

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TASARSIZ BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN ETKİN BİR HİBRİT
ÇOK-YOLLU ROTALAMA YÖNTEMİNİN TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Bil. Yük. Müh. Erkan GÜLER

**HAZİRAN 2018
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TASARSIZ BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN ETKİN BİR HİBRİT
ÇOK-YOLLU ROTALAMA YÖNTEMİNİN TASARIMI**

Bil. Yük. Müh. Erkan GÜLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
DOKTOR (BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ)
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 / 05 / 2018

Tezin Savunma Tarihi : 26 / 06 / 2018

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul ÇAVDAR

Trabzon 2018

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında
Erkan GÜLER tarafından hazırlanan**

**TASARSIZ BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN ETKİN BİR HİBRİT
ÇOK-YOLLU ROTALAMA YÖNTEMİNİN TASARIMI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 29 /05/2018 gün ve 1755 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

Üye : Prof. Dr. Ali GANGAL

Üye : Doç. Dr. Burhan ERGEN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul ÇAVDAR

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin PEHLİVAN

R. Bayındır
.....
Ali Gangal
.....
B. Ergen
.....
Tuğrul Çavdar
.....
Hüseyin Pehlivan
.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bilişsel Radyo, son yıllarda kablosuz iletişim teknolojilerinde gözlemlenen çeşitlenme ile beraber sınırlı bir kaynak olan spektrumun daha verimli kullanılması adına oldukça önem kazanmıştır. Özellikle Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları alanında çalışan araştırmacıların ilgi odağı durumundaki rotalama yöntemleri, kaynak ve hedef cihazlar arasında bağlantı kurulumunu gerçekleştirmek için Bilişsel Radyoya özgü farklı metriklerin tanımlanmasını içermektedir. Bu tez çalışmasında, rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve rota çeşitliliği hususlarını göz önünde bulundurmanın yanı sıra birden fazla veri akışını birden fazla rotaya atayan; paket gönderim oranı, uçtan-uca gecikme ve veri iletim miktarı gibi performans ölçütleri bağlamında önemli kazanımlar sağlayan etkin bir rotalama algoritması tasarlanmıştır.

Tez konusu seçiminde belirleyici rol alan, çalışmalarında danışmanlığımı üstlenen, farklı ve akılcı katkılarıyla çalışmama yön veren, her daim sunduğu destekleriyle yanımda olan çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul ÇAVDAR'a teşekkürü bir borç bilirim. Çalışma sürecinde değerli görüşlerini ve düşüncelerini beyan etmekten sakınmayan Sayın Prof. Dr. Ali GANGAL ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Pehlivan'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Birçok çalışma ve yayına beraber imza attığımız Öğr. Gör. Zhaleh Sadreddini'ye sunduğu fikirler dolayısıyla çok teşekkür ederim. Tez süreci sırasında 2214 Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a minnettar olduğumu bildirmek isterim.

Öğrenim hayatımda bu noktaya gelmeme vesile olan, aramızda olmasa da manevi desteğini sürekli olarak hissettiğim çok değerli babam Osman GÜLER'e, çalışmamın en önemli destekçilerinden çok sevgili annem Gülhanım GÜLER'e şükranlarımı sunarım. Uzun soluklu tez süreci günlerinde her zaman itici kuvvet olarak gördüğüm yaşamıma anlam katan, bana tahammül sınırlarının ötesinde katlanan çok sevdiğim biricik eşim Nihal'e, ilk göz ağrım güzel kızım Eylül'e, evimizin neşesi canım oğlum Boran'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Erkan GÜLER

Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları için Etkin Bir Hibrit ok-Yollu Rotalama Yönteminin Tasarımı’’ başlıklı çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul ÇAVDAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/06/2018

Erkan GÜLER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Problem İfadesi, Tezin Amacı ve Sunulan Katkılar	3
1.3. Bilişsel Radyo.....	6
1.3.1. Bilişsel Kabiliyet, Yeniden Ayarlanabilirlik ve Bilişsel Çevrim	8
1.3.2. Katman Etkileşimli Tasarım ve Bilişsel Radyo İşlevleri	10
1.4. Bilişsel Radyo Ağları	12
1.4.1. Ağ Bileşenleri.....	13
1.4.1.1. Birincil Ağ.....	14
1.4.1.2. İkincil Ağ.....	15
1.4.2. Ağ Mimarisi	16
1.4.2.1. Altyapılı Ağ.....	17
1.4.2.2. Tasarsız Ağ.....	18
1.4.2.3. Örgüsel Ağ	20
1.4.3. Bilişsel Ağ Kullanım Alanları ve Yeni Yönelimler	21
1.5. İletişim Ağlarında Veri Gönderimi, Yönlendirme ve Rotalama	23
1.5.1. Klasik Kablosuz Tasarsız Ağlar ve Rotalama.....	25
1.5.2. Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları ve Rotalama	26
1.5.2.1. Tek-Yollu Rotalama Algoritmaları	29
1.5.2.2. Çok-Yollu Rotalama Algoritmaları.....	32

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	38
2.1.	Sistem Modeli.....	39
2.2.	Önerilen Hibrit Çok-Yollu Rotalama Algoritması.....	43
2.2.1.	Atomik Metrikler.....	44
2.2.1.1.	Rota Kararlılığı.....	44
2.2.1.2.	Tıkanıklık Farkındalığı.....	46
2.2.1.3.	Rota Çeşitliliği.....	48
2.2.2.	Atomik Metriklerden Hibrit Fayda Fonksiyonunun Türetimi.....	50
2.2.3.	Çoklu-Yol Mekanizması	54
2.2.4.	Geliştirilen Hibrit Çok-Yollu Rotalama Algoritması için İyileştirme.....	57
2.2.5.	Rota Bakımı.....	59
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	60
3.1.	Simülasyon Ortamı.....	61
3.2.	Çoklu Akış Analizi.....	63
3.3.	Çoklu Yol Analizi	66
3.4.	Performans Analizi.....	70
3.5.	Karmaşıklık Analizi	81
4.	SONUÇLAR	83
5.	ÖNERİLER	86
6.	KAYNAKLAR.....	88
7.	EKLER	101
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

TASARSIZ BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN ETKİN BİR HİBRİT ÇOK-YOLLU
ROTALAMA YÖNTEMİNİN TASARIMI

Erkan GÜLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul ÇAVDAR
2018, 100 Sayfa, 5 Sayfa Ek

Sınırlı bir kaynak olan spektrumun lisanslı (birincil) kullanıcılar tarafından verimsiz kullanımı ve gelişen yeni kablosuz iletişim teknolojileri için yetersiz kalmaya başlaması, değinilen sorunlara çözüm sunan Bilişsel Radyonun önünü açmıştır. Bu teknoloji sayesinde, birincil kullanıcılara atanan spektrum bantlarının kullanılmadığı zamanlarda lisanssız (ikincil) kullanıcılar, oluşan spektrum boşluklarını fırsatçı bir şekilde değerlendirebilmektedir. Alanda karşılaşılan başlıca ve zor meseleler arasında Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında rotalama problemi bulunmaktadır. Yeni rotaların tespitinde sadece birincil kullanıcıların aktivitelerini göz önünde bulundurmak yeterli değildir. İkincil ağda zamanla oluşabilecek tıkanıklıklar ve ikincil kullanıcılar arasında başlatılan birden fazla veri akışları / oturumlar da ele alınmak durumundadır. Bu çalışmada, en uygun rotanın seçimine yönelik rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve rota çeşitliliğine dayalı bir hibrit fayda fonksiyonu altında birleştirilen atomik metrikler tanımlanmıştır. Geliştirilen çoklu-yol mekanizması ile kaynak ve hedef cihazlar arasında bulunan olası tüm yollardan gereksiz olanları elenmekte ve rotalama sürecinden kaynaklanabilecek veri trafiği yükü azaltılmaktadır. Yürütülen çok kapsamlı simülasyonlar, ikincil kullanıcıların gezgin olduğu durumlarda dahi önerilen yöntemin verimliliğine işaret etmektedir. Ayrıca, paket gönderim oranı, uçtan-uca gecikme ve veri iletim miktarı gibi ölçütler açısından ve literatürdeki diğer rotalama yöntemleriyle yapılan karşılaştırmalar neticesinde tasarlanan rotalama algoritmasının daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ağ topolojisinde yer alan birincil kullanıcıların aktivite değerlerinin ve sayısının artışıyla paket gönderim oranı ve uçtan-uca gecikmede gözlemlenen dalgalanmalar, rotalama süreci için geliştirilen yöntemin kullanımı ile dengelenebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilişsel Radyo, Tasarsız Ağlar, Hibrit Rotalama, Rota Kararlılığı, Tıkanıklık Farkındalığı, Rota Çeşitliliği, Çoklu-Yol Mekanizması

PhD. Thesis

SUMMARY

DESIGN OF A NOVEL HYBRID MULTI-PATH ROUTING METHOD FOR COGNITIVE
RADIO AD HOC NETWORKS

Erkan GÜLER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Tuğrul ÇAVDAR
2018, 100 Pages, 5 Pages Appendix

Spectrum is a limited resource, which is inefficiently used by licensed (primary) users and becomes inadequate for the usage of newly emerged wireless communication technologies. Cognitive radio has the ability to solve the mentioned problems. With the help of this technology, the spectrum bands assigned to the primary users can be opportunistically accessed by the unlicensed (secondary) users when those bands are not in use. Routing problem in cognitive radio ad hoc networks is one of the major challenges in the field. While searching for new routes, it is insufficient just only to take the activities of the primary users into account. Congestions that could occur over time in the secondary network and multiple data flows / sessions initiated by the secondary users have to be also considered. In this work, with the aim of capturing the best route, atomic metrics are defined, which are combined to form a hybrid utility function based on route stability, congestion awareness and route diversity. The developed multi-path mechanism eliminates the redundant paths among all possible ones between the source device and the destination device and thus minimizes the data traffic load that could be caused by the routing process. Comprehensive simulations point out that the proposed method is efficient even when there are mobile secondary users in the network. Also, it is found that the designed routing algorithm performs better than the other routing schemes in the literature with respect to the performance measures such as packet delivery ratio, end-to-end delay and throughput. The fluctuations observed in packet delivery ratio and end-to-end delay with the increase in the number and the activity values of the primary users in the network topology can be compensated by the use of the method developed for the routing process.

Key Words: Cognitive Radio, Ad Hoc Networks, Hybrid Routing, Route Stability, Congestion Awareness, Route Diversity, Multi-Path Mechanism

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Tez içeriğinin genel akış şeması	6
Şekil 2.	Dinamik spektrum erişimi ve spektrum boşlukları.....	7
Şekil 3.	Bilişsellik çevrimi [26]	8
Şekil 4.	OSI modeli: yatay ve dikey bağlantılar	9
Şekil 5.	Bilişsel radyonun katman etkileşimli tasarımı ve işlevleri [4]	11
Şekil 6.	Bilişsel Radyo Ağı [12]	13
Şekil 7.	Altyapılı Bilişsel Radyo Ağı.....	17
Şekil 8.	Tasarsız Bilişsel Radyo Ağı.....	19
Şekil 9.	Örgüsel Bilişsel Radyo Ağı	20
Şekil 10.	Sistem modeli	41
Şekil 11.	Standart bir ikincil kullanıcı üzerindeki temel rotalama işlevleri.....	43
Şekil 12.	Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında Rota Kararlılığı	45
Şekil 13.	Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında Tıkanıklık Farkındalığı	48
Şekil 14.	Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında Rota Çeşitliliği	50
Şekil 15.	Metrikler ve hibrit fayda fonksiyonu ilişkisi	52
Şekil 16.	Geliştirilen çoklu yol mekanizması için örnek bir durum	57
Şekil 17.	Kaynak ve hedef düğümler arasında başlatılan veri akışlarının birincil kullanıcı aktivitesine bağlı olarak (a) tek bir yol üzerinden (b) birden fazla yol üzerinden iletimi	64
Şekil 18.	Artış gösteren BK_2 değerleri bağlamında Veri Akışı 1 ve Veri Akışı 2'nin izlediği yollara ait hibrit fayda fonksiyonu değerleri	66
Şekil 19.	Hibrit çok-yollu rotalama algoritması (a) ve AODV tarzı rotalama algoritmalarının (b) sekme sayısı cinsinden uzaklığa göre tespit ettiği aday yolların ortalama sayısı	68
Şekil 20.	Hibrit çok-yollu rotalama algoritması (a) ve AODV tarzı rotalama algoritmalarının (b) topolojide yer alan ikincil kullanıcı sayısına göre tespit ettiği aday yolların ortalama sayısı	69
Şekil 21.	Farklı beş veri akışı için SPR tarafından kullanılmakta olan rota	72
Şekil 22.	Farklı beş veri akışı için Gymkhana tarafından kullanılmakta olan rota.....	72

Şekil 23.	Farklı beş veri akışı için ROSA tarafından kullanılmakta olan rotalar	73
Şekil 24.	Farklı beş veri akışı için HyMPRo tarafından kullanılmakta olan rotalar.....	73
Şekil 25.	Değişken veri akışı sayısına göre HyMPRo, ROSA, Gymkhana ve SPR'nin sergilediği performans değerleri	75
Şekil 26.	Değişken ortalama düğüm hızına göre HyMPRo, ROSA, Gymkhana ve SPR'nin sergilediği performans değerleri.....	77
Şekil 27.	Birincil kullanıcı (a) aktivite değeri ve (b) sayısına göre paket gönderim oranı.....	79
Şekil 28.	Hedef düğüme (a) her 20 saniye aralığında ve (b) simülasyonun başlangıcından ölçümlemenin yapıldığı t anına kadar ulaşan veri paketlerinin ortalama uçtan-uca paket gecikmesi.....	80



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Aday Rota R_1 üzerinden IK_8 'e ulaşan RREQ mesajı	46
Tablo 2.	Aday Rota R_2 üzerinden IK_8 'e ulaşan RREQ mesajı	46
Tablo 3.	Metrikler arasındaki öncelik ilişkisine dair örnek bir durum	53
Tablo 4.	Simülasyon parametreleri	62
Tablo 5.	Farklı sayılarda ikincil kullanıcı içeren yedi ağ topolojisi.....	67
Tablo 6.	Karşılaştırılan algoritmaların karmaşıklık analizi.....	82
Ek Tablo 1.	$m_3 = 0.1$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	101
Ek Tablo 2.	$m_3 = 0.2$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	101
Ek Tablo 3.	$m_3 = 0.3$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	102
Ek Tablo 4.	$m_3 = 0.4$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	102
Ek Tablo 5.	$m_3 = 0.5$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	103
Ek Tablo 6.	$m_3 = 0.6$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	103
Ek Tablo 7.	$m_3 = 0.7$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	104
Ek Tablo 8.	$m_3 = 0.8$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	104
Ek Tablo 9.	$m_3 = 0.9$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	105
Ek Tablo 10.	$m_3 = 1.0$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri	105

SEMBOLLER DİZİNİ

FCC	Federal İletişim Kurumu (Federal Communications Commission)
CR	Bilişsel Radyo (Cognitive Radio)
DSA	Dinamik Spektrum Erişim (Dynamic Spectrum Access)
TVWS	TV Beyaz Boşluğu (TV White Space)
CRAHN	Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları (Cognitive Radio Ad Hoc Networks)
RREQ	Rota İstek Mesajı (Route Request Message)
TTL	Yaşam Süresi (Time to Live)
AP	Erişim Noktası (Access Point)
SDR	Yazılım Tabanlı Radyo (Software Defined Radio)
OSI	Açık Sistemler Arabağlaşımı (Open Systems Interconnection)
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International Organization for Standardization)
BTS	Baz Alıcı-Verici İstasyonu (Base Transceiver Station)
ITU	International Telecommunication Union (International Telecommunication Union)
ISM	Sınai Bilimsel Tıbbi Cihaz Bantları (Industrial Scientific Medical Bands)
OFCOM	Birleşik Krallık Komünikasyon Ofisi (Office of Communications)
CEPT	Avrupa Posta ve Telekomünikasyon İdareleri Birliği (European Conference of Postal and Telecommunications)
MIC	Japonya İçişleri ve Haberleşme Bakanlığı (Japanese Ministry of Internal Affairs and Communications)
IDA	Singapur Bilişim ve Gelişim Otoritesi (Info-Communications Development Authority)
SUN	Akıllı Yardımcı Hizmet Ağları (Smart Utility Networks)
MBAN	Tıbbi Beden Alan Ağları (Medical Body Area Networks)
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
WSN	Kablosuz Duyarga Ağlar (Wireless Sensor Networks)
IETF	İnternet Mühendisliği Görev Grubu (Internet Engineering Task Force)
SOP	Spektrum Fırsatı (Spectrum Opportunity)
AODV	Ad Hoc On-Demand Distance Vector

BK	Birincil Kullanıcı
İK	İkincil Kullanıcı
CCC	Ortak Kontrol Kanalı (Common Control Channel)
HyMPRo	Hibrit Çok-Yollu Rotalama Algoritması (Hybrid Multi-Path Routing Algorithm)
ACK	Alındı Bildirimi Mesajı (Acknowledgement Message)
RERR	Rotalama Hatası Mesajı (Route Error Message)
MAC	Ortam Erişim Kontrolü (Media Access Control)
PHY	Fiziksel Katman (Physical Layer)
CBR	Sabit Bit Oranı (Constant Bit Rate)
SPR	En Kısa Yol Rotalama (Shortest Path Routing)
DTN	Gecikme Toleranslı Ağlar (Delay Tolerant Networks)
ζ_{BK}	Birincil ağ
D_{BK}	Birincil kullanıcılar
K_{BK}	Birincil ağ bağlantıları
$\zeta_{İK}$	İkincil kullanıcı ağı
$D_{İK}$	İkincil kullanıcılar
$K_{İK}$	İkincil ağ bağlantıları
M	Birincil kullanıcı sayısı
N	İkincil kullanıcı sayısı
C	Kanal sayısı
BK_n	Birincil kullanıcı n
$İK_m$	İkincil kullanıcı m
$d_{i,j}^{BK}$	BK_i ve BK_j düğümleri arasındaki Öklit mesafesi
$t_{i,j}$	BK_i ve BK_j düğümleri arasında kurulan bağlantı
r_i^{BK}	BK_i 'nin kapsama alanı
r_j^{BK}	BK_j 'nin kapsama alanı
$d_{q,r}^{İK}$	$İK_q$ ve $İK_r$ düğümleri arasındaki Öklit mesafesi
$t_{q,r}$	$İK_q$ ve $İK_r$ düğümleri arasında kurulan bağlantı
$r_q^{İK}$	$İK_q$ 'nin kapsama alanı
$r_r^{İK}$	$İK_r$ 'nin kapsama alanı
$Akt(BK_i)$	Birincil kullanıcı BK_i 'nin aktivite değeri

G_{IK_q}	IK_q 'nun girişim alanındaki birincil kullanıcıların listesi
$S_{BK}^{açık}(t)$	Birincil kullanıcının t anında aktiflik durumu
$S_{BK}^{kapalı}(t)$	Birincil kullanıcının t anında pasiflik durumu
$\mu_{BK}^{açık}$	Birincil kullanıcının ortalama aktif kalma süresi
$\mu_{BK}^{kapalı}$	Birincil kullanıcının ortalama pasif kalma süresi
$p^{açık}(t)$	Birincil kullanıcının t anında aktif olma olasılığı
$p^{kapalı}(t)$	Birincil kullanıcının t anında pasif olma olasılığı
$\mu(t_{i,i+1})$	IK_i ve IK_{i+1} düğümleri arasındaki bağlantıya etkiyen birincil kullanıcıların ortalama aktivite değeri
$buf(IK_i)$	IK_i 'nin tampon belleğinin doluluk miktarı
$BUFLen(IK_i)$	IK_i 'nin tampon bellek kapasitesi
$\beta(IK_i)$	IK_i 'nin tampon bellek doluluk oranı
$\delta(IK_i)$	IK_i 'nin gönderdiği toplam paket sayısı
$\tau(IK_{i,1})$	IK_i 'nin gönderdiği toplam paket sayısının IK_1 'in gönderdiği toplam paket sayısına oranı
$m_{kararlılık}(R)$	R rotası için elde edilen rota kararlılığı metrik değeri
$m_{tıkanıklık}(R)$	R rotası için elde edilen tıkanıklık farkındalığı metrik değeri
$m_{çeşitlilik}(R)$	R rotası için elde edilen rota çeşitliliği metrik değeri
$f_i(R)$	IK_i düğümü üzerinde R rotası için elde edilen hibrit fayda fonksiyonu değeri
h	R rotası üzerindeki sekme sayısı
$RREQ_{IK_i}$	IK_i tarafından RREQ mesajına güncellenerek iliştilen metrik bilgileri
d	Ağ topolojisi çapı
α	d üzerine uygulanan genişletme katsayısı
$TTL_{uyarlanır}$	Çap tabanlı uyarlanabilir TTL değeri

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Kablosuz iletişim teknolojisinin tüm dünyada çok hızlı bir şekilde gelişmesi neticesinde daha çok servis / hizmet çeşitliğinin ortaya çıktığı görülmektedir. Bu hizmetlerin kullanılabilir olması için belirtilen servislere belirli bir radyo spektrumunun (radio spectrum) atanması gerekmektedir.

Lisanslı kullanıcılara ya da geniş coğrafik alanlarda uzun süreli kullanıma sunulan lisanslı servislere sağlanan spektrum ataması, ülkelerde yer alan bazı kamu kuruluşları (örnek: ülkemizdeki BTK – Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu) tarafından sabit spektrum atama politikası ile belirlenmektedir. Her yeni hizmet ve özellikle son yıllarda daha da çeşitlenen mobil servisler için atanan spektrum, zamanla radyo spektrumu kaynağı yetersizliğini de beraberinde getirmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde “Federal İletişim Kurulu (Federal Communications Commission – FCC)” tarafından yürütülen bir çalışma [1], atanan spektrum kullanım verimliliğinin %15 ile %85 arasında olduğunu göstermiştir. Bu durum, mevcut radyo spektrumunun daha verimli kullanılabilir ve faydalanılabilir olması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Nitekim spektrum kullanım verimliliğini etkin bir şekilde artırmaya yönelik önerilen “Bilişsel Radyo (Cognitive Radio – CR)” [2] kablosuz iletişim alanında yoğun bir ilgi görmüştür.

Bilişsel Radyo, içinde bulunduğu ortamı algılar ve lisanslı (birincil) kullanıcılara / servislere atanmış spektrum bantlarının kullanılmadığı durumlarda oluşan spektrum boşluklarını (spectrum holes) [3] tespit ederek bunların lisanssız (ikincil) kullanıcılar tarafından etkin ve verimli bir şekilde kullanımını sağlar. Dolayısıyla, Bilişsel Radyo,

- spektrumun hangi bölümlerinin kullanımda olup olmadığını belirleme,
- mevcut en iyi kanalı kullanma,
- ikincil kullanıcılar arasında bulunan en iyi kanala erişimi koordine etme,
- birincil kullanıcı tespit edildikten sonra kullanılan kanalı geri verme ve yeni bir spektrum boşluğuna geçme

işlevlerini yerine getiren ve mobil kullanıcılara yüksek bantgenişliği sağlayacak Gelecek Nesil Ağların (Next Generation Networks) içinde önemli bir yer tutan kablosuz iletişim teknolojisi olup Dinamik Spektrum Erişimi (Dynamic Spectrum Access – DSA) olarak da adlandırılmaktadır [4].

Zaman içerisinde analog yayınlarn yerini dijital yayınlara bırakması ile yayıncı kuruluşlara tahsis edilen frekanslar boş kalmaya başlamıştır. Bu boşluklara TV beyaz boşlukları (TV white spaces – TVWS) denilmektedir. UHF ve VHF bantlarının yer aldığı 54-862 MHz arasında kalan frekans aralığı, FCC'nin 23 Eylül 2010 tarihinde aldığı karar [5] neticesinde lisanslı kullanıcılara girişim yapmama koşulu ile lisanssız kullanıcılar tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Bu tarihten önce, belirtilen frekans aralıklarını kullanacak Bilişsel Radyo Ağları için Ocak 2009'da "IEEE 802.22: İlk Bilişsel Radyo Kablosuz Bölgesel Alan Ağ Standardı" [6] yayınlanmıştır. Ayrıca, yine Bilişsel Radyonun işlevselliğini destekleyen 802.11h, 802.11y ve 802.16h standartları [7-9] ortaya konulmuştur.

5G ve sonrasında kullanılabilcek mobil iletişim teknikleri ile ilintili olarak yukarıda özellikleri ve standartları hakkında değinilen Bilişsel Radyonun spektral verimliliği artırmaya yönelik gelecek için vaat edici niteliklere sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, konu ile ilgili yürütülecek her çalışma milli spektrumumuzun daha verimli kullanılmasını sağlayacaktır.

Türkiye'nin bilgi ve iletişim teknolojileri alanında belirlediği 2035 hedefleri arasında genişbant erişim büyüklüklerinde Avrupa'nın en iyi ilk 5 ülkesinin içine girilmesi, spektrumu verimli kullanacak yeni nesil platform ve cihaz üretimlerinin ülkemizde gerçekleştirilmesi bulunmaktadır [10]. Bu bağlamda, Bilişsel Radyo Ağları ile ilişkilendirilen ticari ürünlerin henüz piyasada yer almaya başlamadığını da belirtmek gerekir.

Yukarıda değinilen Bilişsel Radyo işlevleri, alanda çalışan bilim adamları tarafından etraflıca incelenmektedir [11-15]. Bunun yanında, geliştirilen yöntemler çoğunlukla baz istasyonu gibi merkezi bir birime sahip Altyapılı Bilişsel Radyo Ağları için tasarlanmıştır. Son zamanlarda, merkezi bir bileşene sahip olmayan Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları (Cognitive Radio Ad Hoc Networks – CRAHN) da önem kazanmış ve bu tip ağların Altyapılı Bilişsel Radyo Ağlarından farklı bir şekilde incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır [16].

Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında ilgilenilen bir diğer konu ise ağdaki herhangi iki kullanıcı (düğüm) arasında haberleşmenin yapılabilmesi için gerekli olan ve rotalama (routing) olarak adlandırılan yol tespitidir. Özellikle, birincil kullanıcıların ağdaki dinamik davranışları ve ortamdaki ikincil kullanıcıların gezgin olması gibi hususlar rotalama sürecinde olumsuz etkilere sahiptir. Son yıllarda, bu etkilerin azaltılması / ortadan kaldırılması için Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında kullanılacak rotalama teknikleriyle ilgili çalışmalar hız kazanmıştır [17].

1.2. Problem İfadesi, Tezin Amacı ve Sunulan Katkılar

İkincil kullanıcıların veri iletişimini gerçekleştirecekleri yolların tespitinde dikkate alınması gereken birçok etmen bulunmaktadır. Bunların başında, ağ içindeki birincil kullanıcıların spektrum kullanımında sergiledikleri mekânsal ve zamansal düzensiz dalgalanmalar yer almaktadır. Bilişsel Radyonun işleyişi açısından, ikincil kullanıcılar lisanslı kullanıcıların aktivitelerini düzenli olarak gözlemlemek ve herhangi bir birincil kullanıcı aktivitesi söz konusu olduğunda yürütmekte olduğu veri iletişimi kesmek ve mümkünse başka bir boş spektrum bandına geçip veri iletimini bu banttan devam ettirmekle yükümlüdür. Bu durumun sıkça yaşanması, ikincil ağdaki rota kararlılığını ve dolayısıyla performans değerlerini negatif yönde etkileyecektir.

İkinci olarak, verilerin iletiildiği rotalar üzerinde bulunan ikincil kullanıcılara ait tampon bellek doluluk oranları zaman içerisinde Bilişsel Ağ dinamiklerine bağlı olarak artmaktadır. Özellikle, birincil kullanıcıların spektrum kullanım sıklıkları, ikincil kullanıcılar arasında başlatılan birden fazla oturum ve bu oturumlara ait veri miktarlarının yüksek olması rota üzerindeki düğümlerin tampon belleklerinin yetersiz kalmasına neden olabilmekte ve hatta iletilen verilerin bir kısmının düşürülmesine / kaybolmasına sebebiyet vermektedir.

Rota tespitinde sağlam ve güvenilir yolların bulunması için gözetilecek bir diğer etmen ise ikincil düğümlerin açacakları oturumların aynı ya da farklı yollar üzerinden gerçekleştirilip gerçekleştirilmeyecekleri hususudur. Yine ağ dinamikleri bağlamında, lisanslı kullanıcılar ağa sıkça girip çıkıyorlarsa ve lisanslı kullanıcılar arasında yoğun bir veri trafiği gerçekleşiyorsa, bu durumda yeni veri transferleri için farklı yolların bulunması ve bu şekilde rota çeşitliliğinin artırılması gerekmektedir. Aksi halde, hedef düğüm ve kaynak düğüm arasındaki farklı oturumlara ait verilerin sürekli olarak aynı rotadan

iletilmesi, ikincil ağda tıkanıklıklara, verilerin kaybolmasına, gecikmesine ve iletilen veri miktarının düşük olmasına neden olacaktır.

Rotalamanın ilk aşaması olan rota keşfi (route discovery) sürecinde, kaynak düğüm yol istek mesajı (Route Request Message - RREQ) üretir ve bu mesajı tüm ağa iletir. RREQ mesajının mümkün olan her yoldan iletilerek kaynak düğümüne ulaştırılması, ağ içinde bu kontrol mesajından kaynaklı veri trafiği sıklığına neden olabilmektedir. Ayrıca, ara düğümlerde hedef düğümüne doğru izlenen mevcut yol için herhangi bir değerlendirme yapılmaması, bu sürecin en iyi rotanın tespiti için sadece hedef düğüm üzerinde gerçekleştirilmesi, dağıtık hesaplama (distributed computation) yerine merkezi hesaplamanın (centralized computation) tercih edilmesi, hedef düğümün donanımsal kaynaklarını zorlayacaktır.

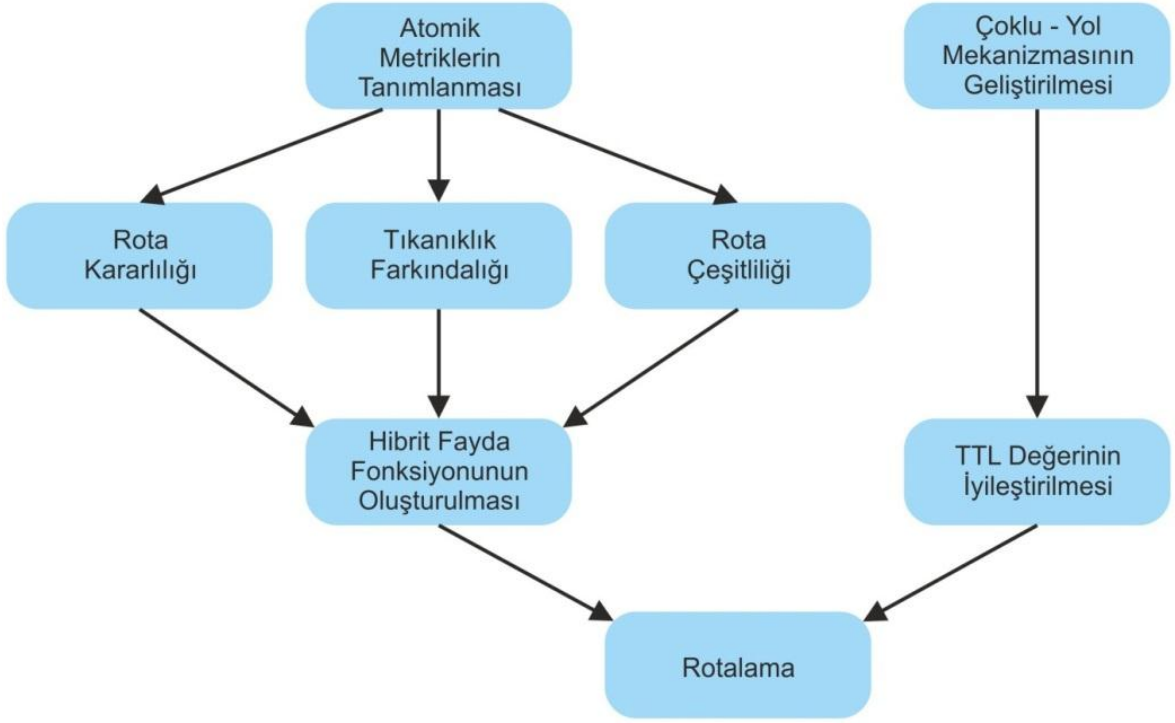
RREQ mesajlarında yer alan yaşam süresi (Time To Live – TTL) bilgisi 8-bitlik bir bilgi olup üretilen RREQ mesajının en fazla kaç düğüm üzerinden geçebileceğini ve sonrasında düşürülmesi gerekliliğini ifade eder. Çünkü bu mesajların hedef düğümü bulma yolunda ağ içinde sonsuz bir çevrime girmesinin önlenmesi gerekmektedir. Ancak, TTL değerinin yüksek olması kaynak düğüm – hedef düğüm arasında bulunabilecek alternatif yolların sayısını sert bir şekilde artıracaktır. Hâlbuki bu alternatif yolların birçoğu Bilişsel Radyo Ağlarına özgü niteliklerden dolayı en iyi rota olma özelliğine sahip değildir.

Sözü edilen problemler doğrultusunda sınırlı bir kaynak olan spektrumun verimli kullanımında Bilişsel Radyonun sunduğu avantajlar göz önünde bulundurularak herhangi bir yönlendirici (router) ya da erişim noktasının (access point – AP) ihtiyaç duyulmadığı tasarsız ağlarda yer alan iki kullanıcı arasındaki bağlantının kurulmasında rol alacak etkin bir rotalama yönteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın sunduğu katkılar aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Atomik metriklerin tespit edilmesi: Rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve yol çeşitliliği ile ilişkilendirilecek Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarının sistem parametreleri en iyi rota tespitinde kullanılacak rotalama metriklerine dönüştürülmüştür. Bu noktada, rota kararlılığı birincil kullanıcıların ağ içindeki aktiviteleri üzerine temellendirilirken, tıkanıklık farkındalığı için rota tespitinde kullanılan ara kullanıcıların tampon bellek doluluk oranları baz alınmıştır. Rota çeşitliliği için ise ikincil ağdaki düğümlerin önceki veri iletimlerinde kaç kez iştirak ettiği ile ilgili bilgi kullanılmıştır.

- Hibrit fayda fonksiyonunun tanımlanması: Farklı sistem parametrelerini ele alan atomik metriklerin tek bir fayda fonksiyonu içinde formüle edilmesi ile mümkün olan alternatif yollardan en iyisinin tespiti yapılmıştır. En iyisinden kasıt, seçilen rotanın veri gönderim oranı (packet delivery ratio), uçtan-uca gecikme (end-to-end latency) ve iletilen veri miktarı (throughput) ölçütleri açısından en iyi değerleri sunmasıdır.
- Çoklu-yol mekanizmasının oluşturulması: RREQ mesajının iletimi esnasında tespit edilen mümkün alternatif yolların sayılarının azaltılması için bir yöntem geliştirilmiştir. Yerel düğüm tabanlı bu yöntem sayesinde, en iyi yol tespitinde yapılan hesaplamalar dağıtık olarak hem ara düğümler üzerinde gerçekleştirilmiş, hem de son nihai yol seçimini yapacak olan hedef düğümdeki işlem miktarı azaltılmıştır. Ayrıca, ara düğümlerin alternatif yollardan iyi olmayanları elemesi neticesinde ağ içindeki RREQ kontrol mesajlarının sayısı asgari düzeye indirilmiştir.
- TTL değerleri üzerinde iyileştirme: Kaynak düğümün ürettiği RREQ mesajına ait TTL bilgisinin mevcut topolojinin birbirine en uzak iki düğüm arasında yer alan düğüm sayıları (topoloji çapı) ile ilişkilendirilmeleri sağlanmıştır. Bu sayede, alternatif yollar bulma amacı ile ağda gezinen RREQ mesajlarının üzerinden geçtiği düğüm sayıları sınırlandırılmış, tespit edilen sınır aşıldığında söz konusu olan RREQ mesajları sistemden atılmıştır / ağdan düşürülmüştür. Çünkü Tasarsız Bilişsel Ağlarda hedeflenen en iyi rota uzunluğu, topoloji çapından çok fazla değerlere sahip olmamalıdır. Nitekim topoloji çapından fazla düğüm içeren alternatif yollar, göz önünde bulundurulmuş ölçütler açısından kötü sonuçlar vermektedir.
- Önerilen rotalama tekniği, mevcut diğer çalışmalarla veri gönderim oranı, uçtan-uca gecikme ve iletilen veri miktarı gibi performans ölçütleri bağlamında karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada geliştirilen algoritmanın özellikle ağdaki ikincil kullanıcıların gezgin (mobile) olması ve kaynak-hedef düğüm ikilisi arasında birden fazla oturum (session) açılması / farklı veri akışları (data flow) gerçekleştirilmesi durumlarında karşılaştırma yapılan diğer yöntemlere göre iyi sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

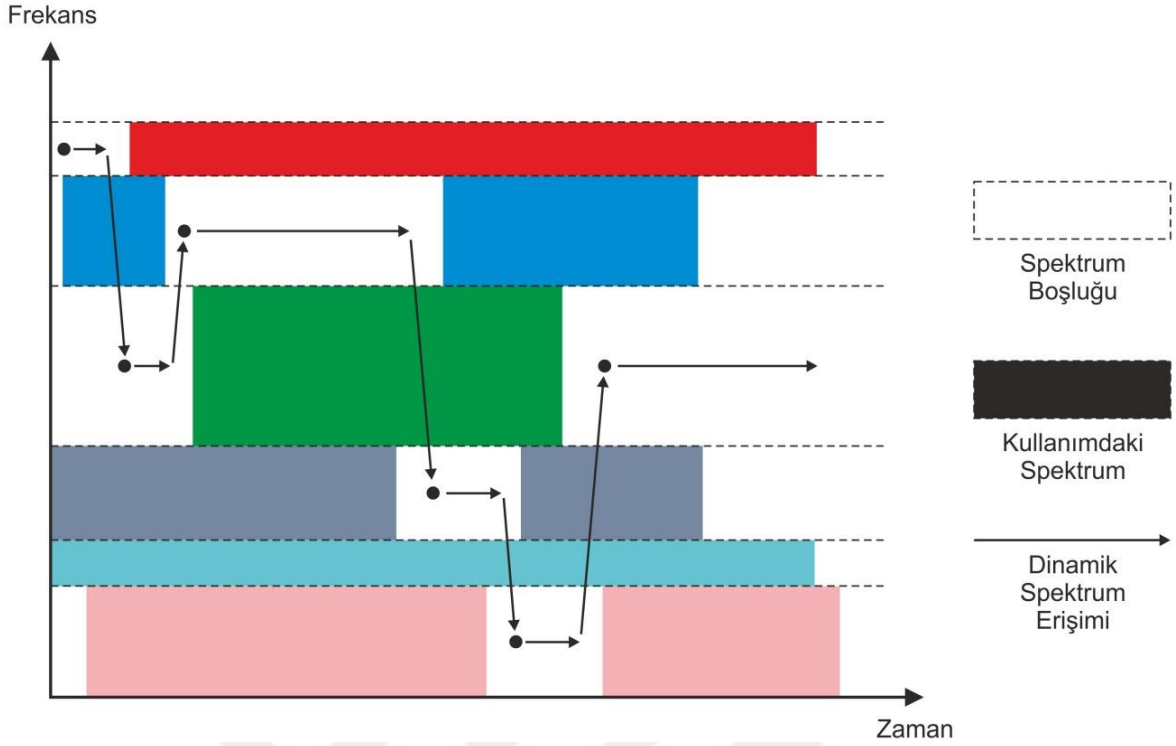


Şekil 1. Tez içeriğinin genel akış şeması

Tezin genel bilgiler bölümünde, Bilişsel Radyo Ağları ve literatürde yer alan Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları için tasarlanmış rotalama algoritmaları ele alınacaktır. Yapılan çalışmalar bölümünde önerilen rotalama tekniği ile ilgili çalışmalara / yöntemlere değinilecektir. Bulgular ve irdelemede ise gerçekleştirilen simülasyonların sonuçları incelenecek ve yorumlanacaktır. Tez içeriğinin genel akış şeması Şekil 1’de verilmiştir.

1.3. Bilişsel Radyo

Bilişsel Radyo’nun biçimsel tanımını vermeden önce bilişsellik (cognition) kavramına değinmek yerinde olacaktır. Bilgisayar bilimleri açısından bilişsellik, giriş uyarımları ve çıkış tepkileri arasında ussal durumların ve süreçlerin aracılık etmesini ifade eder [18]. Algoritmalarla tanımlanabilen ussal durumlar ve süreçler, muhakeme (reasoning), değerlendirme (evaluation), hesaplama (computation), problem çözme (problem solving), karar verme (decision making), yapay öğrenme (machine learning) gibi işlemleri kapsar ve bilimsel araştırmalara uygun bir ortam sunar. Bilişsellik kavramından ve içeriğinden yola çıkarak, Bilişsel Radyo için aşağıdaki gibi bir tanımlama yapılmıştır:



Şekil 2. Dinamik spektrum erişimi ve spektrum boşlukları

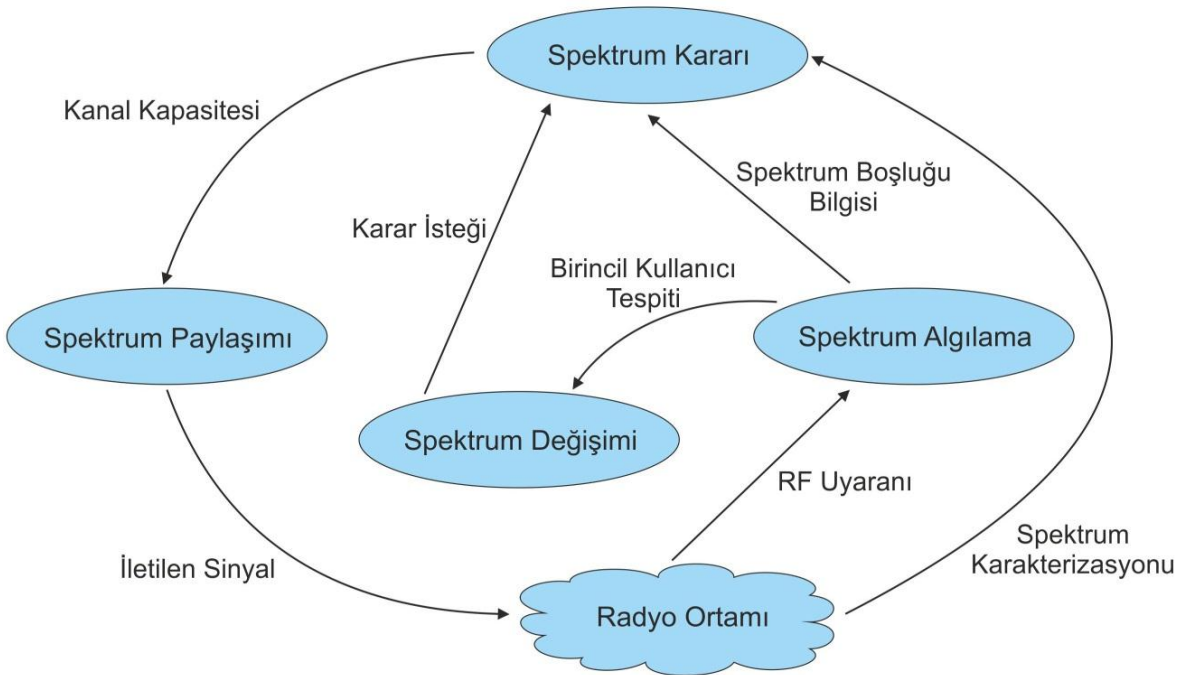
Çevresini otonom olarak gözlemleyen, içerik çıkarsamalarını gerçekleştiren, alternatifleri hesaplayan ve değerlendiren, planlar üreten, çokluortam (multimedia) servislerini yöneten / denetleyen ve yaptığı hatalardan öğrenen hedef odaklı bir çatıdır (goal – driven framework) [19]. Bir diğer tanımlamaya göre ise, içinde çalıştığı ortamla etkileşimlerine bağlı olarak iletim gücü, taşıyıcı frekansı ve modülasyon tekniği gibi çalışma parametrelerini değiştirebilen ve ayarlayabilen akıllı bir kablosuz iletişim sistemidir [4, 20].

