



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



# GENİŞBANT BİLİŞSEL RADYO AĞLARI TASARIM VE UYGULAMALARI

# X

"31. Grup Elektrik, Elektronik ve Bilişim Sanayii"  
adına desteklenmiştir



İSTANBUL  
SANAYİ ODASI

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

# Genişbant Bilişsel Radyo Ağları Tasarım Ve Uygulamaları



Kısaltılmış Proje Raporu

## İTÜ Proje Grubu

**Prof. Dr. Sema OKTUĞ**  
(İTÜ BİLGİSAYAR MÜH. BÖLÜMÜ)

**Doç. Dr. Güneş KURT**  
(İTÜ ELEKTRONİK-HABERLEŞME MÜH. BÖLÜMÜ)

**Yard. Doç. Dr. Berk CANBERK**  
(İTÜ BİLGİSAYAR MÜH. BÖLÜMÜ)

**Doktora Öğr. Uzm. Özge CEPHELİ**  
(İTÜ ELEKTRONİK-HABERLEŞME MÜH. BÖLÜMÜ)

**Doktora Öğr. Selda UYANIK**  
(İTÜ BİLGİSAYAR MÜH. BÖLÜMÜ)

Sonuç Raporu Kasım 2014

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 desteklediği 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 **31. Grup Elektrik, Elektronik ve Bilişim Sanayii** Meslek Komiteleri adına desteklenen bu çalışmanın sanayinin ihtiyaçlarına yanıt verecek şekilde hayata geçirilmesine yönelik katkılarından dolayı Tez Değerlendirme Komitesi üyelerimiz olan;

1. Abdullah Gelgeç (GES Elektronik),
2. H. Uran Tiryakioğlu (NETA Elektronik),
3. Yusuf Kenan Koyuncu (Koyuncu Elektronik),
4. Ahmet Benli (Kale Kalıp)
5. Necat Saldanlı (Casper Bilgisayar)
6. Atila Özkök (Erguvan Bilişim)
7. Mahmut Dönmez'e (Segment Bilgisayar) 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

ISBN: 978-605-137-446-8 (BASILI)  
ISBN: 978-605-137-447-5 (ELEKTRONİK)  
İSO YAYIN NO: 2015/6  
SERTİFİKA NO: 191176

Genişbant Bilişsel Radyo Ağları Tasarım Ve Uygulamaları,  
İstanbul Sanayi Odası, İstanbul

**TASARIM VE UYGULAMA:**

MediaBird  
Cihangir Mahallesi, Güvercin Caddesi  
No: 13 Haramidere 34310 İstanbul  
TEL: (0212) 422 22 99  
FAKS: (0212) 422 01 90  
www.mediabird.com.tr

**BASKI:**

Tor Ofset San. ve Tic. Ltd. Şti.  
Hadımköy Yolu, Akçaburgaz Mahallesi,  
4.Bölge, 9. Cadde 116. Sokak No:2  
Esenyurt / İstanbul  
Tel: (212) 886 34 74

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

İÇİNDEKİLER	5
ÖNSÖZ	7
TABLO LİSTESİ	9
ŞEKİL LİSTESİ	10
ÖZET	13
<b>2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI</b>	<b>15</b>
2.1 Bilışsel Radyo Nedir?	15
2.2 Bilışsel Radyo Ağlarının Kullanımı	17
2.3 Bilışsel Radyo Ağlarındaki Fonksiyonlar	18
2.3.1 Spektrum Algılama	18
2.3.2 Spektrum Paylaşımı	19
2.4 Bilışsel Radyo İletişim Kanalları	20
2.5 Bilışsel Radyo Cihazları – Yazılım Tabanlı Radyolar	21
2.6 Bilışsel Radyo Ağlarında Güvenlik	22
2.7 Haberleşme Teknolojileri Ve Bilışsel Ağlar İle İlişkileri	23
<i>Lte Standardı Çerçevesindeki Çalışmalar</i>	23
<i>Ism Band Uygulamaları</i>	24
<b>3. PROJE KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR</b>	<b>25</b>
3.1 Kanal Modelleri İle İlgili Çalışmalar	25
3.1.1 Bilışsel Radyo Ağlarında Çok Antenli Spektrum Sezmenin Rayleigh Sönümlmeli Kanal Modelinde İncelenmesi	25
3.1.2 Bilışsel Radyo Ağlarında, Bir Gözlem Ağı Yardımıyla Elverişli Kanal Sınıflandırılması	27
3.1.3 Kanal Bozucu Etkilerin Modellenmesi	30
3.1.4 Tam-Çift Yönlü Sistemlerin Başarımının Ve Spektrum Kullanımının İncelenmesi Ve Kanal Kestirimi Çalışması	31
3.2 Usrc Tabanlı, Bilışsel Radyo Ağı Test Ortamı	33
3.3 Spektrum Algılama Çalışmaları	34
3.3.1 Usrc Tabanlı Test Ortamı Kullanılarak Gerçekleştirilen Spektrum Algılama Yöntemleri Ve Bilışsel Ağ Sistemi	34
3.3.2 Öğrenme Ve Tahmine Dayalı Spektrum Algılama Yöntemleri	38

3.4 MIMO Anten Yapısı Üzerine Yapılan Çalışmalar	40
3.4.1 MIMO Anten Yapısının Kullanımı Ve Yararları	40
3.4.2 Usrc Test Ortamında Kurulan 2X2 MIMO Sistemi	41
3.4.3 MIMO-Ofdm Sistemlerde Ses Kalitesi Kestirimi	43
3.5 Fiziksel Katman Güvenliği İle İlgili Çalışmalar	46
3.5.1 Yapay Gürültünün Fiziksel Katman Güvenliği Üzerindeki Etkisinin Analizi	47
3.5.2 Bilişsel Ağ Güvenlik Sistemlerinde Spektrum Algılama Bilgi Değiştirme Saldırılarının Sezilmesi Ve Önerilen Karşı Önlem	50
3.6 Spektrum Paylaşımı İle İlgili Çalışmalar	54
<b>4. PROJE KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR VE DİĞER PROJELER</b>	<b>59</b>
<b>5. SONUÇLAR VE GELECEK HEDEFLERİ</b>	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>63</b>

İstanbul Sanayi Odasının araştırmalarımıza verdiği destek, 2007 yılında İSO – İTÜ Doktora/ Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi ve İstanbul Sanayi Odası arasında yapılan bir protokol ile başlamıştır. Bu bağlamda, 2007 – 2010 yılları arasında Dr. Berk CANBERK'in "Bilişsel Radyo Ağlarında Servis Kalitesine Dayalı Spektrum Yönetimi" başlıklı doktora tez çalışması desteklenmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarının uluslararası saygın dergilerde yayınlanmış ve konferanslarda sunulmuştur. Araştırma çalışmalarına verilen desteklerde sürekliliğin önemli olduğu yaklaşımı ile İstanbul Sanayi Odası, 2011 – 2014 yılları arasında "Genişbant Bilişsel Ağları Tasarım ve Uygulamaları" başlığı altında Prof.Dr.Sema OKTUĞ ve Doç.Dr.Güneş KURT'un doktora öğrencilerinin çalışmalarını destekleme kararı almıştır. G. Selda UYANIK ve Özge CEPHELİ'nin doktora çalışmaları proje kapsamında şekillendirilmiştir.

İkinci dönem araştırmalarında laboratuvar temelli çalışmalar önem kazanmıştır. Önerilen yöntemlerden elde edilen sonuçlar ve yöntemlerin günümüz teknolojisi ile uygulamaya olan yatkınlığı incelenmiş ve sonuçlar raporumuzda sunulmuştur. Proje kapsamında kullanılan test ortamı "Bilişsel Radyo Ağlarında Spektrum Yönetimine Dayalı Başarım Değerlendirmesi için Bir Test Ortamı," başlıklı İ.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projesi ve "Çok Antenli Genişbant Bilişsel Radyo Ağları için Girişim Yönetim Sistemi" başlıklı Genç Araştırmacıları Destekleme Programı Projesi kaynakları ile oluşturulmuştur.

Sonuç raporumuzun proje kapsamında yapılan akademik çalışmaların biraraya getirildiği bir döküman olmasından öteye gitmesini istedik. "Genişbant Telsiz Haberleşme Ağları" ve "Bilişsel Radyo Ağları" konularının güncelliği ve bu konulardaki Türkçe kaynak azlığını da düşünerek, raporumuzu lisans üstü derslerde de kullanılabilir bir kaynak şeklinde hazırladık. Yaptığımız çalışmaların detayına girmeden önce konuyla ilgili temel bilgileri sunduk. Bu bağlamda Türkçe akademik literatüre de katkı sağlamaya çalıştık. Böylece raporumuzun hem üniversitelerimizin hem de konuyla ilgili sanayicilerimizin ilgisini çekeceğini düşündük.

Projemize destek veren dönem toplantılarında görüşleri ve yorumları ile bizleri yönlendiren İstanbul Sanayi Odası 31. Grup Elektrik, Elektronik ve Bilişim Sanayii Meslek Komitesinin değerli üyeleri  
Abdullah Gelgeç,  
H. Uran Tiryakioğlu  
Yusuf Kenan Koyuncu  
Ahmet Benli  
Necat Saldanlı  
Atıla Özkök ve  
Mahmut Dönmez'e teşekkürlerimizi sunuyoruz.

Çalışmalarımızın çıktılarının İstanbul Sanayi Odası tarafından sektöre aktarılmasını ve ülkemiz firmalarının genişbant telsiz haberleşme alanında katma değeri yüksek ürünler geliştirmesine katkı sağlamasını diliyoruz.

Saygılarımızla,

**Prof.Dr. Sema F. OKTUĞ**  
**Doç.Dr. Güneş KURT**  
**Y.Doç.Dr. Berk CANBERK**  
12 Kasım 2014

## TABLO LİSTESİ

Tablo 1: Birinci set deneylerde, spektrum algılama algoritması performansları	37
Tablo 2: Benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	46
Tablo 3: Tek kanallı ve 2x2 MIMO sistemin performans analizi	46
Tablo 4: Benzetim ve ölçüm sonuçları	49
Tablo 5: Simulasyon ve test ortamı farklılıkları	52

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1:	Spektrum boşluklarının kullanılması [4]	15	Şekil 29:	LabVIEW® blok diyagram panel görüntüsü	42
Şekil 2:	Bilişsel çevrim	17	Şekil 30:	MIMO kanal modeli	43
Şekil 3:	Projede ele alınan alttan destekli (underlay) CR ağı örneği	18	Şekil 31:	MOS değişim ölçeği	44
Şekil 4:	Kanal modeli	20	Şekil 32:	Kurulan ölçüm düzeneği	44
Şekil 5:	Genel alıcı/verici blok diyagramı	21	Şekil 33:	2x2 Alıcı antenlerden elde edilen 4-QAM işareti	45
Şekil 6:	Fiziksel katman güvenliği	23	Şekil 34:	SSDF saldırıları	47
Şekil 7:	Sistem modeli	26	Şekil 35:	Kullanılan sistem modeli	47
Şekil 8:	Alıcıda 4 anten kullanarak ve değişik birleştirme yöntemleriyle elde edilen toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) ve Rayleigh sönümlenme modellerinin doğru tespit olasılıkları performansı	26	Şekil 36:	Gizli dinleyici kanal SNR'ı 15.3dB iken yapılmış ölçüm sonuçları (a) Gönderilen sinyal (b)Alınan sinyal, Yapay gürültü yok, (c) Alınan sinyal, yapay gürültü gücü = -20dB, (d) Alınan sinyal, yapay gürültü gücü = -17dB, (e)Alınan sinyal, yapay gürültü gücü = -13dB, (f)Alınan sinyal, yapay gürültü gücü =-10dB	48
Şekil 9:	Alıcıda 4 anten kullanarak ve değişik birleştirme yöntemleriyle elde edilen toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) ve Rayleigh sönümlenme modellerinin hatalı tespit olasılıkları performansı	27	Şekil 37:	Farklı QAM modülasyon seviyeleri için SNR-BER ilişkisi	49
Şekil 10:	Çalışmada kullanılan topoloji	28	Şekil 38:	Sistem modeli	50
Şekil 11:	Tasarlanan sistem	29	Şekil 39:	Simülasyon sonuçları	51
Şekil 12:	Kullanım oranının karşılaştırılması	29	Şekil 40:	2 anten ile huzme yönlendirme	52
Şekil 13:	Farklı m değerleri için Nakagami-m dağılımına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonları	30	Şekil 41:	Güven metriğinin zamanla değişimi.	53
Şekil 14:	Alıcı işletim karakteristiği (Receiver Operating Characteric - ROC)	31	Şekil 42:	Sistem şeması	53
Şekil 15:	Kanal kestirimi ölçüm sonuçları ( $T_s = 5 \mu s$ )	32	Şekil 43:	Test sonuçları	54
Şekil 16:	Gizli dinleyici problemi	33	Şekil 44:	Koruma bantlarının kullanımı	55
Şekil 17:	Yazılım - temelli radyo (Software Defined Radio, USRP-SDR)	33	Şekil 45:	Örnek bir başlangıç spektrum durumu	55
Şekil 18:	USRP N210 Kit, iç yapı ve ön görünüm	34	Şekil 46:	Başlangıç spektrumunda bulunan boş bloklar	56
Şekil 19:	Kullanılan sistem modeli	35	Şekil 47:	Spektrum isteği 6 kanal olan bir link için kullanılacak boş blokların kombinasyonu	56
Şekil 20:	Kurulan test ortamı	35	Şekil 48:	Spektrum isteği 6 kanal olan bir link için kullanılacak bir diğer boş blokların kombinasyonu	56
Şekil 21:	Birincil ve ikincil kullanıcı LabVIEW® arayüzleri	36	Şekil 49:	Spektrum isteği 7 kanal olan bir link için yapılan örnek atama	57
Şekil 22:	Birinci set deneylere ilişkin performanslar	36	Şekil 50:	Birincil kullanıcı kanalı kullanma olasılığına bağlı olarak spektrum efektif kullanım oranı ve koruma bantları sayıları	57
Şekil 23:	Gözlemlenen örnek spektrum algılama hataları	37	Şekil 51:	Birden fazla link için kanal atamaları	57
Şekil 24:	Değişen sinyal/gürültü oranlarına ilişkin deneylerin sonuçları	38	Şekil 52:	Sırayla atama yapılan birden fazla link için kanal atamaları	58
Şekil 25:	Spektrum tahmin etme algoritmaları	39	Şekil 53:	Birden fazla link olma durumunda, verilen servis oranı	58
Şekil 26:	Geçmiş penceresi boyutunun etkileri	40			
Şekil 27:	Kurulan 2x2 MIMO sistemi	41			
Şekil 28:	LabVIEW arayüzü	42			

İkinci nesil (2G) ve üçüncü nesil (3G) olarak isimlendirilen gezgin (mobile) haberleşme ağları (network), lisanslı frekans bantlarında kullanılmaktadır. Lisanslar ülkemizde Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) tarafından verilmekte ve kontrol edilmektedir. Mevcut ağlarda lisanslanan bir bant, lisans süresi boyunca sadece lisans sahibi tarafından kullanılabilir. Frekansta lisanslı bantlarda kullanılan gezgin haberleşme ağlarının teletrafik istatistikleri uzayda, zamanda ve frekansta yüksek değişkenlik göstermektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nin telekomünikasyon otoritesi Federal Communications Commission (FCC) tarafından yapılan ölçümler lisanslı bantların % 90'a varan oranlarda kullanılmadığını göstermiştir. Ölçüm sonuçları FCC Spectrum Policy Task Force grubu tarafından "FCC Report of the Spectrum Efficiency Working Group," başlıklı raporda yayınlanmıştır [1].

Bilindiği gibi, frekans spektrumu sınırlı bir kaynaktır ve artan veri iletim talepleri doğrultusunda mümkün olan en yüksek verimlilikle kullanılmalıdır. Bilişsel radyo teknolojisi bu ihtiyaçtan doğmuş olup, kullanılmayan spektrum alanlarından faydalanılmasını hedeflemektedir.

Kablosuz ve akıllı cihazların çeşit ve kullanım yaygınlığı son yıllarda sürekli artış göstermektedir. Yakın gelecekte ise bu artışın çok daha büyük oranlar ile olacağı ve haberleşme trafiğinin de paralel olarak artacağı öngörülmektedir. Bu gibi kablosuz teknolojilerin yaygınlaşması, makinelerin haberleşmesi, nesnelere interneti gibi sahaya çıkan pek çok yeni teknoloji ile birlikte, haberleşme kaynaklarının önemi artmakta, spektrumun giderek kalabalıklaşması sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Öte yandan, saha çalışmalarının gösterdiği üzere, lisanslı bantların tam kapasite ile kullanılmadığı sahalar da bulunmaktadır. Bu ihtiyaç ve olası kullanılmayan kaynaklar göz önünde bulundurularak, çözüm olarak gördüğümüz bilişsel radyo ağları teknolojisi ile ilgili, "GENİŞBANT BİLİŞSEL RADYO AĞLARI TASARIM VE UYGULAMALARI" isimli, bu projemizin gerçekleştirilmiş temel hedefleri aşağıdaki gibidir:

- Bir bilişsel radyo test ortamı yaratmak
- Etkin bir şekilde spektrum sezme/algılamak
- Fiziksel katmanda, spektrum sezme aşamasında, güvenliği sağlamak
- Spektrum sezme ve paylaşım yöntemlerini test ortamı problemlerini de düşünerek geliştirmek ve uluslararası akademik literatüre katkı sağlamak.

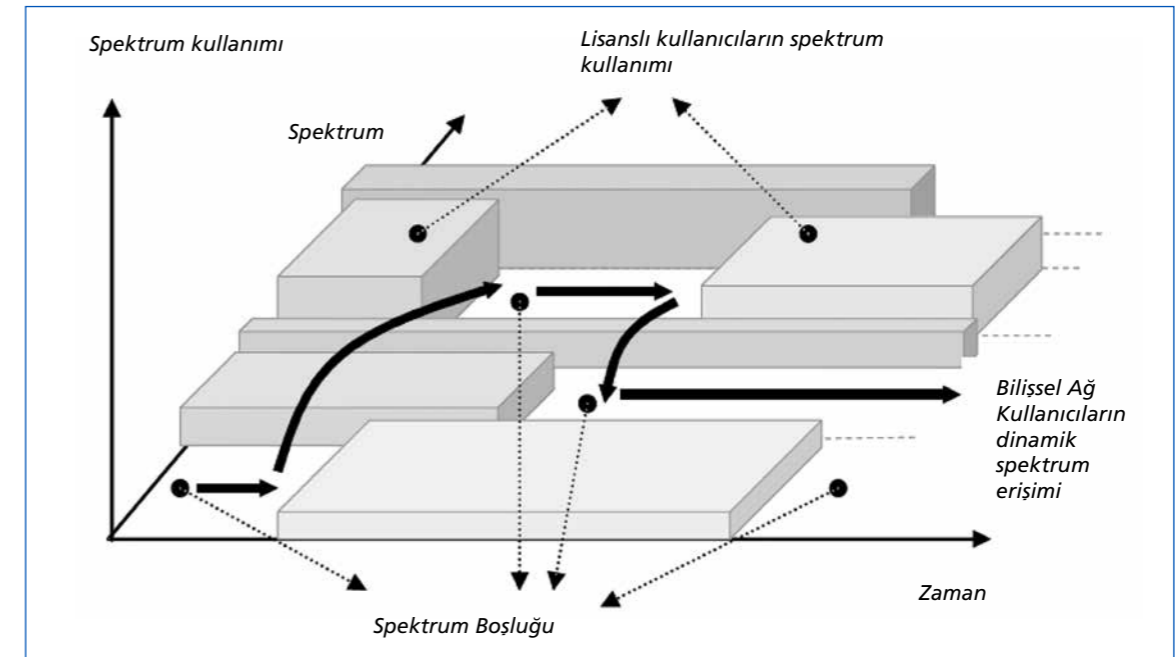


## 2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI

## 2.1 Bilışsel Radyo Nedir?

Temel olarak, bilışsel ađ ve yazılım temelli radyo teknolojisi, belirli spektrum alanlarının kullanım hakkı için ücret ödemiş olan birincil kullanıcıların kullanmadıkları spektrum alanlarını, kendi kullanıcılarına sunmayı amaçlamaktadır. Bilışsel radyo (cognitive radio - CR) ağları spektrum verimliliğini arttırmayı hedeflemektedir [2]. Spektrum verimliliği, gönderilen toplam bilginin kullanılabilen spektrum (bant) genişliğine oranı olarak ölçülebilir [1]. CR ağlarında birincil kullanıcı (primary user - PU) ve ikincil kullanıcı (secondary user - SU) olmak üzere iki tip kullanıcı tanımlanmaktadır. Lisanslı bantı kullanım önceliği, söz konusu lisansa sahip olan birincil kullanıcılara verilmektedir. İkincil kullanıcılar, yalnızca birincil kullanıcıların iletişiminin engellenmediği durumlarda veri gönderebilir. Aksi halde, birincil kullanıcılarda gözlemlenen servis kalitesinin (quality of service - QoS) seviyesi düşebilir. Bu nedenle, lisanslı bantların birincil kullanıcılar tarafından kullanıldığı zamanların hızlı ve doğru olarak algılanması CR ağları için çok önemlidir. Bu problem, literatürde spektrum algılama (spectrum sensing) olarak isimlendirilmektedir.

CR kullanıcıları, belirli bir zaman aralığında kullanılmayan spektrum boşluklarını algılayıp burada iletişime geçerler. Bu spektrumun lisanslı sahibi geldiğinde, bilışsel kullanıcı, banttı çekilerek, kullanılmayan başka bir banda geçer. Bu bandın lisanslı kullanıcısı geri geldiğinde, CR kullanıcı bu bandı da boşaltıp kullanılmayan başka bir banda geçiş yapar. CR ađ kullanıcılarının uygun frekansı bulup, bu frekansa geçmesinden sonraki adım, CR ağda kullanılan tüm protokol ve katmanların yeni geçilen frekans bandına uygun hale getirilmesidir.



Sekil 1 Spektrum boşluklarının kullanılması [4].

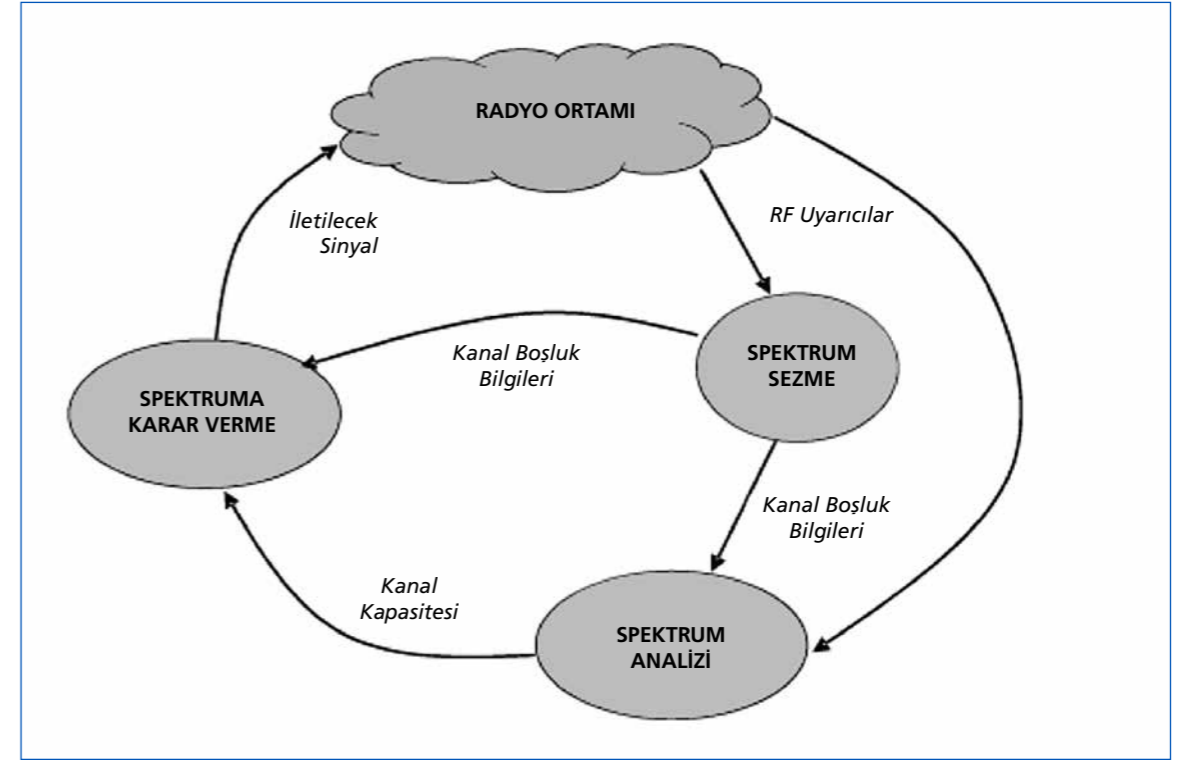
CR ağ kullanıcıları dinamik spektrum kullanımı gibi iletişim başarımını artırmaya yönelik önemli bir özelliğe sahiptir. Buna karşılık, spektrumdaki boşluklarını doğru olarak belirlemek ve lisanslı kullanıcılara girişim yaratmamak, CR ağ tasarımında temel alınan en önemli öğelerden biridir [3]. Kullanılmayan spektrum bantlarının, diğer bir ifadeyle spektrum boşluklarının, tespit edilmesi ve boşluklar arasında geçiş yapılması Şekil 1'de gösterilmiştir [4]. Bu 3 boyutlu grafikte, zamana bağlı olarak (x-ekseni) lisanslı kullanıcıların sahip oldukları spektrum bantlarını (z-ekseni) kullanma durumu (y-ekseni) gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, spektrumda oluşabilecek boşluklar, hem zaman hem de frekans uzayında bileşene sahip olabilmektedir.

CR ağlarında spektrum yönetimi, spektrumu kullanma hakkına sahip birincil kullanıcılara engel olmadan, elverişli spektrum bantlarının bulunması ve bunun ikincil kullanıcılar arasında paylaşılması olarak tanımlanabilir [5,6]. Buradaki elverişli spektrum bantları, değişik spektrum sezme teknikleriyle belirlenir. Elverişli spektrum, sadece kanalın zaman değişim karakteristiklerinden değil, birincil kullanıcıların spektrumu kullanma aktivitelerine göre değişiklik gösterir.

İkincil kullanıcılar (bilişsel ağ kullanıcıları) için elverişli spektruma erişim teknikleri, bilişsel radyonun en uygun spektrum bandını seçmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yapılabilmesi için yukarıda bahsedilen spektrum sezme/algılamaya yönelik işlevlerin yanı sıra aşağıdaki işlevler gerçekleştirilmelidir [4]:

- 1. Spektrum Seçme (Spectrum Decision):** Bilişsel ağ kullanıcıları tarafından sezilen birden fazla spektrum boşluğu olduğunda, bunlardan en uygun olanının bilişsel ağ kullanıcılarının istediği servis kalitesine göre seçilmesidir.
- 2. Spektrum Hareketliliği (Spectrum Mobility):** İkincil kullanıcıların spektrumun gerçek sahibi geldiğinde spektrumunu terk etmesi ve mümkün ise başka bir boşluğa geçiş yapabilmesidir.
- 3. Spektrum Paylaşma (Spectrum Sharing):** Aynı spektrum bandını kullanan ikincil kullanıcılar arasında adil ve efektif bir paylaşım sağlanabilmesidir.

