



İstanbul Sanayi Odası - İstanbul Teknik Üniversitesi  
Doktora / Yüksek Lisans  
Tezlerine Sanayi Desteği Projesi



# BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SERVİS KALİTESİNE DAYALI SPEKTRUM YÖNETİMİ

# VIII

"44. Grup Bilgisayar, Elektronik, Yazılım ve  
Optik Ürünler Sanayii Meslek Komitesi"  
adına desteklenmiştir



İSTANBUL  
SANAYİ ODASI

İstanbul Sanayi Odası - İstanbul Teknik Üniversitesi  
Doktora / Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi

# Bilişsel Radyo Ağlarında Servis Kalitesine Dayalı Spektrum Yönetimi



Kısaltılmış Doktora Tezi

Hazırlayan  
**Araş. Gör. Dr. Berk CANBERK**

Danışmanı  
**Prof.Dr.Sema OKTUĞ**  
Anabilim Dalı: Bilgisayar Bilimleri  
Programı: Bilgisayar Bilimleri

İzleyiciler: Emel ALTAY  
Uran TİRYAKİOĞLU  
(İSO 44. Grup Meslek Komitesi)

**ISBN:** 978-9944-60-935-7 (BASILI)

**ISBN:** 978-9944-60-936-4 (ELEKTRONİK)

**İSO Yayın No:**2011/10

**Sertifika no:**19176

**Bilişsel Radyo Ağlarında Servis Kalitesine Dayalı Spektrum Yönetimi,  
İstanbul Sanayi Odası, İstanbul**

Tasarım ve Uygulama:

**Mürettebat Reklamcılık ve İletişim Hizmetleri Ltd. Şti.**

Badem11 Villa16 Bahçeşehir

34538, İstanbul

Tel: (212) 608 06 08

Faks: (212) 608 16 03

[www.murettebat.com.tr](http://www.murettebat.com.tr)

Tüm Hakları Saklıdır. Bu yayındaki bilgiler ancak kaynak gösterilmek suretiyle kullanılabilir.

Bu çalışma; İstanbul Sanayi Odası ile İstanbul Teknik Üniversitesi arasında, sanayi-üniversite işbirliğinin geliştirilmesi ve akademik çalışmaların ekonomik kalkınmaya katkısının artırılması amacıyla başlatılan "İSO-İTÜ Doktora / Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği" projesi kapsamında yayınlanmıştır.

Üniversitede doktora ve yüksek lisans tezlerini yürüten araştırmacıların desteklendiği proje ile üniversite ve sanayinin gündemini buluşturarak, ticari ürüne dönüştürülen bilimsel araştırma ve patent sayısının artmasına, küresel rekabet gücümüzün gelişmesine katkıda bulunulması hedeflenmektedir.

Proje kapsamında, üniversitede hali hazırda yürütülen doktora/yüksek lisans tez/tezleri arasından uygun bulunanlar ile Meslek Komitelerimizin sektörel ihtiyaçları doğrultusunda belirlediği konulardaki akademik çalışmalara destek verilmektedir.

İstanbul Sanayi Odası 44. Grup Bilgisayar, Elektronik, Yazılım ve Optik Ürünler Sanayii Meslek Komitesi adına desteklenen bu çalışmanın sanayinin ihtiyaçlarına yanıt verecek şekilde hayata geçirilmesine yönelik katkılarından dolayı Tez Değerlendirme Komitesi üyelerimiz olan;

Uran Tiryakioğlu, Neta Elektronik

Emel Altay, Universal İletişim ve Bilgisayar

Mustafa Yurttaş, Özdisan Elektronik

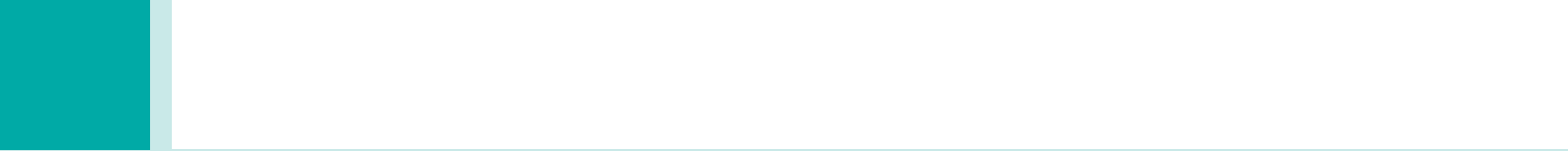
Peniyamin Teker (merhum), Erdem Ticaret

Farzad Kuchani'ye, Profilo Telra Elektronik teşekkür ediyoruz.

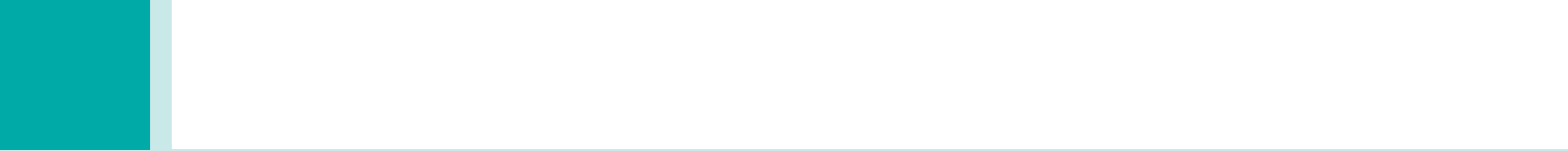
Başta araştırmacı olmak üzere, araştırmacıya danışmanlık yapan öğretim üyesi ve Değerlendirme Komitesi'nin katkılarıyla oluşturulan ve sanayi-üniversite işbirliğinin işlevsel ve somut bir çıktısı olan bu çalışmanın sektöre fayda sağlamasını ümit ediyoruz.

Saygılarımızla,

İstanbul Sanayi Odası



<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>5</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>9</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>10</b>
<b>ÖZET</b>	<b>11</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>13</b>
<b>1. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI (COGNITIVE RADIO NETWORKS)</b>	<b>15</b>
1.1. Spektrum Boşluğu Kavramı	16
1.2. Bilişsel Ağ Topolojisi	17
1.3. Bilişsel Ağ Uygulamaları	18
<b>2. IEEE 802.22 KABLOSUZ BÖLGESEL AĞLARI</b>	<b>19</b>
<b>3. BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM YÖNETİMİ</b>	<b>21</b>
3.1. Spektrumun Sezilmesi	22
3.2. Spektrum Seçimi	22
<b>4. BİRİNCİL KULLANICILARIN MODELLENMESİ</b>	<b>25</b>
4.1. Bu Çalışmanın Temel Motivasyonu	25
4.2. Tasarlanan Sistem	26
4.3. Sistemin Çalışması	27
4.4. Bulunan Temel Sonuçlar	27
<b>5. BİLİŞSEL AD-HOC AĞLARDA DİNAMİK VE AĞIRLIKLI BİR SPEKTRUM KARAR MEKANİZMASI</b>	<b>29</b>
5.1. Bu Konuda Literatürde Yapılan Çalışmalar	29
5.2. Tasarlanan Sistem	29
5.3. Sonuçlar	31
<b>6. IEEE 802.11 BİLİŞSEL AĞLARDA DİNAMİK FREKANS KANALI ATAMASI</b>	<b>33</b>
6.1. Bu Konuda Literatürde Yapılan Çalışmalar	33
6.2. Tasarlanan Sistem ve Test Ortamı	34
6.3. Sonuçlar	36
<b>7. BİLİŞSEL AĞLARDA ÇAPRAZ KATMAN TEMELLİ SPEKTRUM ATAMASI</b>	<b>39</b>
7.1. Tasarlanan Xpec Sisteminin Yapısı	39
7.2. Sonuçlar	40
<b>8. KAZANIMLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR</b>	<b>43</b>
<b>9. KAYNAKLAR</b>	<b>45</b>



Bu çalışma, "ISO - İTÜ Doktora/Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi" kapsamında, ISO 44. Grup Meslek Komitesi tarafından desteklenen bir doktora tezinden oluşmaktadır.

İTÜ Bilişim Enstitüsü Bilgisayar Bilimleri Anabilim dalında tamamladığım bu doktora tezim sırasında, hem ciddi ve titiz akademik danışmanlığı, hem de sabırlı ve özverili yol göstericiliğinden ötürü doktora tez danışmanım Prof.Dr. Sema OKTUĞ'a teşekkür etmek istiyorum.

Doktora tezim sırasında bir yıl boyunca (2008-2009), kurucusu ve yürütücüsü olduğu, bilgisayar ağları konusunda dünyaca saygın Broadband Wireless Networking Laboratory (BWNLab)'da kendisiyle çalışma imkanı vererek tezime çok büyük katkılar sağlayan, Georgia Institute of Technology - School of Electrical and Computer Engineering'deki değerli öğretim üyesi Prof.Dr. İan F. Akyıldız'a teşekkür etmek istiyorum.

Değerli yorum ve görüşleriyle tezimin oluşmasında katkıları olan doktora tez komitesi üyeleri Prof. Dr. Ali Emre Harmancı, Doç. Dr. Tuna Tuğcu ve Yard. Doç. Dr. Feza Buzluca'ya çok teşekkür ediyorum.

ISO 44. Grup Meslek Komitesi adına tezimin yürütülmesi sırasındaki özverili çalışmaları ve değerli katkılarından ötürü, Emel Altay ve Uran Tiryakioğlu'na çok teşekkür ediyorum.

Son olarak, doktora tez sürecim dahil tüm eğitim hayatım boyunca bana sonsuz destek olan anne ve babama çok teşekkür ediyorum.

**Nisan 2011**

**Araş. Gör. Dr. Berk CANBERK**

**Sayısal Haberleşme Yüksek Mühendisi**





## TABLO LİSTESİ

Tablo-4.1: Bulunan Temel Sonuçlar

28

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil-1.1 : Spektrumun Kullanımı [1]	15
Şekil-1.2 : Bilişsel Ağların Kısa Vadede Uygulanabileceği Kablosuz Ağlar	16
Şekil-1.3 : Spektrum Boşluklarının Kullanılması [1,2]	16
Şekil-1.4 : Bir Bilişsel Ağ Topolojisi [1]	17
Şekil-2.1 : Günümüz Kablosuz Ağlarının Karşılaştırılması [3]	19
Şekil-2.2 : 802.22 Temelli Bir Ağ Topolojisi [3]	20
Şekil-3.1 : Bilişsel Çevrim [1,2]	21
Şekil-4.1 : Poisson Modelinde Kullanılmayan Spektrum Boşlukları [6]	26
Şekil-4.2 : Tasarlanan Sistem [6]	27
Şekil-5.1 : Tasarlanan Sistemin Uygulandığı Ağ [7]	29
Şekil-5.2 : Tasarlanan Sistem [7]	30
Şekil-5.3 : Bilişsel Kullanıcı sayısına göre birincil kullanıcıyı doğru hissetme olasılığı [7]	31
Şekil-5.4 : Bilişsel Kullanıcıların mesajlarının ulaştığı düğüm sayısına göre birincil kullanıcıyı doğru hissetme olasılığı [7]	32
Şekil-6.1 : Kanalların Band Genişlikleri ve Enerji Seviyeleri [4]	33
Şekil-6.2 : Tasarlanan Test Ortamı [4]	35
Şekil-6.3 : TCP Trafiğinin Ortalama Debisi [4]	36
Şekil-6.4 : UDP Trafiğinin Ortalama Debisi [4]	36
Şekil-6.5 : RTP Trafiğinin Seyirme Değerleri [4]	37
Şekil-7.1 : Kullanılan Ağ Topolojisi [19]	39
Şekil-7.2 : Tasarlanan Xpec Sistemi [19]	40
Şekil-7.3 : Debinin Kullanıcı Sayısına Göre Değişimi [19]	41
Şekil-7.4 : Spektrum Atama Adaletinin Kullanıcı Sayısına Göre Değişimi [19]	41

## Bilişsel Radyo Ağlarında Servis Kalitesine Dayalı Spektrum Yönetimi

Günümüzde kablosuz ağlar tasarlanırken, yetkili kurumlar tarafından düzenlenen ve kontrol edilen sabit spektrum lisans dağıtım sözleşmeleri dikkate alınır. Dağıtılan spektrumun düzensiz bir şekilde kullanımı, spektrum bantlarının verimsiz kullanılmasına yol açmaktadır. Yetkili kurumlar tarafından statik olarak dağıtılmış olan spektrum kullanımını dinamik hale getirerek kullanımdaki verimsizliğin giderilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, Bilişsel Radyo (Cognitive Radio) adı verilen teknoloji ile, kablosuz kullanıcılara değişik frekanslarda, dinamik olarak çalışma olanağı tanınmaktadır.

Bilişsel radyo, dinamik spektrum erişim teknikleri ile verimsiz spektrum kullanım problemini çözmek için önerilmiş bir teknolojidir. Bu teknolojiyi temel alarak oluşturulan ağlara Bilişsel Radyo Ağları (Cognitive Radio Networks) denmekte, bu ağların kullanıcılarına, seyrek kullanılan lisanslı frekanslar arasında geçiş yaptırılarak, iletişim olanağı verilmektedir. Bilişsel Radyo Ağlarında oluşturulan spektrum yönetimi (spectrum management), spektrumu kullanma hakkına sahip birincil kullanıcılara (primary users) engel olmadan, elverişli spektrum bandlarının bulunması ve bu bantların ikincil kullanıcılar (secondary users) arasında paylaşılması olarak tanımlanabilir. Bilişsel ağ kullanıcılarına sağlanan bu dinamik özellik, frekansın lisanslı gerçek kullanıcısıyla girişim yapmaması koşuluyla verilmektedir. Böylece bilişsel radyo ağı kullanıcıları, lisanslı kullanıcıların sahip oldukları frekansı seyrek kullanmalarından faydalanarak, iletişime geçmektedir. Lisanslı kullanıcının sahip olduğu frekansa geri dönmesi halinde, bilişsel kullanıcılar frekansı boşaltmak ve lisanslı kullanıcıyla girişime geçmemekle yükümlüdürler.

Elverişli spektrum bantları, değişik spektrum sezme (spectrum sensing) teknikleriyle belirlenir. Elverişli spektrum, sadece hattın zaman değişim karakteristiklerinden değil, birincil kullanıcıların spektrumu kullanma aktivitelerine göre de değişiklik gösterir. İkincil kullanıcılar (Bilişsel ağ kullanıcıları) için elverişli spektruma erişim teknikleri, bilişsel radyonun en uygun spektrum bandını seçmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yapılabilmesi için gerçekleştirilen işlevlerden biri Spektrum Sezme'dir. Burada, kullanılmayan spektrum bandlarının saptanabilmesi ve bu bantların, birincil kullanıcıların iletişimine engel olabilecek çakışmalara sebep olmadan ikincil kullanıcılarla paylaşılabilmesi esas alınır.

Bir diğer işlev, Spektruma Karar Verme (Spectrum Decision)'dir. Bu işlev, bilişsel ağ kullanıcıları tarafından sezilen birden fazla spektrum boşluğu varsa bunlardan bilişsel ağ kullanıcılarının istediği servis kalitesine göre en uygun olanının kullanımına karar verilmesidir. Bir diğer temel fonksiyon olan Spektrum Paylaşma (Spectrum Sharing), birincil kullanıcıların iletişimini etkilemeden aynı spektrum bandını kullanan ikincil kullanıcılar arasında hem adil hem de yüksek kaliteli bir paylaşım sağlanabilmesidir. Tanımlanabilecek başka bir fonksiyon olan Spektrum Hareketliliği (Spectrum Mobility) işlevi, ikincil kullanıcıların spektrumun gerçek sahibi geldiğinde kullandıkları spektrumu değiştirebilmesidir.

Bilişsel ağlarda spektrum yönetimini oluşturan, spektrum sezme, spektruma karar verme ve spektrum paylaşımı işlevlerinde çözümü ve iyileştirilmesi gereken sorunlar bulunmaktadır. Bu bağlamda, ISO - İTÜ Doktora/Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi kapsamında desteklenen bu doktora tezinde, aşağıdaki konularda çalışılmış ve uluslararası literature katkı sağlanmıştır:

- Spektrum sezme fonksiyonu sırasındaki etkinliği arttırmak amacıyla yeni bir birincil kullanıcı modelleme tekniği önerilmiştir. Tasarlanan yeni modelde, birincil kullanıcı aktivitelerinin kısa süreli salınımlarının sezilmesi ve modellenmesi bir kümeleme algoritması tasarlanarak gerçekleştirilmiş, elverişli spektrum boşluklarının matematiksel olarak modellenmesi ise, aktivite datasının korelasyon bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

- Bilişsel tasarsız ağlar için, ağdaki diğer bilişsel kullanıcıların bilgilerinin de kullanıldığı müşterek ve dağıtık bir spektruma karar verme yapısı tasarlanmıştır.
- İkincil kullanıcıların servis istekleri ve birincil kullanıcıların kısa zamanlı spektrum kullanımındaki değişimler dikkate alınarak bir spektrum paylaşım yapısı tasarlanmış ve modellenmiştir.
- Hem birinci (fiziksel) hem de ikinci (veri bağı) katmanlardaki bilgiler modellenerek bir çapraz katman yapısı oluşturulmuştur. Bu yapı sayesinde, etkin bir spektrum karar mekanizması, birden fazla parametre yardımıyla geliştirilmiştir.