Bilişsel Radyo'nun sınırları düzgünce çizilmiş olsa da Yazılım Tanımlı Radyo (Software Defined Radio – SDR) ile sıkça karıştırılmaktadır. Yazılım Tanımlı Radyo, geleneksel olarak donanımda kullanılan karıştırıcılar, filtreler, yükselticiler, modülatörler / demodülatörler gibi bileşenlerin yerine kişisel bilgisayarlar veya gömülü sistemlerdeki yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilen bir radyo iletişim sistemidir [21]. Diğer taraftan, Yazılım Tanımlı Radyo üzerine oturtulmuş Bilişsel Radyoya ise zekâ atfedilmiştir. Bu özellik sayesinde Bilişsel Radyo, Yazılım Tanımlı Radyonun hangi işlem kipini ve parametrelerini kullanabileceğini belirlemesini sağlar [22]. Bilişsel Radyo, bir Yazılım Tanımlı Radyo olmanın dışında ek olarak etrafını sezme, çevresindeki değişiklikleri takip etme ve bulgularına binaen tepki gösterme gibi özelliklere sahiptir [23]. Bu bağlamda,

Bilişsel Radyo kendi kullanıcılarını bilişsel kabiliyet ve yeniden ayarlanabilirlik karakteristikleriyle donatarak konvansiyonel radyo cihazlarından ve Yazılım Tanımlı Radyodan ayrılmaktadır [24].

1.3.1. Bilişsel Kabiliyet, Yeniden Ayarlanabilirlik ve Bilişsel Çevrim

Bilişsel kabiliyet, bulunduğu radyo ortamından ağ ile bilgileri yakalayabilme ya da algılayabilme yeteneğini ifade etmektedir. Bu yetenek sadece bazı frekanslardaki iletim güçlerinin gözlemlenmesi ile gerçekleştirilemez. Aksine radyo ortamındaki zamansal ve mekânsal değişimlerin yakalanması ve lisanslı / lisanssız kullanıcılara girişimin önlenmesi için daha gelişmiş tekniklere ihtiyaç vardır. Dolayısıyla bilişsel kabiliyet sayesinde belirli bir zaman ve belirli bir konumda kullanılmayan spektrum bölümleri / boşlukları (Şekil 2) belirlenebilmekte, mevcut en iyi kanal seçilebilmekte ve uygun çalışma parametreleri belirlenebilmektedir.

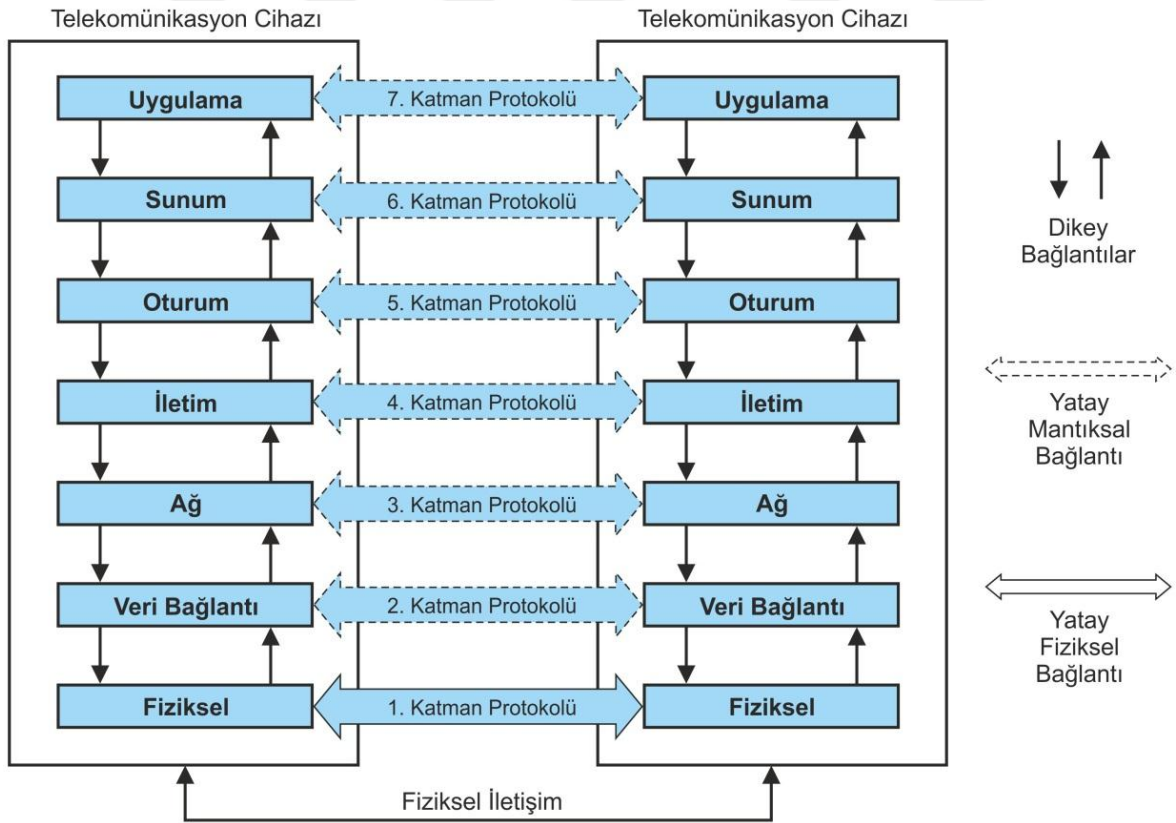


Şekil 3. Bilişsellik çevrimi [26]

Bilişsel Radyo kullanıcıları, bilişsel kabiliyetin kullanımıyla iletilen dalga biçimi, radyo frekans spektrumu, iletişim ağı tipi ve protokolü, coğrafi konum bilgisi, mevcut

yerel kaynaklar ve servisler, kullanıcı ihtiyaçları, güvenlik politikası gibi bilgiler hakkında farkındalığa eriştikten sonra algılanan çevresel değişimlere göre dinamik olarak iletim parametrelerini değiştirebilirler. Bu karakteristik yeniden ayarlanabilirlik olarak nitelendirilmekte ve çalışma kipi, frekans aralığı, modülasyon tipi, çıkış gücü gibi parametrelerin otomatik olarak ayarlanabilmesini sağlamaktadır.

Dinamik radyo ortamına adaptasyonu sağlayabilmek için spektrum algılama, spektrum değişimi, spektrum kararı ve spektrum paylaşımı işlevlerini içeren özgün bir bilişsellik çevrimine (cognition cycle) ihtiyaç vardır (Şekil 3) [4, 25-27]. Spektrum algılama adımında mevcut spektrum bantları ile ilgili bilgiler gözlemlenir ve spektrum boşlukları tespit edilirken, spektrum değişimi birincil kullanıcı tespit edildiğinde mevcut kanaldan boş bir kanala geçişi gerçekleştirir. Spektrum kararı adımında ise Bilişsel Radyo cihazı, spektrum karakteristiklerini ve kullanıcı ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak veri hızını (data rate), iletim kipini ve bantgenişliğini ayarlar; en uygun spektrum bandının seçimine karar verir. Diğer taraftan, spektrum paylaşımı ile ikincil kullanıcıların kanallara erişimi düzenlenir.



Şekil 4. OSI modeli: yatay ve dikey bağlantılar

1.3.2. Katman Etkileşimli Tasarım ve Bilişsel Radyo İşlevleri

Telekomünikasyon sistemlerinde esas alınan iç yapı ve teknolojiye bağımsız olarak iletişim fonksiyonlarını karakterize eden ve standardizasyonu sağlayan OSI (Open Systems Interconnection) modeline [28] benzer katmanlı bir yapı Bilişsel Radyo teknolojisinde de kullanılmaktadır. Fiziksel, veri bağlantı, ağ, iletim, oturum, sunum ve uygulama katmanları gibi toplamda 7 katmana (Şekil 4) sahip ve ISO (Uluslararası Standartlar Teşkilatı – International Organization for Standardization) tarafından geliştirilen OSI modelinin amacı farklılıklar içeren çeşitli iletişim sistemlerinin standart protokollerle birbirleriyle çalışabilirliğini sağlamaktır.

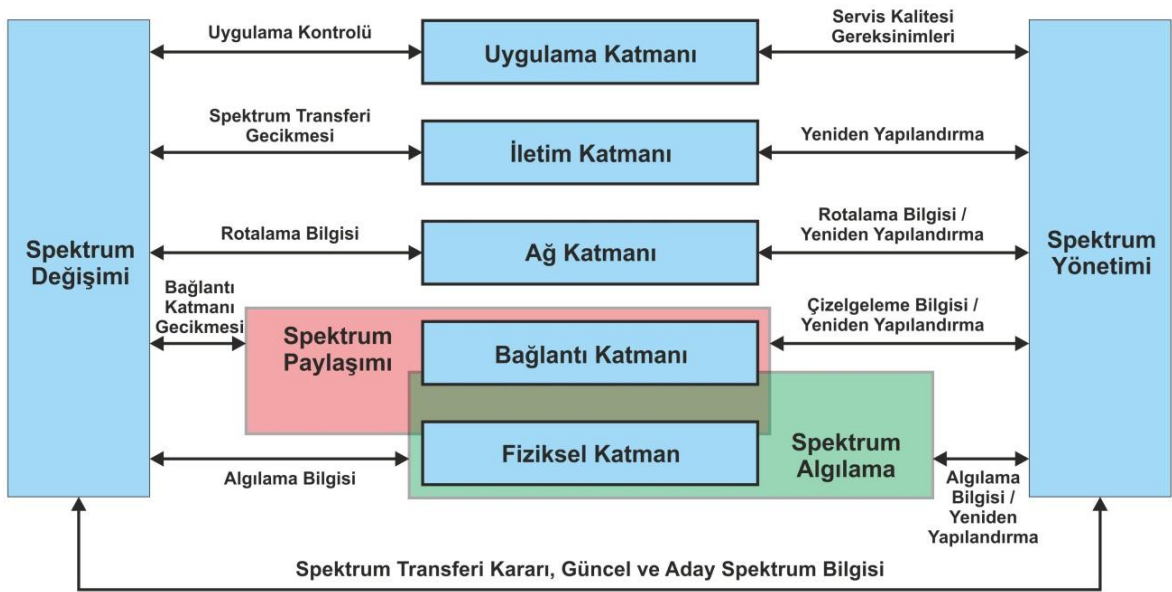
Her bir katman, üstünde yer alan katmana servis sağlarken altındaki katmandan servis alır. Örneğin, ağ içinde hatasız iletişimin sağlanabilmesi için görevlendirilen iletim katmanı, uygulama katmanında çalıştırılan bir uygulamanın gereksinim duyduğu rota bilgilerini hazırlar; oturum ve sunum katmanları aracılığı ile bu bilgileri iletir. İletim katmanı, ayrıca altında yer alan ve veri iletiminin gerçekleştirileceği kaynak ve hedef düğümler arasındaki rotayı tespit eden ağ katmanına başvurur. Katmanlar arası hiyerarşik dikey bağlantıların dışında, iletişim içindeki iki telekomünikasyon cihazının karşılıklı katmanları arasında standart protokollerin çalıştırıldığı yatay bağlantılar da bulunmaktadır.

Bahsedilen OSI modelinden farklı olarak, Bilişsel Radyo mimarisinde tanımlanmış 5 katman bulunmaktadır: fiziksel, veri bağlantı, ağ, iletim ve uygulama katmanları. Bununla birlikte Bilişsel Radyo ortamının zaman içinde değişkenlik arz eden özelliklerine bağlı olarak garantili servis kalitesinin önünde engel teşkil eden OSI modelindeki yatay ve hiyerarşik dikey bağlantıların yanında katmanlar arası ortak eniyilemeyi (optimization) amaçlayan teknikler ve katman etkileşimli tasarım (cross-layer design) kullanılmıştır.

Şekil 5’te verilen katman etkileşimli tasarım kapsamında kullanılan Bilişsel Radyo işlevleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

- Spektrum Algılama (Spectrum Sensing): Ağ ortamındaki aktif (veri transferi gerçekleştiren) lisanslı kullanıcıların saptanması yolu ile Bilişsel Radyonun spektrum boşluklarını tespit etmesini ve içinde bulunduğu ortama adaptasyonunu sağlar.
- Spektrum Paylaşımı (Spectrum Sharing): Aynı ortamı paylaşan Bilişsel Radyo kullanıcıları arasında adil bir spektrum çizelgelemesi oluşturma ve bu kullanıcılar için kanal erişimini koordine etme görevlerini yürütür.

- Spektrum Yönetimi (Spectrum Management): Spektrum algılama işlevi neticesinde elde edilen dinamik spektrum bilgilerine bağlı olarak mevcut tüm spektrum bantları arasında ikincil kullanıcıların servis kalitesi gereksinimlerini karşılayacak en iyi spektrum bandını seçme sürecini yönetir.
- Spektrum Değişimi (Spectrum Mobility): Kullanılan mevcut kanaldaki durumun / kalitenin bozulması ya da ortama lisanslı kullanıcıların girmesi halinde spektrum yönetimi işlevi tarafından belirlenen en iyi kanala geçmek için Bilişsel Radyonun çalışma frekansını değiştirmesinde görev alır.



Şekil 5. Bilişsel radyonun katman etkileşimli tasarımı ve işlevleri [4]

OSI modelinde bulunmayan, fakat Bilişsel Radyo için geliştirilen katman etkileşimli tasarım sayesinde Bilişsel Radyo işlevleri işbirliği içerisinde çalışarak spektrum verimliliği artırabilmektedir. Ayrıca, Bilişsel Radyonun fiziksel, bağlantı, ağ, iletim ve uygulama katmanlarında yer alan işlevsellikler kullanılan spektrumun dinamik doğası dikkate alınarak spektrum değişimi ve spektrum yönetimi işlevleri tarafından müşterek bir şekilde sürdürülür. Netice itibarıyla, mevcut tüm spektrumdaki sınırlılık ve spektrum kullanımına bağlı olarak gözlemlenen verimsizlik problemlerine Bilişsel Radyonun katman etkileşimli tasarımı etkin bir çözüm sunmaktadır.

İşlenmemiş bit akışlarının fiziksel ortam üzerinden gönderilmesi ve alınması (fiziksel katman) ile birbirine bağlı iki düğüm arasında veri çerçevelerinin güvenli bir şekilde

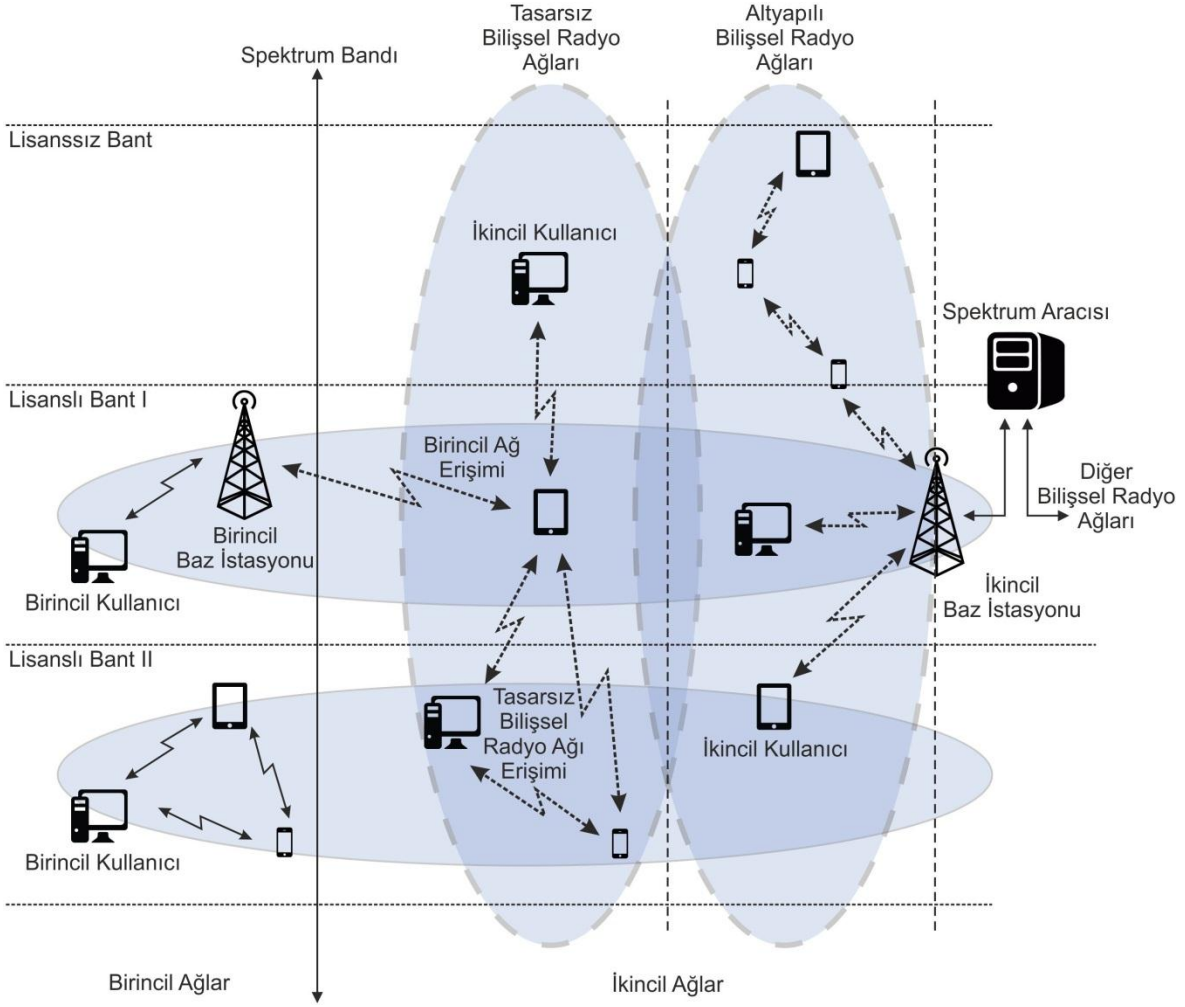
iletiminde (bağlantı katmanı) koordineli olarak çalışan spektrum algılama ve spektrum paylaşımı işlevlerine yönelik çalışmalara literatürde geniş yer ayrılmıştır. Spektrum algılama bağlamında zaman, mekân ve frekanstaki kullanım fırsatçılığını temel alan ve ikincil kullanıcıların aynı spektrum bantlarında yer alan birincil kullanıcılara en az girişimine izin veren teknikler geliştirilmiştir [29-34]. Diğer taraftan, spektrum erişimi için kullanıcılar arasında uygun bir koordinasyonla en iyi algılama süresi (sensing time) ve en iyi iletim süresi (transmission time) miktarlarını, spektrum tahsisi davranışlarını ve spektrum erişim tekniklerini belirleyen yöntemler [35-40] spektrum paylaşımı işlevi altında incelenmiştir.

Servis kalitesi gereksinimleri, rotalama, çizelgeleme ve algılama bilgilerini değerlendiren; bağlantılı olarak yeniden yapılandırma işlemlerini gerçekleştiren spektrum yönetimi işlevi iki temel unsur olan spektrum analizi ve spektrum karar verme mekanizmalarını içermektedir. Bu iki mekanizma üzerinde yapılan çalışmalar [41-45] girişim seviyesini, yol kaybını (path loss), bağlantı katmanı gecikmesini, kanal hata oranını (channel error rate) ve birincil kullanıcıların kanal tutma zamanlarını göz önünde bulundurarak spektrum analizini gerçekleştirmekte ve en iyi kanal seçimine karar vermektedir.

Spektrum değişimindeki temel amaç ikincil kullanıcılar arasındaki mevcut iletişim performansını sürdürerek saydam kanal değişimini (seamless channel switchover) gerçekleştirmektir. Bu doğrultuda, devam etmekte olan veri iletiminin mevcut kullanılan kanaldan başka boş bir kanala taşınması süreci olarak nitelendirilen spektrum transferi (spectrum handoff) üzerine yapılan çalışmalar spektrum değişiminden kaynaklanan gecikmelerin azaltılabilmesi amacıyla çeşitli yöntemler önermiştir [46-51].

1.4. Bilişsel Radyo Ağları

Bilişsel Radyo esasen fiziksel katman radyo iletişimde dinamik spektrum erişimi için geliştirilmiş bağlantı seviyesi teknolojisidir. Ancak, Bilişsel Radyo sadece spektrum avantajları sağlamakla kalmayıp bağlantı katmanı üzerinde tümleşik yeniden ayarlanabilir sistem cihazlarını birbirine bağlayan ve makro ölçekli çeşitliliğe imkân veren ağ oluşturmaya da temel sunmaktadır.



Şekil 6. Bilişsel Radyo Ağı [12]

Bilişsel Radyo uçbirimleri iletişim için spektrum boşluklarını kullanma fırsatlarını elde ettikten sonra yararlı uygulamaların ve servislerin başarılı bir şekilde çalıştırılabilmesi için Bilişsel Radyo bağlantıları üzerinde paketlerin iletimini sağlayacak tarzda ağların varlığını gerektirmektedir [52]. Belirtilen gerekliliği karşılayan Bilişsel Radyo Ağları, Bilişsel Radyo cihazlarının akıllı kablosuz iletişim ağı olarak tanımlanmaktadır. Bu tip ağlarda iletişim parametreleri uyarlanabilir bir şekilde değiştirilerek uçtan-uca (end-to-end) sistem performansının geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

1.4.1. Ağ Bileşenleri

İşlemsel prensipler ve yordamlar ile ağın fiziksel bileşenlerini belirleyen ve birden fazla Bilişsel Radyo düğümü içeren Bilişsel Radyo Ağları, sahip olunan haklara ve

önceliklere göre birincil ağ ve ikincil ağ olarak adlandırılan iki temel bileşenden oluşmaktadır (Şekil 6).

1.4.1.1. Birincil Ağ

Mevcut ağ altyapısı, otoriteler tarafından belirlenen spektrum atama politikaları neticesinde bir veya birden fazla sabit spektrum bantları üzerinde özel hakka sahip birincil ağ olarak tanımlanır. Genel hücreli (4G, 5G gibi) ve TV yayın ağları birincil ağlara örnek olarak verilebilir.

Lisanslı bantta çalışan bir birincil ağ sistemi, o bantta yer alan frekansı kullanımda en yüksek önceliğe sahiptir. Diğer lisanssız kullanıcıların ve sistemlerin, birincil ağ sistemlerine girişim yapmalarına ve bu lisanslı bantları işgal etmelerine izin verilmez. Lisanssız bantlarda çalışan birincil ağlar açısından ise durum farklılık göstermektedir. Aynı lisanssız bant içinde veri iletişimini gerçekleştirmekte olan birincil ağlar birbirleri arasında olabilecek girişimi göz önünde bulundurmamak zorundadırlar. Dolayısıyla, lisanssız bantta çalışan birincil ağlar bu tip girişimlerin önüne geçmek amacıyla bazı düzenlemelere dayanan farklı öncelik seviyelerine sahip olabilirler.

Birincil kullanıcılar ve birincil baz istasyonları birincil ağlar içinde farklı haklara ve işlevlere sahip olan iki ögedir. Birincil kullanıcılar, belirli bir spektrum bandında çalışmak üzere bulunan ülkenin spektrum düzenleyici kurumu tarafından düzenlenmiş lisansa sahiptir. Lisanslı bantlara erişim birincil baz istasyonları tarafından kontrol edilmekte ve bu erişimin diğer lisanssız kullanıcıların işlemleri neticesinde olumsuz bir şekilde etkilenmesine izin verilmemektedir. Birincil kullanıcıların ikincil kullanıcılarla aynı ortamda bulunabilmeleri için donanım / yazılım temelinde herhangi bir değişikliğe ve ek işleme ihtiyaç yoktur.

Hücreli sistemlerdeki baz alıcı-verici istasyonu gibi (base transceiver station – BTS) spektrum lisansına sahip birincil baz istasyonu birincil ağların sabit altyapı elemanıdır ve birincil kullanıcıların ağa erişimini koordine eder. Teknik olarak spektrum paylaşımı gibi bir kabiliyete sahip olmasa da lisanssız kullanıcıların birincil ağa erişim isteklerinin yerine getirebilmesi için mevcut protokollerle beraber Bilişsel Radyoya özgü protokollerin kullanımı birincil baz istasyonlarından istenebilir.

1.4.1.2. İkincil Ağ

İkincil kullanıcılar ve / veya ikincil baz istasyonlarını içeren ve istenilen herhangi bir bantta veri iletimi yapmak için lisansa sahip olmayan ikincil ağların yalnızca spektrum boşluklarını fırsatçı bir şekilde değerlendirmesiyle spektrum erişimine izin verilir. Bu sayede ağda bulunan ikincil kullanıcılar, birincil kullanıcılara tahsis edilmiş olan spektrum bantlarını geçici olarak kullanabilirler.

İkincil kullanıcıların birincil kullanıcılarla aynı radyo ortamında var olabilmesi Bilişsel Radyoya özgü spektrum algılama, spektrum paylaşımı, spektrum yönetimi ve spektrum değişimi işlevlerini donanımsal ve yazılımsal olarak üzerlerindeki radyo cihazlarında bulundurmasıyla mümkün hale gelmektedir. Farklı iletişim sistemlerine bağlanabilmesi için kendilerini yeniden yapılandırabilirler. Ayrıca, diğer kullanıcılarla ve ikincil ağ içindeki varsa ikincil baz istasyonlarıyla sahip oldukları bilişsel kabiliyet ve yeniden ayarlanabilirlik özellikleriyle spektrum boşluklarını dinamik olarak tespit ederek iletişim içerisine girebilirler.

Bilişsel çevrimdeki yeteneklere sahip ve ikincil ağların sabit ağ elemanı olan ikincil baz istasyonları, lisanssız kullanıcıların internet gibi omurga ağlara (backbone network) erişiminde ağ geçidi (gateway) vazifesi görür. İkincil kullanıcılara spektrum erişim lisansı olmadan tek sekme (hop) bağlantısı sağlarlar. Bu sayede, diğer ağlara erişim mümkün hale gelir.

Diğer birincil ve ikincil ağlarla bağlantı gerçekleştiren ağ elemanı, spektrum aracısı (spectrum broker) olarak adlandırılır. Merkezi bir ağ bileşeni olan spektrum araçları spektrum kaynaklarının farklı ikincil ağlar arasında paylaşımında rol üstlenirler. Her ağa bağlanabilmekle beraber farklı ikincil ağların aynı radyo ortamında olabilmelerine imkân sağlayacak spektrum bilgi yöneticiliği vazifesini de icra edebilirler.

İkincil ağlardaki veri iletişimi lisanslı ya da lisanssız bantlarda gerçekleştirilebilir. Kullanılan bant türüne göre ikincil kullanıcıların, ikincil baz istasyonlarının ve spektrum araçlarının gereksinim duyduğu işlevsellikler farklılık gösterebilir. Birincil ağla aynı coğrafik alan ve spektrum bandını paylaşan ikincil ağlar iletişimin sağlanabilmesi için bilişsel iletişim tekniklerini kullanarak spektrum boşluklarından faydalanırlar. İkincil ağlardaki asıl amaç mevcut en iyi spektrum bandını saptamak olsa da lisanslı bantların kullanımı söz konusu olduğunda birincil kullanıcıların tespit edilmesine yönelik öncelik belirleyici olmaktadır. Dolayısıyla, radyo ortamına giren veya tekrar aktif veri

iletimine başlayan bir lisanslı kullanıcının tespit edilmesi durumunda mevcut bandı kullanan lisanssız kullanıcı sürdürmekte olduğu iletişimi durdurmak zorundadır. Bu durumda, ikincil kullanıcı ya veri iletimini tamamen sonlandırmayı da ya da kullanılmayan başka bir spektrum boşluğuna geçmeyi tercih edebilir.

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union – ITU) tarafından tanımlanmış sınıai, bilimsel ve tıbbi cihaz (Industrial Scientific Medical – ISM) bantları [53] herhangi bir sertifika veya lisans gereksinimi olmadan telekomünikasyon dışında endüstriyel, bilimsel ve tıbbi amaçlarla enternasyonal olarak rezerve edilmiş ve kullanıma açılmış radyo spektrum bantlarıdır. SBT bantları için açık spektrum politikalarının oluşturulması neticesinde kablosuz telefonlardan bluetooth cihazlarına, kablosuz bilgisayar ağlarından (WiFi) temassız ödeme sistemlerinde kullanılan yakın alan iletişim (near field communication) teknolojisine kadar geniş bir yelpazede dikkat çekici önemli teknolojiler ve yenilikçi kullanım alanları ortaya çıkmıştır. Ancak, değişik hizmetler sunan ve günümüzde sayıca fazla olan heterojen ağların birbirlerine olan girişimlerinden ötürü SBT bantlarındaki verimlilik iyice düşmüştür. Tam bu noktada SBT bantlarında ve diğer lisanssız spektrum bantlarında verimliliği artırmak üzere Bilişsel Radyo Ağları devreye sokulabilmektedir.

Lisanslı bantlarda herhangi bir birincil kullanıcı aktivitesi gözlemlendiğinde sürdürülmekte olan ikincil kullanıcı iletişiminin kesilmesi, kullanılan kanalın boşaltılması ve iletişimin yeni bir boş kanal üzerinden devam ettirilmesi gibi hususlar lisanssız bantlar için geçerli değildir. Lisanssız bantlara erişim sağlamak isteyen tüm kullanıcılar eşit haklara sahiptir. Dolayısıyla ikincil kullanıcılar arasında lisanssız spektrum bölümlerine erişim için bir rekabet söz konusu olmaktadır. Lisanssız bantlardaki bu rekabet durumu için çok yönlü ve ileri seviyeli spektrum paylaşım teknikleri geliştirilmiştir [54-57].

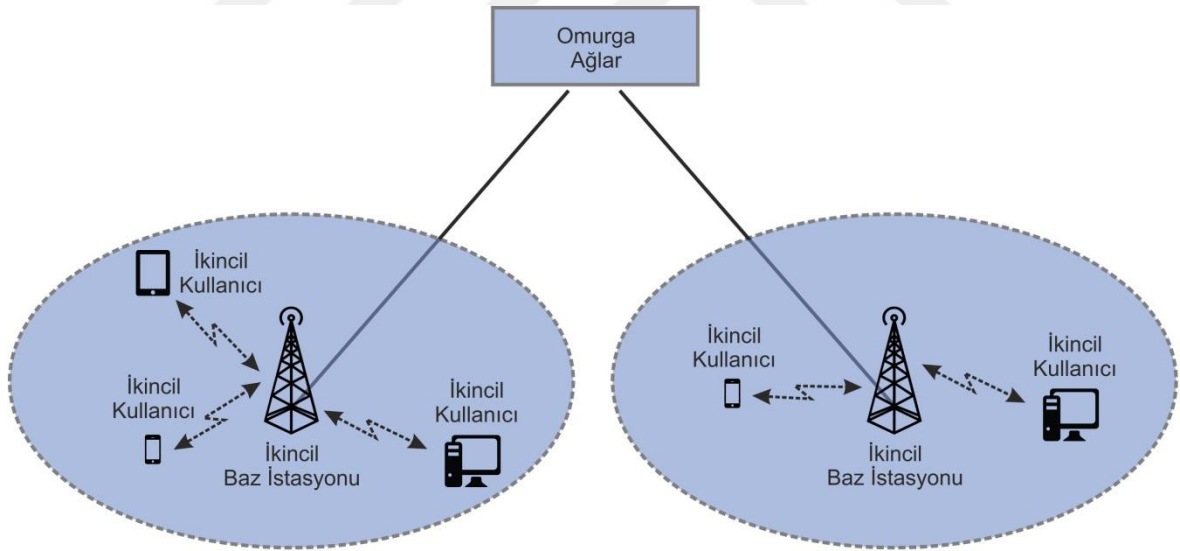
1.4.2. Ağ Mimarisi

Bilişsel Radyo Ağları, lisanslı ve lisanssız bantlarda çalıştırılan birbirinden farklı servislerin ve uygulamaların servis kalitesi, gecikme, iletilen veri miktarı gibi gereksinimlerini karşılamak üzere ağ-merkezli, dağıtık veya örgüsel yapılar içinde kullanılabilirler. Buradan hareketle, bir önceki bölümde değinilen birincil / ikincil kullanıcılar ve baz istasyonları ile spektrum araçları gibi temel unsurlardan oluşan Bilişsel

Radyo Ağları konvansiyonel kablosuz ağlarda olduğu gibi altyapılı, tasarsız ve örgüsel ağlar olarak sınıflandırmaya tabi tutulmaktadır [58].

1.4.2.1. Altyapılı Ağ

Altyapılı ağlar, merkezi bir bileşeni olan hücresel ağlardaki gibi bir baz istasyonuna ya da kablosuz yerel alan ağlarındaki gibi bir erişim noktasına sahiptir. Böyle bir ağ-merkezli yapı içinde yer alan ikincil baz istasyonları / erişim noktaları kendi iletim alanında (transmission range) konuşlanmış ikincil kullanıcıların spektrum tahsis süreleri, iletim güçleri gibi parametreleri kontrol ederler. İkincil kullanıcılar, bu baz istasyonları / erişim noktaları üzerinden tek sekmeli bağlantı (one-hop connection) şeklinde yalnızca kendi aralarındaki iletişimi gerçekleştirmekle kalmayıp farklı türdeki iletişim sistemlerine de erişebilmektedir. Diğer altyapılı ağlara bağlanılabilmesi ise omurga ağlar ya da spektrum araçları ile mümkün hale getirilebilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Altyapılı Bilişsel Radyo Ağı

İkincil ağlar, birincil ağlarla aynı radyo ortamında bulduklarından ötürü ikincil baz istasyonları / erişim noktaları birincil kullanıcılara herhangi bir girişime sebebiyet vermek için dinamik spektrum erişim tekniklerini kullanırlar. Bu doğrultuda merkezi bileşenler, lisanslı kullanıcıların spektrum kullanımı ile lisanssız kullanıcıların spektrum

gereksinimleri hakkında bilgi edinmek durumundadırlar. Bahsedilen bilgiler tüm ikincil kullanıcılar tarafından gözlemler neticesinde toplanır ve birincil ağlara girişi önlemek üzere karar mekanizmalarını çalıştıracak olan ilgili merkezi bileşene gönderilir.

Analiz edilen bilgiler temelinde gereksinimleri karşılayacak kanalların tespiti için kullanılacak en uygun çözüm sayesinde uçtan-uca gecikmenin azaltılması, servis kalitesinin ve iletilen veri miktarının artırılması sağlanabilmektedir. Kullanılabilecek mümkün tüm kanalların listesi merkezi bileşen tarafından kararlaştırılır. İkincil kullanıcılara iletilen bu karar aracılığıyla iletişim parametreleri yeniden ayarlanır ve ikincil kullanıcıların en iyi kanala erişimi temin edilir.

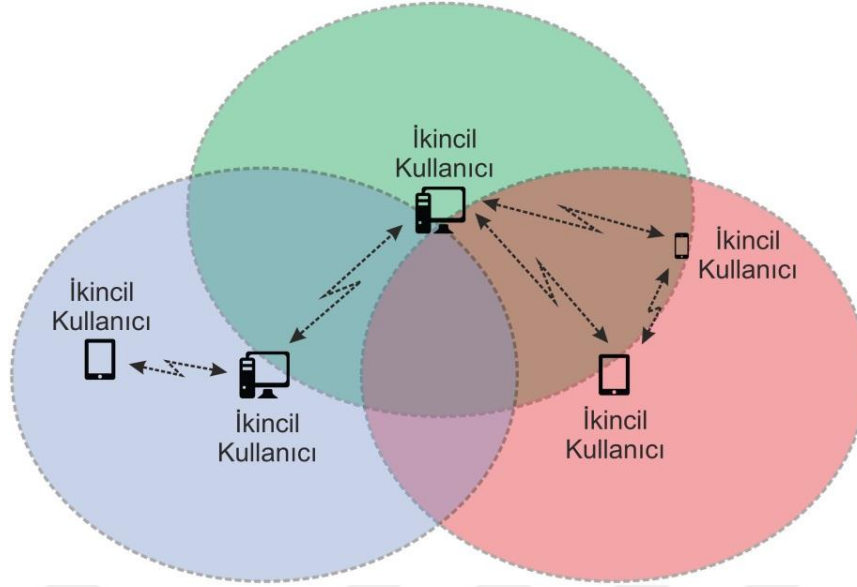
1.4.2.2. Tasarsız Ağ

Tasarsız ağlarda herhangi bir merkezi bileşen bulunmadığından ikincil kullanıcılar kendi aralarında lisanslı ya da lisanssız bantlar üzerinden direkt olarak iletişim kurarlar (Şekil 8). Her bir ikincil kullanıcı tüm Bilişsel Radyo karakteristiklerine sahip olmak durumundadır. Çünkü ortamla ilgili yerel gözlemlerini yapıp kendi kararlarını almakla yükümlüdür.

Yerel gözleme dayanan karar doğrultusundaki eylemlerin tüm ağdaki etkilerinin kestirimi zordur. Değişkenlik arz eden spektrum ortamı ve birincil ağ iletişiminin korunmasına yönelik ortaya çıkan bu zorluk Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarını klasik tasarsız radyo ağlarından ayırtmaktadır.

Klasik tasarsız radyo ağlarında önceden belirlenmiş olan bir kanal tüm iletişim süresi boyunca aynı kalır. Ancak Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında hem zamansal ve mekânsal değişimlere hem de birincil kullanıcı aktivitelerine bağlı olarak iletişimin sürdürüldüğü yol (path) üzerinde kullanılan kanallar farklılık gösterebilir.

Yine ilintili olarak, topoloji bilgilerini edinmekte kullanılan işaretçi mesajlar (beacon message) klasik tasarsız radyo ağlarında tek bir ve aynı kanal üzerinden gönderilip alınabilir. Fakat bu durum Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları için geçerli değildir. Çünkü ikincil kullanıcılar tarafından kullanılabilecek mevcut spektrum bantları geniş bir frekans aralığına sahip olduğundan topoloji bilgisi içeren işaretçi mesajları mümkün tüm kanallar üzerinden göndermek ve almak rasyonel bir işlem olmaktan uzaktır. Bu nedenle ikincil kullanıcılar tam bir topoloji bilgisine sahip olamamakta, ikincil ağdaki veri paketi çarpışma (data packet collision) olasılığı ile birincil kullanıcılara girişim olasılığı artmaktadır.

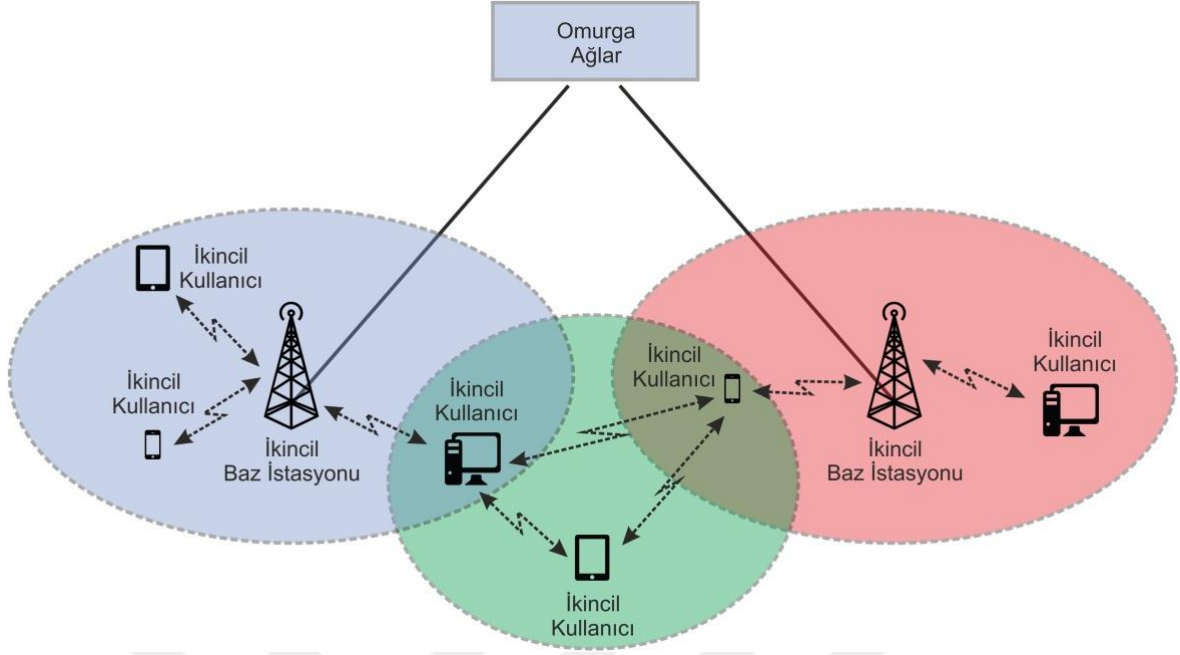


Şekil 8. Tasarsız Bilişsel Radyo Ağı

Bir performans ölçütü olan uçtan-uca servis kalitesindeki bozulmalar klasik tasarsız radyo ağlarında sadece trafik yükünün dengelenmesiyle giderilebilir. Diğer taraftan Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarındaki servis kalitesi sürdürülebilirliği içinse trafik yükü dengelemesi dışında kaynak (source) ve hedef (destination) düğümler arasında tespit edilen rota üzerinde kaç farklı kanalın hatta kaç spektrum bandının kullanıldığı ve lisanslı kullanıcı aktivitesi kaynaklı spektrum değişimi sayısı bilgilerine de sahip olmak gerekmektedir.

