



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KONYA MERKEZİNDE EM SPERKTRUM DOLULUK ÖLÇÜMLERİ VE ANALİZİ

İbrahim ŞEFLEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2016
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KONYA MERKEZİNDE EM SPEKTRUM DOLULUK ÖLÇÜMLERİ VE ANALİZİ

İbrahim ŞEFLEK

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ercan YALDIZ

2016, 91 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Ercan YALDIZ
Yrd. Doç. Dr. Hakkı SOY
Yrd. Doç. Dr. Levent SEYFİ

Son otuz yılda haberleşme sistemlerindeki hızlı gelişmeler sonucu kablosuz iletişim uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Bu uygulamaların artması, sonsuz bir kaynak gibi düşünülen elektromanyetik spektrumun kıt bir kaynak olduğunu ve spektrumun ölçülüp izlenmesinin önemini ortaya çıkarmıştır. Her yeni uygulamanın yeni bir frekansa tahsis edilme gereksinimi; mevcut spektrumun verimli kullanılması gerekliliğini göstermiştir. Spektrumun verimli kullanımı adına dünya çapında çeşitli dinamik spektrum erişimi çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalar arasından bilişsel radyo kavramı oldukça rağbet görmektedir. Bilişsel radyo; spektrum kullanım hakkına sahip olan kullanıcıların izniyle, lisanssız kullanıcıların da spektrumu kullanabileceklerini belirtmektedir.

Dinamik spektrum erişimi çalışmalarının başarılı bir şekilde yürütülebilmesi, öncelikle mevcut spektrum kullanımının analiz edilmesiyle mümkündür. Hangi spektrum bandının ne sıklıkta kullanıldığı, hangi bandın ne kadar boş (atıl) bulunduğu spektrum doluluk (meşguliyet) ölçümleri ile anlaşılmaktadır.

Bu tez çalışmasında spektrum doluluk ölçümlerinin gerekliliği ve ölçümlerin dünya çapında nasıl gerçekleştirildiği açıklanarak, literatürde gerçekleştirilen çalışmalar geniş kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Tezde Konya şehrinin üç farklı bölgesinde (Selçuklu, Karatay, Meram) dış ortamda 25-3000 MHz frekans bant aralığında altı ay süren ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Ölçümlerde; Rigol DSA 1030 spektrum analizör, AOR DA3200 yönsüz discone anten, yine aynı firmaya ait LN 4000 düşük gürültülü kuvvetlendirici ve bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Spektrumun algılanmasında enerji algılama yöntemi kullanılarak elde edilen veriler, spektral güç yoğunluğu, 24 saat süreye göre doluluk istatistiği ve tüm çalışma süresi boyunca ortalama doluluk-boşluk oranı (duty cycle) istatistiği şeklinde grafiklerle sunulmuştur. Üç ölçüm noktası (Selçuklu, Karatay ve Meram) için elde edilen doluluk oranları sırasıyla %5.12, %4.46 ve %4.19 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Spektrum Doluluk Ölçümleri, Spektrum Kullanımı, Spektrum İzleme, Spektrum Algılama, Bilişsel Radyo.

ABSTRACT

MS THESIS

EM SPECTRUM OCCUPANCY MEASUREMENTS AND ANALYSIS IN KONYA CENTER

İbrahim ŞEFLEK

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRICAL-ELEKTRONICS ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Ercan YALDIZ

2016, 91 Pages

Jury
Assoc. Prof. Ercan YALDIZ
Asst. Prof. Dr. Hakkı SOY
Asst. Prof. Dr. Levent SEYFİ

Wireless communication applications increase day by day as a result of rapid developments on communication systems in the last 30 years. As the applications increase, it is understood that the electromagnetic spectrum is a scarce source and it is very significant to measure and monitor the spectrum. The present spectrum must be exploited efficiently since any new application must be allocated to a new spectrum. In order to use spectrum efficiently, there are worldwide research efforts on dynamic spectrum access. Among these methods, cognitive radio mostly draws attention. Cognitive radio provides unlicensed users to use the spectrum with the permission of licensed users.

In order to carry out dynamic spectrum access studies successfully, available spectrum must be carefully analyzed. Spectrum occupancy measurements lead to find out which spectrum band is used frequently and which frequency band is unused and how much are those bands are used.

In this thesis, an introduction to the necessity of spectrum occupancy measurements and required material to make these measurements is expressed. Also, the studies in the literature are reviewed extensively as well as the way how these studies are carried out is presented. In the thesis, measurements between 25-3000 MHz frequency band are made in 3 different regions (Selçuklu, Karatay, Meram) of city of Konya outdoors during 6 months.

In the measurements, Rigol DSA 1030 Spectrum Analyzer, AOR DA3200 omnidirectional discone antenna, LN 4000 low noise amplifier and a laptop PC are used. Using energy detection method to sense the spectrum, the obtained data is presented with graphics using power spectral density, statistics on occupancy ratio during 24 hours and duty cycle which shows the percentage of occupation. The occupancy ratios are %5.12, %4.46 and %4.19 for three measurement regions (Selçuklu, Karatay and Meram) respectively.

Keywords: Cognitive Radio, Spectrum Monitoring, Spectrum Occupancy Measurements, Spectrum Sensing, Spectrum Usage,

ÖNSÖZ

Bütün çalışmalarımda değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, gerekli araştırma ve uygulamalarda yardımlarını esirgemeyen danışmanım Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği öğretim üyesi Sayın Doç.Dr. Ercan YALDIZ'a ve bölümümüzün değerli tüm öğretim elemanlarına, her türlü maddi manevi katkılarını esirgemeyen aileme ve öğrenci arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İbrahim ŞEFLEK
KONYA-2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **viii**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

2.1. Dış Ortam Ölçümleri 4
2.2. İç Ortam Ölçümleri 11
2.3. Belirli Bantlar İçin Gerçekleştirilen Ölçümler 12

3. MATERYAL VE YÖNTEM **16**

3.1. Materyal 16
3.1.1. Anten 16
3.1.2. Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici 18
3.1.3. Spektrum Analizör 19
3.1.4. Diğer Materyaller 20
3.2. Yöntem 21
3.2.1. Spektrum Algılama Yöntemleri 21
3.2.2. Spektrum Algılama Yöntemlerinin Karşılaştırılması 26

4. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE TARTIŞMA **27**

4.1. Selçuklu İlçesi (Üniversite) Ölçümleri ve Sonuçları 28
4.2. Karatay İlçesi Ölçümleri ve Sonuçları 46
4.3. Meram İlçesi Ölçümleri ve Sonuçları 63

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **81**

5.1 Sonuçlar 81
5.2 Öneriler 83

KAYNAKLAR **85**

EKLER **90**

ÖZGEÇMİŞ **91**

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

H_0 : Binary modelinde gürültü

H_1 : Binary modelinde sinyal

E_n : Alınan sinyalin enerjisi

$E(f)$: Mevcut frekans değerindeki eşik değeri

$G_{m(f)}$: Mevcut frekanstaki maksimum gürültü değeri

$G_{ort(f)}$: Mevcut frekanstaki ortalama gürültü değeri

$X(f)$: Gürültü değerlerinin kümülatif dağılım fonksiyonu

Kısaltmalar

BR : Bilişsel Radyo

BTK : Bilgi Teknolojileri Kurumu

DANL : Görüntülenen Ortalama Gürültü Seviyesi

dBm : Desibel Miliwatt

DECT : Geliştirilmiş Dijital Kablosuz İletişim

DMO : Doğrudan Mod Operasyonu

FCC : Federal İletişim Komisyonu

GHz : Gigahertz

GPIB : Genel Amaçlı Arayüz Veri yolu

GSM : Mobil İletişim İçin Küresel Sistem

IEEE : Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü

ILS : Hava Seyrüsefer

IMT Advance : Uluslararası İleri Mobil Telekomünikasyon

ITU : Uluslararası Telekomünikasyon Birliği

KET : Kısa Mesafe Erişimli Telsiz

kHz : Kilohertz

LAN : Yerel Alan Ağı

MHz : Megahertz

NTIA : Ulusal Telekomünikasyon ve Bilgi Yönetimi

PFA : Yanlış Alarm Olasılığı

RMS : Ortalama Karekök

TVWS : TV Beyaz Boşluğu

USB : Evrensel Seri Veri Yolu

USRP : Evrensel Yazılımsal Radyo Çevresel Birimi

3G : Üçüncü Nesil

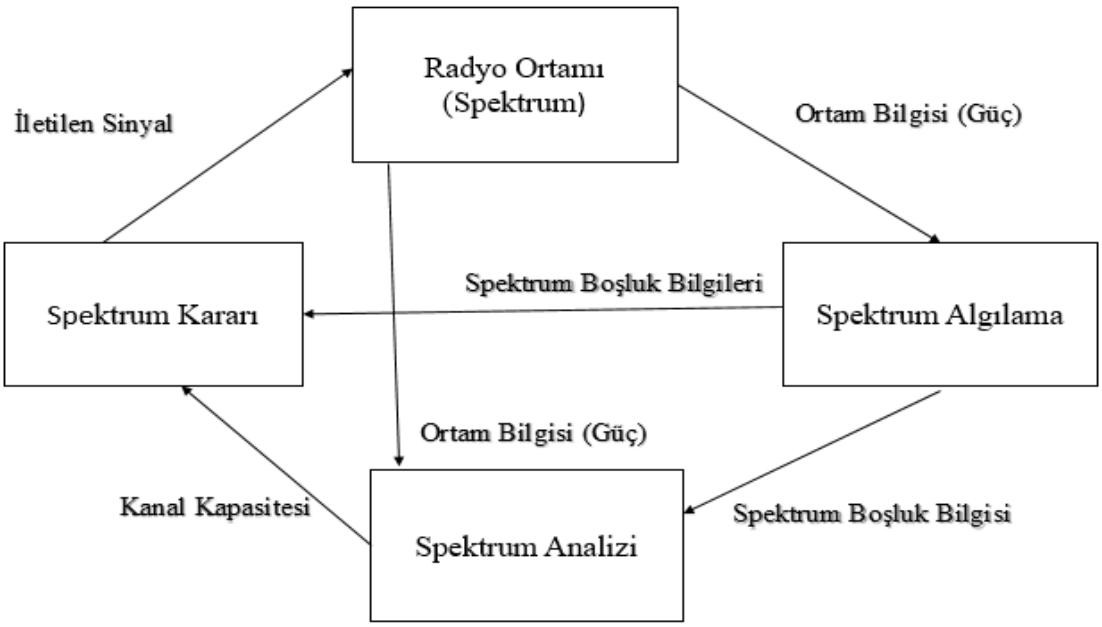
4.5G : İlerlemiş Dördüncü Nesil

1. GİRİŞ

1864 yılında Maxwell'in elektrik ve manyetik alanların birlikte yayıldığını keşfetmesi ile birlikte elektromanyetik dalgaların varlığı gün yüzüne çıkmıştır. Maxwell'in teorik olarak ispatladığı dalgaların varlığını H.R. Hertz 1887 yılında bir indüksiyon bobini kullanarak ilk olarak üretip, onları algılayarak deneysel olarak kanıtlamıştır (Altun, 2001). 1901 yılında Marconi'nin transatlantik deneyi ile uzun mesafeli radyo dalgaları ile veri iletimi gerçekleşmiş ve elektromanyetik dalgalar o günden itibaren hayatımızın vazgeçilmezleri arasında yerini almaya başlamıştır. Elektromanyetik spektrum kavramı ise kâinatta mevcut olan tüm elektromanyetik radyasyonun dalga boyları ve frekanslara göre sınıflandırılması olarak tanımlanabilir. Spektrumun en belirgin özelliği, elektromanyetik dalganın yayılımı ve dalganın kullanıldığı uygulamanın frekansa bağlı olarak ifade edilmesidir. Yüksek frekansa sahip dalgalar daha düşük yayılım mesafesine sahip iken, daha fazla bilgi taşıma kapasitesi gösterirler. Spektrumun sahip olduğu bu karakteristik özellik farklı frekanslarda farklı uygulamaların ortaya çıkmasını sağlamış ve belirli frekanslar için talebi artırmıştır. Özellikle spektrumda 400-2600 MHz frekans aralığı yayılma yönünden oldukça uygun olması ile yeni nesil uygulamaların gözdesi haline gelmiştir.

Son otuz yılda haberleşme teknolojilerinde meydana gelen yoğun çalışmalar sonucunda yeni uygulamaların ortaya çıkması ve her yeni uygulama için elektromanyetik spektrumda yeni frekans tahsisi sonsuz bir kaynak gibi düşünülen elektromanyetik spektrumun aslında öyle olmadığını göstermiştir. Kıt bir kaynak durumuna düşen spektrumun verimli kullanımı bir zorunluluk haline gelmiştir. Dünya çapında uygulanan sabit frekans tahsisi metoduyla mevcut spektrumun belirli bir bölümü, belirli uygulamalar için, belirli zaman aralıklarında yüksek ücretler karşılığında tahsis edilmektedir. Son dönemde Türkiye'de IMT-Advance uygulaması için frekans tahsisi ihalesinde firmalar devlete 3 milyar 960 milyon avro gibi bir bedel ödemeyi taahhüt etmişlerdir (http://www.btk.gov.tr/tr-TR/Kurumdan-Haberler/BTK-45G-Ihalesini-Onayladi). Bu sebepten haberleşme alanında spektrum; ülkelerin en değerli kamu varlığı olarak görülmektedir. Yetkili kurumlar tarafından tahsis edilen spektrumun değeri; bant genişliği miktarı, hizmet kapsamındaki talep, anlaşmanın süresi ve servisin gelişme imkânı gibi birçok bakımdan değerlendirilmektedir (Çiçek, 2011).

Sabit frekans tahsisinin yol açtığı bu tıkanma, spektrumun daha verimli kullanımı adına yeni çalışmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Sabit tahsis metodu yerine spektruma dinamik olarak erişim imkânı sağlayabilen sistemler üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiş olup, bunların en popüleri bilişsel radyo (BR) teknolojisidir. Bilişsel radyo; "gözlemleme, yönelme, planlama, öğrenme, karar verme, hareket etme" şeklindeki altı temel bilişsel eylemi gerçekleştirme yeteneğine sahip bir aygıt olarak tanımlanmıştır (Mitola III ve Maguire Jr, 1999). Daha sonra bu tanım ITU GSC (International Telecommunication Union Global Standards Collaboration) tarafından kendi çalışma ortamını sezen ve bu ortam hakkında bilgi sahibi olan, bunlardan yararlanarak radyo çalışma parametrelerini dinamik olarak ayarlayabilen sistem olarak genişletilmiştir. Bilişsel radyo spektruma dinamik olarak erişimi vaat ederken, lisanssız kullanıcıların da spektruma erişimini sağlamayı hedefler. Ayrıca bu kavram lisanslı kullanıcıları girişim, gürültü gibi istenmeyen durumlardan da koruyacağını öne sürmektedir. Bilişsel radyonun işlevleri arasında spektrum sezme, spektrum analizi, spektrum değiştirme, spektrum paylaşma gibi nitelikler söz konusudur. Bilişsel radyonun temel bilişsellik işlev döngüsü Şekil 1.1'de gösterilmektedir (Akyildiz ve ark., 2006).



Şekil 1.1 Bilişsellik Döngüsü (Akyildiz ve ark., 2006)

Bilişsel radyo kavramının gerçekleştirilebilirliği dünya çapında çalışmalarla araştırılırken; en temel çalışma mevcut elektromanyetik spektrumun nerede, nasıl ve ne kadar süreyle ve verimli kullanıp kullanılmadığını araştırmak yani spektrum doluluk

ölçümlerini gerçekleştirmek olmuştur. Sabit frekans tahsisi yönteminin uygulandığı Federal Communications Commission'un (FCC) verilerine göre yapılan çalışma sonucu tahsis edilen spektrumun %15 ile %85'lik kısmının zaman, frekans ve coğrafi konuma bağlı olarak atıl kaldığı gösterilmiştir (Akyildiz ve ark., 2006). Bu sebeple hem spektrumun verimli kullanımı adına hem de yeni teknolojilerin ortaya çıkmasını hızlandırma adına spektrum doluluk ölçümlerinin önemi artmaktadır.

Spektrum doluluk ölçümleri;

- Hangi frekans bandının düşük veya yüksek kullanıma sahip olduğunu
- Spektrumun nasıl kullanıldığını
- Mevcut olan kullanıcıların ekipman parametrelerini (sinyal bant genişliği, güç seviyeleri)
- Spektrum meşguliyeti boşluk genişliği ve süre istatistikleri
- Her bir banttaki verici sayısı
- Ortam gürültüsü

gibi mevcut spektrumla ilgili çok önemli verilerin elde edilmesini sağlar. Bu veriler ölçüm yapılan noktanın spektrum kullanım karakteristiğini ortaya koymak için yeterlidir. Bu sebeple bu tez çalışmasında Konya şehrinin farklı bölgelerinde dış ortamda (Selçuklu, Karatay, Meram) 25-3000 MHz frekans bant aralığında spektrum doluluk ölçümleri ve analizi gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 2'de dünya çapında gerçekleştirilmiş çalışmaların bir özeti sunulmuştur. Çalışmaların hangi amaçla yapıldığı ve şu an dünyada ne boyutlarda olduğu anlatılmıştır. Bölüm 3'de çalışmalarda kullanılan materyaller ve yöntemlerden bahsedilmiştir. Tez çalışmasında kullanılmış olan materyaller ayrıntılı bir şekilde tanıtılmıştır. Ayrıca spektrumun algılanması için kullanılan yöntemler de bu bölümde ele alınmıştır. Bölüm 4'te ölçüm çalışmasının ne şekilde gerçekleştirildiği ve farklı ölçüm noktalarında hangi frekanslarda ne tür sonuçların elde edildiği açıklanmıştır. Bölüm 5'te ise gerçekleştirilen çalışmada edinilen bilgiler ışığında sonuçlar değerlendirilerek gelecekte benzer çalışmalar için öneriler araştırmacılara aktarılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde daha önce gerçekleştirilen spektrum doluluk ölçümleri taranarak literatüre girmiş çalışmalar farklı yönleriyle sunulmuştur.

2.1. Dış Ortam Ölçümleri

Bu bölümde anlatılan çalışmalar, dış ortamda gerçekleştirilen ölçümleri kapsamaktadır.

The National Telecommunications and Information Administration (NTIA), Amerika'da spektrumun yönetilmesi ile ilgili yükümlülüklere sahip kuruluştur. Bu kuruluş spektrumun değerlendirilmesi ve spektrumun verimli kullanımı adına boşluklarının belirlenmesi amacıyla literatürdeki ilk geniş bantlı spektrum ölçümlerini gerçekleştirmiştir. İlk ölçüm Amerika'nın Colarado eyaletinin Denver şehrinde gerçekleştirilmiştir (Sanders ve Lawrence, 1995). Ölçümleri gerçekleştiren Sanders ölçüm bölgelerini artırarak sırasıyla Californa eyaletinin San Diego şehrinde ve California eyaletinin Los Angeles şehrinde gerçekleştirmiştir (Sanders ve ark., 1996),(1997). Üç yıl boyunca gerçekleştirilen ölçümler en az ikişer hafta sürmüştür. Çalışmada HP-8566 Spektrum analizör ve birkaç farklı anten yapısı kullanılmış ve kendine özgü analiz programı tasarlanmıştır. 108 MHz ile 19.7 GHz frekans aralığı ölçüm için tercih edilmiştir. Üç şehirde gerçekleştirilen ölçümler sonucu yoğun olarak kullanımın deniz kıyısındaki şehirde olduğu tespit edilmiştir ve bunun sebebi olarak da deniz radarı gösterilmiştir (Sanders, 1998).

Weidling ve arkadaşlarının (2005) gerçekleştirdiği çalışma spektrum kullanımını ölçmek, karakterize etmek ve modellemek için ortak bir çerçeve mimarisi sunmaktadır. Ayrıca ölçümlerde işaretin sinyal veya gürültü olduğunun anlaşılmasını sağlayan istatistiksel metotlar ve algoritmalar tanıtılmıştır.

Bir şehir merkezi ve bir kırsal olmak üzere iki farklı bölgede toplam spektrum kullanma miktarını belirleme amacıyla Amerika'nın Atlanta ve Kuzey Carolina bölgelerinde spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 400 MHz ile 7200 MHz bant aralığını kapsayan ölçümler birkaç ay boyunca sürmüştür. 5 milyara yakın veri elde edilerek aktif spektrum kullanımı belirlenmiştir. Kullanılmayan veya az kullanılan frekans bölgeleri belirlenerek dinamik spektrum erişim çalışmalarına katkı sunulmuştur (Petrin ve Steffes, 2005).

30 MHz -3000 MHz aralığında gerçekleştirilen bir diğer ölçüm Amerika'nın Chicago şehrinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümde bir spektrum analizör, bir adet yönsüz (omni-directional) anten, bir adet log-periyodik dizi anten, ön seçici ve diz üstü bilgisayar kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları maksimum güç seviyesi, anlık spektrum doluluk durumu ve doluluk-boşluk oranı (duty cycle) şekilleri ile sunulmuştur. Ölçüm sonuçları arasında dikkat çeken sonuçlar elde edilmiştir. 54-88 MHz bant aralığındaki TV bandı %70,9 oranında spektrum doluluğu gösterirken; 806-904 MHz bant aralığındaki cep telefonu bandı için doluluk oranı %55 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca birçok frekans bandının (1400-1850 MHz) da hiç kullanılmadığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada tüm frekans bantları için doluluk oranı %17,4 olarak bulunmuştur. Bu da spektrumun büyük bir kısmının atıl olarak kaldığını ispat etmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen çalışmada daha önce New York'ta gerçekleştirilmiş ölçümlerle bir karşılaştırma da sunulmuştur (McHenry ve ark., 2006).

İrlanda'nın Dublin şehrinde Shared Spectrum Company (SSC) tarafından gerçekleştirilen spektrum doluluk ölçümlerinde 30-3000 MHz'lik frekans bant aralığı taranmıştır. Ölçümler iki gün boyunca bölgenin en yüksek binalarından biri olan Commission for Communications Regulation binasının çatısında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde bir spektrum analizör, ön seçici, iki farklı model anten ve bir diz üstü bilgisayar kullanılmıştır. 1710-1850 MHz frekans aralığı %38.5 doluluk oranı ile en yoğun kullanılan bant olurken, 2300-2390 MHz bandında herhangi bir aktiviteden söz edilmemiştir. Ortalama doluluk oranı tüm bantlar için %13,60 olarak hesaplanmıştır (Erpek ve ark., 2007).

Asya kıtasında gerçekleştirilen bir çalışma olarak literatürde yerini alan Singapur spektrum doluluk ölçümleri, 12 iş günü boyunca gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 80-5850 MHz frekans aralığını kapsamaktadır. Ölçüm işlemi için Agilent E4407B spektrum analizör ve ETS-Lindgren anten firmasının 3149 model yönlü (directional) anteni kullanılmıştır. Labview yazılımı kullanılarak ölçülen değerler masaüstü bir bilgisayara toplanmıştır. Tüm frekans aralığı 60 MHz'lik bantlara ayrılmıştır. Her bir 60 MHz'lik bant 401 noktaya bölünerek peş peşe gelen iki frekans noktası arasındaki fark 150 kHz olarak belirlenmiştir. 174-230 MHz ve 490-614 MHz bandı (TV) sırasıyla %49,05 ve %52.35'lik doluluk oranları ile en yoğun olarak kullanılan iki bant olmuştur. Ayrıca 2400-2700 MHz bant aralığında herhangi bir aktivite tespit edilemediğinden bu bandın boş olduğu bildirilmiştir. Tüm spektrumun doluluk oranı ise %4.54'tür. Ayrıca

Singapur'un küçük bir şehir olup yanındaki diğer ülkelerin şehirlerindeki yayınlardan da etkilenebileceği üzerinde durulmuştur (Islam ve ark., 2008).

İspanya'nın Barcelona şehrinde gerçekleştirilen bir diğer çalışmada 75-3000 MHz frekans bant aralığı ölçüm işlemine tâbi tutulmuştur. İki gün boyunca gerçekleştirilen ölçümlerde Anritsu Spectrum Master MS2721B model spektrum analizör, AOR DN 753 discone anten ve dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Ölçülen frekans aralığı 500 MHz'lik bölümlere ayrılarak analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar güç spektral yoğunluğu, anlık spektrum doluluğu ve doluluk-boşluk oranı grafikleri ile sunulmuştur. Ölçüm sonuçlarına göre 1000 MHz'in altında bulunan frekansların yoğun olarak kullanıldığı; 1000 MHz'in üstünde kalan bölgelerin büyük çoğunluğunun kullanılmadığı belirlenmiştir. Dinamik spektrum erişimi için uygun bantlar belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca ölçüm esnasında peş peşe iki frekans arasında kalan frekans farkının (frequency bin) doluluk ölçümüne etkisi de incelenmiştir (Lopez-Benitez ve ark., 2009).

Bir diğer çalışmada Katar'ın Doha şehrinin dört farklı bölgesi için üç gün boyunca gerçekleştirilmiştir. Ölçüm çalışması 700-3000 MHz frekans bant aralığını kapsamaktadır. Çalışmada Rohde & Schwarz FSH6 model taşınabilir spektrum analizör, AOR marka DA5000 model discone anten ve diz üstü bilgisayar kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları üç boyutlu güç spektral yoğunluğu grafiği şeklinde sunulmuştur. Ölçüm sonuçları dört farklı bölge için zaman ve frekansa göre değişmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, değerler düşük spektrum kullanımını göstermiş ve dinamik spektrum erişimi sistemleri için uygun bantlar belirlenmiştir (Qaraqe ve ark., 2009).

Valenta ve arkadaşları (2010) 400-3000 MHz bant aralığında Fransa'nın Paris şehir merkezi ve kenar mahallesinde, Çek Cumhuriyetinin Brno şehrinin banliyösünde ortak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada her bölge için ölçüm parametreleri sunularak farklı bölgeler için spektrum kullanım bakımından korelasyon incelenmiştir. Ölçümlerde Rohde&Schwarz FSP ve Tektronix RSA3408 A model spektrum analizörler kullanılmıştır. Matlab programı ile USB/GPIB arayüzüyle cihazlar uzaktan kontrol edilmiştir. Tüm frekans bandı 20 MHz'lik alt bantlara bölünerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Üç bölge içinde en yoğun olarak kullanılan bandın GSM 900 downlink bandı olduğu sunulmuştur. Brno, Paris kenar mahallesi ve şehir merkezi için 400-3000 MHz spektrum doluluk oranları sırasıyla %6.5, %10.7, %7.7 olarak hesaplanmıştır. Temel kablosuz iletişim ve kullanım performansları ortaya konularak üç bölgedeki sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Benitez ve Casedevall'in (2010) çalışmasında o zamana kadar gerçekleştirilen çalışmaların bir özeti sunulmuştur. Yapılan çalışmalar özetlenerek belirli bir metodolojinin ortaya konulması gerekliliği ileri sürülmüştür. Gerçekleştirdikleri 75-7075 MHz frekans bandını kapsayan çalışmada ölçüm sırasında nelerin yapılması gerektiği zaman ve frekans boyutu bağlamında ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Verilerin toplanıldıktan sonra nasıl işleneceği hakkında önemli bilgiler verilmiştir.

Avrupa'da yapılan bir diğer çalışma Romanya'nın Bükreş şehrinde 25-3400 MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Anritsu MS2690A marka sinyal analizör, Sirio SD1300N ve Aaronia Hyperlog 4060 marka antenler kullanılmıştır. Veri toplama ve analiz işlemi için MATLAB programı tercih edilmiştir. Analiz kısmında farklı eşik değerlerinin doluluk istatistiğine etkisi karşılaştırılarak sunulmuştur. Tüm bantlar için ortalama doluluk oranı %12.19 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca belirli frekans bölgelerinin oldukça düşük kullanıma sahip olduğu ve dinamik spektrum erişimi için uygun olabileceği belirlenmiştir (Marţ ve ark., 2010).

Hollanda'nın Amsterdam şehrinde Schiphorst ve Slump (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada spektrum doluluk ölçümleri hareketli (mobile) olarak gerçekleştirilmiştir. Araca sabitlenen ölçüm cihazları ile şehrin çeşitli bölgelerinden ölçüm alınarak şehirdeki spektrum kullanımı değerlendirilmiştir. 100-500 MHz bant aralığı için dört farklı ölçüm noktasında alınan güç değerleri ve istatistikler yapılan çalışmada sunulmuştur.

30-6000 MHz frekans aralığını kapsayan bir ölçüm sistemi kurularak yapılan bir çalışma Amerika'nın Chicago şehrinde gerçekleştirilmiştir. Üç yıl boyunca gerçekleştirilen çalışma diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça kapsamlıdır. 30-3000 MHz bant aralığının doluluk değerleri 2008, 2009 ve 2010 yılı için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu değerler ortalama olarak tüm bantlar için sırasıyla %18, %15 ve %14 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca belirli frekans bantları için elli iki hafta boyunca ölçülen doluluk değerleri gün bazında karşılaştırmalı şekilde gösterilmiştir. FCC tarafından belirlenen TV bantlarının dinamik spektrum erişimi adına uygunluğunu ifade eden TV beyaz uzayı (TV White Space) ölçümleri gerçekleştirilerek TV bandının doluluk sonuçları incelenmiştir (Taher ve ark., 2011).

Hindistan'da gerçekleştirilen bir ölçümde Mumbai şehrinin sahil kesimi ve yerleşim bölgesinin olduğu alanda 700-2700 MHz frekans aralığı çalışma için seçilmiştir. İki gün boyunca gerçekleştirilen ölçümlerde frekans aralığı sekiz alt banda bölünerek analiz edilmiştir. GSM 900 ve GSM 1800 bandı en çok aktivitenin gerçekleştiği bantlar

olarak tespit edilmiş ve doluluk oranı sırasıyla %37.20 ve %31.71 olarak hesaplanmıştır. Tüm ölçüm aralığı için ortalama doluluk oranı ise %6.62'dir. Ortaya konulan bu sonuçlarla; çalışma yapılan bölgede spektruma dinamik erişim imkânı sağlayan bilişsel radyo için uygun frekans bantlarının mevcut olduğu gösterilmiştir (Patil ve ark., 2011).

Bir diğer spektrum doluluk ölçümü Vietnam'ın Ho Chi Minh City şehri ve Long An bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm amacı, farklı uygulamalar için tahsis edilen spektrumun durumunu incelemek ve kullanılmayan veya az kullanılan frekans bantlarını belirleyerek bilişsel radyo gibi uygulamaların hizmetine sunmaktır. Ekipman olarak R&S EM550 VHF / UHF dijital geniş bant alıcı ve HE016, HE309, HE314A1, HF214, HF902 marka farklı antenler kullanılmıştır. Çalışma frekans aralığı olarak 20-3000 MHz bandı seçilmiştir. Dört ay süren ölçümlerde bazı bantların hiç kullanılmadığı belirtilmiştir. Ho Chi Minh City şehri çalışmasında tüm bantlar için güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Bu şehir için en yoğun doluluk oranı %58 ile analog TV bandı (470−806 MHz) olmuştur. Çalışmada 2 farklı bölge için bant-bant doluluk ölçümlerinin karşılaştırılmasının yanı sıra; Amerika'nın New York şehrindeki bir çalışma da karşılaştırmada kullanılmıştır. 20-3000 MHz bantları için ortalama doluluk oranı Long An bölgesi için %11.19 ve Ho Chi Minh City şehri için ise % 13.74 olarak hesaplanmıştır (Vo ve ark., 2011).

Ayrıntılı bir çalışma olarak literatüre giren diğer bir çalışmada, ölçüm sisteminin kurulumu, spektrum analizörün ölçüm için ayarlanması ve kontrolü için gerekli algoritma, verilerin nasıl ve hangi formatta elde edilmesi gibi önemli konular paylaşılmıştır. Barcelona ve Castelldefells bölgesinde gerçekleştirilmiş çalışmaların karşılaştırılması da bu çalışmada sunulmuştur (López-Benítez ve Casadevall, 2011).

Malezya'da gerçekleştirilen ölçüm çalışmasında 30-3000 MHz frekans bandı ölçüme tabi tutulmuştur. Johor Bahru bölgesinin kenar mahallesinde gerçekleştirilen çalışma, mevcut spektrumun durumu hakkında fikir sahibi olma ve fırsatçı bir şekilde spektrumu kullanma imkânı sunan bilişsel radyo uygulaması için spektrumun uygunluğunu kontrol etmeyi amaçlamaktadır. Çalışma Agilent E4440A PSA spektrum analizör, geniş bantlı bir anten ve bir diz üstü bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Spektrum analizörün kontrolü ve veri analizi MATLAB programı ile sağlanmıştır. En yoğun kullanılan frekans bantları FM radyo, TV, GSM 900 ve GSM 1800 olarak belirtilmiştir. Ortalama duty cycle değeri tüm bantlar için %11.29'dur (Dzulkifli ve ark., 2012).

İngiltere'nin Hull City şehrinde 80- 2700 MHz frekans aralığında farklı konumlar için spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Agilent E4407B spektrum analizör ve log-periyodik bir antenle çalışma düzeneği kurulmuştur. Ayrıca yapılan çalışmada

geçmiş yıllarda gerçekleştirilmiş çalışma sonuçları ile Hull City'de elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Mehdawi ve ark., 2012).

Çin'in güneyinde Guangzhou bölgesi çevresinde dört farklı lokasyon için çalışma gerçekleştirilmiştir. 20-3000 MHz frekans aralığında bir hafta boyunca süren ölçümlerde EM 550 model dijital alıcı, ölçüm frekansını kapsayacak anten ve diz üstü bilgisayar kullanılmıştır. Çalışmada metodoloji, veri depolanması ve verinin nasıl analiz edildiği ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. TV beyaz uzayı (TV White Space) çalışması da ölçümlerle gerçekleştirilmiştir. Dört farklı bölgenin sonuçları karşılaştırılmış ve doluluk istatistiklerinin beta dağılımına uygunluğu araştırılmıştır. Çalışma sonucu mevcut frekans bantlarının birçoğunun bilişsel radyo uygulaması için uygun olduğu görüşü belirtilmiştir (Liang ve ark., 2012).

İngiltere'de gerçekleştirilen bir diğer çalışma da Londra'da birden çok konumda gerçekleştirilmiştir. Bir adet sabit noktada kurulan sistem dışında birçok cadde, hava alanı ve alış veriş merkezi gibi yoğun olarak insanların yaşadığı bölgelerde geçici ölçüm sistemleri kurulmuştur. Bir hafta boyunca gerçekleşen ölçümlerde metropol bir şehir için spektrumun nasıl kullanıldığı ortaya çıkarılmıştır. Ölçümlerde üç adet spektrum analizör kullanılmış olup anten olarak AOR DA753G modeli tercih edilmiştir. Spektrumun 75-3000 MHz frekans aralığı taranmış ve GSM bantları üzerine analizler yoğunlaşmıştır. Ayrıca zaman, uzay ve frekans domeni bağlamında dinamik spektrum kullanımı ve korelasyon çalışması gerçekleştirilmiştir (Palaios ve ark., 2012).

Karşılaştırılmalı bir ölçüm çalışması, Kliks ve arkadaşları (2013) tarafından İspanyanın Barcelona şehri ile Polonya Poznan şehrinde gerçekleştirilmiştir. Gürültü eşik seviyesi; cihaz içi ve ortam gürültüleri karşılaştırılarak faydacı (pragmatik) bir yaklaşımla elde edilmiştir. 75-3000 MHz frekans aralığı ölçüm için seçilmiştir. Karşılaştırmalı sonuçların elde edilebilmesi için her iki şehirde de ölçüm parametreleri benzer tutulmuştur. Barcelona'daki ölçümlerde Anritsu MS2721B model spektrum analizör ve AOR DN753 model anten kullanılmıştır. Poznan'daki çalışmada ise Rohde&Schwarz FSL6 model spektrum analizör ve AOR DA-753G model anten kullanılmıştır. Barcelona'daki ölçümler yaklaşık dört ay sürerken Poznan'da bu süre bir haftadır. İki şehir için elde edilen sonuçlarda en çok kullanılan bandın GSM 900 bandı olduğu tespit edilmiştir. Tüm frekans bant aralıkları için hesaplanan ortalama doluluk sonuçları Barcelona ve Poznan için %22 ve %27 olarak sunulmuştur.

Çin'in başkenti Pekin'de gerçekleştirilen bir başka çalışmada 440-2700 MHz frekans aralığı taranmıştır. İki gün için gerçekleştirilen ölçümlerde mevcut spektrum

hakkında değerli veriler elde edilmiştir. Agilent N9030A spektrum analizör, Boger DA-5000 marka anten, ölçümlerin 24 saat boyunca aksamaması için kesintisiz güç kaynağı ve diz üstü bilgisayar ile ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Belirlenen ölçüm periyodu sonrası yoğun olarak kullanılan frekans bantlarının 470-806 MHz TV bandı ve 935-960 MHz GSM 900 bandı olduğu tespit edilmiştir. Ölçülen tüm bantlar için aktif spektrum kullanım oranının %15.2 olduğu hesaplanmıştır. Bu sonuç; dinamik spektrum erişim imkânı sağlamayı amaçlayan bilişsel radyo gibi uygulamaların spektrumu kullanabilecekleri oldukça fazla frekans bandı olduğunu göstermiştir (Xue ve ark., 2013).

Romanya'daki çalışmasını genişleten Martian (2014) Maneciu köyü ve Bükreş şehir merkezinde 25-3400 MHz bandında spektrum doluluk ölçüm çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada farklı eşik değeri belirleme yöntemleri karşılaştırılarak aralarındaki doluluk istatistik farkları gösterilmiştir. Hafta içi ve hafta sonu ölçümler saat bazlı karşılaştırılmış, iki farklı bölge için sonuçlar sunulmuştur. Tüm frekans bantları için Maneciu köyünde %14.19 doluluk istatistiği elde edilirken, Bükreş'te ise bu değer %21'dir.

Amerika'nın Grand Forks, Kuzey Dakota'da gerçekleştirilen çalışmada 824-5800 MHz frekans bant aralığı taranarak spektrum kullanımı belirlenmiştir. Önceki çalışmalara kıyasla yüksek zaman çözünürlüğü içeren Universal Software Radio Peripheral (USRP) sistemin kullanıldığı çalışmada enerji belirleme ve oto korelasyon yöntemi uygulanmıştır. Belirli bantlar için ortalama doluluk oranları sunulmuştur (Subramaniam ve ark., 2015).

Ölçüm çalışmalarının oldukça çok olması bazı araştırmacıları bu çalışmaların bir araya getirilerek sunulmasına teşvik etmiştir. Das (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada dünya çapında gerçekleştirilen çalışmalar ve spektrum doluluk modelleri ele alınmıştır. Bir diğer araştırmada Chen ve Oh (2016) bu zamana kadar gerçekleştirilen spektrum doluluk modellerini incelemişlerdir. Spektrum doluluk ölçümlerinin istatistiksel boyutta incelenmesi ve elde edilen sonuçlarla spektrum tahmin modelleri de çalışmada ayrıntılı bir şekilde aktarılmıştır.

2.2. İç Ortam Ölçümleri

İç ortam ölçümleri mevcut spektrumda iç ortamdan kaynaklanan çeşitli zayıflamaların (gölgeleme, yansıma vb.) etkisini inceleyebilmek için gerçekleştirilmektedir. Dış ortam ölçümlerine göre daha az gerçekleştirilen ölçümlerden spektrum kullanımı ile ilgili değerli veriler elde edilmektedir.

Almanya'nın Aachen şehrinde gerçekleştirilen çalışmada 20-6000 MHz frekans aralığı taranmıştır. Ölçümler hem iç hem de dış ortam için gerçekleştirilmiştir. Agilent E4440A model spektrum analizör, ölçüm frekans aralığını kapsayacak şekilde AOR DA-5000, AOR DA-5000JA ve Antennentechnik Bad Blankenburg AG KS 1-10 model antenler ve bir diz üstü bilgisayar ile ölçüm sistemi kurulmuştur. Dış ortam için tüm frekans bantlarında minimum, maksimum ve ortalama güç spektral yoğunluğu verilmiştir. Bir hafta boyunca gerçekleşen ölçümlerde 20-3000 MHz frekans bandında dış ortam için neredeyse %100'e yakın doluluk istatistiği elde edilirken iç ortam için bu değer %32'dir. Ayrıca iç ortam için 1000-3000 MHz frekans bandı oldukça atıl bulunmuştur. Dinamik spektrum erişimi için uygun bantlar belirlenmeye çalışılmıştır (Wellens ve ark., 2007).

Yeni Zelanda'nın Auckland şehrinde 806-2750 MHz frekans bant aralığında hafta içi günlerde 12 hafta süren spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı diğer çalışmalarda olduğu gibi bilişsel radyo gibi uygulamalar için spektrumdaki potansiyel fırsatları belirlemektir. Ölçümlerde Rohde & Schwarz ESVN40 Test alıcı, iki adet frekans aralığını kapsayacak şekilde farklı özelliklerde anten ve bir bilgisayar kullanılmıştır. Ölçümler iç ve dış ortamda gerçekleştirilmiştir. Farklı eşik seviyeleri belirlenerek etkileri karşılaştırılmıştır. İç ve dış ortam arasında alınan sinyallerde 5-25 dB arasında fark olduğu ortaya konmuştur. Gürültü dağılımı ve sinyal güç olasılık dağılımı grafiklerle gösterilmiştir. Tüm frekans bantları arasında en çok GSM 900 downlink bandının kullanıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca 806-2750 MHz frekansı için iç ortamda %5.72 doluluk oranı hesaplanırken; dış ortamda bu oran %6.21'dir (Chiang ve ark., 2007).

Wellens ve Mahonen'in (2010) yaptığı bir diğer çalışmada spektrum doluluk ölçümlerinden elde edilen önemli bilgiler sunulmuştur. 2007 yılında gerçekleştirilen çalışmayla aynı ölçüm düzeneği kullanılmıştır. Buna ek olarak çalışma Aachen şehri ve Hollanda'nın Maastricht bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Üç bölge için güç-olasılık yoğunluk fonksiyonu istatistiği elde edilmiştir. Doluluk-boşluk oranının hesaplanması

için modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bazı bantlar için doluluk-boşluk oranı dağılımı kümülatif dağılım fonksiyonu ile karşılaştırılmıştır. Doluluk boşluk oranı modellemesi için geliştirilmiş beta dağılımı uygulanmıştır. Ayrıca adaptif spektrum algılama ile ilgili çalışma da gerçekleştirilmiştir.

İngiltere'nin Bristol şehrinde 300-4900 MHz frekans bant aralığında 6 ayı aşkın sürede spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bir spektrum analizör, iki farklı anten, anten tercihi yapmak için anahtar ve bir bilgisayarla kendine özgü bir sistem kurulmuştur. Tüm frekans aralığı 20 MHz'lik 230 alt banda ayrılmıştır. Ortalama tüm bantlar için günlük bazda doluluk analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda hafta sonunda spektrum aktivitesinin azaldığı yorumu yapılmıştır. 24 saat için saatlik doluluk üzerinde de çalışılmıştır. Ayrıca iç ve dış ortam için tüm bantlar için doluluk oranları sunulmuştur (Harrold ve ark., 2011).

