



An analytical and simulation model for IEEE 802.11af based cognitive radio sensor networks

Burak Demirtürk^{1*}, Muhammed Enes Bayrakdar²

¹Department of Electrical-Electronics and Computer Engineering, Institute of Graduate Studies, Düzce University, 81620, Düzce, Türkiye

²Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Duzce University, 81620, Düzce, Türkiye

Highlights:

- Design of IEEE 802.11af standard for cognitive radio sensor network
- Utilization of licensed television white spectrum without any spectrum cost
- Utilization of priority classes according to the urgency conditions

Keywords:

- Cognitive Radio
- IEEE 802.11af
- Priority
- Wireless Sensor Networks

Article Info:

Research Article

Received: 08.04.2024

Accepted: 15.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1466774

Correspondence:

Author: Muhammed Enes Bayrakdar
e-mail: muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr
phone: +90 380 542 1036 / 4659

Graphical/Tabular Abstract

Figure A shows the IEEE 802.11af environment for priority-based data monitoring. The wireless network environment includes GDB, RLSS, AP, STA and 17 mobile WSDs. GDB is a database that stores allowable spectrum frequencies and operating parameters for WSDs in order to meet requirements by geographical location. RLSS is a local database containing the geographic location and operating parameters of a limited set of services. The task of RLSS is to distribute the allowed operating parameters to AP and STA. AP is an activation station connected to the geolocation database that controls the operation of the STA. The AP's tasks are to access the GDB to obtain operating frequencies and parameters, allow and control the operation of the STA, maintain and distribute the WSM. WSM contains not only a list of available white space channels but also the corresponding power limitations provided by GDB. STA is defined as a station connected to a geolocation database, controlled by an AP. STA receives the allowed spectrum frequencies and parameters from AP or RLSS as WSM.

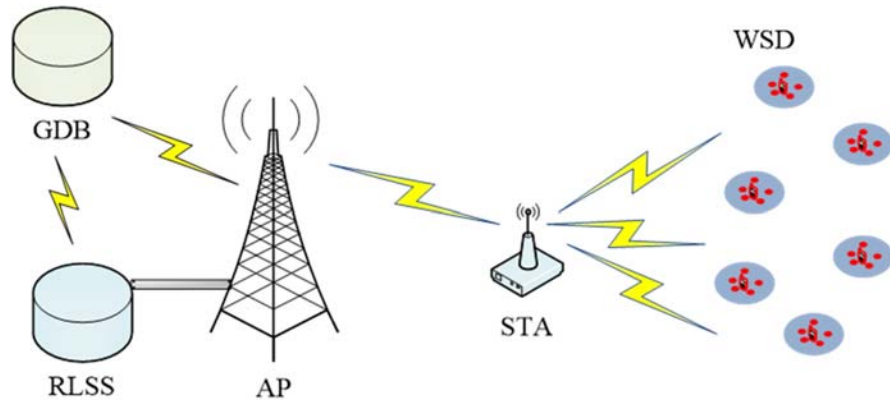


Figure A. IEEE 802.11af network structure

Purpose: The purpose of this study is to design a wireless sensor network based on IEEE 802.11af technology for data monitoring with priority classes. The goal of this work is to minimize latency and energy consumption and provide free spectrum access for priority-based data monitoring.

Theory and Methods: With the FDMA technique, packet collisions are prevented, energy consumption is minimized and efficiency is maximized. Priority information is added to the package according to priority status. Non-preemptive M/G/1 priority scheduling is used for the queuing model in the network. For packets with equal priority classes, the first-in, first-out algorithm is used. WSD forwards the packet to the STA, and the STA sends the packet to the AP.

Results: The graphical results prove the validity and feasibility of the proposed network in terms of latency (0.17 s) and energy consumption (4.7 mJ/s) without any spectrum cost for monitoring priority-based data.

Conclusion: WSD collects the data and combines it with the priority class to create a packet. The priority class is determined as red, yellow and green depending on the urgency of the data. After the analytical model of the proposed network was obtained, a simulation model of the network was realized using Riverbed Modeler.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

IEEE 802.11af tabanlı bilişsel radyo algılayıcı ağlar için bir analitik ve benzetim modeli uygulaması

Burak Demirtürk^{1*}, Muhammed Enes Bayrakdar²

¹Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 81620, Merkez, Düzce, Türkiye

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 81620, Merkez, Düzce, Türkiye

ÖNE ÇIKAN LAR

- Bilişsel radyo algılayıcı ağlar için IEEE 802.11af standardının uygulaması
- Lisanslı televizyon beyaz spektrumunun spektrum maliyeti olmadan kullanımı
- Aciliyet durumlarına göre öncelik sınıflarının kullanımı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.04.2024

Kabul: 15.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1466774

Anahtar Kelimeler:

Bilişsel radyo,
IEEE 802.11af,
öncelik,
kablolu algılayıcı ağlar

ÖZ

Bu çalışmada, öncelik sınıflarına sahip veriler için IEEE 802.11af teknolojisi tabanlı bilişsel radyo algılayıcı ağ önerilmektedir. IEEE 802.11af teknolojisi Beyaz Uzay Cihazı (WSD), İstasyon (STA) ve Erişim Noktası (AP), lisanslı hizmetlere herhangi bir zararlı müdahaleye neden olmadan, televizyon beyaz spektrumu üzerinden fırsatçı bir şekilde iletişim kurar. Önerilen ağ yapısında; WSD'ler, STA ve AP, Beyaz Uzay Haritası (WSM) tarafından belirlenen beyaz alan spektrumu üzerinden iletişim kurmak amacıyla Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (FDMA) tekniğini kullanır. WSD, çeşitli ortamlardaki sensörlerden sıcaklık, nem, basınç gibi verileri toplar. Öncelik sınıfı verinin aciliyet durumuna göre kırmızı, sarı ve yeşil olarak belirlenmiştir. Önerilen ağın analitik modeli elde edildikten sonra Riverbed Modeler kullanılarak benzetim modeli gerçekleştirilmiştir. Grafiksel sonuçlar, öncelik bazlı verilerin izlenmesi için herhangi bir spektrum maliyeti olmadan, önerilen ağın gecikme (0,17 s) ve enerji tüketimi (4,7 mJ/s) açısından geçerliliğini ve uygulanabilirliğini kanıtlamaktadır.

An analytical and simulation model for IEEE 802.11af based cognitive radio sensor networks

H I G H L I G H T S

- Implementation of IEEE 802.11af standard for cognitive radio sensor network
- Utilization of licensed television white spectrum without any spectrum cost
- Utilization of priority classes according to the urgency conditions

Article Info

Research Article

Received: 08.04.2024

Accepted: 15.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1466774

Keywords:

Cognitive radio,
IEEE 802.11af,
priority,
wireless sensor networks

ABSTRACT

In this study, a cognitive radio sensor network based on IEEE 802.11af technology is proposed for data with priority classes. In IEEE 802.11af technology, the White Space Device (WSD), Station (STA), and Access Point (AP) communicate opportunistically over the television white spectrum without causing any harmful interference to licensed services. In the proposed network structure; WSDs, STA and AP use the Frequency Division Multiple Access (FDMA) technique to communicate over the white space spectrum determined by the White Space Map (WSM). WSD collects data such as temperature, humidity, pressure from sensors in various environments. The priority class is determined as red, yellow and green depending on the urgency of the data. After the analytical model of the proposed network was obtained, the simulation model was implemented using Riverbed Modeler. The graphical results prove the validity and feasibility of the proposed network in terms of latency (0.17 s) and energy consumption (4.7 mJ/s) without any spectrum cost for monitoring priority-based data.

1. Giriş (Introduction)

Kablosuz algılayıcılar, kablosuz iletişim ve bilgi teknolojilerindeki gelişmeler, çeşitli izleme sistemlerinin hızla gelişmesine yol açmaktadır [1]. Günümüzde algılayıcılara uygun olarak tasarlanmış izleme sistemlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Uzaktan izleme sistemlerinde kullanılan izleme cihazlarının kullanımı kolay, özelleştirilebilir ve rahat bir algılama ara yüzüne sahiptir [2]. Kullanılan ara yüzler doğal ortamda sürekli uzaktan izlemeye olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, uzun süreli izleme için algılayıcı konfigürasyonunun ihtiyaçlara göre kolaylıkla özelleştirilmesi gerekmektedir. Ek olarak; bu şekilde daha huzurlu bir izleme süreci sağlanmaktadır [3]. Ayrıca, konumların adresleri veri tabanında tutulmakta olup, acil durumlarda acil müdahale hizmetleri verilmektedir.

IEEE 802.11af, TV Beyaz Alanları üzerinden Wi-Fi bağlantısı sağlayan bir kablosuz iletişim standardıdır. Düşük frekanslarda çalıştığı için 1-5 km'ye kadar geniş kapsama alanı sunar ve sinyaller engelleri daha iyi geçer [3]. Erişim Noktaları ve istasyonlar çevredeki boş spektrumu dinamik olarak kullanarak, lisanslı TV yayınlarına müdahale etmeden iletişim kurar [4]. IEEE 802.11af'in avantajları arasında daha az parazit, enerji verimliliği, fırsatçı spektrum erişimi ve daha geniş kapsama alanı yer alır. Yoğun ortamlarda ve kırsal alanlarda daha istikrarlı bağlantı sağlarken, akıllı şehir uygulamaları, nesnelerin interneti ve uzaktan izleme gibi alanlarda büyük fayda sunar [5]. Özellikle kapsama alanının kritik olduğu kırsal bölgelerde uygun maliyetli internet erişimi çözümü olarak dikkat çeker [6].

Televizyon Beyaz Boşlukları, televizyon yayınları tarafından kullanılmayan, 54 MHz ile 790 MHz arasındaki frekans bantlarını ifade eder [7]. Bu boşluklar, televizyon yayınları arasında paraziti önlemek amacıyla bırakılan koruma kanalları veya yayın yapılmayan frekans dilimleridir [8]. Düşük frekans bandında çalıştıkları için sinyaller uzun mesafelere ulaşabilir ve fiziksel engelleri kolayca geçer. Fırsatçı spektrum erişimi sayesinde lisanslı hizmetlere zarar vermeden dinamik olarak kullanılabilir [9]. Kırsal internet erişimi, akıllı şehir uygulamaları, nesnelerin interneti ve tarım teknolojileri gibi birçok alanda düşük maliyetli ve geniş kapsama alanı sağlayan yenilikçi iletişim çözümlerine olanak tanır [10].