Bir diğer farklılık ise düğümler gezgin olduğunda karşımıza çıkmaktadır. Klasik ağlarda, gezginliğe bağlı olarak veri bağlantılarında oluşan kesilmeler bir sonraki düğüme gönderilen mesaja karşılık cevap alınmadığında ya da yeniden gönderim limiti (retransmission limit) aşıldığında kolayca tespit edilebilir. Bilişsel Ağlarda bu tespit süreci, gönderici düğüm gezgin olmasa dahi herhangi bir birincil kullanıcı aktivitesi söz konusu ise veri paketi hemen gönderilemeyeceğinden zor hale gelmektedir. Dolayısıyla Bilişsel Ağlardaki gezginlik durumları ile ilgili çıkarsamalar klasik ağlardakinden farklı olarak ele alınmaktadır.

Yukarıda değinilen klasik tasarsız ağlar ile Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları arasındaki farklılıklar ve ikincil kullanıcıların aldığı kararların tüm ağa etkisinin kestirimindeki zorluklar [59] nedeniyle gözlemlenen bilgileri ikincil kullanıcılar arasında yayacak işbirlikçi (cooperative) yöntemler tasarlanmıştır [60-63].



Şekil 9. Örgüsel Bilişsel Radyo Ağı

1.4.2.3. Örgüsel Ağ

Örgüsel ağlar, altyapılı ve tasarsız ağ mimarilerinin birleşimiyle meydana getirilmiş karma ağlar şeklinde tanımlanmıştır (Şekil 9). Hibrit Kablosuz Örgüsel Ağlara [64] benzerlik gösteren Bilişsel Ağlardaki bu mimari baz istasyonları / erişim noktaları arasındaki kablosuz bağlantıların kurulmasını sağlar.

Ağ içinde yer alan merkezi bileşenler, yönlendirici vazifesi görmekte ve kablosuz omurgalar oluşturmaktadırlar. Ağ kullanıcıları, merkezi bileşene direkt olarak bağlanırlar ya da bağlantı kurmak için diğer aktarma düğümlerini (relay node) kullanırlar.

Bazı baz istasyonları / erişim noktaları kablolu omurgalara bağlanarak ağ geçidi gibi işlevsellik gösterebilir. Ayrıca, herhangi bir kablolu omurga ağına bağlanmaksızın kullanılan merkezi bileşenlerin ağ içindeki konumlandırılmaları çok esnek ve az maliyetli olabilmektedir. Bilişsel Radyo yetenekleriyle donatılmış baz istasyonları / erişim noktaları birbirleriyle haberleşmek için spektrum boşluklarını kullanabilir. Mevcut spektrum boşluklarının potansiyel çokluğuna bağlı olarak merkezi bileşenler arasındaki kablosuz iletişim linklerinin kapasitesi, kablosuz omurga olarak hizmet görmek için yeterli olabilmektedir.

1.4.3. Bilişsel Ağ Kullanım Alanları ve Yeni Yönelimler

Birincil kullanıcılara garanti edilen servis kalitesinden ödün vermeksizin üçüncü parti anlaşmalar üzerinden birincil ağlara tahsis edilmiş lisanslı spektrum erişime açılarak kiralık ağ hizmeti sunulabilir [65-68]. Örneğin, bir birincil ağ kendine ait spektrum erişim hakkını bir sanal ağ operatörüne kiralayabilir.

Toplum güvenliği ve acil durum ağları Bilişsel Ağların kullanılabilceği bir diğer alandır [69-72]. Mevcut haberleşme altyapılarının kısmen devre dışı kaldığı ya da tamamen zarar gördüğü acil durum anlarında, afet bölgesinde çalışan görevli personellerin acil durum ağları oluşturmaları gerekebilir. Bu ağların mevcut durumla ilgili önemli bilgilerin iletiminde görev almasından dolayı en az gecikmeyle güvenilir bir haberleşmenin garanti edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, acil durum ağları yüksek miktarda veri trafiği oluşturan ses ve görüntü gibi büyük çokluortam verileri içerebileceğinden radyo spektrumunun önemli bir kısmına ihtiyaç vardır. Bu durumda, herhangi bir altyapı oluşturmadan haberleşme önceliği ve cevap süreleri hususlarını göz önünde bulunduracak Bilişsel Radyo Ağları devreye sokulabilir.

Bilişsel Radyo Ağlarının potansiyel kullanım alanları arasında askeri haberleşme ortamları da bulunmaktadır [73-75]. Düşman hattında yürütülecek olan haberleşmenin güvenliği ve korunarak devam ettirilmesi, üzerinde önemle durulması gereken hususlardandır. Askeri personelin ve müttefiklerinin kendi aralarındaki iletişiminin güvenilir bir spektrum bandında gerçekleştirilmesi Bilişsel Radyoya ait spektrum değişimi işlevi tarafından mümkün hale getirilebilmektedir. Bu doğrultuda, bilişsel yeteneklerle donatılan askeri haberleşme cihazları savaş alanının değişken radyo ortamına uyumlu olacak şekilde iletişim parametrelerini seçebilir ve değiştirebilir.

Özellikle son yıllarda Dünya'nın değişik bölgelerinden aşağıda listelenen kurumlar yerel olarak kullanılmayan, ancak bir yayın servisine tahsis edilen ve TV beyaz boşlukları olarak adlandırılan frekansların Bilişsel Radyo temelli kullanımını ile ilgili düzenlemeler gerçekleştirmişlerdir:

- Amerika Birleşik Devletleri – FCC
- Birleşik Krallık – Komünikasyon Ofisi (Office of Communications – OFCOM)
- Avrupa Birliği – Avrupa Posta ve Telekomünikasyon İdareleri Birliği (European Conference of Postal and Telecommunications – CEPT)

- Japonya – İçişleri ve Haberleşme Bakanlığı (Japanese Ministry of Internal Affairs and Communications – MIC)
- Singapur – Bilişim ve Gelişim Otoritesi (Info-Communications Development Authority – IDA)

Yapılan düzenlemeler spektrum verimliliği adına önemli fırsatlar sunmuştur. Karşılık olarak da endüstri ve standardizasyon girişimcileri, düzenlemeler neticesinde yararlanılabilir hale sokulan spektrum bantlarının kullanımından etkin avantajlar sağlayacak yenilikçi teknolojilerin belirlenmesi için harekete geçmişlerdir. TV beyaz boşluklarının kullanılabilmesi potansiyel kullanım alanları arasında kırsal genişbant erişimi (rural broadband access), akıllı yardımcı hizmet ağları (Smart Utility Networks – SUN), kurumlar, kampüsler ve kentler için geniş alan genişbant erişimi, kablosuz ev uygulamaları ve ulaşımda (şehirlerarası tren ve otobüs hizmetleri gibi) çokluortam uygulamaları sayılabilir [76].

Hastaların ve ameliyatlar esnasında sağlık personelinin gezgin olmasına imkân tanıyan, hastaların iyileşme sürecini hızlandıran ve kronik hastalıklardan dolayı sıkıntı yaşayan hastaların uzaktan takibini kolaylaştıran tıbbi beden alan ağları (Medical Body Area Networks – MBAN) önem kazanan teknolojilerden birisidir. İlk etapta lisanssız bantlarda kullanılan tıbbi beden alan ağı cihazlarının aynı spektrum bölümlerini kullanmakta olan diğer elektronik cihazlarla girişimini önlemek üzere Bilişsel Radyoyu baz alan ultra genişbant erişimi için çalışmalar [77, 78] yürütülmektedir.

Günümüzde, geleneksel güç iletim şebekelerinden akıllı şebekelere (smart grid) dönüşümün gerçekleştirilmeye başlanması ile birtakım zorluklar ortaya çıkmıştır. Bunlar arasında güç üretimini ve kullanımını kontrol etmek ve düzenlemek için karmaşık güç sistemleri içeren akıllı şebekelere entegre edilebilecek, yüksek hızlı ve güvenli veri iletimini sağlayacak iletişim teknolojisi gerekliliği bulunmaktadır. Kablosuz akıllı şebekelerdeki kablosuz kapsama alanları, kablosuz iletişim kapasitesi ve sınırlı spektral kaynaklar arasındaki dengeyi gözetebilecek Bilişsel Radyo teknolojisinin akıllı şebekelere pozitif yöndeki potansiyel etkileri sistem mimarisi, iletişim ağı bileşenleri ve uygulamaları yönüyle inceleme altına alınmıştır [79].

1999 yılından itibaren tanınırlığını ve popülerliğini artırmaya başlayan Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT) [80] standart iletişim protokollerini kullanan benzersiz (uniquely) şekilde adreslenebilir birbirine bağlı nesnelerin dünya çapında yayılmış ağıdır. İnsanlar ve nesnelerin ideal olarak herhangi bir yolu / bir ağı ve herhangi bir servisi

kullanarak herhangi biriyle ve herhangi bir nesneyle herhangi bir zaman ve mekânda bağlantı kurmasına olanak sağlar [81]. Ancak, fiziksel nesnelerin görme, duyma ve koklama duyuları üzerine gerçekleştirdikleri gözlemleri birbirleriyle paylaşmak için bağlantıda olmanın ve bağlantılar kurmanın ötesinde Nesnelerin İnternetini fiziksel ve sosyal dünyaları anlama, düşünme ve öğrenme yetenekleriyle donatmanın gerekliliği ortaya konmuştur. Bu bağlamda, Bilişsel Radyo ve Nesnelerin İnternetini birbirleriyle ilişkilendirmek ve bir araya getirmek amacı ile çalışmalar [82, 83] yürütülmeye başlanmıştır.

Popülerlik kazanmaya başlayan bir diğer alan ise enerji hasadıdır (Energy Harvesting). Kablosuz Duyarga Ağlar (Wireless Sensor Networks – WSN) ve elektronik donatılı giysilerde olduğu gibi elektronik devrelerin enerji gereksinimini güneş enerjisi, kinetik enerji, rüzgar enerjisi gibi dış kaynaklardan edinimi süreci olarak tanımlanan enerji hasadı yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji (yeşil enerji) dışında kullanılan geleneksel enerji çeşitlerine olan bağımlılığı azaltma yönünde yenilikçi fırsatlar ile karşımıza çıkmaktadır. Bu doğrultuda, yeşil enerji ile karbon salınımını çok düşük seviyelere indirgeyen ve aynı zamanda Bilişsel Radyo işlevselliklerini barındıran sistemlerin uygulanabilirliği üzerine yeni bir yönelim [84] ortaya konmuştur.

1.5. İletişim Ağlarında Veri Gönderimi, Yönlendirme ve Rotalama

İletişim ağlarında kaynak iletişim cihazından hedef iletişim cihazına verilerin gönderilmesi OSI modeline ve katman etkileşimli Bilişsel Radyo tasarımına göre ağ katmanına (Network Layer) atanmış bir görevdir. Veri gönderimi (data delivery) kaynak ve hedef düğümler arasında herhangi bir ara sekme bulunmaması durumunda direkt gönderim olarak adlandırılırken, bir ve birden fazla sekme üzerinden veri gönderiminin gerçekleştirilmesi dolaylı gönderim olarak tanımlanmaktadır [85].

Veri gönderimi ile ilintili olarak çok sıklıkla birbirine karıştırılan yönlendirme ve rotalama terimleri arasındaki ayrıma dikkat çekmekte fayda vardır. Yönlendirme, bir veri paketi ara bir düğüme ulaştığında o pakete ne olacağı ile ilgilenir [86]. Diğer bir deyişle, paketin hedefe olan rota üzerine yerleştirilerek bir sonraki düğüme gönderilmesini ifade etmektedir. Yönlendirmenin yapılabilmesi için yönlendirmede görev olan düğüm üzerinde bir rotalama tablosuna ihtiyaç vardır. Rotalama tabloları, farklı hedeflerle ilişkilendirilen rota bilgilerini içerdiği gibi rotalama kararını yapmada kullanılan metrik bilgilerini de

saklar. Başvurulan metrikler dahilinde kaynak ve hedef düğümler arasındaki sekme sayısı, gecikme miktarı (latency), yol güvenilirliği (path reliability), veri yükü (data load) gibi bilgiler bulunmaktadır.

Bahsedilen rotalama tablolarının oluşturulması, doldurulması ve güncellenmesi olarak tanımlanan rotalama, kaynak ve hedef düğümler arasında yer alan diğer sekmeler üzerinden verilerin taşınması esnasında tablolardaki ilintili metriklerden faydalanarak alternatif yollardan hangi rotanın kullanılması gerektiğini tespit eden karar verme mekanizmasıdır. Rotalamanın ana çatısı durumundaki karar verme mekanizmasına ait adımlar ise belirli bir yol seçimine yönelik rotalama algoritmasını oluşturur.

Seçilen iletişim teknolojisine (kablolu / kablosuz), hatta veri bağlantılarının kurulduğu ağ türüne (altyapılı, tasarsız, örgüsel ağlar) göre iletişimin gerçekleştirilebilmesi için farklı gereksinimler ortaya çıkmaktadır. Fiziksel ve bağlantı katmanlarından elde edilen bilgiler ile rotalamanın sürdürüldüğü ağ katmanında göz önünde bulundurulması gereken ve rotalama algoritmalarının temel adımlarına şekil veren parametreler de kullanılan iletişim teknolojisi ve ağı bağlamında farklılıklar göstermektedir. Fakat iletişim türüne bağlı olarak geliştirilen ve çeşitlilik arz eden rotalama algoritmalarında aranan temel tasarımsal özellikler [87,88] genellikle benzerdir. Bu özellikleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Eniyilik (Optimality)
- Sadelik
- Dayanıklılık
- Hızlı Yakınsama
- Esneklik

Eniyilik, hesaplama yapmak için kullanılan farklı metriklere bağlı olarak en iyi rotayı seçmede rotalama algoritmasının yeteneğini ifade eder. Örneğin, bir rotalama algoritması sadece sekme sayısı metriğini kullanırken, bir diğeri gecikme süresini, hatta her iki metriği birden kullanabilir. Dolayısıyla, rotalama protokollerinde faydalanılan metrikler ve metrik hesaplama yöntemleri mutlaka tanımlanmalıdır.

Rotalama algoritmaları olabildiğince sade olacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu sayede, rotalama algoritmasının işlevselliği asgari düzeyde gerçekleştirilen programlama ve işlem yükü ile verimli bir şekilde sunulabilmektedir. Rotalama yöntemini içeren yazılım özellikle sınırlı fiziksel kaynaklara sahip bir iletişim cihazında çalıştırıldığında verim daha önemli bir hale gelmektedir.

Dayanıklılık, rotalama algoritmalarının donanım hataları, bağlantı kesilmeleri, yüksek veri trafiği ve yanlış kodlamalar gibi olağandışı veya öngörülemeyen durumlar karşısında doğru bir şekilde çalışmasını ifade eder. Rotalama sürecinde yer alan düğümler ağ bağlantılarını oluşturduklarından bu düğümler üzerinde karşılaşılabilecek herhangi bir sorun tüm ağdaki veri gönderiminde aksamalara sebebiyet verebilir. En iyi rotalama algoritmaları genellikle çeşitli ağ koşulları altında uzun bir süre boyunca teste tabi tutulan ve kararlılığı kanıtlanmış olan algoritmalarlardır.

İletişim ağında yer alan düğümlerin en iyi yollar üzerine anlaşma sürecini belirten yakınsama hızlı bir şekilde yapılmalıdır. Herhangi bir ağ olayı, kullanımdaki rotaların düşmesine ya da tekrar erişilebilir olmasına neden olabilir. Bu gibi durumlarda rotalamayı gerçekleştiren düğümler birbirlerine en uygun rotaların yeniden hesaplanmasını ve belirlenen rotalar üzerinde karar kılınmasını tetikleyecek güncelleme mesajlarını gönderirler. Alınan mesajların değerlendirilmesi neticesinde gerçekleştirilen en iyi yol tespitinde yavaş bir şekilde yakınsayan rotalama algoritmaları, rota döngülerine (route cycle) ya da bağlantı kesilmelerine neden olabilir.

Rotalama algoritmalarında aranan bir diğer özellik olan esneklik, çeşitli ağ koşullarına hızlı ve doğru bir şekilde adapte olma anlamını taşımaktadır. Örneğin, bir ağ bölümünün (network segment) düşmesi, dolayısıyla veri iletiminin sürdürülememesi durumu rotalama algoritması tarafından hızlıca fark edilmeli ve bu bölümü kullanan tüm rotalar için yeniden hesaplamalar yapılmalıdır. Ayrıca, bir rotalama yöntemi ağ gecikmesi (network delay), bantgenişiği, veri paketlerinin düğümler üzerinde sıraya sokulduğu kuyruk (queue) büyüklüğü gibi parametrelerde gözlemlenecek değişikliklere uyum sağlayacak şekilde programlanmalıdır.

1.5.1. Klasik Kablosuz Tasarsız Ağlar ve Rotalama

Bir önceki bölümde değinilen özellikler ışığında şekillendirilen yöntemler, kurallar bütününe sokularak rotalama protokollerine yerleştirilir ve iletişim ağlarında verilerin etkin bir şekilde kaynak düğümden hedef düğüme iletiminde yol belirleyici, diğer bir ifade ile rehber olarak işlev gösterir. Bu doğrultuda, klasik kablosuz tasarsız ağlar için geliştirilmiş rotalama algoritmaları çalışma prensipleri bakımından iki kategoride ele alınmıştır [89]: Tablo-Sürülen Rotalama (Table-driven / Proactive Routing) ve İstek-Sürülen Rotalama (On-Demand / Reactive Routing).

Tablo-sürülen rotalama algoritmaları, ağ topolojisi içerisinde bulunan tüm düğümlerin birbirleriyle en güncel rotalama tablosu bilgilerini paylaşmalarını sağlamaktadır. Zamansal ve mekânsal olarak statik bir yapıya sahip ağ topolojileri için en uygun yolların seçiminde iyi performans sergilerler. Ancak, güncellenmesi gereken tablo bilgilerinin çokça olması, bu bilgiler düğümler arasında paylaşılırken ağ üzerinde veri trafiği yoğunluğu ile karşılaşılması, yeni yolların oluşturulması ve mevcut yollardan bazılarının bloke olması durumlarında göstermiş oldukları yavaş reaksiyon bu tip algoritmaların zayıf yanları olarak belirtilmektedir. BABEL [90] ve OLSR [91] gibi yöntemler tablo-sürülen rotalama algoritmaları grubunda bulunmakla beraber İnternet protokollerini geliştiren ve standartlaştıran İnternet Mühendisliği Görev Grubu (İnternet Engineering Task Force – IETF) tarafından klasik kablosuz tasarsız ağlar için standart rotalama protokolleri arasına alınmıştır.

İstek-sürülen rotalamada ise kaynak düğümün isteği üzerine kaynak düğümden hedef düğüme yol bulma işlemi gerçekleştirilir. Yeni bir yol gerektiğinde kaynak düğüm rota keşfi sürecini (route discovery process) başlatır. Belirtilen süreç herhangi bir yolun bulunması ya da mümkün tüm yolların incelenmesi sonrasında tamamlanır. Kaynaktan hedefe yolun kurulması, tüme gönderim (broadcast) yönteminin kullanılarak komşu düğümlere RREQ paketlerinin gönderilmesi neticesinde sağlanır. Bu durum, anlaşılacağı üzere ağda tıkanıklıklara neden olabileme ihtimalini artırmaktadır. Ancak, ağ topolojisi içerisinde yer alan tüm düğümlerin birbirleriyle rotalama bilgileri paylaşması gerektiği gibi, zamansal ve mekânsal anlamda sürekli değişim gösteren ağ yapıları için istek-sürülen algoritmalar iyi performans göstermektedirler. Klasik kablosuz tasarsız ağlarda kullanılmak üzere bu kategoride yer alan AODV [92] ve DSR [93] gibi yöntemler IETF tarafından standartlaştırılmış algoritmalarındandır.

1.5.2. Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları ve Rotalama

Bilişsel Radyo Ağlarında yapılan çalışmaların çoğunluğu protokol yığınının (protocol stack) alt katmanları olan ve tek-sekmeli yönlendirme gerçekleştiren fiziksel ve bağlantı katmanları üzerine yoğunlaşmıştır [4, 59, 94, 95]. Bu çalışmaların temel amaçları kanal yetersizliği probleminde çözümler üretmek, an itibarıyla boş ve kullanım için hazır frekans bantları seti olarak tanımlanan spektrum fırsatlarını (spectrum opportunity – SOP) [96] tespit etmek ve verimli bir kablosuz iletişim sağlamak olmuştur. Bu sayede, kanallar

üzerindeki rekabet miktarı düşürülmekte, haberleşmekte olan düğümler arasındaki girişimler azaltılmakta ve ortalama kanal verimliliği iyileştirilmektedir. Diğer taraftan Bölüm 1.4.3'te ele alınan yeni yönelimler bağlamında Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları önem kazanmış ve beraberinde tüm ağ performansını etkileyebilecek önemli bir problem olan rotalama hususuna ilişkin olası zorluklar tespit edilmiştir [16, 17, 24].

Klasik Tasarsız Radyo Ağlarında tüm ağ düğümlerine kullanım için sabit bir spektrum bandı sunulur. Örneğin, WLAN servisleri ve uygulamaları 2.4 GHz ve 5 GHz bantlarını kullanmaktadır. Nitekim bu ağlarda karşılaşılan düğüm gezginliği (node mobility), düğümlerin sınırlandırılmış iletim güçleri, ağ yaşam süresi, yüksek hata oranı, yüksek girişim miktarı, sinyal bayılması (signal fading) gibi zorluklar Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları tarafında da göz önünde bulundurulur. Bunun dışında, kullanılacak kanalların mevcudiyetinde yaşanan sürekli değişimler ve ağ kullanıcılarının davranışsal örüntülerindeki rasgelelik Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları için planlanacak rotalama yöntemlerine ilave bir yük getirmektedir. Dolayısıyla, bu yöntemler spektrum farkındalığına (spectrum awareness) sahip olmak durumundadır. Spektrum boşlukları bilgisini kapsayan spektrum farkındalığı, ağ katmanındaki rotalama işlevi ve Bilişsel Radyoya özgü spektrum yönetimi işlevlerinin müşterek bir şekilde çalışmasıyla mümkün hale gelmektedir.

Temel zorluklardan bir diğeri de kaliteleri rotaların kurulumunda gözlemlenmektedir. Klasik tasarsız radyo ağlarındaki rotalama yöntemlerinde kaliteli rotaların belirlenmesi amacı ile başvuru iletilen veri miktarı, gecikme, veri gönderim oranları gibi klasik ölçüm yolları Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları söz konusu olduğunda rota kararlılığı, boş kanal bulma olasılığı ve birincil kullanıcı mevcudiyeti gibi ölçütlerle ilişkilendirilmek zorundadır.

Birincil kullanıcıların belirli bir kanalı kullanmak üzere ağ ortamına aniden girmesi, ikincil ağda iletişimin sürdürülmekte olduğu rotalar üzerinde iletişimin kesilmesi / kopması gibi rota hatasına sebebiyet vermektedir. Karşılaşılan rota hatalarının düzeltilmesi ya farklı düğümler üzerinden ya da aynı düğümleri kullanarak farklı kanallar üzerinden yeni rotaların bulunması ile gerçekleştirilebilir. Rota bakımı (route maintenance) olarak adlandırılan bu süreç Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında rotalama algoritmaları tarafından ele alınması gereken bir diğer zorluktur.

Değinen zorlukları aşmak üzere tasarlanmış rotalama algoritmaları literatürde farklı çalışmalarda farklı sınıflandırmalara tabi tutulmuştur. Bunlardan birincisi, ikincil

düğümünün spektrum hakkında sahip oldukları bilginin kapsamına göre algoritmaları iki kategoriye ayırmıştır [97]. İlk kategoride yer alan tüm spektrum bilgisine haiz rotalama yöntemleri sayesinde merkezi olarak devamlılığı sağlanan ve sürekli olarak güncellenen veri tabanlarında tutulacak bir spektrum mevcudiyeti haritası oluşturulur ve ağdaki tüm düğümlerin ya da tasarsız ağ içinde seçilmiş / tanımlanmış merkezi bir kontrol biriminin kullanımına sunulur. Nitekim FCC, 900 MHz altında kalan ve 3 GHz etrafındaki spektrum bantları için zamansal ve mekânsal spektrum fırsatlarını veri tabanlarında tutmayı teşvik edecek düzenlemeler gerçekleştirmiştir [98]. Düzenlemede dikkate alınan mimari yapı, herhangi iki düğüm arasındaki spektrum mevcudiyetinin bilindiği ve düğümlerin gezgin olmadığı statik bir Tasarsız Bilişsel Radyo Ağıdır.

Diğer kategoride yer alan yöntemler, yerel spektrum bilgisine haiz rotalama algoritmalarıdır. Dağıtık protokoller yardımı ile her bir ikincil düğüm üzerinde spektrum boşlukları tespit edilir. Bu işlem spektrum yönetimi işlevlerinin rotalama yöntemi ile müşterek çalışmasını gerektirmektedir. Dolayısıyla, tasarlanan rotalama modülü rota hesaplamalarının dışında iletişim için gerekli mevcut boş kanal bilgilerini derler ve bu bilgileri ağdaki diğer düğümlerle paylaşır.

Akyıldız vd. tarafından yapılan çalışmada, rotalama algoritmaları üç gruba ayrılmıştır [59]. Birinci grupta bir sonraki yönlendirici (forwarder) düğüm seçimi ile spektrum bandı seçimini aynı anda gerçekleştiren rotalama yöntemleri yer almaktadır. Aktif birincil kullanıcıların konum bilgilerini tespit eden ve rotalarını buna göre belirleyen, aynı zamanda rotalama süreciyle senkronize bir şekilde hangi spektrum bandının kullanılması gerektiği kararını alan rotalama algoritmaları ikinci grupta bulunmaktadır. Son grup ise dinamik ağ ortamı bağlamında yeniden ayarlanabilir (reconfigurable) özelliğe sahip olan ve spektrum seçimini beraberinde yapan algoritmaları içermektedir. Yeniden ayarlanabilirlik, yerel spektrum bandı değişimleri (ikincil düğümün farklı bir spektrum bandına geçmesi) ya da farklı yönlendirici düğümlerden oluşan setin seçimiyle sağlanmaktadır.

Tek-yollu (single-path) ve çok-yollu (multi-path) rotalama algoritmaları şeklinde oluşturulan sınıflandırma türüne ise [99]'da değinilmiştir. Çalışmada ayrıca birden fazla atomik metriğin birleşimiyle oluşturulan hibrit metriklerin Bilişsel Radyo Ağları için rotalama yöntemleri araştırmasında önemli bir yönelim olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda, tez dâhilinde tanımlanan atomik metrikler ve sonrasında geliştirilen hibrit fayda fonksiyonu belirtilen yönelimle paralellik göstermektedir.

Tek-yollu rotalama protokollerinde kaynak düğüm ile hedef düğüm arasında sadece bir tane ve en uygun rota tespiti yapılır. Bu yöntem rotalama tablolarını önemli ölçüde sadeleştirmektedir. Diğer taraftan, kaynak ve hedef düğümler arasında alternatif yolların hem düğümler hem de düğümlerin kullanabileceği farklı spektrum bantları üzerinden tespiti ve bu yolların performans ölçütleri açısından uygun olanlarının farklı veri oturumları için kullanılması çok-yollu rotalama algoritmalarının ana çatisını oluşturmaktadır.

Tez kapsamında önerilen rotalama yöntemi çok-yollu rotalama algoritmaları grubunda yer almaktadır. Dolayısıyla, Bölüm 1.5.2.1 ve Bölüm 1.5.2.2’de Youssef vd. tarafından geliştirilen sınıflandırma [99] dikkate alınmış ve Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları için geliştirilmiş rotalama algoritmalarına bu sınıflandırma üzerinden değinilmiştir.

1.5.2.1. Tek-Yollu Rotalama Algoritmaları

SEARCH [100] coğrafi yönlendirme prensiplerini temel alan bir rotalama yöntemidir. Önerilen protokol birincil kullanıcıların coğrafi olarak aktif olduğu alanlardan kaçınmayı öncelemektedir. Ayrıca, rotalama ve kanal seçimi işlevleri müşterek bir şekilde yürütülmektedir. Aday rotalardan en iyisinin tespitinde filtreleme metriği olarak kaynak ve hedef düğümler arasındaki sekme sayısı kullanılır. Kullanılan yolların bakımında düğümlerin gezginliği ve ağdaki değişimler göz önünde bulundurulur. Yeni yolların ara düğümler üzerinden keşfi sırasında gecikme kestirimleri (latency prediction) yapılır. Ancak, Bilişsel Radyo Ağlarına özgü spektrum dinamikleri bağlamında bu tip kestirimler yanlış hesaplamalara neden olabilmektedir.

Habak vd. tarafından önerilen LAUNCH [101] rotalama algoritması hem hedefe yakın ara düğümleri hem de birincil kullanıcı aktivitelerinden en az etkilenen yolları seçen fırsatçı yönlendirme prensibine dayanmaktadır. Spektrum bandı değişiminden kaynaklı gecikmeler, komşu ikincil kullanıcıların konum bilgileri ve birincil kullanıcıların beklenen aktiviteleri dikkate alınmakla birlikte, ikincil düğümlerin tampon bellek durumları ve yol çeşitliliği gibi rota kararlılığını olumsuz etkileyebilecek hususlar hakkında herhangi bir öneri sunulmamıştır.

Tang vd. çalışmalarında kararlı yönlendirme ve girişim önleyici kanal atamasına dayanan katman etkileşimli bir yaklaşım (MP-JSRCA) önermişlerdir [102]. MP-JSRCA algoritması SEARCH gibi fırsatçı konum tabanlı prensipleri kullanmaktadır. Adım adım

bir sekmeden diğere geçerken en kararlı bir sonraki komşuyu seçerek çalışmaktadır. Kararlı komşu düğümündeki seçim, bir düğümde komşusuna veri paketi yollandığında gezginlik maliyeti ile birincil ve ikincil kullanıcılara olan kanal girişim maliyetinin ağırlıklı ortalaması olarak tanımlanan veri iletim maliyetindeki niceliğe göre gerçekleştirilmektedir. Ancak, önerilen çalışmada protokol performansını önemli ölçüde etkileyen genel yol uzunluğu (seçilen yoldaki sekme sayısı) dikkate alınmamaktadır.

MCR [103] algoritması, bir düğümün bir girişim bölgesine yakınlığını belirlemede Markov kestiricisi (Markov predictor) kullanmaktadır. Bir düğüm, girişim bölgelerine ne kadar yakınsa birincil kullanıcılara girişim olasılığı o kadar yüksektir. Mesafeye dayanan böyle bir tahmin modeli, kaçınılması gereken daha uzun bir rotaya sahip olma riskini içermektedir.

Çoklu yollar üzerinden çoklu veri akışlarını yönlendirmek gibi bir mekanizmaya sahip olmayan rotalama yöntemlerinden biri de OPERA [104] algoritmasıdır. Bu çalışmada, hem statik hem de gezgin düğüm senaryoları için en iyi olduğu ispatlanan rotalama metrikleri kullanılmıştır. Geliştirilen metrikler, eniyilik (optimality) ve doğruluk (accuracy) hususlarını müşterek olarak ele almıştır. Eniyilik, Dijkstra ve Bellman-Ford tabanlı rotalama protokollerinin birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bilişsel Radyo Ağlarının kendine özgü niteliklerini hesaba katan doğruluk ise bir rotadaki uçtan-uca gecikmenin hesaplanmasında rol alan düğümler tarafından sağlanan rota çeşitliliğinden faydalanma ile mümkün kılınmaktadır. Kaynak ve hedef düğümler arasındaki rotanın maliyeti uçtan-uca gecikme, birincil kullanıcı aktivitesi ve ağ kullanıcılarının gezginliği bağlamında hesaplanmaktadır.

Rota seçimi ve spektrum kararı işlevlerinin birlikte yürütüldüğü rotalama algoritmalarından bir diğere Zhu vd. tarafından yapılan çalışmada [105] yer verilmiştir. Tasarlanan STOD-RP yöntemi kapsamında ikincil kullanıcılar rota seçimi ve spektrum kararı arasındaki işbirliğini kolaylaştırmak maksadı ile her bir spektrum bandında bir spektrum ağacı oluşturmaktadır. Ağaç oluşumu, ikincil kullanıcıların erişebilecekleri spektrum bantları ve komşularıyla aralarındaki bağlantılara göre şekillenmektedir. Bu doğrultuda, STOD-RP algoritması üç temel hususu aynı yapı altında barındırmaktadır. Bunlardan birincisi, birincil kullanıcı aktiviteleri ile ikincil kullanıcıların servis kalitesi gereksinimlerinin göz önünde bulundurulmasıdır. İkincisi, ağaç yapısına dayalı tablosürülen rotalama işlevi ile istek-sürülen rota keşfi sürecinin bir arada sürdürülmesidir. Sonuncusu ise veri iletişiminin sürdürülebilirliğini sağlamak için gereklilik arz eden rota

onarım (route recovery) yönteminin spektrumun mevcut durumuna uyarlanabilirliğidir. Fakat önerilen rotalama metriğinde kaynak ve hedef düğümler arasındaki sekme sayısının dikkate alınmaması ve düğümlerin gezgin olma senaryosuna karşı herhangi bir önermenin bulunmaması STOD-RP algoritmasının zayıf yönleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

IPSAG [106] çalışması, WiFi ve WiMAX gibi mevcut kablosuz sistemlerle Bilişsel Radyo Ağlarında çalışabilecek hibrit bir rotalama algoritması sunmaktadır. Kaynak düğümden çıkan bir veri paketi herhangi bir mevcut iletişim teknolojisi ile karşılaşırsa tünelleyerek rotalama yaklaşımına (tunneling routing approach) dayalı mevcut sistemin rotalama yöntemi kullanılır. Aksi durumda ise rota belirleme süreci için ikincil düğümler hedef düğüme en yakın olma ve komşu düğümlerle en az bir ortak kanala erişim imkânına sahip olma bağlamında bir sonraki en iyi komşu seçimini gerçekleştirir. Önerilen yöntemin performans belirleyici uçtan-uca gecikme, rota kararlılığı ve rota uzunluğu gibi ölçütler açısından analizi yapılmamıştır. Dolayısıyla, literatürdeki diğer çalışmalar nezdinde avantajları sayısal sonuçlarla desteklenmemiştir.

En az uçtan-uca gecikme değerine ulaşmak üzere rota ve spektrum bandı seçimini yapan ve Yang vd. tarafından geliştirilen rotalama algoritması [107] yerel bir koordinasyon düzeneği önermiştir. Çalışmada ikincil kullanıcılar üzerindeki kuyruk gecikmeleri esas alınmıştır. Kuyruk gecikmelerine bağlı olarak bir düğüm komşusuna veri akışını yönlendirip yönlendirmeme kararını alır. Bu bağlamda, düğümler arasında sağlanan yerel koordinasyonla yük dengelemesi yapılabilmektedir. Ancak, rota bakımı ve düğüm gezginliği için destek sunulmamıştır. Önerilen rotalama metriğinde rota kararlılığının ve spektrum mevcudiyetinin formüle edilmemiş olması bir diğer zayıf yön olarak ifade edilebilir.

Rotalama algoritmalarında başvurulan yaklaşımlar arasında belirli bir spektrum bandı üzerinden birincil kullanıcıların ikincil kullanıcılara yönelik girişiminin olasılıksal kestirimi (probabilistic estimation) bulunmaktadır. Bu yöntemin kullanıldığı çalışmada [108] olasılık tabanlı bir rotalama metriği sunulmuştur. Metrik tanımlaması sözü edilen girişim temelinde yapılmış olup kaynak ve hedef düğümler arasında belirli bir bantgenişliği gereksinimini karşılayacak en olası yolun tespiti yapılmaktadır. Gecikme, rota çeşitliliği ve tıkanıklık farkındalığı ile ilintili sistem parametrelerine önerilen metrikte yer verilmemiştir. Bunun dışında, ağdaki düğümlerin hareketliliğine bağlı olarak karşılaşılabilecek rotalama hatalarına yönelik herhangi bir rota bakımı mekanizmasına değinilmemiştir.

Huang vd. çalışmalarında birincil kullanıcı aktivitesini göz önünde bulunduran üç farklı rotalama metriği geliştirmişlerdir [109]. Tanımlanan metriklerden birincisi, aday yollardan kümülatif olarak en az birincil kullanıcı aktivitesine sahip rotayı öncelemektedir. Bu metrik, birincil kullanıcıların ağ ortamına sık girdiği durumlarda tercih edilmektedir. Diğer taraftan her bir aday yol üzerinde birincil kullanıcı aktivitesinden maksimum düzeyde etkilenen ikincil düğümler arasındaki bağlantı tespit edilir ve elde edilen değer geliştirilen ikinci metrik tarafından kullanılır. En düşük metrik değerine sahip yol rotalama süreci için tercih edilir. İkinci metrik, birincil kullanıcı aktivitesinin düşük olduğu durumlarda seçilmektedir. Birincil kullanıcıların orta düzeyde aktif olduğu durumlarda ise birinci ve ikinci metriklerin bileşiminden türetilmiş üçüncü bir metrik devreye sokulmuştur. Çalışmada aday yollar üzerindeki olası tıkanıklıklar tespit edilmesine rağmen, yol uzunluğu ve uçtan-uca gecikme bağlamında performans değerlendirmesi yapılmamıştır.

Birincil kullanıcı aktivitesinden kaynaklanan kanal ve/veya bağlantı değişikliklerinde rol alan rota bakımına dair maliyet, rotalama algoritmalarının performansını önemli ölçüde etkileyen faktörlerden birisidir. Bu doğrultuda yapılan bir çalışmada [110] rota bakım maliyetine dayanan yeni bir rota kararlılığı tanımlaması yapılmıştır. Bakım maliyeti uçtan-uca bağlantısının sürdürülebilirliğini devam ettirmek için gerekli çabayı ya da ödenmesi gereken cezayı ifade etmektedir. Birincil kullanıcılar aktif olduğunda ya bağlantı ya da kanal değiştirme işlemini içeren rota bakım süreci devreye girer. Bağlantı değişiminde rota boyunca birincil kullanıcılar tarafından etkilenen bağlantıların hiç etkilenmeyen bağlantılarla değiştirilmesi gerekmektedir. Kanal değişimlerinde ise aynı bağlantılar kullanılabilirken iletişimin devam ettirilmesi için başka bir spektrum bölümüne geçilmelidir. Bir veri bağlantısının yaşam süresince kullanılacak yollar dizisini bulmayı amaçlayan bu çalışmada rota bakım maliyeti, birincil kullanıcı aktivitesi ve rota olarak tercih edilen yollardaki ortalama sekme sayısı açısından irdelenmiştir. Nitekim tıkanıklık farkındalığı ve düğüm gezginliği hususları göz önünde bulundurulmamıştır.

1.5.2.2. Çok-Yollu Rotalama Algoritmaları

Abdelaziz vd. Bilişsel Radyo Ağlarının rota keşif aşaması sırasında bulunan çoklu yolların etkisini incelemiş ve kaynak düğümden hedef düğüme olan ek yollar nedeniyle

güvenilirlikte (reliability) artış ve rota hata olasılığında azalma gözlemlendiği sonucuna varmışlardır [17]. Gerekli olan güvenilirlik düzeyine bağlı olarak birincil kullanıcı aktivitelerinden daha az etkilenen rotaları keşfetmek için birden fazla yolun kullanılmasının önemli olduğunu belirtmişlerdir. Diğer taraftan, bağlantı durumu (link state) [91], uzaklık vektörü (distance vector) [92] gibi yaklaşımları kullanan klasik rotalama metriklerini Bilişsel Ağlarda uygulamak pek uygun değildir. Bunun temel nedeni rotalama tablolarını hızlı bir değişime uğratan çok sayıdaki güncellemeleri tetikleyecek Bilişsel Radyo Ağlarındaki sık dinamik değişimlerdir. Yine de klasik tasarsız ağlar için geliştirilmiş rotalama yöntemlerinden bazıları Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında kullanılmak üzere uyarlanmıştır [111].

CAODV [112, 113] algoritması sözü edilen uyarlamalara örnek olarak verilebilir. Bu yöntem, AODV protokolünün [92] modifiye edilmiş bir sürümü olup hem rota oluşumu hem de paket yönlendirmesi esnasında tahsis edilmiş herhangi bir ortak kontrol kanalına (common control channel) gereksinim duymadan birincil kullanıcıların aktif olduğu bölgelerden kaçınmayı öncelemektedir. Rota oluşumu bağlamında hâlihazırda birincil kullanıcılar tarafından kullanılan kanallar rota keşif sürecine dâhil edilmemektedir. Yönlendirme aşaması ile ilintili olarak ise bir birincil kullanıcı belirli bir kanalda aktif hale geldiğinde tüm komşu ikincil kullanıcılar bu kanalı kullanan rotaları geçersiz kılmaktadır. Sekme sayısı, aynı sıra numarasına (sequence number) sahip aday yollar arasında seçim yapma amacıyla CAODV algoritmasının metriği olarak tanımlanmıştır.

