



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

**YAZILIM TANIMLI AĞ YAKLAŞIMINA DAYALI KABLOSUZ
BİLİŞSEL RADYO AĞLARI**

SEDA CİCİOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Doktor Öğretim Üyesi ALİ ÇALHAN**

DÜZCE, 2018

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAZILIM TANIMLI AĞ YAKLAŞIMINA DAYALI KABLOSUZ
BİLİŞSEL RADYO AĞLARI

Seda CİCİOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doktor Öğretim Üyesi Ali ÇALHAN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doktor Öğretim Üyesi Ali ÇALHAN

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Halil YİĞİT

Kocaeli Üniversitesi

Doktor Öğretim Üyesi Serdar BİROĞUL

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 23/03/2018

BEYAN

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

23 Mart 2018

Seda CİCİOĞLU

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımından dolayı çok değerli hocam Ali ÇALHAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarıma, teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca içimi aydınlatan gülüşüyle, sıcacık bakışıyla, içten samimi sözleriyle beni motive eden, her zaman yanımda olan, huzurum, mutluluk sebebim, dostum, canım eşim Murtaza CİCİOĞLU'na, hayatıma anlam katan, benim için dünyadaki tüm güzel duyguları barındıran, iki buçuk yaşının verdiği tüm masumiyetle yüzümde kocaman bir gülücük oluşturan, dünyalar güzeli kızım Nil Erva CİCİOĞLU'na ve ilerleyen yaşına rağmen bana hala küçük bir kız çocuğu ilgisi gösteren, her an dualarında olduğumu bildiğim canım fedakâr annem Ümmü YANMAZ'a en derin duygularıyla çok teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini hiç esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma da sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

23 Mart 2018

Seda CİCİOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ	VII
ÇİZELGE LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR.....	IX
ÖZET	X
ABSTRACT	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. BİLİŞSEL RADYO.....	3
2.1.1. Kanal Birleştirme.....	8
2.2. ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLLERİ	9
2.3. YAZILIM TANIMLI AĞLAR.....	12
3. ÖNERİLEN AĞ MİMARİSİ	20
3.1. YAZILIM TANIMLI AĞ YAKLAŞIMINA DAYALI BİLİŞSEL RADYO AĞLARI	20
3.2. YAZILIM TANIMLI AĞ YAKLAŞIMINA DAYALI BİLİŞSEL RADYO AĞ TASARIMI	22
3.3. GENEL MİMARİ	22
3.4. ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	23
3.5. ÇALIŞMA MEKANİZMALARI	26
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	28
4.1. BENZETİM MODELİ	28
4.1.1. Riverbed Modeller Benzetim Yazılımı.....	28
4.2. BENZETİM SENARYOSU	28
4.3. BENZETİM SONUÇLARI.....	31
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	41
5.1. DEĞERLENDİRME SONUÇLARI	41

5.2. ÖNERİLER	42
6. KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ	49



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Bilişsel radyo süreci.....	4
Şekil 2.2. Bilişsel radyo döngüsü.....	5
Şekil 2.3. Bilişsel radyo sisteminde olabilecek bileşenlerin bir görünümü.	6
Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrumların kullanım sıklıkları.....	7
Şekil 2.5. Kanal birleştirme mekanizması.	9
Şekil 2.6. Ortam erişim kontrol protokollerinin sınıflandırılması.	10
Şekil 2.7. YTA mimarisinin temel mimarisi.....	15
Şekil 2.8. YTA mimarisinin temel yapılandırma iletişimi.....	17
Şekil 3.1. YTA yaklaşımına dayalı bilişsel radyo ağ mimarisi.	21
Şekil 3.2. Sistemin genel çalışmasını özetleyen akış diyagramı.....	23
Şekil 3.3. Geliştirilen ikincil kullanıcı düğümünün durum geçiş diyagramı.	24
Şekil 3.4. Geliştirilen denetleyici düğümünün durum geçiş diyagramı.....	25
Şekil 3.5. Kanal birleştirme mekanizması.	27
Şekil 4.1. Benzetim senaryosu.	29
Şekil 4.2. Birincil ağ iş çıkarma oranı.	31
Şekil 4.3. Önerilen bilişsel radyo ağ iş çıkarma oranı (paket boyutları aynı).	32
Şekil 4.4. Önerilen bilişsel radyo ağ iş çıkarma oranı (paket boyutları farklı).....	33
Şekil 4.5. Birincil ağ gecikme analizi.	34
Şekil 4.6. Aynı paket boyutlarına sahip beş adet ikincil kullanıcı ile farklı sayılarda birincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil ağ gecikme analizi.....	35
Şekil 4.7. Farklı paket boyutlarına sahip beş adet ikincil kullanıcı ile farklı sayılarda birincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil ağ gecikme analizi.....	36
Şekil 4.8. Aynı paket boyutlarına sahip ve farklı sayılarda ikincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil ağ paket kayıp oranları.....	37
Şekil 4.9. Farklı paket boyutlarına sahip ve farklı sayılarda ikincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil ağ paket kayıp oranları.....	38
Şekil 4.10. Farklı paket boyutlarına sahip ve farklı sayılarda ikincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil bit hata oranları.	39
Şekil 4.11. Karşılaştırmalı ytbr- slotted aloha bilişsel radyo ağ iş çıkarma oranları.	40

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 3.1. OpenFlow Mesaj Türleri.	19
Çizelge 4.1. Benzetimde kullanılan parametre değerleri.	29



KISALTMALAR

ACK	Alındığını Bildirme (Acknowledgement)
BK	Birincil Kullanıcı
BK-BO	Birincil Kullanıcı Boş Olma Olasılığı
BR	Bilişsel Radyo
CDMA	Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access)
CSMA	Taşıyıcı Sezme Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access)
CSMA/CA	Taşıyıcı Sezme Çoklu Erişim / Çarpışma Kaçınma (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)
FCC	Federal Haberleşme Komisyonu (Federal Communications Commission)
FDMA	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)
GSM	Küresel Mobil Haberleşme Sistemi (Global System for Mobile Communications)
HSPA	Yüksek Hızlı Paket Erişimi (High Speed Packet Access)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
İK	İkincil Kullanıcı
MIMO	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
OEK	Ortam Erişim Kontrolü (Media Access Control)
ONF	Açık Ağ Vakfı (Open Network Foundation)
QoS	Hizmet Kalitesi (Quality of Service)
SDN	Yazılım Tanımlı Ağ (Software Defined Network)
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
Wi-Fi	Kablosuz İnternet (Standard For Wireless Fidelity)
WLAN	Kablosuz Yerel Alan Ağı (Wireless Local Area Network)
WRAN	Kablosuz Bölgesel Alan Ağı (Wireless Regional Area Network)
YTBR	Yazılım Tanımlı Bilişsel Radyo
YTA	Yazılım Tanımlı Ağlar
4G	4. Nesil (4. Generation)
5G	5. Nesil (5. Generation)

ÖZET

YAZILIM TANIMLI AĞ YAKLAŞIMINA DAYALI KABLOSUZ BİLİŞSEL RADYO AĞLARI

Seda CİCİOĞLU

Düzce Üniversitesi

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

Danışman: Doktor Öğretim Üyesi Ali ÇALHAN

Mart 2018, 48 sayfa

Bilişsel radyo ağ teknolojisi, ikincil (lisanssız) kullanıcılara birincil (lisanslı) kullanıcıların iletişimine müdahale etmeden lisanslı spektrumlara erişim imkânı tanıyan güncel bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım spektrum yetersizliği ve spektrumların verimsiz kullanımı gibi güncel sorunlara çözüm önermektedir. Yazılım tanımlı ağ yaklaşımı ise geleneksel ağ altyapısının sınırlılıklarını ortadan kaldırmayı amaçlayan, tümleşik olan veri ve kontrol düzlemlerinin birbirinden soyutlanmasını öneren yeni bir ağ yaklaşımıdır. Veri merkezleri, bulut bilişim, kablosuz algılayıcı ağ teknolojileri gibi mimari açıdan birbirinden farklı birçok alanda yazılım tanımlı ağ çalışmaları halen devam etmektedir. Bu çalışmada, kablosuz iletişimin bir formu olan bilişsel radyo ağ teknolojilerinin mevcut ağ altyapı sorunlarına çözüm bulmak amacıyla yazılım tanımlı ağ yaklaşımına dayalı yeni bir mimari önerilmiştir. Bilişsel radyo ağlarında bulunan baz istasyonlarının bazı yönetim işlevleri denetleyiciye devredilerek yarı dağıtık bir kontrol mekanizması geliştirilmiştir. Bu sayede bilişsel radyo ağlarında kaynak sanallaştırma gerçekleştirilirken, ikincil kullanıcılar için dinamik, altyapıdan bağımsız ve verimli kaynak tahsisi sağlanmaktadır. Böylece, baz istasyonları üzerindeki aşırı kontrol yükü azaltılarak ağ performansı artırılırken, ikincil kullanıcıların baz istasyonlarına ve fiziksel ağ kaynaklarına olan bağımlılığı da azaltılmıştır. Önerdiğimiz ağ ortamının başarımlı analizi Riverbed Modeller benzetim yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ikincil kullanıcılar için farklı iş yükleri seçilerek birincil ağ için uçtan uca gecikmeler, beş adet ikincil kullanıcı olan bir ortam için birincil ağ gecikmeleri, paket kayıp oranları ve bit hata oranları incelenmiştir. Ayrıca aynı ve farklı paket boyutları için birincil ağ ve önerilen ağ mimarisi iş çıkarma oranları incelenmiş, kanal birleştirme tekniği kullanılarak ağ performansı da artırılmıştır. Benzer ortam ve senaryolara sahip literatürdeki başka bir çalışmayla karşılaştırılmış ve iş çıkarma oranının yaklaşık %45 oranda daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, yazılım tanımlı ağ yaklaşımının bilişsel radyo ağları için uygun bir çözüm olduğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Bilişsel radyo, Yazılım tanımlı ağlar, Kanal birleştirme.

ABSTRACT

WIRELESS COGNITIVE RADIO NETWORKS BASED ON SOFTWARE- DEFINED NETWORK APPROACH

Seda CİCİOĞLU

Düzce University

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

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ali ÇALHAN

March 2018, 48 pages

Cognitive radio network technology is a current approach that allows secondary (unlicensed) users to access licensed spectrum without interfering with the communication of primary (licensed) users. This approach suggests solutions to current problems such as spectrum inefficiency and ineffective use of spectrum. The software-defined network approach is a new network paradigm and it suggests that the integrated data and control planes be abstracted from each other to remove the limitations of the traditional network infrastructure. Many different software-defined network studies are still in progress in terms of architecture, such as data centres, cloud computing, wireless sensor network technologies. In this study, a new architecture based on a software-defined network approach was proposed to solve the existing network infrastructure problems of cognitive radio network technologies, a form of wireless communication. Some management functions of base stations in cognitive radio networks have been transferred to the controller to develop a semi-distributed control mechanism. While resource virtualization is carried out on cognitive radio networks, dynamic, infrastructure-independent, and efficient resource allocation are provided for secondary users. So, while network performance is improved by reducing the overhead of base stations, the dependence of secondary users on base stations and physical network resources is also reduced. The performance analysis of the proposed network environment was carried out through the Riverbed Modeler simulation software. In this study, end-to-end delays for the primary network, primary network delays for five secondary users, packet loss rates and bit error rates have been investigated by selecting different workloads for the secondary users. Also, for the same and different packet sizes, primary network throughput and proposed network architecture throughput were examined and network performance was improved by using channel bonding technique. When compared to another study in the literature with similar media and scenarios, it was observed that the throughput increased by about 45%. Consequently, the software-defined network approach has been found to be a suitable solution for cognitive radio networks.

Keywords: Cognitive radio, Software-defined networks, Channel bonding.

1. GİRİŞ

Kablolu veya kablosuz olması fark etmeksizin ağ altyapısı, günümüz ve gelecek teknolojileri için çok büyük önem arz etmektedir. Hızla gelişen teknoloji, paralelinde birtakım talepler doğurmaktadır. Yıllar önce temeli atılmış mevcut ağ altyapısı bu talepleri karşılayabilmek için sürekli yeni tekniklere ve donanımlara ihtiyaç duymaktadır. Yeni teknikler ve donanımlar, yeni talepleri karşılamaya çalışırken başka sorunları da beraberinde getirmektedir. Dinamik ve değişen durumlar için sürekli yenilenme ihtiyacı duyan mevcut ağ alt yapısı, devamlı daha karmaşık ve yönetilmesi zor bir duruma dönüşmektedir [1]. Bu bağlamda; son zamanlarda isminden sıkça bahsedilen yazılım tanımlı ağ (YTA) yaklaşımı, etkili ve verimli ağ kaynak yönetimine imkân sunan yeni bir bakış açısı ortaya koymaktadır. Verimli ve dinamik spektrum erişimi sağlayan bilişsel radyo (BR) teknolojisi ise kısıtlı bulunan spektrum sorununa çözüm olmak için öne sürülmüş yeni bir teknolojidir [1], [2].

BR teknolojisi, mevcut spektrumların yetersiz kalması, etkili ve verimli bir şekilde kullanılamaması gibi sorunlardan dolayı ortaya çıkmıştır. BR teknolojisi, belirli aralıklardaki frekans bantlarını sezip, iletişim parametrelerini buna göre güncelleyebilen bir radyo sistemidir [3], [4]. Bu teknoloji, lisanslı birincil kullanıcıların (BK) iletişimine engel olmadan, lisanssız ikincil kullanıcıların (İK) spektrumlarından fırsatçı bir şekilde yararlanmasını imkân sunmaktadır. Bunun sağlanabilmesi için kullanıcılar etrafındaki spektrum durumunu belirli aralıklarla baz istasyonlarına iletmesi ve veri iletimi yapabilmeleri için de sürekli baz istasyonlarıyla iletişim halinde olması gerekmektedir. Kullanıcılar ile sürekli iletişim halinde olma zorunluluğu, baz istasyonları üzerinde aşırı işlem yükü oluşturmaktadır. Bu durum ağın performansı için olumsuz bir durum oluşmakta ve dolayısıyla performansını düşmektedir [5].

Genel olarak ağı yapılandırmak ve yönetim işlemlerini daha kolay hale getirmek karmaşık ve oldukça zordur. Bu anlamda YTA yaklaşımı, bu karmaşık ve zor işlemler için öne sürmüş olduğu çözümlerden dolayı büyük önem kazanmaktadır. Ağa programlanabilirlik becerisi kazandırmak ve bu sayede ağ uygulaması geliştirebilmek, günümüz ağ altyapısında tümleşik olan veri ve kontrol düzlemlerinin birbirinden soyutlanmasını

sağlamak YTA yaklaşımının sunduğu önemli yenilikler arasında yer almaktadır. Bu yaklaşım, geleneksel ağ altyapısında mevcut birçok sorun için de çözüm sunmaktadır. YTA yaklaşımı her yeniliğe kolayca uyabilen ağ tasarımlarına sahip, etkili ve verimli yapılandırmaya uygun, yüksek performans ve daha çok esneklik imkânı sunan yeni bir ağ yaklaşımıdır [6].

Bu çalışmada BR ağ teknolojisi için YTA yaklaşımına dayalı yeni bir ağ mimarisi önerilmektedir. Bu mimari BR ağları için ağ kaynaklarının yönetim sorumluluklarını üstlenmiş, mantıksal olarak tüm ağı merkezi bir noktadan yöneten bir denetleyici ile dinamik spektrum erişim mekanizması sağlamaktadır. Bu yaklaşım ile ağ kaynaklarının yönetim sorumlulukları ağ kullanıcıları ve baz istasyonlarından alınarak bir denetleyiciye devredilmiştir. Bu sayede, ağ kullanıcılarının baz istasyonlarına olan bağımlılığı azaltılmış, baz istasyonlarının bazı iş yüklerinin de denetleyiciye devredilmesi ile ağ performansının artırılması sağlanmıştır. YTA yaklaşımı ile kaynak yönetim işlemleri herhangi bir yönetimsel müdahaleye ihtiyaç duyulmadan tamamen yazılımsal olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca önerdiğimiz bu yeni mimariye öncelik tabanlı ve kanal birleştirme tabanlı mekanizmalar da eklenerek başarımlarının artırılması sağlanmıştır. Literatürde BR ağ teknolojisi için çeşitli iyileştirme çalışmaları yapıldığı görülmektedir. Çoğunlukla bu çalışmalar yeni ortam erişim teknikleri önermektedirler. Bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan farkı ise yeni bir ağ paradigması olan YTA mimarisinin BR ağ mimarisine entegre edilerek yeni bir ağ mimarisi önermesidir. Bu bağlamda BR ağ teknolojisine yeni bir mimari önerilerek, daha yüksek başarımların sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde çalışmanın kapsamında kullanılan ağ yaklaşımlarından bahsedilmiştir. Öncelikle öne sürülen mimarinin temelini yansıtmaları için BR ağ yaklaşımı açıklanmış ve daha sonra bu mimariye entegre edilerek yeni bir bakış açısı kazandıran YTA yaklaşımı açıklanmıştır.

2.1. BİLİŞSEL RADYO

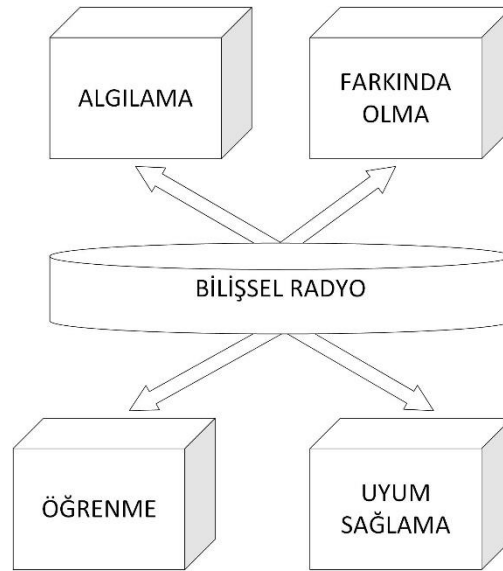
Günümüzde dünyanın her yerinde kablosuz ağlar kullanılmaktadır. Evlerde, okullarda, kütüphanelerde, iş ortamlarında, alışveriş merkezlerinde olmak üzere birçok farklı alanlarda kablosuz ağlar hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Kablosuz ağlar doğası gereği bu ortamlarda yüzlerce hatta binlerce kullanıcılara aynı anda ağ hizmeti verebilmektedir. Aynı zamanda kablosuz ağlarla birlikte mobil cihaz sayısı da her geçen gün hızla artmaktadır. Kablosuz cihaz kullanımının her geçen gün artması, kısıtlı bulunan spektrumların verimli kullanım sorununu da beraberinde getirmiştir [7], [8]. Kablosuz ağlar ve mobil cihazlar lisanslı ve lisanssız spektrumları kullanmaktadırlar. Kullanıcılar lisanslı spektrumları kullanabilmek için bir bedel ödemektedirler. Bu bedel karşılığında ise spektrumların kullanımı için bir önceliğe sahip olmaktadır. Lisanslı olmayan spektrumlar ise ağ kurulumu için herhangi bir bedeli olmayan ve herkesin erişimine açık olan spektrumlardır. Nesnelerin interneti yaklaşımı ile birlikte Wi-Fi, Bluetooth, uzaktan kontrol gibi altyapılarla birçok cihaz lisanslı olmayan spektrum kullanımının artmasını sağlamaktadır. Bunun bir sonucu olarak da birçok veri, ses ve gerçek zamanlı video trafikleri oluşmasına sebep olmaktadır [9]–[12].