Bu çalışmanın motivasyonu, IEEE 802.11af tabanlı bilişsel radyo algılayıcı ağlar kullanarak TV Beyaz Alanları (TVWS) spektrumunun verimli bir şekilde kullanılması ve öncelik sınıflarına sahip verilerin düşük gecikme ve enerji tüketimiyle iletilmesidir. Çalışma, sınırlı spektrum kaynaklarının daha etkin kullanılması ve kritik öncelik verilerinin optimize edilmesi amacıyla fırsatçı spektrum erişimi sunmayı hedeflemektedir. Ayrıca, Riverbed Modeller simülasyonları ile ağın geçerliliği kanıtlanmıştır. IEEE 802.11af teknolojisi, lisanslı televizyon beyaz boşluklarının fırsatçı bir şekilde hiçbir maliyet olmaksızın lisanssız kullanımını sağlayan bilişsel radyo tabanlı bir standarttır [11]. IEEE 802.11af teknolojisini kullanan beyaz alan cihazları (WSD'ler), lisanslı yerleşik hizmetlere herhangi bir müdahaleye neden olmadan coğrafi konum veri tabanı (GDB) tarafından yönetilen lisanslı televizyon spektrumundan yararlanmaktadır [12]. Lisanssız fırsatçı cihazlar olan WSD'ler için çalışma parametreleri hareketliliklerine göre (taşınabilir veya sabit) değiştirilebilmektedir [13]. GDB, izin verilen spektrum frekanslarının ve WSD'lerin coğrafi konuma ilişkin çalışma parametrelerinin saklanması açısından IEEE 802.11af teknolojisinin birincil unsurudur [14]. IEEE 802.11af teknolojisine sahip akıllı algılama cihazları sayesinde her türlü ortamda hiçbir maliyet olmadan veri takibi gerçekleştirmek büyük bir fırsattır.

Bilişsel Radyo Ağ Teknolojisi, kablosuz iletişimde spektrum verimliliğini artırmayı amaçlayan bir teknolojidir. Bu teknoloji, radyo

cihazlarının çevresindeki spektrum kullanımını algılayarak boş alanları belirli ve bu alanları fırsatçı bir şekilde kullanır [15]. Spektrum algılama, yönetimi ve paylaşımı gibi özellikleri ile mevcut frekansları dinamik olarak kullanır. Bilişsel radyo, lisanslı hizmetlere zarar vermeden boş frekansları kullanarak spektrum verimliliği, daha az parazit, gelişmiş kapsama alanı ve esneklik sağlar [16]. Özellikle 5G ve IoT gibi modern teknolojilerde sınırlı spektrum kaynaklarının verimli kullanılması için kritik bir rol oynar [17].

Bu çalışmanın hipotezi, IEEE 802.11af tabanlı bilişsel radyo algılayıcı ağların, öncelik sınıflarına göre verileri spektrum maliyeti olmaksızın etkin bir şekilde iletebilmesi ve bu ağların düşük gecikme ve enerji tüketimi açısından uygulanabilir bir çözüm sunmasıdır. Bu çalışmanın amacı, öncelik sınıfları ile veri izlemeye yönelik IEEE 802.11af teknolojisi tabanlı kablosuz algılayıcı ağ tasarlamaktır. Bu çalışmanın amacı, gecikmeyi ve enerji tüketimini en aza indirmek ve öncelik tabanlı veri izleme için ücretsiz spektrum erişimi sağlamaktır.

Bu çalışmanın ana katkıları şunlardır: (i) Veri izleme için algılayıcı ağ ve öncelik tabanlı IEEE 802.11af teknolojisi kullanılmıştır. (ii) Lisanslı televizyon beyaz spektrumundan herhangi bir spektrum maliyeti olmaksızın yararlanılmıştır. (iii) Öncelik sınıfları, durumun aciliyetine göre kırmızı, sarı ve yeşil olarak kullanılmıştır. (iv) Analitik model türetildikten sonra, Riverbed Modeller kullanılarak benzetim modeli gerçekleştirilmiştir. (v) Önerilen ağın geçerliliği ve uygulanabilirliği grafiksel sonuçlarla kanıtlanmıştır. (vi) Fırsatçı televizyon beyaz spektrumuna dayalı algılayıcı ağlar ile öncelik tabanlı veri izleme, Riverbed Modeller ile simüle edilmiştir.

2. İlgili Çalışmalar (Related Works)

Literatürde, bilişsel kablosuz algılayıcı ağlarda veri iletişimi ile ilgili pek çok araştırma bulunmaktadır. Panbude vd., bilişsel radyo kablosuz algılayıcı ağlar için dinamik bulanık tabanlı birincil kullanıcı farkındalığına sahip yeni bir yaklaşım sunmuşlardır [1]. Yaklaşımları, küme sayısını tespit etmek için dinamik bir yaklaşım, optimum küme başı seçimi için bulanık tabanlı bir algoritma ve birincil kullanıcı korumasını sağlamak için güvenilir çok atlamalı veri iletimi kullanmışlardır. Wang ve Liu, hatalı spektrum algılamanın ağ performansı üzerindeki etkisini hafifletmek için kusurlu spektrum algılama tabanlı çok atlamalı kümeleme yönlendirme protokolü önermişlerdir [2]. Küme başı ve röle seçim kriterleri, küme başarımının ve yüksek spektrum algılama özelliğine sahip rölelerin seçilmesine yardımcı olmak için mevcut kanalların algılama seviyesi işlevine göre tanımlanmıştır. Wang vd., SWIPT teknolojisini kullanan bilişsel radyo algılayıcı ağ için çok atlamalı düzensiz kümeleme yönlendirme protokolü önermişlerdir [3]. Özellikle, düğümlerdeki dinamik enerji değişimlerini doğru bir şekilde izlemek için enerji durumu fonksiyonu önermişlerdir.

Singh ve Shrestha, veri füzyonu tabanlı işbirlikçi bilişsel radyo ağ için uygulama dostu işbirlikçi spektrum algılama algoritması önermişlerdir [4]. Önerdikleri algoritma, tespit performansını düşürmeden, verimli donanım tasarımıyla sonuçlanan hesaplama karmaşıklığını hafifletmek için tasarlanmıştır. Bala vd., birincil kullanıcı emülasyon saldırısı varlığında spektrum erişim sorununun üstesinden gelmek için bilişsel radyo algılayıcı ağlar için yeni bir enerji verimli uyarlanabilir algılama tekniği önermişlerdir [5]. Önerilen teknik, kullanıcı sinyallerini farklılaştırarak algılama doğruluğunu artırmakta, algılama hatası olasılığını azaltmakta ve temel sistem modelinin enerji verimliliğini artırmaktadır. Lu vd., yeni bir kör durdurma kuralı kullanan, kör blok ortogonal en küçük kareler tabanlı işbirlikçi spektrum algılama algoritması önermişlerdir [6]. Özel olarak, karşılıklı tutarsızlık özelliğine dayalı olarak bu algoritma için hem gürültüsüz hem de gürültülü kurtarma yöntemlerini sunmuşlardır. Kumar vd., genelleştirilmiş Nakagami sönümleme

kanalları üzerinden eş zamanlı kablosuz bilgi ve güç aktarımı etkin işbirlikçi bilişsel radyo algılayıcı ağ performansı sunmuşlardır [7]. Bunun için, bir zaman değiştirme protokolü kullanılarak enerji hasadı, bilgi iletimi, bilgi işleme ve yayınlama aşamaları üzerindeki etki faktörü dikkate alınmıştır.

Raghavendra vd. spektrum algılamanın önemli yönüne odaklanarak, bilişsel radyo kablosuz algılayıcı ağlar için uyarlanmış bir enerji optimizasyon tekniği sunmuşlardır [8]. Önerilen teknikte, bir birincil algılayıcı ve bir ikincil algılayıcı içeren iki aşamalı bir algılama stratejisi kullanılmıştır. Zhang vd., raporlama süresini ve bilişsel kablosuz algılayıcı ağların verimini optimize etmek için seçici raporlama, çok bitli niceleme, veri birleştirme ve dinamik parametrelerden oluşan etkili bir işbirlikçi spektrum algılama algoritması önermişlerdir [9]. Öncelikle algılayıcı düğümler seçici raporlama yoluyla gerekli bazı gözlemleri rapor etmektedirler, daha sonra yerel gözlemleri çok bitli ikili kodlarla kodlayarak füzyon merkezine göndermektedirler. Babu vd., birden fazla rastgele ikincil kullanıcı ve birincil kullanıcı uygulaması için algoritma sunmuşlardır [10]. Önerdikleri algoritma, mevcut optimizasyon algoritmalarına kıyasla çok kullanıcılu kümelenmiş iletişimi birleştirerek yakınsama hızını artırmıştır.

IEEE 802.11af teknolojisi ile ilgili sınırlı sayıda makale bulunmaktadır. Flores vd. lisanssız beyaz alan cihazları ve televizyon beyaz alan bandındaki lisanslı hizmetler arasında spektrum paylaşımına yönelik uluslararası özellikleri tanımlayan IEEE 802.11af standardını sunmuşlardır [11]. Cheang vd. IEEE 802.11af kablosuz yerel alan ağı tamamlayıcı metal oksit yarı iletken verici için yeni bir bileşik bozulma telafisi dijital ön-bozucu önermişlerdir [12]. Un vd. IEEE 802.11af kablosuz yerel alan ağıyla uyumlu çok sınıflı doğrusal duruma getirilmiş güç yükselticene sahip kablosuz verici tanımlamışlardır [13]. Matsumura vd. kompakt, düşük güç tüketimine sahip ve düşük maliyetli televizyon beyaz alan aygıtlarına olarak tanıyan dünyanın ilk IEEE 802.11af tabanlı devre prototipini sunmuşlardır [14]. Yukarıda bahsedilen makalelerin hiçbirisi, bilişsel radyo algılayıcı ağlarda veri izleme alanında herhangi bir maliyet olmaksızın televizyon beyaz alan spektrumundan yararlanmak için mükemmel bir fırsat olan IEEE 802.11af teknolojisini dikkate almamaktadır.

