

RF Sinyal Karakteristiklerinin Kapalı Ortam Konumlandırma Etkisi

Veli Bayar

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Aralık 2016



The Effect of RF Signal Characteristics on Indoor Positioning

Veli Bayar

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Electrical and Electronics Engineering

December 2016

RF Sinyal Karakteristiklerinin Kapalı Ortam Konumlandırma Etkisi

Veli Bayar

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Telekomünikasyon ve Sinyal İşleme Mühendisliği Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Ahmet Yazıcı

Bu tez İnovasyon Mühendislik Ltd. Şti. tarafından yürütülen TÜBİTAK ARGE Proje Destek 1511 programı 1130024 nolu projesi kapsamında desteklenmiştir.

Aralık 2016

ONAY

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Veli Bayar'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “RF Sinyal Karakteristiklerinin Kapalı Ortam Konumlandırılmada Etkisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Ahmet Yazıcı

İkinci Danışman : Prof. Dr. Hüseyin Arslan

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Ahmet Yazıcı

Üye : Prof. Dr. H. Hüseyin Erkaya

Üye : Doç. Dr. Nuray At

Üye :

Üye :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŐAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Ahmet Yazıcı danışmanlığında hazırlamış olduğum “RF Sinyal Karakteristiklerinin Kapalı Ortam Konumlandırma Etkisi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 30.12.2016

Veli Bayar

ÖZET

Kapalı ortamlarda konumlandırma sistemleri üzerinde çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu çalışmalarda kızılötesi sinyal, sesüstü sinyal, kamera algılayıcı, lazer algılayıcı, RF (Radio Frequency) sinyal vb. teknolojileri kullanılarak konum bilgisi üreten sistemler geliştirilmiştir. Uygulama alanına göre bazı sistemler öne çıkmakta olup bu çalışmalarda fikir birliğine varılmış bir sistem yoktur. Bunun yanı sıra, yaygın olarak hazır altyapı bulunması nedeniyle RF teknolojilerinden Wi-Fi üzerine önemli bir çalışma yoğunluğu bulunmaktadır. Örneğin, birçok kapalı ortamda mobil cihaza sahip kullanıcılar ortamdaki Wi-Fi erişim noktalarından alınan sinyal gücü bilgisini kullanarak konumlarını hassas olmasa da oda seviyesinde bulabilmektedirler. Yapılan çalışmalar incelendiğinde RF sinyallerinin karakteristikleri ile konumlandırma doğruluğu arasındaki ilişkiye yönelik çalışmaya ihtiyaç olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, Wi-Fi özelinde RF sinyal karakteristiklerinin kapalı ortam konumlandırma sistemlerine etkisi araştırılmaktadır. Tezin literatür araştırması kısmında temel RF sinyal davranışları ve bu davranışların konumlandırma sistemleri üzerine etkisi detaylı incelenmektedir. Ayrıca literatürde bulunan RF yayılım modelleri araştırılarak, gerçek ortamda test ile doğrulanmışlardır. Sonrasında ise konumlandırma amaçlı kullanımına ilişkin çalışmalar yapılmaktadır. Referans ölçüm, emilim ve çok yönlü sönümlenme testleri ile RF sinyal davranışlarının alınan sinyal gücüne etkisi gerçek ortamda test edilmektedir. Yapılan çalışmalar ile yayılım modellerinin kapalı ortamlarda tünel etkisi görülen bölgelerde yetersiz kaldığı ortaya konulmaktadır. Önerilen yayılım modeli kullanılarak, tünel etkisinin sebep olduğu konum hataları azaltılmaktadır. Modelin konum çıktıları logaritmik uzaklığa bağlı temel yol kayıp modeli ve emilim etkisi dâhil edilen yol kayıp modeli çıktıları ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma sonuçlarına göre önerilen yayılım modeli tünel etkisi görülen kapalı test ortamında tatmin edici sonuçlar vermektedir.

Anahtar Kelimeler: RF Tabanlı Konumlandırma, Kapalı Ortam Konumlandırma, Radyo Yayılım Modelleri, RF Sinyal Karakteristikleri, Tünellerde Dalga Yayılımı

SUMMARY

Indoor positioning systems have received increasing attention of the researchers. In these systems, infrared signal, ultrasound signal, camera sensor, laser sensor, RF signals etc. are some of the technologies to produce positioning information. Although some of these systems have better performance depending on the application area, there is no consensus on positioning system. On the other hand, Wi-Fi within RF technologies has received great attention due to existing infrastructures in buildings. For instance, some mobile phone users can find their location within room level accuracy in various indoor environments by using signals from Wi-Fi access points. After analyzing the literature, the relation between RF signal characteristics and positioning accuracy is an open area to study.

In this study, the effect of RF signal characteristics on indoor positioning has been studied using Wi-Fi signals. In literature part of the thesis, basic RF signal characteristics, and the effects of these on positioning systems has been researched in detail. Beside RF propagation models were analyzed, and some tests were conducted to verify the models. Later, they were used in positioning process. Reference measurement, absorption and multipath tests are conducted to reveal the effect of RF signal behaviors on received signal strength. The tests show that the radio propagation models including absorption and multipath effects fail to reflect tunneling effect. Proposed propagation model reduces the localization errors due to tunneling effect. The proposed method is compared with the outputs of basic log-distance path loss model and path-loss model considering absorption. According to results, proposed propagation model gives satisfying results in indoor test environment where tunneling effect present.

Keywords: RF based Indoor Positioning, Indoor Positioning, Radio Propagation Models, RF Signal Characteristics, Wave Propagation in Tunnels

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın planlanması ve yürütülmesinde bana danışmanlık ederek yönlendiren, tecrübeleri ile destek sağlayan değerli danışmanım Doç. Dr. Ahmet Yazıcı'ya, yardımcı tez danışmanım Prof. Dr. Hüseyin Arslan'a, yüksek lisans eğitimim süresince yanımda olarak manevi desteklerini esirgemeyen aileme, teknik donanım ve alt yapı desteği sağlayan şirketim İnovasyon Mühendislik ve değerli çalışanlarına saygıyla teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez, İnovasyon Mühendislik, Teknoloji Geliştirme, Danışmanlık, San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından yürütülen 1511 – TÜBİTAK Öncelikli Alanlar Araştırma Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Projeleri Destekleme Programı, Bilgi İletişim öncelikli alanında "Konumlama sistemleri" başlıklı çağrı kapsamında geliştirilen 1130024 nolu Kapalı Ortamlar İçin RF Tabanlı Konumlandırma Sistemi projesi dahilinde desteklenmiştir.

Veli BAYAR

İÇİNDEKİLER**Sayfa**

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. RF Sinyal Karakteristikleri	5
2.2. Yayılım Modelleri.....	10
2.3. RF Tabanlı Konumlandırma Sistemlerini Etkileyen Faktörler.....	18
2.3.1. Kapalı ortam yapısı	18
2.3.2. Anten etkisi	20
2.3.3. İnsan varlığı	24
2.3.4. Erişim noktası yoğunluğu ve yerleşimi	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. Önerilen Yol Kayıp Modeli	30
3.2. Test Ortamı	34
3.3. Donanım ve Yazılım Özellikleri.....	35
3.4. Test Metodolojileri	37
3.5. Konumlandırma Yöntemi	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1. Referans Ölçüm ve Emilim Testleri	47
4.2. Çok Yollu Sönümleme Testleri	48
4.3. Yayılım Modeli Testleri.....	49
4.4. Konumlandırma Testleri	52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 RF Tabanlı Konumlandırma Sistemlerinde Doğruluğu Etkileyen Faktörler.....	4
2.2 RF Sinyal Emilimi	5
2.3 RF Sinyal Yansıması	6
2.4 RF Sinyal Kırınımı	6
2.5 RF Sinyal Saçılımı.....	7
2.6 RF Sinyal Kırılarak Yansıması.....	7
2.7 Geniş ve Küçük Ölçekli Sönümlenme.....	8
2.8 RF Sinyal Çok Yollu Sönümlenme	9
2.9 RF Sinyal Gölgeleme Etkisi	9
2.10 RF Tünel Etkisi.....	10
2.11 Radyo Yayılım Modeli Çeşitleri	11
2.12 Logaritmik Uzaklığa Bağlı Yol Kayıp Modeli.....	14
2.13 Tipik Tünel Kesitleri	16
2.14 Çoklu İnsan Varlığı Deney Düzenegi (El-Kafrawy vd.den, 2011)	26
3.1 Tünel Etkisi Olan Örnek Ortam	32
3.2 Teknopark Birinci Kat Krokisi ve Sensör Düğümü Yerleşimleri	35
3.3 Test için Kullanılan Donanımlar	35
3.4 Gezkon Logger Mobil Uygulaması	36
3.5 Referans Ölçüm Test Düzenegi	37
3.6 Sinyal Emilim Test Düzenegi.....	38
3.7 Çok Yollu Sönümlenme Test Düzenegi - 1	39
3.8 Çok Yollu Sönümlenme Test Düzenegi – 2	40
3.9 RF Harita için Ölçüm Alınan Noktalar.....	41
3.10. İki Boyutta Çember Kesişimi Yöntemi	43
4.1 Gerçek Ortam Çok Yollu Sönümlenme Testi.....	48
4.2 Dalga Boyu Komşuluğunda Çok Yollu Sönümlenme.....	49
4.3 Temel Yayılım Modeli	50
4.4 Yayılım Model Testi Sinyal Emilim Etkisi	51
4.5 Emilim Etkisinden Kaynaklı Uzak Dönüşüm Hatası	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.6 Temel ve Emilim Modeli Koridor Konumlandırma Sonuçları	55
4.7 Dördüncü Erişim Noktası Koridor Yayılımı Karşılaştırılması.....	55
4.8 Beşinci Erişim Noktası Koridor Yayılımı Karşılaştırılması.....	56
4.9 Dördüncü Erişim Noktası Koridor Uzaklık Dönüşüm Karşılaştırılması.....	57
4.10 Beşinci Erişim Noktası Koridor Uzaklık Dönüşüm Karşılaştırılması.....	58
4.11 Dördüncü Erişim Noktası RSS Hata Bölgesi	59
4.12 Dördüncü Erişim Noktası Uzaklık Hata Bölgesi.....	59
4.13 Bir dBm RSS Farkının Uzaklığa Bağlı Hata Grafiği	60
4.14 Dördüncü Erişim Noktası İçin Koridor Modeli Uygulanması	61
4.15 Temel, Emilim ve Koridor Modellerinin Karşılaştırılması	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Emilim Sinyal Kayıpları (Saunders ve Aragon-Zavala'dan, 2007)	19
2.2 Gerçek Ortam Emilim Kayıp Değerleri (Ahsan vd.den, 2013).....	19
2.3 Anten Sayısına Bağlı Farklı Algoritmaların Konumlandırma Sonuçları Karşılaştırması (Klesiouris vd.den, 2010)	22
2.4 Ölçülebilir RSS Aralıkları (Kaemarungsi'den, 2006)	23
3.1 Teknopark Sensör Düğümleri Yerleşimi	34
3.2 Sinyal Kaynağı Özellikleri	36
3.3 LG Cihaz Kablosuz Özellikleri	36
3.4 Sony Cihaz Kablosuz Özellikleri	36
3.5 Kullanılan Erişim Noktası Kombinasyonları	45
4.1 Referans Ölçüm Testi Sonuçları.....	47
4.2 Gerçek Ortam Sinyal Emilim Test Sonuçları	47
4.3 Temel Model ve Gerçek Ölçümlerin Karşılaştırılması	50
4.4 Emilim Etkisi Model ve Gerçek Ölçüm Karşılaştırılması.....	51
4.5 Temel Yayılım Modeli İle Oda İçi Konumlandırma Sonuçları.....	52
4.6 Temel Yayılım Modeli İle Koridor Konumlandırma Sonuçları	53
4.7 Emilim Modeli ile Oda İçi Konumlandırma Hataları.....	54
4.8 Emilim Model Koridor Konumlandırma Hataları	54
4.9 Önerilen Model Konumlandırma Sonuçları Karşılaştırılması.....	61
4.10 Modellerin Maksimum ve Ortalama Konum Hataları Karşılaştırması	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
d	Alıcı ile verici arasındaki uzaklık
d_{B1REF}	Birinci bölgede referans ölçüm uzaklığı
d_{B2REF}	İkinci bölgede referans ölçüm uzaklığı
$d(EN_i)$	i . erişim noktasından hesaplanan tahmini uzaklık
d_f	Uzak alan bölgesi uzaklığı
d_i	Çember kesişimi i . erişim noktası mobil cihaz uzaklığı
d_0	Referans ölçüm uzaklığı
d_c	Uzaklık düzeltme değeri
G_t	Verici anten kazancı
G_r	Alıcı anten kazancı
k	Alıcı ve verici arasındaki engel sayısı
L	Sinyal alıcı veya verici donanımında sistem kaybı
n	Yayılım zayıflama katsayısı
n_{sf}	Aynı kat için yol kayıp kuvveti
$P(d_{B1REF})$	Birinci bölgede referans ölçüm uzaklığında alınan sinyal gücü
$P_{B2}(i)$	İkinci bölgede alınan sinyal gücü tahmin değeri
P_{B2REF}	İkinci bölgede referans ölçüm uzaklığında alınan sinyal gücü
P_{engel}	Sinyal günün engelde sönmüleme miktarı
P_L	Yol kaybı
$PL(d_0)$	d_0 referans ölçüm uzaklığında sinyal kaybı
$P_m(EN_i)$	i . erişim noktasından alınan sinyal gücü değeri
P_r	Alınan sinyal gücü
$P_r(d)$	d uzaklığında alınan sinyal gücü
$P_r(d_0)$	d_0 referans ölçüm uzaklığında alınan sinyal gücü
$P_r(x_i, y_i)$	i . ölçüm noktasında tahmin edilen sinyal gücü
P_t	Vericiden iletilen sinyal gücü
x_i	Çember kesişimi i . erişim noktası X koordinatı