Tezde tasarlanan modeller geniş bir başarımla incelemeyle, literatürdeki güncel bilişsel ağ çalışmalarıyla karşılaştırılmış ve sonuçlar detaylı bir şekilde verilmiştir. Yapılan tez çalışmasının detaylarına [29]'dan ulaşılabilir.

Bu doktora tezi kapsamında üretilen uluslararası dergi ve konferans yayınları aşağıdaki gibidir:

- 1) Berk Canberk, Ian F. Akyildiz, ve Sema Oktuğ, "Primary User Activity Modeling Using First-Difference Filter Clustering and Correlation in Cognitive Radio Networks" isimli dergi makalesi, IEEE/ACM Transactions on Networking Vol: 19,No:1, pp:170-183, Şubat 2011.
- 2) Berk Canberk, ve Sema Oktuğ, "A Dynamic and Weighed Spectrum Decision Mechanism based on SNR Tracking in CRAHNS", Elsevier Ad Hoc Networks dergisinde basılmak üzere kabul edildi, Şubat 2011.
- 3) Berk Canberk, Ian F. Akyildiz ve Sema Oktuğ, "A QoS-Aware Framework for Available Spectrum Characterization and Decision in Cognitive Radio Networks" isimli bildiri, The 21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2010) konferansı, İstanbul-TURKIYE, Eylül 2010.
- 4) Berk Canberk ve Sema Oktuğ, "Xpec: A Cross-Layer Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks" isimli bildiri, The 4th IEEE Conference on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS 2010) konferansı, Mumbai-HİNDİSTAN, Aralık 2010.
- 5) Gökhan Yıldırım, Berk Canberk ve Sema Oktuğ. "Enhancing The Performance of Multiple IEEE 802.11 Network Environment By Employing A Cognitive Dynamic Fair Channel Assignment" isimli bildiri, The 9th IFIP/IEEE Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MEDHOCNET 2010) konferansı, Juan Les Pins-FRANSA, Haziran 2010.
- 6) Berk Canberk, Ian F. Akyildiz, ve Sema Oktuğ, "An Adaptive QoS-based Spectrum Sharing Scheme for CR Networks", IEEE Transactions on Mobile Computing dergisine gönderildi, Aralık 2010.
- 7) Berk Canberk, Ian F. Akyildiz ve Sema Oktuğ, "A Spectrum Decision Framework for Heterogeneous QoS Requirements in CR Networks", isimli dergi makalesi hazırlanıyor.

## SUMMARY

The problems of the spectrum scarcity, as well as the unbalanced and sporadic usage of the fixed spectrum assignment, have been addressed by a new communication paradigm, called Cognitive Radio (CR). This key enabling technology uses dynamic spectrum access techniques in order to achieve an effective spectrum management in the licensed bands. In the spectrum management of CR networks, the vacant spectrum bands of primary users (PUs) are opportunistically shared by the CR users. Since PUs have priority to utilize the licensed spectrum, their communication should not be interrupted or interfered by any other user. Therefore, CR users should intelligently sense and determine the ongoing PU activities in a licensed spectrum band to avoid interference with PUs. This concept is also called the spectrum sensing function in CR spectrum management paradigm. In spectrum sensing, the PU activities need to be accurately modeled so that CR users can evacuate the band without affecting PU activities. CR users also need to detect spectrum holes to identify transmission opportunities so that the spectrum usage is maximized.

Moreover, considering the PU activity, the CR users should decide on the best available spectrum bands for their transmissions. This is the part of the spectrum decision function of the spectrum management paradigm in CR networks. It is seen that the spectrum decision, must be organized carefully by considering the challenges in the spectrum availability over time, the short term fluctuations in the availability, and the heterogeneous Quality of Service (QoS) requirements of the CR users. Since CR users should share the available spectrum bands with other CR users without causing harmful interference to the PUs, spectrum management in CR networks should also be designed with effective spectrum sharing function. To achieve this function, first, CR users should intelligently monitor and determine the presence of PUs. When CR users managed to detect the spectrum holes to identify transmission opportunities, they should share the available spectrum according to their heterogeneous QoS requirements. Moreover, the assignments of the available spectrum bands should be realized according to the activities of the PUs in the spectrum as well as the throughput requirements of the CR users. Besides, another important point in the spectrum management is that CR users should evacuate the spectrum band when the PU of that band starts using it again. Therefore, a spectrum mobility function in the spectrum management is needed in order to organize the spectrum switching issues of the CR network.

This thesis has contributions related to spectrum sensing, decision and sharing functions of the spectrum management paradigm. When working on each contribution, our final aim was to enhance the performance of overall cognitive radio spectrum management system. Our contributions could be itemized briefly as below:

- A novel PU activity model based on the first-difference filter clustering and enhanced with temporal correlation statistics is introduced to analyze and model the spectrum sensing function in CR networks. The scheme which has the capability of clustering and modeling the PU activity fluctuations, addresses the potential drawbacks of Poisson model in the sense of more accurate PU detection and more effective usage of transmission opportunities.
- In order to use the available spectrum as efficient as possible, a cooperative and distributed spectrum decision mechanism is proposed, to model the spectrum decision function in CR ad-hoc networks (CRAHNs). The mechanism is aimed to obtain more accurate spectrum decision results for CRAHN users by collecting the entire SNR observations and local decisions in the network.

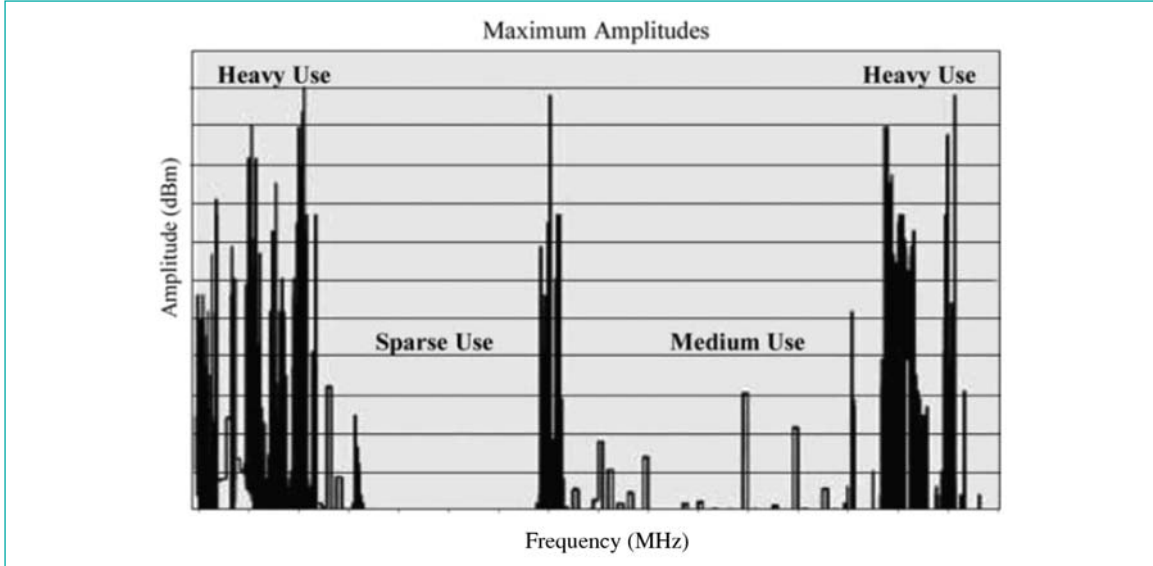
- A spectrum sharing mechanism, where the heterogeneous QoS requirements of CR users are characterized, is proposed to enhance the spectrum sharing function. The proposed adaptive spectrum sharing algorithm allocates the available spectrum among all CR operators bandwidth requests.
- A physical layer-data link layer based cross-layer spectrum assignment for centralized CR networks is proposed to analyze the affects of the cross-layer approaches in spectrum sharing.

Each proposed scheme for the spectrum management functions is evaluated with thorough performance analysis and compared with the existing architectures in the CR network literature. The details of the thesis is available in [29].

# 1. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI (COGNITIVE RADIO NETWORKS)

## 1. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI (COGNITIVE RADIO NETWORKS)

Günümüzde, kablosuz ağ iletişiminin temel bileşeni olan frekans spektrumunun dağıtılması ve kullanımı belirli kurumlar tarafından denetlenmektedir. Bu yetkili kurumlar, frekans bantlarını belirli standartlara (802.11, 802.15, 802.16, 802.20 gibi) bağlı çalışan ağlarda iletişim yapmayı amaçlayan ikincil kurumlara vermekte ve tahsis edilen bu bantın dışında iletişim yapmalarına olanak tanımamaktadır. Bu durum, belirli frekans bantlarının çok yoğun olarak, bazı frekans bantlarının ise çok nadir olarak kullanılmasıyla sonuçlanmaktadır. Radyo spektrumunun bu biçimdeki verimsiz kullanılması Şekil-1.1'de gösterilmiştir. Amerikan Federal İletişim Komisyonu (Federal Communication Commission, FCC) tarafından belirlenen bu grafikte, kurum tarafından belirli frekans bantlarını kullanması için yetki verilen kuruluşların, spektrumu kullanma yoğunluğu belirtilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bazı bantlardaki kullanım çok yoğun, buna karşın bazı frekans bantlarındaki kullanım çok seyrek. Bu verimsiz kullanım neticesinde, aynı bantta çalışmak zorunda kalan kullanıcıların ağ iletişim başarımı düşmekte ve iletişim kalitesi azalmaktadır.

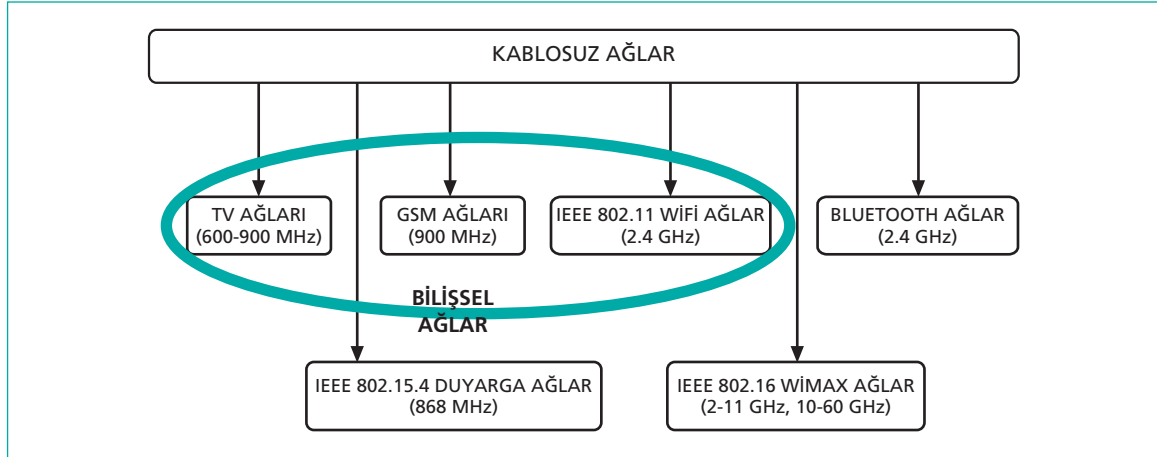


Şekil 1.1 Spektrumun Kullanımı [1]

Yetkili kurumlar tarafından statik olarak dağıtılmış olan spektrumun kullanımını dinamik hale getirerek yukarıda açıklanan verimsizliğin giderilmesi, günümüzdeki önemli çalışma/ araştırma alanlarından biridir. Bu bağlamda, Bilişsel Radyo (Cognitive Radio) adı verilen teknoloji ile, kablosuz kullanıcılara değişik frekanslarda dinamik olarak çalışma olanağı tanınmaktadır. Bu teknoloji temeliyle oluşturulan ağlara Bilişsel Radyo Ağları (Cognitive Radio Networks) denilmekte, bu ağın kullanıcılarına, seyrek kullanılan lisanslı frekanslar arasında geçiş yaptırılarak, iletişim olanağı verilmektedir. Bilişsel ağ kullanıcılarına sağlanan bu dinamik özellik, frekansın lisanslı gerçek kullanıcısıyla girişim yapmaması koşuluyla verilmektedir. Böylece bilişsel radyo ağ kullanıcıları, lisanslı kullanıcıların sahip olduğu frekansı seyrek kullanmasından faydalanarak, o frekansta iletişime geçmekte, lisanslı kullanıcının sahip olduğu bu frekansa geri dönmesi halinde ise bilişsel kullanıcılar frekansı boşaltmaktadır. Şekil 1.1'de görülen spektrum kullanımı, günümüzdeki kablosuz ağ kullanıcılarının frekans aralıklarından bağımsız olarak spektrumu kullanma oranlarını göstermekte olup özel bir frekans bandını içermemektedir. Bu şekilde birincil kullanıcıların kullanımından kaynaklanan boşlukların gösterilmesi amaçlanmıştır. Gönderilen trafiğin debisi üzerinde durulmamıştır. Bilişsel radyo ağlar, tüm frekanslarda çalışan



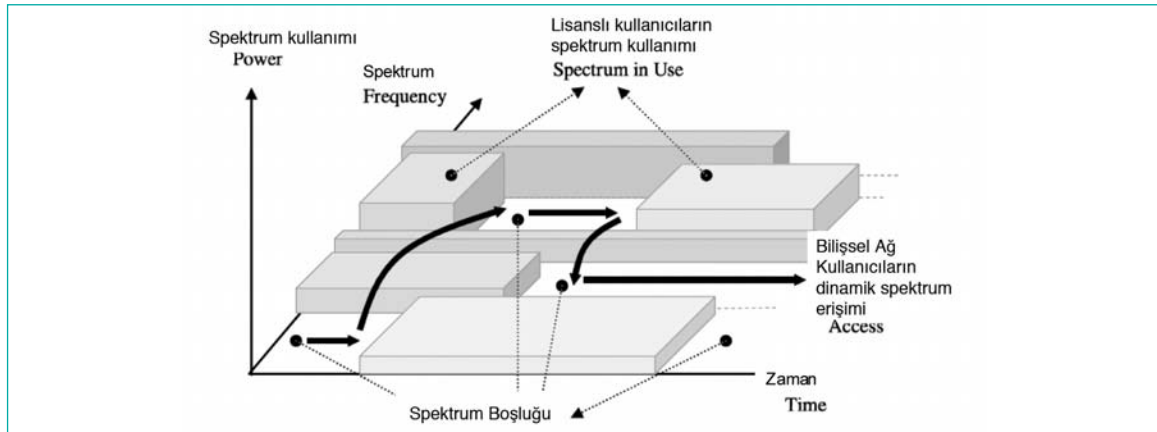
kablosuz ağlara uygulanabilir. Şekil 1.2'de, sadece örnek olarak bilişsel radio ağların kısa vadede gerçekleştirilebileceği kablosuz ağlar görülmektedir. Şekilde de gösterildiği gibi bilişsel radio ağ çalışmaları, günümüz kablosuz ağ çeşitlerinden WiFi, GSM ve TV bantlarında uygulanabilir.



Şekil 1.2 Bilişsel Ağların Kısa Vadede Uygulanabileceği Kablosuz Ağlar

### 1.1. Spektrum Boşluğu Kavramı

Bilişsel ağ kullanıcıları dinamik spektrum kullanımı gibi iletişim başarımını arttırmayı sağlayan önemli bir özelliğe sahiptirler. Buna karşın, spektrumdaki boşlukları doğru olarak belirlemek ve lisanslı kullanıcılara girişim yaratmamak, bilişsel ağ tasarımında temel alınan en önemli öğelerdendir. Kullanılmayan spektrum bantlarının, diğer bir ifadeyle spektrum boşluklarının, tespit edilmesi ve boşluklar arasında geçiş yapılması Şekil 1.3'de belirtilmiştir. Bu 3 boyutlu grafikte, zamana bağlı olarak (x-ekseni) lisanslı kullanıcıların spektrum kullarımlarına (z-ekseni) bağlı bilişsel radyo kullanıcıların spektrum kullanımı (y-ekseni) gösterilmiştir. Bilişsel kullanıcılar, belirli bir zaman aralığında kullanılmayan spektrum boşluklarını algılayıp burada iletişime geçerler. Bu spektrumun lisanslı sahibi geldiğinde, bilişsel kullanıcı, banttan çekilerek, kullanılmayan başka bir banta geçer. Bu bandın lisanslı kullanıcısı da geri geldiğinde, bilişsel kullanıcı, bu bandı da boşaltıp kullanılmayan başka bir banda geçiş yapar. Bilişsel ağ kullanıcılarının uygun frekansı bulup oraya geçmesinden sonraki adım, bilişsel ağda kullanılan tüm protokol ve katmanların, yeni geçilen frekans bandına uygun hale getirilmesidir.