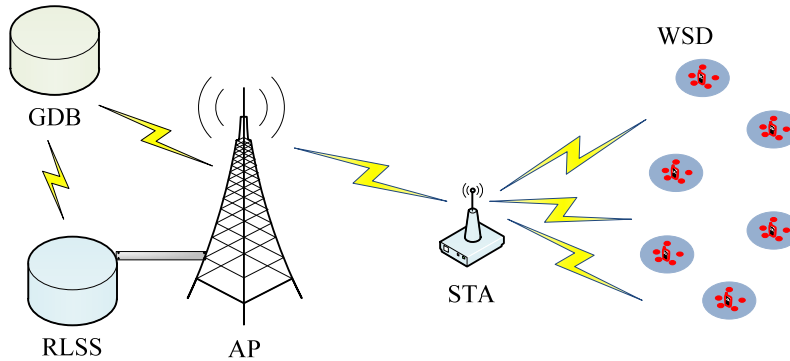
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

IEEE 802.22 ve IEEE 802.11af, her ikisi de Televizyon Beyaz Alanları spektrumunu kullanan kablosuz iletişim standartlarıdır, ancak farklı amaçlara hizmet etmektedirler. IEEE 802.22, kırsal ve düşük nüfus yoğunluklu bölgelerde Kablosuz Bölgesel Alan Ağı sunarak geniş kapsama alanı (100 km'ye kadar) ve düşük veri hızı (22 Mbps) ile internet erişimi sağlamaktadır. Buna karşın, IEEE 802.11af,

yoğun nüfuslu kentsel bölgelerde Wi-Fi tabanlı Kablosuz Yerel Alan Ağı hizmeti sunar ve 1-5 km kapsama alanı ile 600 Mbps'ye kadar veri hızlarına ulaşabilmektedir. IEEE 802.22 daha çok kırsal internet erişimi için tasarlanırken, IEEE 802.11af, akıllı şehirler, IoT uygulamaları ve yüksek hızlı internet bağlantıları için uygundur. İki teknoloji de fırsatçı spektrum erişimi sayesinde lisanslı hizmetlere müdahale etmeden spektrumunu dinamik olarak kullanır, farklı kullanım senaryolarında birbirini tamamlamaktadırlar.

Bu çalışmada, önceliğe dayalı veri izleme için televizyon beyaz boşluklarının fırsatçı bir şekilde kullanılması amacıyla IEEE 802.11af standardı kullanılmıştır. IEEE 802.11af standardı sayesinde, yerleşik hizmet yelpazesinden hiçbir ücret ödmeden yararlanmak mümkündür. IEEE 802.11af teknolojisindeki düzenleyici etki alanları ve belirtilen kullanılabilir spektrum tahsisinin yardımıyla, WSD'lerin korunan yerleşik hizmetlere müdahale etmesine izin verilmemektedir. Bu çalışmanın işlemsel karmaşıklığı, spektrum algılama, frekansta kaynak tahsis ve öncelik sınıflarına göre veri yönetimi gibi süreçlerin birleşiminden kaynaklanmaktadır. Beyaz alan spektrumunun dinamik olarak yönetilmesi, FDMA tekniğiyle frekans bölünmesi ve öncelik sınıflandırması gerektiren işlemler, ağı verimli çalışması için karmaşık hesaplamalar ve yüksek işlem gücü gerektirir. Ayrıca, ağı performansını analiz etmek için kullanılan Riverbed Modeller simülasyonu, bu karmaşıklığı artıran bir diğer faktördür.

Şekil 1'de önceliğe dayalı veri izlemeye yönelik IEEE 802.11af ortamı gösterilmektedir. Kablosuz ağ ortamında GDB, kayıtlı konum güvenli sunucu (RLSS), erişim noktası (AP), istasyon (STA) ve 17 adet mobil WSD bulunmaktadır. GDB, coğrafi konuma göre düzenlilik gereksinimlerini karşılamak amacıyla WSD'ler için izin verilen spektrum frekanslarını ve çalışma parametrelerini saklayan bir veri tabanıdır. RLSS, sınırlı sayıda hizmet kümesinin coğrafi konumunu ve işletim parametrelerini içeren yerel bir veri tabanıdır. RLSS'nin görevi izin verilen çalışma parametrelerini AP ve STA'ya dağıtmaktır. AP, STA'nın çalışmasını kontrol eden, coğrafi konum veri tabanına bağlı bir etkinleştirme istasyonudur. AP'nin görevleri, çalışma frekanslarını ve parametrelerini elde etmek için GDB'ye erişmek, STA'nın çalışmasına izin vermek ve kontrol etmek, beyaz alan haritasının (WSM) bakımını ve dağıtımını sağlamaktır. WSM yalnızca mevcut beyaz alan kanallarının bir listesini değil aynı zamanda GDB tarafından sağlanan ilgili güç sınırlamalarını da içermektedir. RLSS ile AP arasında altyapı tabanlı kablolu iletişim bulunmaktadır. RLSS ve GDB arasında doğrudan kablosuz iletişim vardır. AP ve GDB arasında doğrudan kablosuz iletişim vardır. AP, STA ve WSD'ler arasında, kablosuz iletişim vardır. STA, AP tarafından kontrol edilen, coğrafi konum veri tabanına bağlı bir istasyon olarak tanımlanmaktadır. STA, izin verilen spektrum frekanslarını ve parametrelerini WSM olarak AP veya RLSS'den almaktadır.



Şekil 1. IEEE 802.11af ağ yapısı (IEEE 802.11af network structure)

Önerilen ağ yapısında, algılayıcı cihazlar kapalı ortamda veya açık ortamda bulunabilir. Sıcaklık sensörü sıcaklığı algılar. Nem sensörü nemi algılar. Basınç sensörü basıncı algılar. Sensörler yardımıyla algılanabilecek başka veriler de olabilir. WSD, algılanan tüm verileri sensörlerden toplamaktadır. Toplanan veriler yetkililer tarafından izlenecek herhangi bir çevrimiçi cihaza iletilmektedir.

3.1. Kanal Yönetimi (Channel Management)

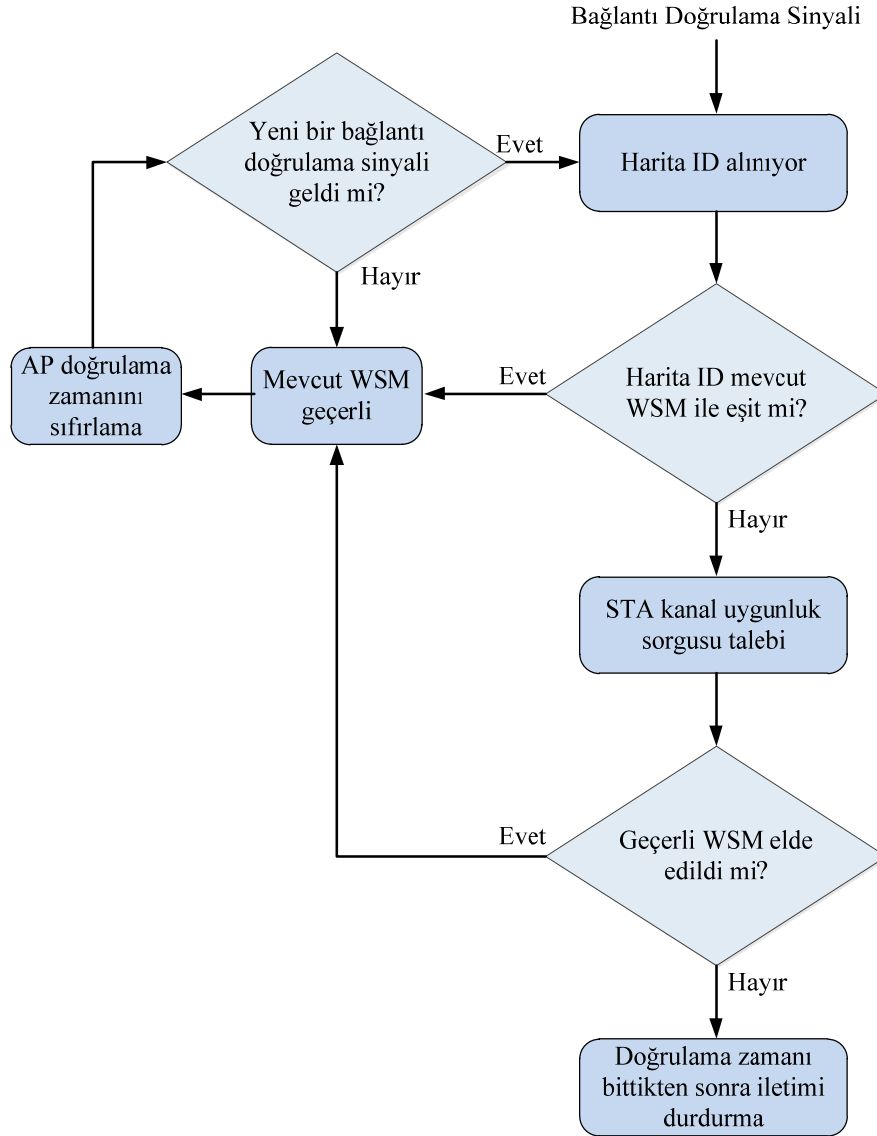
STA, kanal kullanılabilirliği sorgusu aracılığıyla mevcut konumundaki kullanılabilir spektrum frekanslarını WSM biçiminde elde etmektedir. Kanal kullanılabilirliği bilgisi doğrudan RLSS aracılığıyla veya GDB'den STA'ya erişilerek verilmektedir. Ağ yapısında kanal kullanılabilirliği sorgusu istemenin farklı durumları vardır. STA aşağıdaki durumlarda kanal müsaitlik sorgulaması talep edebilir; (i) zaman aşımından sonra etkinleştirme durumunda kalan STA talebi, (ii) AP tarafından gösterilen kanal kullanılabilirliği değişikliği, (iii) STA'nın izin verilen mesafenin ötesine taşınması. AP, beyaz boşluk kanal bilgilerini elde etmek için kanal program yönetimini kullanmaktadır. AP, mevcut televizyon veya kablosuz

yerel alan ağı beyaz alan kanallarını öğrenmek amacıyla RLSS'den kanal program yönetimi talebinde bulunduğundan, STA kanal program yönetimi talep etmemektedir.