(x_i, y_i)	i . ölçüm noktası koordinatı
(x_k, y_k)	k . sensör düğümü koordinatı
x_m	Çember kesişimi mobil cihaz X koordinatı
y_i	Çember kesişimi i . erişim noktası Y koordinatı
y_m	Çember kesişimi mobil cihaz Y koordinatı
λ	Sinyal dalga boyu
α	Kanal sönümlenme faktörü
α_k	Koridor etkisi düzeltme katsayısı

Kısaltma**Açıklama**

FAF	Kat Zayıflama Faktörü
FDTD	Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar Yöntemi
kNN	k. En Yakın Komşuluk
PCA	Temel Bileşenler Analizi
RF	Radyo Frekansı (Radio Frequency)
RFID	Radyo Frekansı ile Tanımlama
RSS	Alınan Sinyal Gücü (Received Signal Strength)
UHF	Ultra Yüksek Frekans
Wi-Fi	Kablosuz Bağlantı (Wireless Fidelity)
WLAN	Kablosuz Yerel Ağ

1. GİRİŞ

Günümüzde alışveriş merkezleri, hastaneler, hava alanları, oteller, üniversiteler gibi geniş ve karmaşık yapıda kapalı ortamların sayısı belirli bir seviyeye ulaşmış ve halen artmaya devam etmektedir. Yapılan çalışmalara göre insanlar zamanlarının %80-90 oranında kapalı ortamlarda geçirmektedir. Bu ortamlarda konum tabanlı servisler önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bununla beraber kapalı ortamlarda konum bilgisi üretebilecek sistemlerin olmayışı bu konum tabanlı hizmetlerin verilmesinde önemli bir engeldir. Bir bina içerisinde insan veya nesne konumlandırılması fikri yeni olmamakla birlikte, 1990'lı yılların sonuna doğru gerçek zamanlı konumlandırma sistemleri ile ilgili çalışmalar başlamıştır (Sinopoli, 2013). Geçen zaman içerisinde gelişen farklı teknolojiler ile birlikte basit anlamda veri toplama sistemi olarak görülen konumlandırma sistemleri bunun ötesine taşınarak değerli bilgi sağlayan sistemler haline gelmektedir. Değerli mal/malzeme takibi, personel takibi, reklam ve bilgilendirme amaçlı konum bazlı servisler, kapalı ortamda navigasyon gibi uygulamalar kapalı ortam konumlandırma sistemlerinin örnekleri olarak verilebilmektedir.

Kapalı ortam konumlandırma sistemlerinde kızılötesi, sesüstü, kamera, lazer, hücresel ağ, ataletsel sensör, RF ve manyetik bilgi veren sensör teknolojileri olmak üzere birçok farklı teknoloji kullanılmaktadır (Mai vd., 2014; Svalastog, 2007; Yayan vd., 2015; Yücel vd., 2012). Bu teknolojiler kullanılarak geliştirilen ticari ve akademik anlamda birçok konumlandırma sistemi bulunmakta ve uygulama alanlarına göre üstün yönleri bulunmaktadır (Bayar V., 2014). Buna rağmen geliştirilen sistemler arasında uygulama alanından bağımsız olarak çeşitli performans ölçütlerine göre dış ortamlarda var olan GPS teknolojisi gibi kabul gören tek bir kapalı ortam konumlandırma sistemi bulunmamaktadır. Bu nedenle, 2010 yılından sonra içlerinde Broadcom gibi donanım üreticisi şirketlerin de bulunduğu 22 uluslararası şirket bir araya gelerek konumlandırma için yapılan çalışmalarını standart ve ticari hale getirmek için halen çalışmalarını sürdürmektedir (InLocation Alliance, 2012).

Radyo frekansı teknolojileri alt grubundan biri olan Wi-Fi mevcutta birçok kapalı ortamda kurulu olduğu için, bu gruptaki diğer teknolojilere göre öne çıkmaktadır.

Kullanım yaygınlığı nedeniyle Google, Microsoft, Cisco, Apple gibi dünya devi şirketler çalışmalarını Wi-Fi teknolojisi kullanarak yürütmektedir. Google Wi-Fi teknolojisi kullanan kendi Android konumlandırma sistemine sahiptir. Microsoft sinyal gücü tabanlı bir Wi-Fi kapalı ortam konumlandırma sistemi kullanmaktadır (RADAR, 2001). Bu çalışmalarda mevcut altyapı bilgisini kullanarak hesaplamasal maliyet iyileştirilmesi, konum hassasiyetinin iyileştirilmesi vb. konularda geliştirmeler yapılmakta, yeni metotlar türetilmektedir. Buna rağmen birçok kapalı ortamda mobil cihaza sahip kullanıcılar ortamdaki Wi-Fi erişim noktalarından alınan sinyaller ile konumlarını ancak oda seviyesinde bulabilmektedirler. Yürütülen çalışmaların genelinde bu duruma sebep olan en temel problem ise RF sinyal yayılımının kapalı ortamlarda çeşitli etkilere maruz kalarak değişkenlik göstermesidir. Alınan sinyal gücü (RSS) RF sinyal değişikliklerinin yansıdığı ve konumlandırma sistemlerinde kullanılan temel kavram olarak yer almaktadır. Bu nedenle RF sinyal karakteristiklerinin konumlandırma üzerinde etkisi yeni metotlar geliştirilmeden önce bilinmesi gereken bir zorunluluk olarak ortaya çıkmakta, RF sinyal karakteristikleri ile konumlandırma doğruluğu arasındaki ilişkiye yönelik çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında RF sinyallerinin kapalı ortamda maruz kaldığı etkiler, bu etkilerin tahmin edilebildiği yayılım modelleri ve sinyal karakteristiklerinin kapalı ortam konumlandırma sistemlerine etkisi konularında çalışılmaktadır. Emilim, kırınım, saçılım, yansıma, kırılarak saçılma gibi temel RF sinyal davranışlarının sebep olduğu çok yönlü sönümlenme, gölgeleme ve tünel etkileri incelenmektedir. Konumlandırma sistemlerinin gelişimi ile haberleşme sistemi tasarımlarında kullanılan yayılım modellerinin konumlandırma sistemleri için kullanımı araştırılmaktadır. Emilim ve çok yönlü sönümlenme etkilerini içine alan yayılım modelleri kullanılarak geliştirilen RSS tabanlı konumlandırma sistemlerinin kapalı ortamlardaki koridor gibi tünel etkisi yaratan ortamlarda yetersizliği ortaya konmaktadır. Bu nedenle, kapalı ortamlarda konumlandırma amaçlı tünel etkisini dâhil eden yeni bir yayılım modeli önerisi yapılarak, gerçek ortamda modelin testleri yapılmaktadır.

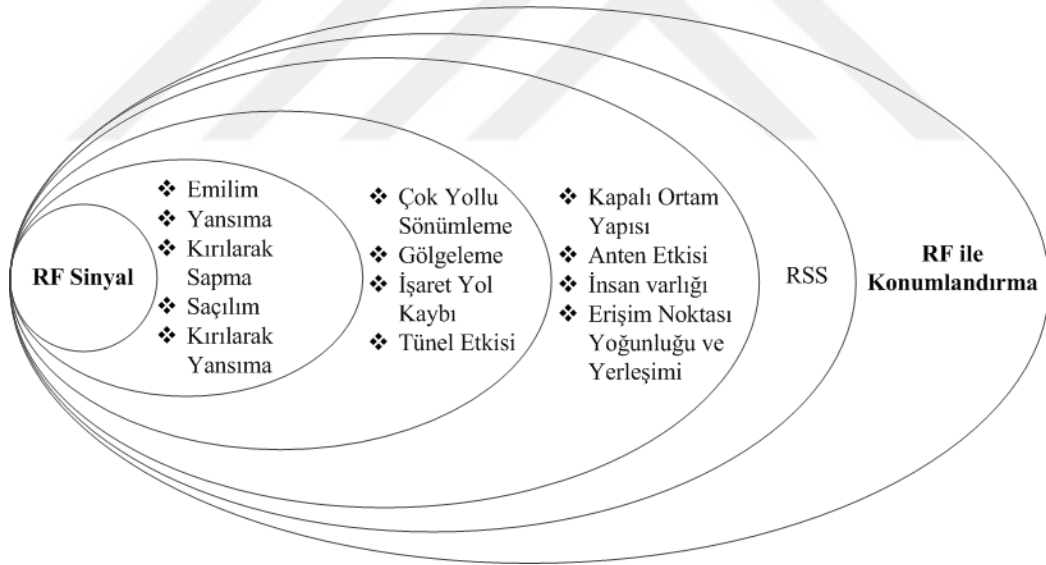
Takip eden Bölüm 2’de RF sinyal karakteristiklerinin temelleri, yayılım modelleri ve konumlandırma sistemlerinde sinyal karakteristiklerinin etkileri literatür araştırması olarak verilmektedir. Bölüm 3’de kapalı ortamlarda tünel etkisini modelleyen bir deneysel

yayımlı model önerilmekte, test ortamı, test ekipmanları ve uygulanan test metodolojileri hakkında bilgiler verilmektedir. Bölüm 4 içerisinde yapılan test sonuçları verilmekte, sonuçlardan elde edilen bulgular tartışılmaktadır. Son bölümde de sonuç ve öneriler yer almaktadır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Radyo frekansı sinyallerinin kullanıldığı konumlandırma sistemlerinde ağırlıklı olarak alınan sinyal gücü (RSS) kullanılmaktadır. Sinyal gücü bilgisi parmak izi ya da geometrik temelli konum hesaplama metotlarında doğrudan veya uzaklık dönüşümü yapılarak kullanılmaktadır. Bu nedenle Şekil 2.1'de gösterildiği üzere geliştirilen konumlandırma sistemlerinde konum hassasiyeti RSS değerlerini etkileyen faktörler ile ilişkili olmaktadır. Yayınlanan bir RF sinyal alıcı tarafına ulaşmadan önce temel olarak emilim, yansıma, kırılarak sapma, saçılım ve kırılarak yansıma etkilerine maruz kalmaktadır. Bu etkilerin oluşturduğu ve uzaklığa bağlı olarak azalma durumları ise çok yönlü sönümlenme, gölgeleme ve işaret yol kaybı olarak bilinmektedir. Kapalı ortamlarda bu etkilerin oluşmasına sebep olan çeşitli faktörler bulunmakta ve bu faktörler sonucu alıcıda kullanılabilir RSS bilgisi elde edilmektedir.



Şekil 2.1 RF Tabanlı Konumlandırma Sistemlerinde Doğruluğu Etkileyen Faktörler

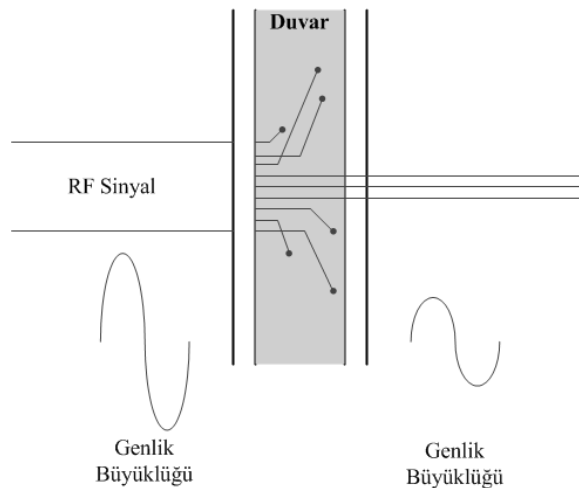
Yapılan literatür araştırmasında öncelikle RF sinyallerin temel davranışları olan emilim, yansıma, kırılarak sapma, saçılım ve kırılarak yansıma incelenmektedir. Bu davranışların ortaya çıkardığı çok yönlü sönümlenme, gölgeleme ve tünel etkileri bulunmaktadır. Bu davranışların modellenmesi için gerekli radyo yayılım modelleri ve kullanımları detaylı olarak araştırılmaktadır.

2.1. RF Sinyal Karakteristikleri

Bir ortamda yayılan RF sinyalin bir verici üniteden alıcı üniteye ulaşması sürecinde maruz kaldığı etkiler yalnızca gürültü, sinyal girişimi ve kanal gecikmelerinden oluşmamaktadır. Sinyalin iletim yolu üzerinde bulunan engeller, yansıma yüzeyleri, açık görüş hattı bulunmaması gibi ortama bağlı parametreler daha kritik ve tahmin edilemeyen etkenlerdir. Bu etkenler bir sinyali tanımlayan bileşenleri dolayısı ile sinyalin genliğini, fazını ve frekansını değiştirebilmekte, bu nedenle alıcı üniteye ulaşan sinyal gücü zamanla değişiklik göstermektedir (Goldsmith, 2005).

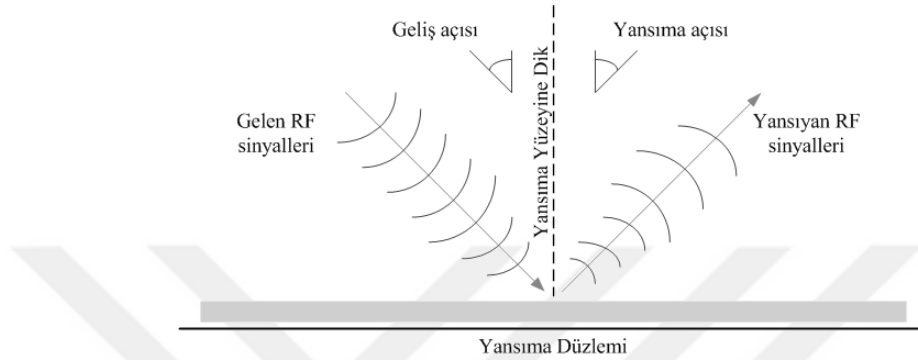
RF sinyaller iç ve dış ortamlarda dalga boyu ve yayıldıkları ortam özelliklerine bağlı olarak emilme, yansıma, kırınım, saçılma ve kırılarak sapma olmak üzere sinyal gücünün zayıflamasına ve değişiklik göstermesine sebep olan beş temel faktöre maruz kalmaktadır (Sarkar vd., 2003; Neskovic vd., 2000). Bu etkiler RF sinyallerin davranışları olarak da nitelendirilmektedir.