2.3. Belirli Bantlar İçin Gerçekleştirilen Ölçümler

Spektrum doluluğunu incelemek için yapılan bazı çalışmalar belirli bantları kapsamaktadır. Bu bantlar arasında TV bandı ilk sırada yer almaktadır. Karasal TV yayınının yerini dijital TV yayınının almasıyla spektrumun büyük bir kısmı boşalmıştır. Bu durum ikincil kullanıcılara erişim sağlayan bilişsel radyo gibi dinamik spektrum erişim imkânı sunan uygulamalar için büyük bir fırsattır. Bu yüzden birçok ölçüm bu bandı kapsar. Bazı çalışmalarda endüstriyel, bilimsel ve medikal (ISM) bandı da araştırılmıştır. Birçok çalışma ise haberleşme uygulamaları (GSM, UMTS, IMT vb.) bantlarına odaklanmıştır.

İngiltere'nin farklı şehirlerinde özel, kamu ve şehir merkezlerinin farklı konumları kullanılarak gerçekleştirilen ISM bandı için spektrum doluluk ölçümleri; bu bant için çok ayrıntılı sonuçların ulaşılmasını sağlamıştır. Ölçümler için bir spektrum analizör, bir anten ve bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Analizler MATLAB programı ile gerçekleştirilmiştir. Farklı eşik değerleri ile spektrum doluluk istatistiği etkileri gösterilmiştir. Günlük olarak spektrum kullanımı tablolar ile sunulmuştur. Özel, kamu ve şehir merkezleri lokasyonlarına göre doluluk oranı sırasıyla %5, %30 ve %4 olarak hesaplanmıştır (Biggs ve ark., 2004).

Matinmikko ve arkadaşları (2010) tarafından beş iş günü boyunca ofis ortamında ISM bandını (2400-2485 MHz) kapsayan spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde iki farklı alıcı ve üç anten kullanılmıştır. Üç antenden

alınan güç seviyeleri karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Konumun ve antenlerin yönlülüğünün spektrum doluluk ölçümlerini etkilediği sonucuna varılmıştır.

Avrupa'nın 11 farklı ülkesinde birlikte gerçekleştirilen çalışmada 470-790 MHz UHF TV bandı için spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma özellikle karasal analog TV yayın uygulamasının sona ermesinden sonra dijital TV yayını ile ortaya çıkan spektrum boşluklarını (TV beyaz uzayı) belirlemeyi hedeflemiştir. Yapılan çalışmada 11 ülke için ayrı ayrı alana ve nüfusa göre beyaz uzaylar belirlenerek Amerika'da gerçekleştirilmiş olan bir başka çalışma ile karşılaştırılmıştır (Van De Beek ve ark., 2012).

Filipinlerin başkenti Manila'da VHF ve UHF TV bandının durumunu anlayabilmek için doluluk ölçüm çalışması yapılmıştır. Çalışmada dört elemanlı Yagi-Uda anten ve R3131A model Advantest spektrum analizör kullanılmıştır. Analiz işlemi MATLAB programı ile gerçekleştirilmiş olup VHF bandı ikiye bölünmüştür. 54-88 MHz düşük frekanslı VHF bandı için doluluk istatistiği %7 olarak hesaplanmıştır. Yüksek frekanslı VHF ve UHF TV bantları için bu değerler sırasıyla %57 ve %60'tır. İki gün boyunca gerçekleşen ölçümlerde tüm frekans aralığı için ortalama spektrum doluluk değeri %16 bulunmuştur (Pintor ve ark., 2012).

Hindistan'ın Pune şehrinin kenar mahallesinde ve Kumbhivali köyünde gerçekleştirilen bir çalışmada VHF ve UHF TV bantları için spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Rohde &Schwarz FS3 spektrum analizör ve AOR DN 753 model antenin kullanıldığı çalışma kenar mahalle için bir gün ve kırsal kesim için bir saat sürmüştür. Mevcut TV bantları için oldukça önemli sonuçlar elde edilmiştir. Kenar mahalle için VHF TV bandı ve UHF TV bandı için doluluk istatistik sonuçları sırayla %3.55 ve %7.22 olarak belirlenmiştir. Ayrıca şehir merkezinde yaklaşık 100 km uzaklıkta olan köyde ise herhangi bir TV yayınına rastlanmamıştır. Bu da bilişsel radyo uygulamasının bu gibi lokasyon ve bantlarda rahatlıkla kullanılabileceği rapor edilmiştir (Patil ve ark., 2013).

Yedi gün boyunca gerçekleşen diğer bir çalışma Uganda Kampala'da Kagarura ve arkadaşları (2013) tarafından gerçekleştirilmiştir. 50-1100 MHz frekans aralığında gerçekleşen çalışma belirli bantlara yoğunlaşmıştır. Hem iç hem dış ortamda yapılan ölçümlerde Agilent N9000A spektrum analizör, bir discone anten ve bir bilgisayar kullanılmıştır. Tüm frekans aralığının güç spektral yoğunluğu ve güç dağılım olasılığı sunulmuştur. Eşik değerinin değişmesi ile doluluk oranlarının nasıl değiştiği gösterilmiştir. FM, TV ve GSM bandının yoğun olarak kullanıldığı ifade edilmiştir.

Avrupa'nın yedi farklı şehrinde iki gün boyunca 110-3000 MHz frekans aralığı doluluk ölçümü için taranmıştır. Çalışma, özellikle GSM 900 ve GSM 1800 bantlarının günlük aktivite ve duty cycle modeline odaklanmıştır. Çalışılan lokasyonların ikisinde ISM bant kullanımı ayrıca incelenmiştir. Rohde & Schwarz FSL6, Tektronix RSA 6100A, Rohde & Schwarz FSQ-26 ve Anritsu MS2690A spektrum analizörler kullanılmıştır. Anten olarak ise AOR DA3200 ve AOR DA 753G tercih edilmiştir. 7 şehir için GSM 900 ve 1800 bantları için duty cycle-kümülatif dağılım fonksiyon tablosu sunulmuştur. Mevcut spektrum için uygun frekans bant aralıkları belirlenmiştir (Palaios ve ark., 2013).

Güney Afrika'nın Pretoria Hatfield bölgesinde UHF (470–854 MHz), GSM 900 downlink (935–960 MHz) ve GSM 1800 downlink (1805–1880 MHz) frekans bantları için 6 hafta boyunca kendine özgü bir ölçüm sistemi ve yazılım ile spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ham ölçüm verileri için bir spektrum doluluk metodu belirlenerek veriler analiz edilmiştir. UHF, GSM 900 downlink ve GSM 1800 downlink bantları için meşguliyet oranları sırasıyla yaklaşık olarak %20, %92 ve %40 olarak hesaplanmıştır (Barnes ve ark., 2013).

Almanya-Berlin'de gerçekleştirilen bir diğer çalışmada bir hafta boyunca iç ortamda UHF TV bandı (470-870 MHz) spektrum kullanımı doluluk ölçümleri ile incelenmiştir. Çalışmanın bir diğer amacı 4G (LTE) uygulamasının gelişimini gözlemlemektir. Ölçüm çok geniş bir iç ortamda gerçekleşmiş ve 5 farklı bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelere yirmi bir farklı alıcı kullanılarak ölçüm işlemi yapılmıştır. Bu bölgeler için doluluk oranı %22 ile %7 arasında değişmektedir. Ayrıca mekânsal korelasyon çalışması da yapılmıştır (Konig ve ark., 2014).

Malezya'nın Selengor bölgesinde cep telefonları ve TV yayın frekans bantlarında spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Advantest U3741 spektrum analizör, Tri-Band Dipole anten (XPO2V-880-2175/1355), Discone Anten (DA3200) ve bir bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Malezya'da dinamik spektrum erişimi için büyük fırsatların olduğu ölçüm sonuçları ile sunulmuştur. GSM 900 (880 – 960 MHz), GSM 1800 (1710 – 1880 MHz), 3G (IMT-2000) (1885 – 2200 MHz), VHF TV (174 – 230 MHz), UHF TV (470 – 798 MHz) frekans bantları için doluluk oranları sırası ile %35.31, % 9.59, % 26.08, %10.92 ve % 13.36 olarak bulunmuştur (Jayavalan ve ark., 2014).

Literatüre girmiş olan uluslararası çalışmalar Çizelge 2.1'de özetlenerek sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Farklı Ülkelerde Gerçekleştirilmiş Spektrum Doluluk Ölçümlerinin Listesi

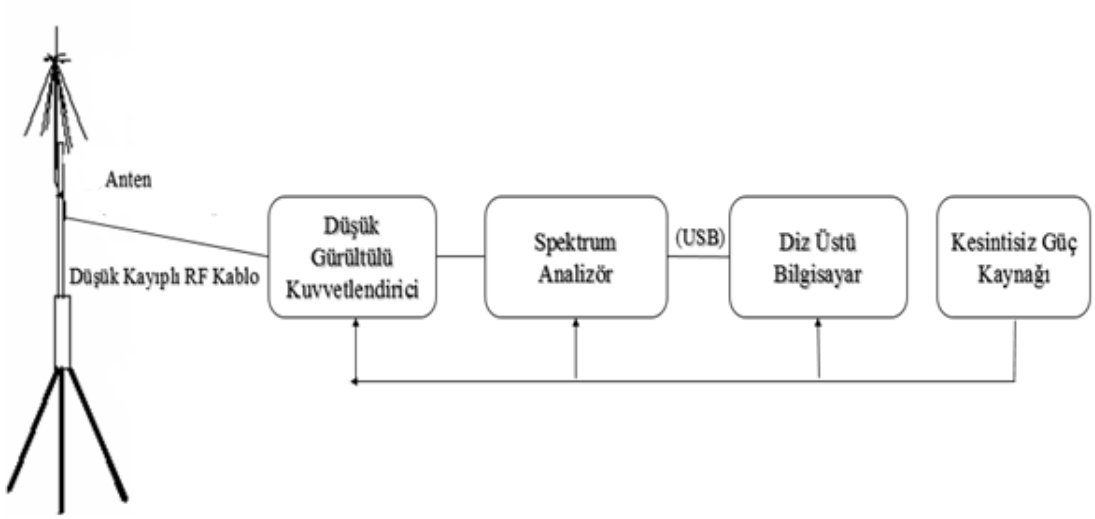
Yıl	Yazarlar	Ülke	Frekans Aralığı	Ölçüm Süresi
1998	Sanders	Amerika	108-19700 MHz	Üç Yıl
2004	Biggs ve ark.	İngiltere	2400-2483.5MHz	Yedi Gün
2005	Petrin ve Steffes	Amerika	400-7200 MHz	Birkaç Ay
2006	McHenry ve ark.	Amerika	30-3000 MHz	İki Gün
2007	Erpek ve ark.	İrlanda	30-3000 MHz	İki Gün
2007	Wellens ve ark.	Almanya	20-6000 MHz	Yedi Gün
2007	Chiang ve ark.	Yeni Zelanda	806-2750 MHz	On iki Hafta
2008	Islam ve ark.	Singapur	80-5850 MHz	On iki gün
2009	Benitez ve ark.	İspanya	75-3000 MHz	İki Gün
2009	Qaraqe ve ark.	Katar	700-3000 MHz	Üç Gün
2010	Valenta ve ark.	Fransa, Çek	400-3000 MHz	-
2010	Marţ ve ark	Romanya	25-3400 MHz	-
2010	Matinmikko ve ark.	Finlandiya	2400-2485 MHz	Beş Gün
2011	Taher ve ark.	Amerika	30-3000 MHz	Üç Yıl
2011	Patil ve ark.	Hindistan	700-2700 MHz	İki Gün
2011	Harrold ve ark.	İngiltere	300-4900 MHz	Altı Ay
2011	Vo ve ark.	Vietnam	20-3000 MHz	Dört Ay
2012	Dzulkifli ve ark.	Malezya	30-3000 MHz	Yedi Gün
2012	Mehdawi ve ark.	İngiltere	80-2700 MHz	On iki saat
2012	Liang ve ark.	Çin	20-3000 MHz	Yedi Gün
2012	Palaios ve ark.	İngiltere	75-3000 MHz	Yedi Gün
2013	Kliks ve ark.	İspanya,Polonya	75-3000 MHz	Dört Ay, Yedi Gün
2013	Xue ve ark.	Çin	440-2700 MHz	İki Gün
2013	Kagarura ve ark	Uganda	50-1100 MHz	Yedi Gün
2013	Palaios ve ark	Avrupa	110-3000 MHz	İki Gün
2013	Barnes ve ark.	Güney Afrika	470-1880 MHz	Altı Hafta
2014	Jayavalan ve ark.	Malezya	30-3000 MHz	Bir Gün
2015	Subramaniam ve ark.	Amerika	824-5800 MHZ	Birkaç Gün

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan materyallerden ve yöntemlerden bahsedilmiştir.

3.1. Materyal

Spektrum doluluk ölçümlerini gerçekleştirmek için bazı materyallerin bir araya getirilerek bir ölçüm sisteminin kurulması gerekmektedir. Ölçüm sistemi çalışılacak frekans aralığına bağlı olarak bir veya birkaç geniş bantlı anten, ölçüm bölgesinin vericilere göre mesafesine bağlı olarak ve ölçüm hassasiyetini de göz önünde bulundurarak düşük gürültülü kuvvetlendirici, güç kaybını önlemek için düşük kayıplı kablo ve bir spektrum analizörden oluşmaktadır. Spektrum analizörün kontrolü bir bilgisayar ve uygulamaya özgü olarak tasarlanan bir yazılımla sağlanmaktadır. Şekil 3.1'de ölçüm çalışması için kurulan ölçüm sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir.



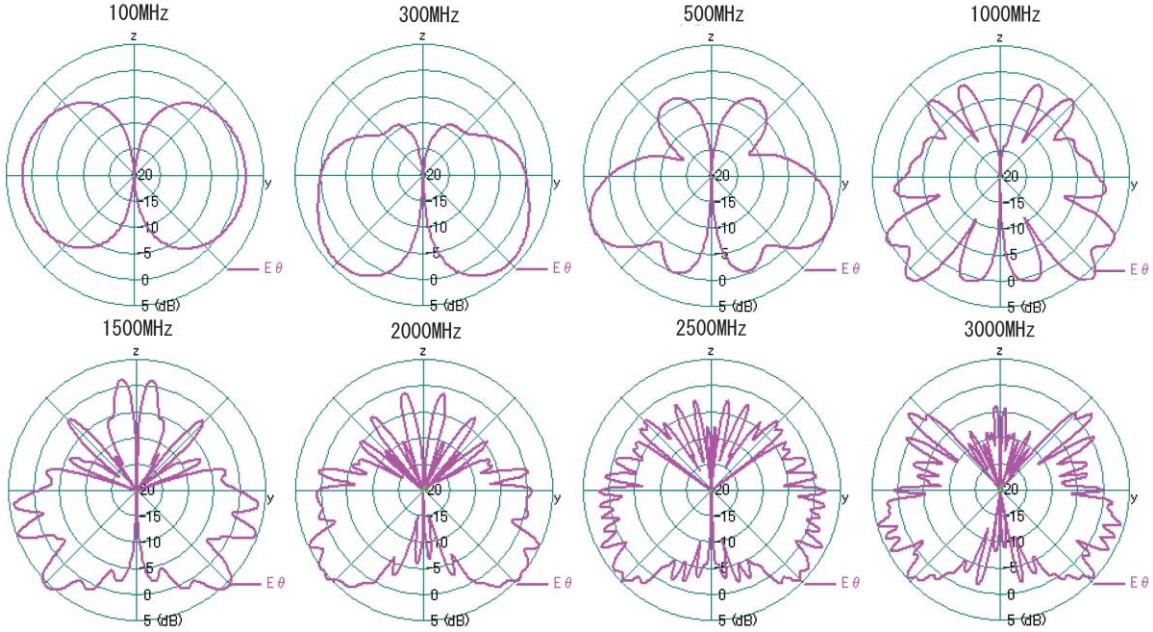
Şekil 3.1 Spektrum Doluluk Ölçüm Sistemi Blok Diyagramı

Blok diyagramda görülen materyallerin yapıları ve kullanım amaçları bundan sonraki kısımda açıklanmıştır.

3.1.1. Anten

Spektrum doluluk ölçümleri için öncelikli olarak ölçümü yapılacak frekans aralığı

belirlenmelidir. Daha sonra belirlenen frekansa uygun anten seçimi yapılmalıdır. Dünya çapında gerçekleştirilen çalışmalarda yönsüz ve ultra geniş bant özelliğine sahip antenler ön plana çıkmıştır. Ancak gerçekleştirilen bazı çalışmalarda yönlü antenler de tercih edilmiştir. Burada gerçekleştirilen ölçüm çalışmasında AOR firmasının ürettiği discone anten özelliği gösteren yönsüz DA3200 modeli kullanılmıştır. 25-3000 MHz frekans bant aralığında çalışan anten on altı elemanı monte edilerek kullanılmaktadır. Anten dikey polarizasyonlu olup, yatay düzlemde yönsüz alıcı özelliği göstermektedir. Antenin frekansa bağlı dikey ışıma deseni Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 AOR DA3200 Model Discone Antenin Dikey Işıma Deseni (http://www.aorja.com/)

Seçilen anten, spektrumun gözlemlenmesi için tasarlanmış olup, hafif olması nedeniyle (yaklaşık 1 kg) oldukça kullanışlıdır. 1.12 m uzunluğa sahip olan anten 3dBi (100-3000 MHz) kazanca sahiptir. Antenin genel görüntüsü Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3 AOR DA3200 Anten (http://www.aorja.com/)

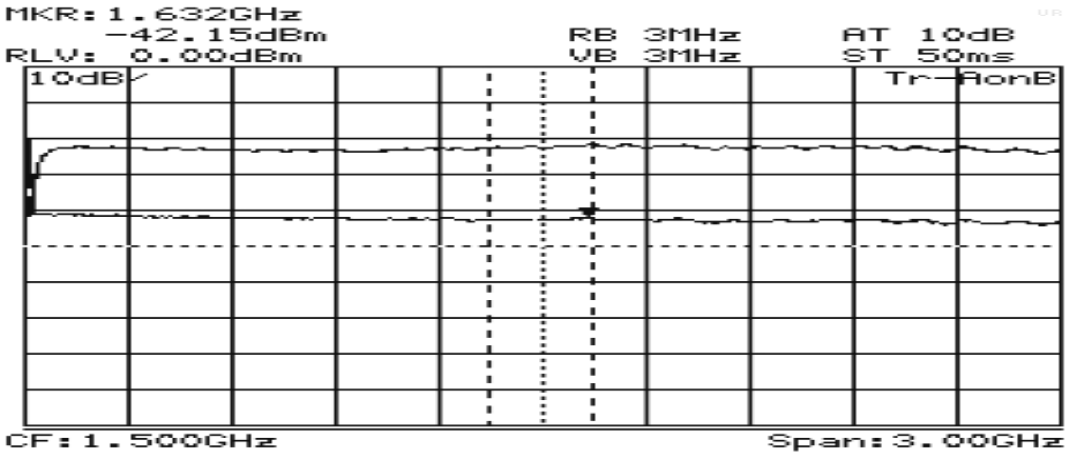
3.1.2. Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici

Ölçüm işlemlerinin hassas gerçekleştirilebilmesi ve zayıf sinyallerin de elde edilebilmesi için spektrum doluluk ölçümlerinde düşük gürültülü kuvvetlendiriciler kullanılmaktadır. Özellikle vericilere uzak olan bölgelerde ve düşük güce sahip sinyallerin elde edilmesinde, ölçümün kalitesini artırarak araştırmacıların spektrum hakkında net bir fikir elde etmesinde son derecede önemlidir. Çalışmalarda genellikle spektrum analizörün içine monte edilmiş ön kuvvetlendiriciler kullanılıyor iken, mevcut olmayan spektrum analizörler için dışarıdan ilave edilerek ölçüm yapılmaktadır. Yapılan çalışmada ölçüm sistemine dışarıdan AOR markasının LN 4000 model düşük gürültülü (LNA) kuvvetlendiricisi dahil edilmiştir. Cihaz 100-3000 MHz geniş frekans bant aralığı ve düşük gürültü özelliğine sahiptir. Gürültü sinyallerini kuvvetlendirmeden, sinyalleri tipik olarak 20 dB'e kadar kuvvetlendirebilmektedir. 5-12 V DC çalışma gerilimine ihtiyaç duyan cihaz 15 gram ağırlığı ile de oldukça kullanışlı olup Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 AOR LN4000 Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici (http://www.aorusa.com/)

Şekil 3.5'te cihazın kazanç eğrisi görülmektedir. Şeklin üst kısmında kuvvetlendirici aktif iken yapılan alt kısmında ise kuvvetlendirici olmadan yapılan ölçüm görülmektedir.



Şekil 3.5 AOR LN4000 Kazanç Eğrisi (http://www.aorusa.com/)

3.1.3. Spektrum Analizör

Spektrum analizör seçimi, spektrum doluluk ölçümleri için son derece önemlidir. Spektrum analizörden yüksek doğruluklu, hafif ve istenilen frekans aralığını hassas bir şekilde ölçmesi beklenir. Literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla taşınabilir yüksek doğruluklu spektrum analizörler tercih edilmiştir.

Üç farklı konumda gerçekleştirilen ölçümlerde Rigol DSA 1030 spektrum analizör kullanılmıştır. Cihaz 9 kHz ile 3 GHz frekans aralığındaki sinyallerin incelenmesi amacıyla üretilmiştir. -138 dBm'e kadar Görüntülenen Ortalama Gürültü Seviyesi (DANL) özelliğine sahip olması, spektrum doluluk ölçümleri için kullanılabilirliğini göstermektedir. Ölçümler için önemli bir faktör de minimum

çözünürlük bant genişliğidir. 100 Hz'e kadar çözünürlük imkânı sunan cihaz, ayrıca tamamen dijital orta frekansa (intermediate frequency) sahip şekilde üretilmiştir. Doğruluk bağlamında cihaz 1.5 dB'e kadar doğru ölçüm sonuçlarını garanti etmektedir. 1 GB dahili hafızaya sahip olan cihaz; USB, LAN ve GPIB gibi bağlantı ara yüzlerine de sahiptir. Şekil 3.6'da ölçüm çalışmalarında kullanılan spektrum analizör gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Rigol DSA 1030 Spektrum Analizör (http://www.rigolna.com/)

3.1.4. Diğer Materyaller

Kurulan ölçüm sisteminin kontrolü bir diz üstü bilgisayar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Kontrol işlemi için MATLAB programı kullanılarak, ölçüm çalışma parametrelerine uygun bir program yazılmıştır. Diz üstü bilgisayar ile spektrum analizör arasında USB bağlantı kurularak spektrum analizör kontrol edilmiştir. Anten ile kuvvetlendirici arasındaki bağlantı, düşük kayıplı 5D-2V koaksiyel kablo vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca spektrum analizör ve kuvvetlendirici gibi cihazların bağlantıları için uygun ara parçaları (SMA veya BNC) kullanılmıştır. 24 saatlik spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirildiği için anlık elektrik kesintilerine karşı ölçümün aksamaması ve bu süre boyunca spektrumun net bir şekilde gözlemlenebilmesi için kesintisiz güç kaynağı da kullanılmıştır. Tüm materyaller kesintisiz güç kaynağından beslenerek güç bakımından sorunsuz ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca elde edilen

verilerin analiz aşamasında ölçüm sistemine özgü programlar MATLAB ortamında yazılarak kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Bu bölümde spektrum doluluk ölçümlerinin gerçekleştirilmesi ve analizi için kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

3.2.1. Spektrum Algılama Yöntemleri

Bilişsel radyo sistemleri için spektrum algılama çok önemli bir konudur. Dolayısıyla spektrum doluluk ölçümlerinde de spektrum algılama yöntemleri kullanılarak mevcut spektrumdaki lisanslı kullanıcıların varlığı tespit edilebilmektedir. Tespit edilen lisanslı kullanıcılar, bu algılama yöntemleri vasıtasıyla, lisanssız kullanıcılar tarafından spektrum kullanımını olumsuz yönde etkileyecek herhangi bir girişim ve gürültü gibi durumlardan etkilenmemiş olacaktır. Spektrumda mevcut yayınların ve kullanıcıların varlığının tespiti için literatürde birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler arasında enerji algılama ve özdeğer tabanlı algılama alınan sinyalle ilgili ön bilgi gerektirmez, sadece alınan sinyalin güç örnekleri üzerinden spektrumu değerlendirir. Uyumlu filtre algılama, çevrimsel-durağan öznitelik algılama, dalga oluşum tabanlı algılama ve radyo tanıma tabanlı algılama yöntemlerinde ise yayılan sinyalin kendine özgü özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir (Gavrilovska ve Atanasovski, 2011). Bundan sonraki bölümlerde literatürde mevcut olan algılama yöntemleri sunulmuştur.

3.2.1.1. Enerji Algılama (Energy Detection)

Enerji algılama yöntemi verici hakkında önceden herhangi bir bilgi sahibi olunmadan spektrumun algılanmasına imkân tanıyan bir yöntemdir. En yaygın kullanılan yöntem olan enerji algılama yöntemi basit hesaplama ve uygulama karmaşıklığının azlığından dolayı tercih edilmektedir. Sinyalin varlığının tespiti, gürültü zeminine bağlı eşik değeri enerji algılayıcısının çıkışı ile karşılaştırılarak elde edilir. Bu yöntem için en önemli nokta, eşik değerinin doğru bir şekilde belirlenmesidir. Bu algılama yönteminin dezavantajları ise yayılı spektrum sinyallerini ayırt edememesi ve gürültü değerlerine

bağlı olmasıdır (Yücek ve Arslan, 2009). Enerji algılama yönteminde sinyal modeli şu şekildedir.

$$r(n)=s(n)+g(n) \tag{3.1}$$

Burada *s(n)* lisanslı sinyali, *g(n)* ise gürültüyü ve *n* ise örnek katsayısını temsil etmektedir. Binary hipotezinde eğer sinyal eşik değerinin altında ise H_0 modeli, üstünde ise H_1 modeli geçerlidir.

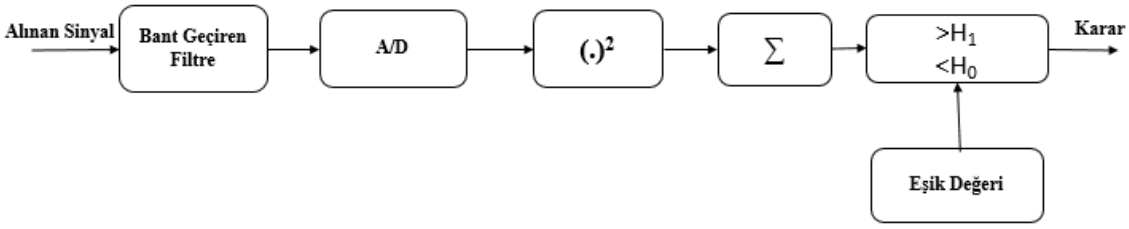
$$H_0: y(n)= g(n) \tag{3.2}$$

$$H_1: y(n)=s(n) + g(n) \tag{3.3}$$

Alınan sinyalin enerjisi En ise şu şekilde ifade edilir.

$$En = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} |y[n]|^2 \tag{3.4}$$

Eşitlik (3.4)'deki N değeri alınan sinyal örneklerinin sayısını göstermektedir. Dijital olarak enerji algılama blok diyagramı Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Dijital Enerji Algılama (Atapattu ve ark., 2014)

Eğer spektrum kullanımını algılamak için sadece güç ölçüm işlemi gerçekleştiriliyorsa kullanabilecek olan tek algılama yöntemi enerji algılama yöntemi olmaktadır. Literatürdeki spektrum doluluk ölçümlerinde ve burada gerçekleştirilen çalışmada enerji algılama yöntemi kullanılmıştır. Enerji algılama yönteminde, alınan sinyalin enerjisi belirli frekans bandı için önceden belirlenmiş olan bir eşik değeri ile karşılaştırılır. Sinyalin değeri eşik değerinin üzerinde ise spektrumun o bandı dolu olarak değerlendirilir. Eşik değerinin altında olan sinyaller ise boş olarak belirtilir. Eşik değeri belirleme işlemi ham verilerin işlenip doluluk ölçüm istatistiğini elde etmede son derece

önemlidir. Yüksek bir eşik değeri belirlendiğinde mevcut spektrumun durumu eksik bir şekilde ortaya konur ve lisanslı sinyaller gürültü olarak algılanabilir. Diğer yandan, eşik değeri düşük belirlendiğinde, gürültü işaretleri lisanslı işaret olarak algılanarak spektrumun gerçek dışı yüksek doluluk oranına sahip olmasına sebep olabilir. Eşik değeri belirlemede gürültü ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Spektrum analizöre bağlı olan anten çıkartılarak yerine 50Ω'luk uyumlu yük bağlanır ve gürültü ölçülür. Elde edilen gürültü değerleri kullanılarak eşik değeri belirlenir. Eşik değeri belirlemede maksimum gürültü kriteri, m-dB kriteri ve PFA%1 kriteri kullanılmaktadır.

Maksimum gürültü kriterinde ölçülen her bir frekans bandı için gürültü ölçümü yapılarak bantların maksimum gürültü değeri elde edilir ve eşik değeri buna göre belirlenir. Maksimum gürültü kriterinde eşik değeri belirleme aşağıda gösterilmektedir.

$$Eşik\ değeri\ E(f) = G_m(f) \tag{3.5}$$

Burada, $E(f)$ mevcut frekans değerindeki eşik değerini gösterirken, $G_m(f)$ mevcut frekanstaki maksimum gürültü değerini göstermektedir. Ancak bu yöntemde gürültü değerinin maksimum değerinin alınmasından dolayı zayıf sinyallerin gürültü değerinin altında kalma olasılığından bu yöntem fazla tercih edilmemektedir.

m-dB kriterinde ise ölçüm yapılan bölgedeki gürültü değerleri belirlenerek her frekans aralığı için gürültü değerlerinin ortalaması alınır. Ortalama değerin üzerine m-dB değeri eklenerek eşik değeri belirlenir.

$$Eşik\ değeri\ E(f) = G_{ort}(f) + m \tag{3.6}$$

Burada, E(f) mevcut frekans değerindeki eşik değerini gösterirken $G_{ort}\ (f)$ belirli frekans aralığındaki ortalama gürültü değeridir. m değeri ise ortalama gürültü gücüne ilave edilen dB cinsinden güç miktarını göstermektedir. Literatürdeki çalışmanın birçoğu bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından 10 dB olarak kullanılabilirliği belirtilen m değeri dünya çapında yapılan çalışmalarda 3-7 dB değerleri arasında değişiklik gösterebilmektedir. Bu yöntemde de sabit eşik değerinden dolayı doluluk ölçümlerinde az değer biçme (underestimation) ya da fazla değer biçme (overestimation) olabileceği düşünülmüştür.

Bu sebeplerden dolayı "PFA%1 yanlış alarm olasılığı kriteri" fikri sunulmuştur. Bilişsel radyo bağlamında PFA gerçekte boş olan bir frekans bandının lisanslı bir

kullanıcı tarafından meşgul edilmiş gibi algılanmasıdır. Bu yöntemde gürültü örneklerinin *X(f)* ampirik dağılımı hesaplanır ve ölçülen gürültü örneklerinin %1'inden fazla olmayacak şekilde eşik değeri belirlenir.

$$Eşik\ değeri\ E(f) = F^{-1}_{X(f)}\left(1 - P_{fa}\right) \tag{3.7}$$

Burada $F^{-1}_{X(f)}(.)$; $F_{X(f)}(.)$ in tersini temsil etmektedir. $F_{X(f)}(.)$ ise $X(f)$ gürültü değerlerinin kümülatif dağılım fonksiyonunu göstermektedir (López-Benítez ve Casadevall, 2010).
Bir X rasgele değişkeninin olasılık dağılımı çoğunlukla kümülatif dağılım fonksiyonu yada kısaca dağılım fonksiyonu ile tanımlanır. X kesikli rasgele bir değişken ise; dağılım fonksiyonu;

$$\mathrm{F}(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x}^{n} P(X = x_i) \tag{3.8}$$

olarak hesap edilir. Burada gerçekleştirilen çalışmada PFA%1 yöntemi kullanılmıştır.

3.2.1.2. Öz Değer Tabanlı Algılama (Eigenvalue Detection)

Öz değer tabanlı algılama yöntemi de sinyal hakkında ön bilgi gerektirmeyen yöntemlerdendir. Gürültü seviyesi ve sinyal gürültü oranı bilgisi de gerektirmeyen yöntem, lisanslı sinyalin varlığını farklı antenlerden alınan örnekler arasındaki kovaryans matrisi üretilerek ya da tek bir antenden elde edilen sinyalin oto korelasyonu hesaplanarak bir kovaryans matrisinin hesaplanmasına dayanır. Bu algılama yöntemi gürültü belirsizliklerinin önüne geçmesine rağmen, yüksek hesaplama karmaşasına sahip olmasından ve korelasyonsuz sinyallerde algılama güçlüğünden dolayı spektrum doluluk ölçümlerinde tercih edilmemiştir (Gavrilovska ve Atanasovski, 2011).

3.2.1.3. Uyumlu Filtre Algılama (Matched Filter Detection)

Uyumlu filtre algılama haberleşme sistemleri için uygulanabilecek optimum özellikleri barındıran yöntemdir. Bu yöntemin temel avantajı kısa zaman içinde sinyalin yanlış alarm olasılığını belirleme özelliğine sahip olmasıdır. Ancak bu yöntem, spektrumda mevcut olan sinyalin bilgilerinin önceden bilinmesini gerektirmektedir. Yani

lisanslı kullanıcı sinyallerinin çalışma frekansı, bant genişliği, modülasyon tipi ve darbe şekli gibi bilgileri kendinde barındırması gerekmektedir (Yücek ve Arslan, 2009). Ayrıca, yüksek güç tüketimi ve çeşitli algoritmaların kullanımını gerektiren bu algılama yöntemi, literatürdeki spektrum doluluk ölçümlerinde kullanılmamıştır. Devam eden bilişsel radyo çalışmalarında kullanılabilirliği üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

3.2.1.4. Çevrimsel-durağan öznitelik algılama (Cyclostationary Feature Detection)

Çevrimsel durağan algılama, zaman fonksiyonuna bağlı periyodik olarak değişen ortalama değer, oto korelasyon gibi istatistiksel özellikler kullanılarak spektrumda iletilen sinyallerin tespitinde kullanılmaktadır. Bu algılamada sinyalin tespitinde güç spektral yoğunluğu yerine çevrimsel korelasyon formülü kullanılır. Çevrimsellik modülasyon ya da kodlama kullanılarak üretilmektedir. İletilen sinyallerin kendine özgü özelliklerinin önceden bilinmesini gerektirmesi ve hesaplama karmaşıklığı içermesi tekniğin genel dezavantajları arasındadır (Gavrilovska ve Atanasovski, 2011).

3.2.1.5. Dalga oluşum tabanlı algılama (Waveform-based Sensing)

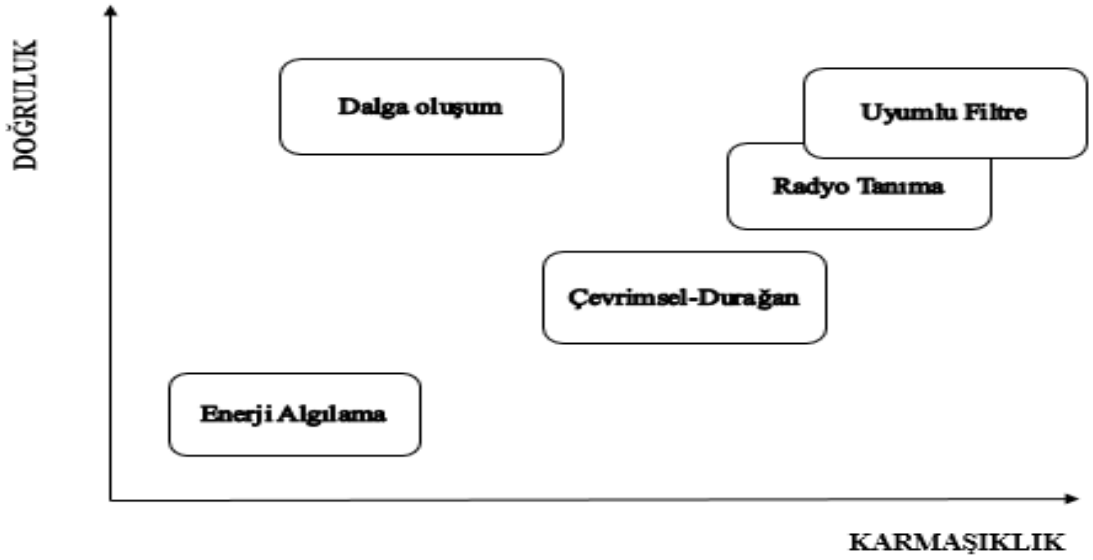
Bu algılama yönteminde, alınan sinyalin senkronizasyon bilgilerinin önceden bilinmesine dayalı olarak sinyalin tespitine olanak sağlamaktadır. Bilinen bir modelin varlığında sinyalin algılanması; bilinen kopya ile alınan sinyalin korelasyonuna bakılarak gerçekleştirilir. Enerji algılama yöntemine göre daha güvenilir sonuçlar verebilmesine rağmen, sinyalin senkronizasyon özelliklerinin önceden bilinmesi ihtiyacı ve senkronizasyon hatalarına karşı hassas olması temel dezavantajlarındandır (Yücek ve Arslan, 2009). Bu yöntem doluluk ölçümlerinde şu ana kadar kullanılmamıştır.

3.2.1.6. Radyo tanıma tabanlı algılama (Radio identification-based Sensing)

Lisanslı kullanıcılar tarafından kullanılan iletim teknolojileri belirlenerek spektrum karakteristikleri hakkındaki tüm bilgilerin elde edilebileceği algılama yöntemlerindendir. Ancak bu yöntem, diğer algılama yöntemleri birleştirilerek elde edilen bir algılama yöntemidir. Farklı algılama türlerinin bir arada kullanılması, karmaşıklığı ve hesaplama zorluğu bu yöntemin dezavantajlarındandır.

3.2.2. Spektrum Algılama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Spektrum algılama yöntemleri, verici algılama kabiliyetlerine göre sınıflandırılmaktadır. Özellikle spektrumu belirleyebilme olasılığı ve yanlış alarm olasılığı spektrum algılamanın kalitesini gösterir. Algılama karşılaştırmalarında diğer kullanılan parametreler ise algılama süresi, sinyal gürültü oranı, sinyal hakkında ön bilgi, donanım ve yazılım karmaşıklığı, lisanslı sinyallerin dalga formunun karmaşıklığı ve enerji tüketimi gibi başlıklardır (Gavrilovska ve Atanasovski, 2011). Şekil 3.7'de spektrum algılama yöntemlerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Spektrum Algılama Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Yücek ve Arslan, 2009)

Şekil 3.8'deki spektrum algılama yöntemlerinin dağılımına bakıldığında en düşük doğruluğa sahip olmasına rağmen en az karmaşıklığı da sunan enerji algılama yöntemi; spektrum doluluk ölçümlerinde ölçüm sistemine uygunluğu ve analiz işlemlerini kolaylaştırması bakımından tercih edilmektedir.

4. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Spektrum doluluk ölçüm çalışmaları 1 Ekim 2015 tarihinde başlamış olup Konya'nın üç farklı bölgesinde (Selçuklu, Karatay, Meram) gerçekleştirilmiştir. 14 Mart 2016 tarihinde Meram ilçesinde son ölçümler gerçekleştirilerek çalışma sonlandırılmıştır. Spektrum doluluk ölçümlerinde üç farklı bölgede de Çizelge 4.1'de gösterilen aynı spektrum analizör parametreleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Spektrum Analizör Yapılandırma Parametreleri

Parametre	**Değer**
Frekans aralığı	100 MHz
Çözünürlük bant genişliği	10 kHz
Video bant genişliği	10 kHz
Referans seviyesi	-10 dBm
Skala	10 dB/div
Dedektör tipi	RMS dedektör
Tarama zamanı	Otomatik

Ölçüm çalışması boyunca 25-3000 MHz frekans bant aralığı otuz alt banda bölünmüştür. Alt bantlara ayrılmış her 100 MHz kendi içerisinde 502 frekans noktasına bölünmüştür. Art arda gelen iki frekans noktası aralığı 199,6 kHz'dir. Bunun sebebi ölçümün gerçekleştiği frekans aralığındaki vericilerin bant genişliğinin 200 kHz ve üstünde olmasıdır. Eğer spektrumda mevcut olan sinyalin bant genişliği seçilen frekans noktası aralığından küçük olursa spektrumun doluluğu olması gerekenden yüksek çıkar ve yanlış değerlendirmelere sebep olur. Diğer durumda yani sinyalin bant genişliğinden küçük olması durumunda ise makul karşılanabilir (López-Benítez ve Casadevall, 2010). Spektrum doluluk ölçümlerinde spektrum doluluğunu gösteren parametre doluluk–boşluk oranı değeri ile ifade edilir. Doluluk-boşluk oranı hesaplanması EK-1 de gösterilmiştir. Ölçümlerin değerlendirilmesi adına mevcut spektrumda ne tür yayınların bulunduğu BTK tarafından belirlenen milli frekans spektrum çizelgesinin bulunduğu internet sitesinden elde edilmiştir (https://ifis.btk.gov.tr/wmfys/millifrekanssorgu.aspx). Ölçümlerden elde edilen sonuçlar üç farklı grafikle sunulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmada gün sayısına göre ortalama değerleri gösteren bu grafikler;

a) Spektral güç yoğunluğunu,

b) Hangi zaman aralığında spektrumun dolu veya boş olduğunu,

c) Hangi frekans değerinin eşik değerini ortalama ne sıklıkta aştığını (ortalama duty cycle) gösteren grafiklerdir.