Joshi vd. yaptıkları çalışmada [114] Tasarsız Bilişsel Radyo Ağları için katman etkileşimli rotalamanın gereksinimlerini analitik olarak göstermiş ve sık kanal değişimlerini azaltmak üzere bir rotalama yöntemi önermişlerdir. Klasik tasarsız ağlarda kullanılan DSR algoritmasını [93] uyarlayan bu çalışma çeşitli senaryolar kapsamında kanal değiştirme sayısının kestirimini gerçekleştirmektedir. Karşılaştırma amaçlı, düğüm gezginliği ya da rota üzerindeki herhangi bir ikincil düğümün ağ ortamından ayrılması neticesinde ortaya çıkan bağlantı hatasından kaynaklanan gecikmeden ötürü katman etkileşimli olmayan protokollerin menfi yönde nasıl etkilendikleri analiz edilmiştir.

Benzer şekilde klasik tasarsız ağlardan Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarına uyarlanan bir diğer yöntem ise TORA [115] algoritmasıdır. TORA rotalama protokolündeki esaslardan faydalanan çalışmada [116] birincil kullanıcı aktivitesine karşı dayanıklı ve etkin bir rotalama çözümü (CO-TORA) amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, orijinal yöntem çok arayüzlü olacak ve birincil ile ikincil ağlara ait veri paketlerini ayırt edecek şekilde yeniden

tasarlanmıştır. Literatürde yer alan mevcut yöntemlerle karşılaştırılmamış olması ve ayrıca düğüm gezginliği için destek sunmaması CO-TORA algoritmasının eksik yönleri olarak ifade edilebilir.

Song ve Lin [117], çok-yollu rotalamanın mantığını kullanarak güvenilirliği esas alan bir yönlendirme protokolü sunmuşlardır. Protokol kapsamındaki ana tasarım düşüncesi, tüm aday yollar arasından en kararlı olanı tercih etmek ve birincil yol olarak kullanmaktır. Birincil yoldan maksimum düzeyde ayrışan bir diğer yol ise alternatif yol olup algılanan birincil kullanıcı aktivitesi ya da diğer sebeplerden dolayı birincil yolun kullanılabilir olmaktan çıkması durumlarında seçilir. Ayrışıklık, düğümler veya bağlantılar temelinde oluşturulmaktadır. Tercih edilen düğümsel ayrışıklık olursa birincil ve alternatif yollar, hedef ve kaynak düğümler hariç ortak düğümlere sahip değildirler. Yine aynı şekilde bağlantısal ayrışıklık söz konusu olduğunda birincil ve ikincil yollar üzerinde ortak bağlantılar bulunmamaktadır. Birincil kullanıcıların aktiviteleri dikkate alınmakla beraber ikincil ağdaki düğümler arası girişim irdelenmemiş ve önerilen algoritmanın veri iletim miktarı açısından performans ölçümü yapılmamıştır.

Birbirine yakın olmayan yolların veri iletişimde kullanımı, çok-yollu rotalama yöntemlerinde hem keşfedilen rotaların sayısını azaltmada hem de uçtan-uca veri iletim miktarının azaltılmasında avantajlar sunmaktadır. Beltagy vd. tarafından ele alınan bu düşünce sayesinde aktif ve gezgin bir birincil kullanıcının birbirinden uzak olan iki rota üzerine aynı anda etki etmesinin önüne geçilmiştir [118]. Nitekim önerilen rotalama yöntemi ikincil kullanıcıların statik olduğu varsayımına dayandırılmaktadır ki böyle bir varsayım telekomünikasyon alanında karşılaşılan mevcut gerçeklik için kapsayıcı bir çözüm sunma açısından engel teşkil etmektedir.

Chen vd. MAC katmanı erişimini, sekme sayısını ve yeniden iletim gecikmelerini (retransmission delay) eniyilemek, veri iletim miktarını artırmak ve uçtan-uca gecikmeyi azaltmak amacıyla iki farklı rotalama yöntemi geliştirmişlerdir [119]: kopyalama ve kodlama tabanlı çok-yollu rotalama algoritmaları. Çoğaltma tabanlı yaklaşımda veri paketi kopyaları oluşturulur ve ayrı yollar üzerinden gönderilirken kodlama tabanlı rotalamada gönderilmek istenen veri paketi kodlanır ve birbirinden farklı yollar üzerinden iletilir. Sunulan yöntemler homojen olarak konumlandırılmış birincil ve ikincil kullanıcıların bulunduğu bir ağ ortamında test edilmiştir. Kaynak ve hedef düğümler arasındaki diğer düğümlerin birbirlerine eşit mesafelerde bulunması ve seçilebilecek aday yolların sekme sayılarının eşit olması gibi varsayımlar günümüzdeki ağ uygulamalarında sıklıkla

karşımıza çıkan heterojen ağlar bağlamında performans değerlerini olumsuz yönde etkileme potansiyelini taşımaktadır.

Yük dengelemesi ve rota kararlılığı ile ilintili olarak trafik yükünü çoklu-yollar üzerinden dağıtan rotalama algoritması Lin ve Tian tarafından önerilmiştir [120]. Oyun kuramına başvurulmuş çalışmada, n adet ayrık yol arasında kararlı bir trafik ataması gerçekleştirmek üzere müşterek olmayan bir kuramsal oyun yaklaşımı (non-cooperative game theoretic approach) kullanılmıştır. Sunulan oyun modellemesinde her bir yol oyuncu olarak ifade edilmekte ve alınan bilgi miktarına göre hedef düğüm bu oyunculara (yollara) ödeme yapmaktadır. Çalışma kapsamında rotalama yöntemlerinin en temel işlevlerinden birisi olan rota seçimine yönelik herhangi bir önerme sunulmamıştır.

Birincil kullanıcıların girişime karşı korunmasını ve Bilişsel Radyo yollarındaki servis farklılıklarının gözetilmesini sağlayan CRP protokolü [121] spektrum ve rota seçimini aynı anda ele almaktadır. Önerilen yöntem, iki farklı çalışma kipi tanımlamıştır. Birinci çalışma kipinde kullanılan Sınıf I rotaları ikincil ağlar için uçtan-uca gecikme değerlerini azaltmaktadır. Diğer taraftan, ikinci çalışma kipine özgü Sınıf II rotaları sayesinde daha fazla sekme sayısına bağlı olarak artan gecikme zamanı pahasına birincil kullanıcılara yüksek düzeyde koruma sağlanmaktadır. Ancak CRP algoritması tıkanıklık farkındalığında başvurulacak ara düğümlerdeki boş tampon bellek miktarlarına ilişkin heterojenlik bilgisini dikkate almamıştır.

DSR yöntemine dayalı SER protokolü [122] enerji tüketimi dengelemesi, rotalama yükünü azaltma, düğümler arasında spektruma erişim rekabetini ortadan kaldırma ve veri trafiğini farklı kanallar üzerine ayırıştırma gibi avantajlar sağlamaktadır. Talep edilen bantgenişliğine sahip istek-sürülen rotalar oluşturmak amacıyla rota seçimi ve kanal-zaman aralığı tahsisi (channel-timeslot allocation) birlikte yürütülmesine rağmen SER rotalama metodu yoğun gezginlik senaryolarında DSR protokolünün doğasından kaynaklanan zayıf performans gösterme dezavantajına sahiptir [123].

DZP [124], daha önce bulunan yol üzerindeki düğümler ve bu düğümlerin komşuları arasında kooperatif bağlantılar oluşturmaktadır. Geliştirilen yöntem ile rotalama yollarının yeniden yapılandırılmasına gerek kalmamaktadır. Çünkü birincil kullanıcıların aktif olduğu bölgelerde yönlendirici düğümün bir sonraki düğüme veri iletimini gerçekleştirmesi yönlendirici ile komşusunun işbirliği sayesinde sağlanmaktadır. Birincil kullanıcı girişimi DZP'nin rotalama metriğinde ele alınmakla birlikte ikincil kullanıcı girişiminin hariç

tutulması pratikte karşılaşılabilecek ikinci kullanıcı aktivitesinin yoğun olduğu senaryolar için yöntemin güvenilirliğini azaltmaktadır.

Gui vd. tarafından sunulan çok yollu rotalama metodu [125] rota oluşturma aşamasında ikincil bir kullanıcı üzerindeki veri varış ve servis hızları bilgilerini temel almaktadır. Bu doğrultuda, önerilen yöntem kuyruk teorisini kullanmakta ve uçtan-uca gecikmeyi azaltmak üzere trafik yükünü dinamik bir şekilde birçok rotalama yoluna atamaktadır. Ancak, yapılan çalışma veri iletim miktarı ve paket gönderim oranı gibi performans ölçütlerine ilişkin herhangi bir bilgi sağlamamaktadır. Hizmet kalitesini ana odak noktası bağlamında değerlendiren bir diğer çalışma Juang vd. tarafından önerilmiştir [126]. Geliştirilen yöntem, bağlantı bantgenişliği bilgisini ve birden fazla yol üzerinde link kullanılabilirliği olasılığını toplamaktadır. Hizmet kalitesi seviyesini karşılayan en uygun yolun hedef düğümde belirlenmesi, bunun yerine ara düğümler üzerinde dağıtık hesaplamaların tercih edilmemesi ve ikincil kullanıcıların statik olarak konumlandırılması sunulan algoritmanın zayıf yönleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Coğrafi bir rotalama protokolü olan TIGHT [127] üç farklı çalışma kipi kullanmaktadır. Bunlardan birincisi olan fırsatçı (greedy) kip için birincil kullanıcıların konum bilgilerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Veri paketleri birincil kullanıcıların aktif olduğu bölgelerin etrafından ve bu bölgelerin dışında yer alan düğümler üzerinden gönderilir. Fırsatçı kip, birincil kullanıcılar nadiren aktif olduğunda tercih edilmektedir. En iyi ve en iyiye yakın çalışma kipleri ise yüksek birincil kullanıcı aktivitesi gözlemlendiğinde kullanılmaktadır. Birincil kullanıcıların konum bilgilerine başvurulduğu bu kiplerde hedef düğüme doğru sırasıyla en kısa ya da hesaplama karmaşıklığını düşürmek için en kısaya yakın yollar tespit edilmektedir. Yürütülen simülasyonlarda gerçek dünya senaryolarıyla uyumlu olmayan ve birden fazla kanal yerine tek bir kanal kullanan birincil kullanıcıların tanımlandığı bir senaryo ele alınmıştır.

Ping vd. tarafından yapılan çalışmada [128] ele alınan temel hususlar kooperatif rotalama ve farklı spektrum bantlarına ait kanalların kümeleştirilmesidir. Tanımlanan iki farklı rotalama sınıfından Sınıf A Rotalaması yüksek enerji verimliliği ve yüksek veri iletim miktarını hedeflemektedir. Sınıf B Rotalaması ise uçtan-uca gecikmenin azaltılmasında yardımcı olmaktadır. Ancak, önerilen rotalama metodunda düğüm gezginliği hususu göz önünde bulundurulmamıştır.

Benzer şekilde gecikme ve enerji tüketimine odaklanan bir diğer yöntem ise SSR [129] algoritmasıdır. SSR yerel spektrum dinamiklerini etkili bir şekilde kullanma

yeteneğine sahiptir. Bahsedilen yetenek ikincil ağda yer alan tüm ikincil kullanıcıların konum bilgilerinin her bir kullanıcı tarafından kullanılabilir olduğu varsayımına dayanmaktadır. Nitekim bu tür konum bilgileri, özellikle çok sayıda kullanıcı içeren dinamik bir Bilişsel Radyo ortamında ikincil kullanıcılar arasında büyük miktarlarda kontrol mesajı değişimini zorunlu kılmaktadır.

Birden fazla kanal ve sekme üzerinden rotalama yollarını tespit etmek üzere Cui vd. tarafından işbirlikçi ve spektrum farkındalığına sahip fırsatçı bir rotalama protokolü [130] önerilmiştir. Öncelikle, birincil kullanıcı aktivitelerinin etkisi altındaki spektrumun kullanılabilirliğini iyileştirmek için çift aşamalı işbirlikçi spektrum algılama (Dual-Stage Collaborative Spectrum Sensing – DCSS) [131] tekniğine başvurulmuştur. Sonrasında ise en uygun rota seçimi için mevcut en iyi spektruma erişim fırsatını ve iletim gecikmesini temel alan iki farklı metrik tanımlanmıştır. Çalışmanın zamanla ara düğümler etrafında meydana gelen tıkanıklık oluşumlarına çözüm sunmaması açık bırakılmış bir husustur.

Pourpeighambar vd.'nin çalışmasında [132] Bilişsel Radyo Ağlarındaki çevresel değişimlere ikincil kullanıcıların hızlıca adaptasyonunu gözeten ve pekiştirmeli öğrenmenin bir türü olan gradyan tabanlı öğrenmeye [133] dayalı bir rotalama modeline değinilmektedir. Önerilen yöntem ile ikincil kullanıcıların uçtan-uca gecikmeyi azaltma ve aynı zamanda birincil kullanıcılara olan girişimlerini belirli bir eşik değerinin altına çekme istekleri karşılanmaktadır. Rotalamada yerel bilgiler kullanılmakta olup hesaplamalar dağıtık olarak gerçekleştirilmektedir. Çalışma, ikincil kullanıcı gezginliğine bağlı olarak iletilen veri miktarı açısından irdelenmemiştir.

Kaynak ve hedef düğümler arasında çok düğümlü ayırık yolların kurulumunu gerçekleştiren MACNRP [134] protokolü, veri paketi gecikmesi ve rotalama yükündeki makul bir artışa karşın iletilen veri miktarını artırmayı, birincil kullanıcılara girişimi ve rota hatalarını asgari düzeye çekmeyi hedeflemektedir. Çalışmada, AODV algoritmasının çok-yollu versiyonu AOMDV [135] rotalama protokolünü temel alan MACNRP için veri gönderim oranına dair performans değerlendirmesi yapılmamıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Önceki bölümde değinilen çalışmaların önemli bir kısmı, kaynak – hedef düğümler arasındaki gecikme ve mesafeye dayalı tahmin modelleri kullanarak rotalama işlevini gerçekleştirmiştir. Ancak Cesena vd. tarafından sunulan çalışmada [97] rotalama yollarının oluşum sürecinde yer alan ara düğümlerdeki tahmin modellerinin spektrum dinamikleri bağlamında genellikle çok yanlış olduğu ve tedbirli bir şekilde kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu tespit, çalışmamızda önerilen rotalama yöntemi için herhangi bir tahmin modeline başvurulmamasına zemin oluşturmuştur.

Çok-yollu rotalama algoritmalarının ağ performansı ölçütleri temelinde sunduğu avantajlar [97] tez çalışmamız için bir diğer motivasyon kaynağı olarak ifade edilebilir. Fakat çok-yollu rotalama yöntemleri için gerekli tasarım parametrelerinin Bilişsel Radyo ortamlarında belirleyici bir karakteristik konumundaki birincil kullanıcı davranışları ile sınırlandırılmaması gerektiğini belirtmekte fayda vardır. Kaynak ve hedef düğümler arasında özellikle birden fazla veri akışının başlatılması durumunda en kararlı ve en güvenilir rotaların tespiti için Bilişsel Radyo Ağları ile ilintili diğer hususların tanımlanması ve uygun parametrelerle ifade edilmesi kaçınılmazdır.

Tez kapsamında diğer odaklanılan nokta, rota keşfi aşamasında bulunan yolların sayısının makul seviyelere çekilmesi olmuştur. Çünkü önceki bölümde de değinildiği üzere tüm olası yolların değerlendirilmesi ağ içinde birçok kontrol mesajının değişimine, dağıtık bir rotalama yöntemi tercih edilse bile hem ara hem de hedef düğümlerde aşırı sayıda hesaplamaların gerçekleştirilmesine sebebiyet vermekte ve ağ performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bağlantılı olarak olası tüm yolları değerlendirme sürecinin merkezi olarak sadece hedef düğümde yürütülmesinin hesaplama yükünü artıracak gayet açıktır. Çalışmamızda yukarıda sözü edilen tüm noktaları göz önünde bulunduran hibrit bir çok-yollu rotalama algoritması geliştirilmiştir. Bu bağlamda yapılan çalışmalar bölümü şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2.1’de sistem modellemesine yer verilmiştir. Atomik metriklerin tanımlanması, hibrit fayda fonksiyonun oluşturulması, çok-yollu rotalama mekanizmasının tasarımı ve geliştirilen yönteme ait rota bakım sürecinin içeriği Bölüm 2.2’nin alt başlıklarını oluşturmaktadır.

2.1. Sistem Modeli

Dikkate alınan Tasarsız Bilişsel Radyo Ağı sırasıyla birincil kullanıcılara (BK) ve ikincil kullanıcılara (IK) atfedilmiş düğümleri (D) ve kenarları (K) içeren iki farklı çizgeden (graph) oluşmaktadır:

$$\zeta_{BK} = (D_{BK}, K_{BK}) \quad (1)$$

$$\zeta_{IK} = (D_{IK}, K_{IK}) \quad (2)$$

Ağ içinde M tane birincil ve N tane ikincil kullanıcı bulunmakta olup ζ_{BK} ve ζ_{IK} çizgelerine ait kenarlar aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$K_{BK} = \{BK_n | 0 \leq n \leq N\} \quad (3)$$

$$K_{IK} = \{IK_m | 0 \leq m \leq M\} \quad (4)$$

Aynı türden kullanıcıları temsil eden iki düğüm arasındaki veri iletim bağlantısı ilintili olduğu ζ_{BK} veya ζ_{IK} çizgesinin kenarıyla eşleştirilir. Bir bağlantı, sadece ve sadece düğümlerin kapsama alanları kesişirse ve bu kullanıcıların üzerinden iletişim kurabilecekleri boş bir kanal varsa oluşturulabilir. Toplamda C tane kanalın kullanıma sunulduğu ağ modelinde her bir kanal benzersiz (unique) bir kanal numarası olan c ile gösterilmiş ve $1 \leq c \leq C$ eşitsizliği dikkate alınmıştır. Tüm birincil ve ikincil kullanıcıların kapsama alanlarının sabit olduğu varsayılmıştır. Bu bağlamda, ζ_{BK} ve ζ_{IK} çizgelerinin düğümleri aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$D_c^{BK} = \{t_{i,j} | i \neq j, 0 \leq i, j \leq N, d_{ij}^{BK} \leq \min(r_i^{BK}, r_j^{BK})\} \quad (5)$$

$$D_c^{IK} = \{t_{q,r} | q \neq r, 0 \leq q, r \leq M, d_{qr}^{IK} \leq \min(r_q^{IK}, r_r^{IK})\} \quad (6)$$

Formül 5'te yer alan d_{ij}^{BK} , BK_i ve BK_j düğümleri arasındaki Öklit mesafesini; t_{ij} , r_i^{BK} ve r_j^{BK} kapsama alanı yarıçaplarına sahip bu düğümlerin kapsama alanlarının kesişmesi şartıyla c kanalı üzerinden oluşturdukları bağlantıyı ifade etmektedir. Benzer

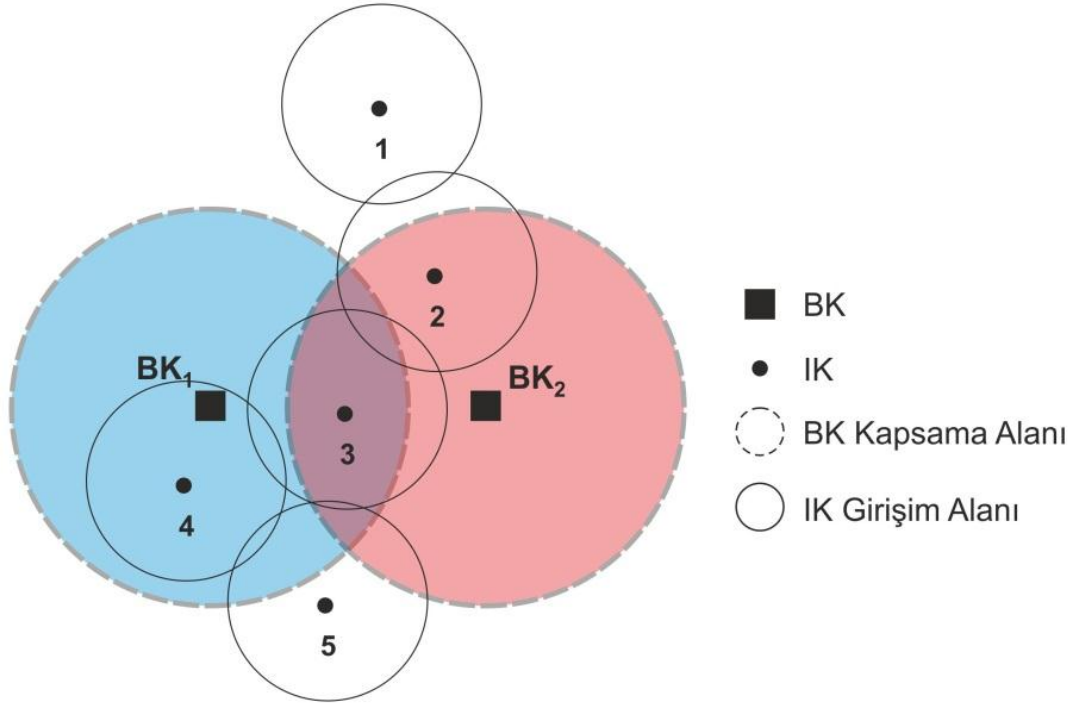
şekilde ikincil ağ için aralarındaki mesafe d_{qr}^{IK} , kapsama alanı yarıçapları r_i^{IK} ve r_j^{IK} olarak verilen IK_q ve IK_r düğümlerinin kapsama alanlarının kesişmesi, anlık olarak herhangi bir birincil kullanıcı tarafından kullanılmayan ve bu iki düğümün haberleşebilecekleri boş bir kanal c 'nin mevcut olması koşuluyla t_{qr} ile simgelenen iletişim bağlantısı gerçekleştirilmektedir (Formül 6).

Çalışmada tüm ikincil kullanıcıların homojen iletim aralığına (transmission range) sahip tek bir radyo alıcı-vericisi ile donatıldığı varsayılmıştır. İkincil kullanıcılar üzerindeki alıcı-vericiler yeniden yapılandırılabilen, kontrol ve veri mesajlarının değişimi için lisanslı banttaki herhangi bir kanal boş ise seçilebilmektedir. Bir diğer varsayım ise rotalama süreci bağlamında ağ katmanı desteğine sahip önerilen yöntemle kanal bantgenişliği ve spektrum algılama zamanını içeren bilgiler paylaşıldığı müddetçe bağlantı katmanı için geliştirilmiş herhangi bir MAC protokolünün ve fiziksel katman için tasarlanmış herhangi bir spektrum algılama tekniğinin kullanılabilir olmasıdır.

Yayılm (propagation) modeli olarak yol kaybı ve gölgeleme (shadowing) modeli temel alınmıştır. Ağda yer alan birincil kullanıcıların konumları hem sabit hem de diğer tüm ikincil kullanıcılar tarafından bilinmektedir. Diğer taraftan kendi buldukları konumu takip edebilen ikincil kullanıcılara gezginlik desteği sunulmuştur. İkincil kullanıcılar konum farkındalığı için ortak bir kontrol kanalı (common control channel – CCC) üzerinden kendi aralarında işaret (beacon) mesajlarının periyodik olarak değiş-tokuşunu gerçekleştirmektedir. Dolayısıyla her bir ikincil kullanıcı bir sekme ötesindeki komşuluk ilişkisi listesini belirli aralıklarla güncellemektedir.

Herhangi bir birincil kullanıcı aktivitesi söz konusu ise derhal ikincil kullanıcıya ait veri iletimi durdurulur. Aksi takdirde birincil kullanıcıya girişim meydana gelir. Girişimin önlenmesi ikincil kullanıcının çevresini periyodik olarak algılaması (dinlemesi) ve birincil kullanıcı aktif olduğunda başka bir kanala geçmesi ya da herhangi bir kanal tekrar boşalana kadar veri iletimi gerçekleştirmeksizin beklemesi ile mümkün hale gelebilmektedir. İlişkili olarak ikincil ağda yüksek veri iletim miktarlarına erişebilmek için birincil kullanıcıların sıklıkla aktif oldukları bölgelerden kaçınmak önemli bir husustur. Bu amaçla, herhangi bir ikincil kullanıcının girişim (G) alanında yer alan her bir birincil kullanıcıya ait aktivite değerleri listesi şöyle tanımlanabilir:

$$G_{IK_q} = \{Akt(BK_i) | i \leq N, q \leq M, \|BK_i - IK_q\| \leq \min(R_i^{BK}, R_q^{IK})\} \quad (7)$$



Şekil 10. Sistem modeli

Yukarıda verilen formülde $Akt(BK_i)$, BK_i ile simgelenen birincil kullanıcının aktivite değerini; $\|BK_i - IK_q\|$, BK_i ve IK_q ile simgelenen ikincil kullanıcı arasındaki Öklit mesafesini; R_i^{BK} , BK_i 'nin kapsama alanı yarıçapını; R_q^{IK} , IK_q 'nin kapsama alanı yarıçapını; G_{IK_q} , IK_q 'nin girişim alanıyla kapsama alanları çakışan birincil kullanıcıları içeren IK_q 'ya ait girişim listesini ifade etmektedir. Formül 7 aracılığıyla IK_q ve IK_r arasındaki iletim bağlantısını (transmission link) etkileyen tüm birincil kullanıcıların listesi şu şekilde elde edilebilir:

$$G_{IK_{q,r}} = G_{IK_q} \cup G_{IK_r} \quad (8)$$

Şekil 10 toplamda iki kanalın mevcut bulunduğu, iki adet birincil ve beş adet ikincil kullanıcının yer aldığı örnek bir Tasarsız Bilişsel Radyo Ağı topolojisini tasvir etmektedir. IK_1 , herhangi bir birincil kullanıcının kapsama alanında bulunmamakta ve dolayısıyla birincil kullanıcı aktivitelerinden bağımsız olarak herhangi bir kanalı kullanabilmektedir. IK_2 , IK_3 ve IK_5 'in yüksek birincil kullanıcı aktivitesi bölgelerinde konumlandığı söylenebilir. Çünkü bu kullanıcıların girişim alanları her iki birincil kullanıcının kapsama alanlarıyla kesişmiştir. Diğer taraftan IK_4 için bağlantı mevcudiyeti olasılığının

(probability of link availability) IK_2 , IK_3 ve IK_5 'e göre daha yüksek olduğu ifade edilebilir. Bunun nedeni, IK_4 'ün kanal c_1 'i kanal c_2 'nin BK_1 tarafından ya da kanal c_2 'yi kanal c_1 'in yine BK_1 tarafından tahsis edildiği durumlarda kullanabilme fırsatına sahip olmasıdır.

Birincil kullanıcı aktivitesi, açık-kapalı mekanizmasına göre modellenmiştir [59]. Herhangi bir t anında bir birincil kullanıcı aktif veya pasif durumdadır. Diğer bir ifade ile ya veri iletimi yapmaktadır (açık) ya da yapmamaktadır (kapalı). Dolayısıyla t anında bu kullanıcıya mümkün olan açık ($s_{BK}^{açık}$) veya kapalı ($s_{BK}^{kapalı}$) durumlarından yalnızca birisi atanır:

$$s_{BK}^{açık}(t) = \begin{cases} 1, & BK \ t \text{ anında aktifse} \\ 0, & BK \ t \text{ anında pasifse} \end{cases} \quad (9)$$

$$s_{BK}^{kapalı}(t) = 1 - s_{BK}^{açık}(t) \quad (10)$$

Ortalama açık kalma süresi ($\mu_{BK}^{açık}$) ile ortalama kapalı kalma süresinin ($\mu_{BK}^{kapalı}$) verilmesi koşuluyla birincil kullanıcıların açık ve kapalı kalma süreleri üssel olarak dağıtılmıştır (exponentially distributed). Herhangi bir t anında $s_{BK}^{açık}$ ve kapalı $s_{BK}^{kapalı}$ durumlarının beklenen değerleri (expected value) $\mu_{BK}^{açık}$ ve $\mu_{BK}^{kapalı}$ ile ilişkili olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

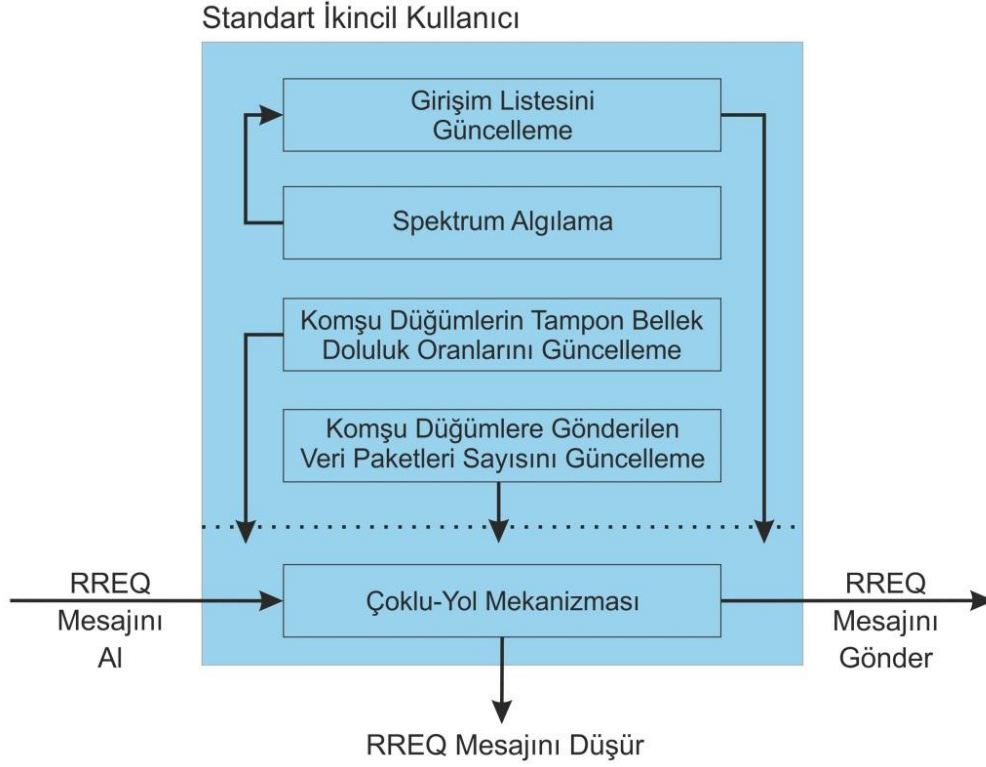
$$P^{açık}(t) = \mathbb{E}[s_{BK}^{açık}(t)] = \frac{\mu_{BK}^{açık}}{\mu_{BK}^{açık} + \mu_{BK}^{kapalı}} \quad (11)$$

$$P^{kapalı}(t) = \mathbb{E}[s_{BK}^{kapalı}(t)] = 1 - \mathbb{E}[s_{BK}^{açık}(t)] \quad (12)$$

Formül 11'de verilen $P^{açık}(t)$ herhangi bir t anında birincil kullanıcının aktif olma olasılığını belirtirken Formül 12'de verilen $P^{kapalı}(t)$ pasif olma olasılığını ifade etmektedir.

İkincil kullanıcılar üzerindeki tampon bellek kapasitesi çalışmamızda kullandığımız önemli bir kavram olup düğümler tarafından gönderilmek üzere alınan veri paketlerinin depolanabileceği tüm bellek miktarını belirtmektedir. Komşu düğümlerin boş tampon bellek kapasitesine bağlı olarak kaynak ve hedef düğümler arasında alternatif yollar

oluşturulabilmektedir. Tez kapsamında tüm ikincil kullanıcıların tampon bellek kapasitelerinin sabit ve aynı olduğu varsayılmıştır.



Şekil 11. Standart bir ikincil kullanıcı üzerindeki temel rotalama işlevleri

2.2. Önerilen Hibrit Çok-Yollu Rotalama Algoritması

Öncelikle önerilen yöntemin temel yapıtaşları konumundaki atomik metriklerin tanımları ve tasarımsal ayrıntıları açıklanmıştır (Bölüm 2.2.1). Devamında yol seçiminde karar verme sürecini etkileyen hibrit fayda fonksiyonunun atomik metriklerin yardımıyla türetilmesine değinilmiştir (Bölüm 2.2.2). Rota keşif aşamasında tespit edilen aday yolların sayısını azaltan farklı yöntemler ile kaynak ve hedef düğümler arasında bulunan tüm kararlı ve güvenilir yolların değerlendirilmesi Bölüm 2.2.3'te ele alınmıştır. Son olarak Bölüm 2.2.4'te rota devamlılığını sağlayacak rota bakımına yer verilmiştir. Bu bölümde ve alt başlıklarında yer alan rotalama sürecine dair temel işlevler ile standart bir ikincil kullanıcı arasındaki ilişki Şekil 11'de gösterilmiştir.

2.2.1. Atomik Metrikler

2.2.1.1. Rota Kararlılığı

Bilişsel Radyo cihazları girişim alanlarındaki farklı aktivite değerlerine sahip birincil kullanıcıları izlemekle yükümlüdür. Buradan hareketle ikincil kullanıcılar birincil kullanıcıların kapsama alanlarında hiç etkilenmemiş ya da minimum düzeyde etkilenen yolları tercih etme yoluna gideceklerdir. Dolayısıyla spektrum algılama işlevi Bilişsel Radyo Ağlarının ana işlevlerinden olup tüm ikincil kullanıcılar tarafından gerçekleştirilmektedir. Algılama sürecine bağlı olarak ikincil kullanıcılar tarafından birincil kullanıcılara dair aktivite geçmişi oluşturulmakta ve geçmiş gözlemlerden dayalı birincil kullanıcı aktivite değerleri tanımlanmaktadır. Birincil kullanıcıların aktif olma olasılığına Bölüm 2.1' de değinilmişti.

Standart bir ikincil düğüm, lisanslı kullanıcılar tarafından hangi kanalların daha az kullanıldığını ortaya koymak ve birincil kullanıcılara girişim olasılığını en aza indirmek için bu kullanıcıların listesini etkinlik değerleriyle birlikte güncellemek zorundadır. Her bir ikincil kullanıcı kendi girişim listesini tutar ve bu listeyi birincil kullanıcılarca yoğun bir şekilde kullanılan bölgelerin mümkünse etrafından dolanmasını (by-pass) ya da en az aktif bölgelerden geçilmesini sağlamak üzere rota kararlılığı metriğine uygular.

Takip edilen yol üzerinde her bir iletişim bağlantısı için Formül 7'de tanımlanmış girişim listesi ilgili RREQ mesajına iliştilir (piggybacking). Girişim listesi aracılığıyla mevcut rotanın birincil kullanıcı aktivitesi açısından kararlı olup olmadığı tüm ara düğümler tarafından değerlendirilir. Değerlendirme süreci için $t_{i,i+1}$, IK_i ve IK_{i+1} düğümleri arasında ve R rotası üzerinde bulunan iletişim bağlantısı olsun ve $1 \leq i \leq S$ eşitsizliği sağlansın. Burada S değeri R rotasındaki ikincil kullanıcıların sayısını vermektedir. Bu doğrultuda $t_{i,i+1}$ bağlantısına etkileyen birincil kullanıcıların ortalama aktivite değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

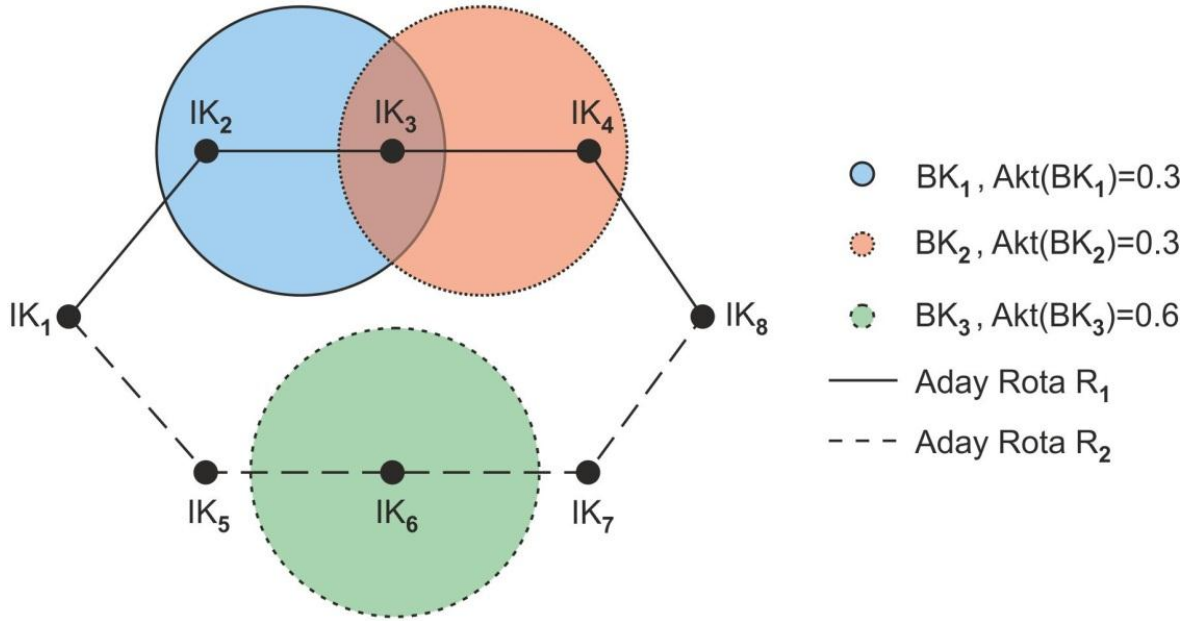
$$\mu(t_{i,i+1}) = \frac{\sum_{k=1}^N Akt(BK_k)}{N} \quad (13)$$

Verilen formülde $Akt(BK_k)$, bağlantı üzerinde etkisi bulunan N tane birincil kullanıcıdan k . birincil kullanıcıya ait aktivite değerini ifade etmektedir. Eğer $t_{i,i+1}$ linki

BK_k 'nin kapsama alanında bulunmuyorsa $G_{IK_i,i+1}$ girişim listesindeki $Akt(BK_k)$ değerine sıfır atanır. Bağlantılı olarak IK_1 kaynak düğümünden IK_{S-1} ara ya da hedef düğümüne kadar R rotası üzerindeki rota kararlılığı değeri aşağıdaki gibi formüle edilmektedir:

$$m_{kararlılık}(R) = \prod_{i=1}^{S-1} (1 - \mu(t_{i,i+1})) \quad (14)$$

Formül 14'te verilen rota kararlılığı metriği $m_{kararlılık}(R)$ değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Metrik değerinin 1'e yaklaşması R rotasının birincil kullanıcı aktivitesinden daha az etkilendiğine ve kaynak – hedef ikilisi arasında tercih edilebilir bir yol olduğuna atıf yapmaktadır.



Şekil 12. Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında Rota Kararlılığı

Şekil 12'de verilen örnek bir topolojide 8 ikincil kullanıcı ve aktivite değerleri sırasıyla 0.3, 0.3 ve 0.6 olan 3 birincil kullanıcı bulunmaktadır. IK_1 'de oluşturulan bir RREQ mesajı iki farklı yol izleyerek IK_8 'e ulaşmaktadır. Tüme gönderim ile iletilen RREQ mesajının her iki kopyasına aday yollar üzerinde ilerlerken her bir sekmede rota kararlılığı bilgisi iliştilir (Tablo 1 ve Tablo 2). Buna göre Rota R_1 ve Rota R_2 'ye ilişkin hedef düğüm IK_8 'de $m_{kararlılık}(R_1)$ ve $m_{kararlılık}(R_2)$ metrik değerleri sırasıyla 0.52 ve 0.64

olarak hesaplanır. Bulunan değerler R_2 'nin rota kararlılığı açısından en uygun yol olduğunu ifade etmektedir. Rota R_1 için elde edilen sonucun düşük çıkmasının temel nedeni RREQ mesajının BK_1 ve BK_2 birincil kullanıcılarının aynı anda aktif olabilecekleri iki bölgeden geçmesidir. Birincil kullanıcı BK_3 , BK_1 ve BK_2 'den daha büyük bir aktivite değerine sahip olmasına rağmen hedef düğüm, hesaplanan daha yüksek rota kararlılığı metrik değerine bağlı olarak en uygun rota seçiminde R_2 'yi tercih etmektedir.

Tablo 1. Aday Rota R_1 üzerinden IK_8 'e ulaşan RREQ mesajı

İliştirilmiş Rota Kararlılığı Bilgisi			
Bağlantı	Birincil Kullanıcı Aktivite Değerleri		
	BK_1	BK_2	BK_3
$t_{1,2}$	0.3	0	0
$t_{2,3}$	0.3	0.3	0
$t_{3,4}$	0.3	0.3	0
$t_{4,8}$	0	0.3	0

Tablo 2. Aday Rota R_2 üzerinden IK_8 'e ulaşan RREQ mesajı

İliştirilmiş Rota Kararlılığı Bilgisi			
Bağlantı	Birincil Kullanıcı Aktivite Değerleri		
	BK_1	BK_2	BK_3
$t_{1,5}$	0	0	0
$t_{5,6}$	0	0	0.6
$t_{6,7}$	0	0	0.6
$t_{7,8}$	0	0	0

2.2.1.2. Tıkanıklık Farkındalığı

Birincil kullanıcı aktivitesini temel alan rota kararlılığı hususu tek başına her daim tüm alternatif yollar arasından en kararlı olanının seçimini sağlayamayabilir. Çünkü en kararlı olarak nitelenen rota, kaynak ve hedef düğümler arasında birden fazla veri akışının gerçekleştirildiği durumlarda birçok ara ikincil kullanıcı tarafından tercih edilecek ve sonuç olarak bahsedilen rota üzerindeki veri trafiği yoğunluğu artacaktır. Bu nedenle

sadece birincil kullanıcı aktiviteleri için değil aynı zamanda ikincil ağda tıkanıklığı önlemek üzere olası yollar üzerindeki ikincil kullanıcılara ait veri trafiği için de gözlem yapılmalıdır. Bu doğrultuda önerilen yöntem kapsamında tıkanıklık farkındalığı da göz önünde bulundurulmuştur.