RF sinyallerin en bilinen davranışı emilimdir. Eğer RF sinyal bir engele çarpıp yansımıyor ise, engelin etrafından dolaşmakta veya engelin içerisinde geçmektedir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, farklı materyaller emilim özelliklerine göre RF sinyalleri emerek hapsetmektedir.



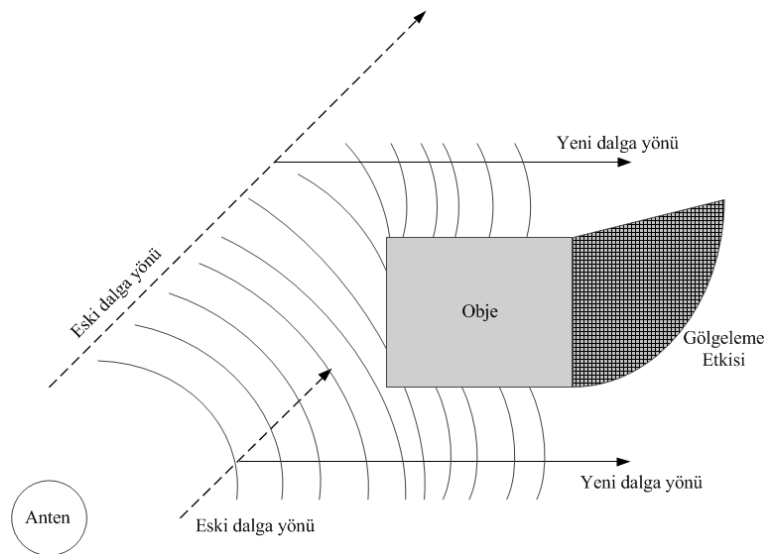
Şekil 2.2 RF Sinyal Emilimi

Yansımada, yayılan RF sinyalin dalga boyuna oranla çok büyük bir engel ile karşılaştığında gerçekleşmektedir. Yansıyan sinyaller RF alıcı noktasında sinyal gücünü artıran veya azaltan etkiye sahip olabilmektedir. Gerçek bir ortamda alıcı antene ulaşan birden fazla sinyalin varlığının büyük ölçüde kaynağı yansıyan sinyallerdir. Şekil 2.3 üzerinde RF sinyalin yansıması gösterilmektedir.



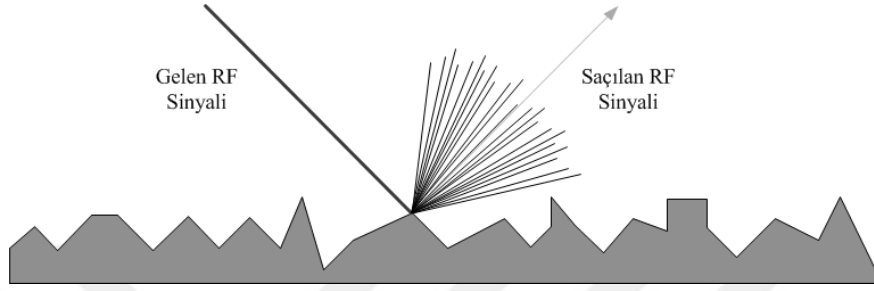
Şekil 2.3 RF Sinyal Yansıması

Kırınım, RF alıcı ve verici arasındaki doğrudan görüş boyutları sinyal dalga boyuna nazaran daha büyük bir cisim tarafından engellediğinde gerçekleşmektedir. Kırınım cismin kenarlarında sinyalin saçılması olarak gerçekleşmekte, aynı zamanda sinyal zayıflayarak yön değiştirebilmektedir. Kırınım mekanizması sinyallerin doğrudan görüş hattında olmayan yerlere ulaşmasını sağlamaktadır. RF sinyallerin kırılarak yeni ve farklı yönlerde ilerlemeleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



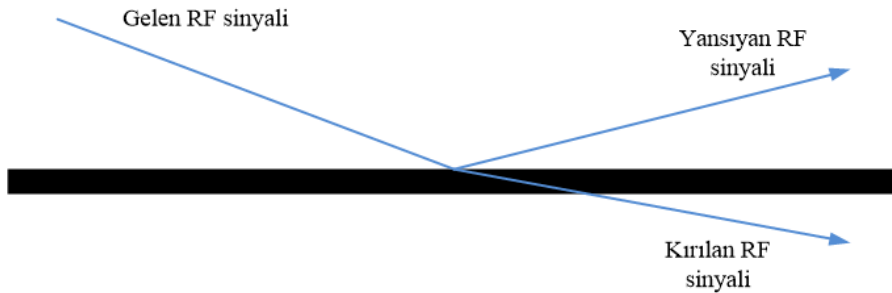
Şekil 2.4 RF Sinyal Kırınımı

Saçılım, sinyal dalga boyu engel cismin büyüklüğüne çok yakın olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Kırınımına benzer yapıda gerçekleşen durumun kırınımından farkı engelle çarpan sinyalin çok sayıda sinyaller oluşturup farklı yönlerde ilerlemesidir. Sinyalin pürüzlü bir yüzeyden saçılması Şekil 2.5'te gösterilmektedir. RF sinyallerini etkileyen faktörler arasında tahmin edilmesi en zor etkidir.



Şekil 2.5 RF Sinyal Saçılımı

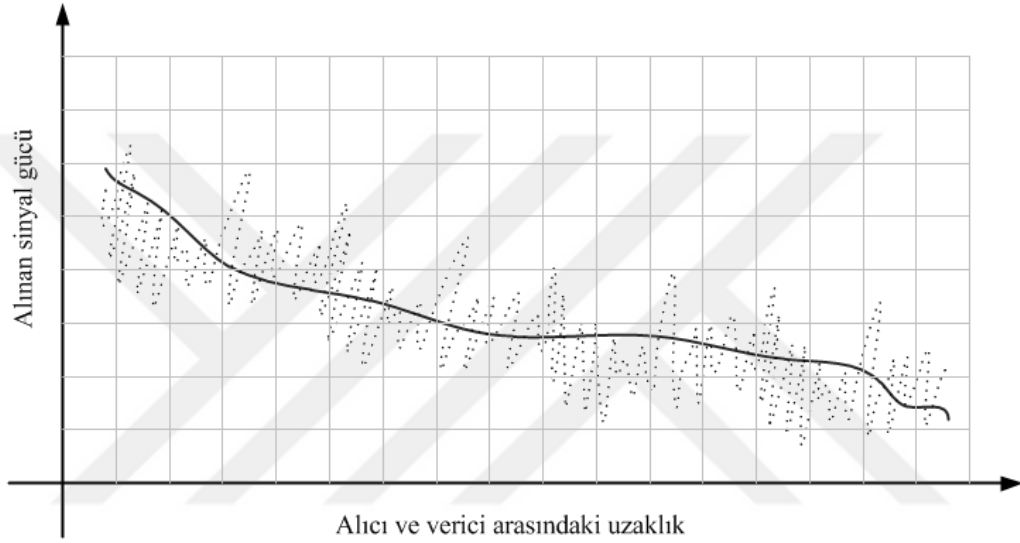
Kırılarak yansıma, sinyalin farklı bir ortamdan kırılması ve yansımaya olayının birlikte gerçekleşmesi ile meydana gelmektedir. Sinyalin bir kısmı kırılarak karşılaştığı ortamda yön değiştirmiş biçimde hareket etmekte, kalan kısmı ise aynı ortamda yansıyarak yine farklı yönde hareket etmektedir. Şekil 2.6'da sembolik olarak sinyalin kırılıp yansıyarak farklı bir yönde ilerlemesi gösterilmiştir. Örneğin; özellikle hücreyel yayınlarda atmosferin değişen kırınım indeksi nedeniyle sinyaller doğrusal değil, eğri bir yol izlemektedir. Bu nedenle bir hücreyel yayın vericisinin kapsadığı alan daha geniş olmaktadır.



Şekil 2.6 RF Sinyal Kırılarak Yansıması

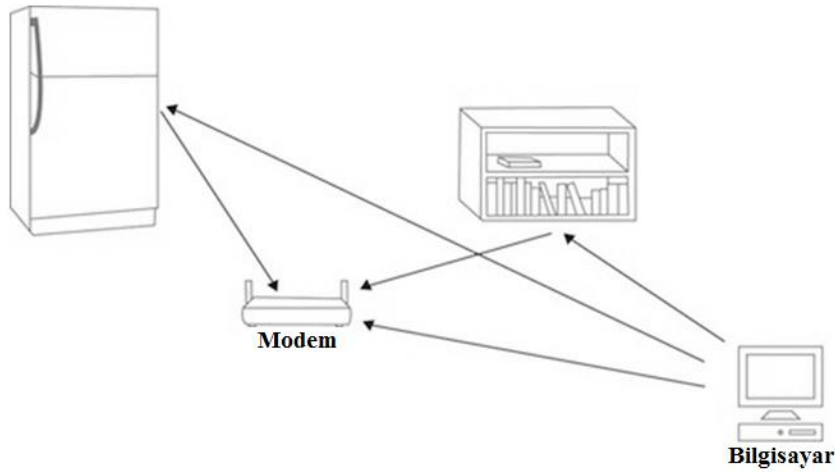
Sönümlenme; geniş ölçekli (large-scale fading) ve küçük ölçekli (small-scale fading) olmak üzere iki kategoride incelenmektedir (Rappaport, 2002). Geniş ölçekli sönümlenme, birkaç yüz metrelik alıcı-verici arası mesafelerde sinyal gücünün değişimini işaret yolu

kaybı (path loss) ve gölgeleme etkisi (shadowing) ile karakterize etmektedir. Küçük ölçekli sönümlenme ise birkaç dalga boyu uzunluğundaki mesafeler ve saniye katlarındaki zaman değişimi süresince alınan sinyal gücünün hızlı değişimlerini incelemektedir. Alıcı ve verici arasındaki uzaklığa bağlı olarak alınan sinyal gücü değişimi Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Geniş ölçekte pürüzsüz olarak azalan sinyalin yavaş değişimleri kırmızı çizgi ile işaret yol kaybı ve gölgeleme etkisini temsil etmektedir. Kesikli çizgi sinyalin yayıldığı uzaklık boyunca ani değişimler gösteren küçük ölçekli sönümlemeyi göstermektedir.



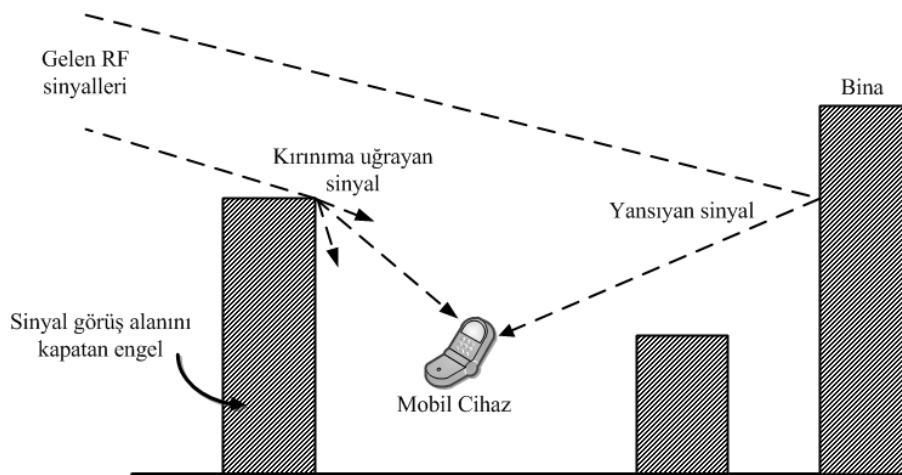
Şekil 2.7 Geniş ve Küçük Ölçekli Sönümlenme

RF sinyallerinin kullanıldığı sistemlerde, vericiden alıcıya iletilen sinyaller arasına engeller girerek sinyallerin farklı yollardan alıcıya ulaşması söz konusu olmaktadır. Bu koşulda vericiden yayınlanan sinyal alıcıya bir dizi sinyal olarak ulaşmaktadır. Örneğin; Şekil 2.8’de bilgisayardan modeme iletilen sinyalin farklı engellerden yansiyarak modeme ulaşması gösterilmektedir. Yönü, genliği, fazı ve ulaşma zamanları farklı olan bu sinyaller çok yollu sönümlenme kavramını oluşturmaktadır (Yin ve Cheng, 2016). Alıcıya ulaşan sinyal gücü alıcıya ulaşan tüm sinyallerin toplamından oluşmaktadır. Alıcıya ulaşan sinyallerin birbirini tamamlayıcı ya da sönümleyici etkileri olabilmekte, bu nedenle alınan sinyal gücünde zamana bağlı olarak değişimler meydana gelmektedir.



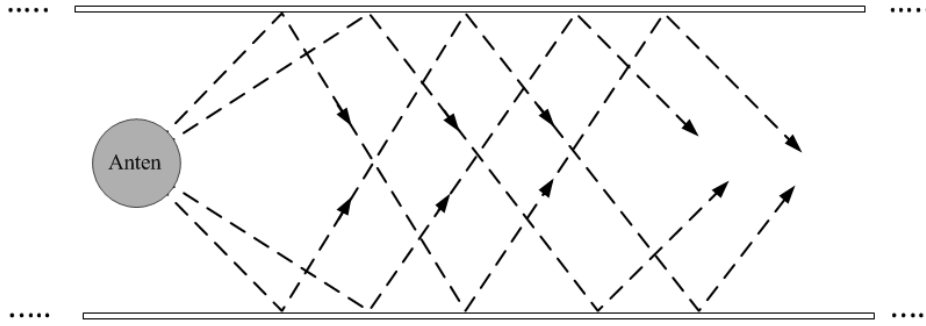
Şekil 2.8 RF Sinyal Çok Yollu Sönümleme

Gölgeleme etkisi olduğu durumlarda vericiden iletilen sinyallerin doğrudan alıcıya ulaştığı bir iletim yolu bulunmamaktadır. Fakat sinyal kırınarak ve yansiyarak alıcıya farklı yollardan ulaşmaktadır. Şekil 2.9'da görüldüğü üzere, alıcı doğrudan gelen sinyali alamamakla birlikte kırılan ve yansıyan sinyaller toplamında alıcıda bir sinyal gücü oluşmaktadır. Yansıyan ve kırılan sinyallerin birbirleri tamamlayıcı etkisi olur ise alıcı yayınlanan sinyali normal düzeyde alabilmektedir. Fakat sinyaller birbirini sönmüleyecek şekilde bir araya gelir ise alıcıda oluşan sinyal gücü düşük düzeyde olmaktadır.