Yukarıda belirtilen işlevlerin gerçekleştirildiği Bilişsel Çevrim (Cognitive Cycle) Şekil 2'de görülmektedir. Radyo ortamından alınan RF uyarıcılar, spektrum sezme yöntemleriyle incelenmekte ve spektrumdaki birincil kullanıcıların karakteristikleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu karakteristiklerle spektrum kanalındaki olası boşluklar saptanmakta, buradan elde edilen kanal boşluk bilgileri spektrum analizine girmektedir. Burada, ikincil kullanıcıların servis isteklerine, spektrumun RF özelliklerine ve birincil kullanıcıların spektrum bandına geri dönme ihtimallerine bakılarak, bilişsel ağın kullanabileceği tam bir boş spektrum bant kapasitesi ve kullanılabilirliği hesaplanmaktadır. Boş bant kapasitesi ve kanal boşluk bilgileri, ikincil kullanıcılara en elverişli bandın tahsis edilmesi için kullanılmaktadır. Bu elverişli bantlar Şekil 2'deki bilişsel çevrimde de görüldüğü gibi spektruma karar verme yöntemleriyle gerçekleştirilir.



Şekil 2 Bilişsel çevrim.

## 2.2 Bilişsel Radyo Ağlarının Kullanımı

Bilişsel radyo ağları üzerine çalışmalar 1999 yılında Mitola ve Maguire tarafından yapılan çalışma [7] ile başlamıştır. Bunu takip eden ilk çalışmaların öncelikli odağı dinamik spektrum kullanımı ve spektrumun ikincil kullanımı üzerinde yoğunlaşmıştır. Konuyla ilgili bir çok araştırma projesi yapılmıştır (örn. URA, SPECTRUM, MILTON, XG-projesi). Bu projelerin başarısıyla birlikte, bilişsel radyo ağları üzerinde daha geniş çaplı çalışmalar başlamıştır.

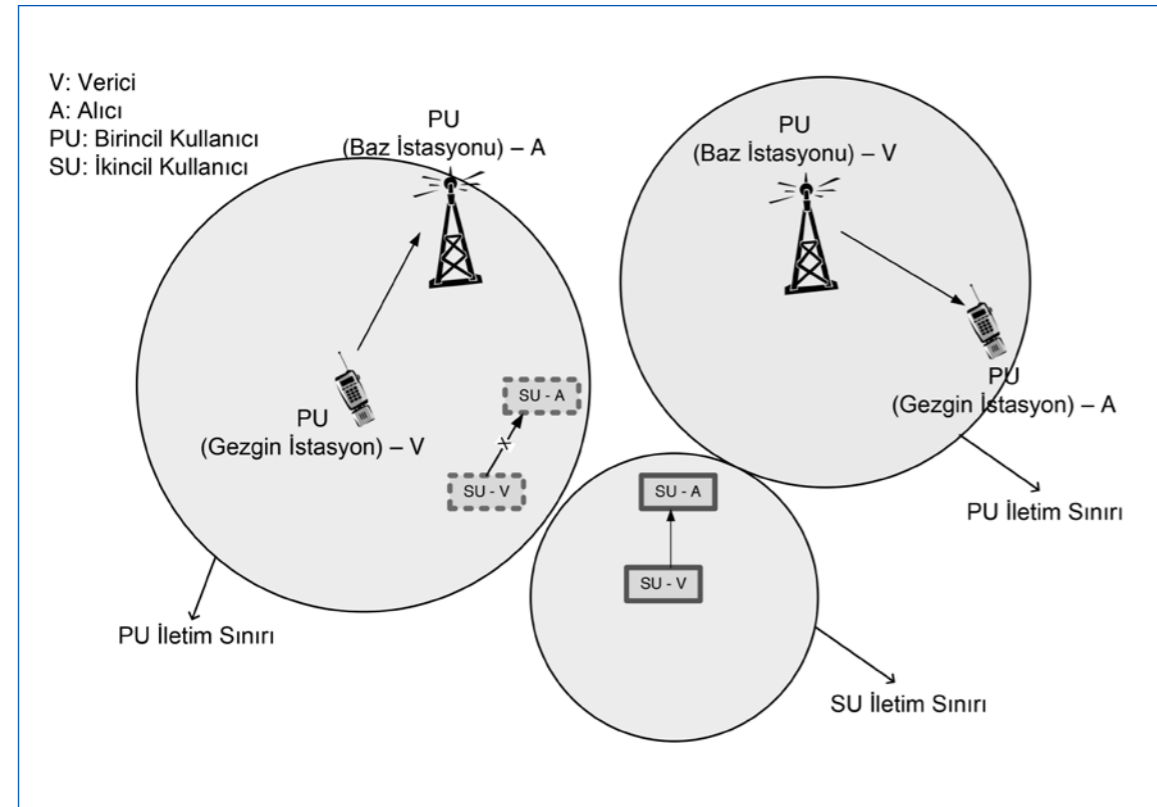
Bilişsel radyo ağları için standartlaşma çalışmaları üç ana grup tarafından yapılmaktadır: IEEE 802.22, SCC41 ve ETSI - Reconfigurable Radio Systems Technical Committee on CRs and SDRs. Bunun yanında bir endüstri grubu olan SDR Forum da bilişsel radyo ağları ile ilgili konularda çalışmalar yapmaktadır. Bunlar arasında ticari açıdan en önemli olan olan standart IEEE 802.22 olmuştur. 2004 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde TV bantlarına ikincil erişimin FCC tarafından izin verilmesi önerilmiştir [8]. Televizyon yayını için ayrılmış olan çok yüksek frekans (very high frequency, VHF) ve ultra yüksek frekans (ultra high frequency, UHF) bantları, televizyonların dijital yayına geçmesiyle bölgesel olarak oldukça boşalmıştır. Bu boşluklar, TV beyaz alanları (TV white spaces, TVWS) olarak adlandırılmaktadır. Bilişsel radyo teknolojilerinin TVWS'de kullanımının testi için bir çok firma (Adaptrum, I2R, Microsoft, Motorola ve Philips) 2008 yılında prototip bilişsel radyo sistemlerini FCC'ye sunmuşlardır [9]. 2008 Kasım ayında FCC, bilişsel radyo cihazlarının çalışmasına izin veren bir regülasyonu çıkarmıştır [10]. 2009 yılında, İngiltere'nin regülasyon otoritesi Ofcom da bilişsel radyonun çalışmasına izin vereceğini vaat etmiştir. [11]. Bu gelişmeler ve standardizasyon çalışmaları

çerçevesinde, bilişsel radyo ağlarının yakın gelecekte yaygın olarak kullanılan bir teknoloji olacağı beklenen bir durumdur.

### 2.3 Bilişsel Radyo Ağlarındaki Fonksiyonlar

#### 2.3.1 Spektrum Algılama

CR ağları, kullanım felsefesi olarak iki ayrı grupta toplanabilir: örtülü (overlay) ağlar ve alttan destekli (underlay) ağlar. Örtülü ağlarda, ikincil kullanıcılar toplam güçlerinin bir kısmını birincil kullanıcı işaretlerinin iletimi için kullanmaktadır. Örtülü ağlar için kirli kağıt kodlaması (dirty paper coding) gibi yöntemlerin kullanılması önerilmiştir. Bu yöntemler bilgi kuramı açısından oldukça ilginçtir, fakat uygulanabilmeleri için birincil kullanıcılar hakkında nedensel olmayan (noncausal) bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır [12]. Bu nedenle, örtülü ağların gerçekleşmesi oldukça zordur. Alttan destekli ağlarda ise ikincil kullanıcılar, birincil kullanıcıların iletimine zarar vermediği durumlarda, birincil kullanıcıların kaynaklarını paylaşabilir. Zarar verilmemesi, ikincil kullanıcıların güç spektral yoğunluk değerlerinin (power spectral density – PSD), birincil kullanıcılara ilişkin gürültünün PSD değerlerinin altında olması ile sağlanabilir. Bu projede de kullanılan bu tip bilişsel ağlarda, spektrum algılama aşaması, birincil kullanıcı olmadığı zaman spektrumunu kullanmak açısından büyük önem taşımaktadır.



**Sekil 3** Projede ele alınan alttan destekli (underlay) CR ağı örneği.

Örnek bir alttan destekli CR ağı, Sekil 3'te gösterilmiştir. Örnekte dört PU ve dört SU olmak üzere toplam sekiz adet "düğüm" (node) bulunmaktadır. Alıcılar A, vericiler ise V harfi ile gösterilmiştir. Kesik çizgili çerçeve ile gösterilen ikincil kullanıcılar arasında iletişim yoktur. Bu durumdaki verici ikincil kullanıcı, verici birincil kullanıcı düğümünün iletim sınırı dahilindedir. İletim sınırları, işaret gürültü oranının belirli eşik değerinin altına düştüğü alanı kavramsal olarak göstermektedir. Düz çizgi ile gösterilmiş ikincil kullanıcılar, birincil kullanıcıların iletimini etkilemeyecek şekilde işaret gönderip alabilmektedir. Örnekte yönsüz (omnidirectional) olarak iletim yapıldığı ve aynı frekans bandının kullanıldığı varsayılmıştır, fakat projede yönlü iletimler de incelenmiştir.

Genişbant CR (wideband CR - WCR) ağları spektrum verimliliğini arttırabileceği için yakın geçmişte araştırmacıların ilgisini çekmeye başlamıştır. İkincil kullanıcıların geniş bant üzerinde birincil kullanıcılar tarafından kullanılmayan bir iletim kanalı bulma ihtimali daha yüksektir. FCC ölçüm sonuçlarında bulunan % 10'a yakın bant kullanım oranı bu iddiayı kanıtlamaktadır. WCR ağlarındaki en önemli problemlerden birisi, geniş bant spektrum algılamadır. İkincil kullanıcılar geniş bir spektrum aralığında sınırlı sayıda ölçüm kullanarak, birincil kullanıcıların ilgili bant içinde olup olmadığını belirlemek durumundadır. Bu ölçümlerin gürültüden etkilenme olasılıkları da göz ardı edilmemelidir.

Bu projede, bilişsel radyo ağlarının seyrek spektrum özelliğinden faydalanmak için anten dizisi kullanan sıkıştırılmış spektrum algılama yöntemleri de incelenmiştir. Bu yöntemlerin geliştirilmesi sonucunda örnekleme sayısı, dolayısıyla işlem yükü azalacağı için, bilişsel radyoların en önemli sorunlarından biri olan birincil kullanıcı spektrum kullanımını algılama süresinin azaltılması hedeflenmiştir.

Spektrum durumunu, algılanan enerji seviyesine göre belirlemek, literatürdeki en temel spektrum algılamalarından biridir. Bu projede gerçekleştirilen test ortamında bu yöntem kullanılmış, bu yöntemin ortamdaki gürültü seviyesinden ve çeşitli sistem parametrelerinden nasıl etkilendiği incelenerek tasarımı yapılmıştır.

#### 2.3.2 Spektrum Paylaşımı

Spektrum paylaşım mekanizmaları, spektrum olanaklarını, herhangi bir lisans veya ödeme yapmadıkları için kendi aralarında eşit haklara sahip olduğu düşünülen ikincil kullanıcılar arasında dağıtmaya olanak sağlamaktadır. İkincil kullanıcıların her zaman birincil kullanıcılardan düşük önceliğe sahip olmalarına karşılık, kendileri arasında, spektrum paylaşım algoritmalarının düzenlenmesi ile servis tanımlamaları yapmak mümkündür. Bahsedilen paylaşımın yapısı, ikincil ağın performansını doğrudan etkilemektedir. Bu optimizasyon problemi için önerilen, kural tabanlı ve/ya yapay zeka algoritmaları ile desteklenmiş olan yaklaşımlar, oyun teorisi analogileri, graf boyama algoritmalarına dönüştürülmüş çözümler, ekonomik modellerden esinlenen pazarlık ve açık arttırma tipleri, iş sıralama algoritmaları gibi pek çok değişik çözüm yaklaşımları mevcuttur.

Spektrum paylaşım algoritmaları, mimarilerine göre merkezci veya dağıtık, spektrum alma yöntemlerine göre kooperatif veya olmayan, spektrum erişim tiplerine göre

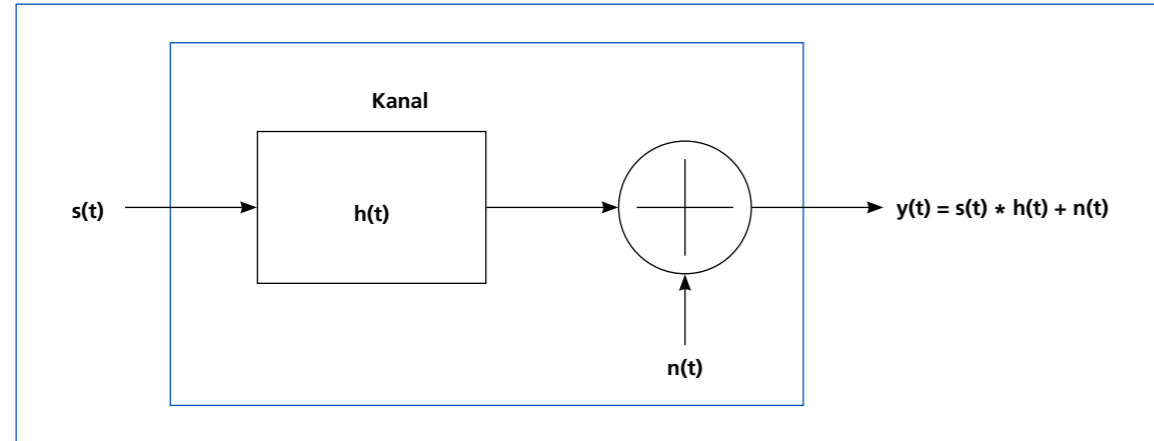
“underlay” (alttan destekli) veya “overlay” (örtülü) olarak sınıflandırılır. Spektrum paylaşım algoritmalarının karşı karşıya kaldığı önemli zorluklar: CCC: Ortak Kontrol Kanal varlığı ve korunması, bağlılık grafının kullanılan frekanslara bağlı olarak değişmesi, algoritmaların “Kanal” olarak belirtilen ortak bir birime ihtiyaç duyulması olarak verilebilir. (Bu birimin kalitesinin ölçülmesi ve bir metrik ile ifade edilmesi, hangi transmision parametreleri ve kanal kapasitelerinin hesaba katılması gibi hususlar önemlidir.)

Bu proje kapsamında, ileriki bölümlerde detayları verilecek olan, literatüre katkı olarak sunulan, spektrum paylaşımı ile ilgili yöntemler de bulunmaktadır.

#### 2.4 Bilişsel Radyo İletişim Kanalları

Bilişsel radyo ağları, kablosuz ağlar üzerinde çalışan sistemler olduklarından, bu ağların çalışma prensiplerini tam olarak anlaşılabilmesi için üzerinde çalıştıkları kablosuz kanalların detaylarının da bilinmesi gerekir. İletim kanalları özellikle spektrum algılama konusunda büyük öneme sahiptir. Kanalın özelliklerinin bilinmesi, incelenen kanalda bir kullanıcı olup olmadığı kararının doğru şekilde verilebilmesi için çok büyük önem taşır.

Fiziksel iletim kanalı, sıklıkla bir matematiksel bir model olarak tanımlanır. En çok kullanılan modellerden biri gürültü ilaveli lineer filtre modelidir. Bu model, Şekil 4’te verilmiştir. Bu modelde kanalın sinyal (  $s(t)$  ) üzerindeki etkileri bir filtre (  $h(t)$  ) olarak modellenir. Kanaldaki sinyale etki eden gürültü (  $n(t)$  ) de toplamsal olarak modellenmektedir.



Şekil 4 Kanal modeli.

Bu modele göre, t anındaki çıkış sinyali  $y(t)$ , giriş sinyali  $s(t)$  ile  $h(t)$ ’nin konvolüsyonuna gürültü sinyali  $n(t)$ ’nin eklenmesi ile elde edilmektedir.

Kanal gürültüsü, doğal ya da yapay kaynaklar sebebiyle sinyal üzerinde oluşan bozulmaları kapsamaktadır. Bu bozulmanın çok büyük bir kısmı devreler üzerinde oluşan ve sinyale etki eden termal gürültüdür. Gürültü genellikle rastlantısal süreç olarak modellenir. Bu sürecin parametreleri, kanaldan kanala farklılık gösterir. En çok kullanılan toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (additive white Gaussian noise, AWGN) modelidir. Burada gürültü sinyalinin

olasılık yoğunluk fonksiyonunun Gauss dağılımına uyduğu ve gürültünün gücünün tüm frekanslarda eşit olduğu kabul edilir. İsimdeki “beyaz” ibaresi gürültünün tüm frekanslarda eşit güce sahip olduğunu ifade eder. Modelleme ve hesaplamalar açısından kolaylık sağladığından gürültünün beyaz olduğu kabulü yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kanalı sadece gürültüyü ele alarak modellediğimizde en basit kanal modeli olan AWGN kanala ulaşırız. Ancak bu kanal modeli, sönümlenmenin etkisini göz önüne almaz.

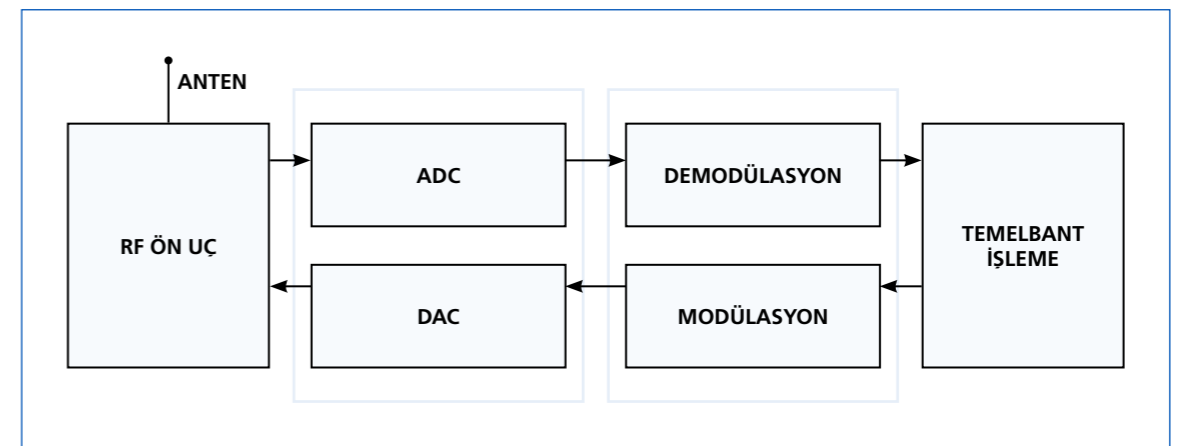
Sönümlenme, kanal gücünün zaman ve frekansta farklı değerler almasına sebep olur. Sönümlenme büyük ölçekli sönümlenme ve küçük ölçekli sönümlenme olarak ikiye ayrılmaktadır. Büyük ölçekli sönümlenme, uzaklık ve büyük objelerin gölgeleme etkisinden dolayı oluşur ve genellikle frekanstan bağımsızdır. Küçük ölçekli sönümlenme ise alıcı-verici arasındaki farklı yansımalarından oluşan sinyal yollarının (multipath) etkisidir. Bu etkiler, alınan sinyal üzerinde ve hata performansından büyük öneme sahiptir.

Literatürde sönümlenmenin etkisini de içeren istatistiksel kanal modelleri önerilmiştir [13]. Bunlardan en önemlilerden biri Rayleigh kanal modelidir. Bu kanal modelinde, alıcı-verici çifti arasında doğrudan bir yol olmadığı, sinyallerin birçok yansıtıcıdan yansarak alıcıya ulaştığı kabul edilir. Küçük bir çok yansıtıcının bulunduğu ortamlarda bu kanal oldukça gerçekçi bir yaklaşıklık sağlamaktadır. Bu kanalın alıcı-verici arasında direkt bir yolun olduğu alternatifi ise Rician kanal modeli olarak literatüre geçmiştir [13].

Proje kapsamında fiziksel katman özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla farklı kanal modelleri ile çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar Bölüm 3.1’de verilmiştir.

#### 2.5 Bilişsel Radyo Cihazları – Yazılım Tabanlı Radyolar

Klasik radyo donanımları, 5 ana bölümden oluşur. Bunlar, anten bölümü, RF ön uç bölümü, analog-dijital / dijital-analog dönüştürücü bölümü, modülasyon / demodülasyon bölümü ve temelbant işleme bölümüdür [14]. Örnek bir blok diyagramı Şekil 5’te görülmektedir.



Şekil 5 Genel alıcı/verici blok diyagramı.

Anten bölümü, radyo dalgalarını kablosuz kanaldan alan ya da kablosuz kanala gönderen bölümdür. RF ön uç bölümü, alıcıda antenden gelen sinyalleri orta frekans (intermediate frequency, IF) sinyale çevirir. Vericide ise dönüştürücüden gelen IF sinyalleri antenin çalışma frekansına çevirir. Alıcıda, IF sinyaller analog-dijital dönüştürücü tarafından dijital hale çevrilir. Modülasyon/demodülasyon bölümü alıcıda dönüştürücüden gelen sinyallerin demodülasyonundan, verici tarafında ise modülasyon işleminden sorumludur. Temelbant bölümü eşitleme (equalization), frekans atlama (frequency hopping), kodlama / kod çözme gibi fonksiyonları gerçekleştirmekten sorumludur.

Mikroelektronik alanındaki hızlı gelişmeler ile birlikte kablosuz alıcı ve vericiler daha yetenekli, daha güçlü ve mobil hale gelmiştir. Bu iyileştirmeler, yazılım tabanlı radyo (software defined radio, SDR) teknolojisine ışık tutmuştur. Yazılım tabanlı radyo, yukarıda bahsedilen fonksiyonlarının tümü ya da bir kısmının yazılım tarafından kontrol edilebildiği radyo platformlarının genel adı olarak tanımlanmıştır [15].

Modülasyon / demodülasyon ve temelbant işlemleri yüksek işlem gücü gerektirdiğinden, klasik alıcı verici cihazlar özelleştirilmiş donanım üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yazılım tabanlı radyolarda ise bu işlemler yazılım blokları tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu durum, yazılım tabanlı radyolardaki modülasyon / demodülasyon ve temelbant işlemlerinin yazılımsal olarak kontrolüne ve değiştirilebilmesine olanak vermektedir. Bu sayede yazılım tabanlı radyonun modülasyon tipi, frekans bandı, kodlama gibi karakteristikleri parametrik olarak değiştirilebilmektedir.

Yazılım tabanlı radyolar, bilişsel radyo teknolojileri için önemli bir altyapı oluşturmuştur. Bilişsel radyolarda gerekli olan esneklik, yazılım tabanlı radyolar ile sağlanmıştır. Projede de bir yazılım tabanlı radyo çözümü olan Universal Software Radio Platform (USRP) kitleri kullanılmıştır. Bu sistem ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.2’de verilmiştir.

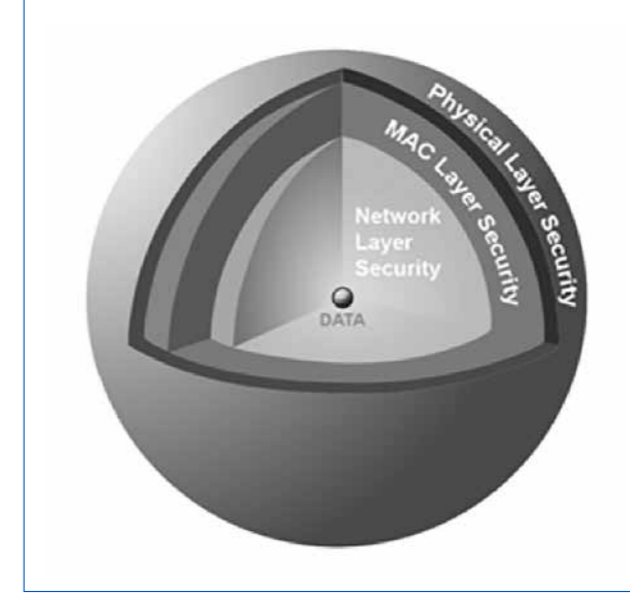
## 2.6 Bilişsel Radyo Ağlarında Güvenlik

Bilişsel radyo ağlarında güvenlik oldukça önemli bir noktadır. Lisanslı bantların ikincil kullanıcılar tarafından kullanımına olanak verilmesi, özellikle lisanslı kullanıcıların (birincil kullanıcıların) kullanım hakkına sahip olduğu bandı kullanması konusunda yaşayabileceği risklerin elimine edilmesi gerekliliğini doğurmuştur. Başka bir deyişle, ağ üzerinde kötü niyetli kullanıcıların olması durumunda birincil kullanıcıların zarar görmemesi için gerekli önlemleri almak zorunlu hale gelmiştir.

Birincil kullanıcıların haklarının ihlali dışında, bilişsel radyo ağının diğer fonksiyonlarını hedef alan saldırılar da söz konusu olabilmektedir. Bazı saldırı tipleri spektrum algılama fonksiyonunu hedef alırken, bazıları spektrum paylaşımı aşamasında problemlere yol açmaktadırlar [15].

Bilişsel radyo sistemlerinde karar vericilerin fiziksel katmandaki ölçümlere göre karar vermesi sebebiyle fiziksel katman güvenliği konusu bilişsel radyo ağlarında önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Güvenlik problemi, her katmanda ayrıca ele alınması gereken bir problemdir

(Şekil 6). Kablosuz ağlarda ise, fiziksel katman güvensizdir, bu nedenle, bilişsel ağlarda özellikle fiziksel katman güvenliği büyük önem taşımaktadır.



Şekil 6 Fiziksel katman güvenliği.

Özellikle sinyal boğma (jamming) ve birincil kullanıcı emülasyonu saldırıları bilişsel radyo ağlarının başarımını ciddi ölçüde etkileyen problemlerdir. Bilişsel radyo ağlarında sinyal boğma saldırıları ikincil kullanıcılar tarafından diğer ikincil kullanıcılar arasında öne geçmek için kullanılabilir. Bu tip saldırılarda hem toplam sistem başarımı, hem de birincil kullanıcıların haberleşme başarımı olumsuz yönde etkilenebilir.

Veri yanıltma (data falsification) saldırıları da bilişsel radyo ağlarında çokça kullanılan bir saldırı çeşididir. İşbirlikli bilişsel ağlarda ikincil kullanıcılar işbirliği içinde olan düğümler arasında iletilen spektrum kullanımı bilgisini değiştirerek kendilerine avantaj sağlayabilirler. Bilişsel radyo ağlarında yapılan saldırılar birincil kullanıcıların başarımını ve toplam sistem verimliliğini etkilediğinden oldukça hassas bir konudur.

Bilişsel radyolarda karşılaşılan en önemli güvenlik problemlerinden biri spektrum algılama bilgi değiştirme (spectrum sensing data falsification, SSDF) saldırıları olmaktadır. Bu saldırı tipinde bilişsel çevrimdeki spektrum sezme süreci kötü niyetli bir kullanıcı tarafından manipüle edilmektedir.