Birçok frekans bandı çeşitli kablosuz uygulamalara tahsis edilmiştir [13]. Gelecekte ortaya çıkabilecek kablosuz uygulamalar için ise çok az sayıda kullanılabilir spektrum kalmıştır [14]. Bununla birlikte Federal İletişim Komisyonu (FCC) tarafından yapılan birçok çalışma spektrumların önemli bir kısmının tam olarak verimli kullanılmadığını ve kullanılan spektrumların da zamana ve yere bağlı olduğunu göstermektedir [13]–[15]. Geleneksel yaklaşım, bireysel ya da servislere tahsis edilen sabit spektrumların kullanılmayan kısımlarının lisanslı olmayan kullanıcılar tarafından kullanılmasına izin

vermemekteydi. Ancak yeni uygulamalar için spektrum eksikliği ve spektrumların kullanılmayan kısımlarının artması dinamik spektrum tahsisi konusunu ortaya çıkarmıştır.

Günümüz kablosuz ağ altyapısının en büyük sorunlarından biri, lisanslı olmayan spektrumların artan taleplere artık cevap verememesidir [16], [17]. Bununla birlikte birçok lisanslı spektrumların ise tam anlamıyla kullanılmadığı görülmektedir. Bu bağlamda mevcut bu sorunun çözümü olarak, lisanslı olmayan spektrumların kullanımı ile birlikte kullanılmaya müsait bazı lisanslı spektrumlardan da yararlanmak bilişsel radyo teknolojisinin odak noktasını oluşturmaktadır [18]–[20]. Bilişsel radyo teknolojisi lisanslı olmayan spektrumların aşırı kullanılma ya da yetersiz kalma sorununa yönelik çözüm olmaya çalışan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım lisanslı spektrumların lisansa sahip olmayan kullanıcılar tarafından da kullanılmasına imkân tanıyan bir bakış açısı kazandırmaktadır [7], [10], [16], [21].

Joseph MITOLA tarafından ortaya atılan bilişsel radyo kavramı, akıllı bir telsiz sistemi yardımıyla kullanılan ve kullanılmayan kanalların tespit edildiği, bir kanalı işgal etmeden boş kanalların kullanımı için dinamik yapılandırmaya uygun yeni bir teknolojidir [22]. Bu kavram yazılım tanımlı radyo teknolojisi üzerine inşa edilmiştir. Şekil 2.1’de BR süreci görülmektedir. Bilişsel radyo ortamı algılayabilen, başka düğüm ya da ağların farkında olabilen, ortamdaki değişime uyum sağlayabilen ve bunun yanında bu değişimi öğrenebilen bir sürece sahiptir.

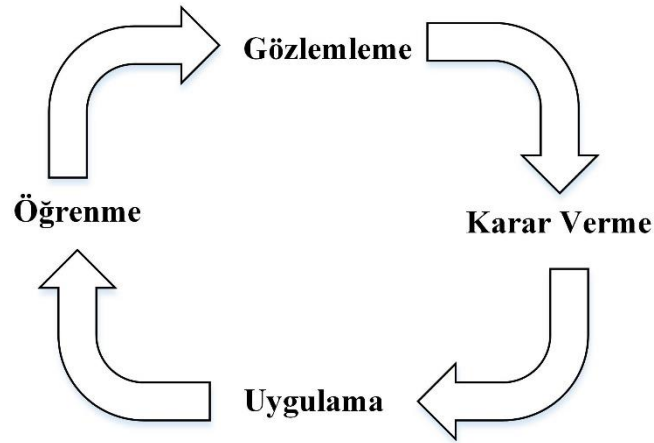


Şekil 2.1. Bilişsel radyo süreci.

BR ağları, lisanslı BK'lar ile lisanssız İK'ların aynı ortamda oldukları bir iletişim ağıdır. Doğal olarak lisansa sahip olan BK'lar, haberleşme için sürekli önceliğe sahiptirler. Dolayısıyla bu yaklaşım, lisanslı BK'ların frekans bantlarını kullanmadığı durumlarda lisanssız İK'ların fırsatçı bir biçimde frekans bantlarından yararlanmasını imkân sunmaktadır [13], [23]–[26].

Bilişsel radyo teknolojisi en temelde iki türde olabilmektedir. Bunlardan ilki tam bilişsel radyodur. Tam bilişsel radyo, dinamik spektrum tahsisi için karar verilirken tüm olası parametrelerin gözlemlenebilir olduğunu düşünen bir yaklaşımdır [7], [12]. Bir diğer tür ise spektrum algılama bilişsel radyodur. Bu yaklaşımda ise dinamik spektrum tahsisi için karar verilirken sadece radyo frekans spektrumları dikkate alınmaktadır [9].

Bilişsel radyo teknolojisinde iki tür kullanıcı bulunmaktadır. Bunlar lisanslı kullanıcılar olarak ifade edilen birincil kullanıcılar (BK) ile bilişsel radyo sistemlerinde uygun lisanslı spektrumlara fırsatçı bir biçimde erişebilen ikincil kullanıcılarıdır (İK) [4], [10]. Bilişsel radyo sistemleri içinde kullanıcılar kapalı bir döngüyle çalışmaktadırlar. Şekil 2.2'de verilen bu döngü içerisinde temel fonksiyonlar bulunmaktadır. Bunlar buldukları ortamı gözlemeleme, karar verme, uygulama ve ortamın durumlarını öğrenme aşamalarıdır.

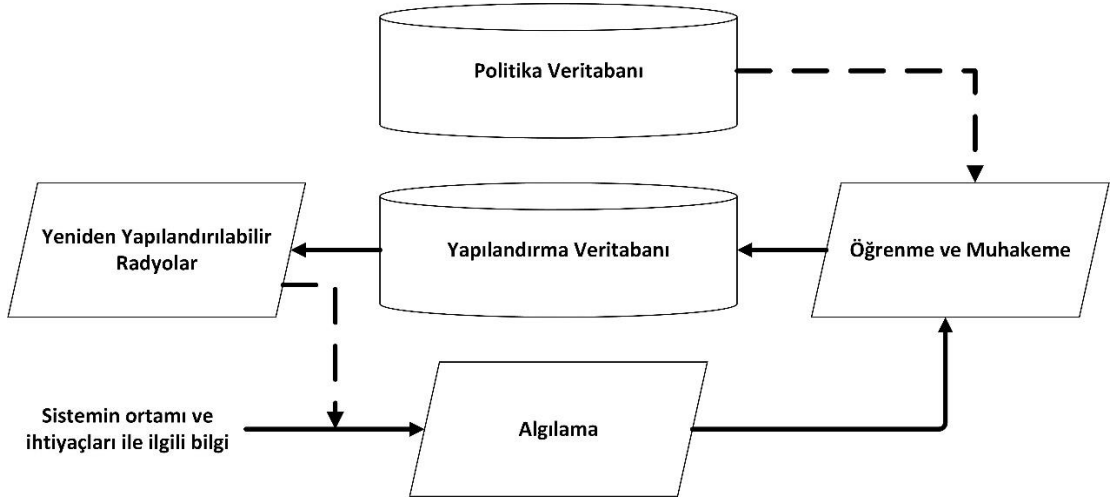


Şekil 2.2. Bilişsel radyo döngüsü.

BR teknolojisi spektrumların etkili ve verimli kullanılabilmesi için dinamik spektrum sezme tekniğini önermektedir. Bu yaklaşım, sürekli olarak bulunduğu ortamı algılayabilen, iletişim parametrelerini anlık olarak güncelleyebilen [2], [7], [27], mevcut frekans bantlarında var olan boşluklara “akıllı” spektrum kullanımı sağlayan, verimli ve dinamik spektrum erişimine imkânı sunan güncel bir yaklaşımdır [21], [28], [29]. BR

teknolojisinde lisanssız İK'lar kullanılabilir kanalları tespit etmek amacıyla periyodik olarak tarama ve tanımlama işlemlerini yapmaktadırlar [18], [30]–[32]. BR ağlarındaki en önemli ölçüt ise İK'lar frekans bantlarını kullanırken, BK'ların iletişimini kesinlikle engellememesidir.

Bilişsel radyo üzerine birçok araştırma ve uygulama çalışmaları bulunmaktadır. Uluslararası standart belirleyen bir kuruluş olan IEEE, bilişsel radyo için IEEE 802.22 standardını geliştirmiştir [33]. Bu standardın amacı kablosuz bölgesel alan ağlarında (WRAN) geniş ve farklı standartların spektrumları paylaşılabilmesini sağlamaktır [34]. Bu standart bilişsel radyo temelli ilk uluslararası standarttır. Şekil 2.3'te de gösterildiği üzere literatürde yapılan birçok araştırmayla birlikte bilişsel radyo sisteminin temel mimarisi ortaya konulmuştur. Bilişsel radyo sistemi politika veritabanı bileşeni, mantıklı muhakeme ve öğrenme bileşeni, yapılandırma veritabanı bileşeni, algılama bileşeni ve yeniden yapılandırılabilir radyo bileşenlerinden oluşmaktadır.

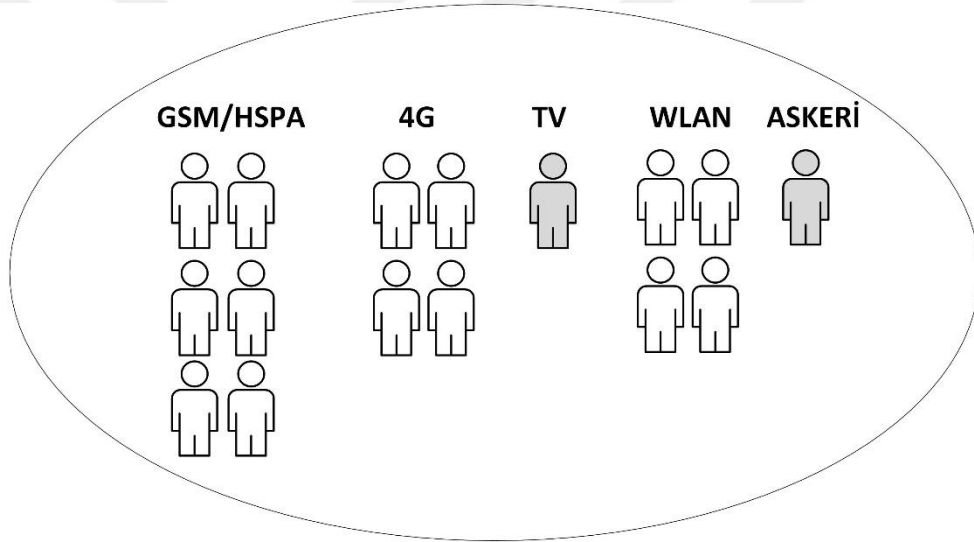


Şekil 2.3. Bilişsel radyo sisteminde olabilecek bileşenlerin bir görünümü.

Radyo spektrumları geleneksel olarak farklı kablosuz teknolojiler için tanımlanmıştır. Bunun bir sonucu olarak da günümüzde bazı frekans bantlarında yığılmalar oluşurken diğerleri çok nadir kullanılmaktadır. Bu durum verimsiz spektrum kullanımı olarak adlandırılmaktadır [7]. Bilişsel radyo spektrum verimsizliğini azaltmak amacıyla geliştirilmiş bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Çok kullanılan ve az kullanılan spektrum parçalarının algılanması, spektrumların verimli kullanılması adına veri iletiminin yeniden dağıtılması esasına dayanmaktadır. BR teknolojisi kullanımına örnek olarak, GSM ile TV baz istasyonları verilebilir. Örneğin, çok kullanılan GSM baz istasyonunun daha az kullanılan TV baz istasyonuna boşta olan ve paylaşabileceği radyo

spektrumlarını sorması ve izin aldığı takdirde bazı TV spektrumlarının yeniden dağıtılarak kullanılması yaklaşımı spektrum verimsizliği sorununun azaltılmasını sağlamaktadır.

BR ağlarının akademik ve endüstride yaygın hale gelmesi 5G teknolojileri için anahtar sağlayıcılarından biri haline gelmesini sağlamaktadır [35], [36]. GSM gibi çok yoğun kullanıcısı olan alanlarda spektrum frekanslarındaki frekans bantlarının yetersiz kalması; ancak, askeri amaçlı kullanımda olan bir diğer frekans bantlarının ise daha az kullanılması, spektrum verimsiz kullanımının bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır [7]. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi farklı teknolojilere tahsis edilmiş spektrumlar, GSM, 4G, WLAN gibi teknolojilerde kullanıcı sayısında yığılmalar oluşurken, askeri ve TV teknolojilerinde ise daha az kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrumların kullanım sıklıkları.

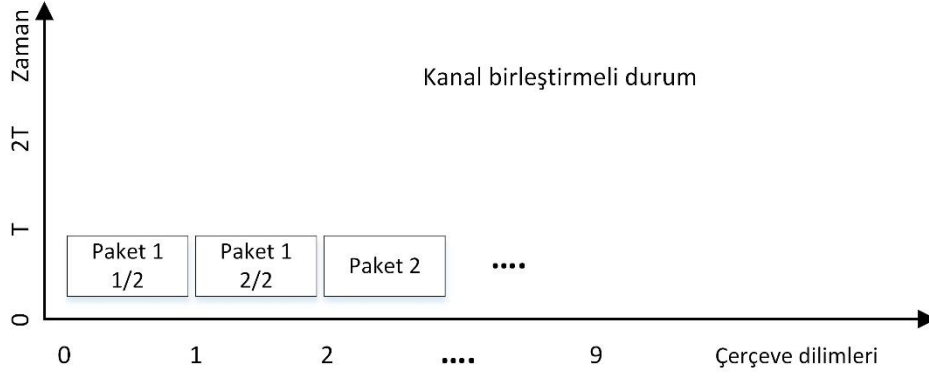
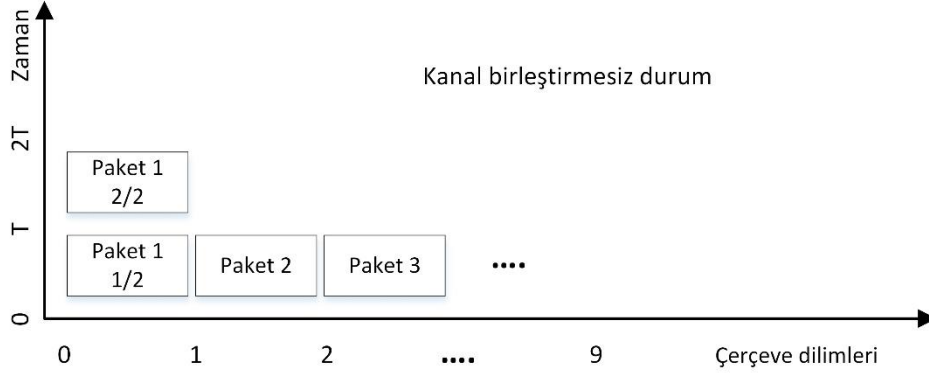
Spektrum verimsizliği, artan mobil cihazların yetersiz frekans bantlarıyla birlikte büyük bir sorun haline gelmesine ve günümüz dünyasında kablosuz teknolojilerinin hayatta kalmasını daha zor hale getirmektedir [3], [10]. Bu bağlamda radyo spektrumlarının fırsatçı bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyan bilişsel radyo, spektrum yetersizliği sorununa çözüm olabilecek bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır [37]. Lisansız kullanıcıların, tahsis edilmiş frekansların kullanılmadığı durumlarda lisanslı bantları kullanmasına imkân tanıyan bilişsel radyo bu sayede spektrum verimliliğinin artmasını sağlamaktadır. Dinamik olarak değişen çevreye uyum sağlayabilen bilişsel radyo sistemlerinin faydaları; yapıya göre anlayış, spektrum verimliliği, operasyonel esneklik, ortama uyum sağlayabilen ve mevcut kablosuz teknolojileri ile işbirlikçi olmalarıdır.

BR teknolojisinin benzer birçok teknolojide olduğu gibi tasarım, geliştirme ve uygulama bazında birtakım zorluklar ve sınırlamalar mevcuttur. Farklı ve uyumsuz kablosuz teknolojilerin birlikte çalışılabilir olması konusu BR sistemlerinin uygulanabilirliğini daha zor hale getirmektedir. Aynı zamanda BR sistem uygulamalarını destekleyen gelişmiş donanımsal bileşenlere ihtiyaç duyulması, (üst düzey radyo frekansı seçicisi, yüksek hızlı işlemci, gelişmiş sinyal işleme birimi, ikincil donanımlarda özel algılama birimi, çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) anten birimleri) başka bir zorluk ve sınırlama olarak karşımıza çıkmaktadır. En önemli zorlukların başında ise yayılmış spektrum sinyallerini tespit edebilen etkili algılama algoritmasına ihtiyaç duyulmasıdır [28], [38]–[40].

2.1.1. Kanal Birleştirme

Kanal birleştirme tekniği kablosuz ağlarda artan kapasite gereksinimlerini karşılamayı amaçlayan yeni bir mekanizmadır [41]–[43]. Bu mekanizma bitişik kanalların tek bir kanala dönüştürülmesiyle gerçekleştirilmektedir [43]–[45]. Bu teknik sayesinde iş çıkarma oranı artırılırken, gecikme süresinin de azaltılması sağlanmaktadır [46].