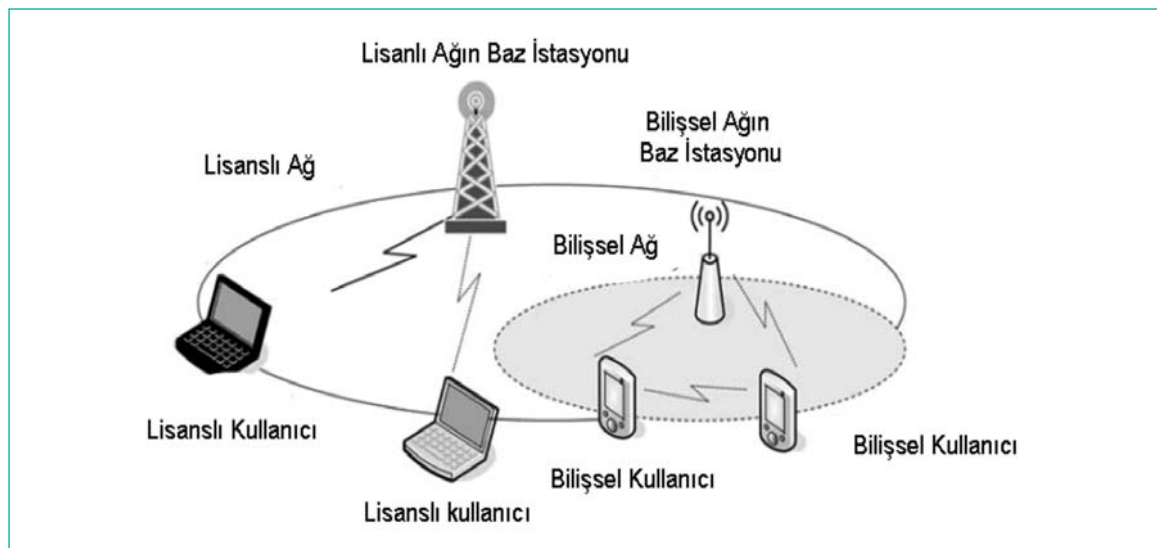
Şekil 1.3 Spektrum Boşluklarının Kullanılması [1,2]

Yukarıda belirtilen spektrum boşluklarını kullanarak iletişim sağlayan bilişsel ağların tasarımında dikkate edilmesi gereken önemli noktalar vardır. Bu noktalar aşağıda ki gibi özetlenebilir:

- **Spektrum Algılanması (Spectrum Sensing):** Belirli bir zaman diliminde lisanslı kullanıcı tarafından kullanılmayan spektrum bandının algılanıp buna geçiş yapılması ve bu bandın lisanslı kullanıcıya zarar verilmeden kullanılması
- **Spektrum Seçimi ve Yönetimi (Spectrum Decision and Management):** Bilişsel ağ kullanıcıları tarafından hissedilen birden fazla spektrum boşluğu varsa bunlardan en uygun olanının bilişsel ağ kullanıcılarının istediği servis kalitesine göre seçilmesi
- **Spektrum Hareketliliği (Spectrum Mobility):** Lisanslı kullanıcılara karşı görünmez davranılarak, spektrum boşlukları arasında geçişlerin verimli, mümkün olduğunca kesin ve girişim yaratmayacak şekilde olması
- **Spektrum Paylaşımı (Spectrum Sharing):** Kullanılan spektrum bandının bilişsel kullanıcılar arasında verimli bir iş sıralamayla paylaşılması.

## 1.2. Bilişsel Ağ Topolojisi

Klasik bir bilişsel ağ topolojisi Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi ağ, lisanslı kullanıcılar ve bilişsel kullanıcılar olmak üzere iki tip kullanıcıdan oluşmaktadır. Bu iki tip kullanıcı yapı, kablosuz iletişimde önemli bir yenilik olup, yukarıda açıklanan unsurların bütünleşik bir şekilde sağlanmasıyla gerçekleştirilebilir. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi lisanslı ağ, bir baz istasyonu ve onun kontrolünde iletişim yapan lisanslı kullanıcılardan oluşur. Frekansın tüm kullanım hakkı lisanslı kullanıcılarda olduğu için hiçbir şekilde girişime izin verilmemektedir. Lisanslı ağın kapsama alanında bulunan bilişsel ağ bir bilişsel radyo temelli baz istasyonu ve bilişsel kullanıcılardan oluşur. Spektrumu sürekli takip ederek boşlukları yakalamaya çalışan bilişsel kullanıcılar, bunu yaparken lisanslı kullanıcıların iletişimini engellememelidir.



Şekil 1.4 Bir Bilişsel Ağ Topolojisi [1]

### 1.3. Bilişsel Ağ Uygulamaları

Bilişsel ağ tasarımı birçok alanda kullanılabilir. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır:

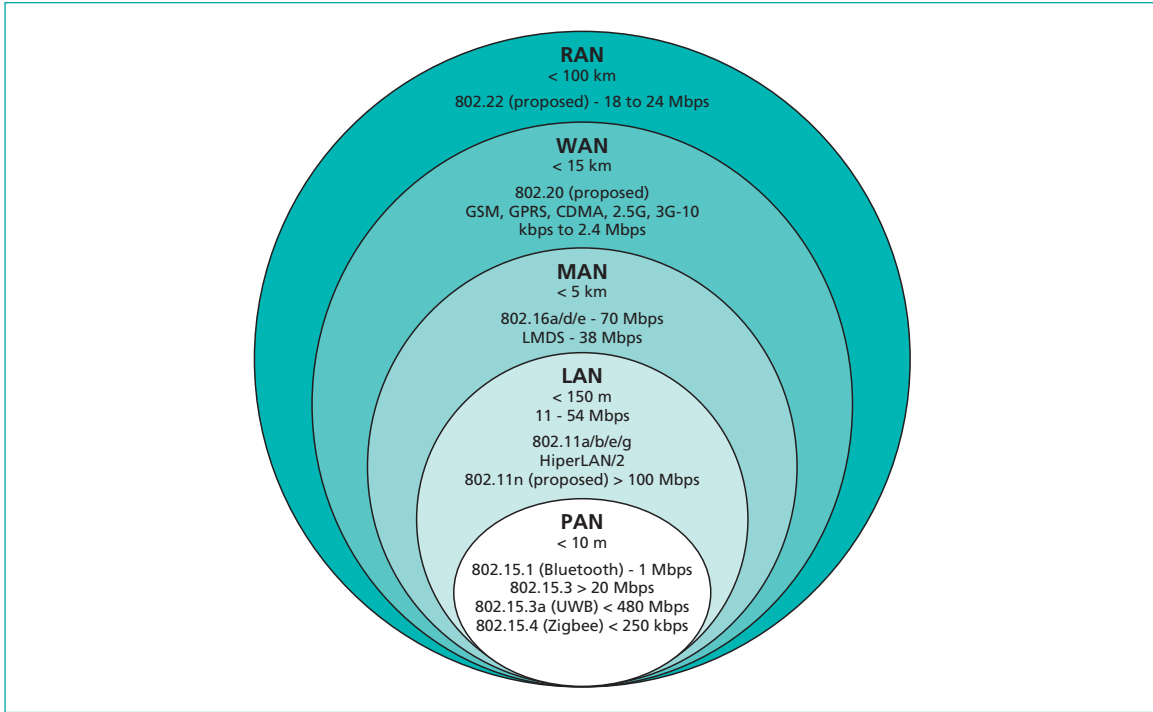
- **Adanmış Ağ Tasarımı (Dedicated Cognitive Network Design):** Lisanslı bir kablosuz ağ, kendi kullanıcılarına verdiği servis kalitesini düşürmeden kendi frekansı üzerinden bir bilişsel ağ tasarımına izin verebilir. Böylece, özel bir amaca yönelik olarak tasarlanan, adanmış bir bilişsel ağ kurulabilir. Bunun yanında, lisansa sahip bir ağ, başka bir operatör veya başka bir lisanslı ağa kendi bandında bilişsel ağ kullanım hakkı tanıyabilir.
- **Bilişsel Örgü Ağları Tasarımı (Cognitive Mesh Networking Design):** Kablosuz örgü ağları, gerek ağ kapasitesinin arttırımı gerekse tasarım maliyetinin düşük tutulması açısından tercih edilen sistemlerdir. Fakat, örgü ağlara yeni eklenen düğümlerin yüksek bandgenişliği istemeleriyle, tek bandda iletişim yapan örgü ağlarında fiziksel iletişim kaynağı sıkıntısı yaşanabilir. Bilişsel radyo teknolojisiyle sağlanan birçok bandda çalışabilme olanağı bu sorunun çözülmesini sağlayacaktır. Dolayısıyla, bilişsel teknolojiyle geliştirilen örgü ağ tasarımı, kablosuz örgü ağlarda karşılaşılan kapasite darlığı, bandgenişliği yetersizliği, servis kalitesi arttırımı gibi sorunlara çözüm olarak görülebilir.
- **Acil Durum Ağ Tasarımı (Emergency Cognitive Network Design):** Yangın, deprem gibi acil afet durumlarında, afet bölgesiyle iletişimin sağlam ve etkili bir şekilde sağlanması gerekmektedir. Günümüz teknolojilerinde kullanılan kablosuz sistemlerde, sistemi aynı anda kullanan kullanıcı sayısı arttıkça hatta bozulmalar gözlenir. Sadece afet durumlarında devreye girebilecek bir bilişsel ağ tasarımı ile birçok spektrumun aynı anda kullanılmasına olanak tanınabilir. Böylece, hem afet bölgesiyle kesintisiz ve yüksek bandgenişliğinde iletişim sağlanabilir hem de afet durumları dışında bu ağın tasarımı durdurulacağı için maliyet açısından etkin bir yol seçilmiş olunur.
- **Askeri Ağ Tasarımı (Military Cognitive Network Design):** Gerekli görüldüğünde askeri uygulamalara olanak tanınacak bilişsel bir ağ, lisanslı kullanıcılara zarar vermeden oluşturulabilir. Askeri uygulamaların temel gereksinimlerinden olan güvenlik ve kesintisiz iletişimin sağlanması için tasarımda spektrum hareketliliği ve spektruma karar verilmesi konularında bazı iyileştirmeler yapılmalıdır.

## 2. IEEE 802.22 KABLOSUZ BÖLGESEL AĞLARI

### 2. IEEE 802.22 KABLOSUZ BÖLGESEL AĞLARI

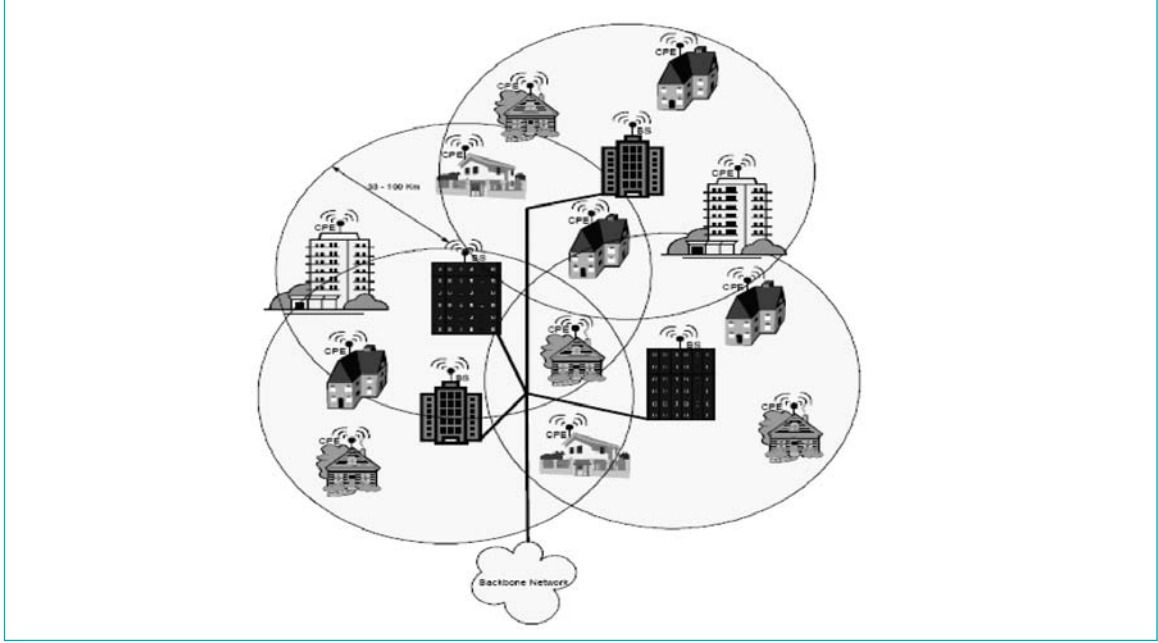
IEEE 802.22, IEEE 802 MAN/LAN grubu tarafından oluşturulan ve 802.16 standardı gibi geniş alan ağ topolojilerinde uygulanmak için geliştirilen bir standarttır. 802.22 Kablosuz Bölgesel Ağ (Wireless Regional Area Networks, WRAN) standardı, 2004 Kasım ayında oluşturulmaya başlanmış, 2008 yılının ilk çeyreğinde resmi olarak yayınlanmıştır.

802.22 WRAN standardını diğer IEEE 802 standartlarından ayıran en önemli özellik, baz istasyonunun kapsama alanının, güç kısıtlamalarının çözüldüğü bir ortamda 100 km'ye kadar çıkarılmasına olanak tanınmasıdır. Şekil-2.1'de günümüz kablosuz ağ teknolojileri ile 802.22 arasında kapsama alanı ve bandgenişliği açısından yapılan bir karşılaştırma görülebilir.



Şekil 2.1 Günümüz Kablosuz Ağlarının Karşılaştırılması [3]

802.22 standardı temelli bir ağ konfigürasyonu Şekil-2.2'de görülmektedir. 802.16d standardı gibi tek noktadan çok noktaya (Point-to-Multipoint, PMP) şeklinde bir topolojik yapısı olan 802.22 ağları, bir baz istasyonu (Base Station, BS) ve onun kapsama alanında çalışan kullanıcılardan (Customer Premise Equipment, CPE) meydana gelmektedir. 802.22 ağlarında, 802.16 PMP ağlarından farklı olarak, kapsama alanını genişletilmiştir. Şekil-2.1'de görüldüğü gibi, kapsama alanı 20-100 km arasında değişebilen 802.22 ağları, bu özelliğini OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) temelli fiziksel iletişim kanal paylaşımı, gelişmiş modülasyon tekniklerinin sistemle bütünleştirilmesi ve düşük frekansta çalışma gibi tasarım tekniklerinin kullanılmasıyla kazanmaktadır.



Şekil 2.2 802.22 Temelli Bir Ağ Topolojisi [3]

802.22 standardı temelli ağlarda iletişim, 54-862 MHz aralığındaki TV frekans spektrumunda sağlanmaktadır. Bu spektrumdaki herhangi bir frekansta iletişim yapan TV istasyonlarıyla girişim yaratmadan çalışmayı hedef alan 802.22 standardı, bu özelliği sağlamak için "Dinamik Spektrum Erişimi (Dynamic Spectrum Access)" ya da "Bilişsel Radyo (Cognitive Radio)" teknolojisi kullanmaktadır. Dolayısıyla, bu standartta yapılan akademik çalışmalar öncelikle, bilişsel radyo teknolojisini temel alan kablosuz ağlara dayandırılmıştır.

## 3. BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM YÖNETİMİ

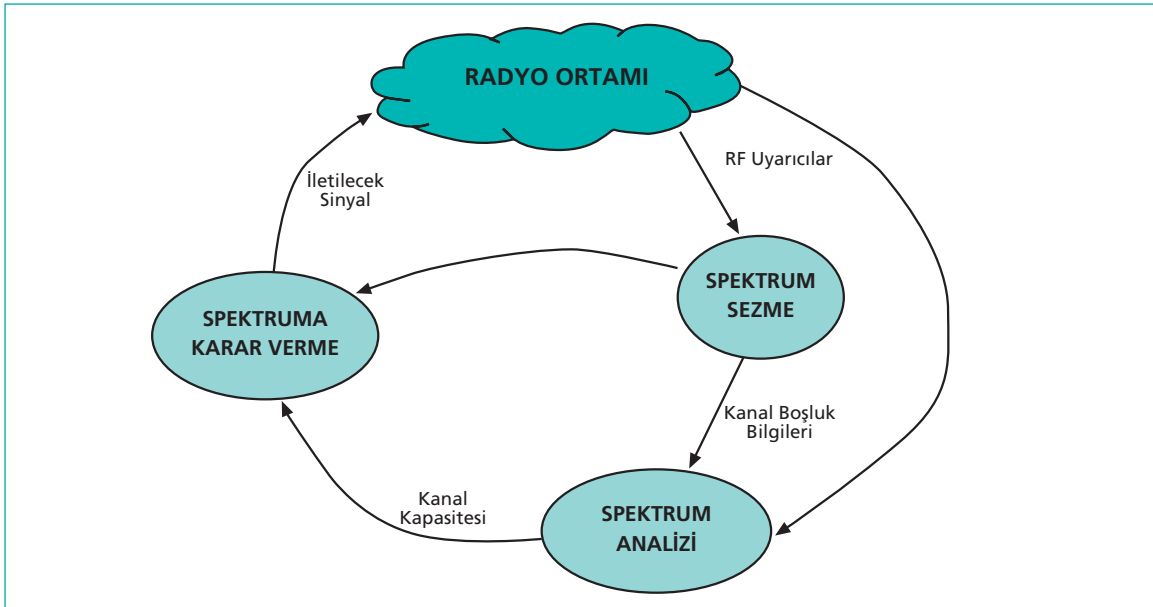
### 3. BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM YÖNETİMİ

Bilişsel Radyo Ağlarında spektrum yönetimi, spektrumu kullanma hakkına sahip birincil kullanıcılara engel olmadan, elverişli spektrum bandlarının bulunması ve bunun ikincil kullanıcılar arasında paylaşılması olarak tanımlanabilir [1]. Buradaki elverişli spektrum bandları, değişik spektrum sezme teknikleriyle belirlenir [7]. Elverişli spektrum sadece hattın zaman değişim karakteristiklerine göre değil, birincil kullanıcıların spektrumu kullanma aktivitelerine göre de değişiklik gösterir.