3.2. Bağlantı Doğrulama Sinyali (Contact Verification Signal)

Bağlantı doğrulama sinyali AP tarafından iki amaçla iletilmektedir; (i) AP'nin kapsama alanı dahilinde yeni bir STA'nın keşfedilmesi, (ii) STA'nın geçerli bir WSM altında çalışmasının sağlanması.

Şekil 2'de, bağlantı doğrulama sinyalinin akış şeması gösterilmektedir. Öncelikle bağlantı doğrulama sinyalinin harita ID'si elde edilmektedir. Harita kimliğinin mevcut WSM'ye eşit olup olmadığı kontrol edilmektedir. Harita kimliği mevcut WSM'ye eşitse bu, çalışan WSM'nin geçerli olduğu ve AP'nin zaman aşımından sonra doğrulama zamanlayıcısını sıfırladığı anlamına gelmektedir. Daha sonra, yeni bağlantı doğrulama sinyalinin gelip gelmediği kontrol edilmektedir. Yeni sinyal gelmezse, çalışan WSM'nin hala geçerli olduğu anlamına gelmektedir. Yeni sinyalin gelmesi durumunda mevcut WSM'nin güncellenmesi amacıyla sinyalin harita



Şekil 2. CVS çalışma prensibi (CVS working principle)

ID'si alınmaktadır. Harita kimliği mevcut WSM'ye eşit değilse STA, kanal kullanılabilirliği sorgusunu istemektedir. Yeni bir sorgu ile geçerli WSM alınmazsa doğrulama süresi dolduktan sonra iletim durdurulmaktadır. Yeni bir sorgu ile geçerli WSM elde edilirse, çalışan WSM'nin geçerli olduğu ve beyaz alan spektrumunun kullanılabileceği anlamına gelmektedir.

3.3. Konum Veritabanı Bağımlılığı (Geo-Location Database Dependency)

Coğrafi konum veri tabanı bağımlılığı (GDD) etkinleştirme süreci, AP'nin GDB'nin kontrolü altında düzenleyici gerekliliklere göre bir ağ oluşturmaya izin vermektedir. GDD etkinleştirme hizmetini sağlamak için bir AP tarafından mevcut televizyon beyaz alan kanallarına bir işaret sinyali gönderilmektedir. STA, GDD etkinleştirme sinyalini aldıktan sonra GDD etkinleştirme yanıt çerçevesi ile etkinleştirme sürecini başlatmaktadır.

STA'nın çeşitli etkinleştirme durumları vardır; bunlar etkinleştirilmemiş, deniyor ve etkindir. Etkinleştirilmemiş durumda, STA, ağa katılmak amacıyla bir AP'den gelen etkinleştirme sinyali için beyaz alan kanallarını pasif olarak taramaktadır. STA, etkinleştirilmemiş durumda herhangi bir çerçeve gönderememektedir. Deneme durumunda, STA GDD'yi etkinleştirmeyi denemektedir. STA, GDD etkinleştirme sinyalini aldığı anda deneme durumuna

girmektedir. Etkin durumda, STA başarılı bir GDD etkinleştirme yanıtı olarak ağa katılmayı başarmaktadır.

3.4. IEEE 802.11af tabanlı Bilişsel Radyo Algılayıcı Ağ (IEEE 802.11af based Cognitive Radio Sensor Network)

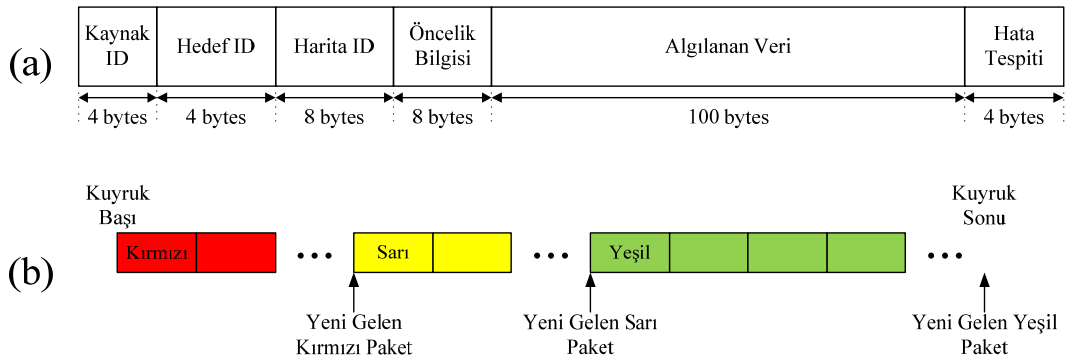
Önerilen IEEE 802.11af tabanlı kablosuz algılayıcı ağ, herhangi bir spektrum maliyeti olmaksızın öncelik bazlı veri izleme yapılabilmesi amacıyla uygulanmıştır. Bu kapsamda, WSD, STA ve AP'nin analitik modelleri hesaplanmıştır.

Tablo 1'de, önerilen algılayıcı ağ modelinin simülasyon parametreleri sunulmaktadır [18]. Bazı simülasyon parametreleri çift yönlü olduğundan tüm parametreler parantez içinde belirtildiği gibi ayrı olarak tanımlanmıştır.

Şekil 3(a)'da paket yapısı gösterilmektedir. Bir paketin toplam boyutu, kaynak kimliği, hedef kimliği, harita kimliği, öncelik bilgileri, algılanan veriler ve hata tespiti dahil olmak üzere 128 bayttan oluşmaktadır. Harita kimliği ilgili WSM'yi göstermektedir. Öncelik bilgisi ilgili algılayıcının öncelik sınıfını tutmaktadır. İlgili algılayıcının önceliği, aciliyet durumuna göre yeşil, sarı ve kırmızı olmaktadır. Kırmızı en yüksek önceliğe ve yeşilin en düşük önceliğe sahiptir. Algılanan veriler sıcaklık, basınç, nem vb. verilerden oluşmaktadır.

Tablo 1. Simülasyon parametreleri (Simulation parameters)

Parametre	Değer
Kayıp (10 mm - Kapalı Ortam)	10 dB
Bant Genişliği (Kapalı Ortam)	300 KHz
Frekans Bandı (Kapalı Ortam)	402 MHz - 405 MHz
Maksimum kapsama mesafesi	250 m
Yol Kaybı Katsayısı	4
Sinyal Gürültü Oranı	8 dB
İletim Gücü	40 mw
Frekans Bandı	2437 MHz
Bant Genişliği	20 MHz
Veri Oranı (Giden Bağlantı)	200 Kbps
Veri Oranı (Gelen Bağlantı)	1000 Kbps
AP, STA, WSDs Sayıları	1, 1, 17
Modülasyon Şeması	QPSK
Veri Paketi Boyutu	128 Byte
Ağ Alanı	200 m x 200 m



Şekil 3. Paket organizasyonu (a) ve kuyruk yapısı (b) (Packet organization (a) and queue structure (b))

Şekil 3(b)'de önceliğe dayalı kuyruk organizasyonu gösterilmektedir. Kırmızı, sarı ve yeşil paketler sırasıyla önceliğe göre işlem görmektedir. Yeni gelen kırmızı paket tüm kırmızı paketlerin en sonuna, yeni gelen sarı paket sarı paketlerin en sonuna ve yeni gelen yeşil paket de yeşil paketlerin en sonuna yerleştirilmektedir.

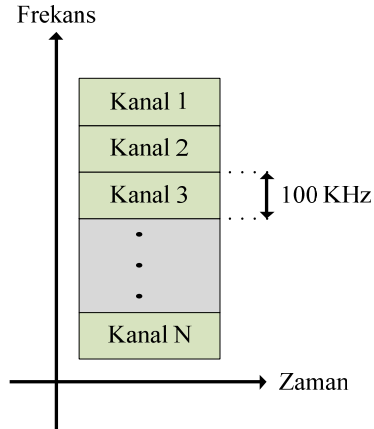
3.5. Öncelik tabanlı Bilişsel Radyo Algılayıcı Ağ Tasarımı (Design of Priority based Cognitive Radio Sensor Network)

Önerilen öncelik tabanlı kablosuz algılayıcı ağ yapısında; IEEE 802.11af teknolojisine göre kendi aralarında FDMA tekniğini kullanarak haberleşen algılayıcı cihazlar, WSD'ler, STA ve AP bulunmaktadır. FDMA çekişmesiz bir teknik olduğundan, çarpışan paketlerden kaynaklanan gecikmeler meydana gelmez. FDMA tekniği ile paket çarpışmaları önlenerek enerji tüketimi en aza indirilmekte ve verim en üst düzeye çıkarılmaktadır. WSD, algılayıcı cihazların algıladığı verileri toplamaktadır. Öncelik durumlarına göre öncelik bilgisi pakete eklenmektedir. Ağdaki kuyruk modeli için engelsiz M/G/1 öncelik planlaması kullanılmaktadır. Eşit öncelik sınıflarına sahip paketler için ilk giren ilk çıkar algoritması kullanılmaktadır. WSD, paketi STA'ya iletmekte ve STA, paketi AP'ye göndermektedir. AP tarafından alınan tüm veriler yetkililer tarafından herhangi bir çevrimiçi cihazdan izlenebilmektedir.

Tablo 2. Öncelik sınıfları (Priority classes)

Öncelik	Tanım
1. Kırmızı	Yüksek seviyede öncelikli paket
2. Sarı	Orta seviyede öncelikli paket
3. Yeşil	Düşük seviyede öncelikli paket

Tablo 2'de; kırmızının birinci öncelik, sarının ikinci öncelik ve yeşilin üçüncü öncelik olduğu algılayıcıların aciliyet durumlarına göre öncelik planlaması verilmektedir.