Şekil 2.9 RF Sinyal Gölgeleme Etkisi

Sokak, tünel ve iç ortamlarda koridor gibi sinyal yayılımını yönlendiren ortamlarda tünel etkisi meydana gelmektedir (Östlin, 2009). Tünel etkisine maruz kalan radyo yayılımında sinyal zayıflaması boşlukta seyreden yayılıma göre daha az olmaktadır (Hrovat vd., 2014). Tünel etkisi temsili olarak Şekil 2.10 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2.10 RF Tünel Etkisi

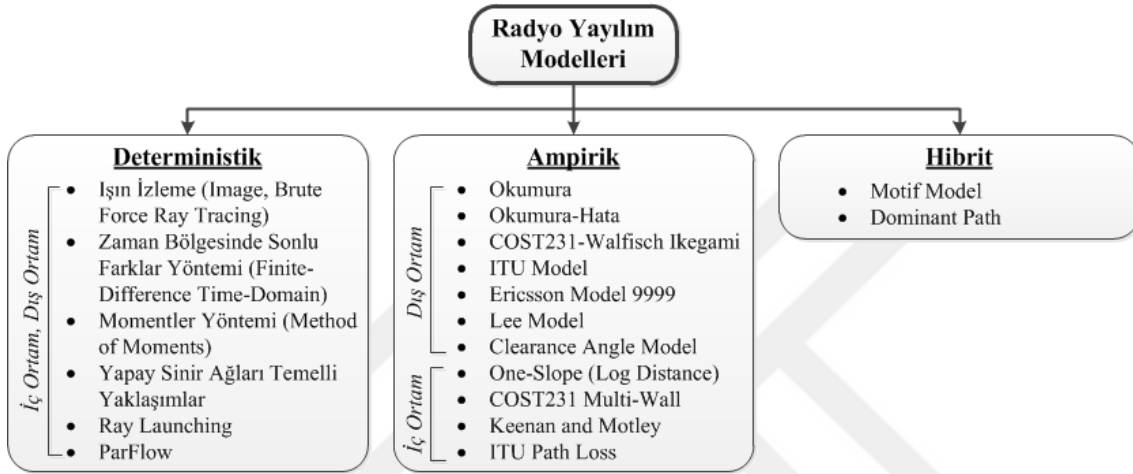
RF sinyallerin maruz kaldıkları etkiler sebebiyle sergiledikleri bu davranışlar RF sinyal teknolojilerinin kullanıldığı alanlarda önceden bilgi edinmek amacı ile radyo yayılım modelleri kullanılarak benzetim yapılmaktadır. Yayılım modelleri ilgili detaylar bir alt kısımda verilmektedir.

2.2.Yayılım Modelleri

Radyo yayılım modelleri; bir vericiden yayılan sinyalin belirli uzaklıkta gücünün tahmin edilmesi, baz istasyonlarının yerleşimi, işaret-gürültü oranı tahmini (signal-to-noise ratio), taşıyıcının girişime oranı (carrier-to-interference ratio) tahmini, kapsama alanı belirlenmesi gibi bilgilerin sağlanması için kullanılmaktadır. Dolayısı ile iç ve dış ortamlarda RF sinyal karakteristiklerini içine alarak RF sinyal yayılımının modellenmesi ihtiyacını karşılamaktadırlar (Sarkar vd., 2003; Neskovic vd., 2000; Hashemi, 1993).

Radyo yayılım modelleri temelde deterministik, ampirik ve hibrit modeller olmak üzere üç kategoride incelenmektedir (Şekil 2.11). Deterministik modellerin temelinde Maxwell denklemlerinin kullanımı ile elektromanyetik dalga teorisi bulunmaktadır. Bu modeller ile özelleşmiş bir alanda yayılım modellemesi çalışıldığı için bölgeye özel (site-specific) modeller olarak da bilinmektedir. Model sonuçları yüksek hassasiyete sahip olmakla birlikte, işlemsel yük ve bölgeye özel modelleme yapılması bu modeller için en büyük dezavantajlardır. Ayrıca modelleme için ortamın detaylı bilgileri gerektiğinden deterministik modeller genel pratik uygulama için popüler değillerdir. Aynı deterministik model iç ve dış ortamlar için kullanılabilir. Ampirik modellerde ise yayılım modeli

çıkarılacak tipik bölgeler içerisinde ölçümler alınarak basitleştirilmiş matematiksel formüller veya dağılım fonksiyonları kullanılmaktadır. Ampirik modellerin deterministik modellere göre hassasiyeti daha düşüktür. Fakat gerçekleşmesi basit ve çok düşük hesaplamasal maliyete sahip modellerdir (CCIR, 1990; Sarkar vd., 2003; Neskovic vd., 2000; Zvanovec vd., 2003; Östlin, 2009, Luo, 2013). Hibrit modellerde deterministik ve ampirik metotlar birlikte kullanılmaktadır.



Şekil 2.11 Radyo Yayılım Modeli Çeşitleri

Okumura (Okumura vd., 1968), Okumura-Hata (Hata, 1980), COST 231-Walfisch-Ikegami (European Commission, 1999), ve ITU) modelleri en bilinen dış ortam ampirik radyo yayılım modelleridir (Sati ve Singh, 2014). Okumura-Hata modelinin Ericsson tarafından uygulaması olan Ericsson Model 9999, Lee ve Clearance Angle modelleri bilinen diğer deneysel modellerdir (Östlin, 2009). Ayrıca ışın izleme (Ray-Tracing) metoduna dayalı yöntemler (Image, Brute-Force Ray-Tracing), zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemi (Finite-Difference Time-Domain), momentler yöntemi (Method of Moments) ve yapay sinir ağlarına dayalı yöntemler dış ortamda radyo yayılımı için kullanılan deterministik modellerdir (Sarkar vd., 2003; Neskovic vd., 2000).

Okumura ve Hata modelleri dış ortamlarda en çok kullanılan model olarak bilinmektedir. Bu model 150-1920 MHz frekans aralığında, 1-100 km arası uzaklıklar için kullanılmaktadır. Anten uzunlukları ise 30 ile 1000 metre aralığında tanımlanmaktadır. Okumura modelinin temelinde belirtilen frekans ve uzaklık aralıklarını ilişkilendirildiği eğriler kullanılmaktadır. Denklem 2.1 ile ifade edilen modelde $L_{50}(dB)$ yol kaybının

yüzde 50 değerini, L_F boşlukta yayılım kaybını, $A_{mu}(f, d)$ boşluğa oranla ortanca (median) azalma değerini, $G(h_{te})$ ve $G(h_{re})$ sırası ile alıcı ve verici anten uzunluğuna bağlı kazanç faktörünü, G_{AREA} ise ortam tipine bağlı kazanç değerini göstermektedir. $A_{mu}(f, d)$ ve G_{AREA} değerleri doğrudan Okumura'nın hazırladığı görsel eğri çizimlerinden çıkartılmaktadır.

$$L_{50}(dB) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad (2.1)$$

Hata modelde ise Okumura tarafından görsel olarak verilen eğrilerin deneysel formülasyonu çıkartılarak ve düzeltmeler eklenerek bir model oluşturulmaktadır. Çalışma frekansı aralığı 150 ile 1500 MHz aralığında olan model Denklem 2.2 ile gösterilmektedir. Denklemden taşıyıcı frekans f_c , mobil anten düzeltme faktörü $\alpha(h_{re})$, etkin alıcı anten yüksekliği h_{re} , etkin verici anten yüksekliği h_{te} , alıcı ve verici arasındaki uzaklık ise d parametresi olarak verilmektedir.

$$L_{50}(dB) = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_{te} - \alpha(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log h_{te}) \log d \quad (2.2)$$

Kapalı ortamlarda ise en yaygın ampirik modeller One-Slope (Log-Distance), COST 231 Multi-Wall (European Commission, 1999), Keenan ve Motley (Motley ve Keenan, 1988) ve ITU Path Loss (Goldsmith, 2005) modelleridir (Jadhavar ve Sontakke, 2012; Zvanovec vd., 2003; Luo, 2013; Flattie, 2012). Deterministik modeller ise dış ortamda olduğu gibi ışın izleme ve zaman bölgesinde sonlu farklar yöntemleri kullanılarak türetilmiş modellerdir. Ray Launching (Lawton ve McGeehan, 1994) ve ParFlow (Chopard ve Droz, 1998) modelleri kapalı ortamlar için deterministik modellere örnek olarak verilebilmektedir.

Logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp (Log-Distance) modeli, Friis'in boşluk modelinin bir uzantısı olmakla birlikte genel olarak kabul görmüş deneysel yol kayıp modelidir. Friis'in modelinde alıcıya ulaşan sinyal gücü tahmini için açık görüş hattı bulunması gerekliliği bulunurken iken, logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli bu koşula tabi değildir. Fakat logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeline göre referans ölçüm noktasında yol kaybının hesaplanması için Friis'in modeli kullanılmaktadır.

Friis'in boşluk modeli; alınan sinyal gücünün (P_r) vericiden uzaklaştıkça, uzaklığın (d) karesi ile ters orantılı olarak azaldığını (Denklem 2.3) ifade etmekte ve Denklem 2.4 ile gösterilmektedir. Bu denklemde $P_r(d)$ watt cinsinden d uzaklığında alınan sinyal gücünü, P_t vericiden iletilen sinyal gücünü, λ metre cinsinden taşıyıcı frekansın dalga boyunu, G_t ve G_r anten kazançlarını, L ise sistem kayıplarını ifade etmektedir. Sistem kayıpları iletim yolu kayıpları, çeşitli filtre kayıpları vb. olabilmektedir. Sistem kaybı L genellikle bire eşit (kayıpsız sistem) veya birden büyük bir değer olabilmektedir. Denklem yalnızca verici antenin uzak alan bölgesinde (far field region) geçerlidir.

$$P_r \propto \frac{1}{d^2} \quad (2.3)$$

$$P_r(d) = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (2.4)$$

Yol kaybı (P_L) sinyalin yayılırken maruz kaldığı sinyal gücü kaybıdır. İletilen efektif sinyal gücü ($P_t G_t$) ile alıcı antene ulaşan sinyal arasındaki fark olarak da ifade edilmektedir. Friis'in model denklemine göre yol kaybı, sinyalin yayılım aşamasında uğradığı kayıp olduğu için alıcı anten kazancı (G_r) ve sistem kayıpları (L) göz ardı edilerek Denklem 2.5 ile gösterilebilmektedir.

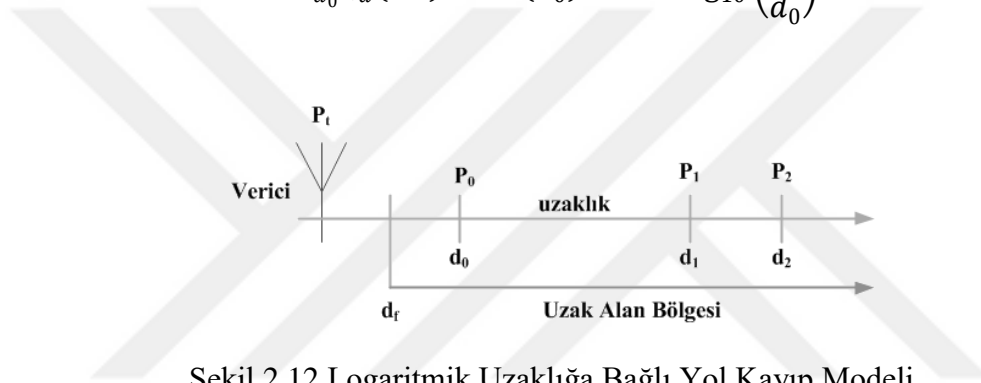
$$P_L dB = -10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \right) = +20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (2.5)$$

Logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modelinde rastgele uzaklıkta birbirinden ayrılmış alıcı ve verici arasında ortalama yol kaybı yayılım zayıflama katsayısı kullanılarak uzaklığa bağlı bir fonksiyon olarak verilmektedir (Denklem 2.6).

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (2.6)$$

Vericinin uzak alan bölgesi içerisinde referans uzaklıkta yapılan ölçüm kullanılarak referans uzaklıktan daha büyük herhangi bir uzaklıkta yol kaybı Denklem 2.7'ye göre Şekil 2.12'de verildiği üzere hesaplanabilmektedir. Denklemde verilen $PL(d_0)$ referans ölçüm noktasında alınan sinyal gücünü, $PL_{d_0 \rightarrow d}(dB)$ $d_0 < d$ koşuluna uyan herhangi bir d uzaklığındaki sinyal değerini ve n ise yayılım zayıflama katsayısını göstermektedir. Uzak alan bölgesi, referans ölçüm mesafesi ve tahmini ölçüm mesafeleri arasındaki ilişki $d_f \leq d_0 \leq d$ eşitsizliğini sağlamak koşulu bulunmaktadır. Ayrıca literatürde kapalı ortam referans ölçümleri için d_0 mesafesi 1 metre olarak alınmaktadır.

$$PL_{d_0 \rightarrow d}(dB) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.7)$$



Logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modelinden türetilmiş duvar, kat geçişleri gibi sinyal azaltıcı etkileri de içine alan yayılım modelleri literatürde yer almaktadır. Seidel ve Rappaport (1992) önerdikleri modelde özel bir yayılım zayıflama katsayısı ve kat faktörünü dikkate alarak kapalı ortam yol kaybının tahmini üzerine çalışmışlardır. Denklem 2.8 ile gösterilen modelde n_{sf} ve FAF (floor attenuation factor) parametreleri deneysel yolla hesaplanmaktadır.