Proje kapsamında bilişsel radyo ağları güvenliği ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu konudaki çalışmaların detayları Bölüm 3.5’te verilmiştir.

## 2.7 Haberleşme Teknolojileri ve Bilişsel Ağlar ile İlişkileri LTE Standardı Çerçevesindeki Çalışmalar

2G olarak sınıflandırılan GSM telekomünikasyon ağlarının ilk çıkışından itibaren cep telefonu kullanımı hızlanarak artmaktadır. Geçen zaman içinde kullanım arttıkça, mobil servislere olan ihtiyaç artmıştır ve bu sistemler paket data servislerini destekleyecek şekilde geliştirilmeye başlanmıştır. Bu gelişim ilk olarak "General Packet Radio Service"(GPRS) (1997)

ile başlamış ve "Enhanced Data Rates for GSM Evolution" (EDGE) (2003) ile devam etmiştir. Bu sırada internet kullanımının yaygınlaşması ile bu iki teknolojinin birleşmesi kaçınılmaz olmuştur ve mobil internet erişimini olanaklı kılan smart (akıllı) cihazlar ortaya çıkmıştır. Bu gibi cihazların ortaya çıkması internet erişimine olan talebi daha da arttırmış, daha hızlı ve daha güvenilir veri iletişimine olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır.

Telekomünikasyon otoriteleri bu ihtiyaca 3G ağları ile cevap vermiş ve "Wideband Code Division Multiple Access" (WCDMA) bazlı "High Speed Packet Access" (HSPA) adı verilen ağlar ortaya çıkmıştır. HSPA'nın başarısı ve operatörler ve kullanıcılar tarafından hızlıca kabul görmesi bu daha hızlı, daha güvenli iletişim ağları için talebin hiçbir zaman bitmeyeceğini, aksine artan bir hızla devam edeceğini göstermektedir.

Bu sebeple "3rd Generation Partnership Project" (3GPP) telekomünikasyon ağlarının bir sonraki evrim basamağı olarak sıfırdan bir sistem yaratmayı önermiş ve "Long Term Evolution" (LTE) olarak adlandırılan sistemi ortaya koymuştur. LTE sistemi, kendisinden önce gelen (legacy) sistemlerden bağımsız olduğu için performans hedeflerine ulaşabilmek için "Multiple-Input Multiple-Output" (MIMO) veya "Orthogonal Frequency Division Multiplexing" (OFDM) gibi değişik teknolojilerden yararlanabilmiştir. MIMO – OFDM yapısının kullanılması ileride sistemin artan ihtiyaçlar doğrultusunda genişletilebilmesini olanaklı kılmıştır.

LTE standardizasyonu günümüzde 300 Mbps'ın üzerinde downlink ve 80 Mbps'ın üzerinde uplink data iletişim hızını desteklemektedir. Aynı zamanda LTE sistemleri 1.4 MHz den 20 MHz e kadar ölçeklenebilen bant genişliklerini desteklemektedir. Bu iletişim hızları 4x4 MIMO anten konfigürasyonu ile mümkün olup, standardizasyonun bir sonraki adımı olan LTE Advanced sistemleri MIMO konfigürasyonunu 8x8 e çıkarmayı hedeflemektedir. MIMO ve sistemin diğer bölümlerinde yapılan geliştirmelerle birlikte "International Telecommunication Union" (ITU) nun 4G sistemler için önerdiği 1 Gbps downlink data iletişim hızına ulaşması hedeflenmektedir.

LTE kullanıcıları PU olarak değerlendirildiğinde, bu sisteme bir bilişsel ağın eklenmesi olası kapasite kazancını çok arttıracaktır. Bununla birlikte, çoklu anten kullanımı, bilişsel ağ radyolarına da eklenerek kapasite artırımı sağlanabilecektir. Günümüzde, bu şekilde bir saha çalışması mümkün olmamakla birlikte, gelecekte, telekomünikasyon şirketlerinin bilişsel ağ destekli saha çalışmalarına izin verebileceği öngörülmektedir.

#### ISM BAND Uygulamaları

Yeni nesil iletişim ağları için önerilen bu proje kapsamında önerilen yöntemler mevcut iletişim sistemlerinde de kullanılabilir. ISM bandında çalışan WiFi cihazlarında ve yeni HSPA uygulamalarında birden çok anten kullanılmaya başlanmıştır veya kullanılması hedeflenmektedir. Burada MIMO kaynaklı kazanç sağlayabilecek yöntemler uygulanırsa bu sistemler için de performans gelişimi söz konusu olacaktır.

Bilişsel ağlar kapsamında yaptığımız çalışmalar, özellikle lisanssız olarak kullanılan ISM bandında iletim yapan sistemlere bilişsel radyo ağları entegrasyonuna örnek teşkil etmektedir. Test ortamımızdaki ikincil kullanıcıların algıladıkları spektrum boşlukları, WiFi bandında çalışacak şekilde implementasyonunu sağladığımız birincil kullanıcıya ait boşluklardır.

### 3. PROJE KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde proje kapsamında yapılmış olan çalışmalar tanıtılacaktır. Projede yapılmış olan çalışmalar altı ana grupta toplanmıştır. Bu gruplardan ilki kanal modelleri ile ilgili çalışmalardır. Bu gruptaki çalışmalarda bilişsel radyo ağlarında kanalın ve bozucu etkilerin modellenmesi, ve kanalların bazı bilişsel radyo ağ fonksiyonlarının üzerindeki etkisi incelenmiştir. İkinci grup yazılım destekli radyo tabanlı bilişsel radyo ağı test ortamının oluşturulmasına ilişkin çalışmalardır. Yazılım tabanlı radyo kitleri ile bilişsel ağların gerçekleştirilebileceği bir test ortamı kurulmuş ve diğer grup çalışmalarda da kullanılmıştır. Proje kapsamındaki üçüncü grup çalışmalar spektrum algılama üzerine yapılmıştır. Bu çalışmalarda, kurulan test ortamı üzerinde bir spektrum algılama senaryosu gerçekleştirilerek, kullanıcı trafiğinin ve kanal gürültüsünün spektrum algılama başarımına etkisi pratikte test edilmiştir. Ayrıca, öğrenme ve tahmine dayalı bir spektrum algılama modeli önerilmiştir. Dördüncü grup çalışmalarda çok giriş çok çıkışlı sistemler ele alınmıştır. Kurulmuş olan yazılım destekli radyo tabanlı test ortamı çoklu anten kullanımını desteklemek üzere geliştirilmiştir ve 2x2 MIMO sistem üzerinde ses kalitesi kestirimi yapılmıştır. Beşinci grup çalışmalar fiziksel katman güvenliği ile ilgili olmuştur. Fiziksel katman güvenliği, kablosuz ağlardaki önemi sebebiyle bilişsel radyo ağlarında da karşımıza çıkmaktadır. Literatürdeki fiziksel katman ağ güvenliği yöntemi olan yapay gürültü test ortamında gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte spektrum algılama bilgi değiştirme saldırılarının engellenmesi için bir yöntem önerilmiştir. Altıncı grup çalışmalar spektrum paylaşımı çatısı altında toplanmıştır.

#### 3.1 Kanal Modelleri ile İlgili Çalışmalar

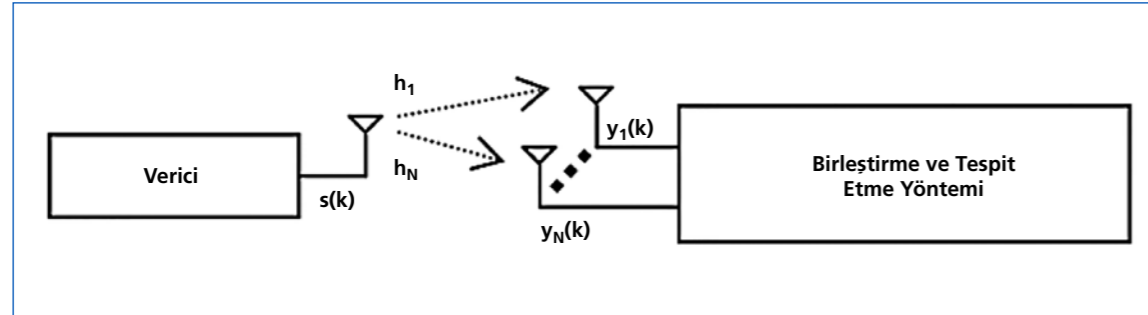
##### 3.1.1 Bilişsel Radyo Ağlarında Çok Antenli Spektrum Sezmenin Rayleigh Sönümlenmeli Kanal Modelinde İncelenmesi

Bilişsel radyo ağlarında sistemin genel performansını ciddi derecede etkilediği için spektrum sezme en önemli işlemlerden biridir. Bu çalışma bilişsel radyo ağlarında iki değişik "çok antenli spektrum sezmede sinyal birleştirme ve tespit etme" yöntemi üzerine yapılmıştır. Bu iki yöntemin performansları toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) ile denenmiştir. Spektrum sezme için işaret-gürültü oranı (SNR) kritik derecede önemli olduğu için alıcı çeşitliliği yaratan çok antenli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler çeşitli şekillerde alıcıda toplanan sinyalleri birleştirip sonucunda işaret-gürültü oranı yüksek bir toplam sinyal yaratmaktadırlar. Bu toplam sinyalden daha sonra çeşitli tespit teknikleri kullanılarak spektrum sezme sonuçları elde edilir.

Bilişsel radyo ağlarındaki şiddetli sönümlenme durumları göz önüne alınırsa, kanal etkisi olarak sadece toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) alınması yeterli derecede gerçekçi olmayabilir. Ayrıca alıcı tarafında birden çok anten kullanmanın getirdiği alıcı çeşitliliğinin sonucu olarak ortaya çıkacak işaret-gürültü oranındaki kazanç, kanal modeline Rayleigh sönümlenme modeli eklendiğinde tek antenli duruma göre farklılık gösterebilir. Bu yüzden bu çalışma sinyal birleştirme ve tespit etme yöntemlerinin performansını Rayleigh sönümlenme modelini de içeren kanal modellerinde test etmek için yapılmıştır.

Çalışmanın sistem modeli Şekil 7 'de verilmiştir. Birincil kullanıcının vericisi spektrumda belli aralıkları kullanarak etrafındaki alıcılara bir sinyal yollar. Bu sinyal her alıcı anteni için değişik

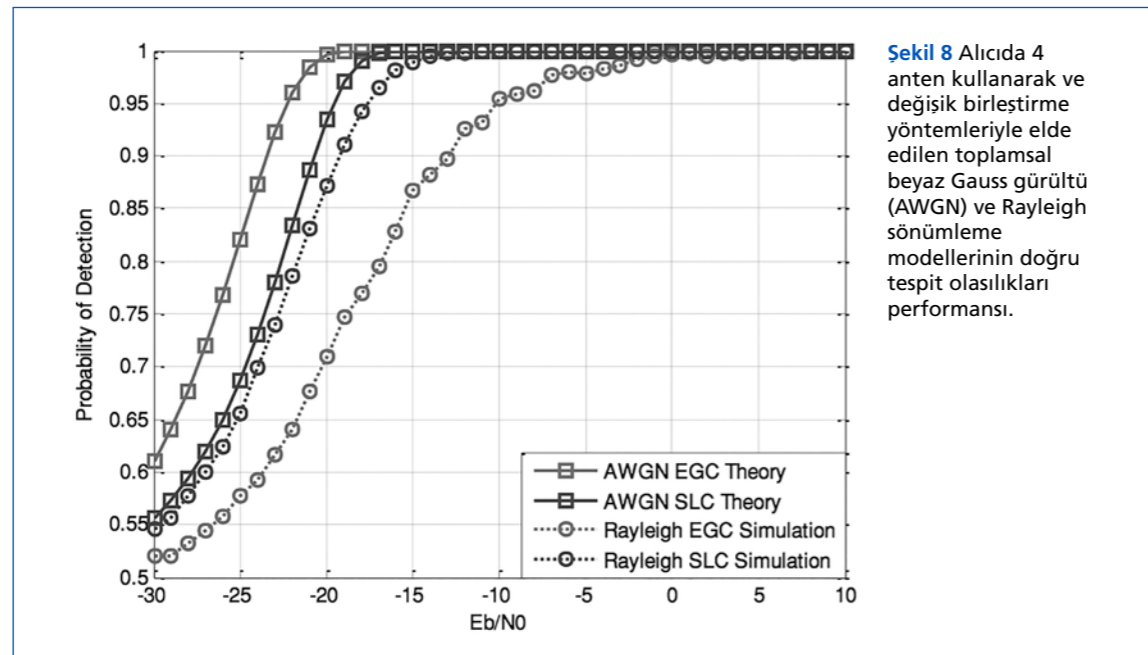
kanal katsayılarına sahip olan tek girişli-çok çıkışlı (single input-multiple output – SIMO) bir kanal modelinden geçerek alıcı antenlerine ulaşır. Bu çalışmada tek girişli-çok çıkışlı kanal modeli Rayleigh sönümlenme modelini içerecek şekilde kullanılmıştır.



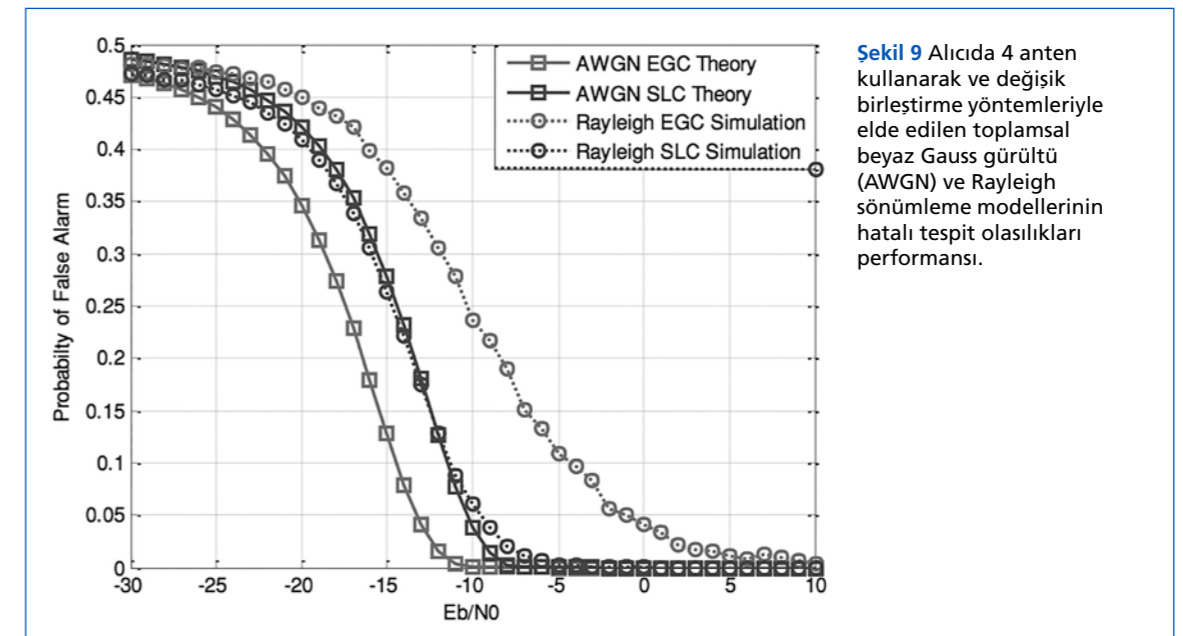
Şekil 7 Sistem modeli.

Alınan sinyaller daha sonra alıcıda birleştirme ve tespit yöntemlerince kullanılır. Bu yöntemler önce değişik antenlerden alınan sinyalleri birleştirir ve işaret-gürültü oranı (SNR) yüksek bir sinyal elde eder. Daha sonra bu sinyal çeşitli tespit tekniklerinde kullanılarak spektrum kullanım verisine ulaşılır.

Çalışmamız sonucunda elde edilen iki değişik birleştirme ve tespit etme yönteminin toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) ve Rayleigh sönümlenmeli kanal modellerinde performans karşılaştırması Şekil 8 ve 9 da incelenebilir. EGC olarak adlandırılan algoritmanın toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) kanalında SLC olarak adlandırılan algoritmadan daha iyi performans sergilediği, ancak Rayleigh sönümlenmeli kanal modellerinde daha kötü bir performansı olduğu - doğru tespit (Şekil 8) ve hatalı tespit (Şekil 9) grafiklerinden - görülebilir.



Şekil 8 Alıcıda 4 anten kullanarak ve değişik birleştirme yöntemleriyle elde edilen toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) ve Rayleigh sönümlenmeli modellerinin doğru tespit olasılıkları performansı.



Şekil 9 Alıcıda 4 anten kullanarak ve değişik birleştirme yöntemleriyle elde edilen toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) ve Rayleigh sönümlenmeli modellerinin hatalı tespit olasılıkları performansı.

Sonuç olarak, bu çalışma çok antenli spektrum sezme yöntemlerinin toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) ile test edilmelerinin gerçek performansları hakkında kesin bir belirti vermeyebileceğini göstermiştir. Beklendiği gibi, EGC yöntemi toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) kanal modeli ile en iyi performansı sergilediği halde, ilişkisiz Rayleigh sönümlenmeli kanal modellerinde en kötü performansı elde etmiştir. Böylece, sinyal birleştirme ve tespit yöntemlerinin değişik kanal modellerinde karşılaştırmalı performanslarının değişik olacağı sonucuna varabiliriz.

Ayrıca bu çalışma Rayleigh sönümlenmeli kanal modellerindeki tespit başarı oranının toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) kanal modellerindeki başarı oranına kıyasla daha kötü olduğunu doğrulamaktadır. Buna ek olarak, Rayleigh sönümlenmeli kanal modellerinde, birden çok anten kullanımının performansı artıracığının kesin olmadığı, artışın kullanılan birleştirme yöntemine bağlı olduğu gösterilmiştir.

Son olarak, bu çalışmada çok antenli spektrum sezme yöntemlerinin performans değerlendirmesinde Rayleigh sönümlenmeli kanal modelleri kullanılırsa elde edilen performans kazancının daha iyi belirlenebileceği gösterilmiştir.

### 3.1.2 Bilişsel Radyo Ağlarında, Bir Gözlem Ağı Yardımıyla Elverişli Kanal Sınıflandırılması

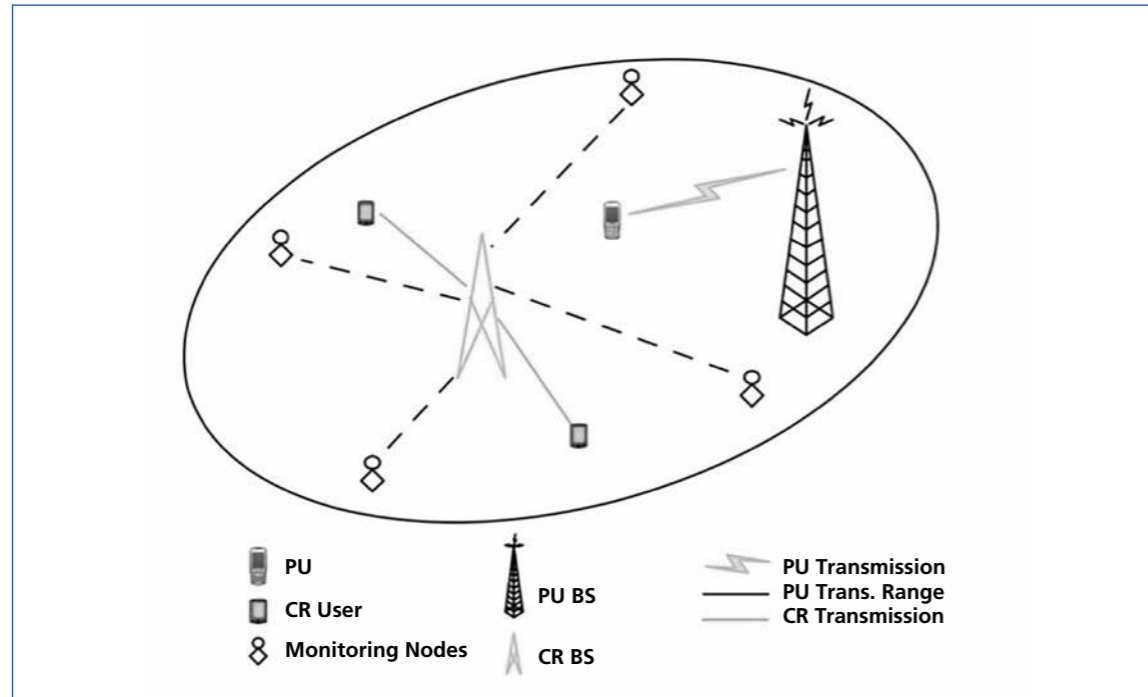
Bilişsel radyo ağlarının en temel ögesi "elverişli kanal" bulma ve kullanmadır. Bilişsel radyo kullanıcıları açısından *elverişli kanal*, birincil kullanıcıların iletim yapmakta olduğu kanalı kullanmadıkları durumlarda elde edilir. Bilişsel radyo kullanıcıları, kanalın elveriş durumunu belirlemek için etkin spektrum sezme ve gözleme teknikleri kullanmak zorundadır.

Bilişsel radyo kullanıcıları, birincil kullanıcıların kanal kullanımını belirlemek için kendileri bir spektrum sezme yöntemleri kullanabilir. Ancak, IEEE 802.22 standardının 2010 yılındaki değişikliğinden sonra, Bilişsel radyo kullanıcıları, birincil kanalların durumlarını ortak bir veri

tabanından okuyabilmekte, kanalın elverişli olup olmadığını kendi gözleme teknikleri dışında belirleyebilmektedir. Böylece kanallar hakkında bilgiler daha hızlı bir şekilde tüm bilişsel ağ kullanıcıları tarafından paylaşılabilir. Elverişli kanalların ortak bir veri tabanında toplanması için ek bir "gözlem ağı" kullanılmakta, bu ağdaki düğümler tüm birincil kanalları sürekli olarak izlemektedir. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biride de zaten buradadır. Yani kanal sezme işini eğer ikincil kullanıcılar yaparsa hattı belirli periyodik aralıklarla dinlemek ve elverişli kanal kararlarını bu periyodikliğe göre vermek zorundadırlar. Oysaki gözlem ağındaki kullanıcılar sadece kanal gözleme, sezme ve karar verme işlemleriyle uğraştıkları için ve kendileri bilişsel radyo trafiğine ortak olmadıkları için, elverişli kanal bilgilerini daha etkin ve güvenilir şekilde elde edebilirler. Kanallar hakkında toplanan bilgiler bu gözlem ağı kullanıcıları tarafından bilişsel ağ baz istasyonuna gönderilmekte, burada ortak bir veri tabanında tutulmaktadır. Böylece bilişsel ağ kullanıcıları, kendileri ek bir spektrum sezme ve gözleme yapmadan hat hakkında gerekli bilgiyi edinebilmektedir.

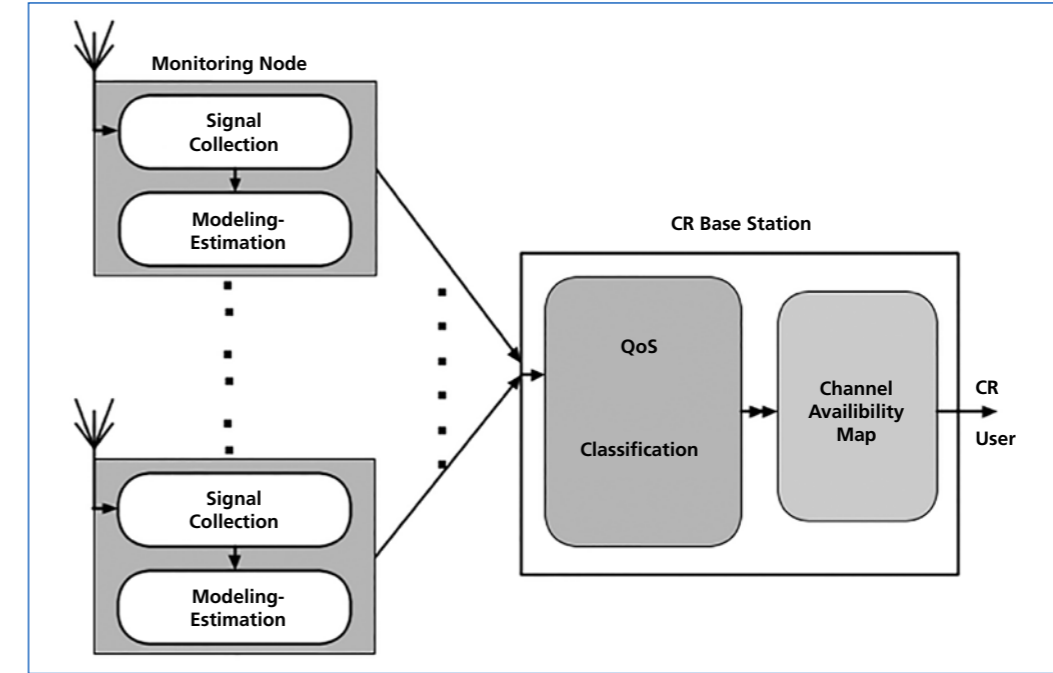
Yapılan çalışmada da, bir gözlem ağı bilişsel ağ topolojisine eklenmiş ve spektrum sezme işlemi tamamen bu gözlem ağına bırakılmıştır. Bu şekilde oluşturulmuş olan topoloji Şekil 10'da görülmektedir.

Şekil 10'da görüldüğü gibi, gözlem ağı kullanıcıları (monitoring nodes) spektrumu gözleme ve sezme işlemini yürütmektedir. Gözlem ağı kullanıcıları, sürekli olarak dinledikleri kanaldaki sinyalleri kullanarak modelleme ve tahmin yaparlar. Bu elverişli kanal tahmin bilgileri bilişsel radyo baz istasyonuna (CR BS) gönderilir. Baz istasyonu, gözlem ağından edindiği bu bilgilerle elverişli kanal kararlarını verir ve bilişsel ağ kullanıcılarına bu kararı gönderir.



Şekil 10 Çalışmada kullanılan topoloji.

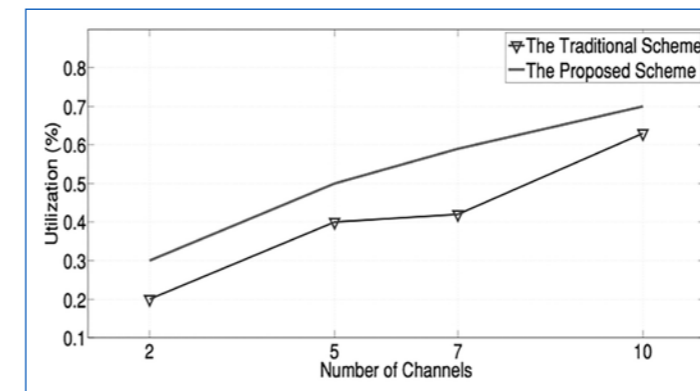
Gözlem ağı kullanılarak oluşturulan sistem Şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 11 Tasarlanan sistem.