Şekil 4. FDMA protokolü (FDMA protocol)

Şekil 4'te kanal genişliğinin 100 KHz'e eşit olduğu FDMA çerçeve yapısı gösterilmektedir. FDMA tekniği frekans spektrumunu kanallara böldüğü için; AP, STA ve WSD'ler herhangi bir kanalda herhangi bir çarpışma olmadan yalnızca iletim veya alım yapabilmektedir. FDMA tekniğinde her paketin servis süresi Eş. 1'de ifade edilmektedir.

$$T = \frac{MP}{R} \quad (1)$$

T hizmet süresi, M WSD sayısı, P paket uzunluğu ve R veri hızıdır. Sunulan yük ve T, bir çerçevedeki tüm başarılı iletimlerin zaman

dilimi süresidir. FDMA tekniğinin tam yükü Eş. 2'de hesaplanmaktadır.

$$G = \lambda T \quad (2)$$

G tam yük ve T servis süresidir. WSD, Poisson sürecine göre λ hızıyla paket üretmektedir. FDMA tekniğinin performans denklemi Eş. 3'te elde edilmektedir.

$$S = GM \quad (3)$$

S, performans, G, tam yük ve M, etkin WSD'lerin toplam sayısıdır. FDMA çekişmesiz bir teknik olduğundan, bir aktarım başka herhangi bir aktarım tarafından engellenmemektedir. Her WSD için M/G/1 kuyruk sistemi kullanılarak bir paketin beklenen gecikmesi (D) Eş. 4'te elde edilmektedir.

$$D = \frac{2T(1 - \lambda T) + (\lambda T^2)}{2(1 - \lambda T)} \quad (4)$$

G yerine λT konulursa, bir paketin beklenen gecikmesi Eş. 5'te tanımlanmaktadır.

$$D = \frac{T(2 - G)}{2(1 - G)} \quad (5)$$

G yerine S/M kullanıldığında, bir paketin beklenen gecikmesi Eş. 6'da ifade edilmektedir.

$$D = \frac{T}{2} \left(1 + \frac{M}{M - S} \right) \quad (6)$$

Sabit paket boyutu için FDMA tekniğinin istenen verim - beklenen gecikme özellikleri elde edilmektedir.

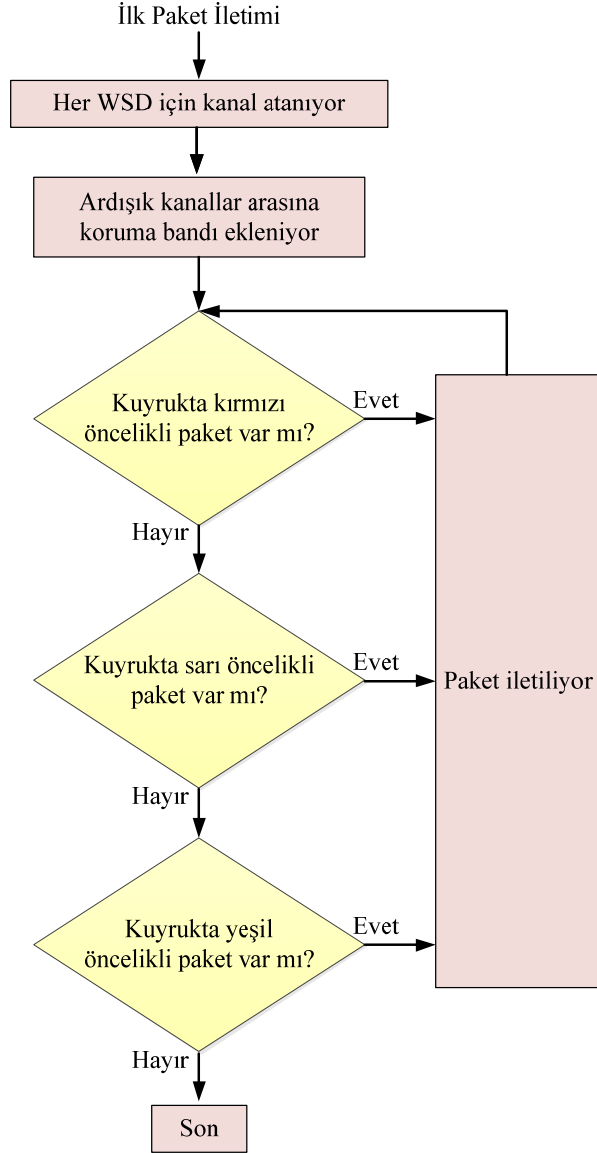
Şekil 5'te öncelik bazlı FDMA tekniğinin akış diyagramı gösterilmektedir. İlk paket aktarımına başlamadan önce her WSD'ye kanallar atanmaktadır. Atama sonrasında ardışık kanallar arasına koruma bandı eklenmektedir. Kuyrukta kırmızı öncelikli paket olup olmadığı kontrol edilmektedir. Kırmızı öncelikli paket varsa iletilmektedir. Kırmızı öncelikli paket yoksa sarı öncelikli paket olup olmadığı kontrol edilmektedir. Sarı öncelikli paket varsa iletilmektedir. Sarı öncelikli paket yoksa yeşil öncelikli paket için de aynı süreç uygulanmaktadır. Bu işlem tüm paketler gönderilene kadar devam etmektedir.

3.6. Benzetim Modeli Kurulumu (Simulation Model Setup)

Genel ağ modeli Riverbed yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir [19]. Riverbed Modeler, ağ performansı ve davranışını simüle etmek, analiz etmek ve optimize etmek için kullanılan bir ağ simülasyon yazılımıdır. Özellikle ağ tasarımı, protokol testleri, trafik analizi ve performans değerlendirme çalışmalarında tercih edilmektedir. Riverbed Modeler, farklı ağ protokollerini destekleyerek kablosuz ağlar, bilişsel radyo ağları ve IoT gibi modern iletişim teknolojilerinin simülasyonlarını yapma imkânı sunar. Kullanıcılar, ağ topolojileri oluşturarak bant genişliği, gecikme, paket kaybı ve enerji tüketimi gibi parametreleri detaylı şekilde inceleyebilir. Yazılım, mühendislik projeleri, akademik çalışmalar ve ağ yönetimi alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir ağ modelinin performans değerlendirmesi, Riverbed yazılımındaki ayrık olay simülasyonları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kablosuz algılayıcı ağı konfigürasyonu üç aşamada gerçekleştirilmektedir; bunlar ağ, düğüm ve işlem

modelleridir. Kablosuz algılayıcı ağı topolojisi ağ aşamasında düzenlenmiştir. Düğüm aşaması, düğümün davranışını tanımlamaktadır ve düğümün farklı bir bölümünde akan paketleri izlemektedir. İşlem aşaması durum makineleri ile karakterize edilmektedir. Durum makineleri, durumlarla ve durumlar arasındaki geçişlerle birlikte kullanılmaktadır. Riverbed simülasyon yazılımında Proto C programlama dili kullanılmaktadır.



Şekil 5. Öncelik tabanlı FDMA (FDMA with priority)

Şekil 6(a)'da Riverbed simülasyon yazılımındaki bir STA'nın düğüm ve süreç modeli gösterilmektedir. Başlangıç durumunda tüm değişkenler tanımlandıktan sonra ilk değerler atanmaktadır. Boş durumda, yeni olayın oluşması için bir kesme beklenmektedir. Etkinleştirme durumunda, GDD etkinleştirme sinyali alındıktan sonra GDD etkinleştirme işlemi başlatılmaktadır. Alma durumunda paketler WSD'den FDMA tekniğine göre alınmaktadır. İletim durumunda, WSD'lerden alınan paketler, FDMA tekniğindeki kanal planlamasına göre AP'ye iletilmektedir. Şekil 6(b)'de Riverbed simülasyon yazılımındaki bir WSD'nin düğüm ve süreç modeli gösterilmektedir. Başlangıç durumunda tüm değişkenler tanımlandıktan sonra ilk değerler atanmaktadır. Boş durumda, yeni olayın oluşması için bir

kesme beklenmektedir. Veri toplama aşamasında; algılayıcı cihazlardan sıcaklık, basınç gibi veriler toplanmaktadır. Kuyruk durumunda, toplanan veriler ve öncelik bilgileri paketler halinde kuyruğa iletilmektedir. İletim durumunda, kuyrukta bekleyen paketler FDMA tekniğindeki kanal planlamasına göre STA'ya iletilmektedir.

Şekil 7'de, Riverbed simülasyon yazılımındaki bir AP'nin düğüm ve süreç modeli gösterilmektedir. Başlangıç durumunda tüm değişkenler tanımlandıktan sonra ilk değerler atanmaktadır. Boş durumda, yeni olayın oluşması için bir kesme beklenmektedir. Kanal yönetimi durumunda, beyaz boşluk kanal bilgileri RLSS ve GDB yardımıyla elde edilmektedir. CVS durumunda; CVS, yalnızca kapsama alanı içindeki STA'nın keşfedilmesi için değil aynı zamanda STA'nın geçerli bir WSM altında çalışmasının sağlanması için de iletilmektedir. Kuyruk durumunda toplanan tüm bilgiler öncelik sınıflarına göre paketler halinde kuyruğa alınmaktadır. Alma durumundaki paketler, FDMA tekniğindeki kanal planlamasına göre STA'lerden alınmaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