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n_{sf} \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + FAF \quad (2.8)$$

Devasirvatham vd.nin (1991) modelinde ise kat faktörü dışında uzaklık ile üssel olarak artan fazladan bir kayıp faktörü tanımlanmaktadır. Model Denklem 2.9'da verilmekte ve α çalışılan kanal için dB/m cinsinden kayıp faktörünü göstermektedir.

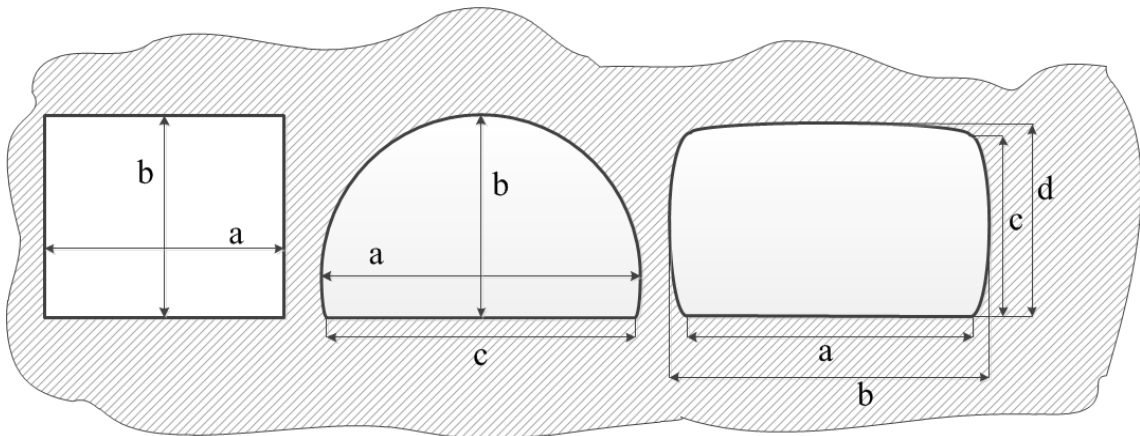
$$PL(d) = PL(d_0) + 20 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \alpha d + FAF \quad (2.9)$$

Motley ve Keenan (1988) önerdikleri modelde kat kayıp faktörünü bağımsız olarak ifade etmektedir. Bu modele Lima ve Menezes (2005) tarafından duvar geçişindeki sinyal düşümü için yeni bir parametre tanımlanmıştır. Bu parametre ile duvar geçişlerindeki sinyal azalmaları deneysel olarak detaylandırılarak malzeme ve kalınlığa bağlı biçimde engel nedeniyle oluşan sinyal kaybı hesaplanmaktadır.

Motif ve Dominant Path modelleri ise deterministik ve ampirik modellerin kombinasyonu ile oluşmuş modellerdir (Luo, 2013; Flattie, 2012). Bu tür hibrit modellerde deterministik modellerin işlem yükü ampirik modellerle zayıflatılarak daha hassas tahminlerde bulunan modeller hedeflenmektedir. Motif modeli ilk olarak Klepal'in (2003) doktora çalışmasında ortaya konmuştur. Ray Launching modelinin materyallerin elektriksel özellikleri ve Fresnel denklemleri eklenmediği durumda ortaya çıkan modifiye edilmiş halidir. Emilim, yansıma ve saçılım için tanımlanan olasılık parametreleri ile gerekli hesaplamasal maliyet ve karmaşıklık Ray Launching modelinden daha iyi hale getirilmiştir. Dominant Path modelinde kapalı ortam içerisindeki odalar arasında ağaç yapısı kurularak, baskın yollar belirlenmektedir. Buna göre 3 farklı yayılım modeli çalıştırılmaktadır. Bu modellerden ikisi yapay sinir ağı tabanlı, kalan model ise ampirik tabanlı bir yayılım modelidir (Wölfle ve Landstorfer, 1998).

Yukarıda verilen yayılım modelleri yanı sıra RF sinyaller tünel yapısına sahip ortamlarda (ulaşım amaçlı tünel, dar koridor vb.) farklı yayılım karakteri göstermektedir. Bu nedenle tünel etkisi gösteren ortamlar için yayılım modelleri üzerine ayrıca çalışılmaktadır. Güncel bir çalışmada tüneller için kullanılan yayılım modelleri gözden geçirilerek, modeller karmaşıklık ve model için gerekli bilgiler açısından karşılaştırılmaktadır (Hrovat vd., 2014). Çalışmada Maxwell denklemleri ile nümerik metotlara dayalı modeller, dalga kılavuzu (waveguide) modeli, ışın izleme metoduna dayalı modeller ve çift eğimli (two-slope) yol kayıp modelleri incelenmektedir. Tünel geometrisinin sinyal zayıflama oranı üzerindeki önemli etkisinden bahsedilmektedir (Şekil 2.13). Tünel kesitinin maksimum uzunluğunun sinyal dalga boyundan yaklaşık on beş kat büyük olduğu durumlarda sinyal zayıflamasının tünel geometrisinden bağımsız

gerçekleştiği anlatılmaktadır. Wang (2012) ise çalışmasında dikdörtgen maden tüneli içerisinde sinyal azalmasının karakteristiğini incelemektedir. Vericinin tünel duvarına yakın olduğu durumlarda sinyal azalması daha fazla olurken, tünelin ortasında yer alan verici için azalma miktarı oranı minimum olmaktadır. Hrovat vd. (2011) UHF frekans bandında tünel geometrisi ve boyutlarının işaret yol kaybına olan etkisini araştırmaktadır. Yapılan çalışmada tünel kesiti ve sinyal frekansının sinyal yol kaybı değerlerini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenirken, tünelde kullanılan materyal etkisinin önemsenmeyecek derecede olduğu belirtilmektedir. Benzer şekilde tünelin şekli, alıcı ve vericinin enine pozisyon değişimleri sinyal kaybını aşırı derecede etkilememektedir. Yapılan benzetim testi sonuçlarına göre sinyal taşıyıcı frekansı arttıkça tünel etkisinin belirginleştiği, bu nedenle sinyal kaybının azaldığı gözlemlenmektedir. Aynı ekip tüneller ve yeraltındaki koridorlar için yol kayıp modellerini lisanslı ve ücretsiz simülasyon yazılımlarını kullanarak yazılımların uygunluğunu değerlendirmektedir (Hrovat vd., 2012). Sun ve Akyildiz (2008) tünellerdeki sinyal yayılımı için önerdikleri yeni modelde (Multimode model) tünelin herhangi bir noktasında işaret yol kaybı ve gecikme yayılımını analitik olarak ifade edebilmektedir. Modelin test sonuçlarına göre tünel büyüklüğü ve sinyal frekansı yayılım için kritik parametrelerdir. Benzer şekilde verici antenin pozisyonu yayılımı etkilemektedir. Tünel içerisindeki havanın nemi, basıncı, sıcaklığı gibi fiziksel değişkenler ve tünel duvarlarının materyali ise yayılımda etkin bir yere sahip değildir. Devam eden çalışmalarda Multimode modeline gölgeleme etkisi dahil edilerek model geliştirilmektedir (Sun ve Akyildiz, 2010).



Şekil 2.13 Tipik Tünel Kesitleri

Kapalı ortamlarda tünel etkisi yaratan koridor yapıları için ayrıca önerilen modeller ve yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Porrat (2002) tarafından önerilen modelde UHF frekans bandında koridor ve sokak ortamında tünel etkisi modellenmektedir. Vericiye on metre uzaklıktan daha fazla olan koridor bölgelerinde tünel etkisinin yayılımı etkilediği gözlenmektedir (Porrat ve Cox, 2004). Yarkoni ve Blaunstein (2006) ise çalışmalarında yarı deterministik model ve yarı ampirik yaklaşım ile kat geçişleri, koridorlardaki tünel etkisi ve diğer sönümlenme faktörlerini dikkate alan birleşik bir model sunmaktadırlar. Model kapalı ortamlardaki haberleşme yapısında iletişim kayıp (link budget) performansının iyileştirilmesine yönelik geliştirilmiştir. Söderman (2012) tez çalışmasında odalara komşuluğu olan düz bir koridor için teorik iç ortam radyo yayılım modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model iki boyutta dalga kılavuzu (waveguide), mod eşleştirme metodu (mode matching) ve saçılım matrislerinin kademeli eşlenmesi ile ortaya konulmuştur. Model testlerinde koridor duvarlarının dielektrik iletkenlik katsayısının koridordaki sinyal yayılımını tünel etkisi nedeni ile etkilemediği görülmektedir.

RSS tabanlı konumlandırma sistemlerinde yayılım modelleri geometrik tabanlı yöntemlerde uzaklık dönüşümünde kullanılmaktadır. Lassabe vd.nin (2005) yaptıkları çalışmada Friis boşluk modeli uygulamaya göre kalibre edilerek Wi-Fi terminallerin konumlandırılmasında sinyal gücünden uzaklık verisine dönüşüm için kullanılmaktadır. Dao vd. (2013) çalışmalarında olasılığa dayalı yeni bir yayılım modeli önerisi ile konumlandırma sistemi geliştirmişlerdir. RF konumlandırma sistemleri için iki temel yöntem olan RF parmak izi yöntemi ve elips kesiştirme yöntemi Alkası vd.nin (2013) çalışmalarında karşılaştırılmıştır. Elips kesiştirme yöntemi için gerekli uzaklık dönüşümlerinde logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli kullanılmaktadır. Chuku vd. (2013) ise kablosuz sensör ağı altyapısıyla RSS tabanlı konumlandırmada kullanılabilecek gölgeleme etkisini içine alan yayılım modeli dönüşümü önermektedir. Namik vd.nin (2008) çalışmasında en az kareler ve maksimum benzerlik yöntemleri ile konumlandırma yapılarak, çalışılan ortama ait sinyal zayıflama katsayısı ve gölgeleme etkisinin konumlandırma hatalarına etkisi araştırılmaktadır. Küçük değere sahip sinyal zayıflaması katsayısı ve büyük değere sahip gölgeleme standart sapması olan ortamlarda konumlandırma hatalarının yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmektedir. Yapılan bir diğer çalışmada farklı olarak ışın izleme deterministik modeli konumlandırma amaçlı kullanılmaktadır (Tayebi vd., 2009).

2.3. RF Tabanlı Konumlandırma Sistemlerini Etkileyen Faktörler

Konumlandırma için RSS değeri kullanılan RF sistemlerde bu değeri etkileyen tüm etkenler doğrudan konumlandırma performansını etkilemektedir. Önceki kısımlarda verilen RF sinyallerin yayılım karakteristikleri RSS değişimlerine sebep olmaktadır. Ayrıca ortam yapısı, anten tipi, insan varlığı, erişim noktası yoğunluğu ve erişim noktası yerleşimi (kapsama alanı) de RF tabanlı konumlandırma performansını etkilemektedir.

2.3.1. Kapalı ortam yapısı

Kapalı ortam yapısı RSS değişimlerini etkileyen en temel faktör olarak bilinmektedir. Bunun nedeni RF sinyal karakteristiklerinin ortamda kullanılan yapı malzemelerine göre değişkenlik göstermesidir. Kapalı ortam yapısı başta olmak üzere bu ortamları bölen duvar ve katların yapıldığı malzemeler RF sinyalin yayılırken etkileşime girdiği yüzeyler olarak görülmektedir. Farklı materyal özelliklerine göre bir RF sinyalin emilim, yansıma, kırınım ve saçılım miktarı değişkenlik göstermektedir. Literatürde telsiz iletişim ve konumlandırma amaçlı farklı frekanslarda RF sinyalleri için bu etki üzerinde çalışmalar bulunmaktadır (Ahsan vd., 2013; Ji, 2012; Fan vd., 2014; Yang vd., 2011).

Ahsan vd. (2013) çalışmalarında farklı materyaller içeren duvar çeşitleri üzerinde sinyal kayıpları için gerçek ortamda ölçümler yaparak Saunders ve Aragon-Zavala'nın (2007) kitabında yer alan teorik kayıp değerleri ile karşılaştırma yapmaktadır. RSS değişimlerinin detaylı incelenmesi için bir dalga boyu (12,5 cm) adımlar ile ölçümler toplanmıştır. Çizelge 2.1'de 2.4 GHz ve 5 GHz frekanslarında verilen maddelere göre sinyal kayıp değerleri gösterilmektedir. Çizelge 2.2'de ise gerçek ölçümler ile elde edilen Wi-Fi sinyalinin farklı materyallere göre emilimden kaynaklı sinyal gücü kayıpları verilmektedir.

Çizelge 2.1 Emilim Sinyal Kayıpları (Saunders ve Aragon-Zavala'dan, 2007)

	2.4 GHz Kayıp (dB)	5 GHz Kayıp (dB)
İç alçı panel bölme	3-4	3-5
Kübik duvar bölmesi	2-5	4-9
Ahşap kapı (içi boş-dolu)	3-4	6-7
Tuğla/Beton duvar	6-18	10-30
Cam/Pencere (boyasız)	2-3	6-8
Çift katlı kaplamalı cam	13	20
Kurşun geçirmez cam	10	20
Çelik/Yangın çıkış kapısı	13-19	25-32

Çizelge 2.2 Gerçek Ortam Emilim Kayıp Değerleri (Ahsan vd.den, 2013)

Engel	Kayıp (dB)
Cam (1 cm kalınlıkta)	5
Ahşap duvar (10 cm kalınlıkta)	6
Tuğla duvar (30 cm kalınlıkta)	17
Çatı (27 cm kalınlıkta)	15

Kapalı ortamdaki duvar bölmeleri ve tavanın iç ortam yayılımına etkisi Ji'nin (2012) çalışmasında bir üniversite binasının yapılış evrelerinde testler alınarak gösterilmektedir. Araştırmada 433 MHz ve 2.4 GHz sinyaller kullanılmaktadır. Sekiz ay süren testler boyunca binanın 4 farklı evresinde Ray Tracing kullanılarak elde edilen RSS verileri incelenmektedir. Test ortamı 4 adet odadan oluşmaktadır. Bir odaya verici konup diğer üç odadan testler alınmaktadır. Sorunu ortaya koymaya yönelik yapılan bu test ile duvarlar son haline geldiğinde görülen etki iç ortamlarda duvarların zayıflatma davranışını ortaya koymaktadır. Bir diğer çıkarım ise odaların tavanı tamamlandığında yakın mesafelerde tavan etkisi olumlu yönde olmaktadır. Bunun nedeni sinyal yansımaları olarak belirtilmektedir. Çalışmanın devamında ise 3 boyutlu bir yayılım modeli önerilmektedir. Bu model iki katlı bir binada test edilmektedir. Katlar ve duvarlar arasında sinyal zayıflama değerleri olarak bağ kurulmakta ve katlar arası geçiş duvar zayıflamaları bazında ifade edilmektedir. 2.4 GHz ve 433 MHz frekanslarında test edilen yayılım modeli sonuçlarına göre düşük frekanstaki sinyallerde daha büyük kayıplar olmaktadır.