Şekil 11'de görülen bu sistemde, gözlem ağı kullanıcıları sinyal toplama ve modelleme görevini üstlenirler. Toplanan sinyaller, bir otoregresyon modeli yardımıyla modellenir ve sonraki sinyaller yine bu otoregresyon modeliyle tahmin edilir. Tüm gözlemciler bu tahmin bilgilerini şekilde görüldüğü gibi bilişsel radyo baz istasyonuna gönderirler. Baz istasyonu, elde ettiği bu bilgilerle elverişli kanal için bir sınıflandırma yapar. Bu sınıflandırma birincil kullanıcıların hattı kullanma sıklıklarına göre üç tip olarak tasarlanmıştır. Bu sınıflandırma hattın çok kullanılması (BUSY), ortalama kullanılması (MODERATE) ve az kullanılması (IDLE) olarak yapılmıştır. Bu sınıflandırma yapılırken, gözlemcilerden elde edilen kanal modeli ve tahminleri toplanmış bu tahminlerin birbirleriyle olan ilişkisi bir korelasyon katsayısıyla belirlenmiştir. Söz konusu sınıflandırmada bu korelasyon katsayısı bir eşik değeri olarak kullanılmış, belirlenen eşik değerlerine göre sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan sistemle ilgili oluşturulan bir başarımlar incelemesi Şekil 12'de verilmiştir.



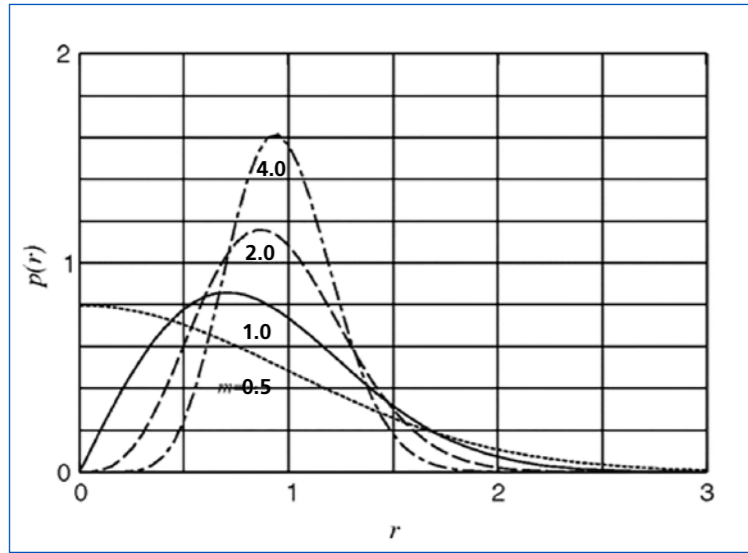
Şekil 12 Kullanım oranının karşılaştırılması.



Şekilde görüldüğü gibi, önerilen sistem, literatürde sıkça görülen geleneksel yöntemle karşılaştırılmıştır. Bu geleneksel yöntemde, hem gözlemciler hem de bilişsel kullanıcılar kanalları belirli periyodik aralıklarla dinlemekte ve bilgilerini baz istasyonu ile paylaşmaktadır. Geleneksel yöntem, baz istasyonunun bu kanal kullanım bilgilerini toplaması ve tahminin baz istasyonu tarafından yapılması esasıyla çalışmaktadır. Oysaki tasarlanan sistemde, gözlemciler hem hattı sürekli dinlemekte hem de sinyal toplama ve tahmin işlemini yürütmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, spektrum kullanım oranı tasarlanan sistemde geleneksel sisteme göre daha fazladır. Çalışmamız Bölüm 4'te listelenen yayınlarımızdan 2 numaralı olan bildiri aracılığı ile literature sunulmuştur.

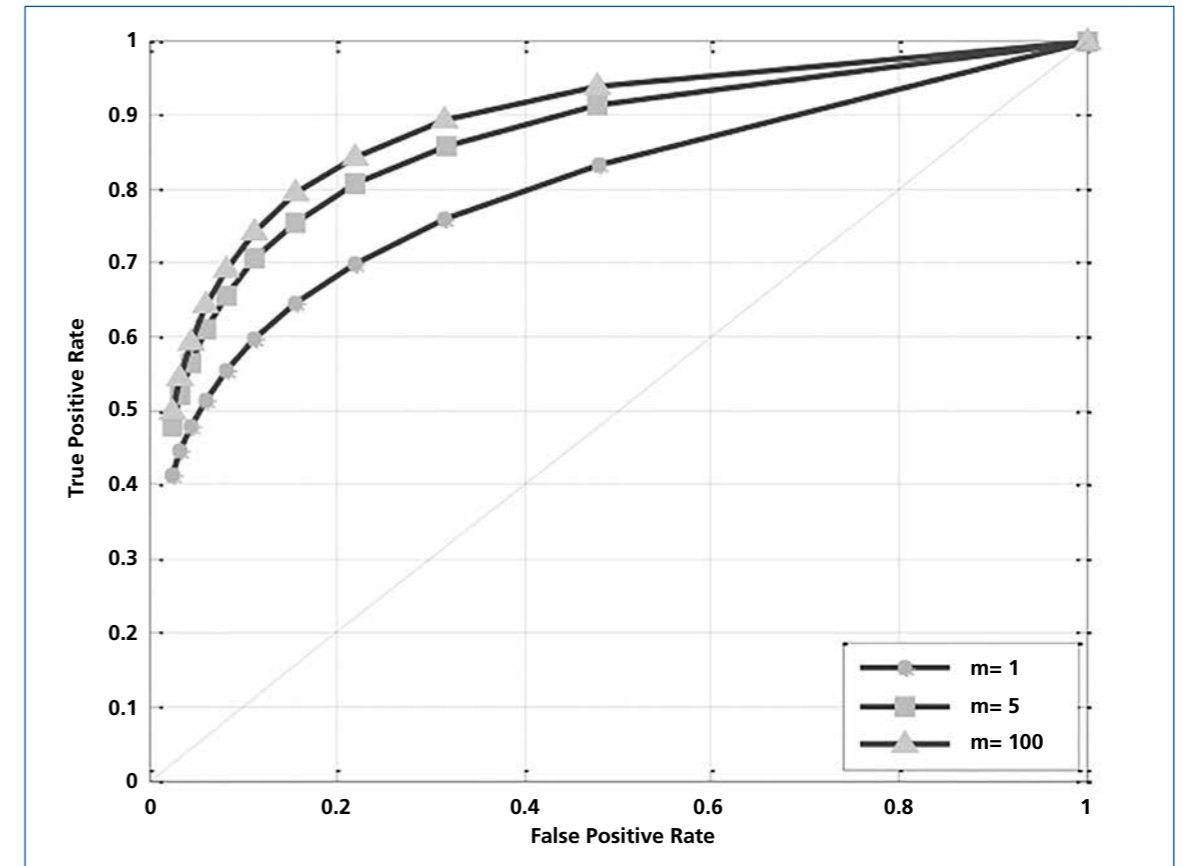
### 3.1.3 Kanal Bozucu Etkilerin Modellenmesi

Spektrum algılama çalışmalarında, ilk aşamada, kanal bozucu etmenlerinin etkilerinin proje kapsamında geliştirilen spektrum sezme algoritmalarına uyarlanması ve test edilebilmesi amacıyla kanal etkilerine bağlı spektrum sezme hatasının modellenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu amaç doğrultusunda Nakagami-m kanallarda farklı SNR değerleri için doğru tespit ve hatalı tespit oranlarını veren bir model oluşturulmuştur.



Şekil 13 Farklı m değerleri için Nakagami-m dağılımına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonları.

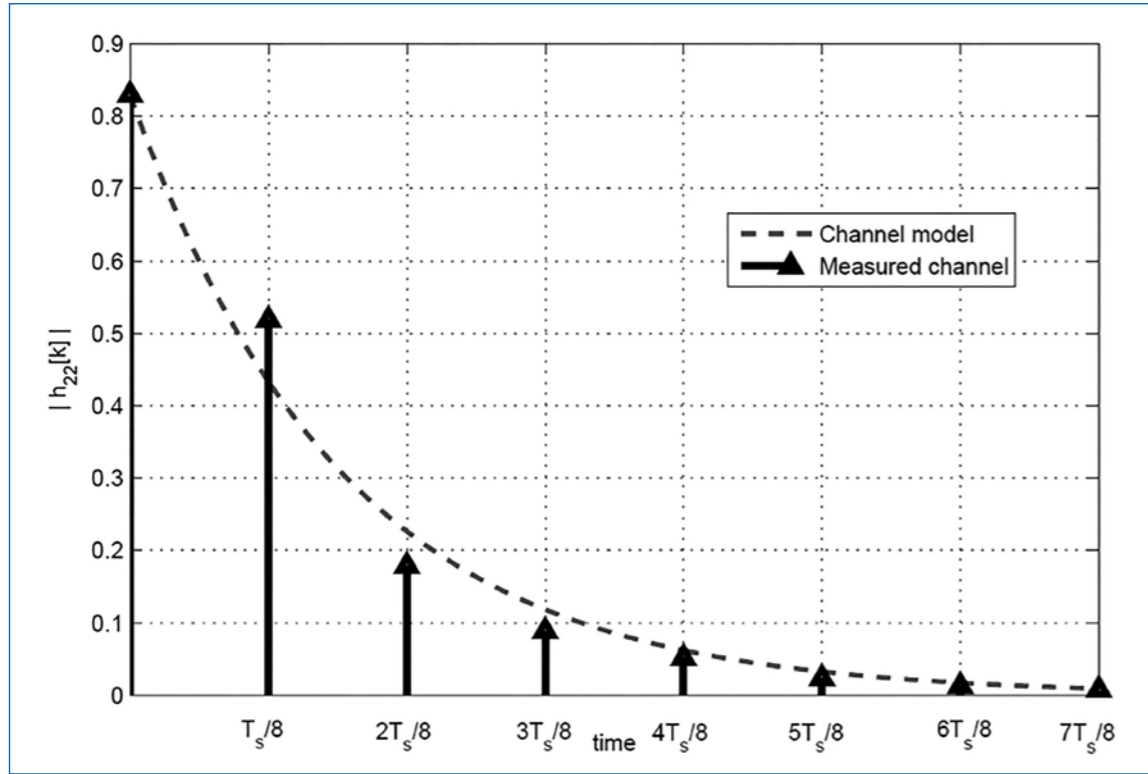
Nakagami-m dağılımı, özellikle sönümlü radyo kanallarını modellemede sıkça kullanılan bir dağılımdır [16]. Bu dağılımdaki m-parametresinin değiştirilmesi ile, Şekil 13'de de görülebileceği gibi geniş bir sönümlenme aralığını modellemek mümkündür. Bu dağılım,  $m=1$  durumunda Rayleigh dağılımına,  $m = \infty$  durumunda sönümlenmesiz duruma yakınsar. Ayrıca deneysel sonuçlar Nakagami dağılımının telsiz haberleşme kanallarının modellenmesinde diğer dağılımlardan daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir [17]. Bu sebeple, kanal modeli üzerinde çalışılırken Nakagami-m tipi kanallar seçilmiştir. Modelleme sonucu farklı kanallara ait örnek ROC eğrileri Şekil 14 üzerinde görülmektedir.



Şekil 14 Alıcı işletim karakteristiği (Receiver Operating Characteristic - ROC).

### 3.1.4 Tam-Çift Yönlü Sistemlerin Başarımının ve Spektrum Kullanımının İncelenmesi ve Kanal Kestirimi Çalışması

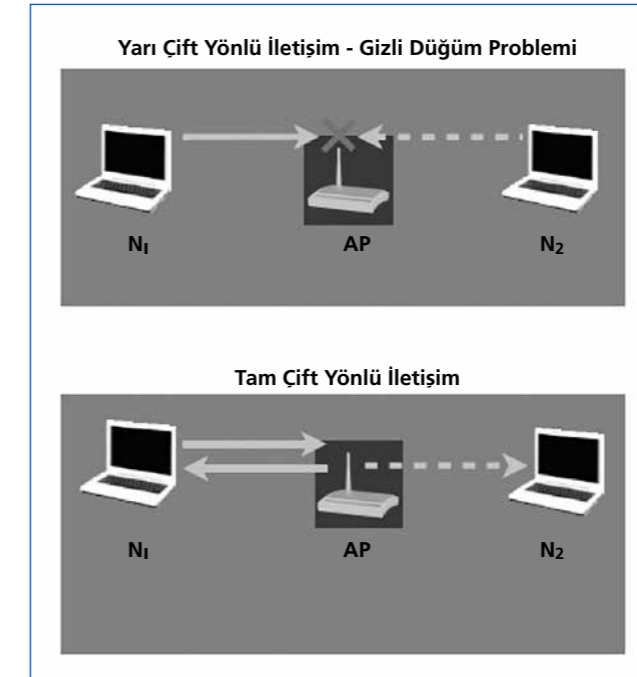
Mevcut telsiz haberleşme sistemleri yarı-çift yönlü yapıda olup, veri gönderme ve alma işlemleri için ya aynı zaman aralığında farklı frekans bantları ya da aynı frekans bantı kullanılarak farklı zaman aralıkları kullanılarak gerçekleştirilir. Her geçen gün kullanıcı sayısının ve talep edilen bilgi miktarının artmasıyla birlikte yaşanan kapasite sorunları nedeniyle frekans bantlarının daha etkin bir şekilde kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır [18]. Bu soruna bir çözüm olarak önerilen tam-çift yönlü haberleşme tekniğini kullanan radyolar tasarlanmaktadır [19]. Aynı zamanda bilişsel radyoların tam-çift yönlü işaretleme uygulamalarında saklı düğüm problemine çözüm getirilebileceği öngörülmektedir [20]. Bu çalışmada USRP kitleri kullanılarak tam-çift yönlü radyolardaki başarımları etkileyen öz-girişim kanalının özelliklerini tanımlamaya yönelik bir uygulama yapılmıştır. Kanal karakteristiğini belirleyebilmek amacıyla verici antenden birim darbe işaretleri gönderilmiştir. Bu işaretlerin bant genişliği 200kHz iken 2.4 GHz frekansında bulunmaktadır. Bu ölçümde kullanıcıya ait alıcı ve verici antenler arasındaki mesafe 5 cm alınarak radyolar çalıştırılmıştır. Alıcıda elde edilen işaret kanalın birim darbe yanıtını verirken teorik sonuçlarla karşılaştırılabilmesi amacıyla kanal katsayıları normalize edilmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 15 Kanal kestirimi ölçüm sonuçları ( $T_s = 5 \mu s$ ).

Ölçülen kanal değerleri kullanılarak eğri uydurma işlemi gerçekleştirildiğinde kanalın darbe cevabının üstel dağılım gösterdiği görülmektedir. Burada girişim kanalından gelen işaretin alınan işaret üzerinde yarattığı bozucu etkilerin belirlenebilmesi aşamasında kanalın darbe yanıtının dağılımı etkili olmaktadır. Tam-çift yönlü haberleşme uygulamalarında kullanıcının verici ve alıcı antenleri arasındaki mesafe (5cm) çok yakın olduğundan, tek ton modülasyonlu işaretleşmede, ölçümlerden de görülebileceği üzere kanalın zamanla değişen yapıda olduğu göz ardı edilmemelidir.

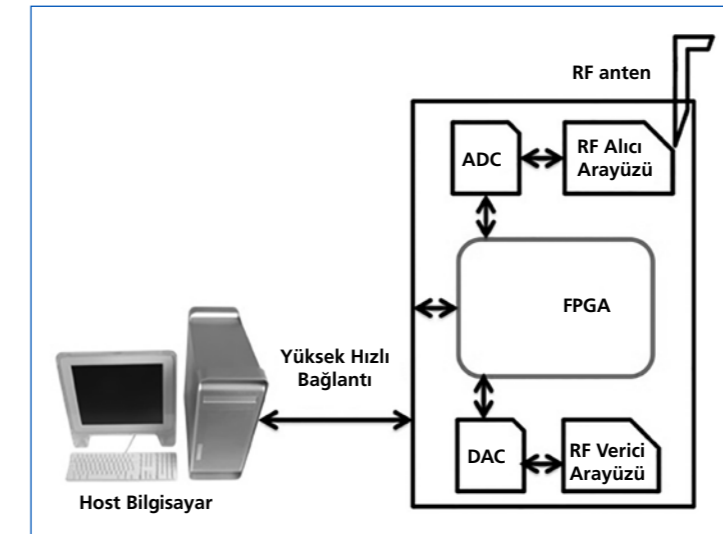
Bunun yanı sıra tam çift yönlü iletişim teknikleri, günümüz yarı çift yönlü telsiz haberleşme sistemlerinde oluşan gizli düğüm problemini (hidden node problem) ortadan kaldırmaktadır. Gizli düğüm problemi Şekil 16’te görüldüğü gibi, iki düğümün birbirinden habersiz olarak aynı düğüm ile haberleşme isteği göndermesi durumudur. Bu durumda iki yönden de işaret alan düğümde, yüksek girişim sebebiyle sinyal kalitesi düşecek ve iletişim gerçekleşemeyecektir. Tam çift yönlü iletişimde ise ortadaki düğüm halihazırda iletimde olduğu için gizli düğüm ortamdaki hiçbir düğüm için oluşmamaktadır.



Şekil 16 Gizli dinleyici problemi.

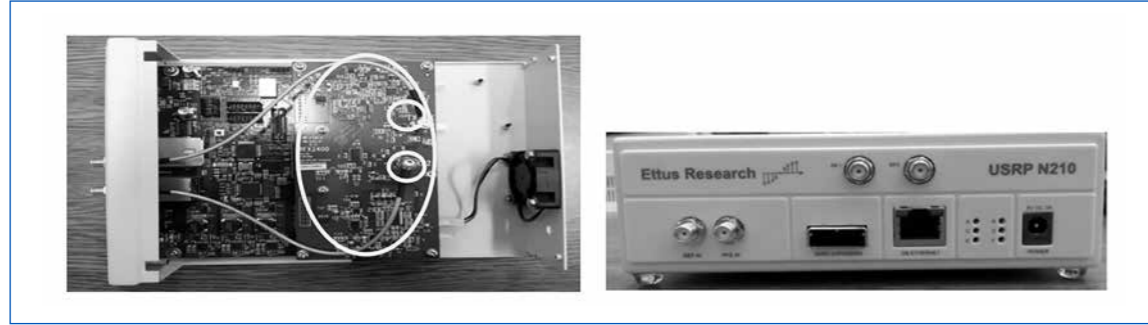
### 3.2 USRP Tabanlı, Bilişsel Radyo Ağı Test Ortamı

Oluşturulan test ortamında, güncel literatürde sıkça kullanılan Universal Software Radio Platform (USRP) kitleri kullanılmıştır. Bu kitler, Şekil 17’te görüldüğü gibi, bir Field Programmable Gate Array (FPGA), bir Dijital-Analog ve bir Analog-Dijital dönüştürücüden oluşmaktadır. Kitler, yüksek hızlı bir bağlantıyla (USB ya da Gigabit hızında bir Ethernet bağlantısı) bir ev sahibi (host) bilgisayarla haberleşmektedir. Bu host bilgisayar USRP’den alınan anlık sinyalleri analiz ederek spektrum üzerinde gerekli yazılımsal değişikliklerin yapılmasını kontrol etmektedir. Böylece bir “Yazılıma Bağlı Radyo (Software Defined Radio, SDR)” platformu sağlanmaktadır.



Şekil 17 Yazılım - temelli radyo (Software Defined Radio, USRP-SDR).

USRP, Ettus Research LLC - National Instruments tarafından üretilen ve bilgisayara bağlanarak yazılım tanımlı radyo ortamı oluşturan bir ürün ailesidir. İç yapısı bir ana kart ve bu ana karta bağlanan değişik özelliklerde çalışan yardımcı kartlardan oluşmaktadır. Anten, referans işaretleri, çoklu anten kullanımına özgü genişletme gibi girişleri bulunmaktadır. Şekil 18’te, anakart üzerine monte edilen RFX2400 kartı ve USRP N210 kitine ilişkin ön görünüm görülmektedir.



Şekil 18 USRP N210 Kit, iç yapı ve ön görünüm.

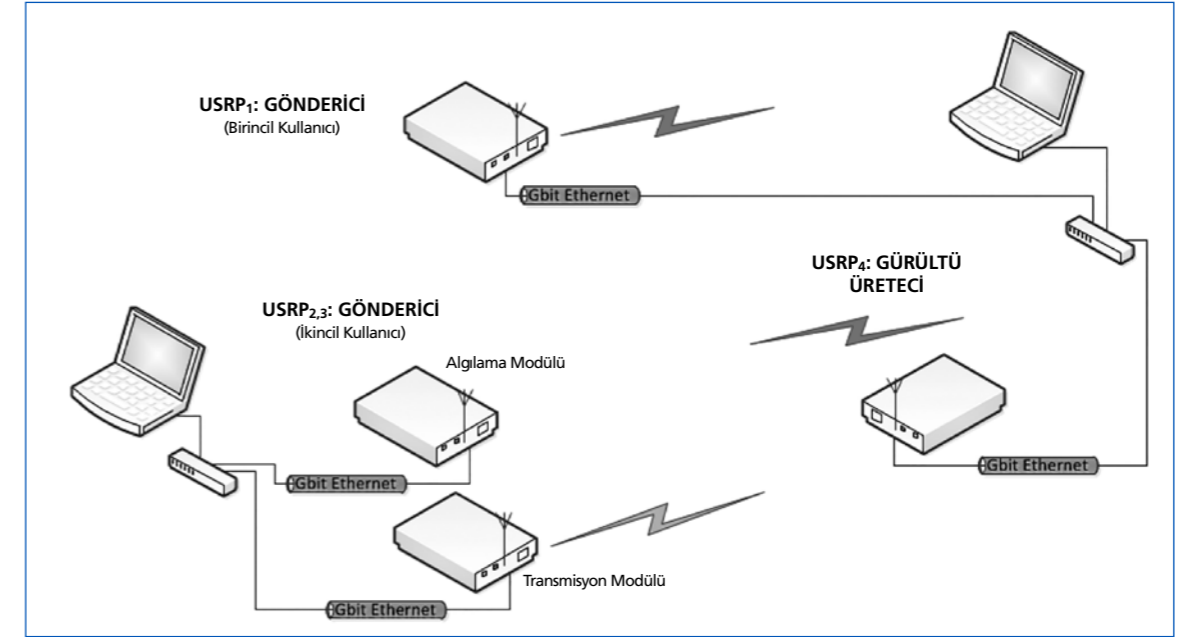
Yazılım bileşeni olarak, projenin ilk aşamasında GNU Radio açık kaynak kodlu yazılım platformu incelenmiş ve ilk örnekler denenmiştir. İlerleyen aşamalarda ise, MATLAB Simulink® ortamına geçilerek, bu yazılım ortamındaki örnekler incelenmiş ve gerçekleştirilen simülasyonlarda bu platform kullanılmıştır. Son olarak, daha önce Ettus firması tarafından üretilen USRP kitlerinin National Instruments (NI) firması tarafından temin edilmeye başlanmış olması ve bu firmanın yazılımsal desteği LabVIEW® programı üzerine yoğunlaştırması üzerine, LabVIEW® programının yetenekleri incelenmiş ve çalışmaların LabVIEW® ortamı üzerine taşınması ve bu ortam üzerinde devam ettirilmesi uygun bulunmuştur.

Kurulan bu test ortamı, ileride detayları verilecek olan, spektrum algılama, fiziksel katman güvenliği, çoklu anten yapıları kullanma gibi pek çok çalışmada kullanılmıştır.

### 3.3 Spektrum Algılama Çalışmaları

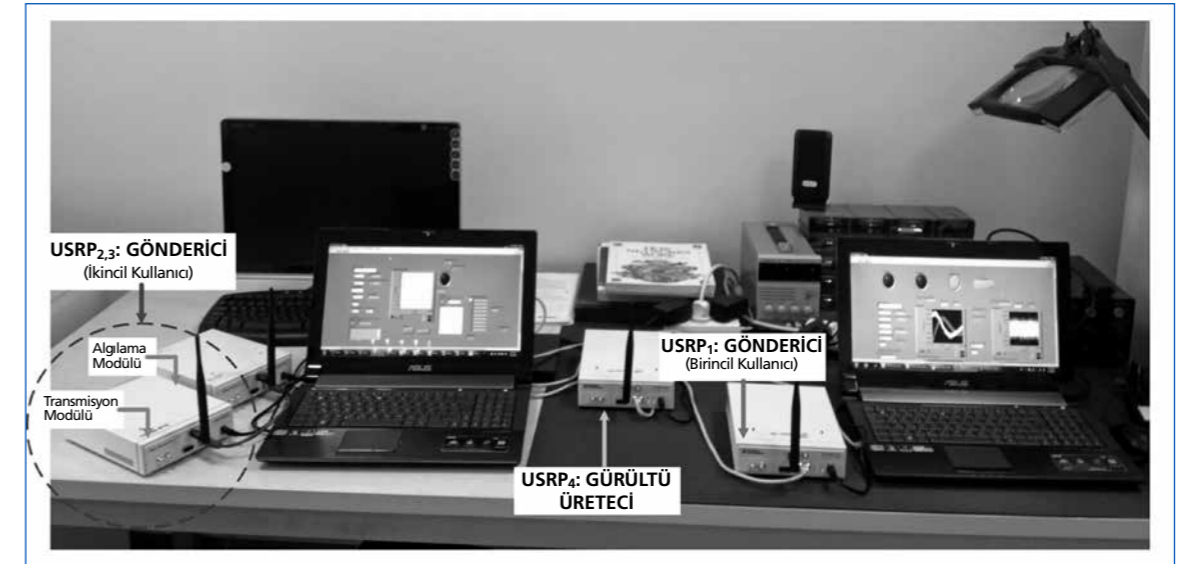
#### 3.3.1 USRP Tabanlı Test Ortamı Kullanılarak Gerçekleştirilen Spektrum Algılama Yöntemleri ve Bilişsel Ağ Sistemi

Bu çalışmada, yazılım tabanlı radyolar kullanılarak bir bilişsel radyo test ortamı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu test ortamında, bilişsel radyo ağının performansı, birincil kullanıcının trafik yoğunluğu, sistemdeki gürültü seviyesi gibi, çeşitli ağ parametreleri ile test edilmiştir. Gerçek zamanlı spektrum algılama yönteminin performansı, yanlış yakalama, yanlış alarm ve yakalama oranları ile sistem efektif kullanım oranı metrikleri incelenerek değerlendirilmiştir. Kurulan bu test ortamı, ilerideki çalışmalarımız için bir temel oluşturmaktadır.



Şekil 19 Kullanılan sistem modeli.