İkincil ağ trafiğinden kaynaklı bir tıkanıklık için en önemli belirti, ikincil kullanıcılar üzerindeki tampon belleklerin (buffer) doluluk oranlarıdır. Belirtildiği üzere şayet ikincil kullanıcılar rotalama için sadece minimum düzeyde birincil kullanıcı aktivitesinin gözlemlendiği belirli bir rotayı seçerse bu rota üzerindeki ara düğümlerin tampon bellekleri hızla veri paketleriyle dolacak ve hatta bu veri paketlerinin bir kısmı bellek tamamıyla dolu olduğundan düşürülecektir. Bir ara düğüm IK_i üzerinde tampon bellek doluluk oranı şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\beta(IK_i) = \frac{buf(IK_i)}{BUFLEN(IK_i)} \quad (15)$$

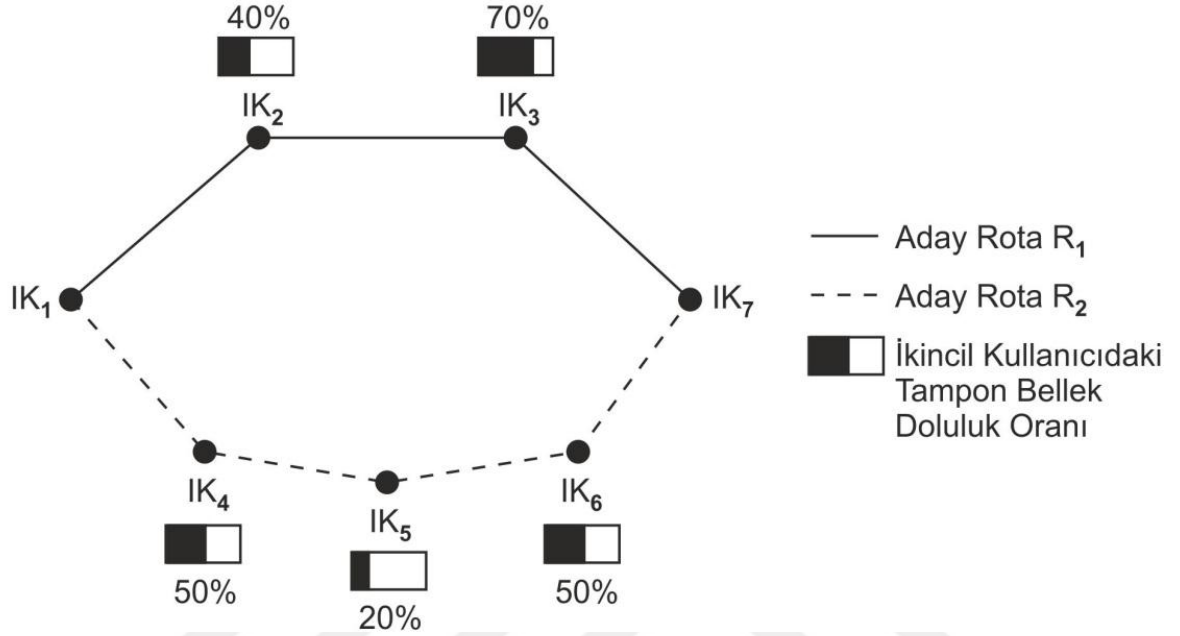
Formül 15'te verilen $buf(IK_i)$, IK_i kullanıcılarına ait tampon bellekteki mevcut paketlerin sayısını ve $BUFLEN(IK_i)$ ise yine aynı kullanıcının sahip olduğu tampon bellek uzunluğunu ifade etmektedir. IK_2 'den IK_s 'ye kadar R rotası boyunca RREQ mesajına iliştirilen tampon bellek doluluk oranı bilgisi aşağıdaki formüle göre toplanacak ve IK_s düğümünde hesaplanacaktır:

$$m_{tıkanıklık}(R) = \prod_{i=2}^s (1 - \beta(IK_i)) \quad (16)$$

Yukarıdaki formül için $0 \leq \beta(IK_i) < 1$ eşitsizliği geçerli kılınmıştır. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilir: $\beta(IK_i)$ 'nin üst sınırı ile bağlantılı olarak mevcut düğümde herhangi bir boş tampon bellek bulunmasa dahi hesaplama doğruluğu maksadıyla boş tampon bellek uzunluğunun en az bir olduğu varsayılır. Aksi takdirde hesaplamanın gerçekleştirildiği düğümde tampon bellek tamamen doluysa metrik sıfır değerini alır.

Belirtilen durum, takip edilen rotayı oluşturan önceki düğümlerde metrik değerleri minimum seviyelerde olsa bile diğer alternatif yollara kıyasla toplamda daha az tıkanıklığa sahip bir yolun gözden kaçmasına neden olacaktır. Bu nedenle önlem olarak değinilen varsayım aracılığıyla Formül 16 için $0 < m_{tıkanıklık}(R) \leq 1$ eşitsizliğinin geçerli olması

sağlanmıştır. Rota R üzerinde tampon bellek doluluk oranları yükseldikçe metrik değeri, yüksek tıkanıklık olasılığının belirtisi olan sıfıra yaklaşacak, fakat hiçbir zaman sıfır değerini almayacaktır.



Şekil 13. Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında Tıkanıklık Farkındalığı

Tıkanıklık farkındalığı için örnek bir ağ topolojisi Şekil 13'te gösterilmiştir. Her bir ara düğümün üzerinde yer alan kutucuklar yüzdesel olarak tampon bellek doluluk oranlarını ifade etmektedir. Rota R_1 iki ara düğümünden oluşurken Rota R_2 üzerinde üç ara düğüm bulunmaktadır. Her iki aday rota için IK_7 'de tıkanıklık farkındalığı ölçümü gerçekleştirilmektedir. Ölçüm sonucunda Rota R_1 ve Rota R_2 için $m_{tıkanıklık}(R_1)$ ve $m_{tıkanıklık}(R_2)$ metrik değerleri sırasıyla 0.18 ve 0.20 olarak bulunur. Birinci aday rotanın ikincisine kıyasla daha az sekme içermesine rağmen Rota R_2 'deki tüm rota boyunca tampon bellek doluluk durumunun Rota R_1 'inkinden daha iyi olduğu gözlemlenmektedir.

2.2.1.3. Rota Çeşitliliği

Rota kararlılığı ve tıkanıklık farkındalığı metrikleri veri paketlerinin her zaman aynı yollardan gönderilmesini önlemek için gerekli olan rota çeşitliliğini sağlayamamaktadır. Servis kalitesinde bozulmanın meydana gelmemesi koşuluyla rotalama süreci için daha

fazla iyileştirmenin kaydedilmesi, kaynak düğüm tarafından oluşturulan farklı veri akışlarının mümkün olduğunca farklı yollara intikal ettirilmesi ile sağlanabilir.

Ara bir ikincil düğüm, kullanımda olan bir rota üzerinden veri paketleri alabilir ve bu paketleri ilintili veri akışı kapsamında önceden belirlenmiş bir sonraki komşuya iletebilir. Ancak yeni kurulacak olan bir veya daha fazla veri oturumu aynı rotayı takip etmek zorunda kalırsa bu yoldaki tıkanıklık olasılığı artar. Bu doğrultuda ikincil kullanıcı tarafından komşularına gönderilen paket sayısının izlenmesi ve veri akışlarının az sayıda paket alan komşu düğümlere yönlendirilerek farklı rotaların kullanılması mümkün kılınabilmektedir. Rota R , IK_1 'den IK_S 'ye izlenilen yol ve bu yol üzerinde yer alan ara düğümler $1 < i < S$ eşitsizliğini sağlayan IK_i olarak simgelensin. Aşağıdaki gibi formüle edilen $\tau(IK_{i,1})$, R rotası üzerinde IK_i 'nin gönderdiği paketlerin ($\delta(IK_i)$) kaynak düğüm IK_1 'in gönderdiği pakete ($\delta(IK_1)$) oranını göstermektedir:

$$\tau(IK_{i,1}) = \frac{\delta(IK_i)}{\delta(IK_1)} \quad (17)$$

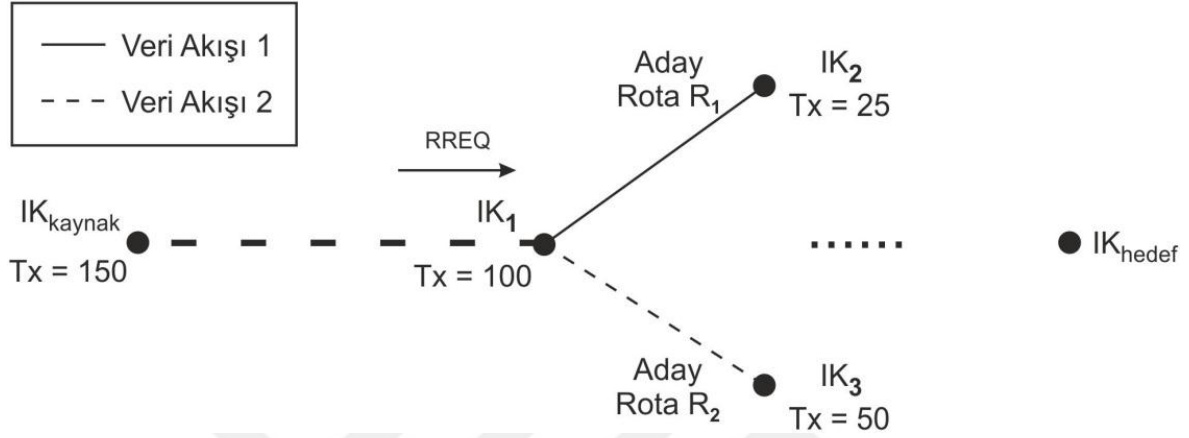
Gönderilen paketlere ilişkin söz konusu oran IK_2 'den IK_S 'ye kadar olan rota boyunca her düğümde RREQ mesajına iliştilir. Buradan hareketle rota çeşitliliği için gerekli olan metrik şu şekilde oluşturulmuştur:

$$m_{\text{çeşitlilik}}(R) = \prod_{i=2}^S (1 - \tau(IK_{i,1})) \quad (18)$$

Formül 18'teki $m_{\text{çeşitlilik}}(R)$, R rotası için IK_i düğümünde hesaplanan rota çeşitliliği metriği olup bu formül için $0 \leq \tau(IK_i) < 1$ eşitsizliği geçerli kılınmıştır. Rota çeşitliliği bağlamında ara düğümler daha fazla veri paketi yolladıkça metrik değeri sıfıra yaklaşmakta ve yeni oluşturulacak veri akışları için rotalama sürecinde önceden sıklıkla kullanılmış bu düğümlerin daha az tercih edilmesi, servis kalitesinden ödün vermemek kaydıyla üzerinden minimum düzeyde yönlendirme yapılan düğümlere öncelik verilmesi sağlanmaktadır.

Oran $\tau(IK_{i,1})$ 'in üst sınırı ile ilgili tartışma, Formül 15'te verilen $\beta(IK_i)$ 'nin üst sınırına dair sunulan açıklamaya benzerdir. Kaynak düğüm IK_1 ve ara düğüm IK_i 'nin gönderdiği veri paketleri sayısının aynı olduğu durumlarda yol çeşitliliği metrik değerinin

sıfır olmaması adına IK_i tarafından gönderilen paketlerin kaynaktan gönderilen paketlere göre bir eksik olduğu varsayılmıştır. Aksi halde IK_i dışında daha iyi metrik değerlerine sahip düğümleri barındıran R rotası diğer alternatif yollara göre toplamda en iyi rota çeşitliliğini sunsa dahi rota seçiminde göz önünde bulundurulmayacaktır.



Şekil 14. Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında Rota Çeşitliliği

Geliştirilen çok-yollu rotalama algoritması kapsamındaki yol çeşitliliğine dair örnek bir durum Şekil 14'te tasvir edilmiştir. Verilen mevcut duruma göre kaynak düğüm IK_{kaynak} ve hedef düğüm IK_{hedef} arasında iki farklı veri akışı / oturumu başlatılmış bulunmaktadır. Ayrıca, ara düğüm IK_1 100 adet, IK_2 25 adet ve IK_3 50 adet veri paketi iletilmiş durumdadır. Kaynak düğüm yeni bir veri akışı / oturumu için rota keşfi başlattıktan sonra RREQ mesajı ara düğüm IK_1 'e ulaştığında IK_1 'de Rota R_1 ve Rota R_2 için rota çeşitliliği metrik değerleri sırasıyla 0.27 ve 0.22 olarak hesaplanır. Rota R_2 daha düşük metrik değerine sahip olduğundan başlatılan yeni veri akışı için en uygun rota olarak R_1 belirlenir.

2.2.2. Atomik Metriklerden Hibrit Fayda Fonksiyonunun Türetimi

Önceki bölümde sunulan rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve rota çeşitliliğine özgü metrikler, önerilen hibrit çok-yollu rotalama algoritmasının (Hybrid Multi-Path Routing Algorithm – HyMPRo) atomik metrikleridir. Bu metrikler rota keşfi süreci yürütülürken ara bir düğüm BK_i üzerinde bir sonraki komşu düğümün seçimi için karar

verici olarak rol alan ve aşağıdaki şekilde tanımlanan bir hibrit fayda fonksiyonu altında birleştirilmiştir:

$$f_i(R) = \frac{[m_1 \cdot (e^{\prod_{j=1}^2 m_j}) \cdot (e^{\prod_{j=1}^3 m_j})]}{h} \quad (19)$$

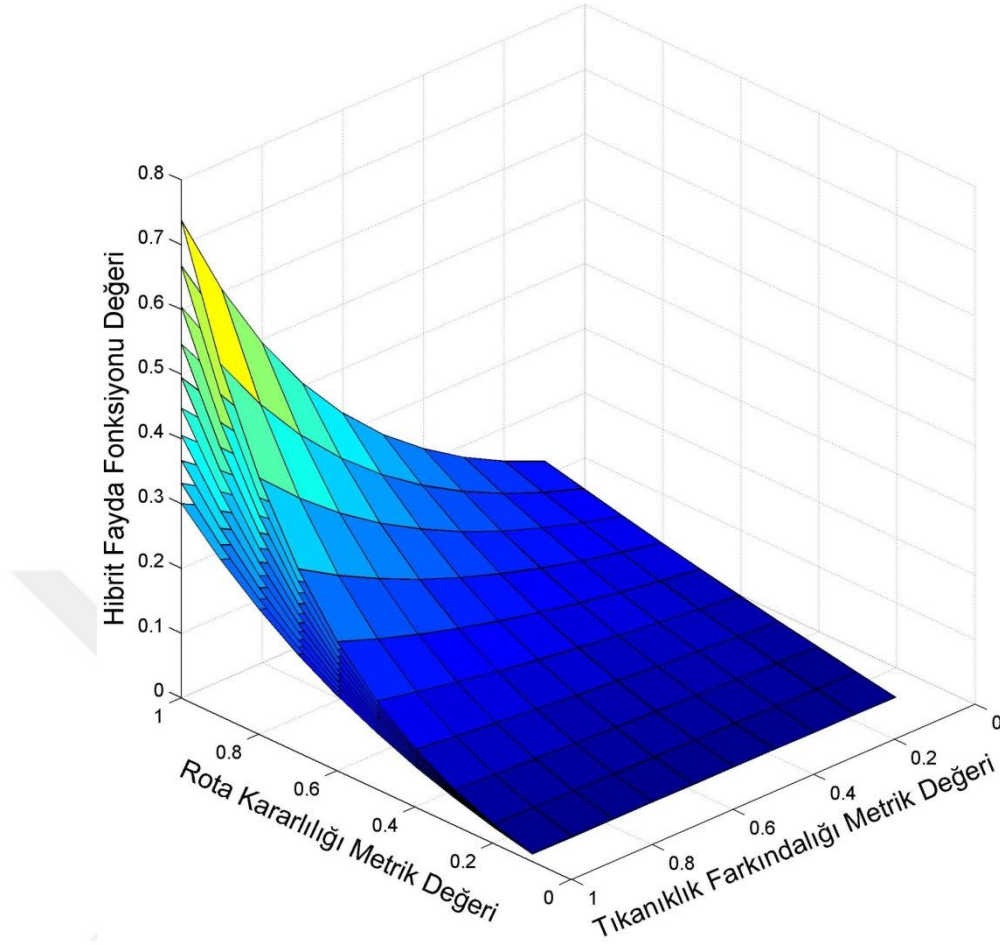
Verilen formülde h ile IK_i ara düğümüne kadar izlenen R rotasında bulunan IK_i dâhil olmak üzere tüm düğümlerin sayısı simgelenmiştir. Yine aynı R rotası için IK_i 'de hesaplanan $m_{kararlılık}(R)$, $m_{tıkanklık}(R)$ ve $m_{çeşitlilik}(R)$ metrik değerleri sırasıyla m_1 , m_2 ve m_3 olarak kısaltılmıştır.

Hibrit fayda fonksiyonu $f_i(R)$ 'nin teorik değeri 0 ile e^2/h arasında değişmektedir. Fonksiyona ilişkin apaçık bir çözümleme olarak aşağıda belirtilen tüm şartların sağlanması durumunda m_1 , m_2 ve m_3 metrik değerlerinin her biri için 1 değeri hesaplanacak ve sonuç olarak $f_i(R)$ e^2 olarak hesaplanacaktır:

- Kaynak ve hedef düğümler arasındaki herhangi bir aday yol üzerinde bulunan IK_i kaynak düğümden bir sekme uzaklıktadır.
- Kaynak ve IK_i düğümleri çevresinde herhangi bir birincil kullanıcı aktivitesi gözlemlenmemektedir.
- IK_i 'ye ait tampon bellek tamamen boştur ve bu düğüm kaynak düğüm tarafından veri iletimi için daha önce hiç seçilmemiştir.

Formül 19'un payındaki ikinci çarpan $e^{\prod_{j=1}^2 m_j}$ tıkanıklık farkındalığı katkısına atıfta bulunurken $e^{\prod_{j=1}^3 m_j}$ çarpanı hesaplanan $f_i(R)$ değeri içindeki rota çeşitliliğini belirlemektedir.

Geliştirilen hibrit fayda fonksiyonu artan bir fonksiyon olup m_1 , m_2 ve m_3 metrikleri arasında $m_3 < m_2 < m_1$ şeklinde gösterilebilecek bir öncelik ilişkisi kurulmaktadır. Diğer bir ifade ile metrik değerlerindeki aynı ve çok küçük değişimler bağlamında rota kararlılığı metriği tıkanıklık farkındalığı metriğine kıyasla daha fazla katkıda bulunmaktadır. İlintili olarak fayda fonksiyonuna en düşük katkıyı rota çeşitliliği sunmaktadır.



Şekil 15. Metrikler ve hibrit fayda fonksiyonu ilişkisi

Sunulan öncelik ilişkisine dair gerekçelendirme, öncelikle tıkanıklık farkındalığı ve rota çeşitliliği hususlarının rota kararlığına bağımlılığı temelinde ele alınmıştır. Çünkü bir Bilişsel Radyo Ağında rotalama sürecinin ana amacı servis kalitesi bozunumuna yol açmaksızın birincil kullanıcı aktivitelerinden en az düzeyde etkilenen rota seçimini gerçekleştirmektir. Bu nedenle rota keşfi mekanizmasının en yüksek önceliğe sahip bileşeni olarak rota kararlılığı belirlenmiştir.

İkinci olarak hem birincil hem de ikincil ağlarda genel veri trafiği artarsa seçilen rota kapsamındaki düğümlerin boş tampon bellek miktarları önem kazanır. Bu durumda, yeni oluşturulan bir veri akışına / oturumuna ait veri paketlerini fazla miktarda boş tampon bellek barındıran düğümlerden iletmek daha rasyonel bir eylemdir. Aksi takdirde bu yeni akışın veri paketlerinin yüksek trafik yükü olan bir bölgedeki düğümler tarafından düşürülmesi riskiyle karşı karşıya kalınır. Üçüncü ve son olarak iki aday yol, rota kararlığı ve tıkanıklık farkındalığı açısından benzer özellikler ve aynı niceliksel değerleri taşıyorsa

rota çeşitliliği ölçümü ön plana çıkar. Yani, yeni oluşturulan veri akışı önceden en az miktarda veri paketi gönderen veya hiç paket göndermeyen düğümler üzerinden yönlendirilir.

Kaynak düğümün hedef düğümden 10 sekme uzaklıkta olması durumunda ($h = 10$) hibrit fayda fonksiyonunun metriklerle olan ilişkisi 4 boyutlu olarak Şekil 15’te verilmiştir. Grafikte hibrit fayda fonksiyonunun en düşük değerinden en yükseğine doğru olmak üzere gösterilen 10 yüzeyden her biri rota çeşitliliği metriği değerinin 0.1’lik artışına karşılık gelmektedir. Metrikler arasındaki öncelik ilişkisine bağlı olarak rota kararlığı metriği için kaydedilen birim miktardaki artış, hem tıkanıklık farkındalığı hem de rota çeşitliliği metrikleri için aynı miktardaki artışa göre hibrit fayda fonksiyonu değerinde etkisini daha fazla göstermektedir. Bahsedilen etkiyi vurgulamak adına Şekil 15’ten elden edilen ve tamamı Ek 1’de verilen verilerden oluşturulmuş örnek bir duruma Tablo 3’te değinilmiştir.

Tablo 3. Metrikler arasındaki öncelik ilişkisine dair örnek bir durum

m_1	m_2	m_3	$f_i(R)$
0.4	0.4	0.4	0.0500
0.5	0.4	0.4	0.0662
0.4	0.5	0.4	0.0529
0.4	0.4	0.5	0.0508

Başlatılmak istenen veri akışı v için kaynak düğüm IK_k tarafından oluşturulan RREQ mesajı, hedef düğüm IK_h ’ye doğru farklı yollar takip eder. İzlenen rotaya bağlı olarak iliştilmiş farklı metrik bilgilerini içeren orijinal RREQ mesajının ara düğümler tarafından elenmeyen bütün kopyaları hedef düğüme ulaştıktan sonra her bir aday yolun hibrit fayda fonksiyonu değeri hesaplanır:

$$r = \arg_j \max \{f_h^v(R_j)\}, \quad 1 \leq j \leq n \quad (20)$$

Formül 20’de verilen $f_h^v(R_j)$, rota keşfi kapsamında veri akışı v için tespit edilen aday rota R_j ’nin hedef düğüm IK_h ’de bulunan hibrit fayda fonksiyonu değerini ifade etmektedir. Tüm aday yollar R_1, \dots, R_n arasından en yüksek fayda fonksiyonu değerine sahip rota r seçilir ve rotalama sürecinde kullanılmaya başlanır.

2.2.3. Çoklu Yol Mekanizması

Rota keşif aşaması sırasında kaynak düğümde oluşturulan RREQ kontrol mesajının birden fazla yol üzerinden iletimi, mesajı yönlendirecek Bilişsel Radyo cihazının komşuluğundaki düğümlerin tamamına gönderilmesi ile sağlanır. Bu yöntem tüme gönderim olarak adlandırılmaktadır. Tüme gönderim gerçekleştirilirken RREQ mesajının çevrime (cycle) sokulmamasına, diğer bir ifadeyle düğümlerin aynı mesajı birden fazla kez iletmemesine dikkat edilir ve bu gibi durumlarda çevrime giren RREQ mesajı ağdan atılır.

Nitekim Bölüm 1’de değinilen çoğu çalışmada olduğu gibi ağ içinde sürekli olarak tüme gönderim yapılması RREQ kontrol mesajlarını içeren ağır veri trafiği yükünün oluşmasına, bu mesajların düğümler arasında sürekli olarak ileri-geri gönderilmesine ve servis kalitesi seviyesinin kademeli olarak düşmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda RREQ mesajının kaynak düğümde hedef düğüme birden fazla yol üzerinden geçişi bir mekanizma tarafından kontrol altına alınmalıdır.

Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarına özgü önemli karakteristik özellikleri metrikler doğrultusunda tanımlamanın yanı sıra çalışma kapsamında kaynak ve hedef düğümler arasında olası tüm yolları değerlendirmek üzere çoklu yol mekanizması önerilmiştir. Geliştirilen yöntem ile sadece yerel en iyi yol değil, aynı zamanda dinamik ağ kullanıcılarının değişken aktivitelerinden etkilenen diğer tüm aday yollar dikkate alınmaktadır. Ayrıca, aday yollara ilişkin hesaplamalar / değerlendirmeler hem ara düğümlerde hem de hedef düğümde gerçekleştirilmektedir. Kullanılan dağıtık hesaplama sayesinde üç farklı kazanım elde edilmektedir:

- (1) Tüm aday yolların ara düğümlerde de değerlendirilmesiyle hedef düğüm üzerindeki aşırı hesaplama yükünün önüne geçilmektedir.
- (2) Birçok aday yol düşük hibrit fayda fonksiyonu değerine sahip olduğundan gereksiz olarak nitelendirilebilecek bu tip yolların hedef düğümde en iyi rotaya karar verilmesi öncesinde elenmesi sağlanmaktadır.
- (3) Kaynak düğümde oluşturulan RREQ mesajına ait ve farklı yollar üzerinden iletilen kopyaların sayısı azaltılmakta, dolayısıyla kontrol mesajlarını içeren veri trafiği yükü hafifletilmektedir.

Standart bir ikincil kullanıcı üzerinde düzenli olarak güncellenen ortalama birincil kullanıcı aktivitesi, tampon bellek doluluk oranı ve bu kullanıcının komşu düğümlere gönderdiği paketlerin sayısı rota keşfi sırasında izlenen yol üzerinde bulunan önceki ara

düğümünün yaptığı gibi iletilmekteki RREQ mesajına iliştilir. Bir ara düğüm IK_i 'nin IK_{i-1} 'den aldığı RREQ mesajına iliştilirilmiş bilgilere dair veri yapısı aşğıdaki şekilde formüle edilebilir:

$$RREQ_{IK_{i-1}} = \left[\begin{array}{l} (\mu(t_{1,2}), \mu(t_{2,3}), \dots, \mu(t_{i-1,i})), \\ (\beta(IK_1), \beta(IK_2), \dots, \beta(IK_{i-1})), \\ (\delta(IK_1), \delta(IK_2), \dots, \delta(IK_{i-1})) \end{array} \right] \quad (21)$$

Veri yapısındaki $\mu(t_{i-1,i})$ ve $\beta(IK_{i-1})$, sırasıyla Formül 13 ve Formül 15'te tanımlandığı gibidir. Verilen $\delta(IK_{i-1})$ ise ikincil kullanıcı IK_{i-1} tarafından komşu düğümlere gönderilmiş toplam paket sayısını ifade etmektedir. Gönderilen $RREQ_{IK_{i-1}}$ mesajındaki tüm bilgiler IK_i tarafından çıkarılır. Bu kullanıcıya ait güncel bilgiler de kullanılarak rota kararlılığı (14) ve tıkanıklık farkındalığı (15) metrikleri hesaplanır. Ayrıca, her bir ara düğümün gönderdiği paketlerin sayısının kaynak düğüm IK_1 'in gönderdiği paketlerin sayısına oranı tespit edilir (17) ve rota çeşitliliği metrik değeri çıkarılır.

Devamında IK_i , bulunan atomik metrik değeri aracılığıyla takip edilen R rotası için anlık hibrit fayda fonksiyonu $f_i^{anlık}(R)$ değeri hesaplar ve önceki yolların değerlendirilmeleri sonucunda kaydedilmiş mevcut fonksiyon değeri $f_i^{mevcut}(R)$ ile kıyaslar. Eğer anlık fonksiyon değeri mevcut değerden büyük çıkarsa $f_i^{anlık}(R)$ 'deki sonucun $f_i^{mevcut}(R)$ 'ye ataması gerçekleştirilir. Diğer bir ifade ile eski değerin üzerine bulunan en güncel ve en iyi fayda fonksiyonu değeri yazılır.

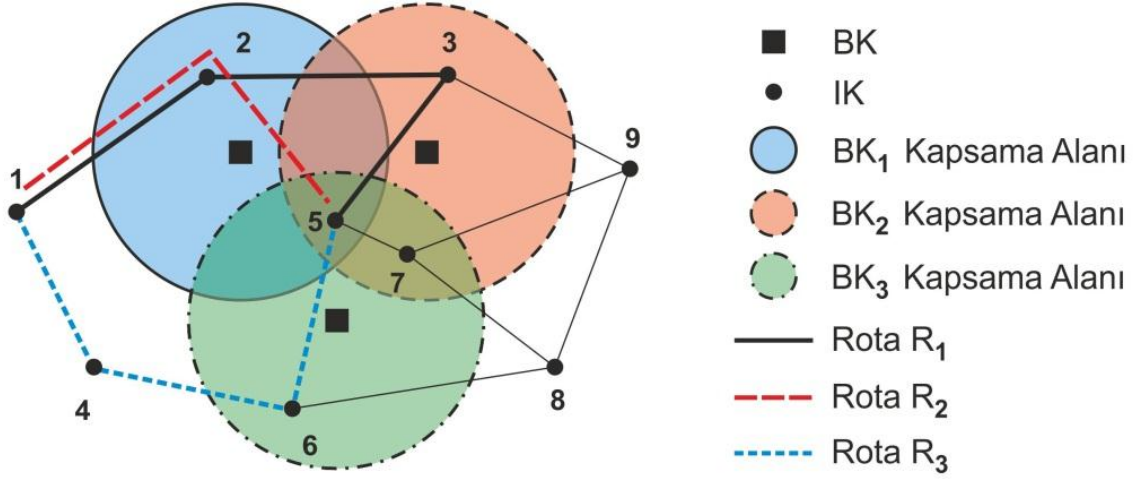
Nitekim mevcut değerden daha düşük bir değerle karşılaşırsa iletilmekte olan $RREQ_{IK_{i-1}}$ mesajı ağdan atılır ve bir sonraki komşu düğümlere gönderilmez. Çünkü öncesinde rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve rota çeşitliliği açısından değerlendirmeye tabi tutulmuş daha iyi bir yol tespit edilmiştir. Anlık değerin mevcut değerden büyük çıkması durumunda ise IK_i 'ye ait güncel ortalama birincil kullanıcı aktivitesi, tampon bellek doluluk oranı ve komşu düğümlere gönderilen paket sayısı bilgisi $RREQ_{IK_{i-1}}$ 'e eklenir ve iliştilirilmiş yeni bilgileri içeren $RREQ_{IK_1}$ komşu düğümlere yönlendirilir:

$$RREQ_{IK_i} = \left[\begin{array}{l} (\mu(t_{1,2}), \mu(t_{2,3}), \dots, \mu(t_{i-1,i}), \mu(t_{i,i+1})) \\ (\beta(IK_1), \beta(IK_2), \dots, \beta(IK_{i-1}), \beta(IK_i)) \\ (\delta(IK_1), \delta(IK_2), \dots, \delta(IK_{i-1}), \delta(IK_i)) \end{array} \right] \quad (22)$$

Algoritma 1: Standart İkincil Kullanıcı IK_i Üzerinde Çalıştırılan Hibrit Çok-Yollu Rotalama Algoritması

1. Rota R üzerinden $RREQ_{IK_{i-1}}$ mesajını al
 2. $RREQ_{IK_{i-1}}$ 'ye iliştirilmiş Rota R dâhilindeki önceki düğümlere ait ortalama birincil kullanıcı aktivitesi bilgisini çıkar
 3. IK_i 'deki güncel ortalama birincil kullanıcı aktivitesi bilgisini kullanarak $m_{kararlılık}(R)$ metrik değerini hesapla
 4. $RREQ_{IK_{i-1}}$ 'ye iliştirilmiş Rota R dâhilindeki önceki düğümlere ait tampon bellek doluluk oranı bilgisini çıkar
 5. IK_i 'deki güncel tampon bellek doluluk oranı bilgisini kullanarak $m_{farkındalık}(R)$ metrik değerini hesapla
 6. $RREQ_{IK_{i-1}}$ 'ye iliştirilmiş Rota R dâhilindeki önceki düğümlere ait komşu düğümlere gönderilen paket sayısı bilgisini çıkar
 7. IK_i 'deki güncel komşu düğümlere gönderilen paket sayısı bilgisini kullanarak $m_{çeşitlilik}(R)$ metrik değerini hesapla
 8. Rota R için $f_i^{anlık}(R)$ değerini hesapla
 9. **Eğer** $f_i^{anlık}(R) > f_i^{mevcut}(R)$ ve $RREQ_{IK_{i-1}}^{TTL} < TTL_{standart}$ **ise başla**
 10. $f_i^{mevcut}(R) \leftarrow f_i^{anlık}(R)$
 11. $RREQ_{IK_{i-1}}^{TTL} \leftarrow RREQ_{IK_{i-1}}^{TTL} + 1$
 12. $RREQ_{IK_{i-1}}^{TTL}$ mesajını güncelle ve $RREQ_{IK_i}^{TTL}$ mesajını oluştur
 13. $RREQ_{IK_i}^{TTL}$ mesajını IK_{i-1} dışında diğer tüm komşu düğümlere gönder
 14. **Değilse**
 15. $RREQ_{IK_{i-1}}$ mesajını ağdan düşür
 16. **Eğer son**
-

Standart ikincil kullanıcı IK_i tarafından çalıştırılan Hibrit Çok-Yollu Rotalama Algoritmasındaki tüm işlemler Algoritma 1'de verilmiştir. Çoklu yol mekanizmasına örnek teşkil etmesi açısından Şekil 16'da tasvir edildiği üzere IK_1 tarafından bir RREQ mesajı tüme gönderim yöntemi kullanılarak Rota R_1 , Rota R_2 ve Rota R_3 üzerinden iletilmektedir. Belirtilen rotalar için bu mesajın kopyalarının ara düğüm IK_5 'e varış zamanları sırasıyla T_1, T_2 ve T_3 olup $T_1 < T_2 < T_3$ eşitsizliği verilmektedir.



Şekil 16. Geliştirilen çoklu yol mekanizması için örnek bir durum

Mesajın iletiildiği rotalara dair IK_5 'te hesaplanan hibrit fayda fonksiyonu değerlerinin şu ilişkiye sahip olduğunu varsayalım: $f_5(R_1) < f_5(R_3) < f_5(R_2)$. Rota R_1 üzerinden RREQ mesajına ait kopyanın diğer kopyalara kıyasla daha erken alınmasından dolayı her hâlükârda sonraki komşu düğümlere iletimi gerçekleştirilir. Fakat Rota R_3 aracılığıyla IK_5 'e varan RREQ mesajı, bu rota için bulunan fayda fonksiyonu değerinin Rota R_2 'e ait değerden düşük olması nedeniyle ağdan atılır. Bu durumda RREQ mesajının iki kopyası iletmeye devam edilirken birisi komşu düğümlere iletilmeden düşürülür. Ayrıca hesaplanan $f_5(R_2)$, sonraki muhtemel kıyaslamalar için en iyi hibrit fayda fonksiyonu $f_5^{mevcut}(R)$ değeri olarak kaydedilir.

2.2.4. Geliştirilen Hibrit Çok-Yollu Rotalama Algoritması için İyileştirme

Bilgisayar ağlarında veri ve kontrol paketlerinin iletimi esnasında üzerinden geçilen sekme sayısını kısıtlamaya yönelik önemli bir işlevsellik bulunmaktadır. Yaşam süresi (TTL) olarak adlandırılan RREQ mesajlarına ait bu öznitelik sayesinde RREQ mesajlarının sonsuza kadar ağ içinde dolanımının önüne geçilmektedir. Genellikle kullanılan Bilişsel Radyo cihazının donanımına ve/veya işletim sistemine bağlı olarak TTL değeri 64, 128, 256 gibi varsayılan değerlerden biri olarak belirlenir.

Paketler kaynak ve hedef düğümler arasında yol alırken en başta sıfır değeri değerini alan RREQ mesajı içindeki TTL, her bir sekme üzerinden geçildikçe değeri bir artırılır. Bu değer belirlenen standart TTL değerinden büyük olduğunda paket ağdan düşürülür. Nitekim standart TTL değerleri özellikle Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında rota keşfi süreci için gereksiz hesaplamaları da beraberinde içerecek daha uzun yolların tespitine neden olmaktadır. Bu bağlamda, çoklu yol mekanizmasının daha verimli çalışmasına yönelik RREQ mesajlarının TTL özneliği üzerinde bir iyileştirme önerilmiştir.

Standart TTL değerlerinin altında yeni bir değer belirlemek ve bunu önerilen algoritmada kullanmak için rotalamanın gerçekleştiği ağın çap (diameter) bilgisine gereksinim duyulmaktadır. Ağ topolojisi içinde en uzak iki sekme / düğüm arasındaki mesafe çap olarak adlandırılır. Geliştirilen yöntem, veri iletimi başlatılmadan önce sadece bir defaya mahsus çap (d) değerini hesaplar ve rotalama boyunca bu değeri kullanır. Ancak bulunan çap bilgisini hesaplandığı şekliyle kullanmamak gerekir. Çünkü çap değerinden daha fazla sayıda sekmeye sahip bir yolun izlenmesi durumunda, özellikle ağ içinde önemli ölçüde veri trafiği söz konusuysa, bahsedilen yol metrikler açısından iyi sonuçlar üretse dahi rotalama sürecinde en iyi rotanın belirlenmesi kapsamına dâhil edilmeyecektir. Dolayısıyla elde edilen çap bilgisi yeterli bir değere dönüştürülmekte ve önerilen yöntem için uyarlanır bir TTL değeri olarak belirlenmektedir:

$$TTL_{uyarlanır} = d * (\alpha + 1) \quad (23)$$

Verilen formülde α , çap değeri d üzerine uygulanan bir genişletme katsayıdır. Bu katsayıdaki artış daha uzun aday yolların bulunması anlamına gelirken α için belirlenecek daha düşük değerler tüm olası yollar arasından en iyisinin bulunamamasına ve hatta kaynak düğümden hedef düğüme herhangi bir rotanın tespit edilememesine, dolayısıyla rotalama hatasına neden olabilir.

Bir önceki bölümde sunulan Algoritma 1'in 9. satırında üzerinden geçilen mevcut sekme sayısı $RREQ_{IK_{i-1}}^{TTL}$, $TTL_{standart}$ değeri ile karşılaştırılmakta ve $RREQ_{IK_{i-1}}^{TTL}$ 'ün standart TTL değerinin üzerine çıkması halinde RREQ mesajı ağdan atılmaktadır. Ancak bahsedildiği üzere fazladan hesaplamalar içeren ve metrikler bağlamında iyi sonuçlar üretmeyen yolların erken aşamalarda elenmesi Algoritma 1'de yeni bir düzenlemeyi gerekli kılmaktadır:

Algoritma 2: İyileştirilmiş Hibrit Çok-Yollu Rotalama Algoritması

... ..

9. Eğer $f_i^{antık}(R) > f_i^{mevcut}(R)$ ve $RREQ_{iK_{i-1}}^{TTL} < TTL_{uyarlanır}$ ise başla

... ..

2.2.5. Rota Bakımı

Önerilen yöntemin rota keşif aşaması ve yol seçim mekanizması önceki bölümlerde açıklanmıştı. Bu bölüm, rotalama hatalarında devreye sokulacak uçtan-uca rota bakımını / rota düzeltmesini ele almaktadır.

Komşuluk ilişkisi içindeki ikincil kullanıcılar birbirlerine düzenli olarak konumlarını bildirmekte ve rotalama tablolarını buna göre güncelleyen işaret mesajlarını paylaşmaktadır. Düğüm gezginliği veya kullanılan rota üzerindeki herhangi bir düğümün ağdan ayrılması neticesinde devam etmekte olan veri iletiminin kesilmesi ve hedef düğümün ulaşılamaz (unreachable) olması durumlarıyla karşılaşılır.

Bu gibi durumlarda, kaynak düğüm L_{tx} ile simgelenen önceden belirlenmiş bir sayı kere veri paketini hedef düğüme yollamaya devam eder. Yeniden iletim limiti olarak adlandırılan L_{tx} değeri aşılsa ve gönderilen veri paketine karşılık herhangi bir alındı bildirim mesajı (acknowledgement message – ACK) kaynak düğüme ulaşmazsa ara düğümler tarafından rotalama hatası mesajı (route error – RERR) oluşturulur ve kaynak düğüme gönderilir. Rotalama hatasının karşılaşıldığı ara düğümlerden başlamak üzere kaynak düğüme kadar yol üzerinde bulunan tüm düğümlerin rotalama tablolarında hatayla karşılaşılan rota geçersiz olarak işaretlenir. Kaynak düğüm RERR mesajını alır almaz Bölüm 2.2.1, 2.2.2 ve 2.2.3'te açıklandığı gibi yeni bir rota keşif aşamasını başlatır.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde önerilen hibrit çok-yollu rotalama algoritmasının etkinliği ve performansına yönelik sayısal bulgular irdelenmekte ve literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılması yapılmaktadır. Analizler ve değerlendirme sonuçları üç ana senaryo bağlamında sunulmaktadır:

- (1) Kaynak ve hedef düğümler arasında mevcutta bulunan veri akışına bir yenisi eklenmek istendiğinde yöntem kapsamında geliştirilen hibrit fayda fonksiyonunun tepkisi, değişken birincil kullanıcı aktivitelerine göre değerlendirilecek ve doğrulanacaktır. Diğer bir ifade ile farklı veri akışlarına atanacak yolların ağdaki birincil kullanıcıların davranışlarına bağlı olarak aynı ya da farklı rotalardan oluşturulması ele alınacaktır. Değinilen senaryo çoklu-akış analizi olarak adlandırılmıştır.
- (2) Çoklu yol analizi şeklinde nitelendirilen ikinci başlık altında rota keşfi süresince tespit edilen, gereksiz hesaplamalara sebebiyet veren ve rotalama için uygun olmayan olası aday yolların elenmesi hususuna değinilmektedir. Sözü edilen yolların gereksizliği, daha iyi hibrit fayda fonksiyonu değerlerine sahip diğer yollarla karşılaştırıldığında güvenilir ve kararlı olmadıkları gerçeğinden kaynaklanmaktadır.
- (3) Üçüncü ve son senaryoda ise ilintili olduğu başlık kapsamında değinilen ve açıklanan veri paketi gönderim oranı, uçtan-uca gecikme ve iletilen veri miktarı gibi performans ölçütlerine göre farklı ağ parametreleri kullanarak sunulan yöntemin diğer tekniklerle kıyaslamalı değerlendirilmesi yapılacaktır.

Ortaya konan senaryolar, ilgili başlıklar altında incelenmekte olup öncelikle bir sonraki alt bölümün içeriğini oluşturan sayısal verilerin elde edildiği simülasyon ortamına ve devamında birincil ve ikincil kullanıcıların davranışlarına; fiziksel ve bağlantı katmanına dair hususlara; simülasyonlarda kullanılan ağ topolojisi özelliklerine ve simülasyon parametrelerine yönelik açıklamalar sunulmuştur.

Bulgular ve irdeleme altında son olarak karşılaştırmaya tabi tutulan rotalama algoritmaları için düğümlerde gerçekleştirilen işlem sayılarına göre karmaşıklık analizi yapılmıştır.

