyo ağları, bir spektrumdaki frekans bantlarının daha etkili bir biçimde kullanılması için geliştirilmiştir [10]. Bilişsel radyo ağlarında, spektrum bandındaki lisanslı (birincil) kullanıcılar kendi frekans bantlarını kullanmadığında boş olan frekans bantları lisanssız (ikincil) kullanıcılar tarafından kullanılmaktadır [11]. Frekans bantlarının daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için birçok ortam sezme yöntem ve teknikleri vardır [12]. Ortam sezme yöntem ve teknikleri sayesinde, kablosuz spektrumda lisanslı bir kullanıcı bulunup bulunmadığı tespit edilmekte ve boş olduğunda lisanssız kullanıcının boş spektrumdan yararlanması sağlanmaktadır [13].

Kablosuz bilişsel radyo ağlarında, birincil kullanıcıların ikincil kullanıcılar tarafından hiçbir girişime (interference) maruz kalmamaları oldukça önemlidir [14]. Birincil kullanıcıların hiçbir şekilde girişime maruz kalmamaları, bilişsel radyo ağları tarafından mutlaka sağlanması gereken bir koşuldur [15]. Bununla birlikte, frekans kanalında herhangi bir ikincil kullanıcı iletim yaptığı sırada, kanal birincil kullanıcı tarafından kullanılacaksa spektrumun boşaltılması gerekmektedir [16]. Bu durumda, ikincil kullanıcının frekans bandını boşaltmak amacıyla iletimini sonlandırması veya boş bir frekans bandına geçerek iletimini sürdürmesi gerekmektedir [17], [18]. İkincil kullanıcıların frekans bandını boşaltmak için bir kanaldan başka bir kanala geçerek

iletimini sürdürmesi spektrum el değıştirme olarak isimlendirilmektedir [19]–[21]. Bilişsel radyo ağlarında spektrum el değıştirme işlemini gerçekleştirmek için çeşitli yöntem ve teknikler bulunmaktadır [22], [23]. Bu teknik ve yöntemler yardımıyla, ikincil kullanıcıların iletişimleri aksamadan diğer frekans bantlarına geçişleri sağlanmaktadır [24], [25].

Bilişsel radyo ağlarında kullanılan spektrum el değıştirme işlemlerinde, öncelik sınıfları da dikkat edilmesi gereken bir durumdur [26], [27]. Öncelik sınıfları veya öncelik kuyrukları, kablosuz ağ kullanıcılarının iletim yapacakları sırayı tanımlamaktadır [28]. Diğer bir ifadeyle, önceliğı en yüksek olan kablosuz kullanıcı iletimini en önce gerçekleştirmek hakkına sahiptir [29]. Engelli (preemptive) veya engelsiz (non-preemptive) öncelik sırası kullanımı da, kablosuz ağlardaki öncelik sınıfları ile ilgili olarak bilinmesi gereken diğer bir durumdur [3]. Engelli öncelik kullanıldığı durumlarda, spektrum bandındaki düşük öncelikli iletim yarıda kesilerek yüksek öncelikli iletimin başlanması sağlanmaktadır. Engelsiz öncelik kullanıldığı durumlarda ise, spektrum bandındaki düşük öncelikli iletimin tamamlanması beklenir ve düşük öncelikli iletimin tamamlanmasının ardından yüksek öncelikli iletimin başlanması sağlanmaktadır [3].

Kablosuz bilişsel radyo ağlarındaki ikincil kullanıcılara, spektrumda bulunan boş spektrum bantlarından ihtiyaçları için en uygun olan kanalın tahsis edilmesi gerekmektedir [30]. Mevcut spektrum bantları arasından en uygun kanalın tespit edilmesinde bazı parametrelerin ve ikincil kullanıcıların iletim gereksinimlerinin göz önünde bulundurulması kaçınılmazdır [8]. Bu durumda, kablosuz frekans bandı özelliklerinin ve kullanıcı gereksinimlerinin çok parametrelili karar verme süreçleri ile değerlendirmeye alınıp ikincil kullanıcılara ihtiyaçları için en uygun olan frekans bandı tahsisinin yapılması sağlanmalıdır. Yapay zeka tabanlı teknikler, kablosuz bilişsel radyo ağlarındaki karar verme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [29]. Yapılan çalışmalara bakıldığında, spektrum el değıştirme işlemi için yapay zeka tabanlı yaklaşımların kullanımının arttığı görülmektedir.

İnsanın düşünme yöntem ve metotlarını inceleyerek bunlara benzer bir şekilde yapay yönergeleri geliştirmeye çalışmak yapay zeka olarak tanımlanmaktadır [31]. Yapay zeka sistemlerinden; insanlara özgü olan öğrenme, algılama, düşünme, fikir yürütme, kavramlar arasında ilişki kurma, çıkarım yapma ve karar verme gibi işlevleri gerçekleştirmesi beklenmektedir [31]. Yaygın olarak kullanılan yapay zeka

tekniklerinin başında; bulanık mantık, yapay sinir ağları, uzman sistemler ve genetik algoritmalar gelmektedir [29].

Tez çalışmasının amacı; bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcıların spektrum el değiştirme işlemi ile kesintisiz bir iletişime sahip olmaları ve öncelik durumları da göz önüne alınarak acil olan veri iletimlerinin diğer iletimlerden daha önce gerçekleşmesini sağlamaktır. Tez çalışması kapsamında, birincil kullanıcıların ve birincil baz istasyonunun tasarımı RIVERBED yazılımı ile gerçekleştirilmiştir [32]. Tasarımı gerçekleştirilen birincil kullanıcı ve birincil baz istasyonunu benzetim yazılımı üzerinde gerçekleştirmek için düğüm modülü, işlemci modülü oluşturulmuştur ve Proto C programlama dilinde ilgili kodlar yazılmıştır. Kuyruk modeli de tasarlandıktan sonra, frekans aralığı, bant genişliği, modülasyon tekniği, paket boyutu, vb. iletişim parametreleri ayarlanmıştır.

Bunun yanında, ikincil kullanıcıların ve ikincil baz istasyonunun tasarımı da RIVERBED yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen ikincil kullanıcı ve ikincil baz istasyonunu benzetim yazılımı üzerinde gerçekleştirmek için aynı şekilde düğüm modülü, işlemci modülü oluşturulmuştur ve Proto C programlama dilinde ilgili kodlar yazılmıştır. Kuyruk modeli de tasarlandıktan sonra, frekans aralığı, bant genişliği, modülasyon tekniği, paket boyutu, vb. iletişim parametreleri ayarlanmıştır. İkincil kullanıcıların benzetim modelinde, spektrum sezme ve spektrum el değiştirme işlemleri ile birlikte öncelikler de göz önüne alınarak gerçekleştirildiği için kuyruk modeli de bunlara göre tasarlanmıştır.

Tüm baz istasyonları ve kullanıcılar tasarlandıktan sonra, tasarlanan kullanıcılar ve baz istasyonları bir araya getirilerek öncelik sırasına göre ikincil kullanıcıların spektrum el değiştirme işleminin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Ek olarak, çok parametrelili karar verme süreçlerinde bulanık mantık başta olmak üzere yapay zeka tekniklerinden de faydalanılmıştır. Ayrıca, benzetimi gerçekleştirilen ağ modelinin analitik model ile tutarlı olduğunu göstermek amacıyla karşılaştırmalı sonuç grafikleri de elde edilmiştir. Analitik modelden elde edilen sonuçlar ile benzetim modeli sonuçları yorumlanarak literatürde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Tezin birinci bölümünde, spektrum el değiştirme işlemi ile ilgili genel bilgiler verilerek bilişsel radyo ağlarındaki kullanımının nasıl ortaya çıktığından ve kısaca gelişiminden bahsedilmiştir. Daha sonra tezin amaç ve kapsamı açıklanarak, bu konuda literatürde

yapılan bazı çalışmalara yer verilmiştir.

İkinci bölümde, tez kapsamında kullanılan konular hakkında genel bilgilere yer verilmiştir. Bilişsel radyo ağlarının ilk uygulamalarından olan IEEE 802.11af, IEEE 802.22 WRAN (Kablosuz Bölgesel Alan Ağı) tekniklerinden bahsedilerek spektrum yönetimi hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra, çekişme tabanlı ve çekişmesiz ortam erişim kontrol protokolleri anlatıldıktan sonra spektrum el değiştirme işlemi hakkında bilgilere yer verilmiştir. Sezme tabanlı ve önceden tanımlı sezme teknikleri anlatıldıktan sonra, yapay zeka teknikleri ve öncelik sınıfları hakkında bilgilere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tez kapsamında kullanılan ortam erişim kontrol protokollerinin ve spektrum el değiştirme yaklaşımlarının analitik modelleri verilmiştir. Bu kapsamda, birincil kullanıcılar tarafından kullanılan TDMA ve ikincil kullanıcılar tarafından kullanılan Slotted Aloha tekniklerinin performans analizleri yapılmıştır. Daha sonra, öncelik tabanlı ve kanal birleştirme tabanlı spektrum el değiştirme işlemleri modellenmiştir. Bunlara ek olarak, bulanık mantık ve yapay sinir ağları tabanlı spektrum el değiştirme işlemi açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, sezme tabanlı, öncelik tabanlı, kanal birleştirme tabanlı ve yapay zeka tabanlı olmak üzere tez kapsamında ele alınan yaklaşımların benzetim modelleri tasarlanmıştır. Daha sonra, bu yaklaşımların performanslarının hangi ölçütlere göre değerlendirileceğini vurgulamak için performans ölçütleri verilmiştir. Son olarak, benzetim modelleri ve analitik modelleri ele alınan yaklaşımların görsel olarak başarımlarını değerlendirmeleri sunulmuştur.

Son bölümde ise çalışmanın öneminden bahsedilmiş ve literatüre olan katkısı vurgulanmıştır. Ayrıca gelecekte yapılabilecek çalışmalara değinilmiş ve öneriler sunulmuştur.

1.2. LİTERATÜR TARAMASI

Son yıllarda özellikle bilişsel radyo ağları konusunda önemli araştırma alanlarından biri olan spektrum el değiştirme hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Bu konuda incelenen önemli bazı çalışmalar aşağıda detaylandırılmıştır.

Zahed ve arkadaşları tarafından, toplam servis süresi ve el değiştirme gecikmesini düşürmek için önceden tanımlı (proactive) ve öncelikli spektrum el değiştirme karar

algoritması önerilmiştir [33]. Önerdikleri algoritma, iletimi kesilen kullanıcılara yüksek öncelik vermek amacıyla; iletimi kesilmeyen ikincil kullanıcılardan daha önce iletimlerine devam etmeleri için engelsiz devam eden öncelikli (preemptive resume priority) M/G/1 kuyruk modeli kullanılarak modellenmiştir. Önerdikleri el değiştirme algoritmasının başarımı ele alınmış ve standart spektrum el değiştirme algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, geliştirdikleri algoritmanın çeşitli trafik varış oranları ve servis süreleri altında ortalama spektrum el değiştirme gecikmesi ve toplam servis süresi açısından standart algoritmalarından daha iyi sonuçlar verdiğini gözler önüne sermektedir.

Liu ve arkadaşları tarafından, ikincil kullanıcıların standart spektrum erişim senaryosunu kullandığı bilişsel radyo ağları ortamında spektrum el değiştirme işlemine odaklanılmıştır [34]. Bulanık mantık yardımıyla spektrum tahsis tablosu tahmin edilmekte ve spektrum el değiştirme işlemi gerçekleşeceği zaman ikincil kullanıcının hızlıca spektrum erişimini seçebilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede, spektrum el değiştirme gecikmesini düşürmeyi hedeflemişlerdir.

Giupponi ve Neira tarafından, bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme işlemi çalışılmıştır [35]. İkincil kullanıcılar, spektrum kanallarını birincil kullanıcılara oluşturdukları girişim belirli bir eşik değerini aşmadığı süre boyunca kullanmaktadırlar. Birincil kullanıcılara zararlı bir girişim oluşturulduğu durumda ya da ikincil kullanıcıya sağlanan hizmet kalitesi iyi değil ise, ikincil kullanıcı kanalı hızlıca boşaltmak için el değiştirme işlemini başlatmaktadır.

Kaur ve arkadaşları tarafından, bilişsel radyo ağlarında bulanık mantık yapısı kullanılarak yeni bir spektrum hareketlilik tekniğinin tasarımı önerilmiştir [36]. Önerdikleri teknik, ikincil kullanıcıların; birincil kullanıcılar spektruma ihtiyaç duyduğunda ya da birincil ve ikincil kullanıcılar arasında zararlı bir girişim oluşturmamak için iletişim gücünü ayarlamasını sağlamaktadır. Bu teknik sayesinde, ikincil kullanıcılar iletişim güçlerini belli girişim aralıklarında tutamazlarsa kanallar arasında geçiş yapmaktadırlar. Bu şekilde, yaptıkları çalışma; ikincil kullanıcıların iletişim gücünü belli limitlerde kontrol etme önceliği ve girişim oluşturmamak için farklı frekans bandına geçiş yapılması olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır.

Potdar ve Patil tarafından; öncelik, hareketlilik ve servis kalitesine bağlı yeni bir el değiştirme tekniği önerilmiştir [37]. Önerdikleri teknik, esas olarak ikincil kullanıcıların

hareketliliğine dayanmaktadır. Hareketliliği temel alarak, ikincil kullanıcılara hizmet kalitesi sağlamak için hücre içi ve hücrelerarası spektrum el değiştirme tanımlamışlardır. Spektrum el değiştirme işlemindeki önemli durumlarını öncelik sırasına dizmek için kaynak kullanımı parametresinden faydalanmışlardır.

Ahmed ve arkadaşları tarafından, aday kanalların kazancını tahmin etmek amacıyla bulanık mantık tabanlı yeni bir sistem önerilmiştir [38]. Bu şekilde, en avantajlı kanal seçilebilmektedir. Ayrıca, SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) parametresi ile lisanslı kullanıcı girişim parametresi birleştirilerek spektrum el değiştirme kararı verilmektedir. Uygun el değiştirme kararları sayesinde spektrum el değiştirme sayısını düşürmeyi hedeflemişlerdir.

Konishi ve arkadaşları tarafından, ikincil kullanıcıların yararlandığı alt kanalların sayısının değişken olduğu kanal birleştirme yöntemi ile dinamik spektrum el değiştirme tekniğinin performansı analiz edilmiştir [39]. Çoklu kanal bilişsel radyo ağlarında çok sunuculu bekleme olmayan öncelikli kuyruk sistemini; zorunlu sonlandırma olasılığı (forced termination probability), ikincil kullanıcıların iş çıkarma oranı ve engel olma olasılığı (blocking probability) parametrelerini türeterek modellemişlerdir. Zorunlu sonlandırma olasılığı için, iki farklı durumu göz önüne almışlardır. Bunların ilki, en fazla alt kanal kullanmakta olan ikincil kullanıcıların iletişimlerini bitirmeye zorlanması; ikincisi ise, en az alt kanal kullanmakta olan ikincil kullanıcıların iletişimlerini bitirmeye zorlanması şeklindedir.

Han ve arkadaşları tarafından, spektrum sezme işlemi göz önüne alınarak gerçek zamanlı el değiştirme işlemi amaçlanmıştır [40]. Gerçek zamanlı el değiştirmeyi gerçekleştirmek için, spektrum havuzu ve ikinci alıcı olmak üzere iki farklı yapı önermişlerdir. Spektrum sezme aşamasında, sezme kanalını tespit etmek için yeniden spektrum sezmenin gerekliliğini tartışmışlardır. Bunun yanında, çalışmalarında model tabanlı tahmin sistemini de incelemişlerdir.

Lee ve Jang, spektrum sezmenin yanlış alarm olasılığından kaynaklanan el değiştirme işlemini hesaba katan optimizasyon problemini formüle etmişlerdir. Buna bağlı olarak, en uygun spektrum sezme sürelerini bulmayı hedeflemişlerdir [41].

Pham ve arkadaşları tarafından, bilişsel radyo ağlarında el değiştirme tekniğini en iyi bir biçimde kullanmak amacıyla kanal durumlarının analizi yapılmıştır. Bu sebeple, Hidden Markov model tabanlı spektrum el değiştirme işlemini önermişlerdir [42].

Lertsinsrubtavee ve arkadaşları tarafından, gecikme limiti gerekliliği göz önüne alınarak gereksiz spektrum el değiştirme işlemlerini ortadan kaldırmayı amaçlayan yeni bir el değiştirme tekniği önerilmiştir [43]. Öncelikle, uygulama paketlerinin tahmin edilen gecikmesi kanalla bağlantılı kuyruğun bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Elde edilen gecikme, kanalın mevcut durumunu ve paket iletimleri için ortamın uygunluğunu göstermektedir. Daha sonra, gereksiz spektrum el değiştirme işlemlerini engellemek için; el değiştirme ve seçim kararına öncülük eden gecikme ihlal oranını tahmin etmek amacıyla tahmin edilen gecikmeleri kullanmışlardır. Ek olarak, hızlı ardışık spektrum el değiştirme sorununu çözmek için destek kanallarının kullanımı üzerine de incelemeler yapmışlardır.

Yoon ve Ekici, bilişsel radyo ağları için gönüllü el değiştirme olarak adlandırılan yeni bir spektrum yönetim tekniğini tanıtmışlardır [44]. İletişim kesintisi olmaksızın alternatif kanal kurulumunu ve haberleşmesini basitleştirmek için zorunlu olmayan spektrum el değiştirme işlemini başlatmak amacıyla gönüllü el değiştirmeye dayanan yeni bir sistem önermişlerdir.

Zhang ve arkadaşları tarafından, ikincil kullanıcılar 1. Sınıf ve 2. Sınıf olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılmıştır [45]. 1. Sınıf kullanıcıların, kanal erişimi açısından 2. Sınıf kullanıcılara göre öncelikleri vardır. Farklı öncelikli ikincil kullanıcıların birikimli spektrum el değiştirme gecikmesini ifade etmek için, engelsiz devam eden öncelikli (preemptive resume priority) M/M/2 kuyruk ağ yapısıyla birleştirilmiş Markov geçiş modelini incelemişlerdir.

Lertsinsrubtavee ve arkadaşları tarafından, spektrum el değiştirmenin olup olmayacağı ve eğer olacaksa nasıl olacağını belirlemek amacıyla önceden birikmiş ölçümlere dayanan birikimli olasılık kullanımı önerilmiştir [46]. Gereksiz spektrum el değiştirme işlemini önlemek amacıyla ikincil kullanıcı, birikimli olasılık değeri belirli bir limiti geçmediği sürece aynı spektrumda kalmalıdır. Bunun yanında, önceki gözlem sonuçları verimli bir tahmin modeli kullanılsa bile anlık kararlarda gerçek davranışlara cevap vermemektedir. Bu problemi çözmek amacıyla, kısa zaman dilimli destek kanallarının kullanımını önermişlerdir.

Wang ve arkadaşları, iki atlamalı seçici röle ağ yapısında periyodik spektrum sezme ve el değiştirme ile basitleştirilen fırsatçı spektrum kullanım modelini ele almışlardır [47]. İkincil kullanıcıların iş çıkarma oranı ve çarpışma olasılığının matematiksel ifadeleri

türetilerek ikincil kullanıcıların iletişimlerinin güvenilirliğini incelemişlerdir.

Wu ve arkadaşları tarafından, bilişsel radyo ağlarında önceliğe dayanan iletişim için engelli ve engelsiz devam eden öncelikli (preemptive and non-preemptive resume priority) M/G/1 kuyruk modeli önerilmiştir [48]. Ayrıca, gecikme tabanlı uygulamalar için önerdikleri kuyruk modeline bağlı olarak trafik duyarlı spektrum el değiştirme tekniği geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri el değiştirme tekniği, ikincil kullanıcılar için gecikme tabanlı uygulamaların hizmet süresini düşürmektedir. Bunun yanında, ikincil kullanıcılar arasındaki el değiştirmelerden kaçınılarak ağ yapısının toplam başarımı belirli bir seviyenin altına düşürülmemektedir.

Kim ve Shin tarafından, lisanslı kanalların hangi sıklıkla ve ne kadar süre seziyeceği ile ilgili yeni bir yaklaşım önerilmiştir [49]. Önerdikleri yaklaşımı iyileştirerek, spektrumdan daha etkili bir biçimde faydalanılmasını hedeflemişlerdir.

Tigang ve Tong tarafından, engellenen ikincil kullanıcılar için sınırlı boyuta sahip tampon kuyruklu dinamik spektrum el değiştirme tekniği önerilmiştir [50]. Çok fazla sayıda gerçek zamanlı trafik yığılmasını önlemek amacıyla sınırlı boyutta tampon kuyruğu kullanmışlardır. Tampon kuyruğu boyutunu sınırlandırarak, gerçek zamanlı olmayan trafiklerin spektrum kullanımı için adil bir şansa sahip olmalarını sağlamışlardır. Ayrıca, spektrum sezme ve kanal tahsisi merkezi bir erişim noktası ile kontrol altında tutulmaktadır. Birden fazla ikincil kullanıcının eş zamanlı olarak aynı spektrum kanalından yararlanma isteğini etkin bir biçimde önleyebilmek için bu tarz merkezi bir kontrol mekanizması kullanmışlardır.

Wang ve Wang, bilişsel radyo ağlarında kullanılan spektrum el değiştirme tekniklerini incelemişlerdir [51]. Çalışmalarında, önceden tanımlı (proactive) ve önceden tanımsız (reactive) olmak üzere iki temel el değiştirme tekniği karşılaştırılmıştır. Önceden tanımsız el değiştirme tekniğinin avantajı, tespit edilen hedef kanalların doğruluğudur ancak sezme süresi maliyeti ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, önceden tanımlı el değiştirme tekniğinde sezme süresi maliyeti bulunmamakla birlikte önceden tanımlanan hedef kanalların uygun olmaması sorunu ile karşı karşıya kalınabilir. Spektrum sezme süresine bağlı olarak, hangi koşulda önceden tanımlı veya önceden tanımsız el değiştirme tekniğinin seçileceğini analiz etmek için engelsiz devam eden öncelikli (preemptive resume priority) M/G/1 kuyruk ağ yapısını kullanmışlardır.

Zhou ve arkadaşları, ikincil kullanıcıların erişim noktasının en geniş kapsama alanına

sahip olması için yerleştirilmesi gereken yer üzerine odaklanmışlardır [52]. En geniş kapsama alanını elde etmek için, birincil kullanıcılar için girişim kısıtlarını ve ikincil kullanıcılar için hizmet kısıtlarını göz önüne alarak kapsama alanını bulmaktadırlar. İkincil kullanıcı erişim noktası konumunun, kapsama alanı tespiti için önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmıştır. Haberleşme gerçekleştirilen bilişsel radyo ağ yapısında, kapsama alanının geniş olması için ikincil kullanıcı erişim noktasının en optimum konumu tespit edilmiştir.

Wang ve arkadaşları, bilişsel radyo ağlarında bağlantıya dayanan el değiştirmenin gecikme başarımını değerlendirmek amacıyla analitik model sunmuşlardır [53]. İkincil kullanıcıların iletişim yaptığı sırada; birincil kullanıcıların sebep olduğu çoklu kesmeler, çoklu el değiştirme ile ve el değiştirme için mevcut kanalların önceden tespit edilmesi gerekliliğine ihtiyaç duyulması ile neticelenmektedir. Hedef kanalların belirlenmesinde kanal durumunu tespit etmek için üç farklı tasarım özelliği ele alınmıştır. Bu özellikler; birincil ve ikincil kullanıcıların servis süresi dağılımı, çoklu spektrum el değiştirmelerde farklı kanallar ve çoklu ikincil kullanıcıların kanal çekişmesi işleminden kaynaklanan kuyruk gecikmesidir. Bu tasarım özellikleriyle spektrum kullanım durumunu karakterize etmek amacıyla engelsiz devam eden öncelikli (preemptive resume priority) M/G/1 kuyruk ağ yapısı modelini önermişlerdir.

Shiang ve Schaar tarafından, bilişsel radyo ağlarında gecikme tabanlı çoklu ortam uygulamalarında iletişimi gerçekleştiren kablosuz kullanıcılar için yeni bir dinamik kanal tespit mekanizması önerilmiştir [54]. Kullanıcılar genel olarak; farklı frekans kanallarındaki özel fonksiyonlara, uygulama ihtiyaçlarına ve çeşitli kanal özelliklerine gereksinim duymaktadırlar. Spektrum kaynağını merkezi olmayan durumda etkili bir biçimde yönetmek için, kullanıcılar arasında veri haberleşmesi yapılması zorunludur. Bu sebeple, gerekli olan bilgi alışverişini belirleyen öncelik tabanlı sanal kuyruk arayüzü önermişlerdir ve farklı öncelik tabanlı trafikler tarafından maruz kalınan gecikmeleri değerlendirmişlerdir.

Kannappa ve Saquib tarafından, iki boyutlu Markov zinciri üç durum değişkeni ile tasarlanmıştır [55]. İkincil kullanıcıların performans göstergeleri olarak, tamamlanma olasılığı ve engel olma olasılığını kullanmışlardır.

Ma ve Wang tarafından, kuyruk teorisi tabanlı kanal değişim isteği tekniği gerçek zamanlı olmayan veri trafikleri için kullanılmıştır [56]. Performans ölçütleri olarak;

fazlalık olasılığı, kanal kullanım oranı ve engel olma olasılığı parametreleri incelenmiştir.

Sheikholeslami ve arkadaşları bilişsel radyo ağlarının spektrum el değiştirme işlemi için başlangıç ve hedef kanallarının belirlendiği olasılıklı bir yaklaşım önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada, ağ yapısını karakterize etmek için hem kuyruk teorisi hem de el değiştirme süreci göz önünde bulundurulmuştur [57].

Wang ve Wang tarafından, çoklu spektrum el değiştirmeden kaynaklanan toplam servis süresini en az indirmek için hedef kanalların nasıl seçileceği konusu tartışılmıştır. Ayrıca, farklı hedef kanallarının seçiminde toplam servis süresini değerlendirmek için PRP M/G/1 kuyruk ağ modeli önermişlerdir [58].

Zhang, spektrum el değiştirme performansını karakterize etmek için; bağlantı (link maintenance) olasılığı, spektrum el değiştirme sayısı el değiştirme gecikmesi ve tamamlanmama olasılığı olmak üzere dört parametre önermiştir. Yaptığı çalışmada özellikle, olasılık kütle fonksiyonu ve ortalama spektrum el değiştirme sayısını geliştirmiştir. Bunun yanında, hem fırsatçı hem de uzlaşmaya varılmış spektrum erişim stratejilerini incelemiştir [59].

Raiyn tarafından, hücrel sistemlerde gecikme analizi yapılmıştır. Ayrıca, gereksiz el değiştirme işleminden kaynaklanan gecikmeyi azaltmak için bilişsel radyoya dayanan yeni bir el değiştirme yönetimi önermiştir [60].

Song ve Xie tarafından, bilişsel radyo tasarsız (ad-hoc) ağlarda önceden tanımlı spektrum el değiştirme yaklaşımı önerilmiştir. Önerdikleri yaklaşımda, kanal değiştirme politikası ve önceden tanımlı spektrum el değiştirme protokolü, girişimi önlemek amacıyla kanalda birincil kullanıcı faaliyeti başlamadan önce spektrum el değiştirmenin gerçekleşmesini sağlamaktadır [61].

Wang ve arkadaşları, bilişsel radyo ağlarında çoklu el değiştirme gecikmesinin etkisinin nasıl karakterize edileceği üzerine çalışmışlardır. Ortamda birincil kullanıcı faaliyeti gerçekleşeceği zaman, ikincil kullanıcılar için spektrum el değiştirme işlemi başlatılmaktadır. Spektrum sezme sayesinde, ikincil kullanıcının yarım kalan iletimine devam edebilmesi için önceden tanımsız şekilde spektrum el değiştirme yapacağı hedef kanala karar verilmektedir. Yaptıkları çalışmada, çoklu el değiştirme gecikmesini karakterize etmek amacıyla PRP M/G/1 kuyruk ağı ile entegre bir şekilde çalışan Markov geçiş modeli geliştirilmiştir. Çoklu el değiştirme gecikmesi; sezme zamanı,

anlaşma (handshaking) zamanı, kanal değiştirme zamanı ve bekleme zamanından oluşmaktadır [62].

Liu ve arkadaşları; spektrum el değiştirme, spektrum boşluklarının olasılık modeli ve bilişsel radyo kullanıcılarının davranışlarını incelemiştir. Ayrıca, spektrum el değiştirme zaman ilişkisi modeli önerilmiştir. Bunun yanında, spektrum el değiştirme etkisi ve bilişsel radyo kullanıcıların spektrum el değiştirme için harcadığı servis süresi de araştırılmıştır [63].

Kalil ve arkadaşları tarafından, bağlantı olasılığı (link maintenance probability) ve beklenen spektrum el değiştirme sayısının göz önüne alındığı destek kanallı fırsatçı spektrum erişimi (Opportunistic Spectrum Access with Backup Channels - OSAB) performansının değerlendirilmesi için kapsamlı bir matematiksel model önerilmiştir [18].

Guo ve arkadaşları tarafından, destek vektör makinelerine (Support Vector Machines - SVM) dayanan yeni bir spektrum el değiştirme yönetim tekniği önerilmiştir. Daha iyi spektrum sezme sonuçları elde etmek amacıyla, işbirlikli spektrum sezme mekanizması kullanılmıştır. Ayrıca, SVM modeli el değiştirme tahminleri için kullanılmıştır. Böylece, ikincil kullanıcı kanal meşgul olmadan önce el değiştirme için hazırlanabilmektedir [14].

Zheng ve arkadaşları, bilişsel radyo ağlarında önceden tanımsız karar mekanizmalı spektrum el değiştirme işlemi için ardışık hedef kanal seçim tekniği önermişlerdir. Bu teknik yardımıyla, spektrum el değiştirme başarısızlık olasılığı en aza indirilmektedir [64].

Qiao ve arkadaşları tarafından, spektrum sezme ve spektrum el değiştirme etkileşimini göz önüne alan birleştirilmiş optimizasyon tekniği önerilmiştir. Özellikle spektrum sezme performans parametreleri olan yanlış alarm olasılığı ve yanlış sezme olasılığı spektrum el değiştirme sırasındaki olumsuz etkiyi azaltmak için göz önüne alınmıştır [65].

Wu ve arkadaşları, spektrum giriş izni kontrollü yeni bir el değiştirme tekniği önermişlerdir. Önerilen tekniğe göre, ikincil kullanıcılar kendi aralarında grup oluşturarak birincil kullanıcıların sinyallerini tespit etmektedirler. Spektrum el değiştirme performansını analiz etmek için basit bir Markov modeli kullanılmıştır. Sistemin çıkışında; engel olma olasılığı, zorunlu bitirme olasılığı ve bilişsel radyo

ağının iş çıkarma oranı parametreleri incelenmiştir [66].

Xie ve arkadaşları, ikincil kullanıcıların performansının düşmesine sebep olan tekrarlı spektrum el değiştirme problemini çözmek için çok hücreli spektrum el değiştirme tekniği önermişlerdir [67].

Wang ve arkadaşları tarafından, bilişsel radyo ağlarında en uygun hedef kanal seçimi için en düşük birikimli el değiştirme gecikmesinin nasıl belirleneceği çalışılmıştır. İkincil kullanıcı iletimi sırasında çoklu spektrum el değiştirmeye maruz kaldığında, diğer kullanıcıların yanında ikincil kullanıcı da en uygun hedef kanal seçimi işlemine dahil olmalıdır [53].

Coutinho ve arkadaşları tarafından, birincil kullanıcı tespitinde hataların varlığını göz önüne alan yeni bir spektrum el değiştirme yaklaşımı önerilmiştir. Böylece, spektrum kullanım verimliliği ve birincil kullanıcı girişimi açısından daha iyi bir kanal düzeni sağlanmaktadır [7].

Wang ve Wang, bilişsel radyo ağlarında çoklu spektrum el değiştirmenin kanal verimliliği ve gecikme performansına olan etkisini değerlendirmek amacıyla analitik bir model sunmuşlardır. İkincil kullanıcıların iletişimi sırasında, birincil kullanıcıların sebep olduğu çoklu kesintiler çoklu el değiştirme ile sonuçlanmaktadır. Her bir spektrum el değiştirme işlemi için hedef kanallara karar vererek yarım kalan iletimlere devam etmek amacıyla anlık önceden tanımsız şekilde geniş bant sezme gerçekleştirilmektedir. Bilişsel radyo kullanıcıların kanal kullanım davranışlarını karakterize etmek için PRP M/G/1 kuyruk modeli kullanılmıştır [68].

Zahed ve arkadaşları tarafından, önerdikleri modelin servis süresini değerlendirmek amacıyla öncelikli ve önceden tanımlı el değiştirme karar mekanizması önerilmiştir. Önerdikleri teknik, PRP M/M/1 kuyruk kullanılarak modellenmiştir. Bu tekniğe göre, iletimi kesilen ikincil kullanıcılar diğer ikincil kullanıcılardan daha yüksek önceliğe sahiptirler [69].

Mardeni ve arkadaşları, bilişsel radyo kullanıcılarının lisanslı kanalı birincil kullanıcıya bıraktığı spektrum el değiştirmeye odaklanmışlardır. Bunun yanında, bilişsel radyo kullanıcısı spektrum el değiştirme gerçekleştirmek yerine iletim gücünü ayarlayarak koruma sağlayabilmektedir. Bu şekilde, ikincil kullanıcı sadece iletim gücünü belirli limitlerde ayarlayamadığı durumlarda spektrum el değiştirme gerçekleştirmektedir [29].

Soleimani ve arkadaşları tarafından, bilişsel radyo ağlarında el değiştirme oranını

azaltmayı ve ikincil kullanıcıların toplam iş çıkarma oranını artırmaya dayanan dinamik bir spektrum el değiştirme işlemi önerilmiştir. Gizli Markov Modeli yardımıyla her bir ikincil kullanıcı geçmiş gözlemlere dayanarak birincil kullanıcı aktivitelerini tahmin etmektedir. Bu modele göre, ikincil kullanıcılar herhangi bir çarpışmaya sebep olmadan kanallarını değiştirebilmektedirler [70].

Lertsinsrubtavee ve arkadaşları tarafından, bilişsel radyo ağlarında dinamik spektrum paylaşımı için sezgisel bir yaklaşım önerilmiştir. İkincil kullanıcıların spektrum el değiştirme işleminde belirli bir oranı yakalaması için telafi oranı (rate compensation) kavramı tanımlanmıştır [22].

Park ve arkadaşları tarafından, küme tabanlı bilişsel radyo algılayıcı ağlarda yeni bir olasılıklı spektrum el değiştirme sistemi sunulmuştur. Sistemin başarımını analiz etmek için zorunlu sonlandırma olasılığı ve engel olma olasılığı parametreleri incelenmiştir [71].

Lee ve Yeo, bilişsel radyo ağlarında el değiştirme için; kanal boşluk durumu ve spektrum el değiştirme gecikmesinin kararlı durum (steady-state) analizini sunmuşlardır. Ayrıca; spektrum sezme zamanı, veri iletim zamanı ve birincil kullanıcı sinyallerinin durum geçiş oranları üzerinde çalışmışlardır [21].

Fahimi ve Ghasemi tarafından, bilişsel radyo ağlarında çoklu spektrum el değiştirmenin ikincil kullanıcıların veri iletim zamanını nasıl etkilediği incelenmiştir. Önerdikleri yaklaşımda, lisanslı kanalda birincil kullanıcıların varlığı tespit edildiğinde, spektrum el değiştirme işlemi başlatılarak ikincil kullanıcının iletimi kesilerek kanal birincil kullanıcıya bırakılmaktadır. Yaptıkları çalışmada, spektrum el değiştirme gerçekleşme oranı incelenmiştir ve ikincil kullanıcıların çoklu el değiştirme işlemini ve veri iletim zamanını karakterize etmek için PRP M/G/1 kuyruk modeli kullanılmıştır. İkincil kullanıcı iletim yaptığı sırada bir el değiştirme işlemi gerçekleşirse, el değiştirmeye maruz kalan ikincil kullanıcı diğer ikincil kullanıcılardan daha yüksek önceliğe sahip olmaktadır [10].

Tianwei ve arkadaşları, kapsamlı bir maliyet tabanlı spektrum el değiştirme algoritması önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada, iletim gecikmesi, kanal bant genişliği SNR ve kullanıcı karakteristiği gibi çoklu parametreler bir arada kullanılarak kanal seçimi gerçekleştirilmektedir. Böylece, sistem performansını ölçerken tüm bu faktörler göz önünde bulundurulmaktadır [72].

Zahed ve arkadaşları tarafından, el değiştirme gecikmesini azaltmak için lisanslı ve lisanssız kullanıcıların bir arada bulunduğu öncelikli spektrum el değiştirme karar mekanizması önerilmiştir. Önerilen teknikteki lisanslı kanallar PRP M/M/C kuyruk kullanılarak modellenmiştir. Bununla birlikte, lisanssız kanallar M/M/C tekrarlı öncelik kuyruğu kullanılarak modellenmiştir. Sistemin genel performansını değerlendirmek için el değiştirme ve ikincil kullanıcıların aynı ve farklı önceliklere sahip olduğu durumlar ele alınmıştır [73].

Mahamuni ve arkadaşları, spektrum el değiştirme işlemi algoritmasının tasarımı için spektrum sezme sonuçlarına dayanan gerçek zamanlı deneysel bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşım sayesinde, bilişsel radyo ağlarında el değiştirme mekanizmasının spektrum el değiştirme gecikmesi en aza indirilmiştir [28].

Liu ve arkadaşları tarafından, taşma (overflow) kuyruk teorisine dayanan akıllı bir spektrum el değiştirme stratejisi önerilmiştir. Bu strateji, tüm lisanslı kanallar kullanılıyor durumunda ve değiştirme kuyruğu (switching queue) ikincil kullanıcılarla dolu olduğu durumlarda birincil kullanıcının sisteme entegre olma sorununu çözmeyi hedeflemektedir [26].

NoroozOliaee ve arkadaşları, ikincil kullanıcıların sadece bitişik kanallara el değiştirme gerçekleştirebildiği gerçekçi el değiştirmeyi göz önüne alan bilişsel radyo ağlarının performansını incelemişlerdir. İkincil kullanıcıların zorunlu bitirme olasılığını (forced termination) ve engel olma olasılığını (blocking probability) analiz etmek için sürekli (continuous) Markov modelini kullanmışlardır [74].

Chinh Chu ve arkadaşları tarafından, bilişsel radyo ağlarında öncelikli trafiğin göz önüne alındığı dinamik spektrum erişim tekniği geliştirilmiştir. Geliştirdikleri teknikte; birincil kullanıcılar, birinci sınıf ikincil kullanıcılar ve ikinci sınıf ikincil kullanıcılardan oluşan üç farklı trafik vardır. En yüksek önceliğe sahip olan kullanıcılar birincil kullanıcılardır. Birinci sınıf ikincil kullanıcılar ise ikinci sınıf ikincil kullanıcılardan daha yüksek önceliğe sahiptirler [3].

Zhang ve Yeo, oklu kullanıcı bilişsel radyo ağlarında ardışık sezme tabanlı el değiştirme tekniğini önermişlerdir. İlk önce, her ikincil kullanıcı için uygun aday kanallar seçilmektedir. Sonra, dinamik programlamaya dayanan ardışık sezme sayesinde en iyi spektrum el değiştirme kanalı belirlenmektedir [75].

Sayyadi ve Nourinia, ardışık spektrum sezme tekniğinin modellenmesini ve performans

değerlendirmesini yapmışlardır. Bununla birlikte, iletim fırsatı bulmak için gereken ortalama el değiştirme sayısı üzerine çalışmışlardır [76].

Li ve Liu, işbirlikli spektrum sezme yönteminin sürü optimizasyonu algoritmasına uygulamasını yapmışlardır. Yapay arı kolonisi algoritmasının işbirlikli spektrum sezme yöntemine adapte edilmesi yaptıkları çalışma içerisinde yer almaktadır. Ayrıca, önerdikleri yapay arı kolonisi algoritmasının geleneksel arı kolonisi algoritmasından daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir.

Pradhan, kablosuz ortamda üç farklı evrimsel algoritma ile önceden tanımlı uyum fonksiyonunu optimize etmişlerdir [77]. Üç farklı evrimsel algoritmanın en başında yapay arı kolonisini kullanmışlardır.

Cheng ve Jiang, bilişsel radyo ağlarında spektrum tahsisi için genel bir çerçeve tanımlaması yapmışlardır [78]. Bunun yanında, verimlilik bakımından spektrum tahsisini optimize etmek için yapay arı kolonisinin kullanıldığı bir yöntem önermişlerdir. Benzetim sonuçları ile yapay arı kolonisi algoritmasının genetik algoritmadan daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Ashrafinia ve arkadaşları, bilişsel radyo ağları için düşük karmaşıklığa sahip yapay arı kolonisi tabanlı ve girişime duyarlı güç kontrollü röle tahsis tekniği önermişlerdir [79].

Xinbin ve arkadaşları, OFDM sistemlerde güç ayarlaması için yapay arı kolonisi tabanlı bilişsel radyo ağlarında güç tahsis algoritması önermişlerdir [80].

Ghasemi ve arkadaşları, bilişsel radyo ağlarında yapay arı kolonisi algoritması tabanlı yeni bir kanal tahsis yöntemini önermişlerdir [81]. Önerdikleri algoritmaya göre, arama uzayını daraltmak için kanal tahsis matrisi ve arının konumuna bağlı olarak girişim kısıtlarını kullanmışlardır.

Sultan ve arkadaşları, işbirlikli haberleşme tekniklerinden olan yükseltme ve gönderme tekniği tabanlı bilişsel röle ağı önermişlerdir [82]. Önerdikleri ağ yapısında, girişim gücü kısıtlaması altında ikincil kullanıcıların sinyal gürültü gücü oranını maksimize etmek için bir optimizasyon problemi formüle etmişlerdir. Elde ettikleri optimizasyon problemini yapay arı kolonisi algoritmasını kullanarak çözmüşlerdir. Yapay arı kolonisi algoritması tabanlı yaklaşımın verimliliğini benzetim sonuçları ile de desteklemişlerdir.

Yesil ve arkadaşları, bulanık bilişsel ağlarda haritalama için yapay arı kolonisi algoritmasını kullanmışlardır [83]. Elde ettikleri sonuçlara göre, yapay arı kolonisi

algoritmasının başarımını doğrulamışlardır.

Ghasemi ve arkadaşları, bilişsel radyo ağlarında kanal tahsisi için genel bir model tanımlamışlardır [84]. Buna bağlı olarak, yapay arı kolonisi algoritması ve arı sürüsü optimizasyonu tabanlı yeni ve farklı kanal tahsisi yöntemi önermişlerdir.