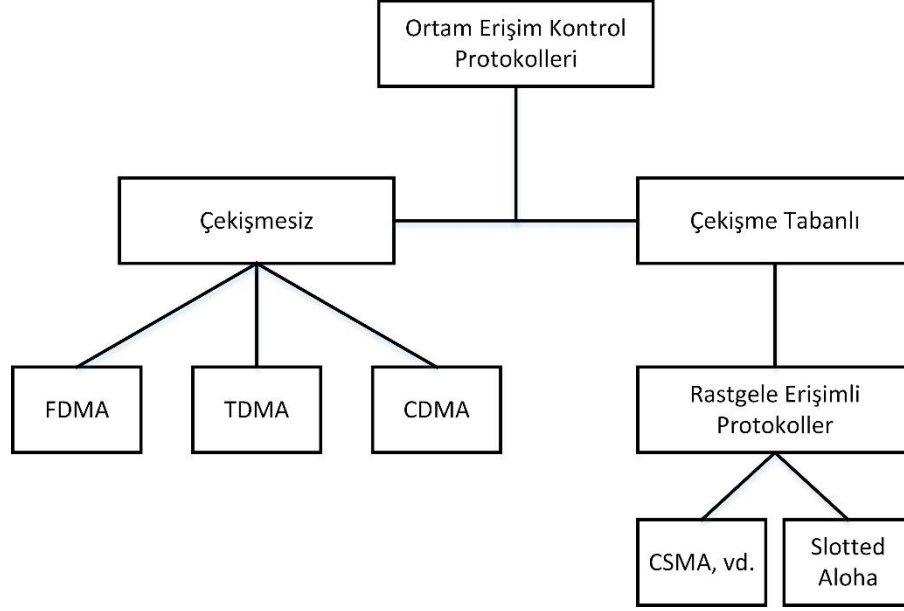
Kanal birleştirme mekanizması Şekil 2.5’te gösterilmektedir [42]. Şekilden de anlaşılacağı üzere birinci paket kanal birleştirme tekniği kullanılmadığında 2T sürede gönderilirken, diğer durumda bu süre yarı yarıya (T) düşürülmüştür. Bu çalışmada kanal birleştirme işlemi, paket boyutu baz alınarak denetleyici tarafından gerçekleştirilmektedir. Veri iletimi gerçekleştirmek isteyen İK düğümü denetleyiciden kanal talep etmektedir. Kanal talep ederken, paket boyut bilgisini de kanal talep ettiği mesaj paketiyle birlikte denetleyiciye iletmektedir. Denetleyici paket boyutunu baz alarak, gerektiği durumlarda boş ve bitişik kanalları birleştirerek talepte bulunan İK düğümüne atama işlemini gerçekleştirmektedir. Bu mekanizma sonucunda önerilen mimarinin performansı arttırılmaya çalışılırken, ayrıca servis kalite gereksinimi (QoS) de karşılanmaya çalışılmıştır.



Şekil 2.5. Kanal birleştirme mekanizması.

2.2. ORTAM ERİŞİM KONTROL PROTOKOLLERİ

Çeşitli ortam erişim kontrol (OEK) protokolleri kablosuz BR ağlarında kullanılmaktadır. Bu protokoller Şekil 2.6'da olduğu gibi kategorize edilebilmektedir. Zaman bölmeli çoklu erişim protokolü olan TDMA, Frekans bölmeli çoklu erişim protokolü FDMA, Kod bölmeli çoklu erişim protokolü CDMA çekişmeleri önlemek için kullanılmaktadır. CSMA, Slotted-Aloha gibi çekişmeli protokoller ise gönderilen verinin çarpışma ihtimalini de göz önünde bulundurmaktadır [47], [48]. Şekil 2.6'da, OEK protokollerinin sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.6. Ortam erişim kontrol protokollerinin sınıflandırılması.

Çekişme tabanlı OEK protokolleri dinamik ağlara uygulanırken, çekişmesiz OEK protokolleri statik ve merkezi kontrol sistemine sahip ağlara uygulanabilmektedir. Çalışmamızda, lisanslı kullanıcılar olan BK'lar ortama erişebilmek için çekişmesiz OEK protokollerinden biri olan TDMA protokolünü kullanmaktadırlar. Tasarladığımız mimarinin başarımlı sonuçları, BR ağları için çekişme tabanlı OEK protokollerinden biri olan Slotted-Aloha protokolünün kullanıldığı bir çalışma ile karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda hem çekişme tabanlı hem de çekişmesiz OEK protokolleri kısaca açıklanmıştır.

Rastgele erişim tabanlı protokollerden biri olan Aloha, Pure Aloha ve Slotted-Aloha olmak üzere iki çeşide ayrılır. Bunlardan ilki olan Pure Aloha protokolü, birden fazla düğümün paylaşıldığı ortamda çoklu erişim sağlamak adına, paketi olan düğümün hemen paketini göndermesi esasına dayanmaktadır. Doğası gereği, birden fazla düğümün paylaşılan ortama aynı anda paket gönderme ihtimali de yüksektir. Bu durum çarpışma olasılığını da arttırmakta ve iş çıkarım oranını düşürmektedir. Bu bağlamda, Aloha protokolünün iş yükü daha düşük olan ortamlarda kullanılması gerektiği, aksi takdirde iş çıkarım oranının ciddi anlamda düştüğü gözlemlenmiştir [49].

Pure Aloha daha çok geri bildirim (ACK) esasına dayanmaktadır. Algoritması gereği paketini göndermiş olan bir düğüm, belli bir süre ACK beklemektedir. Bu süre içerisinde ACK gelmemişse, paketin çarpışma veya başka bir durumdan ötürü silindiğini varsayıp paketini yeniden tekrar göndermektedir. Aynı durumu yaşayabilecek başka düğümlerin olma ihtimalini de göz önünde bulunduran bu protokol, yeniden gönderme durumunda

geri çekilme süresi (backoff time) denilen rastgele bir zaman bekleyip tekrar gönderme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu yaklaşım hem yeniden paket gönderme durumunda çarpışma ihtimalini azaltmakta, hem de iş çıkarma oranını arttırmaktadır.

Pure Aloha protokolü geliştirilip, iş çıkarma oranını arttırmak amacıyla Slotted-Aloha protokolü önerilmiştir. Bu protokolde zaman, slot adı verilen kanallara bölünmüştür. Her düğümün sadece bu kanalların başında paket gönderebilmesi sağlanmıştır. Bu sayede paketi olan düğüm kanalın başlangıcını kaçırmışsa bir sonraki kanalın başlangıç zamanını beklemek zorunda kalacaktır [50]. Bu yöntem ile çarpışma ihtimali azaltılmaya çalışılmasına rağmen yine de kanalın başlangıcında paketi olan birden fazla düğümün olabileme ihtimali göz ardı edilmiştir.

Günümüzde, CSMA gibi başarımlı sonuçları daha yüksek farklı protokoller bulunmaktadır. Bu OEK protokolü paket gönderilmeden önce ortamın boş olup olmadığını kontrol etme fikrine dayanmaktadır. Çekişmeli bir OEK protokolü olan CSMA (Carrier Sense Multiple Access) en temelde kablolu ağlar için CSMA-CD (Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection), kablosuz ağlar için CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. CSMA-CD OEK protokolünde çarpışmanın tespit edildiği andan itibaren rastgele bir süre beklenmekte ve daha sonra yeniden ilettime geçilmektedir. Aynı gecikmeyi rastgele seçen iki veya daha fazla düğüm olma olasılığı neredeyse sıfıra yakındır. Dolayısıyla yeniden iletimin başarılı olma durumu yüksektir. Kablolu ağlarda çarpışma durumunun tespiti yapılabilirken, kablosuz ağlarda çarpışma durumu tespit edilememektedir. Bundan dolayı çarpışma ihtimalinden kaçınmak için farklı teknikler kullanılmaktadır.

Günümüzde halen kullanılan CSMA-CA (802.11) OEK protokolü, kanalın boş olma durumunda paketini hemen göndermemektedir. Bir süre daha bekleyip ortamı tekrar kontrol edip, halen uygunsa paketini göndermektedir. Ayrıca paket gönderme işleminden önce de kanalı kullanma ihtimali olan diğer düğümlere de kanalı kullandığına dair bir bilgi göndermektedir. Bu sayede çarpışma ihtimali en aza indirilmeye çalışılmıştır. Kanalın boş olmadığı durumda ise rastgele bir zaman bekleyerek tekrar ortamı kontrol etmektedir. Bu zaman periyoduna üstel geri çekilme (exponential backoff) denilmektedir. Burada bir sayaç tutulmakta ve her defasında sayaç bir azaltılmaktadır. Sayaç sıfır olunca kanal hala boş değilse, üstel geri çekilme tekrar ayarlanır ve paket gönderme işlemi en baştan tekrarlanmaktadır. CSMA / CA, ağa gereksiz trafik ekledikçe her şeyi yavaşlattığı için önemli bir ek yük oluşturmaktadır [14], [46].

Çekişmesiz OEK protokollerinden biri olan TDMA, Slotted-Aloha'ya benzer bir biçimde zamanın kanallara bölünmesi ile gerçekleşmektedir. Slotted-Aloha'dan farklı olarak ise her bir kanal bir düğüme tahsis edilmektedir. Böylece her düğüm sahip olduğu kanalı kullanarak iletişime geçmektedir [51].

Geçmişten günümüze yeni protokoller geliştirilmiş ve halen geliştirilmektedir. Çalışmamızın Slotted-Aloha [27] ile karşılaştırılmasının amacı benzer ortam ve senaryoya sahip literatürde bir çalışma ile karşılaştırılmasıdır. Bu bağlamda özellikle benzer ortam ve senaryolara sahip çok fazla çalışma olmaması çalışmamızın daha yüksek başarımlarına sahip farklı OEK teknikleriyle karşılaştırılmasına imkân tanımamıştır.

2.3. YAZILIM TANIMLI AĞLAR

İnternet, makineler ve insanların birbirine bağlı olduğu, her an ve her yerde ulaşılabilir olma durumunu yaratan dijital bir toplum oluşumunu sağlamıştır. Sürekli yaygınlaşan ve kullanımı artan internet, her geçen gün bu ivmesini sürdürmektedir. Geleneksel ağ altyapısı sürekli olarak artan talepleri karşılamakta yetersiz kaldığı görülmektedir. Ayrıca, yönetimi oldukça karmaşık, zor ve üretici firmanın ürettiği donanıma bağımlı hale gelmiştir [6], [52], [53].

Günümüz ağ altyapısı, farklı amaçlar için üretilmiş ve birbirinden oldukça farklı ağ cihazları ile bu ağ cihazları için özel tasarlanmış kapalı kaynak birçok karmaşık protokollerden oluşmaktadır [54]. Önerilen her yeni protokol bazı sorunları çözmeye çalışırken, diğer taraftan yönetimi zor ve daha karmaşık ağ yapılarının oluşmasına sebep olabilmektedir [55]. Bununla birlikte, ağ üzerinde bir takım uygulamalar ile yapılandırma ayarları yapabilmek için farklı üretici firmaların ürettiği ve standart olmayan ağ cihazları, ağ işletim ve denetim yazılımları kullanılmaktadır. Ağın omurgasını oluşturan ağ cihaz sayısı ile güvenlik, performans ve yönlendirme gibi çeşitli ağ işlemleri için kullanılan ağ cihaz sayısı neredeyse eşit düzeye eriştiği görülmektedir. Ağ altyapılarına sonradan eklenen her ara ağ cihazı, yönetimi daha zor ve karmaşık ağ alt yapılarının oluşmasına sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra farklı üretici firmaların ürettiği ve standart olmayan ara ağ cihazları birçok güvenlik açığına da sebep olabilmektedir. Bu bağlamda birçok ağ probleminin çözülebilmesi amacıyla YTA yaklaşımı ortaya çıkmıştır.

YTA yaklaşımı Google, NEC, Cisco, SAMSUNG, Türk Telekom ve birçok firma

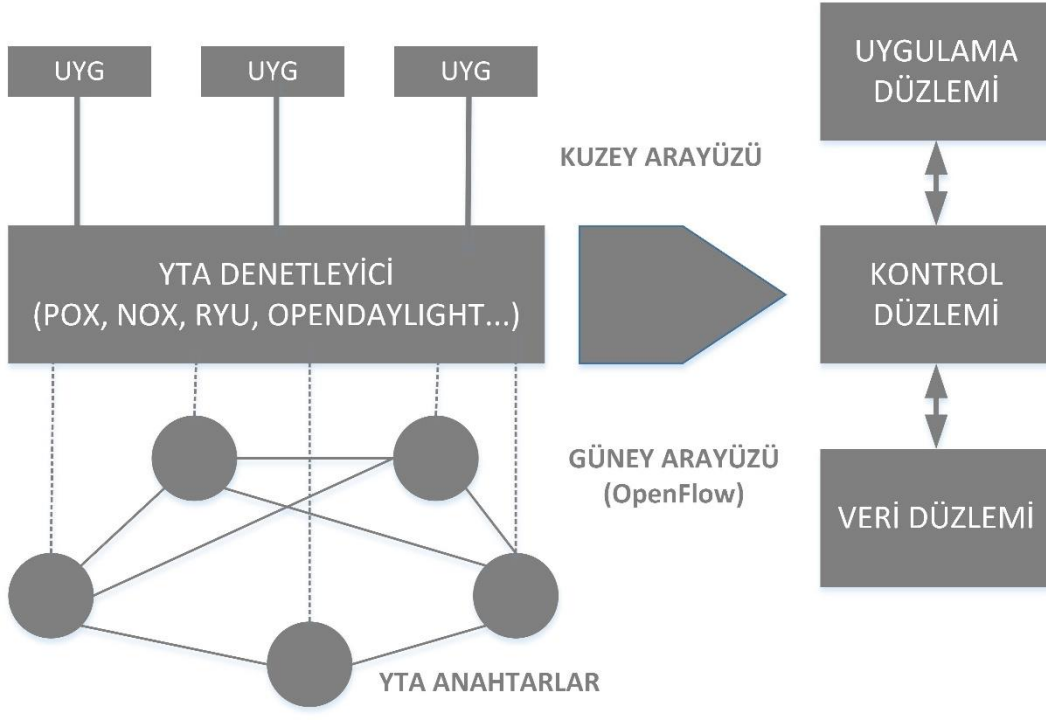
tarafından desteklenmesi ile uluslararası topluluklarda büyük ilgi görmeye başlamıştır [56]. Geleneksel ağ altyapısının sınırlamalarını ortadan kaldırmayı amaçlayan YTA yaklaşımı, kontrol ve veri düzlemlerinin birbirinden soyutlanmasını öneren [57], ağ ve yönetim sistemlerinin basitleştirilmesini [52], değişime hızlı uyum sağlayabilen bir yapıya kavuşmasını sağlayan yeni bir yaklaşımdır. Bu şekilde mantıksal olarak merkezi bir noktadan tüm ağı yönetebilen bir kontrol düzlemi ile performansı yüksek, dinamik, verimli ve gelişime açık bir ağ altyapısı sağlamaktadır [58]. Ancak, halen gelişim aşamasında olan bu yaklaşım beraberinde yeni güvenlik sorunları gibi birtakım soruları da beraberinde getirmektedir [6], [59].

YTA yaklaşımının amacı, standart ve açık kaynak bir ara yüz aracılığıyla ağ uygulamalarının ağ kaynakların durumunu ve kendi arasında oluşan ağ trafiğini kontrol edilebilmesini sağlamaktır. Yönlendirici ve anahtar gibi ağ altyapısını oluşturan ağ cihazlarını, veri düzleminde olan basit birer yönlendirme ağ cihazları haline getiren bu yaklaşım, ağ yönetimini daha basit hale getirmeyi amaçlamaktadır. YTA yaklaşımıyla ortaya çıkan katmanlı mimaride kontrol ve veri düzleminin arasındaki iletişim, güney ara yüzünde tanımlı protokoller ile gerçekleşmektedir. Bu protokollerden en yaygın olanı YTA yaklaşımı ile birlikte ortaya çıkan OpenFlow protokolüdür. Günümüzde bu ara yüzde çalışacak protokol çalışmaları halen devam etmektedir. Literatürde ForCES [60], Open vSwitch Database (OVSDB) [61], POF [62], OpFlex [63], OpenState [64] gibi çeşitli protokoller bu ara yüz için önerilmiştir. Kontrol düzleminde ise YTA denetleyicileri çalışmaktadır. Bu denetleyiciler bir ürün, cihaz ya da bir protokol olmaktan öte ağ işletim sisteminde çalışabilen aracı bir yazılımdır. Denetleyici güvenlik duvarı, yük dengeleme gibi aracı internet aygıtları tarafından sağlanan imkânları içeren, geleneksel yönlendirme becerilerine sahip, ağ işletim sisteminde çalışabilen, ağ uygulamalarını destekleyen bir mantıksal birimdir [65], [66].

Mantıksal olarak merkezi bir denetim mimarisine sahip YTA yaklaşımı, standart hale gelmiş bir ara yüz aracılığıyla tüm ağın bütünleştirilmesini ve tek bir noktadan yönetilebilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, günümüz ağ altyapısı için her an değişen durumlara daha çabuk uyum sağlama yeteneği kazandırmaktadır. Bununla birlikte, ağ altyapısında uygulanacak yenilikler daha kolay hale gelmektedir. Bu yaklaşım, etkili ve verimli kaynak kullanımını, ağ performansını arttırmakta [58], programlanabilir, uçtan uca gerçek zamanlı izlenebilir ve daha kolay denetlenebilir bir ağ altyapısına imkân sunmaktadır.

Haberleşme teknolojilerinde yıllardır iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak hız, güvenilirlik, ölçeklendirme vb. birçok başlık altında incelenmiştir. Ancak, bu çalışmaların sonucu sadece tasarım aşamasında kalmış, temeli yıllar önce atılmış ve değişime, gelişime kapalı geleneksel ağ altyapısına uygulanamamıştır. Sadece üretildikleri firma tarafından desteklenen ağ cihazları yine sadece farklı firmalar tarafından oluşturulan yazılımlarla yönetilebilmekte ve bu yönetim doğal olarak sınırlı olmaktadır. Bu sorunların çözümü için ise ağın programlanabilir hale gelmesi artık bir zorunluluk haline gelmiştir.

Ağın programlanabilmesi fikri çok daha eskiye dayanmasına rağmen, 2006 yılında ortaya çıkan Nick McKeown ve arkadaşları tarafından önerilen OpenFlow standardı [67], bu fikrin daha büyük ilgi görmesini sağlamıştır. Aynı zamanda YTA yaklaşımının da temelini atan bu standart, geleneksel ağ altyapısında var olan bazı sınırlılıkları ortadan kaldırmayı, bir yazılım vasıtasıyla veri akışı tanımlanabilmesine imkân sunmaktadır [6]. YTA yaklaşımı, Open Network Foundation (ONF) tarafından desteklenmekte ve standardize edilmektedir [68]. Bu standart ağ trafiğini yönetmek, veri akış tablolarına erişmek, basit yönlendirme işi yapan ağ cihazlarına görevler atamak gibi birçok iş ve işlemleri bir yazılım aracılığıyla (OpenFlow) yapılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, farklı üretici firmalar tarafından üretilen ağ cihazlarının yönetilebilir olması sağlanmıştır [68]. Şekil 2.7'de YTA yaklaşımının temel mimarisi verilmiştir.



Şekil 2.7. YTA mimarisinin temel mimarisi.

Bu güncel ağ yaklaşımı, veri düzleminin kontrol düzleminde var olan bir yazılımı (denetleyici) aracılığıyla yönetilebilmesini ve bu iki düzlemin birbirinden soyutlanmasını sağlamaktadır. Geleneksel ağ altyapısında tümleşik durumda olan veri ve kontrol düzlemleri, YTA yaklaşımı ile birbirinden soyutlanmış ve denetim işlemleri bir ağ işletim sistemi üzerinde çalışan denetleyiciye devredilmiştir. Mantıksal olarak merkezi bir noktadan ağı yöneten denetleyici, tüm ağ ile ilgili bilgilere sahip olabilmektedir. Bu sayede veri düzlemindeki ağ cihazlarını yönetebilmektedir.