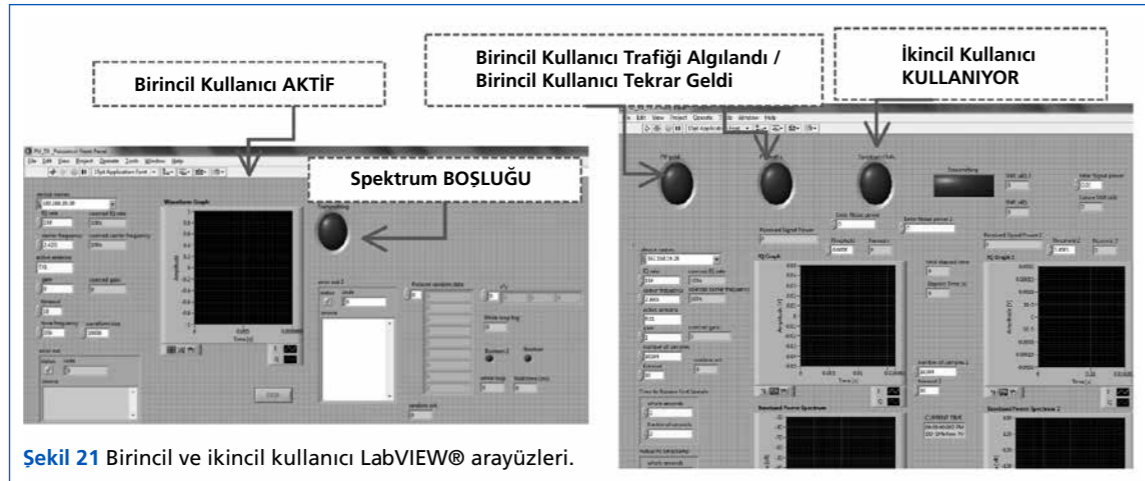
Şekil 19’ da verilen sistem modelinde görüldüğü üzere, test ortamı, bir adet ikincil kullanıcı, bir adet birincil kullanıcı ve kontrol edilebilir gürültü kaynağı düğümlerinden oluşmaktadır. İkincil kullanıcı paralel spektrum algılama yöntemini kullanmakta olup, bu nedenle, iki ayrı spektrum algılama ve transmisyon birimlerine sahiptir. Şekil 20’de, USRP kitleri ile gerçekleştirilen test ortamını görülmektedir.



Şekil 20 Kurulan test ortamı.

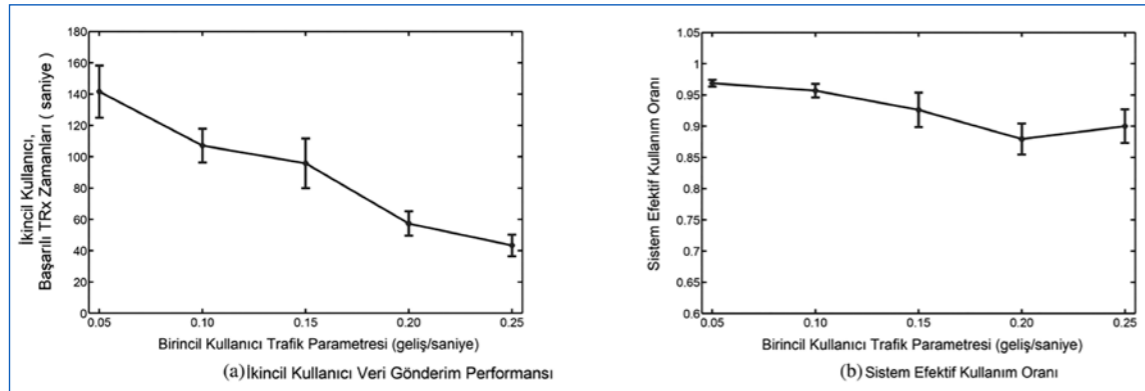
Yapılan deneylerde birincil kullanıcı 2.49 GHz merkez frekansını kullanarak veri göndermektedir. Bu işlemi transmisyon modülü ile yapmaktadır. Veri gönderme tipi Poisson proses olarak modellenmiştir (Saniyede ortalama 0.25 olay ve her veri gönderimi 3sn). İkincil kullanıcının algılama biriminin görevi, devamlı birincil kullanıcı frekansını dinlemek ve enerji

yakalama algoritmasını uygulamaktır. Transmisyon modülünün görevi ise ikincil kullanıcının, yakalamış olduğu spektrum boşluklarını kullanmasını sağlamaktır. Bu sayede algılama birimi ve transmisyon modülü tek bir ikincil kullanıcıyı gerçekleştirmektedir. Yapılacak olan deneyler farklı kanal gürültü seviyelerinde gerçekleşmek istendiğinden sisteme bir adet gürültü üretici de eklenmiştir. Ortam gürültüsü ölçüldükten sonra, deneyin yapılacağı SNR değeri için gereken ilave gürültü, bu düğüm tarafından sağlanmaktadır. Gürültü üretici düğümü 2.49 GHz merkez frekansını kullanarak veri göndermektedir. Bu düğümün gücü, ikincil kullanıcı düğümdeki SNR değeri belirli değerlerde tutulacak şekilde ayarlanmaktadır.



Sekil 21 Birincil ve ikincil kullanıcı LabVIEW® arayüzleri.

Birinci set deneylerde, birincil kullanıcı trafik yoğunluğu değiştirilerek, ikincil kullanıcının performansı incelenmiştir. Şekil 22'de görüldüğü üzere, birincil kullanıcı trafik yoğunluğu arttıkça ikincil kullanıcının kullanabildiği spektrum alanları azalmıştır.



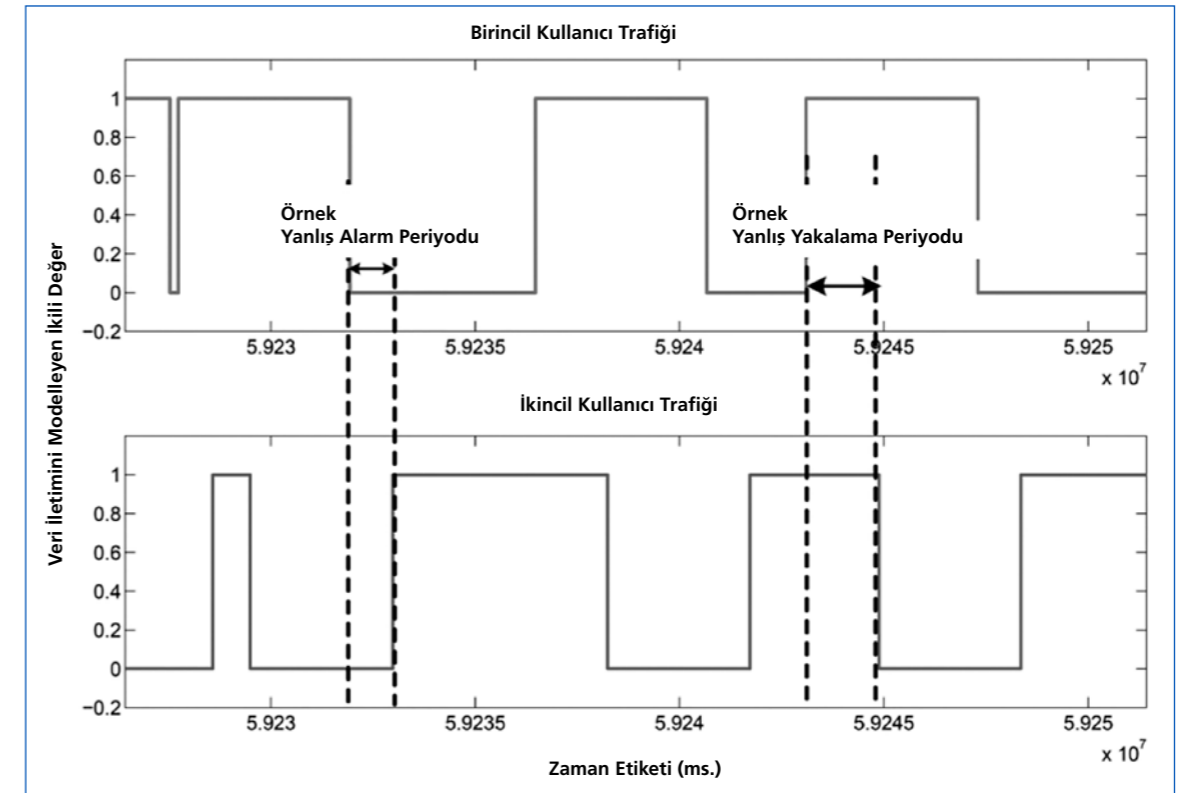
Sekil 22 Birinci set deneylere ilişkin performanslar.

Sistem efektif kullanım oranı parametresi ise spektrum algılama algoritmasının performansı ile ilgili olduğundan, birincil kullanıcı trafiğinin değiştirilmesinden çok etkilenmemiştir. Tablo 1'de, bu deneylerdeki spektrum algılama yöntemi performans değerleri görülmektedir. Tablo 1'de de görüldüğü üzere spektrum algılama algoritmasının performansı, birincil kullanıcı trafik parametrelerinden çok etkilenmemektedir. Bu algoritmanın performansını, seçilen eşik değeri belirlemektedir.

$\lambda$	0.005	0.10	0.15	0.20	0.25
<b>Yakalama</b>	0.922	0.881	0.852	0.810	0.813
<b>Yanlış Yakalama</b>	0.031	0.043	0.074	0.121	0.100
<b>Yanlış Alarm</b>	0.262	0.243	0.241	0.226	0.225

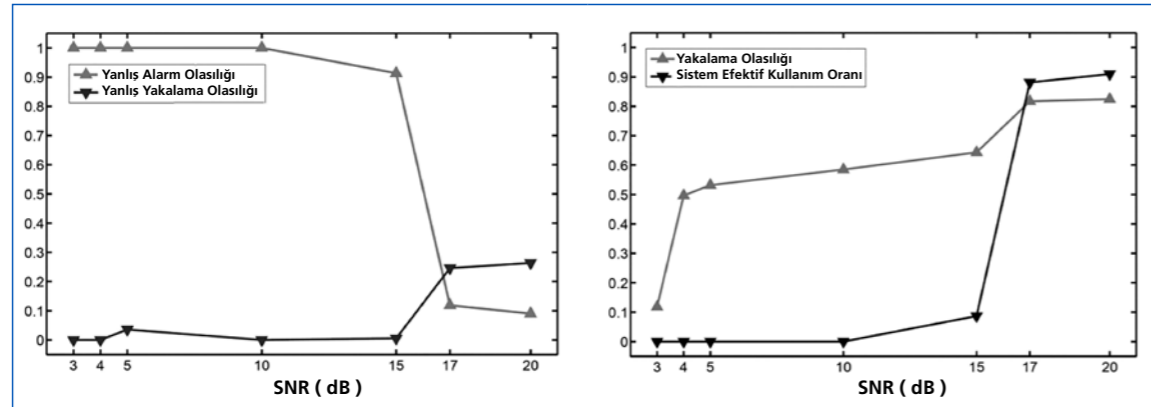
Tablo 1 Birinci set deneylerde, spektrum algılama algoritması performansları.

Şekil 23'te gözlemlenen örnek spektrum algılama hataları verilmiştir. Yakalama oranı birincil kullanıcının gönderim durumunun doğru olarak algılanması olasılığıdır. Yanlış alarm, birincil kullanıcı hattı kullanmadığı halde spektrum algılama algoritmasının birincil kullanıcı var sonucu oluşturması iken yanlış yakalama oranı ise ters biçimde, birincil kullanıcı hattı kullanmakta iken, algoritmanın birincil kullanıcı yok sonucu üretmesinin olasılığıdır.



Sekil 23 Gözlemlenen örnek spektrum algılama hataları.

İkinci set deneylerde ise sistemin gürültüye dayanıklılığı test edilmiştir. Kontrollü gürültü kaynağı olan düğüm, ikincil kullanıcıdaki SNR değerinin istenilen seviyeye getirilmesi için kullanılmıştır. Ortamdaki gürültü artırıldıkça, belirli bir değerden sonra, ikincil kullanıcıdaki spektrum algılama algoritmasının (eşik değeri değiştirilmeden) gerektiği şekilde davranmadığı gözlemlenmiştir. Bu deneylerdeki amaç, test ortamındaki ikincil kullanıcının hangi seviyedeki gürültüden sonra düzgün çalışma yeteneğini kaybedeceğinin ölçülmesidir.



Sekil 24 Değişen sinyal/gürültü oranlarına ilişkin deneylerin sonuçları.

Şekil 24'de de görüldüğü üzere, ikincil kullanıcıdaki SNR değeri 15 dB değerinden düşük olduğu sürece çok yüksek yanlış alarm urumu ve bu nedenle spektrumun hiç kullanılmaması sonucunda 0 değerine yakın bir efektif kullanım oranı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmamızda, LabVIEW® yazılımı ile programlanabilen radyolar ile dinamik spektrum erişimi üzerine bir test ortamı kurulmuştur. Birincil kullanıcının Poisson trafik modeline göre trafik yarattığı bu ortamda, ikincil kullanıcının performansı çeşitli parametreler ile test edilmiş ve incelenmiştir. Spektrum algılama algoritması, enerji seviyesi gibi parametrelerin belirlenmesi, sisteme ek kontrol edilebilir gürültü kaynağı eklenerek sistemin performansının ölçülmesi gibi geliştirmeler yapılmıştır. Oluşturulan bu test ortamı diğer çalışmalar için de bir temel bilişsel radyo ortamı oluşturmaktadır. Çalışmamız Bölüm 4'te listelenen yayınlarımızdan 5 numaralı olan bildiri aracılığı ile literatüre sunulmuştur.

### 3.3.2 Öğrenme ve Tahmine Dayalı Spektrum Algılama Yöntemleri

Bilişsel radyo ağlarında, spektrumun doğru şekilde algılanması, bu ağların performansını doğrudan etkileyen bir aşamadır. Spektrum algılama yöntemlerinin doğruluk performansları ise, spektrum algılama işlemine ayrılan zaman ile doğru orantılıdır. Bunun yanında, bu süre ne kadar uzun tutulur ise, spektrum kullanma zamanından algılama için ayrılan süre o kadar uzun olur ve bu bir spektrum kaybı olarak değerlendirilebilir. Bu sebeple, spektrum algılama zamanı ve spektrum algılama doğruluğu kriterleri, çakışan performans ölçütleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmamızda, spektrum algılama süresinin, spektrum durumunu, spektrumun daha önceki durumlarına bağlı olarak tahmin eden bir algoritma yardımı ile en aza indirilmesi hedeflenmiştir.

Spektrumun önceki durumlarını içeren ve kayarak ilerleyen bir geçmiş penceresi bulunmaktadır. Bu geçmiş penceresinin içerisindeki değerleri kullanarak bir gelecek penceresi oluşturulmaktadır. Bu iki pencerenin de boyutları değiştirilerek tahmin kalitesini nasıl etkiledikleri incelenmiştir. Bu tahmin aşamasında kullanılan algoritmalar ise aşağıdaki şekildedir:

- Korelasyon tabanlı tahmin algoritması,
- Lineer Regresyon tabanlı tahmin algoritması,
- Otokorelasyon tabanlı tahmin algoritması.

Bu üç algoritmaya ilişkin sözde kodlar Şekil 25'de gösterilmiştir. İlk algoritma, eğer geçmiş penceresindeki değerlerin, birbirleri arasındaki korelasyonları fazla ise, son örneğe güvenebileceğimiz öngörüsü ile, gelecek penceresindeki değerleri, geçmiş penceresindeki en son değer ile doldurmaktadır. Aksi durumda ise majority kuralı olarak da anılan yöntem ile, bu değerlerden hangisi sayıca en fazla kez tekrarlanmış ise, tahmin penceresini o değer ile doldurmaktadır. Bu noktada, spektrum algılama bilgilerinin, ikili bir değer ile spektrumda birincil kullanıcı algılanmış ise 1, aksi durumda 0 olacak şekilde saklandığını ve ikincil kullanıcıların, tahminlerine göre spektrumunu kullanmakta olmalarının yanında, paralelinde spektrum algılama işlemi de gerçekleştirilip, geçmiş pencerelerini güncel tutmakta olduklarını belirtmek gerekir.

Şekil 25'de gösterilen ikinci algoritma ise, birinci algoritma gibi korelasyonu ölçmekte fakat bu korelasyon yeteri kadar yüksek ise, gelecek penceresi geçmiş değerlerden faydalanarak, lineer regresyon yöntemi ile hesaplanan, ikili değere çevrilen değerler ile doldurulur. Aksi durumda yine çoğunluk kuralı kullanılarak tahmin değerleri hesaplanır.

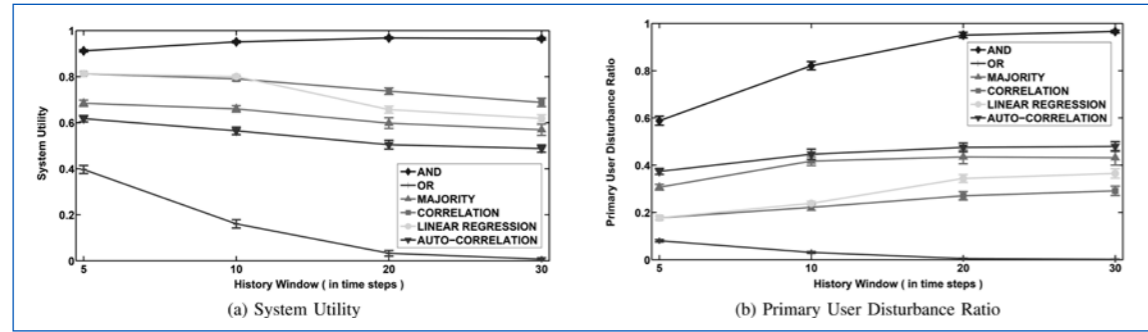
Şekil 25'de gösterilen üçüncü algoritmada ise, geçmiş penceresinin içerisindeki değerde bir periyodiklik özelliği bulunup bulunmadığı araştırılır. Bu sebeple bakılan lag değerlerinden en yüksek katsayı yeteri kadar anlamlı ise periyodiklik özelliğinin periyodunu yansıtmaktadır. Bu özellik kullanılarak, tahmin penceresi, geçmiş penceresindeki değerler ve periyodiklik özelliği kullanılarak doldurulur. Aksi durumda; anlamlı bir periyodiklik bulunamaz ise, diğer algoritmalara benzer şekilde çoğunluk kuralı ile tahmin penceresi doldurulur.

Algorithm 1 Procedure for Correlation Based Prediction Scheme	Algorithm 2 Procedure for Correlation and Linear Regression Based Prediction Scheme	Algorithm 3 Procedure for Auto-Correlation Based Prediction Scheme
<p><b>Require:</b> Spectrum sensing history vector of channel status (<math>W_H</math>), correlation threshold (<math>\delta_C</math>).</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1: <math>majorResult \leftarrow Majority(W_H)</math></li> <li>2: <b>if</b> <math>corrCoeff(X, W_H) &gt; \delta_C</math> <b>then</b></li> <li>3: <math>W_P \leftarrow [H_{ W_H } \dots H_{ W_H }]</math></li> <li>4: <b>else</b></li> <li>5: <math>W_P \leftarrow [majorResult \dots majorResult]</math></li> <li>6: <b>end if</b></li> <li>7: <b>return</b> Channel status predictions (<math>W_P</math>)</li> </ol>	<p><b>Require:</b> Spectrum sensing history vector of channel status (<math>W_H</math>), correlation threshold (<math>\delta_C</math>).</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1: <math>majorResult \leftarrow Majority(W_H)</math></li> <li>2: <b>if</b> <math>corrCoeff(X, W_H) &gt; \delta_C</math> <b>then</b></li> <li>3: <math>W_P \leftarrow</math> Points Calculated via Linear Regression</li> <li>4: (Calculated point values are matched with binary values comparing them with a 0.5 threshold)</li> <li>5: <b>else</b></li> <li>6: <math>W_P \leftarrow [majorResult \dots majorResult]</math></li> <li>7: <b>end if</b></li> <li>8: <b>return</b> Channel status predictions (<math>W_P</math>)</li> </ol>	<p><b>Require:</b> Spectrum sensing history vector of channel status (<math>W_H</math>), correlation threshold (<math>\delta_C</math>).</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1: <math>majorResult \leftarrow Majority(W_H)</math></li> <li>2: Calculate auto-correlation coefficients of <math>W_H</math> up to lag <math> W_H /2</math></li> <li>3: <math>maxCoeff \leftarrow \max(coefficients)</math></li> <li>4: <b>if</b> <math>corrCoeff(X, W_H) &gt; \delta_C</math> <b>then</b></li> <li>5: <math>periodicity \leftarrow</math> lag number of <math>maxCoeff</math></li> <li>6: <math>W_P \leftarrow</math> Points Determined via Periodicity Value</li> <li>7: <b>else</b></li> <li>8: <math>W_P \leftarrow [majorResult \dots majorResult]</math></li> <li>9: <b>end if</b></li> <li>10: <b>return</b> Channel status predictions (<math>W_P</math>)</li> </ol>

Sekil 25 Spektrum tahmin etme algoritmaları.

Bu çalışmamız simülasyon bazlı olup, MATLAB Simulink® ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, 20 deney ortalaması ve %95 güven aralığı ile gösterilmiştir. Birincil kullanıcı Poisson trafik modeli ile iletim yapmaktadır, iletim sıklığı  $\lambda$  parametresi ile değiştirilmiştir. Geçmiş penceresi boyutu için verilen değerler: 5, 10, 20 ve 30 şeklinde, gelecek penceresi (tahmin penceresi) için verilen değerler ise 1, 2, 4 e 8 şeklindedir.

Çalışmamızda tanımlamış olduğumuz birincil kullanıcı rahatsız etme oranı parametresi, spektrum tahminlerimizin yanlış olduğu durumda, birincil kullanıcıya verdiğimiz zararı ölçmektedir. Sonuç grafiklerimizde "Primary User Disturbance Ratio" etiketi ile yer almaktadır. "System Utility" etiketi ile ölçülen metrik ise, sistemdeki spektrum boşluklarını ikincil kullanıcı olarak ne kadar kullandığımızın bir göstergesidir. Tahmin algoritmamız, yanlış bir şekilde birincil kullanıcının varlığını tahmin ettiğinde, ikincil kullanıcı olarak hattı kullanamamakta olduğumuz ve bu bize performans kaybı olarak yansıdığı için bu metrik de ölçülmüştür. Algoritmalarımızı karşılaştırdığımız spektrum tahmin prensipleri 'AND' ve 'OR', geçmiş penceresi içerisindeki ikili değerler üzerinde ve veya işlemler uygulayarak, tahmin penceresini doldurmakta, 'MAJORITY' şeklinde verilen yöntem ise daha önce bahsedilen çoğunluk kuralını kullanmaktadır.



**Sekil 26** Geçmiş penceresi boyutunun etkileri.

Şekil 26'te görüldüğü üzere, geçmiş penceresinin boyutunun büyütülmesi 'OR' tipindeki algoritmanın performansını çok düşürmekte, sadece bir örnek bile spektrumun doluluğunu gösterdiğinde, spektrumun kullanılmaması sebebi ile, geçmiş penceresi büyüdükçe spektrumu hiç kullanamama durumuna gelinebilecek kadar performans düşümü olmaktadır. Şekil 26'te ilk grafikte en performanslı algoritma 'AND' gibi gözükse de, sürekli veya çoğu zaman spektrumu kullanma durumu olduğundan, boşlukların kullanım oranı %100'e yaklaşırsa dahi, boşluk olmayan zamanlarda da iletim yapıldığı ve birincil kullanıcının bu durumdan çok kötü etkilendiği ikinci grafikte, 'AND' algoritmasının en yüksek birincil kullanıcı rahatsız oranına sahip olmasından anlaşılmaktadır. Bunun yanında, önerilen üç tahmine dayalı yöntem bu iki ekstra yöntem arasında performans göstermiş, 'Correlation' ve 'Linear Regresson' algoritmaları 'Majority' algoritmasına göre daha iyi performans göstermiştir. Çalışmamız Bölüm 4'te listelenen yayınlarımızdan 4 numaralı olan bildiri aracılığı ile literatüre sunulmuştur.

### 3.4 MIMO Anten Yapısı Üzerine Yapılan Çalışmalar

#### 3.4.1 MIMO Anten Yapısının Kullanımı ve Yararları

Çok antenli (multiantenna) sistemlerin telsiz (wireless) haberleşme kanallarının kapasitelerini ve/veya sistem dayanıklılığını arttırdığı bilinmektedir. Aynı nedenlerden ötürü SU'larda çok antenli bir alıcının bulunmasının, WCR ağlarında spektrum algılama başarımını arttırması beklenmektedir. Projede çok antenli WCR ağları için sıkıştırılmış spektrum algılama yönteminin geliştirilmesi, bu yöntemin başarımlarının belirlenmesi ve sistem başarımının

gerçekçi haberleşme kanalları için ölçülmesi hedeflenmektedir. Geliştirilecek sıkıştırılmış spektrum algılama yöntemi frekanstaki seyreklik bilgisini kullanacaktır. Çok antenli WCR ağlarında sıkıştırılmış spektrum algılama sistemleri henüz literatürde bulunmamaktadır.

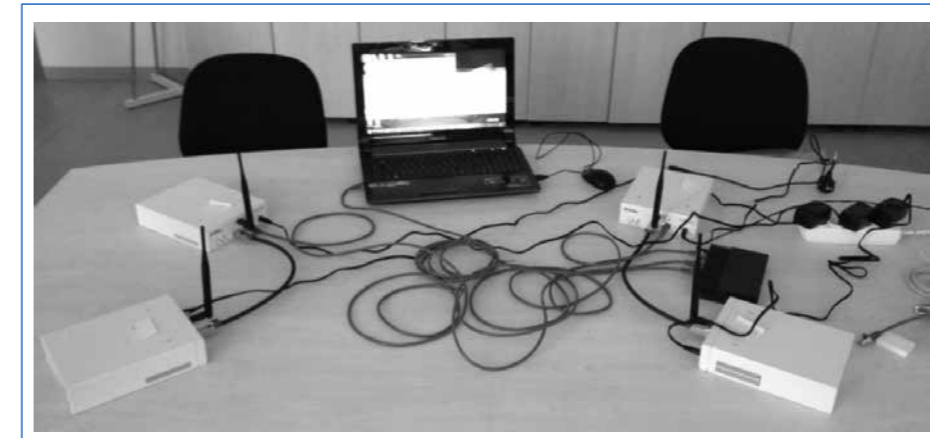
Çok antenli sistemlerin bir diğer avantajı ise "directional beamforming" ve "beamforming via precoding" olarak adlandırılan huzme oluşturma yöntemlerinin kullanılarak birincil ve ikincil kullanıcıların birbirlerinin iletişimine olan girişimlerinin kontrol altına alınmasıdır. Huzme oluşturma yöntemlerini kullanan birincil ve ikincil kullanıcıların oluşturduğu sinyaller kendi alıcılarında yüksek işaret-gürültü oranına sahip olurken, diğer kullanıcılarda ya hiç algılanmayacak, ya da gürültü ile aynı oranda algılanacaktır.

"Directional beamforming" yönteminde iletişim sinyalleri yönlü huzme olarak oluşturulmaktadır. Alıcının açısı veya konum bilgisine sahip bir vericide bu yöntem kullanılarak alıcı yönünde güçlü, diğer yönlerde ise zayıf bir sinyal yaratılabilir. Bu durumda başka yönde olan kullanıcıların iletişimi bu sinyalden etkilenmeyecektir ve aynı anda iletişim mümkün olacaktır.

"Beamforming via precoding" yönteminde iletişim sinyalleri alıcının uzaysal kanalının durumuna göre maksimum kazanç sağlayacak şekilde oluşturulmaktadır. Alıcının uzaysal kanalı hakkında bilgi sahibi olan bir vericide bu yöntem kullanılarak alıcı kanalından geçince güçlenecek, diğer kanallardan geçince zayıflayacak bir sinyal yaratılabilir. Bu durumda başka uzaysal kanala sahip olan kullanıcılara girişim kabul edilebilir seviyede olacaktır ve aynı anda iletişim mümkün olacaktır.