Li ve arkadaşları, bilişsel radyo ağlarındaki işbirlikli spektrum sezme işlemi ile toplam fırsatçı iş çıkarma oranını maksimize etmeyi hedeflemişlerdir [85]. Bunun için, ağırlık katsayıları ve karar eşiği olmak üzere iki farklı parametre ile optimizasyon problemi tanımlamışlardır. Optimizasyon problemini geleneksel yapay arı kolonisi algoritması ve tasarlanmış yapay arı kolonisi algoritması ile tasarlayarak başarımlarını test etmişlerdir.

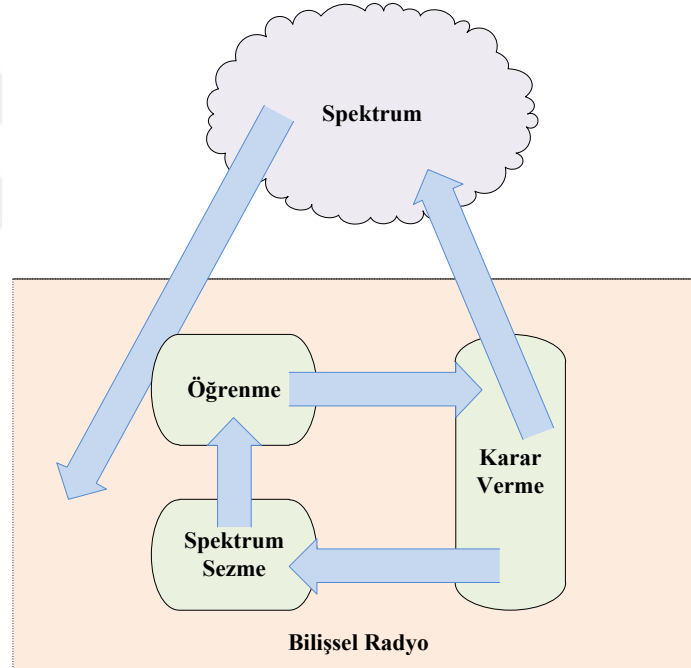
Li ve arkadaşları, adaptif mutasyon mekanizması içeren verimli bir adaptif yapay arı kolonisi algoritması önermişlerdir [86]. Önerilen algoritmayı, bilişsel radyo alanındaki işbirlikli spektrum sezmeye uygulamışlardır. Benzetim sonuçları ile önerilen yöntemin verimliliğini ve güvenilirliğini doğrulamışlardır.

Tez çalışması kapsamında, literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak öne çıkardığımız yenilikler: (i) Bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme işleminin Riverbed yazılımı ile benzetiminin yapılması. (ii) İkincil kullanıcı haberleşmesinde öncelik sınıfları arasında yaşlandırma çözümünün uygulanması. (iii) Büyük boyutlu veriler için kanal birleştirme yaklaşımının kullanılması. (iv) Spektrum el değiştirme işlemi için sezme ve önceden tanımlı yaklaşımların hibrit kullanımı. (v) Spektrum el değiştirme kararı verme süreçlerinde bulanık mantık ve yapay sinir ağından yararlanılması. (v) Spektrum el değiştirme sayısının optimizasyonu için yapay arı kolonisi algoritmasından faydalanılması.

2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARININ TEMELLERİ

2.1. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI

Bilişsel radyo teknolojisi, spektrumdaki boşluklara dinamik olarak erişim olanağı sağlayan teknolojilerden en güncel olanıdır [87]. Bilişsel radyo, çevresi ile sürekli olarak etkileşim halinde olan ve haberleşme parametrelerini dinamik olarak değiştirebilen teknolojik bir sistem olarak ifade edilmektedir [74]. Bu tanımlamadan da anlaşıldığı üzere, bilişsel özelliğe sahip olması ve parametrelerini sürekli olarak değiştirebilmesi bilişsel radyonun başlıca iki özelliği olarak göze çarpmaktadır [71].



Şekil 2.1. Bilişsel radyo sisteminin aşamaları.

Bilişsel radyonun bilişsel olma özelliği; bilişsel radyo alıcı ve vericilerinin çevresindeki spektrumu sezmesi, elde ettiği verileri analiz etmesi ve bu verilere bakarak yapılması gerekenlere karar vermesi olarak tanımlanmaktadır [65]. Bilişsel radyonun aldığı kararların başında, frekans bantlarının kullanımı ve haberleşme tekniğini belirlemek gelmektedir [60]. Bilişsel radyonun bilişsel özelliği, devamlı olarak dinamik bir biçimde çevresini gözlemleyerek uygulanacak en optimum iletişim planlarına karar vermesini sağlamaktadır. Şekil 2.1’de görülen bilişsel radyo sisteminin en temel üç özelliği;

spektrum analizi, spektrum erişimi ve spektrum sezme kararlarından oluşmaktadır.

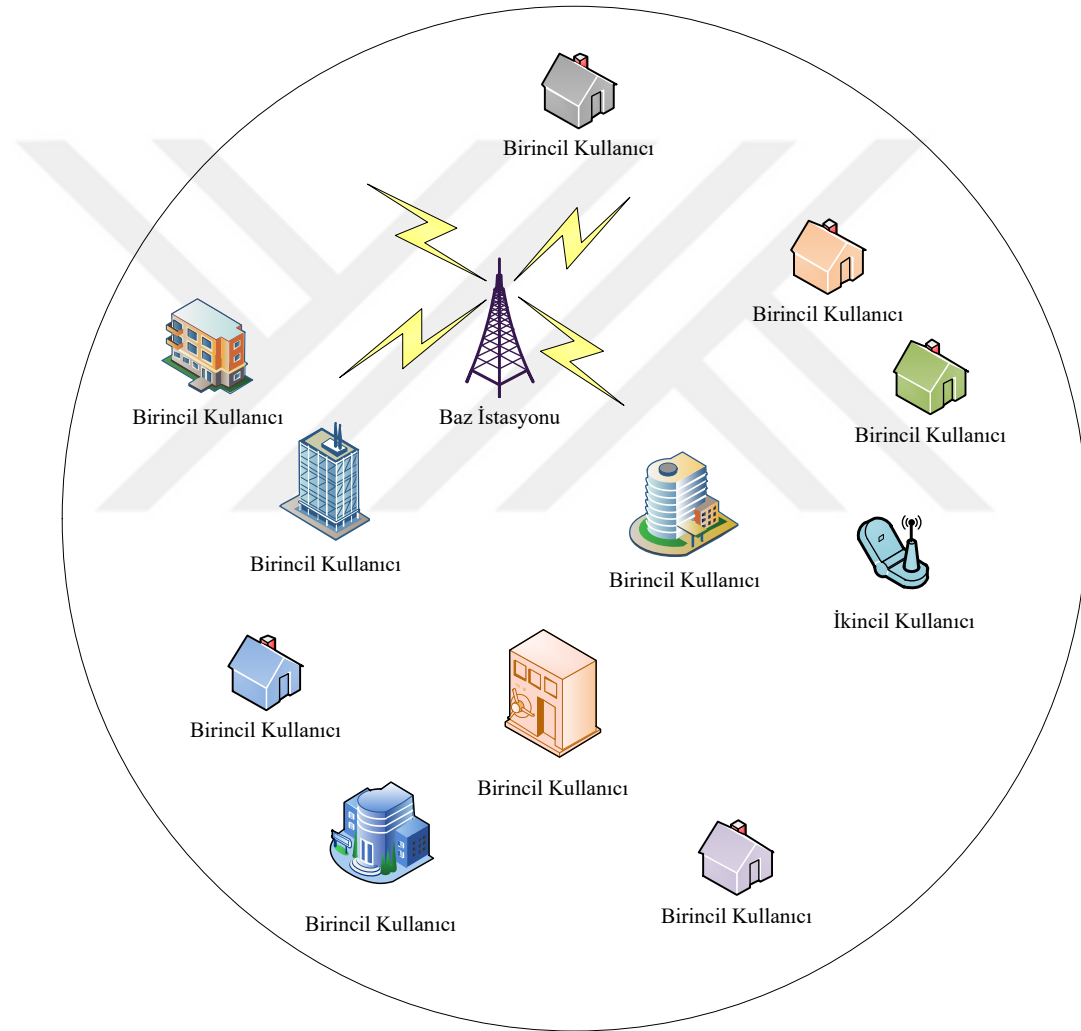
Bilişsel radyonun çeşitli spektrum bantlarındaki radyo iletişimlerinden dolayı oluşan elektromanyetik etkileşimleri ölçmesi yeteneği spektrum sezme olarak ifade edilmektedir. Çevresindeki spektrum kullanım bilgisini sağladığı için, bilişsel radyo sisteminin en kritik fonksiyonu spektrum sezme olarak bilinmektedir. Bilişsel radyo sistemi, hangi spektrumun ne zaman ve ne kadar süre boyunca sezileceği ile ilgili gerçek zamanlı kararlar almalıdır. Toplanan spektrum bilgileri, bilişsel radyonun optimum sonuçlara ulaşmasına yeterli olacak seviyede olmalıdır [39]. Bunun yanında; spektrum sezme, bilişsel radyo ortamındaki anlık değişimleri izleyecek kadar hızlı olmalıdır. Spektrum sezmenin ihtiyaç duyduğu bu tür gereksinimler, bilişsel radyo donanım sisteminin işlem hızı, bant genişliği gibi karakteristiklerinin iyi olmasını zorunlu kılmaktadır [88]. Genel olarak kullanılan spektrum sezme yöntemleri, birincil kullanıcıların aktivitelerine bağlıdır.

Sezilen bilişsel radyo parametrelerine bağlı olarak ortamdaki spektrum boşluklarının tespit edilmesi spektrum analizi olarak nitelendirilmektedir [89]. Belli bir zaman ve spektrumda birincil kullanıcılar tarafından kullanılmayan spektrum bandı spektrum boşluğu olarak ifade edilmektedir. Bilişsel radyo sisteminin son aşamasında, spektrum sezme ve spektrum analizi işlemlerinin çıktılarına göre iletişim faaliyetleri konusunda karar alınmaktadır. Bilişsel radyo; spektrumdaki iletişimlere sağlamak amacıyla alıcı verici parametrelerini tanımlamak için, spektrum boşluklarını hesaba katarak elde edilen bilgilerden faydalanmaktadır [41]. Elde edilen spektrum bilgisi ve alıcı verici yapısına bağlı olarak, bilişsel radyo sistemi diğer iletişimler için yapılandırılacak olan parametrelerin değerlerini hesaplamaktadır.

Bir bilişsel radyo ağ sisteminde, genel olarak bir ikincil ağ ve ortamda birlikte bulunan birincil ağ yer almaktadır [8]. Birincil ağ, belirli bir frekans bandında haberleşmesi için lisansı bulunan mevcut bir ağıdır (Örneğin; GSM, UMTS, WiMAX, vb.). Bu sebeple, birincil ağlar lisanslı ağlar olarak da bilinmektedir. Birincil ağlar, merkezi bir ağ yapısında olabildikleri gibi tasarsız (ad-hoc) olarak dağıtılmış bir şekilde de iletişim gerçekleştirebilmektedirler [24]. Birincil ağda bulunan lisanslı kullanıcılar, sadece birincil ağ yapısına özgü olan lisanslı spektrumlara erişmektedirler [21]. Birincil kullanıcılar, mevcut lisanslı spektrumun yetkili kullanıcıları oldukları için spektruma öncelikli olarak erişim hakkına sahiptirler. Bu sebeple, birincil kullanıcılar hiçbir biçimde ikincil ağ yapısı ile işbirliği içinde bulunmamaktadırlar. Ayrıca, birincil

kullanıcıların haberleşmeleri hiçbir şekilde ikincil kullanıcılar tarafından kesilmemelidir [15].

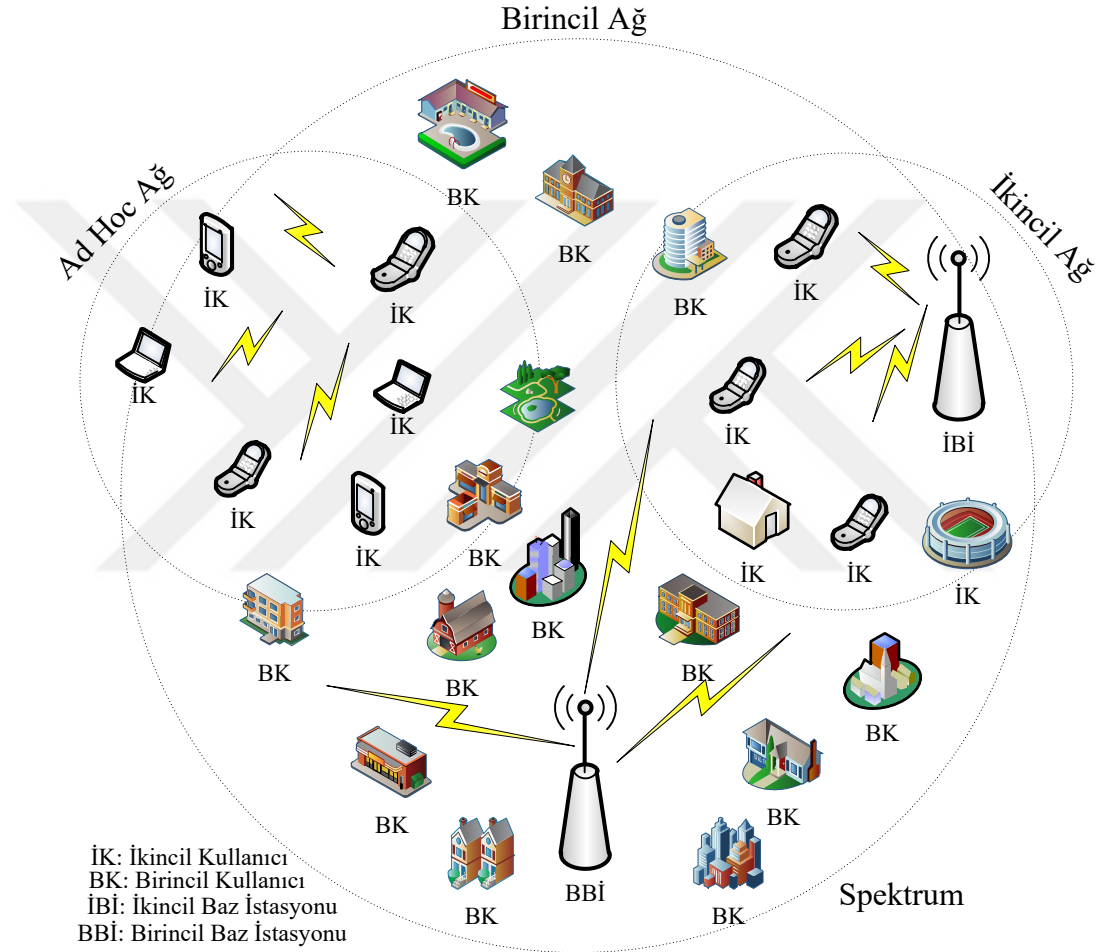
Bununla birlikte, ikincil ağların haberleşme yapmaları için lisansları bulunmamaktadır. Bilişsel radyo ağlarının spektrum erişimi özelliği, ikincil kullanıcıların birincil ağların olduğu spektrumları fırsatçı (opportunistic) bir şekilde kullanmalarına izin vermektedir [1]. İkincil kullanıcılar aynı zamanda lisanssız spektrum kanallarını da kullanabilmektedirler. İkincil ağlar, merkezi bir ağ yapısında olabilirler veya tasarsız olarak da iletişim sağlayabilmektedirler [4].



Şekil 2.2. Kablosuz bilişsel radyo ağ ortamı.

Şekil 2.2’de, merkezi yapıda birincil ağ ve ad hoc ağ yapısında ikincil ağın bulunduğu bir bilişsel radyo ağ ortamı görülmektedir. Merkezi yapıda olan bilişsel radyo ağları, bilişsel radyo erişim noktasının ikincil kullanıcıların haberleşmelerini kontrol ettiği ve düzenlediği ağ yapıları olarak tanımlanmaktadır [5]. Bilişsel radyo erişim noktası,

ikincil kullanıcılar tarafından sağlanan spektrumla ilgili verileri toplayarak lisanslı ve lisanssız spektrum kanalındaki ikincil kullanıcı haberleşmelerini yönetmektedir. Elde edilen verilere göre, bilişsel radyo erişim noktası tüm kullanıcılar için spektrum erişim kararları almaktadır [89]. Merkezi yapıdaki bilişsel radyo ağlarının ilk örneği olarak IEEE 802.22 standardı görülmektedir [6]. IEEE 802.22 standardı, kullanılmayan radyo ve televizyon kanallarında bulunan spektrum boşluklarındaki iletişim tekniğinin özelliklerini ortaya çıkarmaktadır [6].



Şekil 2.3. Bilişsel radyo ağ yapısı.

Şekil 2.3'te, merkezi birincil ağ, ikincil ağ ve ad hoc ağ sisteminin birlikte bulunduğu geniş bir alandaki bilişsel radyo ağ sistemi bulunmaktadır. IEEE 802.22 standardı, merkezi altyapılı bilişsel radyo ağlarının ilk örneğidir [27].

2.1.1. IEEE 802.22 Kablosuz Bölgesel Alan Ağları

TV yayın bantlarının spektrum boşluklarında çalışan bilişsel radyo tekniklerini kullanarak geliştirilen ilk standart IEEE 802.22 standardıdır. IEEE 802.22 ağ sistemleri,

kullanılmayan televizyon frekanslarını geniş alan haberleşmesinin zor olduğu kırsal alanlarda girişim olmayacak bir şekilde ortak kullandırmaktadır. IEEE 802.22 standardı, altyapı tabanlı geniş alan ağlarda fiziksel ve ortam erişim kontrol katmanının fonksiyonlarını tanımlamaktadır. Bu standart kapsamında, erişim noktası bilişsel radyo kullanıcıları arasında iletişimi kontrol altında tutmaktadır. Bu standarttaki fonksiyonlar, dinamik kanal yönetimi esasına göre çalışmaktadır [27].

Kablosuz yerel alan ağları ve ad-hoc ağlar gibi ağlarda, kanal yönetimi sadece kaynak kullanımı ve servis kalitesine bağlıdır. Bilişsel radyo ağlarında ise, kanal yönetimi aynı zamanda birincil kullanıcıların haberleşmesinin güvenliğine de bağlıdır. Birincil kullanıcıları korumak amacıyla yapılan ortam sezme, kanal yönetiminin en önemli özelliklerindendir.

IEEE 802.22 cihazları, televizyon kanallarının özelliklerine bağlı olarak kararlar vermek için bilişsel radyonun yeteneklerinden yararlanmaktadır. Televizyon kanallarının durumu, harici bir veri tabanından elde edilebileceği gibi spektrum sezme yöntemi ile de tespit edilebilmektedir. Toplanan verilere göre, kullanılabilir kanalların listesi tutulmaktadır [50].

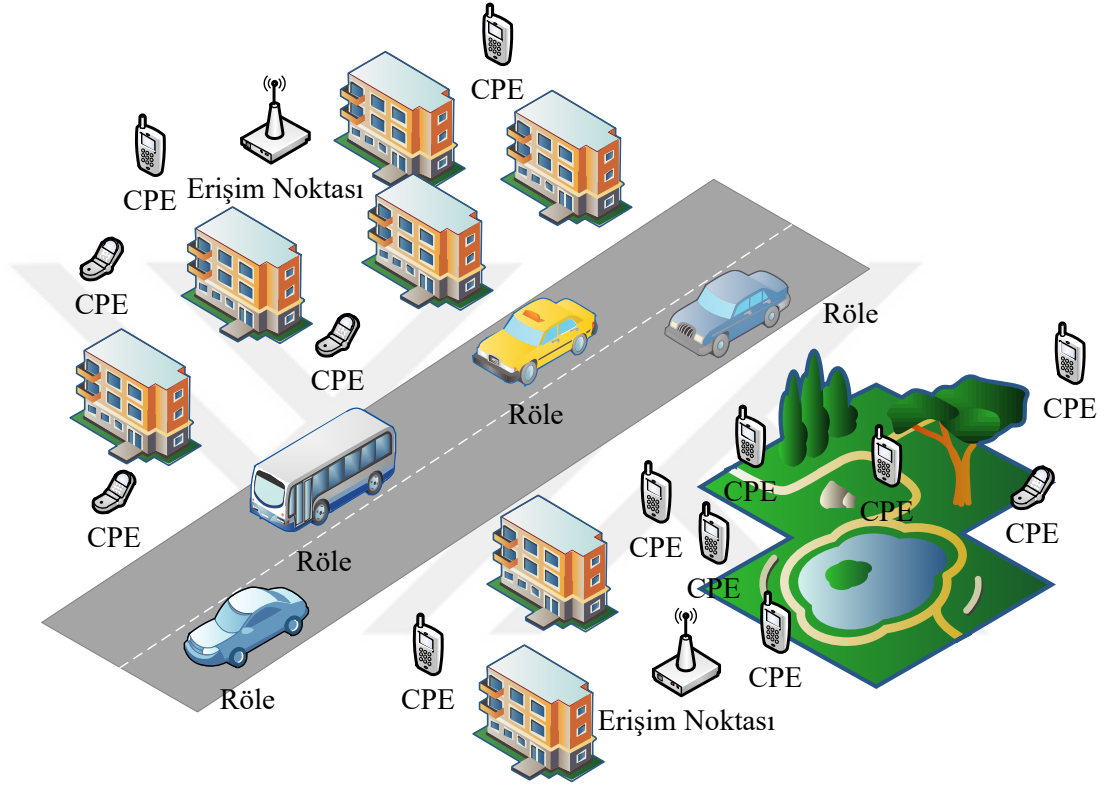
IEEE 802.22 işlemleri için kanal uygunluğu birincil kullanıcıların faaliyetlerine bağlı bir şekilde dinamik olarak değişkenlik gösterebilmektedir. IEEE 802.22 sistemi birincil kullanıcıların haberleşmelerini garanti altına almak amacıyla, kanalı birincil kullanıcı kullanmak istediğinde kullanılmayan bir kanal bulmaktadır. İlgili kanal, IEEE 802.22 cihazı tarafından kullanılmadan önce, göz önünde bulundurulması gereken birden fazla durum vardır. Bir kanal kararı verilmeden önce, IEEE 802.22 bölgesel alan ağ sistemi bilişsel radyo işlemleri için kullanılabilir olan kanalların listesine ihtiyaç duymaktadır [27].

IEEE 802.22 sisteminde hem erişim noktasının hem de bilişsel radyo kullanıcılarının birincil kullanıcıları tespit etmelerine karşın, kanal yönetimi kararları sadece erişim noktası tarafından alınmaktadır.

2.1.2. IEEE 802.11af Standardı

Günümüzde, spektrum bantları hem lisanslı hem de lisanssız olarak hizmet vermektedir. Sabit spektrum tahsisleri, kablosuz cihazlardaki artışı desteklemek için kullanılan kaynakları sınırlandırmaktadır [13].

IEEE 802.11af, lisanssız beyaz boşluk cihazları (WSD) ve TV beyaz boşluk bantlarını kullanan lisanslı servisler arasında spektrum paylaşımı için uluslararası standartları belirlemektedir [13], [19]. Spektrum paylaşımı, bir nesnenin coğrafi konumunu tutan veri tabanı (GDB) tarafından lisanssız WSD'ler aracılığıyla yapılır [13]. IEEE 802.11af standardı, WSD cihazları için ortak bir işletim mimarisi ve mekanizması sağlamaktadır [19]. Cihazların açıklamaları Çizelge 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.4. IEEE 802.11af ağ ortamı.

Şekil 2.4'te görülmekte olan kullanıcılar müşteri öncül ekipman (CPE) olarak isimlendirilmektedirler. IEEE 802.11af protokolü, IEEE 802.11 protokolünün iyileştirilmiş biçimidir [13]. Bu protokolde, TV beyaz boşluklarını paylaşmak için bilişsel radyo tabanlı erişim noktası (AP) ve istasyon (STA) bulunmaktadır [19].

IEEE 802.11af sistemi; sabit (fixed), yetki veren (enabling) ve bağımlı (dependent) olmak üzere üç farklı STA'dan oluşmaktadır. Sabit STA ve yetki veren STA kayıtlı konumlarını yayımlayan kayıtlı STA'lardır. Yetki veren STA'nın, kayıtlı olmayan bir STA'ya (örneğin; bağımlı STA) yetki verme izni vardır. Yetki veren STA, mevcut kanal bilgilerini TV beyaz boşluk veri tabanından alır ve bağlantı doğrulama sinyali (CVS) gönderir. CVS, hem bağımlı STA'ların yetki veren STA'nın kapsama alanı içinde

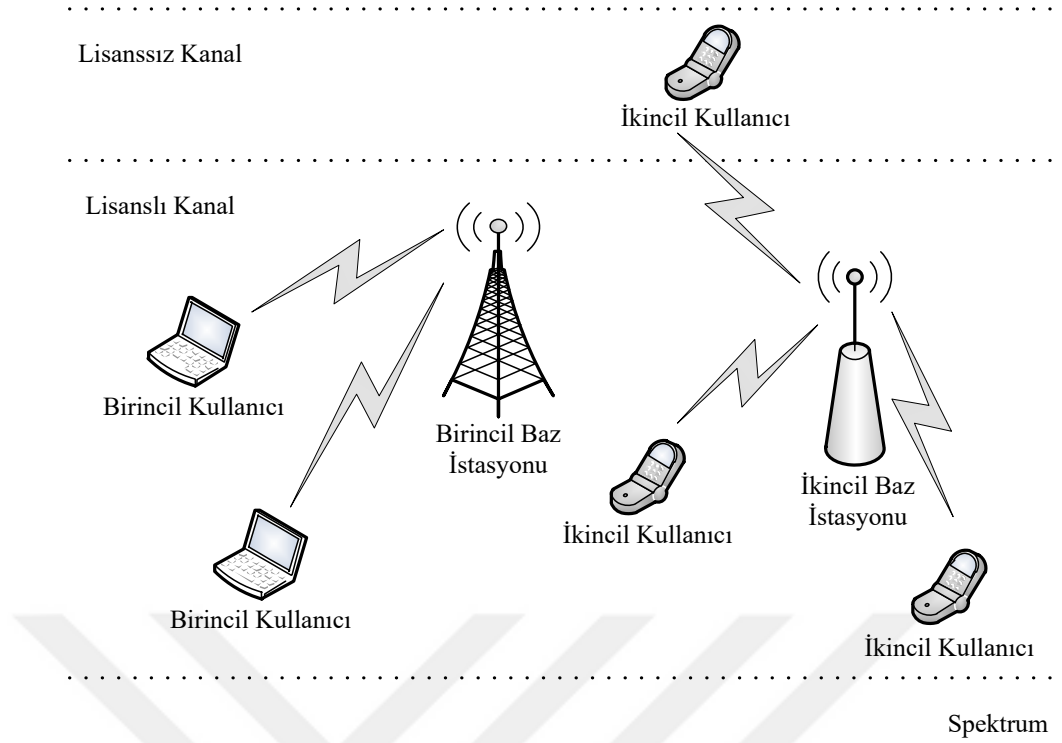
olduğunu saptamak hem de mevcut kanal listesini doğrulamak için kullanılır [13]. Dinamik istasyon yetkilendirmesi (DSE), bağımlı STA'lara, yetki veren STA'nın kontrolü altında mevcut TV kanallarını kullanmasına izin verir [49]. Ek olarak; kanal güç yönetimi (CPM), mevcut kanal listesini güncellemek için kullanılmasının yanında iletim gücü, bant genişliği ve kanal frekansını değiştirmek için de kullanılmaktadır [13]. IEEE 802.22 sisteminde hem erişim noktasının hem de bilişsel radyo kullanıcılarının birincil kullanıcıları tespit etmelerine karşın, kanal yönetimi kararları sadece erişim noktası tarafından verilebilmektedir.

Çizelge 2.1. IEEE 802.11af protokolündeki cihazlar.

Cihaz	Açıklama
WSD	White space devices (Beyaz boşluk cihazları)
GDB	Geolocation database (Coğrafi konum veritabanı)
CPE	Customer premises equipment (Müşteri öncül ekipman)
AP	Access point (Erişim noktası)
STA	Station (İstasyon)
CVS	Contact verification signal (Bağlantı doğrulama sinyali)
DSE	Dynamic station enablement (Dinamik istasyon yetkilendirmesi)
CPM	Channel power management (Kanal güç yönetimi)

2.2. SPEKTRUM YÖNETİMİ

Bilişsel radyo ağlarında, birincil ve ikincil kullanıcılardan oluşan iki farklı kullanıcı grubu vardır. Birincil kullanıcıların, bilişsel radyo ağlarında kullandıkları spektrum bandı için lisansları bulunmaktadır. Bu sebeple, birincil kullanıcılar lisanslı kullanıcılar olarak da bilinmektedirler [42]. İkincil kullanıcıların, kullandıkları spektrum için herhangi bir lisansları yoktur. Bu sebeple, spektrumu ortamda birincil kullanıcılar olmadığında kullanabilirler. İkincil kullanıcılar, bilişsel radyo kullanıcıları ya da lisanssız kullanıcılar olarak da isimlendirilmektedirler. Şekil 2.5'te lisanssız ve lisanslı spektrumların birincil ve ikincil kullanıcılar tarafından kullanıldığı gösterilmektedir. Birincil ve ikincil kullanıcılar baz istasyonları yardımı ile iletişim kurmaktadır. Birincil kullanıcılar kendilerine ait olan lisanslı kanallarda iletişim sağlarken, ikincil kullanıcılar lisanssız veya lisanslı kanallarda iletişim kurabilmektedirler.



Şekil 2.5. Bilişsel radyo ağlarında spektrum yönetimi.

Gönderici tespiti tekniği, ikincil kullanıcıların gözlemleri aracılığıyla birincil göndericilerin zayıf sinyallerinin tespit edilmesi esasına dayanmaktadır. Eşlemeli filtre tespiti tekniği, enerji tespiti tekniği ve özellik tespiti tekniği olmak üzere üç farklı gönderici tespiti tekniği vardır [90]. Birincil kullanıcının sinyal bilgisi, bilişsel radyo kullanıcıları tarafından bilinirse en optimum tespit etme tekniği eşlemeli filtre tekniğidir. Alıcı olan kullanıcı, birincil kullanıcı sinyali ile ilgili yeterli bilgiye sahip değilse en uygun tespit etme tekniği, enerji tespiti tekniği olarak bilinmektedir [44]. Özellik tespiti yönteminde, modüle edilen sinyallerin periyodik olarak özellikleri çıkarılmaktadır. İşbirlikçi tespit etme tekniği girişim olasılığını düşürmesiyle birlikte spektrumdaki boşlukları tespit etmenin en iyi yolu bilişsel radyo ağı kapsama alanında veri alıp gönderen lisanslı kullanıcıların saptanmasıdır. Televizyon alıcılarının tespitinde genel olarak bu yöntem kullanılmaktadır [45]. Genel olarak, girişim alıcı tarafta güç yöntemi ile ve bireysel gönderici düğümlerin konumu ile kontrol altında tutulabilmektedir. Girişim sıcaklık sınırının doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça zor olmasına rağmen, bu model spektrum sezme için oldukça uygundur.

Spektrum sezme tekniklerini incelemek için, araştırılması gerekli olan birden fazla konu vardır. Birincil ve ikincil ağlar arasında herhangi bir etkileşim olmadığı için, ikincil kullanıcılar birincil kullanıcıların konumu ile ilgili net bir bilgiye sahip değildir. Bu

sebeple, yakında bulunan birincil kullanıcıların girişim sıcaklığını ölçmek veya tahmin etmek amacıyla yeni yöntemlere ihtiyaç vardır. Çok sayıda birincil ve ikincil kullanıcıdan oluşan çok kullanıcıli ağlarda, spektrum boşluklarını sezme ve girişimleri tahmin etmek oldukça güçtür. Bu nedenle, spektrum sezme fonksiyonları çok kullanıcı barındıran ortamları dikkate alarak tasarlanmalıdır.

Sezme işlemi paket iletimi anında yapılamamaktadır. Bu yüzden, ikincil kullanıcılar sezme işlemi boyunca iletişimlerine ara vermek durumundadır. Bu olay, spektrum verimlilik oranını düşürmektedir [46]. Bu sebeple, spektrum verimlilik oranı ve sezme doğruluğu arasında denge kurmak oldukça önemlidir. Diğer yandan, sezme süresi doğrudan iletişim performansını etkilediği için, belli bir sezme doğruluğunda sezme süresinin optimuma getirildiği spektrum sezme teknikleri tasarlanmalıdır.

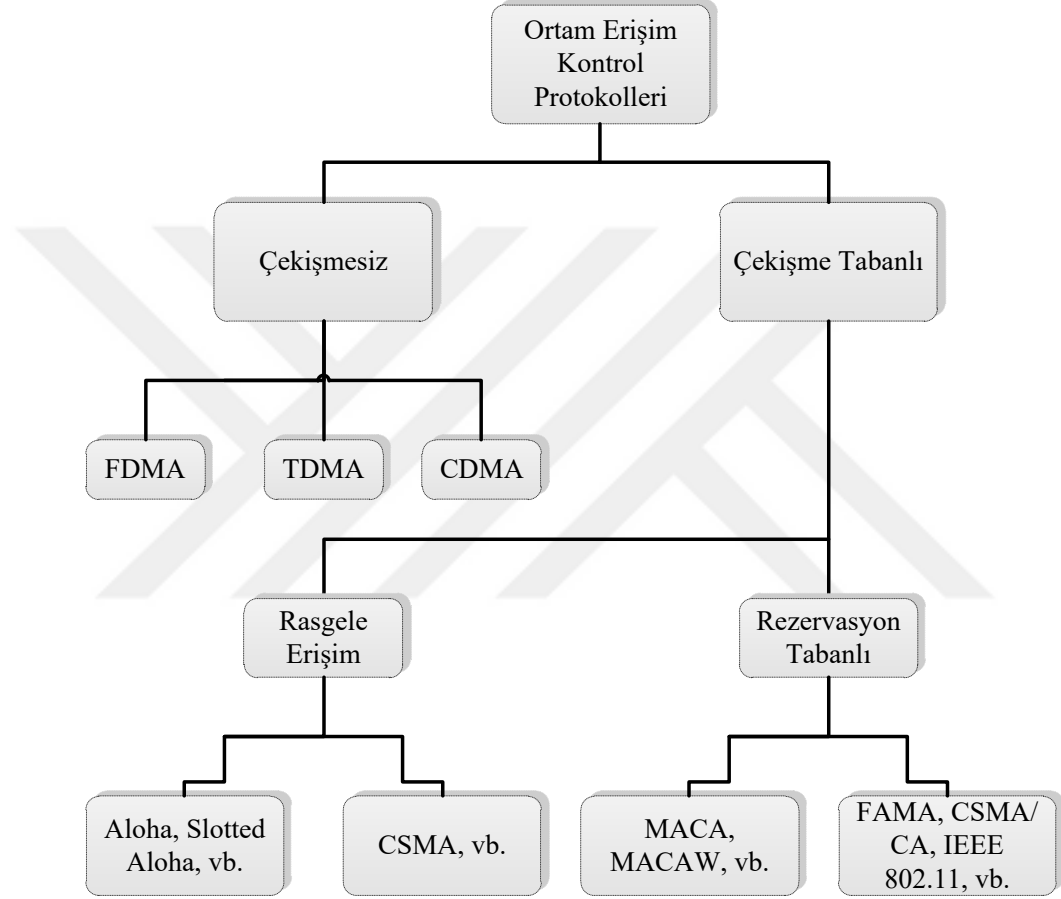
Bilişsel radyo ağları, uygulamaların hizmet kalitesi ihtiyaçlarına göre mevcut spektrum bantları içerisinde hangi spektrum bandının optimum olduğunu tespit etme yeteneğine sahiptir. Spektrum karar mekanizması, lisanslı kullanıcıların işlemleri ve kanal özellikleri ile oldukça yakından bağlantılıdır. Spektrum karar aşaması geleneksel olarak iki adımdan meydana gelmektedir [91]. İlk olarak, spektrum kanalının özellikleri hem lisanslı ağların istatistik bilgilerine göre hem de ikincil kullanıcıların gözlemlerine bakılarak tespit edilir. Sonrasında, en uygun spektrum kanalı bu özelliklere bakılarak elde edilir.

Kablosuz spektrum kanallarının yapısı, ikincil kullanıcılar arasında bir haberleşme düzenlemesinin yapılması gereğini ortaya çıkarmaktadır. Bu kanalların özellikleri açısından, spektrum paylaşım aşaması ortam erişim kontrol protokolünün karakteristikleriyle ilişkilidir [92]. Birincil kullanıcılar ile ikincil kullanıcıların aynı ortamda birlikte bulunması ve geniş aralıktaki mevcut spektrum bantları vb. bilişsel radyo ağlarının farklı karakteristikleri spektrum paylaşımı için bazı zorluklar oluşturmaktadır.

Bilişsel radyo optimum kullanılabilir spektrumu bulduktan sonra, bulunan spektrumdaki birincil kullanıcı aktivitesi ikincil kullanıcıların spektrum bandını değiştirmesini zorunlu kılmaktadır [35]. Spektrum hareketliliği, kablosuz bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme olarak ortaya çıkan farklı bir çeşit el değiştirme işlemi meydana getirmiştir.

2.3. ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLLERİ

Kablosuz bilişsel radyo ağlar için geliştirilen çeşitli MAC şemaları sınıflandırılabilir. Çekişmesiz protokollerde (örneğin, TDMA (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim), FDMA (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim), CDMA (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)), bazı atamalar çekişmeleri önlemek için kullanılır. Diğer yandan, çekişmeli protokoller, iletilen verinin çarpışma riskinin farkındadır [93]–[95].



Şekil 2.6. Ortam erişim kontrol protokollerinin sınıflandırılması.

Çekişmesiz MAC protokolleri statik veya merkezi kontrol sistemine sahip ağlara ve çekişme tabanlı MAC protokolleri de dinamik yapıdaki ağlara uygulanabilir oldukları için bu çalışmada hem çekişme tabanlı hem de çekişmesiz MAC protokolleri ele alınmıştır. Şekil 2.6’da, ortam erişim kontrol protokollerinin sınıflandırılması görülmektedir.

ALOHA gibi rasgele erişim tabanlı protokollerde, bir düğüm hazır olur olmaz kanala erişebilir. Doğal olarak, aynı anda birden fazla veri iletimi olabileceği için çarpışmalar meydana gelebilir. Bu yüzden, ALOHA düşük sistem yükü altında daha uygundur ve

nispeten düşük iş çıkarma oranı sunmaktadır [34]. ALOHA protokolünün bir varyasyonu olarak adlandırılan slotted-ALOHA, TDMA yapısına benzer senkronize iletim hatlarına sahiptir. Bu durumda, düğümler sadece bir zaman diliminin başlangıcında iletim yapabilirler [96]. Pure-ALOHA ile karşılaştırıldığında zaman senkronizasyonu maliyeti ile iş çıkarma oranı iki katına çıkar. CSMA tabanlı protokoller paket çakışması olasılığını azaltmakta ve verimi artırmaktadır [97].

CSMA protokolünde gizli terminal ve maruz-kalan terminal problemlerini çözmek için araştırmacılar birçok çekişme tabanlı protokol üzerinde çalışmalar yaptılar [94], [95], [98]. Bazı protokoller RTS (Gönderme İsteği) / CTS (Ortam Temiz Mesajı) yapısı ile paketleri kontrol ederek çarpışmaları önlemeyi hedeflediler. MACA (Çoklu Erişim Çarpışmadan Kaçınma) ve MACAW (MACA Kablosuz Ağ), taşıyıcı sezme ve kontrol paketleri kullanan yapılardandır.

MAC protokollerini ayırtıran önemli etkenlerden biri, veri trafiğini göndericinin ya da alıcının başlatmasıdır. Yukarıda da bahsedildiği üzere, dinamik atama yaklaşımı veri gönderiminden önce bir çeşit rezervasyon yapma işlemi gibidir. Eğer rezervasyon işlemini veri göndermek isteyen düğüm yaparsa, buna gönderici başlatmalı protokol adı verilir. Birçok protokol gönderici başlatmalı olarak çalışmaktadır [99]–[102]. Alıcı başlatmalı protokollerde, alıcı düğüm muhtemel gönderici düğümler arasından bir düğüm seçer. Eğer gönderici düğümün gönderecek bir verisi var ise, seçildikten sonra veri gönderimine izin verilir. MACA-BI (MACA-Davet ile) ve RI-BTMA (Alıcı Başlatmalı - Meşgul Tonlu Çoklu Erişim) bu protokollere örnektir. Daha sonra da göreceğimiz üzere MACA-BI protokolü MACA protokolünden biraz daha iyi performans sergilemektedir [100].

Diğer bir sınıflandırma, veri gönderimi için kullanılan kanal sayısına dayanmaktadır. Tek kanallı protokoller gönderim için rezervasyon uygulamalar ve daha sonra aynı kanal ya da frekansı kullanarak verilerini gönderirler [103]–[105]. MAC protokollerinin çoğunluğu tek kanal kullanmaktadır. Çoklu kanal protokolleri alıcı ve verici düğümlerin oturumlarını yönetmek için birden daha fazla sayıda kanal kullanırlar. FCC (Federal Haberleşme Komisyonu) ISM bandını kullanan bütün radyolar için DSSS (Direkt Sıralı Geniş Spektrum) veya FHSS (Frekans Atlamalı Geniş Spektrum) protokollerini kullanmaya zorlamaktadır. Bazı MAC protokolleri frekans atlamalı teknikler aracılığıyla çoklu kanal kullanımı için geliştirilmişlerdir [104]. HRMA (Atlama - Rezervasyon Çoklu Erişim) protokolü buna örnek olarak verilebilir. Bazı diğer

protokoller ise gönderilen veriyi korumak için ayrı kanallarda özel kontrol sinyalleri kullanırlar.

Daha önce de bahsedildiği üzere, ağın tüm katmanlarında enerji etkili protokoller elde etmek için düşük güç tüketen cihazlar önemli hale gelmektedir. Enerji tabanlı MAC protokolleri geliştirmek için birçok çalışmalar halen sürdürülmektedir. Diğer bir sınıf MAC protokolleri ise yönlü antenler kullanmaktadırlar [106]–[109]. Bu yöntemin avantajı bütün sinyallerin tek bir yönde gönderilmesidir. Diğer yönlerdeki düğümler, girişimlere ve çarpışma etkilerine duyarlı değildir.