YTA yaklaşımı ile ortaya çıkan, kontrol düzleminde bulunan denetleyici, mantıksal olarak merkezi bir konumda yer almakta ve ağ üzerindeki tüm basit yönlendirme cihazlarının akış tablolarını tek bir noktadan yönetebilmektedir [69]. Basit yönlendirme cihazlarından ağ istatistiği ile ilgili tüm verileri toplayabilen denetleyici, aynı zamanda tüm ağ hakkında da verilere sahip olabilmektedir. Sonuç olarak, veri ve kontrol düzleminin birbirinden soyutlanmasını sağlayan bu ağ yaklaşımı, teknolojik gelişmelere kapalı olan geleneksel ağ altyapısına büyük bir dinamizm, esneklik ve teknolojik gelişim imkânları sunmaktadır.

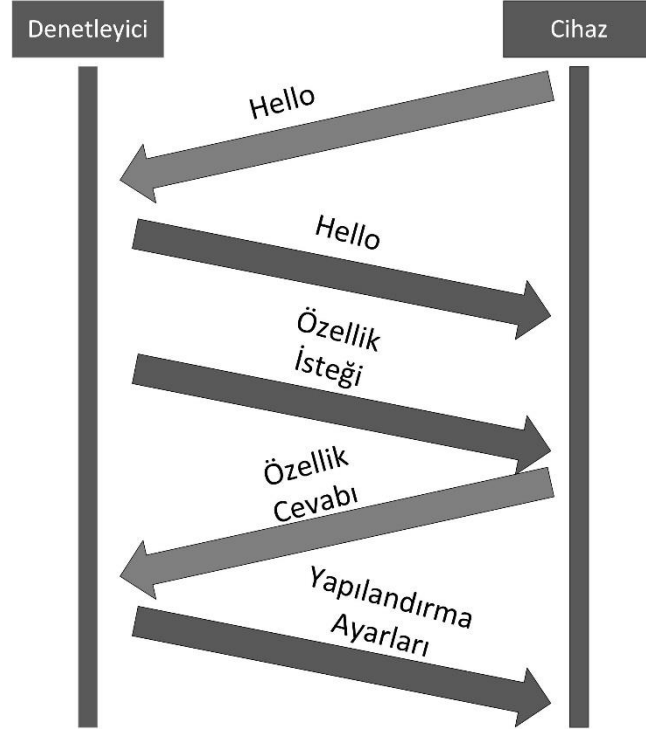
YTA yaklaşımı en temelde üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

- Denetleyici

- YTA anahtarlar (openflow switch)
- Aradaki iletişim için arayüzler (southbound - northbound)

YTA yapısında anahtarlar açık kaynak bir arayüz aracılığıyla erişilebilen basit yönlendirme cihazları olarak kabul edilmektedir. Ayrıca kontrol mantığı ve algoritmalarını YTA denetleyicisi devralmaktadır. Güney ara yüzü, denetleyici ile anahtarlar arasındaki iletişimi sağlamaktadır. Anahtarlar üzerinden geçen trafiğe göre yapılacak işleme karar vermek için gerekli sorguları yapmak, port durumlarını, fiziksel durumunu ve istatistiklerini denetleyiciye göndermek ya da kendisine denetleyici tarafından gelen herhangi bir sorguya cevap vermek gibi işlemler burada çalışan protokoller ile gerçekleştirilmektedir. Bu protokollerden en yaygın kullanılanı OpenFlow protokolüdür [70]. Ancak OVSDB, NETCONF, SNMP gibi protokoller de mevcuttur [71], [72]. OpenFlow mesajları ile anahtarlar ve denetleyici arasındaki iletişim sağlanmaktadır. OpenFlow destekleyen anahtarlar için sadece denetleyicinin bağlantı bilgilerinin verilmesi yeterli olmaktadır. Port bilgisi verilmez ise varsayılan olarak 6633'ü almaktadır.

Şekil 2.8'de YTA ağ yaklaşımında kontrol düzleminde var olan denetleyici ile veri düzleminde var olan basit yönlendirme cihazları olan ağ cihazları arasındaki temel yapılandırma için gerekli olan mesajlaşma yapısı görülmektedir. Burada temel yapılandırmadan sorumlu birim kontrol düzleminde var olan denetleyici veya denetleyicilerdir. Bu temel yapılandırma için gerekli mesajlaşma paketlerinin görevi aşağıda ifade edildiği şekildedir;



Şekil 2.8. YTA mimarisinin temel yapılandırma iletişimi.

Denetleyici ile anahtarlar arasında giden-gelen mesajlar;

- Features (özellikler): Denetleyicinin anahtarın özellikleri ile ilgili veri almasını sağlayan mesajlardır. Denetleyici ağa ya da kendisi ile iletişim kurmak isteyen her anahtardan bu bilgiyi talep etmektedir.
- Configuration (yapılandırma): Denetleyicinin anahtara gerekli yapılandırma bilgilerini ilettiği mesajlardır.
- Modify-State (durum değişimi): Denetleyicinin anahtarın akış tablosuna ve port durumlarına erişmesini ve çeşitli değişiklikler yapabilmesini sağlayan mesajlardır.
- Read-State (okuma durumu): Denetleyicinin anahtar üzerinde oluşan trafiğe ait istatistiksel veriyi çekmesini veya port durumları ile ilgili bilgileri almasını sağlayan mesajlardır.
- Packet-Out (kural gönderme): Anahtar üzerinde bilinmeyen bir trafik oluşması durumunda yapılması gerekenlerin söylendiği mesajlardır.
- Packet-In (kural isteme): Denetleyiciye, anahtarın akış tablosunda var olmayan trafik ile ilgili gerekli kuralı öğrenmek için gönderilen mesajlardır.

- Flow Removed/Expiration (akış bilgisinin kaldırılması / kullanım süresinin dolması): Uzun süre kullanılmayan veya kullanım süresi dolmuş olan akış bilgilerinin denetleyiciye iletildiği mesajlardır.
- Port-Status (port durumu): Port durumu değişen anahtarın yeni durumları ile ilgili bilgiyi denetleyiciye iletildiği mesajlardır.
- Error (hata): Anahtarda meydana gelen sorunlar ile ilgili bilgilerin denetleyiciye iletildiği mesajlardır.

YTA yaklaşımında kullanılan mesaj türleri, anlamları ve iletişim şekilleri geleneksel ağ yaklaşımdan oldukça farklıdır. Akış temelli olan YTA yaklaşımı gerekli işlemleri gerçekleştirebilmek için bu mesaj türlerini kullanmaktadır. Dolayısıyla YTA yaklaşımının temel alındığı mimarilerde kullanılacak OEK'ler bu mesaj türlerini ve iletişim aşamalarını dikkate almalıdır.

Kablosuz BR ağları gibi farklı bir mimariye sahip teknolojiler için kullanılacak OEK büyük önem arz etmektedir. Mimariye özgü gerekliliklerin baz alınması, servis kalite gereksinimlerinin tatmin edici düzeyde karşılanabilmesi, lisanlı kullanıcıların iletişimine herhangi bir müdahalede bulunulmaması gibi birçok parametrenin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Hem bu parametreleri göz önünde bulundurmamak hem de YTA yaklaşımı gereği akış bazlı bir ortam oluşturabilmek, önerilecek mimari için göz ardı edilemeyecek beklentiler arasında yer almaktadır. YTA yaklaşımında en yaygın kullanılan güney ara yüz protokolü OpenFlow'dur. Kablolu ağlar için ortaya çıkmış olan bu protokolün mesaj türleri, mesaj içerikleri ve iletişim şekilleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Çalışmamızda OpenFlow protokolü incelenmiş ve bu protokol kablosuz BR ağları için uyarlanmıştır.

Çizelge 3.1. OpenFlow Mesaj Türleri.

Mesaj Türleri	Mesajlar	İletişim
Denetleyiciden Anahtara Giden Mesajlar	Features (Özellikler)	Senkron
	Configuration (Yapılandırma)	Senkron
	Modify-State (Durum değişimi)	Senkron
	Read-State (Okuma durumu)	Senkron
	Packet-Out (Kural gönderme)	Senkron
Anahtardan Denetleyiciye Giden Mesajlar	Packet-In (Kural isteme)	Asenkron
	Flow Removed/Expiration (Akış bilgisinin kaldırılması / kullanım süresinin dolması)	Asenkron
	Port-Status (Port durumu)	Asenkron
	Error (Hata)	Asenkron
Karşılıklı Mesajlar	Hello (Merhaba)	Simetrik
	Echo (Cevap)	Simetrik

3. ÖNERİLEN AĞ MİMARİSİ

Bu bölümde önerilen ağ yaklaşımının genel mimarisi, çalışma prensibi ve mekanizmaları adım adım açıklanmıştır. BR ağ teknolojisi ile YTA yaklaşımının entegre edilirken nasıl bir yol izlendiği ve nasıl bir mimari önerildiği gösterilmektedir. Önerilen YTBR ağ mimarisinin akış diyagramı, durum geçiş diyagramları, çalışma mekanizması, kanal birleştirme işlemi detaylı bir biçimde açıklanmıştır.

3.1. YAZILIM TANIMLI AĞ YAKLAŞIMINA DAYALI BİLİŞSEL RADYO AĞLARI

YTA (Software-defined network - SDN) yaklaşımı ağ kaynaklarının daha kolay ve hızlı bir şekilde yönetilmesini sağlamakta ve geleneksel ağ mimarisinde var olan birçok problemin çözülmesine imkan sunmaktadır [73]. BR ise kısıtlı olan spektrumların etkili, verimli ve dinamik kullanılmasını amaçlayan yeni bir teknolojidir [74]. Yazılım tanımlı kablosuz bilişsel radyo (YTBR) ağları yaklaşımı, YTA yaklaşımı ile BR teknolojisi sahip oldukları ve önerdikleri yeniliklerin birbiriyle entegre edilerek tek bir mimariye dönüştürülmesi, bunun sonucunda da etkili ve verimli spektrum kullanım imkânını sunmaktadır. Bu sayede BR ağları için sanallaştırma tabanlı YTA yaklaşımına dayalı bir ağ yönetim tarzı benimsenmektedir. Etkili ve verimli bir şekilde ağ kaynaklarını paylaşırabilmek için çok katmanlı denetleyiciye sahip bir BR ağ yaklaşımı önerilmektedir. BR ağlarında baz istasyonlarının bazı yönetim sorumlulukları vardır. Bu sorumluluklar hem baz istasyonu için aşırı yük oluşturmakta, hem de düğümlerin baz istasyonlarına olan bağımlılığını arttırdığı görülmektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek amacıyla baz istasyonlarının bazı yönetim sorumlulukları YTA yaklaşımı ile ortaya çıkan bir denetleyiciye devredildiği, yarı dağıtık bir kontrol sistemi önerilmektedir. Bu mimari sayesinde, BR ağları için kaynak sanallaştırma, BR kullanıcıları için dinamik, altyapıdan bağımsız, etkili ve verimli kaynak tahsisi sağlanmıştır. Sonuç olarak, YTBR ağ mimarisi, baz istasyonları ve kullanıcılar üzerindeki kontrol yükü azaltılarak ağın performansı artırılırken, BR ağ kullanıcılarının baz istasyonlarına ve fiziksel ağ kaynaklarına olan bağımlılığı da azaltılmaktadır [27], [74].

Şekil 3.1’ de YTBR ağ mimarisinin katmanlı görünümü gösterilmektedir. Bu mimari üç düzlem olarak tasarlanmıştır. Bunlar uygulama, kontrol ve veri düzlemleridir. Basit yönlendirme cihazlarının bulunduğu veri düzleminde var olan uygulama programlama ara yüzü, kontrol düzlemindeki denetleyici/denetleyiciler ile uygulamalar ve servislerin birbiri ile iletişim kurabilmelerini sağlamaktadır. Bu mimaride güney ara yüzü için OpenFlow baz alınarak kablosuz BR ağ mimarisine uygun yeni bir protokol tasarlanmıştır. Veri düzlemindeki uygulamalar, temel kaynakların paylaşılmasını ve sanallaştırılmasını desteklemektedir. Veri düzlemindeki BR ağ düğümlerinin YTA kontrollü olması ve YTA uygulamalarına maruz kalan spektrumların sanallaştırılması mimarinin en önemli özellikleridir [75].



Şekil 3.1. YTA yaklaşımına dayalı bilişsel radyo ağ mimarisi.

YTBR ağ mimarisinde uygulamalar, uygulamalardan ağ gereksinimlerini alan YTA kontrol mantığı, bu uygulamalar arasında planlama ve aracılık yaparken, ağ denetleyicisi ile haberleşme sağlanabilmesi için genel bir ara yüz sağlamaktadır. Bu ara yüzler, denetleyicinin veri düzlemindeki cihazlar ve ağ uygulamaları arasında uygun bir iletişim kurabilmesi için önemli bir katmandır. Bu yüzden, YTBR ağ mimarisi radyo kaynaklarının etkili ve verimli yönetimi için iyi tanımlanmış bir bilişsel makine uygulaması olarak görülmektedir. Bilişsel makine, kontrol düzleminde paylaşılan spektrumların görünümünü ve radyo ağ parametrelerinin kontrolünün devralınmasını içermektedir [75].

Kablosuz ağ altyapısında BR sistemlerinin tasarımı, gelişimi ve uygulamaları için çalışmalar halen devam etmektedir. Mevcut kablosuz ağ altyapısında BR sistemlerinin etkili ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için genel mimarinin yanı sıra donanımsal ve

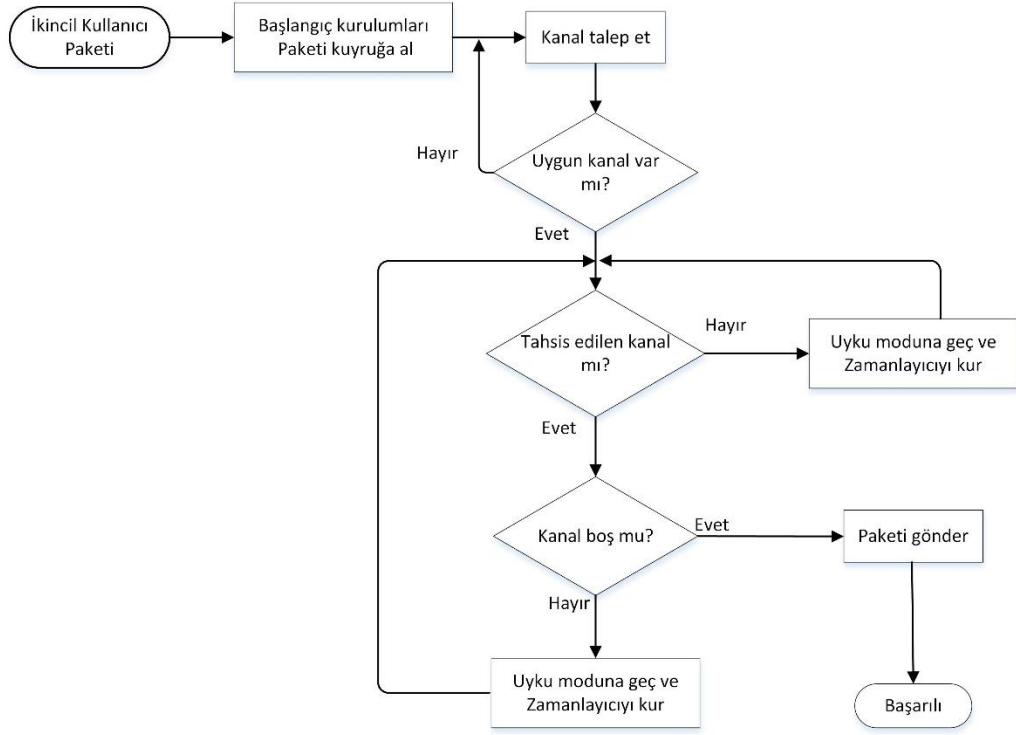
yazılımsal tasarım ve gelişim için de daha birçok çalışmaya ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Gelişen teknolojiler ile birlikte artmaya devam eden yetersiz spektrum sorununu çözebilmek adına bir gereklilik haline gelmektedir [76]. BR sistemlerinin mevcut kablosuz teknolojilerle birlikte sorunsuz bir biçimde çalışabilir olması da önemli bir parametredir.

3.2. YAZILIM TANIMLI AĞ YAKLAŞIMINA DAYALI BİLİŞSEL RADYO AĞ TASARIMI

BR ağlarında kullanılabilir durumdaki boş lisanslı kanalların tespit edilmesi ve bunun talepte bulunan İK'lara servis kalite gereksinimleri baz alınarak tahsis edilmesi gerekmektedir. İK'lar denetleyici ile ilk haberleşmesini sağlayıp gerekli ilk kurulumlarını gerçekleştirmeleri gerekmektedir. BR ağlarında BK'ların iş çıkarma oranları, gecikme oranları, paket kayıp oranlı, bit hata oranları göz önüne alınarak İK'ların ortamda ne düzeyde etkide bulunduğu tespit edilmektedir.

3.3. GENEL MİMARİ

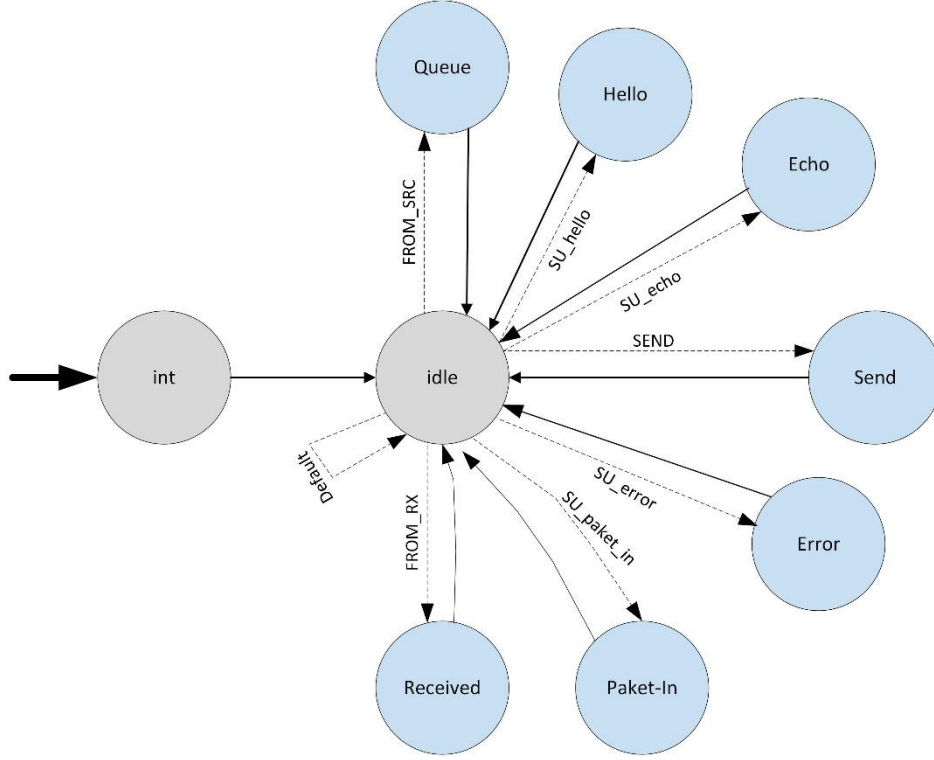
Tasarlanan YTA yaklaşımına dayalı BR ağ ortamında ilk aşama olarak kurulum aşaması gerçekleştirilmektedir. Denetleyicinin ortamı sezmesi ve kullanılabilir kanalları tespit etmesi, ortamdaki İK'lara denetleyici olduğu bilgisini vermesi, İK'ların denetleyiciden uygun kanal talep etmesi ve denetleyicinin İK'lara paket boyutlarını göz önünde bulundurarak kanal tahsis etmesi geliştirilen mimarinin ana aşamalarıdır. Kanal talep eden İK'lar için yeterli ve uygun kanal olmaması durumunda İK'lar ağa dâhil edilmemektedir. Genel işleyiş Şekil 3.2'deki akış diyagramında özetlenmektedir.