Duvar yansımalarının RSS tabanlı konumlandırma sistemi üzerine etkisini inceleyen Fan vd.nin (2014) yaptığı çalışmada Two-Ray Tracing model kullanılmaktadır. 490 MHz ve 2400 MHz frekanslarında yapılan testler ile kısa mesafelerde yansıma başta olmak üzere kırınım, kırılarak sapma gibi nedenlerden ötürü hassasiyetin etkilendiği örneklenmektedir. Hassasiyeti artırmak için ise daha fazla sayıda düğüm kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca ortamda yer alan mobil düğümlerin bu konuda katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.

Kapalı ortamlarda kat ayrımları hatalarını azaltma yönünde Yang vd. (2011) yeni bir metot önermektedir. Wi-Fi karışıklık alanları tanımlanmakta ve buna göre erişim noktalarının benzerliğine bakılarak kat ayrımı hatalarının azaltılması öngörülmektedir. Sistem alınan parmak izi verilerini işleyerek, konum hesaplanacak alanın yeni bir kavram olarak tanımlanan Wi-Fi karışıklık alanı içerisinde olup olmadığını belirlemektedir. Buna göre Jaccard katsayısı ile kat belirlenerek yaklaşık konum bilgisi üretilmektedir.

Fink ve Beikirch (2015) uzun ayak madenciliğinde personel takip sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada bu tür tünel ortamlarında bilinen yayılım modellerinin dalga kılavuzu etkisi nedeniyle geçerli olmadığından bahsedilmektedir. Bu nedenle kullanılan konumlandırma sisteminde tünel etkisinin dahil edildiği ağırlıklı merkezi konumlandırma (weighted centroid localization) algoritması yeniden düzenlenmiştir. Yapılan düzenleme ile tüneldeki radyo yayılımı incelenerek RSS tabanlı uzaklık tahminleri iyileştirilmektedir.

2.3.2. Anten etkisi

RF sinyallerin kullanıldığı sistemlerde en önemli donanım elemanlarından biri antenlerdir. Anten özellikleri iletilen sinyal gücünü ve alınan sinyal gücünü değiştirebilecek parametrelerden oluşmaktadır (Alsmadi ve Saif, 2015). Bu parametreler RSS tabanlı konumlandırma sistemlerinde bahsedilen cihaz çeşitliliği problemlerinin temelini oluşturmaktadır.

Anten özellikleri nedeniyle antenlerde performans değişimleri ve etkilendikleri parametreler AT & T (2009) tarafından teknik doküman olarak sunulmaktadır. Teorik olarak iki anten arasında enerjinin etkili transferi için ışına örüntülerinin doğru yönde

optimize edilmesi ve aynı oryantasyonda polarize edilmesi gerekmektedir. Gerçek ortamda ise iki anten arasında açık görüş hattı genelde bulunmamaktadır. Özellikle 500 MHz üzeri frekanslarda antenler arasındaki duvar, insan vb. nesnelere nedeniyle ışınma örüntüsü ve polarizasyon değişebilmektedir. Işınma örüntüsü ve polarizasyon üzerindeki bu etkiler rastgele ve kontrol edilemez olduğu gibi zamana bağlı olarak da farklılık göstermektedir. Bir cihaz sabit konumda bulunur iken etrafta bulunan nesnelere nedeniyle polarizasyonu değişmektedir. Buna ek olarak anten empedansı, bant genişliği ve ışınma örüntüsü antenin üzerinde bulunduğu cihazın karakteristiklerine ciddi ölçüde bağlıdır. Cihaz üzerinde iletken bölümler anten üzerinde en büyük etkiye sahip iken; cihaz kabı, baskılı devre vb. etkenler de anten tasarımı ve performansını etkilemektedir.

Bras vd.nin (2012) çalışmasında RSS, uçuş zamanı ve varış açısı temelli yöntemler kullanan konumlandırma sisteminde bu parametrelerin üzerinde durulmakta ve konumlandırma sistemleri için uygun anten kullanımının önemi vurgulanmaktadır. Özellikle ışınma örüntüsü çeşitliliğinin konum bulma performansı iyileştirilmesi üzerinde durulmaktadır. Işınma örüntüsü yanı sıra anten bant genişliği ve polarizasyon karakteristiklerinin konumlandırma için anten tasarımlarında kritik olduğu belirtilmektedir. Yapılan çalışma sonucunda RSS kullanılarak mesafe dönüşümü yapılan sistemlerde 3 boyutta homojen sinyal iletimi yapabilen eş yönlü (isotropic) anten kullanımının en iyi çözüm olduğu belirtilmektedir. Fakat bu anten tipi bulunamadığı için halka şeklinde (toroidal) ışınma yapan ve azimut düzleminde her yöne ışınma yapan antenler kullanılmaktadır. RSS parmak izi tabanlı yöntemlerde ise her yöne ışınma yapan antenlerin, belli yönde ışınma yapan antenlere göre daha az RSS değişimine sebep olması nedeniyle tercih edildiği anlatılmaktadır.

Kleisouris vd. (2010) ise vericilerde birden fazla anten kullanılarak alınan sinyal gücü değişiminin azalmasını anlatmakta ve kablosuz konumlandırma hassasiyeti üzerine etkisini araştırmaktadır. Yapılan çalışmada birden fazla anten kullanımının konumlandırma üzerine etkisi parmak izi eşleştirme, maksimum benzerlik tahmini, sinyal parmak izlerinin eşik değerine göre seçilmesi ve hiperbol kesişim (multilateration) yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada 802.11 (Wi-Fi) ve 805.15.4 (Zigbee) olmak üzere iki ayrı test ortamı hazırlanmıştır. Ortama üç antenli sensör düğümleri yerleştirilmiştir. 101 test noktasından farklı oryantasyonlarda RSS bilgileri toplanmıştır. Test noktaları arasındaki

mesafe 1,5-3 metre arasında değişmektedir. Son durumda 802.11 için 909 adet, 805.15.4 için ise 707 adet RSS bilgilerinden oluşan veritabanı oluşturulmuştur. Bu veritabanı üzerinden farklı konumlandırma algoritmaları kullanılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 2.3'de verilmektedir. Verilen sonuçlar aynı zamanda RADAR sistemi (Bahl ve Padmanabhan, 2000) ile karşılaştırmalı olarak anlatılmaktadır.

Çizelge 2.3 Anten Sayısına Bağlı Farklı Algoritmaların Konumlandırma Sonuçları Karşılaştırması (Klesiouris vd.den, 2010)

	802.11	805.15.4
RADAR - scene-matching algoritm	Masa seviyesinde 1 antenli sisteme göre 3 antenli yapı yüzde 20 iyileşme sağlamaktadır. Koridorda aynı koşullarda masa seviyesinde elde edilen iyileşmeden daha az bir iyileşme sağlanmıştır.	Masa seviyesinde 1 antenli sisteme göre daha iyi sonuç elde edilmiştir. Fakat 2 ve 3 antenli kullanım konusunda birbirine üstünlük görülmemektedir. Koridorda ise 802.11 için koridorda yapılan test sonuçlarına çok yakın iyileşme olduğu görülmüştür
Area-Based Probability	3 antenli yapı en iyi performansı göstermiştir. Hatanın 2 metreden 60 santimetreye kadar düştüğü görülmüştür.	Sonuçlar 802.11'de elde edilen çıktılarına göre düşük performans göstermiştir.
Simple Point Matching	3 antenli yapı masa seviyesi ve koridor ölçümlerinde en iyi performansı sergilemiştir.	Benzer şekilde 3 antenli yapının en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir.
Bayesian Networks	2 ve 3 antenli yapı 1 antenli yapıya göre iyi performans göstermiştir. Koridor bazında ise gölgeleme etkisi nedeni ile performans düşüşü yaşanmıştır.	Her üç yapı için iyileşme gözlenmiştir.

Konumlandırma çalışmalarının konularından biri olan cihaz çeşitliliği problemi de anten etkisi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Farklı mobil cihazların kullanıldığı sistemlerde özellikle alıcı antenlerin farklılıkları nedeniyle kullanılan cihaza göre farklı RSS değişimleri gözlenebilmektedir. Literatürde cihaz çeşitliliği nedeniyle RSS değişimlerini inceleyen, RSS değişimlerine çözüm önerisi sunan, cihaz çeşitliliği ile konum hassasiyeti arasında ilişki kuran çalışmalar yer almaktadır (Kjærsgaard, 2006; Kaemarungsi, 2006; Park vd., 2011; Chen vd., 2006; Tsui vd., 2009).

Kjærsgaard (2006) çalışmasında Wi-Fi konumlandırma sistemlerinde farklı donanım ve yazılıma sahip cihazların (etiket, dizüstü bilgisayar vb.) adaptasyonu problemini ortaya

koymaktadır. Problemin çözümü olarak ise iki otonom sistem önerilmiştir. İlk konumlandırma sisteminde farklı donanım ve yazılım kombinasyonlarının uygunluğunu belirleyecek bir sistem geliştirilmesidir. İkincisi ise uygun kombinasyonların RSS tabanlı sisteme adaptasyonu olarak verilmektedir. Çalışmada kullanılan donanım ve yazılım kombinasyonları için Automatic Still Period Analyzer, Fitness Classifier ve farklı normalizasyon metotları uygulanarak elde edilen sonuçlara göre önerilen sınıflandırma çözümleri %98 oranında başarılı olmuştur. Normalizasyon için ise el ile yapılan normalizasyon çözümleri tüm kombinasyonlar üzerinde %19,2 iyileştirme sağlar iken, önerilen otomatik normalizasyon yöntemi %13,1 kadar hassasiyette iyileşme sağlamaktadır.

Diğer bir çalışma, beş farklı IEEE 802.11 b/g WLAN arayüz kartları kullanılarak RSSI dağılımlarını incelemektedir (Kaemarungsi, 2006). Çalışmanın amacı deneylerle elde edilen dağılım verilerinin farklı konumlandırma sistemlerinde performansı iyileştirici yönde kullanılması olarak belirtilmektedir. Ölçülebilir aralıkları Çizelge 2.4'te verilen kartlardan alınan ölçümlerce oluşturulan RSS dağılımlarında ortak özellik olabilecek Left Skewness özelliğinden bahsedilmektedir. Radyo haritası oluşturulurken aynı cihazların kullanılmasına dikkat edilmesi gerektiği aksi halde cihazlar arası dönüşümlere ihtiyaç olacağı ve gerçek RSS dağılımlarının pozisyon hassasiyetini olumlu etkileyeceği konularına dikkat çekilmektedir.

Çizelge 2.4 Ölçülebilir RSS Aralıkları (Kaemarungsi'den, 2006)

WLAN Kart Modeli	RSSI (dBm)		
	Maksimum	Minimum	Aralık
3CRUSHB10075	+10	-94	104
AirPlus DWL-650	-50	-100	50
EZ Connect SMC2635W	-14	-82	68
HWC54G Rev.R	0	-75	75
PRO/Wireless 2200BG	-10	-84	74

Park vd. (2011) çalışmalarında RF harita oluşturmada standart kullanıcı verilerinden yararlanılan sistemlerde cihazların farklılığı nedeni ile konumlandırma performansının düştüğünü öne sürmektedir. Yapılan çalışmada, RF haritanın bir cihaza göre oluşturulması ve bunun diğer cihazlar için kullanıldığı durumlarda lineer dönüşüm yapılmasının yetersizliği problem olarak sunulmaktadır. Buna ek olarak farklı cihazların

aynı noktada belli bir erişim noktasından sinyal alıp alamama durumu probleme ek olarak belirtilmektedir. Probleme çözüm olarak ise kernel estimation metodu verilmektedir. Bu metod ile sinyal güçlerinin cihazlar arası dönüşümünün daha etkili sonuçlar ürettiği ortaya konulmaktadır. Ayrıca erişim noktasının farklı cihazlar için var olup/olmama durumunun konumlandırma performansı üzerine etkisi araştırılmaktadır. 6 farklı cihazın 18 farklı iç ortamda değerlendirilen verileri sonucunda cihazlar arasında lineer korelasyon olduğu fakat lineer dönüşümlerin yeterli olmadığı bahsedilmektedir. Ayrıca cihaz farklılıklarına göre erişim noktası tespitinin konumlandırma performansına etkisi Kullback-Leibler ıraksama yöntemi ile incelenerek, erişim noktası tespiti ile konum hassasiyeti arasındaki ilişki ortaya konmaktadır.

GSM sinyalleri kullanılarak yapılan çalışmada ise konumlandırma hassasiyetine etki eden faktörler olarak algoritma seçimi, tarama seti büyüklüğü, farklı sağlayıcıların kullanılması, farklı cihazlarda veri setlerinin kullanımı ve ölçümleme verisi yoğunluğu verilmektedir (Chen vd., 2006). İç ortamlar konumlandırma sistemlerine olduğu gibi dış ortamlarda da alınan sinyal gücünün kullanıldığı sistemlerde farklı cihazların konumlandırma performansı etkilenmektedir. Çalışmada merkezi yöntem (centroid) algoritması kullanılan durumlarda %6-8 arasında performans düşüşü yaşanmaktadır. Gauss süreci kullanıldığında ise bu düşüş %57-63 arasında değişmektedir.