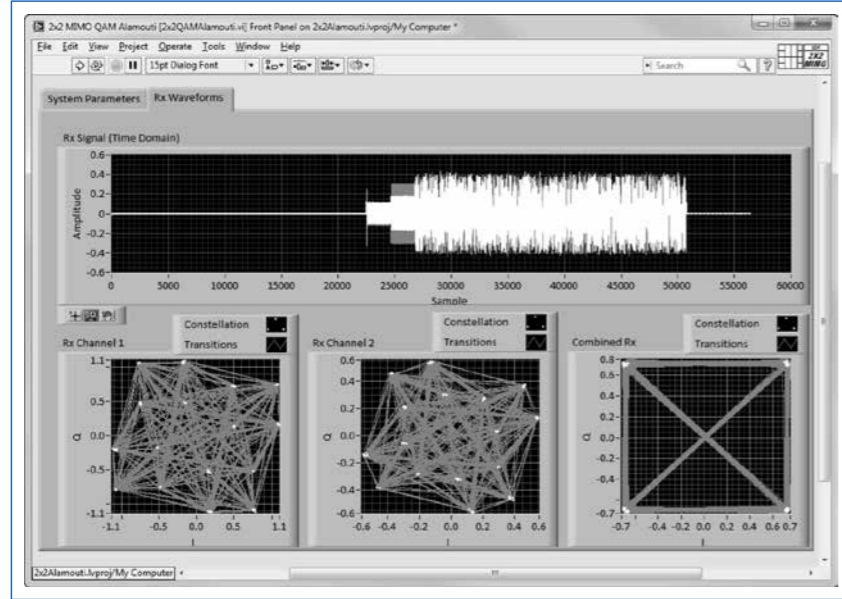
#### 3.4.2 USRP Test Ortamında Kurulan 2x2 MIMO Sistemi

Proje, çalışma dönemi kapsamında kabulü alınan "Çok Antenli Genişbant Bilişsel Radyo Ağları İçin Girişim Yönetim Sistemi" isimli Genç Araştırmacıları Destekleme Programı Projesi kapsamında proje çalışmalarını destekleyici cihaz alımı yapılmıştır. İTÜ Telsiz Haberleşme Laboratuvarı bünyesinde söz konusu proje bütçesiyle 6 adet USRP kitinin ve bağlantı aksesuarlarının alımının tamamlanması ile birlikte toplam 9 adet USRP kiti, spektrum analizörü ve dijital osiloskop cihazlarından oluşan test ortamı kurulmuştur. Bu sayede çok giriş çok çıkışlı (multi-input multi-output MIMO) sistem uygulamaları donanımsal olarak mümkün olmuştur. USRP kitleri ile LabVIEW® ortamında MIMO iletişim sistemi kurulmuş ve gerçekleştirilmiştir. MIMO sistem, 2 girişli 2 çıkışlı (2x2) konfigürasyonu ile çalıştırılmıştır.



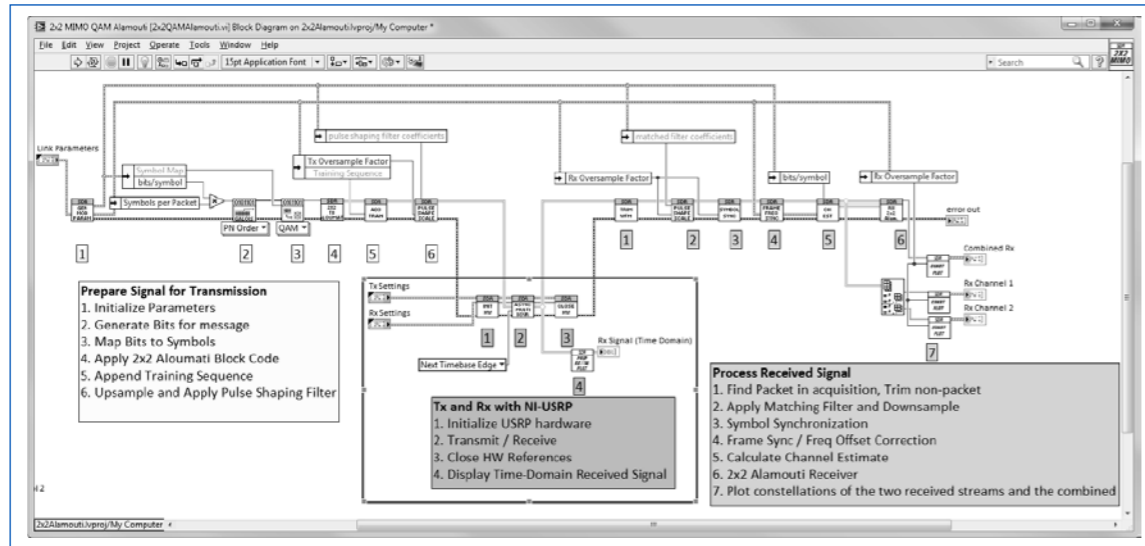
**Sekil 27** Kurulan 2x2 MIMO sistemi.

USRP kitleri ve MIMO kabloları ile 2x2 MIMO uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu kurulumda 4 adet USRP kiti kullanılmış olup, 2 adet USRP düğümü bilgisayara Ethernet ile, diğer iki USRP ise bu USRP'lere MIMO kablosu üzerinden bağlanmıştır. MIMO kabloları üzerinden hem veri dizileri, hem de saat bilgisi paylaşılabilir. Kurulmuş olan sistem Şekil 27'de verilmiştir.



Şekil 28 LabVIEW® arayüzü.

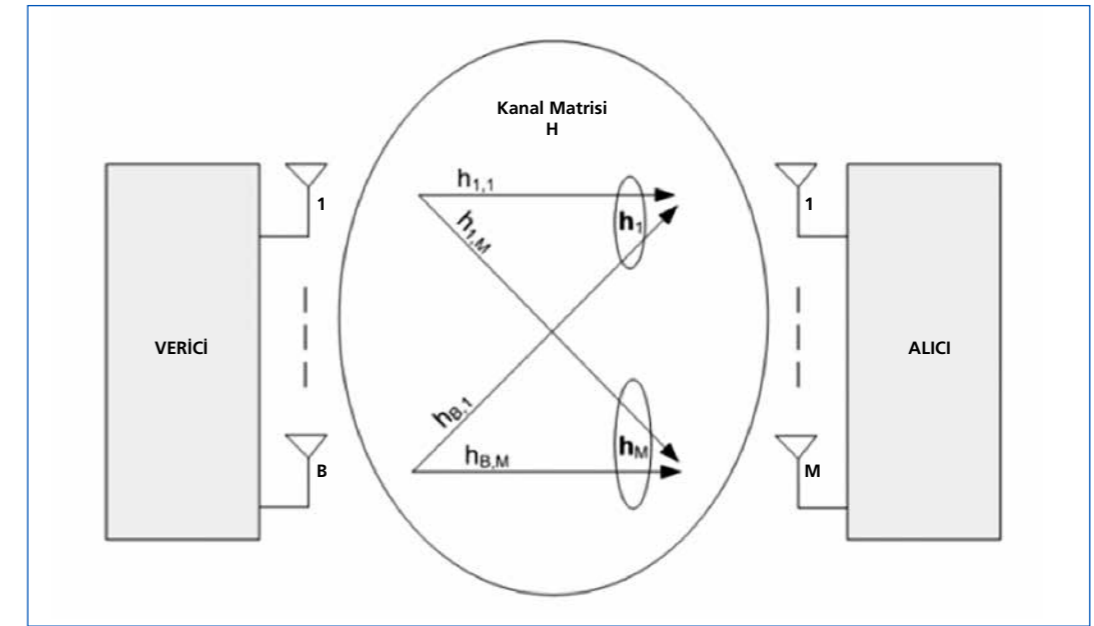
LabVIEW® grafik tabanlı bir programlama platformudur. LabVIEW® ortamı, bir kullanıcı arayüzü ve bir blok diyagram görünümünden oluşmaktadır. Kullanıcı arayüzünde giriş-çıkışlar görülürken, programlama ile ilgili işlemler blok diyagram içinden yapılmaktadır. Şekil 29'de örnek bir blok diyagram görülmektedir. Sistemin kullanıcı arayüzü Şekil 28'de görülmektedir. Şekil 28'de üst kısımda 4QAM ile modüle edilmiş verinin zaman domeninde alınmış örnekleri görülmektedir. Alt kısımda solda ve ortada 2x2 sistemin 2 farklı alıcısından alınan işaretler gösterilmiş, sağda ise elde edilen işaretler görülmektedir.



Şekil 29 LabVIEW® blok diyagram panel görüntüsü.

### 3.4.3 MIMO-OFDM Sistemlerde Ses Kalitesi Kestirimi

Haberleşme sistemlerinde çoklu anten yapıları sayesinde girişimin etkileri azaltılarak ses iletim kalitesi artırılmaktadır. Bu çalışmada çok girişli çok çıkışlı (MIMO) dik frekans bölme (OFDM) haberleşme sistemlerinde ses kalitesi belirlenmesi ve ses kalitesi analizi yapılmıştır. MIMO ağ sistemi laboratuvar ortamında yazılım tabanlı radyo kitleri (USRP) ile gerçekleştirilerek ses verisi çoklu antenli vericiden verilir çoklu antenli alıcıdan alınmıştır. Telsiz haberleşme sisteminin işaret-gürültü oranı ve bit hata oranı parametreleri ölçülerek sistemin performansı analiz edilmiştir. Analiz kısmında işaret tabanlı kalite ölçüm yöntemi olan E-model tercih edilmiştir. Haberleşme bloğundan alınan sistem parametreleri E-model'e uygulanarak ses kalitesi belirlenmiştir. İletilen ses verisinin kalitesini etkileyen faktörler incelenerek analiz yapılmıştır.



Şekil 30 MIMO kanal modeli.

MIMO sistemlerde çoklu anten kazancı ile kanal kapasitesi de SNR değerinin artması ile birlikte artmaktadır. Diğer bir performans metriği olan bit hata oranı (BER), sayısal haberleşme sistemlerinde veri iletim kalitesinin ölçümünde kullanılan bir orandır. Sayısal veri iletiminde BER, yanlış iletilen bitlerin, gönderilen bitlere oranı şeklinde ifade edilir. Sistemin ses performansı analizi, ölçülen iletim parametreleri kullanılarak işaret tabanlı kalite belirleme yöntemlerinden biri olan E-model ile yapılmıştır. E-model, paket kayıp oranı ve paket gecikmesi gibi ağ parametreleriyle R puanı (iletim kalite puanı) hesaplanan bir ITU-T G.107 standardıdır. R puanı iletim başarı oranına göre 0 ile 100 arasında değerler alır. E-model standardı ile ses kalitesi belirlenmesinde bozucu etkiler toplamsal varsayılarak aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$R = R_o - I_s - I_d - I_{e,eff} + A.$$

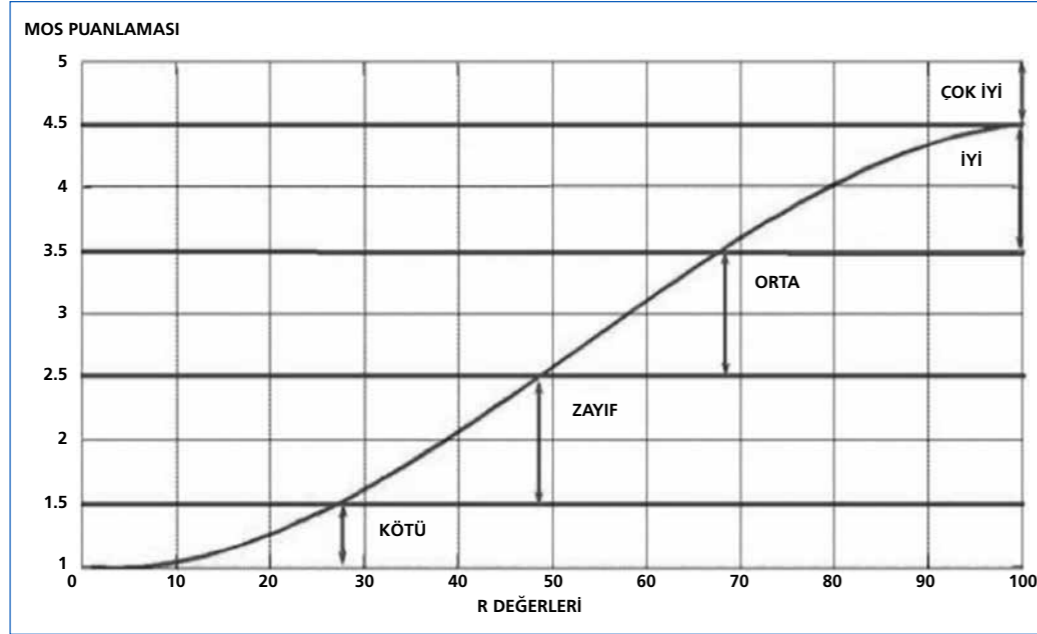
$$R_o = 15 - 1.5 (SLR + N_o)$$

$$N_o = 10 \log \left[ 10^{\frac{N_c}{10}} + 10^{\frac{N_{os}}{10}} + 10^{\frac{N_{or}}{10}} + 10^{\frac{N_{fo}}{10}} \right]$$

Ses kalitesi kestiriminde sonuçlar MOS ses kalitesi ile ilişkilendirilerek performans analizi yapılır:

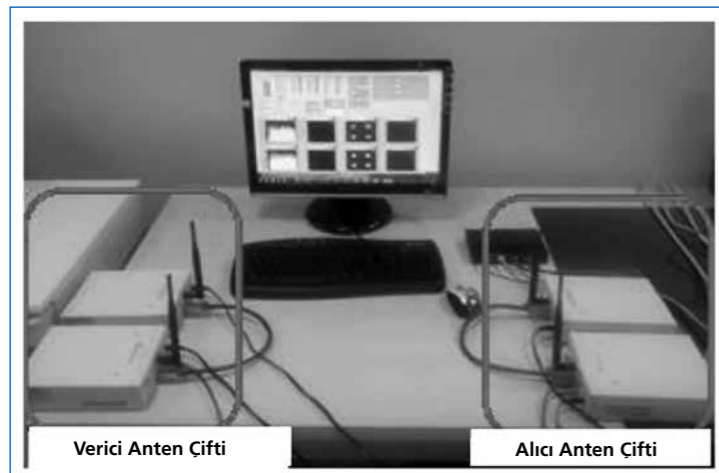
$$MOS = 1 + 0.035R + (R - 60)(100 - R) \frac{7R}{10^6}$$

MOS değeri, Şekil 31'da da görüldüğü gibi, 5 en iyi olmak üzere, 1 ile 5 arasında değişen bir değerdir. Kaliteli bir iletim ortamında  $R > 70$  veya  $MOS > 3.5$  olması beklenir.



Şekil 31 MOS değişim ölçeği.

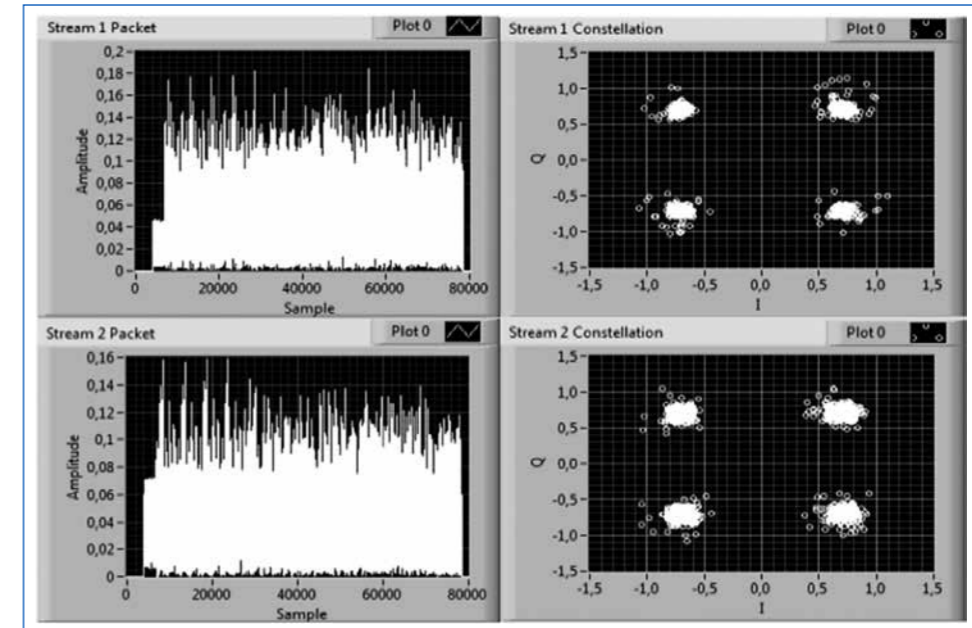
2x2 MIMO sistemde, NI2921 National Instruments Universal Software Radio Peripheral (USRP) kitleri kullanarak ölçümler yapılmıştır. Kitler değişik mesafelerde konumlandırılarak ölçümler çeşitlendirilmiştir. Laboratuvar ortamında kurulan ölçüm düzeneği Şekil 32'de görülmektedir.



Şekil 32 Kurulan ölçüm düzeneği.

NI 2921 USRP kitlerinin iletim bant genişliği 2.4 GHz- 5 GHz aralığındadır. Bu nedenle ölçümler 2.4 GHz taşıyıcı frekansında gerçekleştirilmiştir. IQ örnekleme oranı 1M değeri seçilmiştir. Veri iletimi sırasında alıcı tarafında alınan her iletim paketinde 80K veri örneği işlenmektedir. Bu değerlerin altında sistem ara bellek hatası vermektedir. Ara belleğin gelen veriyi modülasyon bloğuna aktarmadan boşalması bu hataya neden olmaktadır. Bu durumda IQ örnekleme oranının artırılması gerekmektedir.

OFDM vericisinde, modüle edilmiş semboller seriden paralele çevirilip 128 bileşenli ters hızlı Fourier dönüşümü uygulanmaktadır. Verici haberleşme bloğunda dik genlik modülasyonu (QAM) kullanılmaktadır. Şekil 33'de 2x2 alıcı antenlerden elde edilen 4-QAM işareti görülmektedir.



Şekil 33 2x2 Alıcı antenlerden elde edilen 4-QAM işareti.

Ölçümler esnasında kullanılan anten çiftlerinin arasındaki uzaklık yaklaşık 10 cm'dir. Senkronizasyonu sağlayabilmek için alıcı ve verici anten çiftleri arasında MIMO kabloları kullanılmıştır. Sistemin performansını değerlendirebilmek için anten çıkış gücü değiştirilerek ölçümler yapılmış olup anten çıkış gücü arttıkça SNR oranının arttığı görülmüştür. Alıcı ve verici anten çiftleri birbirlerinden 1m uzaklıkta ve alıcı çıkış gücü 20 dB iken işaret gürültü oranı birinci kanalda 9.26 dB, ikinci kanalda 8.65 dB olarak ölçülmüştür. Sistemin işaret gürültü oranı denklem (3)' de belirtilen eşitlikle hesaplanarak 17.91 dB olarak bulunmuştur. Alıcı çıkış gücü değiştirilerek 10 dB yapıldığında ise işaret gürültü oranı birinci kanal için 7.1 dB ve ikinci kanal için 7.6 dB olarak ölçülmüştür. Bu şekilde hesaplanan değişik alıcı güçlerindeki SNR değerleri, bu SNR değerlerinde elde edilen BER ölçümleri ve BER benzetim sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablo 3'te de tek kanallı sistem ve 2x2 MIMO sistem performansını karşılaştırabilmek için yapılan değişik alıcı çıkış güçlerindeki SNR ölçüm sonuçları ve bu değerlerle elde edilen E-model R/MOS değerleri yer almaktadır.



Alıcı çıkış gücü(dB)	SNR(dB)	BER	
		Ölçüm	Benzetim
0	9.62	$1.5 \times 10^{-3}$	$8.701 \times 10^{-3}$
10	14.7	$3.1 \times 10^{-4}$	$6.8 \times 10^{-4}$
20	17.91	$1.07 \times 10^{-4}$	$5.208 \times 10^{-4}$

Tablo 2 Benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Analizler sonucunda kanal sayısının artırılmasıyla elde edilen yüksek SNR değerlerinde bit hata oranının azaldığı ses iletim kalitesinin arttığı görülmüştür. Çoklu antenli yapılar daha az bant genişliği kullanarak daha yüksek oranda veri iletimini gerçekleştirebildikleri için iletim performansları tek antenli haberleşme sistemlerine oranla daha yüksektir. Bu nedenle yeni nesil haberleşme sistemlerinde tercih edilirler.

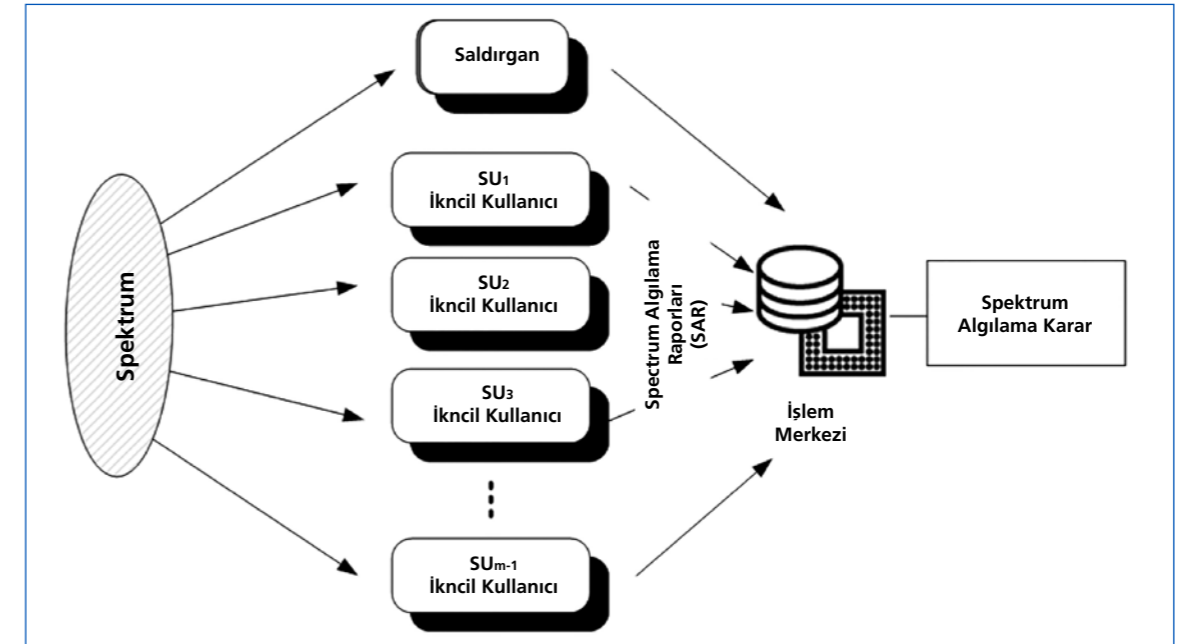
Alıcı çıkış gücü(dB)	Tek Kanallı Sistem		2x2 MIMO Sistem	
	SNR (dB)	E-model(R/MOS)	SNR (dB)	E-model(R/MOS)
0	5.02	47.865/2.46	9.62	70.975/3.64
10	9.24	68.952/3.54	14.7	85.169/4.20
20	10.76	74.548/3.80	17.91	90.115/4.34

Tablo 3 Tek kanallı ve 2x2 MIMO sistemin performans analizi.

Bu çalışmamız, Bölüm 4'te listelenen yayınlarımızdan 7 numaralı olan bildiri aracılığı ile literatüre sunulmuştur.

### 3.5 Fiziksel Katman Güvenliği ile İlgili Çalışmalar

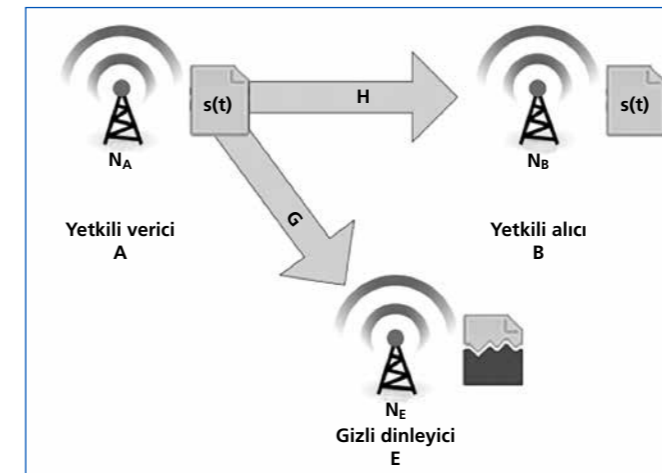
Güvenlik problemleri klasik olarak haberleşme protokolünde ikinci ve üçüncü katmanlarda çözülmekle beraber bilişsel radyolarda birinci katman, yani fiziksel katmanın etkileri yok sayılmaz. Örneğin daha önce 2. Bölümde bahsedildiği üzere bilişsel radyolarda karşılaşılan en önemli güvenlik problemlerinden biri spektrum algılama bilgi değiştirme (spectrum sensing data falsification, SSDF) saldırıdır. SSDF saldırılarının amacı genellikle kullanılan spektrumu birincil kullanıcı tarafından kullanılıyor gibi göstererek diğer ikincil kullanıcıların spektrumu kullanmalarını önlemektir. Bu sayede saldırıyı gerçekleştiren kötü niyetli ikincil kullanıcı boş spektrumu kendi kullanımı için ayırmış olur. Örnek bir SSDF saldırısı Şekil 34'da verilmiştir.



Şekil 34 SSDF saldırıları.