Şekil 3.2. Sistemin genel çalışmasını özetleyen akış diyagramı.

3.4. ÇALIŞMA PRENSİBİ

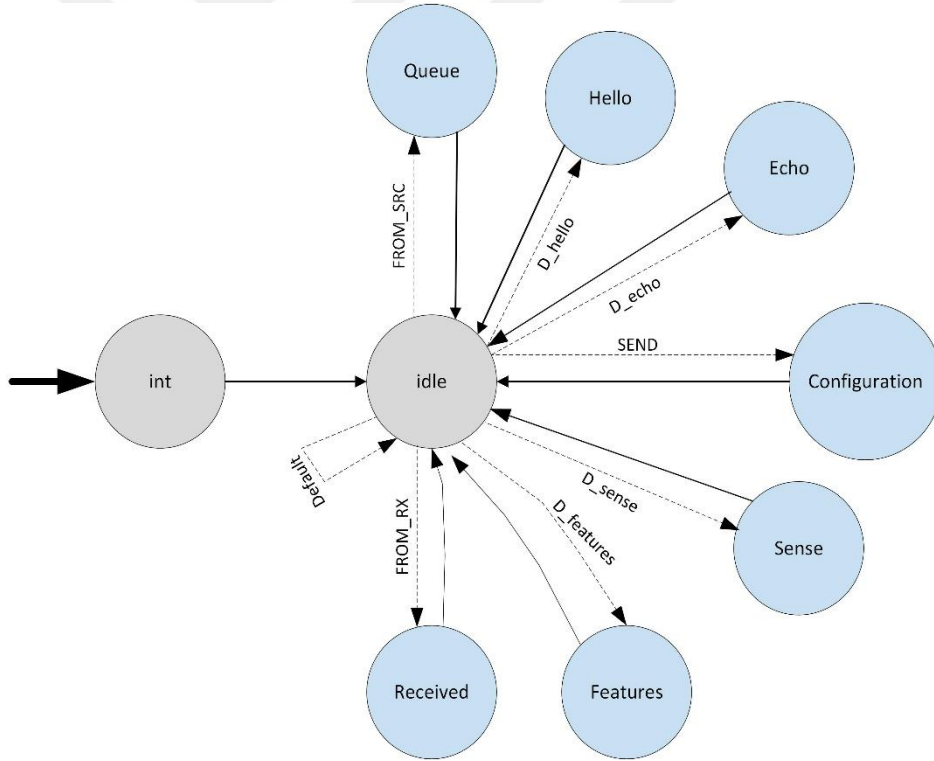
Durum diyagramları, sınırlı sayıda durumun olduğu sistemlerde doğrulama olanağı sunan ve modeli basitleştirip davranışlarının anlaşılmasını sağlamaktadır. Tasarlanan sistemin durum diyagramları Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Önerilen senaryoda İK'lar ve denetleyicilerin görevlerinin farklı olması nedeniyle durum diyagramları birbirinden farklıdır. Durum diyagramları basitleştirilerek aktarılmıştır.



Şekil 3.3. Geliştirilen ikincil kullanıcı düğümünün durum geçiş diyagramı.

- Int durum makinesi, istatistiksel bilgiler ile düğüm özellerinin belirlendiği, kullanılan değişkenlerin ilk değerlerini aldığı bölümdür. Kanallara ayrılan zaman dilimi, ana çerçeve süresi, ilk kanal başlama zamanı gibi değişkenlere değerler atanmaktadır. Düğüme ait bilgiler üst katmandan okunarak değişkenlere ataması gerçekleştirilmektedir.
- Queue durum makinesi, kaynak tarafından üretilen paketlerin gerekli parametreleri eklenmesiyle kuyruğa gönderildiği kısımdır. Benzetim modelinde, algılayıcılardan alınan verileri temsilen bu kısımda değerler oluşturulmaktadır.
- Received durum makinesi, paket alındığında, paket türü belirlenmekte ve gerekli işlemler yapılmaktadır. Kurulum atama paketi geldiğinde, kullanılacak kanal bilgileri gibi değerlerin değişkenlere aktarılması gibi işlemler gerçekleştirilir.
- Idle durum makinesi, diğer durum makinelerinin çalışmadığı zamanlarda beklenen durumdur.
- Send durum makinesinde, gerekli şartlar sağlandığında paket kuyruktan alınarak vericiye gönderilmektedir. Burada düğüme tahsis edilen kanal bilgileri yardımıyla doğru kanal tespiti gerçekleştirilip, gönderme işlemi gerçekleştirilmektedir.

- Hello durum makinesinde, düğüm ile denetleyicinin ilk iletişime geçtiği mesajdır. Denetleyici düğümün kendisiyle kablosuz haberleşebilmesi için bu mesajla ilk kurulum işlemlerini gerçekleştirmektedir.
- Echo durum makinesinde, denetleyici ile düğüm arasında periyodik aralıklarla gönderilip alınan simetrik kontrol mesajları burada gerçekleştirilir.
- Error durum makinesinde, düğüm üzerinde meydana gelen problemleri denetleyiciye iletmek için kullandığı işlemler gerçekleştirilir.
- Packet-In durum makinesinde, düğümün akış tablosunda var olmayan trafiğe ait kuralları öğrenmek için gerekli akış-kural bilgilerini denetleyiciden istediği mesajlar bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Düğüm ilk kurulumdan sonra sadece denetleyici bilgisine sahiptir. Kullanacağı kanal, baz istasyonu gibi bilgileri denetleyiciden talep etmektedir. Bu aşamada bu bilgilerin talep aşaması gerçekleşmektedir.



Şekil 3.4. Geliştirilen denetleyici düğümünün durum geçiş diyagramı.

- Configuration durum makinesinde, denetleyicinin düğüme yapılandırma bildirimini yaptığı mesajlar bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Denetleyici paket boyutuna göre, gerekli durumlarda ortam uygunsa kanal birleştirme yapıp, kanal

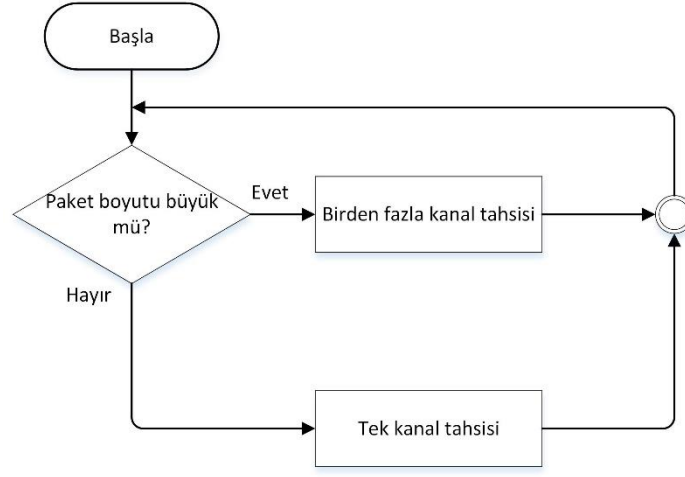
bilgilerini düğüme iletme işlemleri, trafikte herhangi bir değişiklik söz konusuysa düğümün akış tablosunu güncelleme işlemleri burada gerçekleştirilmektedir.

- Features durum makinesinde, denetleyicinin düğümün durumu hakkında bilgi almasını sağlayan mesajlar burada gerçekleşmektedir. Denetleyici kendisine bağlanmak isteyen her düğümden bu bilgiyi istemektedir.
- Sense durum makinesinde, denetleyici BR ağ ortamında boş kanalları tespit edilmesi için periyodik olarak ortamın dinlenmesi, uygun kanalların talepte bulunan ya da bulunacak İK'lar için geçici olarak depolanması, kanal kullanım istatistiklerinin tutulması gibi BR ağ ortamının çekirdek işlemler burada gerçekleşmektedir.
- Denetleyicideki diğer durum makineleri düğümdeki durum makinelerinde açıklanmıştır.

3.5. ÇALIŞMA MEKANİZMALARI

Tasarlanan YTA yaklaşımına dayalı BR ağ modelinde, servis kalite gereksinimlerini karşılamak için yeni bir kanal tahsis şeması tasarlanmıştır. Kanal tahsis şeması, ağdaki İK'lara paket boyutuna göre gerekli sayıda kanal ayırmaktadır. Bu sayede, farklı trafik yüklerine sahip düğümlere servis kalite gereksinimi sağlayarak, garanti edilen veri iletimi sağlanmış olunacaktır. Ayrıca gecikme değerleri de düşürülmüştür. Kanal tahsis mekanizması paket çakışmasından kaçınmayı sağlayarak bit hata oranı (BER) değerini azaltmaktadır. Ayrıca İK'ların denetleyici kontrolünde ağa dâhil olması ağın ölçeklenebilirliğini sağlamaktadır.

Kanal birleştirme tekniği, paket boyutu büyük düğümler için birden fazla kanala ihtiyaç duyulduğu durumlarda bitişik olan kanalların birleştirilmesi işlemidir [77]. Kanal birleştirme mekanizması, servis kalite gereksinimlerini karşılayabilmek için birden fazla kanalın farklı paket boyutlarına sahip düğümlere tahsis edilmesi anlamına gelmektedir. Böylece, düğümler kendilerine tahsis edilmiş kanallarda verilerini gönderebilmekte ve iş çıkarma oranı da artmaktadır. Şekil 3.5'te kanal birleştirme mekanizması verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere paket boyutu baz alınarak tek kanalın yeterli olmadığı durumlara birden fazla kanal tahsisi gerçekleştirilerek servis kalite gereksinimleri karşılanmaya çalışılmaktadır.



Şekil 3.5. Kanal birleştirme mekanizması.



4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde kullanılan benzetim yazılımı, modeli, senaryosu ve parametreleri açıklanmıştır. Ayrıca önerilen ağ modelinin farklı senaryolar ve iş yükleri dikkate alınarak iş çıkarma oranı, uçtan uca gecikme, paket kayıp oranları ve bit hata oranları incelenmiştir.

4.1. BENZETİM MODELİ

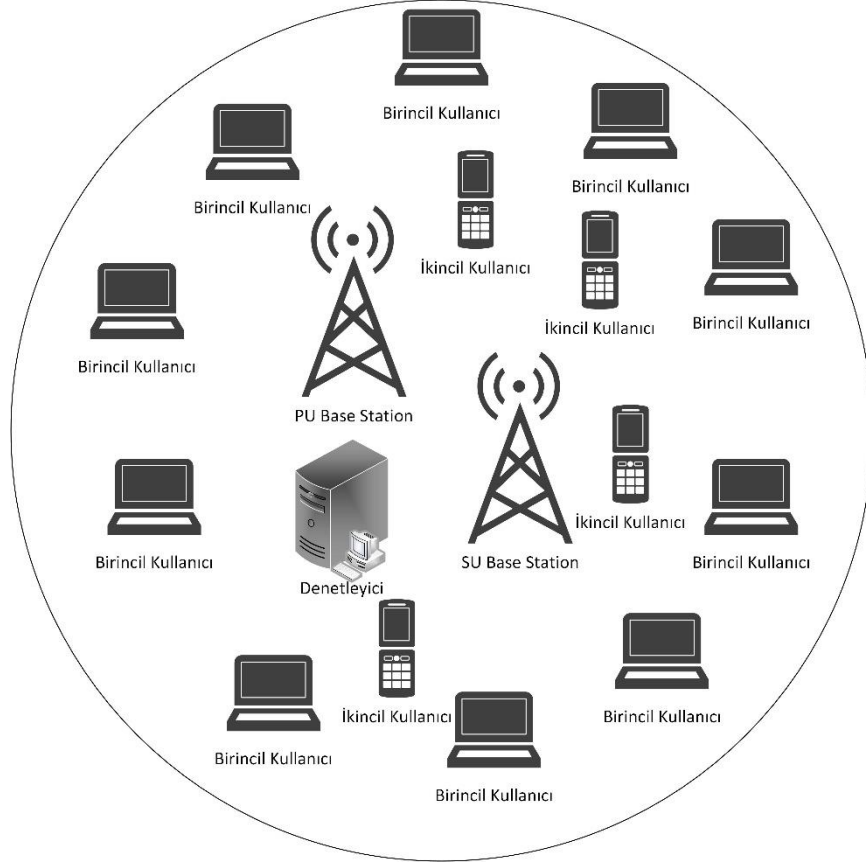
YTA yaklaşımına dayalı BR ağ ortamı için birincil ve ikincil kullanıcılar ile YTA yaklaşımının getirdiği kontrol katmanı elemanı olan denetleyici düğümleri Riverbed Modeler yazılımı ile tasarlanmıştır [78].

4.1.1. Riverbed Modeler Benzetim Yazılımı

Riverbed modeler yazılımı, haberleşme ağlarının modellenmesinde kullanılan, akademik dünyaca kabul görmüş görsel bir benzetim ortamı sunan, nesneye yönelik bir benzetim yazılımıdır. Modellenen sistemin başarımlarını analizleri ayrık olay benzetim yöntemi ile yapılmaktadır. Hiyerarşik modelleme katmanlarına sahip bu yazılım, ağ ortamında kullanılacak bağlantı hatları, veri paketleri, düğümler, katmanlar ve protokoller ayrı editörlerde hazırlanabilmektedir. Riverbed modeler yazılımı, editörler yardımıyla yeni protokol ve ürünlerin modellerini oluşturabilmesi, oluşturulan model ve protokollerin model kütüphanesine eklenebilmesi sayesinde ağ ortamlarında yenilikçi yaklaşımlara destek olmaktadır [78].

4.2. BENZETİM SENARYOSU

Ağ topolojisinin ve düğüm konumlarının gösterildiği kısım Şekil 4.1’de verilmektedir. Ağ trafik yük tanımlamaları, benzetim sonucu oluşacak istatistiklerin seçimleri proje modelinde editör yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere on adet BK, beş adet İK, birer adet BK ve İK baz istasyonları ile denetleyicinin kullanıldığı proje benzetim senaryosu görülmektedir. Çizelge 4.1’de benzetimde kullanılan parametre değerleri verilmektedir.



Şekil 4.1. Benzetim senaryosu.

Çizelge 4.1. Benzetimde kullanılan parametre değerleri.

Parametre	Değer
Benzetim süresi	3600 saniye
Slot genişliği	100 ms
Alıcı - Verici frekansı	2.4 GHz - 1.85 GHz
BK ve İK sayısı	Senaryoya bağlı olarak (5 – 10 – 20)
Bant genişliği	2 MHz
Modülasyon şeması	BPSK
Verici gücü, Veri hızı	0.1 W, 1Mbps
Algılama olasılığı	0.9
Yanlış alarm olasılığı	0.1

Önerdiğimiz mimari için farklı sayılarda İK ile BK'ların olduğu senaryolar ve farklı parametre değerleri kullanılmıştır. Bu farklı senaryolar için çeşitli analizler yapılarak önerdiğimiz mimarinin başarımları analizleri incelenmiştir. BK'lar TDMA ortam erişim tekniğini kullanırken, İK'lar kablosuz bilişsel radyo ağ ortamı için geliştirilmiş YTA yaklaşımına dayalı yeni bir ortam erişim tekniğini kullanmaktadırlar. YTA yaklaşımının önerdiği mimari yapı, BR ağ ortamına entegre edilmeye çalışılmıştır. BR ağ ortamlarındaki baz istasyonları ve İK'lar veri düzleminde basit birer yönlendirme cihazlarına dönüştürülmüştür. Kontrol düzlemi için BR ağ ortamlarının gereksinimlerini karşılayacak, kontrol ve yönetim işlemlerini üstlenecek bir denetleyici tasarlanmıştır. İK'lar uygun olan kanalları kullanarak iletişimleri sürdürebilmek amacıyla, denetleyiciye başvurup uygun kanal talebinde bulunmaktadırlar. Kablosuz BR ağ ortamı için tasarlanmış ve mantıksal olarak merkezi bir noktada olan denetleyici, tüm ağın trafik bilgisine sahiptir. Bu sayede kullanılmayan uygun kanalları tespit edip, talep eden İK'lara paket boyutlarına göre kanal atama işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Önerdiğimiz mimaride denetleyici;

- dinamik kanal tarama işlemlerini gerçekleştirebilmek için periyodik aralıklarla ortamı tarayarak uygun kanalları tespit etme,
- veri iletimi gerçekleştirmek isteyen İK'lara kullanacağı kanallara karar verme,
- kanalların kullanım istatistiklerini çıkarma,
- servis kalite gereksinimlerini karşılayabilmek için İK'ların paket boyutuna göre kanal birleştirme tekniğini kullanma,
- İK'lar ile sürekli iletişim halinde olarak dinamik kanal atama işlemlerini gerçekleştirme,
- ölçeklenebilir bir BR ağ ortamı sağlama,
- veri düzlemindeki İK'ların akış tablolarına müdahale etme gibi BR ağ ortamı için birçok kontrol ve yönetim işlemlerini gerçekleştirmektedir.