İkincil kullanıcılar (Bilişsel ağ kullanıcıları) için elverişli spektruma erişim teknikleri, bilişsel radyonun en uygun spektrum bandını seçmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yapılabilmesi için aşağıdaki işlevler gerçekleştirilmelidir [1,6,7]:

1. Spektrum Analizi ve Spektrum Sezme (Spectrum Sensing): Kullanılmayan spektrum bandlarının saptanabilmesi ve bu bandların, birincil kullanıcıların iletişimine engel olabilecek çakışmalara sebep olmadan ikincil kullanıcılarla paylaşılabilmesidir.
2. Spektrum Seçme (Spectrum Decision): Bilişsel ağ kullanıcıları tarafından sezilen birden fazla spektrum boşluğu varsa bunlardan en uygun olanının bilişsel ağ kullanıcılarının istediği servis kalitesine göre seçilmesidir.
3. Spektrum Hareketliliği (Spectrum Mobility): İkincil kullanıcıların spektrumun gerçek sahibi geldiğinde spektrumunu değiştirebilmesidir.
4. Spektrum Paylaşma (Spectrum Sharing): Aynı spektrum bandını kullanan ikincil kullanıcılar arasında hem adil hem de yüksek debili bir paylaşım sağlanabilmesidir.

Yukarıda maddelenen işlevlerin gerçekleştirildiği Bilişsel Çevrim (Cognitive Cycle) Şekil-3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1 Bilişsel Çevrim [1,2]

Radyo ortamından alınan RF uyarıcılar, spektrum sezme yöntemleriyle incelenmekte ve spektrumdaki birincil kullanıcıların karakteristikleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu karakteristiklerle spektrum kanalında ki olası boşluklar saptanır. Buradan elde edilen kanal boşluk bilgileri, analiz edilmek üzere spektrum analizine girer. Burada, ikincil kullanıcıların servis isteklerine, spektrumun RF özelliklerine ve birincil kullanıcıların spectrum bandına geri dönme ihtimallerine de bakılarak, bilişsel ağın kullanabileceği tam bir boş spektrum band kapasitesi ve kullanılabilirliği çıkarılır. Boş band kapasitesi ve kanal boşluk bilgileri, ikincil kullanıcılar için en elverişli bandın tahsis edilmesi için kullanılır. Bu elverişli bandlar Şekil-3.1'de ki bilişsel çevrimde de görüldüğü gibi spektruma karar verme yöntemleriyle gerçekleştirilir.

### 3.1. Spektrumun Sezilmesi

Bilişsel radyo ağlarında son yıllarda yapılan çalışmalarda, birincil kullanıcı aktivitelerinin Poisson Dağılımıyla modellendiği görülmüştür [8,11,12,15,17]. Bu modelde, paketlerin geliş zamanının üstel dağılıması söz konusudur. Ancak, Poisson yaklaşımı, birincil kullanıcı aktivite bilgilerinin bilişsel ağlar için çok etkin olmayacak şekilde modellenmesine sebep olur. Poisson modelinde, birincil kullanıcı aktivitelerindeki kısa zamanlı değişimler ihmal edilmektedir. Bu model, trafiğin uzun süreli örneklenmesi halinde, trafiği pürüzsüz ve yalın bir süreç olarak modeller [9,14]. Bununla beraber, [18]'de yapılan çalışma, uzun süreyle analiz edilen birincil kullanıcıların Poisson yaklaşımıyla modellenmesinin, sürekli değişkenlik gösteren trafik tipleri için verimli ve etkin bir yöntem olmadığını, deneysel bir şekilde ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada, ayrıca, birincil kullanıcı trafiğinin kısa zaman dilimlerinde de çok fazla değişim gösterebileceği belirtilmiş, bu değişimlerin sonucunda ortaya çıkabilecek spektrum boşluklarının, ikincil kullanıcılar tarafından bilişsel ağ trafiği için değerlendirilebileceği ispatlanmıştır. Burada belirtilen çalışmaların neticesinde, ikincil kullanıcıların, hattın lisanslı sahiplerinin aktivitelerinin kısa zaman dilimlerdeki değişimlerini de incelemesi ve modellemesi gerektiği sonucuna varılabilir [4].

### 3.2. Spektrum Seçimi

Bilişsel Radyo Ağlarında, ikincil kullanıcılar, birincil kullanıcıların spektrumu kullanma aktivitelerine bakarak boş spektrumları modelledikten sonra, kendi servis istekleri için en uygun ve elverişli bandların seçimini yaparlar [2,5,6,10,11]. Spektrum Seçimi de denilen bu özellik Şekil-3.1'de gösterilmiştir. İkincil kullanıcılar için tasarlanabilecek bir spectrum seçme algoritmasında, hem birincil kullanıcı aktivitelerinin kısa zamanlı değişimleri, hem de ikincil kullanıcıların servis kalite istekleri göz önüne alınmalıdır [3].

İkincil kullanıcıların heterojen servis isteklerini birçok sınıf altında birleştirmek mümkündür. Bu sınıflandırmalar, aşağıdaki gibi değişik kullanıcı tiplerine ayrılabilir [3,13]:

- Sabit hızla veri gönderen kullanıcılar (Constant Bit Rate)
- Video-Konferans kullanıcıları
- VoIP kullanıcıları
- Best-Effort kullanıcılar (BE).

Kullanıcılar servis kalite isteklerine göre tasarlanan bir spectrum seçme algoritmasında ayrıca, bilişsel ağdaki tüm kullanıcılar arasında adil spektrum dağılımı ve en yüksek debili spektrum kullanımı da amaçlanmalıdır [1,3,11,16]. Spektrum seçimiyle ilgili yapılan [16] çalışmasında, ikincil kullanıcıların servis istek sınıfları ikiye ayrılmıştır. Bunlar gerçek zamanlı kullanıcılardan gelen trafik ve Best-Effort kullanıcılardan gelen trafiktir. Bu iki tip kullanıcıları dikkate alarak tasarlanan yapıda, kullanıcılar için bir spektrum seçme optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca [16]'da tasarlanan sistem ve algoritmada, ikincil kullanıcıların debi ve gecikme gibi servis kalitesi parametreleri de dikkate alınmış, iki değişik kullanıcı tipi için bu parametrelerin optimizasyonu yapılmıştır. [15]'de, iletişim kaynakları sınırlı olan kullanıcılardan oluşan bir bilişsel ağ yapısı için bir spektrum atama mekanizması tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sistemde, kullanıcılar arasındaki adaletli dağıtım ve spektrum kullanım parametreleri incelenmiş, bu incelemeler tıpkı [11]'deki gibi temel iki tipte (gerçek zaman ve BE) kullanıcılar için verilmiştir. [16] ve [19]'daki çalışmalarda ise, kullanıcılar arasında yardımlaşma kullanılarak, spektrum dağıtım adaleti ve spektrum atanması üzerine bir optimizasyon algoritması verilmiştir. Bu bahsedilen çalışmalara bakılacak olunursa, üzerinde çalışılabilecek en önemli noktalardan biri, değişik kullanıcı tiplerine göre bilişsel ağda oluşturulan spektrum seçme mekanizmasıdır [3,13].





## 4. BİRİNCİL KULLANICILARIN MODELLENMESİ

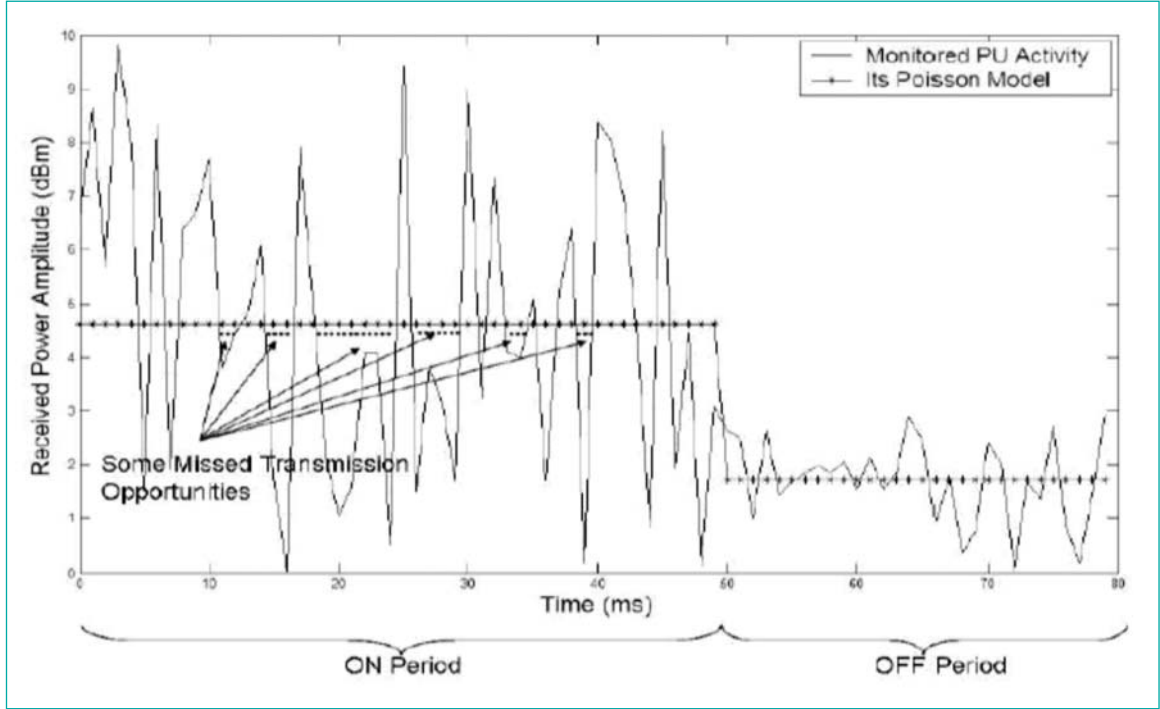
### 4. BİRİNCİL KULLANICILARIN MODELLENMESİ

Bilişsel Ağlarda son yıllarda yapılan akademik çalışmalarda, birincil kullanıcılar için Poisson modeli kullanılmıştır. Paketlerin gelme sürelerinin üstel dağılım gösterdiği bu model, birincil kullanıcı dasetindeki korelasyon ve benzerlikleri ihmal etmektedir [20]. Böylece, Poisson modeli kullanılarak oluşturulan birincil kullanıcı aktivitesi pürüzsüz ve kısa zaman dilimlerinde değişme göstermeyen bir yapıda oluşur. Böyle bir band kullanımını dikkate alarak banddan yararlanmak isteyen ikincil kullanıcılar, elverişli spektrum boşluklarının bazılarında faydalanamazlar [22]. Bu durum, bilişsel ağ debisinin düşmesine, aynı zamanda birincil kullanıcıların yanlış tespit edilmesine sebep olur. Bunlar dikkate alınarak, birincil kullanıcıların kısa zamanlı değişimleri, aktivitenin karakteristiğinde kibenzelik ve korelasyon gibi matematiksel bağlantıları kullanarak yeni bir model tasarlanmıştır [4]. Bu modelde, bir birincil kullanıcı indeks'i (Primary User Activity Index),  $\rho$ , tasarlanmıştır. Bu indeks, birincil kullanıcı dasetinde yapılan Birincil Kümeleme Filtrelemesi (First-Difference Filter) ve datanın korelasyonu kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yeni model ile, Poisson modeline göre çok daha yüksek bir debi, birincil kullanıcıların doğru tahmin edilme olasılığında artış ve çok daha düşük bir tahmin hatası sağlamıştır.

#### 4.1. Bu Çalışmanın Temel Motivasyonu

Poisson modelinin, birincil kullanıcı aktivitelerinin kısa zaman dilimlerindeki değişimleri ihmal etmesi Şekil-4.1'de gösterilmiştir. Burada, trafiğin sinyal seviyesinin (y eksenini) zaman ekseninde (x eksenini) değişimi ve onun Poisson modeli belirtilmiştir. Model, birincil kullanıcının spektrumunda var olduğu ('ON') 4.8 dbm'lik sabit bir enerjiyle belirlemiş, spektrumunda birincil kullanıcının olmaması ise ('OFF') 1.8 dbm ile gösterilmiştir. Şekil-4.1'de görülen OFF periyodu, ikincil kullanıcıların spektrumu kullanabileceği zaman dilimini ifade eder. Buradan görülebileceği gibi, birincil kullanıcılar Poisson modeliyle ifade edilirse, ikincil kullanıcılar sadece OFF periyodunda hattı kullanabilir durumda olurlar. Oysa ki, birincil kullanıcıların gerçekte gözlemlenen trafiği (Monitored PU Activity) Şekil-4.1'de görüldüğü gibi salınımlı bir karakteristik göstermektedir. Bu salınımlar, Poisson modeli uygulandığı takdirde ortalama bir değerde sabitlenecektir. Böylece, ikincil kullanıcılar bu ortalama değer altında kalan zaman dilimlerinde, gözlemlenen spektrumunda birincil kullanıcı olmamasına rağmen, birincil kullanıcı varmış gibi davranacak ve spektrumunu kullanamayacaklardır [4]. Şekil-4.1'de kaçırılan iletim fırsatları (missed transmission opportunities) olarak gösterilen bu zaman dilimleri, ikincil kullanıcı tarafından değerlendirilebilseydi, bilişsel ağdaki spektrum kullanım performansında bir artış meydana gelirdi. Bununla beraber, Poisson modeliyle yanlış modellenen spektrum boşluklarından dolayı, ikincil kullanıcılar birincil kullanıcıların iletişimlerini bozabilirler. Bu durum, Bilişsel Radyo Ağlarının temel mantığına aykırıdır.

Şekil-4.1'de görüldüğü gibi Poisson Modeli birincil kullanıcı aktivite salınımlarını ihmal etmekte ve ikincil kullanıcıları boş spektrum tespit etme konusunda yanıltmaktadır. Bunun yanında, dolu spektrum tespit etme konusundaki bir yanlışlıkla, birincil kullanıcıların iletişimine de engel olunabilir. Bu sebeplerden ötürü, yeni bir birincil kullanıcı modellemesi ihtiyacı oluşmaktadır. Tasarlanan yeni model ile, yukarıda bahsedilen Poisson Modeli'nin eksik yanlarının giderilmesi amaçlanmaktadır [4]. Birincil kullanıcıların salınımlarının sezilmesi ve modellenmesi bir kümeleme algoritması tasarlanarak gerçekleştirilmiştir (First-Difference Filter Clustering). Elverişli spektrum boşluklarının matematiksel olarak modellenmesi ise, aktivite dasetinin korelasyon bağıntısı kullanılarak (Correlation) hesaplanmıştır. Bunun sonucunda elde edilen 'Birincil Kullanıcı Aktivite İndeksi (Primary User Activity Index)',  $\rho$ , spektrumdaki aktivite oranını gösterir.