Genel olarak, düğümler arasındaki bağlantılar çift yönlüdür ancak, bazı durumlarda MAC protokolleri tarafından özel işlem gerektiren farklı uygulamalara da ihtiyaç duyulmaktadır. Tek yönlü bağlantılar üzerine de birçok çalışmalar yapılmıştır. Bilişsel radyo ağların gün geçtikçe artan popüleritesine bağlı olarak, kullanıcılar belli seviyede QoS beklemektedirler. Bunlardan bazıları; uçtan uca gecikme, kullanılabilir bant genişliği, paket kayıp olasılığıdır [109]–[111]. Bununla birlikte; merkezi kontrol olmaması, sınırlı bant genişliği kanalları, düğüm hareketliliği, güç ve işlevsel kısıtlılıklar gibi kablosuz ortam sorunları bilişsel radyo ağlarda etkili bir QoS sağlamayı zorlaştırmaktadırlar. MAC protokolü, bir düğümden diğer düğüme ne kadar güvenli ve etkili veri transfer edilebileceğiyle ilgilendiği için ağın QoS parametresini doğrudan etkilemektedir. Literatürde, birçok QoS-tabanlı MAC protokolü önerilmiştir.

Yukarıda sınıflandırılan protokoller tamamen birbirinden bağımsız değildir. Bir MAC protokolü birden fazla kategoriye ait olabilmektedir [112]–[114]. Örneğin, PAMAS (Enerji Tabanlı Çoklu Erişim Kontrol - Sinyal ile) hem bir enerji tabanlı protokol hem de iki kanal kullanmaktadır. Benzer olarak, RI-BTMA hem alıcı başlatmalı hem de iki kanal kullanan MAC protokolleridir.

2.3.1. Çekişme Tabanlı Protokoller

MACA (Çoklu Erişim Çarpışma Kaçınma) protokolü, CSMA ailesindeki protokollerin karşılaştığı gizli ve maruz kalan terminal problemlerini çözmek için önerilmiştir [95]. MACA protokolünde önemli olan nokta, RTS paketini duyan komşu düğümler ilgili CTS paketinin işlemi bitene kadar gönderimlerini ertelemek zorunda kalırlar. Ayrıca, CTS paketini duyan komşu düğümler de beklenen veri paketinin uzunluğu kadar erteleme yaparlar.

IEEE 802.11 MAC protokolü, iki farklı MAC protokolü modu üzerinde

yoğunlaşmaktadır. Bunlar, kablosuz bilişsel radyo ağlar için DCF (Dağıtık Koordinasyon Fonksiyonu) ve merkezi altyapılı ağlar için PCF (Nokta Koordinasyon Fonksiyonu) modlarıdır [103], [105], [115]. IEEE 802.11 DCF modu, CSMA ve MACA protokollerinin karması olan CSMA / CA yapısına dayanmaktadır. Veri iletimi için, RTS-CTS-DATA-ACK yapısını kullanmaktadır. Sadece fiziksel taşıyıcı sezme değil, aynı zamanda sanal taşıyıcı sezme mekanizmasını da kullanmaktadır. Bu sistem her bir düğüm tarafından NAV (Ağ Tahsis Vektörü) formunda uygulanmaktadır [116]. NAV ortamın diğer gönderimlerden dolayı ne kadar süre boyunca meşgul olduğunu belirlemek için kullanılır. Her bir paket, kalan gönderim süresi için bilgi tuttuğundan dolayı sürekli olarak NAV tablolarını günceller [117].

MACA-BI (Çoklu Erişim Çarpışma Kaçınma-Davet ile) gibi tipik gönderici başlatma protokollerinde, gönderici düğümün RTS paketini gönderdikten hemen sonra CTS almak için alıcı moda geçmesi gerekmektedir. Paket alışverişleri, zaman kaybından dolayı toplam iş çıkarma oranını düşürmektedir. MACA-BI, gönderici-başlatmalı protokoldür ve kontrol paketi alışverişlerini azaltmaktadır [95]. Kanal erişimi için gönderici beklemesi yerine, MACA-BI alıcının göndericiyi veri iletimi için davet etmesi prensibine dayanmaktadır. İlgili yaklaşımda RTS / CTS paketleri yerine RTR (Almak için Hazır) paketi kullanılmaktadır [100]. Bu yüzden, MACA protokolündeki RTS – CTS – DATA üçlü paket alışverişi yerine RTR – DATA ikili paket alışverişi yapılmaktadır.

GAMA-PS (Grup Tahsis Çoklu Erişim-Paket Sezme ile) hem çekişme tabanlı hem de çekişme tabanlı olmayan yöntemlerin özelliklerini taşımaktadır. Kablosuz kanalı bir dizi dilimlere böler. Her bir dilim, çekişme ve grup gönderimi için iki bölüme ayrılır. Grup gönderim bölümü kendi içinde gönderim periyotlarına ayrılrsa da, GAMA-PS farklı düğümler arasında zaman senkronizasyonu gerektirmemektedir. Kanala erişim için rezervasyon yapmak isteyen düğümler RTS / CTS algoritmasını uygularlar. Bununla birlikte, düğüm sadece tüm paketi algıladığında geri çekilme yapar [114], [118]–[120]. Yalnız başına taşıyıcı sezme, geri çekilme için yeterli sebep değildir.

PAMAS (Güç Tabanlı Ortam Erişim Kontrol Protokolü-Sinyal ile) protokolünde, RTS / CTS gibi kontrol paketleri iletimi ayrı bir sinyal kanalı üzerinden yapılmaktadır ve veri gönderimleri için ayrı bir kanal mevcuttur [107]. Veri paketi alınırken, hedef düğüm sinyal kanalı üzerinden meşgul mesajı yayımlar. Düğümler sinyal kanalını dinleyerek ne zaman alıcı-verici güçlerini düşürecekleri hakkında bilgi sahibi olurlar. Güçleri düşürme

veya düşürmeme konusunda, iş çıkarma oranını da hesaba katarak her bir düğüm kendi kararını verir [121]–[124]. Bir düğüm, gönderecek verisi olmadığında veya komşu düğümleri iletim yaparken enerji tüketmezler. Bir düğüm ayrıca, komşu düğümlerden birisi veri gönderiyorsa ve diğeri veri alıyorsa gücünü kapatır.

IEEE 802.11 DCF modu zamanın belli senkronize dilimlere bölündüğü güç koruma mekanizmasına sahiptir. Her bir dilimin başlangıcında, her bir düğüm belirli bir süre boyunca uyanık olmak zorundadır [99]–[101]. DPSM (Dinamik Güç Koruma Mekanizması) mekanizması, gönderim için hazır olan paketleri alıcı düğümlere duyurur. Duyurular çerçeveler aracılığıyla yapılır ve ACK paketleri ile geri bildirim işlemi yapılır.

Bundan önceki yaklaşımlarda düğümler için uykuda ve uyanık olma güç kontrol mekanizmaları kullanılmaktadır. PCM (Güç Kontrol-Ortam Erişim Kontrolü) mekanizmasında, RTS ve CTS paketleri mümkün olan en yüksek güçlerle gönderilmesine karşın ACK ve veri paketleri en düşük güçlerle gönderilmektedir [103].

PCMA (Güç Kontrollü Çoklu Erişim), gönderici iletim gücünü kontrol etme esasına dayanmaktadır. Böylece, alıcının tek yapması gereken paketi çözmektir. Bu durum diğer komşu düğümlerle oluşabilecek girişimleri engellemeye yardımcı olur. PCMA iki kanal kullanmaktadır [105]–[108]. Bunlardan biri, meşgul olduğunu bildiren mesaj kanalı, diğeri ise veri ve kontrol paketlerinin aktarımı için kullanılan kanaldır. PCMA mekanizmasındaki güç kontrolü, sadece batarya ömrünü artırmak için değil aynı zamanda kanal verimliliğini artırmak için de kullanılır. Bu yüzden, alıcı ve verici için önemli olan mesele alıcının paketi çözebileceği minimum güç seviyesini belirlemek ve girişimlerden ayırt etmektir. Ayrıca, alıcı gürültü toleransını bildirmek zorundadır ki diğer potansiyel göndericiler onun alım işlemine girişimde bulunmasın.

Tek paylaşımlı kanal protokollerinin en büyük sorunu, düğümler arttıkça çarpışma olasılığının artmasıdır. Bu sorunu çözmek için çoklu kanal yaklaşımlar kullanmak gerekmektedir. Sınıflandırmada da görüldüğü üzere, bazı çoklu kanal stratejileri paket kontrolü için ayrı bir kanal ve veri transferi için ayrı bir kanal kullanmaktadır [114]. Kontrol kanalında sadece meşgul mesajı yayınlanmaktadır. Küçük bir bant genişliği sayesinde, düğümler devam eden bir iletim olduğunun farkına varmış olurlar.

RTS / CTS değişimini baz alan protokollerde, bu paketlerin dahi çarpışma yaşayabileceği göz önüne alınmalıdır. Böylece, gizli terminallerin varlığı durumunda

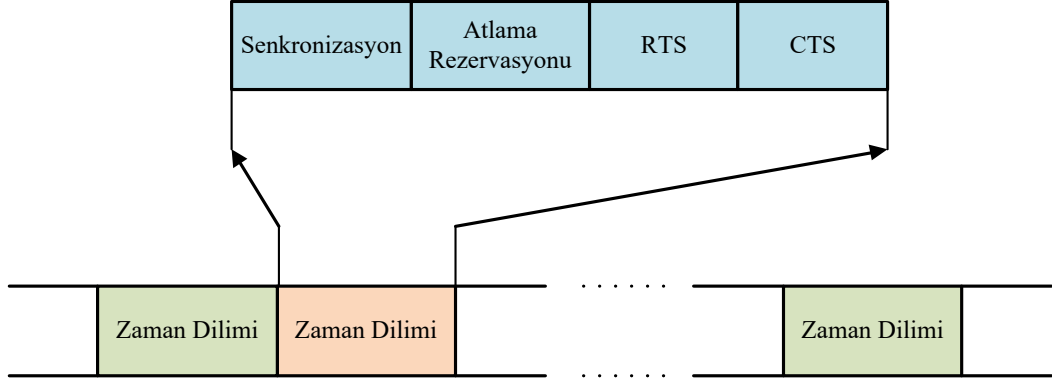
ardışık veri paketlerinin çarpışma olasılığı vardır. DBTMA (Çoklu Meşgul Mesajı-Çoklu Erişim), bant dışı sinyal kullanımı ile gizli ve maruz kalan terminal problemlerini etkili bir şekilde çözmektedir. Veri iletimi de, tek paylaşımlı kablosuz bir kanal üzerinden yapılmaktadır [95], [98], [99]. Bu protokol, BTMA (Meşgul Mesajı Çoklu Erişim) ve RI-BTMA protokolleri üzerine kurulmuştur.

Çok kanallı CSMA protokolü, toplam bant genişliğini N kanala bölmektedir. Burada N, ağdaki düğüm sayısından daha düşük olabilmektedir. Ayrıca, kanalların FDMA veya CDMA tabanlı olması mümkündür. Bir verici, son kullanılan kanalın boş olup olmadığını öğrenmek için algılama taşıyıcı kullanır [121]. Boş bulursa, son kullanılan kanalı kullanır. Aksi takdirde, başka bir boş kanal rasgele seçilir. Hiç boş kanal bulunamazsa, düğüm geri çekilme yapar ve daha sonra tekrar dener. Her düğüm, son kullanılan kanal yerine sadece rasgele yeni bir kanal tercih etme eğiliminde olduğu için, trafik yükü yüksek olduğunda yeterli kanal mevcut değilse bile, çarpışma olasılığı biraz azalır.

HRMA (Atlama Rezervasyonu Çoklu Erişim), ISM bandında FHSS radyo bandına dayalı etkin bir MAC protokolüdür [102]. Daha önceki protokollerde, veri paketlerinin ortasında frekans atlamalı radyo gerektiren etkili CDMA elde etmek için frekans atlamalı kanal modeli ele alınmıştır. HRMA, tüm paketin aynı atlama kanalından gönderildiği FHSS sisteminin zaman dilimleme özelliklerini kullanmıştır. HRMA, hiçbir taşıyıcı algılama gerektirmeyen ortak bir frekans atlamalı kanal kullanır. Ayrıca, düğümlere diğer düğümlerden müdahale olmaksızın iletişim için bir RTS-CTS değişimiyle frekans atlama rezervasyonu sağlar. Şekil 2.7’de, senkronizasyon sırasında tüm düğümler birbirleriyle senkronize olmaktadır. Atlama rezervasyonu, CTS ve RTS dilimlerinde ise, atlama işlemini gerçekleştirmektedirler.

MMAC (Çoklu Kanal Ortam Erişim Kontrol), çoklu kanal kullanmak için DCF yönteminin bir uyarlamasıdır. DPSM protokolüne benzer şekilde, zaman birden fazla sabit aralıklara ayrılmıştır. Her aralığın başlangıcında küçük çekişme penceresi vardır. Bu aralık boyunca, çekişme paketleri düğümler arasında değiştirilir. Böylece, pencere sırasında sonraki zaman dilimlerinin kullanımı için uygun bir atama koordinesi yapılır [95], [98], [99]. Diğer çok kanallı farklı protokollerin aksine, MMAC sadece bir alıcı verici gerektirmektedir. Her işaret aralığının başında, her düğüm çekişme paket alışverişi yapan ortak bir senkronizasyon kanalı için ayarlama yaparak bütün diğer düğümlerle senkron hareket ederler. Bu zaman diliminde, hiçbir veri paketi iletimine

izin verilmez. Ayrıca, her düğüm kendi iletim aralığındaki kanalların kullanımı ile ilgili PCL (Tercih edilen Kanal Listesi) saklar ve aynı zamanda bu kanallar için öncelikleri belirler.



Şekil 2.7. HRMA protokolünün zaman dilimi ve çerçeve yapısı.

DCA-PC (Dinamik Kanal Atama-Güç Kontrol), DCA protokolünün güç kontrolü konusunu ele alan bir uzantısıdır. Bu protokol, gezgin ağlar bağlamında güç kontrolü ve çok kanallı ortam erişim kavramlarını birleştirir. Düğümler, gerektiğinde dinamik kanallara atanabilirler. Her düğüm, iki yarım çiftli alıcı ile donatılmıştır. DCA-PC, bant genişliği kontrol kanalı ve birden çok veri kanalına bölünmüştür. Bir alıcı verici kanalı, güç kontrolü ile veri alışverişi yapmak için kullanılır [99]–[104]. Veri kanalları arasındaki diğer anahtarlamalar için maksimum güç sağlanarak kontrol kanalları kullanılır. RES (Rezervasyon) paketi, kullanılacak uygun veri kanalını gösteren, özel bir rezervasyon paketidir. Bir iletim kanalı gerektiğinde, RTS / CTS / RES üçlü mesajlaşması başlatmak gerekmektedir.

Kablosuz bilişsel radyo ağlar için MAC protokolleri, genellikle radyo sinyallerinin iletimi için çok yönlü anten kullanırlar. Bu MAC protokolleri çevresindeki diğer tüm düğümlerin bekleme durumunda kalması gerekmektedir. Yönlü antenler ile daha yüksek kazançlar elde etmek ve belirli bir yöndeki iletimi sınırlamak mümkündür. Benzer şekilde, yönlü anten ile bir düğümün paket alımı sırasında diğer yönlerdeki girişimlerden etkilenilmez [107], [109]–[111], [113], [114]. Sonuç olarak, bu iki düğüm çifti iletim yönüne bağlı olarak, eş zamanlı olarak iletişim kurabilirler. Bu durum, diğer etkilenmeyen yönlerde daha iyi spektrum kullanımına yol açmaktadır. Bu antenleri kullanarak, doğru yönde sağlanan ve gerçek zamanlı olarak dönüt sağlayan sistemler gerçekleştirilebilir. IEEE 802.11 gibi mevcut protokolleri, bu özelliklere sahip olarak tasarlamak için yönlü antenler kullanılması gerekmektedir. Şu anda, yönlü antenlerin

donanımları çok yönlü antenlerin donanımları ile karşılaştırılırsa daha maliyetli oldukları görülmektedir. Büyük askeri araçlar içeren uygulamalarda, bu tür anten sistemleri kullanılarak kablosuz cihazlar için uygun ağlar geliştirmek mümkündür. Ultra geniş bant iletimi sağlayan yüksek frekans bantları kullanımı, yönlü antenlerin boyutunu azaltmaktadır.

Tek yönlü MAC protokolleri üzerine birçok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Tek yönlü bağlantılı ağlarda dikkat edilmesi gereken bazı sorunlar vardır. Heterojen güç seviyeleri olan cihazların bulunduğu bir ağda, düşük gücü olan bir düğüm veri iletimi için kanal ayırmaya çalışır, fakat yakın olan yüksek güçlü düğümler veri alışverişini bozabilir. Sonuç olarak, başarılı bir RTS-CTS paket değişimi başarılı bir veri iletimini garanti etmez [125]–[127]. Ayrıca, daha yüksek güçlü düğümlerin her zaman tercih edilmeyeceği de bilinmelidir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, IEEE 802.11 protokolünde RTS / CTS paket alışverişini genişletmek için bir sistem önerilmiştir. Bu durum, tüm gizli yüksek güçlü düğümlerin kanalın rezervasyonundan haberdar olmasını gerektirir, aksi takdirde sonraki veri paketi iletimleri engellenebilir.

2.3.2. Çekişmesiz Protokoller

QoS servis modeli, toplam çerçeve mimarisini özetlemektedir ve ağda hangi tip servislerin sağlanacağını belirlemektedir. Sinyal; kaynakları koruma, sürdürme ve boşaltma için kullanılmaktadır ve ağın en karmaşık yapılarından biridir. Topoloji değişikliklerini de içerecek şekilde güvenli bir şekilde gerçekleştirilmelidir [128].

QoS - tabanlı MAC protokollerinde, merkezi bir koordinatör düğüm yapısını önlemek için iki yol vardır. İlk yaklaşım; Küme TDMA, Küme Token ve SRMA / PA (Yumuşak Rezervasyon Çoklu Erişim / Öncelik Atama ile) gibi senkron protokolleri içermektedir. Küme TDMA protokolünde, düğümler kümeler halinde düzenlenmiştir ve her kümenin kendi içinde düğümlerin faaliyetlerinin koordinasyonundan sorumlu bir küme başı vardır. Her küme farklı bir DS (Dağınık Spektrum) kodu kullanmaktadır. Zaman dilimleri, gerçek zamanlı trafik ile rezerve edilebilir ve boş dilimler gerçek zamanlı olmayan veriler tarafından kullanılır [103], [115], [117], [129], [130]. Ancak, zaman senkronizasyonu kaynak yoğunluklu bir süreçtir ve bilişsel radyo ağlarında kullanmaktan kaçınılmalıdır [131]. Benzer şekilde, çoklu kodların uygulanması ve ilgili güç kontrolleri gereksiz değildir.

RT-MAC (Gerçek Zamanlı MAC) adındaki IEEE 802.11 protokolü, paket

çarpışmalarından ve süresi geçmiş paketlerin iletiminden kaçınarak gerçek zamanlı trafikleri destekler. Bunu başarmak için, RT-MAC protokolü bir paket iletim tarihi ve gelişmiş çarpışma kaçınma yöntemleri kullanır [112], [120]–[123], [130]. Bir gerçek zamanlı trafik paketi iletim için sıraya alındığında, aktarılması gereken zamanı gösteren bir zaman damgası düğüme kaydedilir. Bir paketin süresinin dolup dolmadığı üç yolla belirlenir: paketi göndermeden önce, geri çekilme süresi dolduğunda ve iletimi onaylanmamış bir şekilde iletildiğinde. Süresi dolan bir paket hemen iletim kuyruğundan çıkarılır. Paket aslında gönderilmek üzereyken, gönderen düğüm bir sonraki geri çekilme değerini seçer ve bunu paket başlığına kaydeder. Paketi duyan diğer herhangi bir düğüm farklı bir geri çekilme değeri seçer. Bu durum, çarpışma olasılığını ortadan kaldırmaktadır [124]. Geri çekilme değerinin seçildiği çekişme penceresi değer aralığı sistemdeki düğüm sayısının bir fonksiyonu olarak tutulur. Bu nedenle, düğüm sayısının bilinmesi ya da en azından tahmin edilebilmesi gerekmektedir.

Öncelik Sınıfları ile DCF (Dağıtık Koordinasyon Fonksiyonu), farklı veri sınıfları için öncelik tabanlı erişim destekleyen IEEE 802.11 protokolü DCF-PC olarak önerilmiştir. Temel fikir, gerçek zamanlı trafiklerde daha fazla öncelikli veriler için daha kısa IFS bekleme süreleri ayarlamaktır [129], [132], [133]. Çekişme penceresinin izin verilen maksimum boyutunu aşmayacak şekilde daha kısa geri çekilme zaman değerleri kullanılmaktadır. Daha önce de belirttiğimiz gibi, IEEE 802.11 protokolünde IFS, SIFS, PIFS ve DIFS gibi zaman bekleme aralıkları bulunmaktadır [103]. Normal bir düğümün, veri iletimi öncesinde DIFS kadar süre boşa kalması gerekmektedir. Daha öncelikli bir düğüm ise sadece PIFS süresi kadar beklemelidir. Bununla birlikte, seçilen geri çekilme değeri daha uzun olabilir, ancak daha yüksek öncelikli bir düğüm uzun bir IFS ve daha kısa bir rasgele geri çekilme değeri kadar bekler [118]–[120]. Bu sorunu çözmek için, yüksek öncelikli düğümlere daha kısa bir geri çekilme zamanı atanır.

IEEE 802.11 DCF, dağıtılmış bir şekilde tüm çekişen düğümlerin eşit olasılıklar ile bir kanala erişim sağlamaları için tasarlanmıştır [103]. EDCF (Geliştirilmiş DCF), çerçeve önceliklerine göre farklı kanal erişimi sağlamak için DCF protokolünü geliştirmiştir. Bu, IEEE 802.11e protokolünün ve HCF (Hibrit Koordinasyon Fonksiyonu) protokolünün bir parçası olarak geliştirilmiştir [103], [115].

BB (Siyah Patlama) Çekişmesi, IEEE 802.11 standardına ve taşıyıcı sezme mekanizmasına dayanmaktadır. Şu şekilde çalışmaktadır: normal veri düğümleri gerçek

zamanlı düğümlerden daha uzun çerçeve arası zamana sahiptir [101]–[104]. Kanal belli bir zaman boyunca boş olduğunda paketlerini göndermek yerine, gerçek zamanlı düğümler kanalı siyah patlama da denilen enerji darbeleriyle sıkıştırırlar. Bunların uzunluğu yaşanan çekişme gecikmesiyle orantılıdır. Çekişme gecikmesi, siyah patlama iletimi başlayana kadar kanala erişim denemesi yapıldığı andan itibaren ölçülür.

MACA-PR (Çoklu Erişim Çarpışma Kaçınma-Rezervasyon ile) protokolünde, düğümler özel rezervasyon tablosu tutarlar ve bir paketin iletilebilmesi için iletim zamanını tabloda belirtirler [129]. Gerçek zamanlı veri akışındaki ilk veri paketi, standart RTS - CTS yaklaşımı ile tüm yol boyunca rezervasyonlarını ayarlar. Bu kontrol paketleri, her veri paketinin uzunluğunu içerir. En kısa sürede ilk paket bir bağlantı rezervasyonu yaptığında, göndericide bir iletim dilimi ayrılır. Daha sonraki paket için, uygun zaman aralıkları bir sonraki alıcı düğüme tahsis edilir. Gönderici aynı zamanda mevcut veri paketleri içerisinde sonraki veri paketinin rezervasyon bilgilerini de yerleştirir. Alıcı, kendi rezervasyon tablosunda bu rezervasyonları not eder ve aynı zamanda ACK paketi ile teyit eder. Veri ve ACK paketlerine kulak misafiri olan komşu düğümler, sonraki paket iletim zamanlamalarından haberdar olurlar ve buna göre geri çekilme yaparlar [103], [115]–[117], [129]. ACK sadece rezervasyon yenilemek için hizmet vermektedir. Çünkü veri paketleri ACK çarpışması nedeniyle kaybolursa bile yeniden iletim yapılmaz. Gönderen arka arkaya N kez ACK alamazsa, bağlantının bant genişliği ihtiyacını karşılayamadığı varsayılır ve üst katmandaki QoS yönlendirme protokolüne bildirilir. İlk veri paketinden sonra hiçbir RTS - CTS değişimi olmadığı için, gerçek zamanlı paketlerin çarpışma önlemesi rezervasyon tablolarının kullanımıyla gerçekleşir.

Literatürde, IEEE 802.11 DCF protokolüne dayanan asenkron bir protokol önerilmiştir. Bu protokol, CBR (Sabit Bit Hızı), VBR (Değişken Bit Hızı) gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan datagram trafiğini destekler. Gerçek zamanlı olmayan bir veri iletimi durumunda, düzenli RTS-CTS-DATA-ACK dizisi gönderici ve alıcı arasında kullanılır. Gerçek zamanlı olmayan ve olan paketlere yanıt olarak gönderilen paketlere sırasıyla D-ACK ve R-ACK denir [114], [118]–[120]. Benzer şekilde, gerçek zamanlı olmayan ve olan veri paketlerine de D-PKT ve R-PKT adı verilir. Gerçek zamanlı trafik durumunda, ilk R-PKT paketinden sonra gönderilen veri paketleri için bir RTS-CTS değişimi yapılmamaktadır. Diğer bir deyişle, R-ACK paketi sonraki gerçek zamanlı veri paketi için iletim rezervasyonu yapmaktadır. Beklenen bir gerçek zamanlı trafik olduğunda düğümler bilgilendirilir [121]–[124]. Bu tahminler, R-PKT ve R-ACK paketleriyle ilgili

tabloları kaydedilir. Aslında, herhangi bir RTS göndermeden önce, düğümler rezervasyon tablolarındaki girişlere dayalı olarak kuyruktaki gerçek zamanlı iletimlere müdahale etmeden boş bir zaman dilimi ararlar. Benzer şekilde, bir düğüm RTS alırsa, bir CTS paketi ile yanıt vermeden önce aynı denetimleri gerçekleştirir. Başarılı bir RTS-CTS alışverişinden sonra, veri gönderilir ve bir ACK paketi beklenir. ACK cevapsız kalır ise, düğüm geri çekilmeye başlar ve aynı işlem için IEEE 802.11 çekişme pencerelerini kullanır.

Ortak bir kablosuz kanal paylaşan ve farklı akışları sağlayan DFS (Dağıtık Adil Çizelgeleme) protokollerine, öncelikleri göz önüne alınarak bant genişliği ataması yapılmaktadır. DFS, IEEE 802.11 DCF protokolünden türetilmiştir ve ortam erişimini düzenleyen merkezi bir koordinatöre ihtiyaç duymaktadır [121]–[124]. DFS temel fikri, her paketin başlangıç ve bitiş zaman damgaları ile ilişkili olmasıdır. Daha yüksek öncelikli bir pakete daha küçük bir bitiş etiketi ve daha kısa geri çekilme periyodu atanmaktadır. Bu yaklaşım, yüksek öncelikli paket akışlarına tutarlı olarak daha kısa geri çekilme zamanları atamaktadır. Böylece, daha yüksek iş çıkarma oranları elde edilecektir.

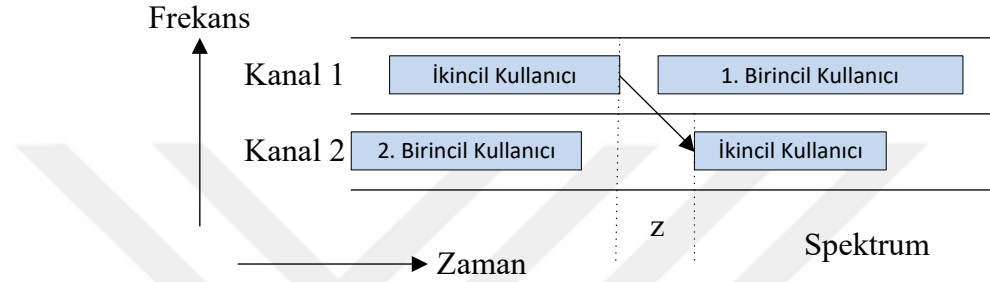
2.4. SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İŞLEMİ

Spektrum boşluklarında, sezme yöntemiyle birincil kullanıcı iletişimi saptandığında; ikincil kullanıcılar birincil kullanıcılara girişimde bulunmamak için spektrumunu terk etmelidir. Bilişsel radyo, belirli parametrelere bakarak diğer kanallara geçişi sağlamaktadır. İletişimi diğer spektrum bandına kaydıran bu sistem spektrum el değiştirme işlemi olarak tanımlanmaktadır [51].

İkincil kullanıcılar yararlanacakları spektrum kanalları için misafir niteliğindedirler. Bu sebeple, yararlanılan spektrumun kanalının bir bölümü lisanslı kullanıcı tarafından kullanılacak ise ikincil kullanıcı iletişiminin spektrumun farklı bir boş kısmında sürdürülmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır [30], [52], [54]–[56].

Spektrum el değiştirme işleminin olduğu üç farklı özel durum vardır. Bunlardan ilki, spektrumda lisanslı kullanıcı varlığının saptanmasıdır [134]. Diğer, devam etmekte olan iletişim anında kullanıcı hareketliliğinden dolayı ikincil kullanıcıların bağlantı kaybı yaşamasıdır [135]. Üçüncüsü ise, mevcut spektrum kanalının gerekli olan en düşük hizmet kalitesine karşılık verememesidir.

Şekil 2.8’de, spektrum el değiştirme işleminin bilişsel radyo ağlarında nasıl meydana geldiği gösterilmiştir. Kanal 1 ve Kanal 2, sırasıyla 1. ve 2. lisanslı kullanıcılarıdır. Şekil 2.8’de, ilk olarak ikincil kullanıcının boş olan 1. lisanslı kullanıcı kanalından yararlandığı anlaşılmaktadır. İkincil kullanıcının en başta bu kanalı seçmesinin sebebi 2. lisanslı kullanıcı kanalının boş olmamasıdır. Sonraki aşamada, spektrumdaki 1. lisanslı kullanıcı aktivitesine bağlı olarak ikincil kullanıcı iletişimini Kanal 2’ye taşımıştır. Gerçekleştirilen iletişim taşıma işlemi sırasında, “z” süre kadar spektrum el değiştirme gecikmesi meydana gelmiştir.



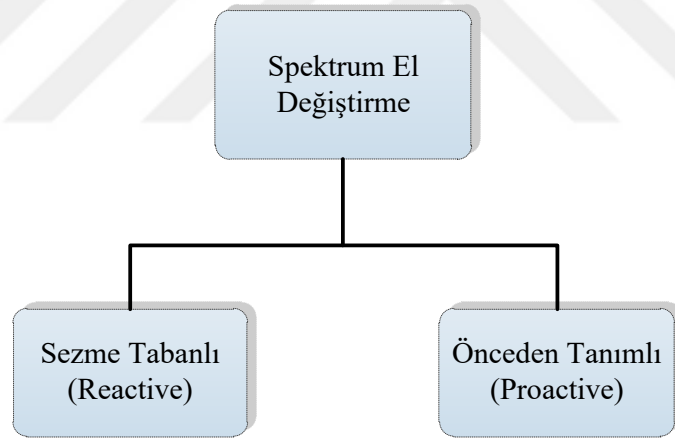
Şekil 2.8. Bilişsel radyo ortamında spektrum el değiştirme işlemi.

Spektrum el değiştirme sırasında, yeni spektrum bantları aranması işleminden dolayı geçici iletişim kesintileri yaşanmaktadır [56]. Kullanılabilir spektrum bantları bitişik olmadığı için ve geniş bir alana yayıldıkları için, bilişsel radyo kullanıcılarının spektrumlarını değiştirmesi gerekmektedir [136]. Bu işlem de oldukça uzun gecikmelere yol açmaktadır. Bu sebeple, spektrum el değiştirme işlemi iki farklı yöntemle yapılmaktadır [137]. Önceden tanımsız (reactive) spektrum el değiştirme işleminde, ikincil kullanıcılar spektrum hareketliliğinden dolayı gerçekleşen bağlantı kaybından sonra spektrum el değiştirme işlemi gerçekleştirmektedirler. Bu teknik, herhangi bir zaman kaybı olmadan anlık spektrum el değiştirme işlemi yapılmasını sağlamaktadır. Bu olay, iletişim kalitesi açısından sorunların yaşanmasına yol açmaktadır [54].

Diğer taraftan, önceden tanımlı (proactive) spektrum el değiştirme işleminde bilişsel radyo kullanıcıları mevcut bağlantıdaki gelecek aktiviteleri tahmin etmektedir ve mevcut iletişime devam ederken yeni bir spektrum tespit etmektedir. Böylece, spektrum el değiştirmeyi herhangi bir bağlantı kaybı olmadan yapabilmektedir. Önceden tanımlı el değiştirme işlemi yeni frekans bandı ararken aynı zamanda mevcut iletişimine de devam edebildiği için, spektrum el değiştirme oldukça hızlıdır fakat daha karmaşık algoritmalara ihtiyaç duymaktadır [53], [55], [109], [138], [139], [80].

Önceden tanımsız (reactive) spektrum el değıştirme işlemi genel olarak birincil kullanıcıların varlığını tespit etmek için kullanılırken, önceden tanımlı (proactive) spektrum el değıştirme işleminden kullanıcı hareketliliğı ya da spektrum kalitesi azalması durumlarında yararlanılmaktadır [140]. Bu durumlar, anlık spektrum el değıştirme işlemi gerektirmemektedir ve basit bir şekilde kontrol altında tutulabilmektedir. Birincil kullanıcı varlığının tespiti için de önceden tanımlı (proactive) spektrum el değıştirme işleminden faydalanılabilmektedir [23], [30].

El değıştirme gecikmesi, spektrum hareketliliğı başarımını belirlemede en önemli parametrelerden biridir. Bu gecikme değeri, bilişsel radyo ağlarında belli işlemlerin gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır [141]. Öncelikle, ilgili protokolün farklı katmanları iletişim frekansının kanal parametreleriyle uyumlu olmalıdır [142], [143]. Bu şekilde, bilişsel radyo kullanıcıları frekans değıştirdiğinde, ilgili protokolün iletişim parametrelerini ayarlaması zorunlu bir hale gelmektedir [42], [144]–[146]. Bu olay da, protokol ayarlama gecikmesine yol açmaktadır. Bununla birlikte, spektrum sezme süresi ve el değıştirme süresi için geçen süre de göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.9. Spektrum el değıştirme yaklaşımları.

Kullanımda olan işlem frekansı bilişsel radyo kullanıcısı tarafından gerçekleştirilen bir iletişim sırasında meşgul olursa, bu düğümde çalışan uygulamalar yeni bir spektrum bandına aktarılmalıdır. Bunun yanında, farklı bir spektrum seçimi belirli bir süre gerektirmektedir. Bağlantı yönetim protokolünün önemli bir özelliğı, spektrum el değıştirme işleminin süresi hakkında bilgi sahibi olmasıdır [42], [145], [147]. Gecikme süresi ile ilgili bilgi hazır olduğunda, bilişsel radyo kullanıcısı her bir protokol katmanındaki geçici bağlantı kaybının etkisini tahmin etmektedir. Buna bağılı olarak, her bir protokol katmanı ve hata kontrol yönteminin uyarlanması yoluyla az bir başarımla

düşüşüyle devam eden haberleşmeyi kontrol altında tutmaktadırlar.

Böylece, çok katmanlı spektrum el değiştirme yönetim protokolleri spektrum hareketlilik fonksiyonlarını gerçekleştirmek için gerekli olmaktadır [39]. Bu protokoller, farklı uygulamalar ile ayarlı (adaptive) spektrum el değiştirme yönetimini kullanmaktadırlar. Örnek olarak, iletişim kontrol protokolü bağlantısı el değiştirme süresi bitene kadar bekleme durumunda olmaktadır. Diğer yandan, el değiştirme işleminden sonra iletişim kontrol protokolü (TCP, Transmission Control Protocol) parametreleri değişeceği için yeni parametrelerin öğrenilmesi gerekmektedir ve eski parametrelerden yeni parametrelere geçiş sürecinin hızlı bir şekilde yapılması gerekmektedir.

Şekil 2.9’da spektrum el değiştirme işleminde kullanılan temel yaklaşımlar verilmiştir. Çözülmesi gereken problemlerin başında spektrum el değiştirme işlemi gerçekleştiği anda gerçekleşen spektrum el değiştirme gecikmesi yönetimi gelmektedir. Spektrum el değiştirme gecikmesinin süresi, spektrum karar algoritmaları ve spektrum sezme tekniği ile doğrudan bağlantılıdır. Buna ek olarak, spektrum el değiştirme gecikmesinin hatasız olarak tahmin edilmesi güvenilir bir bağlantı yönetimi için elzemdir. Önceden tanımlı (proactive) ve önceden tanımsız (reactive) spektrum el değiştirme teknikleri arasında esnek geçişlerin yapılması da araştırılması gereken problemler arasındadır. Bu teknikler arasındaki geçiş, paket veri trafiğinin gerçek zamanlı olması ya da olmamasına göre değişiklik gösterebilmektedir. Örnek olarak, enerji kısıtlılığı olan algılayıcı düğümler için önceden tanımsız (reactive) spektrum el değiştirme tekniğinin kullanılması daha mantıklıdır. Diğer taraftan, gecikme duyarlılığına sahip olan gerçek zamanlı uygulamalar için önceden tanımlı (proactive) spektrum el değiştirme tekniğinin kullanımı daha uygundur. Verimli spektrum el değiştirme tekniklerinin geliştirilmesi ve spektrum el değiştirme gecikmesinin en aza indirilmesi araştırılması gereken hususların en başındadır.

2.4.1. Sezme Tabanlı Spektrum El Değiştirme

Spektrum el değiştirme işlemi gerçekleşmesi gerektiğinde spektrumun sezilerek boş spektrum kanalı bulunması ve boş olan kanala geçiş yapılması sezme tabanlı spektrum el değiştirme işlemi olarak tanımlanmaktadır [21], [46], [61], [62]. Bu işlem sırasında, anlık kanal sezme ve geçiş işlemi yapıldığı için gecikmeler meydana gelmektedir. Bunun yanında, boş lisanslı kanal olmaması durumunda ikincil kullanıcı

haberleşmesinin kesilmesi söz konusudur [21], [23], [67], [138]. Sezme tabanlı spektrum el değiştirme işlem aşamaları şu şekildedir: İlk olarak, bir ikincil kullanıcının lisanslı spektrum kanalında haberleşme yaptığını göz önüne alalım. İkinci olarak, spektrum kanalında lisanslı kullanıcı faaliyeti gerçekleşecekse, ikincil kullanıcının bu faaliyeti sezerek spektrum el değiştirme işlemi için hazırlanması gerekmektedir. Üçüncü olarak, ikincil kullanıcı iletimini durdurarak farklı bir boş kanal bulmaya çalışır. Son olarak ise, tespit ettiği boş spektrum kanallarından birinde haberleşmesini sürdürür.

2.4.2. Önceden Tanımlı Spektrum El Değiştirme

İkincil kullanıcıların spektrum el değiştirme işlemi gerçekleştirilecek olan hedef spektrum kanallarını haberleşmeye başlamadan önce tespit etmesi önceden tanımlı spektrum el değiştirme işlemi olarak bilinmektedir [142]. Bu teknikte, ikincil kullanıcılar kanal kullanım istatistiklerini elde etmek için spektrumunu gözlemlemektedirler [51], [58], [69]. Spektrum el değiştirme işlemi gerçekleştirilecek olan hedef kanallar elde edilen istatistik sonuçlarına göre belirlenmektedir.

2.5. YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ

Yapay zeka, bilgisayar tabanlı bir makinenin insana özgü nitelikleri yerine getirme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [31]. Zeka ise, insanın algılama, düşünme, akıl yürütme ve çıkarım yapma gibi yeteneklerinin tamamına verilen isimdir. Zekanın temelini bilgi oluşturmaktadır. Bu yüzden, zekayı anlayabilmek için bilginin de tanımlanması gerekmektedir. Bilgi, duyu organları aracılığıyla alınan ve daha önce var olan bir nesne ile karşılaştırılarak gerçekleştirilen olgudur. Bu olgu sadece önceden bilinen diğer nesnelerle sürdürdüğü ilişkiler sayesinde tanımlanabilmektedir.

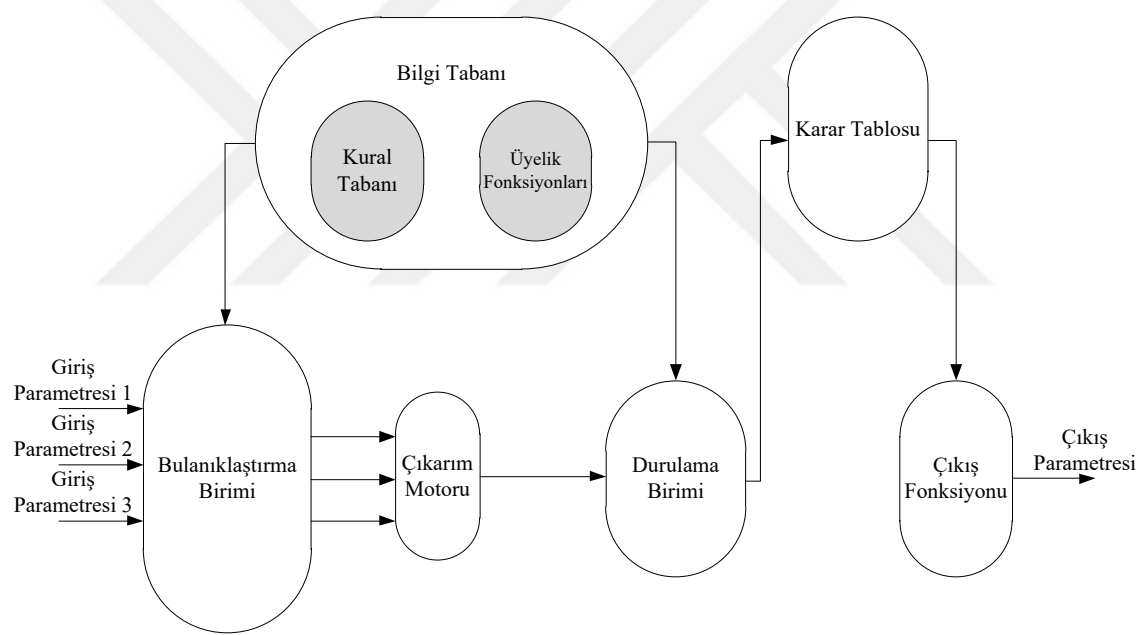
Yapay zeka araştırmaları, insan beyninin görevlerinin incelenmesi ile yakından ilişkilidir. Beynin çalışması; bilginin girişi, sentezleme ve kıyaslama, çıkış ve eylem olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadır [31], [90]. Sinir sistemi, genel olarak çevresel sinir sistemi ve merkezi sinir sistemi olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Merkezi sinir sistemi, insan vücudunun bütün davranış ve işlevlerini yönetirken; çevresel sinir sistemi ise beyin ve omuriliği ilişkilendiren sinirlerden oluşmaktadır.