4.1. Selçuklu İlçesi (Üniversite) Ölçümleri ve Sonuçları

Spektrum doluluk ölçümleri 1 Ekim 2015 tarihinde Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Binasının çatısına ölçüm düzeneği kurularak (Şekil 4.1.a) gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Ölçümün gerçekleştiği bölge Şekil 4.1.b de gösterilmektedir.



a)



b)

Şekil 4.1 a) Çatıda ölçüm düzeneği ve b) Selçuklu İlçesi (Üniversite) Ölçüm Noktası (https://www.google.com.tr/maps/)

Bölgedeki en yüksek ve çeşitli vericilere doğrudan görüş açısına sahip olan bu binada ölçümün yapılması uygun görülmüştür. Şehir merkezine yaklaşık 25 km uzakta olan bölge çeşitli vericiler için (TV, Radyo) düşük güç seviyelerine sahiptir. Dolayısıyla gerçekleştirilen ölçümün amacı spektrumdaki aktivitelerin tespiti olduğundan, bu ölçüm bölgesinde düşük gürültülü kuvvetlendirici kullanılarak mevcut sinyallerin varlığı sezilebilmiştir. Altı ay süren çalışmanın bu ilk bölümünde ölçüm adına birçok ders çıkarılmıştır. Ölçüm sonuçları spektrum analizöre bağlı olan bir hard diske kaydedildiğinden, 24 saatlik ölçüm için spektrum analizörün formatına uygun disk formatının gerekliliği ölçüm esnasında anlaşılmıştır. Bu sebepten yaklaşık yetmiş gün süren bu bölgedeki ölçümlerde veri kayıpları yaşanmıştır. Ayrıca şimşek ve yıldırımın mevcut olduğu yağışlı günlerde voltaj dalgalanması gibi etkilerden dolayı enerji kesilmesi, hatta kullanılan kuvvetlendiricinin yanması gibi olaylarla karşılaşılmıştır. Bu gibi olayların yaşanması sonucu ölçüm düzeneğine kesintisiz güç kaynağı ilave edilmiştir. Bu sebeplerden ve çeşitli diğer aksaklıklardan bu bölgeden elde edilen veriler otuz yedi günlüktür. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bu gün sayısının bir bölgenin spektrum kullanımının tespiti adına oldukça fazla olduğu görülecektir. Bazı frekans bantları için Selçuklu ilçesinde hesaplanan eşik değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Bazı Frekans Bantlarının Selçuklu İlçesi İçin Hesaplanan Eşik Değerleri

Frekans Bantları	Değer
FM Radyo (88-108 MHz)	-95 dBm
VHF TV (174-216 MHz)	-94.9 dBm
UHF TV (470-790 MHz)	-93.7 dBm
GSM 900 (890-960 MHz)	-93.4 dBm
GSM 1800 (1800-1820 MHz)	-91.8 dBm
UMTS (2110-2170 MHz)	-90.3 dBm
ISM (2400-2480 MHz)	-90 dBm

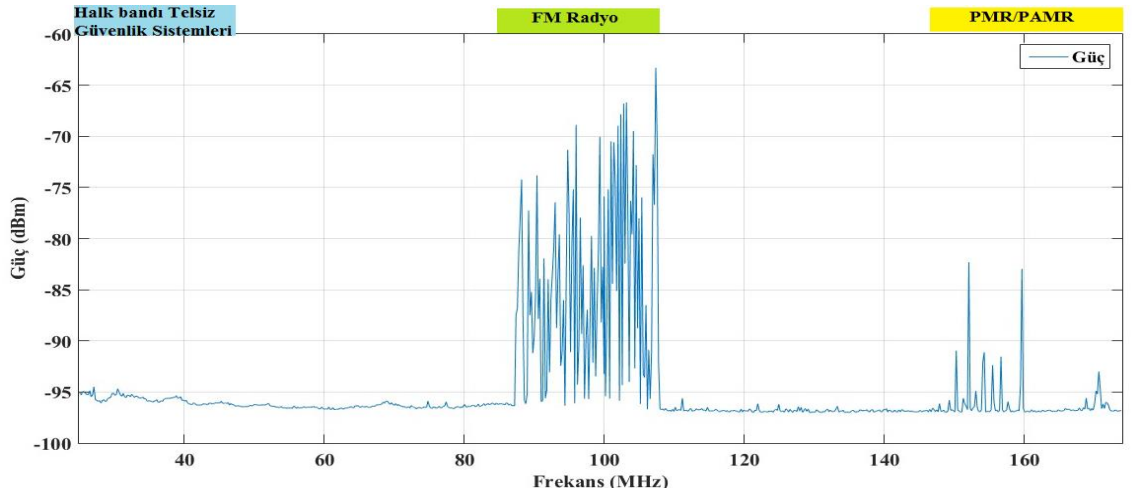
Şekil 4.2'de 25-174 MHz frekans bant aralığında yapılan çalışma boyunca spektrumun durumu gösterilmiştir. Bu frekans aralığında birçok uygulama söz konusudur. Bunlardan bazıları güvenlik sistemleri, noktadan çok noktaya link, radyoastronomi, halk bandı telsiz, taktik radyo link, amatör radyo, hava seyrüsefer, FM radyo, hava yer hava haberleşmeleri, özel mobil radyo ve özel erişim mobil radyo uygulamalarıdır. Özellikle FM radyo ve özel erişim radyo uygulamalarının bulunduğu frekans bantları ölçüm süresi boyunca sürekli doluluk göstermiştir. Bazı günler halk bandı telsiz, amatör yayınlar, hava seyrüsefer ve hava yer hava haberleşmesi için ayrılan bantlarda doluluklar tespit edilmiştir. Spektrumun çalışılan süre boyunca ortalama duty

cycle değeri %14.87 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.2.b'den de görüleceği üzere ölçüm periyodu boyunca 24 saatlik sürede sürekli doluluk gösteren frekans değerleri görülmektedir.

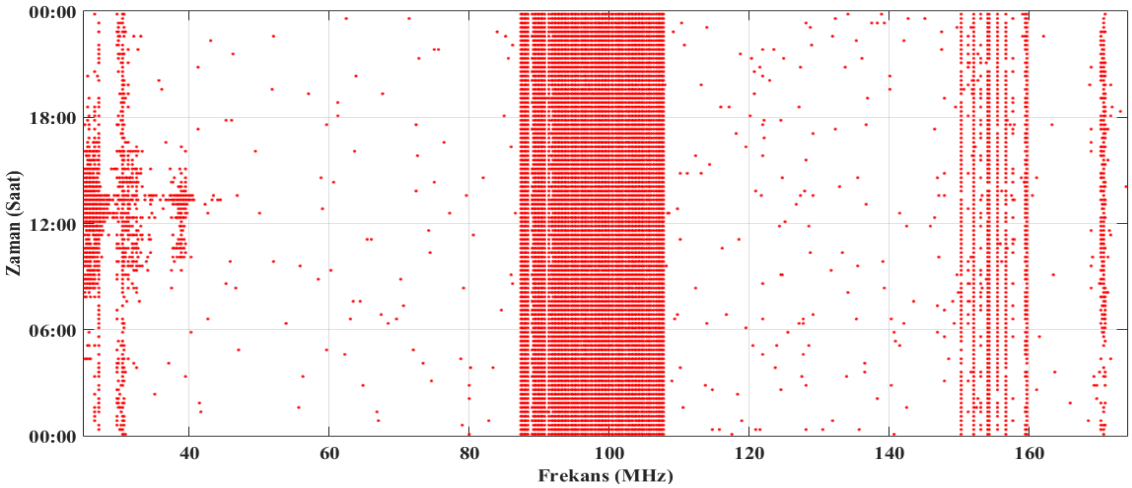
VHF TV bandı, sabit link, kara mobil ve sayısal radyo yayını için tahsis edilmiş olan spektrumun 174-230 MHz'lik bölümü sonuçları Şekil 4.3'te sunulmuştur. Türkiye'de henüz sayısal radyo yayıncılığına geçilmediği için bu frekans aralığında herhangi bir yayın tespit edilememiştir (223-230 MHz). Frekans bant aralığındaki doluluğun varlığı analog TV yayınından kaynaklanmaktadır. Bu frekans bandı için ortalama doluluk oranı %5.01 olarak tespit edilmiştir. Sayısal yayına geçilmesi ile bu bandın daha fazla doluluk oranı göstereceği tahmin edilmektedir.

Şekil 4.4'te spektrumun 230-470 MHz frekans bandı için gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Hava yer hava haberleşmesi, hava seyrüsefer, taktik radyolink, radar, özel mobil radyo ve özel erişim mobil radyo ve doğrudan mod operasyonu (DMO) bu frekans aralığında çalışması tespit edilen uygulamalardır. Spektrumun bu bölümü oldukça atıl olarak kullanılmaktadır ve spektrum doluluk oranı %1.09 olarak hesaplanmıştır. Bu da bu frekans aralığının neredeyse hiç kullanılmadığını göstermektedir.

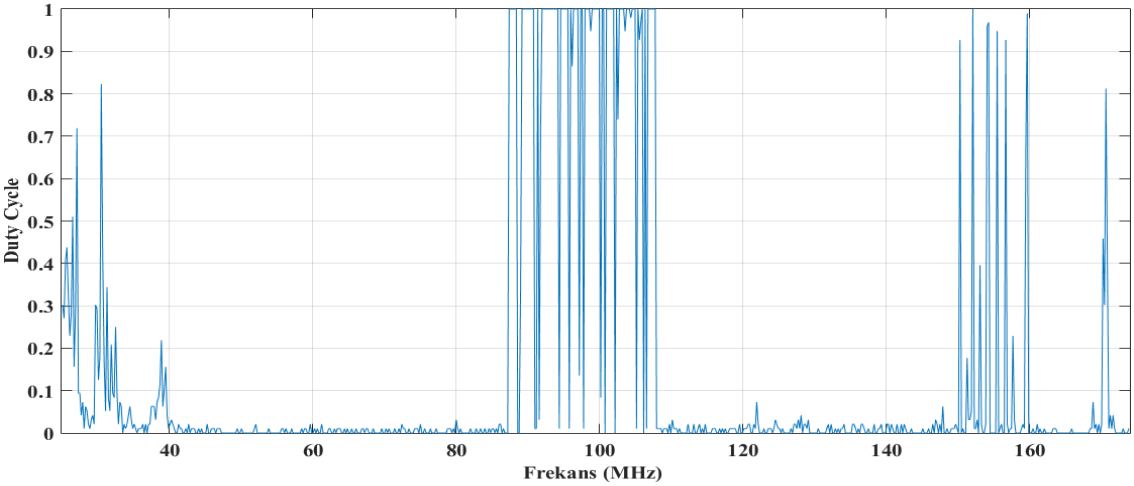
UHF TV bandı bilişsel radyo bakımından oldukça önem taşımaktadır. Karasal analog TV yayınına göre 6-8 kat daha az spektrum kullanımı talep eden sayısal TV yayıncılığı birçok ülkede kullanılmaya başlanmıştır. Bu ülkelerde karasal TV bantlarının boşalttığı spektrumun bilişsel radyo uygulamaları için kullanılması planlanmaktadır. Hatta kırsal kesimlerde yani analog TV bandının kullanılmadığı bölgelerde IEEE tarafından WRAN standardı belirlenerek yürürlüğe konmuştur. Spektrumun 470-790 MHz bant aralığı için ölçüm çalışmalarından elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu frekans bant aralığı için elde edilen doluluk oranı %4.95 olarak bulunmuştur. Bu değer oldukça düşüktür. Ayrıca Türkiye'nin yakında sayısal TV uygulamasına geçeceği de düşünülürse bilişsel radyo uygulamaları için oldukça geniş frekans bant aralığı söz konusu olabilecektir.



a)

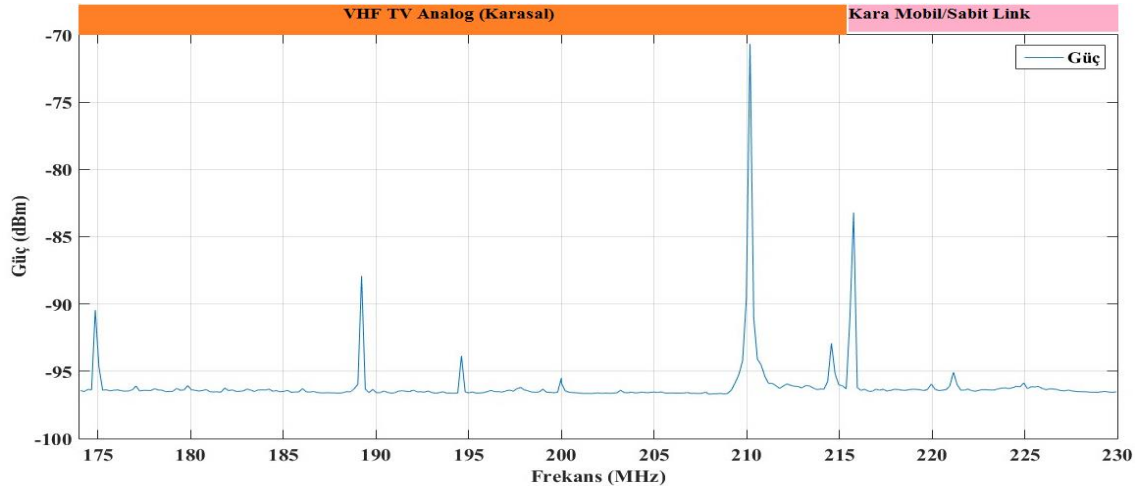


b)

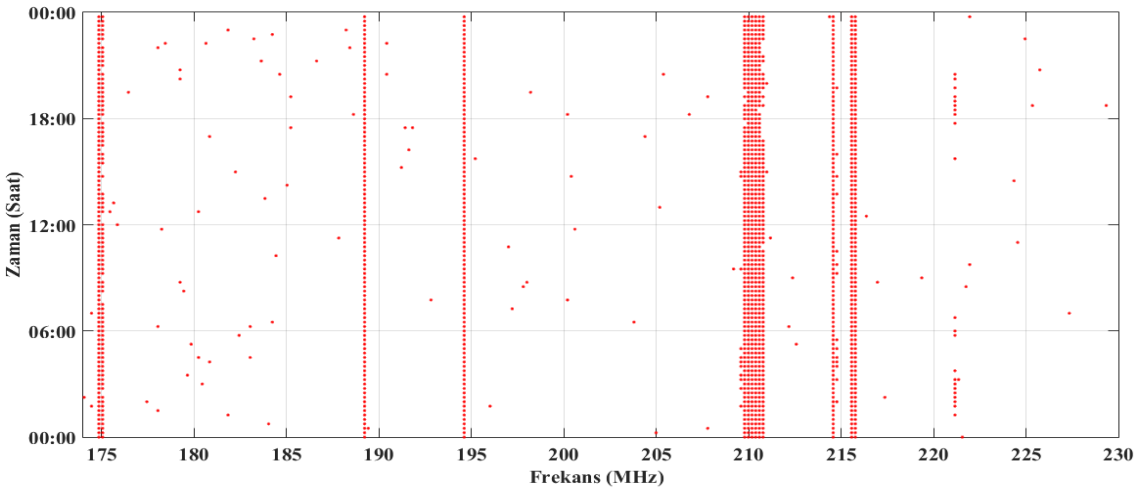


c)

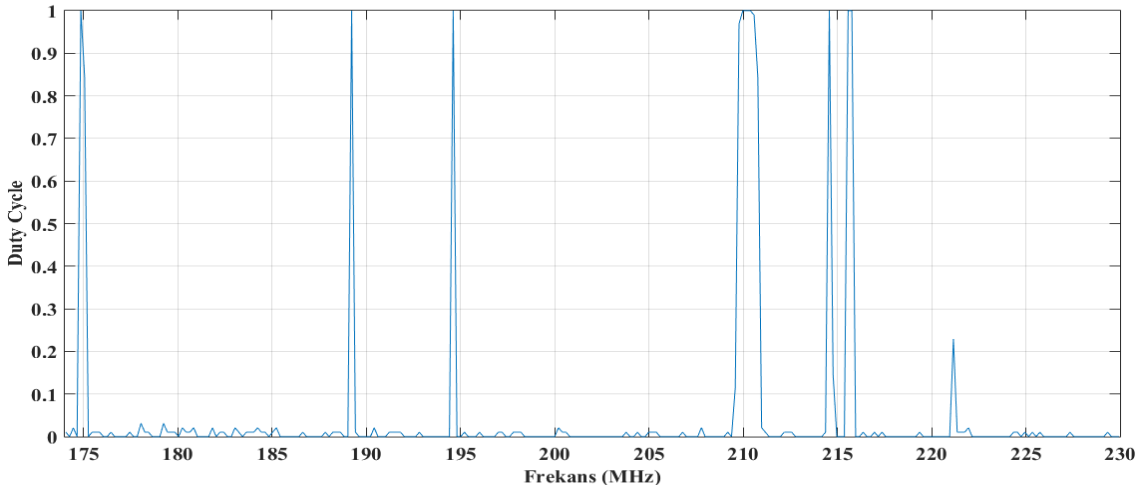
Şekil 4.2 25-174 MHz Frekans Aralığı



a)

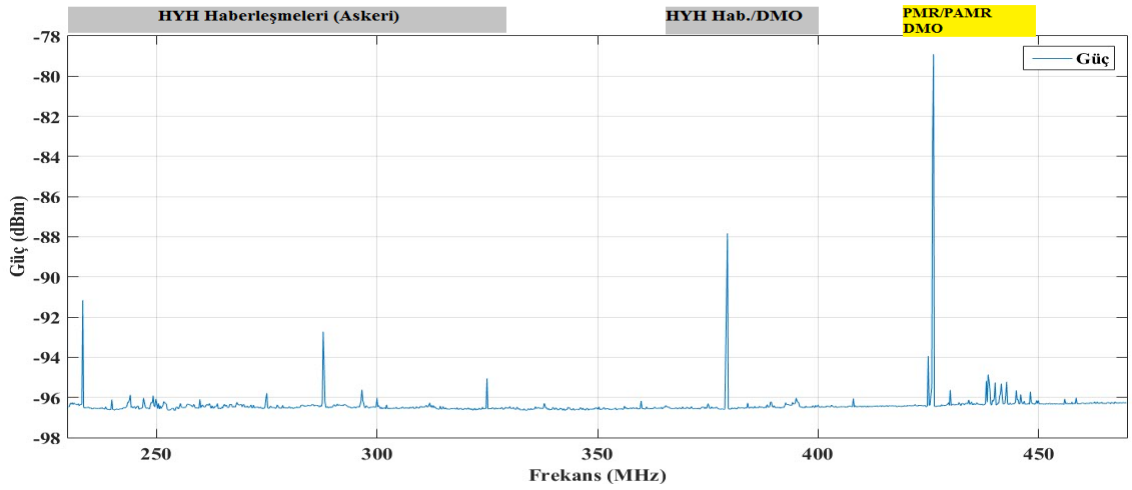


b)

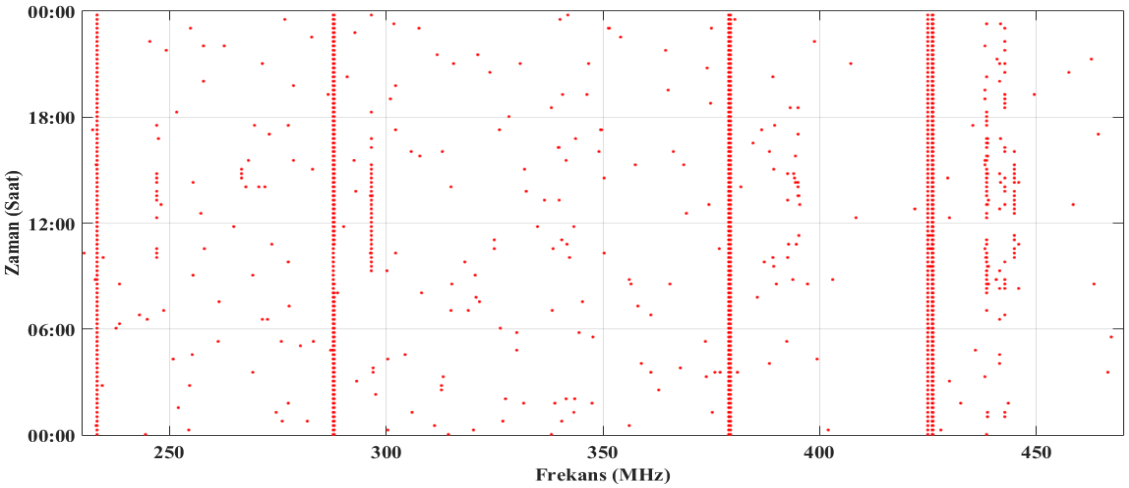


c)

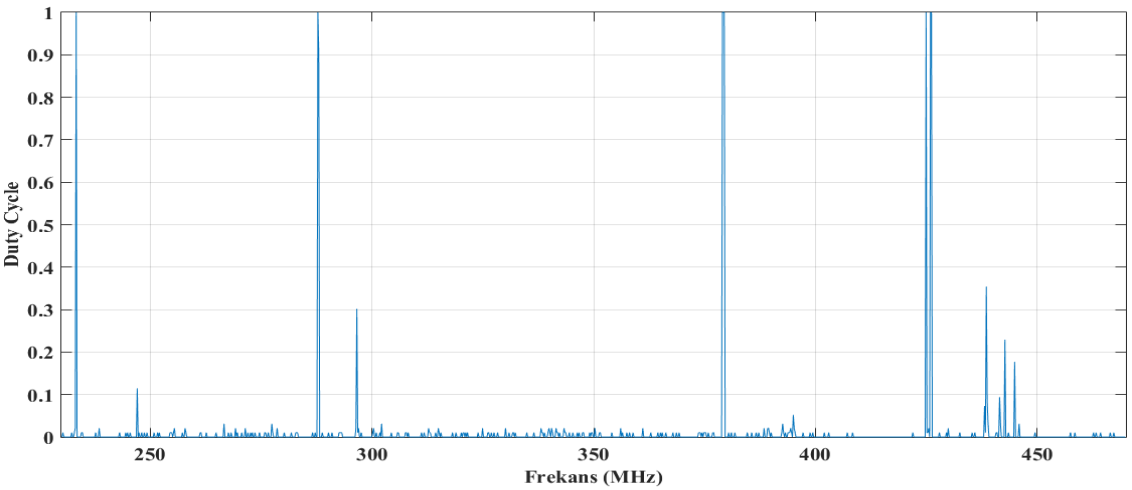
Şekil 4.3 174-230 MHz Frekans Aralığı



a)

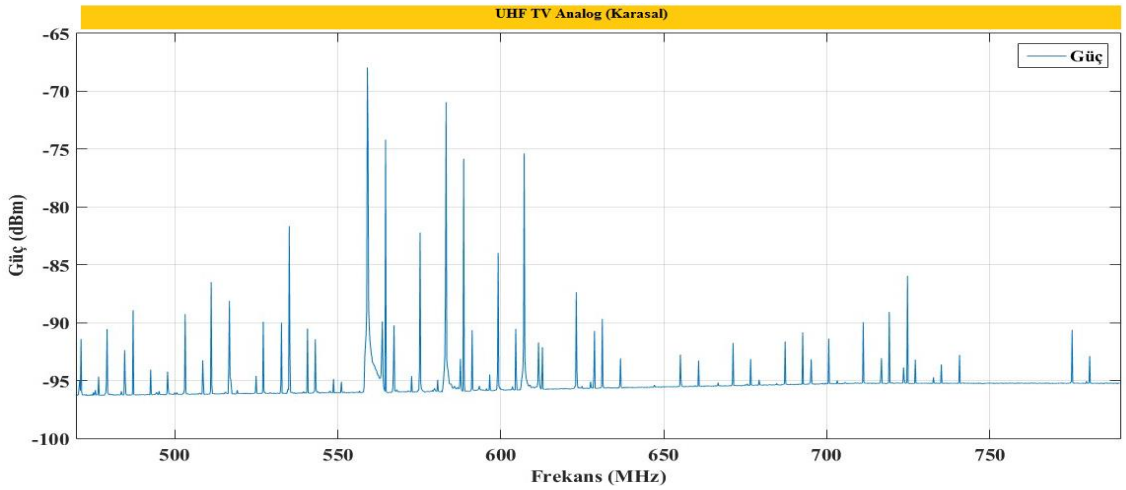


b)

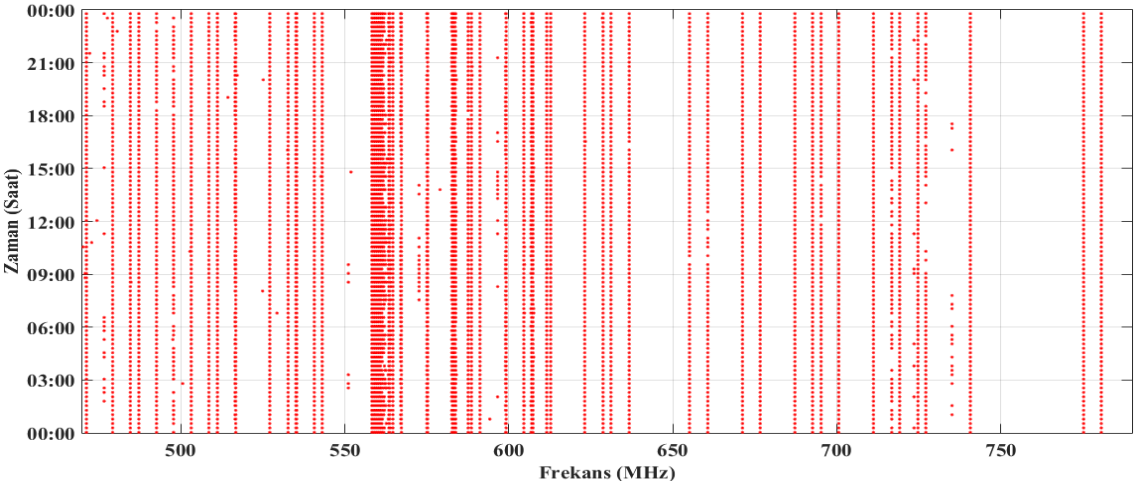


c)

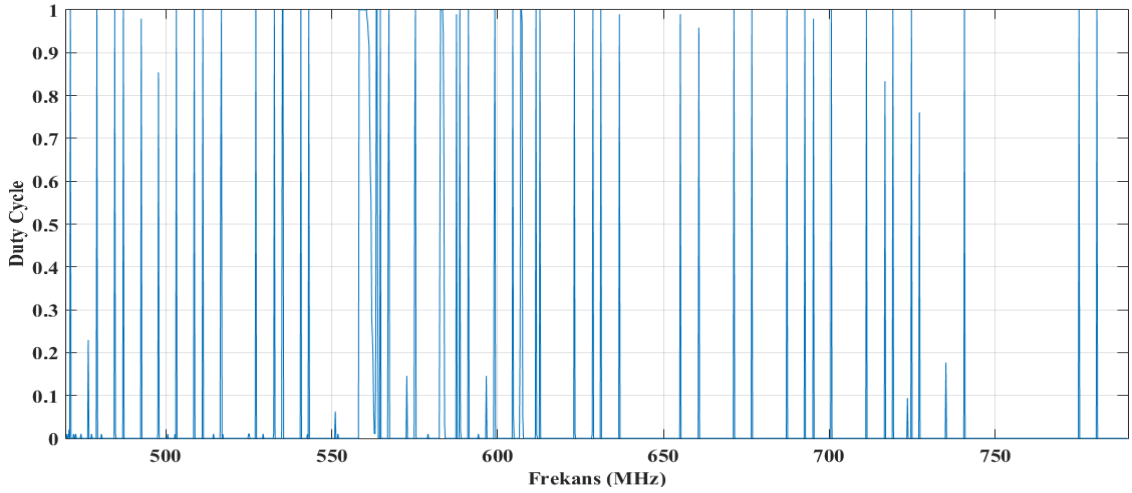
Şekil 4.4 230-470 MHz Frekans Aralığı



a)



b)

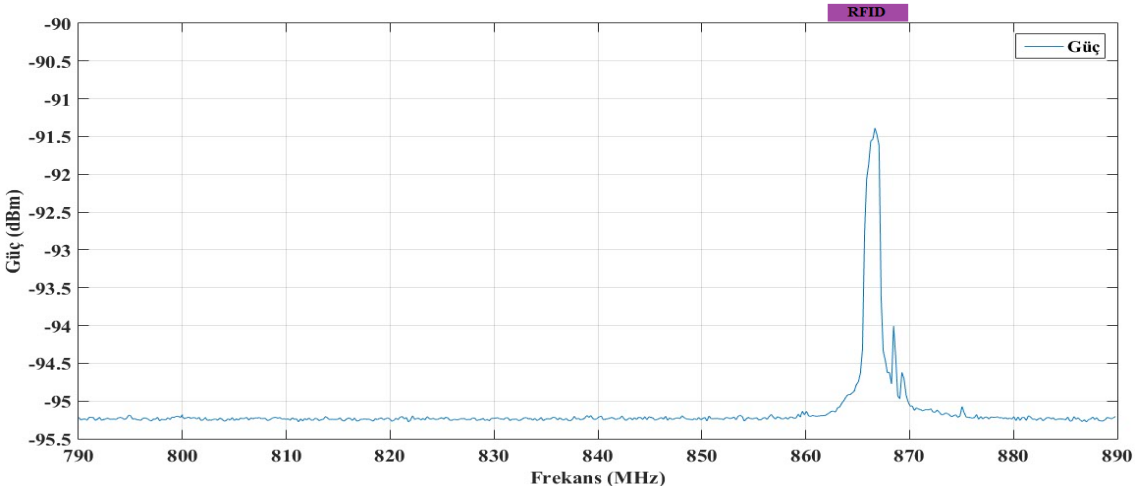


c)

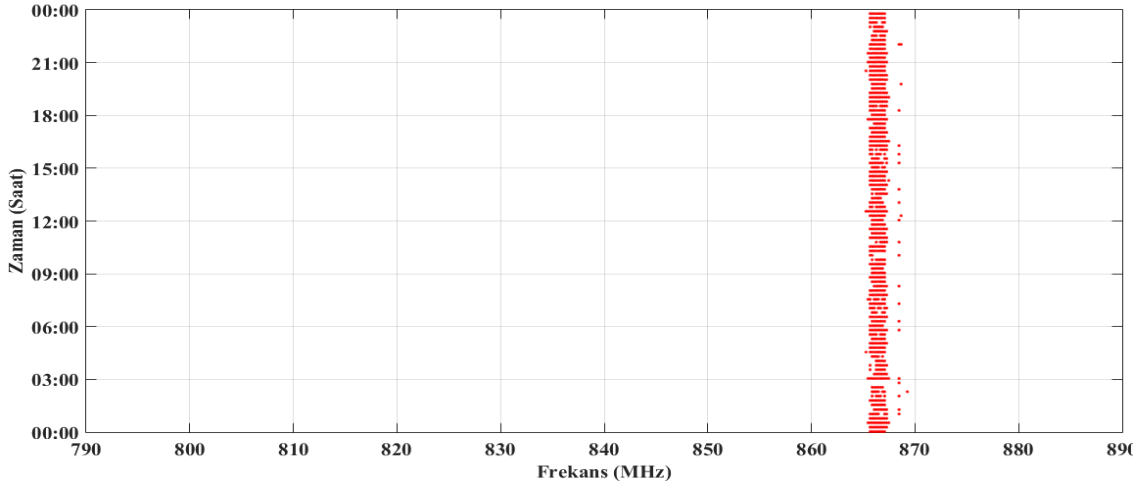
Şekil 4.5 470-790 MHz Frekans Aralığı

Taktik radyo link, alarm, radyo frekansla tanımlama (RFID) ve mobil/sabit iletişim ağları gibi uygulamaların bulunduğu bölüm spektrumun 790-890 MHz'lik kısmını oluşturmaktadır. Şekil 4.6'da sunulan sonuçlar incelendiğinde 860-870 MHz bant aralığında bir doluluk tespit edilmiştir. Bu frekans bölgesi RFID uygulamaları için tahsis edilmiştir. Ayrıca 791-887 MHz bandı parça parça Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu tarafından ihale yapılarak 4.5G için tahsis edilmiştir. Ancak ölçüm yapılan dönemde bu bölgede bu frekans aralığında herhangi bir yayına rastlanmamıştır. Spektrum doluluk oranı bakımından bu frekans bandı için hesaplanan değer %1.54'tür.

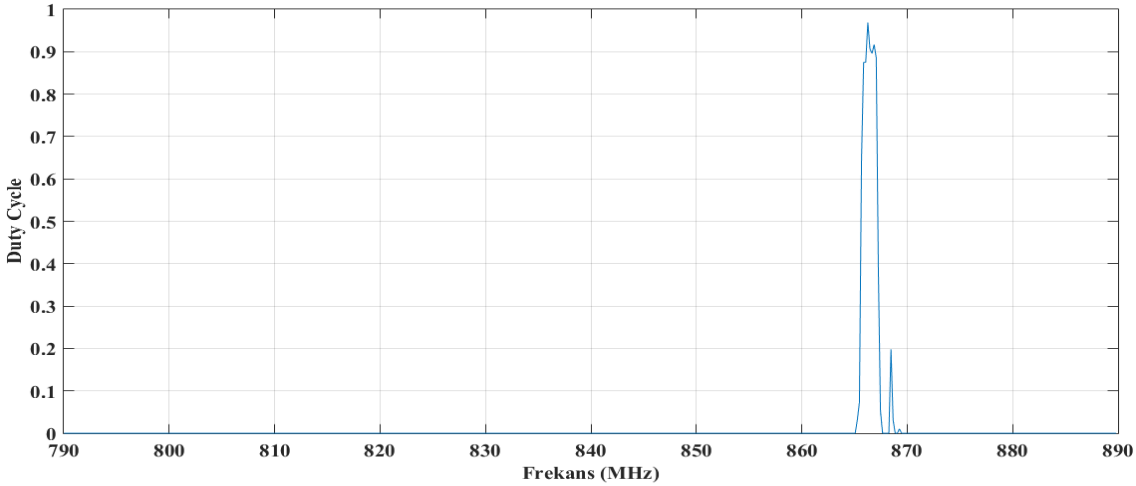
Şekil 4.7 spektrumun 890-960 MHz'lik kısmının sonuçlarını göstermektedir. Bu frekans aralığı GSM-R, GSM 900, özel mobil radyo ve özel erişim mobil radyo uygulamaları için tahsis edilmiştir. 890-915 MHz bandı, GSM 900 uygulamasının uplink bandı olup üç operatörün de bu frekans bandında kullanım hakları mevcuttur. Ancak 4.5G ihalesinin ardından Türk Telekom operatörü GSM 900 uplink ve downlink frekanslarının hakkından feragat etmiştir. Uplink frekansları için doluluk oranı yaklaşık %1 olarak bulunmuştur. Bunun sebebi ise cihazların düşük güç tüketimi ve GSM 900'ün kullandığı çoklu erişim tekniği gerçek değerin elde edilmesini güçleştirmektedir. 915-921 MHz frekansı özel mobil radyo ve özel erişim mobil radyo için tahsis edilmesine rağmen herhangi bir yayın algılanamamıştır. 921-925 MHz frekans aralığı GSM-R (GSM Railway) uygulaması için tahsis edilmiş olup bu noktada yayının mevcut olduğu tespit edilmiştir. Yüksek hızlı tren ulaşım sistemine bağlı olarak, bu yayının varlığı söz konusudur. Ayrıca 925-935 MHz frekans bandı deniz radarı için tahsis edilmesi ve Konya'da denizin bulunmaması, bu bölgede yayın elde edilmesini sorgulatmıştır. Araştırma sonucu bu 10 MHz'lik frekans bandının 4.5G kapsamında Türk Telekom operatörüne tahsis edildiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışma döneminde 4.5G uygulamasının test yayınlarının başladığı anlaşılmaktadır. 935-960 MHz frekans bandı GSM 900 downlink bandı olarak tahsis edilmiş olup ölçüm çalışması sırasında en yoğun doluluğun elde edildiği bant olmuştur. GSM 900 downlink bandı için doluluk oranı %95.34'tür. 890-960 MHz'lik tüm frekans bandı için elde edilen spektrum doluluk oranı ise %40.39 olarak hesaplanmıştır.



a)

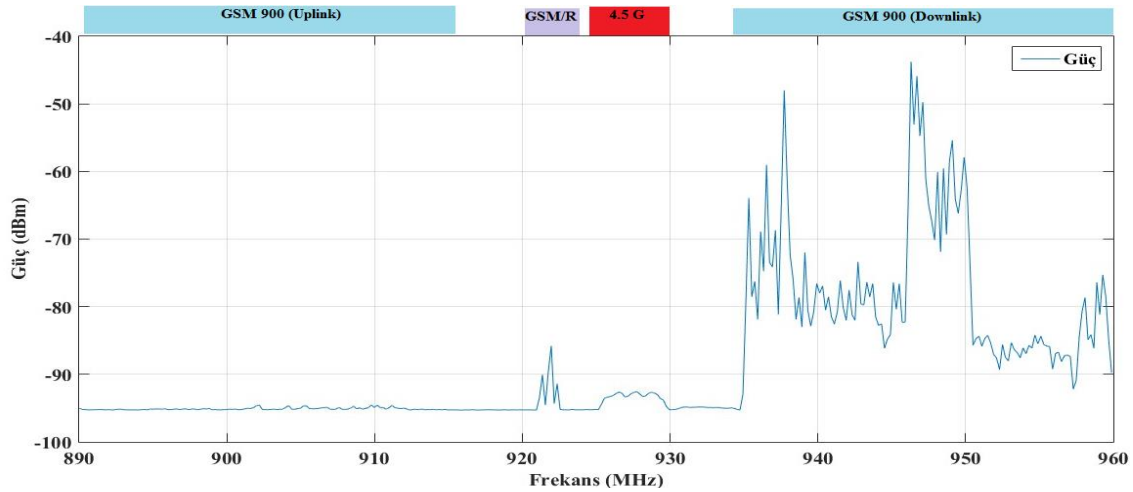


b)

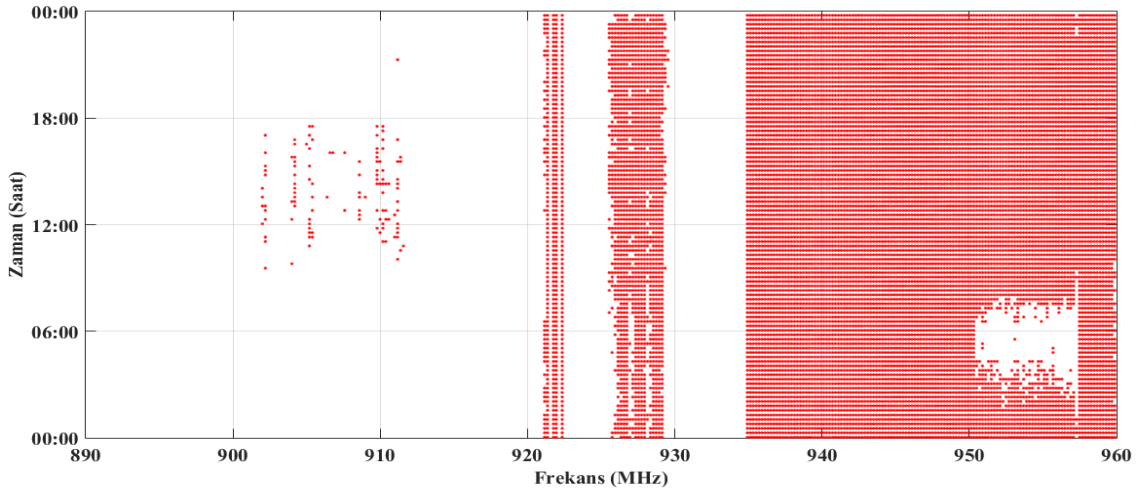


c)

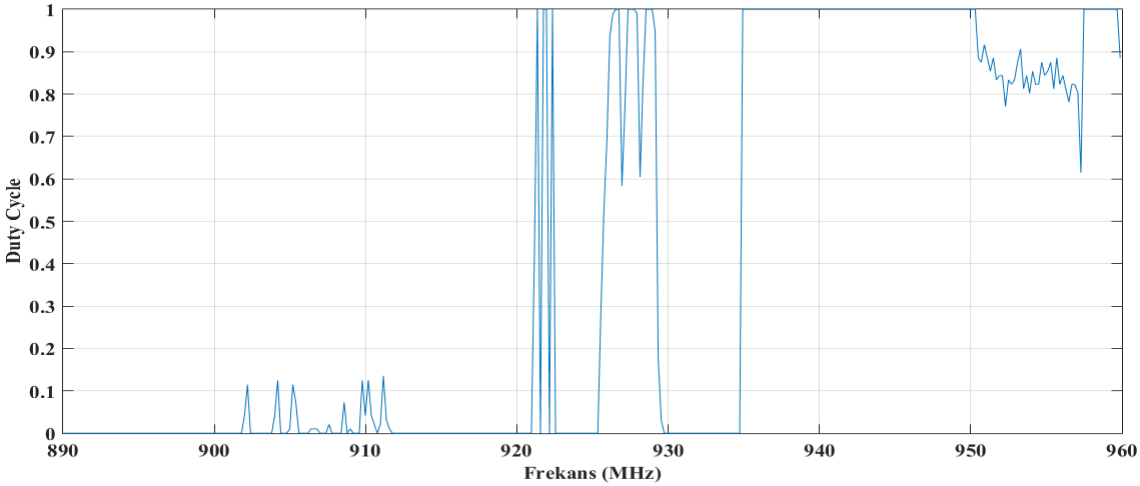
Şekil 4.6 790-890 MHz Frekans Aralığı



a)



b)



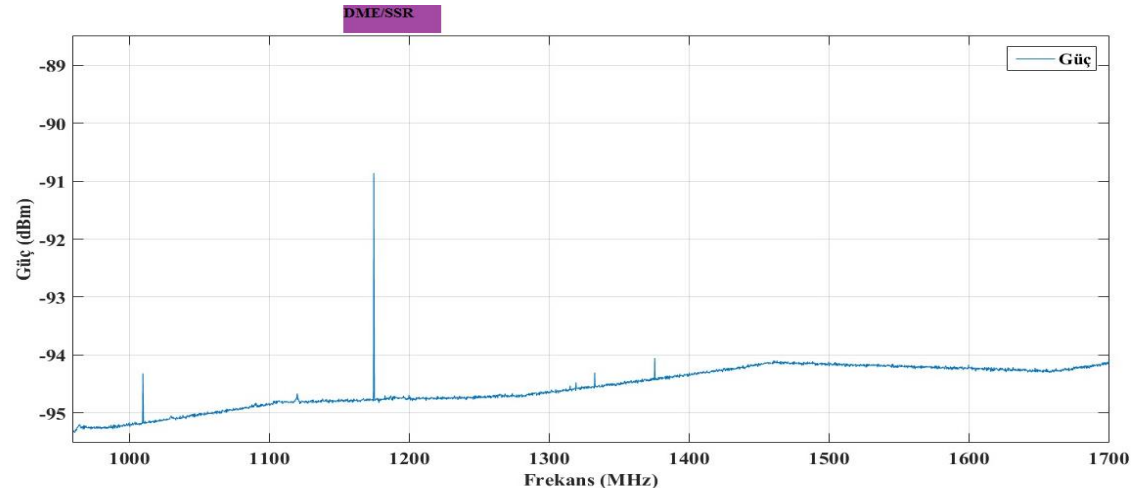
c)

Şekil 4.7 890-960 MHz Frekans Aralığı

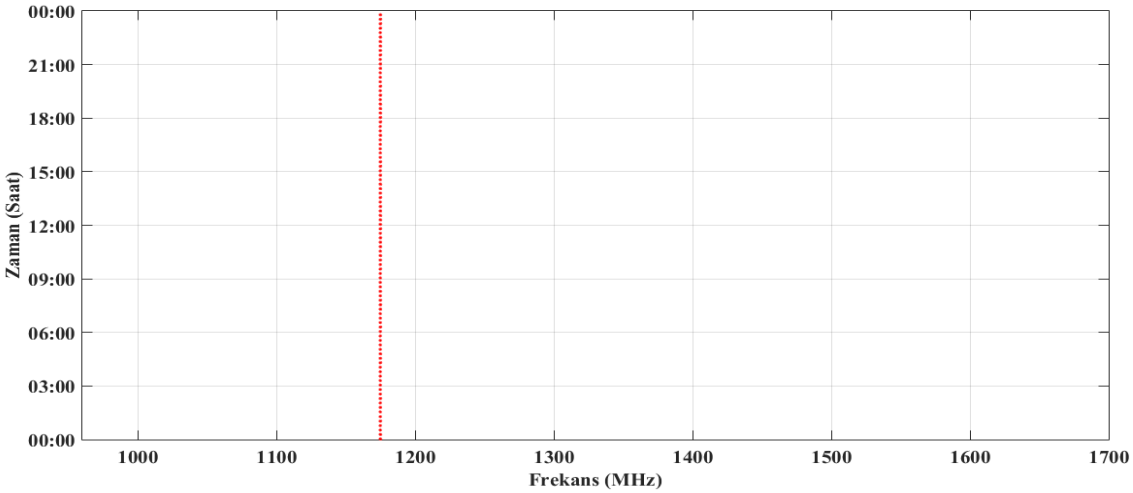
Spektrumun çok geniş bir bölümünün sonucunu gösteren Şekil 4.8'de 960-1700 MHz frekans aralığı sonuçları sunulmuştur. Bu frekans aralığında oldukça çok uygulamaya yer verilmiştir. İkincil izleme radarı, mesafe ölçüm, radar, hava izleme, uzay araştırma, radyoastronomi, meteoroloji hava durumu uyduları, küresel konumlama sistemi ve çeşitli mobil uydu uygulamaları bunlardan bazılarıdır. Çalışma kapsamı boyunca 1175 MHz frekansından bir yayın alınmıştır. Bunun da ikincil izleme radarı olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca gürültü değerlerine oldukça yakın güç değerleri olan bazı yayınlarda söz konusu olmuştur. Bunların ise frekans bant aralığına bakılarak taktik radar olduğu düşünülmektedir. 960-1700 MHz frekans aralığı için doluluk oranı %0.04 olarak hesaplanmıştır.