Şekil 4.1 Poisson Modelinde Kullanılmayan Spektrum Boşlukları [6]

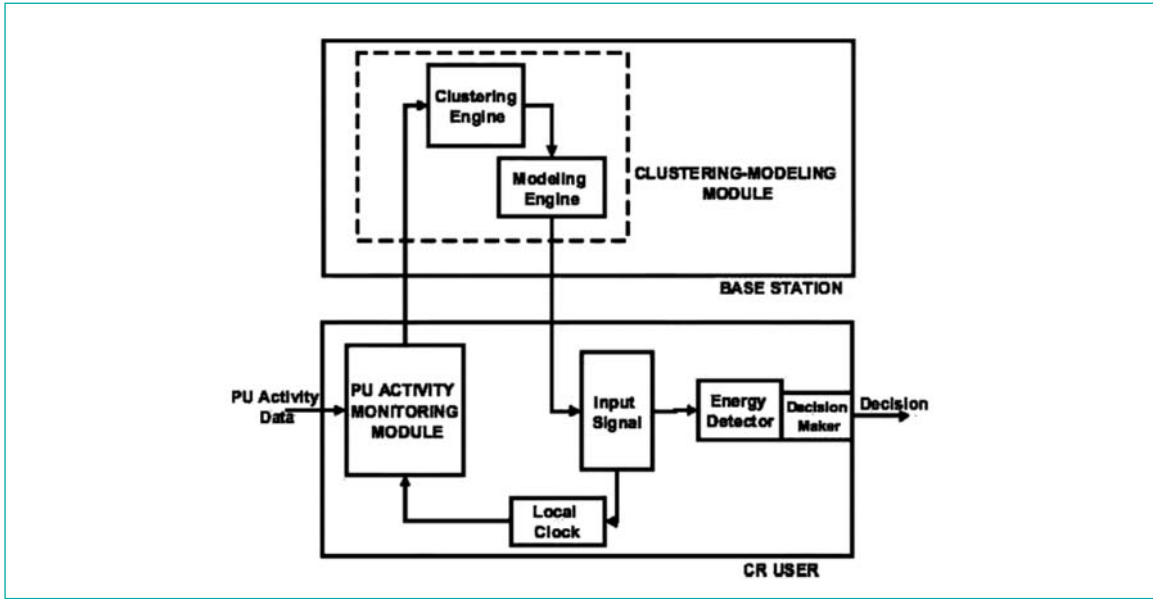
#### 4.2. Tasarlanan Sistem

Birincil kullanıcı aktiviteni modellemek için tasarlanan sistem Şekil-4.2'de gösterilmiştir [4]. Bu sistem 5 ayrı modülden oluşmaktadır. Bu modüller ve açıklamaları şu şekildedir:

1. Birincil Kullanıcı İzleme Modülü (PU Activity Monitoring Module) : Bu modül, lisanslı spektrumdan belirli bir süre örneklem toplar. Bu işlem, ağdaki ikincil kullanıcılar tarafından gerçekleştirilir. Toplanan örneklem, bilişsel ağın baz istasyonuna gönderilir. Baz istasyonu Kümeleme ve Modelleme Modülünü etkin hale getirerek yeni modeli hesaplar.
2. Kümeleme-Modelleme Modülü (Clustering-Modeling Module) : Bu modül, toplanan birincil kullanıcı aktivite bilgisi kullanarak Birincil Kullanıcı Aktivite İndeksini hesaplar. Bu indeks hesaplanırken geliştirilen iki ayrı algoritma kullanılır. Bunlar:
  - a. Kümeleme Motoru (Clustering Engine)
  - b. Modelleme Motoru (Modeling Engine)
3. Yöresel Sayaç (Local Clock): Tasarlanan sistemin adaptif bir yapı sağlaması açısından geliştirilmiştir. Bu sayaç, toplanan ve modellenen belirli bir örneklemden sonraki örneklem toplama eylemini başlatır.
4. Giriş Sinyali (Input Signal): Modellenen aktivite bilgisi, spektrum enerjisini hesaplamak üzere giriş sinyaline dönüştürülür.
5. Spektrum Enerji Hesaplama ve Karar Modülü (Energy Detector-Decision Maker): Modellenen sinyal, 'hatta kullanıcı var (BUSY)' veya 'hatta kullanıcı yok (IDLE)' şeklinde bir karar alınmak üzere işlenir.

### 4.3. Sistemin Çalışması

Şekil-4.2'te görülen sistemdeki Birincil Kullanıcı İzleme Modülü, ikincil kullanıcılarda bulunmaktadır. Bilişsel ağ'da bulunan kullacılardan herbiri, 6 MHz'lik bir spektrum bandını belirli bir süre izler ve örneklem toplar. Toplanan bu örneklemelerin oluşturduğu p boyutlu vektör, Kümeleme-Modelleme Modülüne gönderilir. Bu modül baz istasyonunda bulunmaktadır. Tasarlanan iki algoritma ile örneklem önce kümelendirir sonra da modellenir. Kümeleme algoritması, belirli bir kümeleme katsayısı kullanarak örneklenen sinyali kümelere yerleştirir. Bu kümeler, belirli bir zamansal koralasyon fonksiyonundan geçirilerek matematiksel olarak birbirleriyle olan ilişkisi hesaplanır. Bunun neticesinde, spektrumun ne kadar süre boş, ne kadar süre dolu olduğu belirlenmiş olur. Bu hesaplama sonucunda bulunan birincil kullanıcı aktivite indeksi sayesinde, hattın meşgul ve boş olma olasılıkları (P\_BUSY ve P\_IDLE) elde edilir. Bu noktadan sonra, işlenen örneklem, hesaplanan birincil kullanıcı aktivite indeksi, P\_IDLE ve P\_BUSY, spektrum analizine sokulur. Burada, hattın boş veya dolu olma durumuna karar verilerek ikincil kullanıcıların iletişime geçip geçmeme kararı alınır. Tasarlanan bu model, belirli bir p boyutlu vektör için yapılmış olup, bu işlem bittikten sonra yerel sayaç yardımıyla yeni bir örneklem alınır.



Şekil 4.2 Tasarlanan Sistem [6]

### 4.4. Bulunan Temel Sonuçlar

Tasarlanan yeni sistemin oluşturduğu model, Bilişsel radyo ağ literatüründe çok sık kullanılan Poisson Modeliyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma 3 değişik parametreyle yapılmıştır. Bu parametreler şunlardır:

1. Ortalama Hata (Mean Squared Error, MSE): Hattan toplanan birincil kullanıcı örneklemeyle, hesaplanan model arasındaki hata oranını hesaplamak için kullanılan bir parametredir.
2. Yanlış Alarm Olasılığı (False Alarm Probability, Pf): Yanlış alarm, spektrum bandını kullanan birincil kullanıcı olmamasına rağmen ikincil kullanıcıların hattın dolu olduğunu zannedip kullanmamasıdır. Bu olasılık, birincil kullanıcıların aktivitesine bağlı olduğu için, değişik modellemelerde ağın performansının incelenmesinde kullanılabilir.

3. İkincil Kullanıcıların Debisi (Throughput, T): Elverişli spektrum bandının ikincil kullanıcılar tarafından elde edilmesinden sonra ölçülen ikincil kullanıcı trafik miktarıdır.

Tasarlanan Birincil Kullanıcı modeli ve kullanıcı aktivite indeksi ( $\phi$ ), 0-1 arasında bir değer almakta olup, iki ayrı algoritma yardımıyla (Kümeleme ve modelleme algoritmaları) geliştirilmiştir. Dolayısıyla, algoritmaların aktivite indeksine etkilerini görmek için iki alt indeks oluşturulmuştur. Bunlar  $\phi_1$  ve  $\phi_2$  dir.  $\phi_1$  Kümeleme algoritmasının etkisini göstermekte,  $\phi_2$  ise modelleme algoritmasının etkisini göstermektedir.

Oluşturulan modelin Poisson Modeliyle karşılaştırılması Tablo-1'de gösterilmiştir. Görüleceği gibi, tasarlanan model ve matematiksel olarak oluşturulan birincil kullanıcı aktivite indeksi, Poisson Modeline göre, ortalama hatada (MSE) ve yanlış alarm olasılığında ( $P_f$ ) daha az değerler çıkarmış, debide (T) ise Poisson Modeline göre daha yüksek değerler bulunmasını sağlamıştır. Her üç parametre için, tasarlanan model Poisson Modeline göre %25- %50 arasında bir başarımla iyileştirmesi gerçekleştirmiştir.

**Tablo 4.1** Bulunan Temel Sonuçlar

	<b>MSE</b>	<b><math>P_f</math></b>	<b>T (bps/Hz)</b>
<b>Poisson Modeli</b>	0.65	0.67	4.1
<b>Tasarlanan Model <math>\phi_1</math></b>	0.32	0.38	5.4
<b>Tasarlanan Model <math>\phi_2</math></b>	0.33	0.5	5.2
<b>Başarım İyileşme Oranı (<math>\phi_1</math> için)</b>	50	43	31
<b>Başarım İyileşme Oranı (<math>\phi_2</math> için)</b>	49	25	26

## 5. BİLİŞSEL AD-HOC AĞLARDA DİNAMİK VE AĞIRLIKLI BİR SPEKTRUM KARAR MEKANİZMASI

### 5. BİLİŞSEL AD-HOC AĞLARDA DİNAMİK VE AĞIRLIKLI BİR SPEKTRUM KARAR MEKANİZMASI

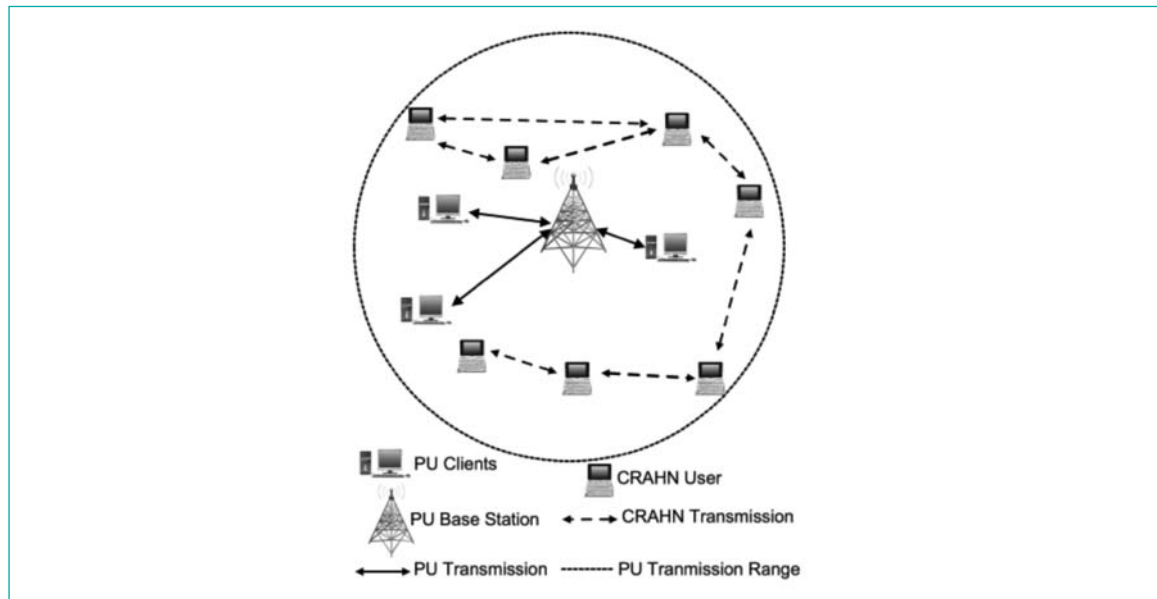
Bu bölümde, bilişsel radyo (cognitive radio) ağlarında spektruma karar verme problemi üzerinde durulmuş ve bu ağlarda spektruma karar vermeye yönelik bir çözüm geliştirilmiştir [7].

#### 5.1. Bu Konuda Literatürde Yapılan Çalışmalar

Bilişsel Ağlarda elverişli spektruma karar verilmesi bazı çalışmalarda incelenmiştir. [16]'de, bir optimum spektrum karar mekanizması geliştirilmiştir. Bu yapılırken, ikincil kullanıcıların temel servis istekleri, yani gerçek-zaman ve 'Best-Effort', oldukları varsayılmış, servis istekleri detaylandırılmamıştır. Ayrıca birincil kullanıcılar modellenirken yine Poisson modeli kullanılmış, kısa zamanlı salınımlar ihmal edilmiştir. [15]'de ise bir spektrum karar algoritması geliştirilmiş, fakat bu algoritmanın sadece belirli ilişsel ağ topolojileri için geçerli olduğu belirtilmiştir. [16]'da geliştirilen spektrum karar tekniği, bilişsel ağdaki hattın kullanıcılar arasında adaletli dağıtımı ve kullanıcı debileri göz önüne alınarak tasarlanmış, fakat kullanıcıların servis kalite istek tipleri detaylı bir şekilde sınıflandırılmamıştır. [17]'de verilen optimum spektrum karar algoritmaları ise Poisson temelli birincil kullanıcılar kullanarak geliştirilmiş, kısa zamanlı salınımlar ihmal edilmiştir. Burada belirtilen eksik noktaların bu projede tasarlanacak olan tekniklerle giderilmesi ve bilişsel ağ başarımının artırılması hedeflenmiştir.

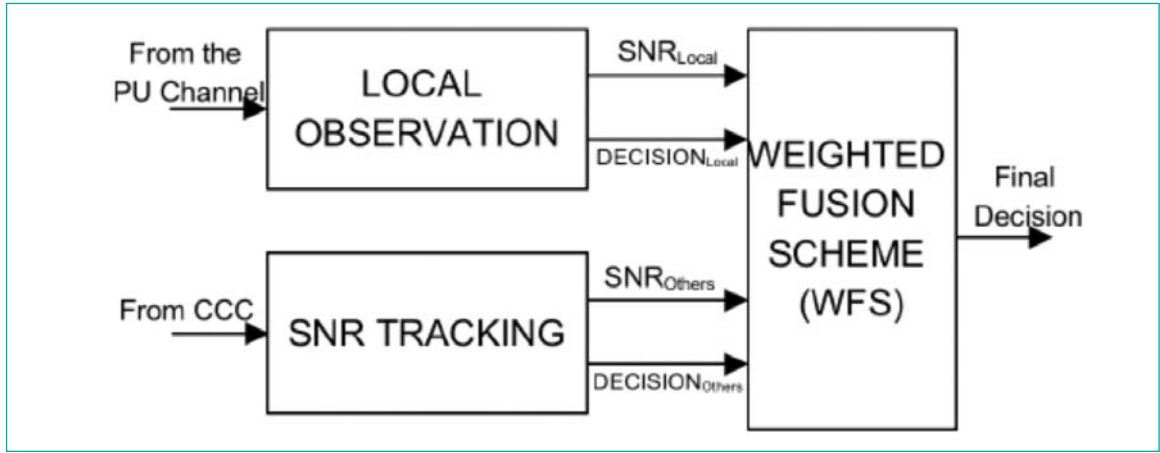
#### 5.2. Tasarlanan Sistem

Tasarlanan sistemin [7] uygulandığı topoloji Şekil-5.1'de görülmektedir. Sistem bir bilişsel Ad-Hoc ağı üzerine kurulmuştur. Bu ad-hoc ağı, hattın gerçek sahibi olan birincil kullanıcı ağının kapsama alanında bulunmaktadır. Birincil kullanıcı ağı, merkezi bir yapıya sahip olup, tüm kullanıcılar bu merkez, baz istasyonu, aracılığıyla konuşmaktadırlar [6].



Şekil 5.1 Tasarlanan Sistemin Uygulandığı Ağ [7]

Verimli bir spektrum kararı vermek için tasarlanan sistem, Şekil-5.2'de gösterilmiştir. Bu sistem, temel olarak 3 kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi "Local Observation" modülüdür. Bu modül, her bilişsel kullanıcının kendi olanaklarıyla yaptığı spektrum hissetme sonucunda elde ettiği bilgileri içerir. Bu bilgi, spektrumdan ölçülen SNR (Signal to Noise Ratio) değeridir. Her kullanıcı, kendi bulunduğu konuma ve zamana göre değişiklik gösteren birincil kullanıcı kanalını dinleyecektir. Bu kanal heterojen bir özellik gösterir; yani kanalda meydana gelecek gürültü ve sönümlenme değerleri her kullanıcı tarafından farklı algılanacaktır. Dolayısıyla, bir bilişsel kullanıcıya göre, o spektrumun gerçek sahibi olan birincil kullanıcının aktivitesi değişiklik gösterecektir. "Local Observation" modülü bu bilgileri toplamakla görevlidir.



Şekil 5.2 Tasarlanan Sistem [7]

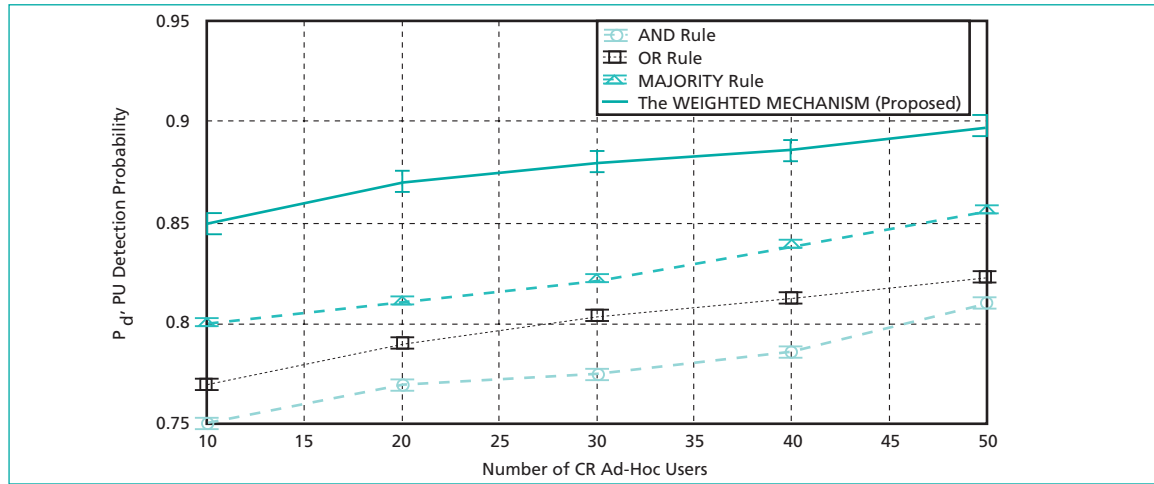
Tasarlanan sistemdeki bir başka modül, bir mesajlaşma sistemi olan "SNR Tracking" modülüdür. Bu modül bilişsel kullanıcılar arasındaki iç iletişimi sağlar. Her bilişsel kullanıcı, spektrum hakkındaki bilgilerini bu mesajlaşma sistemi aracılığıyla diğer kullanıcılara iletir. Böylece spektrum hakkında kendi SNR bilgileri yanında diğer bilişsel kullanıcıların da SNR değerlerini alan her bilişsel kullanıcı, tüm bunları kullanarak daha doğru ve emin spektrum kararları alır.