Uzman sistemler, belirli bir konu üzerinde bir veya daha fazla sayıda insanın yapabildiği yargılama ve karar verme işlemlerini modelleyen bir yazılım sistemidir

[148], [149]. Uzman sistemlerde; bilgi tabanı, uzman, bilgi kazanma modülü, veri tabanı, mantıksal sonuçlandırma mekanizması, yardımcı yorumlama modülü, kullanıcı arabirimi ve kullanıcı bulunmaktadır [31].

Yapay sinir ağları, insan beyninin işlevinin modellenmesi olarak bilinmektedir [31]. Fakat doğal sinir ağları ile yapay sinir ağları arasında yapı ve kapasite bakımından oldukça farklılıklar bulunmaktadır. Ayrıca, gerçek beyin fonksiyonlarını yerine getirmek için yeterli bilgi mevcut değildir. Bu yüzden, öğrenmeyi gerçekleştiren elemanların seçimi büyük önem taşımaktadır.

Genetik algoritmalar, en iyinin korunumu ve doğal seçim ilkesinin benzetim yoluyla bilgisayarlara uygulanması ile elde edilen bir arama yöntemidir [31]. Karınca algoritmaları ise, karıncaların davranışlarını taklit eden popülasyon tabanlı yaklaşımlardır [31].



Şekil 2.10. Bulanık mantık örnek blok diyagramı.

Bulanık mantık genel olarak insan düşüncesine özdeş işlemlerin gerçekleşmesini sağlamakla ve kesin olmayan verileri modellemede kullanılmaktadır [31]. Bildiğimiz mantıksal bir önerme sisteminde sadece doğrular ve yanlışlar vardır. Fakat bulanık mantık sisteminde olayların ne derece doğru ve yanlış olduğu da bilinmelidir [150]. Örneğin; 100 derecedeki suyun sıcaklığı “sıcak” olarak ifade edilirse 80 derecelerdeki su için “sıcak değildir” ifadesi doğru olmadığı gibi yanlış da değildir [151].

Bulanık mantık teorisi; az, sık, orta, düşük, yüksek, az yüksek gibi dilsel terimleri

kullanarak dereceli veri modellemesi gerçekleştirmektedir [29], [31]. Bu şekilde, olayların modellenmesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilir. Bulanık küme, kesin geçişleri eleyerek belirsizliği yeniden tanımlar ve üyelik derecelerine göre matematiksel tanımlamalar yapar. Bireyler, bu sistemdeki üyelik derecelerine göre farklı değerlere farklı oranlarda üye olabilirler.

Şekil 2.10'da, örnek bir bulanık mantık blok diyagramı gösterilmektedir. Bir bulanık mantık sisteminde temel olarak, bulanıklaştırma, çıkarım motoru ve durulama birimleri bulunmaktadır. Bulanıklaştırma biriminin görevi, gelen değerleri üyelik fonksiyonları yardımıyla dilsel değişkenlere çevirmektedir. Dilsel değişkenlere dönüştürülen değerler daha sonra bulanık çıkarım motorunda işlenmektedir. Son olarak durulama biriminde ise, bulanık mantık çıkarım motorunun çıkışından elde edilen değerler sayısal değerlere çevrilmektedir [31], [152].

Optimizasyon algoritmaları, hemen her alanda yaygın olarak kullanılan ve geliştirilmesine ihtiyaç duyulan tekniklerdir. Birçok optimizasyon algoritması da doğadan ilham alınarak geliştirilmektedir [153]. Örnek olarak; parçacık sürü optimizasyonu balık ve kuş sürülerini, karınca kolonisi algoritması karıncaların davranışlarını ve yapay arı kolonisi de arıların davranışlarını taklit etmektedir. Son yıllarda ortaya atılan ve bilişsel radyo ağlarında da yaygın olarak kullanılan yapay arı kolonisi algoritması ile birçok parametrenin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Yapay arı kolonisi algoritması Karaboğa tarafından kısıtsız optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiştir. Kısıtlı optimizasyon problemlerini çözmek için ise, bu algoritmaya kısıt kullanım yöntemi eklenmiştir [154]. Gerçek bir arı kolonisinde, çeşitli arı grupları için görevler bulunmaktadır ve amaçları en fazla miktardaki kaliteli balı kovana toplamaktır. İşçi arılar, gözcü arılar ve kaşif arılar olmak üzere üç farklı arı tipi bulunmaktadır. İşçi arılar koloninin yarısından oluşmaktadır ve görevleri kaynaklardan bal toplayarak bal kalitesi hakkında diğer arıları bilgilendirmektedir [155]. Gözcü arılar da koloninin yarısından oluşmaktadır ve görevleri toplanan bilgilere göre nektar toplanacak kaynaklara karar vermektir [156]. Kaşif arılar ise, yeni nektar kaynakları bulmak için çevrede rasgele veya olası ipuçlarına bağlı olarak ortamı taramaktadırlar [157].

2.6. KUYRUKTA ÖNCELİK SINIFLARI

Kuyruk teorisi ilk olarak telefon trafikleri için geliştirilmiştir. Temeli 1917 yılında Erlang tarafından yazılan bir makale çalışmasına dayanmaktadır [20]. Günümüzde, trafik sıkışıklığı analizi ve farklı servislerin listelenmesi gibi durumlarla ilişkili olan olasılık problemlerinde kullanılmaktadır. Haberleşme sistemlerinde, yeni bir çağrı geldiğinde eğer tüm hatlar dolu ise çağrı düşer [20]. Bu duruma kayıplı sistem adı verilir. Bunun yerine, yeni gelen çağrı bir kuyruğa yerleştirilip belirli bir gecikmenin ardından hat müsait olduğunda hizmet alabiliyorsa bu tür sistemlere de kuyruklu sistem adı verilir [20].

Bir kuyruğun tipini belirlemek için Kendall tarafından tanımlanan kısaltma notasyonları kullanılmaktadır. A/S/m/N/K şeklinde tanımlanan notasyonda her bir terimin bir anlamı Çizelge 2.2’de verilmektedir. Verilen tanımlara göre, K sınırlı olduğunda; N değeri en fazla K olabilmektedir [20], [158]. Kendall notasyonunda yer alan A ve S terimleri için en çok kullanılan dağılım türleri Çizelge 2.3’te gösterilmektedir. N ve K değerleri sonsuz olduğunda, Kendall notasyonunda gösterilmezler. Örneğin; M/M/1/∞/∞ notasyonu kısaca M/M/1 olarak yazılabilmektedir [51].

Çizelge 2.2. Kendall notasyonu.

Terim	Anlamı
A	Varişlar arası zaman dağılımı (Interarrival time distribution)
S	Servis zamanı dağılımı (Service time distribution)
m	Sunucu sayısı (Number of servers)
N	Kuyrukta bekleyebilecek maksimum müşteri sayısı (Maximum number of customers that can be accomodated in the queue)
K	Giriş kaynağının boyutu (Size of input source)

Çizelge 2.3. Dağılım türleri.

Terim	Açıklama
M	Üstel dağılım (Exponential distribution) Markov ile ilgili olduğu için M harfiyle ifade edilmektedir. Genellikle Markov işleminin özel bir çeşidi olan Poisson dağılımı kullanılmaktadır.
D	Sabit tanımlı dağılım (Deterministic distribution) Servis zamanlarının sabit olduğu zamanlarda kullanılmaktadır.
G	Genel dağılımı (General distribution)

Kuyruk analizinde kullanılan en basit ve en yararlı formül, Little teoremi olarak bilinen $L=\lambda W$ formülüdür ve $\bar{Q}=\lambda E[W]$ şeklinde yazılabilmektedir. $\bar{Q}$, $Q(t)$ kuyruk boyutu işleminin ortalama süresini; λ , ortalama varış süresini ve $E[W]$, müşterilerin ortalama bekleme sürelerini temsil etmektedir. $H=\lambda G_g$ ise, Little teoreminin genelleştirilmesiyle elde edilen yeni bir formüldür [33], [73]. H ve G_g parametreleri, sırasıyla birbirleriyle ilişkili olan zaman ve ortalama müşteri sayılarını temsil etmektedir. Örneğin; G_g , müşteri başına düşen ortalama maliyeti temsil ederse ve λ , müşteri varış oranı ise, H birim zamandaki ortalama zaman maliyetini temsil eder [20].

M/M/1 kuyruk sistemi, en basit kuyruk sistemi olarak bilinmektedir. λ oranlı varış Poisson varışlar, ortalama $1/\mu$ üstel dağılımlı servis süreleri ve tek sunuculu kuyruğa sahip olan M/M/1 varışları ve servis süreleri Markov olduğu için (hafızasız) memoryless olarak nitelendirilmektedir. M/M/1 kuyruğunun servis süresinin dağılım fonksiyonu;

$$F_S(x) = 1 - e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

denklemleriyle gösterilmektedir [20]. ρ , utilizasyon faktörü (utilization factor) olmak üzere ortalama bekleme zamanı denklemi,

$$E[W] = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)} \quad (2.2)$$

ifadesiyle ve ortalama servis süresi de;

$$E[T] = \frac{1}{\mu(1 - \rho)} \quad (2.3)$$

şeklinde yazılmaktadır [68].

Tek sunuculu kuyruklarda, sunucu meşgul ise yeni gelen müşteriler kuyrukta beklemek zorundadır [68]. M/M/ ∞ ve M/G/ ∞ gibi kuyruk sistemlerinde, n adet müşteri için n adet sunucu çalışacağından dolayı kuyruk oluşturulmasına gerek olmayacaktır. Bu tür kuyruklara, hiçbir kuyruk oluşturmamalarına rağmen sonsuz sunuculu kuyruk adı verilmektedir [20].

M/G/1 kuyruk sisteminde, t anında sistemde bulunan müşteri sayısı $N(t)$ Markov işlemiyle ifade edilememektedir [20]. Bu zorluğu Markov olmayan yoldan çözmek için,

genel servis süresi dağılımının üstel dağılımlı sunuculara dönüştürülmesi işlemi uygulanmaktadır. Diğer bir yaklaşım ise, gömülü Markov zinciri (embedded Markov chain) kullanmaktır. M/D/1 kuyruk sisteminde, tüm müşterilerin servis sürelerinin sabit olduğu varsayılmaktadır. Bu yüzden, $u(x)$ adım fonksiyonu ve μ^{-1} servis süresi olmak üzere servis süresinin dağılım fonksiyonu,

$$F_S(x) = u(x - \mu^{-1}) \quad (2.4)$$

şeklinde yazılmaktadır [20].

G/M/1 kuyruk modeli; genel dağılımlı varışa, üstel servis süresi dağılımına ve tek bir sunucuya sahiptir [56]. Servis süresi S , ortalama ile üstel dağılımlıdır ve varışlar arası süre X genel dağılımlıdır. Buna göre, genel dağılım fonksiyonu;

$$F_X(x) = P[X \leq x] \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir [159].

G/G/1 kuyruk sisteminde hem varışlar arası zaman hem de servis süreleri genel dağılımlıdır. Bu kuyruk dağılımını bulmak için kullanılabilecek belirli bir analitik model yoktur [90]. Hizmet için bekleyen bir kuyruk oluşturulduğunda, basit ve mantıklı olmasından dolayı genellikle FCFS (First Come First Served – ilk gelen ilk hizmet alır) ya da FIFO (First in First out – ilk giren ilk çıkar) kuralı kullanılmaktadır. Bununla birlikte, uygulamada bazı öncelik tekniklerinin FCFS kuralına tercih edildiği birçok durum bulunmaktadır.

Engelsiz (non-preemptive) öncelik yaklaşımına göre, kuyruktaki bir müşteri sadece mevcut hizmet alan müşterinin hizmet alması tamamen bittikten sonra seçilir [10]. Engelsiz öncelik tekniğinde, bir sonraki hizmet alacak müşteri kuyruktaki en yüksek öncelikli müşteri olur ve aynı öncelik sınıfı olması durumunda FCFS kuralı uygulanır. Engelsiz (non-preemptive) öncelik kuyruğunda hizmet alan bir müşteriye, daha yüksek öncelikli bir müşteri gelse dahi engelsiz bir şekilde iletimini tamamlamasına izin verilir ve sunucu müsait olduğunda en yüksek öncelik sınıfındaki ilk müşteri hizmet alır. Normal şartlarda, öncelik-1 en yüksek öncelik sınıfıdır ve öncelik sayı numarası arttıkça öncelik sınıfı azalmaktadır.

Engelli (preemptive) öncelik tekniğine göre, daha yüksek öncelikli bir müşteri geldiğinde mevcut müşterinin iletimi kesilir [33]. Bu öncelik tekniğinde, engellenen

kullanıcıların iletimlerine nasıl devam edecekleri ile ilgili farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Eğer engellenen müşteri hizmet kesildiği noktadan iletimine devam edebiliyorsa, bu kurala engelli devam (preemptive resume) eden adı verilmektedir. Eğer hizmet hangi noktada kesildiğine ve kaç kez hizmetin engellendiğine bakılmaksızın tekrarlanacaksa, bu kurala da engelli özdeş tekrarı (preemptive repeat identical) adı verilmektedir.



3. SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İŞLEMİNİN ANALİTİK MODELİ

3.1. ORTAM ERİŞİM TEKNİKLERİNİN ANALİZİ

Bu tez çalışmasının özgün değeri, birçok kablosuz ağ teknolojisinde yaygın olarak kullanılan bilişsel radyo ağ mimarisindeki ikincil kullanıcıların öncelik sınıflarına göre spektrum el değiştirme işlemini gerçekleştirmelerini sağlamak ve çok parametrelili karar verme süreçlerinde yapay zeka tekniklerinden faydalanmaktır. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, öncelik sınıflarının ortam erişim kontrol protokolünde kullanıldığı spektrum el değiştirme işleminin benzetim modelinin tasarlandığı çalışmalara rastlanmamıştır. Ayrıca, tasarlanacak öncelikli kuyruğun analitik modeli yeni çalışmaların yapılmasına yol açabilecektir.

İkincil kullanıcıların kuyruk modelinde, farklı öncelik sınıflarına sahip olan engelsiz M/G/1 öncelikli veri trafiği kullanılmıştır. Öncelik sınıfları; en öncelikli acil olmak üzere sırasıyla acil, gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan şeklinde ele alınmıştır. Benzetim senaryomuzda, acil verilerin paket üretim sıklığı en az iken, gerçek zamanlı olmayan verilerin üretim sıklığı en yüksek olarak ayarlanmıştır. ISM bandında çalışılacağı için acil veri paketleri; endüstriyel, bilim ve tıbbi verilerden oluşmaktadır. Gerçek zamanlı veri paketleri; mesajlaşma, video konferansı, internet buluşması vb. verilerden oluşmaktadır. Diğer tüm veri paketleri ise gerçek zamanlı olmayan veri haberleşmeleri olarak değerlendirilmiştir.

Kuyruk algoritmasında, yeni gelen bir paketin önceliği alınarak kuyrukta önceliğine uygun olan konuma yerleştirilmiştir. Aynı önceliğe sahip olan paketler için FCFS (İlk Gelen İlk Hizmet Alır) algoritması uygulanmıştır ve ilgili paket aynı öncelik sınıfına sahip paketlerin en arkasına yerleştirilmiştir. Gelen paketin önceliği acil ise, paket iletimi başlatılmaktadır. İletim devam ederken zaman dilimi birincil kullanıcı tarafından talep edilirse, spektrum el değiştirme işlemi gerçekleştirilmiştir ve ilettime başka zaman dilimlerinde devam edilmiştir. Kuyruktaki tüm acil öncelikli paketlerin iletimi tamamlandıktan sonra, boş zaman dilimlerinde gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan veri paketleri iletilmektedir. Gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan veri

paketlerinin iletimi için, spektrum el değıştirme yapmadan önce kuyruğa daha yüksek öncelikli bir paketin gelip gelmediğı kontrol edilmektedir.

Spektrum el değıştirme işlemine karar vermek için, RIVERBED yazılımındaki parametreler bir ara yüz (MX interface) sayesinde MATLAB yazılımına gönderilmiştir ve bulanık mantık karar verme sürecinden geçirilmiştir. Bulanık mantık karar verme sürecinden çıkan sonuç tekrar aynı ara yüz ile RIVERBED yazılımına aktarılmaktadır. RIVERBED ve MATLAB yazılımlarının haberleştilmesi hiçbir müdahale olmadan doğrudan ara yüz üzerindeki kodlarla gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen kuyruk modeli sayesinde, acil öncelikli trafiklerin diğler verilerden daha önce spektrum el değıştirme işlemi yapması sağlanarak daha düşük el değıştirme gecikmeleri elde edilmiştir. Her bir öncelik sınıfının el değıştirme gecikmeleri ayrı ayrı incelendiğinde, acil veri paketlerinin en az gecikmeye maruz kaldığı görülmüştür. Uçtan uca gecikmelerin düşürülmesine rağmen Bilişsel Radyo Ağı'nın toplam iş çıkarma oranında düşme olmadığı görülmüştür. Bu şekilde, acil veri paketlerinin bekleme işlemi ortadan kaldırılarak sistemin genelinde fazladan bir gecikme olmaması sağlanmıştır.

3.1.1. TDMA Tekniğinin Performans Değerlendirmesi

TDMA tekniğinin performans değerlendirmesi için, birincil ve ikincil kullanıcıların MAC olarak TDMA kullandığı bir ağ ortamı tasarlanmıştır. İkincil kullanıcıların gerçekleştirdikleri işlemler özetle şu şekildedir. Her zaman diliminin başlangıcında, ortam sezilerek boş ya da dolu olduğu tespit edilir. Daha sonra, dolu ise sonraki zaman dilimlerinde boşluklar aranır. Boş olduğunda ise, paket iletimi gerçekleştirilir.

TDMA tekniğinde eş zamanlı olarak desteklenen toplam kanal sayısı aşağıdaki denklem ile elde edilmektedir.

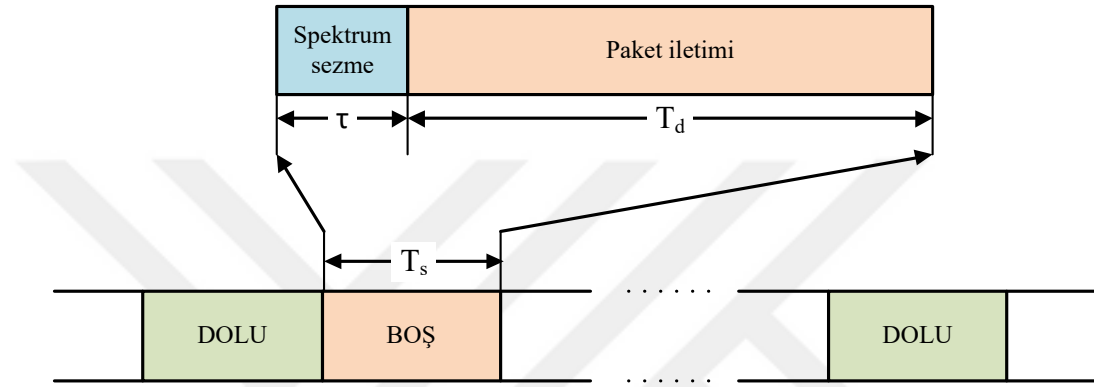
$$NC = \frac{n_m(B_t - 2B_g)}{B_c} \quad (3.1)$$

Bu denklemde, n_m her bir frekans kanalının desteklediğı maksimum kullanıcı sayısını göstermektedir [160]–[162]. Denklem (3.1)'de, B_t toplam spektrum tahsisini, B_g koruma bandını ve B_c kanal bant genişliğini temsil etmektedir.

TDMA protokolünün farklı kullanıcı sayıları için iş çıkarma oranı – gecikme karakteristiğı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$D_p = 1 + \frac{N_M}{2(1-S)} \quad (3.2)$$

Bu denklemde; D_p , N_M and S sırasıyla gecikme kullanıcı sayısı ve iş çıkarma oranını temsil etmektedir [162]–[164]. Denklem (3.2) yardımıyla, farklı değerler için çeşitli iş çıkarma oranı gecikme karakteristikleri elde edilebilmektedir. TDMA tekniğinin uçtan uca gecikmesi, bir zaman dilimindeki toplam gecikmenin bir çerçevedeki zaman dilimi sayısına bölünmesi ile elde edilmektedir [162].



Şekil 3.1. TDMA zaman dilimi yapısı.

Ağ modelinde, Şekil 3.1’de gösterilen zaman dilimi yapısı kullanılmaktadır. Şekilden de görüleceği üzere bazı zaman dilimleri boş bazıları ise doludur. Dolu olanlar birincil kullanıcılar tarafından kullanılan zaman dilimlerini, boş olanlar ise kullanılmayan zaman dilimlerini göstermektedir.

Zaman dilimleri; spektrum sezme ve paket iletimi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Spektrum sezme sırasında, ikincil kullanıcılar bir iletim işlemi yapmadan sadece spektrumunu dinlerler. Eğer boş zaman dilimi bulunursa, paket iletimi kısmında paket iletilir.

Bunun yanında, her bir birincil kullanıcının sınırsız tampona sahip olduğu varsayılarak paket uzunluklarının zaman diliminin uzunluğuna eşit olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, her bir birincil kullanıcının bağımsız Poisson kaynağı olduğu ve λ_p değerinin bir zaman diliminde üretilen ortalama paket sayısını temsil ettiği varsayılmaktadır. Ağa sunulan toplam yük, G_p , aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$G_p = \lambda_p N_p \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'de, N_p birincil kullanıcı sayısını göstermektedir [165]. İş çıkarma oranı, belirli bir sürede başarılı bir şekilde alınan ortalama paket sayısı olarak tanımlanmaktadır.

TDMA tekniği, çekişme tabanlı bir protokol olmadığı için TDMA paketleri birbirleriyle çarpışmamaktadırlar [160]. Bununla birlikte, ikincil kullanıcıların paketleri bilişsel radyo ağlarındaki yanlış sezme olasılığından dolayı birincil kullanıcıların paketleriyle çakışabilmektedirler [166]. Yanlış sezme olasılığının da hesaba katıldığı TDMA tekniğinin iş çıkarma oranı aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$S_p = \begin{cases} G_p(1-P_m), & G_p < 1 \\ (1-P_m), & G_p \geq 1 \end{cases} \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'te, P_m yanlış sezme olasılığını göstermektedir ve sezme olasılığından 1 çıkarılarak elde edilmektedir [71]. S_p , bilişsel radyo ağlarında birincil kullanıcılar için TDMA tekniğinin iş çıkarma oranını göstermektedir.

Yanlış sezme olasılığı ve yanlış alarm olasılıkları da hesaba katıldığında, TDMA tekniğinin ikincil kullanıcılar için iş çıkarma oranı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$S_s = \begin{cases} G_s(1-P_m-P_{fa}), & G_s < 1 \\ (1-P_m-P_{fa}), & G_s \geq 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

Bu denklemde, P_{fa} , S_s ve G_s sırasıyla yanlış alarm olasılığını, ikincil ağın iş çıkarma oranını ve ikincil kullanıcıların yükünü göstermektedir.

Spektrum sezme zamanının da hesaba katıldığı uçtan uca gecikme karakteristiği aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$D_p = 1 + \frac{N_M}{2(1-S)} + t_s \quad (3.6)$$

Bu denklemde; D_p , N_M ve S sırasıyla gecikme kullanıcı sayısı ve iş çıkarma oranını temsil etmektedir [111], [163]. Denklem (3.6)'da, t_s spektrum sezme zamanını temsil etmektedir.

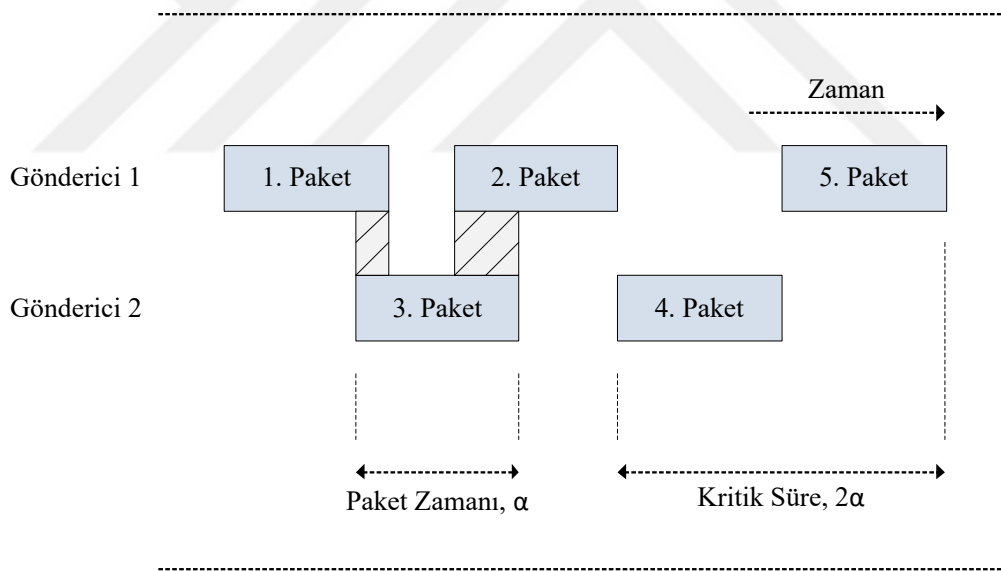
3.1.2. Slotted Aloha Tekniğinin Performans Değerlendirmesi

Tez çalışması kapsamında, bilişsel radyo ağlarında slotted Aloha ortam erişim tekniğinin uçtan uca gecikme analizi yapılmıştır. Uçtan uca gecikme analizi, farklı sayılardaki birincil ve ikincil kullanıcı içeren benzetim senaryoları için gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen senaryolardaki ağ ortamlarında; birincil kullanıcılar, ikincil kullanıcılar ve bu kullanıcılara hizmet veren erişim noktaları birlikte yer almaktadır.

Denklem (3.7)'de, Slotted Aloha tekniğinin gecikmesi, D_s , için analitik ifade yer almaktadır.

$$D_s = 1 + \frac{1 - (1 - \frac{G_s}{N_M})^{N_M-1}}{\frac{G_s}{N_M} (1 - \frac{G_s}{N_M})^{N_M-1}} \quad (3.7)$$

Bu denklemde; G_s toplam yükü, N_M kullanıcı sayısını temsil etmektedir.



Şekil 3.2. Aloha ve slotted Aloha teknikleri.

Slotted Aloha ortam erişim tekniği, Aloha protokolünün çarpışma olasılığını azaltmak için zaman dilimlerine ayrıldığı şeklidir [167], [168]. Aloha protokolünde, bir kullanıcının hazırda paketi olduğunda ortamda başka bir iletim olup olmadığına bakmadan direk olarak gönderim işlemini gerçekleştirir. Bu protokolün kötü yanı, çarpışma olasılığının çok fazla olmasıdır [111], [169]. Slotted Aloha ortam erişim tekniğinde ise, hazırda bir paket olduğunda zaman diliminin başlangıcına kadar bekleme

işlemi yapıp, zaman diliminin başlangıcında iletim gerçekleştirilir. Bu şekilde, Aloha protokolündeki zaman dilimi ortasında olabilecek paket çarpışmaları engellenmektedir [165], [169]. Slotted Aloha protokolünün uçtan uca gecikmesi, bir paketin üretildiği andan itibaren hedefe ulaşana kadar geçen süreye eşittir.

Şekil 3.2’de, Aloha ve slotted Aloha tekniklerinin paket iletimleri görülmektedir. Burada; 1, 2 ve 3 numaralı paketlerin Aloha protokolündeki çarpışmaları görülmektedir. 4 ve 5 numaralı paketler ise, slotted Aloha tekniğinin özelliklerine göre iletildikleri için zaman dilimlerinin başlangıçlarında iletilmektedirler.

3.2. SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İŞLEMİNDE ÖNCELİK SINIFLARI

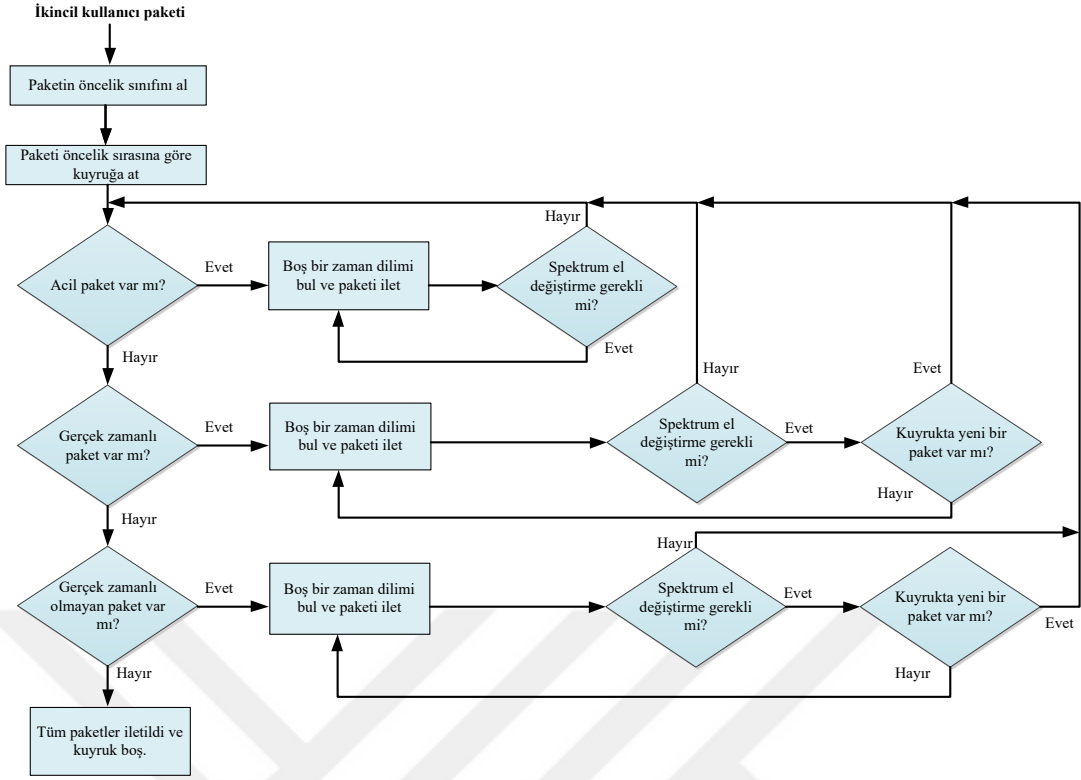
Önerdiğimiz ağ modelinde, ikincil kullanıcıların kuyruk modeli olarak engelsiz öncelikli M/G/1 veri trafiği kullanılmıştır. Öncelik sınıfları; acil, gerçek zamanlı, gerçek zamanlı olmayan şeklinde belirlenmiştir. Çalışmalarımızda kullanılan tüm performans metrikleri analitik olarak elde edilmiştir. Geliştirilen spektrum el değiştirme modeli, önceden tanımlı yaklaşım ile sezme tabanlı yaklaşımın hibrit kullanımıyla oluşturulmuştur.

3.2.1. Öncelik Sınıfları

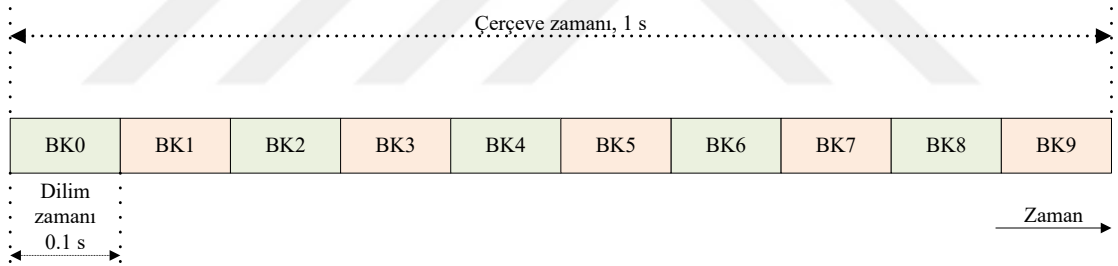
Şekil 3.3’te, kuyruk modelinin blok diyagramı görülmektedir. Kuyruk stratejisinde, paketin önceliği alındıktan sonra önceliğine göre kuyruğa atılmaktadır. Eğer paketin önceliği acil ise, öncelikli olarak paket iletimine başlanmaktadır.

İletim sırasında, zaman dilimi birincil kullanıcı tarafından kullanılacaksa spektrum el değiştirme işlemi gerçekleştirilerek iletme başka bir zaman diliminde devam edilmektedir. Tüm acil öncelikli paketlerin iletimi bittikten sonra, gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan paketler de boş zaman dilimlerinde iletilmektedir. Acil paketlerden farklı olarak, spektrum el değiştirme işlemi gerçekleştirilmeden önce yeni gelen paketler kontrol edilmektedir.

Ağ modelinde, birincil kullanıcılar TDMA tekniğini kullanarak haberleşmektedirler. TDMA tekniği çekişmesiz bir teknik olduğu için, çerçeveler Şekil 3.4’te görüldüğü şekilde eşit uzunlukta zaman dilimlerine bölünmektedir. Birincil kullanıcıların zaman dilimleri, 0.1s olarak elde edilmiştir. Her bir zaman dilimi 1s olduğundan ve 1 çerçeve toplam 10 zaman diliminden oluştuğu için çerçeve süresi 1s olmaktadır.



Şekil 3.3. Önerilen kuyruk modelinin blok diyagramı.



Şekil 3.4. Birincil ağın çerçeve yapısı.

Birincil kullanıcıların paket uzunluğu zaman dilimi uzunluğuna eşittir. Birincil kullanıcıların sunulan yükü aşağıdaki denklem yardımıyla bulunmaktadır.

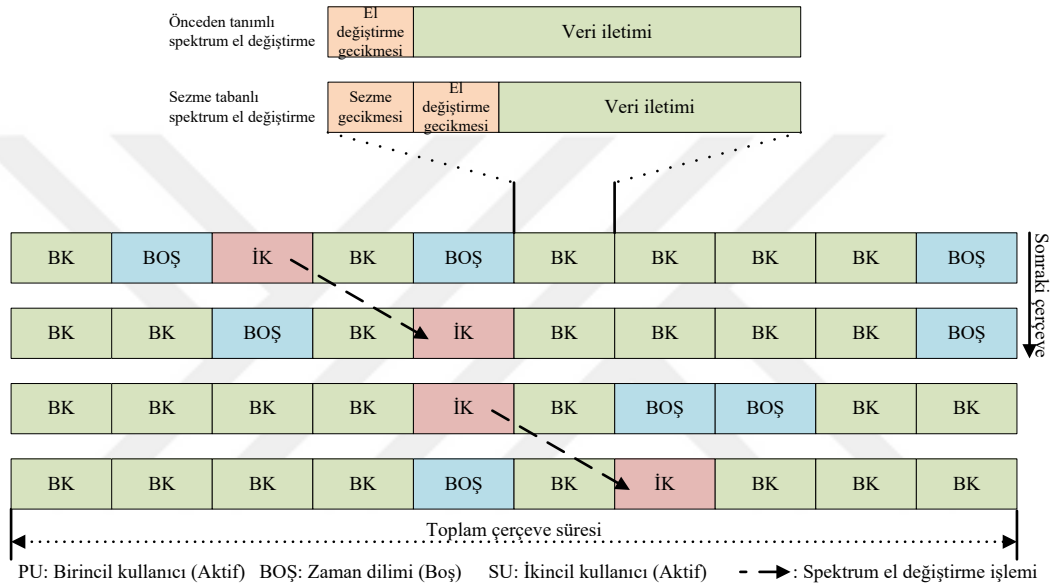
$$G_p = \lambda_p N_p \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de, N_p ve G_p sırasıyla birincil kullanıcı sayısı ve birincil kullanıcı yükünü temsil etmektedir. Poisson dağılımına göre birincil kullanıcıların paket üretim olasılığı aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır.

$$P_M(m) = \frac{G_p^m e^{-G_p}}{m!} \quad (3.9)$$

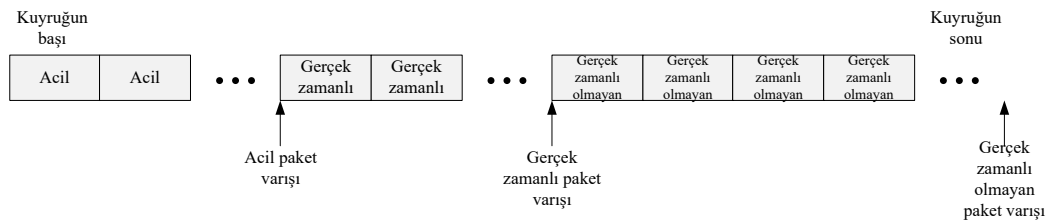
Denklem (3.9)'dan da görüleceği üzere, paket üretim olasılığı birincil kullanıcıların sunulan yükü ile elde edilmektedir. Bu denklemde, m belirli bir sürede gerçekleşen olay sayısını ifade etmektedir.

İkincil kullanıcılar, slotted Aloha tekniğini kullanarak birincil kullanıcıların boş zaman dilimlerinden yararlanmaktadırlar. İkincil kullanıcı paketleri; acil gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan şeklinde üçe ayrılmaktadır. İkincil kullanıcıların iletim yaptığı sırada, zaman dilimi birincil kullanıcı tarafından kullanılacaksa spektrum el değiştirme işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.5. İkincil ağın çerçeve yapısı.

Şekil 3.5'te, ikincil kullanıcılar için spektrum el değiştirme işlemi görülmektedir. Spektrum sezme gecikmesi ve spektrum el değiştirme gecikmesinden dolayı, ikincil kullanıcıların paketi birincil kullanıcıların paketlerinden daha küçüktür. Önceden tanımlı spektrum el değiştirme işleminde, el değiştirme işlemi sırasında önceden tanımlı kanallar kullanıldığı için sezme gecikmesi sıfıra eşittir.



Şekil 3.6. İkincil ağın kuyruk yapısı.

Şekil 3.6'da, ikincil ağın kuyruk yapısı resmedilmiştir. Kuyrukta, eşit öncelik sınıfları

için FCFS algoritması uygulanmaktadır ve yeni gelen paketler aynı öncelik sınıfının en sonuna yerleştirilmektedir. İkincil ağdaki engel olma olasılığı, P_b , aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$P_b = G_p + (1 - G_p) \frac{\lambda_s G_{bs}}{\lambda_s G_{bs} + T_s} \quad (3.10)$$

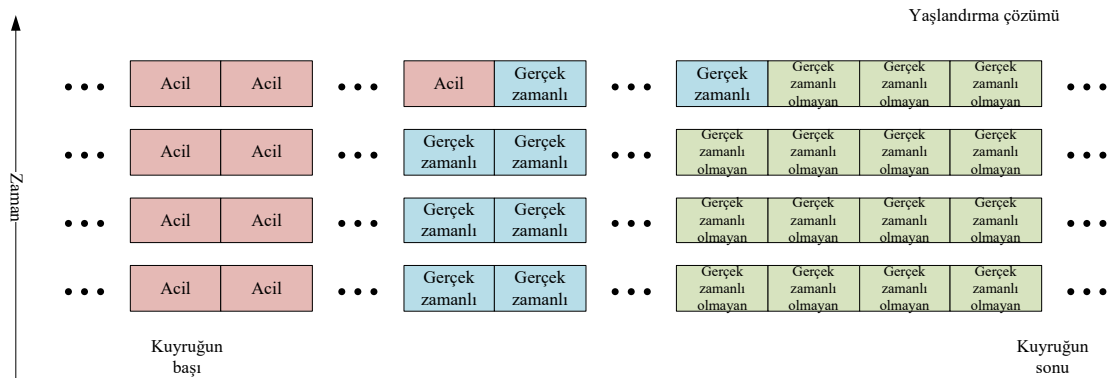
Denklem (3.10)'da, T_s ikincil kullanıcıların ortalama servis süresini ve G_{bs} her bir erişim noktasının iş yükünü temsil etmektedir. Zorunlu bitirme olasılığı da, engel olma olasılığı da hesaba katılarak Denklem (3.11)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{ft} = (1 - P_b) \frac{P_b^{1/G_{bs}-1}}{T_s D_{sh} + P_b^{1/G_{bs}-1}} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'de, T_s ikincil kullanıcıların ortalama servis süresini ve G_{bs} her bir erişim noktasının eşdeğer iş yükünü temsil etmektedir.

3.2.2. Düşük Öncelikli Paketler için Bekleme Zamanı İyileştirmesi

Açlık (starvation), kuyruğa yoğun bir şekilde yüksek öncelikli paketlerin varması şeklinde tanımlanmaktadır [170], [171]. Bu durum, düşük öncelikli paketler için çok uzun bekleme zamanlarına yol açmaktadır [172]. Açlık problemini aşmak için, literatürde önerilen çok sayıda strateji bulunmaktadır [170]. Yaşlandırma çözümü, açlığı hafifletmenin yani bekleme zamanının düşürülmesi için kullanılan tekniklerden biridir [159].



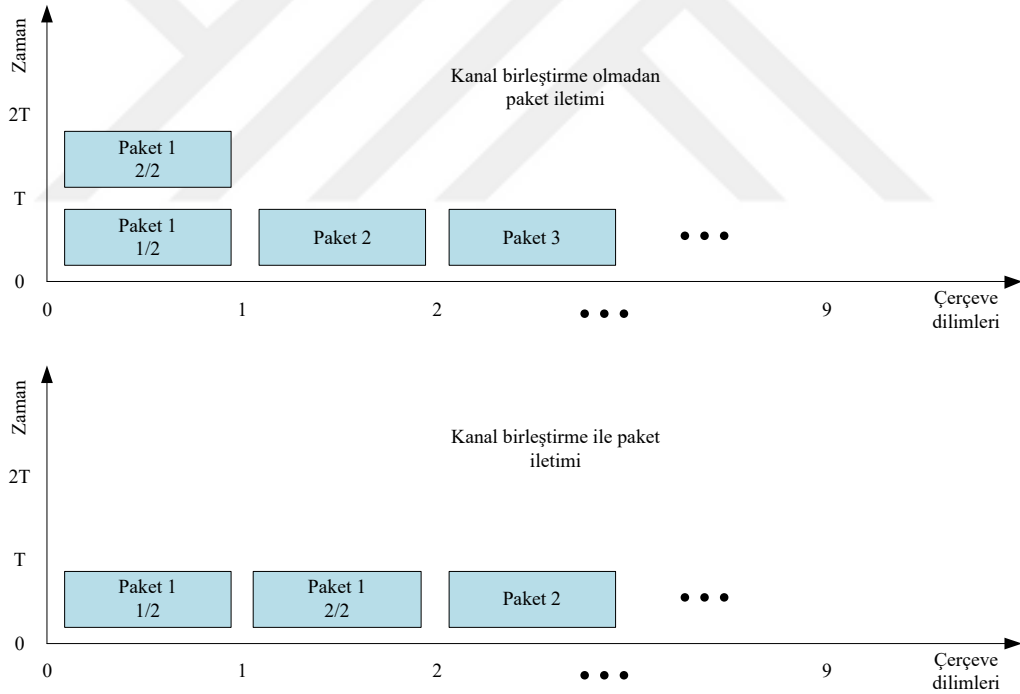
Şekil 3.7. Düşük öncelikli ikincil kullanıcılar için yaşlandırma çözümü.