Hava durumu uyduları, sabit link, GSM 1800 uplink, taktik radyo link, GSM 1800 downlink ve geliştirilmiş dijital kablosuz iletişim (DECT) gibi uygulamalar için tahsis edilen frekans aralığı 1700-1900 MHz'dir. Tek bir operatörün kullandığı GSM 1800 teknolojisinde 1710-1785 MHz uplink frekansı olarak tahsis edilmiştir. Bu bölgede çok düşük oranda spektrum doluluğu elde edilmiş olup, bunun sebepleri GSM 900 bandındaki ile benzerdir. 1805-1880 MHz ise downlink frekansı olarak belirlenmiştir. Downlink frekansı için doluluk oranı %18.78'dir. Ayrıca geliştirilmiş dijital kablosuz iletişim uygulaması için tahsis edilen 1880-1900 MHz frekans aralığında da aktiviteler tespit edilmiştir. 1700-1900 MHz frekans aralığında elde edilen doluluk oranı %7.92 olmuştur. Şekil 4.9'da sonuçlar gösterilmiştir.

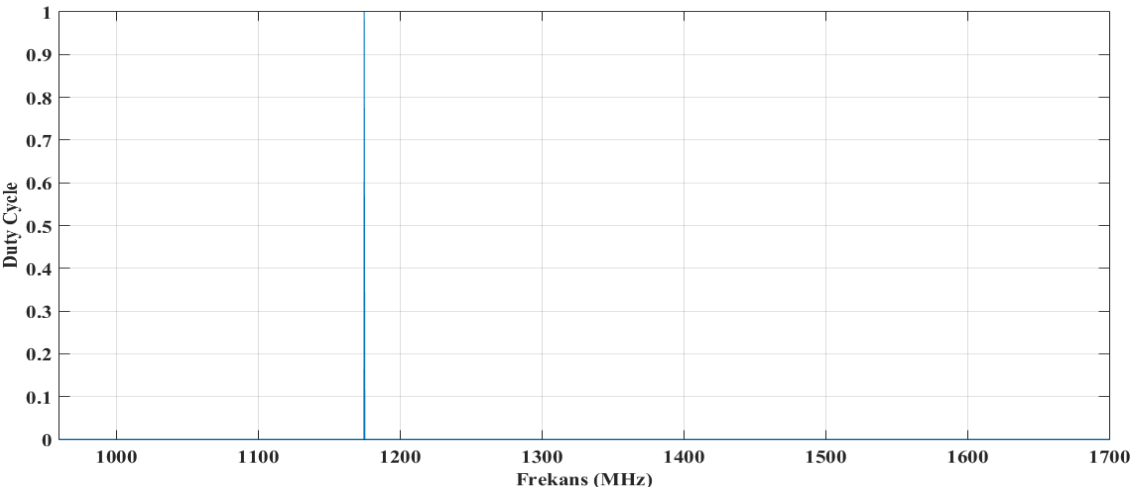
Şekil 4.10'da spektrumun 1900-2300 MHz frekans aralığında yapılan ölçümlerden elde edilen verilerle ortaya çıkan sonuçlar gösterilmiştir. Bu frekans bant aralığı noktadan çok noktaya link, 3G uplink, uzay araştırma, 3G downlink ve sabit link gibi uygulamalar için tahsis edilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere 3G bantlarının bulunduğu 1920-1980 MHz uplink ve 2110-2170 MHz downlink frekanslarında aktivitelerin mevcut olduğu gözlenmiştir. Özellikle baz istasyonları için tahsis edilen downlink frekans aralığı çalışma boyunca yoğun olarak doluluk göstermiştir. 3G downlink bandının doluluk oranı %78.03 olarak bulunmuştur. 1900-2300 MHz frekans bant aralığı için ise bu oran %11.69 olmuştur.



a)

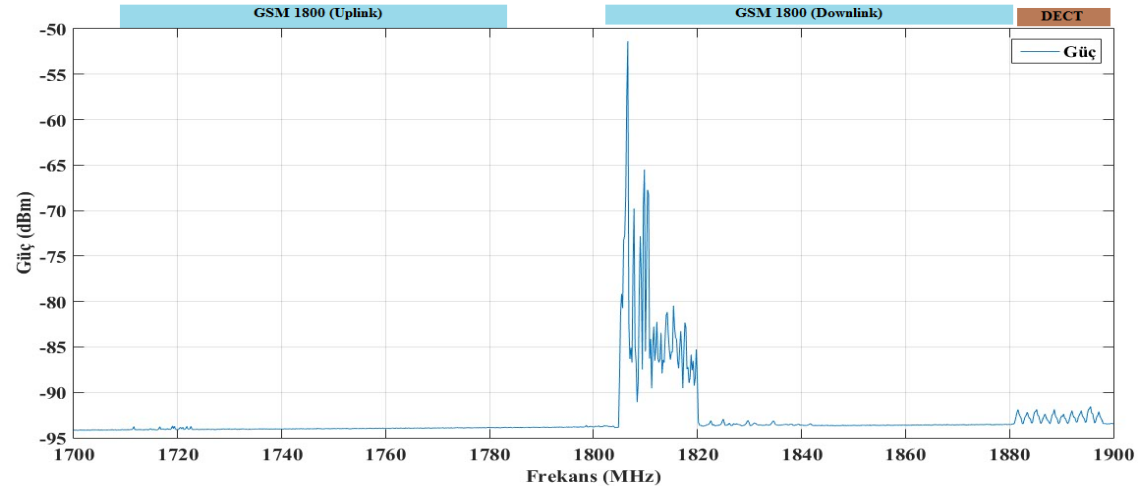


b)

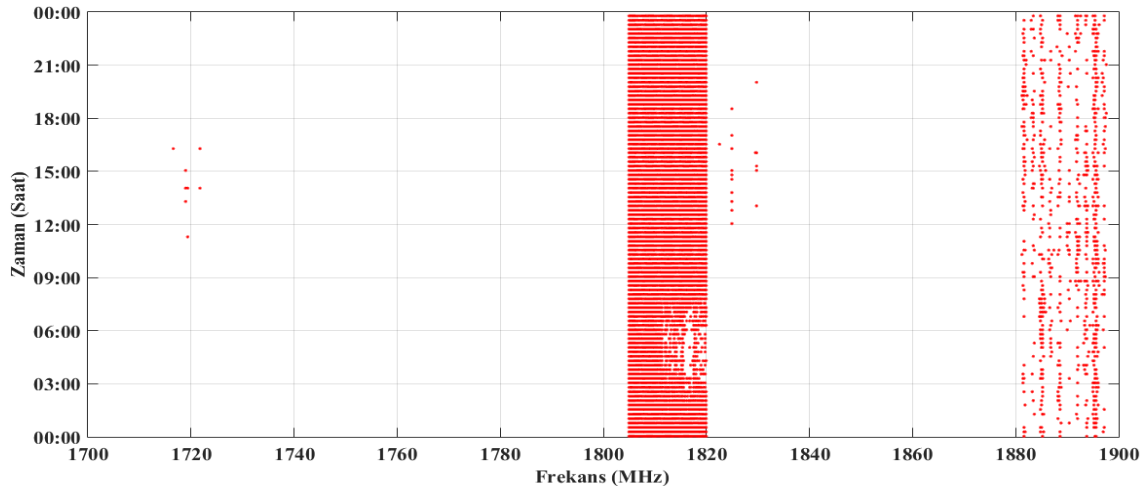


c)

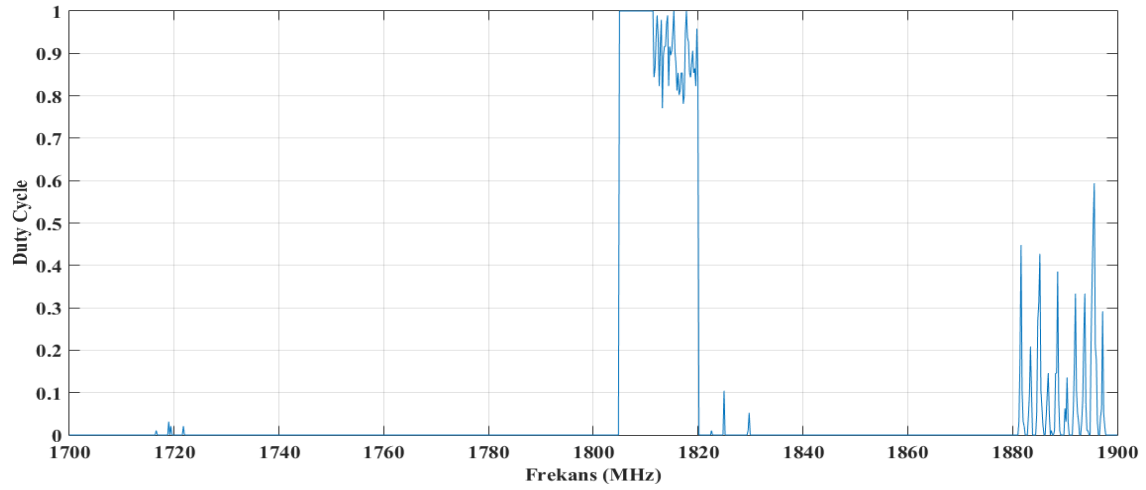
Şekil 4.8 960-1700 MHz Frekans Aralığı



a)

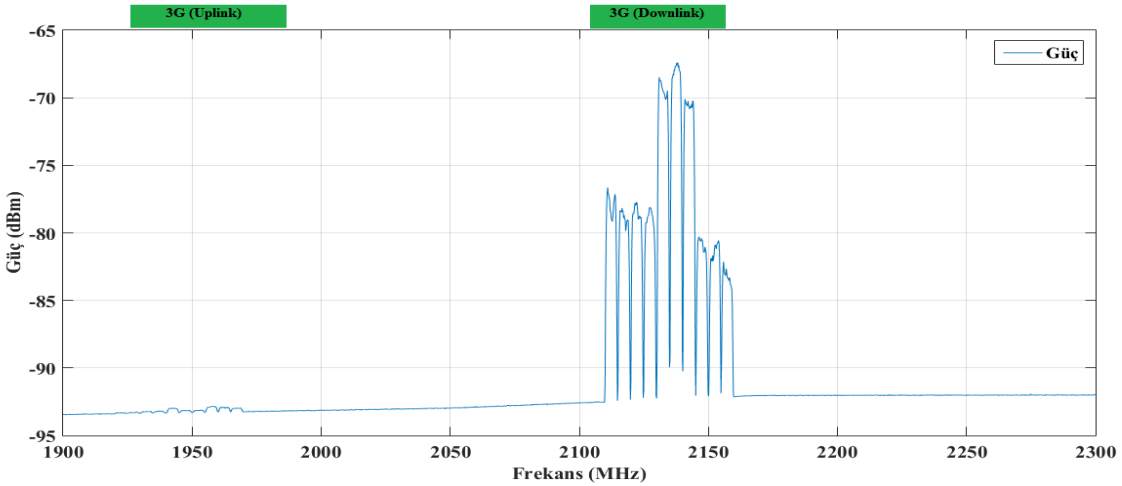


b)

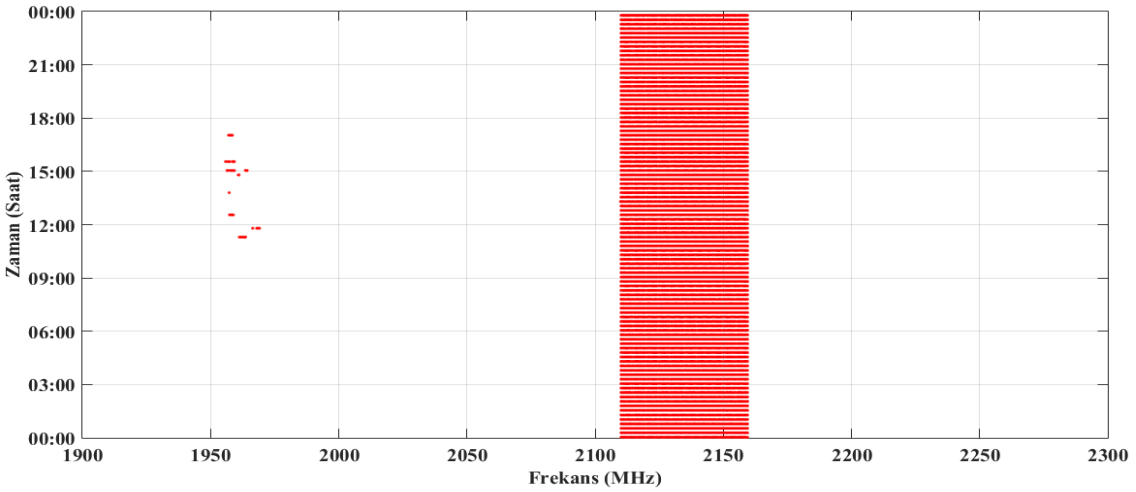


c)

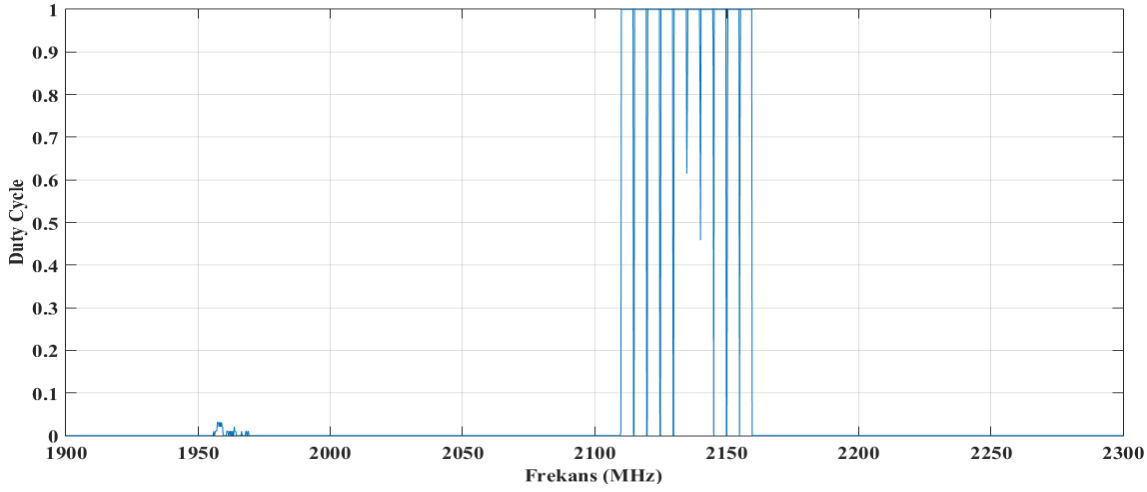
Şekil 4.9 1700-1900 MHz Frekans Aralığı



a)



b)



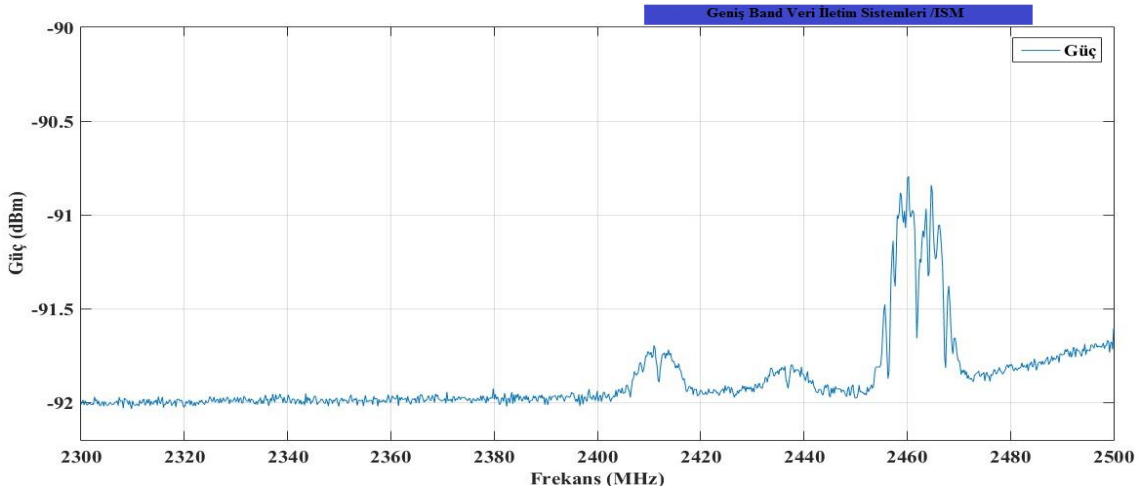
c)

Şekil 4.10 1900-2300 MHz Frekans Aralığı

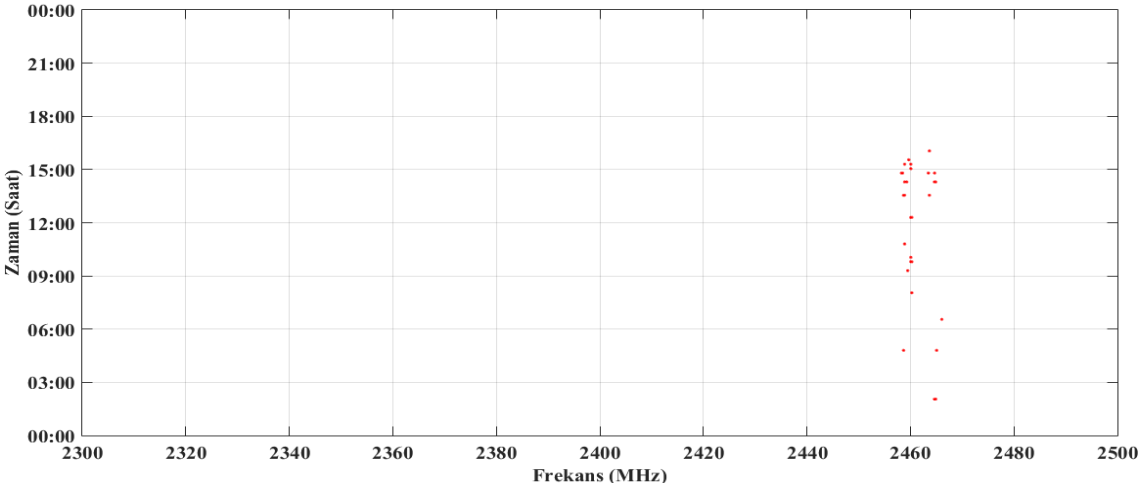
Uzay araştırma, hava telemetri, kısa mesafe erişimli telsiz (KET), geniş band veri iletim sistemleri, radyo frekansla tanımlama gibi uygulamalar 2300-2500 MHz frekans bant aralığı için tahsis edilmiştir. Bu frekans aralığı, özellikle dünya çapında yaygın kullanılan endüstriyel, bilimsel ve tıbbı (ISM) radyo bandını (2400-2483.5 MHz) içermektedir. Herhangi bir aktivite yoğunluğuna rastlanılmamasına rağmen ISM bandının bazı bölümlerinde aktivite tespit edilmiştir. Özellikle ölçüm yapılan bölgenin üniversite olması ve kablosuz internet hizmetinin bu frekans aralığında bulunması bu aktiviteyi açıklamaktadır. Ancak cihazların bina içinde bulunması ve düşük güçle yayın yapmaları ölçüm sisteminin de dış ortamda kurulu olmasından dolayı yayınların algılanmasında güçlük çekilmiştir. Bu frekans bandı için hesaplanan doluluk oranı %0.05'tir. 2300-2500 MHz bandı için elde edilen sonuçlar Şekil 4.11 ile gösterilmiştir.

Spektrumun 2500-3000 MHz frekans arlığı için elde edilen sonuçlar Şekil 4.12'de verilmiştir. Bu frekans aralığı; radyo astronomi, uzay araştırma, hava seyrüsefer ve radar gibi uygulamalara tahsis edilmiştir. 2750-2800 MHz frekans aralığında yayınlarla karşılaşılsa da bu yayınlar eşik seviyesinin altında kalmıştır. Bu bölge frekans tahsis tablosunda askeri radara ve hava seyrüsefere tahsis edilmiştir. 500 MHz'lik frekans bandı için elde edilen doluluk oranı %0'dır.

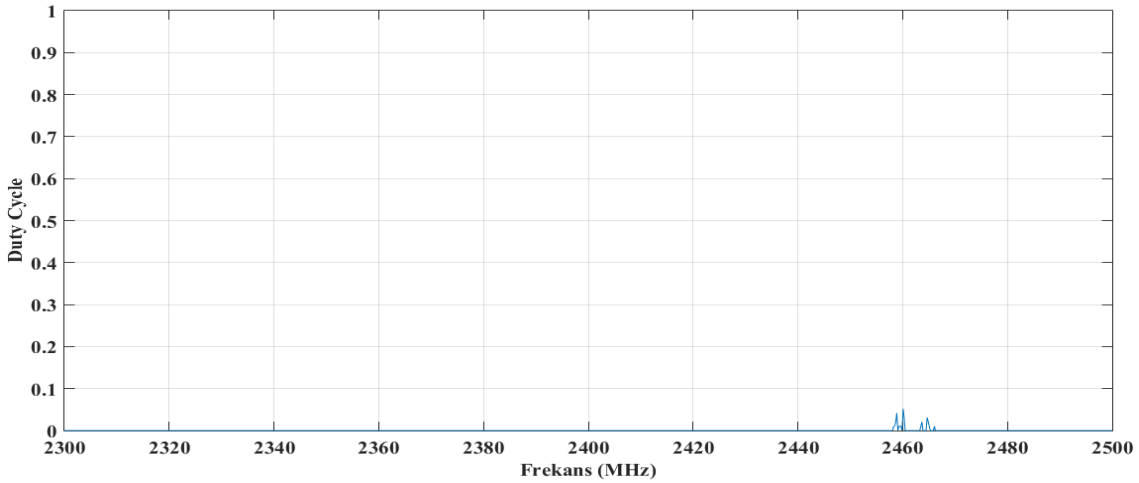
Şekil 4.13 Selçuklu İlçesinde (Üniversite) gerçekleştirilen ve yaklaşık 70 gün süren spektrum doluluk ölçümlerinden elde edilen verilerin sonuçlarını göstermektedir. 25-3000 MHz frekans aralığını kapsayan ölçümlerde 1000 MHz'in altında kalan spektrum yoğun olarak kullanılmakta iken 1 GHz'in üstünde kalan frekans bantları oldukça düşük kullanıma sahiptir. Tüm spektrum bandı için elde edilen doluluk oranı %5.12 olarak hesaplanmıştır. Selçuklu ilçesi için her bir frekans bandında elde edilen ortalama duty cycle sonuçları Şekil 4.14'te özetlenerek sunulmuştur.



a)

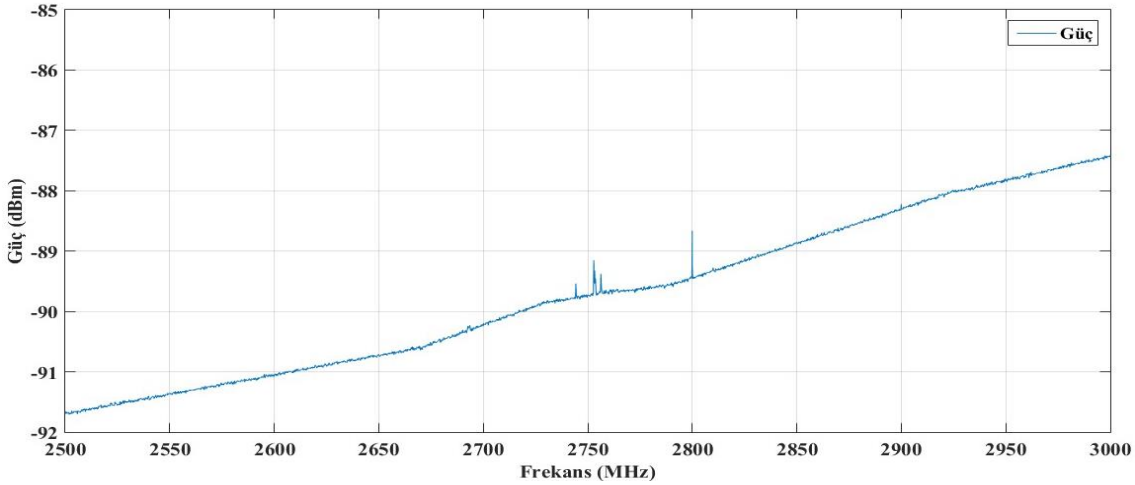


b)

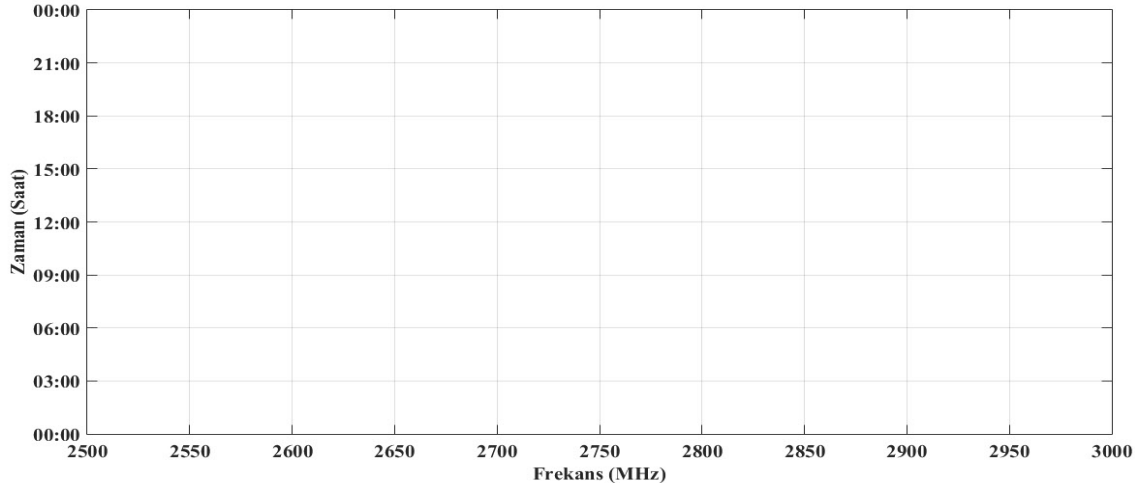


c)

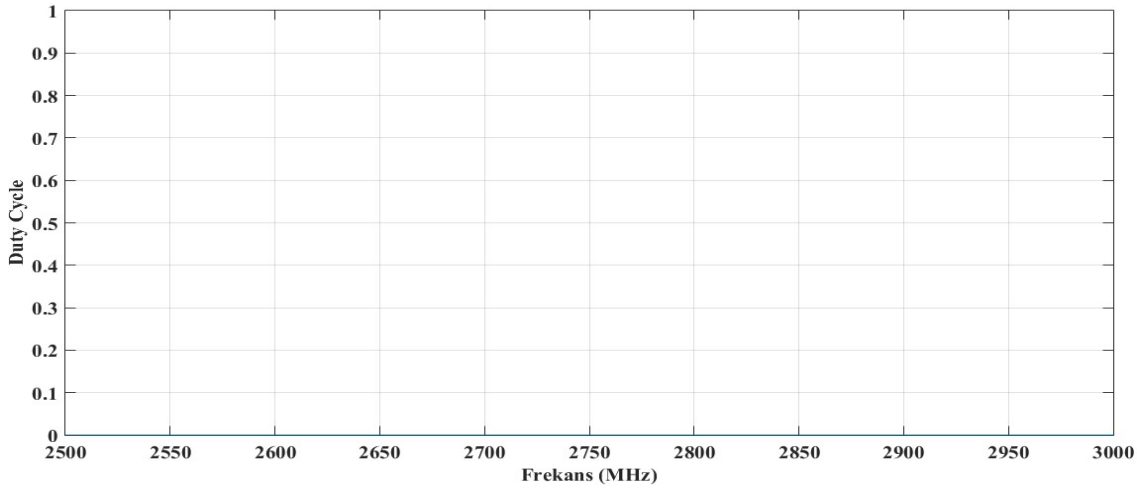
Şekil 4.11 2300-2500 MHz Frekans Aralığı



a)

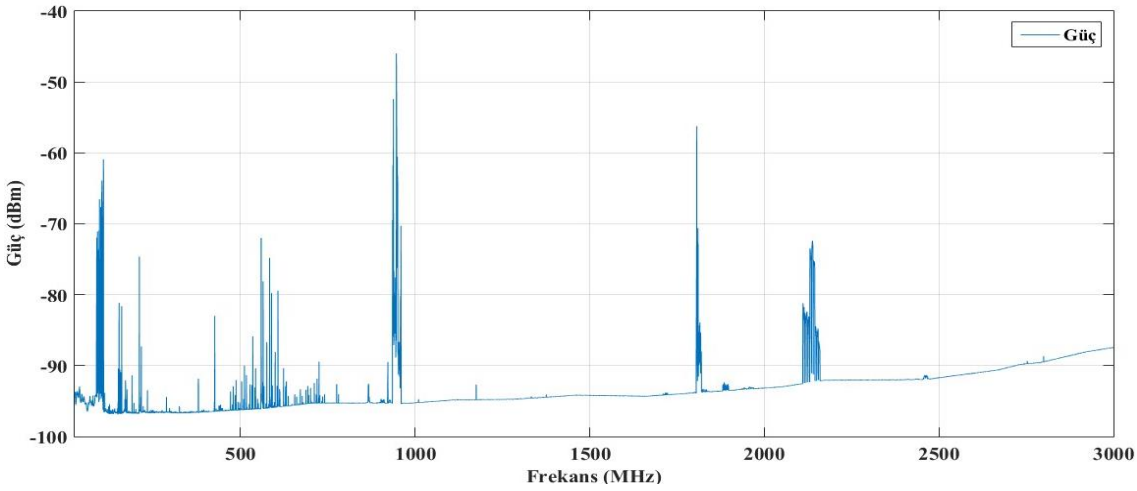


b)

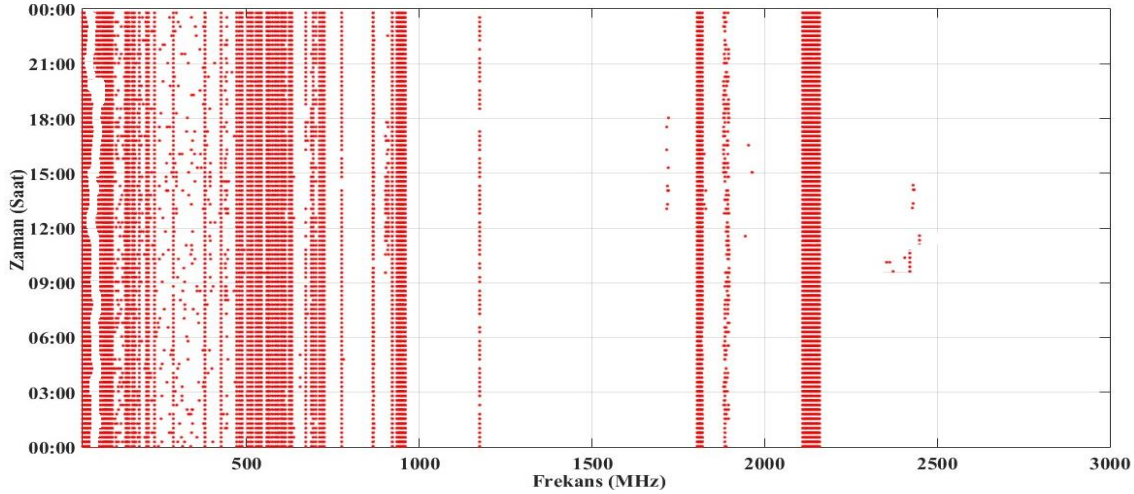


c)

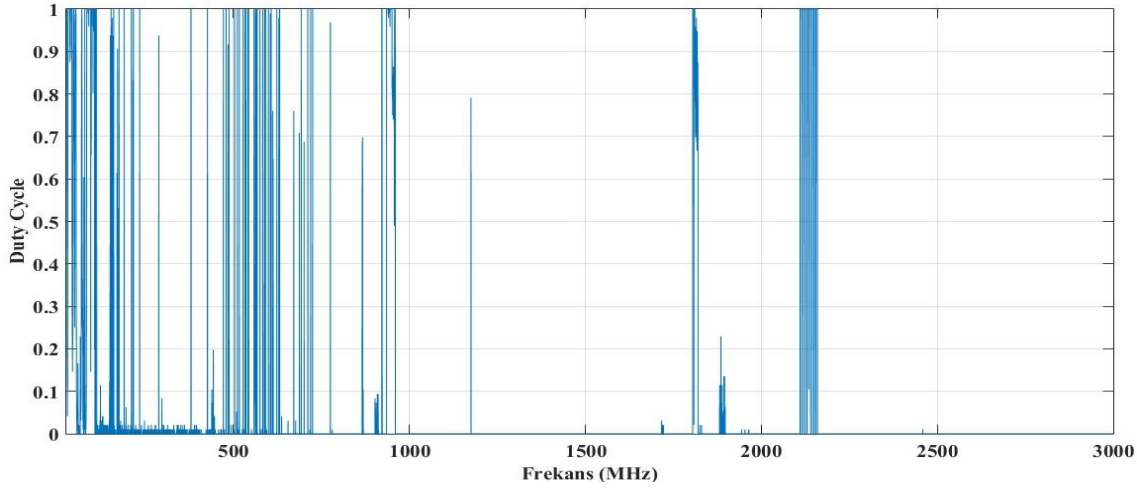
Şekil 4.12 2500-3000 MHz Frekans Aralığı



a)

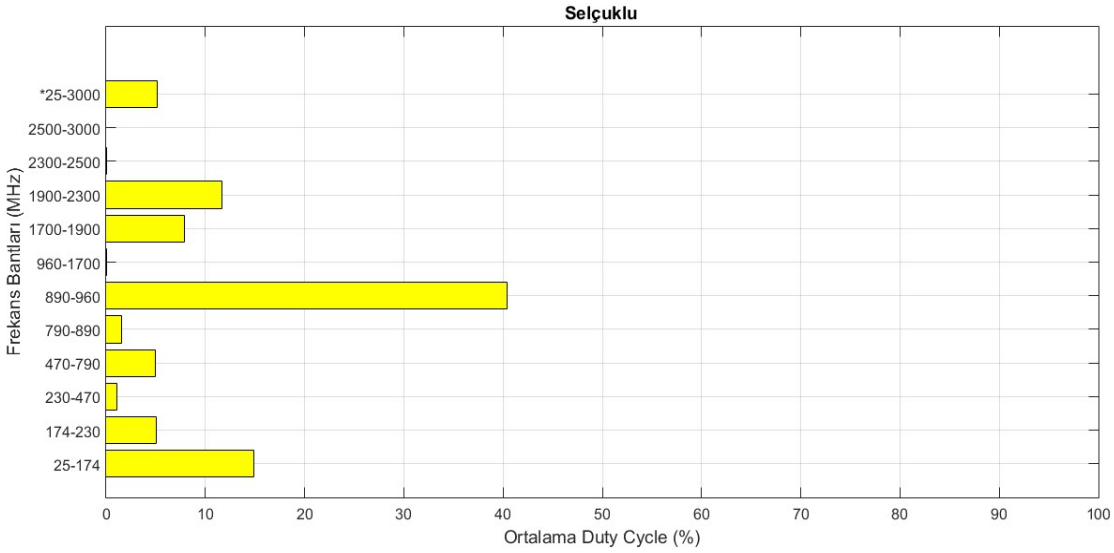


b)



c)

Şekil 4.13 25-3000 MHz Frekans Aralığı



Şekil 4.14 Selçuklu ilçesi için bant-bant ortalama doluluk istatistiği

4.2. Karatay İlçesi Ölçümleri ve Sonuçları

Selçuklu ölçümlerinin bitmesinin ardından Karatay ilçesi için ölçüm çalışmalarına başlanmıştır. Ölçüm çalışması için yüksek binaların bulunmadığı genellikle müstakil evlerin mevcut olduğu bölge seçilmiştir. Konya'daki vericilerin bulunduğu bölgeye (Akyokuş) yaklaşık 12 km mesafede olan ölçüm noktası Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Bölgede fazla yüksek binanın bulunmayışı yayılma ve gölgeleme adına avantaj teşkil etmektedir. 24 saatlik ölçüm işlemi 14 Aralık 2015 tarihinde başlamış olup 35 gün sürmüştür. Ölçüm çalışmalarında düşük gürültülü kuvvetlendirici kullanılmak istenmiş ancak bölgede yayınlar kuvvetli olduğundan ve spektrum analizörün çalışmasını bozucu yönde (görüntü donması vs.) etkilediğinden bu bölgede kuvvetlendirici kullanılmamıştır. Bu bölgedeki ölçümler esnasında kar yağışı meydana geldiği dönemlerde çalışmalara ara verilmiştir. Çalışmalarda Selçuklu ilçesinde kullanılan spektrum yapılandırma parametreleri kullanılmıştır. Bazı frekans bantları için Karatay ilçesinde hesaplanan eşik değerleri Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Karatay İlçesi Ölçüm Noktası (https://www.google.com.tr/maps/)

Çizelge 4.3. Bazı Frekans Bantlarının Karatay İlçesi İçin Hesaplanan Eşik Değerleri

Frekans Bantları	**Değer**
FM Radyo (88-108 MHz)	-94.20 dBm
VHF TV (174-216 MHz)	-94.06 dBm
UHF TV (470-790 MHz)	-92.68 dBm
GSM 900 (890-960 MHz)	-92.39 dBm
GSM 1800 (1800-1820 MHz)	-90.76 dBm
UMTS (2110-2170 MHz)	-89.30 dBm
ISM (2400-2480 MHz)	-89.00 dBm

Ölçümlerden elde edilen verinin analizine 25-174 MHz bandı ile başlanmış sonuçlar Şekil 4.16'da sunulmuştur. Kara mobil, güvenlik sistemleri, FM radyo, hava mobil, hava seyrüsefer ve özel mobil radyo ve özel erişim mobil radyo uygulamaları için tahsis edilen frekanslardan yayınlar algılanmıştır. Özellikle FM radyo bandı ve özel erişim mobil radyo uygulamalarından ölçümler boyunca spektrumun doluluğu dikkat çekmektedir. Bu bant için hesaplanan doluluk oranı %20.30'dur.

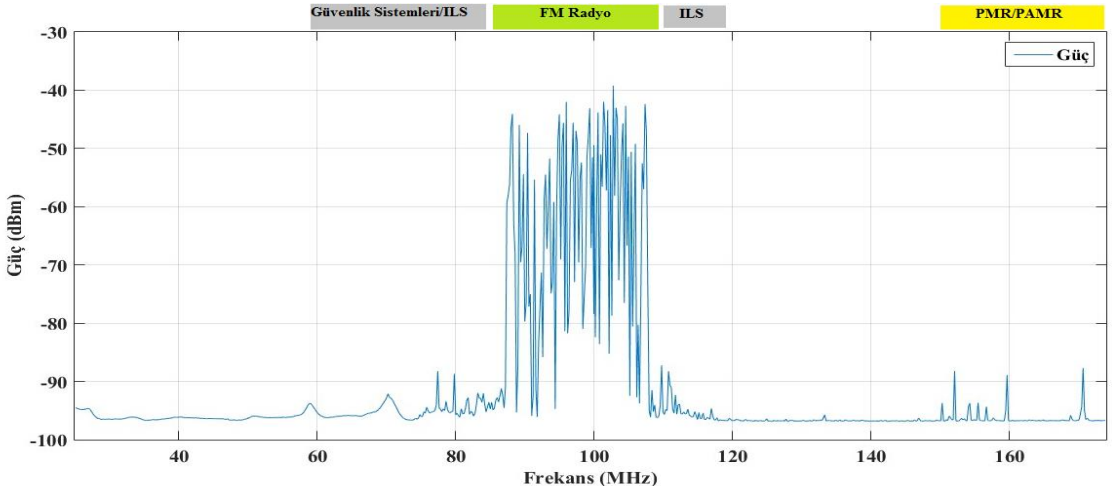
Karatay ilçesi için ölçüm çalışmasında VHF TV bandı bölgesi incelendiğinde elde edilen sonuçlar; Selçuklu bölgesine göre 2 kattan daha fazla çıkmıştır. Bunun sebebi ise vericilere yakın olma olarak gösterilebilir. 174-230 MHz bant aralığı için doluluk oranı %12.16'dır. 187-196 MHz aralığındaki güç dalgalanmasının sebebi vericiye mesafe yakınlığı olarak gösterilebilir. Şekil 4.17'de 54 MHz'lik bant için sonuçlar verilmiştir.

230-470 MHz frekans aralığında bu bölge için neredeyse hiçbir yayına rastlanmamıştır. Ancak 425, 438 ve 442.5 MHz frekanslarında yayın varlığı elde edilmiştir. Şekil 4.18'den de görüldüğü gibi neredeyse 24 saatin tamamında bu frekanslar doludur. Bu frekanslar özel erişim mobil radyo uygulamaları için tahsis edilmiştir. Bu 240 MHz'lik frekans bandı için elde edilen doluluk oranı ise %0.43'tür.