Kendisinden gelen, yani Local Observations modülünden gelen SNR ve karar bilgileri ile SNR Tracking modülünden gelen bilgilerin toplandıktan sonra son kararın verildiği modül "Weighted Fusion Scheme, (WFS)" dir. Bu modül, her kullanıcıdan SNR ölçümlerini ve lokal spektrum kararlarını alır. Bunların hepsini toplayarak son kararı verir. Bu kararı verirken, her bilişsel kullanıcının lokal olarak ölçtüğü SNR değerlerini kullanarak bir ağırlıklandırma yapar. Bu ağırlıklandırmaya dayanarak, yine her bilişsel kullanıcının kararlarını toplar ve son kararını verir. Bu karar, tüm kullanıcılardan gelen lokal SNR değerlerine bağlı olarak hesaplanan ağırlıklarla hesaplandığı için, daha kesin ve gerçekçidir. Her kullanıcı farklı SNR değerleri ölçeceği için, bir kullanıcının yanlış olarak hesaplayacağı spektrum kararı, doğru karar veren bilişsel kullanıcıları etkilemeyecektir.

### 5.3. Sonuçlar

Bu bölümde, tasarlanan sistem ile ilgili yapılan başarımların incelemeleri üzerinde durulacaktır. Sistemde, spektrumda birincil kullanıcı var kararı ikili sistemde 1, bilişsel kullanıcı yok kararı ise 0 olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem bir spektrum karar mekanizması olduğundan, Bilişsel ağlarda kullanılan temel karar mekanizmalarıyla karşılaştırılacaktır. Bunlar AND, OR ve MAJORITY denilen üç mekanizmadır [9]. AND (VE) mekanizması, tüm bilişsel kullanıcılardan toplanan kararların mantıksal VE işlemine tutulması sonucu elde edilen bir karardır. Bu mekanizmada, spektrum kararını sadece bir bilişsel kullanıcı 0 olarak verse bile, bu durum final kararının 0 olmasını gerektirecektir. OR (VEYA) mekanizması, tüm bilişsel kullanıcılardan toplanan kararların mantıksal VEYA işlemine tutulması sonucu elde edilen bir karardır. Bu mekanizmada, spektrum kararını ancak tüm bilişsel kullanıcılar 0 olarak verirse final kararı 0 olarak oluşturur. MAJORITY mekanizması ise, çoğunluğun kararı anlamına gelir. Yani, sistemde olan bilişsel kullanıcı sayısının yarısından bir fazla sayıda 0 kararı çıkarsa, final kararı 0 olacaktır.

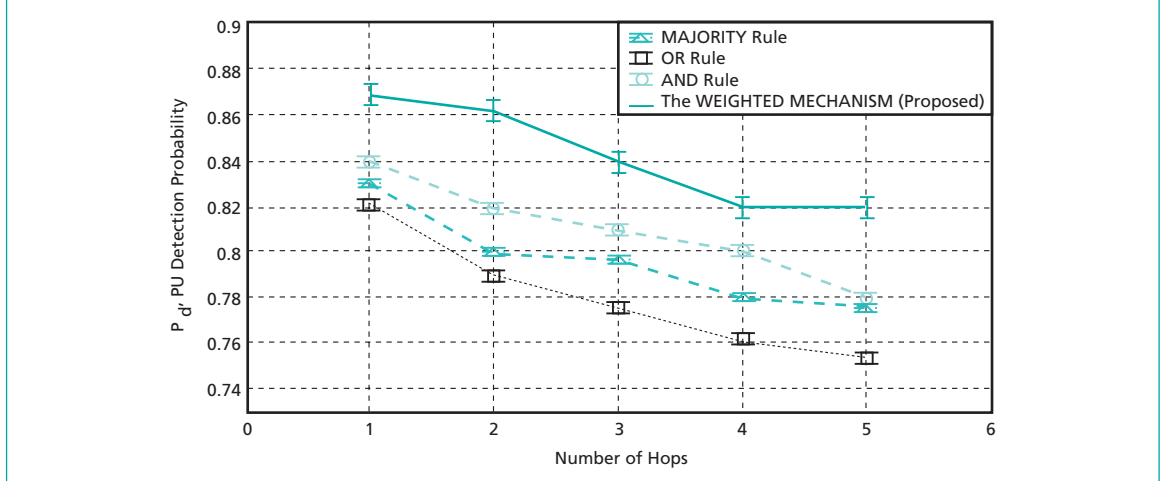
Şekil-5.3'te bilişsel kullanıcı sayısına göre, birincil kullanıcıyı doğru tahmin etme olasılıkları her 4 mekanizma için görülmektedir. Önerilen ağırlıklı spektrum karar mekanizması, AND, OR ve MAJORITY mekanizmalarından daha iyi sonuç vermektedir. Ayrıca, kullanıcı sayısı arttıkça, tüm bu mekanizmalardaki birincil kullanıcıyı doğru tahmin etme olasılığının arttığı da bu grafikte görülmektedir. Sistemde bilişsel kullanıcı sayısı artması, daha fazla kullanıcının değişik SNR ölçümleri alması anlamına gelmekte, bu da daha çok örneklem oluşması demektir. Böylece, hattın doğru tahmin edilme olasılığı da artış gösterecektir.



Şekil 5.3 Bilişsel Kullanıcı sayısına göre birincil kullanıcıyı doğru hissetme olasılığı [7]



Şekil-5.4'te ise, birincil kullanıcıyı doğru tahmin etme olasılığının, mesajların hop sayısına göre değişimi gösterilmiştir. Burada, mesajların gittiği hop sayısı arttıkça, iletim gecikmesi yaşanacağı için doğru tahmin olasılığı düşecektir. Ama tasarlanan sistem, AND,OR ve MAJORITY sistemlerine göre dah başarılı sonuç vermiştir.



Şekil 5.4 Bilişsel Kullanıcıların mesajlarının ulaştığı düğüm sayısına göre birincil kullanıcıyı doğru hissetme olasılığı [7]

## 6. IEEE 802.11 BİLİŞSEL AĞLARDA DİNAMİK FREKANS KANALI ATAMASI

### 6. IEEE 802.11 BİLİŞSEL AĞLARDA DİNAMİK FREKANS KANALI ATAMASI

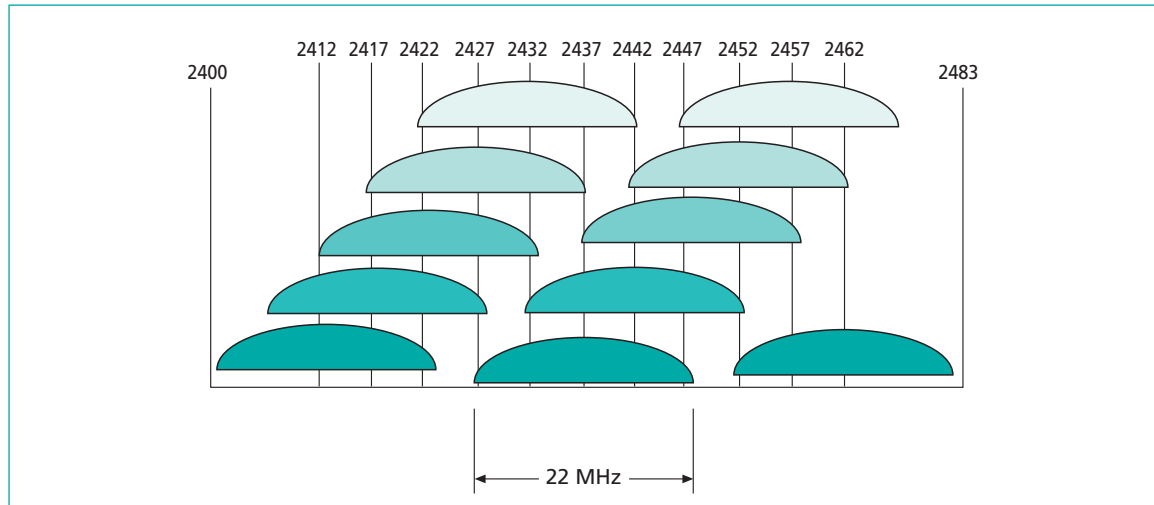
Bilişsel radyoların çalışma alanlarından biri de 802.11 tabanlı kablosuz ağlardır. Yapısal 802.11 tabanlı kablosuz ağlar, kendi ağlarındaki birimlerle haberleşmek için belirli bir kanalda çalışan erişim kontrol üniteleri kullanımını gerektirmektedir.

Bu çalışmada [4], tasarlanmış ve uygulanmış bilişsel erişim kontrol ünitesi için en iyi veri iletim kanalının seçilmesi üzerine odaklanılmıştır. Ayrıca kablosuz ağların ortak olarak kullandığı kablosuz ortamda, kanallar arası girişimin önemli bir sorun olduğu gösterilmiştir. Bunun yanında kanal seçim sisteminde daha da iyileşme yapılarak, sadece bizim bilişsel erişim kontrol ünitemizin performansını arttırarak değil, komşu ağlarla birlikte tüm sistemin performansını arttıracak şekilde komşu ağlara da kanallar atayan bir sistem tasarlanmıştır. Kanal atamaları yapılırken ortamdaki kanalların kullanım oranı karakteristikleri, ağların trafik yükleri ve kanallar arasındaki girişim gerçeği göz önünde bulundurulmuştur. Gerçek test ortamında yapılan test uygulamalarıyla tüm sistemin performansının arttırıldığı gösterilmiştir. Test sonuçları ayrıca önerilen kanal atama uygulamasının, ağlar arasındaki spektrum paylaşımını adil bir şekilde başardığını göstermiştir.

Bilişsel Radyo Ağlarında spektrum yönetimi, spektrumu kullanma hakkına sahip birincil kullanıcılara engel olmadan, elverişli spektrum bandlarının bulunması ve bunun ikincil kullanıcılar arasında paylaşılması olarak tanımlanabilir [1,2,3,5]. Buradaki elverişli spektrum bandları, değişik spektrum sezme teknikleriyle belirlenir [16,17]. Elverişli spektrum, sadece hattın zaman değişim karakteristiklerinden değil, birincil kullanıcıların spektrumu kullanma aktivitelerine göre değişiklik gösterir [4].

#### 6.1. Bu Konuda Literatürde Yapılan Çalışmalar

IEEE 802.11'de bilişsel ağ tasarımı beraberinde kullanıcı sinyallerinin girişimi ve frekans atama problemlerini de getirmiştir. Bu frekans atamaları da girişimden minimum etkilenilecek şekilde geliştirilmelidir. Frekans atamalarının, özellikle girişimi arttırıcı yönde bir etkisinin olması, kullanıcı sayısının artmasıyla ortaya çıkmıştır. Kullanıcıların radyo frekanslarının seviyesi ve enerjisi, kanalların önceden belirlenen sınırlarının dışına çıkmasıyla beraber girişimi tetikleyen önemli bir unsur haline gelmiştir. Şekil-6.1'de kanalların değişik enerji seviyelerine göre dağılımı görülmekte olup, birbirine girişim yapabilecek kanallar hakkında bir fikir sahibi olunur [9].



Şekil 6.1 Kanalların Band Genişlikleri ve Enerji Seviyeleri [4]

802.11 Erişim noktaları (Access Point, AP), 11 kanal arasından bir çalışma frekans bandını belirler. Bu frekans bandını belirlerken diğer kanallarla minimum girişim olması istenir. Bundan dolayı ortogonal frekans bandlarından tercihini yapar. 802.11 frekanslarından ortogonal olanları 1,6 ve 11 olup, erişim noktası bu üç kanaldan bir tanesini seçer. Bu üç kanal arasında en elverişlisinin seçilmesi ve kullanılmayanların başka erişim noktalarına verilmesi de 802.11 bilişsel ağ tasarıyla ilgili güncel literatürde bulunmaktadır [10,11].

[8]'de, iki kanal arasında sinyallerini güç seviyelerine bağlı bir kanal atama algoritması önerilmiştir. Burada önerilen sistemde temel amaç sistemin debisini yükseltmektir. [8]'de önerilen sistemde ise, ağ trafiğinin geçici modellerini oluşturulup, bu modellere göre kanallar atanmıştır. Yine bu sistemde de, kanalların debisinin maksimum olması amaçlanmıştır. Bu çalışmada ayrıca bir kanal değiştirme sistemi de geliştirilmiştir.

Spektrumun dinlenmesi, birincil kullanıcıların aktivitesinin takip edilmesi ve elverişli frekans bantlarının bulunması, bilişsel ağ tasarımında büyük bir öneme sahiptir [13,14]. [4,8]'de, birincil kullanıcıların trafik modellenmesinin yapılmasının önemi vurgulanmıştır. Bu bağlamda, IEEE 802.11 ağlarında kullanımda olan 11 kanalın takip edilip buradaki birincil kullanıcının debilerinin incelenmesi önemli bir çalışma olarak karşımıza çıkar. Ama, bu 11 kanalın aynı anda izlenmesi için, ağ kartlarının birden fazla arayüzü olması gereklidir, bu günümüzdeki kartlarda çok karşılaşılmayan bir tasarımdır. Bu kısıtlamaya çözüm olarak [8]'te, her bir bandın belirli periyotta izlenmesi ve bu periyotta toplanan bilgilere göre her bir kanalın modellenmesi üzerinde durulmuştur.

IEEE 802.11 tabanlı bilişsel ağlarda girişim önemli bir sorundur. Bu sorunun giderilmesi için literatürde birtakım tasarımlar geliştirilmiştir. Girişimin minimuma indirilmesi için ortogonal kanalların kullanılması sık rastlanan bir çözüm olsa da 11 kanalın sadece üçünün kullanılması çok etkin bir kanal atama stratejisi olarak gözükmemektedir [6,7,10,11]. Girişimin giderilmesi amacıyla tasarlanan sistemlerde, komşu kanallardaki aktivitenin izlenip buna göre bir atama yapılması söz konusu olabilir. Bu anlamda kanal aktivitesinin analitik olarak modellenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [11,12]. Bu çalışmalar, sadece bir erişim noktası ve onun kullanıcılarının etkin bir şekilde frekansları kullanmasına yöneliktir. Bu raporda ve [2]'de geliştirilen yöntemde ise, sadece bir erişim noktasının değil, sistemdeki tüm kullanıcı ve erişim noktalarının performansının artırılması amaçlanmaktadır. Bu yapılırken, girişim matematiksel olarak modellenmiş, kullanıcılar değişik trafik tiplerine göre sınıflandırılmıştır.