Şekil 3.7'de, farklı sınıfta paketler içeren ikincil ağın kuyruk yapısı görülmektedir. Acil paketler kuyrukta en yüksek önceliğe sahiptir, gerçek zamanlı paketler ikinci yüksek

önceliğe sahiptir ve gerçek zamanlı olmayan paketler en düşük önceliğe sahiptir. Şekil 3.7’den de görüleceği üzere, kuyrukta üç çerçeve zamanından daha fazla bekleyen paketlerin öncelikleri artırılmaktadır. Bir TDMA zaman dilimi uzunluğu 0.1 s ve bir çerçeve süresi toplam 10 zaman dilimine eşit olduğu için, üç çerçeve zamanı 3 saniyeye denk gelmektedir. Böylece, önceki paketlerin yeni gelen paketlerin öncelikleri daha yüksek olsa dahi kuyrukta daha az beklemesi sağlanmaktadır. Aynı önceliğe sahip yeni gelen paketler, aynı öncelik sınıfına sahip paketlerin en sonuna FCFS (First Come First Served) algoritmasına göre yerleştirilmektedir.

3.2.3. Kanal Birleştirme

Kanal birleştirme kablosuz ağlarda son zamanlarda kullanılan yeni bir tekniktir [173]–[176]. Kanal birleştirme işleminde, bitişik olan kanallar tek bir kanal olarak birleştirilmektedir [175], [177]. Kanal birleştirme sonucunda kanal sayısı arttığı için, paket iletim zamanlarının düşürülmesi amaçlanmaktadır [178].



Şekil 3.8. Kanal birleştirme mekanizması.

$$S_s = G_s e^{-G_s} P_t (1 - P_t)^{N_s - 1} \quad (3.12)$$

Kanal birleştirme mekanizması uygulandığında, ikincil kullanıcılar için iş çıkarma oranı Denklem (3.12)’deki gibi elde edilmektedir.

Şekil 3.8’de, kanal birleştirme mekanizması resmedilmiştir. Kanal birleştirme sayesinde, Paket 1 iki parçaya bölünmesi yerine bitişik zaman dilimlerinde T sürede gönderilmektedir. Kanal birleştirme mekanizması olmayan grafikte, Paket 1’in iletim zamanı 2T süre olarak görülmektedir. Yaptığımız çalışmada, kanal birleştirme mekanizması şu şekilde gerçekleştirilmiştir: eğer paket boyutundan dolayı birden fazla zaman dilimi gerektiriyorsa, önceden tanımlı spektrum el değiştirme yaklaşımı ile iki tane bitişik zaman dilimi bulunmaktadır. Daha sonra, bitişik zaman diliminin başlangıcında sezme tabanlı yaklaşım ile bitişik zaman diliminin boş olduğu konusunda emin olunur. Eğer bitişik zaman dilimlerinin boş olduğu tespit edilirse, iletim işlemi başlatılmaktadır.

3.3. YAPAY ZEKA TABANLI SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İŞLEMİ

Spektrum el değiştirme işlemi için kullanılan yöntem ve teknikler sayesinde, ikincil kullanıcıların iletişimleri kesilmeden başka kanallara aktarılmaları sağlanmaktadır [35], [38]. İkincil kullanıcılara, spektrumda bulunan boş kanallardan kendi ihtiyaçlarına en uygun kanalın verilmesi gerekmektedir [38]. Bu durumda, birden fazla kanal arasından en uygun kanalın tespit edilmesinde belli parametrelerin ve ikincil kullanıcının iletişim gereksinimlerinin de dikkate alınması gerekmektedir [35]. Bu nedenlerden dolayı, kanal karakteristiklerinin ve kullanıcı gereksinimlerinin çok parametreliliği karar verme süreçleri ile değerlendirmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır [38]. Yapay zeka tabanlı yöntemler, kablosuz bilişsel radyo ağlarındaki karar verme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [179]. Çalışmamızda yapay zeka tekniklerinden bulanık mantık ve yapay sinir ağı, spektrum el değiştirme sayısını azaltmak için kullanılmıştır.

3.3.1. Bulanık Mantık Tabanlı Spektrum El Değiştirme

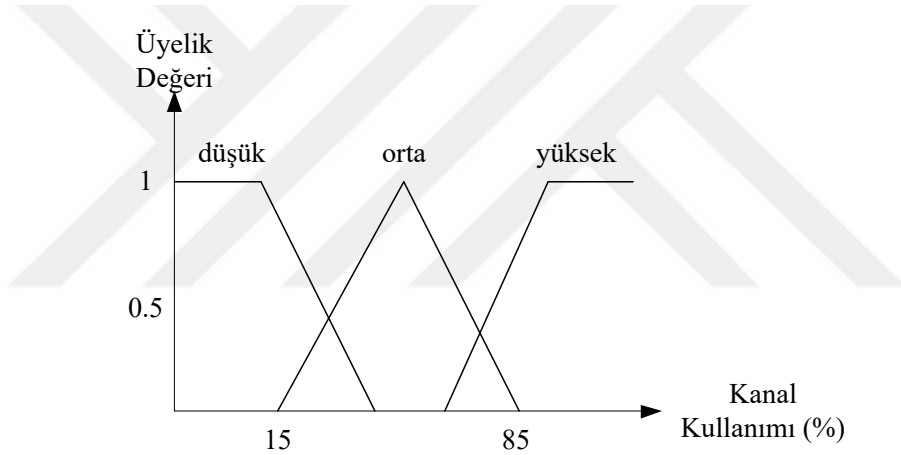
Önerilen sistemde giriş parametreleri olarak; birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğu, ikincil kullanıcıların veri oranı ve ortamdaki gürültü etkisi belirlenmiştir. Ortamdaki gürültü etkisini ölçmek için SNR (Signal to Noise Ratio – Sinyal Gürültü Oranı) parametresi kullanılmıştır.

Çizelge 3.1’de, toplamda 27 tane kuraldan oluşan kural tablosundan 3 tane örnek kural verilmiştir. Çıkış parametresi veri oranı ve gürültü etkisi ile doğru orantılı olmasına rağmen, birincil kullanıcıların ortam kullanma yoğunluğu ile ters orantılıdır.

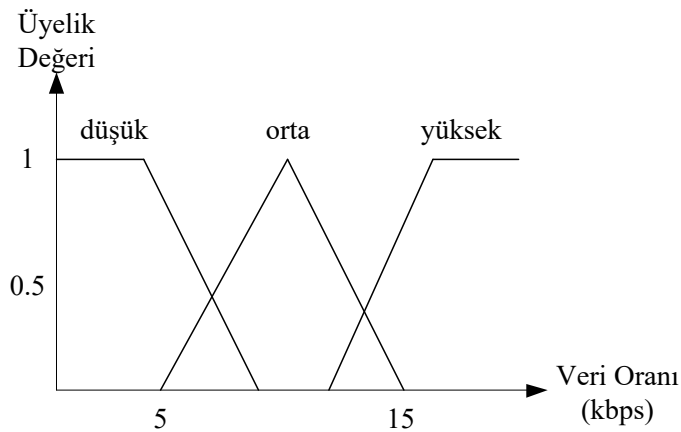
Çizelge 3.1. Kural tablosundan örnekler.

<i>Eğer (veri oranı düşük ise) ve (birincil kullanıcıların kanal kullanım olasılığı yüksek ise) ve (SNR düşük ise) o zaman (spektrum el değiştirme olasılığı çok düşük olur)</i>
<i>Eğer (veri oranı düşük ise) ve (birincil kullanıcıların kanal kullanım olasılığı orta ise) ve (SNR yüksek ise) o zaman (spektrum el değiştirme olasılığı orta olur)</i>
<i>Eğer (veri oranı yüksek ise) ve (birincil kullanıcıların kanal kullanım olasılığı düşük ise) ve (SNR yüksek ise) o zaman (spektrum el değiştirme olasılığı çok yüksek olur)</i>

Şekil 3.9’da, birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğunun üyelik fonksiyonları görülmektedir. Kanal kullanımı için, düşük orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı seviye belirlenmiştir. Kanal kullanım parametresi bir olasılık değeri ifade ettiği için, birimi % olarak seçilmiştir. Orta seviyesinin sınırları 15 ile 85 olarak belirlenmiştir. Üyelik değeri ise 0 ile 1 arasında değişmektedir.



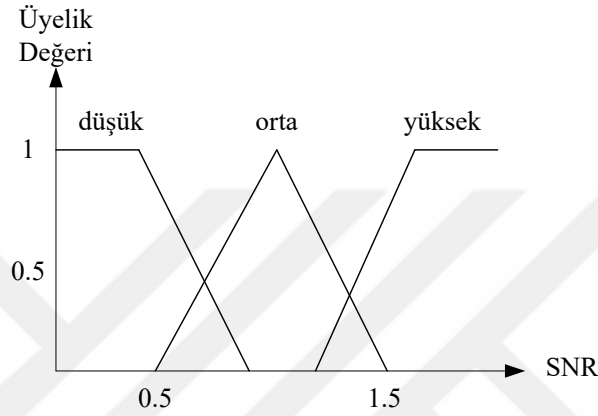
Şekil 3.9. Birincil kullanıcı ortam kullanım olasılığı üyelik fonksiyonları.



Şekil 3.10. İkincil kullanıcıların veri oranını gösteren üyelik fonksiyonları.

Şekil 3.10’da, ikincil kullanıcıların veri oranının üyelik fonksiyonları verilmiştir. Veri oranı için, düşük orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı seviye kullanılmıştır. Orta seviyenin sınırları 5 ile 15 olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.11’de, ortamdaki gürültü etkisi için SNR parametresinin üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. SNR için, düşük orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı seviye belirlenmiştir. SNR değerinin yüksek olması sinyal gücünün gürültü gücünden daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 3.11. İkincil kullanıcı SNR değerlerini gösteren üyelik fonksiyonları.

Aday değerleri için önerilen öncelik tabanlı bulanık mantık sisteminin analitik modeli aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$PV_c = [DR_c; CU_c; P_c] \quad (3.13)$$

Bu denklemde, DR, CU ve P sırasıyla veri oranı, kanal kullanımı ve önceliği temsil etmektedir. Ters bulanıklaştırma birimi ve çıkarım motorunun üç boyutlu girişi göz önüne alındığında, bulanık mantık örnek vektörü aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$PV_F = [PF_1; PF_2; PF_3] \quad (3.14)$$

Çıkarım kuralı, çıkarım motorunu işledikten sonra her bir kuralın katkısı aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$C_r = \prod_{i=1}^3 \mu_{F_i}(P_i) \quad (3.15)$$

Bu denklemde, $\mu_{F_i}(P_i)$, P_i aday değerinin F_i bulanık mantık kümelerini tanımlamaktadır.

Ters bulanıklaştırma biriminin yirmi yedi kural içeren çıkışı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

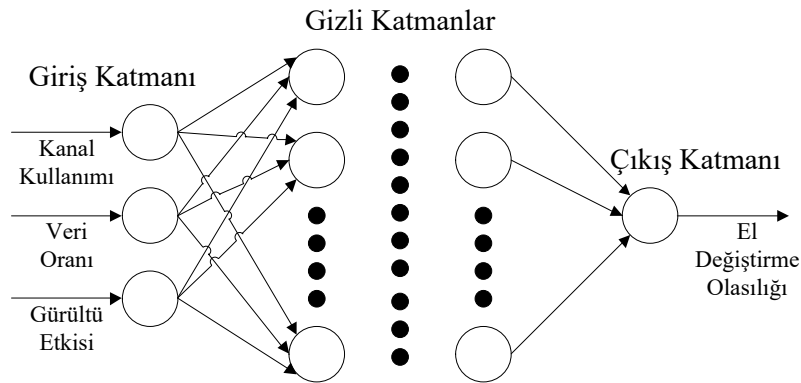
$$M_a = \frac{\sum_{k=1}^{27} y^k (\prod_{i=1}^3 \mu_{F_i}(P_i))}{\sum_{k=1}^{27} (\prod_{i=1}^3 \mu_{F_i}(P_i))} \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'da, y^k k değerinin çıkışı iken M_a bulanık mantık sisteminin elde edilen her bir çıkışın aday değerini göstermektedir.

3.3.2. Yapay Sinir Ağları Tabanlı Spektrum El Değiştirme

Sistemimizde giriş parametreleri olarak; birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğu, ikincil kullanıcıların veri oranı ve iletim yapılan ortamdaki gürültü etkisi kullanılmıştır.

Birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğu % olarak ifade edilmektedir ve 0 ile 100 arasında değişebilmektedir. İkincil kullanıcıların farklı veri oranı değerleri, farklı kullanıcılar için farklı uzunlukta paketler üretilerek sağlanmıştır. Her bir kullanıcıya, kullanıcı tarafından istenen veri oranına uygun uzunlukta tahsisler yapıldığı varsayılmıştır. Veri oranı 0 ile 20 kbps arasında değişmektedir.



Şekil 3.12. Sistemde kullanılan yapay sinir ağı yapısı.

Şekil 3.12'de sistemde kullanılan yapay sinir ağı yapısı görülmektedir. 3 giriş parametresi, 1 gizli katman ve çıkış katmanından oluşan sistemde sonuç olarak el değiştirme olasılığı bulunmaktadır. Gizli katmanda toplam 10 nöron bulunmaktadır.

Ortamdaki gürültü etkisi ise, sinyalin gürültü gücüne olan oranı ile temsil edilmektedir ve değerleri 0 ile 2 arasında ondalık olarak değişmektedir. SNR (Signal to Noise Ratio – Sinyal Gürültü Oranı) değerinin yüksek olması, sinyalin güçlü olduğu anlamına

gelmektedir. Spektrum el değiştirme olasılığının değeri olasılık ile ilgili olduğu için birimi % olarak seçilmiştir ve değeri 0 ile 100 arasında değişmektedir.

Geri yayılımlı ileri besleme yapay sinir ağları; kendi giriş değerlerini ağırlıklı olarak hesapladıktan sonra, toplam değeri hesaplar ve bu değerleri bir aktivasyon fonksiyonu ile işleyerek bir sonraki katmana iletir. Bu yüzden, sistemimizde doğrusal olmayan dinamik bir davranış gösteren ileri besleme yapay sinir ağı kullanılmıştır. Ayrıca, sistemimizde kullanılan yapay sinir ağının eğitim için Levenberg Marquardt algoritması kullanılmıştır. Levenberg Marquardt algoritmasının kullanılmasının sebebi, literatürde bilişsel radyo ağları alanındaki birçok probleme verimli bir şekilde czm sağlamasıdır [91], [148], [150]. Çizelge 3.2’de, ileri besleme yapay sinir ağı eğitim setinden örnekler görülmektedir. Sistem toplamda 360 tane veri seti kullanılarak eğitilmiştir ve oldukça düşük hata oranları elde edilmiştir. Veri seti olarak, bulanık mantık sistemimizde kullandığımız giriş ve çıkış değerleri verilmiştir. Test seti olarak da, sisteme daha önceden verilmeyen girişler uygulanarak makul ıkışlar elde edilmeye çalışılmıştır. Sistemimizin beklenen değerlere yakınlığı ve hata oranları bir sonraki bölümde yer alan grafiksel sonuçlar altında verilmiştir.

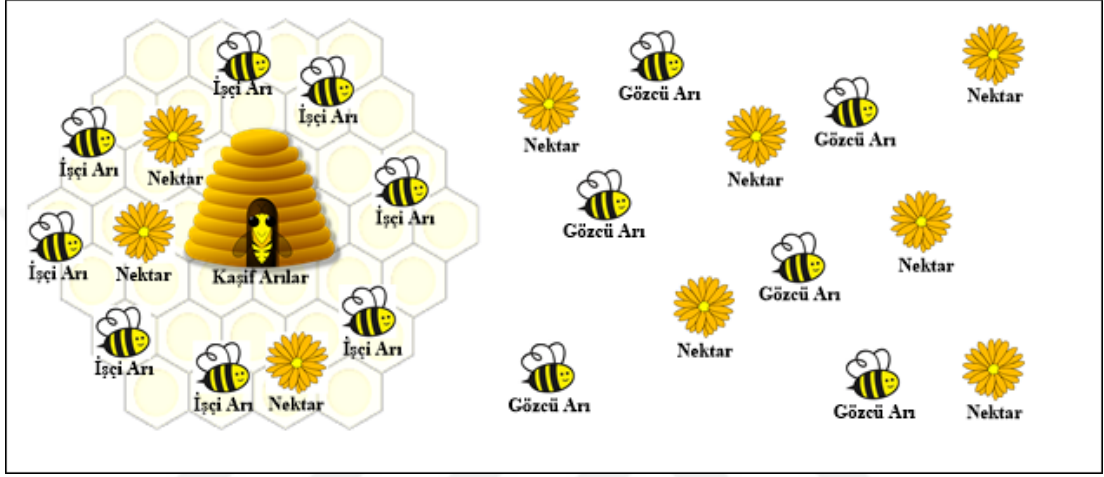
Çizelge 3.2. Eğitim setinden rnekler.

Ortam Kullanımı (%)	Veri Oranı (kbps)	SNR (dB)	El Değiştirme Olasılığı (%)
8	18	1.07	93
94	12	0.51	31
87	16	1.83	50
78	7	1.52	44
66	15	1.77	65
51	10	0.14	30
43	2	0.37	8

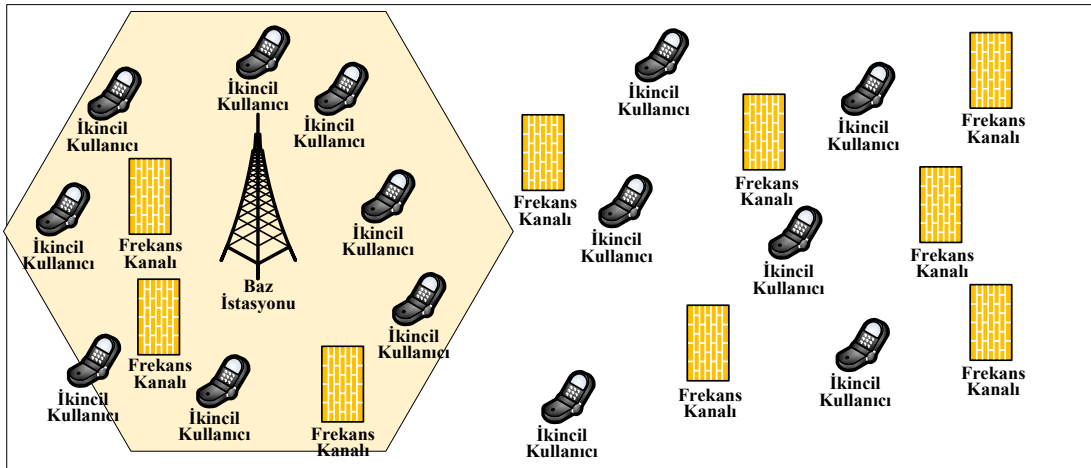
3.3.3. Yapay Arı Kolonisi Tabanlı Spektrum El Değiştirme

Bu tez çalışması kapsamında, yapay arı kolonisi tabanlı spektrum el değiştirme işlemi için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Çalışmamızda ilk olarak, yapay arı kolonisi algoritması ile ilgili temel bilgiler verilerek genel çalışma yapısı tanımlanmıştır. Yapay arı kolonisindeki her bir arı; bilişsel radyo ağları yapısındaki farklı ikincil kullanıcılara

benzetilerek görev tanımlamaları yapılmıştır. Buna göre; ikincil kullanıcıların iletim yapmaları yanında spektrum el değiştirme işlemi için boş bant genişlikleri hakkında bilgi topladıkları bir görevleri bulunmaktadır. Arı kolonisindeki kovan ise, bilişsel radyodaki erişim noktasının kapsama alanına eş değer sayılmaktadır ve toplanan bilgilere göre koordinasyonun yapıldığı birimdir. Bu kapsamda, geliştirdiğimiz yapay arı kolonisi tabanlı spektrum el değiştirme işleminde servis kalitesini analiz etmek için matematiksel ifadeler türetilmiştir.



Şekil 3.13. Yapay arı kolonisi.



Şekil 3.14. Kablosuz bilişsel radyo ağı.

Geliştirdiğimiz algoritmada, spektrum el değiştirme gecikmesini en aza indirmek için yapay arı kolonisi algoritmasındaki arıların konumu esas alınarak kanal kullanılabilirlik özellikleri incelenmiştir. Yapay arı kolonisi algoritması düşük ağ yükü altında daha iyi sonuçlar verdiği için, benzetim parametreleri bu duruma göre seçilmiştir. Yapay arı kolonisi algoritması ile geliştirdiğimiz algoritma yardımıyla, ikincil kullanıcıların

spektrum el deęiřtirme gecikmesi kabul edilebilir bir seviyeye dūřūrūlmūřtır. Ayrıca, dūřūk aę yūkū altında toplam spektrum el deęiřtirme sayısı da azaltılmıřtır.

Çalışmamızda, bilişsel radyo ağlarının en temel fonksiyonlarından biri olan spektrum el değiştirme işleminin yapay arı kolonisi algoritması yardımıyla optimizasyonu yapılmıştır. şekil 3.13'te, yapay arı kolonisinde bulunan kovan, nektarlar, iřçi arılar, gözcū arılar ve kaşif arılar gösterilmektedir. şekil 3.14'te ise, kablosuz bilişsel radyo aę yapısının temel bileşenleri görūlmektedir. Bu iki şekil dikkatle incelendiğinde, temel olarak iki sistemin de aynı hedef için çalıştığı tespit edilebilmektedir. Arıların en būyūk görevi bol miktarda ve kaliteli nektar kaynağı bulmak iken, bilişsel radyodaki ikincil kullanıcıların görevi de bant genişliği yūksek olan boř frekans kanalları bulmaktır. Bu bağlamda, çalışmamızın amacı fonksiyonumuzdaki ikincil kullanıcıların toplam servis sūresini maksimize etmektir.

Önceden tanımlı karar verme iřleminin gerçekleřeceęi bu ařamada frekans kanallarının toplam servis sūresi hesaplanır. Her bir kanalın servis sūresi o kanal için hesaplanarak kanal deęerleri bulunur.

$$E[T_{pro}] = T_d + G_p T_d \frac{T_0}{1 - G_p T_0} \quad (3.17)$$

Denklem (3.17)'de; T_d servis sūresini, $E[T_{pro}]$ toplam servis sūresini, T_0 ikincil kullanıcıların ilk defa spektrum el deęiřtirme iřlemine bařladıęı zamanı ve G_p birincil kullanıcıların yūkūnū temsil etmektedir. μ , ortam kullanım sıklıęını gōstermek ūzere toplam servis sūresi Denklem (3.18)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_d = \frac{1}{\mu} \quad (3.18)$$

Denklemden j parametresi (bant genişliği, BER, SNR, kullanım sıklığı, vb.) toplam parametre sayısını, i ise kanal sayısını gōstermektedir. Diğer adımda, her bir işçi arı kaynak sayısının yarısına eşit sayıda farklı kaynaklar aramaktadır.

$$x_{ij} = x_j^{min} + \varphi_{ij}(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (3.19)$$

Algoritmanın ūūncū adımımda, gözcū arılar;

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + \mu_i} & , \quad \mu_i \geq 0 \\ 0 & , \quad \mu_i < 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'deki uyum fonksiyonunu kullanarak,

$$P_i = \left(\frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \right) \quad (3.21)$$

olasılıkla bir besin kaynağı seçerler. Kaşif arılar yiyecek ararken tamamen rastgele araştırma yapmakta ve herhangi bir ön bilgi kullanmamaktadırlar. Bir kaynağın ter edilme koşulu, ilgili kaynağı ifade eden çözümün belirli sayıdaki deneme ile geliştirilmemiş olmasıdır. İlgili kaynağa gidip gelen arı da kaşif arıya dönüşerek farklı nektar kaynakları aramak üzere yola çıkar. Kaşif arının komşu bir kaynak bulması;

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (3.22)$$

ile Denklem (3.22)'deki gibi hesaplanır. Burada v_{ij} spektrum el değiştirmenin gerçekleşeceği komşu kaynaktır.

4. BENZETİM MODELİ VE GRAFİKSEL SONUÇLAR

4.1. BENZETİM MODELİNİN TASARIMI

Riverbed Modeler benzetim yazılımı, tasarım, benzetim ve veri toplama gibi çok çeşitli araçlar içermektedir [32]. Ayrıca, Riverbed Modeler kablosuz haberleşme ağları ve dağıtık ağ sistemleri gibi çok geniş bir geliştirme ortamı desteği vermektedir [32]. Riverbed yazılımında, benzetim modeli gerçekleştirilen ağın performansı ayrık olay benzetimleri yardımıyla değerlendirilmektedir [32].

Diğer taraftan, Riverbed Modeler hem benzetim senaryolarını konfigüre etmek hem de ağ modelleri geliştirmek için grafiksel kullanıcı arayüzü sunmaktadır. Ağ konfigürasyonu; ağ seviyesi, düğüm seviyesi ve işlem seviyesi olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Ağ seviyesinde, ağın topolojisi kurulmaktadır. Düğüm seviyesi, düğümün davranışlarını tanımlamaktadır ve düğümün farklı bileşenleri arasında veri akışını kontrol etmektedir. İşlem seviyesi ise durumlar ve arasındaki geçişlerden oluşan durum makinelerinin özelliklerini tanımlamaktadır. Riverbed Modeler yazılımının kaynak kodu C programlama diline dayanmaktadır [32].

4.1.1. Sezme Tabanlı Yaklaşım

Sezme tabanlı yaklaşımda, önerilen kablosuz ağın tasarımı, modellenmesi ve benzetimi için Riverbed Modeler benzetim yazılımı kullanılmıştır. Benzetim ortamında, kablosuz ağ ortamında rasgele biçimde dağıtılmış 10 birincil kullanıcı ve 5 ikincil kullanıcı bulunmaktadır. Alınan paket gücünü tahmin etmek için boş uzay kaybı (free space loss) kanal yayılım modeli kullanılmıştır. Riverbed ve MATLAB yazılımlarının ortak çalıştırılmasıyla tasarlanan benzetim modelinde kullanılan diğer benzetim parametreleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Bu yaklaşımda, birincil kullanıcıların ve ikincil kullanıcıların aynı haberleşme ortamında bulundukları merkezi bir kablosuz bilişsel radyo ağı tasarlanmıştır. Birincil kullanıcıların kanal erişim için lisansları bulunurken ikincil kullanıcıların herhangi bir kanal için lisansları bulunmamaktadır. Bu yüzden, ikincil kullanıcılar kanala sadece fırsatçı bir şekilde kanal birincil kullanıcılar tarafından kullanılmadığında erişebilmektedirler.

Çizelge 4.1. Benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
Birincil kullanıcıların zaman dilimi uzunluğu	100 ms
Birincil kullanıcı sayısı	10
İkincil kullanıcı sayısı	3
Birincil kullanıcıların alıcı frekansı	1.85 GHz
Birincil kullanıcıların verici frekansı	2.4 GHz
İkincil kullanıcıların alıcı frekansı	2.4 GHz
İkincil kullanıcıların verici frekansı	1.85 GHz
Birincil ve ikincil kullanıcıların bant genişliği	2 MHz
Modülasyon tipi	QPSK
Birincil ve ikincil kullanıcıların iletim gücü	0.1 W
İkincil kullanıcıların paketler arası varış süresi	0.1 s
Birincil ve ikincil kullanıcıların veri oranı	1 Mbps
Birincil kullanıcıların paket uzunluğu	12 Kb
İkincil kullanıcıların paket uzunluğu	10 Kb

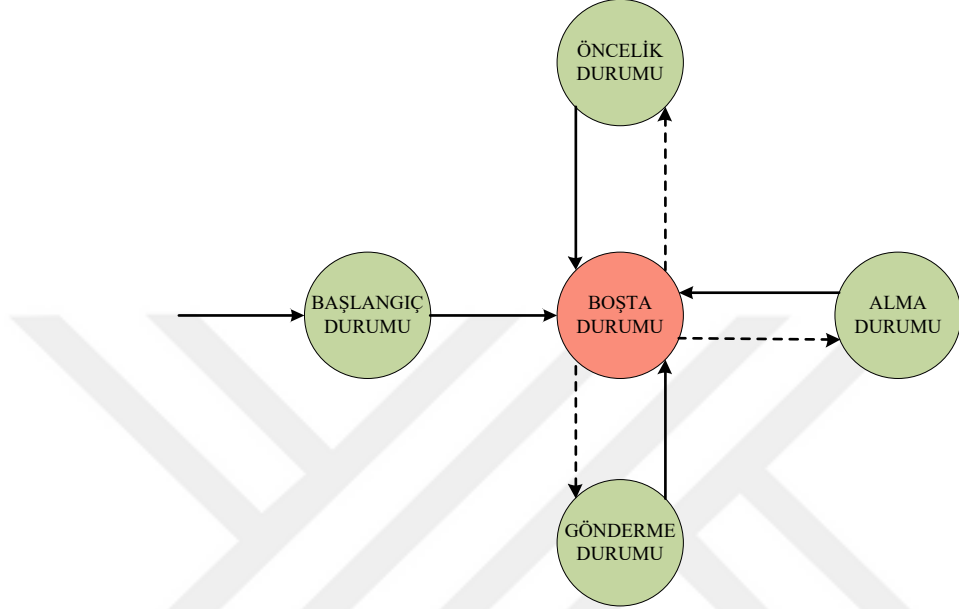
4.1.2. Öncelik Tabanlı Yaklaşım

Benzetim senaryosunda kullanılan ikincil baz istasyonunun işlem seviyesi modeli Şekil 4.1’de verilmektedir. Riverbed benzetim yazılımı olay tabanlı olduğu için; durum değişkenleri tanımlandıktan sonra, başlangıç durumunda ilk değer atama işlemleri yapılmaktadır [32]. Daha sonra, işlem boşa durumunda geçer ve yeni bir olayın meydana geldiğini temsil eden bir kesme bekler.

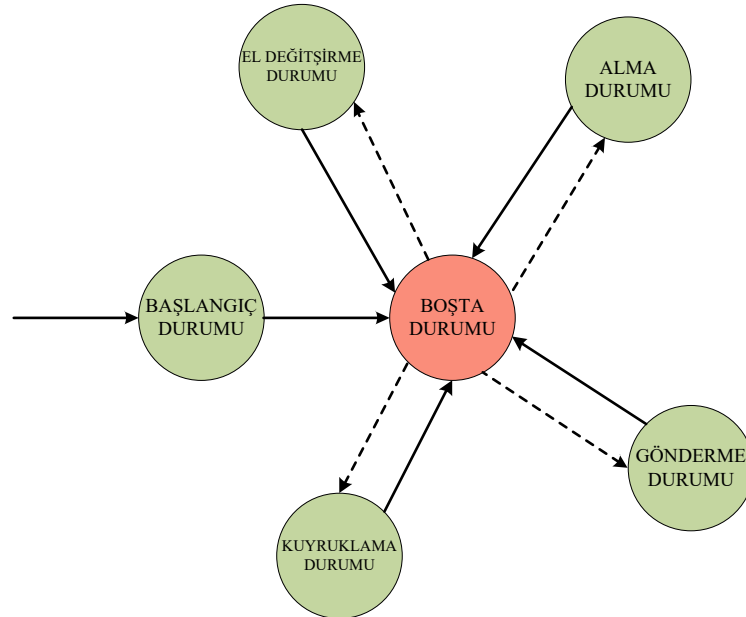
Öncelik durumunda; paketin önceliği alındıktan sonra, öncelik sınıfına göre paket kuyruğa yerleştirilir. Alma durumunda; ikincil baz istasyonu tarafından bir paket alındığında, paketin kaynak ve hedef adresleri kontrol edilir. Eğer paket baz istasyonuna ait ise, veri istatistikleri güncellenir, eğer değilse paket yok edilir. İşlem, her bir zaman diliminin başlangıcında kuyrukta bekleyen hazır paketleri göndermek için gönderme durumuna geçer.

Benzetim senaryosunda kullanılan ikincil kullanıcının işlem seviyesi modeli Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Riverbed benzetim yazılımı olay sürümlü olduğundan dolayı; tüm

durum değişkenleri tanımlandıktan sonra, başlangıç durumunda bu değişkenlerin ilk değerleri atanmaktadır. Daha sonra, işlem boşta durumunda geçerek yeni bir olayın olduğunu ifade eden bir kesme bekler [32]. El değiştirme durumunda; boş zaman dilimi belirlendikten sonra, en yüksek önceliğe sahip olan paket spektrum el değiştirme işlemini gerçekleştirmektedir.



şekil 4.1. Riverbed yazılımında ikincil baz istasyonunun işlem seviyesi modeli.



şekil 4.2. Riverbed yazılımında ikincil kullanıcının işlem modeli.

Kuyruklama durumunda; st katmandan gelen paketlere düğümün kaynak ve hedef bilgisi eklendikten sonra, bu paketler öncelik sınıflarına göre kuyruğa atılmaktadırlar.

Alma durumunda; ikincil kullanıcı tarafından bir paket alındığı zaman, paketin kaynak ve hedef adresleri kontrol edilir. Eğer paket ikincil kullanıcıya ait ise, veri istatistikleri güncellenir, değil ise paket yok edilir. İşlem, her bir zaman diliminin başlangıcında gönderme durumuna geçerek kuyrukta bekleyen mevcut paketleri gönderir.

4.1.3. Kanal Birleştirme Tabanlı Yaklaşım

Kanal birleştirme tabanlı yaklaşımda kullanılan benzetim parametreleri Çizelge 4.2’de verilmektedir.

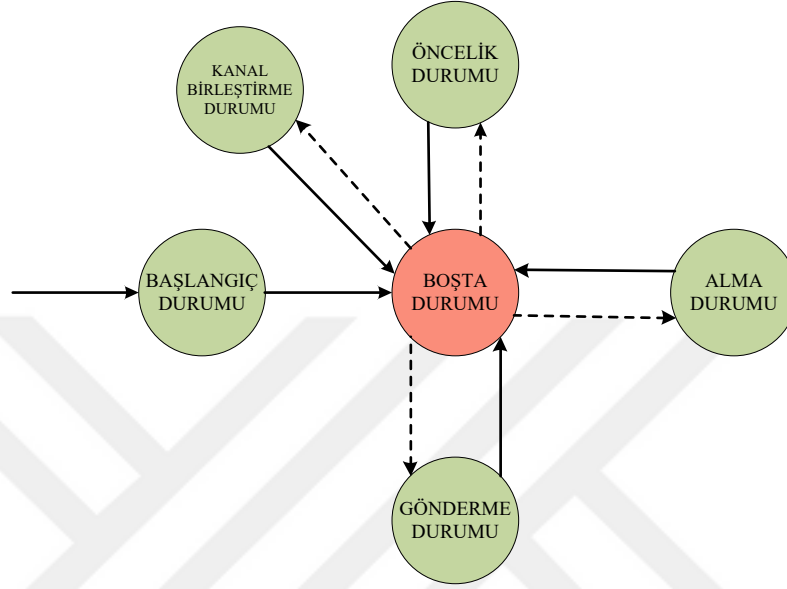
Çizelge 4.2. Kanal birleştirme tabanlı yaklaşımda benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
Birincil kullanıcıların zaman dilimi uzunluğu	100 ms
Bir çerçevedeki zaman dilimi sayısı	10
Birincil ve ikincil kullanıcıların frekansı	2.4 GHz
Birincil ve ikincil kullanıcıların bant genişliği	2 MHz
Birincil ve ikincil kullanıcıların veri oranı	1 MBps
Modülasyon tekniği	QPSK
İkincil kullanıcıların iletim gücü	100 mW
Sezme olasılığı	0.91 – 0.99
Yanlış alarm olasılığı	0.01 – 0.09
Birincil kullanıcıların paket boyutu	12 Kb
İkincil kullanıcıların paket boyutu	10 Kb – 22 Kb
Spektrum el değiştirme gecikmesi	4 ms

Benzetim modelinde kullanılan ikincil erişim noktasının işlem modeli Şekil 4.3’te gösterilmektedir. Riverbed benzetim yazılımı olay sürümlü olduğundan dolayı; tüm durum değişkenleri tanımlandıktan sonra, başlangıç durumunda bu değişkenlerin ilk değerleri atanmaktadır [32]. Daha sonra, işlem boşa durumunda geçerek yeni bir olayın olduğunu ifade eden bir kesme bekler.

Öncelik durumunda; paketin önceliği alındıktan sonra, öncelik sınıfına göre paket kuyruğa yerleştirilir. Kanal birleştirme durumunda; eğer paket boyutu bir zaman diliminden daha büyük ise, ikisi birden boş olduğunda ardışık iki zaman diliminin

birleştirilmesi işlemi gerçekleştirilir. Alma durumunda; ikincil baz istasyonu tarafından bir paket alındığında, paketin kaynak ve hedef adresleri kontrol edilir. Eğer paket baz istasyonuna ait ise, veri istatistikleri güncellenir, eğer değilse paket yok edilir. İşlem, her bir zaman diliminin başlangıcında kuyrukta bekleyen hazır paketleri göndermek için gönderme durumuna geçer.

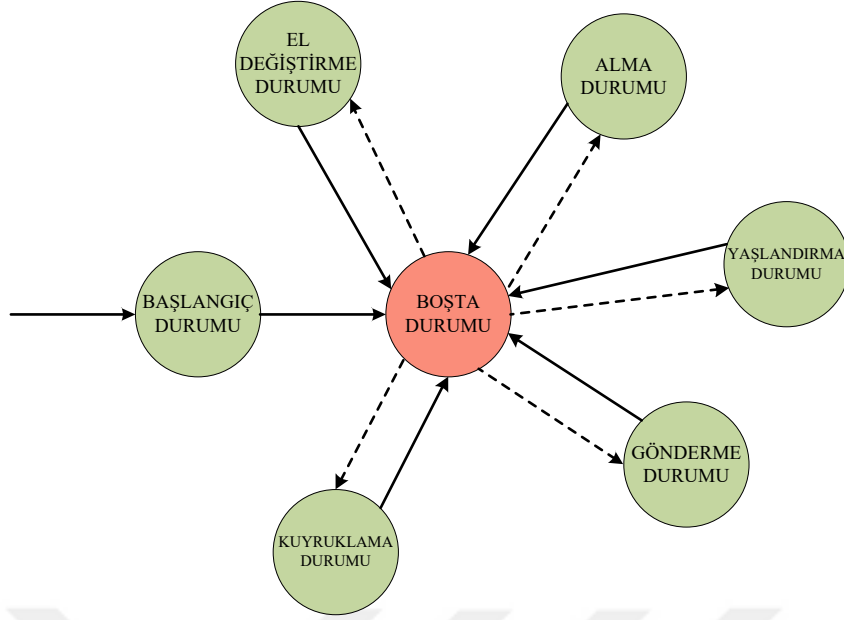


Şekil 4.3. İkincil baz istasyonunun işlem modeli.

Benzetim modelinde kullanılan ikincil kullanıcıların işlem modeli Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Riverbed benzetim yazılımı olay sürümlü olduğundan dolayı; tüm durum değişkenleri tanımlandıktan sonra, başlangıç durumunda bu değişkenlerin ilk değerleri atanmaktadır. Daha sonra, işlem boşta durumunda geçerek yeni bir olayın olduğunu ifade eden bir kesme bekler [32]. El değiştirme durumunda; boş zaman dilimi tespit edildikten sonra, en yüksek önceliğe sahip olan paket spektrum el değiştirme işlemi yapmaktadır.

Yaşlandırma durumunda, kuyrukta üç çerçeve zamanından daha fazla süre bekleyen paketlerin önceliği yükseltilmektedir. Kuyruklama durumunda; üst katmandan gelen paketlere düğümün kaynak ve hedef bilgisi yazıldıktan sonra, bu paketler öncelik sınıflarına göre kuyruğa yerleştirilmektedirler.

Alma durumunda; ikincil baz istasyonu tarafından bir paket alındığında, paketin kaynak ve hedef adresleri kontrol edilir. Eğer paket erişim noktasına ait ise, veri istatistikleri güncellenir, eğer değilse paket yok edilir. İşlem, her bir zaman diliminin başlangıcında kuyrukta bekleyen hazır paketleri göndermek için gönderme durumuna geçer.



Şekil 4.4. İkincil kullanıcının işlem modeli.

4.1.4. Yapay Zeka Tabanlı Yaklaşım

Yapay zeka tabanlı yaklaşımın benzetim modelinde; kablosuz ağ ortamında on birincil kullanıcı, üç ikincil kullanıcı ve bir baz istasyonu vardır. Bunun yanında, ağ davranışlarını modellemek için engelsiz devam eden öncelikli kuyruk modeli kullanılmıştır. En uygun spektrum el değiştirme kararı, ikincil kullanıcıların erişim noktasının kapsama alanında kaldığı varsayılarak erişim noktası tarafından bulanık mantık sistemiyle verilmektedir.

Çizelge 4.3. Ses trafiği için örnek giriş ve çıkış değerleri.

Olasılık (%)	Veri Oranı (kbps)	Kanal Kullanımı (%)	Öncelik
7.16	2	94	1
26.05	7	78	1
50	10	51	2
62.42	13	32	2

Spektrum el değiştirme kararı verilirken, veri oranı ve öncelik giriş parametreleri bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcıların farklı gereksinimleri açısından çok büyük öneme sahiptir.

Çizelge 4.3'te, ses trafiği için benzetim modelinden elde edilen örnek değerler ve

başarılan spektrum el değiştirme olasılık değerleri gösterilmektedir. Öncelik giriş parametresi için; üç, iki ve bir öncelik sıralarını belirtmektedir ve üç en yüksek önceliği göstermektedir.