Önerdiğimiz mimaride veri düzleminde bulunan ve paketi olan İK'lar;

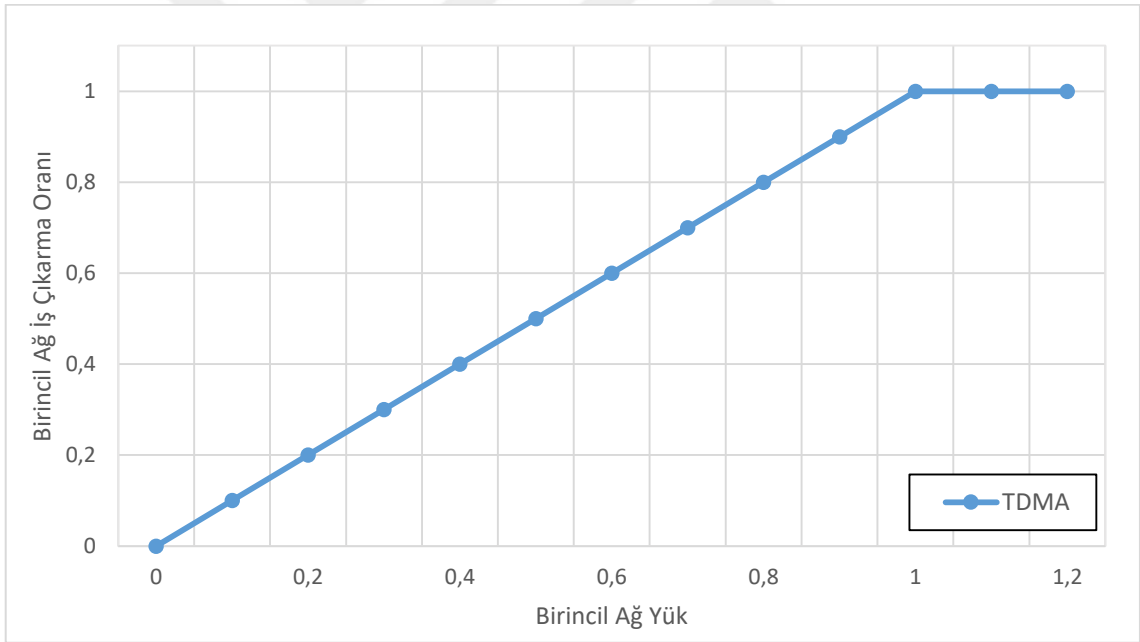
- denetleyici ile iletişime geçip ilk kurulumlarını gerçekleştirme,
- haberleşme için uygun kanal talep etme,
- kendisine atanan kanalı kullanmadan önce BK'nın kanalı tekrar kullanma

ihtimaline karşı ortamı tekrar dinleme,

- kullanmadığı kanal bilgisini, akış tablosunda uygun kanal yoksa durum bilgisini denetleyiciye iletme görevlerini gerçekleştirmektedir.

4.3. BENZETİM SONUÇLARI

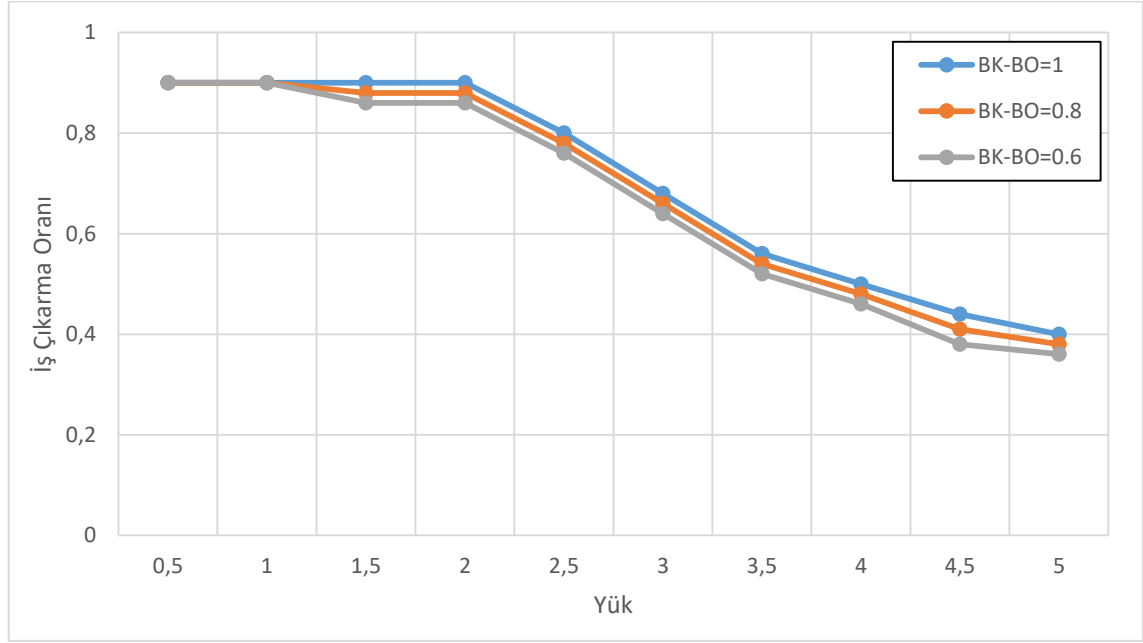
İş çıkarma oranı (Throughput) bir ağ başarıım parametresidir. İş çıkarma oranı, bir ağ ortamında belirli bir zaman diliminde başarılı bir şekilde alınan paket sayısının toplam paket sayısına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bir ağa birim zamanda sunulan paket sayısına ise yük denilmektedir. Şekil 4.2’de farklı ağ koşulları altında TDMA tekniğinin birincil ağ iş çıkarma oranı verilmiştir. Bu ağ senaryosunda 10 adet BK bulunmaktadır. Birincil ağ yükü 0,1’den 1’e yükseltilirken, iş çıkarma oranı da aynı oranla artmaktadır. Birincil ağ yükü 1 ve üzerine çıktığında iş çıkarma oranı aynı kalmaktadır.



Şekil 4.2. Birincil ağ iş çıkarma oranı.

Şekil 4.3’te farklı boş ortam olasılık değerleri için ikincil ağ iş çıkarma oranı gösterilmektedir. Benzetim senaryosunda BK’ların sayısı 10 ve İK’ların sayısı 5 adettir. Birincil kullanıcı boş olma olasılığı (BK-BO) birincil kullanıcıların ortamı kullanmadığı durumdur. Birincil ağ iş çıkarma oranının en düşük olduğu durumda ikincil ağ iş çıkarma oranının en yüksek olduğu görülmektedir. BK’ların kanalı hiç kullanmadığı BK-BO=1 durumunda, ikincil ağ iş çıkarma oranı tüm yük değerlerinde en yüksek düzeyde olduğu

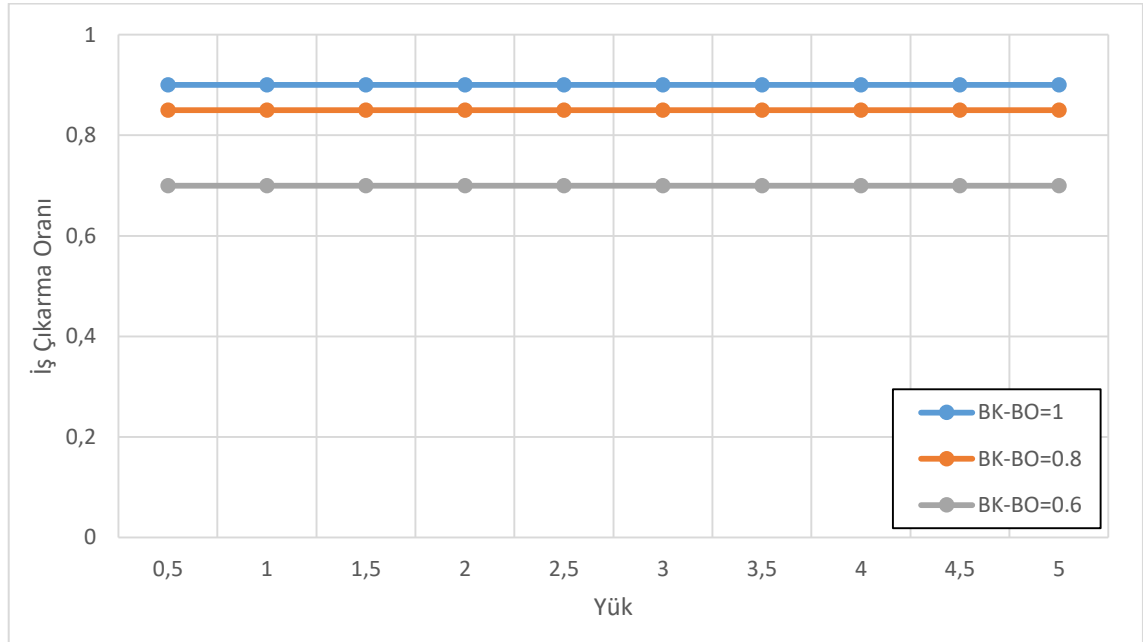
görülmektedir. BK_BO değeri arttıkça ikincil ağ iş çıkarma oranının düştüğü görülmektedir. Tüm durumlarda ağın toplam iş çıkarma oranı en yüksek düzeydedir. Bu grafik sonucu ortamdaki İK'ların paket boyutlarının aynı olduğu varsayılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde İK'ların en yüksek performansının 0,9 olduğu görülmektedir. Bunun nedeni de kablosuz BR ağ ortamlarında algılama ve yanlış alarm olasılıklarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.3. Önerilen bilişsel radyo ağı iş çıkarma oranı (paket boyutları aynı).

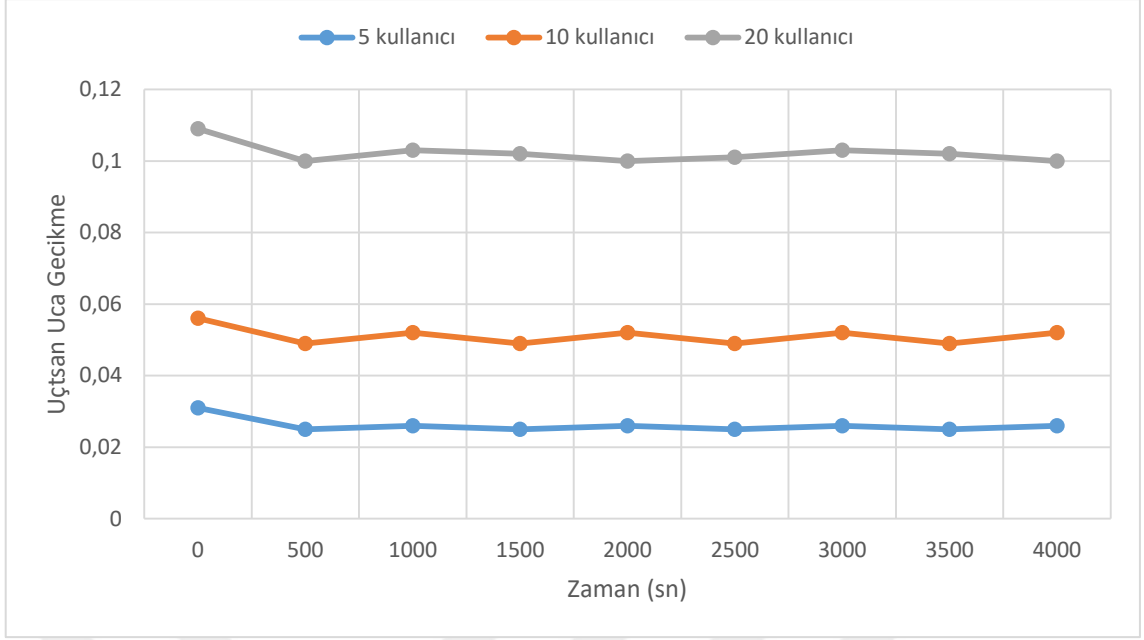
Şekil 4.4'te de farklı boş ortam olasılık değerleri için ikincil ağ iş çıkarma oranı gösterilmektedir. Bu benzetim senaryosunda ise İK'lar farklı paket boyutlarına sahiptirler. Normal ve büyük boyutlarda paketler, farklı İK'lar tarafından ortamda iletmeye çalışılmaktadır. İki adet İK 50Kb paket gönderirken, diğer üç adet İK 10Kb paket göndermektedir. Burada YTA yaklaşımına dayalı denetleyici yardımıyla, boş kanallar tespit edilmekte ve farklı boyutlarda paketlere sahip İK'lar boş kanallar için denetleyiciye başvurumaktadırlar. Denetleyici ortamın durumuna ve talepte bulunan İK'ların paket boyutuna göre servis kalite gereksinimini karşılayacak düzeyde kanal atamalarını gerçekleştirmektedir. BK'ların kanalı hiç kullanmadığı BK-BO=1 durumunda, BR ağ iş çıkarma oranı tüm yük değerlerinde en yüksek düzeyde olduğu görülmektedir. Şekil 4.3 ile karşılaştırıldığında yük değerleri artmasına rağmen iş çıkarma oranının düşmediği görülmektedir. Bunun nedeni denetleyicinin ortamdaki boş kanal bilgisine sahip olması, servis kalite gereksinimleri göz önünde alınarak kanal atama

işlemlerini gerçekleştirmesi, boş kanalların bitmesi durumunda birincil ağın iş çıkarma oranının düşmemesi için İK'ların bir sonraki boş kanalı beklemesini sağlamasıdır.



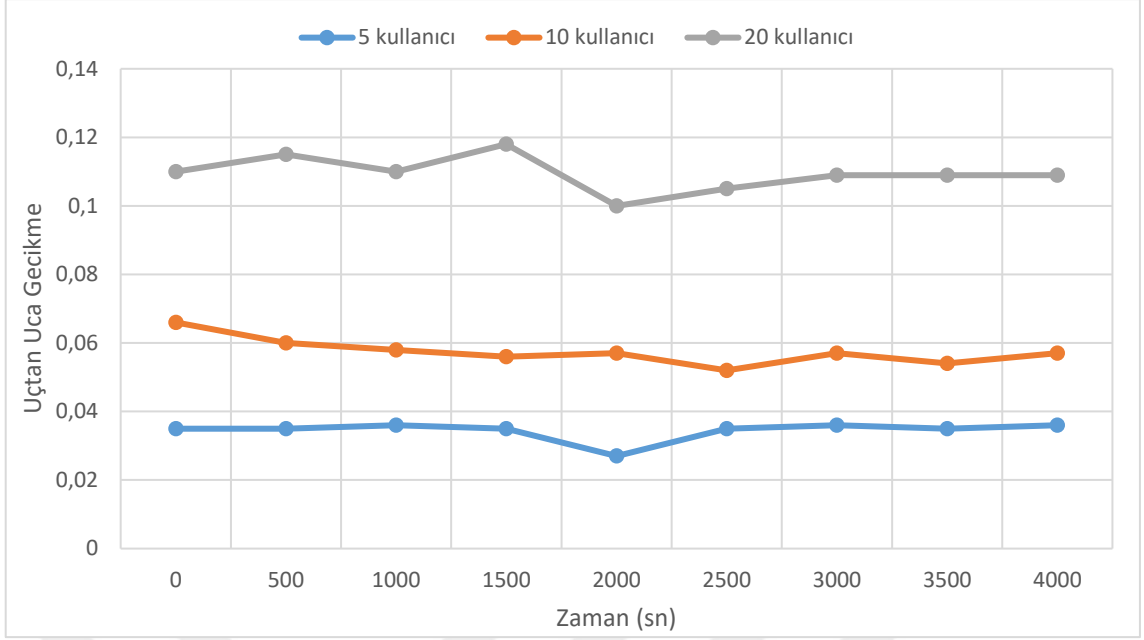
Şekil 4.4. Önerilen bilişsel radyo ağ iş çıkarma oranı (paket boyutları farklı).

Kablosuz mimarilerin benzetiminde kullanılan en önemli başarımlar değerlendirme parametrelerinden biri de uçtan-uca gecikme analizleridir. Bu parametre, paketlerin kaynak tarafında ilk bitin üretildiği andan hedef tarafında son bitin alınmasına kadar geçen süre olarak ifade edilmektedir. Şekil 4.5'te birincil ağın gecikme analizi sonuçları görülmektedir. Senaryoda farklı sayılarda (5, 10 ve 20) BK varken oluşan uçtan uca gecikme sonuçlarına göre, kullanıcı sayısı arttıkça gecikmelerin azda olsa bir miktar arttığı gözlemlenmektedir.



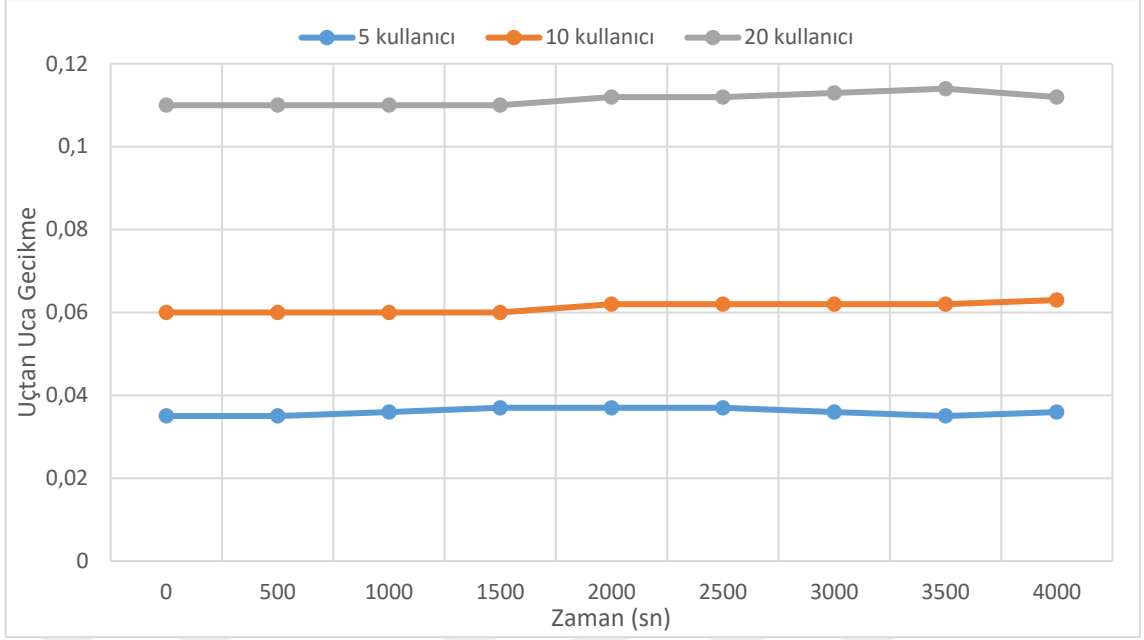
Şekil 4.5. Birincil ağ gecikme analizi.

Şekil 4.5'te İK'ların ortamda olmadığı bir senaryodaki birincil ağın uçtan uca gecikme sonuçları gözlemlenmiştir. Şekil 4.6'da ise ortamda 5 adet İK ile farklı sayılarda (5, 10 ve 20) BK olduğu bir senaryonun uçtan uca gecikme analizi verilmektedir. Bu senaryoda İK'ların tümünün aynı ve normal paket boyutlarında (10Kb) veri iletimi sağladığı varsayılmıştır. Benzer şekilde senaryomuzda BK sayısı arttıkça gecikmelerin arttığı gözlemlenmiştir. İK'ların eklendiği bu senaryoda gecikmenin çok az miktarda değiştiği gözlemlenmektedir. Bu durum bilişsel radyo ağlarında beklenen ve istenen bir durumdur [79].