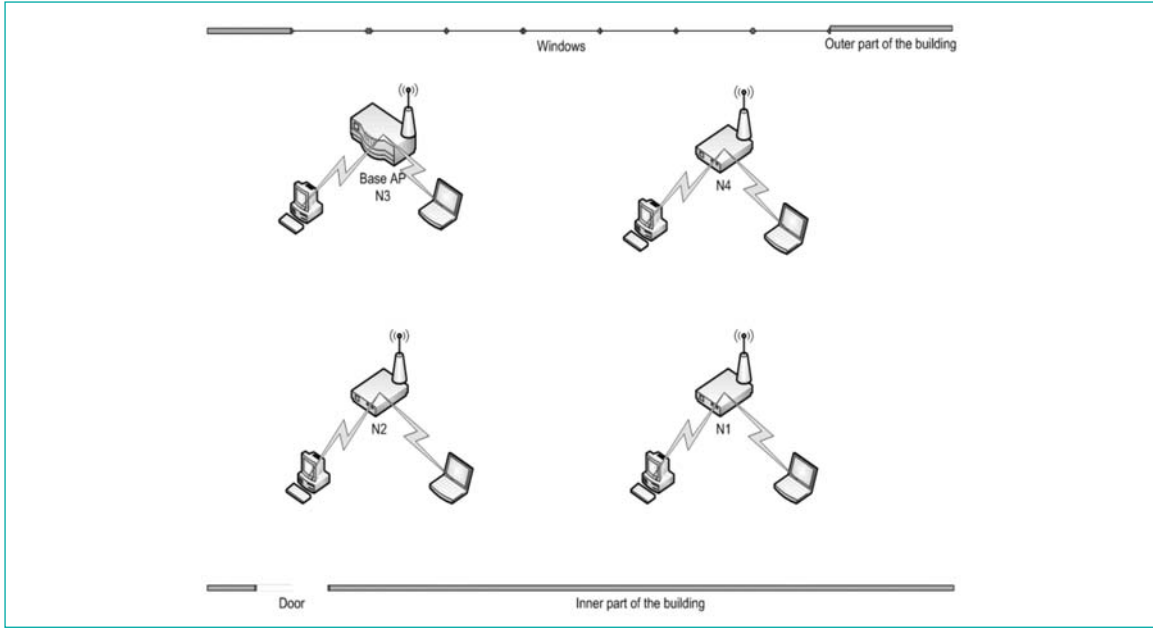
## 6.2. Tasarlanan Sistem ve Test Ortamı

802.11 bilişsel ağlardaki girişim problemini, [4]'de, tüm erişim noktalarının performansını arttırmaya yönelik çözmek amacıyla bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistemde kullanıcılar ağlarda değişik trafik tipleri kullanmakta, her trafik tipine göre debi, gecikme ve seyirme değerleri hesaplanmaktadır. Kullanıcılar 4 değişik ağda çalışırken, ağlarda çeşitli arka plan trafikler bulunmaktadır. Bu arka plan trafik tipleri şu şekildedir:

1. Ağ: HTTP Text Trafiği
2. Ağ: HTTP GIF Resim Trafiği
3. Ağ: POP3 Email Trafiği
4. Ağ: Gerçek Zaman Trafiği

Bu arka plan trafik tiplerinin varlığı altında, TCP, UDP ve RTP trafikleri koşturmakta olan kullanıcıların debi, gecikme ve seyirme parametreleri incelenmiştir.

Tasarlanan sistem, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümündeki Bilgisayar Ağları Araştırma Laboratuvarı'nda kurulan bir test ortamına uygulanmıştır. Şekil-6.2'de tasarlanan test ortamı görülmektedir.



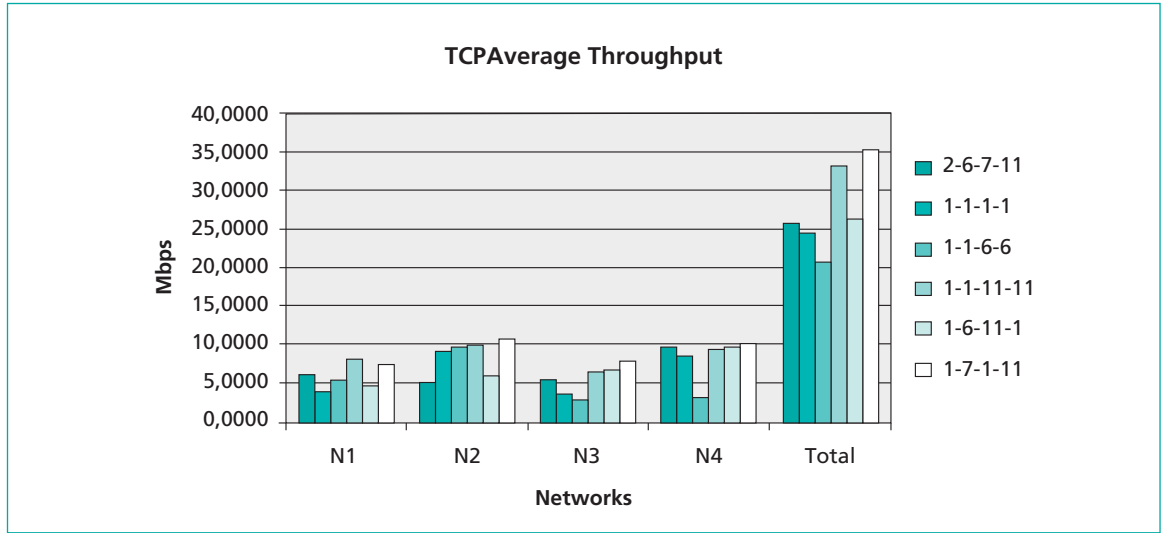
Şekil 6.2 Tasarlanan Test Ortamı [4]

Şekil-6.2'de görüldüğü gibi, kurulan test ortamı 4 adet 802.11 temelli kablosuz ağdan oluşmaktadır. Bu ağlardaki trafiklerin yaratılması için NET IQ firmasının Chariot isimli trafik üretici kullanılmıştır. Trafikler Wireshark trafik izleme aracı yardımıyla izlenmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. 4 erişim noktasından bir tanesi (Base AP) bilişsel özelliğe sahip olan bir ağ kartı yardımıyla çalışmaktadır. Bu karta, dinamik olarak frekans atama özelliğini elde etmek için tasarlanan algoritma gömülmüştür. Her ağda, yukarıda verilen arka plan trafikleri koşturulmakla beraber, ağlara özgü son kullanıcılarda ise TCP, UDP ve RTP trafikleri ayrı ayrı koşturulup bunların performansı incelenmiştir. Bu performans incelemesi, hem statik kanal atamaları için hem de önerilen dinamik kanal ataması için yapılmıştır. Bu kanal atamaları aşağıda sıralanmıştır:

- (2,6,7,11): Her Erişim noktası rastgele kanallara atanmıştır.
- (1,1,1,1): Tüm erişim noktaları aynı ortogonal kanalda çalışmaktadır.
- (1,1,6,6): Erişim noktalarından ikisi aynı ortogonal kanala, diğer ikisi ise başka bir ortogonal kanala atanmıştır. Atanan bu iki kanal birbirine en uzak noktalarda değillerdir.
- (1,1,11,11): Erişim noktalarından ikisi aynı ortogonal kanala, diğer ikisi ise başka bir ortogonal kanala atanmıştır. Atanan bu iki kanal birbirine en uzak noktalardır.
- (1,6,11,1): Her erişim noktası rastgele ortogonal kanallara atanmıştır.
- (1,7,1,11): Her erişim noktası önerilen sisteme göre kanallara atanmıştır.

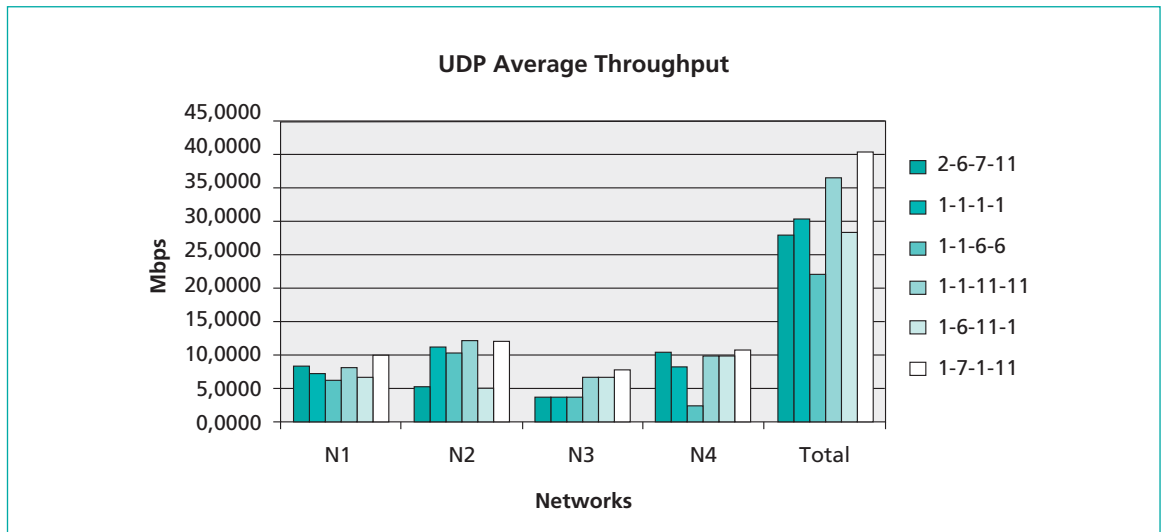
### 6.3. Sonuçlar

Hazırlanan test ortamında elde edilen sonuçlardan ilki her bir ağdaki TCP debisinin incelenmesidir. Şekil-6.3'te görülen bu incelemede, 6 değişik kanal atama stratejisi için TCP debi değerleri 4 ağ için gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi, toplam TCP debisinde, önerilen sistem kullanıldığında bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca her bir ağ için ayrı incelendiğinde de önerilen 1-7-1-11 atamasının TCP debisini arttırdığı görülmektedir.



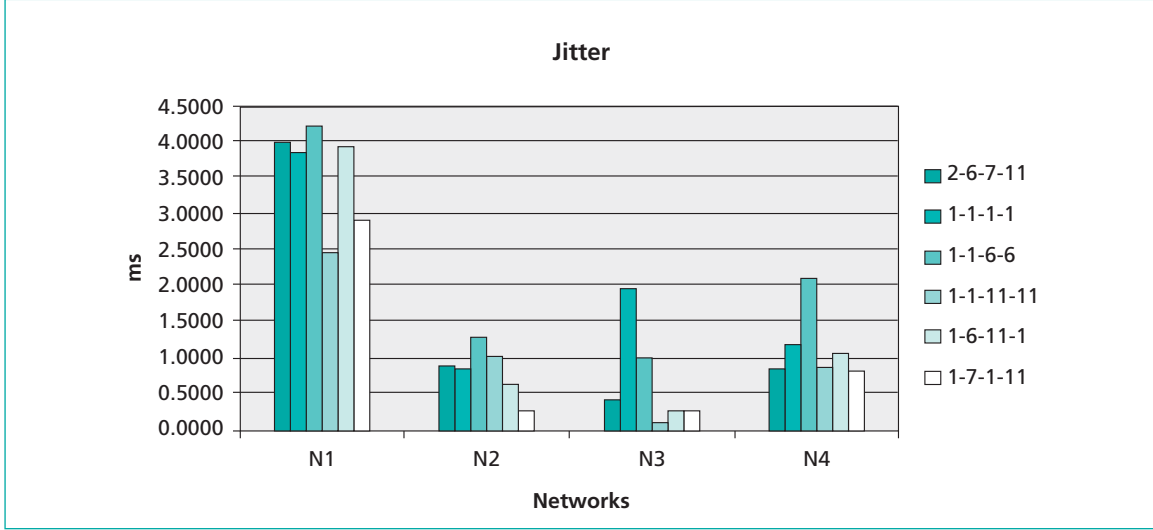
Şekil 6.3 TCP Trafiğinin Ortalama Debisi [4]

Şekil-6.4'te ise sistemdeki UDP trafiğinin ortalama debisi incelenmiştir. Burada da görüldüğü gibi toplam UDP debisi, önerilen sistemdeki kanal atama ile (1-7-1-11) daha fazla olmaktadır. Ayrıca her bir ağ için ayrı incelendiğinde de önerilen 1-7-1-11 atamasının UDP debisini arttırdığı görülmektedir.



Şekil 6.4 UDP Trafiğinin Ortalama Debisi [4]

Şekil-6.5'te ise gerçek zamanlı trafiğin (RTP trafiğinin) seyirme ölçümleri görülmektedir. Seyirme değerlerinin her ağ için ayrı ölçümleri alınmıştır. Görüldüğü gibi, her ağda seyirme değerleri 1-7-1-11 ataması için en düşük çıkmıştır. Bu da önerilen sistemin gerçek zamanlı trafiklerde de etkin çalıştığını göstermektedir.



Şekil 6.5 RTP Trafiğinin Seyirme Değerleri [4]



## 7. BİLİŞSEL AĞLARDA ÇAPRAZ KATMAN TEMELLİ SPEKTRUM ATAMASI

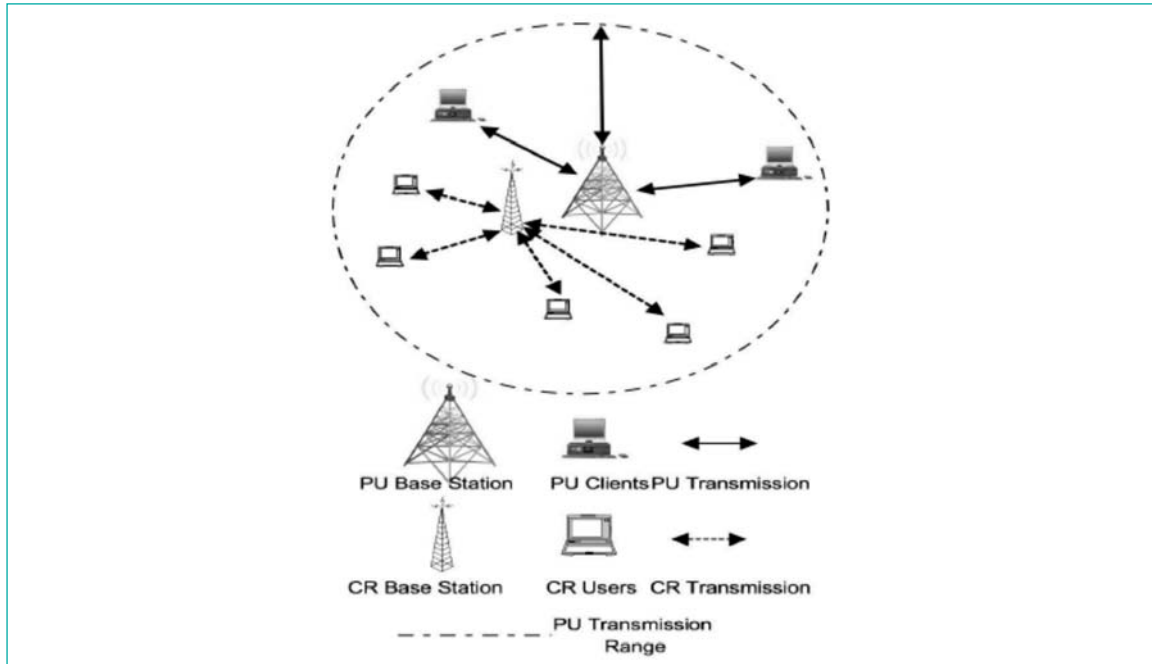
### 7. BİLİŞSEL AĞLARDA ÇAPRAZ KATMAN TEMELLİ SPEKTRUM ATAMASI

Bilişsel ağlarda elverişli spektrum ataması için temel olarak iki önemli noktaya dikkat edilmelidir. Bunlardan birincisi, birincil kullanıcıların o anda söz konusu spektrumda bulunmamaları, ikincisi ise ikincil kullanıcıların boş olarak tespit edilen spektrumunu kullanma isteklerinin olup olmamasıdır. Bu çalışmada bu iki önemli unsur bir çapraz katman yapısı kullanılarak ele alınmıştır [19].

Çapraz katman yapısı, bir ağ yapısına dahil cihazların değişik katman bilgilerini aynı anda kullanarak, sistemin tek katmanlı yapılarda kullanılan mekanizmalardan daha hızlı ve etkin bir şekilde işleyişini amaçlar. Bu çalışmada çapraz katman yapısı, birinci katman (fiziksel katman, physical layer, PHY) ile ikinci katman (veri bağı katmanı, MAC layer, MAC) bilgileri kullanılarak oluşturulmuştur.

#### 7.1.Tasarlanan Xpec Sisteminin Yapısı

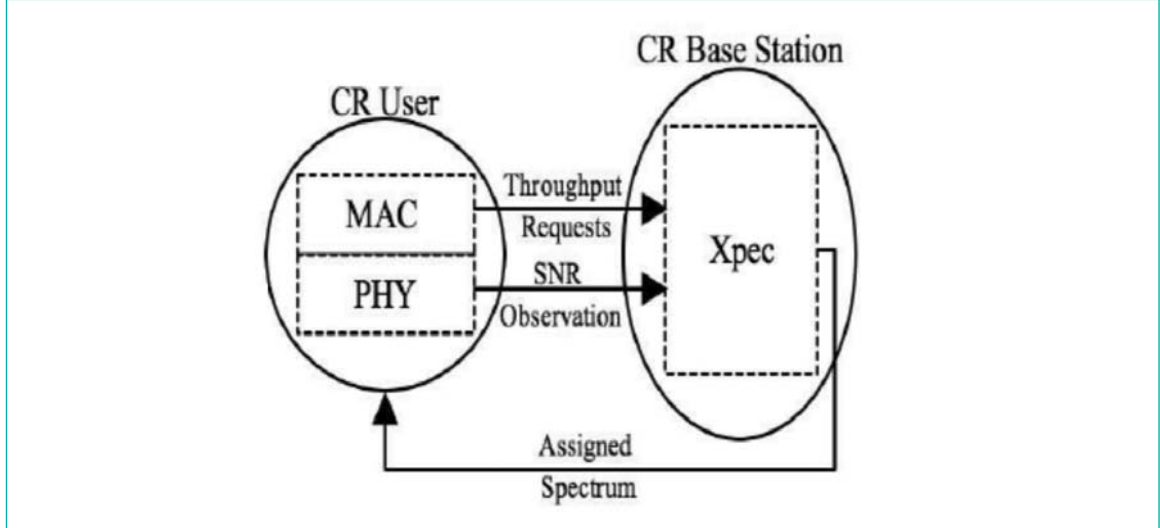
Tasarlanan sistemin uygulandığı topoloji Şekil-7.1'de görülmektedir. Merkezi bir bilişsel ağ ve merkezi bir birincil kullanıcı ağının kullanıldığı sistemde, bilişsel kullanıcılar, lisanslı spektrumları belirli bir süre izleyip, spektrumdan bir SNR değeri hesaplarlar. Farklı bilişsel kullanıcılar, aynı spektrumunu, farklı yerlerde buldukları ve değişik kablosuz kanal özelliklerinden dolayı, farklı şekilde hissederler. Her kullanıcı izlediği ve hissettiği spektruma ait SNR değerini, şekilde görülen ikincil kullanıcı baz istasyonuna gönderir. Bu bilinen katmanlı yapıda da uygulanan bir yöntemdir. Bu çalışmada ise, gönderilen SNR değerine ek olarak, her bilişsel kullanıcı bir de ikinci katman bilgisi olarak adlandırılabilir bantgenişiği isteğini de gönderir. Böylece ikincil kullanıcı hem birincil katman bilgisi olan SNR değerlerini, hem de ikinci katman bilgisi olan bantgenişiği isteğini baz istasyonuna göndermiş olur.