Çizelge 4.4. Video trafiği için örnek giriş ve çıkış değerleri.

Olasılık (%)	Veri Oranı (kbps)	Kanal Kullanımı (%)	Öncelik
50	23	66	2
50	27	43	2
79.83	30	25	3
92.84	33	8	3
66	15	1.77	65
51	10	0.14	30
43	2	0.37	8

Çizelge 4.4'te, video trafiği için benzetim modelinden elde edilen örnek değerler gösterilmektedir. Bu değerlere göre, bulanık mantık sisteminin sonucu olarak spektrum el değiştirme olasılıkları elde edilmiştir.

Tez çalışmasının yapay arı kolonisi kullanıldığı kısımda yer alan Çizelge 4.5'te, yapay arı kolonisi algoritmasındaki arıların ve kovan yapısının bilişsel radyo ağıımızdaki her bir bileşenin karşılıkları tanımlanmıştır.

Çalışmamızda işçi arı: (i) İkincil kullanıcı olarak frekans spektrumunu tarayarak (sezerek) boş frekans kanal bilgilerini toplar. (ii) Frekans kanalı bekleyen gözcü arılara boş kanal bilgilerini verir. (iii) En fazla çevrim sayısı şartı koyularak işçi arılar besin kaynaklarına gönderilirler. İşçi arılar besin kaynağını işlemek üzere rastgele bir besin kaynağına yönelirler. Besin kaynağının işlenme işlemi tamamlandıktan sonra bu besin kaynağına ait yeni besin kalitesi (çözüm değeri) hesaplanmaktadır. Sonrasında bu hesaplanan değere göre işlem yapılmaktadır.

Çalışmamızda gözcü arı: (i) İlk başta pasif ikincil kullanıcı olarak kovanda bekler. (ii) İşçi arılardan aldığı bilgilere göre kullanacağı kanala karar (spektrum el değiştirme) verir. (iii) İşçi arılardan farklı olarak, gözcü arılar uygunluk değerini esas alarak bir seçim yapmaktadırlar.

Çizelge 4.5. Yapay arı kolonisi ve kablosuz bilişsel radyo ağı.

Yapay Arı Kolonisi	Kablosuz Bilişsel Radyo Ağı
İşçi Arı	Aktif İkincil Kullanıcı (Spektrum Sezme)
Gözcü Arı	Aktif İkincil Kullanıcı (El Değiştirme)
Kaşif Arı	Pasif İkincil Kullanıcı
Kovan	Kapsama Alanı
Nektar Miktarı	Bant Genişliği, Kanal Kalitesi
Dans Alanı	Baz İstasyonu
Gün Işığı	Kullanım Sıklığı, Kanal Kalitesi
Petek	Başarılı İletim Oranı
Kaynak	Birincil Kullanıcı Kanalları
Uygunluk Fonksiyonu	Toplam Servis Süresi

Çalışmamızda kaşif arı: (i) Bir kovanda başlangıçta ikincil kullanıcıların yarısı işçi arı diğer yarısı gözcü arı olarak çalışmaktadır. Bu sebepten dolayı kaşif arı ilk etapta pasif ikincil kullanıcı olarak beklemektedir. (ii) Bulunduğu ortamda rastgele boş kanal bulmak için spektrumu tarar. Taradığı bilgilere göre boş ve dolu kanal bilgilerini ve bant genişliklerini hafızasında tutar. Daha verimli frekans kanalı bulduğunda önceki dolu kanal bilgilerini hafızasından siler. (iii) Gözcü arı ve işçi arı aşamalarından sonra kaşif arılar devreye girmektedir. Kaşif arı aşamasının kullanılmasının en temel sebebi, algoritmanın yerel maksimum noktasına veya yerel minimum noktasına takılmasını engellemektir. Bu şekilde, kısıt değerlerini tamamen sıfırlayarak ve dolayısıyla elde edilen çözümleri tamamen bozarak farklı bir çözüm kümesi üretilmesini sağlamaktadır. Önceden hafızada tutulan çözüm değeri ile yeni elde edilen çözüm değeri karşılaştırılarak iyi olan çözüm kümesinin hafızada kalması sağlanır.

Tasarlanan algoritma adımları şu şekildedir: (i) Önceden tanımlı yaklaşım ele alınarak (proactive decision) rastgele frekans kanalları seçilir. (ii) İşçi arılar rastgele kaynaklara gönderilerek kanal kaliteleri bulunur. (iii) İşçi arıların kanal kalitesi bilgilerini alan gözcü arılar uygunluk değerine frekans kanalı seçerler. (iv) İletimi biten ya da birincil kullanıcının geldiği kanallar terk edilir. (v) İletimi biten arılar kaşif arıya dönüşerek yeni boş frekans kanalları bulmak için ortamı tararlar. Bulduğu kaliteli kanalları hafızasında tutarlar. (vi) İletimin devam etmesi için iki ve beş arası adımlar tekrarlanır.

4.2. PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ

Çizelge 4.6’te, spektrum el değiştirme işlemi tez çalışması boyunca kullanılan başarımların ölçütlerinin listesi verilmiştir. Sezme olasılığı, spektrumda birincil kullanıcı varlığının doğru bir şekilde tespit edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Yanlış alarm olasılığı ise, spektrum aslında boş iken spektrumun dolu olduğunun tespit edilmesi olarak ifade edilmektedir [65].

Yanlış sezme olasılığı, sezme olasılığının tam tersi olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, spektrum aslında birincil kullanıcı tarafından kullanılmakta iken spektrumun boş olarak tespit edilmesidir. Engel olma olasılığı, ikincil kullanıcıların boş spektrum kısıtlılığından dolayı engellenmesi olarak nitelendirilmektedir. Örnek olarak, önceden tanımlı yaklaşımda boş olarak tanımlanmış bir kanalın dolu olmasından dolayı ikincil kullanıcının iletimine engel olunması verilebilir.

Çizelge 4.6. Spektrum el değiştirme işlemi için kullanılan başarımların parametreleri.

Performans Metriği	Açıklama
P_d	Sezme olasılığı
P_{fa}	Yanlış alarm olasılığı
P_{md}	Yanlış sezme olasılığı
P_b	Engel olma olasılığı
P_{ft}	Zorunlu bitirme olasılığı
S_s	İkincil kullanıcıların iş çıkarma oranı
D_{sh}	Spektrum el değiştirme gecikmesi
N_{sh}	Spektrum el değiştirme sayısı

Zorunlu bitirme olasılığı, spektrum el değiştirme işleminin gerçekleştirilebileceği mevcut bir spektrum olmadığında meydana gelmektedir [50], [180]. İş çıkarma oranı, alıcı tarafından başarılı bir şekilde alınan paket sayısının belirli bir süredeki toplam zaman dilimi sayısına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Spektrum el değiştirme gecikmesi, kanal değiştirme zamanı ve spektrum sezme zamanının toplamından oluşmaktadır. Önceden tanımlı el değiştirme işleminde ise, spektrum sezme zamanı olmadığı için toplam gecikme kanal değiştirme zamanına eşittir.

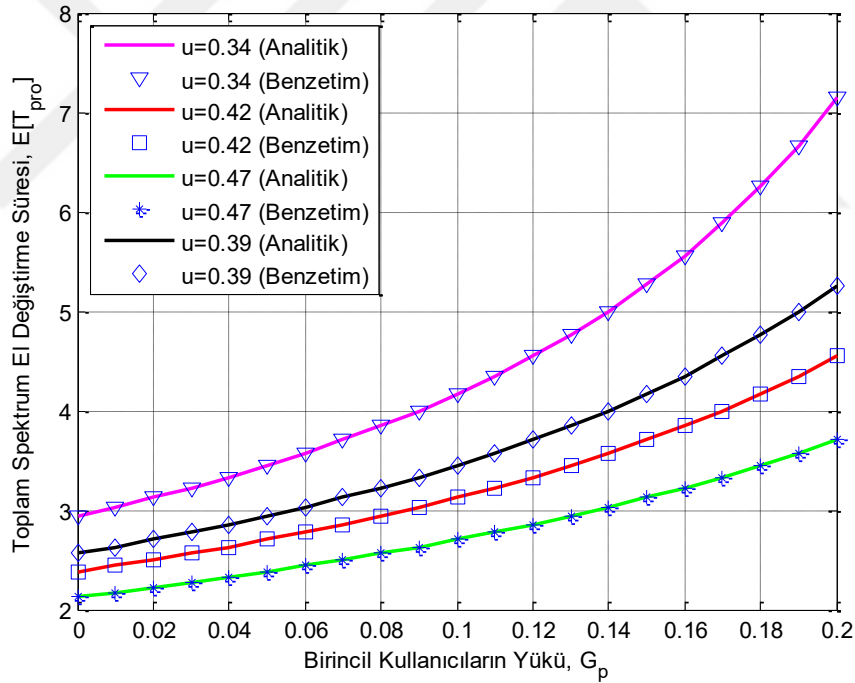
4.3. BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ

Benzetim modellerimizin sayısal sonuçları Riverbed ve MATLAB yazılımlarının birlikte kullanımıyla bulunmuştur. İlk benzetim senaryosunda, farklı birincil kullanıcı yükleri için önceden tanımlı spektrum el değiştirme tekniği analiz edilmiştir.

İkinci senaryomuzda, sezme tabanlı ve önceden tanımlı yaklaşımlar karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Daha sonra, öncelik tabanlı yaklaşım ile ilgili sonuçlar yorumlanmıştır. Kanal birleştirme ve yapay zeka tabanlı yaklaşımların grafikleri de verildikten sonra, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

4.3.1. Sezme Tabanlı Yaklaşım

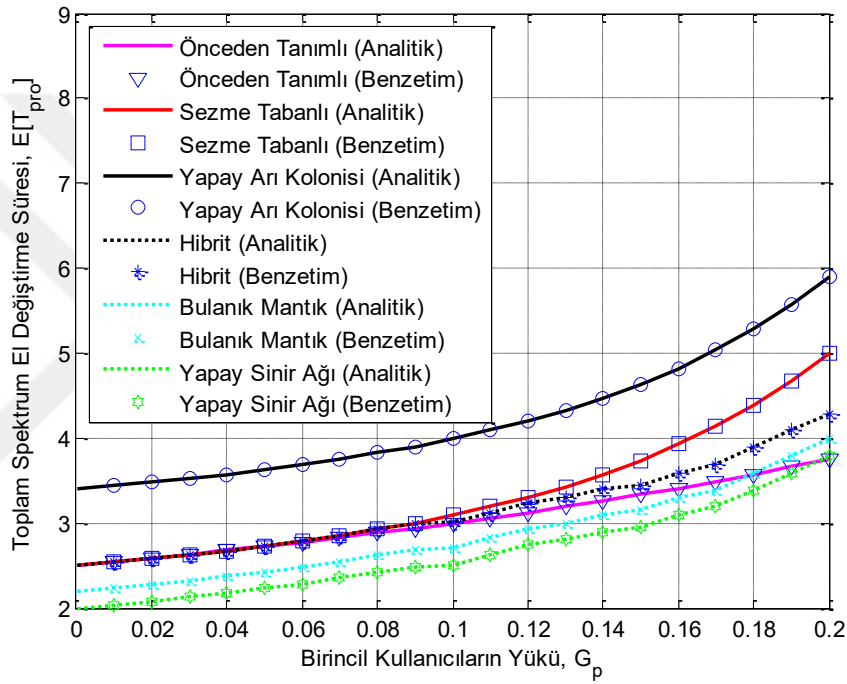
Şekil 4.5'te, farklı servis süresi değerleri ve farklı kullanıcı yükleri için benzetim senaryosunun grafiksel sonuçları verilmiştir. Şekilden anlaşılabileceği gibi, spektrum kullanım sıklığı yükseldikçe toplam spektrum el değiştirme süresi düşmüştür.



Şekil 4.5. Önceden tanımlı yaklaşım için toplam el değiştirme süreleri.

Şekil 4.6'da, sezme tabanlı, önceden tanımlı ve hibrit spektrum el değiştirme teknikleri karşılaştırılmıştır. Lisanslı kullanıcıların yükü 0 ile 0.07 değerleri arasında değişirken el değiştirme sürelerinin sabit kaldığı anlaşılmaktadır. Artan yükler için, önceden tanımlı spektrum el değiştirme tekniği daha düşük el değiştirme sürelerine sahiptir. Bu sebepten dolayı, ortam paket iletimi yoğunluğunun daha fazla olduğu kablosuz ortamlarda sezme

tabanlı yaklaşım yerine önceden tanımlı yaklaşımı kullanmak mantıklıdır. Önerdiğimiz hibrit yaklaşım ise, sezme tabanlı ve önceden tanımlı yaklaşımın ortasında bir performans sergilemektedir. Hibrit yaklaşımın bu şekilde sonuç vermesinin sebebi, önceden tanımlı yaklaşım sayesinde gecikmelerden kurtulması ve aynı zamanda sezme tabanlı yaklaşım sayesinde doğru el değiştirme boşlukları tespit etmesidir. Arı kolonisi algoritması çok doğru değerler verdiği için ağı çalışmaktadır ve bu yüzden yüksek el değiştirme süresine sahip olmuştur. Bulanık mantık ve yapay sinir ağı yakın el değiştirme sürelerine sahip olmasına rağmen, bulanık mantık sistemi biraz daha düşük el değiştirme süresine sahiptir.

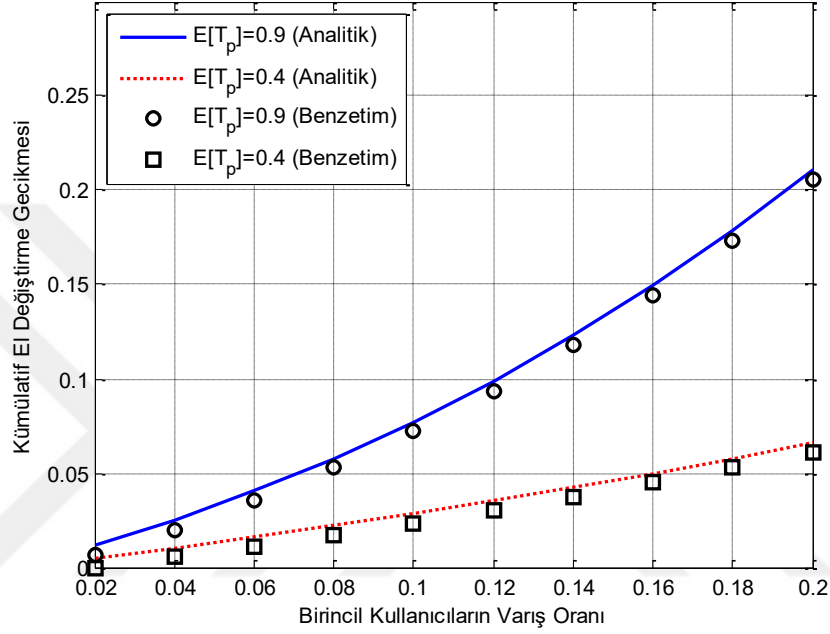


Şekil 4.6. $\mu=0.4$ olduğunda önerilen yöntemlerin karşılaştırılması.

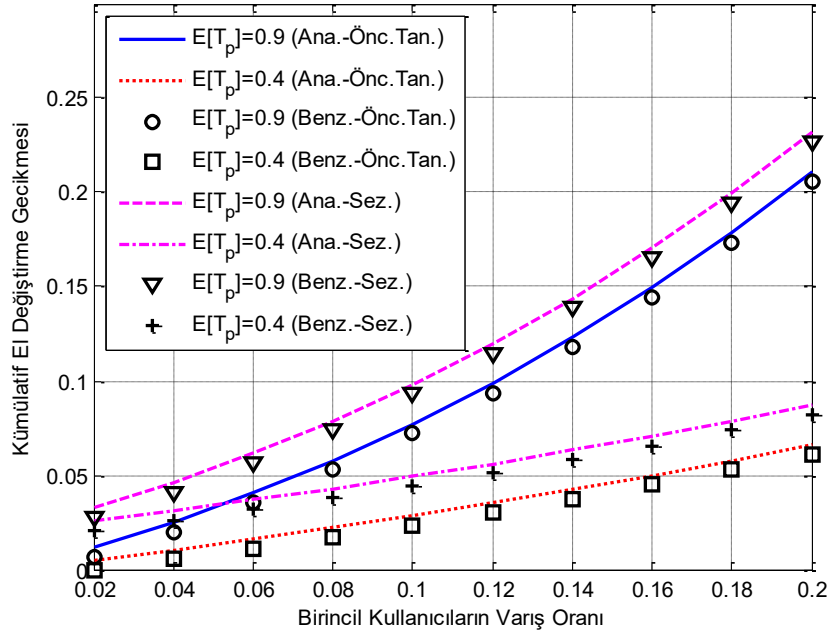
4.3.2. Öncelik Tabanlı Yaklaşım

Şekil 4.7’de, birincil kullanıcıların varış oranı 0.02’den 0.2’ye kadar artırıldığında önceden tanımlı spektrum el değiştirme işlemi için kümülatif el değiştirme gecikme sonuçları görülmektedir. Şekil 4.7’den de görüleceği üzere, birincil kullanıcıların ortalama servis süresi 0.9 olduğunda kümülatif el değiştirme gecikmesi daha yüksektir. Birincil kullanıcıların ortalama servis süresi 0.4 olduğunda ikincil kullanıcıların kümülatif el değiştirme gecikmesi daha düşüktür. Birincil kullanıcıların ortalama servis süresi, kümülatif el değiştirme gecikmesine olan etkisini incelemek amacıyla özel olarak seçilmiştir.

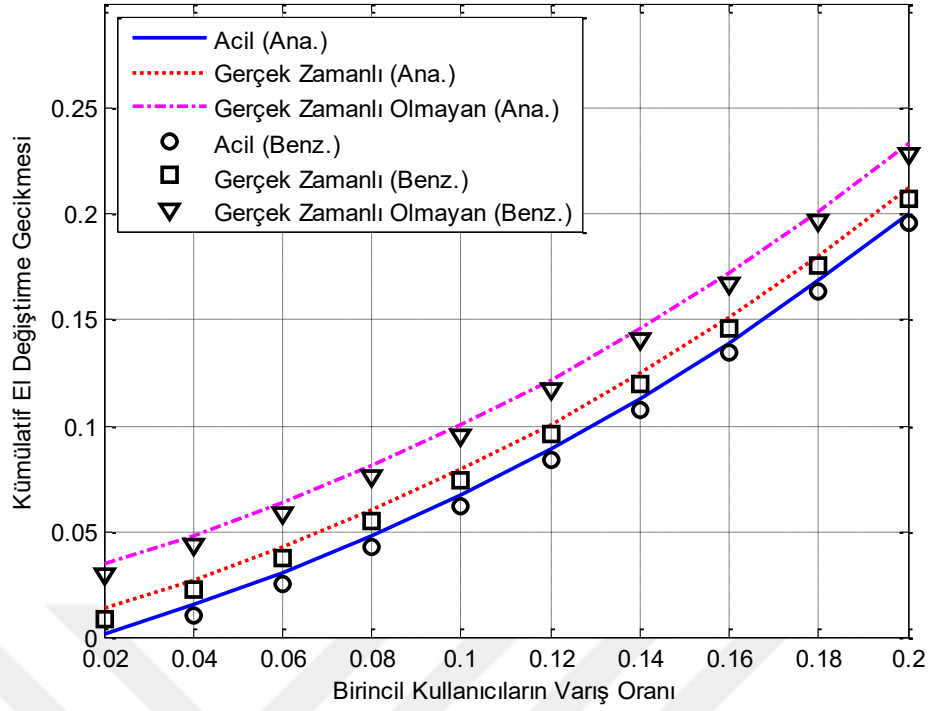
Şekil 4.8’de, önceden tanımlı ve sezme tabanlı spektrum el değiştirme işlemleri için kümülatif el değiştirme gecikme sonuçları artan birincil kullanıcı varış oranları için görülmektedir. Şekil 4.8’den de anlaşılacağı üzere, spektrum sezme süresinden dolayı sezme tabanlı el değiştirmenin gecikme süresi önceden tanımlı el değiştirmeye göre daha yüksektir. Kümülatif el değiştirme gecikmesinin benzetim sonuçlarının farklı birincil kullanıcı ortalama servis süreleri için analitik sonuçlarla aynı olduğu görülmektedir.



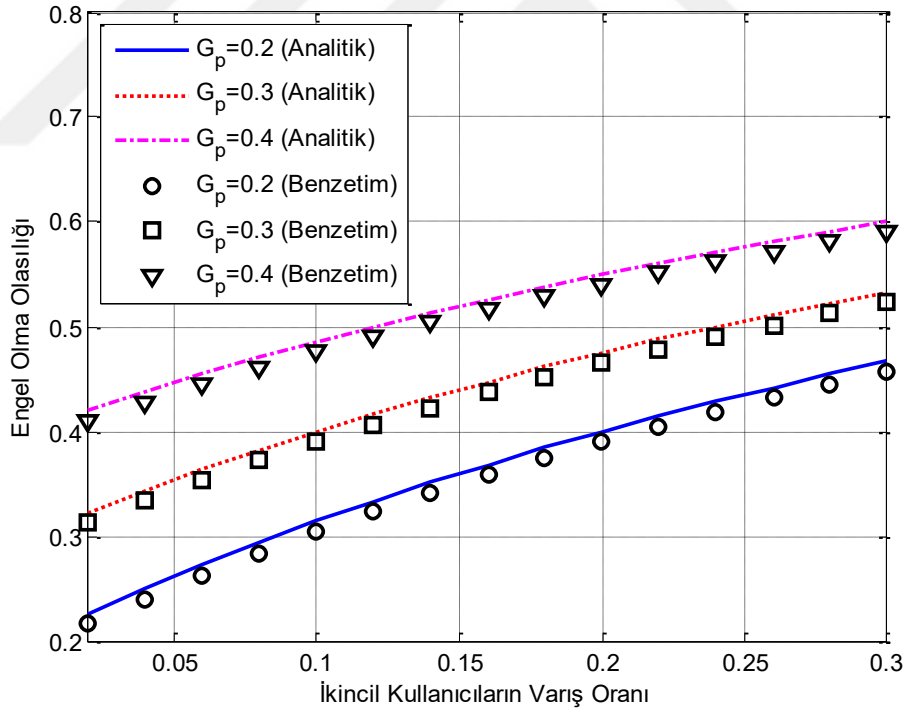
Şekil 4.7. Önceden tanımlı el değiştirmede kümülatif el değiştirme gecikmesi.



Şekil 4.8. Kümülatif el değiştirme gecikme sonuçlarının karşılaştırılması.



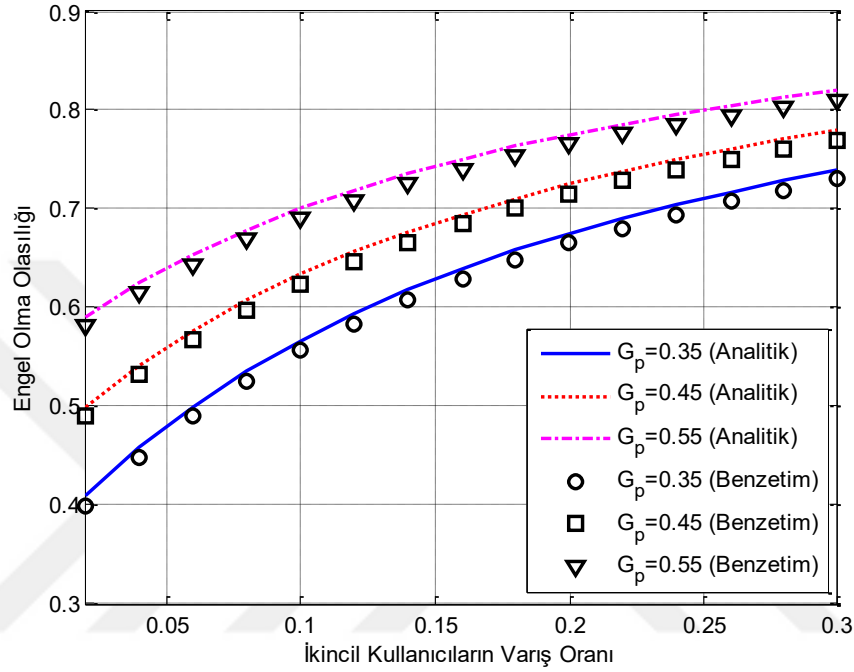
Şekil 4.9. Öncelik sınıflarına göre kümülatif el değiştirme gecikme sonuçları.



Şekil 4.10. Düşük birincil kullanıcı yüklerine göre engel olma olasılığı sonuçları.

Şekil 4.9'da, birincil kullanıcıların ortalama servis süresi 0.9 olduğunda farklı öncelik sınıflarının göz önüne alındığı sezme tabanlı spektrum el değiştirme için kümülatif el değiştirme gecikme sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.9'dan da net bir şekilde

görüreceği üzere, yüksek önceliğinden dolayı acil trafiklerin kümülatif el değiştirme gecikmesi en düşüktür. Gerçek zamanlı trafikler kuyrukta acil trafiklerden daha uzun süre beklemektedirler. Bu yüzden, gerçek zamanlı trafiğin kümülatif el değiştirme gecikmesi acil trafikten daha yüksektir. Gerçek zamanlı olmayan paketler, en düşük önceliklerinden dolayı kuyruktaki herhangi bir paketten daha uzun süre kuyrukta beklemektedirler.

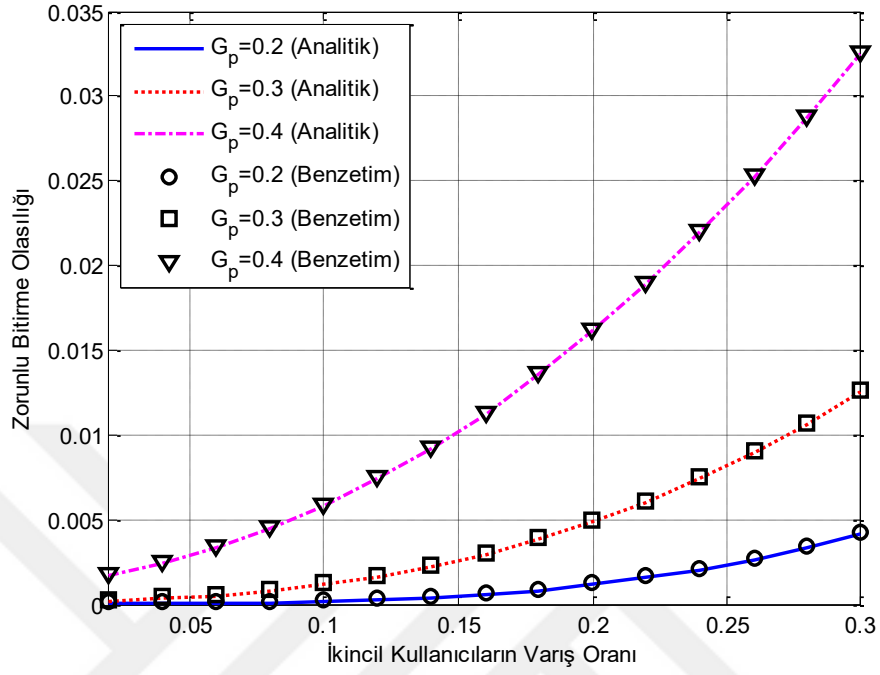


Şekil 4.11. Yüksek birincil kullanıcı yüklerine göre engel olma olasılığı sonuçları.

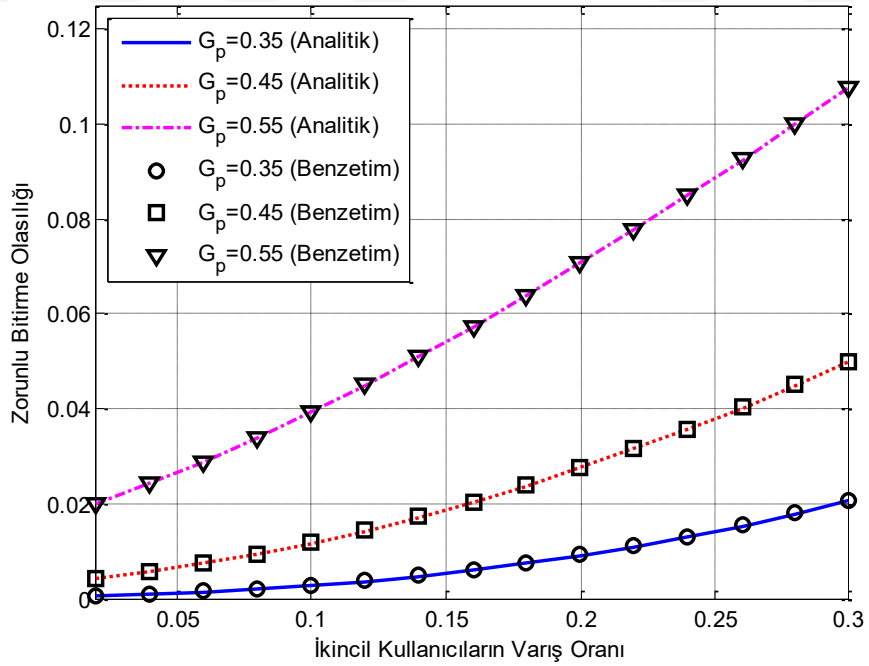
Şekil 4.10'da, birincil kullanıcıların sunulan yükü 0.2, 0.3 ve 0.4 olduğunda farklı ikincil kullanıcı varış oranları için engel olma olasılığı sonuçları görülmektedir. Şekil 4.10'dan gözlemlendiği üzere, birincil kullanıcıların sunulan yükünün artması ikincil kullanıcıların engel olma olasılığını artırmaktadır. İkincil kullanıcıların varış oranı 0.2 olduğunda; sırasıyla birincil kullanıcıların sunulan yükü 0.2, 0.3 ve 0.4 olduğu durumlarda ikincil kullanıcılar için engel olma olasılığı değerleri 0.4, 0.47 ve 0.55 olmaktadır. Grafiğin hassasiyetinden dolayı, benzetim sonuçlarının analitik sonuçlarla çok yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 4.11'de, yüksek birincil kullanıcı sunulan yükü için farklı ikincil kullanıcı varış oranları altında engel olma olasılığı sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.11'den de görüleceği üzere, birincil kullanıcıların artan yüksek değerdeki sunulan yükleri engel olma olasılığını artırmaktadır. İkincil kullanıcıların varış oranı 0.3 olduğunda, ikincil kullanıcıların engel olma olasılığı farklı birincil kullanıcı yükleri altında 0.75 ve 0.85

değerleri arasında birbirlerine yaklaşılmaktadır. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 göz önüne alındığında, birincil kullanıcıların sunulan yükü arttığında ikincil kullanıcıların engel olma olasılığı belirli bir değerden sonra sabit kalmaktadır.



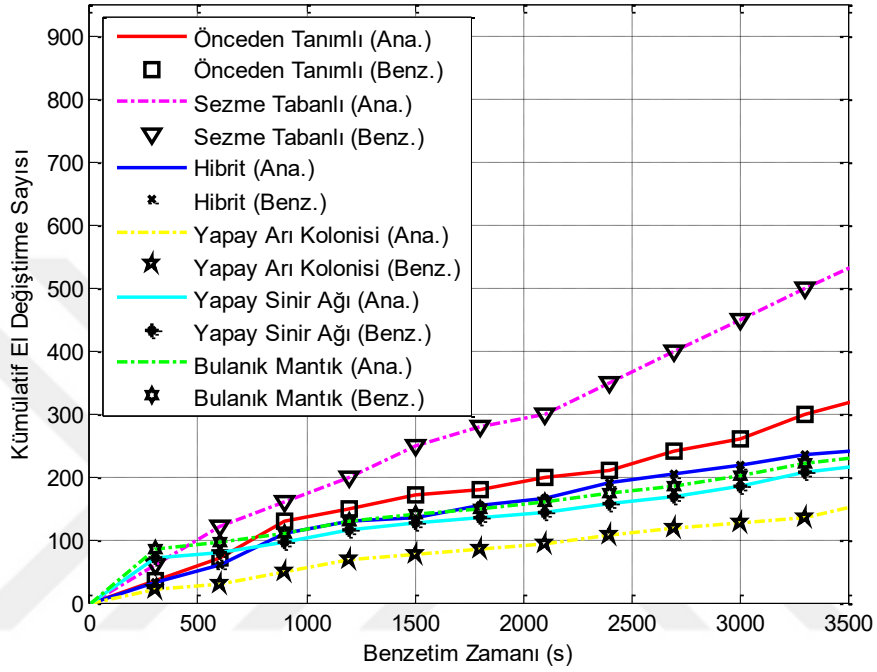
Şekil 4.12. Düşük birincil kullanıcı yükleri için zorunlu bitirme olasılığı.



Şekil 4.13. Yüksek birincil kullanıcı yükleri için zorunlu bitirme olasılığı.

Şekil 4.12'de, birincil kullanıcıların sunulan yükü 0.2, 0.3 ve 0.4 gibi düşük değerler olduğunda farklı varış oranlarına sahip ikincil kullanıcılar için zorunlu bitirme olasılığı

sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.12’den de gözlemlendiği üzere, birincil kullanıcıların sunulan yükü zorunlu bitirme olasılığını tümüyle etkilemektedir. Birincil kullanıcıların sunulan yükü arttıkça, ikincil kullanıcıların zorunlu bitirme olasılığı da yaklaşık aynı oranda artmaktadır. İkincil kullanıcıların varış oranı 0.2 olduğunda, birincil sunulan yükün artan değerlerine karşılık ikincil kullanıcıların zorunlu bitirme olasılığı yaklaşık olarak 0.0001, 0.005 ve 0.016 olmaktadır.



Şekil 4.14. Kümülatif el değiştirme sayısı sonuçları.

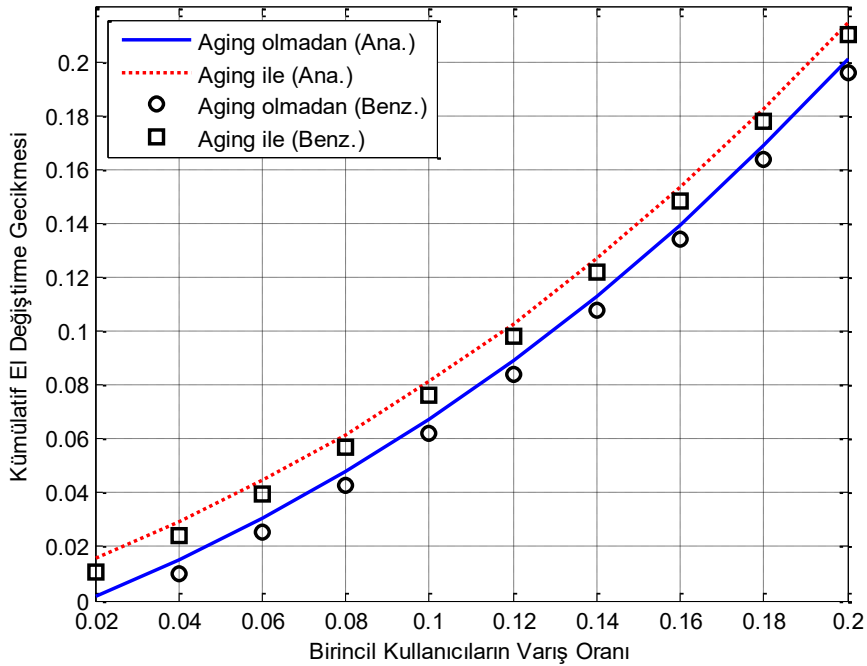
Şekil 4.13’te, birincil kullanıcıların sunulan yükü 0.35, 0.45 ve 0.55 gibi yüksek değerler olduğunda farklı varış oranlarına sahip ikincil kullanıcılar için zorunlu bitirme olasılığı sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.13’ten de gözlemlendiği üzere, birincil kullanıcıların sunulan yükünün artışı zorunlu bitirme olasılığını arttırmaktadır. Birincil kullanıcıların yüksek sunulan yük değerleri için, zorunlu bitirme olasılığı 0.1’e çok yaklaşmaktadır. İkincil kullanıcıların varış oranı 0.3 olduğunda, birincil sunulan yükün artan değerlerine karşılık ikincil kullanıcıların zorunlu bitirme olasılığı yaklaşık olarak 0.02, 0.05 ve 0.11 olmaktadır.

Şekil 4.14’te, birincil kullanıcıların ortalama servis süresinin 0.9 olduğu durum için kümülatif spektrum el değiştirme sayısı sonuçları gösterilmektedir. Sezme tabanlı yaklaşım ve önceden tanımlı yaklaşımın arasındaki farkı belirtmek için, kümülatif spektrum el değiştirme sayısı sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Önceden tanımlı yaklaşım kullanıldığında, en yüksek spektrum el değiştirme sayısı yaklaşık 320

olmaktadır. Bunun yanında, önceden tanımlı yaklaşım kullanıldığında toplam spektrum el değiştirme sayısı yaklaşık 550 olmaktadır. Şekil 4.14'ten görüleceği üzere, sezme tabanlı yaklaşımdaki kümülatif el değiştirme sayısı önceden tanımlı yaklaşımdaki el değiştirme sayısından daha fazladır. Bunun sebebi, önceden tanımlı yaklaşım önceden tanımlanan zaman dilimlerini kullanırken sezme tabanlı yaklaşımın yanlış alarm olasılığı ve yanlış sezme olasılığı gibi parametrelerden etkilenmesidir. Hibrit yaklaşım, önceden tanımlı zaman dilimi boşluklarını sezme işlemi sayesinde tekrar kontrol ettiği için daha az el değiştirme sayısına sahiptir. Daha yüksek gecikmelere sahip olmasıyla beraber en iyi el değiştirme sayısını beklediği üzere yapay arı kolonisi algoritması sağlamıştır. Bulanık mantık ve yapay sinir ağı sonuçları yakın olmasına rağmen, yapay sinir ağının toplam el değiştirme sayısı biraz daha düşüktür.

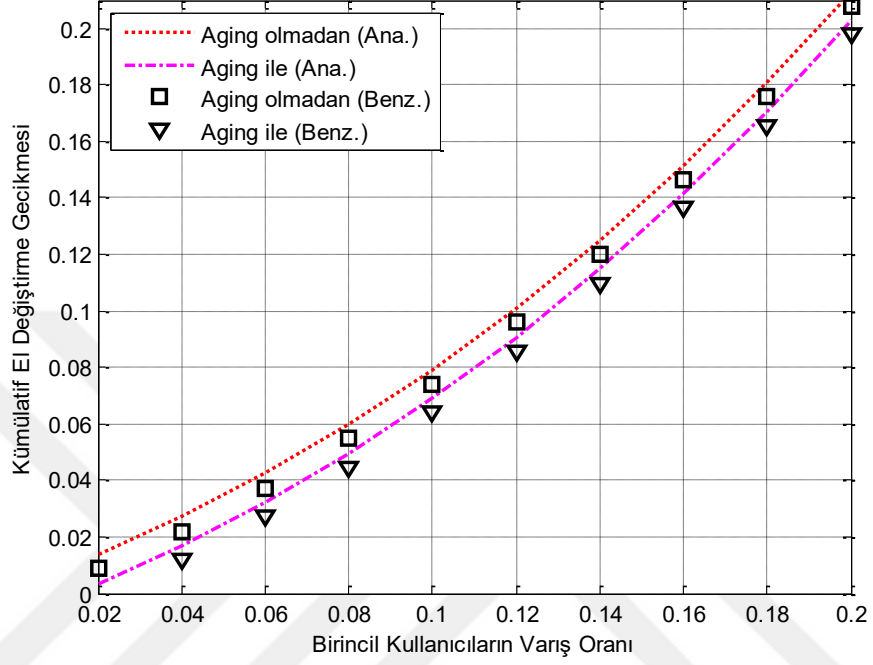
4.3.3. Kanal Birleştirme Tabanlı Yaklaşım

Kanal birleştirme tabanlı spektrum el değiştirme işleminin ve yaşlandırma (aging) çözümünün performans değerlendirmesi, benzetim senaryoları kullanılarak hem sezme tabanlı hem de önceden tanımlı yaklaşımlar için gerçekleştirilmiştir. Önemli olmalarından dolayı önerilen spektrum el değiştirme yaklaşımlarının değerlendirilmesi için; kümülatif el değiştirme gecikmesi, engel olma olasılığı, zorunlu bitirme olasılığı ve ikincil kullanıcıların iş çıkarma oranı ele alınmıştır.

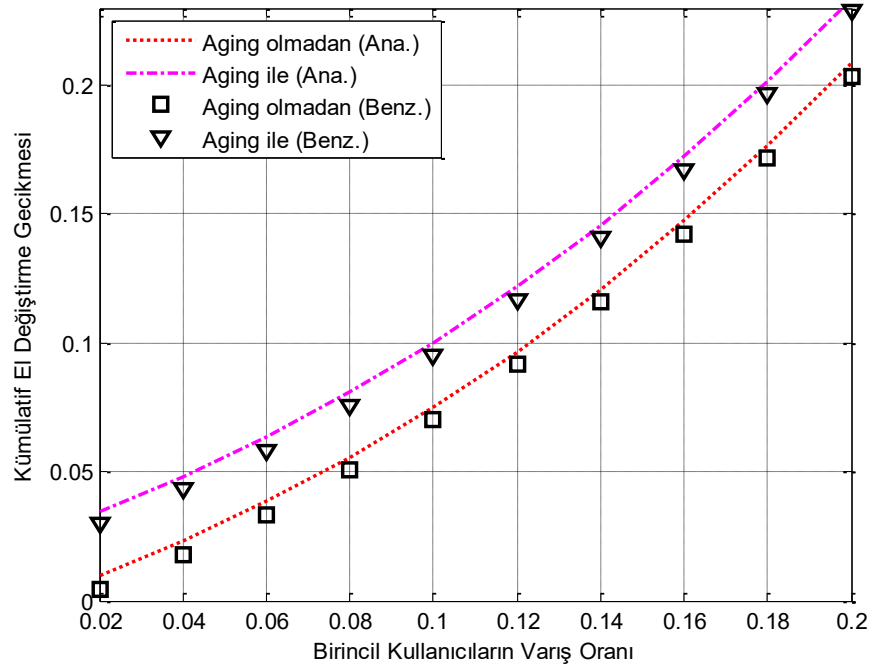


Şekil 4.15. Acil veri paketleri için kümülatif el değiştirme gecikmesi sonuçları.