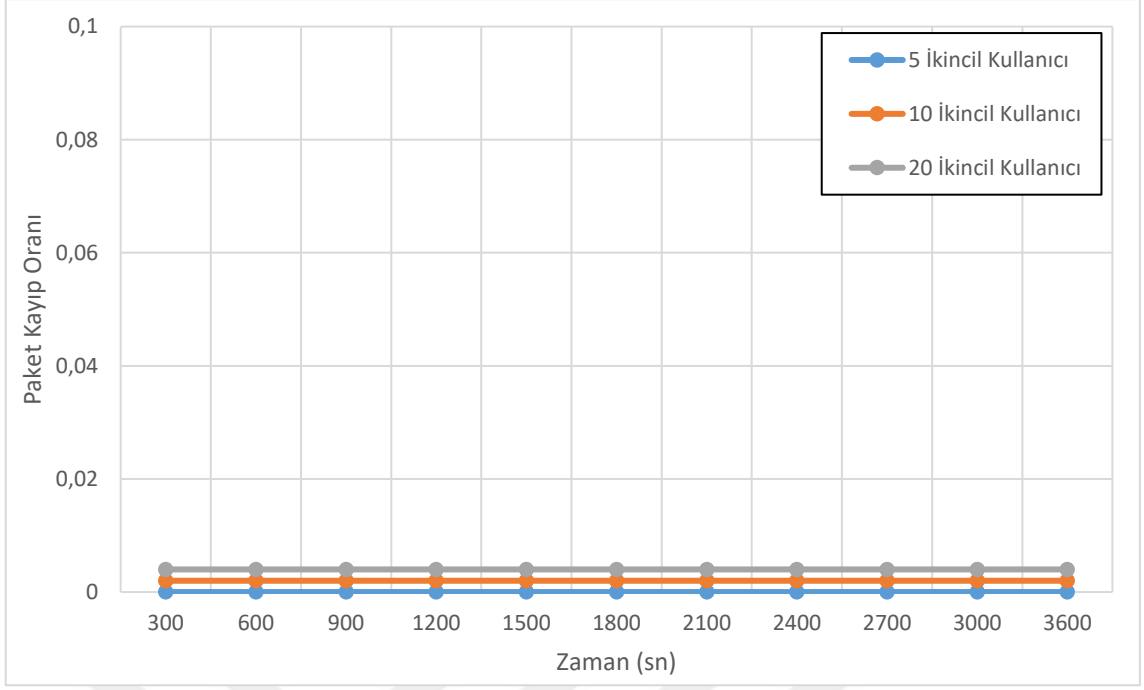
Şekil 4.6. Aynı paket boyutlarına sahip beş adet ikincil kullanıcı ile farklı sayılarda birincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil ağ gecikme analizi.

Şekil 4.7’de ortamda farklı ve büyük paket boyutlarına sahip 5 adet İK ile farklı sayılarda (5, 10 ve 20) BK olduğu bir senaryonun uçtan uca gecikme analizi verilmektedir. Burada iki adet İK 50Kb veri iletmeye çalışırken, diğer üç adet İK ise 10Kb veri iletimi yapmaya çalışmaktadır. Benzer şekilde senaryomuzda kullanıcı sayısı arttıkça gecikmelerin arttığı, farklı ve büyük paket boyutlarına sahip İK’ların da eklenmesi çok az miktarda gecikmeye sebep olduğu gözlemlenmektedir. BR ağları için tasarlanmış olan denetleyici paket boyutlarını baz alarak kanal birleştirme tekniği yardımıyla İK’ların servis kalite gereksinimlerini karşılamaktadır. Ayrıca bu teknik yardımıyla, birincil ağ performansına da zarar verilmemiş olduğu görülmektedir. Bu yaklaşım ile İK ve baz istasyonlarının üç katmanlı YTA yaklaşımı mimarisinin en alt katmanı olan veri katmanında basit yönlendirme cihazları olarak tasarlanmıştır. Tüm mimari merkezi bir noktada toplanarak kontrol katmanında bir denetleyici aracılığıyla yönetilmektedir.



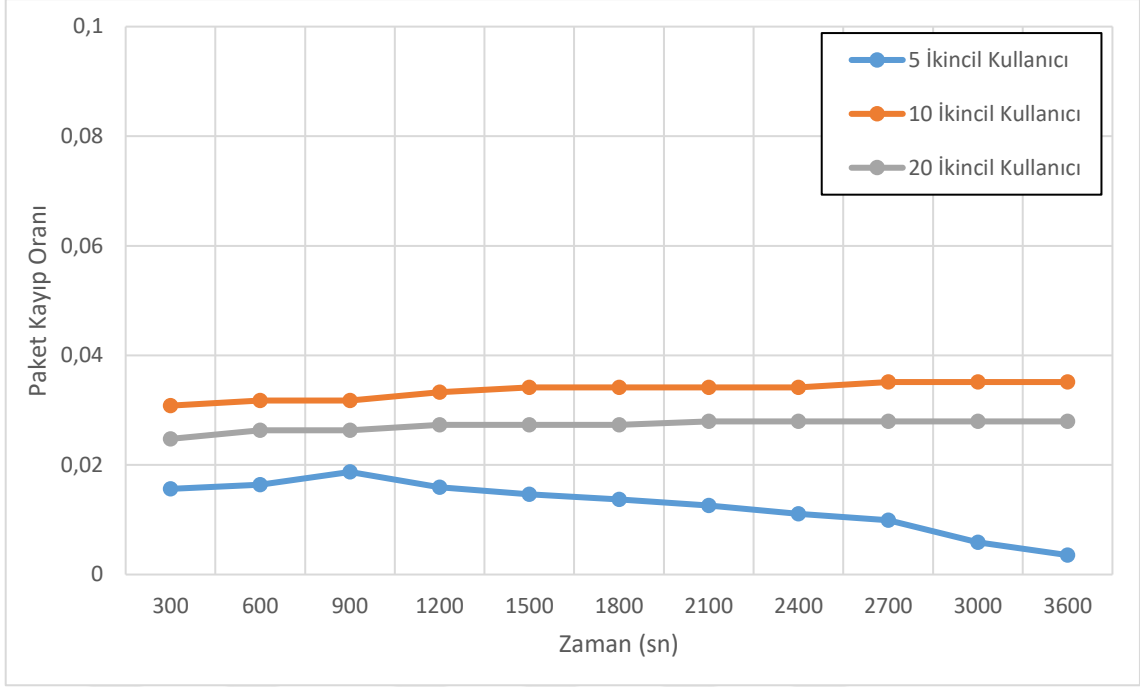
Şekil 4.7. Farklı paket boyutlarına sahip beş adet ikincil kullanıcı ile farklı sayılarda birincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil ağ gecikme analizi.

Şekil 4.8’de ortamda aynı ve normal paket boyutlarına (10Kb) sahip farklı sayıda (5, 10 ve 20) İK ve 10 adet BK olan senaryoda birincil ağ paket kayıp oranları görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere paket kayıp oranının en az olduğu durum ortamdaki İK sayısının 5 adet olduğu durumdur. İK sayısının artmasıyla birlikte paket kayıp oranlarında da artış olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu artışın çok küçük miktarlarda olduğu görülmektedir. 10 adet BK’nın olması ve İK sayısının artması birincil ağ için sorun oluşturmayacak bir seviyededir.



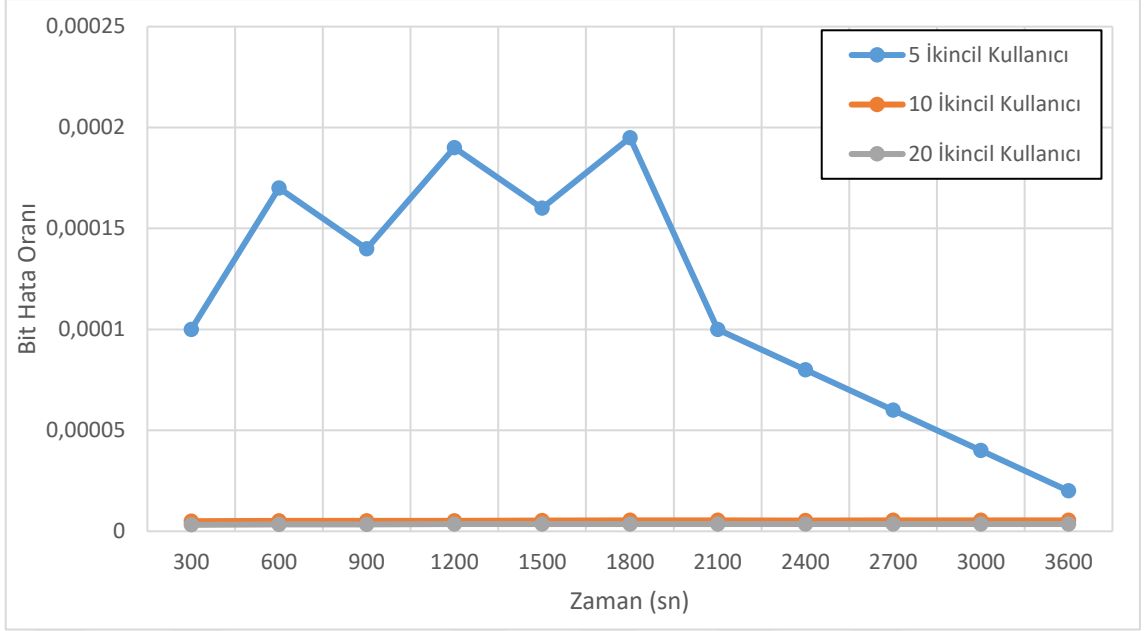
Şekil 4.8. Aynı paket boyutlarına sahip ve farklı sayılarda ikincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil ağ paket kayıp oranları.

Şekil 4.9’da ortamda farklı ve büyük paket boyutlarına sahip farklı sayıda (5, 10 ve 20) İK ve 10 adet BK olan senaryoda birincil ağ paket kayıp oranları görülmektedir. Burada iki adet İK 50Kb veri iletmeye çalışırken, diğer İK’lar ise standart olarak 10Kb veri iletimi yapmaya çalışmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere paket kayıp oranının en az olduğu durum ortamdaki İK sayısının 5 olduğu durumdur. İK sayısının artmasıyla birlikte paket kayıp oranlarında da artış olduğu gözlemlenmiştir. İK sayısının 10 olduğu durumda ise en yüksek paket kayıp oranı olduğu gözlemlenmiştir. İK sayısının 20 olduğu durumda paket kayıp oranı düşmüştür. Bunun nedeni, BR ağları için tasarlanmış olan denetleyicinin BK’ların iletimine zarar vermemek için İK’lara daha az kanal atmasıyla gerçekleşmiştir. Paket kayıp oranları incelendiğinde kullanıcı sayısının artması birincil ağ için sorun oluşturmayacak bir seviyeye olduğu görülmektedir.



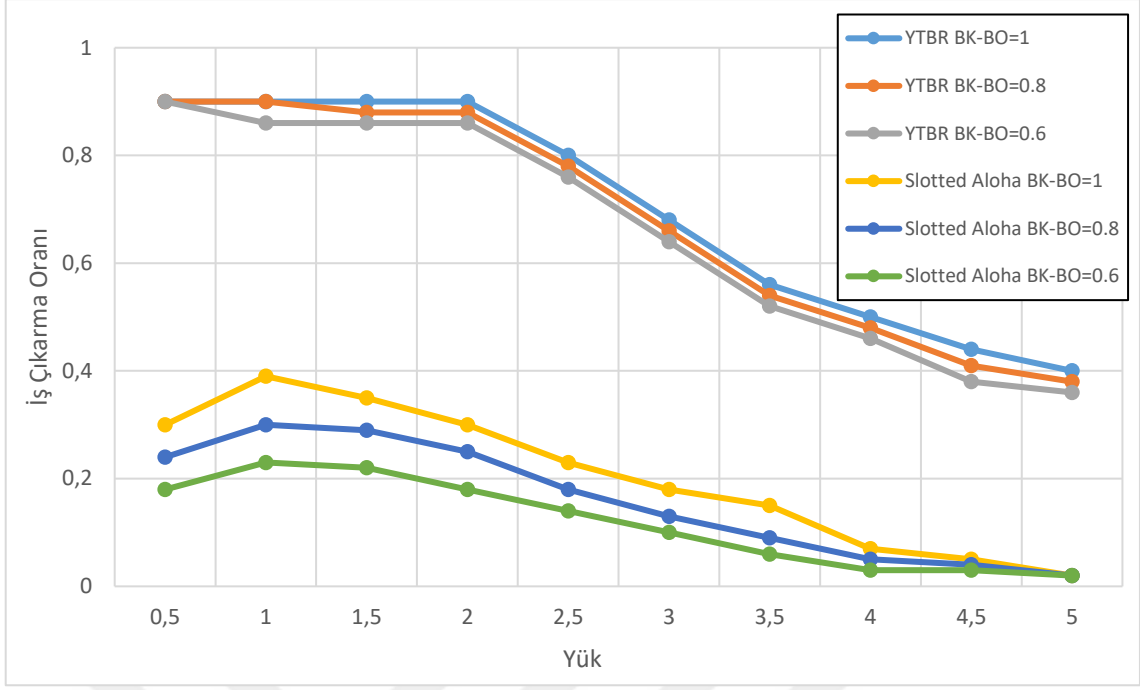
Şekil 4.9. Farklı paket boyutlarına sahip ve farklı sayılarda ikincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil ağ paket kayıp oranları.

Şekil 4.10’da ortamda farklı ve büyük paket boyutlarına sahip farklı sayıda (5, 10 ve 20) İK ve 10 adet BK olan senaryoda birincil ağ bit hata oranları görülmektedir. Burada iki adet İK 50Kb veri iletmeye çalışırken, diğer üç adet İK ise 10Kb veri iletimi yapmaya çalışmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere bit hata oranının en az olduğu durum ortamdaki İK sayısının 10 ve 20 olduğu durumlardır. İK sayısının azalmasıyla birlikte bit hata oranlarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ortamda 5 adet İK varken trafik yoğunluğunun daha fazla olmasıdır. Denetleyici BK’ların iletişimine zarar vermemek için İK sayısını sınırlı tutmaktadır. Bu durum bit hata oranlarının düşmesini sağlamaktadır. Bit hata oranları incelendiğinde kullanıcı sayısının artması birincil ağ için sorun oluşturmayacak bir seviyede olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10. Farklı paket boyutlarına sahip ve farklı sayılarda ikincil kullanıcıların olduğu durumlar için birincil bit hata oranları.

Son olarak Şekil 4.11’de önerdiğimiz YTBR ağ mimarisi ile Slotted-Aloha [27] OEK tekniğinin kullanıldığı benzer bir çalışmada BR ağ iş çıkarma oranlarının karşılaştırılmış hali gösterilmektedir. Her iki çalışmada da benzer sayıda BK ve İK olduğu varsayılan bir senaryoya dayanmaktadır. Ayrıca her iki çalışmada da BK-BO=1, BK-BO=0,8 ve BK-BO=0,6 olduğu durumlar karşılaştırılmıştır. Grafik sonuçlarına bakıldığında iş çıkarma oranına göre YTBR yaklaşımının Slotted-Aloha tekniğinin kullanıldığı çalışmaya göre her durumda daha yüksek başarımlar gösterdiği görülmektedir. Ortamı kullanmak isteyen İK’nın ortamın uygunluk durumunu, hangi kanalı kullanacağı bilgisini bir denetleyiciden alması hem birincil ağ hem de ikincil ağ ortamı için performansı artırıcı bir rol oynadığı görülmektedir. Ortamı koordine eden ve mantıksal olarak merkezi bir noktadan tüm ağın bilgisine sahip bir denetleyicinin BR ağları için olumlu bir sonuç ürettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. Karşılaştırmalı ytbr- slotted aloha bilişsel radyo ağ iş çıkarma oranları.

Riverbed Modeler benzetim yazılımında yapılan kapsamlı analizler sonucunda önerilen mimari, farklı ağ koşullarında literatürde yer alan benzer bir çalışmaya göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca önerilen mimaride, ortamdaki İK'ların sayısının artması, yük miktarlarının artması ya da farklı paket boyutlarına sahip olması hem birincil hem de ikincil ağ ortamının performansını düşürmemiştir. Ayrıca BR ağ iş çıkarma oranı Slotted-Aloha [27] OEK tekniğine nazaran çok daha verimli sonuçlar göstermiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, önerilen ağ yaklaşımı ile ilgili elde edilen sonuçlar ifade edilmiştir. Ayrıca literatürdeki benzer bir diğer çalışma ile karşılaştırılması da gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma ölçütü olarak literatürdeki çalışma esas alınarak benzer senaryo ve iş yükleri seçilmiştir. Sonrasında ise önerilen mimariye ilişkin avantaj ve dezavantajlara değinilmiş ve genel bir yargıya ulaşılmıştır. Son olarak gelecek çalışmalar için bir takım önerilerde bulunulmuştur.

5.1. DEĞERLENDİRME SONUÇLARI

Günümüzde veri merkezleri, bulut bilişim, nesnelerin interneti, 5G gibi birçok teknolojik gelişmeler hızla hayatımıza girmeye çalışırken, mevcut ağ alt yapılarının yeni gelişen teknolojilerin taleplerine cevap vermekte yetersiz kalması önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Karmaşık ve yönetilmesi zor olan günümüz ağ altyapısının birçok sorununa çözüm olmaya aday olan YTA yaklaşımı yeni ağ yaklaşımlarından biridir. YTA yaklaşımı, geleneksel ağ yapısında tümleşik halde bulunan kontrol ve veri düzlemlerinin birbirinden soyutlanması ve tüm ağın mantıksal olarak merkezi bir noktadan yönetilmesine imkân tanıyan yeni bir bakış açısı kazandırmaktadır. Günümüz teknolojilerinin dinamik taleplerine cevap verebilecek, yönetilebilir, uyarlanabilir ve daha az maliyetli olan YTA yaklaşımı, farklı ağ teknolojilerinde beklenen performans ölçütlerini karşılayabilmek adına uygun bir çözüm olduğu görülmektedir.

BR ağ teknolojileri ise yetersiz spektrum bantları ve bunların verimsiz kullanılması gibi sorunlara çözüm olması açısından büyük ilgi görmektedir. BR ağ altyapıları, özellikle doğal afetler ve olağanüstü durumlar esnasında acil iletişim ihtiyaçlarına cevap verebilecek imkânlar sunmaktadır. Bunun yanı sıra gerekli izinler sağlandığı takdirde günlük hayatta da kullanımı mümkündür. BR ağ teknolojilerinde, baz istasyonları üzerindeki aşırı yük oluşması ve taleplere cevap verememesi, servis kalite gereksinimlerinin karşılanamaması, düğümlerin baz istasyonlarına olan aşırı bağımlılığı gibi birçok sorun da çözüm beklemektedir. Bu sorunların çözümüne odaklanıldığında,

YTA yaklaşımının BR ağ teknolojilerindeki mevcut birçok sorun için çok uygun bir yaklaşım olduğu yapılan çalışmalar sonucu da görülmüştür.