3.1. Simülasyon Ortamı

Bulgular ve irdelemeler dâhilinde gerekli sayısal veriler MATLAB yardımıyla geliştirdiğimiz olaya güdümlü benzetim ortamında (event-driven simulator platform) üretilmiş ve bu doğrultuda bir önceki bölümde yer verilen senaryolar için çok kapsamlı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Birincil kullanıcı aktiviteleri Bölüm 2’de verilen açık-kapalı mekanizmasına göre modellenmiştir. Herhangi bir birincil kullanıcının açık-kipinde bulunması, ilgili kullanıcıya tahsis edilmiş kanalın kullanımında olduğunu ifade etmektedir. Bu kullanıcının kapalı-kipinde iken herhangi bir kanala erişimi söz konusu değildir. Birincil kullanıcılar aktif olduğunda ise diğer birincil kullanıcılar tarafından kullanılmayan herhangi bir kanalı seçerler. Telekomünikasyon alanında karşılaşılan gerçek senaryolar ile uyumlu olacak şekilde birincil kullanıcıların mevcut kanallar için yarışma durumu ortaya koymaları pekâlâ mümkündür. Dolayısıyla, ilgili senaryolarda kanal sayısının birincil kullanıcıların sayısından az ya da eşit olduğu düşünülmüş ve kanal sayıları buna göre belirlenmiştir.

Aktif bir birincil kullanıcının kapsama alanındaki ikincil kullanıcının ilgili birincil kullanıcı tarafından tutulan kanalda çalışmasına izin verilmez. Bu durumda ikincil kullanıcı boş bir kanal arar. Bulduğu boş kanala geçiş süreci kanal değiştirme olarak adlandırılır. Simülasyon ortamındaki kanal değiştirme süresi 5 milisaniye olacak şekilde ayarlanmıştır. Tüm kanalların kullanımında olması halinde ikincil kullanıcılar herhangi bir kanal mevcut olana kadar beklemek zorundadır.

Senaryolarda ikincil kullanıcıların gezgin olması durumu göz önünde bulundurulmaktadır. Bu doğrultuda kullanıcı gezginliği rasgele yürüyüş (random walk) metoduna göre modellenmiş olup hareket $[0, 2\pi]$ aralığından rastgele seçilen bir yöne doğru gerçekleştirilir. Ayrıca, ikincil kullanıcılar bir sekme uzaklığındaki komşuluk ilişkisini güncellemek üzere her 4 ms’de (milisaniye) bir kendi aralarında işaret mesajları alıp gönderirler. Bunun dışında tampon bellek kapasitesine tüm lisanssız kullanıcılarda aynı olacak şekilde sabit bir değer atanmıştır.

İkincil kullanıcıların veri iletim süresine ve birincil kullanıcıları algılama süresine ilişkin Lee ve Akyıldız tarafından yürütülen çalışma [136] temel alınmıştır. Buna göre fiziksel katmanda birincil kullanıcıların ikincil kullanıcılar tarafından tam ve doğru bir şekilde algılandığı varsayılmıştır. Ayrıca, algılama ve veri iletim sürelerine sırasıyla 25 ms

ve 64 ms değerlerini atayarak algılama sürecinde karşılaşılabilecek hata oranı %5'in altında tutulmuştur.

Tablo 4. Simülasyon parametreleri

Parametreler	Değerler
Alan Büyüklüğü	600m x 600m
Kanal Sayısı	3
Birincil Kullanıcı Sayısı	[1,6]
İkincil Kullanıcı Sayısı	20, 40
Veri Akışı Sayısı	[1,5]
Birincil Kullanıcıların Kapsama Alanı	300m
İkincil Kullanıcıların Veri İletim Aralığı	150m
Birincil Kullanıcıların Açık Kalma Süresi	50 saniyelik ortalama ile üssel olarak dağıtılmıştır
Kanal Bantgenişliği	2 Mbps
CBR	2 Mbps
Veri Paketi Büyüklüğü	1000 bayt
Tampon Bellek Kapasitesi	150
Algılama Süresi	25 ms
Veri İletimi Süresi	64 ms
İşaret Periyodu	4 ms
Kanal Değişirme Süresi	5 ms
Veri Akışı Üretimi	Her 75 ms
α (Çap Genişletme Katsayısı)	0.25
L_{tx} (Yeniden İletim Limiti)	3
Gezginlik Modeli	Rasgele Yürüyüş
Düğüm Hareket Yönü	$[0,2\pi]$ 'den rasgele seçim
Ortalama Düğüm Hızı	0 m/s, 1 m/s ve 2 m/s
ACK Paketi Büyüklüğü	112 Bit
IP Başlığı Büyüklüğü	160 Bit
MAC Başlığı Büyüklüğü	272 Bit
PHY Başlığı Büyüklüğü	192 Bit
Simülasyon Süresi	500 s

Simülasyonlarda kullanılmak üzere 600m x 600m ebadına sahip topolojiler üretilmiştir. Bu topolojilerde birden fazla birincil ve ikincil kullanıcılar bulunmakta olup aksi belirtilmedikçe konumları rastgele belirlenmiştir. Birincil kullanıcıların sabit ve hareketsiz olduğu, kapsama alanlarının 300m olduğu kabul edilmiştir. İletim güçlerini uyarlanabilir bir şekilde ayarlama yeteneğine sahip ikincil kullanıcıların kapsama alanları ise 150m'yi aşmayacak şekilde belirlenmiştir.

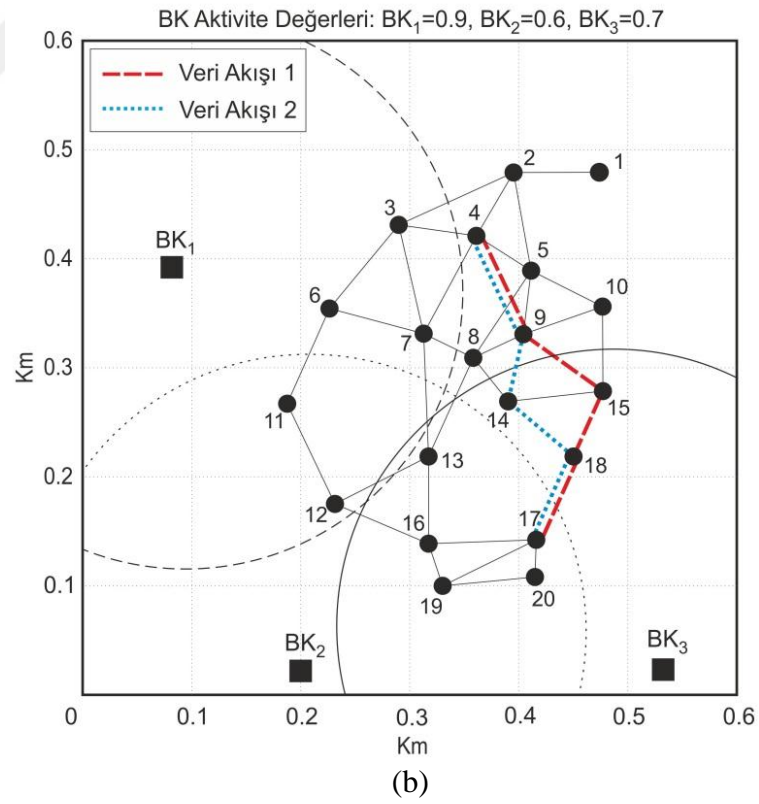
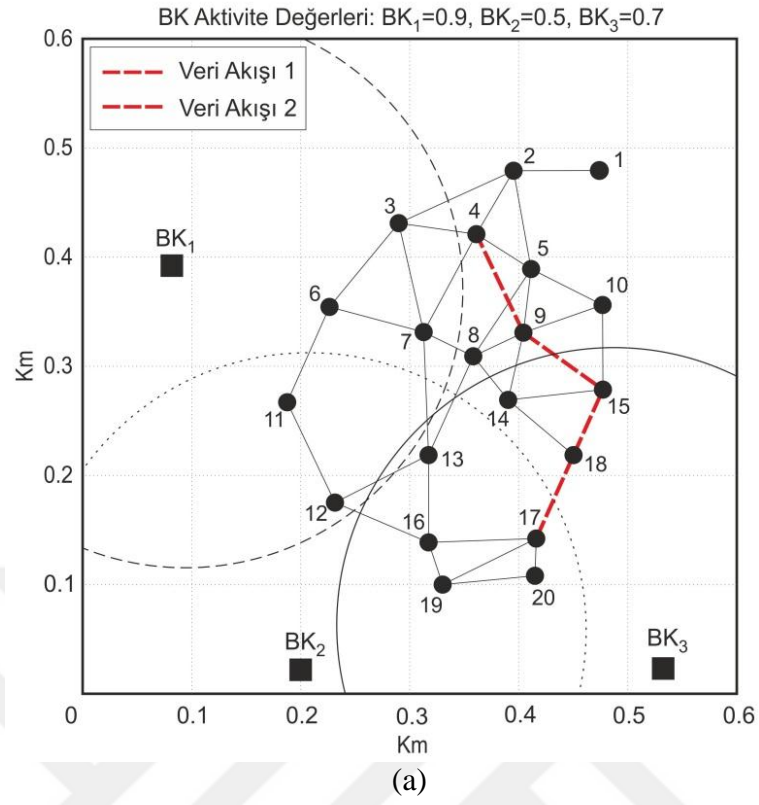
MAC (bağlantı) ve PHY (fiziksel) katman parametreleri için 802.11b protokolündeki varsayılan değerler olduğu gibi kullanılmaktadır. Bu doğrultuda iletilen veri paketlerinin büyüklüğü 1000 bayttır. Simülasyonlarda aksi belirtilmedikçe kaynak ve hedef düğüm ikilisi topoloji içinden rastgele seçilmektedir. Başlatılacak veri akışının hızı sabit bit oranına (constant bit rate – CBR) sahip olup 2 Mbps olacak şekilde ayarlanmıştır.

Senaryoya bağlı olarak kaynak ve hedef düğümler arasında farklı zamanlarda ve farklı miktarlarda veri akışı başlatılmaktadır. Bahsedilen senaryoların her biri için simülasyonlar 100 kere koşturulmuş ve bu koşmalardan elde edilen ortalama değerler veri noktalarını oluşturmak için kullanılmıştır. Tüm simülasyon parametreleri Tablo 4'te listelenmiştir.

3.2. Çoklu Akış Analizi

Bu bölümde, geliştirilen yöntemin hibrit fayda fonksiyonu, değişken birincil kullanıcı aktivite değerlerine göre analiz edilmiştir. Ağdaki birincil kullanıcı aktivitesi değiştikçe kaynak bir ikincil kullanıcı tarafından başlatılan veri akışlarının izlediği rotalar üzerinde rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve yol çeşitliliği hususları kaçınılmaz olarak etkilenmektedir.

Değerlendirme süreci farklı birincil kullanıcı aktivite değerlerinin kullanıldığı iki örnek olay incelemesi altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 17, bu senaryo için üretilen ve 3 birincil kullanıcı ile 20 ikincil kullanıcı içeren ağ topolojisini göstermektedir. Kaynak düğüm IK_4 farklı zamanlarda farklı iki veri akışı başlatmıştır. Bu veri akışlarının aynı anda başlatılmamasının, aksine farklı zamanlarda oluşturulmasının nedeni ara düğümlerin tampon belleklerinin veri paketleri ile yığılması için yeterli zaman sağlamaktır. Bu doğrultuda Veri Akışı 1, 0. ms'de başlatılırken Veri Akışı 2, 2000. ms'de başlatılmıştır.



Şekil 17. Kaynak ve hedef düğümler arasında başlatılan veri akışlarının birincil kullanıcı aktivitesine bağlı olarak (a) tek bir yol üzerinden (b) birden fazla yol üzerinden iletimi

İlk örnek olay incelemesinde birincil kullanıcıların aktivite değerleri 0.9, 0.5 ve 0.7 olarak verilmiş; kaynak düğüm IK_4 ve hedef düğüm IK_{17} arasında iki farklı veri akışı başlatılmıştır. Şekil 17.a'da görüldüğü üzere Veri Akışı 1 ve Veri Akışı 2 aynı yol üzerinde sürdürülmektedir. Çünkü 4-9-15-18-17 yolunun fayda fonksiyonu değeri diğer olası yollara ait değerlere baskın gelmektedir. Bu yol, ayrıca kaynak düğüm IK_4 ve hedef düğüm IK_{17} arasında yapılan veri iletimleri için birincil kullanıcı etkinliğinin toplamda en az olduğu rotadır.

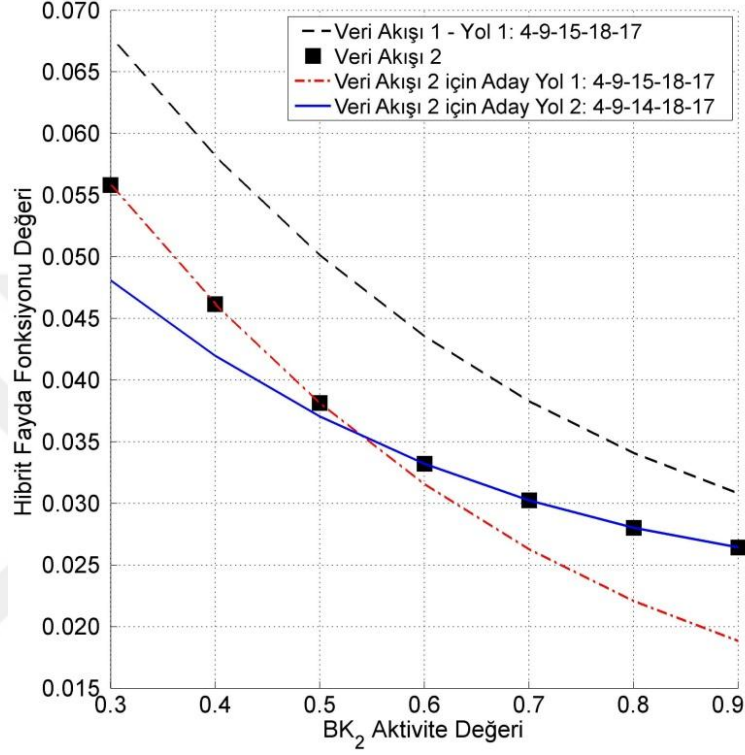
İkinci örnek olay incelemesi, birinci örnek olayın devamı niteliğinde olup birincil kullanıcı BK_2 'nin aktivite değeri 0.1'lik bir artışla 0.6'ya yükseltilmiştir. Bu durumda kaynak ve hedef düğümler arasında Veri Akışı 1 ve Veri Akışı 2'nin farklı yollar üzerinden yönlendirildiği gözlemlenmektedir (Şekil 17.b). Verilen örnek olay için simülasyonun başlangıcından itibaren zaman geçtikçe Veri Akışı 1'in izlediği yol 4-9-15-18-17 üzerinde bulunan ara düğümlerin tampon bellekleri veri paketleriyle dolmaya başlar. Özellikle kavşak düğüm konumundaki IK_9 üzerinde trafik yükü artış gösterir ve bu da 4-9-15-18-17 yolunun güvenilirliğini ve kararlılığını bozar.

Veri Akışı 1 devam ederken, IK_4 yeni bir veri akışı için rota keşif aşamasını başlatır. Oluşturulan RREQ mesajı iki farklı yol 4-9-15-18-17 (Yol 1) ve 4-9-14-18-17 (Yol 2) üzerinden IK_{17} 'ye ulaşır. Hedef düğüm üzerinde bu yolların değerlendirilme sürecine geçilir ve yollara ait hibrit fayda fonksiyonu değerleri karşılaştırılır. Veri Akışı 1'in sürdürülmesi esnasında ara düğüm IK_{14} 'ün üzerinden henüz veri iletilmemiş ve bu düğüm üzerindeki tampon belleğin boş olması neticesinde Veri Akışı 2 için Yol 2 seçilir.

Yapılan seçim üzerinde BK_2 'nin artış gösteren aktivitesinin etkisi bulunmaktadır. Artan birincil kullanıcı aktivitesi göz önünde bulundurulmadan Veri Akışı 2 tıpkı Veri Akışı 1 gibi aynı yol üzerinde gönderilmeye devam edilirse IK_{15} ara düğümü üzerinde tampon belleğin dolması üzerine bir taşmanın (overflow) ortaya çıkma riski yükselecektir. Hâlbuki geliştirilen hibrit fayda fonksiyonu sayesinde olası bir taşma durumu önlenmektedir. Bunun dışında, IK_9 'dan IK_{15} 'e ve yine IK_9 'dan IK_{14} gönderilen veri paketlerinin sayıları arasında denge oluşturulmaktadır.

Senaryo kapsamında artış gösteren BK_2 aktivitesine göre Yol 1 ve Yol 2'den elde edilen hibrit fayda fonksiyonu değerleri Şekil 18'de gösterilmiştir. Veri Akışı 1 için kaynak düğüm ve hedef düğüm arasındaki iletişim Yol 1 aracılığıyla sağlanmaktadır. Diğer taraftan, Veri Akışı 2'nin veri paketleri, BK_2 'nin aktivite değeri 0.54'ten küçük olduğu sürece Yol 1 üzerinden gönderilmeye devam etmektedir. Ancak 0.54'ten büyük tüm

aktivite değerleri için Yol 1'in fayda fonksiyonu değerinin Yol 2'ninkinden daha küçük olduğu gözlemlenmektedir. Dolayısıyla rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve rota çeşitliliği bağlamında BK_2 'ye ait aktivite değerinin 0.54'ü aşması durumunda Veri Akışı 2 Yol 2 üzerinden iletmeye başlanır.



Şekil 18. Artış gösteren BK_2 değerleri bağlamında Veri Akışı 1 ve Veri Akışı 2'nin izlediği yollara ait hibrit fayda fonksiyonu değerleri

3.3. Çoklu Yol Analizi

AODV tarzı rotalama yöntemlerini kullanan çalışmalar [111, 112] kaynak ve hedef düğümler arasında birden fazla yol üzerinden en uygun rotayı tespit etme yeteneğine sahiptirler. Sunulan algoritmaların rota keşif aşamasında döngüye girmeyen olası tüm yollar belirlenir ve bulunan yollarla ilgili değerlendirme süreci hedef düğümde gerçekleştirilir. Nitekim sözü edilen rota keşfiyle ilintili iki önemli dezavantaj bulunmaktadır:

- (1) Tüm topoloji çok miktarda kontrol mesajı ile doldurulur ve ağ kaynakları verimsiz bir şekilde kullanılır / sömürülür.

(2) Tespit edilen yolların değerlendirme süreci merkezi bir şekilde hedef düğümde yürütülür.

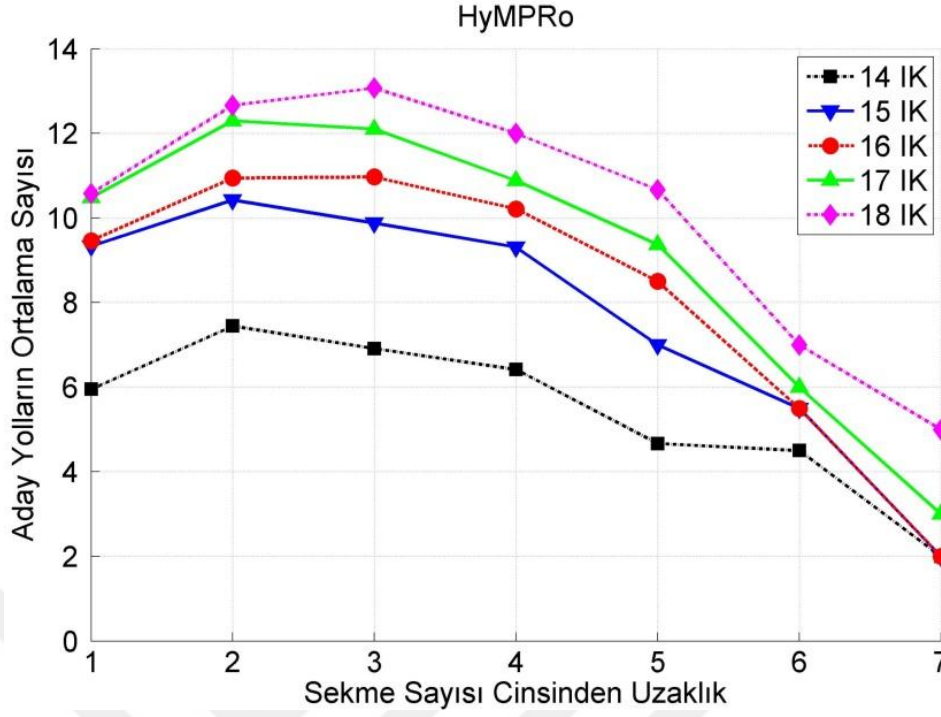
Yukarıda değinilen dezavantajlar, Bölüm 2'de açıklanan hem hedef düğüm hem de ara düğümlerde uyarlanabilir TTL kavramının ve dağıtık hesaplamaların kullanımıyla giderilmektedir. Çoklu yol analizi için sunulan senaryo kapsamında önerilen yöntemin çok yollu mekanizmasının etkinliği irdelenmekte ve tespit edilen olası yolların ortalama sayısı bağlamında AODV tarzı rotalama algoritmaları ile kıyaslaması yapılmaktadır. Karşılaştırmalarda Şekil 17'de tasvir edilen topoloji ve bu topolojiden üretilen alt topolojiler kullanılmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. Farklı sayılarda ikincil kullanıcı içeren yedi ağ topolojisi

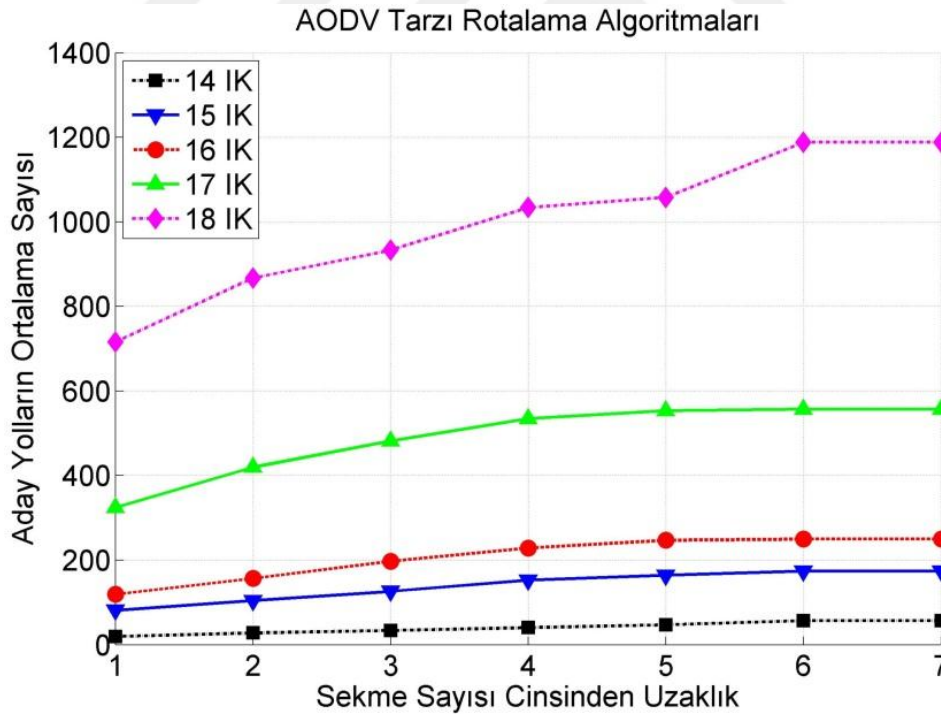
Topoloji Adı	İkincil Kullanıcı Sayısı	Şekil 17'deki topolojiden çıkarılan düğümler
Topoloji 1	20	-
Topoloji 2	19	11
Topoloji 3	18	10-19
Topoloji 4	17	10-11-19
Topoloji 5	16	10-11-15-19
Topoloji 6	15	10-11-12-15-19
Topoloji 7	14	3-10-11-12-15-19

Simülasyonlarda sadelik adına kaynak ve hedef düğümler arasında sadece bir adet veri akışı başlatılmış ve Formül 23'te yer alan α sabiti 0.25 olarak ayarlanmıştır. Tespit edilen olası farklı yolların ortalama sayılarını kıyaslamak için önerilen yöntem çalıştırılmadan önce topolojilerdeki tüm kaynak – hedef çiftleri için tam uzaklık (en kısa yol üzerindeki sekme sayısı) ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Şekil 19.a ve Şekil 19.b'de sırasıyla önerilen yöntem ve AODV tarzı rotalama algoritmaları tarafından tespit edilen yolların ortalama sayılarına dair grafik eğrileri verilmiştir. Çalışma kapsamında sunulan çoklu yol mekanizması için AODV'den faydalanılan yöntemlere kıyasla önemli ölçüde iyi sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, mevcut topolojiler arasından Topoloji 3'te kaynak – hedef çifti arasındaki tam uzaklık 7 iken hibrit çok-yollu rotalama algoritması en uygun rota için 5 aday yol tespit ederken AODV tarzı rotalama algoritmaları 1200 aday yolu değerlendirmek durumundadır.

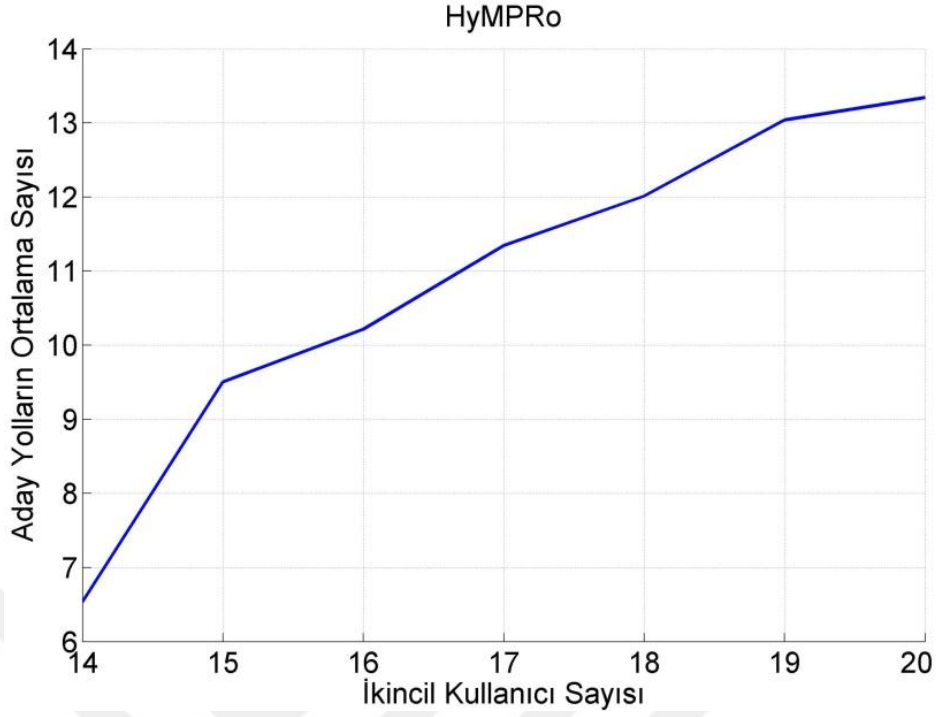


(a)

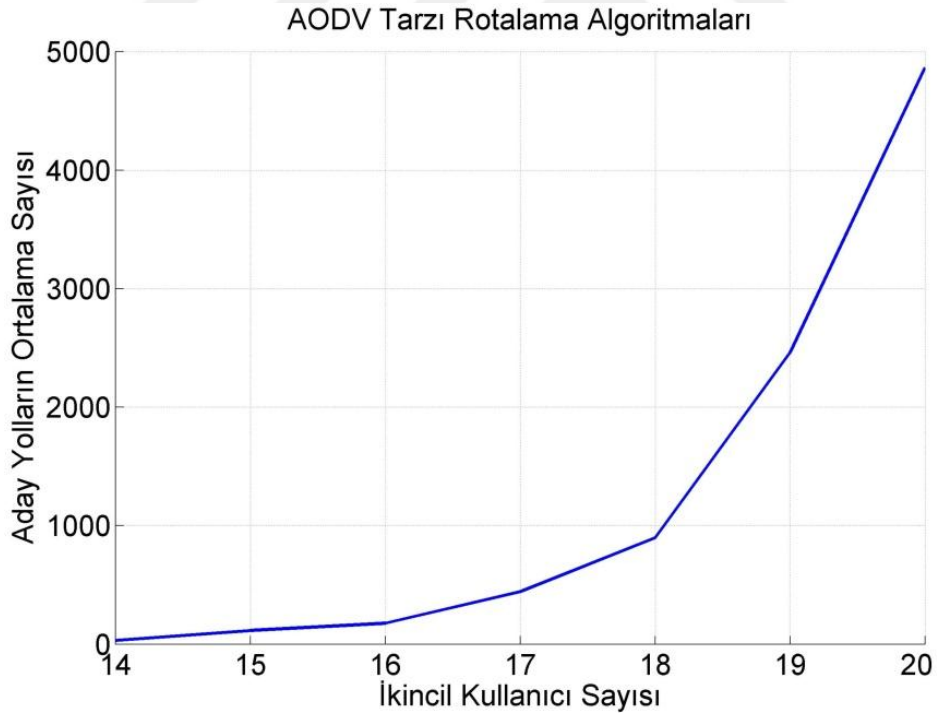


(b)

Şekil 19. Hibrit çok-yollu rotalama algoritması (a) ve AODV tarzı rotalama algoritmalarının (b) sekme sayısı cinsinden uzaklığa göre tespit ettiği aday yolların ortalama sayısı



(a)



(b)

Şekil 20. Hibrit çok-yollu rotalama algoritması (a) ve AODV tarzı rotalama algoritmalarının (b) topolojide yer alan ikincil kullanıcı sayısına göre tespit ettiği aday yolların ortalama sayısı

Çoklu yol analizinden elde edilen bir diğer önemli çıkarım, önerilen yöntem kullanıldığında kaynak ve hedef düğümler arasındaki uzaklık artarken tespit edilen ortalama yol sayısının azalan bir eğilim göstermesidir. Çünkü $TTL_{uyarlanır}$ (23) değerinden daha yüksek TTL değerlerine sahip tüm aday yollar ara düğümler tarafından elimine edilmektedir. Nitekim AODV tarzı rotalama için durum böyle değildir. Topolojilerdeki ikincil kullanıcı sayısı birer birer artırıldığında hibrit çok-yollu rotalama algoritmasında ortalama yol sayısı 14 değerine yaklaşmaktadır (Şekil 20.a). Diğer taraftan AODV tarzı rotalamada ağa yeni bir ikincil kullanıcı katıldığında aday yolların sayısı önemli ölçüde artmaktadır (Şekil 20.b).

3.4. Performans Analizi

Bu başlık altında Tasarsız Bilişsel Radyo Ağı dâhilinde kaynak düğüm tarafından birden fazla veri akışı başlatıldığında geliştirilen yöntemin sergilediği performans ile ilintili hususlara yer verilmiştir. Hibrit çok-yollu rotalama algoritması literatürde kullanılan mevcut üç rotalama şemasıyla karşılaştırılmıştır.

Bunlardan birincisi kaynak ve hedef düğümler arasında tespit edilen olası tüm yollar içinde minimum sekme sayısına sahip rota seçimini gerçekleştiren En Kısa Yol Rotalama (shortest path routing – SPR) yöntemidir [137]. SPR, Dijkstra tarafından önerilen algoritma üzerinde temellendirilmiştir [138]. Bahsedilen metodun kıyaslama amacıyla seçilmesinin ardındaki mantık, çalışma kapsamında tanımlanan ve Bilişsel Radyo Ağlarına özgülünen rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve rota çeşitliliği hususlarından hiçbirisinin SPR tarafından ele alınmamasıdır.

Önerilen yöntemle karşılaştırılan diğer rotalama algoritması Abbagnale ve Cuomo tarafından geliştirilen Gymkhana'dır [139]. Çalışmada çizge kuramından (graph theory) faydalanılmıştır. Yürütülen rotalama süreci, ilgili ağ topolojisinin cebirsel bağlantısallığını (algebraic connectivity) kullanmakta olup rota seçimleri daha az birincil kullanıcı aktivitesinin bulunduğu ağ bölgelerinden yapılmaktadır. Çalışmada, kaynak ve hedef düğümler arasında yer alan veri iletim bağlantıları üzerindeki trafik yüküne ve ikincil kullanıcıların tampon bellek durumlarına dair önermeler bulunmamaktadır. Ayrıca, rotalama sürecinde başlatılmış önceki veri iletimlerinde bir düğümün kaç kez yer aldığı ve kaç adet veri paketi gönderdiği ile ilgili gözlemlerin gerçekleştirilmiyor olması kararlı ve

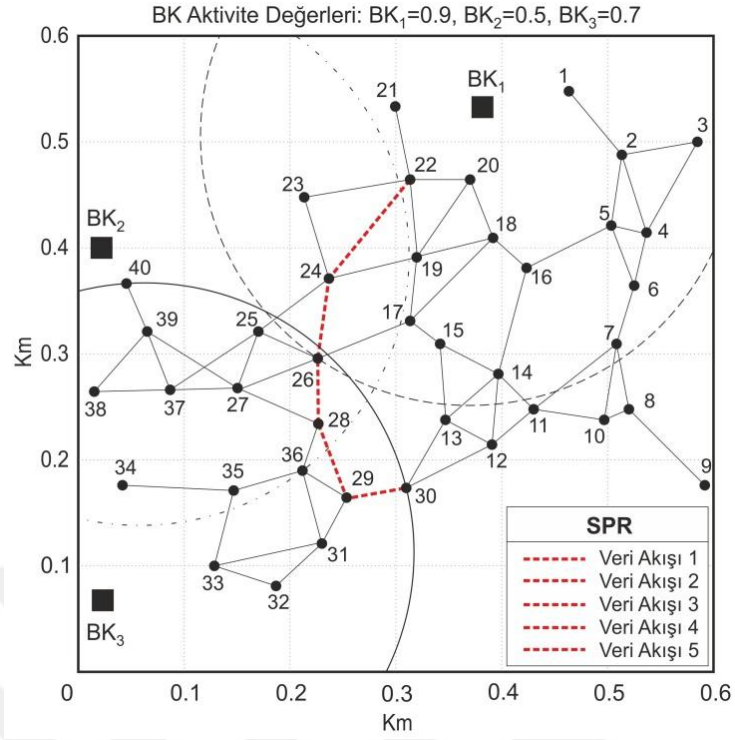
güvenilir olarak nitelendirilebilecek aday yollardan bazılarının hedef düğümde değerlendirme kapasitesine alınmamasına neden olmaktadır.

Gymkhana ve değinilen SPR algoritması tek yönlü rotalama algoritmaları sınıfında yer almaktadır. Diğer taraftan önerilen yöntem ile aynı sınıflandırmaya tabi tutulan, fırsatçı (opportunistic) ve çok yönlü bir rotalama algoritması olan ROSA [140] performans analizi bağlamında yürütülen karşılaştırmalarda kullanılan bir diğer metottur. ROSA tarafından farksal birikim (differential backlog) mekanizması çalıştırılmaktadır. Farksal birikim yardımı ile rota keşif aşaması sırasında hedefe doğru olumlu bir ilerleme kaydetmek üzere en uygun sonraki düğümlerin seçimi gerçekleştirilir. Veri iletiminde görev alan ikincil bir kullanıcı komşu düğümlerin tampon bellek doluluğunu izleme işlevini sürdürürken kendisine ve komşularına ait mevcut boş tampon bellek uzunluklarının farklarını içeren bir liste oluşturur. Farksal birikimin maksimum olduğu ilintili komşu, bu ikincil kullanıcı tarafından veri paketlerini hedef düğüme doğru iletmeye seçilecek en uygun sonraki komşu düğüm olarak belirlenir.

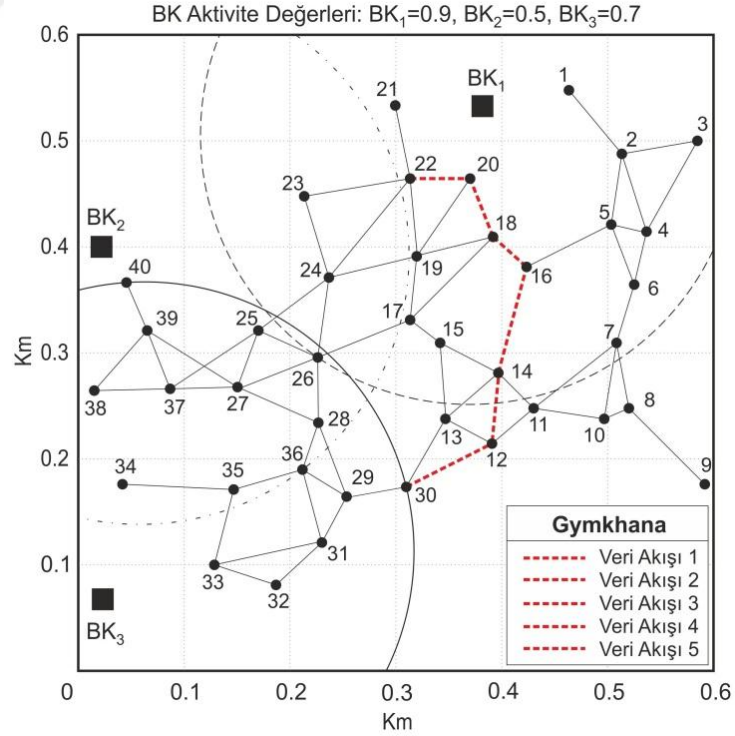
Birincil kullanıcı aktivitesi ile ilgili rota kararlığı ve ara ikincil düğümlerdeki tampon bellek doluluğuna ilişkin tıkanıklık farkındalığı ROSA'da ele alınmıştır. Ancak rotalama sürecinin başlangıcından itibaren sürdürülmekte olan veri iletimlerinde düğümlerin kullanım sıklığı bilgisinin değerlendirmeye alınmaması nedeniyle en iyi aday yolların tümü tespit edilememektedir. Bu doğrultuda, ROSA'nın Bilişsel Tasarsız Radyo Ağlarında ele alınması gereken yol çeşitliliğini desteklemediği görülmektedir.

Önerilen hibrit çok-yönlü rotalama algoritması ile bahsedilen rotalama yöntemlerinin karşılaştırılmaları aşağıda değinilen ölçütler temelinde sunulmuştur:

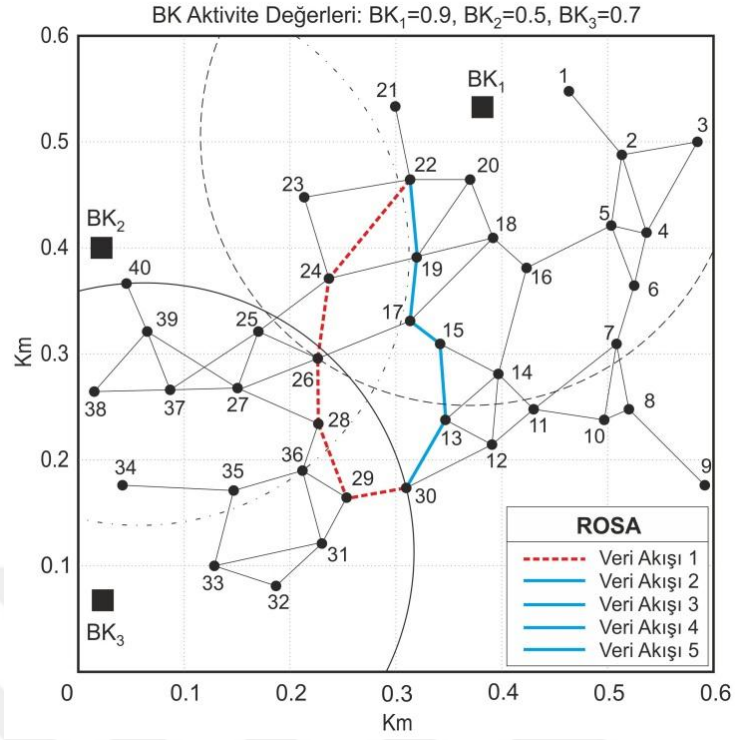
- (1) Paket Gönderim Oranı: Birincil kullanıcı aktivitesi, ara düğümlerde gerçekleşen bellek taşması ve ağdaki veri trafiği yükü nedenlerine bağlı olarak gönderilen veri paketlerinin bir kısmı hedef düğüm tarafından alınamamaktadır. Gönderilen ve alınan veri paketleri bağlamında hesaplanan oransal ilişki paket gönderim oranı olarak adlandırılır
- (2) Uçtan-Uca Paket Gecikmesi: Bir veri paketinin kaynak düğümde oluşturulduğu zaman ile hedef düğüme varış zamanı arasındaki fark gecikme olarak tanımlanmaktadır. Alınan paketlerin tümü için hesaplanan gecikmelerin ortalaması, uçtan-uca paket gecikmesi değerini sağlamaktadır.
- (3) İletilen Veri Miktarı: Hedef düğümde ölçümlenen ve bir saniyede alınan toplam bit sayısını ifade etmektedir.