#### 3.5.1 Yapay Gürültünün Fiziksel Katman Güvenliği Üzerindeki Etkisinin Analizi

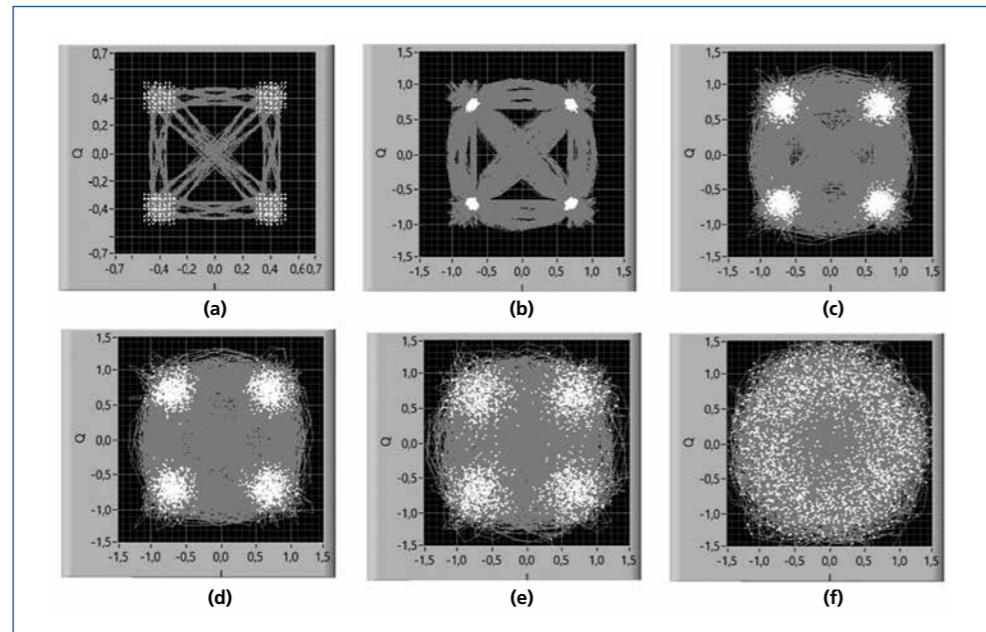
Son yıllarda kablosuz haberleşme sistemlerin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte fiziksel katman güvenliği konusu önem kazanmıştır. Fiziksel katmanda güvenliği sağlamak amacıyla önerilmiş temel metotlardan biri de yapay gürültüdür. Özellikle çoklu anten teknolojilerinin gelişmesi bu alandaki çalışmalara hız kazandırmıştır. Ancak yapay gürültü yardımıyla güvenliği arttıran teknikler çoğunlukla henüz teori aşamasındadır. Bu sebeple, söz konusu yöntemlerin yeni nesil haberleşme sistemlerinde kullanılabilmesi için pratik gerçekleştirme çalışmaları çok önemlidir. Bu çalışmada, yapay gürültü tekniği yazılım tabanlı radyo (USRP) kitleri üzerinde gerçekleştirilmiş ve çeşitli kanal durumlarında ve farklı modülasyon seviyelerinde performansı ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları benzetim sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Yapılan çalışma sonucu yapay gürültü kullanımının gizli dinleyicilerin sinyal kalitesini düşürerek belirli bir güvenlik seviyesini sağlama konusunda pratikte de başarılı bir yöntem olduğu görülmüştür.



Şekil 35 Kullanılan sistem modeli.

SINR değerleri, farklı kodlama ve modülasyon tekniklerinde farklı bit hata oranına yol açarlar. Bit hata oranı üzerinden sistem performansı ve güvenlik belirlenebileceği gibi, fiziksel katman sistemlerde SINR üzerinden de güvenlik seviyesi belirlenebilir. Bu çalışma kapsamında yapılan benzetim ve ölçüm çalışmalarında güvenlik seviyesi bit hata oranı üzerinden belirlenerek farklı sistemlerde söz konusu bit hata oranını sağlamak için gerekli SINR değerleri ve yapay gürültü gücü bulunmuştur.

Sistem modeli tek antenli yazılım tabanlı alıcı verici düğümleri ile gerçekleştirilmiştir. Sistem modelinde belirtilen yapay gürültü teriminin gizli dinleyici üzerindeki etkisinin gerçekleşen sistem üzerinde incelenmesi amaçlanmıştır. USRP kitleri kullanılarak 15.3dB SNR değerine sahip kanalda yapılan 4-QAM işaret iletimi ölçümü sonuçları Şekil 36'da verilmiştir. Bu ölçümde kanal ve sinyal gücü sabit tutularak yapay gürültü gücü değiştirilmiştir. Şekil 36 (a)'da gönderilen sinyal diyagramı görülmektedir. Verici tarafında ve karekök yükseltilmiş kosinüs süzgeç kullanılmaktadır. USRP verici anten kazancı 5 olarak ayarlanmış olup, kullanılan frekans 2,42GHz olarak seçilmiştir.

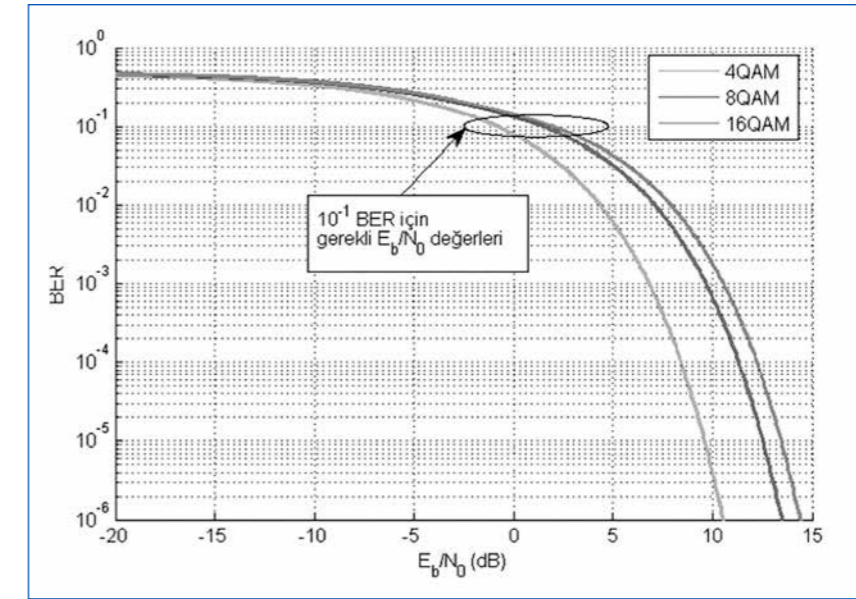


Şekil 36 Gizli dinleyici kanal SNR'ı 15.3dB iken yapılmış ölçüm sonuçları (a) Gönderilen sinyal (b)Alınan sinyal, Yapay gürültü yok, (c) Alınan sinyal, yapay gürültü gücü = -20dB, (d) Alınan sinyal, yapay gürültü gücü = -17dB, (e)Alınan sinyal, yapay gürültü gücü = -13dB, (f)Alınan sinyal, yapay gürültü gücü = -10dB.

Şekil 36 (b-f) üzerinde yapay gürültünün gizli dinleyici üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Yapay gürültü gücünün artırılması ile gizli dinleyicinin SINR'ının düşürebildiği, bit hata oranının arttığı pratikte gerçekleşmiş olan sistem üzerinde de gözlemlenmektedir. Yapay gürültü seviyesinin yeterince artırılması sonucu gizli dinleyicinin aldığı sinyali doğru olarak çözmesi mümkün olmayacaktır.

Bu çalışmada, 4-QAM, 8-QAM ve 16-QAM modülasyon kullanılarak işaretler yetkili alıcı anteninden gönderilmektedir. Farklı gürültüye sahip kanal ortamları oluşturularak gizli

dinleyici tarafından alınan işaret ölçülmüştür. Kanal gürültüsü yüksek iken düşük olan performans, gizli dinleyicinin kanalı iyileştikçe yükselmekte ve artan SINR seviyesi güvenlik için tehdit oluşturmaktadır. Bu aşamada yetkili verici tarafından yapay gürültünün gizli dinleyiciye gönderilmesi ile gizli dinleyicinin SINR seviyesinin belirli bir seviyenin altına düşürülmesi amaçlanmıştır. Farklı modülasyon seviyelerinde SINR ihtiyacı farklı olacağından ortak bir bit hata oranının (BER) sağlanması için gerekli SINR değerleri elde edilmiştir. Söz konusu SNR değerlerinin gösterimi için AWGN kanallarda BER-SNR ilişkisi, Şekil 37' de verilmiştir.



Şekil 37 Farklı QAM modülasyon seviyeleri için SNR-BER ilişkisi

$10^{-1}$  BER seviyesi için gerekli yapay gürültü gücü benzetim ortamında ve test ortamında gerçekleştirilerek ölçülmüştür. Bulunan sonuçlar Tablo 4 üzerinde görülmektedir. Ölçüm sonuçları, benzetim sonuçları ile oldukça uyumluluk göstermektedir.

SNR <sub>kanal</sub>	Yapay Gürültü Gücü (dB)					
	4-QAM		8-QAM		16-QAM	
Kanal	Benzetim	Ölçüm	Benzetim	Ölçüm	Benzetim	Ölçüm
5dB	-27.34	-27.03	-	-	-	-
10dB	-19.94	-19.38	-25.49	-25.17	-29.06	-28.75
15dB	-14.39	-14.07	-19.78	-19.26	-20.84	-20.12
20dB	-9.23	-8.91	-13.35	-13.08	-15.17	-14.85

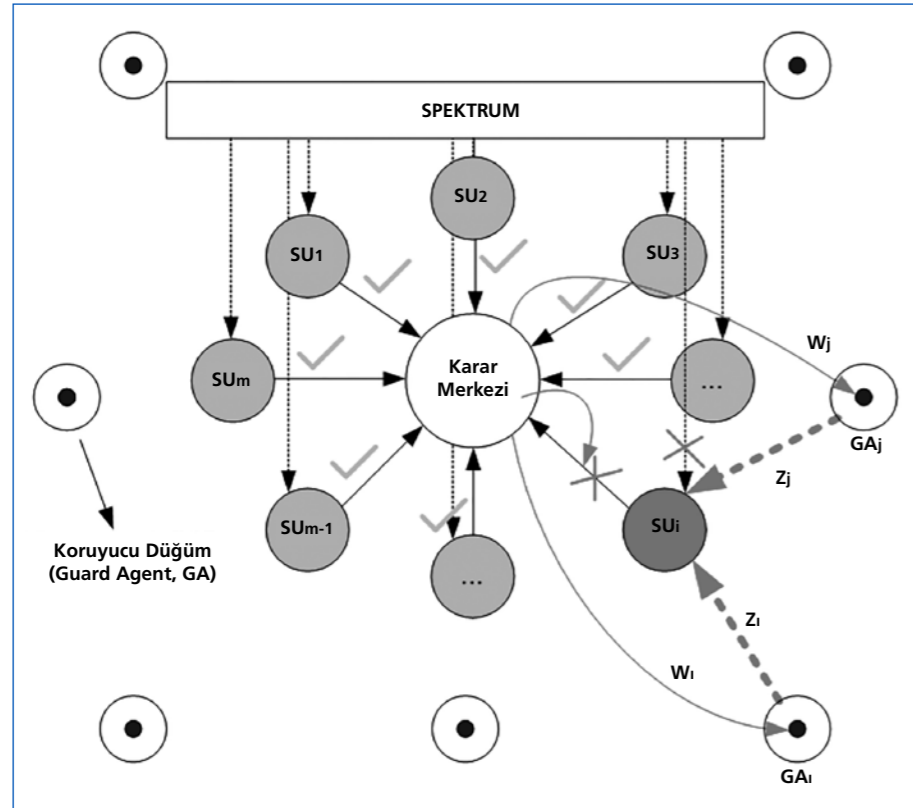
Tablo 4 Benzetim ve ölçüm sonuçları.

Bu çalışmamız, Bölüm 4'te listelenen yayınlarımızdan 6 numaralı olan bildiri aracılığı ile literatüre sunulmuştur.

### 3.5.2 Bilişsel Ağ Güvenlik Sistemlerinde Spektrum Algılama Bilgi Değiştirme Saldırılarının Sezilmesi ve Önerilen Karşı Önlem

Bu çalışmamızda bir bilişsel ağ üzerinde saldırı yapıldığını sezen ve saldırıyı yapan kullanıcıya karşı önlem alan bir sistem geliştirilmiştir ve söz konusu sistem önce simülasyon ortamında test edilmiştir.

Çalışmamızda kullanılan bilişsel ağ sisteminde işbirlikli spektrum algılama kullanılmaktadır. m adet ikincil kullanıcı spektrum algılama gerçekleştirerek spektrum algılama raporlarını bir karar merkezine göndermektedirler. Karar merkezi tüm kullanıcılardan gelen spektrum algılama raporlarından spektrumun uygun olup olmadığına dair bir karar vermektedir. İşbirlikli spektrum algılama literatüründe çeşitli karar mekanizmaları bulunmaktadır. Coğunluk tabanlı karar vermede karar merkezi kullanıcıların raporlarının ortalama değerine bakarak spektrumda birincil kullanıcı olup olmadığına karar verebilir. Bu tip sistemlerde tek bir kullanıcının dürüst olmayarak karar merkezinin kararını etkilemesi oldukça zor olmaktadır. Ancak bilişsel radyo sistemlerinde karar kuralı genellikle OR olarak seçilir. Bu sistemlerde tek bir kullanıcı bile spektrumun dolu olduğu yönünde rapor verir ise karar spektrumun dolu olduğuna karar verilir. Bunun sebebi bilişsel ağ sistemlerinde birincil kullanıcının rahatsız edilmemesinin ilke edinilmesidir. Karar kuralı OR olan sistemlerde tek kullanıcının saldırıda bulunması tüm sistemi etkilemektedir.



Şekil 38 Sistem modeli.

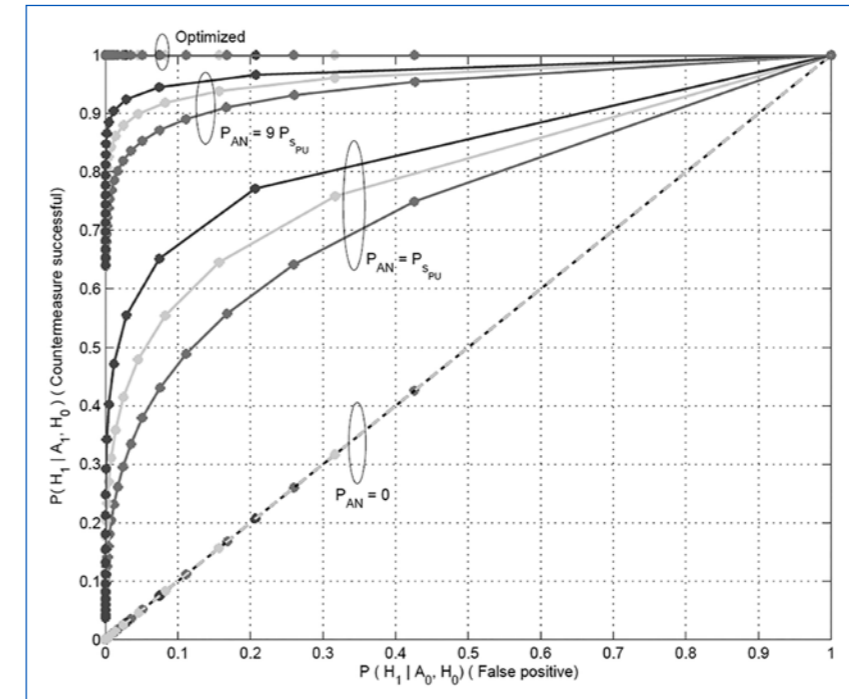
Çalışmada tasarlanmış olan sistem modeli Şekil 38'de verilmiştir.

Bu sistemde m adet kullanıcıdan gelen raporlar karar merkezine ulaşmaktadır. Karar merkezi, her bir kullanıcının gönderdiği raporu diğer raporlar ile karşılaştırarak kullanıcının şüpheli bir hareket yapıp yapmadığına karar vermektedir.

Kullanıcıların zaman içinde diğer kullanıcılardan farklı (şüpheli) rapor verme sıklığına göre kullanıcının güven metriği hesaplanmaktadır. Bunun için sistemimizde literatürde sıklıkla kullanılan beta güven metriği [21] kullanılmıştır.

Güven metriğinin belirlenen bir seviyenin üzerine çıkması durumunda kullanıcının saldırı yaptığına karar verilir. Bu durumda yapılacak ilk karşı önlem, söz konusu kullanıcıdan gelen spektrum algılama raporlarını karar algoritmasına sokmamaktır. Ancak gelen raporlar kullanıcının saldırı durumundan çıkıp çıkmadığının takibi için izlenmeye devam edilebilir. Ancak bu durumda kullanıcının spektrumu kendi kullanmasının önüne geçilememiş olabilir.

Çalışmada bahsedilenden farklı olarak huzme yönlendirme tabanlı bir karşı önlem daha önerilmiştir. Bu karşı önlem için, saldırı yaptığı belirlenen kullanıcıya koruyucu düğümler yardımı ile bir yapay gürültü sinyali gönderilmektedir. Bu durumda kullanıcı spektrumu her zaman dolu olarak algılayarak kendi de herhangi bir veri göndermeye çalışmaz. Söz konusu yapay gürültünün diğer kullanıcıları engellememesi için bu sinyalin saldırgan kullanıcının kanalına göre optimize edilmesi çok önemli olmaktadır. Çalışmamızda bu aşama için de bir çözüm önerilmiştir ve çalışmamız Bölüm 4'te listelenen yayınlarımızdan 8 numaralı olan bildiri aracılığı ile literatüre sunulmuştur. Çalışmaya ait simülasyon sonuçları Şekil 39'da verilmiştir.



Şekil 39 Simülasyon sonuçları.

### 3.5.3 Bilişsel Ağ Güvenlik Sistemlerinde Spektrum Algılama Bilgi Değişirme Saldırıları için Önerilen Güvenlik Sisteminin Yazılım Tabanlı Radyolar ile Gerçeklenmesi ve Performans Ölçümü

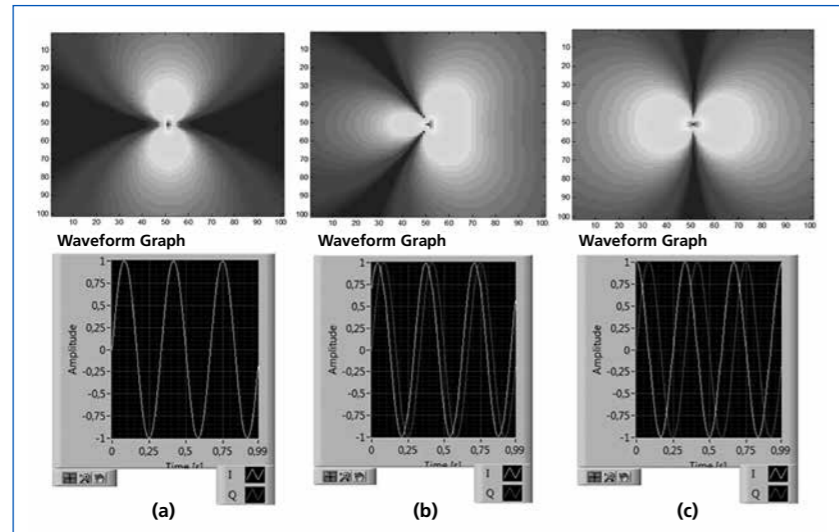
Bu çalışmada, bir önceki bölümde anlatılmış olan sistem, USRP kitleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3.5.1'de simülasyon, bu bölümde ise test ortamı çalışmalarına yer verilen bu yöntem için, iki sistem arasındaki parametre farklılıkları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Simulasyon	Test
1 karar merkezi 1 saldırgan m adet koruyucu düğüm	1 karar merkezi 1 saldırgan 1 koruyucu düğüm
MATLAB® benzetim ortamı SeDuMi optimizasyon motoru	Labview platformu 4 USRP kullanılmıştır
Monte Carlo test sayısı: 1000	Monte Carlo test sayısı: 10
İletim için NT1 = NT2 = 4 verici anteni 2 koruyucu düğüm kullanıldı	İletim için NT1 = 2 verici anteni 1 koruyucu düğüm kullanıldı

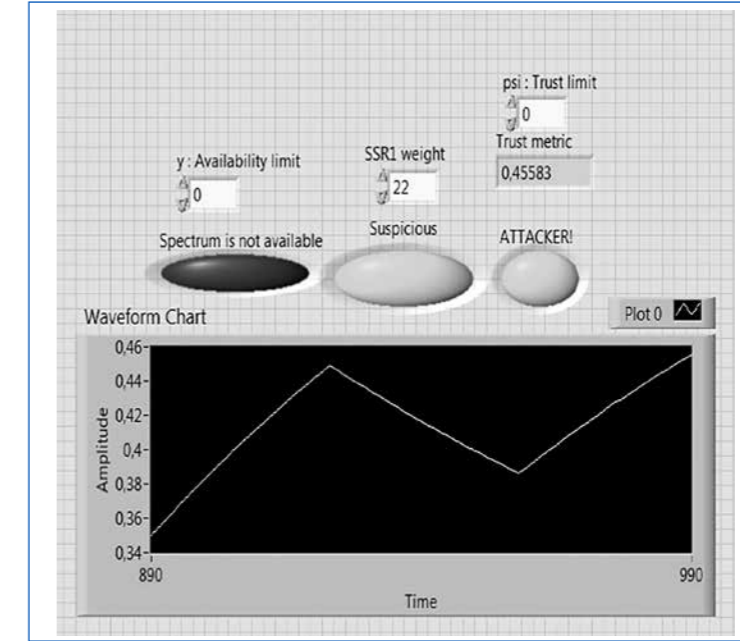
Tablo 5 Simülasyon ve test ortamı farklılıkları.

Öncelikle 2 antenli MIMO sisteminde huzme yönlendirme algoritması USRP kitleri ile gerçekleştirilmiştir. 2 antenli MIMO sistemde huzme yönlendirme sonuçları Şekil 40'ta görülmektedir.



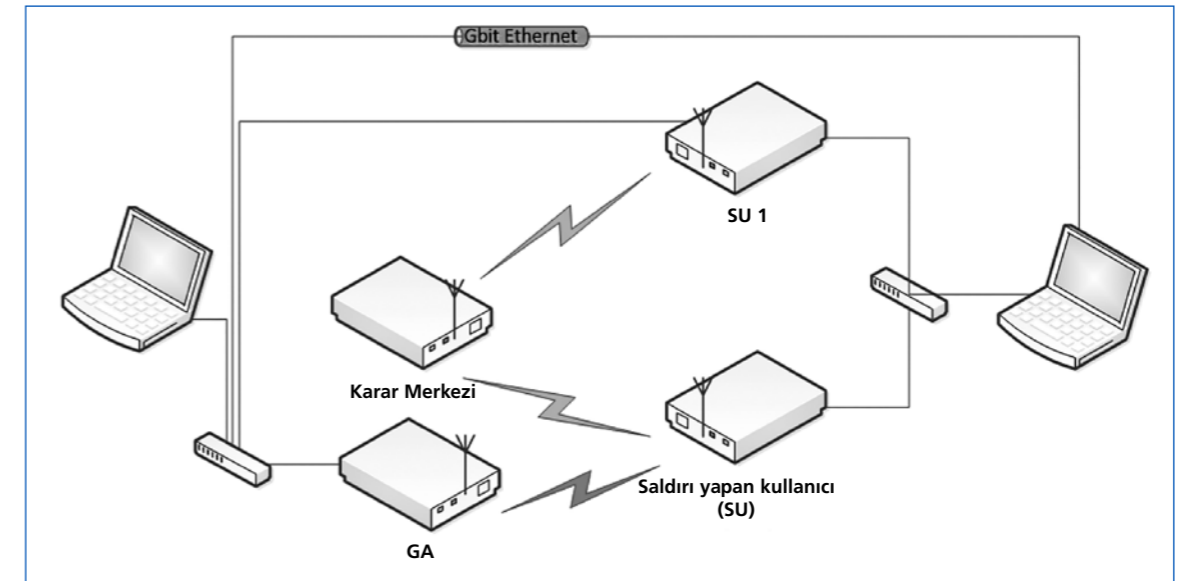
Şekil 40 2 anten ile huzme yönlendirme.

Bir önceki bölümde açıklanmış olan güven metriği LABVIEW ortamında gerçekleştirilmiştir. Güven metriğinin zamanla değişimi Şekil 41'de görülmektedir.



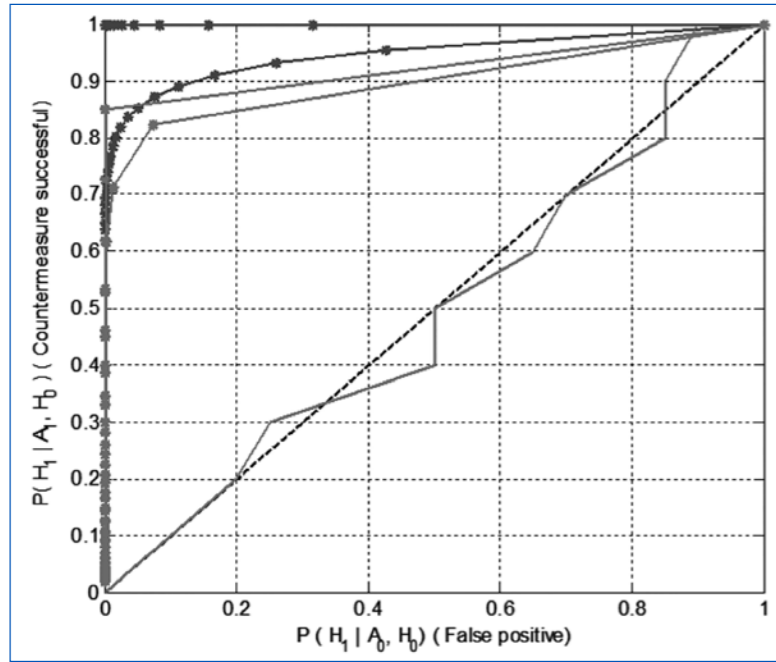
Şekil 41 Güven metriğinin zamanla değişimi.

4 adet USRP ve 2 adet PC ile kurulan sistem Şekil 42'de görülmektedir.



Şekil 42 Sistem şeması.

Söz konusu 2 antenli MIMO sisteminde bir önceki bölümde açıklanmış olan spektrum algılama bilgi değişirme saldırısı gerçekleştirilmiş ve simülasyon ile alınmış sonuçlar test ortamında da elde edilmiştir. Test ortamına ait sonuçlar Şekil 43'de verilmiştir.



Sekil 43 Test sonuçları.

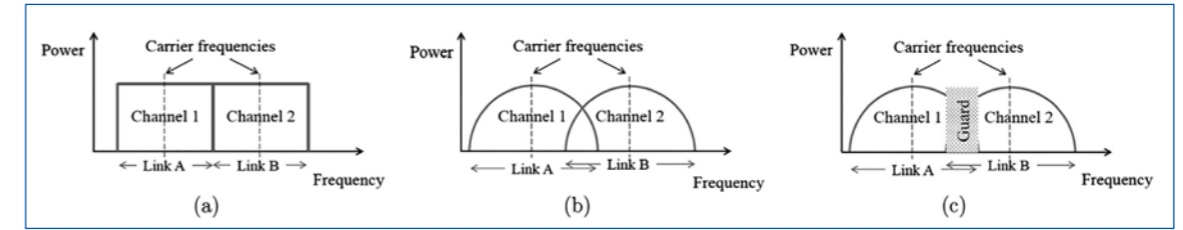
Çalışmanın sonucunda test sonuçlarının da başarılı bir şekilde simülasyon sonuçlarına yakınsadığı görülmüştür.

### 3.6 Spektrum Paylaşımı ile İlgili Çalışmalar

Bu çalışmalar kapsamında, ikincil kullanıcılar arasında yapılacak olan spektrum paylaşımında, bu kullanıcıların bilgi taşıdıkları kanallar arasındaki girişim düzeylerinin, data aktarımına negatif etkisi düşünülerek çeşitli çözümler önerilmiştir.

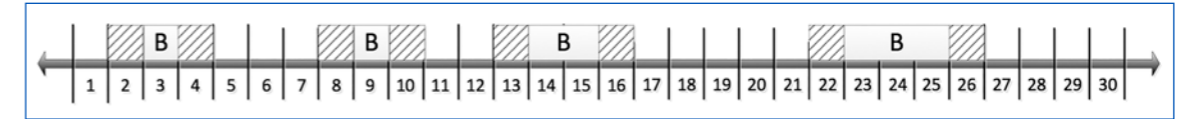
IEEE 802.11n ve IEEE 802.11ac standartlarının da desteklediği kanal birleştirme (channel aggregation: çeşitli kanalların birleştirilmesi) ve kanal bitleştirme (channel bonding: bitişik kanalların birleştirilmesi) olanakları ile, data aktarım kapasitesini arttırmak mümkün olmaktadır. Bu çalışmalarımızda önerdiğimiz teknikler de bu kanal birleştirme yöntemlerini kullanmakta ve sadece bilşsel ağlarda değil, kablosuz kanal birleştirmeye olanak veren tüm ağlarda kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır.