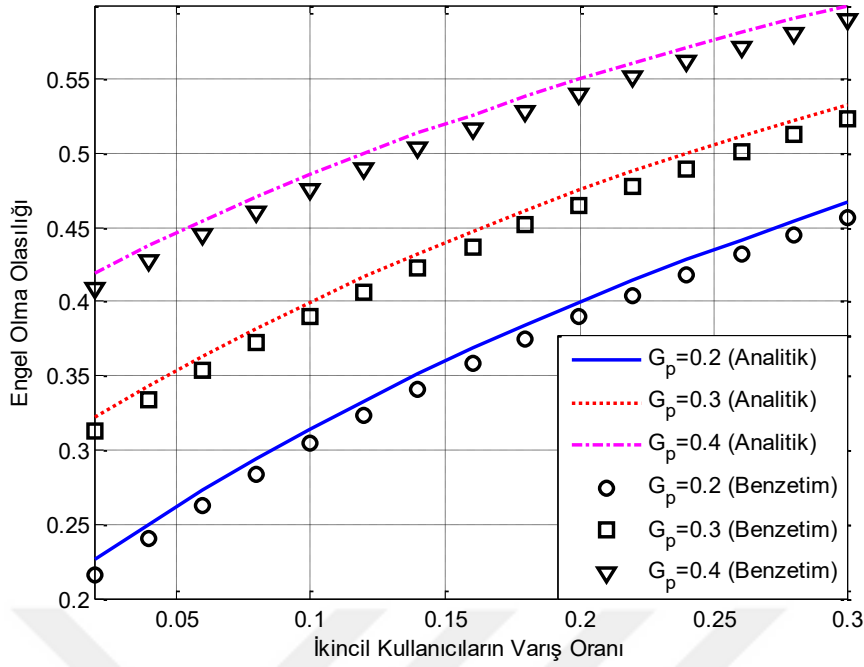
Önerdiğimiz ağın analitik ve benzetim sonuçları sırasıyla MATLAB yazılımı ve Riverbed benzetim yazılımından elde edilmiştir. Kümülatif el değiştirme gecikmesi sonuçları için birincil kullanıcıların ortalama servis süresi 0.9 olarak alınmıştır. Şekil 4.15'te, birincil kullanıcıların varış oranı 0.02'den 0.2'ye artırıldığında acil veri paketlerinin kümülatif el değiştirme gecikmesi sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.16. Gerçek zamanlı veri paketleri için el değiştirme gecikmesi sonuçları.



Şekil 4.17. Gerçek zamanlı olmayan veri paketleri için el değiştirme gecikmesi.



Şekil 4.18. Gerçek zamanlı paketler için engel olma olasılığı sonuçları.

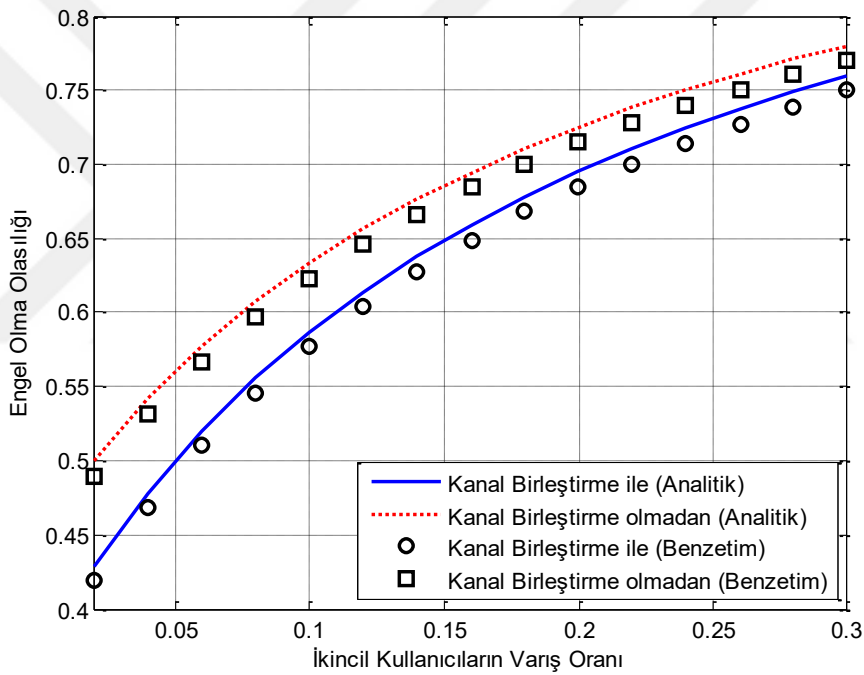
Şekil 4.15'ten de görüleceği üzere, yaşlandırma mekanizması kullanıldığında acil veri paketlerinin kümülatif el değiştirme gecikmesi daha yüksek olmaktadır. Acil veri paketleri en yüksek önceliğe sahip oldukları için, yaşlandırma mekanizmasının acil veri paketlerine bir faydası yoktur. Yaşlandırma mekanizması kullanılmadığında, acil veri paketlerinin kümülatif el değiştirme gecikmesi daha düşük olmaktadır. Bununla birlikte, yaşlandırma mekanizması kullanılarak toplam el değiştirme gecikmesi ikincil ağ için önemli bir ölçüde düşürülmektedir.

Şekil 4.16'da, birincil kullanıcıların artan varış oranlarına karşılık gerçek zamanlı veri paketleri için kümülatif el değiştirme gecikmesi sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.16'dan da görüleceği üzere, öncelik artırımından dolayı yaşlandırma çözümü olmadan elde edilen kümülatif el değiştirme gecikmesi yaşlandırma çözümü ile elde edilen el değiştirme gecikmesinden daha yüksektir.

Şekil 4.17'de, gerçek zamanlı olmayan veri paketleri için yaşlandırma çözümü ile ve yaşlandırma çözümü olmadan elde edilen kümülatif el değiştirme gecikmesi sonuçları görülmektedir. Şekil 4.17'den net bir şekilde görüleceği üzere, öncelik artırımından dolayı yaşlandırma çözümü ile kümülatif el değiştirme gecikmesi daha düşüktür. Yaşlandırma çözümü olmadan, gerçek zamanlı olmayan paketler kuyruktaki diğer paketlerden daha fazla beklemektedir. Bu yüzden gerçek zamanlı olmayan paketlerin yaşlandırma mekanizması olmayan kümülatif el değiştirme gecikmesi sonuçları en

yüksek olmaktadır.

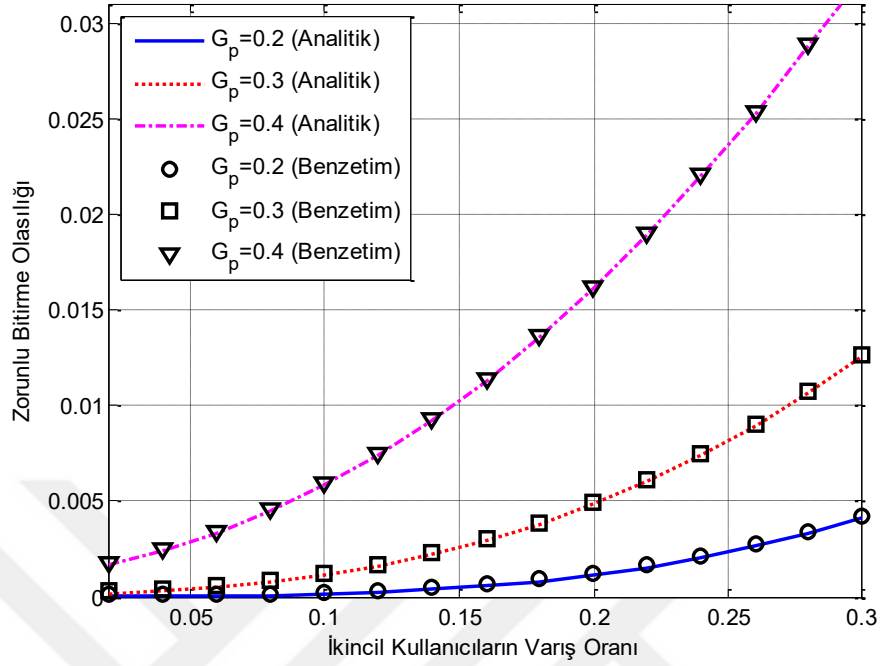
Engel olma olasılığı, boş spektrum ktlığından dolayı ikincil kullanıcıların engellenmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda, ikincil kullanıcılar yoğun birincil kullanıcı sunulan yükünden dolayı kullanılabilir zaman dilimi bulamamaktadır. Şekil 4.18’de, birincil kullanıcıların sunulan yükü 0.2, 0.3 ve 0.4 olduğunda farklı ikincil kullanıcı varış oranlarına karşılık engel olma olasılığı sonuçları görülmektedir. Şekil 4.18’den açıkça görüldüğü üzere, birincil kullanıcıların sunulan yükündeki artış ikincil kullanıcılar için engel olma olasılığını artırmaktadır. İkincil kullanıcıların varış oranı 0.2 olduğunda, birincil kullanıcıların sunulan yükü sırasıyla 0.2, 0.3 ve 0.4 iken ikincil kullanıcıların engel olma olasılığı 0.41, 0.48 ve 0.56 olmaktadır. Analitik sonuçlar, grafiğin hassasiyetinden dolayı benzetim sonuçlarıyla çok yakın bir şekilde örtüşmektedir.



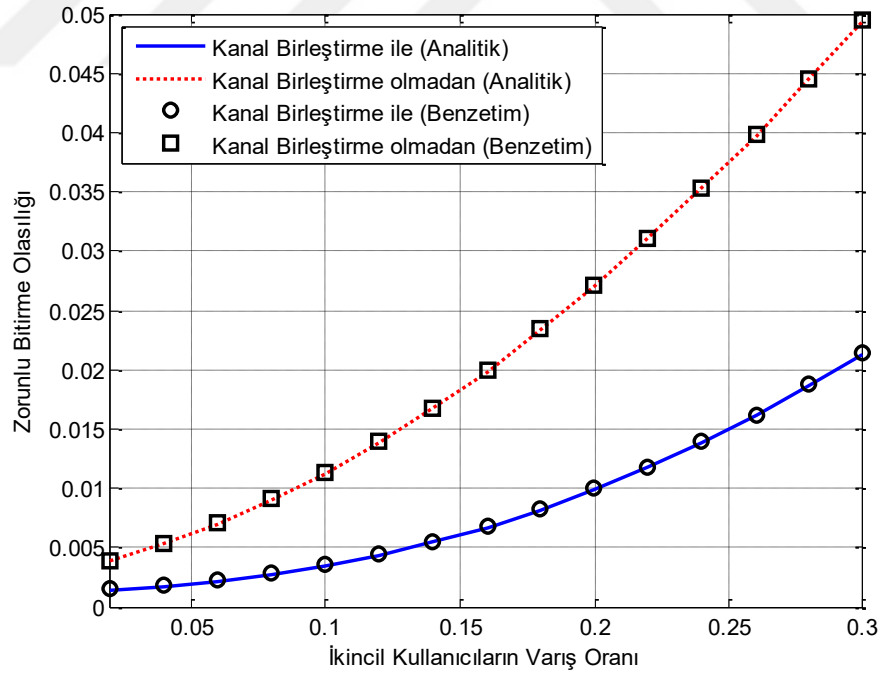
Şekil 4.19. Gerçek zamanlı olmayan paketlerin $G_p=0.45$ için engel olma olasılığı.

Birincil sunulan yük 0.45 olduğunda, kanal birleştirme kullanılmadığında engel olma olasılığı artmaktadır. Şekil 4.19’da, birincil kullanıcıların sunulan yükü 0.45 olduğunda farklı ikincil kullanıcı varış oranları altında engel olma olasılığı sonuçları görülmektedir. Şekil 4.19’dan görüldüğü üzere, kanal birleştirme mekanizmasını kullanmak ikincil kullanıcılar için engel olma olasılığını düşürmektedir. İkincil kullanıcıların varış oranı 0.3 olduğunda, gerçek zamanlı olmayan paketler için kanal birleştirme yaklaşımı ile ve kanal birleştirme yaklaşımı olmadan elde edilen engel olma olasılığı 0.76 ve 0.78 arasında değişmektedir. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 göz önüne

alındığında, ikincil kullanıcıların varış oranı arttığında ikincil kullanıcıların engel olma olasılığı sabit kalmaktadır.



Şekil 4.20. Gerçek zamanlı paketler için zorunlu bitirme olasılığı sonuçları.

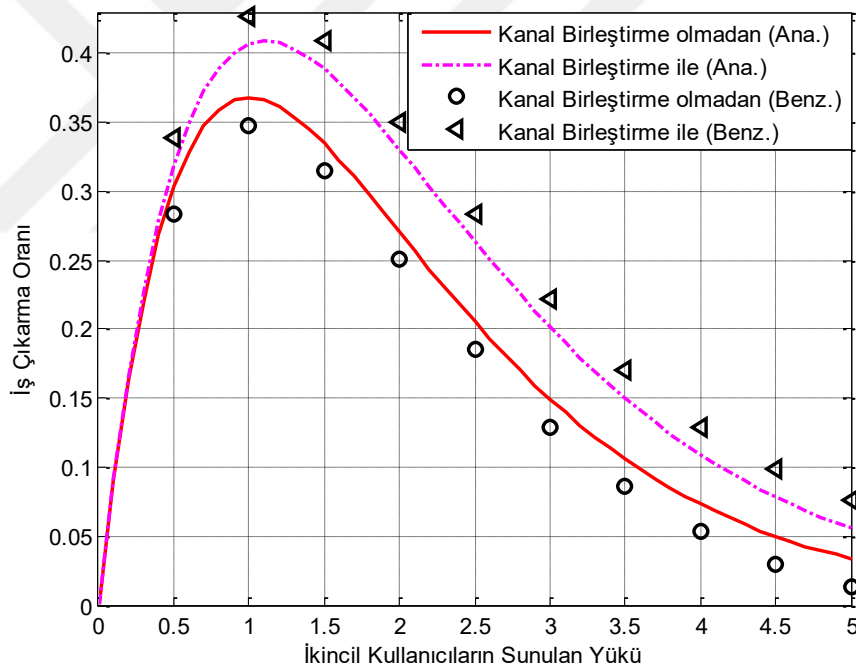


Şekil 4.21. Acil paketler için $G_p=0.45$ olduğunda zorunlu bitirme olasılığı.

Zorunlu bitirme olasılığı, spektrum el değiştirme işlemini gerçekleştirecek boş bir spektrum olmadığı durumlarda meydana gelmektedir. Zorunlu bitirme durumunda, ikincil kullanıcıların paketleri yok olmaktadır ve paketlerin yeniden gönderilmesi

gerekmektedir. Şekil 4.20’de, birincil kullanıcıların sunulan yükü 0.2, 0.3, ve 0.4 gibi düşük değerler olduğunda farklı ikincil kullanıcı varış oranları için zorunlu bitirme olasılığı sonuçları gösterilmektedir. Birincil kullanıcıların sunulan yükü arttıkça, ikincil kullanıcıların zorunlu bitirme olasılığı da yaklaşık aynı oranda artmaktadır. İkincil kullanıcıların varış oranı 0.2 olduğunda, birincil sunulan yükün artan değerlerine karşılık gerçek zamanlı paketlerin zorunlu bitirme olasılığı yaklaşık olarak 0.0002, 0.006 ve 0.017 olmaktadır.

Şekil 4.21’de, birincil kullanıcıların sunulan yükü 0.45 olduğunda farklı ikincil kullanıcı varış oranları altında zorunlu bitirme olasılığı sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.21’den görüleceği üzere, kanal birleştirme mekanizmasının kullanılmaması ikincil kullanıcılar için zorunlu bitirme olasılığını artırmaktadır. İkincil kullanıcıların varış oranı 0.3 olduğunda, acil paketler için zorunlu bitirme olasılığı kanal birleştirme mekanizması ile ve kanal birleştirme mekanizması olmadan sırasıyla 0.022 ve 0.049 olmaktadır.



Şekil 4.22. İkincil ağın iş çıkarma oranı.

Şekil 4.22’de, ikincil kullanıcıların artan sunulan yük değerlerine karşılık ikincil ağın iş çıkarma oranı sonuçları gösterilmektedir. Slotted Aloha tekniğinin maksimum iş çıkarma oranı literatürde 0.36 bilinmektedir. Kanal birleştirme mekanizması sayesinde, ikincil ağın maksimum iş çıkarma oranı 0.41 yükseltilmiştir. Maksimum iş çıkarma oranı değerleri ikincil kullanıcıların sunulan yükü 1 olduğunda elde edilmektedir. İkincil kullanıcıların sunulan yükü 1’den fazla olduğunda, iş çıkarma oranı üstel olarak

azalmaktadır. Ayrıca, benzetim sonuçlarının çok yakın bir şekilde analitik sonuçlarla örtüştüğü gösterilmiştir.

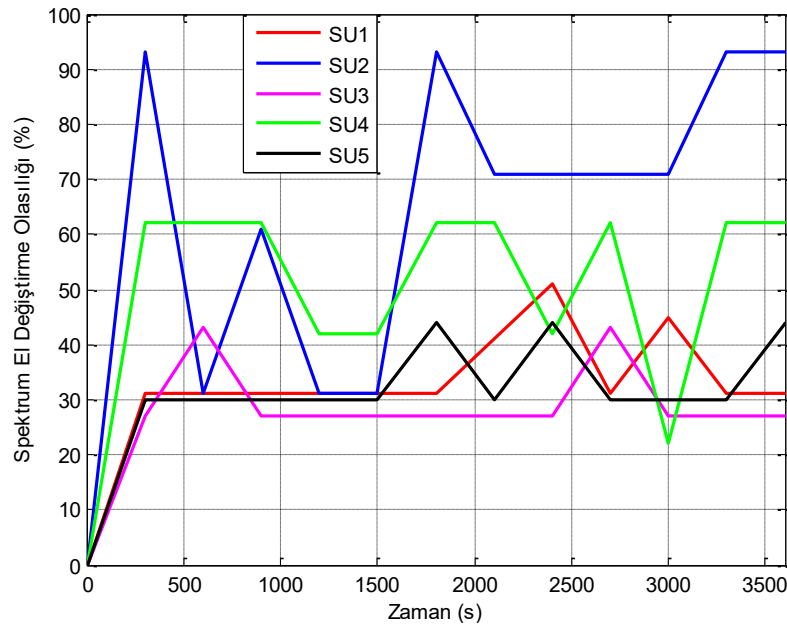
4.3.4. Yapay Zeka Tabanlı Yaklaşım

Sistemimizin başarımını değerlendirmek amacıyla, her seferinde farklı giriş parametresini sabit tutarak spektrum el değiştirme olasılıkları elde edilmiştir. Toplamda on kullanıcı ile elde edilen sonuçlar, daha anlaşılır bir yorumlama sağlamak için beşer kullanıcı grafikler ile verilmiştir. Çizelge 4.7’de, MATLAB yazılımından elde edilen örnek sonuçlar görülmektedir. Örneğin; birincil kullanıcıların ortam kullanımı % 7, ikincil kullanıcıların veri oranı 18 kbps ve SNR değeri 0.18 iken spektrum el değiştirme olasılığı % 93 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.7. Benzetim modeli sonuçlarından örnekler.

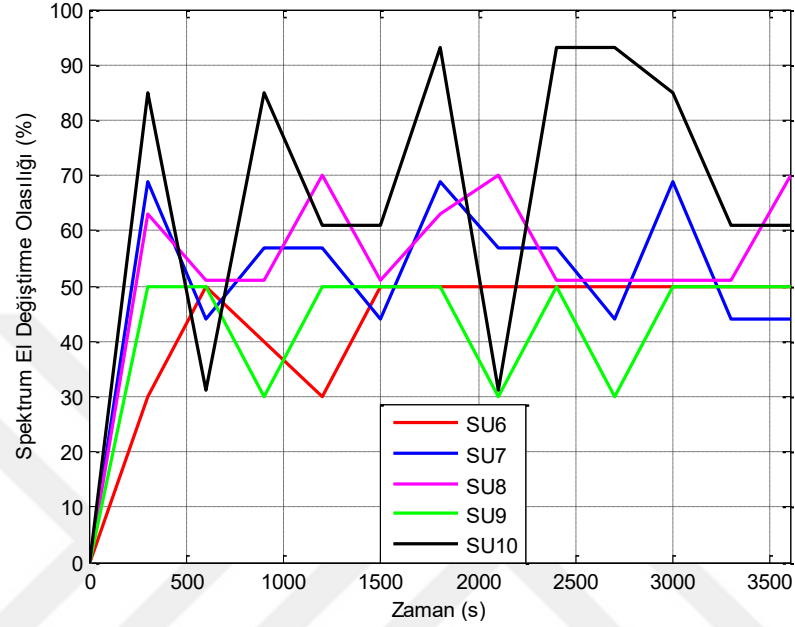
Olasılık (%)	Ortam Kullanımı (%)	Veri Oranı (kbps)	SNR (dB)
93	7	18	0.84
50	12	2	2
27	90	7	0.46

Sistemden elde edilen benzetim sonuçlarında, birbirine çok yakın çıkan spektrum el değiştirme olasılık değerleri tek tek incelenerek optimize edilmiştir.

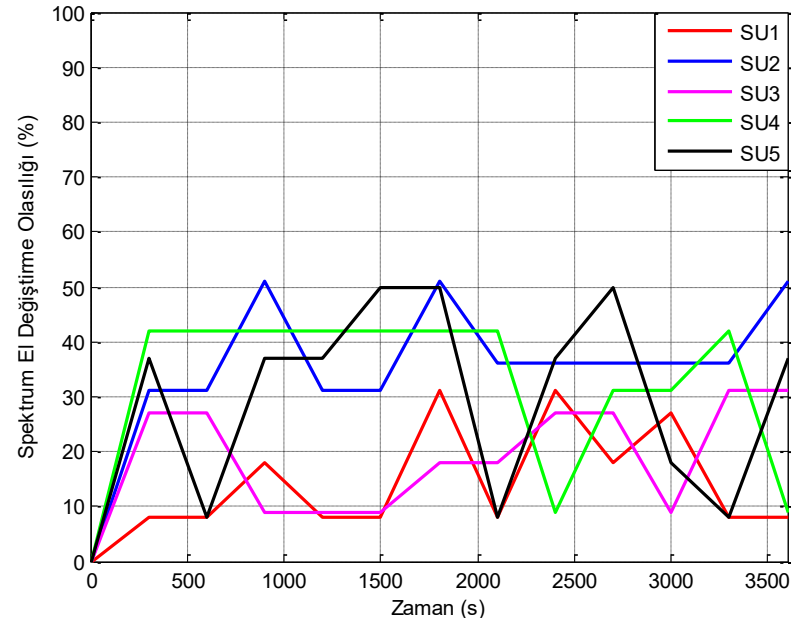


Şekil 4.23. Birincil kullanıcı ortam kullanım yoğunluğuna göre olasılıklar.

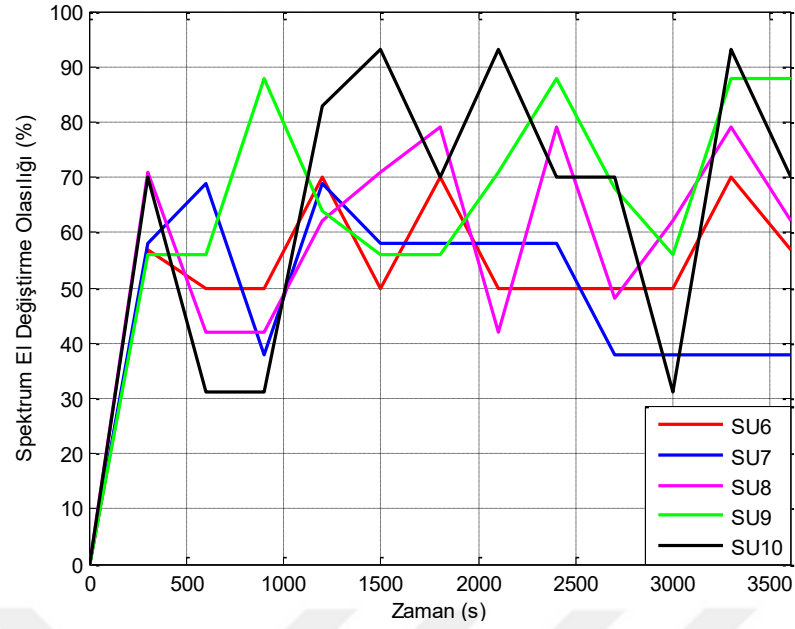
Şekil 4.23'te, ortamdaki gürültü etkisi ve ikincil kullanıcıların veri oranı değerleri sabit tutularak, değişen birincil kullanıcı ortam kullanım yoğunluklarına göre, farklı spektrum el değiştirme olasılıkları elde edilmiştir. Şekil 4.24'te, ortamdaki gürültü etkisi ve ikincil kullanıcıların veri oranı sabit tutularak, değişen birincil kullanıcı ortam kullanım yoğunluklarına göre spektrum el değiştirme olasılıkları gösterilmiştir.



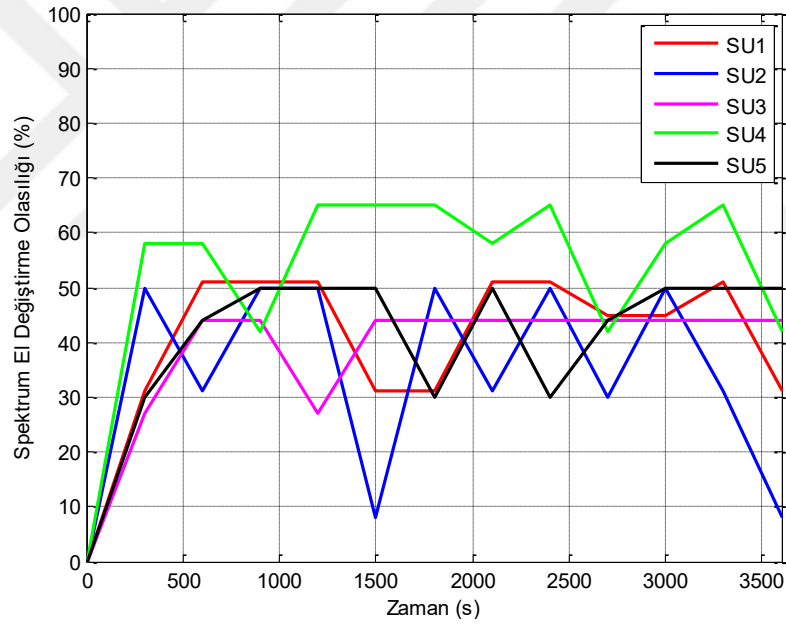
Şekil 4.24. Birincil kullanıcı ortam kullanım yoğunluğuna göre olasılık değerleri.



Şekil 4.25. İkincil kullanıcı veri oranlarına göre olasılık değerleri.



Şekil 4.26. İkincil kullanıcı veri oranlarına göre el değiştirme olasılıkları.



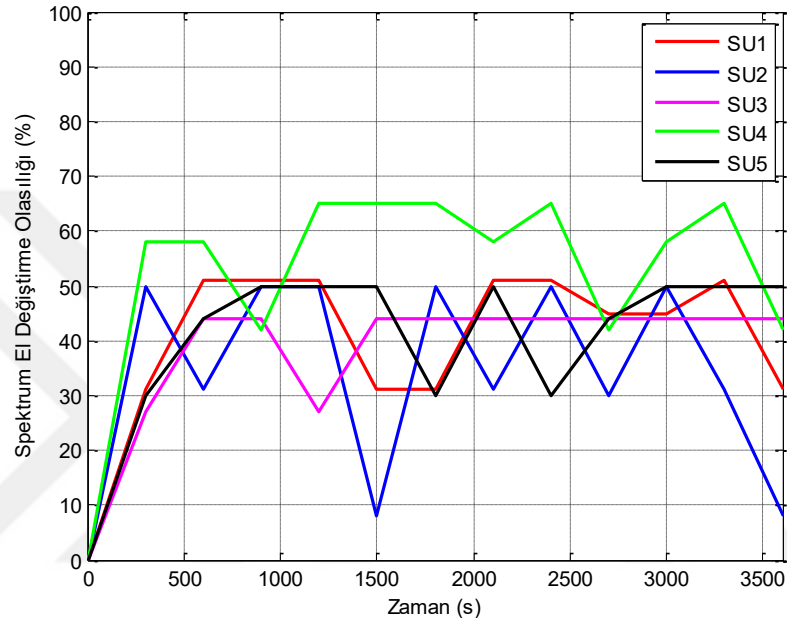
Şekil 4.27. Ortamdaki gürültü etkisine göre spektrum el değiştirme olasılıkları.

Şekil 4.25'te, birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğu ve gürültü etkisi sabit tutulmuştur. Spektrum el değiştirme olasılıkları ilk beş kullanıcı için verilmiştir. İlgili beş kullanıcının benzetim süresi boyunca olasılık değerleri incelendiğinde, % 30 ile % 95 arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 4.26'da, birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğu ve gürültü etkisi sabit tutulmuştur. İlk beş kullanıcı dışındaki kullanıcılar için spektrum el değiştirme olasılıkları verilmiştir.

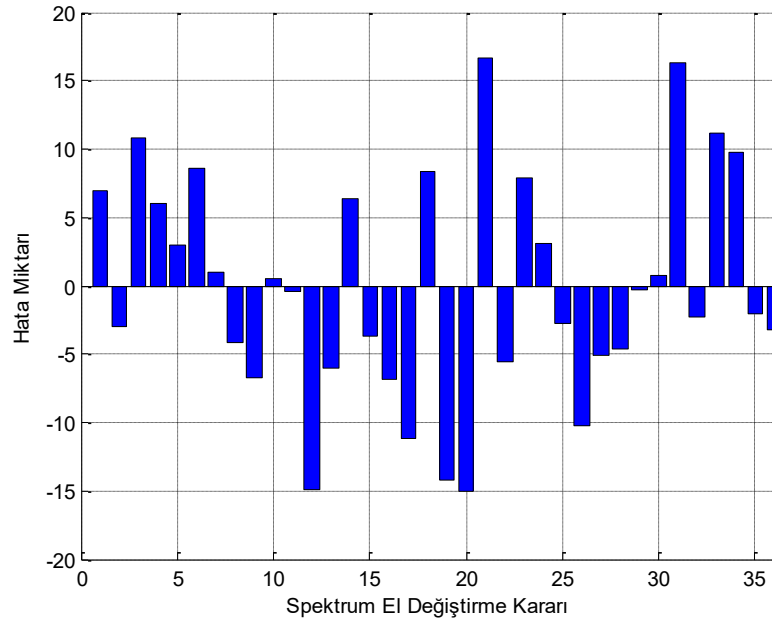
Şekil 4.27'de, birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğu ve ikincil kullanıcıların

veri oranı sabit tutulmuştur. İlk beş kullanıcı için spektrum el değiştirme olasılıklarının % 10 ile % 65 arasında değiştiği gözlenmiştir.

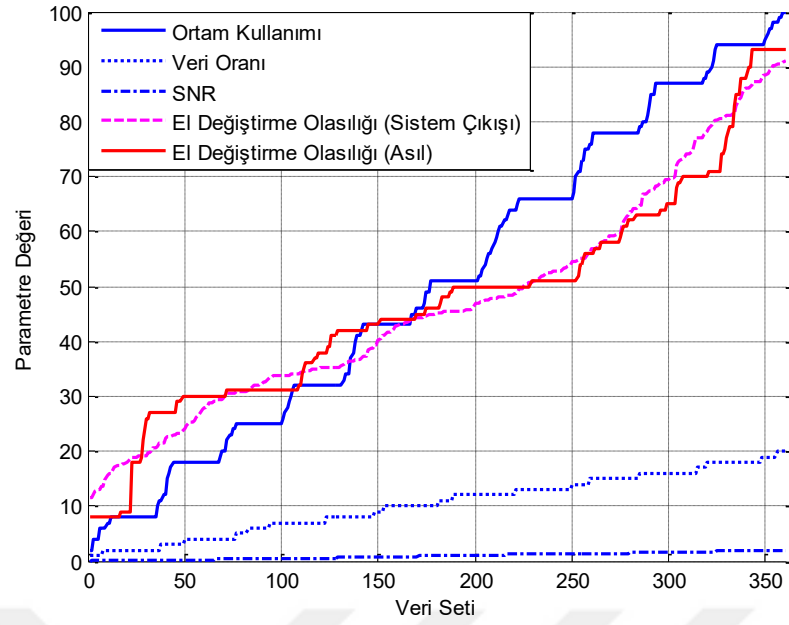
Şekil 4.28’de, birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğu ve ikincil kullanıcıların veri oranı sabit tutulmuştur. Diğer beş kullanıcı için spektrum el değiştirme oranlarının % 10 ile % 90 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Veri setleri ile eğitilen yapay sinir ağı sistemine yeni girişler verilerek sonuçlar alındığında, hata oranlarının çok düşük olduğu görülmüştür.



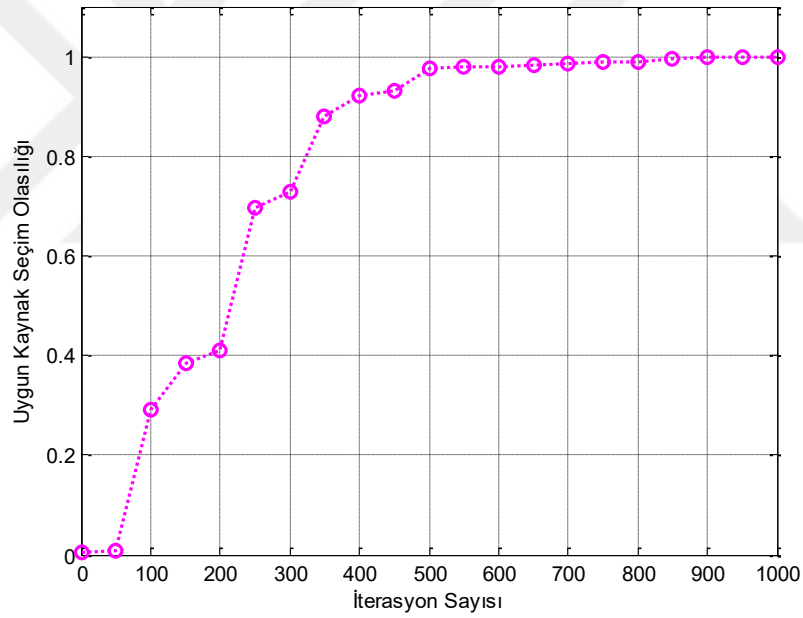
Şekil 4.28. Ortamdaki gürültü etkisine göre spektrum el değiştirme olasılıkları.



Şekil 4.29. Sistemin hata oranları.



Şekil 4.30. Giriş ve çıkış parametreleri.



Şekil 4.31. Uygun kanal seçme olasılığı.

Şekil 4.29’da, hata oranları grafiği görülmektedir. Hata oranı değerleri, gerçek çıkış değeri ile sistemin verdiği çıkış değerlerinin farkı hesaplanarak elde edilmiştir. Sistemde toplamda 360 çıkış değeri olmasına rağmen; sonuçların daha net bir şekilde görülebilmesi için, grafikte en çok tekrar eden hata oranları çizilmiştir. Grafiğe bakıldığında, hata miktarlarının -15 ile +15 arasında olduğu görülmektedir. Çıkış değerimizin % olarak ifade edildiğini düşündüğümüzde, hata miktarlarının da aslında % olarak elde ettiğimizi görebiliriz.

Şekil 4.30’da, giriş ve çıkış parametrelerinin değerleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Grafiğe bakıldığında, spektrum el değiştirme olasılığı çıkış değerini hangi giriş parametresinin daha çok etkilediği net bir şekilde görülmektedir. Elde edilen değerlerin daha anlaşılır olması için, veri setlerinin yer aldığı diziler küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır.

Yapay arı kolonisi algoritması ile optimizasyon işlemi sonucunun elde edildiği Şekil 4.31’de, uygun kanal seçme olasılığının sonuçları görülmektedir. Tasarlanan yapay arı kolonisi tabanlı spektrum el değiştirme işlemi algoritmasında uygun kanal seçiminin 1000 tekrarlama sonra en uygun değerine ulaştığı görülmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kablosuz bilişsel radyo, spektrum bantlarından fırsatçı bir biçimde yararlanılmasını sağlayan güncel bir ağ teknolojisidir. Kablosuz bilişsel radyo teknolojisinin en önemli özelliği, ikincil kullanıcıların spektrumu dinlemesini sağlaması ve gerçek zamanlı olarak çevresindeki değişikliklere uyum sağlamasıdır. Kablosuz bilişsel radyo ağlarındaki ikincil kullanıcılar bu teknoloji sayesinde, herhangi bir zamanda birincil kullanıcılara girişim oluşturmada boş olan frekans bantlarından yararlanabilmektedirler. İkincil kullanıcıların kullanılmayan spektrum bantları üzerinden haberleşme gerçekleştirmesi ve gerektiğinde bu spektrum bantları arasında bağlantılarını aktarması spektrum el değiştirme işlemi olarak nitelendirilmektedir.

Bu tez çalışmasında, kablosuz bilişsel radyo ağ tabanlı spektrum el değiştirme için yapay zeka teknikleri ve öncelik sınıfları kullanan yeni bir algoritmanın tasarımı ve benzetimi yapılmıştır. Bunun yanında, spektrum el değiştirme işleminde öncelik kuyruklarının analitik modelleri ve yapay zeka karar mekanizmaları anlatılarak bu alanda geliştirilebilecek yeni algoritmalar için temel oluşturulmuştur.

Bunun yanında, çıkış parametresinin spektrum el değiştirme olasılığı olduğu bulanık mantık tabanlı spektrum el değiştirme karar mekanizması önerilmiştir. Sistemin giriş parametreleri; birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğu, ikincil kullanıcıların veri oranı ve ortamdaki gürültü etkisi olarak belirlenmiştir. Her bir giriş parametresinin etkisi ayrı ayrı ele alınarak, hangi giriş parametresinin spektrum el değiştirme oranını ne ölçüde etkilediği incelenmiştir. Sonuç olarak, birincil kullanıcıların ortam kullanım yoğunluğunun diğer giriş parametrelerinden daha baskın olduğu tespit edilmiştir.

Tez çalışmasında, kablosuz ikincil kullanıcılar için ileri besleme sinir ağları tabanlı spektrum el değiştirme işleminin başarımlı analizi gerçekleştirilmiştir. Giriş veri setleri olarak; veri oranı, gürültü etkisi ve ortam kullanım yoğunluğu verilmiştir. Çıkış veri seti olarak da spektrum el değiştirme olasılığı girilerek sistem ileri besleme yapay sinir ağları ile eğitilmiştir. Sonuç olarak, eğitilen yapay sinir ağının örneklemeleri tanıdığı ve diğer detaylara ihtiyaç duymadan spektrum el değiştirme olasılıklarını yüksek oranda doğru tahmin edebildiği saptanmıştır.

Ayrıca, önceden tanımlı el değiştirme işleminin kullandığımız ortam erişim kontrol protokolleri açısından başarımlı değerlendirilmeleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirdiğimiz senaryoda, ikincil kullanıcılar el değiştirme işlemi gerçekleştirmesi gerektiğinde önceden tanımlanmış şekilde hazır bulunan boş spektrum kanallarından herhangi birine geçiş sağlamaktadırlar. Spektrum kanallar arasında geçiş yaparken sezme gecikmesinin olmaması önceden tanımlı el değiştirme yaklaşımını sezme tabanlı el değiştirme yaklaşımından bir adım öne taşımaktadır.

Slotted ALOHA ve TDMA ortam erişim protokolleri için benzetim modellerini tasarladığımız senaryoda, toplam servis süresi açısından sadece sezme tabanlı el değiştirmenin kullanıldığı senaryolara göre daha iyi sonuç değerleri bulunmuştur. Tez çalışmamızın alt yapısı kullanılarak farklı ortam erişim kontrol tekniklerinin sezme tabanlı ve önceden tanımlı el değiştirme işlemine olan etkileri incelenerek başarımlı analizleri yapılabilir.

Tez çalışmasında ele alınan spektrum el değiştirme yöntemleri bu alanda yapılabilecek yeni çalışmalara yol göstermesi açısından önemlidir. Bundan sonraki çalışmalarda; çeşitli yapay zeka teknikleri ve düşük öncelik sınıfları için bekleme süresi azaltma için çeşitli yaklaşımların tasarlanması gerçekleştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey," *Comput. Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127–2159, 2006.
- [2] A. O. Bicen, E. B. Pehlivanoglu, S. Galmes, and O. B. Akan, "Dedicated radio utilization for spectrum handoff and efficiency in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 9, pp. 5251–5259, 2015.
- [3] T. My, C. Chu, and H. Phan, "Dynamic spectrum access for cognitive radio networks with prioritized traffics," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 7, pp. 1218–1221, 2014.
- [4] I. Christian, S. Moh, I. Chung, and J. Lee, "Spectrum mobility in cognitive radio networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 6, pp. 114–121, 2012.
- [5] J. H. Chu, R. T. Ma, and K. Ten Feng, "Stochastic spectrum handoff protocols for partially observable cognitive radio networks," *Wirel. Networks*, vol. 20, no. 5, pp. 1003–1022, 2014.
- [6] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and N. Sai Shankar, "IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios," in *1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore, USA, 2005, pp. 328–337.
- [7] R. J. F. Coutinho P. S., Rocha Silva M. W., "Detection error aware spectrum handoff mechanism for cognitive radios," in *7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Stockholm, Sweden, 2012, pp. 1–5.
- [8] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, 1999.
- [9] S. Dahi and S. Tabbane, "Handoff reducing model for multichannel access in cognitive radio networks," in *9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Sardinia, Italy, 2013, pp. 1780–1785.
- [10] M. Fahimi and A. Ghasemi, "Analysis of the PRP M/G/1 queuing system for cognitive radio networks with handoff management," in *22nd Iranian Conference on Electrical Engineering*, Tehran, Iran, 2014, pp. 1047–1051.
- [11] F. Wei, C. Jiannong, Z. Chisheng, and L. Chuda, "Joint optimization of spectrum handoff scheduling and routing in multi-hop multi-radio cognitive networks," in *International Conference on Distributed Computing Systems*, Montreal, Canada, 2009, pp. 85–92.
- [12] W. Feng, J. Cao, C. Zhang, J. Zhang, and Q. Xin, "Coordination of multi-link spectrum handoff in multi-radio multi-hop cognitive networks," *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 72, no. 4, pp. 613–625, 2012.
- [13] A. B. Flores, R. E. Guerra, E. W. Knightly, P. Ecclesine, and S. Pandey, "IEEE

- 802.11af: a standard for TV white space spectrum sharing,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 10, pp. 92–100, 2013.
- [14] J. Guo, H. Ji, Y. Li, and X. Li, “A novel spectrum handoff management scheme based on SVM in cognitive radio networks,” in *6th International ICST Conference on Communications and Networking*, Harbin, China, 2011, pp. 645–649.
 - [15] S. Haykin, “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
 - [16] A. Hossain and N. I. Sarkar, “Spectrum handoff management in cognitive radio networks,” in *Cognitive Radio Technology Applications for Wireless and Mobile Ad Hoc Networks*, 1st ed., Hershey, USA: IGI Global, 2013, ch. 6, pp. 103–123.
 - [17] S. J. S. Jung and C. L. C. Lee, “Wireless LAN handoff module implementation to OPNET simulator and handoff performance analysis,” in *the 6th International Conference on Advanced Communication Technology*, Phoenix Park, Korea, 2004, pp. 151–156.
 - [18] M. Kalil, “Spectrum handoff reduction for cognitive radio ad hoc networks,” in *7th International Symposium on Wireless Communication Systems*, York, UK, 2010, pp. 1036–1040.
 - [19] H. Kang, D. Lee, B. J. Jeong, and A. C. Kim, “Coexistence between 802.22 and 802.11af over TV white space,” in *International Conference on ICT Convergence*, Seoul, South Korea, 2011, pp. 533–536.
 - [20] H. Kobayashi and B. Mark, *System Modeling and Analysis: Foundations of System Performance Evaluation*, 1st ed., New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall, 2009.
 - [21] D. J. Lee and W. Y. Yeo, “Channel availability analysis of spectrum handoff in cognitive radio networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 3, pp. 435–438, 2015.
 - [22] A. Lertsinsrubeetavee, N. Malouch, and S. Fdida, “Efficient dynamic spectrum sharing through rate compensation and spectrum handoff,” in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, Turin, Italy, 2013, pp. 19–20.
 - [23] A. Lertsinsrubeetavee, N. Malouch, S. Fdida, and K. Kanchanasut, “Spectrum sharing and impact on spectrum handoff in multi-channel cognitive radio networks,” in *IEEE 14th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Madrid, Spain, 2013, pp. 1–6.
 - [24] L. Yin, S. Yin, W. Hong, and S. Li, “Spectrum behavior learning in cognitive radio based on artificial neural network,” in *Military Communications Conference*, Baltimore, USA, 2011, pp. 25–30.
 - [25] H. J. Liu, Z. X. Wang, S. F. Li, and M. Yi, “Study on the performance of spectrum mobility in cognitive wireless network,” in *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, Guangzhou, China, 2008, pp. 1010–1014.
 - [26] Y. Liu, B. Pei, and H. Wang, “An intelligent spectrum handoff scheme based on overflow queuing theory in cognitive radio networks,” in *31st URSI General Assembly and Scientific Symposium*, Beijing, China, 2014, pp. 1–4.