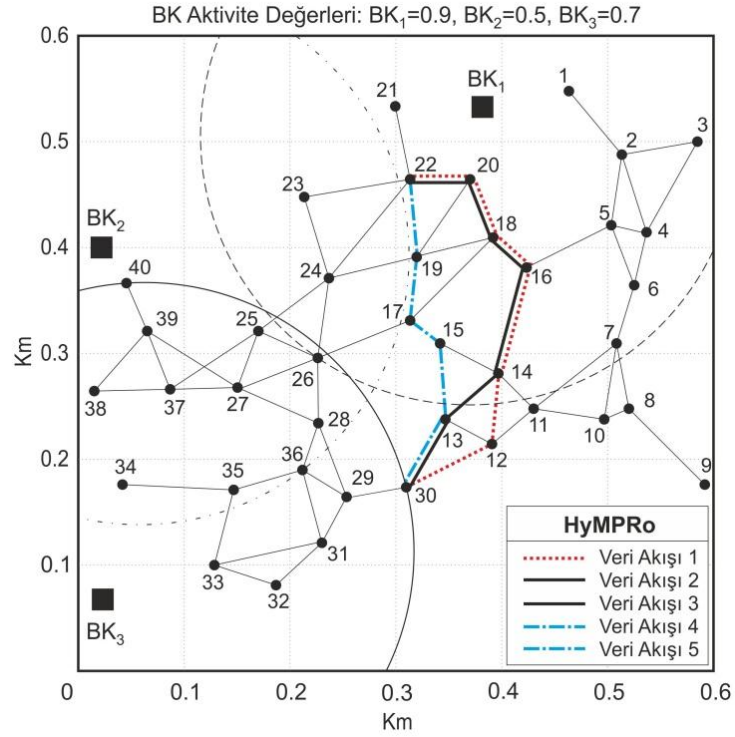
Şekil 21. Farklı beş veri akışı için SPR tarafından kullanılmakta olan rota



Şekil 22. Farklı beş veri akışı için Gymkhana tarafından kullanılmakta olan rota



Şekil 23. Farklı beş veri akışı için ROSA tarafından kullanılmakta olan rotalar



Şekil 24. Farklı beş veri akışı için HyMPRo tarafından kullanılmakta olan rotalar

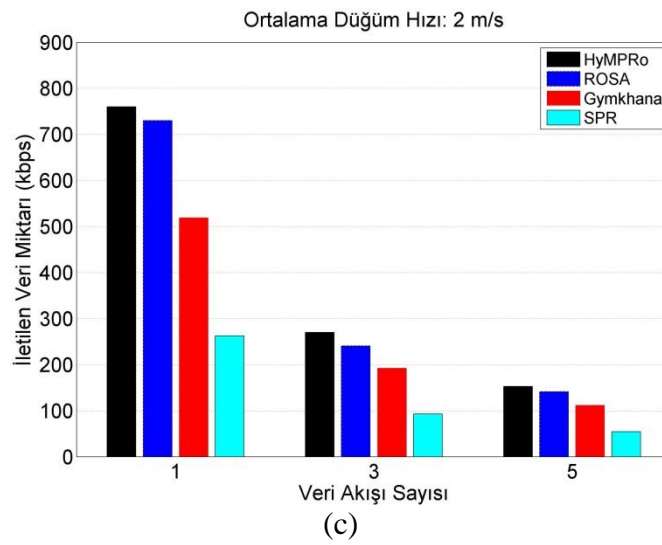
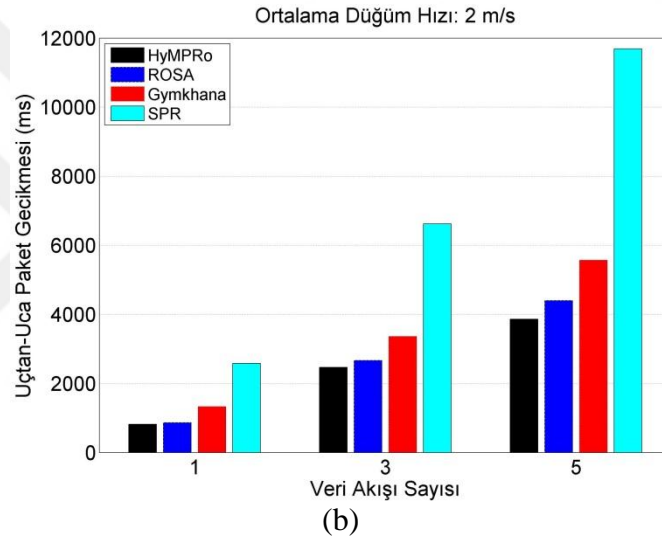
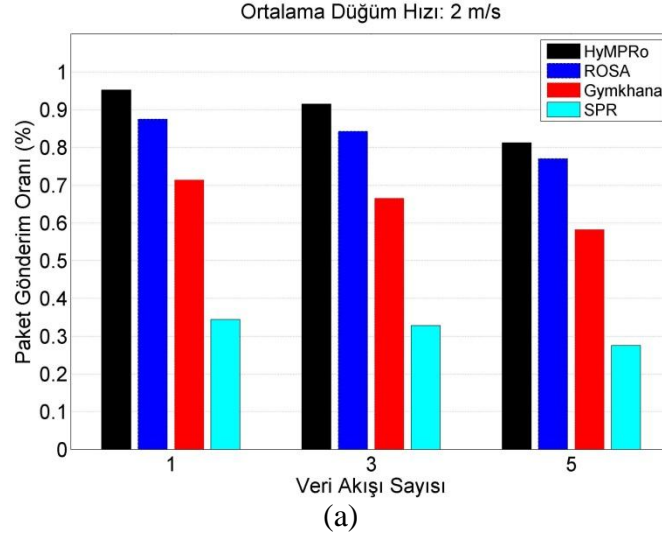
Geliştirilen yöntem ile diğerlerinin karşılaştırılması amacıyla üç farklı olay incelemesi tanımlanmıştır. İlkinde, veri trafiği sadece belirli bir kaynak düğüm ile belirli bir hedef düğüm arasında gerçekleşmektedir. Diğer ikincil kullanıcılar ise ya yönlendirici olarak görev almakta ya da boşta kalmaktadırlar. Her yöntem için aynı Tasarsız Bilişsel Radyo ağı kullanılmış olup üretilen topolojide 40 gezgin ikincil kullanıcı ve sırasıyla 0.9, 0.5 ve 0.7'lik aktivite değerlerine sahip 3 birincil kullanıcı bulunmaktadır.

Simülasyonun başlangıcından itibaren her 75 ms'de kaynak düğüm IK_{22} ve hedef düğüm IK_{30} arasında beş farklı veri akışı başlatılmıştır. Tüm veri akışları için SPR (Şekil 21) ve Gymkhana (Şekil 22) yöntemleri rotalamada sadece bir tane yol kullanırken ROSA (Şekil 23) iki farklı rota üzerinden veri iletimini sağlamaktadır. Diğer taraftan, HyMPRo (Şekil 24) algoritması beş farklı oturuma ait veri paketlerinin hedef düğüme gönderiminde üç farklı rotadan faydalanmaktadır.

Aynı topolojiyi kullanarak farklı miktarlarda veri akışları başlatıldığında paket gönderim oranı, uçtan-uca paket gecikmesi ve iletilen veri miktarı ölçütlerine dair yöntemlerin kıyaslanması sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 25'te gösterilmiştir. Topolojide yer alan düğümlerin ortalama hızı 2 m/s olarak belirlenmiştir. Simülasyon, her bir yöntem için veri akışı sayısı sırasıyla 1, 3 ve 5 olacak şekilde üç kez çalıştırılmıştır.

Her durum altında en kısa yolu rotalama için tercih eden SPR algoritması, tüm yöntemler arasında en kötü performansı göstermektedir: Çünkü veri paketleri yüksek birincil kullanıcı aktivitelerinin gözlemlendiği tek bir yoldan taşınmaktadır. Dolayısıyla ikincil ağda veri trafiği tıkanıklığı ve tampon bellek taşması hususları SPR için kaçınılmazdır. Diğer taraftan, ara düğümlerin tampon belleklerinde iletilmek üzere kuyruğa sokulmuş veri paketleri hedef düğüme önemli ölçüde geç varmaktadır. Bunun nedeni rota olarak kullanılan yol üzerinde yer alan düğümlerin birincil kullanıcıların tekrar pasif olmalarına kadar geçen süre içerisinde beklemek zorunda olmasıdır. İlintili olarak bir saniye içerisinde iletilen veri miktarı değeri de düşmektedir.

Gymkhana'nın tespit ettiği yol, SPR tarafından kullanılan yola göre fazladan bir düğüm içermesine (Şekil 21, Şekil 22) rağmen Gymkhana performans ölçütleri açısından baskın gelmektedir. Rota seçiminin birincil kullanıcı aktivitesi değerlerine bağlı olarak uyarlanabilir bir şekilde yapılması ve SPR'de olduğu gibi her daim sabit bir rotaya bağlı kalınmaması Gymkhana'yı SPR'den üstün kılmaktadır.



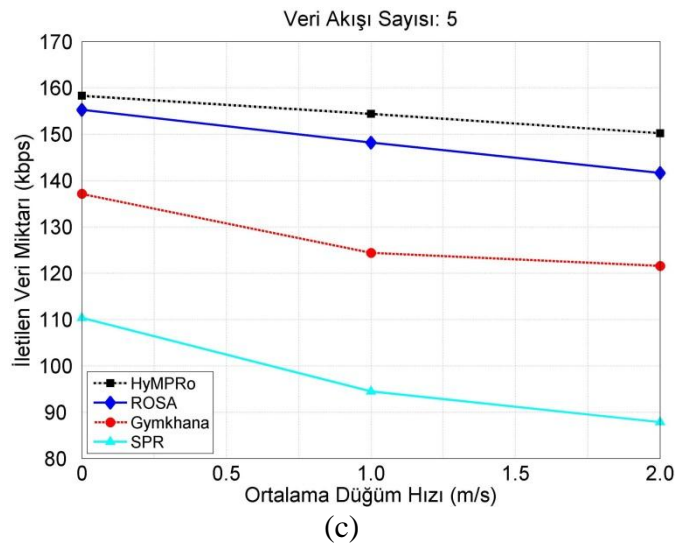
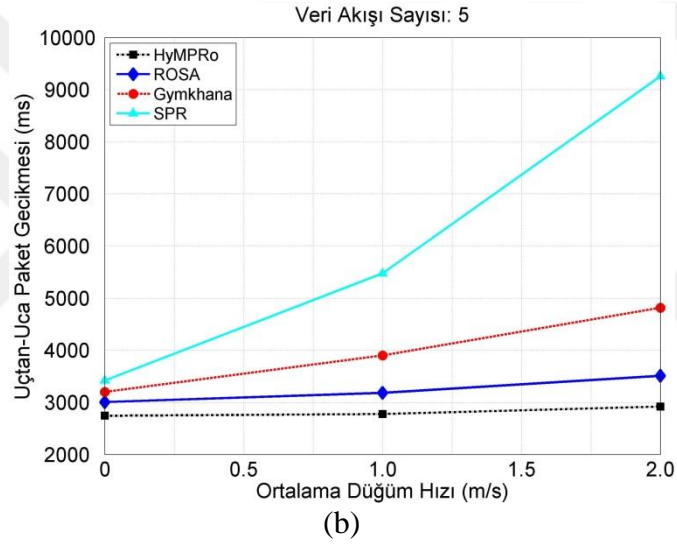
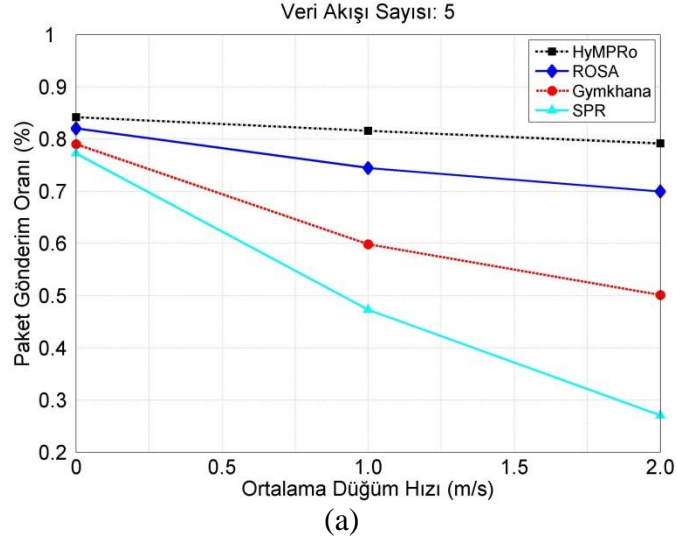
Şekil 25. Değişken veri akışı sayısına göre HyMPRo, ROSA, Gymkhana ve SPR'nin sergilediği performans değerleri

Birden fazla veri akışı için birden fazla rota kullanmanın avantajıyla ROSA, SPR ve Gymkhana'dan daha iyi performans göstermektedir. Ancak, her ne kadar ROSA beş veri akışlı durum altında iki farklı yoldan veri paketlerini iletse de HyMPRo algoritmasına baskın gelememektedir. Bunun iki nedeni vardır. Birincisi, ROSA sonraki düğüm seçiminde en fazla boş tampon belleğe sahip olan düğümü ve bu tip düğümleri içeren rotaları öncelediğinden birincil kullanıcıların ortalama daha az aktif olduğu bölgeleri tespit etmemektedir. İkinci olarak, rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve yol çeşitliliği hususlarının tamamını aynı anda göz önünde bulunduran HyMPRo'nun oluşturulan beş adet veri akışını ROSA'dan bir fazla olmak üzere üç farklı rota üzerinden hedef düğüme yönlendirmesidir.

İkinci örnek olay incelemesi, ağ heterojenliği ile ilintilidir. Ağ içinde yer alan kullanıcıların konumu ve veri trafiğine ilişkin sergiledikleri davranışlar her zaman homojen değildir. Dolayısıyla farklı topolojilerdeki farklı kaynak – hedef düğüm çiftleri için özellikle düğüm gezginliğinin önem kazandığı durumlarda performans değerleri değişkenlik arz etmektedir. Değinilen bulguya Şekil 26'da yer verilmiştir. Simülasyonda 0 m/s, 1 m/s ve 2 m/s olmak üzere değişken ikincil kullanıcı hızları kullanılmış ve veri akışı sayısı beş olarak belirlenmiştir. Çizelgelenen sonuçlar, 20 farklı topolojide olası her kaynak – hedef çifti için paket gönderim oranı, uçtan-uca paket gecikmesi ve iletilen veri miktarı değerlerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Kaydedilen performans sıralaması bir önceki simülasyondan elde edilen sıralama ile aynıdır. HyMPRo'nun düğüm gezginliği ve birincil kullanıcı aktivitesine ilişkin ağ topolojisindeki değişimleri yakalama / tespit etme konusunda ve performans ölçütleri bağlamında daha etkin olduğu ifade edilebilir.

Şekil 26'da görüldüğü üzere HyMPRo ve ROSA, ikincil kullanıcıların ortalama hızı arttıkça performans değerleri açısından lineer bir azalış gösterme eğilimindedir. Ancak geliştirilen yöntem dâhilinde ele alınan tıkanıklık farkındalığı ve yol çeşitliliği sayesinde HyMPRo Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarının değişken bağlantı koşullarına karşı etkili ve hızlı uyum gösterme yönüyle ROSA'ya üstün gelmektedir. Öte yandan, paket gönderim oranı, uçtan-uca paket gecikmesi ve iletilen veri miktarı değerlerinin Gymkhana ve SPR için doğrusal değil, üssel olarak azaldığını belirtmek gerekir.



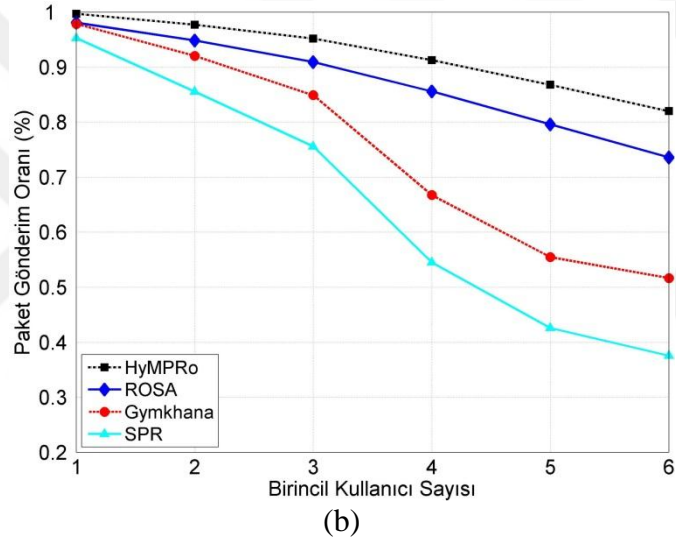
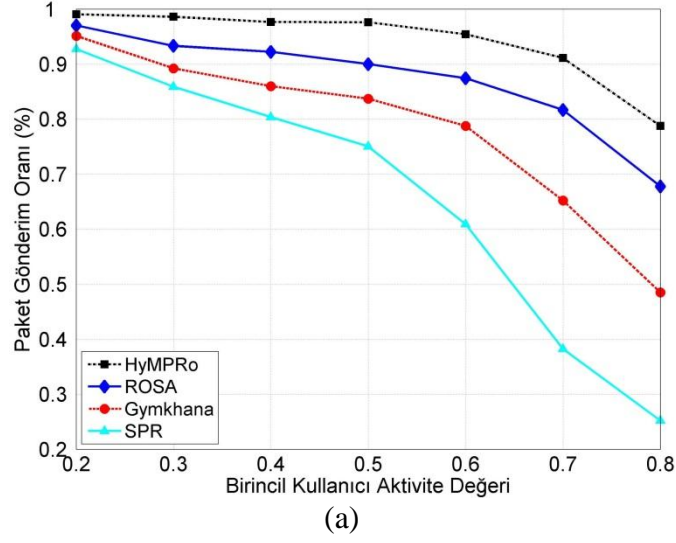
Şekil 26. Değişken ortalama düğüm hızına göre HyMPRo, ROSA, Gymkhana ve SPR'nin sergilediği performans değerleri

Son ve üçüncü örnek olay incelemesinde, gözlemlenen farklı birincil kullanıcı karakteristikleri bağlamında HyMPRo'nun performans analizi gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda beş veri akışı bulunmakta olup ikincil kullanıcıların ortalama hızı 2 m/s olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda üretilen 20 farklı topolojide her bir kaynak – hedef düğüm çifti için HyMPRo algoritması koşturulmuştur. Bu topolojilerde sabit üç adet birincil ve gezgin 40 adet ikincil kullanıcı bulunmaktadır.

Değişken birincil kullanıcı aktivite değerlerine göre paket gönderim oranı Şekil 27.a'da verilmiştir. Birincil kullanıcıların aktif olma durumları sıklaştıkça hedef düğüme başarılı bir şekilde gönderilen paketlerin sayısı azalmaktadır. SPR ve Gymkhana'nın veri paketlerini yalnızca bir rota üzerinden yönlendirmesi nedeniyle çok yollu yönlendirme algoritmalarına göre zayıf bir performans sergilemektedirler.

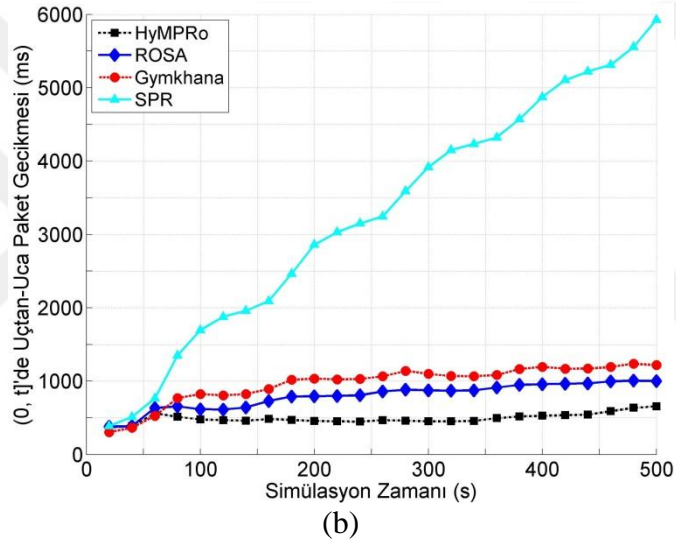
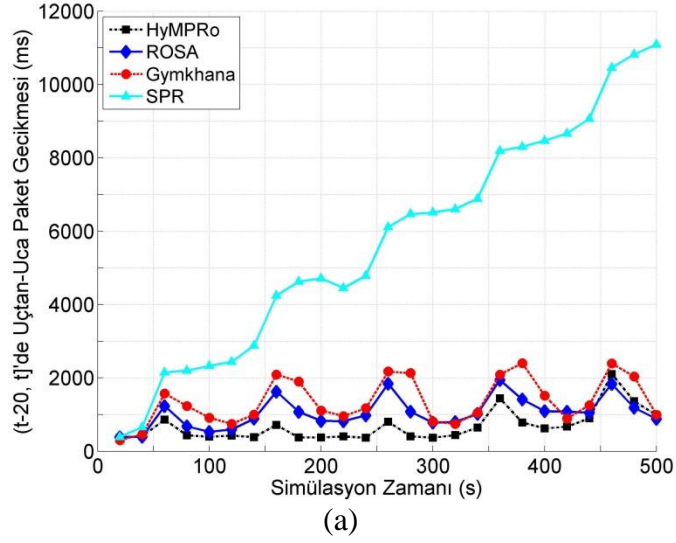
Rotalama sürecinde mevcutta kullanılan veri yolu birincil kullanıcılar tarafından yüksek seviyede etkilenmeye başlarsa Gymkhana, bu yolu yeniden düzenleme yeteneğine sahiptir. Fakat SPR için aynı durum söz konusu değildir. Çünkü kaynak ve hedef düğümler arasında birincil kullanıcı aktivitesi ne olursa olsun her zaman aynı en kısa rotayı kullanmaya devam etmektedir. HyMPRo tarafında ise yüksek birincil kullanıcı aktivite değerlerinde bile ROSA'ya kıyasla daha iyi sonuçların alındığı gözlemlenmektedir. Çoğunlukla, başlatılan veri akışları için HyMPRo, ROSA'dan daha fazla rota tespit etmekte ve dolayısıyla daha yüksek paket gönderim oranlarına ulaşabilmektedir.

Ağda yeni birincil kullanıcıların aktif olması ve birincil veri iletişimine katılması durumunda ikincil kullanıcılar tarafında paket gönderim oranı olumsuz yönde etkilenmektedir (Şekil 27.b). İlgili simülasyonda ağa katılan birincil kullanıcıların her biri için ortalama aktivite değeri 0.5 olarak belirlenmiştir. Performans sonuçları, birincil kullanıcıların sayısı özellikle mevcut kanalların sayısından daha fazla olduğunda ve tek yollu rotalama yöntemleri (SPR ve Gymkhana) çalıştırıldığında hedef düğüm tarafından alınan veri paketleri sayısının keskin bir şekilde düştüğünü göstermektedir. ROSA, paket gönderim oranında doğrusal bir düşüş sağlamaktadır. Nitekim HyMPRo'nun veri akışlarını daha fazla alternatif yollara atması nedeniyle paket gönderim oranı, uçtan-uca paket gecikmesi ve iletilen veri miktarı ölçütleri açısından karşılaştırılan diğer yöntemlere göre HyMPRo'dan daha fazla verim alınmaktadır.



Şekil 27. Birincil kullanıcı (a) aktivite değeri ve (b) sayısına göre paket gönderim oranı

Birincil kullanıcıların aktivite değerlerinin dışında ağa giriş ve ağdan çıkış zamanları da simülasyonlarda ele alınmıştır. Değerlendirmeye tabi tutulan ağ topolojilerinde 0.5'lik aktivite değerine sahip üç adet birincil kullanıcı bulunmaktadır. Bu kullanıcılar ağa yaklaşık 30., 130., 230., 330. ve 430. saniyelerde katılırken 80., 180., 280., 380. ve 480. saniyelerde ağdan ayrılmaktadır. Simülasyon sonuçları kapsamında son 20 saniyelik dilimler halinde hedef düğüm tarafından alınan veri paketlerinden elde edilen ortalama uçtan-uca paket gecikmesi Şekil 28.a'da gösterilmiştir. Örneğin, 240. ve 260. saniyeler arasında ortalama paket gecikmeleri HyMPRo, ROSA, Gymkhana ve SPR için sırasıyla 800, 1845, 2173 ve 6109 ms olarak ölçülmüştür.



Şekil 28. Hedef düğüme (a) her 20 saniye aralığında ve (b) simülasyonun başlangıcından ölçümlenimin yapıldığı t anına kadar ulaşan veri paketlerinin ortalama uçtan-uca paket gecikmesi

Karşılaştırılan rotalama yöntemlerinin koşturulmasıyla hesaplanan sayısal değerler, birincil kullanıcıların ağa giriş ve ağdan çıkış zamanları arasında dalgalanmaktadır (Şekil 28.a). SPR uyarlanabilir bir rotalama mekanizmasına sahip olmadığından dolayı paket gecikmesi simülasyon süresince giderek artmaktadır. Diğer taraftan, herhangi bir rota hatası ile karşılaşıldığında tanımlanan rota bakım mekanizması yardımıyla HyMPro rotalamada kullanılacak yolları yeniden uyarlayabilmektedir. ROSA ve Gymkhana tarafından da rota bakımı gerçekleştirilmesine rağmen bu algoritmalar için bulunan uçtan-uca paket gecikmeleri HyMPro'dan elde edilen değerlere göre daha yüksek çıkmaktadır.

Çünkü Gymkhana veri iletişimi için sadece tek bir rotadan faydalanırken ROSA ise daha fazla boş tampon belleğe sahip ara düğümleri tercih ederek rotalama için daha uygun yolları değerlendirme süreci dışına atmaktadır.

Simülasyonun başlangıcından itibaren bir t anına kadar hedef düğüme ulaşan veri paketlerinin ortalama uçtan-uca paket gecikmelerine dair grafik eğrileri Şekil 28.b'de verilmiştir. HyMPRo, ROSA ve Gymkhana için gecikme ölçümleri hemen hemen sabit kalmaktadır. Birincil kullanıcıların aktif olduğu zaman aralıklarında gözlemlenen paket gecikmelerindeki hızlı artışlar, uzun vadede bu uyarlanabilir rotalama algoritmaları ile dengelenebilmektedir. Ancak, kaynak ile hedef düğümler arasında her zaman en kısa yolun seçilmesine bağlı olarak SPR'den elde edilen uçtan-uca paket gecikmesi doğrusal olarak artmaktadır.

3.5. Karmaşıklık Analizi

SPR ve Gymkhana rotalama algoritmaları ile ilintili olarak rota keşif aşamasında kaynak düğümde oluşturulan RREQ mesajı, n düğümlü bir ağ topolojisinde ikincil kullanıcı IK_i 'ye ulaştığında ($0 < i \leq n$), bu mesaj IK_i tarafından en fazla $n - 1$ tane komşu düğüme gönderilir. Bu işlem kaynak düğüm ve hedef düğüm arasında maksimum $n - 1$ sekme boyunca tekrarlanır. Buradan hareketle, RREQ mesajının $(n - 1)^2$ tane kopyasının oluşturulabildiği söylenebilir.

SPR, sadece olası yollar üzerindeki sekme sayısı ile ilgilendiğinden hedef düğüme ulaşan bu kopyalar için $(n - 1)^2$ tane kıyaslama yapmaktadır. Nitekim Gymkhana aldığı her RREQ mesajı kopyasından takip edilen yolda yer alan düğümler için toplam m tane kanalın her biri üzerindeki komşuluğu belirlemek üzere komşuluk matrisi (A) oluşturmaktadır. Bulunan komşuluk matrisi kullanılarak derece matrisi (D), Laplace matrisi ($L = D - A$) ve L 'nin en büyük ikinci öz değeri hesaplanır. Kaynak ve hedef düğüm arasındaki maksimum uzunluğun n olduğu ve kullanılacak kanal sayısı için $m \leq n$ eşitsizliğinin sağlandığı kabul edilirse ikinci en büyük öz değerin çıkarıldığı L matrisinin büyüklüğü $n^2 \times m$ olacaktır. Gymkhana kapsamında $(n - 1)^2$ tane RREQ mesajı kopyasının her birisi için ikinci en büyük öz değeri bulmak üzere $n^2 \times m$ tane işlem yürütülmektedir.

ROSA, RREQ mesajlarını hedef düğüme doğru iletmeye devam ederken her bir ara düğüm tarafından en uygun sonraki komşu düğüm seçimi gerçekleştirilmektedir. Bu seçim

komşu düğümler üzerindeki boş tampon bellek miktarları üzerinden yapılmaktadır. Topolojide n tane düğümün, kaynak ile hedef düğüm arasında maksimum uzunluğun $n - 1$ sekme ve ara düğümlerin maksimum $n - 1$ komşu düğüme sahip olduğu kabul edilirse her bir ara düğüm üzerinde en fazla $n - 1$ adet, toplamda ise $(n - 1)^2$ işlem gerçekleştirilecektir.

HyMPRo algoritmasını kullanan ikincil kullanıcılar, Formül 22’te bulunan rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve rota çeşitliliği ile ilintili üç farklı veriden metrik değerlerini çıkarıp hibrit fayda fonksiyonu değerini hesaplamaktadır. Ara düğüm tarafından alınan RREQ mesajı, n düğümlü topolojide maksimum $n - 1$ düğümün bilgisini içerebileceğinden dolayı hibrit fayda fonksiyonu (19) değerinin hesaplanması için $3n + 1$ adet işlem gerekmektedir. Bulunan fayda fonksiyonu değerinin %50 ihtimalle önceki kaydedilen değerden yüksek çıkabileceği düşünülürse her bir düğüm aldığı RREQ mesajını ortalamada $(n - 1)/2$ komşu düğüme gönderecektir. Dolayısıyla, hedef düğüm tarafından maksimum $(n - 1)^2/2$ adet RREQ mesajı alınacak ve toplamda gerçekleştirilecek işlem sayısı $(3n + 1) \times (n - 1)^2/2$ olacaktır.

Karşılaştırılan yöntemlerin yürüttüğü işlem sayısı ve Büyük O Notasyonu aracılığıyla işlem karmaşıklığı değerleri Tablo 6’da özetlenmiştir.

Tablo 6. Karşılaştırılan algoritmaların karmaşıklık analizi

Algoritma	Gerçekleştirilen İşlem Sayısı	İşlem Karmaşıklığı
SPR	$(n - 1)^2$	$O(n^2)$
Gymkhana	$(n - 1)^2 \times n^2 \times m$	$O(n^4)$
ROSA	$(n - 1)^2$	$O(n^2)$
HyMPRo	$(3n + 1) \times (n - 1)^2/2$	$O(n^3)$

4. SONUÇLAR

Bilişsel Radyo kavramının ortaya atıldığı 1999 yılından itibaren bilim adamları alanla ilgili birçok çalışma gerçekleştirmişlerdir. Konunun yeni boyutlarıyla tartışılması, araştırılması ve irdelenmesi devam etmektedir. Nitekim sunulan çalışmalarda çoğunlukla Bilişsel Radyonun temel işlevlerinden spektrum algılama, spektrum paylaşımı, spektrum yönetimi ve spektrum değişimine yönelik hususlar ele alınmıştır. Üzerinde durulması gereken bir diğer önemli konu başlığı ise Bilişsel Radyo Ağlarında rotalama problemidir.

Tez çalışması kapsamında, herhangi bir yönlendiriciye veya erişim noktasına ihtiyaç duyulmayan Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında ikincil kullanıcıların bağlantı kurmalarında rol alacak etkin bir rotalama yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca yöntemin test edilmesi amacıyla olaya güdümlü benzetim ortamı oluşturulmuş ve literatürde yer alan farklı rotalama yöntemleri de kullanılarak kapsamlı sayısal veriler çıkarılmıştır.

Ortaya konan hibrit çok-yollu rotalama algoritmasının rota seçimi aşaması için 3 temel atomik metrik tanımlanmıştır. Bunlardan birincisi, ağ içindeki birincil kullanıcıların spektrum kullanımında sergiledikleri mekânsal ve zamansal düzensiz dalgalanmaları göz önünde bulunduran rota kararlılığı metriğidir. İkincisi, rota tespitinde rol alan ara düğümlerin tampon bellek doluluk oranlarını gözlemleyerek ağ içindeki veri trafiği sıklığına yönelik tasarlanan tıkanıklık farkındalığı metriğidir.

Üçüncü metrik ise rota çeşitliliğine yönelik geliştirilmiştir. Bu metriğin önerilmesindeki amaç, hedef ve kaynak düğümler arasında başlatılan farklı oturumlara ait verilerin sürekli olarak aynı rota ya da rotalardan iletilmesinden kaynaklanabilecek ikincil ağ tıkanıklıklarının, veri kayıplarının, yüksek veri gecikmesinin, iletilen veri miktarı düşüklüğünün önüne geçmek ve alternatif rotalar tespit etmektir. Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarının farklı karakteristiklerine dokunan atomik metrikler, olası alternatif yollardan en uygun olanının seçimi için tek bir hibrit fayda fonksiyonu altında birleştirilmiş ve formüle edilmiştir.

Çalışma yürütülürken üzerinde önemle durulan bir diğer husus yol seçiminin merkezi bir şekilde hedef düğümde gerçekleştirilmesi yerine ara düğümlerin de yapılan hesaplamalara katılmasını sağlamak olmuştur. Bir diğer ifade ile merkezi hesaplama yerine dağıtık hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede hedef düğüm üzerindeki hesaplama yükü hafifletilmiş, gereksiz olarak nitelendirilebilecek aday yolların büyük bir kısmı ara

düğüm tarafından elenmiş, ikincil ağda rota keşif aşamasının başlatılmasında ve yürütülmesinde kullanılan RREQ mesajlarından kaynaklanabilecek veri trafiği azaltılmıştır. Bahsedilen kazanımları sağlamak üzere çoklu-yol mekanizması oluşturulmuştur.

Rota keşfi için birden fazla yol üzerinden gönderilen RREQ mesajının yaşam süresi TTL değeri ile belirlenmektedir. Ancak Bilişsel Radyo cihazının donanımı ve/veya işletim sistemi tarafından atanan 64, 128, 256 gibi standart değerler gereksiz uzunlukta yolların tespitine ve bu yolların değerlendirme sürecine katılmasına neden olmaktadır. Çalışma kapsamında standart TTL değerlerinin yerine kullanılabilir bir TTL değerinin oluşturulmasına yönelik yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem ağ topolojisi içinde yer alan birbirlerine en uzak iki düğüm arasındaki mesafeyi, bir başka ifade ile ağ çapını temel almaktadır. Bulunan ağ çapına bir genişletme katsayısı uygulanmıştır. Bu katsayının kullanılması, birincil kullanıcı aktivitesi ve ikincil ağ trafiğinden kaynaklanabilecek nedenlerle en uzak iki düğüm arasında ağ çapından daha fazla sekme sayısına sahip en uygun rotayı bulmak için gereklidir.

Yürütülen çoklu-akış analizi kapsamında HyMPRo algoritmasına ait hibrit fayda fonksiyonunun doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Birincil kullanıcıların aktivitelerine, ara düğümlerin tampon bellek doluluk oranlarına ve düğümler tarafından gönderilen paket sayılarına göre farklı veri akışları / oturumları için farklı rotaların oluşturulduğu gösterilmiştir.

Kaynak ve hedef düğümler arasında aday yolların sayısını azaltan çoklu-yol mekanizması, literatürde yer alan AODV tarzındaki rotalama algoritmaları ile çoklu-yol analizi bağlamında irdelenmiştir. Simülasyonlar neticesinde HyMPRo'nun aday yolların sayısını çok önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Hatta ağdaki ikincil kullanıcı sayısı artarken aday yolların ortalama miktarının belli bir değere yakınsadığı tespit edilmiştir.

HyMPRo, literatürde yer alan üç farklı yöntem ile paket gönderim oranı, uçtan-uca paket gecikmesi ve iletilen veri miktarı gibi ölçütler temelinde kıyaslanmıştır. Bunlardan birincisi, tek-yollu rotalama algoritması olan ve her durum altında en kısa yolu en uygun rota olarak belirleyen SPR, performans değerleri açısından en kötü sonuçları üretmiştir. Kıyaslamalarda kullanılan ikinci yöntem Gymkhana her ne kadar rota kararlığına önem verse de birden fazla veri akışı başlatıldığında rotalama için tek bir rota belirlendiğinden elde edilen sayısal verilerin SPR'ye göre iyi olup HyMPRo'dan daha düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.

Karşılaştırma amacı ile başvurulan diğer yöntem çok-yollu rotalama algoritmaları sınıfına dâhil edilen ROSA'dır. Bu yöntem, rota seçiminde farksal birikimin en fazla olmasını sağlayan düğümlerin yer aldığı yolları öncelemekte olduğundan toplamda birincil kullanıcı aktivitelerinden en az düzeyde etkilenen yolların bir kısmını değerlendirme süreci dışına atmaktadır. Dolayısıyla performans değerleri açısından HyMPRo'ya baskın gelemediği elde edilen sayısal sonuçlar ile doğrulanmıştır.

Ağ topolojisinde bulunan birincil kullanıcıların aktivite değerleri ve sayıları arttıkça paket gönderim oranlarında çok-yollu rotalama algoritmalarının tek-yollu rotalama yöntemlerine üstünlük sağladığı tespit edilmiştir. Özellikle, birden fazla veri akışı olması durumunda bunların atandığı rotaların sayısı, paket gönderim oranındaki yüksek başarımlı açısından önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, HyMPRo bu anlamda ROSA'ya ve diğer tek-yollu rotalama algoritmalarına göre en iyi performansı sergileyen yöntem olmuştur.

Son olarak yapılan simülasyonlar şu gerçeği ortaya konmuştur: Birincil kullanıcıların ağa giriş ve ağdan ayrılış zamanları uçtan-uca paket gecikmesi ölçütünü önemli derecede etkilemektedir. İntitli olarak rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve yol çeşitliliği hususlarından en az birini dikkat alan yöntemler, bu hususları göz önünde bulundurmeyen yöntemlere kıyasla uçtan-uca paket gecikmesi ölçümleri için daha iyi sonuçlar üretmiştir. HyMPRo, bahsedilen tüm hususları ele almakla birlikte birincil kullanıcıların ağa giriş ve ağdan ayrılış zamanları aralığında gözlemlenen gecikme dalgalanmalarını dengeleyebilmiştir. Nitekim, sadece aday yollarda karşılaşılan sekme sayısına göre rota seçimi gerçekleştiren SPR algoritması için paket gecikmesi tüm simülasyon süresince artış göstermiştir.

5. ÖNERİLER

Tasarsız Bilişsel Radyo Ağlarında rotalama problemi üzerine önerilen çalışmalar genellikle tek-yollu rotalama yöntemlerini içermektedir. Özellikle kaynak ve hedef düğümler arasında birden fazla oturum başlatıldığında performans ölçütleri temelinde elde edilen sayısal verilerde bozulma gözlemlenmektedir. Dolayısıyla çok-yollu rotalama algoritmaları tasarımının ve tercihinin birden fazla veri akışını birden fazla rotaya atayarak rotalama sürecini olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir.

Bilişsel Radyoya özgülenebilecek birçok karakteristik bulunmaktadır. Nitekim bu özelliklerden hiçbirini ya da bir kısmını rotalama sürecine dâhil etmek, hedeflenen başarımlar açısından engel teşkil etmektedir. Bu tez çalışmasında tanımlanan rota kararlılığı, tıkanıklık farkındalığı ve rota çeşitliliği, Bilişsel Radyo kapsamında ele alınması gereken üç önemli hususa değinmektedir. Nitekim belirtilen özelliklerin dışında karakteristiklerin tespitinin, bunların rota seçimini etkileyecek yönde geliştirilecek atomik metriklere yerleştirilmesinin ve bu doğrultuda tasarlanacak bir fayda fonksiyonunun ortaya konulmasının rotalama probleminin çözümüne yönelik önemli bir üstünlük sağlayabileceği beklenmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalarda aday yolların değerlendirilmesi için gerekli hesaplamalar, çoğunlukla hedef düğüm üzerinde gerçekleştirilmektedir. Ancak kaynak ve hedef düğümler arasındaki sekme sayısının artışı doğal olarak tespit edilen aday yolların hem uzunluğunu hem de sayısını artırmaktadır. Böyle bir yöntemde başvuru, hedef düğümde hesaplama karmaşıklığı artışı olarak karşımıza çıkmaktadır. Merkezi değerlendirmeler yerine dağıtık hesaplamaların kullanımı, gereksiz olarak nitelendirilebilecek yolların bir kısmının ara düğümlerde elenmesini sağlayabileceği gibi hedef düğüm üzerindeki işlem karmaşıklığını büyük oranda azaltacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Bir diğer öneri, ikincil kullanıcıların gezginliği ile ilintilidir. Gerçek senaryolarla uyumlu olması açısından tasarlanan rotalama algoritmasının gezginlik desteğini sağlaması gerekmektedir. Çünkü gezginlik, kablosuz ağlarda bağlantı kopmasından kaynaklanan rotalama hatası oranını artırmaktadır. Fakat mevcut metriklerin büyük bir kısmı, ikincil kullanıcıların sabit olduğu varsayımıyla tasarlanmıştır. Belirtmelidir ki kablosuz ağlarda mobil kullanıcıların varlığı norm haline gelmektedir. Bu doğrultuda ikincil kullanıcılara

atfedilebilecek farklı gezginlik modellerinin ele alınması gelecekteki rotalama yöntemlerinin tasarımları için önem arz etmektedir.

Bilişsel Radyo teknolojisi esas olarak kablosuz ağlarla birlikte çalışmak ve özelliklerinden faydalanmak üzere geliştirilmiştir. Gelişim sürecini devam ettirmekte olan diğer ağlar benzer işlevsel ortamlara sahiptir. Bu nedenle performanslarını arttırmak ve uygulama alanlarını genişletmek amacıyla Bilişsel Radyo Ağları ile birleştirebilirler. Son zamanlarda ilgi çekmekte olan gecikme toleranslı ağlar (delay tolerant networks – DTN) [141], birincil kullanıcı aktivitesine bağlı olarak rotalama hatasından kaynaklanan bağlantı kopması nedeniyle ortaya çıkan gecikmelere tolerans gösterme zorluğunu paylaştıklarından Bilişsel Radyo Ağlarıyla bir araya getirilmeleri akılcı bir yaklaşım olacaktır. Her iki alanı da yansıtan yeni bir metrik elde etmek için tasarım özelliklerini birleştirmek performans açısından daha fazla kazanım elde edilmesini sağlayabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Federal Communications Commission (FCC), Spectrum policy task force report, Yayın No: 02-135, Washington, DC, ABD, 2002.
2. Mitola, J. ve Maguire, G. Q., Cognitive radio: making software radios more personal, IEEE Personal Communications, 6, 4 (1999) 13-18.
3. Haykin, S., Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 23, 2 (2005) 201-220.
4. Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C. ve Mohanty, S.. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey, Computer Networks, 50, 13 (2006) 2127-2159.
5. Federal Communications Commission (FCC), Second memorandum opinion and order, Yayın No: 10-174, Washington, DC, ABD, 2010.
6. Stevenson, C. R., Chouinard, G., Lei, Z., Hu, W., Shellhammer, S. J. ve Caldwell, W., IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard, IEEE Communications Magazine, 47, 1 (2009) 130-138.
7. IEEE 802.11h, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5 GHz Band in Europe, IEEE, New Jersey, ABD, 2003.
8. IEEE 802.11y, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: 3650-3700 MHz Operation in USA, IEEE, New Jersey, ABD, 2008.
9. IEEE 802.16h, Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Improved Coexistence Mechanisms for License-Exempt Operation, IEEE, New Jersey, ABD, 2010.
10. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 11. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Şurası Sonuç Bildirgesi, Ankara, 2013.
11. Yucek, T. ve Arslan, H., A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11, 1 (2009) 116-130.
12. Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C. ve Mohanty, S., A survey on spectrum management in cognitive radio networks, IEEE Communications Magazine, 46, 4 (2009) 40-48.