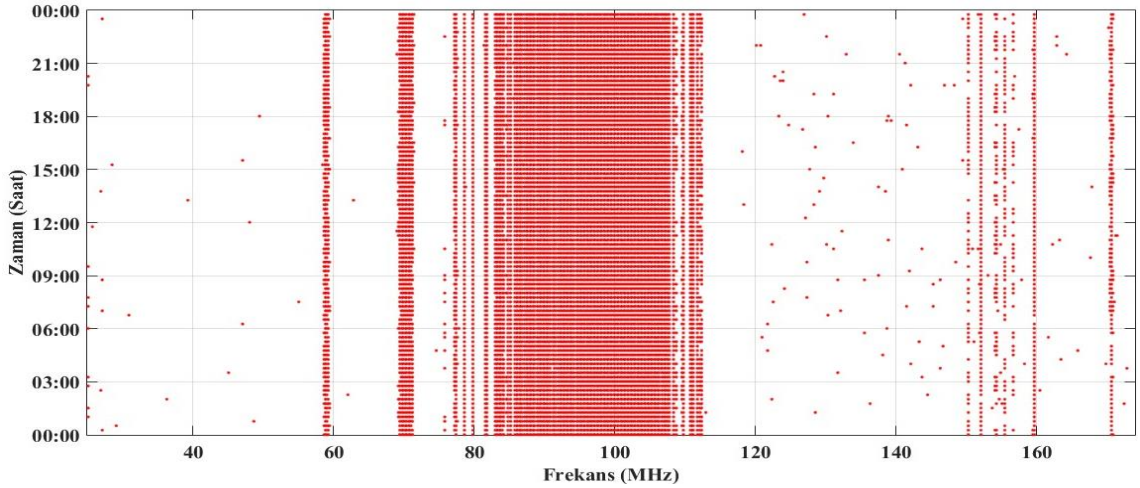
Şekil 4.19'da 470-790 MHz UHF TV bandı için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Sonuçlarda özellikle TV bantları arasındaki geniş spektrum boşlukları göze çarpmaktadır. Ölçüm sonucu olarak %9.93 doluluk oranına sahip olan 320 MHz'lik frekans aralığı Türkiye'nin sayısal TV ye geçmesi ile birlikte bilişsel radyo uygulamaları için çok daha ideal bir bant haline gelecektir.

Şekil 4.20'den de görüleceği üzere 790-890 MHz frekans aralığında herhangi bir yayın tespit edilememiştir. Taktik radyo link, alarm, radyo frekansla tanımlama (RFID) ve mobil/sabit iletişim ağları gibi uygulamalar için tahsis edilen bu bant aralığının tamamı ihale sonucu 4.5G uygulaması için tahsis edilmiştir. Ancak ölçüm süresi boyunca herhangi bir aktivite tespit edilememiştir. Bu zaman zarfında Şekil 4.20.a) kısmı incelenirse düşük güçte yayınların başladığı da görülecektir. Fakat eşik değerini aşacak bir yayın söz konusu değildir.

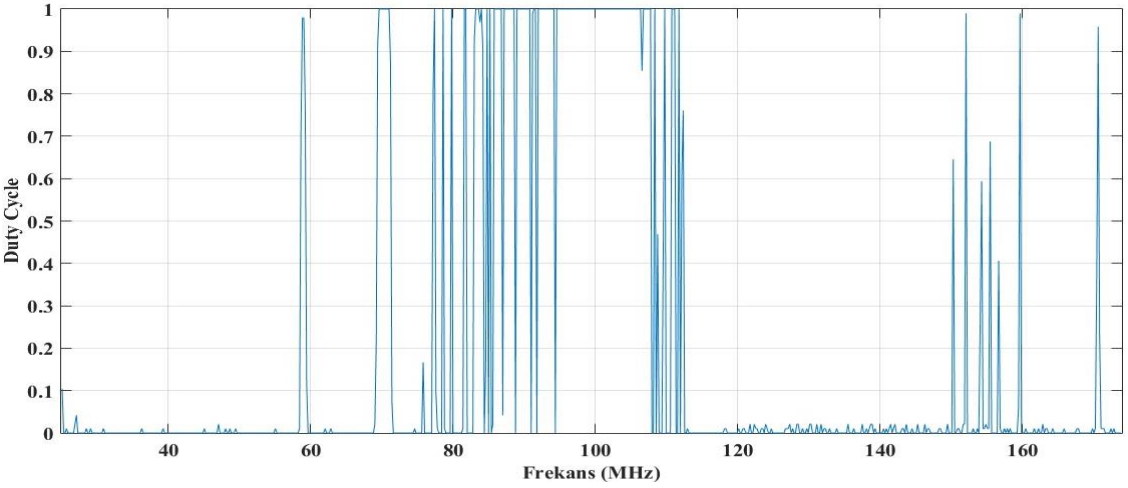
GSM 900 bandının uplink ve downlink bantlarını içermesinin yanı sıra GSM-R ve 4.5G ihalesi ile birlikte IMT-Advanced downlink frekansını da içermeye başlayan 890-960 MHz frekans bandı en yoğun olarak kullanılan bant olarak tespit edilmiştir. Sonuçları Şekil 4.21'de görülen bant için GSM900 uplink bandı için aktivite neredeyse yoktur. Bunun sebebi olarak bölgede insan yoğunluğunun Selçuklu (Üniversite) ölçüm noktasına göre oldukça az olması ve yukarıda bahsedilen diğer sebepler gösterilebilir. GSM-R için tahsis edilen frekans bu bölgede de aktif olarak kullanılmaktadır. Ayrıca 925-930 MHz bandında 4.5G test yayınlarına başladığı da görülmektedir. GSM900 downlink bandı için doluluk oranı %69.83 olarak hesaplanmıştır. 70 MHz'lik tüm bant aralığı için bu değer %31.60'tır.



a)

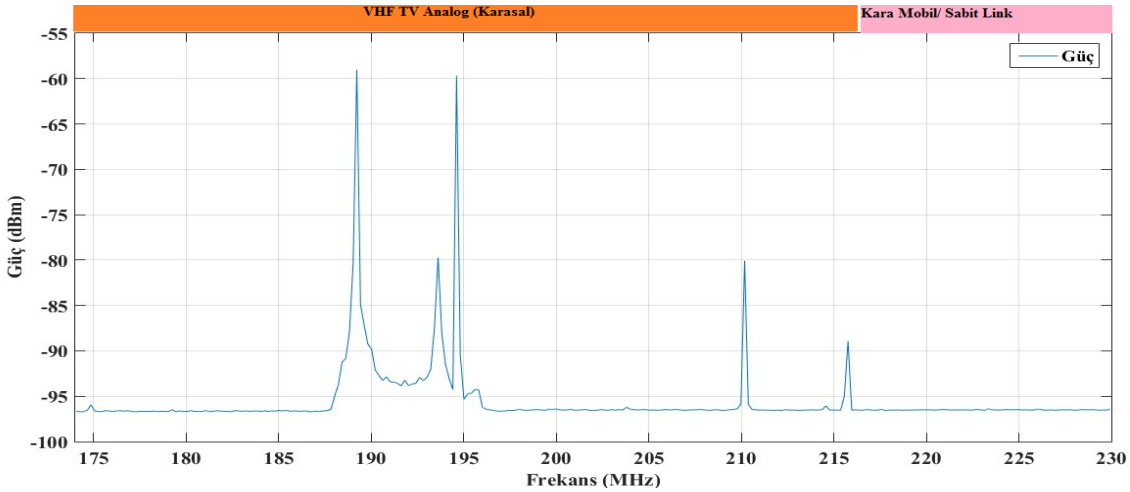


b)

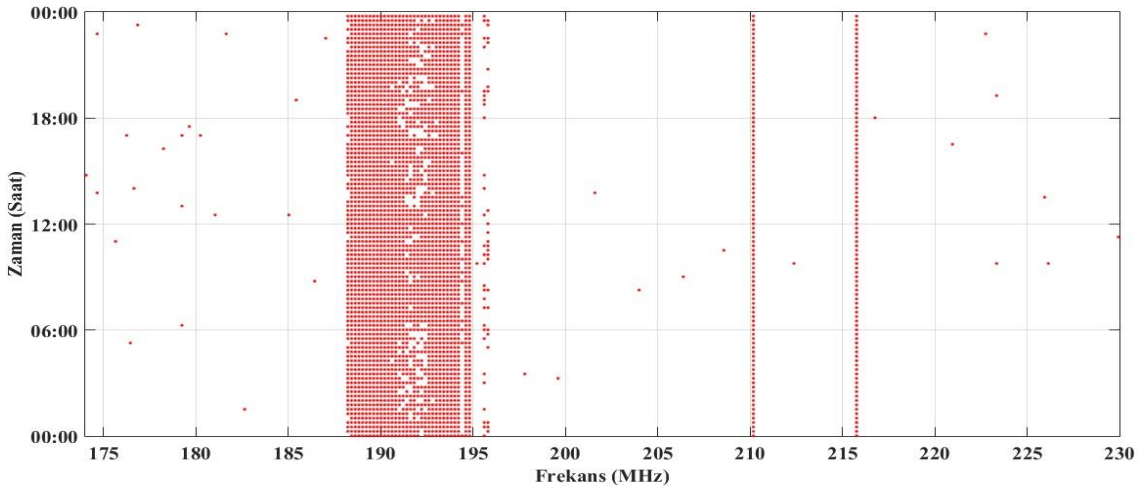


c)

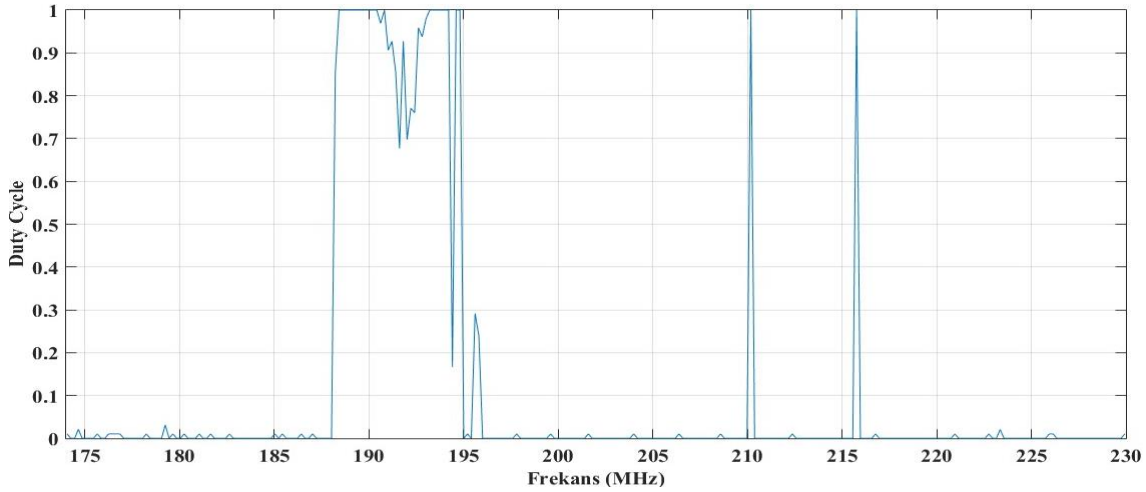
Şekil 4.16 25-174 MHz Frekans Aralığı



a)

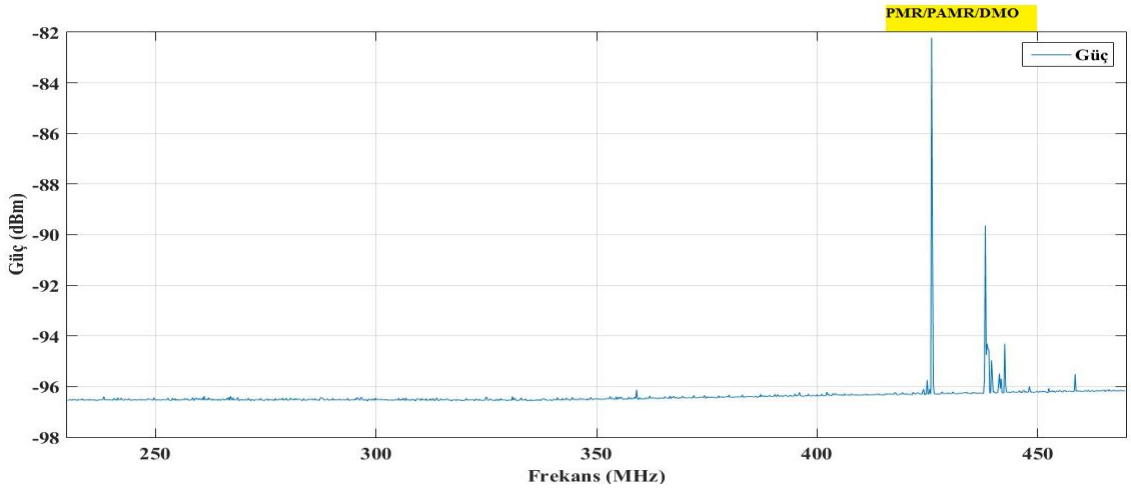


b)

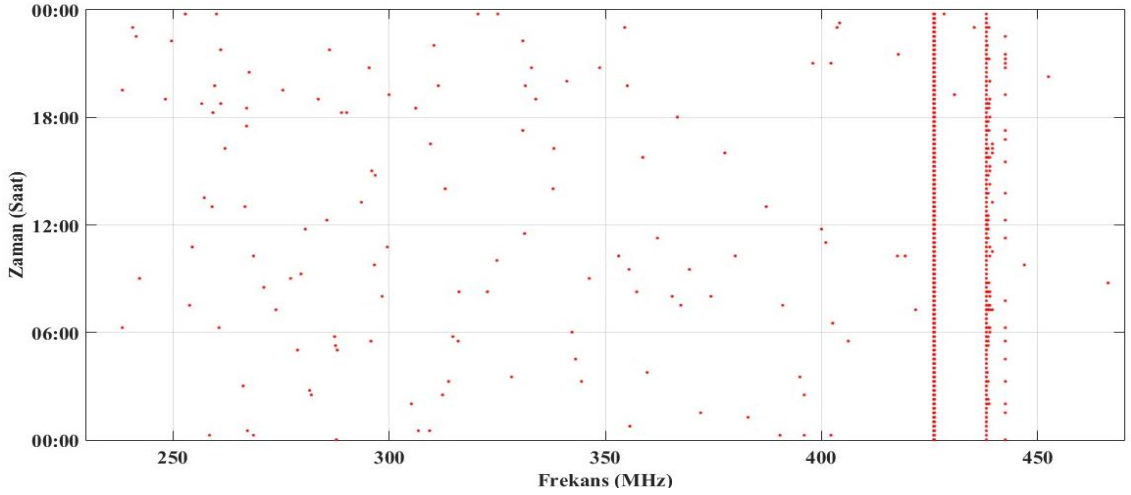


c)

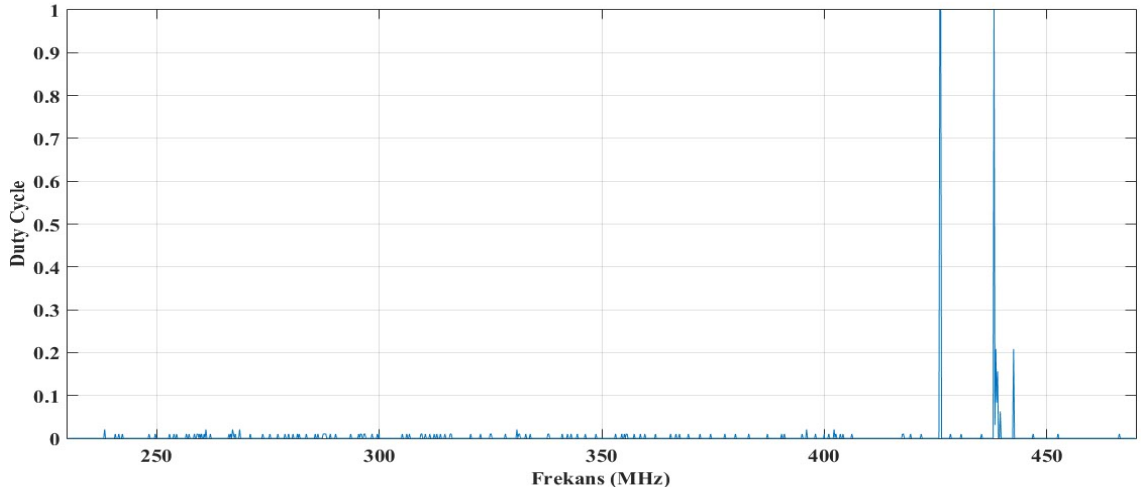
Şekil 4.17 174-230 MHz Frekans Aralığı



a)

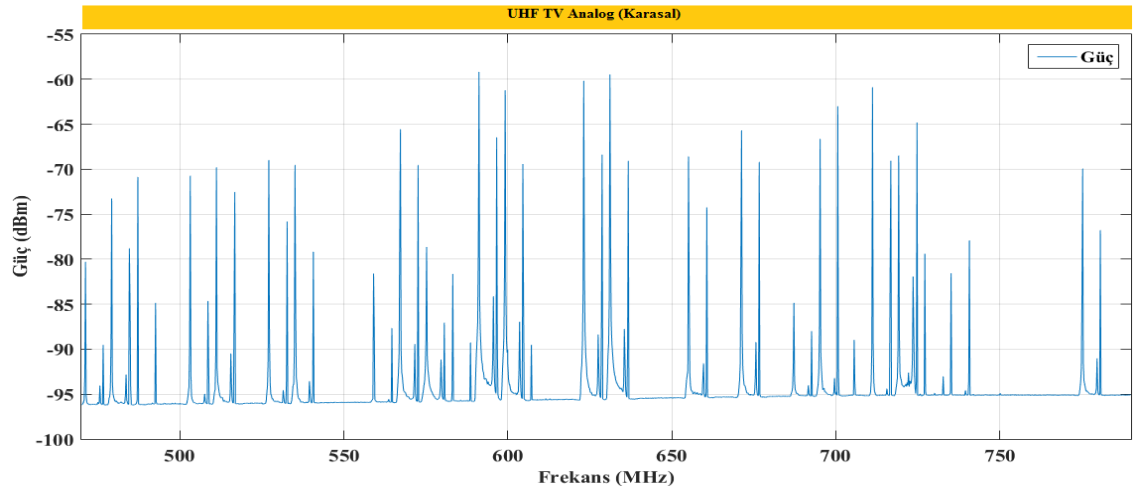


b)

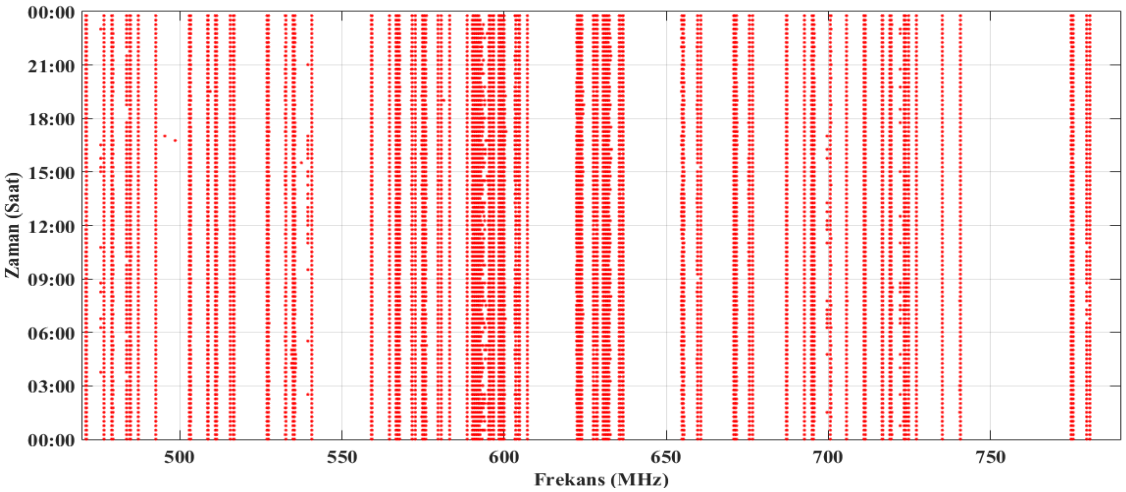


c)

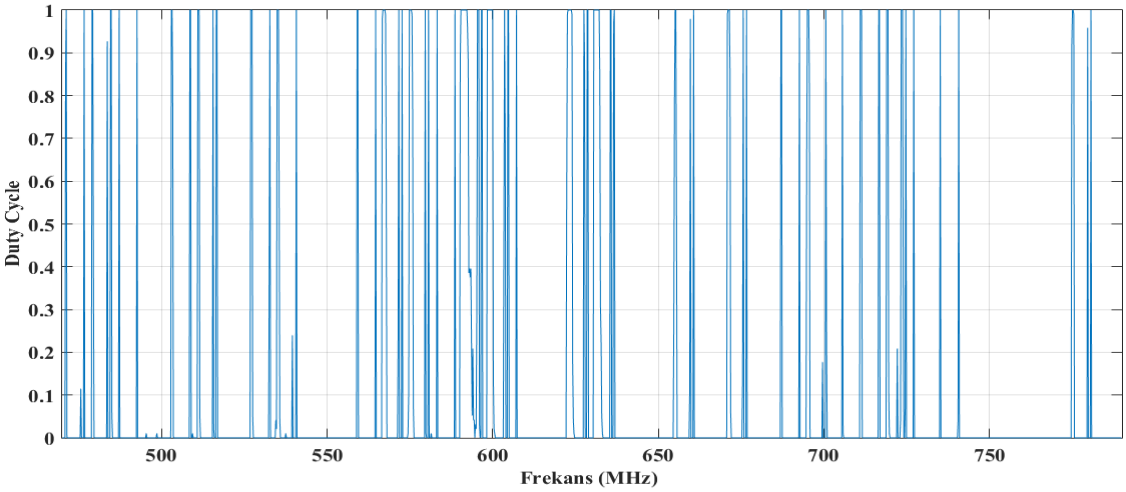
Şekil 4.18 230-470 MHz Frekans Aralığı



a)

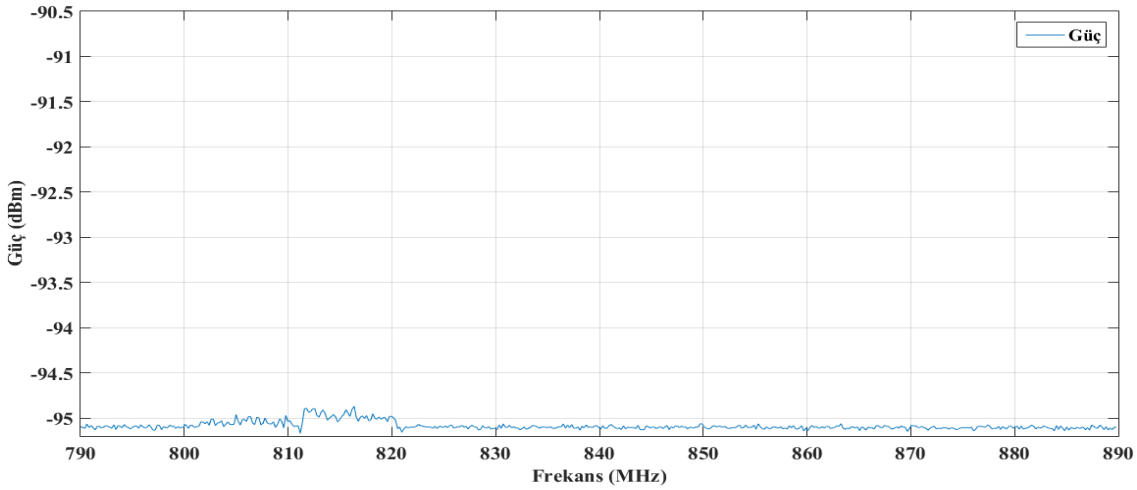


b)

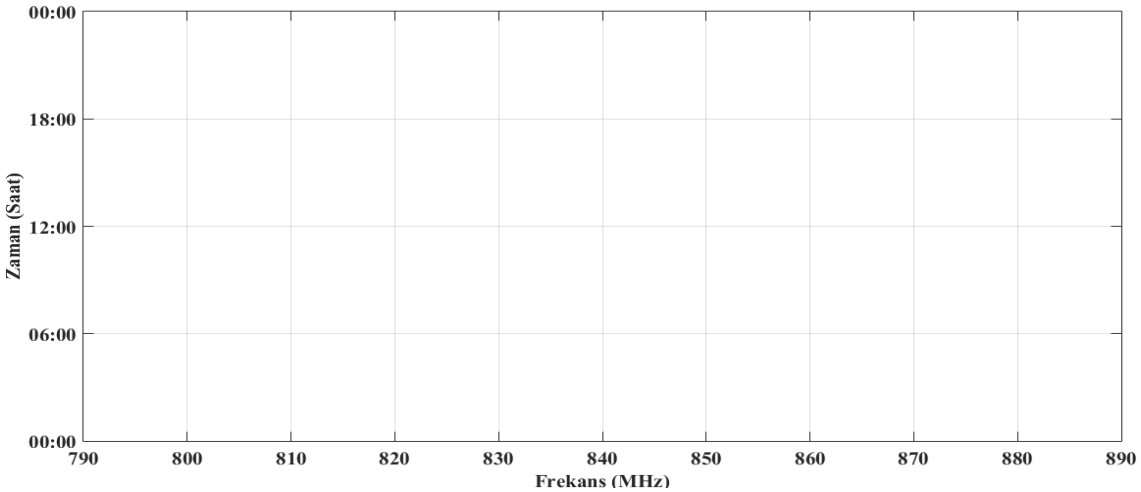


c)

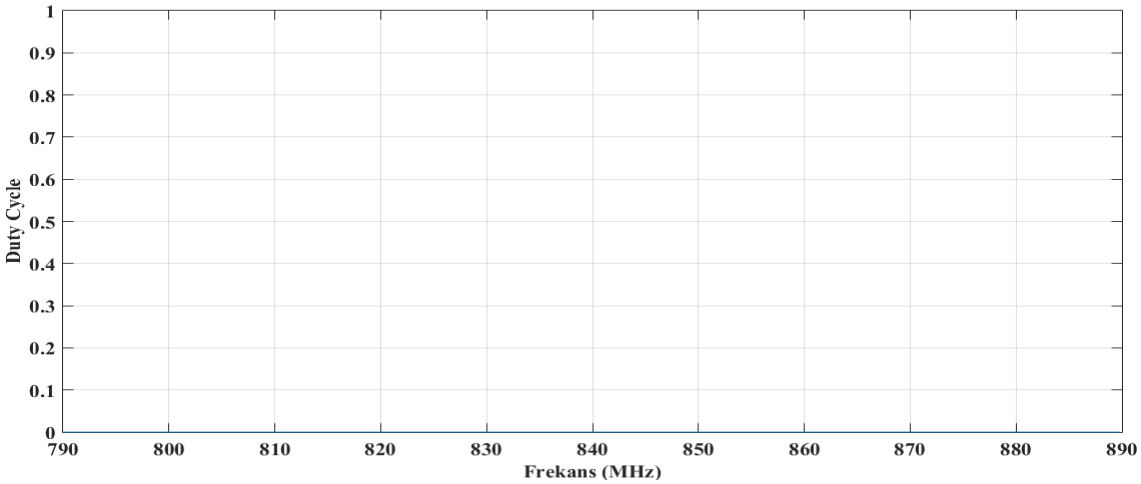
Şekil 4.19 470-790 MHz Frekans Aralığı



a)

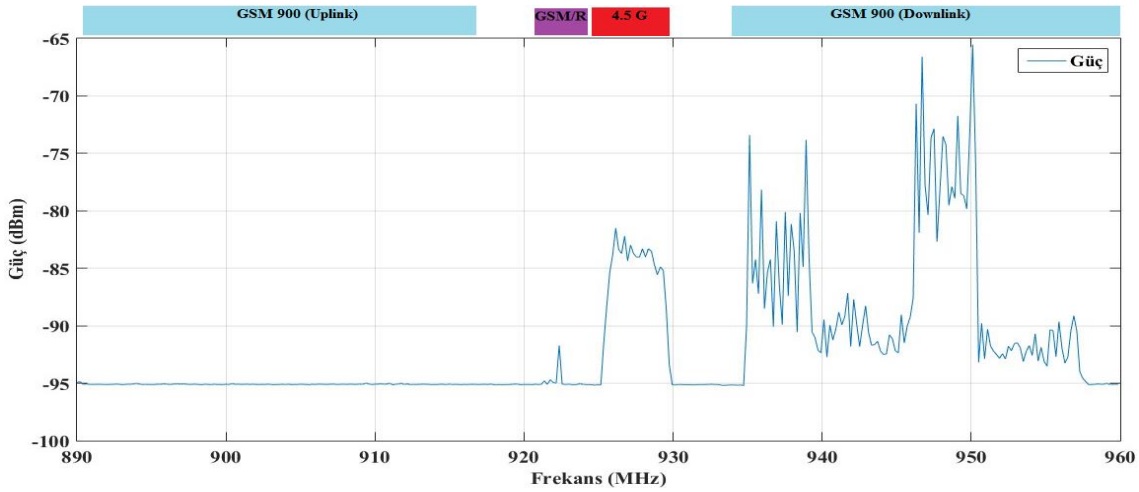


b)

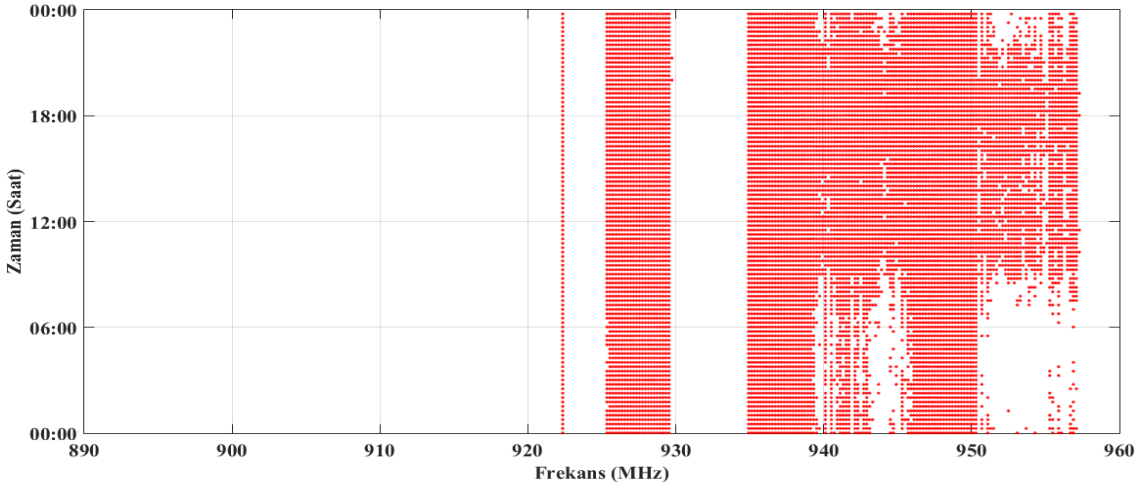


c)

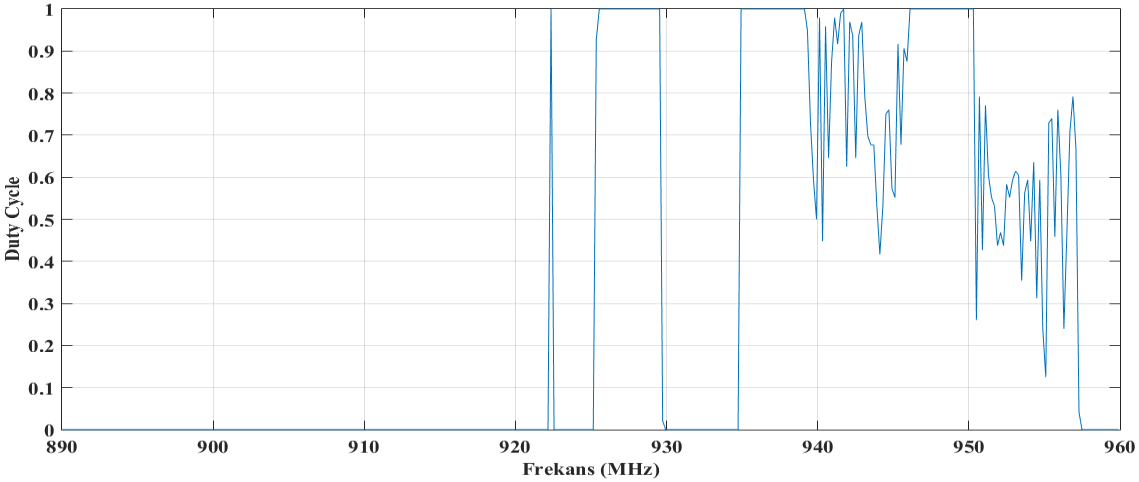
Şekil 4.20 790-890 MHz Frekans Aralığı



a)



b)



c)

Şekil 4.21 890-960 MHz Frekans Aralığı

Karatay ilçesi için 960-1700 MHz ölçüm sonuçları Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Daha önceki bölümde de bahsedildiği gibi birçok uygulamayı barındıran bu bant aralığında ölçüm sonuçlarından görüleceği üzere hiçbir yayının varlığı tespit edilememiştir. Ayrıca şekiller incelendiğinde 1000 MHz'den 1700 MHz'e kadar gürültünün gücünün arttığı görülecektir. 700 MHz'lik kullanılmayan bir alan spektrumun ne kadar atıl olarak değerlendirildiğinin de bir göstergesidir.

Şekil 4.23'te 1700-1900 MHz frekans aralığı için ölçüm sonuçları sunulmuştur. GSM1800 uygulamasının ve DECT uygulamasının varlığı Selçuklu ilçesi ölçüm sonuçlarında elde edilmişti. Fakat 1880-1900 MHz bandını kullanan DECT uygulamasının varlığı bu bölgede tespit edilememiştir. Ayrıca GSM 1800 uplink frekans aralığında ortalamaya göre de kayda değer bir yayın algılanamamıştır. Bu bant aralığında sadece tek bir operatörün downlink bandından yayınlar elde edilmiştir. GSM1800 downlink bandının doluluk oranı %15.58 olarak hesaplanırken 200 MHz'lik tüm bant için bu değer %5.85 olmuştur.

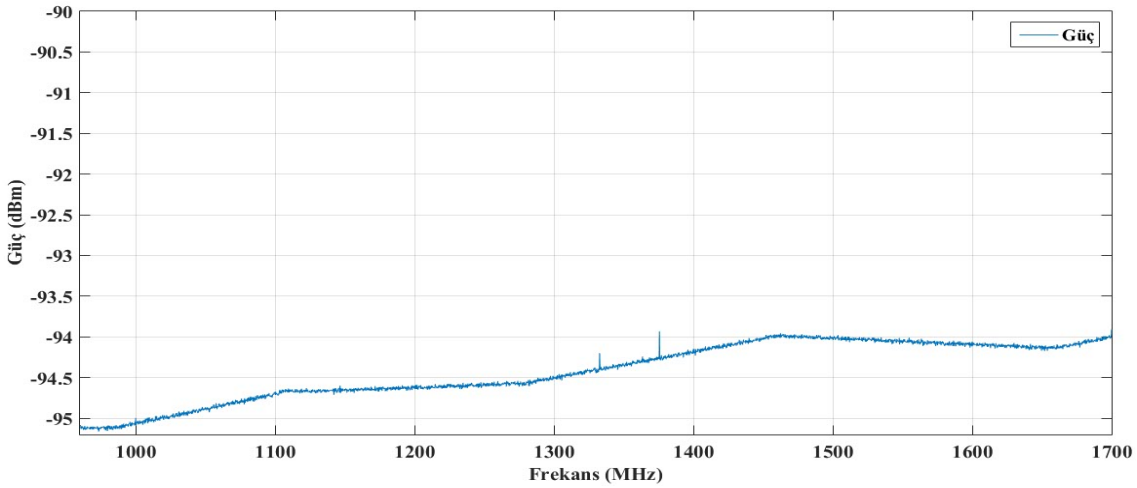
400 MHz'lik geniş bir spektrum bandında ölçüm sonuçları Şekil 4.24'te gösterilmiştir. 1900-2300 MHz frekans aralığında sadece 2110-2170 MHz frekans bandında yayına rastlanmıştır. Bu frekans aralığı, 3G yayınları için downlink bandı olarak tahsis edilmiştir. Bu bantta ise bazı frekanslarda düşük güç değerleri elde edilmiştir. 3G downlink frekans bandı için doluluk oranı % 48.74 iken tüm frekans aralığı için bu değer %7.28'dir.

Radyo frekansla tanımlama, otomatik taşıt tanımlama, demiryolu uygulamaları, genel amaçlı KET, geniş band veri iletim sistemleri, mobil uydu hizmetleri gibi uygulamaların yer aldığı frekans bölgesi olan 2300-2500 MHz frekans aralığı ISM bandını da içermektedir. Ölçüm sonuçları Şekil 4.25 ile verilen spektrumun bu bölümünde herhangi bir spektrum kullanıcısına rastlanılmamıştır. Dolayısıyla hesaplanan doluluk oranı değeri %0'dır.

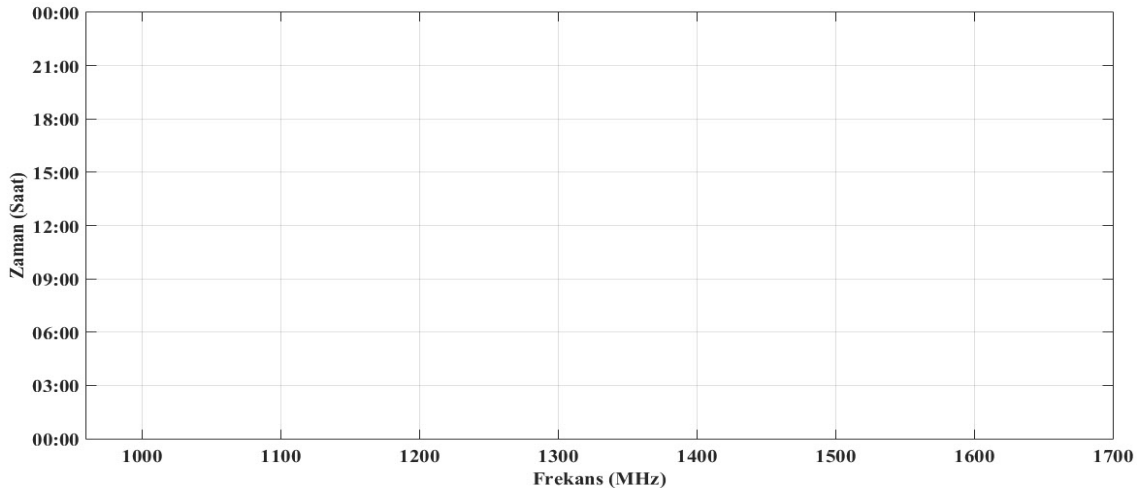
Ölçüm sonuçlarının verildiği son frekans aralığı olan 2500-3000 MHz bandı Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Spektrumun bu bölgesi daha önce de belirtildiği üzere hava seyrüsefer, askeri radar, radyo astronomi ve uzay araştırma uygulamaları için tahsis edilmiştir. Ancak 4.5G ihalesinin ardından bu uygulamada kullanılması için 2500-2670 MHz frekans aralığı BTK tarafından mevcut üç farklı operatöre kiralanmıştır. Ölçüm çalışmalarında herhangi bir yayına rastlanmamasına rağmen 2800 MHz frekansında yayına benzeyen bir güç sezilmiş fakat eşik değerinin altında bir seviyede kalmıştır. Bu

frekans; askeri radar ve seyrüsefer uygulamaları için BTK tarafından tahsis edilen bölgedir.