Bu çalışmada, kablosuz BR ağ ortamları için YTA yaklaşımına dayalı yeni bir ağ mimarisi önerilmiştir. Bu mimari BR ağları için ağ kaynaklarının yönetim sorumluluklarını üstlenmiş, mantıksal olarak tüm ağı merkezi bir noktadan yöneten bir denetleyici ile dinamik spektrum erişim mekanizması sağlamaktadır. Bu yaklaşım ile ağ kaynaklarının yönetim sorumlulukları ağ kullanıcıları ve baz istasyonlarından alınarak bir denetleyiciye devredilmiştir. Bu sayede, ağ kullanıcılarının baz istasyonlarına olan bağımlılığı azaltılmış, baz istasyonlarının bazı iş yüklerinin de denetleyiciye devredilmesi ile ağ performansının artırılması sağlanmıştır. YTA yaklaşımı ile kaynak yönetim işlemleri herhangi bir yönetsel müdahaleye ihtiyaç duyulmadan tamamen yazılımsal gerçekleştirilmiştir.

Önerdiğimiz ağ ortamının başarımlarını analiz için Riverbed Modeler (OPNET) yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. İK'lar için farklı iş yükleri seçilmiş olup, aynı ve farklı paket boyutları için birincil ağ ve önerilen BR ağ için iş çıkarma oranları, birincil ağ uçtan uca gecikmeleri, beş adet İK olan bir ortamda birincil ağ gecikmeleri, paket kayıp oranları, bit hata oranları incelenmiştir. Ayrıca çalışmamızda, BR ağlarında kanal birleştirme tekniği de kullanılarak performansın artırılması sağlanmıştır. Önerdiğimiz mimari literatürde benzer ortam ve senaryolara sahip başka bir çalışmayla karşılaştırılmış ve iş çıkarma oranı yaklaşık %45 oranla daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda YTA yaklaşımının BR ağ teknolojisi için yüksek başarımlar sonucları verdiği görülmüştür. Bu bağlamda BR ağ teknolojisine yeni bir mimari önerilerek, daha yüksek başarımlar sonucları elde edilmiştir.

5.2. ÖNERİLER

Tezimizde YTA yaklaşımına dayalı BR ağ teknolojileri için bir mimari önerilmiştir. YTA yaklaşımı entegre edilerek bir BR ağ ortamları için bir denetleyici tasarlanmıştır. Bu denetleyiciye baz istasyonuna ait birtakım görevler devredilmiştir. Çalışmamızdan farklı olarak gelecek çalışmalarda birden fazla denetleyici ile çalışılabilir. Denetleyiciler arasındaki işbirliği için çeşitli teknikler üzerinde çalışılabilir. Kontrol düzlemindeki denetleyiciler için karar mekanizmalarında farklı yapay zekâ teknikleri kullanılabilir. İK sayısı artırılarak çeşitli ağ başarımlar parametreleri incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] S. Namal, I. Ahmad, S. Saud, M. Jokinen, and A. Gurtov, "Implementation of OpenFlow based cognitive radio network architecture: SDN&R", *Wireless Networks*, 22(2), vol. 22, no. 2, pp. 663-667, 2016.
- [2] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Fuzzy logic based channel selection for mobile secondary users in cognitive radio networks", *In Signal Processing and Communications Applications Conference*, Malatya, Türkiye, 2015, pp. 331-334.
- [3] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, and K. R. Chowdhury, "CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks", *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 5, pp. 810-836, 2009.
- [4] M. E. Bayrakdar and S. Bayrakdar, "Bilişsel radyo ağlarında gönüllü ikincil kullanıcılar için işbirlikli haberleşme yaklaşımı", *Signal Processing and Communications Applications Conference*, Malatya, Türkiye, 2015, pp. 604-607.
- [5] Y. Jararweh, M. Al-Ayyoub, A. Doulat, A. A. A. Al Aziz, H. A. B. Salameh, and A. A. Khreishah, "SD-CRN: Software defined cognitive radio network framework", in *Proceedings - IEEE International Conference on Cloud Engineering*, 2014, pp. 592-597.
- [6] M. Cicioğlu and A. Çalhan, "Yazılım tanımlı ağlar – YTA", *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 7, s. 2, ss. 684-695, 2017.
- [7] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey", *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127-2159, 2006.
- [8] A. Khattab, D. Perkins, and M. Bayoumi, *Cognitive radio networks: From theory to practice*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [9] T. Yucek and H. Arslam, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications", *Proceedings IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 805-823, 2009.
- [10] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks", *Communications Magazine IEEE*, vol. 46, no. 4, pp. 40-48, 2008.
- [11] V. M. Patil and S. R. Patil, "A survey on spectrum sensing algorithms for cognitive radio", in *International Conference on Advances in Human Machine Interaction*, 2016, pp. 149-153.
- [12] B. Wang and K. J. R. Liu, "Advances in cognitive radio networks: A survey", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, no. 1, pp. 5-23, 2011.
- [13] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios", in *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2004, pp. 772-776.
- [14] M. Thoppian, S. Venkatesan, and R. Prakash, "CSMA-Based MAC protocol for cognitive radio networks", *IEEE International Symposium a World Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 2007, pp. 1-8.

- [15] R. W. Brodersen, A. Wolisz, D. Cabric, S. M. Mishra, and D. Willkomm, "Corvus: a cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum", *Berkeley Wireless Research Center White Paper*, pp. 1–21, 2004.
- [16] J. Marinho and E. Monteiro, "Cognitive radio: survey on communication protocols, spectrum decision issues, and future research directions", *Wireless Networks*, vol. 18, no. 2. pp. 147–164, 2012.
- [17] M. E. Bayrakdar, S. Atmaca, and A. Karahan, "A slotted ALOHA-based cognitive radio network under capture effect in rayleigh fading channels", *Turkish Journal Electrical Engineering Computer Sciences*, vol. 24, no. 3, pp. 1955–1966, 2016.
- [18] C. Cormio and K. R. Chowdhury, "A survey on MAC protocols for cognitive radio networks", *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 7, pp. 1315–1329, 2009.
- [19] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Simulation model of spectrum handoff process for medium access control protocols in cognitive radio networks", in *ELECO - 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2015, pp. 1221–1225.
- [20] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Fuzzy logic based spectrum handoff decision for prioritized secondary users in cognitive radio networks", *5th International Conference on Digital Information Processing and Communications*, 2015, pp. 71–76.
- [21] A. Çalhan, "Yeni nesil gezgin haberleşme teknolojileri için yapay zeka tabanlı dikey el değiştirme yöntemi ve uygulaması," Doktora tezi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2011.
- [22] J. Mitola, "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio," Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, Kista, Sweden, 2000.
- [23] A. Chaoub, E. I. Elhaj, and J. El Abbadi, "Multimedia traffic transmission over TDMA shared cognitive radio networks with poissonian primary traffic", in *International Conference on Multimedia Computing and Systems -Proceedings*, 2011.
- [24] E. Z. Tragos, S. Zeadally, A. G. Fragkiadakis, and V. A. Siris, "Spectrum assignment in cognitive radio networks: A comprehensive survey", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1108–1135, 2013.
- [25] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Non-preemptive queueing model of spectrum handoff scheme based on prioritized data traffic in cognitive wireless networks", *ETRI Journal*, vol. 39, no. 4, pp. 558–569, 2017.
- [26] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Spectrum handoff process with aging solution for secondary users in priority based cognitive networks", in *25th Signal Processing and Communications Applications Conference*, 2017.
- [27] M. E. Bayrakdar, S. Atmaca, and A. Karahan, "A slotted Aloha based random access cognitive radio network and its performance evaluation", in *20th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, 2012.
- [28] M. E. Bayrakdar, "Bilişsel radyo ağları için yeni bir kanal kullanım iyileştirme yöntemi," Yüksek lisans tezi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2013.

- [29] Q. He, Z. Feng, and P. Zhang, "Reasoning through fuzzy logical for reconfiguration in cognitive radio network", in *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*, 2011.
- [30] M. Cesana, F. Cuomo, and E. Ekici, "Routing in cognitive radio networks: challenges and solutions", *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 3, pp. 228–248, 2011.
- [31] M. Di Felice, K. R. Chowdhury, W. Kim, A. Kassler, and L. Bononi, "End-to-end protocols for cognitive radio ad hoc networks: An evaluation study", *Performance Evaluation Journal*, vol. 68, no. 9, pp. 859–875, 2011.
- [32] P. Hu and M. Ibnkahla, "A MAC protocol with mobility support in cognitive radio ad hoc networks: Protocol design and analysis", *Ad Hoc Networks*, vol. 17, pp. 114–128, 2014.
- [33] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and N. Sai Shankar, "IEEE 802.22: The first worldwide wireless standard based on cognitive radios", in *1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, 2005, pp. 328–337.
- [34] N. Han, S. Shon, J. H. Chung, and J. M. Kim, "Spectral correlation based signal detection method for spectrum sensing in IEEE 802.22 WRAN systems", *8th International Conference Advanced Commun Technologies*, 2006.
- [35] C. I. Badoi, N. Prasad, V. Croitoru, and R. Prasad, "5G Based on cognitive radio", *Wireless Personal Communications*, vol. 57, no. 3, pp. 441–464, 2011.
- [36] P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu, and J. Yao, "5G on the horizon: Key challenges for the radio-access network", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 47–53, 2013.
- [37] R. Zhang and Y. C. Liang, "Exploiting multi-antennas for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 2, no. 1, pp. 88–102, 2008.
- [38] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs", *Communications Magazine IEEE*, vol. 46, no. 4, pp. 32–39, 2008.
- [39] A. D. Domenico, E. C. Strinati, and M. G. D. Benedetto, "A survey on MAC strategies for cognitive radio networks", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 14, no. 1, pp. 21–44, 2012.
- [40] M. Nekovee, "Cognitive radio access to TV white spaces: Spectrum opportunities, commercial applications and remaining technology challenges", in *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum*, 2010.
- [41] S. Joshi, P. Pawelczak, D. Cabric, and J. Villaseñor, "Performance of channel bonding for opportunistic spectrum access networks", in *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2012, pp. 1676–1681.
- [42] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Improving spectrum handoff utilization for prioritized cognitive radio users by exploiting channel bonding with starvation mitigation", *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 71, pp. 181–191, 2017.
- [43] S. H. R. Bukhari, M. H. Rehmani, and S. Siraj, "A survey of channel bonding for wireless networks and guidelines of channel bonding for futuristic cognitive radio

- sensor networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 924–948, 2016.
- [44] M. H. Rehmani, S. Lohier, and A. Rachedi, "Channel bonding in cognitive radio wireless sensor networks", in *International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking*, 2012, pp. 72–76.
- [45] Y. Lu, H. He, J. Wang, and S. Li, "Opportunistic spectrum access with channel bonding", *4th International Conference Communications Network China*, pp. 1090–1094, 2009.
- [46] X. Liang, K. Yamamoto, and S. Yoshida, "Performance comparison between channel-bonding and multi-channel CSMA", in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2007, pp. 406–410.
- [47] F. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet switching in radio channels: Part II--The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, no. 12, pp. 1417–1433, 1975.
- [48] R. G. Gallager, "A perspective on multiaccess channels", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 31, no. 2, pp. 124–142, 1985.
- [49] X. Li, H. Liu, S. Roy, J. Zhang, P. Zhang, and C. Ghosh, "Throughput analysis for a multi-user, multi-channel ALOHA cognitive radio system", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 11, pp. 3900–3909, 2012.
- [50] S. Choe and S. K. Park, "Throughput of slotted ALOHA based Cognitive Radio MAC", in *Proceedings of the 4th International Conference on Ubiquitous Information Technologies and Applications*, 2009.
- [51] Z. Yang, Y. D. Yao, X. Li, and D. Zheng, "A TDMA-based MAC protocol with cooperative diversity", *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 6, pp. 542–544, 2010.
- [52] D. Kreutz, F. M. Ramos, P. E. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey", *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14-76, 2015.
- [53] I. F. Akyildiz, A. Lee, P. Wang, M. Luo, and W. Chou, "A roadmap for traffic engineering in SDN-OpenFlow networks", *Computer Networks*, vol. 71, pp. 1–30, 2014.
- [54] B. A. A. Nunes, M. Mendonca, X. N. Nguyen, K. Obraczka, and T. Turletti, "A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1617–1634, 2014.
- [55] T. Benson, A. Akella, and D. Maltz, "Unraveling the complexity of network management", in *6th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation*, 2009, pp. 335–348.
- [56] ONF. (2018, Jan 10). *Software-Defined Networking (SDN) Definition* [Online]. Available: <https://www.opennetworking.org/sdn-definition/>.
- [57] N. Feamster, J. Rexford, and E. Zegura, "The Road to SDN: An intellectual history of programmable networks", *ACM Sigcomm Computer Communications*, vol. 44, no. 2, pp. 87–98, 2014.

- [58] T. G. Grbac, C. M. Caba, and J. Soler, "Software Defined Networking demands on software technologies", in *38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*, 2015, pp. 457–462.
- [59] K. Kaur, J. Singh, K. Kumar, and N. S. Ghumman, "Programmable firewall using software defined networking", *IEEE INDIACom*, pp. 5–9, 2015.
- [60] A. Doria. (2018, Feb 10). *ForCES protocol specification* [Online]. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A836887&dswid=1521>.
- [61] B. Pfaff, J. Pettit, T. Koponen, E. J. Jackson, A. Zhou, J. Rajahalme, J. Gross, A. Wang, J. Stringer, P. Shelar, K. Amidon, and M. Casado, "The Design and implementation of open vSwitch", in *NSDI*, pp. 117–130, 2015.
- [62] H. Song, "Protocol-oblivious forwarding: unleash the power of SDN through a future-proof forwarding plane", *HotSDN '13*, pp. 127–132, 2013.
- [63] M. Smith, M. Dvorkin, and P. Garg. (2018, Feb 10). *OpFlex control protocol, internet engineering task force* [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/draft-smith-opflex-00>.
- [64] G. Bianchi, M. Bonola, A. Capone, and C. Cascone, "OpenState: Programming platform-independent stateful OpenFlow applications inside the switch", *Sigcomm Computer Communication Review*, vol. 44, no. 2, pp. 44–51, 2014.
- [65] A. L. Stancu, S. Halunga, A. Vulpe, G. Suci, O. Fratu, and E. C. Popovici, "A comparison between several software defined networking controllers", *12th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services*, 2015, pp. 223–226.
- [66] D. Kreutz, F. M. V. Ramos, and P. E. Verissimo, "Towards secure and dependable software-defined networks", *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14–76, 2013.
- [67] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "OpenFlow: enabling innovation in campus networks", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 2, pp. 69, 2008.
- [68] T. Chen, M. Matinmikko, X. Chen, X. Zhou, and P. Ahokangas, "Software defined mobile networks: Concept, survey, and research directions", *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 11, pp. 126–133, 2015.
- [69] F. Hu, Q. Hao, and K. Bao, "A survey on software-defined network and OpenFlow: From concept to implementation", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2181–2206, 2014.
- [70] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, and J. Turner, "Implementing an OpenFlow switch on the NetFPGA platform", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 2, pp. 69, 2009.
- [71] M. Brandt, R. Khondoker, R. Marx, and K. Bayarou, "Security analysis of software defined networking protocols OpenFlow , OF-Config and OVSDB", in *Fifth IEEE International Conference on Communications and Electronics*, 2014.
- [72] A. Csoma, B. Sonkoly, L. Csikor, F. Németh, A. Gulyas, W. Tavernier, and S. Sahhaf, "ESCAPE: Extensible service chain prototyping environment using

- Mininet, click, NETCONF and POX", *Proceedings ACM SIGCOMM Conference - Demo*, pp. 125-126, 2014.
- [73] J. Yaser, M. Al-Ayyoub, A. Doulat, A. Al Abed Al Aziz, H. A. Bany Salameh, and A. A. Khreishah, "Software defined cognitive radio network framework: design and evaluation", *International Journal of Grid and High Performance Computing.*, no. 7, pp. 17, 2015.
- [74] M. Al-Ayyoub, Y. Jararweh, A. Doulat, H. A. B. Salameh, A. A. A. Al Aziz, M. Alsmirat, and A. A. Khreishah, "Virtualization-based cognitive radio networks", *Journal of Systems and Software*, vol. 117, pp. 15–29, 2016.
- [75] M. Cicioğlu, S. Cicioğlu, and A. Çalhan, "Yazılım tanımlı bilişsel radyo ağları", *I. International Academic Research Congress*, 2016, pp. 3023–3026.
- [76] A. C. Çakir and H. Yiğit, "Spectrum sensing performance with adaptive threshold in MIMO cognitive radio", in *25th Signal Processing and Communications Applications Conference*, 2017, pp. 1–4.
- [77] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Performance analysis of sensing based spectrum handoff process for channel bonding mechanism in wireless cognitive networks", in *25th Signal Processing and Communications Applications Conference*, 2017, pp. 1-4.
- [78] SteelCentral - Riverbed (2018, Jan 10). [Online]. Available: <http://www.riverbed.com/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>.
- [79] M. E. Bayrakdar and A. Çalhan, "Performance evaluation of TDMA medium access control protocol in cognitive wireless", *Computer Science Journal of Moldova*, vol. 25, no. 1, pp. 21–43, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Seda CİCİOĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.02.1985 / ANKARA
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : sedacicioglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2018
Lisans	Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi	Kocaeli Üniversitesi	2009
Lise	Elektronik Teknolojileri	Eskişehir Yunus Emre Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	2003

MESLEKİ DENEYİM

Görev Dönemi	Unvan	Çalıştığı Kurum	Bölüm
2010 – ...	Teknik Öğretmen	Milli Eğitim Bakanlığı	Bilişim Teknolojileri
2009 – 2010	Usta Öğretici	Eskişehir Halk Eğitim Merkezi	Bilişim Teknolojileri

PROJELER

Görev Tanımı	Proje Adı	Destekleyen Kurum	Durum
Proje Araştırmacısı	Bilişsel Radyo Tabanlı Vücut Alan Ağları için Vücut Sönümlenme Etkisi ile Kanal Modellenmesi	Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri	Bitti
Proje Araştırmacısı	Bilişsel Radyo Ağlarında Yeni Bir Spektrum El Değiştirme Algoritmasının Tasarımı ve Benzetimi	Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri	Bitti

ULUSLARARASI BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN BİLDİRİLER

Yazarlar	Bildiri Başlığı	Toplantı Adı	Sayfa	Tarih, Yer
Murtaza CİCİOĞLU, Seda CİCİOĞLU, Ali ÇALHAN	Kablosuz Bilişsel Radyo Ağları için Yazılım Tanımlı Ağ Yaklaşımının Performans Analizi	26. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı	-	2-5 Mayıs 2018 İzmir, Türkiye
Murtaza CİCİOĞLU, Ali ÇALHAN, Seda CİCİOĞLU	Yazılım Tanımlı Bilişsel Radyo Ağları	I. International Academic Research Congress (INES CONGRESS)	3023-3026	3-5 Kasım 2016 Antalya, Türkiye

ULUSAL BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN BİLDİRİLER

Yazarlar	Bildiri Başlığı	Toplantı Adı	Sayfa	Tarih, Yer
Murtaza CİCİOĞLU, Seda CİCİOĞLU, İbrahim YÜCEDAĞ	Bulanık Mantık ile Çamaşır Kurutma Makinesi Modellemesi	Akademik Bilişim Konferansı (AB 2018)	-	31 Ocak-02 Şubat 2018 Karabük, Türkiye