Koruma bantları düşünülmeden yapılan spektrum atamasında, Şekil 44, (a)'da gözüktüğü şekilde, iki yan yana yer alan kanalda iki ayrı kullanıcının sorunsuz bir şekilde iletim yapabildiği düşünülmektedir. Fakat, kullanılan filtreler gereği, gerçek ortamda, iki ayrı kullanıcı -link- yan yana kanallarda iletim yaptığında birbirlerine bir miktar girişim uygulamaktadır (b). Bu girişimden, haberleşmelerinin etkilenmemesi amacı ile araya koruma bantları ilave edilmektedir (c).



Sekil 44 Koruma bantlarının kullanımı.

Koruma bantları kullanılan kanal ataması problemi ise kullanılan koruma bantlarının diğer atamalar tarafından da paylaşılabilir olup olmaması ile ilgili olarak iki türlü yaklaşım mevcuttur. Daha önce yapılan kanal atamaları Şekil 45'deki gibi gösterilmiştir. Bu şekilde taralı olarak işaretlenen kanallar, B ile işaretlenen kullanılmakta olan kanalların etrafında, koruma bantları olarak ayrılan kanalları göstermektedir. Koruma bantlarının tekrar kullanılması ise var olan bu koruma bantlarından faydalanarak, bu kanallara bitişik data kanalı ayırabiliyor olmaktadır. Bu çalışmalarımızda, var olan koruma bantlarının kullanılabilirdiği bir ağ modeli üzerinde çalışılmıştır.

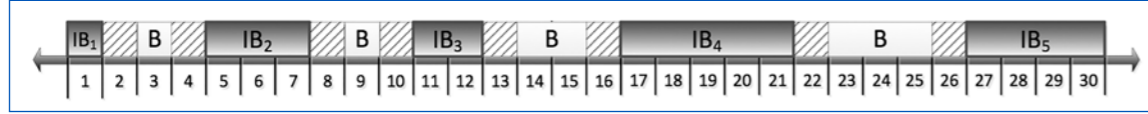


Sekil 45 Örnek bir başlangıç spektrum durumu.

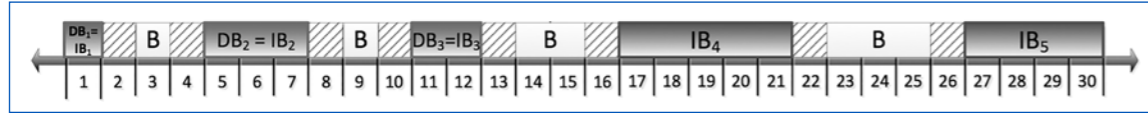
Bu çalışmalarımız kapsamında, Bölüm 4'te listelenen yayınlarımızdan 9 ve 10 numaralı konferans bildirisi ve makale yayınları yapılmıştır. Her iki yayında genel olarak literatüre yaptığımız katkılar aşağıdaki şekildedir:

- Belirli bir isteğe sahip bir link için, optimal kanal ataması probleminin formüle edilmesi,
- Bu problemin bilinen 'Subset Sum Problem' ile modellenmesi, eklenmesi gereken kalan istek ataması işlemi için önerilen yöntem ile birlikte de optimum sonuç verdiğinin ispatının yapılması, optimum sonuç veren arama algoritmasının yanında, yine optimum sonuç veren dinamik programlama tabanlı algoritmanın gerçekleştirilmesi, optimuma uzaklığı belirli seviyede kalan  $\epsilon$ -yakınsama algoritması gerçekleştirilmesi, çalışma zamanı açısından efektif olan fakat optimum değeri garantilemeyen bir yöntem önerilmesi ve gerçekleştirilmesi ile tüm bu algoritmaların performanslarının incelenmesi.
- Birden fazla link olduğunda çok daha karmaşık hale gelen optimum kanal atamasının formüle edilmesi,
- Birden fazla link için çok karmaşık hale gelen bu problemin, optimum çözüm arama algoritmasına, çeşitli uzay sadeleştirme kuralları eklenerek çalışma zamanının kısıtlanması, sırayla atama yapma ve her atamada tek link için önerilen hızlı atama tekniklerinin kullanıldığı çalışma zamanı oldukça düşük olan bir atama algoritması önerilmesi ve gerçekleştirilmesi, bu algoritmaların performanslarının incelenmesi.

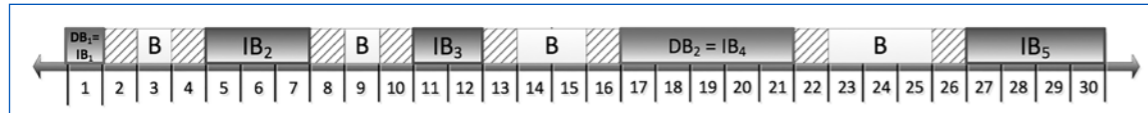
Kısaca, önerilen yöntemleri tanıtmak amacı ile, tek kullanıcı için optimum atama sonucu veren problemin tanımı yapılacaktır. Şekil 46'de gösterildiği üzere, başlangıç spektrumunda bulunan boş kanalları, kanal birleştirme ve var olan koruma bantlarını kullanabilme özellikleri sebebi ile boş kanal blokları olarak yorumlamak mümkündür. Bu durumda, belirli bir isteğe sahip olan link atamasını yapmak bu boş bloklardan, toplam kapasiteleri istek değerine eşit olan bir kombinasyon bulmak anlamına gelmekte ve bilinen 'Subset Sum Problem' problemine denk olmaktadır. Fakat bu aşamada, yapılması gereken ufak bir değişiklik bulunmaktadır. Bu değişiklik ile birlikte de optimum değere ulaşıldığı, çalışmamızda ispatlanmıştır. Ek değişiklik, bu blokların hiçbir kombinasyonu link istek değerine eşit değil ise en yakın olan kombinasyonu kullanmak ve kalan bloklardan birinden, kalan ek spektrum ihtiyacını karşılama isteğidir.



Şekil 46 Başlangıç spektrumunda bulunan boş bloklar.



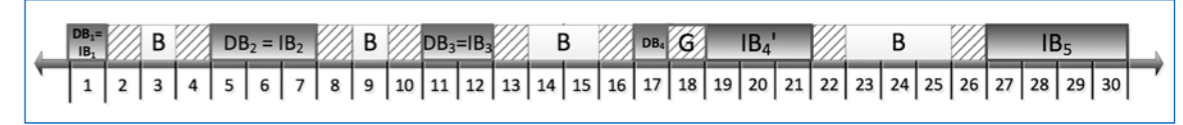
Şekil 47 Spektrum isteği 6 kanal olan bir link için kullanılacak boş blokların kombinasyonu.



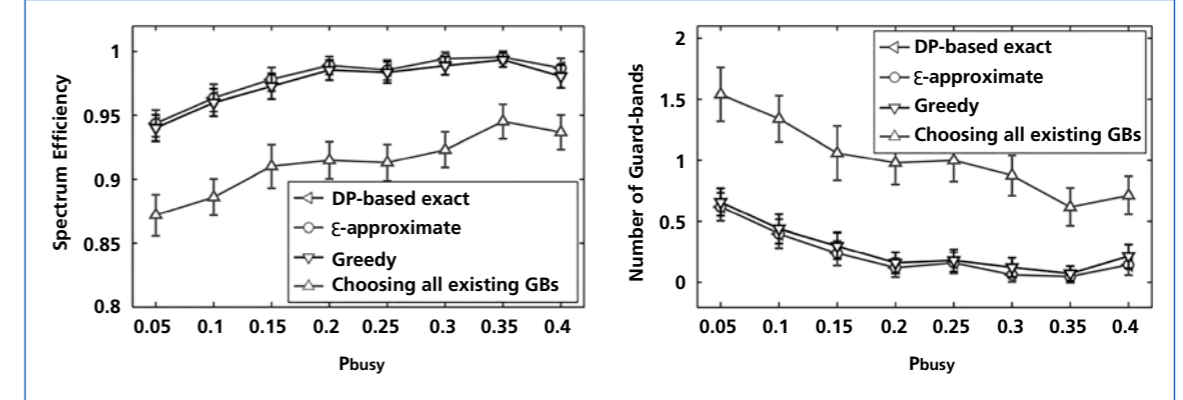
Şekil 48 Spektrum isteği 6 kanal olan bir link için kullanılabilir bir diğer boş blokların kombinasyonu.

Şekil 47'de spektrum isteği 6 olan bir link için yapılan atama görülmektedir. Şekil 48'da ise bir diğer kombinasyon görülmektedir. Tek link atamasında hangi kombinasyonun seçildiği önem taşımaz iken, birden fazla link için atama yapıldığında oluşacak yeni spektrumun yapısı değiştiğinden (koruma bantları ve yer açısından), bir diğer kullanıcıya ait atama düşünüldüğünde, seçilen kombinasyon kritik önem taşımaktadır.

Kullanıcının 7 kanal isteği olduğu durumda ise, boş kanal bloklarından bu değere en yakın kombinasyonun toplam değeri 6 olmaktadır. Bu durumda kalan 1 kanal isteği, boş bloklardan biri parçalanarak sağlanır. Yine benzer şekilde, hangi bloğun parçalanacağı, tek kullanıcı için önemli değil iken, birden fazla kullanıcının ataması düşünüldüğünde çok kritik olmaktadır. Şekil 49'de görüldüğü üzere, IB4 isimli boş blok, parçalanarak bir kanal, kanal atamasına ayrılmıştır. Bu atamanın ardından spektruma yeni bir koruma kanalı (G) eklenmiştir.



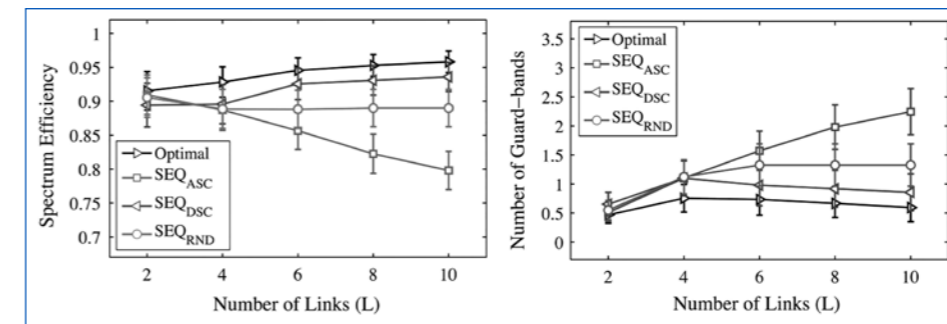
Şekil 49 Spektrum isteği 7 kanal olan bir link için yapılan örnek atama.



Şekil 50 Birincil kullanıcı kanalı kullanma olasılığına bağlı olarak spektrum efektif kullanım oranı ve koruma bantları sayıları.

Çalışmalarda pek çok performans değerlendirmesi yapılmıştır. Şekil 50'de görüldüğü gibi, birincil kullanıcı kullanım oranı arttığında sistemde hali hazırda bulunmakta olan koruma bantları sayısı artmakta, önerilen yöntem de bu bantlardan maksimum oranda faydalanmakta olduğundan, performans kazancı artmaktadır. Bir diğer önemli kazanç literatürdeki benzer bir çalışmaya göre performansın oldukça artırılmış olmasıdır (Grafiklerde 'Choosing all existing GBs' şeklinde verilen çalışma). Algoritmanın çalışma zamanı açısından oldukça önemli olan bir diğer sonuç ise 'Greedy' şeklinde isimlendirilen hızlı algoritmanın, optimum değerlere oldukça yakın bir performans göstermesidir. Şekil 50'de kullanılan koruma bantlarının grafiğinde görülen bir diğer önemli nokta ise, çalışmalarımızda ispatı da bulunan, tek link ataması yapıldığında, bu değer hiçbir zaman 1'den fazla olmayacağı önermesinin gösterilmiş olmasıdır.

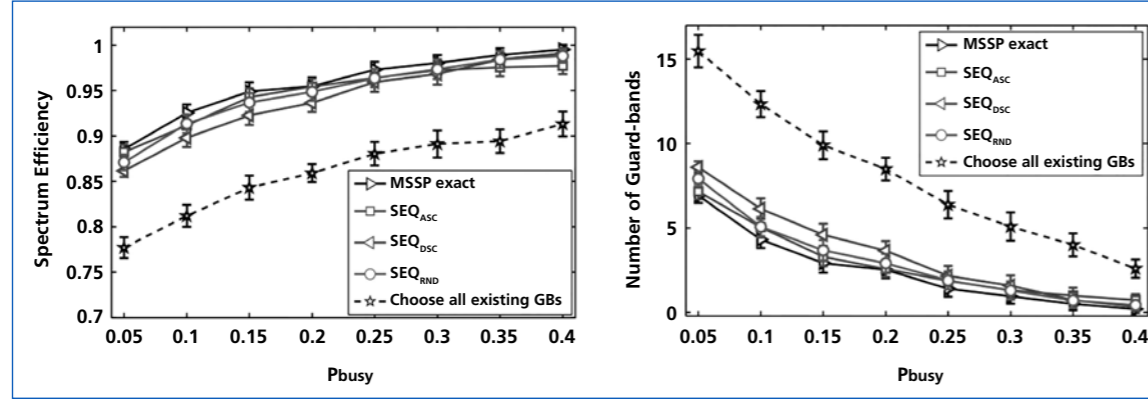
Birden fazla link atamasını gerçekleyen referans bir çalışma olmadığı için önerilen algoritmalar, kendi içerisinde performans değerlendirmesine tutulmuştur. Optimum sonucu veren algoritmalar sonuç vermekte oldukça zaman harcadığı için, kısıtlı bir parametre kümesi ile çalıştırılmıştır. Değerler Şekil 51'de görülmektedir. En kötü atama stratejisi rasgele link sırası ile yapılan atama olarak görülmekte fakat bu atamanın performansı da 0.8 gibi, optimum değere yakın sayılabilecek bir şekilde görülmektedir.



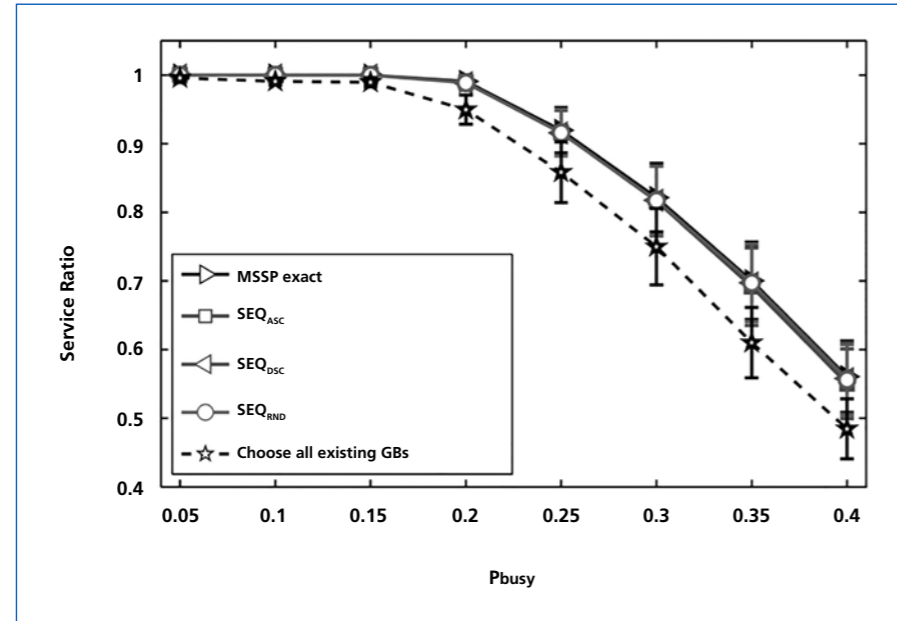
Şekil 51 Birden fazla link için kanal atamaları.

## 4. PROJE KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR VE DİĞER PROJELER

Sırayla atama yapma yöntemini kullanan algoritmalar incelenirken, 'Multiple Subset Sum' problemi ile yapılan modelleme (optimum sonucu vermemesine rağmen, bir baz algoritma oluşturmaktadır) ve sonucu ile literatürdeki diğer tek link atamasının, sırayla uygulanması ile oluşan ('Choose all existing GBs') yöntem ve sonuçları incelenmiştir. Literatürdeki diğer yöntem önerilen yöntemlere göre daha fazla koruma bandı kullandığı için çok daha düşük performans göstermekte, sıra ile yapılan atamalar ise baz algoritmaya oldukça yakın ve yüksek performans göstermektedir.



Sekil 52 Sırayla atama yapılan birden fazla link için kanal atamaları.



Sekil 53 Birden fazla link olma durumunda, verilen servis oranı.

Sekil 53'te görüldüğü üzere, önerilen algoritmalar, daha az sayıda koruma bandı kullandığından, diğer kanallara hizmet etmek için daha fazla olanak oluşmakta ve servis oranı yükselmektedir. Spektrumda yeteri kadar boşluk bulunduğu bu servis oranlarının %100 olacağı, çok az olanak bulunduğu ise algoritmanın sağladığı kazançların da yeterli kalmayarak %50 gibi değerlere düşeceği aşikardır ve bu grafikten de görülmektedir.

## 4. PROJE KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR VE DİĞER PROJELER

Bu proje kapsamında üretilen uluslararası konferans ve dergi yayınları aşağıdaki gibidir:

1. Gulnur Selda Uyanik, Sema Oktug, "A QoS Based Cooperative Spectrum Utilization in Cognitive Radio Networks", 35th IEEE Sarnoff Symposium, USA, 2012.
2. Berk Canberk, Sema Oktug, "A Channel Availability Classification for Cognitive Radio Networks using a Monitoring Network", 7th IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC'12). July 2012, Cappadocia, Turkey.
3. Alphan Salarvan, Gunes Karabulut Kurt, "Multi-Antenna Spectrum Sensing for Cognitive Radio under Rayleigh Channel", 7th IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC'12). July 2012, Cappadocia, Turkey.
4. Gulnur Selda Uyanik, Berk Canberk Berk, Sema Oktug, "Predictive spectrum decision mechanisms in Cognitive Radio Networks", 12/2012, s. 943-947, Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE, Anaheim, 12/3/2012 - 12/7/2012.
5. Gulnur Selda Uyanik, Ozge Cepheli, Gunes Karabulut Kurt, Sema Oktug, "Implementation and Performance Evaluation of Dynamic Spectrum Access Using Software Defined Radios", 2013, First International Black Sea Conference on Communications and Network, Batumi, Georgia, 7/3/2013 - 7/5/2013.
6. Özge Cepheli, Güneş Karabulut Kurt, "Yapay Gürültünün Fiziksel Katman Güvenliği Üzerindeki Etkisinin Analizi", 04/2013, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları, Girne, 4/24/2013 - 4/26/2013.
7. İlknur Ateş, Özge Cepheli, Güneş Karabulut Kurt, "MIMO-OFDM Sistemlerde Ses Kalitesi Kestirimi", 04/2013, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları, Girne, 4/24/2013 - 5/26/2013.
8. Özge Cepheli, Güneş Karabulut Kurt, "Physical layer security in cognitive radio networks: A beamforming approach", Communications and Networking (BlackSeaCom), 2013 First International Black Sea Conference on , vol., no., pp.233,237, 3-5 July 2013.
9. Gulnur Selda Uyanik, Mohammad J. Abdel-Rahman, Marwan Krunz, "Optimal Guard-band-aware Channel Assignment with Bonding and Aggregation in Multi-channel Systems", 12/2013, Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM), Atlanta, 12/9/2013 - 12/12/2013
10. Gulnur Selda Uyanik, Mohammad J. Abdel-Rahman, Marwan Krunz, "Optimal

Channel Assignment with Aggregation in Multi-channel Systems: A Resilient Approach to Adjacent-channel Interference”, Ad Hoc Networks, Volume 20, September 2014, Pages 64-76, ISSN 1570 - 8705

**Bu çalışmaların paralelinde, yürütücülerimizin yönetmekte olduğu diğer projeler aşağıdaki gibidir:**

1. S. Oktuğ ve B. Canberk, “BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM YÖNETİMİNE DAYALI BAŞARIM DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN BİR TEST ORTAMI,” İ.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projesi (Başvuru Tarihi: 30 Mart 2011)
2. G. Kurt, “ÇOK ANTENLİ GENİSBANT BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN GİRİŞİM YÖNETİM SİSTEMİ,” Genç Araştırmacıları Destekleme Programı Projesi (Başvuru Tarihi: 29 Ekim 2011)
3. Airties Kablosuz İletişim Hizmetleri A.Ş. ile “EV İÇİ İLETİŞİM İÇİN ENERJİ TASARRUFU YAPABİLEN ÇİFT BAND, WİFİ ÖZELLİKLİ VE VDSL DESTEKLİ AĞ GEÇİDİ PLATFORMU VE CİHAZI” projesi başlatılmıştır. Bu proje TÜBİTAK TEYDEB tarafından desteklenmektedir. Bu proje ile ev içi iletişim için enerji tasarrufu sağlayacak akıllı algoritmalar ile hem 2.4 GHz hem de 5 GHz bandında aynı anda çalışabilen, VDSL desteği olan bir ağ geçidi platformunun ve cihazının geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

## 5. SONUÇLAR VE GELECEK HEDEFLERİ

### 5. SONUÇLAR VE GELECEK HEDEFLERİ

**Bu proje ile elde edilen kazanımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:**

- İstanbul Teknik Üniversitesi’nde Bilişsel Radyo Ağı test ortamının yaratılması,
- Yaratılan bu test ortamında çevrimiçi (online) spektrum sezme ve karar verme uygulamalarının gerçekleştirilmesi ve pratik zorlukların ortaya çıkarılması,
- Etketif (hızlı) spektrum algılama yöntemlerinin geliştirilmesi,
- Hücresel ağlar (Global System for Mobile Communication (GSM)) ve IEEE 802.11 WiFi gibi günümüzde çok sık kullanılan kablosuz ağlarda oluşan spektrumun verimsiz kullanımının, sadece simülasyon ortamında değil, oluşturulan test ortamında da incelenmesi,
- Bilişsel ağlarda birinci (fiziksel katman) ve ikinci (veri bağı katmanı) katman protokollerinin test ortamında yeniden yapılandırılması,
- PHY katmanındaki temel parametrelerin test ortamında çevrimiçi olarak kullanılarak bir çapraz katman modelinin (Cross-Layer Model) oluşturulması,
- Spektrum algılama, fiziksel katman güvenliği gibi değişik alanlarda yapılan çalışmaların, bu proje kapsamında oluşturulan test ortamında gerçekleştirilmesi,
- Uluslararası akademik literatüre katkı sağlanması.

**Gelecek hedeflerimiz:**

- İstanbul Teknik Üniversitesi’nde kurulan Bilişsel Radyo Ağı test ortamını aracılığı ile ileri spektrum paylaşım yöntemlerinin test edilmesi,
- İstanbul Sanayi Odası – İstanbul Teknik Üniversitesi iş birliğinin devamı ve yeni projelerin oluşturulması,
- Yeni nesil ağlar içerisinde yer alan yazılım tabanlı ağlar konusunda araştırma ve geliştirme çalışmalarının başlatılması ve devam ettirilmesi,
- Bilişsel radyo ağlarında literatürde daha az yer alan güvenlik çalışmaları üzerinde yoğunlaşarak yeni çözümler önerilmesi.



## KAYNAKLAR

- [1] FCC, Federal Communications Commission Spectrum Policy Task Force, Report of the Spectrum Efficiency Working Group, (Teknik Rapor), USA, 2002.
- [2] MITOLA, J., Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Deřned Radio, (Doktora Tezi), Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm - Sweden, 2000.
- [3] B. Canberk, I. F. Akyildiz, ve 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.
- [4] I. F. Akyildiz, W.Y. Lee, M C. Vuran, ve S. Mohanty. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. Computer Networks, Elsevier, 50(13):2127-2159, Eylul 2006.
- [5] B.Canberk ve S.Oktug, "A Dynamic and Weighted Spectrum Decision Mechanism based on SNR Tracking in CRAHNs", Elsevier Ad Hoc Networks Journal, 2011.
- [6] Q. Zhao, ve B. M. Sadler. A survey of Dynamic Spectrum Access. Signal Processing Magazine, IEEE In Signal Processing Magazine, IEEE, Vol. 24, No. 3., pp. 79-89, 2007.
- [7] J. Mitola III, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in Proceedings of the IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications, San Diego, CA, USA, vol. 1, pp. 3-10, Nov. 1999.
- [8] Federal Communications Commission, "The FCC's Office of Engineering and Technology release report on tests of prototype white space devices." ET Docket No. 04-186, Oct. 2008.
- [9] Federal Communications Commission, "First report and order and further notice of proposed rule making in the matter of unlicensed operation in TV broadcast bands." ET Docket No. 04-186, Oct. 2006.
- [10] Federal Communications Commission, "FCC adopts rules for unlicensed use of television white space." Official FCC announcement, Nov. 2009.
- [11] Office of Communications, "Digital dividend review, a statement on our approach to awarding the digital dividend." [Online]: [www.ofcom.org.uk/condocs/ddr/statement](http://www.ofcom.org.uk/condocs/ddr/statement), Dec. 2007.
- [12] G. Scutari, D. Palomar, S. Barbarossa, Cognitive MIMO Radio, IEEE Signal Process. Mag., Vol: 25, No: 6, pp: 46 - 59. 2008.
- [13] A. Goldsmith, Wireless Communications. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2004.
- [14] M. Nekovee, "Dynamic spectrum access concepts and future architectures," BT Technology Journal, vol. 24, pp. 111-116, May 2006.

- [15] Alexander M. Wyglinski, Maziar Nekovee and Y. Thomas Hou, Preface, In Cognitive Radio Communications and Networks, Academic Press, Oxford, 2010,
- [16] M. Nakagami. The m-distribution - A General formula of intensity distribution of rapid fading. Statistical Methods in Radio Wave Propagation. W. C. Hoffman, Ed. Elmsford, NY: Pergamon, 1960.
- [17] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," in Proc. Int. Conf. Mobicom, Sep. 2010, pp. 1–12.
- [18] M. Jain, J. I. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, in Proc. Int. Conf. Mobicom, 2011, pp. 301–312.
- [19] M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, "Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems," 2011. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1107.1276>
- [20] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," in Proc. Int. Conf. Mobicom, Sep. 2010, pp. 1–12.
- [21] Saurabh Ganeriwal and Mani B Srivastava. Reputation-based framework for high integrity sensor networks. In Proceedings of the 2nd ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks, pages 66–77.



**İSTANBUL  
SANAYİ ODASI**

Meşrutiyet Caddesi No:62 Tepebaşı 34430 - İstanbul Tel: (0212) 252 29 00 Faks: (0212) 249 50 07 e-posta: [kobi@iso.org.tr](mailto:kobi@iso.org.tr)  
(Elektronik) ISBN: 978-605-137-447-5 (Basılı) ISBN: 978-605-137-446-8