Şekil 7.1 Kullanılan Ağ Topolojisi [19]



SNR izlenim değerlerini ve bantgenişliği isteklerini alan ikincil baz istasyonu, Şekil-7.2'de görülen bir çapraz katman mekanizmasıyla, ikincil kullanıcılara elverişli spektrumunu atar.

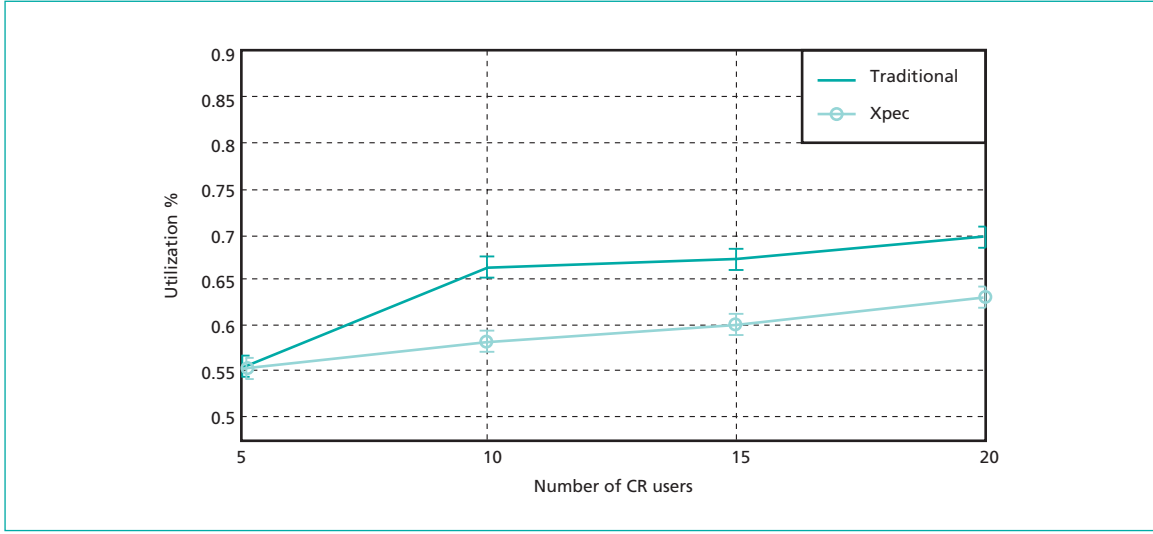


Şekil 7.2 Tasarlanan Xpec Sistemi [19]

Şekil de görülen çapraz katman sistem baz istasyonunda bulunur. Birincil katman bilgisi (SNR Observations) ve ikinci katman bilgisi (Throughput Requests) bir çapraz katman yapısı kullanılarak değerlendirilir. Bu çapraz katman yapısı Xpec olarak adlandırılmıştır. İkincil kullanıcıların gönderdiği SNR değerleri Xpec tarafından ağırlıklandırılır. En güçlü SNR değerini gönderen kullanıcı, birincil kullanıcıyı en iyi tespit etmiş kullanıcı olarak kabul edilir ve bu kullanıcının, söz konusu spektrum için istediği bantgenişliği isteği, en az olarak değerlendirilir. Bunun sebebi ise, SNR değerini en çok hisseden kullanıcı, biricil kullanıcıyla bir çakışma yaşayabilir, bunu engellemek için hattı bu ikincil kullanıcıya kullanılmaması gerekir. Xpec, aldığı bantgenişliği isteklerini de ağırlıklandırarak, SNR değeri en düşük gelen kullanıcıdan başlayarak, bantgenişliği isteklerine göre elverişli spektrumunu paylaşır.

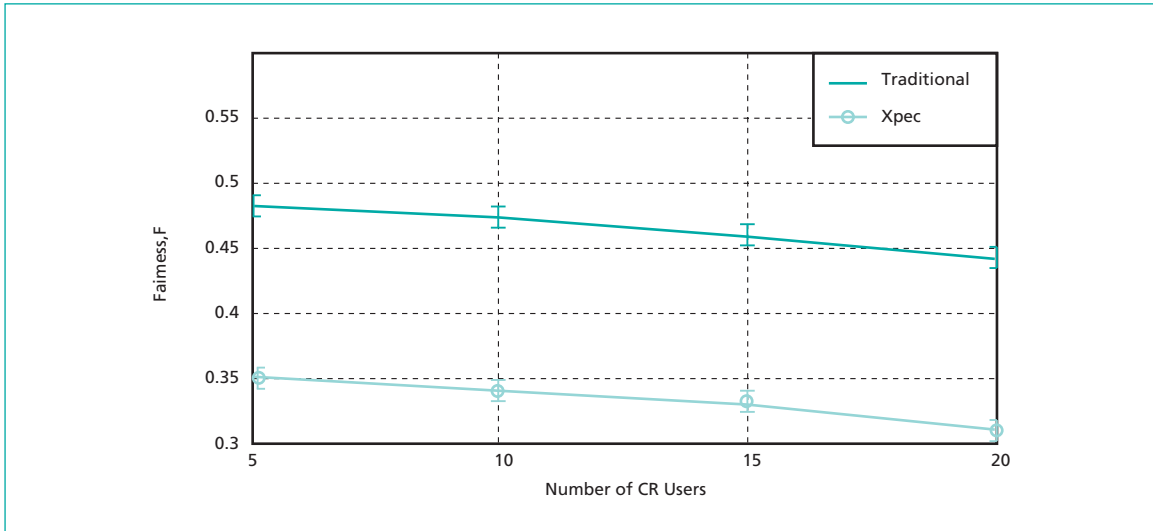
## 7.2. Sonuçlar

Tasarlanan Xpec çapraz katman sistemi, merkezi bir bilişsel ağ ve 20 kullanıcı için MATLAB simülasyon ortamında test edilmiştir. Yapılan başarımların incelemelerinde debi (throughput) ve adil spektrum paylaşımı (fairness) parametreleri kullanılmıştır. Tasarlanan çapraz katmanlı yapı Xpec, çapraz katman kullanılmadan tasarlanan ve katman bilgilerinin tekil olarak kullanıldığı geleneksel bir sistemle karşılaştırılmıştır.



Şekil 7.3 Debinin Kullanıcı Sayısına Göre Değişimi [19]

Şekil-7.3'de hattın kullanım oranının ikincil kullanıcı sayısına göre değişimi Xpec ve geleneksel yapıya göre gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, tasarlanan çapraz katmanlı yapı, hem SNR bilgilerini hem de ikinci katman bantgenişliği bilgilerini kullanarak bir atama yaptığı için daha yüksek bir spektrum kullanımına sahiptir. İkincil kullanıcı sayısı arttıkça spektrum kullanım oranının artması da, daha fazla kullanıcının hattı kullanmasıyla bağlantılıdır.



Şekil 7.4 Spektrum Atama Adaletinin Kullanıcı Sayısına Göre Değişimi [19]

Şekil-7.4'de spektrumun adil bir şekilde dağıtılmasının, ikincil kullanıcı sayıları değişimine göre olan başarımların incelenmesi gösterilmiştir. Burada da görüleceği gibi, tasarlanan Xpec, iki katmanın bilgisini de kullandığı için daha adil bir şekilde spektrumunu ikincil kullanıcılara dağıtmaktadır. Geleneksel yapıda hem SNR hem de bantgenişliği istekleri aynı anda kullanılmadığı için, çapraz katman yapısındaki esneklik sağlanamamakta, bu da adil bir dağılımı engellemektedir.



### 8. KAZANIMLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu doktora tezinde, bilişsel ağlarda spektrum yönetimini oluşturan spektrum sezme, spektruma karar verme ve spektrum paylaşımı işlevleri ayrı ayrı incelenmiş, bu işlevler güncel literatüre paralel olarak iyileştirilmesi için değişik modeller tasarlanmıştır. Öncelikle, elverişli spektrum sezme etkinliğini arttırmak amacıyla yeni bir birincil kullanıcı modeli tasarlanmıştır. Daha sonra, ikincil kullanıcılar için spektruma karar verme yapısı, hem birincil kullanıcı aktivitelerinin kısa zamanlı değişimleri, hem de ikincil kullanıcıların servis kalite istekleri göz önüne alınarak modellenmiştir. Ayrıca, bu tezde, bilişsel tasarsız ağlar için, ağdaki diğer bilişsel kullanıcıların bilgilerinin de kullanıldığı müşterek ve dağıtık bir spektruma karar verme yapısı tasarlanmıştır. Son olarak, hem birinci (fiziksel) hem de ikinci (veri bağı) katmanlarındaki bilgiler modellenerek bir çapraz katman yapısı oluşturulmuştur. Tasarlanan tüm bu modellerle bilişsel ağlar konusundaki uluslararası literatüre katkılar sağlanmıştır. Bu tezde geliştirilen model ve algoritmaların, projenin devamında oluşturulacak bir bilişsel ağ test ortamında incelenmesi amaçlanmaktadır.

Bu doktora tezinden sonra, tezde geliştirilen model ve algoritmaların, projenin devamında oluşturulacak bir bilişsel ağ test ortamında incelenmesi amaçlanmaktadır. Bunun için dünya literatürü yakından takip edilmekte ve kullanılan bilişsel ağ test ortamları incelenmektedir. Böylece, bu proje kapsamında geliştirilen modeller, GSM, IEEE 802.11 WiFi ve IEEE 802.16 WiMAX ağ ortamlarında test edilecek ve dinamik spektrum erişiminin başarımlarını incelenmesi yapılacaktır.

Bu tezde incelenen bilişsel radyo ağlar konusunun, bilişsel radyo temelli çalışmaların endüstride yaygınlaşmasına katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Bu katkılar arasında, kısa vadede ikincil (bilişsel) GSM operatörlerinin oluşması görülebilir. Bunun yanında bilişsel ağlar, TV bantları ve ISM (Industrial, Scientific and Medical) bantlarda bulunan başta WiFi olmak üzere tüm ağlarda ikincil ağlar yaratılması şeklinde uygulanabilir. Böylece kablosuz ağlardaki spektrum kullanımı daha verimli hale gelecek, ses ve görüntü uygulamalarının aktarımı için daha elverişli bantlar elde edilecektir.



## 9. KAYNAKLAR

- [1] I. F. Akyildiz, W.Y. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty, Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey, Computer Networks, Elsevier, Vol. 50, no:13, pp:2127-2159, Eylül 2006.
- [2] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, K. Chowdhury, CRAHNS: Cognitive Radio Ad Hoc Networks, Ad Hoc Networks, Elsevier, vol. 7, no. 5, pp. 810-836, Temmuz 2009.
- [3] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, N. Sai Shankar, IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios, First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005.
- [4] G. Yildirim, B. Canberk, S. Oktug, Enhancing The Performance of Multiple IEEE 802.11 Network Environment By Employing A Cognitive Dynamic Fair Channel Assignment, The 9th IFIP/IEEE Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, MEDHOCNET 2010, Juan Les Pins-FRANCE, Haziran 2010.
- [5] B. Canberk, I. F. Akyildiz, S. Oktug, An Adaptive QoS-based Spectrum Sharing Scheme for CR Networks, IEEE Transactions on Mobile Computing dergisine gönderildi, Aralık 2010.
- [6] B. Canberk, I. F. Akyildiz, S. Oktug, Primary User Activity Modeling Using First-Difference Filter Clustering and Correlation in Cognitive Radio Networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol:19,No:1, pp:170-183, Şubat 2011.
- [7] B. Canberk, S. Oktug, A Dynamic and Weigthed Spectrum Decision Mechanism based on SNR Tracking in CRAHNS, Elsevier Ad Hoc Networks, Şubat 2011.
- [8] A. T. Hoang, Y. Liang, A two phase channel and power allocation scheme for cognitive radio networks, IEEE PIMRC'06, Helsinki, Finland, pp: 1-5. 2006.
- [9] B. S. Manoj, R. R. Rao, M. Zorzi, On the use of higher layer information for cognitive networking, IEEE Globecom 2007, Washington, USA, pp:3568-3573, 2007.
- [10] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. Peh, A. T. Hoang, Sensing-Throughput Tradeoff for Cognitive Radio Networks, IEEE Transactions on Wireless Communications Vol:7, No:4, pp:1326-1337, 2008.
- [11] E. G. Villegas ve diğerleri, Effect of adjacent channel interference in IEEE 802.11 WLANs, IEEE CROWCOM, Orlando, USA, pp:1-8, 2007
- [12] D. Leskaroski, W. B. Mikhael, Frequency planning and adjacent channel interference in a DSSS wireless local area network (WLAN), Wireless Personal Communications, pp:169-180, Springer, 2006.
- [13] X. Hong, C. Wang, J. Thompson, Interference modeling of cognitive radio networks, IEEE VTC 2008, Marina Bay, Singapore, pp:1851-1855, 2008.

- [14] **B. Canberk, I.F.Akyildiz, S. Oktug**, A QoS-Aware Framework for Available Spectrum Characterization and Decision in Cognitive Radio Networks, The 21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2010, Istanbul-TURKEY, Eylül 2010.
- [15] **B. R. Tamma, B. S. Manoj, R. Rao**, An autonomous cognitive access point for Wi-Fi hotspots, IEEE Globecom 2009, Hawaii, USA, pp:1-6, Aralık 2009.
- [16] **L.B. Le, E.Hossain**, Resource Allocation for Spectrum Underlay in Cognitive Radio Networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 12, pp. 5306-5315, Aralık 2008.
- [17] **W.Y. Lee, I. F. Akyildiz**, A Spectrum Decision Framework for Cognitive Radio Networks, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 10, no. 2, pp. 161-174, Şubat 2011.
- [18] **W.Y. Lee, I. F. Akyildiz**, Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol:7, pp:3845-3857, Ekim 2008.
- [19] **B. Canberk, S. Oktug**, Xpec: A Cross-Layer Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks, The 4th IEEE Conference on Advanced Networks and Telecommunication Systems, ANTS 2010, Mumbai-INDIA, Aralık 2010.
- [20] **F.F.Digham, M.-S.Alouini, M.K.Simon**, On the energy detection of unknown signals over fading channels, IEEE Transactions on Communications, Vol:55, No:1, pp:21-24, 2007.
- [21] **V.Paxson, S.Floyd**, Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol:3, pp: 226-244, 1995.
- [22] **H. Tang**, Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems, First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005.
- [23] **D.Willkomm, S.Machiraju, J.Bolot, A.Wolisz**, Primary users in cellular networks: A large-scale measurement study, 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2008.
- [24] **K. R. Chowdhury, T. Melodia**, Platforms and Testbeds for Experimental Evaluation of Cognitive Radio Ad Hoc Networks, IEEE Communications Magazine, Eylül 2010.
- [25] **Z. Yan, Z. Ma, H. Cao, G. Lee, W. Wang**, Spectrum Sensing, Access and Coexistence Testbed for Cognitive Radio using USRP, The 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, ICCSC, Mayıs 2008.
- [26] **R. Dhar, G. George, A. Malani, P. Steenkiste**, Supporting Integrated MAC and PHY Software Development for the USRP SDR, 1st IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks, 2006. SDR '06, Eylül 2006.

**[27] G. Nychis, T. Hottelier, Z. Yang, S.S.Seshan, P.Steenkiste**, Enabling MAC protocol Implementation on Software-Defined Radios, 6th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, 2009.

**[28] M.A.Sarijari, A.Marwanto, N.Fisal, S.K.S.Yusof, R.A.Rashid, M.H.Satria**, Energy Detection Sensing Based on GNU Radio and USRP: An Analysis Study, IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications, Aralık 2009.

**[29] B.Canberk**, QoS Aware Spectrum Management Framework in Cognitive Radio Networks, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Şubat 2011.