Cihaz çeşitliliği problemine öğrenme metodu kullanarak çözüm öneren Tsui vd.nin (2009) çalışmasında, 100 saniyelik öğrenme süresinden sonra pozisyon hassasiyetinin %4 oranında iyileştiği yapılan testlerle ortaya konulmaktadır. Önerilen yöntemde ilk adım bilinmeyen takip cihazında kabaca bir konum hesabının Pearson moment korelasyonu çarpım katsayısı yardımı ile bulunmasıdır. İkinci adımda ise lineer regresyon, beklenti maksimizasyonu metodunun iki farklı versiyonu, sinir ağları öğrenme algoritmaları uygulanmaktadır.

2.3.3. İnsan varlığı

Kapalı ortamlarda bulunan insan yoğunluğu RF tabanlı konumlandırma sistemlerinde bilinen çevresel faktörlerden bir tanesidir. Bu etkinin sebebiyet verdiği anormal durumlar özellikle RSS verisinden uzaklık dönüşümü elde edilerek konum

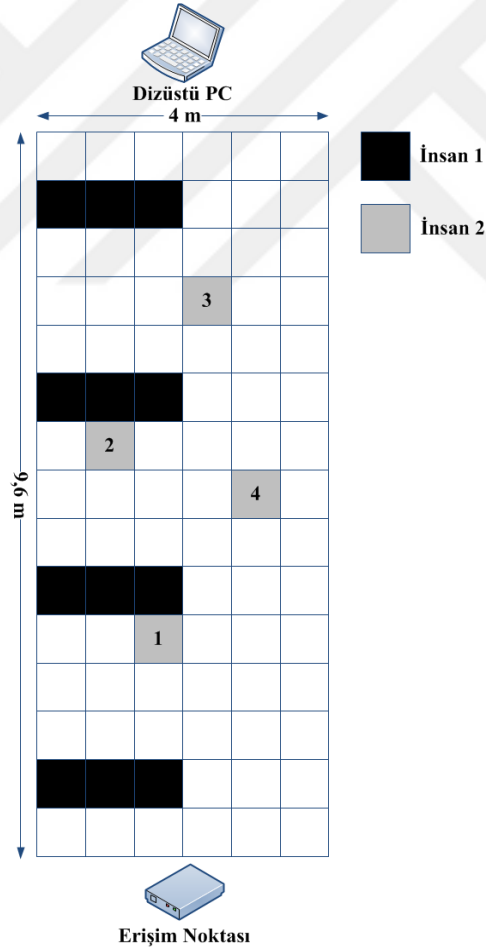
hesaplanan sistemlerde modellerin basitleştirilmesi nedeniyle göz ardı edilmektedir. Bu nedenle RF tabanlı konumlandırma sistemlerinde yer alan iletişim kanallarındaki maruz kalınan etkilerde insan varlığının etkisinin detayına yeterince yer verilmemektedir.

İnsan etkisi genel olarak RSS değerleri üzerinde tahmin edilemeyen dalgalanmalara sebep olmaktadır. Çünkü insan vücudunun %70 miktarı sudan oluşmaktadır ve bu durum radyo sinyallerinin genlik değerlerinde ciddi azalmalara sebep olmaktadır. En basit yaklaşım ile elektromanyetik olarak düşünülerek insan vücudu homojen dielektrik silindir olarak modellendiğinde sinyaller üzerinde yansıma ve kırınım etkisi göstermektedir. Bu durum önceki çalışmalardan bilindiği üzere sinyalin çalışma frekansı ve dalga boyunun vücut boyutuna göre kıyaslanmasına ve uzuvların genel kompozisyonuna göre değişerek etkilenmektedir (Rosa vd., 2012). Detaylı olarak bakıldığında ise insan varlığı nedeniyle meydana gelen RSS değişimlerinin en temelde, anten yapısı üzerindeki etkilerden kaynaklandığı görülmektedir.

Anten sistemi açısından düşünüldüğünde insan vücudu kayıplı bir dielektrik yük olarak tanımlanabilmektedir. Anten verimliliğinin azalması ve ışıma örüntüsü bozulmaları dielektrik yük olarak tanımlanan insan vücudunun neden olduğu temel bozukluklardır (Pelosi vd., 2012). RSS üzerine insan etkisi iki farklı yaklaşım ile ele alınabilmektedir. İlk yaklaşım mobil cihaz kullanıcılarının sinyaller üzerine etkisidir. Örneğin; kullanıcı mobil cihazı elinde tutarken, cihaz anteninin yakın bölgesinde (near field) yer aldığı için antenin ışıma örüntüsüne doğrudan etki etmektedir. İkinci yaklaşım ise verici ve alıcı arasında antenin uzak bölgesinde (far field) yer alan insan vücudunun sinyal yolunda engel olarak bulunmasıdır.

İlk yaklaşımı açıklayan bir çalışmada insan elinin küçük terminal antenleri üzerinde etkileri incelenmektedir. Telefonun konuşma ve veri modunda iken elde tutuluş pozisyonlarının neden olduğu ışıma örüntüsü bozulmaları gösterilmektedir (Pelosi vd., 2009). Bu bozulmaların, insan elinin telefonu tutarken bulunduğu pozisyonda cihazın anteninde yakın bölge diye tanımlanan, elektromanyetik enerji emilimlerinin daha fazla olduğu bölgede bulunmasından kaynaklı olduğu anlatılmaktadır. Özellikle parmaklar anten bölgesine yakın bulunduğu anda ışıma ve verimlilik eşleşmesi sorunu nedeniyle kötü etki yaptığı belirtilmektedir (Graffin vd., 2000; Gabriel, 1996).

Alıcı ve verici çifti arasında bulunan sinyal yayılım yolunda insan varlığı incelendiğinde insan hareketi, oryantasyonu, elde tutuş pozisyonu ve vücut duruşu zamana bağlı değişen koşullar olarak görülmektedir. RF tabanlı konumlandırma sistemleri arasında bilinen RADAR konumlandırma sistemi çalışmalarında parmak izi verileri toplanırken kullanıcı durumunun RSS üzerine etkisinin %67 oranla hassasiyeti olumsuz yönde etkilediği gösterilmektedir (Bahl ve Padmanabhan, 2000). Bunun nedeni erişim noktası ve mobil istasyon arasında kalan insan vücudunun mobil istasyona erişen sinyalleri bloke etmesidir. Benzer şekilde kullanıcının varlığı nedeniyle her yöne ışın yapan antenin yönlü anten karakteristiği göstermesi, toplanan RSS verileri incelemelerine göre verilerin istatistiksel dağılımında RSS değerlerinin ortalama değer çevresinde daha fazla sapmasına neden olmaktadır (Kaemarungsi ve Krishnamurthy, 2004).



Şekil 2.14 Çoklu İnsan Varlığı Deney Düzenegi (El-Kafrawy vd.den, 2011)

El-Kafrawy vd.nin (2011) çalışmasında 2.4 GHz (WLAN) frekans bandında insan hareketinin RSS değişimi üzerine etkisi incelenmektedir. Ray tracing ve deneysel yayılım modelleri kullanılarak yapılan testlerde koridorda yer alan insanların pozisyonuna göre matematiksel olarak RSS değişimi gözlemlenmektedir. Şekil 2.14'te gösterilen deney düzeninde farklı test senaryoları için siyah hücreler ile işaretli bölgede hareketli insan (İnsan 1), gri ile işaretli dört farklı hücrede ise sabit insan (İnsan 2) yer almaktadır. Tek insan ve çoklu insan ile yapılan testlerde ışın izleme (Ray Tracing), ampirik elipsoit (Empirical Ellipsoid) ve hibrit modeller olmak üzere üç adet yayılım modeli kullanılmaktadır.

Diğer bir çalışma olan Mrazovas vd.nin (2013) çalışmasında ise RSS değişimlerinin güvenlik sistemlerinde kullanımı üzerine yeni bir metot önerilmektedir. RSS değişimindeki düzensizlikler kullanılarak ekstra cihaz kullanılmadan insan varlığı tespiti yapılmaktadır.

2.3.4. Erişim noktası yoğunluğu ve yerleşimi

RF tabanlı geliştirilen konumlandırma sistemlerinde sistem maliyeti ile konum hassasiyeti arasında denge bulunmaktadır. Hassas konum elde etmek için fazla sayıda erişim noktası yerleştirilmesi veya birim alan başına düşen erişim noktası sayısı önem arz etmektedir. Bununla birlikte erişim noktası sayısından bağımsız olarak kapsama alanı ve o alandaki sinyal kalitesi erişim noktalarının yerleşimi ile doğrudan ilgilidir. Literatürde erişim noktası yoğunluğu ve yerleşimi üzerine yapılan çalışmalar yer almaktadır.

Priwgharm ve Cherntanomwong (2011) çalışmalarında mesafe tabanlı ve parmak izi tabanlı konumlandırma tekniklerini karşılaştırmaktadır. Mesafe tabanlı algoritmalar olarak uzaklık kestirme (lateration estimation) ve max-min yaklaşımı kullanılmaktadır. Parmak izi yöntemi olarak ise basit en yakın koşuluk ve k. en yakın komşuluk metotları kullanılmaktadır. Farklı üç senaryo ile yapılan testlerde sırası ile üç, dört ve beş referans noktası kullanılarak 9 metre karelik kare bir alanda konum bilgisi hesaplanmaktadır. Test sonuçlarına göre her iki yaklaşım için geçerli olan bir sonuca dikkat çekilmektedir. Mesafe tabanlı yöntem ile hesaplanan konum hatası üç referans noktası kullanıldığında max-min yaklaşımı hata değeri 0,597 metre iken, beş referans noktası kullanıldığında 0,298 metre

olarak bulunmaktadır. Benzer şekilde uzaklık kestirme yönteminde referans nokta sayısı üçten beşe çıkartıldığında hata değeri 0,263 metreden 0,120 metreye dek düşmektedir. Parmak izi tabanlı yöntem kullanıldığında da referans nokta sayısı artışı ile konum hataları azalmaktadır. Lim vd.'nin (2006) geliştirdiği konumlandırma algoritmasında, erişim noktaları ve istemciler arasındaki, aynı zamanda erişim noktaları ve komşu erişim noktaları arasındaki RSS değerleri girdi olarak algoritmaya verilmektedir. Erişim noktaları arasındaki RSS değerleri çok yönlü sönümlenme, sıcaklık ve nem gibi RSS üzerinde etkili olan değişimlerin göz önünde bulundurulması için kullanılmaktadır. Yapılan testlerde konum belirlemek için ortamda bulunan sırası ile beşer ve altışar adet olmak üzere istemci ve gözlemci erişim noktaları kullanılmaktadır. Bu iki test senaryosunda elde edilen konum hata değerleri fazla sayıda erişim noktası kullanıldığında yaklaşık yarım metre azalmaktadır. Aynı zamanda erişim noktası yerleşiminin de hata değerlerini azaltmakta önemli bir faktör olduğu vurgulanmaktadır.

Chen vd.nin (2006) çalışmasında Zigbee ve Wi-Fi ağları kurularak gerçek ortamda test edilen erişim noktası yerleştirme algoritması üzerinde çalışılmaktadır. Yaklaşık 3600 metrekarelik alana sırası ile 4,6 ve 20 adet erişim noktası kare ve çapraz olacak biçimde yerleştirilmektedir. Dört ve altı erişim noktasının kullanıldığı senaryo ve yirmi erişim noktası için kullanılan senaryo iki farklı yerleşim yöntemi kullanılarak erişim noktaları yerlerine konmaktadır. Test çıktılarına bakıldığında dört ve altı erişim noktasının yer aldığı senaryo ile yirmi erişim noktası kullanılan senaryoda elde edilen sonuçlar birbirinden farklı olmaktadır. Bu sonuçlara göre iyi bir konumlandırma performansı için erişim noktalarının kapsama alanı yeterli ise doğru bir yerleşim ile fazla sayıda erişim noktası kullanımına gerek olmadığı anlatılmaktadır. Baala ve Caminada'nın (2006) geliştirdiği konumlandırma sisteminde ise statik ve mobil düğüm sayıları değiştirilerek hassasiyete etkisi üzerine çalışılmaktadır. Yapılan testler statik düğüm sayısı birden üçe çıkarılmakta, aynı zamanda mobil düğüm sayısı 10m aralığı bir, üç ve beş metre olacak şekilde çoğaltılmaktadır. Test sonuçlarına göre fazla sayıda statik düğümün daha hassas konum elde etme imkânı verdiği belirtilmektedir. Benzer şekilde mobil düğüm sayısı artışı da hassasiyeti iyi yönde etkilemektedir fakat güncel konum bilgisi hesaplamasız maliyetler nedeniyle gecikmektedir. Diğer çalışmada da istemci tarafındaki harcanan kaynakların azaltılması için kaynak olarak seçilecek optimum yerleştirilmiş erişim noktaları seçilerek RSS verileri filtrelenmektedir (Sapumohotti vd., 2013). Erişim noktalarının seçiminde yürüme halinde

alınan veriler kullanılmakta ve erişim noktalarının konum hesabı için verimliliğine karar verilmektedir. Dikdörtgen şeklindeki 1500 metrekarelik ortama 22 adet erişim noktası yerleştirilerek test ortamı hazırlanmıştır. Bu test ortamından elde edilen radyo haritası konumlandırma için kullanılmaktadır. Optimum yerleşimin bulunması için çalışmada tanımlanmış yeni metrik ile hesaplamalar yapılmakta, erişim noktalarının sayısı artırıldığında konumlandırma hatalarının azalacağı öngörülmektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kapalı ortam konumlandırmada RF sinyal karakteristiklerinin bilinmesi alınan sinyal gücüne bağlı olarak konumlandırma yapılan sistemlerde önemlidir. Alınan sinyal gücünün değişimi, sinyallerin kapalı ortamda yayılırken sergiledikleri davranışlar ile açıklanmaktadır. Emilim etkisi, çok yollu sönümlenme, gölgeleme etkisi ve tünel etkisi olarak bilinen bu davranışlar konumlandırma sistemlerinde en önemli ölçüt olan konum bilgisinin doğruluğu üzerine etkin rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasında konumlandırma sistemleri için en yaygın kullanılan RF sinyal teknolojilerinden biri olan Wi-Fi teknolojisi kullanılmaktadır. Yayılım modelleri kullanılırken emilim ve çok yollu sönümlenme etkilerinin yanı sıra açık çalışma alanı olarak tespit edilmiş tünel etkisi üzerinde durulmaktadır. Konumlandırma sistemlerinde tünel etkisi iyileştirilen yol kayıp modeli ile açıklanmaktadır. Farklı test ortamlarında Wi-Fi sinyal gücü okumaya dayalı ölçümler alınarak cihaz karakteristiklerinin çıkartılması için referans testleri, sinyal davranışlarının incelenmesi emilim ve çok yollu sönümlenme testleri yapılmaktadır. Bu incelemelerin konumlandırma üzerinde etkisinin gösterimi için ise geometrik tabanlı bir konumlandırma yöntemi kullanılmaktadır. Önerilen yöntemin çalışma mantığı, kullanılan donanım ve yazılımlar, test ortamları hakkında bilgiler, yürütülen testlerin detayları ve konumlandırma testleri ile ilgili ayrıntılar alt bölümlerde verilmektedir.