13. Sadreddini, Z. ve Çavdar, T., Performance analysis of dynamic spectrum management in cognitive radio networks, Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT), Nisan 2017, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 1-4.
14. Çavdar, T. ve Sadreddini, Z., QoS-driven pricing policy for cognitive radio networks. Sakarya University Journal of Science, 21, 4 (2017) 637-642.
15. Christian, I., Moh, S., Chung, I. ve Lee, J., Spectrum mobility in cognitive radio networks, IEEE Communications Magazine, 50, 6 (2012) 114-121.
16. Mansoor, N., Islam, A. M., Zareei, M., Baharun, S., Wakabayashi, T. ve Komaki, S. Cognitive radio ad-hoc network architectures: a survey, Wireless Personal Communications, 81, 3 (2015) 1117-1142.
17. Abdelaziz, S. ve ElNainay, M., Metric-based taxonomy of routing protocols for cognitive radio ad hoc networks, Journal of Network and Computer Applications, 40 (2014) 151-163.
18. Ralston, A., Reilly, E. D. ve Hemmendinger, D., Encyclopedia of Computer Science. Nature Publishing Group, 2000.
19. Mitola III, J., Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications, Mobile Networks and Applications, 6, 5 (2001) 435-441.
20. Federal Communications Commission (FCC), Notice of proposed rulemaking, Yayın No: 03-322, Washington, DC, ABD, 2003.
21. Dillinger, M., Madani, K. ve Alonistioti, N., Software defined radio: Architectures, Systems and Functions, John Wiley & Sons, 2005.
22. Thomas, R. W., DaSilva, L. A. ve MacKenzie, A. B., Cognitive networks, First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), Kasım 2005, Baltimore, MD, ABD, Bildiriler Kitabı, 352-360.
23. Jondral, F. K., Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2005, 3 (2005) 275-283.
24. Wang, B. ve Liu, K. R., Advances in cognitive radio networks: A survey, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 5, 1 (2011) 5-23.
25. Mitola III, J., Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio, Doktora Tezi, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, İsveç, 2000.

26. Masonta, M. T., Mzyece, M. ve Ntlatlapa, N., Spectrum decision in cognitive radio networks: A survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 15, 3 (2013) 1088-1107.
27. Ali, A. ve Hamouda, W., Advances on spectrum sensing for cognitive radio networks: Theory and applications, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19, 2 (2017) 1277-1304.
28. Briscoe, N., Understanding The OSI 7-Layer Model, PC Network Advisor, 120, 2 (2000) 13-14.
29. Margoosian, A., Abouei, J. ve Plataniotis, K. N., An accurate kernelized energy detection in gaussian and non-gaussian/impulsive noises, IEEE Transactions on Signal Processing, 63, 21 (2015) 5621-5636.
30. Dikmese, S., Sofotasios, P. C., Renfors, M. ve Valkama, M., Subband energy based reduced complexity spectrum sensing under noise uncertainty and frequency-selective spectral characteristics, IEEE Transactions on Signal Processing, 64, 1 (2016) 131-145.
31. Zhang, X., Chai, R. ve Gao, F., Matched filter based spectrum sensing and power level detection for cognitive radio network, Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Aralık 2014, Atlanta, GA, ABD, Bildiriler Kitabı, 1267-1270.
32. Sepidband, P. ve Entesari, K., A CMOS spectrum sensor based on quasi-cyclostationary feature detection for cognitive radios, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 63, 12 (2015) 4098-4109.
33. Kortun, A., Ratnarajah, T., Sellathurai, M., Liang, Y. C. ve Zeng, Y., On the eigenvalue-based spectrum sensing and secondary user throughput, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63, 3 (2014) 1480-1486.
34. Orooji, M., Soltanmohammadi, E. ve Naraghi-Pour, M., Improving detection delay in cognitive radios using secondary-user receiver statistics, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 64, 9 (2015) 4041-4055.
35. Verde, F., Scaglione, A., Darsena, D. ve Gelli, G., An amplify-and-forward scheme for spectrum sharing in cognitive radio channels, IEEE Transactions on Wireless Communications, 14, 10 (2015) 5629-5642.
36. Sahoo, P. K. ve Sahoo, D., Sequence-based channel hopping algorithms for dynamic spectrum sharing in cognitive radio networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 34, 11 (2016) 2814-2828.
37. Zhao, N., Yu, F. R., Sun, H. ve Li, M., Adaptive power allocation schemes for spectrum sharing in interference-alignment-based cognitive radio networks, IEEE transactions on vehicular technology, 65, 5 (2016) 3700-3714.

38. Feng, X., Sun, G., Gan, X., Yang, F., Tian, X., Wang, X. ve Guizani, M., Cooperative spectrum sharing in cognitive radio networks: A distributed matching approach, IEEE Transactions on Communications, 62, 8 (2014) 2651-2664.
39. Hawa, M., AlAmmouri, A., Alhiary, A. ve Alhamad, N., Distributed opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks, International Journal of Communication Systems, 30, 7 (2017) 1-30.
40. Pandit, S. ve Singh, G., An overview of spectrum sharing techniques in cognitive radio communication system, Wireless Networks, 23, 2 (2017) 497-518.
41. Fahimi, M. ve Ghasemi, A., A Distributed Learning Automata Scheme for Spectrum Management in Self-Organized Cognitive Radio Network, IEEE Transactions on Mobile Computing, 16, 6 (2017) 1490-1501.
42. Haykin, S., Setoodeh, P., Feng, S. ve Findlay, D., Cognitive dynamic system as the brain of complex networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 34, 10 (2016) 2791-2800.
43. Bayhan, S. ve Alagöz, F., A Markovian approach for best-fit channel selection in cognitive radio networks, Ad Hoc Networks, 12 (2014) 165-177.
44. Pérez-Romero, J., Raschellà, A., Sallent, O. ve Umbert, A., A Belief-based Decision-making Framework for Spectrum Selection in Cognitive Radio Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65, 10 (2016) 8283-8296.
45. Combes, R. ve Proutiere, A., Dynamic rate and channel selection in cognitive radio systems, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 33, 5 (2015) 910-921.
46. Wang, L. C., Wang, C. W. ve Chang, C. J. (2012). Modeling and analysis for spectrum handoffs in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 11(9), 1499-1513.
47. Lee, W. Y. ve Akyildiz, I. F., Spectrum-aware mobility management in cognitive radio cellular networks, IEEE Transactions on Mobile Computing, 11, 4 (2012) 529-542.
48. Chengyu, W., Chen, H. ve Lingge, J., Spectrum handoff scheme based on recommended channel sensing sequence, China Communications, 10, 8 (2013) 18-26.
49. Bicen, A. O., Pehlivanoglu, E. B., Galmes, S. ve Akan, O. B., Dedicated radio utilization for spectrum handoff and efficiency in cognitive radio networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, 14, 9 (2015) 5251-5259.

50. Chu, J. H., Ma, R. T. ve Feng, K. T., Stochastic spectrum handoff protocols for partially observable cognitive radio networks, Wireless Networks, 20, 5 (2014) 1003-1022.
51. Kumar, K., Prakash, A. ve Tripathi, R. Spectrum handoff in cognitive radio networks: A classification and comprehensive survey, Journal of Network and Computer Applications, 61 (2016) 161-188.
52. Chen, K. C., Peng, Y. J., Prasad, N., Liang, Y. C. ve Sun, S., Cognitive radio network architecture: part I--general structure, 2nd International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication, Ocak 2008, Suwon, Güney Kore, Bildiriler Kitabı, 114-119.
53. International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector (ITU-R), Radio Regulations, Cenevre, İsviçre, 2008.
54. Niyato, D. ve Hossain, E., Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach, IEEE Transactions on wireless communications, 7, 7 (2008) 2651-2660.
55. Wang, X., Li, Z., Xu, P., Xu, Y., Gao, X. ve Chen, H. H., Spectrum sharing in cognitive radio networks—An auction-based approach, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 40, 3 (2010) 587-596.
56. Jayaweera, S. K., Vazquez-Vilar, G. ve Mosquera, C., Dynamic spectrum leasing: A new paradigm for spectrum sharing in cognitive radio networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 59, 5 2010 2328-2339.
57. Wang, B., Wu, Y. ve Liu, K. R., Game theory for cognitive radio networks: An overview, Computer networks, 54, 14 (2010) 2537-2561.
58. Ahmed, Z. I. A. M., Bilal, D. K. H. ve Alhassan, D. M., Cognitive Radio Network Review, International Journal of Engineering, Applied and Management Sciences Paradigms, 13, 1 (2016) 320-327.
59. Akyildiz, I. F., Lee, W. Y. ve Chowdhury, K. R., CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks, Ad Hoc Networks, 7, 5 (2009) 810-836.
60. Jiang, D., Ying, X., Han, Y. ve Lv, Z., Collaborative multi-hop routing in cognitive wireless networks, Wireless Personal Communications, 86, 2 (2016) 901-923.
61. Xue, D. ve Ekici, E., Cross-layer scheduling for cooperative multi-hop cognitive radio networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 31, 3 (2016) 534-543.

62. Ejaz, W., Ul Hasan, N. ve Kim, H. S., Distributed cooperative spectrum sensing in cognitive radio for ad hoc networks, Computer Communications, 36, 12 (2013) 1341-1349.
63. Vosoughi, A., Cavallaro, J. R. ve Marshall, A., Trust-aware consensus-inspired distributed cooperative spectrum sensing for cognitive radio ad hoc networks, IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2, 1 (2016) 24-37.
64. Akyildiz, I. F. ve Wang, X., A survey on wireless mesh networks, IEEE Communications Magazine, 43, 9 (2005) 23-30.
65. Simeone, O., Stanojev, I., Savazzi, S., Bar-Ness, Y., Spagnolini, U. ve Pichholtz, R., Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 26, 1 (2008) 203-213.
66. Jayaweera, S. K. ve Li, T., Dynamic spectrum leasing in cognitive radio networks via primary-secondary user power control games, IEEE Transactions on Wireless Communications, 8, 6 (2009) 3300-3310.
67. Duan, L., Huang, J. ve Shou, B., Investment and pricing with spectrum uncertainty: A cognitive operator's perspective, IEEE Transactions on Mobile Computing, 10, 11 (2011) 1590-1604.
68. Li, S., Huang, J. ve Li, S. Y. R., Dynamic profit maximization of cognitive mobile virtual network operator, IEEE Transactions on Mobile Computing, 13, 3 (2014) 526-540.
69. Wang, J., Ghosh, M. ve Challapali, K., Emerging cognitive radio applications: A survey, IEEE Communications Magazine, 49, 3 (2011) 74-81.
70. Sun, Y. ve Chowdhury, K. R., Enabling emergency communication through a cognitive radio vehicular network, IEEE Communications Magazine, 52, 10 (2014) 68-75.
71. Ghafoor, S., Sutton, P. D., Sreenan, C. J. ve Brown, K. N., Cognitive radio for disaster response networks: survey, potential, and challenges, IEEE Wireless Communications, 21, 5 (2014) 70-80.
72. Ferrus, R., Sallent, O., Baldini, G. ve Goratti, L., Public safety communications: Enhancement through cognitive radio and spectrum sharing principles, IEEE Vehicular Technology Magazine, 7, 2 (2012) 54-61.
73. Ge, F., Lin, H., Khajeh, A., Chiang, C. J., Ahmed, M. E., Charles, W. B., Feng, W. ve Chadha, R., Cognitive radio rides on the cloud, Military Communications Conference (MILCOM), Ekim 2010, San Jose, CA, ABD, Bildiriler Kitabı, 1448-1453.

74. Bräysy, T., Tuukkanen, T., Couturier, S., Verheul, E., Smit, N., Buchin, B., Nir, V.L. ve Krygier, J., Network management issues in military cognitive radio networks, International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS), Mayıs 2017, Oulu, Finlandiya, Bildiriler Kitabı, 1-6.
75. Saleem, Y., Rehmani, M. H. ve Zeadally, S., Integration of cognitive radio technology with unmanned aerial vehicles: issues, opportunities, and future research challenges, Journal of Network and Computer Applications, 50 (2015) 15-31.
76. Sum, C. S., Villardi, G. P., Rahman, M. A., Baykas, T., Tran, H. N., Lan, Z., Sun, C., Alemseged, Y., Wang, J., Song, C., Pyo, C. W., Filin, S. ve Harada, H., Cognitive communication in tv white spaces: An overview of regulations, standards, and technology, IEEE Communications Magazine, 51, 7 (2013) 138-145.
77. Feng, S., Liang, Z. ve Zhao, D., Providing telemedicine services in an infrastructure-based cognitive radio network, IEEE Wireless Communications, 17, 1 (2010) 96-103.
78. Chávez-Santiago, R., Nolan, K. E., Holland, O., De Nardis, L., Ferro, J. M., Barroca, N., Borges, L. M., Velez, F. J., Goncalves, V. ve Balasingham, I., Cognitive radio for medical body area networks using ultra wideband, IEEE Wireless Communications, 19, 4 (2012) 74-81.
79. Khan, A. A., Rehmani, M. H. ve Reisslein, M., Cognitive radio for smart grids: Survey of architectures, spectrum sensing mechanisms, and networking protocols, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18, 1 (2016) 860-898.
80. Ashton, K., That ‘internet of things’ thing, RFID Journal, 22, 7 (2009) 97-114.
81. Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P. ve Georgakopoulos, D., Context aware computing for the internet of things: A survey, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16, 1 (2014) 414-454.
82. Wu, Q., Ding, G., Xu, Y., Feng, S., Du, Z., Wang, J. ve Long, K., Cognitive internet of things: a new paradigm beyond connection, IEEE Internet of Things Journal, 1, 2 (2014) 129-143.
83. Khan, A. A., Rehmani, M. H. ve Rachedi, A., Cognitive-radio-based internet of things: Applications, architectures, spectrum related functionalities, and future research directions, IEEE Wireless Communications, 24, 3 (2017) 17-25.
84. Huang, X., Han, T. ve Ansari, N., On green-energy-powered cognitive radio networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17, 2 (2015) 827-842.
85. Forouzan, A. B., Data Communications & Networking, Fourth Edition, McGraw-Hill Education, New York, ABD, 2006.

86. Tanenbaum, A. S., Computer Networks, Fifth Edition, Prentice Hall, ABD, 2011.
87. Bertsekas, D. ve Gallager, R., Data Networks, Second Edition, Prentice Hall, ABD, 1992.
88. Bagad, V. S. ve Dhotre, I. A., Computer Communication Networks, Technical Publications, Pune, Hindistan, 2006.
89. Royer, E. M. ve Toh, C. K., A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks, IEEE Personal Communications, 6, 2 (1999) 46-55.
90. RFC 6126, The Babel Routing Protocol, Internet Engineering Task Force, Fremont, California, ABD, 2011.
91. RFC 3626, Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), Internet Engineering Task Force, Fremont, California, ABD, 2003.
92. RFC 3561, Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV), Internet Engineering Task Force, Fremont, California, ABD, 2003.
93. RFC 4728, The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4, Internet Engineering Task Force, Fremont, California, ABD, 2007.
94. Cormio, C. ve Chowdhury, K. R., A survey on MAC protocols for cognitive radio networks, Ad Hoc Networks, 7, 7 (2009) 1315-1329.
95. Haykin, S., Reed, J. H., Li, G. Y. ve Shafi, M., Scanning the issue, Proceedings of the IEEE, 97, 5 (2009) 784-786.
96. Cheng, G., Liu, W., Li, Y. ve Cheng, W., Spectrum aware on-demand routing in cognitive radio networks, 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), Nisan 2007, Dublin, İrlanda, Bildiriler Kitabı, 571-574.
97. Cesana, M., Cuomo, F. ve Ekici, E., Routing in cognitive radio networks: Challenges and solutions, Ad Hoc Networks, 9, 3 (2011) 228-248.
98. Federal Communications Commission (FCC), Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands, Yayın No: 08-260, Washington, DC, ABD, 2008

99. Youssef, M., Ibrahim, M., Latif, M. A., Chen, L. ve Vasilakos, A. V., Routing Metrics of Cognitive Radio Networks: A Survey, IEEE Communications Surveys and Tutorials, 16, 1 (2014) 92-109.
100. Chowdhury, K. R. ve Felice, M. D., Search: A routing protocol for mobile cognitive radio ad-hoc networks, Computer Communications, 32, 18 (2009) 1983-1997.
101. Habak, K., Abdelatif, M., Hagrass, H., Rizc, K. ve Youssef, M., A location-aided routing protocol for cognitive radio networks, International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Ocak 2013, San Diego, ABD, Bildiriler Kitabı, 729-733.
102. Tang, F., Barolli, L. ve Li, J., A joint design for distributed stable routing and channel assignment over multihop and multiflow mobile ad hoc cognitive networks, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10, 2 (2014) 1606-1615.
103. Lee, J. J. ve Lim, J., Cognitive routing for multi-hop mobile cognitive radio ad hoc networks, Journal of Communications and Networks, 16, 2 (2014) 155-161.
104. Caleffi, M., Akyildiz, I. F. ve Paura, L., OPERA: Optimal routing metric for cognitive radio ad hoc networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, 11, 8 (2012) 2884-2894.
105. Zhu, G. M., Akyildiz, I. F. ve Kuo, G. S., STOD-RP: A spectrum-tree based on-demand routing protocol for multi-hop cognitive radio networks, Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Kasım 2008, New Orleans, ABD, 1-5.
106. Bădoi, C. I., Croitoru, V. ve Prasad, R., IPSAG: an IP spectrum aware geographic routing algorithm proposal for multi-hop cognitive radio networks, 8th International Conference on Communications (COMM), Haziran 2010, Bükreş, Romanya, Bildiler Kitabı, 491-496.
107. Yang, Z., Cheng, G., Liu, W., Yuan, W. ve Cheng, W., Local coordination based routing and spectrum assignment in multi-hop cognitive radio networks, Mobile Networks and Applications, 13, 1-2 (2008) 67-81.
108. Khalife, H., Ahuja, S., Malouch, N. ve Krunz, M., Probabilistic path selection in opportunistic cognitive radio networks, Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) , Kasım 2008, New Orleans, ABD, 1-5.

109. Huang, X., Lu, D., Li, P. ve Fang, Y., Coolest path: Spectrum mobility aware routing metrics in cognitive ad hoc networks, 31st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), Haziran 2011, Minneapolis, Minnesota, ABD, Bildiriler Kitabı, 182-191.
110. Filippini, I., Ekici, E. ve Cesana, M., Minimum maintenance cost routing in cognitive radio networks, 6th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), Ekim 2009, Macau, Çin, Bildiriler Kitabı, 284-293.
111. Salim, S. ve Moh, S., On-demand routing protocols for cognitive radio ad hoc networks, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, 1 (2013) 1-10.
112. Cacciapuoti, A. S., Calcagno, C., Caleffi, M. ve Paura, L., CAODV: Routing in mobile ad-hoc cognitive radio networks, IFIP Wireless Days (WD), Ekim 2010, Venedik, İtalya, 1-5.
113. Cacciapuoti, A. S., Caleffi, M. ve Paura, L., Reactive routing for mobile cognitive radio ad hoc networks, Ad Hoc Networks, 10, 5 (2012) 803-815.
114. Joshi, G. P., Kim, S. W. ve Nam, S. Y., Routing Layer Solution for Mitigating Frequent Channel Switching in Ad Hoc Cognitive Radio Networks, IEEE Communications Letters, 19, 11 (2015) 1917-1920
115. El Garoui, L., Ajib, W. ve Elbiaze, H., CO-TORA on-demand routing protocol for cognitive radio ad-hoc networks, International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Ağustos 2014, Lefkoşa, Kıbrıs, 654-659.
116. Park, V. ve Corson, S., Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification, IETF MANET Working Group, Fremont, California, ABD, Temmuz 2001.
117. Song, H. ve Lin, X., Spectrum aware highly reliable routing in multihop cognitive radio networks, International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WSCP), Kasım 2009, Nanjing, Çin, 1-5.
118. Beltagy, I., Youssef, M. ve El-Derini, M., A new routing metric and protocol for multipath routing in cognitive networks, Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Mart 2011, Cancun, Meksika, 974-979.

119. Chen, P. Y., Cheng, S. M., Ao, W. C. ve Chen, K. C., Multi-path routing with end-to-end statistical QoS provisioning in underlay cognitive radio networks, *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, Nisan 2011, Shanghai, Çin, 7-12.
120. Lin, L. ve Tian, J., Stable-aware traffic assignment for multi-path routing in cognitive radio ad hoc networks, *International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC)*, Ekim 2011, Beijing, Çin, 511-514.
121. Chowdhury, K. R. ve Akyildiz, I. F., CRP: A routing protocol for cognitive radio ad hoc networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29, 4 (2011) 794-804.
122. Kamruzzaman, S. M., Kim, E., Jeong, D. G. ve Jeon, W. S., Energy-aware routing protocol for cognitive radio ad hoc networks, *IET Communications*, 6, 14 (2012) 2159-2168.
123. Hassnawi, L. A., Ahmad, R. B., Yahya, A., Aljunid, S. A. ve Elshaikh, M., Performance analysis of various routing protocols for motorway surveillance system cameras' network, *International Journal of Computer Science Issues*, 9 (2012) 7-21.
124. Karmoose, M., Habak, K., ElNainay, M. ve Youssef, M., Dead zone penetration protocol for cognitive radio networks, *9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Ekim 2013, Lyon, Fransa, 529-536.
125. Gui, L., Zhong, X. ve Zou, S., Traffic assignment algorithm for multi-path routing in Cognitive Radio Ad Hoc Networks, *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Nisan 2013, Shanghai, Çin, 1168-1173.
126. Juang, T. Y., Chen, Y. S. ve Hsu, C. L., An Efficient Multi-path Routing Scheme for Cognitive Ad-Hoc Networks, *7th International Conference on Ubi-Media Computing and Workshops (UMEDIA)*, Temmuz 2014, Ulaanbaatar, Moğolistan, 231-237.
127. Jin, X., Zhang, R., Sun, J. ve Zhang, Y., TIGHT: A geographic routing protocol for cognitive radio mobile ad hoc networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13, 8 (2014) 4670-4681.
128. Ping, S., Aijaz, A., Holland, O. ve Aghvami, A. H., SACRP: A spectrum aggregation-based cooperative routing protocol for cognitive radio ad-hoc networks, *IEEE Transactions on Communications*, 63, 6 (2015) 2015-2030.

129. Ji, S., Yan, M., Beyah, R. ve Cai, Z., Semi-structure routing and analytical frameworks for cognitive radio networks, IEEE Transactions on Mobile Computing, 15, 4 (2016) 996-1008.
130. Cui, C., Man, H., Wang, Y. ve Liu, S., Optimal cooperative spectrum aware opportunistic routing in cognitive radio ad hoc networks, Wireless Personal Communications, 91, 1 (2016) 101-118.
131. Cui, C. ve Wang, Y., Analysis and optimization of sensing reliability for relay-based dual-stage collaborative spectrum sensing in cognitive radio networks, Wireless personal communications, 72, 4 (2013) 2321-2337.
132. Pourpeighambar, B., Dehghan, M. ve Sabaei, M., Multi-agent learning based routing for delay minimization in Cognitive Radio Networks, Journal of Network and Computer Applications, 84 (2017) 82-92.
133. Grondman, I., Busoniu, L., Lopes, G. A. ve Babuska, R., A survey of actor-critic reinforcement learning: Standard and natural policy gradients, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 42, 6 (2012) 1291-1307.
134. Omar, S., El Ghandour, O. ve Abd El-Haleem, A. M., Multipath Activity Based Routing Protocol for Mobile Cognitive Radio Ad Hoc Networks, Wireless Communications and Mobile Computing, 2017 (2017) 1-12.
135. Marina, M. K. ve Das, S. R., On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks, Ninth International Conference on Network Protocols, Kasım 2001, Riverside, California, ABD, 14-23.
136. Lee, W. Y. ve Akyildiz, I. F., Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, 7, 10 (2008) 3845-3857.
137. Garcia, N. M., Lenkiewicz, P., Freire, M. M. ve Monteiro, P. P., On the Performance of Shortest Path Routing Algorithms for Modeling and Simulation of Static Source Routed Networks--an Extension to the Dijkstra Algorithm, Second International Conference on Systems and Networks Communications (ICSNC), Ağustos 2007, Cap Esterel, Fransız Riviyerası, Fransa, 1-6.
138. Abbagnale, A. ve Cuomo, F., Leveraging the algebraic connectivity of a cognitive network for routing design, IEEE Transactions on Mobile Computing, 11, 7 (2012) 1163-1178.

139. Dijkstra, E. W., A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, 1 (1959) 269-271.
140. Ding, L., Melodia, T., Batalama, S. N., Matyjas, J. D. ve Medley, M. J., Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59, 4 (2010) 1969-1979.
141. Spyropoulos, T., Rais, R. N. B., Turetli, T., Obraczka, K. ve Vasilakos, A., Routing for disruption tolerant networks: taxonomy and design, *Wireless Networks*, 16, 8 (2010) 2349-2370.



7. EKLER

Ek 1. Hibrit Fayda Fonksiyonunun Farklı Metrik Değerleri için Aldığı Değerler

Ek Tablo 1. $m_3 = 0.1$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0101	0.0204	0.0310	0.0418	0.0528	0.0641	0.0756	0.0874	0.0994	0.1116
	0.2	0.0102	0.0209	0.0320	0.0437	0.0558	0.0685	0.0817	0.0954	0.1097	0.1246
	0.3	0.0103	0.0214	0.0331	0.0456	0.0590	0.0731	0.0882	0.1042	0.1211	0.1391
	0.4	0.0104	0.0218	0.0342	0.0477	0.0623	0.0781	0.0952	0.1138	0.1337	0.1553
	0.5	0.0106	0.0223	0.0354	0.0498	0.0658	0.0835	0.1029	0.1242	0.1476	0.1733
	0.6	0.0107	0.0228	0.0366	0.0521	0.0695	0.0892	0.1111	0.1356	0.1630	0.1935
	0.7	0.0108	0.0233	0.0378	0.0544	0.0735	0.0952	0.1200	0.1481	0.1800	0.2160
	0.8	0.0109	0.0238	0.0391	0.0569	0.0776	0.1017	0.1296	0.1617	0.1987	0.2411
	0.9	0.0110	0.0244	0.0404	0.0594	0.0820	0.1087	0.1400	0.1766	0.2194	0.2691
	1.0	0.0112	0.0249	0.0417	0.0621	0.0867	0.1161	0.1512	0.1929	0.2422	0.3004

Ek Tablo 2. $m_3 = 0.2$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0101	0.0205	0.0311	0.0420	0.0531	0.0645	0.0761	0.0881	0.1003	0.1127
	0.2	0.0102	0.0210	0.0322	0.0440	0.0564	0.0693	0.0828	0.0969	0.1117	0.1271
	0.3	0.0104	0.0215	0.0334	0.0462	0.0599	0.0745	0.0901	0.1067	0.1244	0.1433
	0.4	0.0105	0.0220	0.0346	0.0485	0.0636	0.0800	0.0980	0.1175	0.1386	0.1616
	0.5	0.0106	0.0225	0.0359	0.0508	0.0675	0.0860	0.1065	0.1293	0.1544	0.1822
	0.6	0.0107	0.0231	0.0372	0.0534	0.0717	0.0924	0.1159	0.1423	0.1721	0.2054
	0.7	0.0109	0.0237	0.0386	0.0560	0.0761	0.0993	0.1260	0.1567	0.1917	0.2316
	0.8	0.0110	0.0242	0.0400	0.0587	0.0808	0.1067	0.1371	0.1724	0.2135	0.2612
	0.9	0.0111	0.0248	0.0415	0.0616	0.0858	0.1147	0.1491	0.1898	0.2379	0.2945
	1.0	0.0113	0.0254	0.0430	0.0646	0.0911	0.1233	0.1621	0.2089	0.2650	0.3320

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 3. $m_3 = 0.3$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0101	0.0205	0.0312	0.0421	0.0534	0.0649	0.0767	0.0888	0.1012	0.1139
	0.2	0.0103	0.0211	0.0324	0.0444	0.0569	0.0701	0.0840	0.0985	0.1137	0.1297
	0.3	0.0104	0.0216	0.0337	0.0468	0.0608	0.0758	0.0920	0.1093	0.1278	0.1477
	0.4	0.0105	0.0222	0.0351	0.0492	0.0648	0.0820	0.1007	0.1213	0.1437	0.1682
	0.5	0.0107	0.0228	0.0365	0.0519	0.0692	0.0886	0.1103	0.1346	0.1615	0.1916
	0.6	0.0108	0.0234	0.0379	0.0546	0.0738	0.0958	0.1208	0.1493	0.1816	0.2181
	0.7	0.0110	0.0240	0.0394	0.0576	0.0788	0.1036	0.1324	0.1657	0.2041	0.2484
	0.8	0.0111	0.0246	0.0410	0.0606	0.0841	0.1120	0.1450	0.1838	0.2295	0.2829
	0.9	0.0112	0.0253	0.0426	0.0639	0.0897	0.1211	0.1588	0.2040	0.2580	0.3222
	1.0	0.0114	0.0259	0.0443	0.0673	0.0958	0.1309	0.1739	0.2263	0.2900	0.3669

Ek Tablo 4. $m_3 = 0.4$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0101	0.0206	0.0313	0.0423	0.0536	0.0653	0.0772	0.0895	0.1021	0.1150
	0.2	0.0103	0.0212	0.0326	0.0447	0.0575	0.0710	0.0852	0.1001	0.1158	0.1323
	0.3	0.0104	0.0218	0.0340	0.0473	0.0617	0.0772	0.0939	0.1119	0.1313	0.1522
	0.4	0.0106	0.0224	0.0355	0.0500	0.0662	0.0840	0.1036	0.1252	0.1490	0.1751
	0.5	0.0107	0.0230	0.0370	0.0529	0.0710	0.0913	0.1143	0.1401	0.1690	0.2014
	0.6	0.0109	0.0237	0.0386	0.0560	0.0761	0.0993	0.1260	0.1567	0.1917	0.2316
	0.7	0.0110	0.0243	0.0403	0.0592	0.0816	0.1080	0.1390	0.1752	0.2174	0.2664
	0.8	0.0112	0.0250	0.0420	0.0626	0.0875	0.1175	0.1533	0.1960	0.2466	0.3065
	0.9	0.0113	0.0257	0.0438	0.0662	0.0939	0.1278	0.1691	0.2192	0.2797	0.3525
	1.0	0.0115	0.0265	0.0457	0.0700	0.1007	0.1390	0.1865	0.2452	0.3173	0.4055

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 5. $m_3 = 0.5$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0102	0.0206	0.0314	0.0425	0.0539	0.0657	0.0777	0.0902	0.1030	0.1162
	0.2	0.0103	0.0212	0.0328	0.0451	0.0581	0.0718	0.0864	0.1017	0.1179	0.1350
	0.3	0.0105	0.0219	0.0343	0.0479	0.0626	0.0786	0.0959	0.1147	0.1349	0.1568
	0.4	0.0106	0.0225	0.0359	0.0508	0.0675	0.0860	0.1065	0.1293	0.1544	0.1822
	0.5	0.0108	0.0232	0.0376	0.0540	0.0727	0.0941	0.1183	0.1458	0.1768	0.2117
	0.6	0.0109	0.0239	0.0393	0.0573	0.0784	0.1030	0.1314	0.1644	0.2023	0.2460
	0.7	0.0111	0.0247	0.0411	0.0609	0.0845	0.1127	0.1460	0.1853	0.2316	0.2858
	0.8	0.0113	0.0254	0.0430	0.0646	0.0911	0.1233	0.1621	0.2089	0.2650	0.3320
	0.9	0.0114	0.0262	0.0450	0.0686	0.0982	0.1349	0.1801	0.2356	0.3033	0.3857
	1.0	0.0116	0.0270	0.0470	0.0729	0.1059	0.1476	0.2000	0.2656	0.3472	0.4482

Ek Tablo 6. $m_3 = 0.6$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0102	0.0207	0.0315	0.0426	0.0542	0.0660	0.0783	0.0909	0.1039	0.1174
	0.2	0.0103	0.0213	0.0330	0.0455	0.0587	0.0727	0.0876	0.1033	0.1200	0.1377
	0.3	0.0105	0.0220	0.0346	0.0485	0.0636	0.0800	0.0980	0.1175	0.1386	0.1616
	0.4	0.0107	0.0227	0.0364	0.0517	0.0689	0.0881	0.1096	0.1335	0.1601	0.1896
	0.5	0.0108	0.0235	0.0381	0.0551	0.0746	0.0970	0.1225	0.1517	0.1849	0.2226
	0.6	0.0110	0.0242	0.0400	0.0587	0.0808	0.1067	0.1371	0.1724	0.2135	0.2612
	0.7	0.0112	0.0250	0.0420	0.0626	0.0875	0.1175	0.1533	0.1960	0.2466	0.3065
	0.8	0.0114	0.0258	0.0440	0.0667	0.0948	0.1293	0.1715	0.2227	0.2848	0.3597
	0.9	0.0115	0.0267	0.0462	0.0712	0.1027	0.1424	0.1918	0.2532	0.3289	0.4221
	1.0	0.0117	0.0275	0.0485	0.0759	0.1113	0.1567	0.2145	0.2877	0.3799	0.4953

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 7. $m_3 = 0.7$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0101	0.0204	0.0310	0.0418	0.0528	0.0641	0.0756	0.0874	0.0994	0.1116
	0.2	0.0102	0.0209	0.0320	0.0437	0.0558	0.0685	0.0817	0.0954	0.1097	0.1246
	0.3	0.0103	0.0214	0.0331	0.0456	0.0590	0.0731	0.0882	0.1042	0.1211	0.1391
	0.4	0.0104	0.0218	0.0342	0.0477	0.0623	0.0781	0.0952	0.1138	0.1337	0.1553
	0.5	0.0106	0.0223	0.0354	0.0498	0.0658	0.0835	0.1029	0.1242	0.1476	0.1733
	0.6	0.0107	0.0228	0.0366	0.0521	0.0695	0.0892	0.1111	0.1356	0.1630	0.1935
	0.7	0.0108	0.0233	0.0378	0.0544	0.0735	0.0952	0.1200	0.1481	0.1800	0.2160
	0.8	0.0109	0.0238	0.0391	0.0569	0.0776	0.1017	0.1296	0.1617	0.1987	0.2411
	0.9	0.0110	0.0244	0.0404	0.0594	0.0820	0.1087	0.1400	0.1766	0.2194	0.2691
	1.0	0.0112	0.0249	0.0417	0.0621	0.0867	0.1161	0.1512	0.1929	0.2422	0.3004

Ek Tablo 8. $m_3 = 0.8$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0102	0.0207	0.0317	0.0430	0.0547	0.0668	0.0794	0.0924	0.1058	0.1197
	0.2	0.0104	0.0215	0.0334	0.0462	0.0599	0.0745	0.0901	0.1067	0.1244	0.1433
	0.3	0.0106	0.0223	0.0353	0.0496	0.0655	0.0830	0.1022	0.1232	0.1463	0.1716
	0.4	0.0107	0.0231	0.0372	0.0534	0.0717	0.0924	0.1159	0.1423	0.1721	0.2054
	0.5	0.0109	0.0239	0.0393	0.0573	0.0784	0.1030	0.1314	0.1644	0.2023	0.2460
	0.6	0.0111	0.0248	0.0415	0.0616	0.0858	0.1147	0.1491	0.1898	0.2379	0.2945
	0.7	0.0113	0.0257	0.0438	0.0662	0.0939	0.1278	0.1691	0.2192	0.2797	0.3525
	0.8	0.0115	0.0267	0.0462	0.0712	0.1027	0.1424	0.1918	0.2532	0.3289	0.4221
	0.9	0.0118	0.0277	0.0488	0.0765	0.1124	0.1586	0.2176	0.2924	0.3868	0.5053
	1.0	0.0120	0.0287	0.0515	0.0822	0.1230	0.1767	0.2468	0.3377	0.4548	0.6050

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 9. $m_3 = 0.9$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0102	0.0208	0.0318	0.0432	0.0550	0.0672	0.0800	0.0931	0.1068	0.1209
	0.2	0.0104	0.0216	0.0336	0.0466	0.0605	0.0754	0.0913	0.1084	0.1267	0.1462
	0.3	0.0106	0.0224	0.0356	0.0502	0.0665	0.0845	0.1043	0.1262	0.1503	0.1768
	0.4	0.0108	0.0233	0.0377	0.0542	0.0731	0.0947	0.1192	0.1469	0.1784	0.2138
	0.5	0.0110	0.0242	0.0399	0.0585	0.0804	0.1061	0.1361	0.1711	0.2116	0.2586
	0.6	0.0112	0.0251	0.0422	0.0631	0.0884	0.1189	0.1555	0.1991	0.2511	0.3127
	0.7	0.0114	0.0261	0.0447	0.0681	0.0972	0.1333	0.1776	0.2318	0.2979	0.3781
	0.8	0.0116	0.0271	0.0473	0.0735	0.1069	0.1494	0.2029	0.2699	0.3535	0.4572
	0.9	0.0119	0.0282	0.0501	0.0793	0.1176	0.1674	0.2317	0.3142	0.4194	0.5529
	1.0	0.0121	0.0292	0.0530	0.0855	0.1293	0.1876	0.2647	0.3658	0.4976	0.6686

Ek Tablo 10. $m_3 = 1.0$ ve $0.1 \leq m_1, m_2 \leq 1$ aralığı için $f_i(R)$ değerleri

		m_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
m_2	0.1	0.0102	0.0208	0.0319	0.0433	0.0553	0.0676	0.0805	0.0939	0.1077	0.1221
	0.2	0.0104	0.0217	0.0338	0.0469	0.0611	0.0763	0.0926	0.1102	0.1290	0.1492
	0.3	0.0106	0.0225	0.0359	0.0508	0.0675	0.0860	0.1065	0.1293	0.1544	0.1822
	0.4	0.0108	0.0235	0.0381	0.0551	0.0746	0.0970	0.1225	0.1517	0.1849	0.2226
	0.5	0.0111	0.0244	0.0405	0.0597	0.0824	0.1093	0.1410	0.1780	0.2214	0.2718
	0.6	0.0113	0.0254	0.0430	0.0646	0.0911	0.1233	0.1621	0.2089	0.2650	0.3320
	0.7	0.0115	0.0265	0.0457	0.0700	0.1007	0.1390	0.1865	0.2452	0.3173	0.4055
	0.8	0.0117	0.0275	0.0485	0.0759	0.1113	0.1567	0.2145	0.2877	0.3799	0.4953
	0.9	0.0120	0.0287	0.0515	0.0822	0.1230	0.1767	0.2468	0.3377	0.4548	0.6050
	1.0	0.0122	0.0298	0.0547	0.0890	0.1359	0.1992	0.2839	0.3962	0.5445	0.7389

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Berlin / ALMANYA’da doğan Erkan GÜLER, ilköğrenimini Giresun Cumhuriyet İlkokulu’nda, orta ve lise öğrenimini Giresun Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 1996 yılında girdiği ODTÜ Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünden 2001’de mezun oldu. 2002 yılında Berlin Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimi Fakültesi Telekomünikasyon Sistemleri Bölümü Gelecek Nesil Ağlar (Next Generation Networks) Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2004-2007 yılları arasında Berlin’de özel bir firmada çalıştı. “İnternet Üzerinden Sesli İletişime (VoIP) İlişkin Anomali Tabanlı Tespit Sistemleri Üzerine Araştırma ve Sınıflandırma (Survey and Taxonomy on Anomaly based Detection Systems with Regard to VoIP)” adlı yüksek lisans tezini 2007 yılında tamamladı. 2009 yılında Giresun Üniversitesi Mehmet Bayrak Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Teknolojileri Bölümü’nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı. TÜBİTAK’ın 2214 Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu’nu almaya hak kazanarak Ekim 2012 – Ocak 2013 tarihleri arasında Northeastern Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde ziyaretçi araştırma görevlisi olarak görev yaptı. Doktora tez sürecinde 3’ü SCI / SCI-Expanded indeksli dergilerde, 3’ü uluslararası konferanslarda ve 1’i ulusal konferansta olmak üzere toplam 7 yayın yaptı. Tasarsız kablosuz ağlar, bilişsel radyo, rotalama protokolleri, sürü zekâsı ve ağ kazanç yönetimi konuları ilgi alanlarını oluşturmaktadır. 2015 yılından itibaren 2547 sayılı Yükseköğretim Kanunu’nun 13/b-4 maddesi uyarınca görevlendirme ile Giresun Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde öğretim görevlisi olarak çalışmaya devam eden Erkan GÜLER, evli ve iki çocuk babası olup iyi derecede İngilizce ve Almanca bilmektedir. Yayınları aşağıda verilmiştir:

SCI / SCI-Expanded İndeksli Dergi Yayınları

Çavdar, T., ve Güler, E., HyMPRo: a hybrid multi-path routing algorithm for cognitive radio ad hoc networks, Telecommunication Systems, (2018) 1-16.

Çavdar, T., Sadreddini, Z. ve Güler, E., Pre-reservation based spectrum allocation for cognitive radio network, *Telecommunication Systems*, (2018) 1-21.

Çavdar, T., Güler, E. ve Sadreddini, Z., Instant overbooking framework for cognitive radio networks, *Computer Networks*, 76 (2015) 227-241.

Uluslararası Konferans Yayınları

Sadreddini, Z., Çavdar, T. ve Güler, E., (2016, June). Performance analysis of the dynamic switch system based on user activity in cognitive radio network, 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 27-29 June 2016, Vienna, Austria, pp. 145-148.

Güler, E., Sadreddini, Z. ve Çavdar, T., Multi-path route discovery algorithm for cognitive radio ad hoc networks using algebraic connectivity. 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 9-11 July 2015, Prague, Czech Republic, pp. 54-59.

Sadreddini, Z., Güler, E. ve Çavdar, T., PSO-optimized Instant Overbooking Framework for cognitive radio networks, 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 9-11 July 2015, Prague, Czech Republic, pp. 49-53.

Ulusal Konferans Yayını

Sadreddini, Z., Masek, P., Cavdar, T., Hosek, J. ve Güler, E., Dynamic decision-based spectrum sharing framework for next-generation (5G) systems, 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 15-18 May 2017, Antalya, pp. 1-4.