- [27] G. Ko, A. A. Franklin, S. J. You, J. S. Pak, M. S. Song, and C. J. Kim, "Channel management in IEEE 802.22 WRAN systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 9, pp. 88–94, 2010.
- [28] S. M. Mahamuni, V. Mishra, and R. Fernandes, "Detection of spectrum in cognitive radio network for efficient spectrum handoff mechanism," in *2nd International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking*, Surat, India, 2014, pp. 1–6.
- [29] R. Mardeni, K. Anuar, M. Hafidzoh, M. Y. Alias, H. Mohamad, and N. Ramli, "Efficient handover algorithm using fuzzy logic underlay power sharing for cognitive radio wireless network," in *IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications*, Kuching, Malaysia, 2013, pp. 53–56.
- [30] J. Wang, M. Ghosh, and K. Challapali, "Emerging cognitive radio applications: a survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 3, pp. 74–81, 2011.
- [31] V. Nabyev, *Yapay Zeka*. 4. baskı, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2012.
- [32] Steel Central. (2017, April 25). *Riverbed modeler* [Online]. Available: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>
- [33] S. Zahed, I. Awan, and A. Cullen, "Analytical modeling for spectrum handoff decision in cognitive radio networks," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 38, pp. 98–114, 2013.
- [34] X. Li, H. Liu, S. Roy, J. Zhang, P. Zhang, and C. Ghosh, "Throughput analysis for a multi-user, multi-channel ALOHA cognitive radio system," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 11, pp. 3900–3909, 2012.
- [35] L. Giupponi and A. I. Pérez-Neira, "Fuzzy-based spectrum handoff in cognitive radio networks," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Singapore, 2008, pp. 1–6.
- [36] P. Kaur, M. Udin, A. Khosla, and B. R. Ambedkar, "An efficient spectrum mobility management strategy in cognitive radio networks," in *First UK-India International Workshop on Cognitive Wireless Systems*, Delhi, India, 2011, pp. 1–6.
- [37] S. M. Potdar and K. P. Patil, "Efficient spectrum handoff in CR network based on mobility, QoS and priority using fuzzy logic and neural network," in *6th International Conference on Contemporary Computing*, Noida, India, 2013, pp. 53–58.
- [38] E. Ahmed, L. J. Yao, M. Shiraz, A. Gani, and S. Ali, "Fuzzy-based spectrum handoff and channel selection for cognitive radio networks," in *Proceeding of The International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Application*, Jakarta, Indonesia, 2013, pp. 23–28.
- [39] Y. Konishi, H. Masuyama, S. Kasahara, and Y. Takahashi, "Performance analysis of dynamic spectrum handoff scheme with variable bandwidth demand of secondary users for cognitive radio networks," *Wirel. Networks*, vol. 19, no. 5, pp. 607–617, 2013.
- [40] H. Han, W. Qihui, and Y. Hong, "Spectrum sensing for real-time spectrum handoff in CRNs," in *3rd International Conference on Advanced Computer*

Theory and Engineering, Chengdu, China, 2010, pp. 480–484.

- [41] D. J. Lee and M. S. Jang, “Optimal spectrum sensing time considering spectrum handoff due to false alarm in cognitive radio networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 12, pp. 899–901, 2009.
- [42] S. D. Nguyen, T. L. Pham, and D. S. Kim, “Dynamic spectrum handoff for industrial cognitive wireless sensor networks,” in *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Bochum, Germany, 2013, pp. 92–97.
- [43] A. Lertsinsruttavee, N. Malouch, and S. Fdida, “Controlling spectrum handoff with a delay requirement in cognitive radio networks,” in *21st International Conference on Computer Communications and Networks*, Munich, Germany, 2012, pp. 1–8.
- [44] S. U. Yoon and E. Ekici, “Voluntary spectrum handoff: a novel approach to spectrum management in CRNs,” in *IEEE International Conference on Communications*, Cape Town, South Africa, 2010, pp. 1–5.
- [45] T. Zhang, M. Wu, and C. Liu, “Cooperative spectrum sensing based on artificial neural network for cognitive radio systems,” in *8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Shanghai, China, 2012, pp. 1–5.
- [46] A. Lertsinsruttavee, N. Malouch, and S. Fdida, “Spectrum handoff strategy using cumulative probability in cognitive radio networks,” in *3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*, Budapest, Hungary, 2011, pp. 1–7.
- [47] Y. Wang, G. Nie, G. Li, and C. Shi, “Sensing-throughput tradeoff in cluster-based cooperative cognitive radio networks with a TDMA reporting frame structure,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 71, no. 3, pp. 1795–1818, 2013.
- [48] Y. Wu, F. Hu, S. Kumar, M. Guo, K. Bao, and S. Diego, “Spectrum handoffs with mixed-priority queueing model over cognitive radio networks,” in *IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*, Austin, USA, 2013, pp. 1194–1197.
- [49] H. Kim and K. G. Shin, “Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 7, no. 5, pp. 533–545, 2008.
- [50] M. Li, T. Jiang, and L. Tong, “Spectrum handoff scheme for prioritized multimedia services in cognitive radio network with finite buffer,” in *Proceedings of The IEEE 11th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing*, Chengdu, China, 2013, pp. 410–415.
- [51] L. C. Wang and C. W. Wang, “Spectrum handoff for cognitive radio networks: reactive-sensing or proactive-sensing,” in *Conference Proceedings of the IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*, Austin, USA, 2008, pp. 343–348.
- [52] J. Zhou, Y. Shen, S. Shao, and Y. Tang, “Optimal location of the secondary base station for broadcasting cognitive radio networks with spectrum underlay,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 75, no. 2, pp. 1331–1342, 2014.
- [53] L. C. Wang, C. W. Wang, and C. J. Chang, “Modeling and analysis for spectrum handoffs in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 11, no. 9,

- pp. 1499–1513, 2012.
- [54] M. V. D. Schaar, “Queuing-based dynamic channel selection for heterogeneous multimedia applications over cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 10, no. 5, pp. 896–909, 2008.
 - [55] S. M. Kannappa and M. Saquib, “Performance analysis of a cognitive network with dynamic spectrum assignment to secondary users,” in *IEEE International Conference on Communications*, Cape Town, South Africa, 2010, pp. 1–5.
 - [56] L. C. Wang, C. W. Wang, and C. J. Chang, “Modeling and analysis for spectrum handoffs in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 11, no. 9, pp. 1499–1513, 2012.
 - [57] F. Sheikholeslami, M. Nasiri Kenari, and F. Ashtiani, “Optimal probabilistic initial and target channel selection for spectrum handoff in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 570–584, 2015.
 - [58] C. W. Wang and L. C. Wang, “Modeling and analysis for proactive-decision spectrum handoff in cognitive radio networks,” in *IEEE International Conference on Communications*, Dresden, Germany, 2009, pp. 1–6.
 - [59] Y. Zhang, “Spectrum handoff in cognitive radio networks: opportunistic and negotiated situations,” in *Proceedings of The 2009 IEEE International Conference on Communications*, Dresden, Germany, 2009, pp. 1–5.
 - [60] J. Raiyn, “Developing cognitive radio approach based on dynamic snr to reduce handoff latency in cellular systems,” in *International Symposium on Performance Evaluation of Computer & Telecommunication Systems*, Istanbul, Turkey, 2009, pp. 231–237.
 - [61] Y. Song and J. Xie, “Common hopping based proactive spectrum handoff in cognitive radio ad hoc networks,” in *IEEE Global Telecommunications Conference*, Miami, USA, 2010, pp. 1–5.
 - [62] C. W. Wang, L. C. Wang, and F. Adachi, “Modeling and analysis for reactive-decision spectrum handoff in cognitive radio networks,” in *IEEE Global Telecommunications Conference*, Miami, USA, 2010, pp. 1–6.
 - [63] F. Liu, Y. Xu, X. Guo, W. Zhang, D. Zhang, and C. Li, “A spectrum handoff strategy based on channel reservation for cognitive radio network,” in *Proceedings of The 3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, Hong Kong, China, 2013, pp. 179–182.
 - [64] S. Zheng, X. Yang, S. Chen, and C. Lou, “Target channel sequence selection scheme for proactive-decision spectrum handoff,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 12, pp. 1332–1334, 2011.
 - [65] X. Qiao, Z. Tan, and J. Li, “Combined optimization of spectrum handoff and spectrum sensing for cognitive radio systems,” in *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, 2011, pp. 1–4.
 - [66] C. Wu, C. He, L. Jiang, and Y. Chen, “A novel spectrum handoff scheme with spectrum admission control in cognitive radio networks,” in *IEEE Global Telecommunications Conference*, Kathmandu, Nepal, 2011, pp. 1–5.
 - [67] X. Xie, G. Yang, and B. Ma, “Spectrum handoff decision algorithm with

- dynamic weights in cognitive radio networks,” in *Global Mobile Congress*, Shanghai, China, 2011, pp. 1–6.
- [68] C. W. Wang and L. C. Wang, “Analysis of reactive spectrum handoff in cognitive radio networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 10, pp. 2016–2028, 2012.
 - [69] S. Zahed, I. Awan, and G. Min, “Prioritized proactive scheme for spectrum handoff decision in cognitive radio networks,” in *Proceedings of The 7th International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications*, Victoria, Canada, 2012, pp. 335–341.
 - [70] M. T. Soleimani, M. Kahvand, and R. Sarikhani, “Handoff reduction based on prediction approach in cognitive radio networks,” in *IEEE International Conference on Communication Technology*, Guilin, China, 2013, pp. 319–323.
 - [71] J. H. Park, Y. Nam, and J. M. Chung, “Analysis of channel access with spectrum handoff in cluster based cognitive radio sensor networks,” in *International Conference on ICT Convergence*, Jeju, South Korea, 2013, pp. 232–233.
 - [72] W. Tianwei, W. Yafeng, and L. Chao, “A spectrum handoff scheme based on comprehensive cost in cognitive radio system,” in *4th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace and Electronic Systems*, Aalborg, Denmark, 2014, pp. 1–5.
 - [73] S. Zahed, I. Awan, A. Cullen, and M. Younas, “Performance evaluation of cognitive radio networks under licensed and unlicensed spectrum bands,” in *Proceedings of The International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Victoria, Canada, 2014, pp. 329–336.
 - [74] M. Norooz Oliace, B. Hamdaoui, X. Cheng, T. Znati, and M. Guizani, “Analyzing cognitive network access efficiency under limited spectrum handoff agility,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 3, pp. 1402–1407, 2014.
 - [75] W. Zhang and C. K. Yeo, “Sequential sensing based spectrum handoff in cognitive radio networks with multiple users,” *Comput. Networks*, vol. 58, no. 1, pp. 87–98, 2014.
 - [76] S. Sayyadi and J. Nourinia, “Performance evaluation of sequential spectrum handoff in cognitive radio networks: a single-user case,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 27, no. 12, pp. 3768–3780, 2014.
 - [77] P. M. Pradhan, “Design of cognitive radio engine using artificial bee colony algorithm,” in *International Conference on Energy, Automation, and Signal*, Odisha, India, 2011, pp. 1–4.
 - [78] X. Cheng and M. Jiang, “Cognitive radio spectrum assignment based on artificial bee colony algorithm,” in *IEEE 13th International Conference on Communication Technology*, Jinan, China, 2011, pp. 161–164.
 - [79] S. Ashrafinia, U. Pareek, M. Naeem, and D. C. Lee, “Binary artificial bee colony for cooperative relay communication in cognitive radio systems,” in *IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, Canada, 2012, pp. 1550–1554.
 - [80] X. Li and L. Liu, “Cooperative spectrum sensing for cognitive radios based on a PA-GABC algorithm,” in *International Conference on Electronics, Communications and Control*, Ningbo, China, 2011, pp. 2604–2607.

- [81] A. Ghasemi, A. F. Jahromi, M. A. Masnadi Shirazi, M. Biguesh, and F. Ghasemi, "Spectrum allocation based on artificial bee colony in cognitive radio networks," in *6th International Symposium on Telecommunications*, Tehran, Iran, 2012, pp. 182–187.
- [82] K. Sultan, I. M. Qureshi, and M. Zubair, "SNR maximization through relay selection in cognitive radio networks," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 8, pp. 2616–2620, 2013.
- [83] E. Yesil, C. Ozturk, M. F. Dodurka, and A. Sakalli, "Fuzzy cognitive maps learning using artificial bee colony optimization," in *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Hyderabad, India, 2013, pp. 1–8.
- [84] A. Ghasemi, F. Qassemi, M. Biguesh, and M. A. Masnadi Shirazi, "Channel assignment based on bee algorithms in multi-hop cognitive radio networks," *IET Commun.*, vol. 8, no. 13, pp. 2356–2365, 2014.
- [85] M. Li, Y. Hei, and Z. Qiu, "Optimization of non-convex cooperative spectrum sensing with modified artificial bee colony algorithm," in *IEEE International Conference on Computer and Information Technology*, Xian, China, 2014, pp. 70–75.
- [86] X. Li, L. Lu, L. Liu, G. Li, and X. Guan, "Cooperative spectrum sensing based on an efficient adaptive artificial bee colony algorithm," *Soft Comput.*, vol. 19, no. 3, pp. 597–607, 2015.
- [87] S. Nejatian, S. K. Syed Yusof, N. Mu, and V. Asadpour, "Proactive integrated handoff management in cognitive radio mobile ad hoc networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 224, no. 1, pp. 1–19, 2013.
- [88] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Improving spectrum handoff utilization for prioritized cognitive radio users by exploiting channel bonding with starvation mitigation," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 71, pp. 181–191, 2017.
- [89] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Performance analysis of proactive decision spectrum handoff for MAC protocols in cognitive radio networks," in *24th Signal Processing and Communication Application Conference*, Zonguldak, Turkey, 2016, pp. 481–484.
- [90] M. E. Bayrakdar and A. Calhan, "Fuzzy logic based spectrum handoff decision for prioritized secondary users in cognitive radio networks," in *5th International Conference on Digital Information Processing and Communications*, Sierre, Switzerland, 2015, pp. 71–76.
- [91] V. Gatla, A. V. Kulkarni, and M. Venkatesan, "Feed forward neural network based learning scheme for cognitive radio systems," in *Third International Conference on Computational Intelligence and Information Technology*, Mumbai, India, 2013, pp. 25–31.
- [92] I. F. Akyildiz, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 40–48, 2008.
- [93] F. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet switching in radio channels: part II--the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 23, no. 12, pp. 1417–1433, 1975.

- [94] R. G. Gallager, "A perspective on multiaccess channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 31, no. 2, pp. 124–142, 1985.
- [95] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 24, no. 4, pp. 212–225, 1994.
- [96] S. Choe and S. K. Park, "Throughput of slotted ALOHA based cognitive radio MAC," in *Proceedings of The 4th International Conference on Ubiquitous Information Technologies and Applications*, Fukuoka, Japan, 2009, pp. 1–4.
- [97] N. Abramson, "The aloha system," in *Proceedings of The Fall Joint Computer Conference*, Texas, USA, 1970, pp. 281–285.
- [98] C. L. Fullmer and J. J. Garcia Luna Aceves, "Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet-radio networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 25, no. 4, pp. 262–273, 1995.
- [99] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the Twenty First Annual Joint Conference of The IEEE Computer and Communications Societies*, New York, USA, 2002, pp. 1567–1576.
- [100] F. Talucci and M. Gerla, "MACA-BI (MACA by invitation). a wireless MAC protocol for high speed ad hoc networking," in *Proceedings of 6th International Conference on Universal Personal Communications*, San Diego, USA, 1997, pp. 913–917.
- [101] C. Wu and V. Li, "Receiver-initiated busy-tone multiple access in packet radio networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 17, no. 5, pp. 336–342, 1987.
- [102] Zhenyu Yang and J. J. Garcia Luna Aceves, "Hop-reservation multiple access (HRMA) for ad-hoc networks," in *IEEE Eighteenth Annual Joint Conference of The IEEE Computer and Communications Societies*, New York, USA, 1999, pp. 194–201.
- [103] Z. J. Haas and J. Deng, "Dual busy tone multiple access (DBTMA) - a multiple access control scheme for ad hoc networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 6, pp. 975–985, 2002.
- [104] K. Chen, K. Chen, and A. H. Lans, "Medium access control of wireless LANs for mobile computing," *IEEE Netw.*, vol. 8, no. 10, pp. 50–63, 1994.
- [105] B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim, and P. T. Sakai, "IEEE 802.11 wireless local area networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 9, pp. 116–126, 1997.
- [106] A. Muir, "An efficient packet sensing MAC protocol for wireless networks," *Mob. Networks Appl.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–20, 1998.
- [107] S. Singh and C. S. Raghavendra, "PAMAS-power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 28, pp. 5–26, 1998.
- [108] A. Chockalingam and M. Zorzi, "Energy consumption performance of a class of access protocols for mobile data networks," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2, no. 11, pp. 820–824, 1998.
- [109] K. M. Sivalingam, M. B. Srivastava, and P. Agrawal, "Low power link and access protocols for wireless multimedia networks," in *IEEE 47th Vehicular*

Technology Conference, Phoenix, USA, 1997, pp. 1331–1335.

- [110] E. S. J. E. S. Jung and N. H. Vaidya, “An energy efficient MAC protocol for wireless LANs,” in *Proceedings Twenty-First Annual Joint Conference of The IEEE Computer and Communications Societies*, New York, USA, 2002, pp. 1756–1764.
- [111] F. L. Lo, T. S. Ng, and T. I. Yuk, “Delay-throughput comparison of single and multi-channel slotted ALOHA networks,” in *Proceedings of International Conference on Communication Technology*, Beijing, China, 1996, pp. 934–937.
- [112] H. Woesner, J. P. Ebert, M. Schläger, and A. Wolisz, “Power-saving mechanisms in emerging standards for wireless LANs: the MAC level perspective,” *IEEE Pers. Commun.*, vol. 5, no. 3, pp. 40–48, 1998.
- [113] J. Monks, “A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks,” in *Twentieth Annual Conference*, Anchorage, USA, 2001, pp. 1–10.
- [114] R. Ramanathan and R. Rosales Hain, “Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment,” in *Proceedings IEEE Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Tel Aviv, Israel, 2000, pp. 404–413.
- [115] S. M. S. Choi, J. D. Prado, N. S. Shankar, “IEEE 802.11e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation,” in *IEEE International Conference on Communications*, Anchorage, USA, 2003, pp. 1151–1156.
- [116] N. Vaidya, A. Dugar, S. Gupta, and P. Bahl, “Distributed fair scheduling in a wireless LAN,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 4, no. 6, pp. 616–628, 2005.
- [117] S. Mangold, S. Choi, P. May, O. Klein, G. Hiertz, and L. Stibor, “IEEE 802.11e wireless LAN for quality of service,” in *Proceedings of the European Wireless*, Florence, Italy, 2002, pp. 32–39.
- [118] V. Rodoplu and T. H. Meng, “Minimum energy mobile wireless networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 8, pp. 1333–1344, 1999.
- [119] J. E. Wieselthier, G. D. Nguyen, and A. Ephremides, “On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks,” in *Proceedings of The IEEE Nineteenth Annual Joint Conference on Computer and Communications Societies*, Tel Aviv, Israel, 2000, pp. 585–594.
- [120] J. E. Wieselthier, G. D. Nguyen, and a. Ephremides, “Resource-limited energy-efficient wireless multicast of session traffic,” in *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, USA, 2001, pp. 10–15.
- [121] A. Nasipuri, J. Zhuang, and S. R. Das, “A multichannel CSMA MAC protocol for multihop wireless networks,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, New Orleans, USA, 1999, pp. 1402–1406.
- [122] A. Nasipuri and S. R. Das, “Multichannel CSMA with signal power-based channel selection for multihop wireless networks,” in *52nd Vehicular Technology Conference*, Boston, USA, 2000, pp. 211–218.
- [123] N. Jain, S. R. Das, and A. Nasipuri, “A multichannel CSMA MAC protocol with receiver-based channel selection for multihop wireless networks,” in *Proceedings of The International Conference on Computer Communications and Networks*,

New Orleans, USA, 2001, pp. 432–439.

- [124] A. Ephremi Des, J. E. Wieselthier, and D. J. Baker, “Design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling,” *Proc. IEEE*, vol. 75, no. 1, pp. 56–73, 1987.
- [125] R. Garces and J. J. Garcia Luna Aceves, “Near-optimum channel access protocol based on incremental collision resolution and distributed transmission queues,” *Proceedings of The IEEE INFOCOM*, San Francisco, USA, 1998, pp. 158–165.
- [126] T. Nandagopal, T. E. Kim, and X. Gao, “Achieving MAC layer fairness in wireless packet networks,” in *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, USA, 2000, pp. 87–98.
- [127] I. Aad and C. Castelluccia, “Differentiation mechanisms for IEEE 802.11,” in *Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society on Computer Communications*, Anchorage, USA, 2001, pp. 209–218.
- [128] M. B. Pursley, “The role of spread spectrum in packet radio networks,” *IEEE Proc.*, vol. 75, no. 1, pp. 116–134, 1987.
- [129] C. R. Lin and M. Gerla, “Asynchronous multimedia multihop wireless networks,” in *Proceedings of INFOCOM*, Kobe, Japan, 1997, pp. 1–19.
- [130] J. P. Ebert, B. Stremmel, E. Wiederhold, and A. Wolisz, “An energy-efficient power control approach for WLANs,” *J. Commun. Networks*, vol. 2, no. 3, pp. 197–206, 2000.
- [131] A. Ghasemi and E. S. Sousa, “Spectrum sensing in cognitive radio networks: the cooperation-processing tradeoff,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 7, no. 9, pp. 1049–1060, 2007.
- [132] A. Veres, A. T. Campbell, and M. Barry, “Supporting service differentiation in wireless packet networks using distributed control,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 19, no. 10, pp. 2081–2093, 2001.
- [133] M. Gerla and J. Tzu Chieh Tsai, “Multicluster, mobile, multimedia radio network,” *Wirel. Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 255–265, 1995.
- [134] S. G. Withthige, “Modeling spectrum handoff in overlay cognitive radio networks - a queueing theoretic approach,” M.S. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Canada, 2012.
- [135] M. R. Çelenlioğlu, “Konum tabanlı enerji verimli dikey el değiştirme,” Yüksek lisans tezi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [136] S. Erman, “Kablosuz ağlarda el değiştirme,” Yüksek lisans tezi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [137] F. Koç, “Çoklu erişim arayüzüne sahip mobil terminaller için servis bilinçli el değiştirme çerçevesi,” Yüksek lisans tezi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [138] U. Baroudi and A. Alfadhly, “Effects of mobility and primary appearance probability on spectrum handoff,” in *IEEE Vehicular Technology Conference*, Yokohama, Japan, 2011, pp. 1–6.

- [139] C. Ren, H. Yu, C. Ma, J. Liu, and Y. Guan, "An energy-efficient spectrum handoff and access mechanism for the WBAN system," in *2013 IEEE/CIC International Conference on Communications*, Xian, China, 2013, pp. 125–130.
- [140] A. Bozkurt, "Heterojen kablosuz ağlarda dikey el değiştirme yolu ile ağ seçimi," Doktora tezi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye, 2011.
- [141] A. Çalhan, "Yeni nesil gezgin haberleşme teknolojileri için yapay zeka tabanlı dikey el değiştirme yöntemi ve uygulaması," Doktora tezi, Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2011.
- [142] A. Lertsinsrubtavee, N. Malouch, and S. Fdida, "Hybrid spectrum sharing through adaptive spectrum handoff for cognitive radio networks," in *IFIP Networking Conference*, Trondheim, Norway, 2014, pp. 1–9.
- [143] Y. Song and J. Xie, "Performance analysis of spectrum handoff for cognitive radio ad hoc networks without common control channel under homogeneous primary traffic," in *Proceedings IEEE INFOCOM*, Shanghai, China, 2011, pp. 3011–3019.
- [144] E. Trigui, M. Esseghir, and L. M. Boulahia, "Cognitive radio spectrum assignment and handoff decision," in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, London, UK, 2013, pp. 2881–2886.
- [145] E. Trigui, M. Esseghir, and L. M. Boulahia, "Spectrum handoff algorithm for mobile cognitive radio users based on agents' negotiation," in *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, Lyon, France, 2013, pp. 750–756.
- [146] C. Wu, C. He, and L. Jiang, "Spectrum handoff scheme based on recommended channel sensing sequence," *China Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 18–26, 2013.
- [147] J. Duan and Y. Li, "An optimal spectrum handoff scheme for cognitive radio mobile ad hoc networks," *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 11–16, 2011.
- [148] K. Tsagkaris, A. Katidiotis, and P. Demestichas, "Neural network-based learning schemes for cognitive radio systems," *Comput. Commun.*, vol. 31, no. 14, pp. 3394–3404, 2008.
- [149] N. Giweli, S. Shahrestani, and H. Cheung, "Selecting the sensing method in cognitive radio and future networks: a qos-aware fuzzy scheme," in *IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*, Sydney, Australia, 2015, pp. 497–504.
- [150] G. V. Lakhekar, "A fuzzy neural approach for dynamic spectrum allocation in cognitive radio networks," in *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies*, Nagercoil, India, 2014, pp. 1455–1461.
- [151] A. Sahoo and D. D. Seth, "A fuzzy logic based spectrum allocation technique for cognitive radio network," in *International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization*, Visakhapatnam, India, 2015, pp. 1–4.
- [152] P. Maheshwari and A. K. Singh, "A fuzzy logic based approach to spectrum assignment in cognitive radio networks," in *IEEE International Advance Computing Conference*, Bangalore, India, 2015, pp. 278–281.

- [153] B. Akay and D. Karaboga, "Wavelet packets optimization using artificial bee colony algorithm," in *IEEE Congress of Evolutionary Computation*, New Orleans, USA, 2011, pp. 89–94.
- [154] C. Ozturk and D. Karaboga, "Hybrid artificial bee colony algorithm for neural network training," in *IEEE Congress of Evolutionary Computation*, New Orleans, USA, 2011, pp. 84–88.
- [155] D. Karaboga and S. Aslan, "A new emigrant creation strategy for parallel Artificial Bee Colony algorithm," in *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey, 2015, pp. 689–694.
- [156] D. Karaboga, S. Okdem, and C. Ozturk, "Cluster based wireless sensor network routing using artificial bee colony algorithm," *Wirel. Networks*, vol. 18, no. 7, pp. 847–860, 2012.
- [157] S. Okdem, D. Karaboga, and C. Ozturk, "An application of wireless sensor network routing based on artificial bee colony algorithm," in *IEEE Congress of Evolutionary Computation*, New Orleans, USA, 2011, pp. 326–330.
- [158] S. Yang, "Spectrum handover with queues and guard channels in cognitive radio networks," in *Spring Congress on Engineering and Technology*, Xian, China, 2012, pp. 12–15.
- [159] R. Jabbour and I. H. Elhajj, "SAF-PS: starvation avoidance for priority scheduling," in *5th International Multi Conference on Systems, Signals and Devices*, Amman, Jordan, 2008, pp. 1–6.
- [160] D. J. Vergados, N. A. Pantazis, D. D. Vergados, and C. Doulige, "Topological dependence and fault tolerance in TDMA based power conservation for WSNs," in *Proceedings of The International Conference on Wireless Information Networks and Systems*, Porto, Portugal, 2008, pp. 53–58.
- [161] A. Chaoub and J. E. L. Abbadi, "Video transmission over cognitive radio TDMA networks under collision errors," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 1, no. 2, pp. 5–13, 2011.
- [162] F. M. Delicado, P. Cuenca, and L. Orozco Barbosa, "QoS-aware video communications over TDMA / TDD wireless networks," in *IFIP International Conference on Personal Wireless Communications*, Berlin, Germany, 2006, pp. 50–63.
- [163] M. Anusha, S. Vemuru, and T. Gunasekhar, "TDMA-based MAC protocols for scheduling channel allocation in multi-channel wireless mesh networks using cognitive radio," in *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies*, Nagercoil, India, 2015, pp. 1–5.
- [164] P. Leone and E. M. Schiller, "Self-stabilizing TDMA algorithms for dynamic wireless ad-hoc networks," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 77, no. 18, pp. 105–107, 2012.
- [165] S. Solak, "Kablosuz algılayıcı ağlarda kullanılan MAC protokollerinin karşılaştırmalı başarımlı analizi," Doktora tezi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2008.
- [166] L. Zhai, "Opportunistic spectrum access for TDMA-based cognitive radio networks," *Optik*, vol. 125, no. 9, pp. 2081–2085, 2014.

- [167] V. Naware, G. Mergen, and L. Tong, "Stability and delay of finite-user slotted ALOHA with multipacket reception," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 7, pp. 2636–2656, 2005.
- [168] Y. Yang and T. S. P. Yum, "Delay distributions of slotted ALOHA and CSMA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1846–1857, 2003.
- [169] G. Cunningham, "Delay versus throughput comparisons for stabilized slotted ALOHA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, no. 11, pp. 1932–1934, 1991.
- [170] C. Kai and S. C. Liew, "Temporal starvation in CSMA wireless networks," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 14, no. 7, pp. 1515–1529, 2015.
- [171] M. Balajee, B. Suresh, M. Suneetha, V. Vasudha Rani, and G. Veeraj, "Preemptive job scheduling with priorities and starvation cum congestion avoidance in clusters," in *The 2nd International Conference on Machine Learning and Computing*, Bangalore, India, 2010, pp. 255–259.
- [172] A. Warriar, J. Min, and I. Rhee, "Mitigating starvation in wireless sensor networks," in *Proceedings IEEE Military Communications Conference*, Washington, USA, 2007, pp. 1–5.
- [173] S. Joshi, P. Pawelczak, D. Cabric, and J. Villaseñor, "Performance of channel bonding for opportunistic spectrum access networks," in *IEEE Global Telecommunications Conference*, Anaheim, USA, 2012, pp. 1676–1681.
- [174] N. Joshi and B. Jharia, "Optimized fuzzy power control over fading channels in spectrum sharing cognitive radio using ANFIS," in *2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks*, Noida, India, 2015, pp. 329–333.
- [175] S. H. R. Bukhari, M. H. Rehmani, and S. Siraj, "A survey of channel bonding for wireless networks and guidelines of channel bonding for futuristic cognitive radio sensor networks," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 924–948, 2016.
- [176] M. H. Rehmani, S. Lohier, and A. Rachedi, "Channel bonding in cognitive radio wireless sensor networks," in *International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking*, Avignon, France, 2012, pp. 72–76.
- [177] Y. Lu, H. He, J. Wang, and S. Li, "Opportunistic spectrum access with channel bonding," in *4th International Conference on Communications and Networking*, Xian, China, 2009, pp. 1090–1094.
- [178] X. Liang, K. Yamamoto, and S. Yoshida, "Performance comparison between channel-bonding and multi-channel CSMA," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Kowloon, China, 2007, pp. 406–410.
- [179] X. Dong, Y. Li, C. Wu, and Y. Cai, "A learner based on neural network for cognitive radio," in *IEEE 12th International Conference on Communication Technology*, Nanjing, China, 2010, pp. 893–896.
- [180] M. Mehrnosh, R. Fathi, and V. T. Vakili, "Proactive spectrum handoff protocol for cognitive radio ad hoc network and analytical evaluation," *IET Commun.*, vol. 9, no. 15, pp. 1877–1884, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed Enes BAYRAKDAR
Doğum Tarihi ve Yeri : 18.07.1988 / Kocaeli
Yabancı Dili : İngilizce, İspanyolca
E-posta : muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2017
Y. Lisans	Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi	Kocaeli Üniversitesi	2013
Lisans	Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2016
Lisans	Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi	Kocaeli Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	İzmit Gazi Lisesi	2005

AKADEMİK VE MESLEKİ DENEYİM

Görev Dönemi	Unvan	Çalıştığı Kurum	Bölüm
2013 – ...	Araştırma Görevlisi	Düzce Üniversitesi	Bilgisayar Mühendisliği
2011 – 2013	Araştırma Görevlisi	Kocaeli Üniversitesi	Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi
2010 – 2011	Araştırma Görevlisi	Düzce Üniversitesi	Bilgisayar Mühendisliği

PROJELER

Görev Tanımı	Proje Adı	Destekleyen Kurum	Durum
Proje Araştırmacısı	Vücut Alan Ağı Kontrollü Tekerlekli Sandalye için Enerji Hasadı Uygulaması	Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri	Devam Ediyor
Proje Araştırmacısı	Bilişsel Radyo Tabanlı Vücut Alan Ağları için Vücut Sönümleme Etkisi ile Kanal Modellenmesi	Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri	Devam Ediyor
Proje Araştırmacısı	Bilişsel Radyo Ağlarında Yeni Bir Spektrum El Değiştirme Algoritmasının Tasarımı ve Benzetimi	Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri	Bitti

ULUSLARARASI (SCI, SCI-E) HAKEMLİ DERGİLERDE YAYIMLANAN MAKALELER

Yazarlar	Makale Başlığı	Dergi Adı	Cilt (Sayı), Sayfa	Tarih
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Non-Preemptive Queueing Model of Spectrum Handoff Scheme based on Prioritized Data Traffic in Cognitive Wireless Networks	ETRI Journal		
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Improving Spectrum Handoff Utilization for Prioritized Cognitive Radio Users by Exploiting Channel Bonding with Starvation Mitigation	AEÜ - International Journal of Electronics and Communications	71 (), 181-191	January 2017
Muhammed Enes Bayrakdar, S. Atmaca, A. Karahan	A slotted ALOHA-based Cognitive Radio Network under Capture Effect in Rayleigh Fading Channels	Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences	24 (3), 1955-1966	March 2016

ULUSLARARASI BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN BİLDİRİLER

Yazarlar	Bildiri Başlığı	Toplantı Adı	Sayfa	Tarih, Yer
Muhammed Enes Bayrakdar,	Spectrum Handoff Process with Aging Solution for Secondary Users in Priority	IEEE 25th Signal Processing and Communications Applications	1-4	15-18 May 2017 Antalya,

A. Çalhan	based Cognitive Networks	Conference (SIU 2017)		Turkey
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Performance Analysis of Sensing based Spectrum Handoff Process for Channel Bonding Mechanism in Wireless Cognitive Networks	IEEE 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2017)	1-4	15-18 May 2017 Antalya, Turkey
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Optimization of Spectrum Handoff with Artificial Bee Colony Algorithm	IEEE 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2017)	1-4	15-18 May 2017 Antalya, Turkey
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Delay Characteristics of TDMA Medium Access Control Protocol for Cognitive Radio Networks	IEEE 11th International Scientific and Technical Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2016)	66-69	06-10 Sep. 2016 Lviv, Ukraine
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Performance Analysis of Proactive Decision Spectrum Handoff for MAC Protocols in Cognitive Radio Networks	IEEE 24th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2016)	481-484	16-19 May 2016 Zonguldak, Turkey
M. Şimşek Biçen, Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Performance Evaluation of Non-Cooperative Spectrum Sensing Techniques under Various Channels in Wireless Cognitive Radio Networks	1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS 2016)	106-110 ISBN 978-605-4444-05-2	21-22 Apr. 2016 Afyonkarahisar, Turkey
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Simulation Model of Spectrum Handoff Process for Medium Access Control Protocols in Cognitive Radio Networks	IEEE 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2015)	1221-1225	26-28 Nov. 2015 Bursa, Turkey
Muhammed Enes	Fuzzy Logic based Spectrum Handoff Decision for	IEEE 5th International	71-76	07-09 Oct.

Bayrakdar, A. Çalhan	Prioritized Secondary Users in Cognitive Radio Networks	Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC 2015)	2015 Sierre, Switzerland
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Fuzzy Logic based Channel Selection for Mobile Secondary Users in Cognitive Radio Networks	IEEE 23th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2015)	331- 334 16-19 May 2015 Malatya, Turkey
Muhammed Enes Bayrakdar, S. Bayrakdar	A Cooperative Communication Approach for Voluntary Secondary Users in Cognitive Radio Networks	IEEE 23th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU 2015)	604- 607 16-19 May 2015 Malatya, Turkey
Muhammed Enes Bayrakdar, S. Atmaca, A. Karahan	A slotted ALOHA-based Random Access Cognitive Radio Network with Capture Effect in Rayleigh Fading Channels	IEEE 10th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO 2013)	72-75 07-09 Nov. 2013 Ankara, Turkey
Muhammed Enes Bayrakdar, S. Atmaca, A. Karahan	A slotted Aloha based Random Access Cognitive Radio Network and Its Performance Evaluation	IEEE 20th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM 2012)	1-5 11-13 Sept. 2012 Split, Croatia

ULUSLARARASI DİĞER HAKEMLİ DERGİLERDE YAYIMLANAN MAKALELER

Yazarlar	Makale Başlığı	Dergi Adı	Cilt (Sayı), Sayfa	Tarih
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Decision System for Rule based Spectrum Handoff Process of Secondary Users	Mugla Journal of Science and Technology	3 (1), 27- 30	June 2017
Muhammed Enes Bayrakdar,	Performance Analysis of TDMA Medium Access Control Protocol in Cognitive Wireless	Computer Science Journal of Moldova	25 (1), 21-43	February 2017

A. Çalhan

Networks

Muhammed
Enes
Bayrakdar,
A. Çalhan

Performance Analysis of Slotted
Aloha Protocol in Wireless
Cognitive Radio Networks

Balkan Journal of
Electrical &
Computer
Engineering

3 (4), December
248-251 2015

ULUSAL HAKEMLİ DERGİLERDE YAYIMLANAN MAKALELER

Yazarlar	Makale Başlığı	Dergi Adı	Cilt (Sayı), Sayfa	Tarih
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Kablosuz Bilişsel Radyo Ağlarında Spektrum El Değiştirme için Öncelik Kuyukları ve Yapay Zeka Teknikleri	Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi		
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Kablosuz Bilişsel Radyo Ağlarında İkincil Kullanıcılar için Ortam Erişim Kontrol Protokolleri	Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi	23 (2), 149-164	Nisan 2017
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Bilişsel Radyo Ağlarında Spektrum El Değiştirme	Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi	19 (3), 291-302	Aralık 2015
Muhammed Enes Bayrakdar, S. Bayrakdar, İ. Yücedağ, A. Çalhan	Bilişsel Radyo Kullanıcıları için Bulanık Mantık Yardımıyla Kanal Kullanım Olasılığı Hesabında Farklı Bir Yaklaşım	Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi	3 (1), 88- 99	Ocak 2015

ULUSAL BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN BİLDİRİLER

Yazarlar	Bildiri Başlığı	Toplantı Adı	Sayfa	Tarih, Yer
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Kablosuz Bilişsel Radyo Kullanıcıları için İleri Besleme Sinir Ağları Tabanlı Spektrum El Değiştirme İşlemi	Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU 2016)	9-12 ISBN 978-605- 60595-5- 1	29 Eylül-01 Ekim 2016 Düzce, Türkiye
Muhammed	Bilişsel Radyo Ağlarında Kural	Akıllı Sistemlerde	5-8	29 Eylül-01

Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Tabanlı Spektrum El Değişirme Karar Mekanizması	Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU 2016)	ISBN 978-605- 60595-5- 1	Ekim 2016 Düzce, Türkiye
Muhammed Enes Bayrakdar, A. Çalhan	Bilişsel Radyo Ağlarında Slotted Aloha Tekniğinin Gecikme Analizi	Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS 2015)	18 ISBN 978-605- 60595-1- 3	10-12 Eylül 2015 Düzce, Türkiye

ÖDÜL VE BURS BİLGİLERİ

Veriliş Nedeni	Destekleyen Kurum	Durum
Yurt İçi Doktora Eğitimi	TÜBİTAK 2228-B Doktora Burs Programı	Devam Ediyor
Yurt İçi Yüksek Lisans Eğitimi	TÜBİTAK 2228-A Yüksek Lisans Burs Programı	Bitti

YABANCI DİL BİLGİLERİ

Yabancı Dil	Sınav Türü ve Yılı (ÜDS/KPDS/YDS)	Dil Puanı
İngilizce	YDS 2013	82,5
İspanyolca	KPDS 2010	73
İngilizce	ÜDS 2008	80
İngilizce	KPDS 2008	79