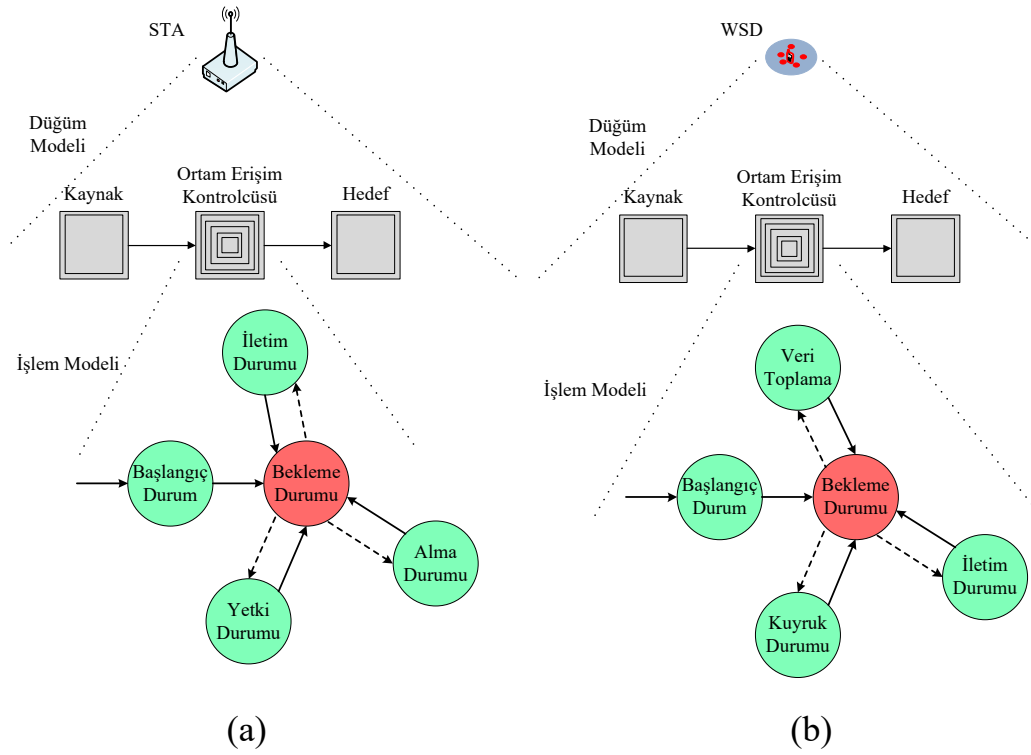
Önerilen ağı performansını değerlendirmek amacıyla; bit hata oranı, paket hata oranı, paket kayıp oranı, performans – gecikme karakteristiği, yol kaybı, ortalama gecikme, spektrum kullanımı ve enerji tüketimi parametreleri kullanılmıştır.

Şekil 8'de, açık ortam ve kapalı ortam iletişimine yönelik sinyal-gürültü oranına göre bit hata oranı sonuçları gösterilmektedir. Bit hata oranı, belirli bir zaman aralığı boyunca bit hatalarının sayısının aktarılan bitlerin toplam sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir. Bit hata oranının mümkün olduğunca azaltılması ağ performansı açısından önemlidir. Açık ortamdaki algılayıcılar, eşit sinyal/gürültü oranı açısından kapalı ortamdaki algılayıcılardan daha iyi bit hata oranına sahiptir. Bunun nedeni, kapalı ortamdaki algılayıcıların sönmeme etkisine, sıcaklığa vb. maruz kalmasıdır.

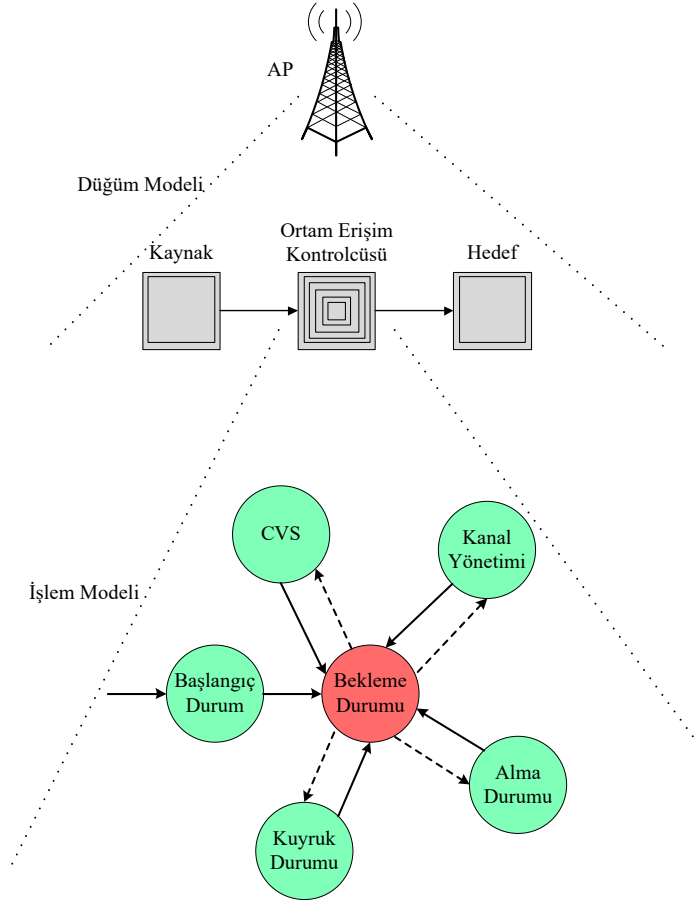
Şekil 9'da, açık ve kapalı ortamdaki algılayıcıların iletişimine yönelik sinyal-gürültü oranına göre paket hata oranı sonuçları gösterilmektedir. Paket hata oranı, belirli bir zaman aralığında hatalı paket sayısının aktarılan paketlerin toplam sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir. Paket hata oranının mümkün olduğunca azaltılması ağ performansı açısından önemlidir. Kapalı ortamdaki algılayıcılar, 6 dB'ye kadar eşit sinyal/gürültü oranı açısından açık ortamdaki algılayıcılardan daha kötü paket hata oranına sahiptir. Bunun nedeni kapalı ortamdaki algılayıcıların zayıflama etkisine, sıcaklığa vb. maruz kalmasıdır. Kapalı ve açık ortamdaki algılayıcılar, 6 dB'den sonra eşit paket hata oranına sahiptir.

Şekil 10'da, açık ve kapalı ortamdaki düğüm sayısına göre paket kaybı oranı sonuçları gösterilmektedir. Paket kaybı, ağdaki bir veya daha fazla paketin hedeflerine ulaşamaması durumunda meydana gelmektedir. Paket kaybı oranı, kayıp paket sayısının gönderilen toplam paket sayısına oranını temsil etmektedir. Paket kaybı oranının mümkün olduğu kadar azaltılması ağ performansı açısından önemlidir. Açık ve kapalı ortamdaki algılayıcılar, artan sayıda aktif algılayıcı düğümler için yaklaşık olarak aynı paket kaybı oranına sahiptir.

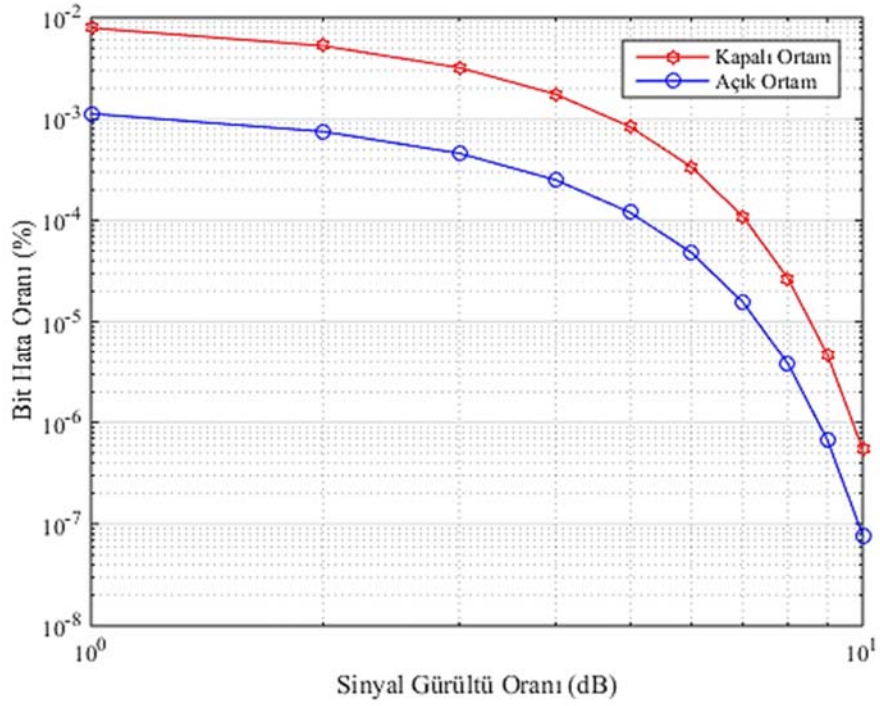
Şekil 11'de, WSD'ler için performans – gecikme karakteristiği ile WSD sayısının iki katına çıkarıldığı performans eğrisi gösterilmektedir. Ortalama gecikme, bir veri bitinin ağ üzerinde bir noktadan diğerine gitmesinin ne kadar süreceğini belirtmektedir. Ortalama performans, ağdaki bir noktadan diğerine başarılı paket teslimini göstermektedir. WSD sayısı iki katına çıktığında ortalama performans biraz azalırken ortalama gecikme biraz artmaktadır. Bu durum, WSD sayısının uygun şekilde seçildiği anlamına gelmektedir.