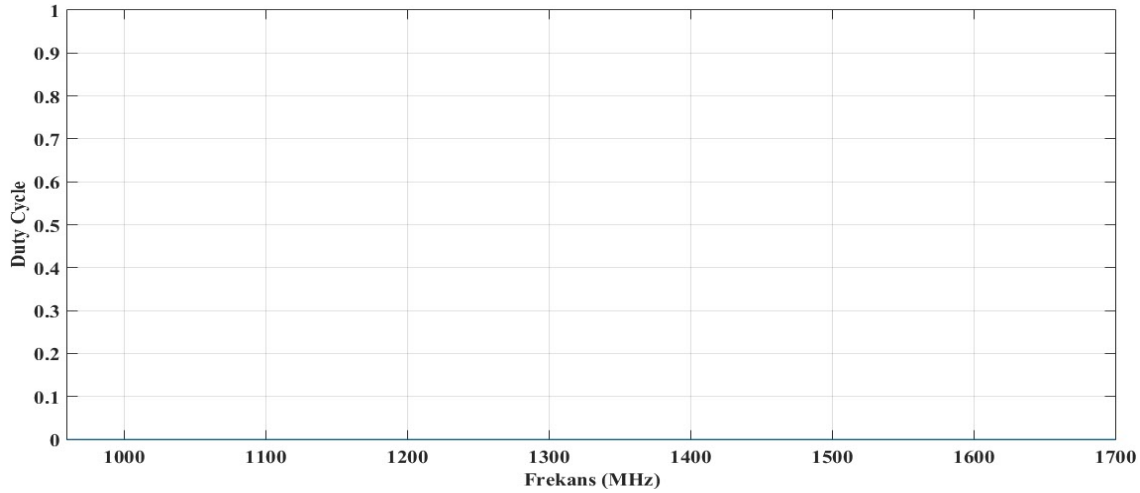
Şekil 4.27, otuz beş gün süren Karatay ilçesi ölçüm çalışmasının tüm frekans bantları için sonuçlarını ortaya koymaktadır. Selçuklu ilçesine benzer bir sonuç bu ilçe içinde ortaya çıkmıştır. 230-470 MHz bant aralığının açıkça kullanılmadığı göze çarpmaktadır. 1 GHz'in altındaki bölgenin kullanımı nispeten 1GHz'in üstüne göre oldukça fazladır. 960-1700 ve 2300-3000 MHz frekans aralıklarının boş olması spektrumun oldukça atıl şekilde kullanıldığının bir göstergesi olup, sabit frekans tahsis metodunun da sorgulanmasının ne kadar haklı olduğunu ispatlamıştır. 4.5G uygulamasının hayata geçmesi ile spektrumun daha yoğun olarak kullanılacağı bir gerçek ise de bilişsel radyo uygulamaları için oldukça çok frekans boşlukları mevcuttur. Karatay ilçesi için 25-3000 MHz frekans aralığında elde edilen doluluk oranı %4.46 olmuştur. Bu ilçe için elde edilen sonuçlar Şekil 4.28 de özetlenerek bant-bant gösterilmiştir.



a)

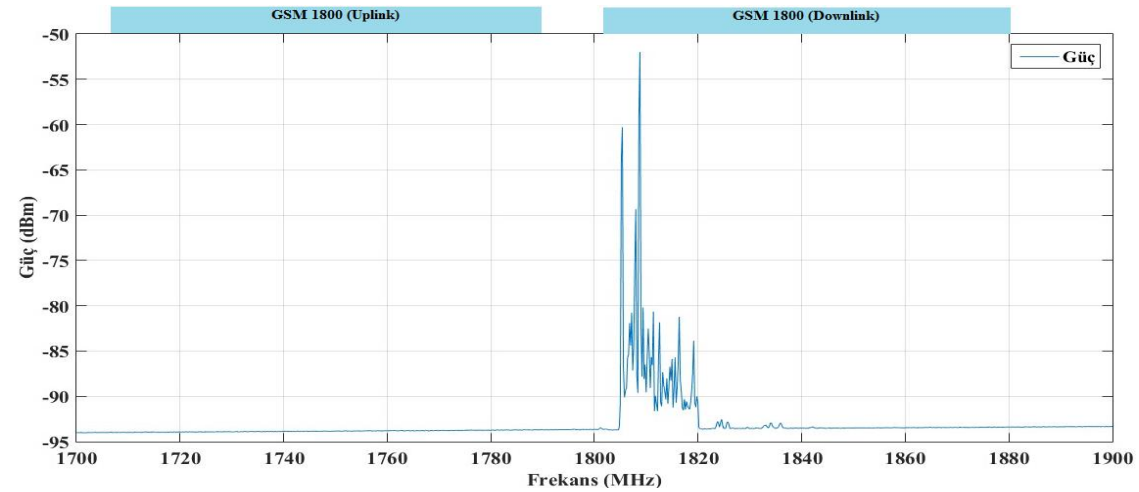


b)

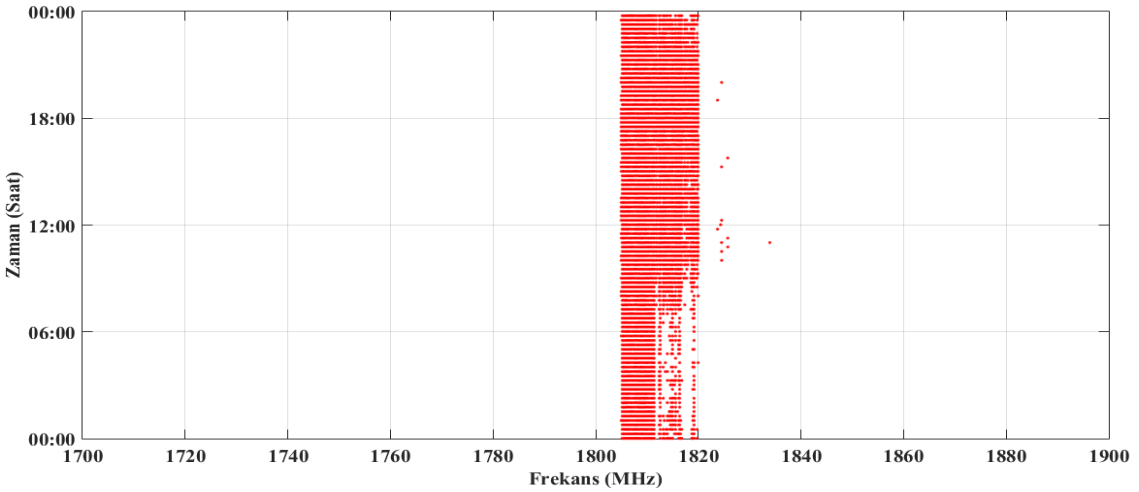


c)

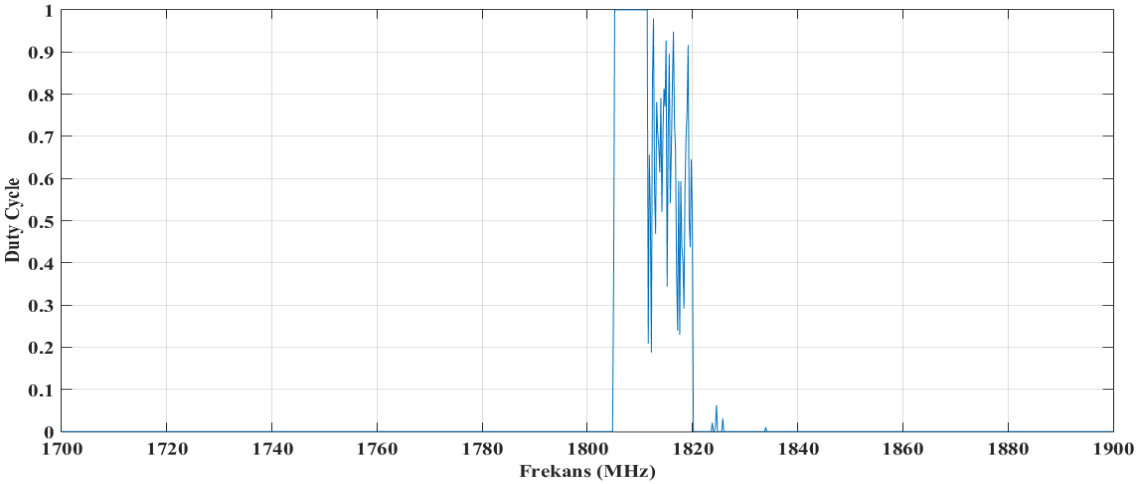
Şekil 4.22 960-1700 MHz Frekans Aralığı



a)

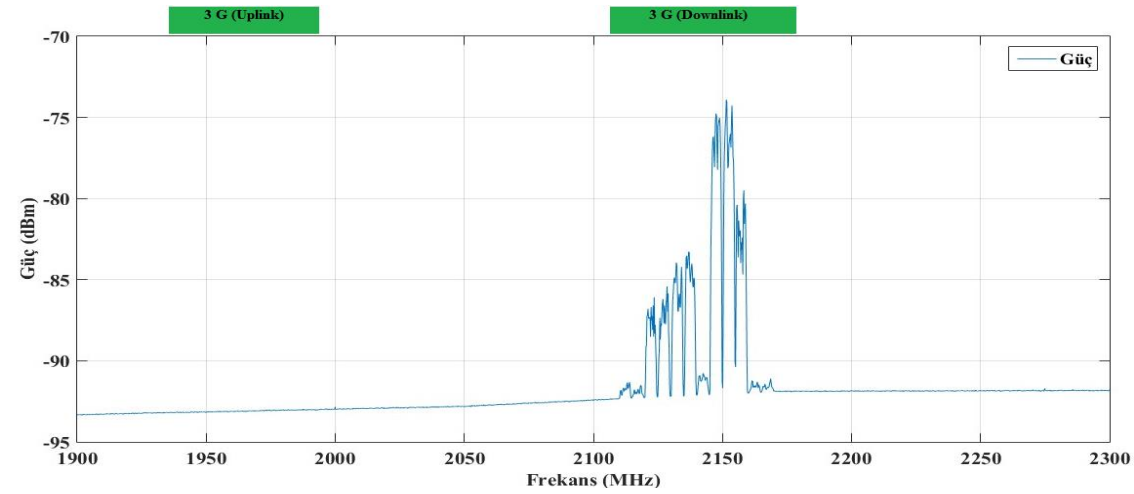


b)

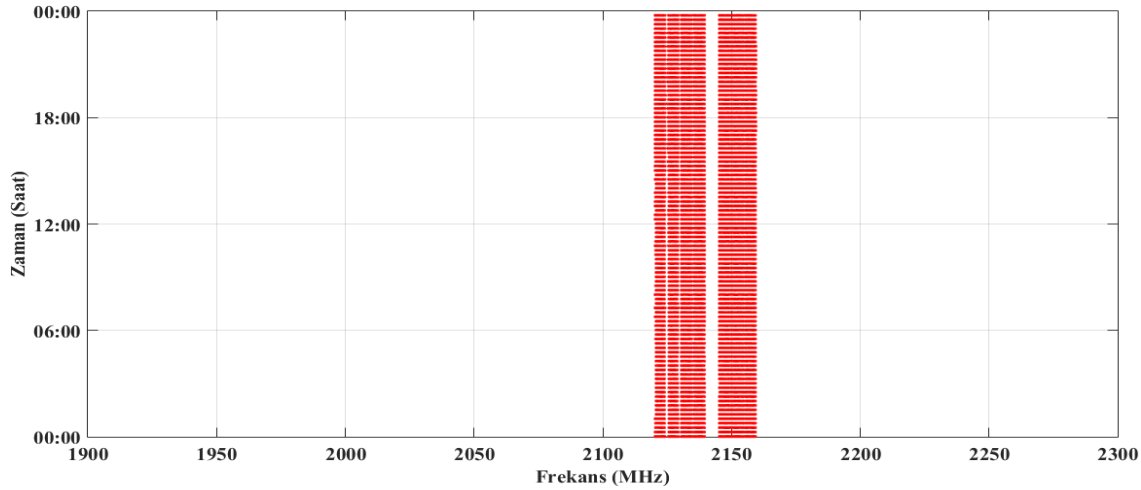


c)

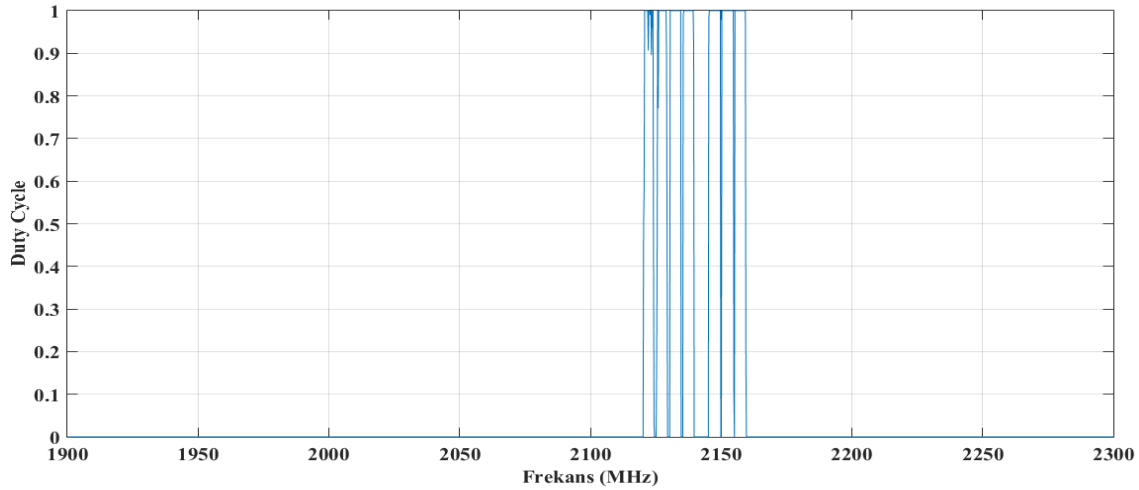
Şekil 4.23 1700-1900 MHz Frekans Aralığı



a)

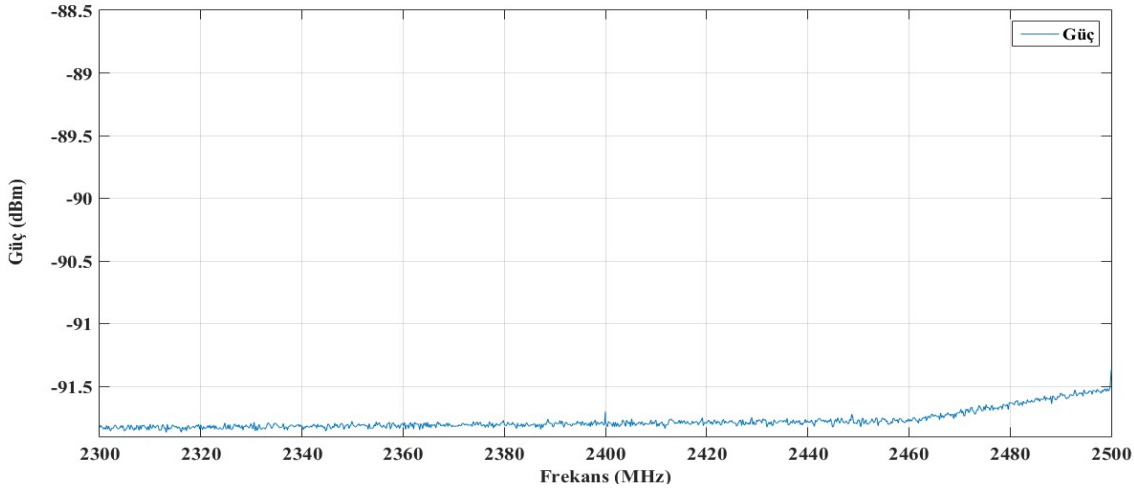


b)

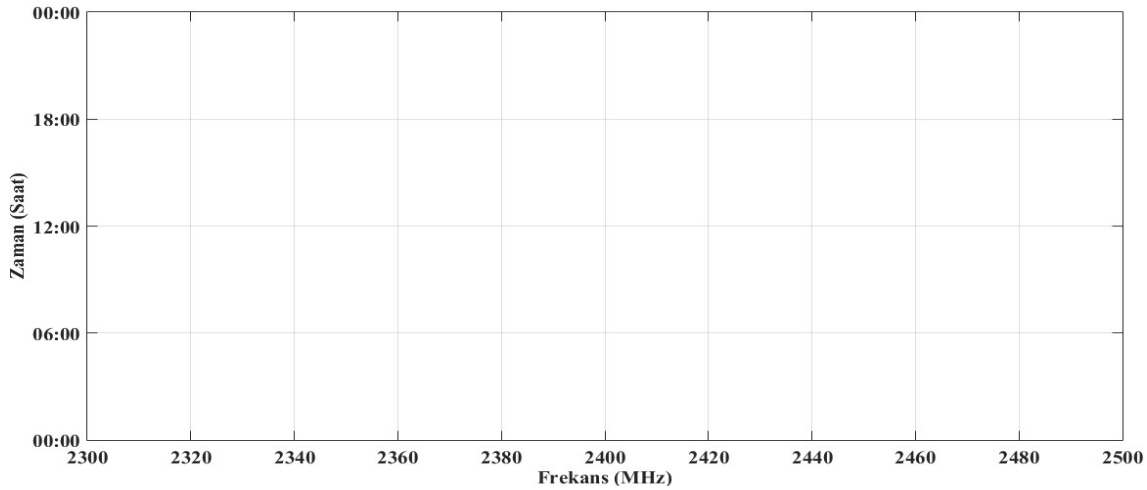


c)

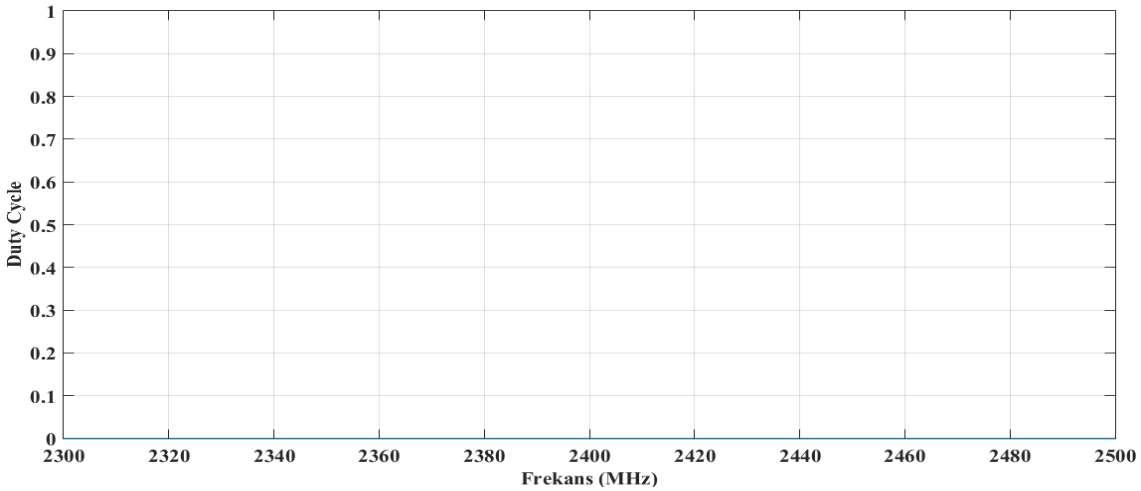
Şekil 4.24 1900-2300 MHz Frekans Aralığı



a)

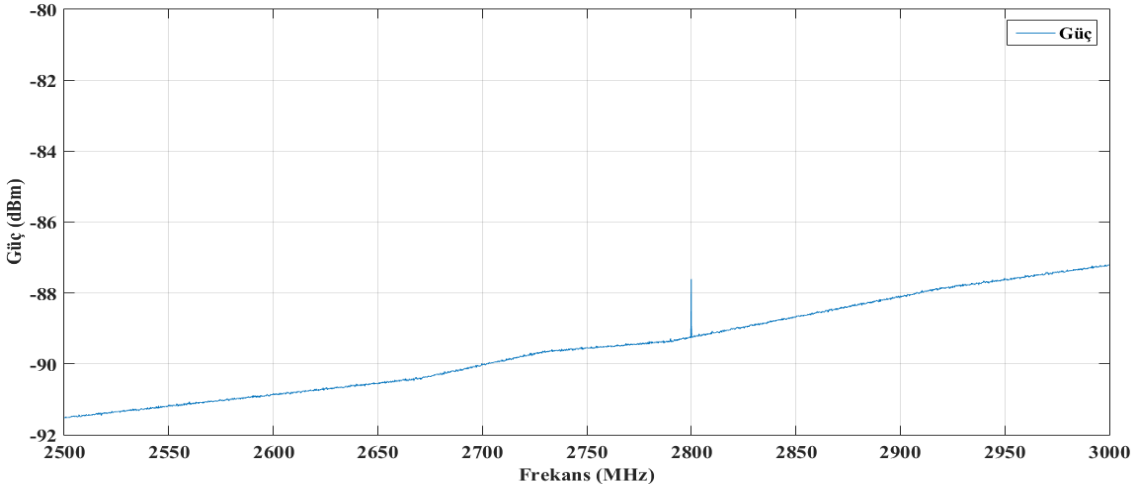


b)

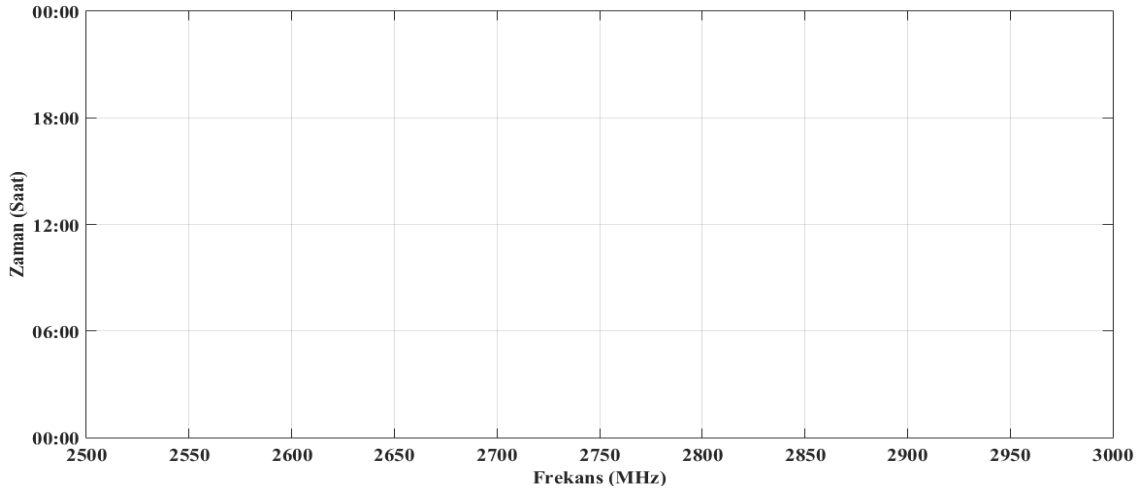


c)

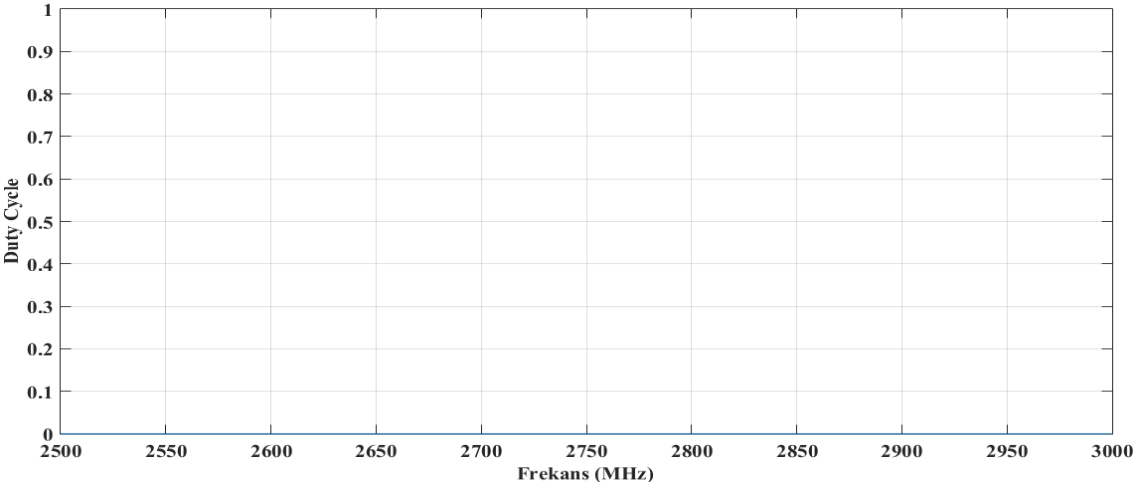
Şekil 4.25 2300-2500 MHz Frekans Aralığı



a)

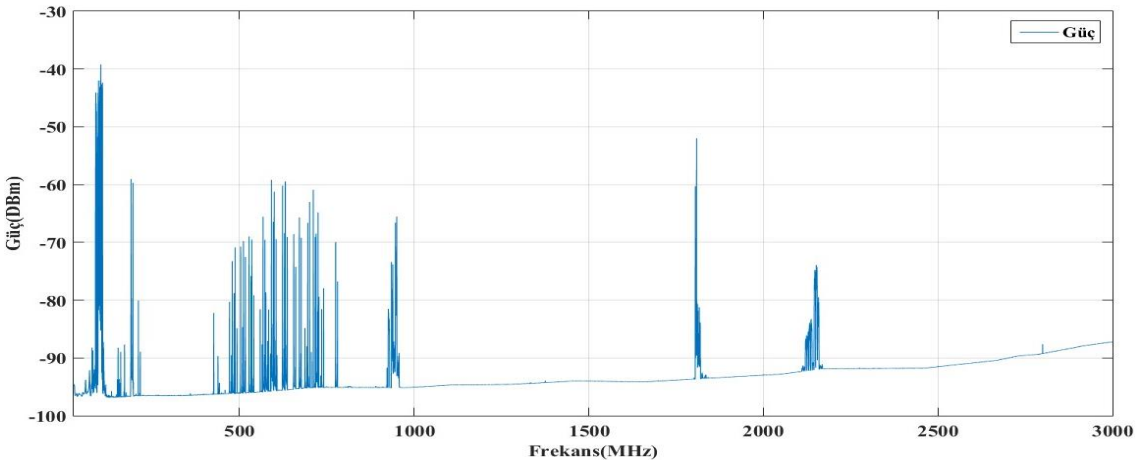


b)

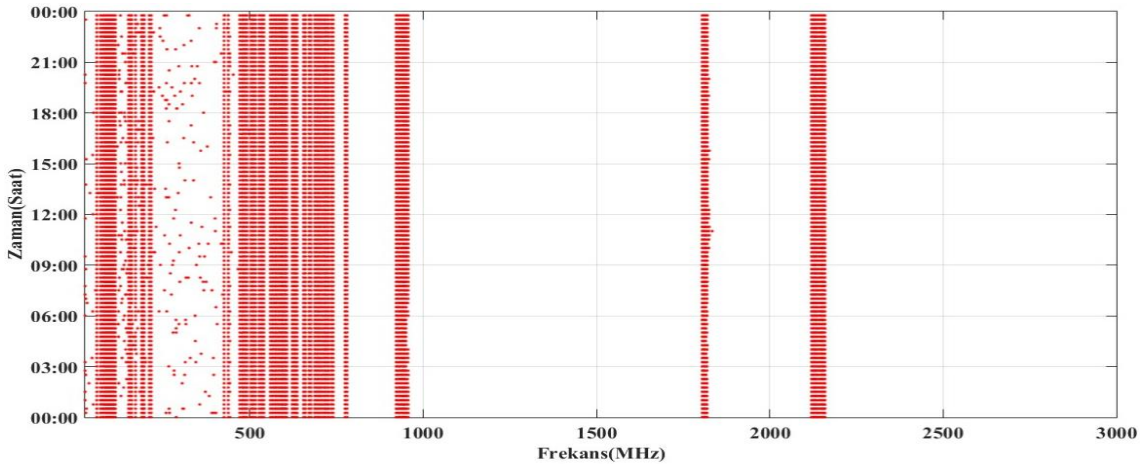


c)

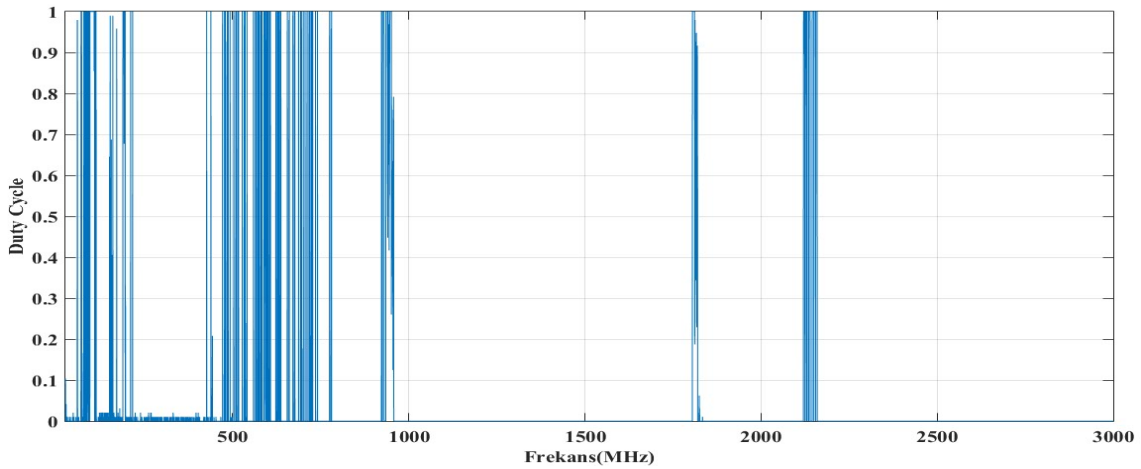
Şekil 4.26 2500-3000 MHz Frekans Aralığı



a)

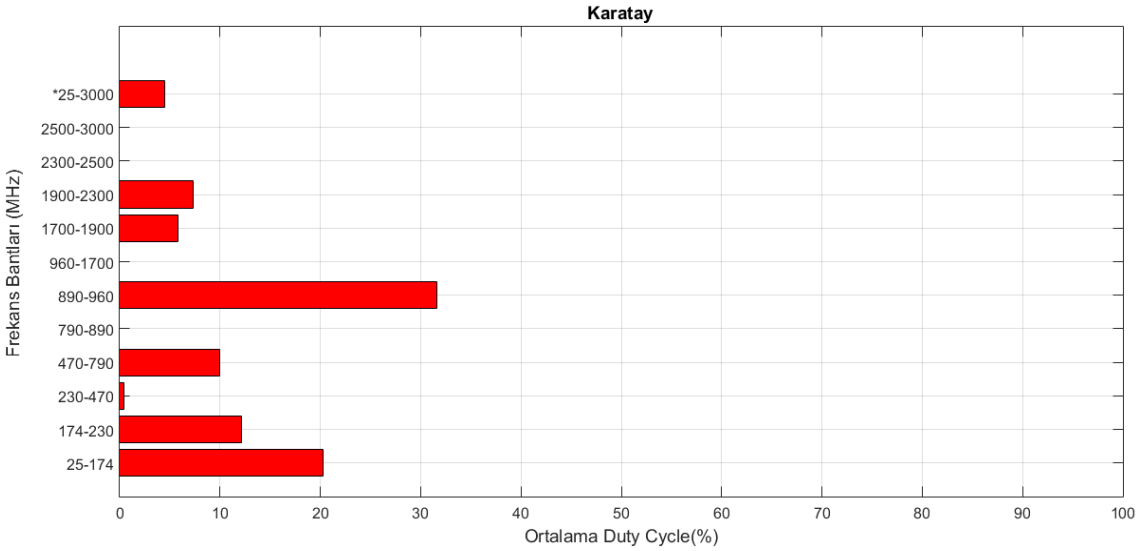


b)



c)

Şekil 4.27 25-3000 MHz Frekans Aralığı



Şekil 4.28 Karatay ilçesi için bant-bant ortalama doluluk istatistiği

4.3. Meram İlçesi Ölçümleri ve Sonuçları

Meram ilçesi ölçümleri için bağ ve tarlaların yoğun olarak bulunduğu Hatıp Mahallesi seçilmiştir. Karatay ölçümlerinin bitmesinin ardından yaklaşık bir aylık bir aradan sonra ölçüm sistemi 20 Şubat 2016 tarihinde ölçüm noktasına kurulmuştur. 14 Mart 2016 tarihine kadar ölçüm yapılmıştır. Ancak hava şartları ve bölgeye ulaşımın sürekli sağlanamaması gibi nedenlerden sadece 15 günlük veri elde edilmiştir. Bölge vericilerin bulunduğu bölgeye yaklaşık 14 km mesafede olup şehir merkezine göre yüksek bir konumdadır. Müstakil bir evin çatısına kurulan sistem Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Sistemin kurulumu için yüksek ve vericilere doğrudan bakış açısına sahip bir bina olması tercih edilmiştir. Ölçüm çalışmalarında Karatay ilçesinde olduğu gibi kuvvetlendirici kullanılmamıştır. Sebepler diğer ilçedeki sebepler ile örtüşmektedir. Spektrum analizörün parametreleri diğer ölçüm noktalarında olduğu gibi aynı kalmıştır. Gürültü ölçümü gerçekleştirildikten sonra 24 saatlik ölçüm işlemi başlamıştır. Bazı frekans bantları için Meram ilçesinde hesaplanan eşik değerleri Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.29 Meram İlçesi Ölçüm Noktası (https://www.google.com.tr/maps/)

Çizelge 4.4. Bazı Frekans Bantlarının Meram İlçesi İçin Hesaplanan Eşik Değerleri

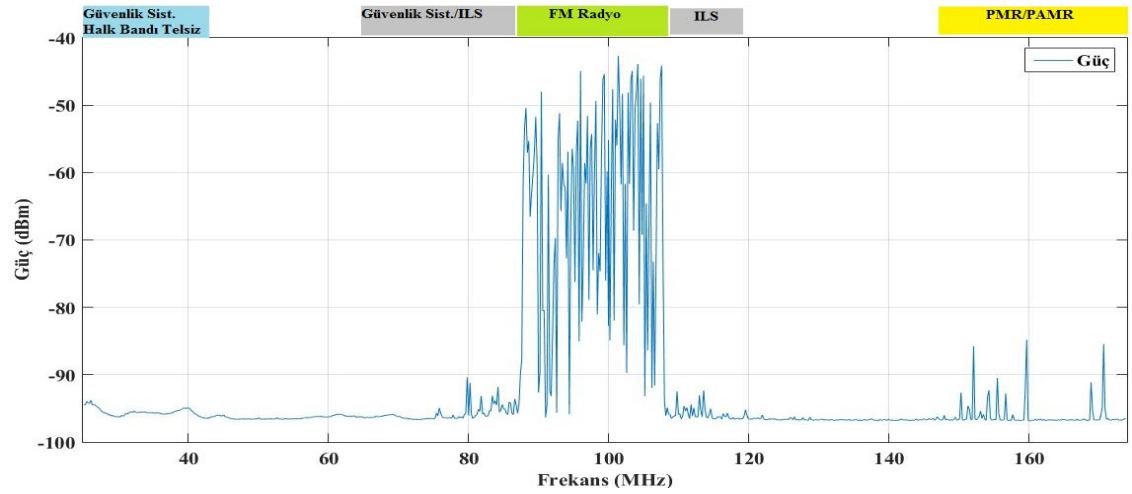
Frekans Bantları	**Değer**
FM Radyo (88-108 MHz)	-94.80 dBm
VHF TV (174-216 MHz)	-94.54 dBm
UHF TV (470-790 MHz)	-93.36 dBm
GSM 900 (890-960 MHz)	-93.08 dBm
GSM 1800 (1800-1820 MHz)	-91.47 dBm
UMTS (2110-2170 MHz)	-90.00 dBm
ISM (2400-2480 MHz)	-89.70 dBm

Bu ilçedeki 25-174 MHz frekans aralığı ölçüm sonuçları Şekil 4.30'da gösterilmiştir. AM analog ses yayını, genel amaçlı KET, halk bandı telsiz, güvenlik sistemleri gibi uygulamalar için tahsis edilen frekans bantları için yayınlar alınmıştır. Bunun yanı sıra hava seyrüsefer için tahsis edilen frekanstan da aktivite tespit edilmiştir. Diğer bölgelerde olduğu gibi FM radyo yayını bu bölgede de yoğun olarak tespit edilmiştir. 150-170 MHz bant aralığında bulunan özel mobil radyo ve özel erişim mobil radyo uygulamalarının da spektrumu işgal ettiği belirlenmiştir. 149 MHz'lik frekans aralığı için elde edilen doluluk oranı %19.75'tir.

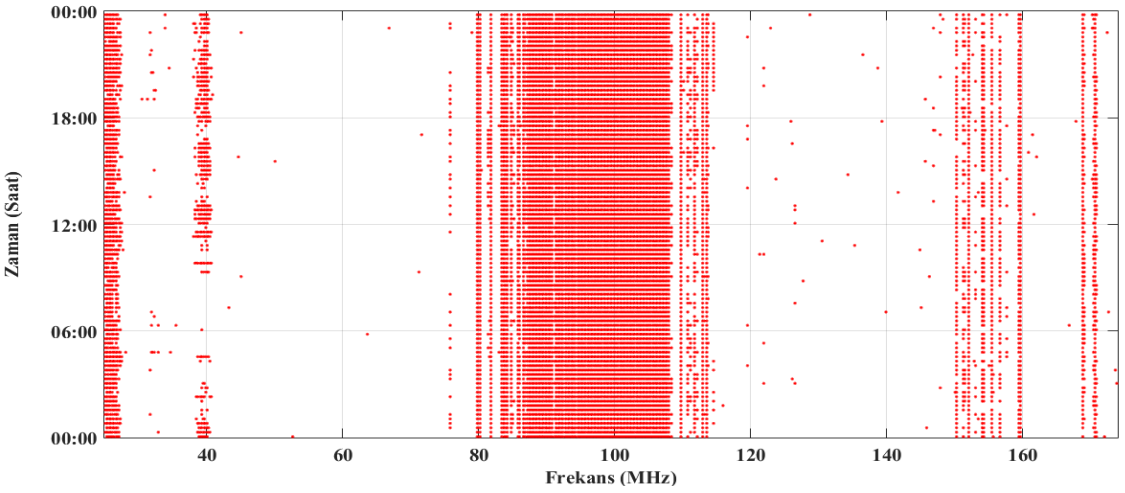
Karasal VHF-TV yayının bulunduğu 174-230 MHz frekans aralığı ölçüm sonuçları Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Diğer bölgelere benzer sonuçlar elde edilmiş olup ortalama doluluk oranı % 5.97 olarak hesaplanmıştır. 216-230 MHz gelecekte karasal sayısal radyo yayınları için tahsis edilmesi planlandığından bu bandın gelecekte daha yoğun bir şekilde kullanılacağı tahmin edilmektedir.

Spektrumun 1 GHz'in altındaki en atıl frekans aralığı olarak diğer bölgelerde de tespit edilen 230-470 MHz frekans aralığı bu ölçüm noktasında da benzer özellikler göstermektedir. Çoğunlukla askeri hava yer hava haberleşmesi ve radar uygulamaları için tahsis edilen spektrumun bu bölümünde ölçüm noktasının olduğu bölgede 425 MHz'e kadar herhangi bir yayının varlığı tespit edilememiştir. Elde edilen yayınlar ise özel amaçlı mobil radyo uygulamaları için tahsis edilen frekans bantlarında olmuştur. Şekil 4.32 incelendiğinde sonuçlar daha ayrıntılı bir şekilde görülecektir. Bu frekans aralığı için ortalama doluluk oranı %0.53 olarak bulunmuştur. Bu ise neredeyse spektrumun bu bölgesinde hiçbir aktivitenin olmadığını ispatlamaktadır.

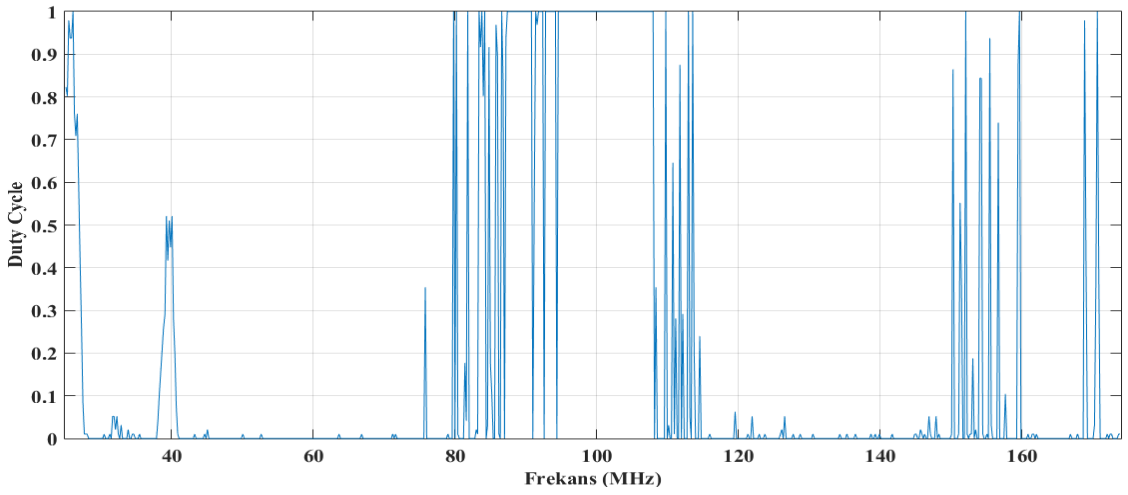
470-790 MHz frekans aralığı için ölçüm sonuçları Şekil 4.33'de gösterilmiştir. UHF TV bandı olarak bilinen frekans aralığında Konya ilinde mevcut olan ulusal kanalların yayınları algılanmıştır. Çalışma kapsamında TV yayınlarının 8 MHz band genişliğinde yayın yaptığı belirlenmiş olup bu frekans aralığında düşük frekanslarda görüntü iletimi yapılırken birkaç MHz daha yüksek frekansta ses iletimi yapıldığı tespit edilmiştir. Dijital yayına geçişle spektrumun verimli kullanımı oldukça artmış olacaktır. Bu bant aralığı için bu bölgede elde edilen doluluk oranı %5.06 olmuştur.



a)

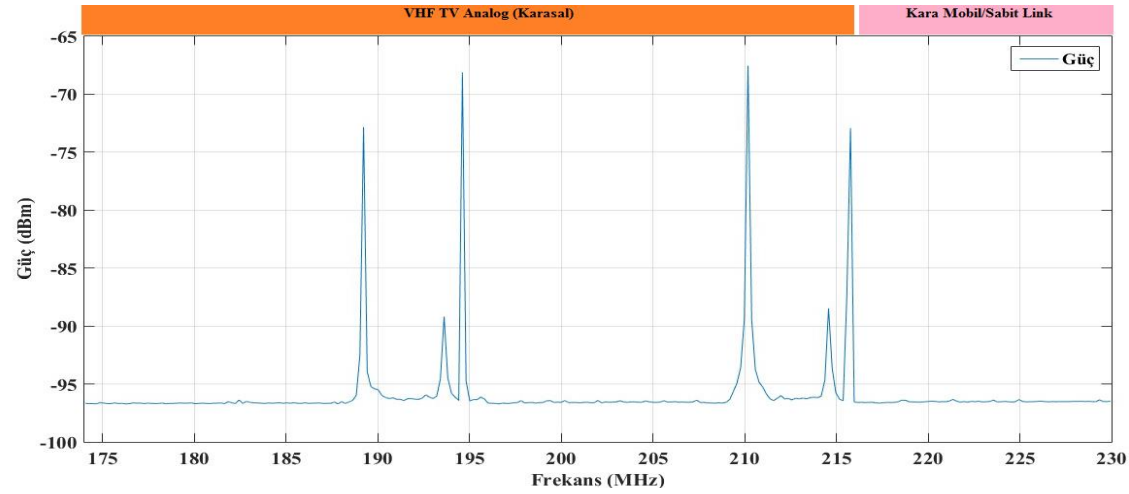


b)

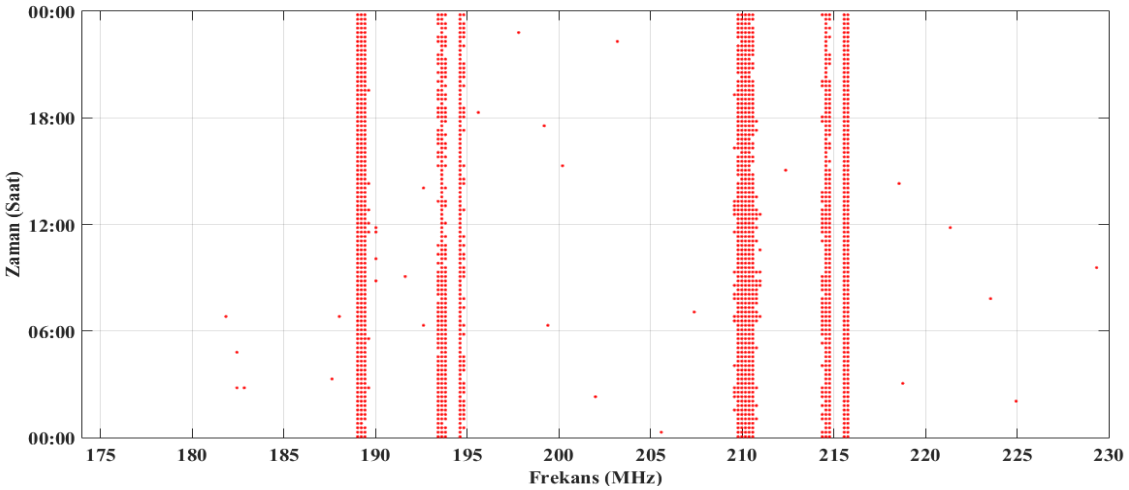


c)

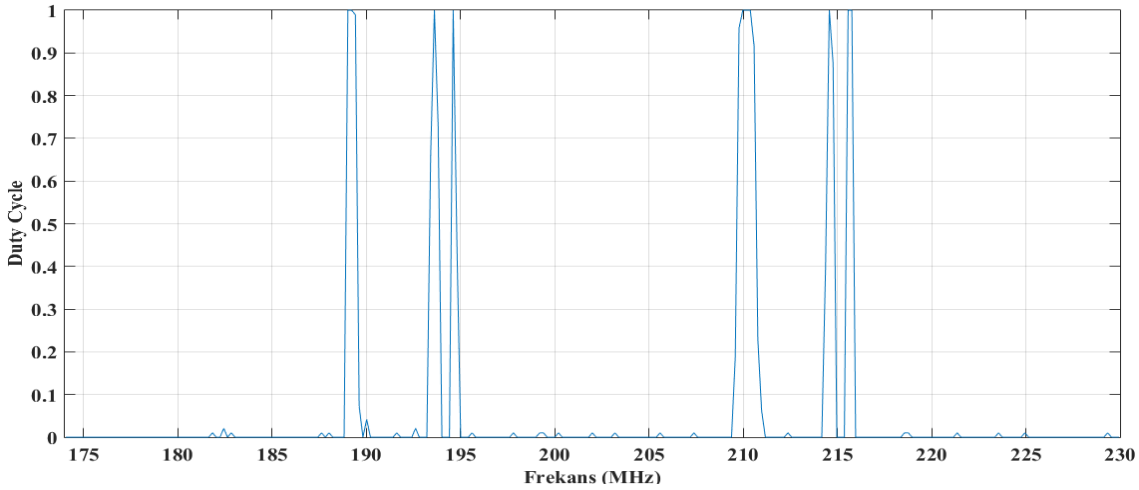
Şekil 4.30 25-174 MHz Frekans Aralığı



a)