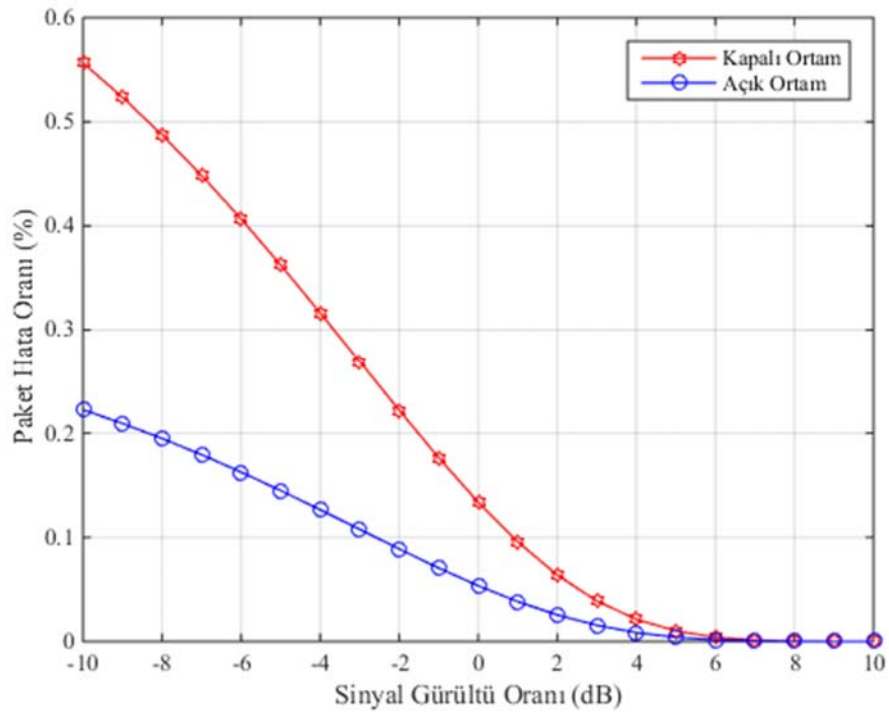
Şekil 6. Riverbed yazılımında STA (a) ve WSD (b) (STA (a) and WSD (b) in Riverbed software)



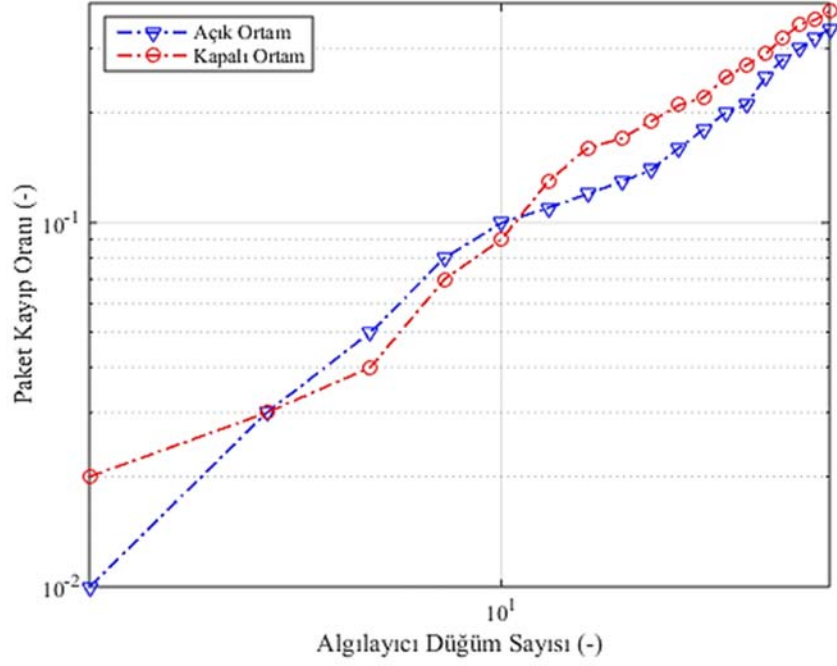
Şekil 7. Riverbed yazılımında AP (AP in Riverbed software)



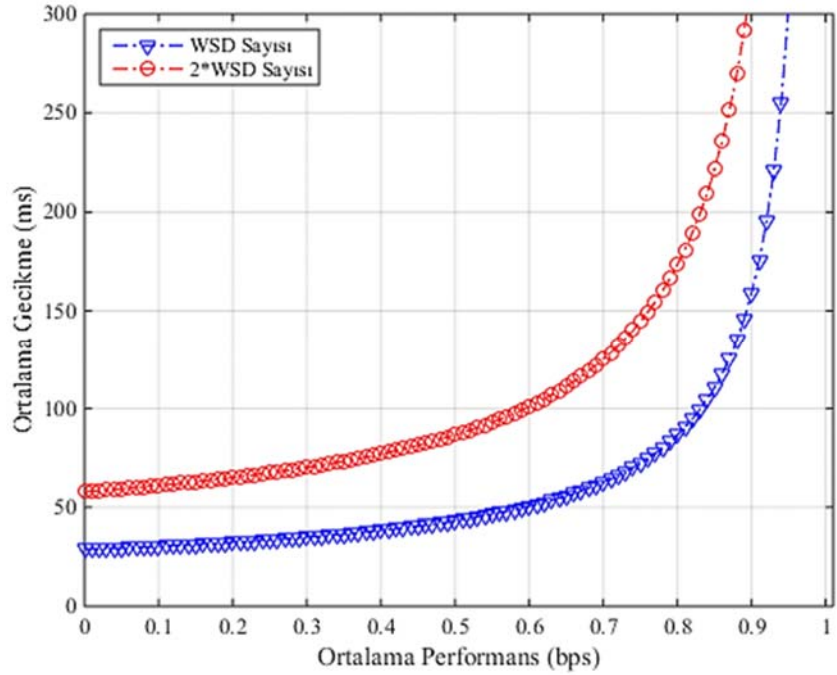
Şekil 8. Bit hata oranı (Bit error rate)



Şekil 9. Paket hata oranı (Packet error rate)



Şekil 10. Paket kayıp oranı (Packet loss rate)



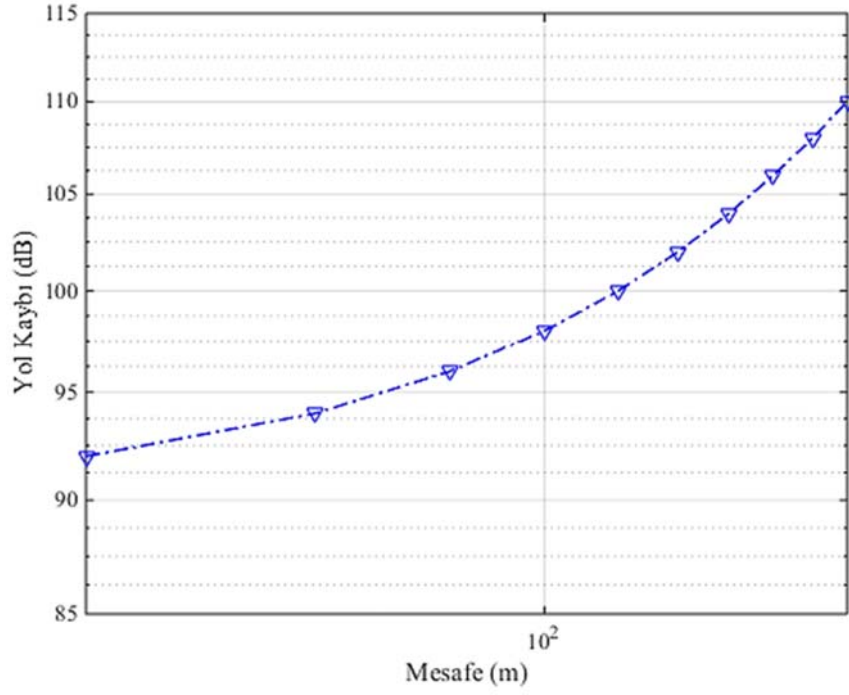
Şekil 11. Ortalama gecikme ve ortalama performans (Average delay and average performance)

Şekil 12'de, maksimum kapsama alanını gösteren mesafeye göre yol kaybı sonuçları gösterilmektedir. Yol kaybı, uzayda yayılan bir elektromanyetik dalganın güç yoğunluğunun azalması veya zayıflamasıdır. Yol kaybı, bir telekomünikasyon sisteminin bağlantı bütçesinin analizinde ve tasarımında önemli bir bileşendir. Mesafe 0 metreden 150 metreye çıktıkça yol kaybı değeri 90 desibelden 110 desibele çıkmaktadır.

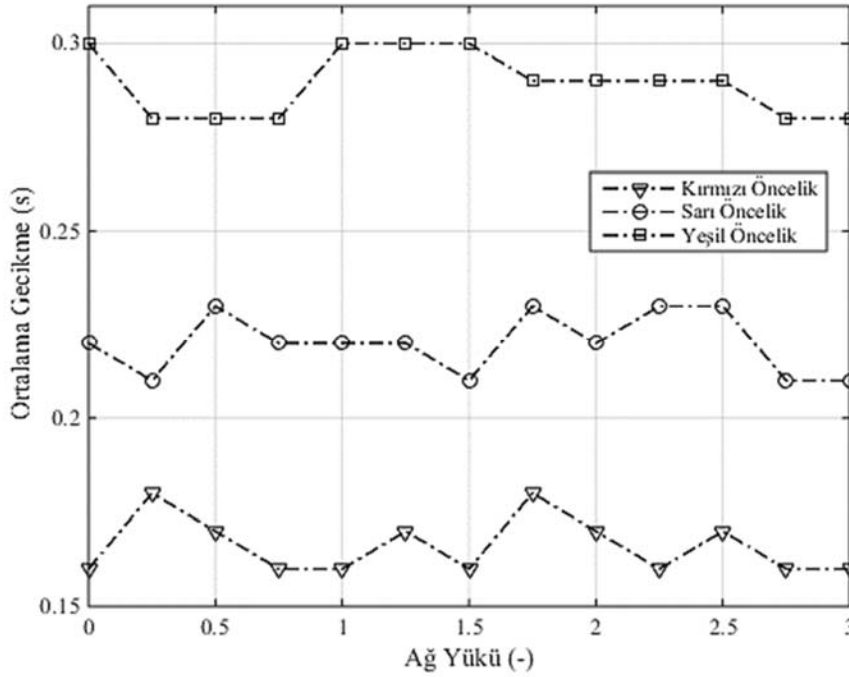
Şekil 13'te, ağ yüküne göre ortalama gecikme sonuçları gösterilmektedir. Ağ yükü, bir algılayıcı düğümün bir saniyede

algıladığı veri paketinin sayısı olarak tanımlanmaktadır. Görüldüğü gibi kırmızı öncelikli paket tüm öncelik sınıfları arasında en az ortalama gecikmeye sahiptir (0,17 s).

Şekil 14'te, açık ve kapalı ortamdaki algılayıcı sayısına göre enerji tüketimi sonuçları gösterilmektedir. Enerji tüketimi, tüm ağın kullandığı enerji olarak tanımlanmaktadır. Açık ortamdaki algılayıcıların enerji tüketimi, kapalı ortamdaki algılayıcı düğümlerin enerji tüketiminden daha azdır (4,7 mJ/s). Bunun sebebi, kapalı ortamdaki algılayıcıların sönümleme etkisine maruz kalmasıdır.