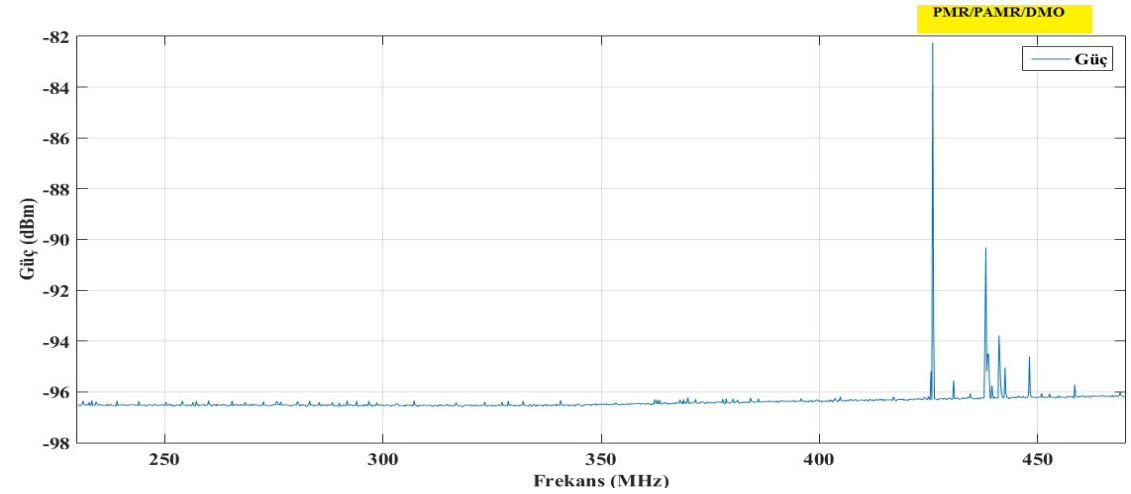


b)

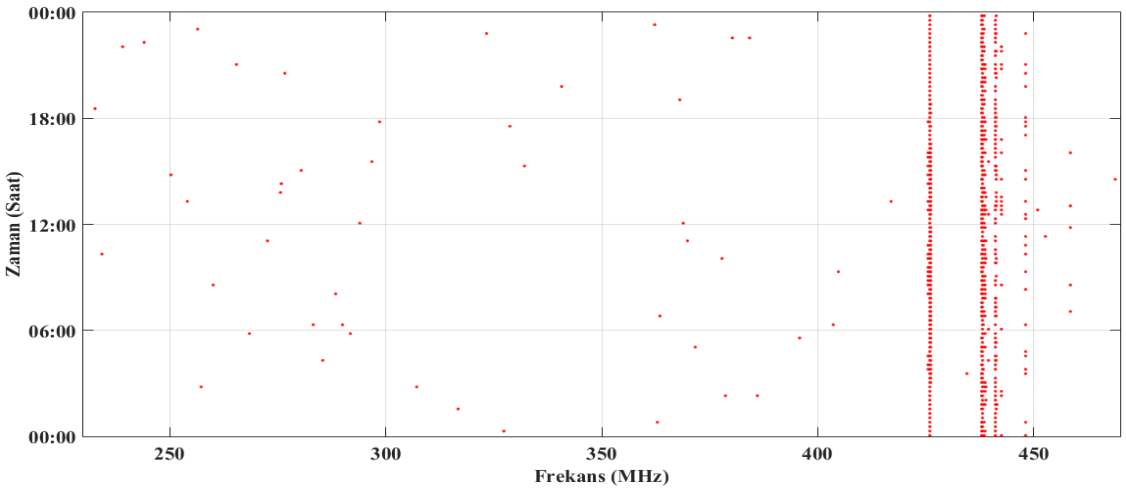


c)

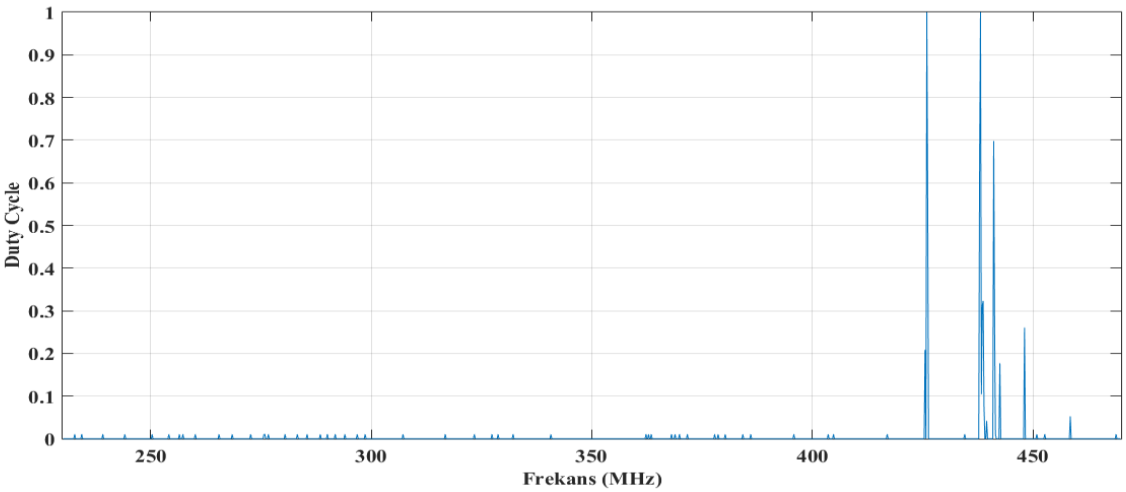
Şekil 4.31 174-230 MHz Frekans Aralığı



a)

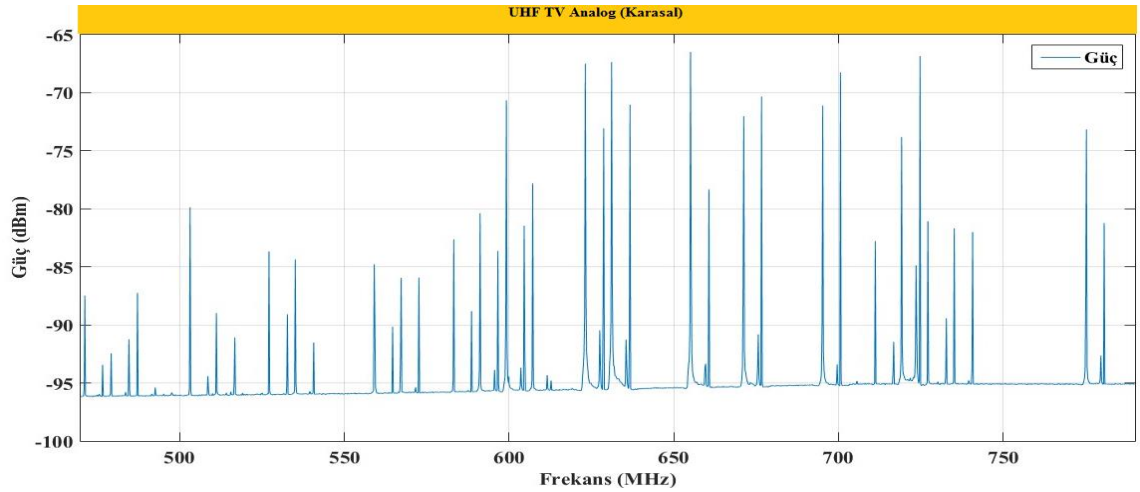


b)

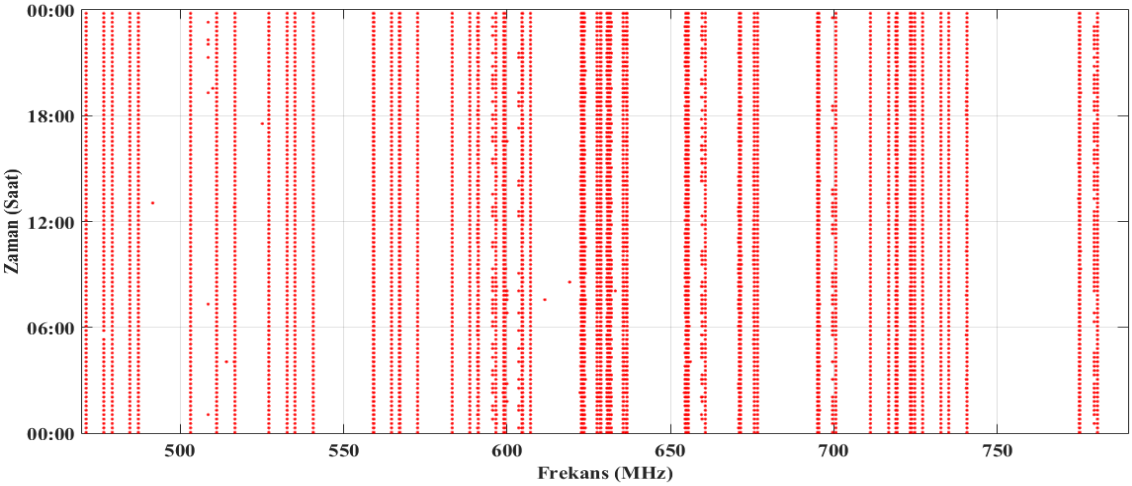


c)

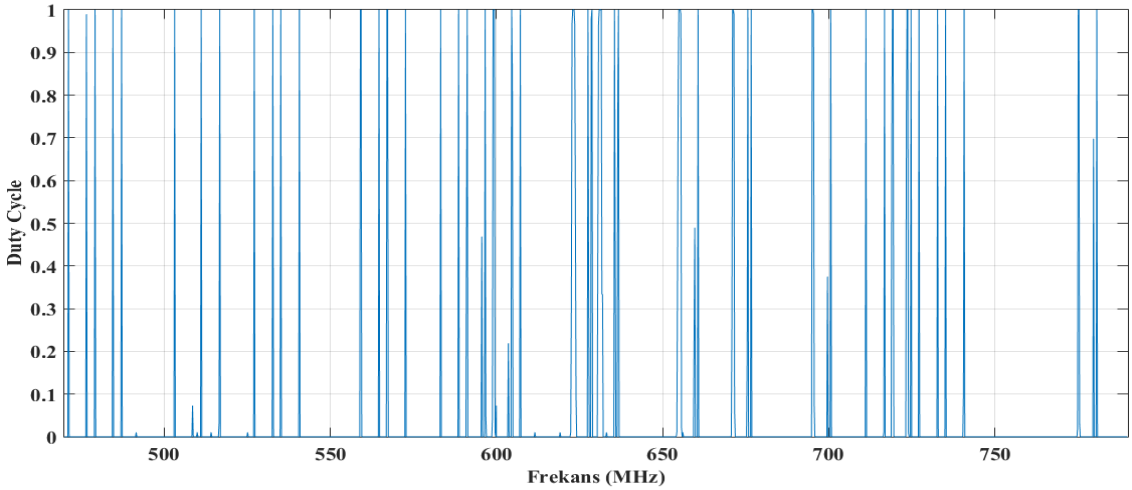
Şekil 4.32 230-470 MHz Frekans Aralığı



a)



b)



c)

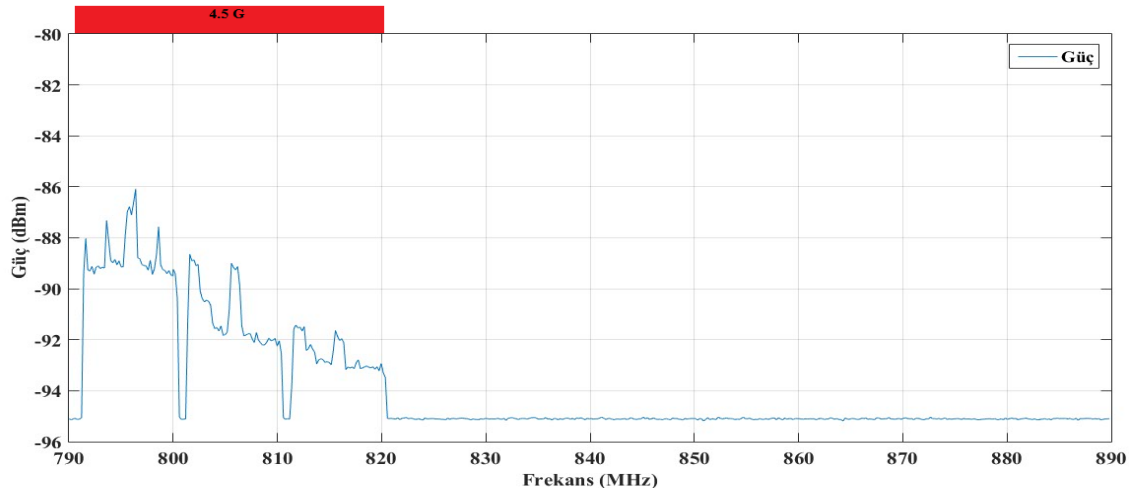
Şekil 4.33 470-790 MHz Frekans Aralığı

790-890 MHz frekans bandı daha önce ifade edildiği gibi 4.5G uygulamaları için tahsis edilmişti. İlk ölçüm noktası için RFID uygulaması tespit edilmiş ancak ikinci ölçüm noktası için bu frekans bandında her hangi bir yayın tespit edilememişti. Fakat 1 Nisan 2016 tarihinde Türkiye'de 4.5G'ye geçilmesi ve ölçüm tarihinin bu tarihe oldukça yakın olası nedeniyle 790-820 MHz 4.5G downlink frekans aralığında yayınların varlığı bu ölçüm noktasında tespit edilmiştir. Üç farklı operatörün de 10 MHz'lik bant genişliğine sahip test yayını Şekil 4.34'teki sonuçlardan görülebilmektedir. O dönem herhangi bir kullanıcı olmaması uplink frekansı düşünüldüğünde boşlukların oluşmasını açıklamaktadır. Bir diğer görüş ise uplink frekans bantlarının yayınlarının algılanamamasıdır. 100 MHz'lik frekans aralığı için elde edilen doluluk oranı % 25.04'tür.

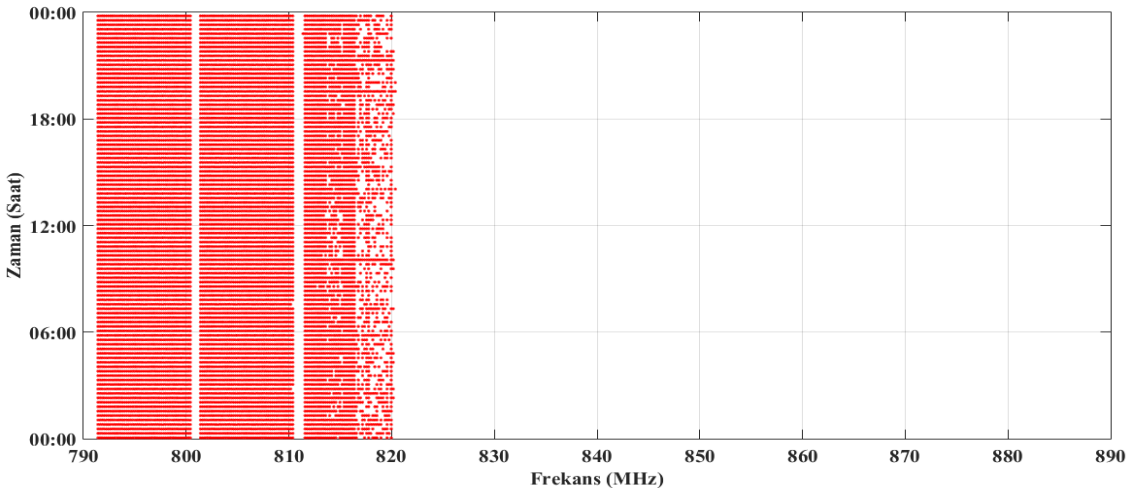
Bu ölçüm noktası için 890-960 MHz frekans aralığı sonuçları incelendiğinde GSM-R ve GSM 900 downlink frekans bandının yoğun olarak kullandığı görülmektedir. Ayrıca 925-935 MHz 4.5G frekans aralığının da artık aktif bir şekilde kullanıldığı tespit edilmiştir. GSM 900 downlink bandı 24 saat boyunca neredeyse tamamen kullanılmaktadır. GSM 900 downlink bandı için bu ölçüm noktasında elde edilen doluluk oranı %83.13'tür. 70 MHz'lik tüm frekans aralığı için hesaplanan ortalama doluluk oranı ise %42.14 olmuştur. Şekil 4.35'te bu frekans aralığı için ölçüm sonuçları sunulmuştur.

Şekil 4.36, 960-1700 MHz frekans aralığı için ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Birçok uygulamayı içinde barındıran bu bant için Karatay ölçüm noktasında olduğu gibi Meram ölçüm noktasında da herhangi bir doluluk tespit edilememiştir.

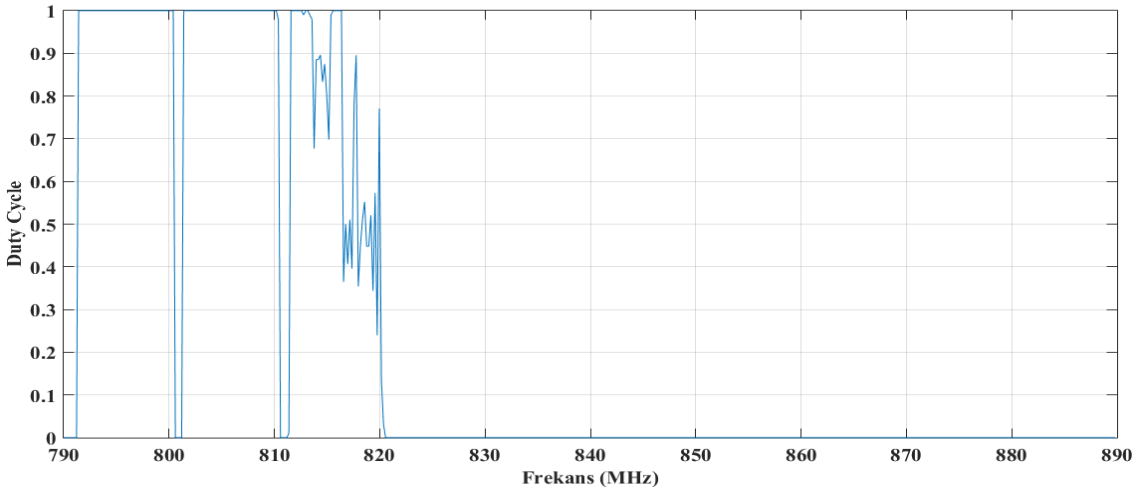
GSM1800 bandını içinde kapsayan 1700-1900 MHz frekans bant aralığı sonuçları Şekil 4.37'de verilmiştir. 1710-1785 MHz GSM uplink bandı ortalama doluluk oranı için kayda değer bir sonuç alınamamıştır. 200 MHz'lik bant aralığında sadece tek bir operatörün downlink bandından yayın tespiti yapılmıştır. DECT uygulaması için de bu bölgede herhangi bir güç alımı söz konusu olmamıştır. GSM 1800 downlink bandı (1805-1880 MHz) için hesaplanan doluluk oranı %13.43'tür. Tüm frekans aralığı için ortalama doluluk oranı ise %5.03 olarak bulunmuştur.



a)

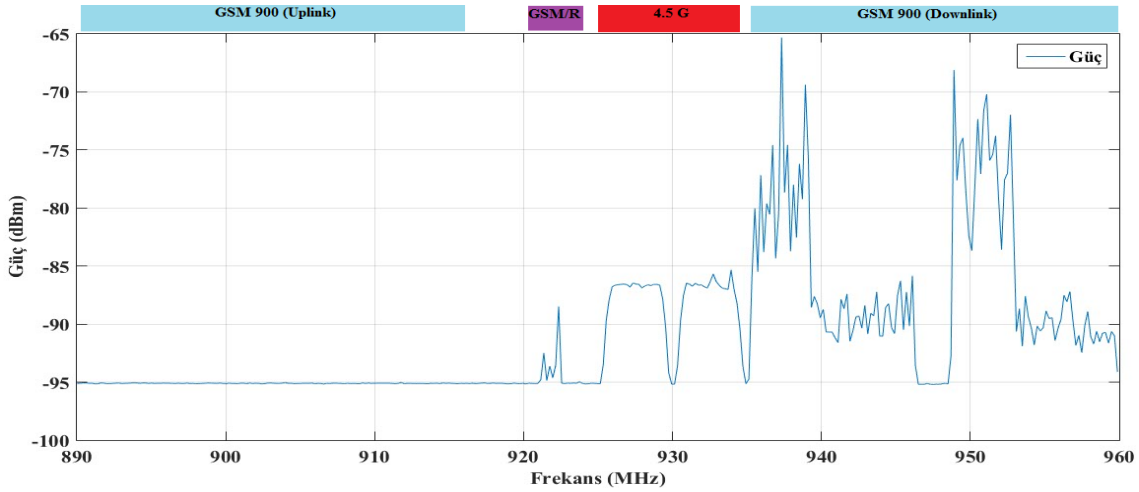


b)

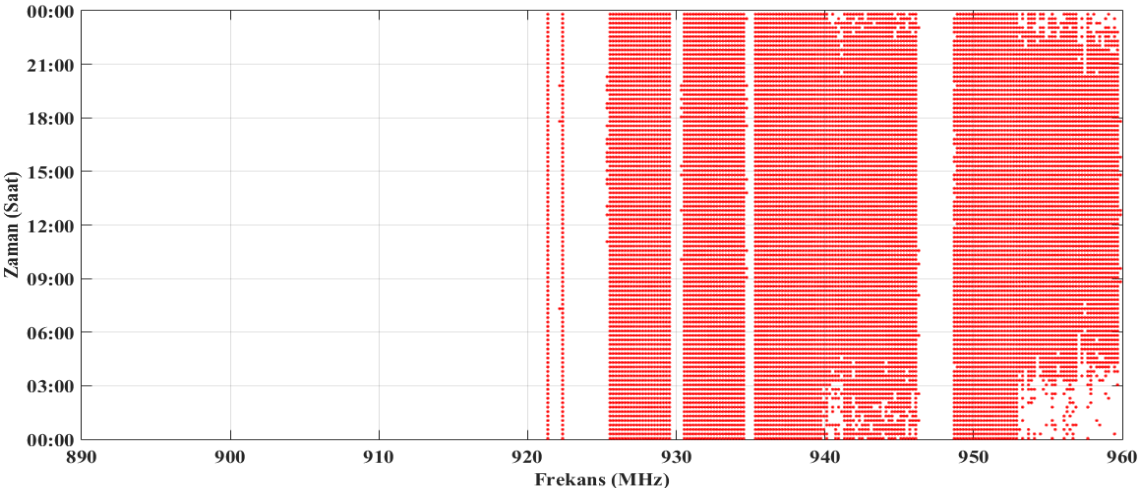


c)

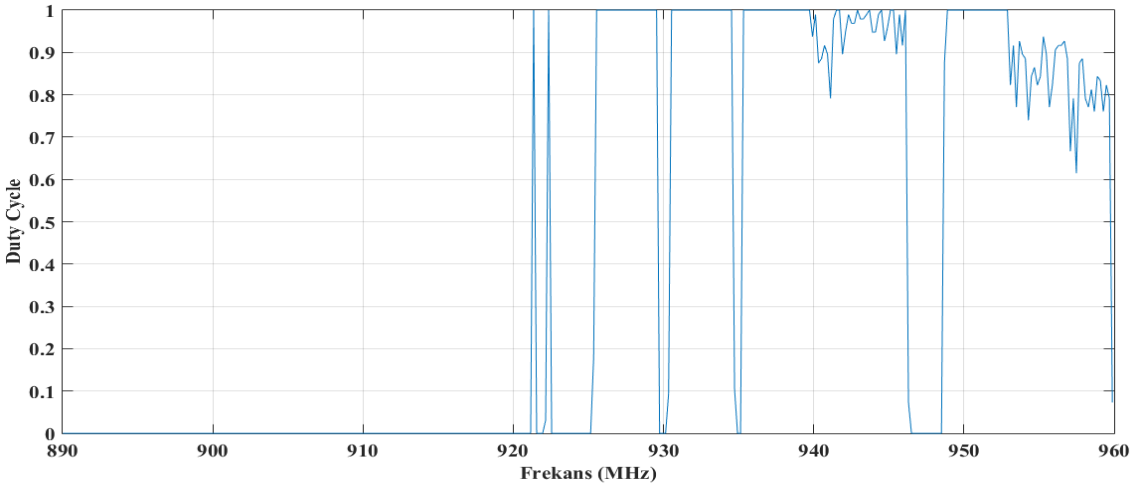
Şekil 4.34 790-890 MHz Frekans Aralığı



a)

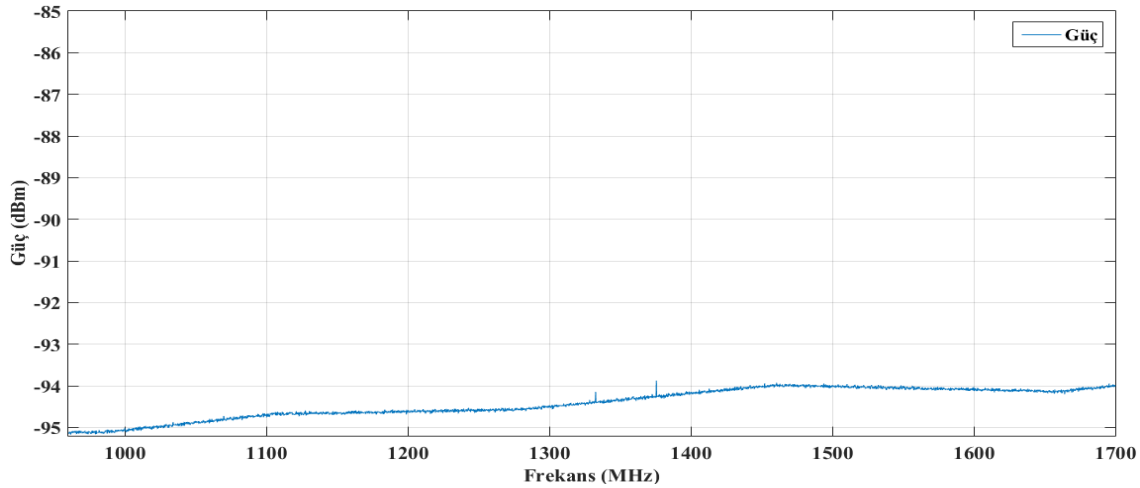


b)

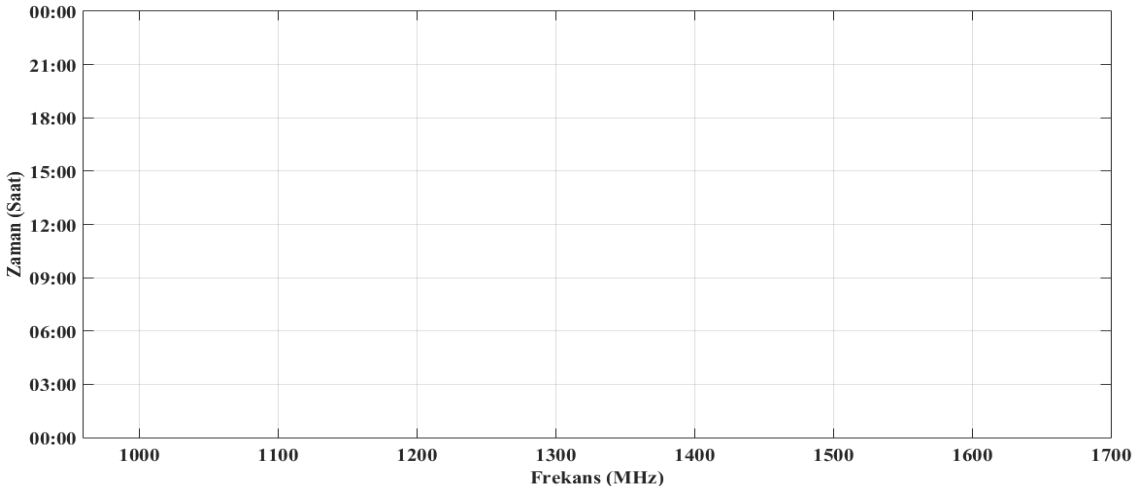


c)

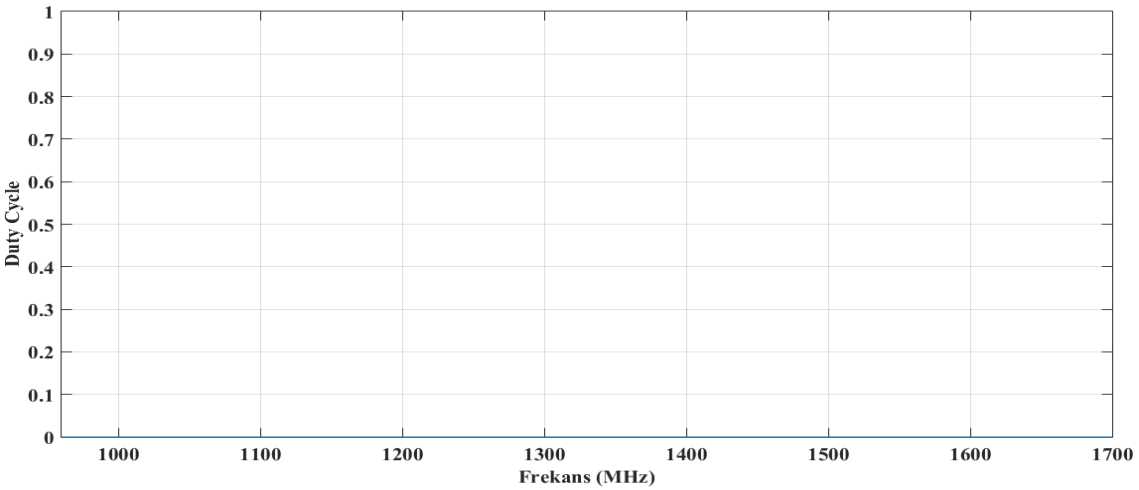
Şekil 4.35 890-960 MHz Frekans Aralığı



a)

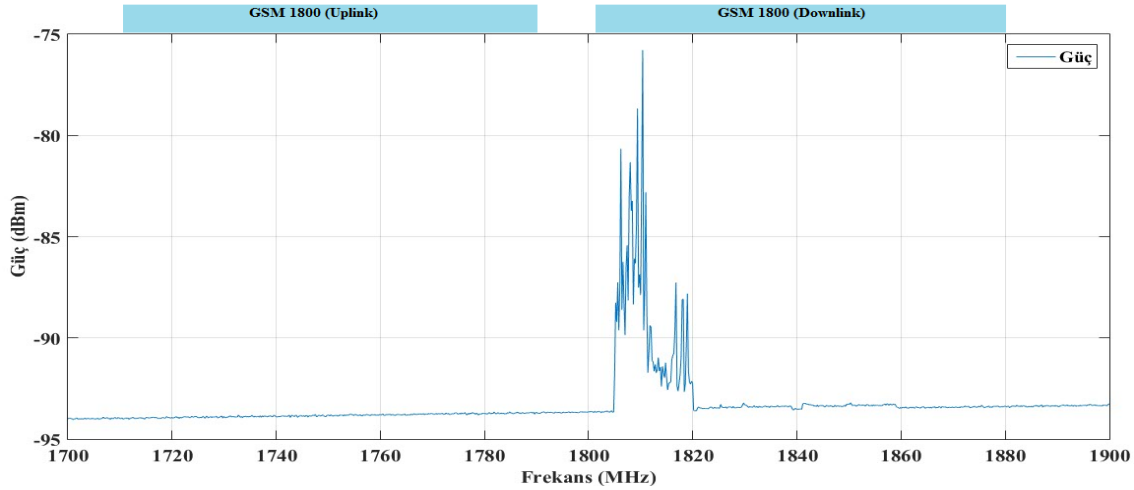


b)

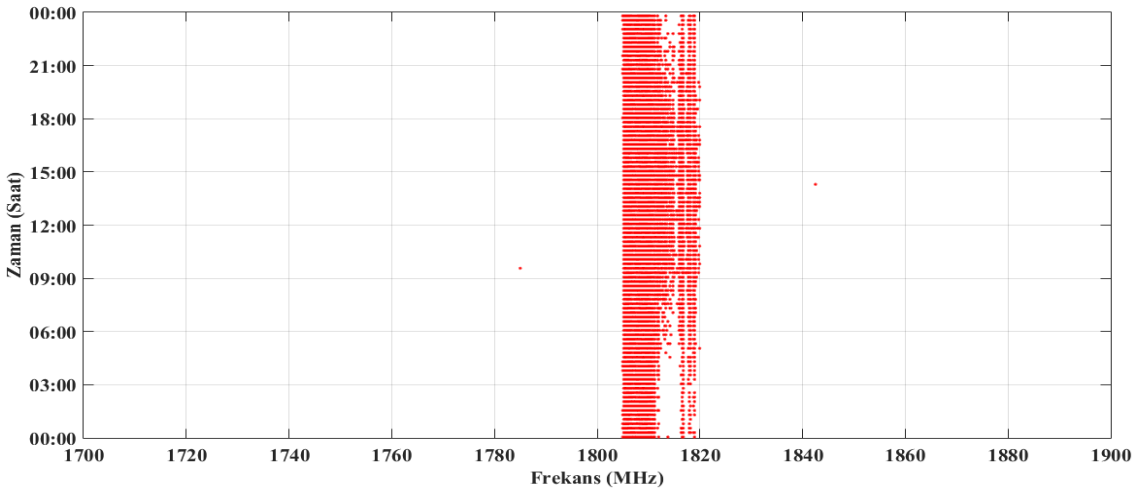


c)

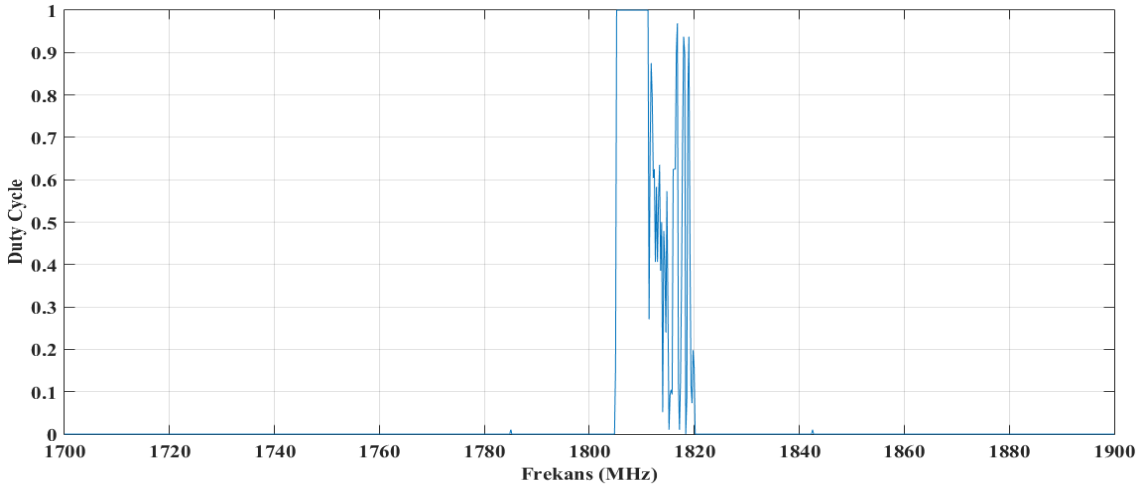
Şekil 4.36 960-1700 MHz Frekans Aralığı



a)



b)



c)

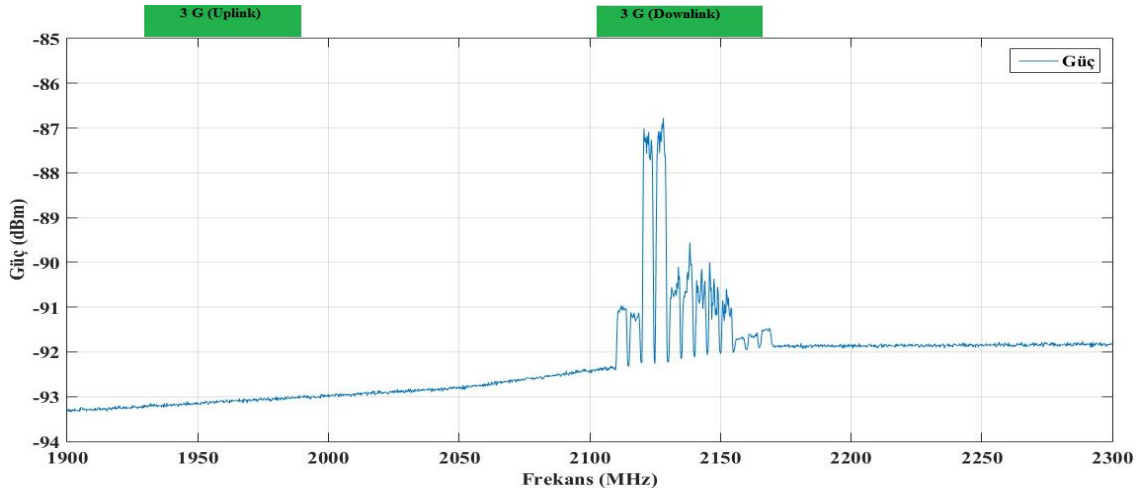
Şekil 4.37 1700-1900 MHz Frekans Aralığı

Şekil 4.38'de Meram ölçüm noktasından spektrumun 1900-2300 MHz frekans aralığı için sonuçları görülmektedir. Diğer iki ölçüm noktasına benzer şekilde 400 MHz'lik frekans bant aralığında sadece 2110-2170 MHz frekans aralığında yayın varlığı tespit edilmiştir. Bu bölge 3G uygulamasının downlink bandına tahsis edilmiştir. Ölçüm noktasına muhtemelen bazı operatörlerin vericilerinin uzak olması nedeniyle bandın tamamının dolu olmadığı görülebilmektedir. 3G downlink bandında elde edilen ortalama spektrum doluluk oranı %16.70'tir. Tüm frekans için bu oran %2.50 olarak hesaplanmıştır.

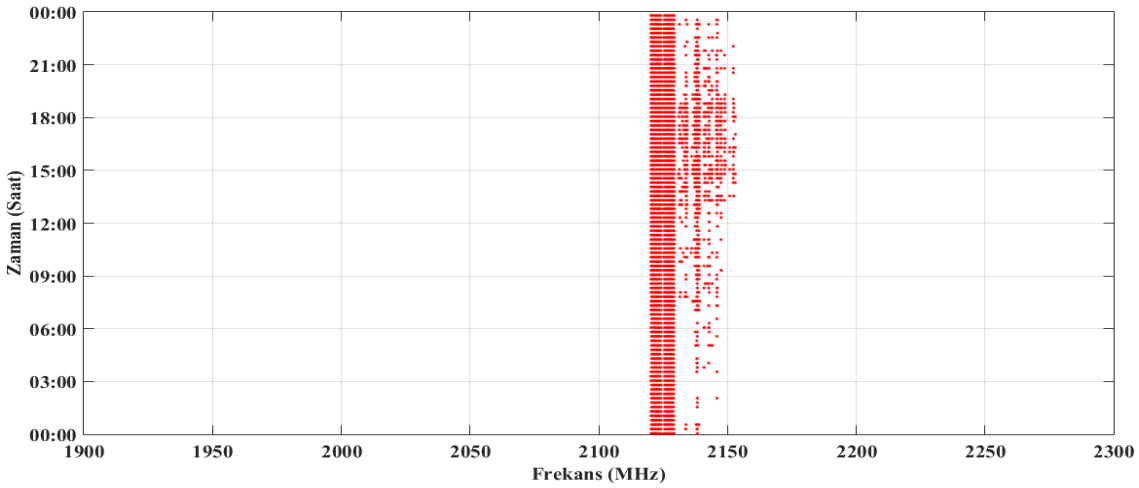
ISM bandını da içine alan 2300-2500 MHz frekans aralığını kapsayan sonuçlar Şekil 4.39'da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde eşik değerini aşan her hangi bir yayın varlığı tespit edilememiştir. Bunun sebebi ISM bandında yayın yapan cihazların düşük güçlü olmaları gösterilebilir. Ayrıca bölgenin fazla kalabalık olmayışı bir diğer etken olarak düşünülmektedir. 2410-2460 MHz arasında bir yayın algılanması görülmekte fakat eşik değerinin altında olmasından bir doluluktan söz edilememektedir. Sonuç olarak 200 MHz'lik frekans aralığı için hesaplanan doluluk oranı %0 olmuştur.

4.5G uygulaması, askeri radar uygulamalarını içine alan 500 MHz'lik frekans aralığı sonuçları Şekil 4.40 ile verilmiştir. 2500-3000 MHz bant aralığının 2500-2670 Mhz'lik bölümü 4.5G için tahsis edilmiş ancak ölçümler esnasında herhangi bir yayın tespit edilememiştir. Diğer bölgelerde de olduğu gibi 2800 MHz'de bir yayın algılanması söz konusudur. Fakat bu yayın belirlenen eşik değerinin altında kalmıştır. Spektrumun bu kısmı hava seyrüsefer ve askeri radar uygulaması için tahsis edilmiştir. 2500-3000 MHz bandı için hesaplanan ortalama doluluk oranı %0 olarak belirlenmiştir.