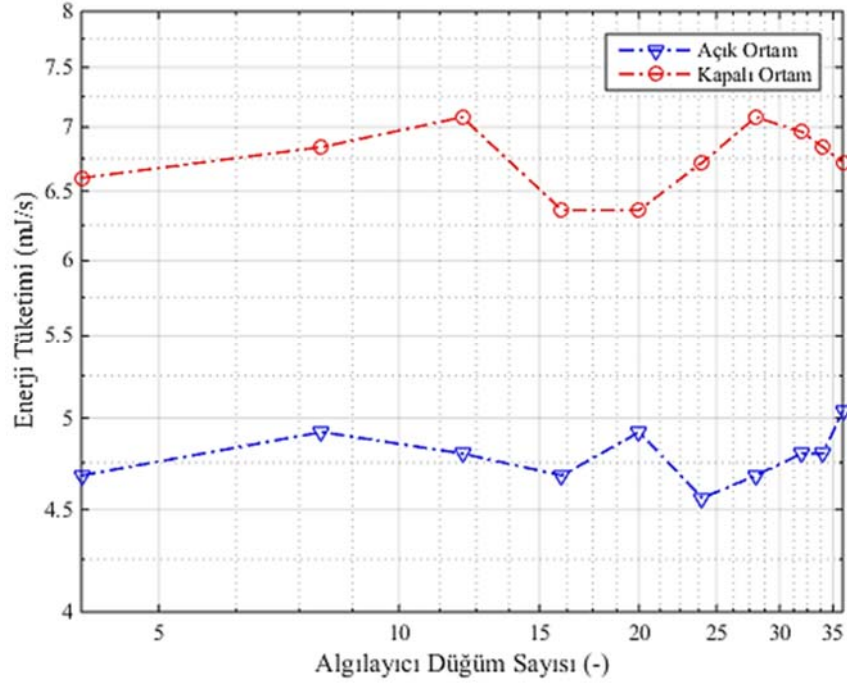
Şekil 12. Yol kaybı ve mesafe (Path loss and distance)



Şekil 13. Önceliğe göre ortalama gecikme (Average delay according to priority)

Mevcut literatürde, IEEE 802.11af tabanlı bilişsel radyo algılayıcı ağlarda çok fazla çalışma olmadığı için, gecikme, algılayıcı düğüm sayısı, yol kaybı, bit hata oranı ve enerji tüketimi değerleri mevcut literatürdeki spesifik verilerle doğrudan karşılaştırılmamaktadır. IEEE 802.11af teknolojisi, herhangi bir spektrum maliyeti olmadan, bilişsel özellikler yardımıyla lisanslı kanallara fırsatçı erişim sağlamaktadır. Kablosuz algılayıcı ağlar, tüm dünyada veri izleme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. İzleme sistemleri alanında

veri takibi için IEEE 802.11af teknolojisinin kullanılması büyük önem taşımaktadır. Verilerin aciliyet duruma göre önceliklendirilmesi de bilişsel radyo algılayıcı ağlar için çok önemlidir. Hem simülasyon hem de analitik modeller kullanılarak elde edilen grafiksel sonuçlar, önerilen ağın geçerliliğini kanıtlamaktadır. IEEE 802.11af teknolojisi tabanlı bilişsel radyo algılayıcı ağ yardımıyla, televizyon beyaz spektrumunu kullanarak herhangi bir spektrum maliyeti olmaksızın öncelik bazlı veri izlemenin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 14. Enerji tüketimi (Energy consumption)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, öncelik sınıflarına sahip verilerin izlenmesi için IEEE 802.11af teknolojisi tabanlı bilişsel radio algılayıcı ağ önerilmektedir. IEEE 802.11af teknolojisinde, WSD, STA ve AP lisanslı hizmetlere herhangi bir zararlı müdahaleye neden olmadan televizyon beyaz spektrumu üzerinden fırsatçı bir şekilde iletişim kurmaktadır. Önerilen ağ yapısında; WSD'ler, STA ve AP, WSM tarafından belirlenen beyaz alan spektrumu aracılığıyla iletişim kurmak amacıyla FDMA tekniğini kullanmaktadır. WSD, çeşitli ortamlardaki algılayıcılardan sıcaklık, nem, basınç vb. verileri toplamaktadır ve bunları bir paket oluşturmak için öncelik sınıfıyla birleştirmektedir. Öncelik sınıfı verinin aciliyet durumuna göre kırmızı, sarı ve yeşil olarak belirlenmiştir. Önerilen ağın analitik modeli elde edildikten sonra Riverbed Modeler kullanılarak ağın benzetim modeli gerçekleştirilmiştir. Grafiksel sonuçlar, öncelik tabanlı verilerin izlenmesi için herhangi bir spektrum maliyeti olmadan, önerilen ağın gecikme ve enerji tüketimi açısından geçerliliğini ve uygulanabilirliğini kanıtlamaktadır. Bit hata oranı ortalama % 0,0001, paket hata oranı ortalama % 0,1, paket kayıp oranı 0,1, ortalama performans 0,8 bps, ortalama yol kaybı 100 dB, ortalama gecikme 0,17 s ve enerji tüketimi 4,7 mJ/s seviyelerindedir. Gelecekteki çalışmalarda, ağ performansını artırmak için daha gelişmiş spektrum yönetimi, güvenlik protokolleri ve AI tabanlı algoritmalar kullanılabilir. Ayrıca, endüstriyel IoT ve akıllı şehir projelerinde uygulanabilirliği test edilerek, ağın gerçek dünya senaryolarındaki verimliliği değerlendirilebilir.

Kaynaklar (References)

- Panbude S., Iyer B., Nandgaonkar A. B., Deshpande P. S., DFPC: Dynamic Fuzzy-based Primary User Aware clustering for Cognitive Radio Wireless Sensor Networks, Eng. Technol. Appl. Sci. Res., 13 (6), 12058-12067, 2023.
- Wang J., Liu C., An imperfect spectrum sensing-based multi-hop clustering routing protocol for cognitive radio sensor networks. Sci Rep, 13, 4853, 2023.
- Wang J., Wang Z., Zhang L. A., Simultaneous Wireless Information and Power Transfer-Based Multi-Hop Uneven Clustering Routing Protocol for EH-Cognitive Radio Sensor Networks, Big Data Cogn. Comput., 8 (2), 15, 2024.
- Singh S., Shrestha R., A New Hardware-Efficient and Low Sensing-Time Cooperative Spectrum-Sensor for High-Throughput Cognitive-Radio Network, IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap., 71 (1), 262-273, 2024.
- Bala V. J., Saswat K. R., Deepan, Energy-efficient adaptive sensing for Cognitive Radio Sensor Network in the presence of Primary User Emulation Attack, Comput. Electr. Eng., 106, 2023.
- Lu L., Xu W., Wang Y., Compressive Spectrum Sensing Using Blind-Block Orthogonal Least Squares in Cognitive Sensor Networks, IEEE Sens. J., 23 (24), 30573-30583, 2023.
- Kumar D., Singya P. K., Choi K., Bhatia V., SWIPT Enabled Cooperative Cognitive Radio Sensor Network With Non-Linear Power Amplifier, IEEE Trans. Cognit. Commun. Networking, 9 (4), 884-896, 2023.
- Raghavendra Y. M., Mahadevaswamy U. B., Asha, M., Energy Optimization in Spectrum Sensing Using Cognitive Radio Wireless Sensor Networks, Wireless Pers Commun, 133, 1675-1691, 2023.
- Zhang B., An Efficient Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Wireless Sensor Networks, IEEE Access, 11, 132544-132556, 2023.
- Babu R. G., Hemanand D., Amudha V., Sugumaran S., Design of clustering techniques in cognitive radio sensor networks, Comput. Syst. Sci. Eng., 44 (1), 441-456, 2023.
- Flores A. B., Guerra R. E., Knightly E. W., Ecclesine P., Pandey S., IEEE 802.11af: a standard for TV white space spectrum sharing, IEEE Commun. Mag., 51 (10), 92-100, 2013.
- Cheang C., Un K., Yu W., Mak P., Martins R. P., A Combinatorial Impairment-Compensation Digital Predistorter for a Sub-GHz IEEE 802.11af-WLAN CMOS Transmitter Covering a 10x-Wide RF Bandwidth, IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap., 62 (4), 1025-1032, 2015.
- Un K., Yu W., Cheang C., Qi G., Mak P., Martins R. P., A Sub-GHz Wireless Transmitter Utilizing a Multi-Class-Linearized PA and Time-Domain Wideband-Auto I/Q-LOFT Calibration for IEEE 802.11af WLAN, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 63 (10), 3228-3241, 2015.
- Matsumura T., Ibuka K., Ishizu K., Murakami H., Kojima F., Harada H., Prototype of IEEE 802.11af-Based Baseband IC Enabling Compact

- Device for Wireless Local Area Network Systems in TV White-Spaces, IEEE Trans. Cognit. Commun. Networking, 3 (3), 450-463, 2017.
15. Başgumus A., Namdar M., Tsiftsis T., Broadcast Cognitive Radio with Dirty Paper Coding over Nakagami-m Fading Channel, Advances in Electrical and Computer Engineering, 191, 3-8, 2019.
 16. Erdogan E, Çolak SA, Alakoca H, Namdar M, Başgumus A, Durak-Ata L. Interference Alignment in Multi-Hop Cognitive Radio Networks under Interference Leakage. Applied Sciences, 8 (12), 2486, 2018.
 17. Başgümüş A., Ardiç M.S., Namdar M., Capacity analysis of the secondary users in spectrum sharing model over Nakagami- m and log-normal fading channels, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (4), 2205-2212, 2023.
 18. IEEE 802.11af, Standart, <https://standards.ieee.org/ieee/802.11af/4761/>, Yayın Tarihi Şubat, 2014, Erişim Tarihi Mart, 2024.
 19. Riverbed Modeler, Benzetim Yazılımı, <https://www.riverbed.com/>, Yayın Tarihi Aralık, 2022, Erişim Tarihi Mart, 2024.