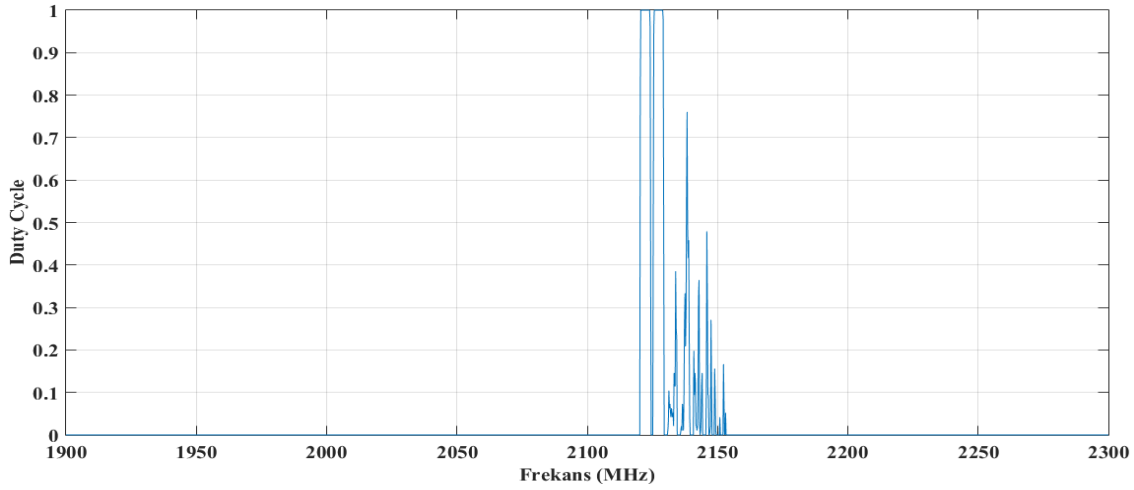
Meram ilçesi için 25-3000 MHz frekans bant aralığında gerçekleştirilen spektrum doluluk ölçüm çalışmasından elde edilen 15 günlük ölçüm sonuçları bir bütün olarak Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Diğer bölgelerde olduğu gibi 1 GHz'in altında kalan spektrum kısmının kullanımının yoğun olduğu; ancak 1 GHz üstünde kalan kısmın belirli bantlar dışında neredeyse hiç kullanılmadığı gözlemlenmektedir. Meram ölçüm noktası için 4.5G uygulamasının aktif bir şekilde kullanılmaya başlandığı da tespit edilmiştir. Meram ilçesinde tüm spektrum bandı için elde edilen ortalama doluluk oranı %4.19'dur. Burada elde edilen ölçüm sonuçlar, Şekil 4.42'de özetlenerek ortalama doluluk istatistiği bant-bant gösterilmiştir.



a)

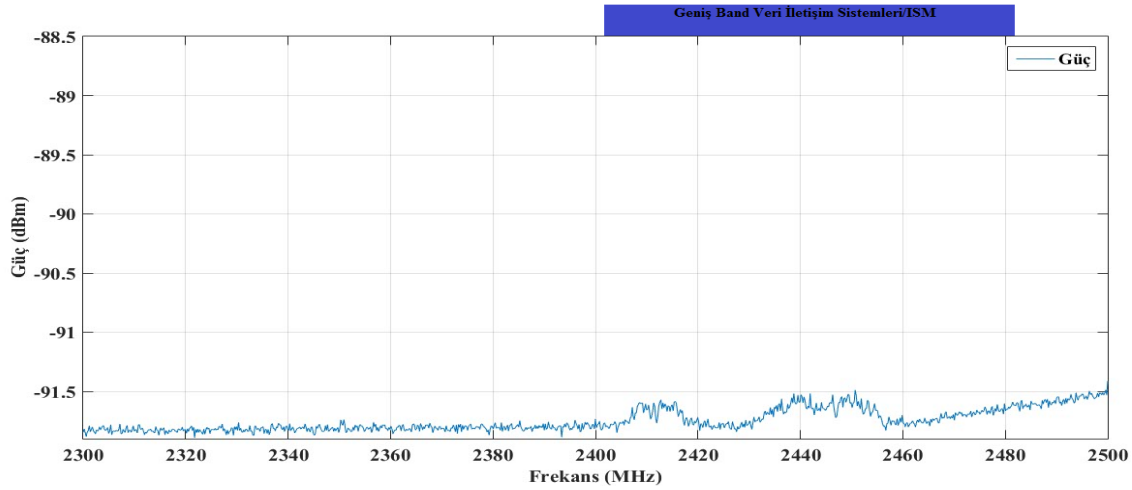


b)

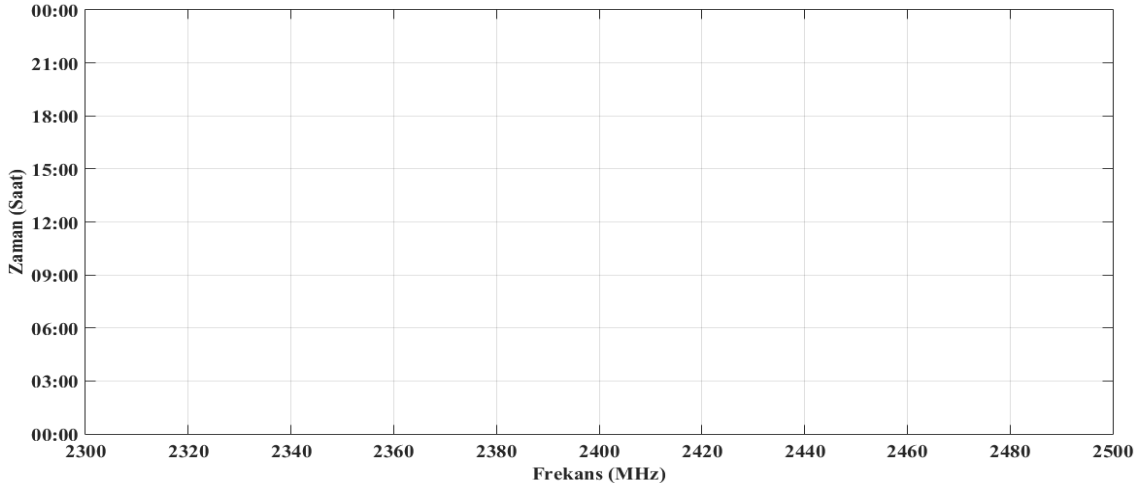


c)

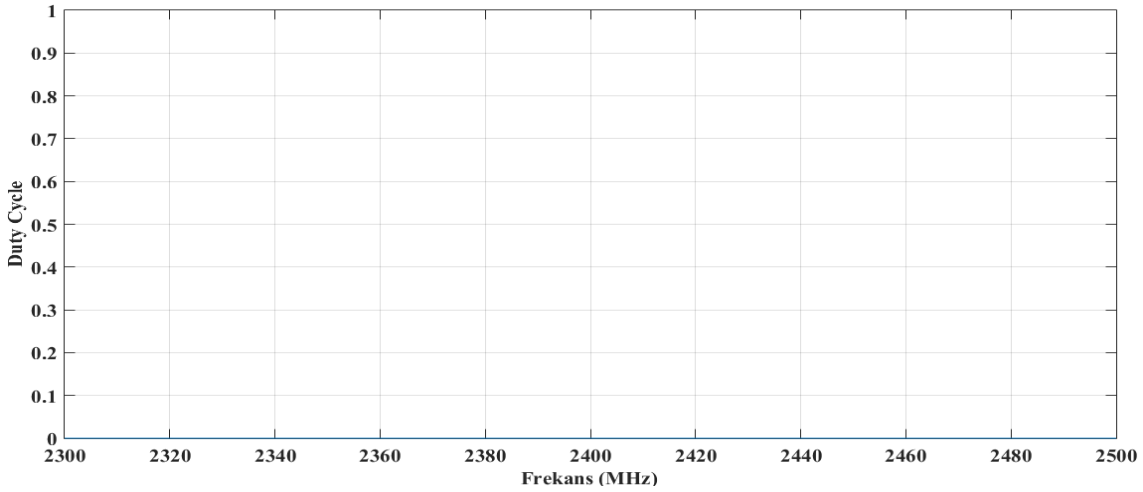
Şekil 4.38 1900-2300 MHz Frekans Aralığı



a)

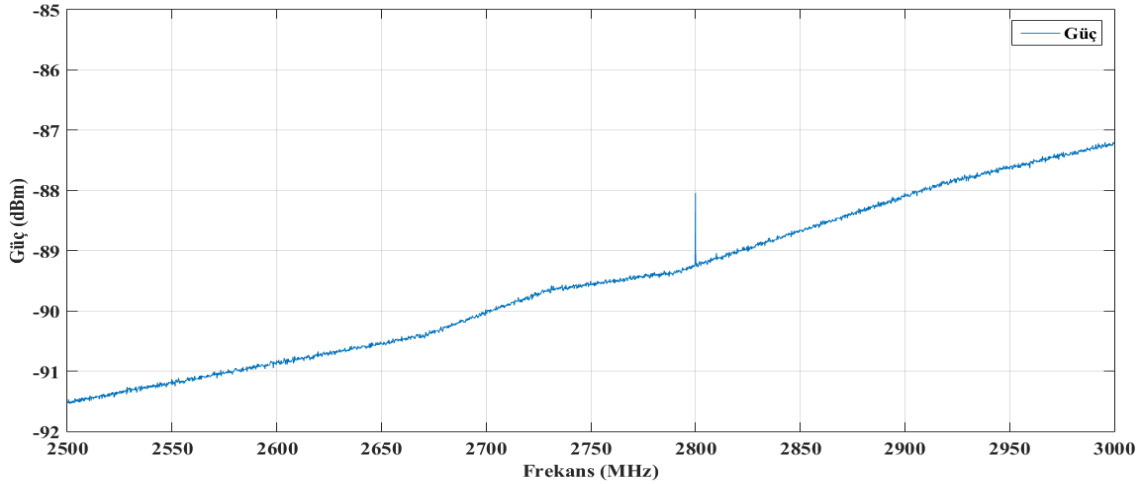


b)

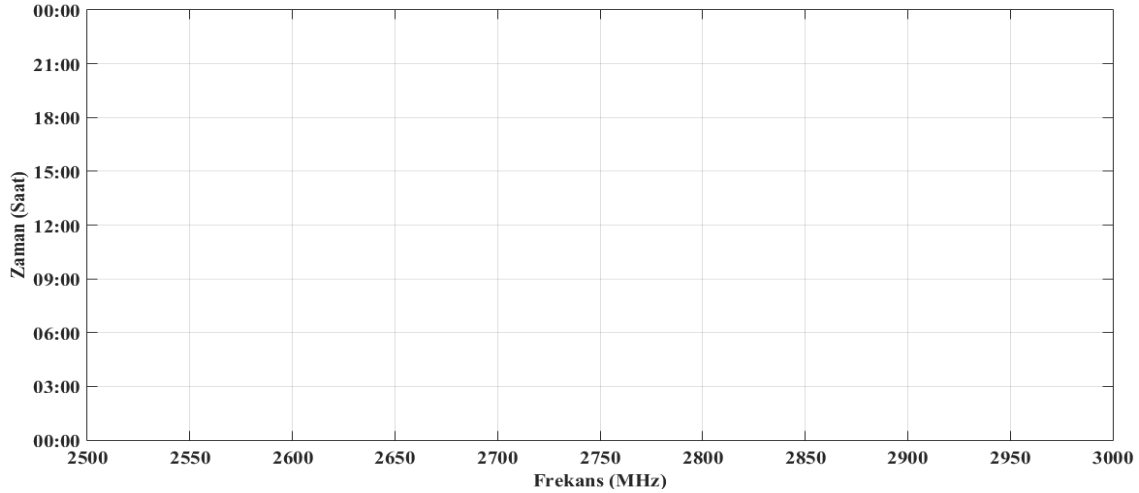


c)

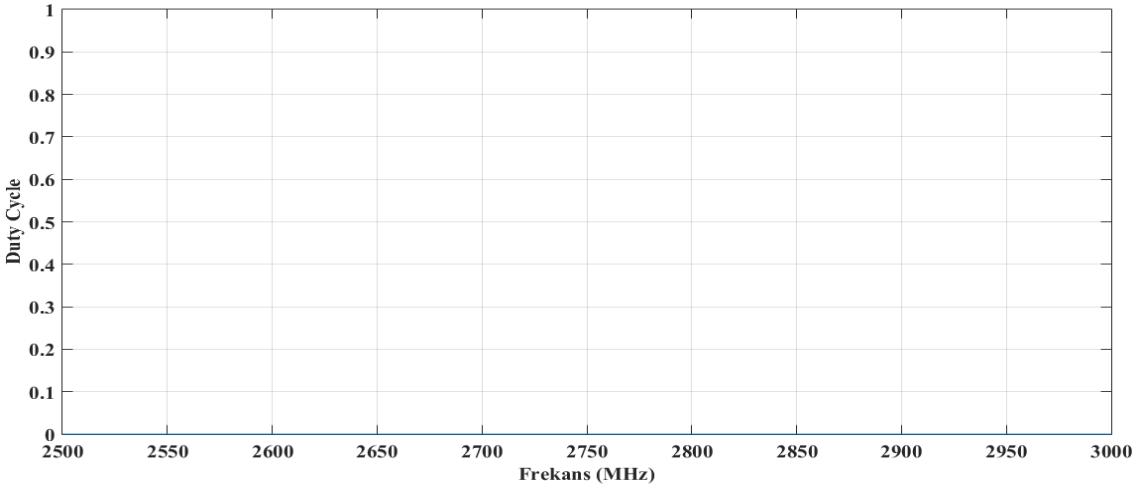
Şekil 4.39 2300-2500 MHz Frekans Aralığı



a)

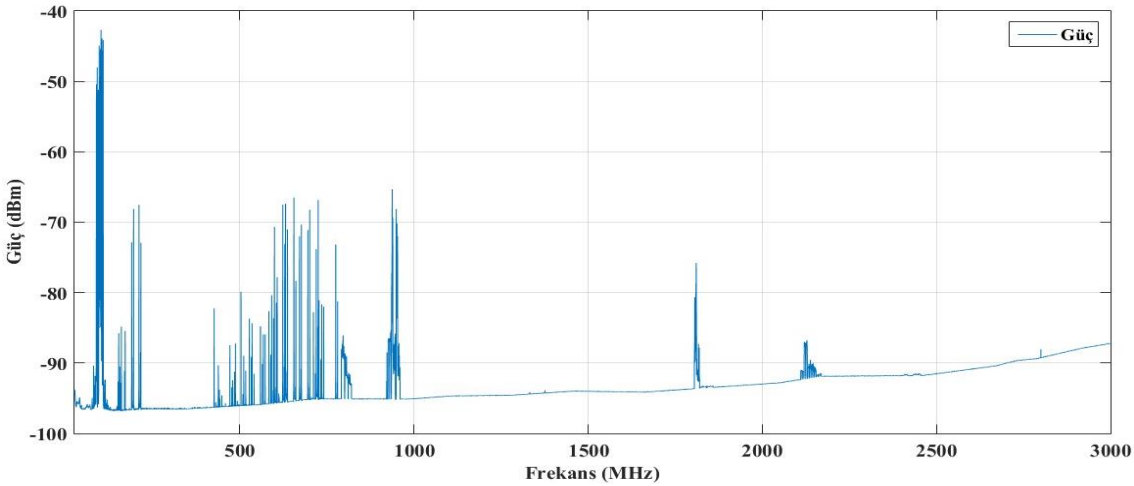


b)

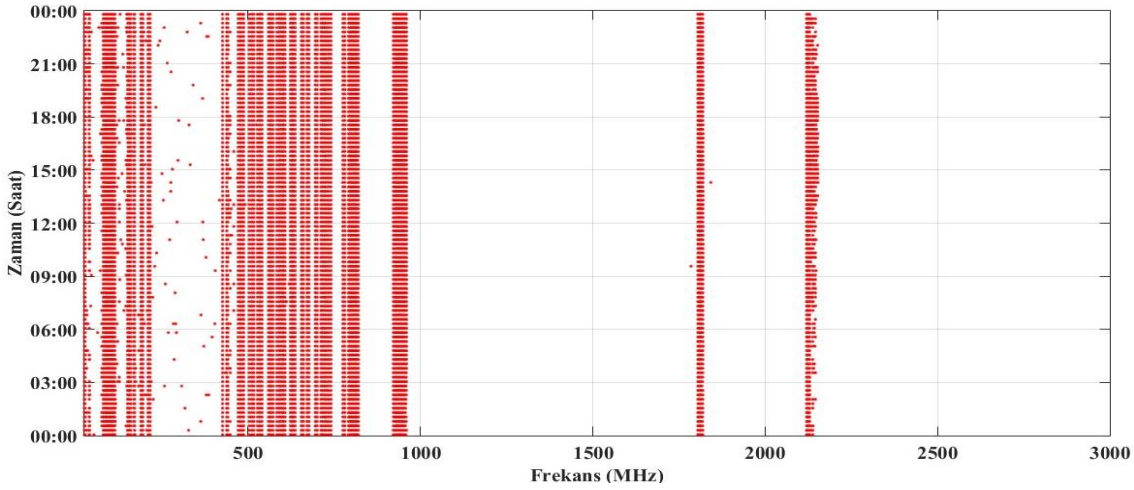


c)

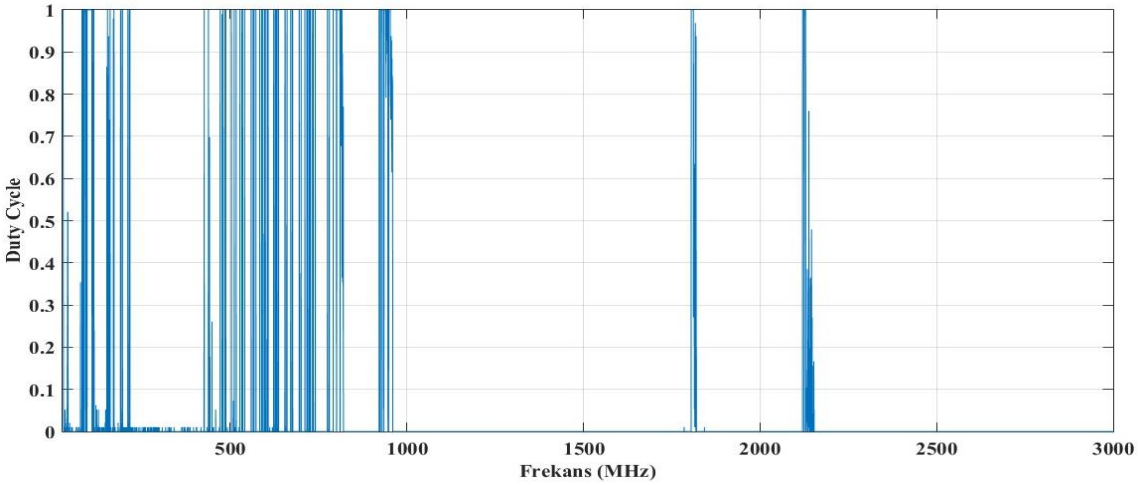
Şekil 4.40 2500-3000 MHz Frekans Aralığı



a)

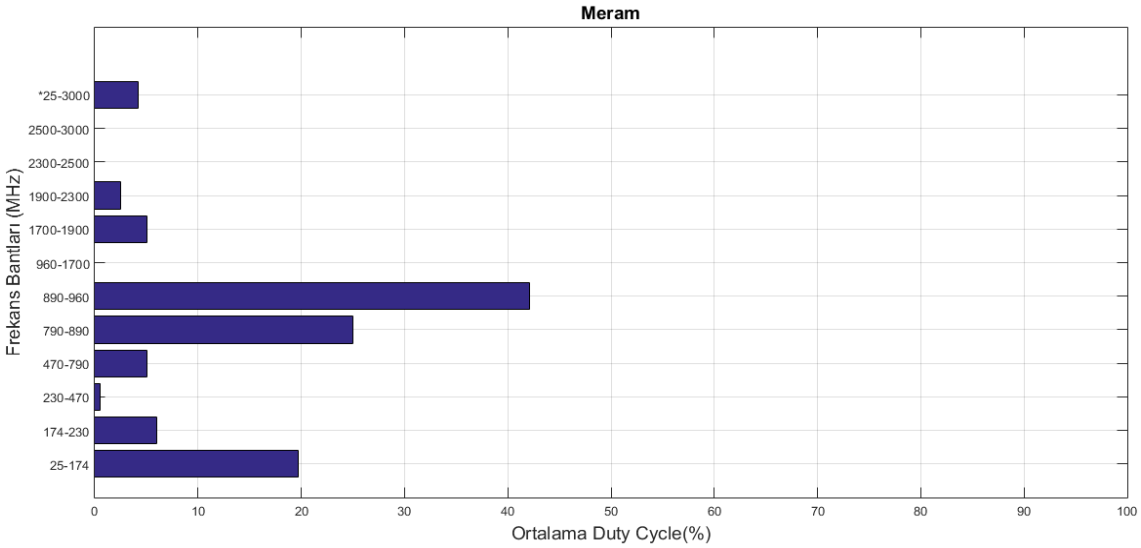


b)



c)

Şekil 4.41 25-3000 MHz Frekans Aralığı



Şekil 4.42 Meram ilçesi için bant-bant ortalama doluluk istatistiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tez çalışmasında Konya merkezinde üç farklı ölçüm noktasında 25-3000 MHz frekans bant aralığında spektrum doluluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler 6 aylık bir zaman periyoduna yayılmıştır. Bu zaman zarfında çeşitli etkenlerden dolayı bazı dönemler ölçümlere ara verilmiştir. Konya merkezindeki ölçüm noktaları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Konya Merkezindeki Ölçüm Noktaları (https://www.google.com.tr/maps/)

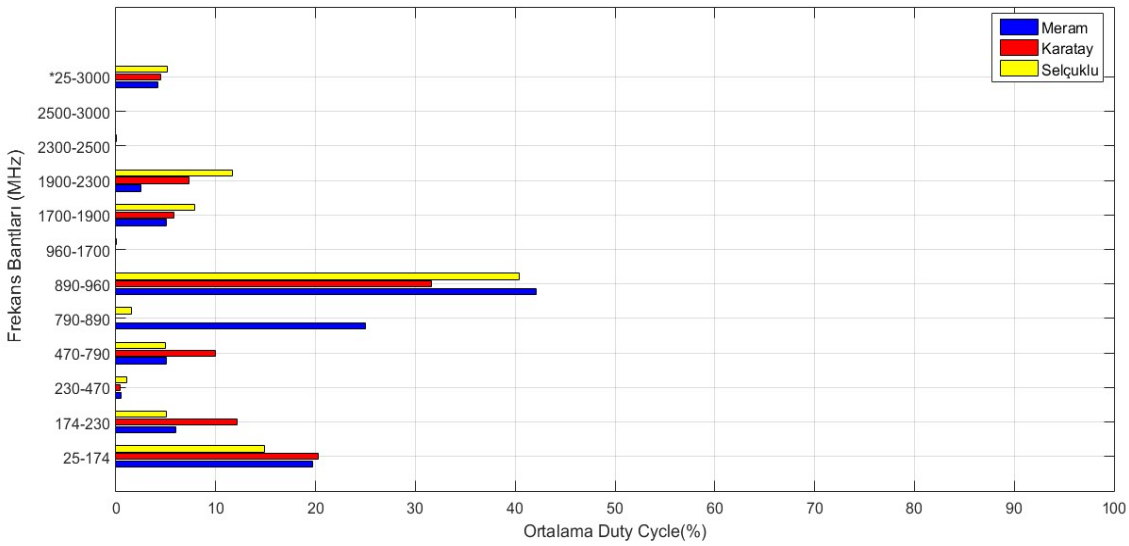
Elde edilen veriler ışığında üç ölçüm noktası için analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları belirlenen her bir frekans bandı için;

a) Spektral güç yoğunluğu
b) Zamana göre doluluk istatistiği
c) Ortalama duty cycle istatistiği

şeklinde sunulmuştur.

Özellikle üç ilçe için elde edilen sonuçlar incelendiğinde spektrumun 1 GHz'in altında kalan kısmının kullanımının fazla olduğu tespit edilirken 1GHz'in üstünde olan frekanslar için belli bantlar haricinde bir yayın varlığı tespit edilememiştir. Özellikle 230-470 MHz, 960-1700 MHz ve 2500-3000 MHz frekans aralıkları üç ölçüm noktası için

de neredeyse hiçbir aktivitenin elde edilemediği frekans bantları olmuştur. GSM haberleşme uygulamalarının downlink bantlarının yoğun bir şekilde kullanıldığı ve 24 saat boyunca spektrumu işgal ettiği gözlemlenmiştir. Ölçüm düzeneğinden, cihazların düşük güçlü olması ve kullanılan teknoloji gibi durumlardan (yayılı spektrum tekniğine bağlı olan GSM bandı ve diğer haberleşme uygulamaları) uplink frekanslarının aktivitelerinin algılanmasında zorlanılmıştır. Ölçüm çalışması yapılan tarihler boyunca 4.5G'nin hayata geçirilmesi ölçüm sonuçlarında gözlenmiştir. Selçuklu ilçesi için GSM900, GSM1800 ve 3G downlink bantlarının ortalama doluluk oranı sırasıyla %95.34, %18,78 ve 78.03'tür. Karatay ilçesi için elde edilen bu sonuçlar %69.83, %15.58, ve 48,74'tür. Meram ilçesi ölçüm noktası bakımından daha bahçe ve bağların bulunduğu bir kesimde olmasına rağmen o bölgede de bu bantlarda kullanım yoğunluğu yüksektir. Bu ilçe için GSM 900, GSM1800 ve 3G downlink bantlarının doluluk oranı %83.13, %13.43 ve %16.70 olarak hesaplanmıştır. 25-3000 MHz frekans bandında ise Selçuklu, Karatay ve Meram ilçeleri için elde edilen ortalama doluluk oranları sırasıyla %5.12, %4.46 ve %4.19 olmuştur. Bu değerler bir birine oldukça yakındır. Bant-bant üç bölgenin sonuçlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.2 Üç Ölçüm Noktasının Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 5.2'ye göre sabit frekans tahsis metoduyla spektrumun yeterli derecede verimli kullanılamadığı görülmektedir. Dinamik spektrum erişimi ile atıl kalan frekans bantlarının kullanıma geçmesi mümkündür. Özellikle askeri uygulamalar için ayrılan frekanslar bu uygulama için düşünülmese dahi spektrumun oldukça geniş bir kesiminin kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Bu durum ise bilişsel radyo gibi uygulamaların hayata geçirilmesi ile spektrum kullanım sorunlarının ortadan kalkacağını göstermekte ve yeni ortaya çıkacak teknolojiler için spektrumda yeni frekans bantlarının açılabileceği şeklinde düşünülebilir. Çeşitli ülkelerde gerçekleştirilmiş çalışmaların sonuçları ve tezde gerçekleştirilen çalışma ile karşılaştırılması Çizelge 5.1' de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Farklı Ülkelerde Gerçekleştirilmiş Spektrum Doluluk Ölçümlerinin Listesi

Yapılan Çalışmalar		Spektrum Doluluk Oranları			
Ülke	Frekans Aralığı	GSM 900	GSM 1800	3G	Tüm Frekans Aralığı
Amerika	30-3000 MHz	%54.8	%42.9	-	%17.4
*İspanya	30-3000 MHz	%4.03 / 96.20	%3.52 / 59.75	%2.86 / 48.38	%22.57
İngiltere	180-2700 MHz	%32.91	%24.64	-	%11.02
Çin	440-2700 MHz	%40.2	-	-	%15.2
Fransa	400-3000 MHz	%47.9	%29.3	%10.8	%10.7
Singapur	80-5850 MHz	%38.11	%19.82	%3.55	%4.54
Yeni Zelanda	806-2750 MHz	%33.37	-	-	%6.21
İrlanda	30-3000 MHz	-	%38.5	%23.2	%13.6
**Türkiye	25-3000 MHz	%40.39	%7.92	%11.69	%5.12

* İlk oran uplink frekans aralığını temsil ederken ikinci oran downlink frekans aralığını temsil etmektedir.

**Selçuklu ölçümleri referans alınmıştır.

5.2 Öneriler

Sonuçlar incelendiğinde Konya merkezinde spektrumun büyük bir bölümünün kullanılmadığı görülecektir. Bu ise sabit frekans tahsis yönteminin sorgulanma sebeplerinin ne denli haklı olduğunu göstermektedir. Dinamik spektrum erişim imkânı hem spektrumun atıl kullanılmasını önleyecek hem de yüksek ücretler içeren tahsis bedellerinin önüne geçecektir. Bu sebeple bilişsel radyo çalışmalarının yakın gelecekte sonuç vermesi ve dünya çapında hayata geçirilmesi beklenmektedir. Bundan dolayı mevcut spektrum aktivitelerinin bilinmesi son derece önemlidir.

Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda gelişmiş özelliklere sahip spektrum analizörler, daha geniş frekans bant aralığına sahip anten veya antenler tercih edilmelidir. Özellikle ölçüm bölgesine bağlı olarak ön kuvvetlendirici kullanılmalıdır. Literatürdeki çalışmalara uygun zaman periyotları ölçüm çalışmaları için tercih edilmelidir. Enerji

algılama metodundan kaynaklanan bazı algılama sorunlarını yok etmek için yeni algılama yöntemlerinin hayata nasıl geçirileceği üzerine çalışılmalıdır. Analiz işleminde farklı istatistiki değerler ile sonuçların sunulması sağlanmalıdır. Konya merkezinde gerçekleştirilen bu çalışmanın diğer illerde de bu perspektifte geliştirilip gerçekleştirilerek; mevcut spektrum kullanım bilgileri elde edilmeli ve yeni haberleşme uygulamaları için hazır hale gelinmelidir.

KAYNAKLAR

Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C. ve Mohanty, S., 2006, NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey, *Computer Networks*, 50 (13), 2127-2159.

Altun, N., 2001, Elektromanyetik dalgaların insan vücudu üzerine biyolojik etkileri, Yüksek Lisans Tezi, 3-5.

Atapattu, S., Tellambura, C. ve Jiang, H., 2014, Conventional energy detector, In: Energy detection for spectrum sensing in cognitive radio, Eds, *New York, NY*: Springer New York, p. 11-26.

Barnes, S. D., Van VUURen, P. J. ve Maharaj, B., 2013, Spectrum occupancy investigation: measurements in South Africa, *Measurement*, 46 (9), 3098-3112.

Biggs, M., Henley, A. ve Clarkson, T., 2004, Occupancy analysis of the 2.4 GHz ISM band, *Communications, IEE Proceedings*, 481-488.

Chen, Y. ve Oh, H. S., 2016, A Survey of measurement-based spectrum occupancy modeling for cognitive radios, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18 (1), 848-859.

Chiang, R. I., Rowe, G. B. ve Sowerby, K. W., 2007, A quantitative analysis of spectral occupancy measurements for cognitive radio, *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*, 3016-3020.

Çiçek, M., 2011, Bilişsel radyo (Cognitive Radio) teknolojisi ve düzenleme perspektifi, Uzmanlık, Ankara, 5-8.

Das, D. ve Das, S., 2015, A Survey on spectrum occupancy measurement for cognitive radio, *Wireless Personal Communications*, 85 (4), 2581-2598.

Dzulkifli, M. R., Kamarudin, M. R. ve Rahman, T. A., 2012, Spectrum occupancy of Malaysia radio environment for cognitive radio application, *Wireless Communications and Applications (ICWCA 2012), IET International Conference on*, 1-6.

Erpek, T., Steadman, K. ve Jones, D., 2007, Dublin ireland spectrum occupancy measurements collected on april 16-18, 2007.Shared Spectrum Company Technical Report.

Gavrilovska, L. ve Atanasovski, V., 2011, Spectrum sensing framework for cognitive radio networks, *Wireless Personal Communications*, 59 (3), 447-469.

Harrold, T., Cepeda, R. ve Beach, M., 2011, Long-term measurements of spectrum occupancy characteristics, *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2011 IEEE Symposium on*, 83-89.

http://www.aorja.com/, [Erişim Tarihi : 22 Ocak 2016].

http://www.aorusa.com/, [Erişim Tarihi : 25 Ocak 2016].

http://www.btk.gov.tr/tr-TR/Kurumdan-Haberler/BTK-45G-Ihalesini-Onayladi, [Erişim Tarihi :29 Mart 2016].

http://www.rigolna.com/, [Erişim Tarihi: 27 Ocak 2016].

https://ifis.btk.gov.tr/wmfys/millifrekanssorgu.aspx, [Erişim Tarihi: 1 Nisan 2016].

https://www.google.com.tr/maps/, [Erişim Tarihi: 10 Nisan 2016].

Islam, M. H., Koh, C. L., Oh, S. W., Qing, X., Lai, Y. Y., Wang, C., Liang, Y. C., Toh, B. E., Chin, F., Tan, G. L. ve Toh, W., 2008, Spectrum survey in Singapore: Occupancy measurements and analyses, *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on*, 1-7.

Jayavalan, S., Mohamad, H., Aripin, N. M., Ismail, A., Ramli, N., Yaacob, A. ve Ng, M. A., 2014, Measurements and analysis of spectrum occupancy in the cellular and TV bands, *Lecture Notes on Software Engineering*, 2 (2), 133.

Kagarura, G. M., Okello, D. K. ve Akol, R. N., 2013, Evaluation of spectrum occupancy: a case for cognitive radio in Uganda, *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), 2013 IEEE Ninth International Conference on*, 167-174.

Kliks, A., Kryszkiewicz, P., Pérez-Romero, J., Umbert, A. ve Casadevall, F., 2013, Spectrum occupancy in big cities comparative study measurement campaigns in Barcelona and Poznan, *Wireless Communication Systems (ISWCS 2013), Proceedings of the Tenth International Symposium on*, 1-5.

Konig, C., Guirao, P. ve Lubben, R., 2014, Distributed indoor spectrum occupancy measurements in the UHF TV band, *Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference on*, 1373-1378.

Liang, Y., Yin, S., Shuai, W., Zhang, E., Q, Hong, W., J ve Li, S., F, 2012, Quantitative spectrum occupancy evaluation in China: based on a large scale concurrent spectrum measurement, *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 19 (3), 122-128.

Lopez-Benitez, M., Umbert, A. ve Casadevall, F., 2009, Evaluation of spectrum occupancy in Spain for cognitive radio applications, *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, 1-5.

López-Benítez, M. ve Casadevall, F., 2010, Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio, *European Transactions on Telecommunications*, 21 (8), 680-693.

López-Benítez, M. ve Casadevall, F., 2011, A radio spectrum measurement platform for spectrum surveying in cognitive radio, In: Testbeds and Research Infrastructure. Development of Networks and Communities, Eds: Springer, p. 59-74.

Marţ, A., Marcu, I. ve Marghescu, I., 2010, Spectrum occupancy in an urban environment: A cognitive radio approach, *Telecommunications (AICT), 2010 Sixth Advanced International Conference on*, 25-29.

Martian, A., 2014, Evaluation of spectrum occupancy in urban and rural environments of Romania, *Revue Roumaine Des Sciences Techniques: Serie Electrotechnique et Energetique*, 59 (1), 87–96.

Matinmikko, M., Mustonen, M., Höyhtyä, M., Rauma, T., Sarvanko, H. ve Mämmelä, A., 2010, Distributed and directional spectrum occupancy measurements in the 2.4 GHz ISM band, *Wireless Communication Systems (ISWCS), 2010 7th International Symposium on*, 676-980.

McHenry, M. A., Tenhula, P. A., McCloskey, D., Roberson, D. A. ve Hood, C. S., 2006, Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal. Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum. Boston, Massachusetts, USA, ACM**:** 1.

Mehdawi, M., Riley, N., Ammar, M. ve Zolfaghari, M., 2012, Comparing historical and current spectrum occupancy measurements in the context of cognitive radio, *Telecommunications Forum (TELFOR), 2012 20th*, 623-626.

Mitola III, J. ve Maguire Jr, G. Q., 1999, Cognitive radio: making software radios more personal, *Personal Communications, IEEE*, 6 (4), 13-18.

Palaios, A., Riihijärvi, J., Holland, O., Achtzehn, A. ve Mähönen, P., 2012, Measurements of spectrum use in London: Exploratory data analysis and study of temporal, spatial and frequency-domain dynamics, *Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN), 2012 IEEE International Symposium on*, 154-165.

Palaios, A., Riihijarvi, J., Mahonen, P., Atanasovski, V., Gavrilovska, L., Van Wesemael, P., Dejonghe, A. ve Scheele, P., 2013, Two days of European Spectrum: Preliminary analysis of concurrent spectrum use in seven European sites in GSM and ISM bands, *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, 2666-2671.

Patil, K., Skouby, K., Chandra, A. ve Prasad, R., 2011, Spectrum occupancy statistics in the context of cognitive radio, *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2011 14th International Symposium on*, 1-5.

Patil, K., Skouby, K. E. ve Prasad, R., 2013, Spectrum measurement and analysis of TV band support of Cognitive Radio operation in India, *Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE), 2013 3rd International Conference on*, 1-5.

Petrin, A. ve Steffes, P. G., 2005, Analysis and comparison of spectrum measurements performed in urban and rural areas to determine the total amount of spectrum usage, *Proc. International Symposium on Advanced Radio Technologies (ISART 2005)*, 9-12.

Qaraqe, K. A., Celebi, H., Gorcin, A., El-Saigh, A., Arslan, H. ve Alouini, M., 2009, Empirical results for wideband multidimensional spectrum usage, *Personal,*

Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on, 1262-1266.

Sanders, F. H. ve Lawrence, V. S., 1995, Broadband spectrum survey at Denver, Colorado, US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration

Sanders, F. H., Ramsey, B. J. ve Lawrence, V. S., 1996, Broadband spectrum survey at san diego, california, *NASA* (19980005224).

Sanders, F. H., Ramsey, B. J. ve Lawrence, V. S., 1997, Broadband spectrum survey at Los Angeles, California, US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration

Sanders, F. H., 1998, Broadband spectrum surveys in Denver, CO, San Diego, CA, and Los Angeles, CA: methodology, analysis, and comparative results, *Electromagnetic Compatibility, 1998. 1998 IEEE International Symposium on*, 988-993 vol.982.

Schiphorst, R. ve Slump, C. H., 2010, Evaluation of spectrum occupancy in Amsterdam using mobile monitoring vehicles, *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st*, 1-5.

Subramaniam, S., Reyes, H. ve Kaabouch, N., 2015, Spectrum occupancy measurement: An autocorrelation based scanning technique using USRP, *Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2015 IEEE 16th Annual*, 1-5.

Taher, T. M., Bacchus, R. B., Zdunek, K. J. ve Roberson, D. A., 2011, Long-term spectral occupancy findings in Chicago, *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2011 IEEE Symposium on*, 100-107.

Valenta, V., Maršálek, R., Baudoin, G., Villegas, M., Suarez, M. ve Robert, F., 2010, Survey on spectrum utilization in Europe: Measurements, analyses and observations.

Van De Beek, J., Riihijärvi, J., Achtzehn, A. ve Mähönen, P., 2012, TV white space in Europe, *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 11 (2), 178-188.

Vo, N. Q. B., Le, Q. C., Le, Q. P., Tran, D. T., Nguyen, T. Q. ve Lam, M. T., 2011, Vietnam spectrum occupancy measurements and analysis for cognitive radio applications, *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2011 International Conference on*, 135-143.

Weidling, F., Datla, D., Petty, V., Krishnan, P. ve Minden, G., 2005, A framework for RF spectrum measurements and analysis, *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005.*

Wellens, M., Wu, J. ve Mahonen, P., 2007, Evaluation of spectrum occupancy in indoor and outdoor scenario in the context of Cognitive Radio, *2007 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, 420-427.

Wellens, M. ve Mahonen, P., 2010, Lessons learned from an extensive spectrum occupancy measurement campaign and a stochastic duty cycle model, *Mobile Networks & Applications*, 15 (3), 461-474.

Xue, J., Feng, Z. ve Chen, K., 2013, Beijing spectrum survey for cognitive radio applications, *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2013 IEEE 78th*, 1-5.

Yücek, T. ve Arslan, H., 2009, A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications, *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 11 (1), 116-130.

EKLER

EK-1 Duty Cycle Değerinin Hesaplanması

Duty Cycle değeri hesaplanırken frekans tarama ve zaman aralığı belirlenir.

$$F_{tarama\ aralığı} = F_{bitiş} - F_{başlangıç} \quad \text{(E.1)}$$

$$T_{zaman\ aralığı} = T_{bitiş} - T_{başlangıç} \quad \text{(E.2)}$$

Ölçülen ayrık zaman örnekleri t_i ve frekans noktaları f_j şu şekilde ifade edilir.

$t_i = T_{başlangıç} + (i - 1)$ x $T_ç$, i= 1, 2, . . . , Nt; $T_ç$ değeri zaman çözünürlüğünü vermektedir ve spektrum analizörün tarama zamanına ve yapılandırma parametrelerine bağlıdır. Nt değeri ise ölçüm boyunca toplam zaman örneklerini ifade eder ve Nt= $T_{zaman\ aralığı}/T_ç$ dir.

$f_j = F_{başlangıç} + (j - 1)$ x $F_ç$, j= 1, 2, . . . , Nf; $F_ç$ değeri frekans çözünürlüğünü vermektedir ve peşpeşe gelen iki frekans noktası arasındaki bölgedir. Spektrum analizör tarafından ölçülen frekans noktası sayısı Nf ve $F_{tarama\ aralığı}$ ile ilişkilidir. $F_ç = F_{tarama\ aralığı}/$ Nf dir.

Belirli zaman süreci boyunca ve frekans tarama aralığında elde edilen güç spektral yoğunluğu bir matriste toplanır.

$$\boldsymbol{P} = \left[P\left(t_i, f_j\right)\right] \quad \text{(E.3)}$$

Her bir $P(t_i, f_j)$ güç spektral yoğunluğunu temsil eder. Ardından lisanslı kullanıcıların varlığını tespit etmek için enerji algılama yöntemi kullanılır. Bu yöntem tezin üst bölümlerinde aktarılmıştır. Bu aşamadan sonra önceden belirlenen eşik değeri ile *P* matrisi karşılaştırılarak bir binary spektral doluluk matrisi oluşturulur.

$$B\left(t_i, f_j\right) = K\left(P\left(t_i, f_j\right), E\left(f_j\right)\right); \quad \text{(E.4)}$$

K (x,y) ise; x>y=1 ve x<y=0 değerlerini almaktadır. B; eşik değerine bağlı olarak 0 ve 1 değerlerinden oluşan bir matrisi göstermektedir. Her bir frekans bandı için duty cycle değeri güç spektral yoğunluk değerlerinin eşik değeri ile karşılaştırılıp eşik değeri aşan örnekler ile oranlanması ile elde edilir.

$$DC_{fj} = \frac{1}{N_t}\sum_{i=1}^{N_t} B\left(t_i, f_j\right) \quad \text{(E.5)}$$

Bu formül; zamanın belirli bir kısmında frekans noktasının dolu veya boş olduğunu göstermektedir. Tüm frekans bantları için ortalama doluluk ölçümü için kullanılması gereken formül ise;

$$DC = \frac{1}{N_t}\sum_{i=1}^{N_t} DC_{fj} = \frac{1}{N_t}\frac{1}{N_f}\sum_{i=1}^{N_t}\sum_{j=1}^{N_f} B\left(t_i, f_j\right) \quad \text{(E.6)}$$

ile ifade edilir (López-Benítez ve Casadevall, 2010).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	İbrahim ŞEFLEK
Uyruğu	**:**	T.C
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Konya-17.01.1988
Telefon	**:**	0332 2233714
Faks	**:**	
e-mail	**:**	iseflek@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Meram Konya Lisesi (Y.D.A.L)	2006
Üniversite	:	Erciyes Üniversitesi	2012
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi	Devam ediyor
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2012	Selçuk Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Elektromanyetik Alanlar, Mikrodalga Tekniği, Elektromanyetik Işıma Ölçümleri, Spektrum Doluluk Ölçümleri

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

İ. Şeflek, E. Yaldız, H. Duysak, 2015, Selçuk Üniversitesi Kampüsünde (Konya) GSM ve 3G Frekans Bantları İçin 24 Saatlik Spektrum Doluluk Ölçümü ve Analizi, *Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri Sempozyumu EMANET'2015,* pp.288-293 13-15 Kasım 2015, Mersin, Türkiye.

I. Seflek, E. Yaldız, H. Duysak, 2016, Spectrum Occupancy Measurements for Terrestrial TV Bands in Turkey, *ICENS International Conference on Engineering and Natural Science ICENS 2016,* May 24-28, , Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

I. Seflek and E. Yaldiz, 2017, Spectrum Occupancy Measurements at University Campus in Turkey, *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol 5 no:1, pp. x-y,. (Beklemede)