3.1. Önerilen Yol Kayıp Modeli

Logaritmik uzaklığa bağlı yayılım modeli, Friis'in boşluk modelini de içine alan, yaygın olarak kullanılan bir yayılım modelidir. Konumlandırma sistemlerinde referans erişim noktalarından belirli uzaklıktaki sinyal seviyesi değerini tespit etmek ve geometrik tabanlı yöntemler kullanıldığında uzaklık dönüşümü için kullanılmaktadır. Kapalı ortamlarda sinyal yayılımını değiştirecek koridor, oda ve bunların farklı yapılarında bir araya gelmesi gibi birçok senaryo bulunmaktadır. Bu senaryolardan duvar geçişleri ve kat geçişleri gibi emilim etkisini içeren sinyal zayıflamaları logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli için çalışılmaktadır. Fakat koridor veya buna benzer yapılarda görülen tünel

etkisi konumlandırma açısından değerlendirildiğinde bu model için çalışılması gereken açık alanlardan biridir. Logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modelinin temel hali ve sinyal emilim etkisi dâhil edilmiş türevleri bu konuda yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle emilim etkisine ek olarak tünel etkisinin de dâhil edildiği bir logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli önerilmektedir.

Önerilen yayılım tanımlı iki bölge (B1 ve B2) için Denklem 3.1 ile gösterildiği üzere parçalı fonksiyon olarak verilmektedir.

$$d(EN_i) = \begin{cases} 10^{\left[\frac{P(d_{B1REF}) - P_m(EN_i) - (k * P_{engel})}{10 * n} \right]}, B1 \\ \left(10^{\left[\frac{P(d_{B1REF}) - P_m(EN_i) - (k * P_{engel})}{10 * n} \right]} + 10^{\left[\frac{P_m(EN_i) - P_{B2REF}}{10 * \alpha_k} \right]} \right), B2 \end{cases} \quad (3.1)$$

Birinci bölgede yayılım modeli olarak temel logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modelinin sinyal emilim etkisini içine alan türetilmiş modeli kullanılmaktadır. Denklem 3.2’de bu model kullanılarak uzaklık hesaplamasının yapıldığı formül gösterilmektedir. Bu denklemde d_{B1REF} birinci bölge için referans uzaklığını, $P(d_{B1REF})$ referans uzaklıkta alınan ölçüm değerini, P_{engel} sinyalin maruz kaldığı sinyal düşüm değerini, n yayılım zayıflama katsayısını ifade etmektedir. Bu parametreler literatürde kabul edilen veya deneysel ölçümlerle belirlenmiş değerler almaktadır. $P_m(EN_i)$ ve k ise sırası ile konumu hesaplanmak istenen noktada i . erişim noktasından ölçülen sinyal değerini ve o nokta ile erişim noktası arasındaki engel sayısını belirtmektedir. k değerinin hesaplanması için kapalı ortam harita bilgisi ve erişim noktalarının bilinen koordinatları kullanılmaktadır.

$$d(EN_i) = 10^{\left[\frac{P(d_{B1REF}) - P_m(EN_i) - (k * P_{engel})}{10 * n} \right]} \quad (3.2)$$

Tünel etkisinin görüldüğü ikinci bölgede logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli özgün biçimde değiştirilerek bu etkinin de hesaba katıldığı önerilen yayılım modeli kullanılmaktadır. Önerilen model denkleminin RSS tahmini hesaplaması için gerekli formül Denklem 3.3 ile gösterilmektedir. Denklemde d_{B2REF} ikinci bölgede yapılacak RSS tahminleri için birinci bölgede, bölgelerin ayrılma noktasından daha yakın mesafede seçilmiş referans uzaklık değeridir. Bu noktada alınan ölçüm ise P_{B2REF} olarak

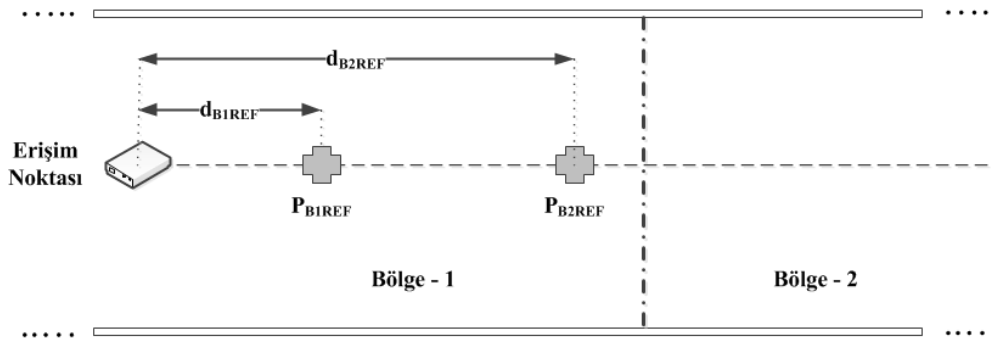
gösterilmektedir. $d(i)$ mesafesi d_{B2REF} değerinden küçük olmamakla birlikte ölçüm alınan noktanın erişim noktasına olan uzaklığıdır. Bu formülasyon ile elde edilen $P_{B2}(i)$ RSS tahmin değeri ölçüm alınan noktada logaritmik uzaklığa dayalı yol kayıp modeli için hesaplanmış düzeltme değeridir.

$$P_{B2}(i) = P_{B2REF} + \left[10 * n * \log_{10} \left(\frac{d(i)}{d_{B2REF}} \right) \right] \quad (3.3)$$

Elde edilen düzeltme değerinin uzaklık dönüşümü karşılığı Denklem 3.4 ile gösterilmektedir. Bu denklemde farklı olarak α_k tünel etki parametresini tanımlamaktadır. Bu parametre ikinci bölgede tünel etkisinden kaynaklı sinyal bozulmalarının karakteristiğini temsil etmektedir ve deneysel ölçümler ile bulunmaktadır. İkinci bölgede bulunan bir ölçüm noktasından okunan sinyal değerinin ($P_m(EN_i)$) referans ölçümü (P_{B2REF}) farkı alınarak tünel etkisi parametresinin dâhil edildiği işlemler sonucunda d_c uzaklık düzeltme verisi elde edilmektedir.

$$d_c = 10^{\left[\frac{P_m(EN_i) - P_{B2REF}}{10 * \alpha_k} \right]} \quad (3.4)$$

Önerilen yayılım modelinin şekilsel gösterimi Şekil 3.1’de verilmektedir. Tünel etkisi görülen iç ortam yapısı için iki bölgeye ayırmaktadır. Birinci bölgede sinyal yayılımı beklenen karakteristik ile uzaklığa bağlı logaritmik olarak azalmaktadır. İkinci bölgede ise tünel etkisi ile sinyal yayılımı bölge geçişinde kırılma noktası yaratarak, uzaklığa bağlı azalma miktarı beklenenden daha düşük değerlerde olmaktadır.



Şekil 3.1 Tünel Etkisi Olan Örnek Ortam

Deneysel yayılım modellerinde, modelin konumlandırma sistemlerinde kullanımı ve model parametrelerinin belirlenmesi için çeşitli varsayımlar ve ön çalışma (çevrimdışı ölçümler) yapılması gereklidir. Önerilen modelin konumlandırma amaçlı kullanımına ilişkin kabullenmeler aşağıda maddeler halinde verilmektedir:

- Kapalı ortama yerleştirilmiş referans sinyal kaynaklarının koordinatları bilinmektedir.
- Kapalı ortam harita bilgileri konumlandırma sistemine dahil edilmektedir.
- Modelin eğitilmesi için çevrimdışı ölçümler alınmaktadır.
- Tünel etkisi bulunan bölgeler dâhil olmak üzere konumlandırma alanı bölgelere ayrılmaktadır.

Belirtilen varsayımlar dâhilinde modelin ihtiyaç duyduğu parametreler aşağıdaki maddelerde verildiği üzere hesaplanabilmektedir:

- Kapalı ortamda bölge tanımlaması yapılması, kapalı ortam bilgileri ve referans sinyal kaynakları koordinatlarının bilinmesi ile k parametresi (sinyal yayılım yolundaki engel sayısı) hesaplanabilmektedir. Ölçüm alınan noktada sinyalin geçtiği engel sayısı hesaplanırken ölçüm noktası ve ilgili erişim noktası arasında hayali bir çizgi oluşturulmaktadır. Kesişim algoritması çalıştırılarak bu çizginin harita bilgileri içerisinde yer alan çizgi grubundaki kesiştiği çizgi sayısı bulunmaktadır. Bu kesişim sayısı sinyalin geçtiği engel sayısını vermektedir. Aksi halde kesişim olmadığı için $k = 0$ durumunda model denkleminde engel için bir sinyal kaybı hesaplanmamaktadır.
- Birinci ve ikinci bölge için referans uzaklıktaki ölçüm değerleri çevrimdışı ölçümler yapılarak ilgili cihaz için referans ölçüm değerleri bulunabilmektedir.
- Emilim etkisi için gerekli kayıp değeri kapalı ortamı bölen engellerin tanımlanması ile literatür verileri veya yapılan çevrimdışı ölçümlerle belirlenebilmektedir.
- Tünel etkisi parametre tanımlaması yapılan çevrimdışı ölçümler ile kapalı ortamdaki tünel yapısına göre bir değer almaktadır.

Önerilen model için tünel etkisinin görüldüğü alanda düz çizgi üzerinde yaklaşık 1 metre aralıklarla ölçüm alınarak deneysel parametreler hesaplanmaktadır. Aynı zamanda

bölge tanımlaması için düz çizgi boyunca elde edilen RSS değerleri incelenerek iki bölge arasındaki ayırım noktası bu analiz sonucunda ortaya konmaktadır.

3.2. Test Ortamı

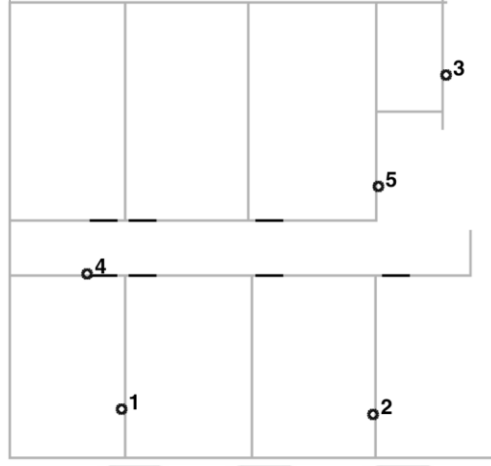
Test ortamları olarak kapalı ve açık alanlar kullanılmaktadır. Kapalı alan olarak Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Meşelik Kampüsü M4 Blok (Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Binası) ve Osmangazi Teknoparkı binası seçilmiştir. İki farklı kapalı ortam seçimi yapılarak küçük ve büyük kapalı ortamlar arasındaki farkların ortaya konması hedeflenmektedir. Açık alanda yapılan testler için ise Teknopark binası önünde yer alan boşluk alan kullanılmaktadır. Açık alanda yapılan testler ile sinyallerin boşluktaki davranışları hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmaktadır. Testlerin çoğunluğu Teknopark binasında yürütülmekle birlikte diğer test alanları karşılaştırma yapılması gereken testlerde kullanılmaktadır.

Teknopark binası 2 katlı yapıdan oluşmaktadır. Bina içerisine yerleştirilmiş 5 tanesi birinci katta ve 2 tanesi ikinci katta olmak üzere kullanılan 7 adet sensör düğümü bulunmaktadır. Özellikle konumlandırma ve yayılım modeli çalışmalarında sistematik şekilde ölçümlerin alınabilmesi için belirli ızgara yapısında biçimlendirilmiş Kartezyen koordinat sistemi kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle gerçek ölçüleri bilinen Teknopark binasının çalışma alanı olarak belirlenen birinci katı MATLAB ortamında kroki olarak çizdirilmektedir. Kroki üzerinde 1,2 metre adım aralıkları ile ızgara yapısı oluşturulmuştur. Sensör düğümlerine ait kat bilgileri ve belirlenen koordinat sistemine göre konumları Çizelge 3.1’de detaylı olarak verilmektedir.

Çizelge 3.1 Teknopark Sensör Düğümleri Yerleşimi

Kat	Sensör No	X Koordinatı (mm)	Y Koordinatı (mm)	Z Koordinatı (mm)
1	1	4600	2000	2200
1	2	15000	1800	2100
1	3	18000	15800	2300
1	4	3200	7600	2200
1	5	15200	11200	2300
2	6	2800	9700	5300
2	7	12800	7600	5300

Teknopark binası birinci kat krokisi ve bu katta yer alan sensör düğümlerinin yerleşimi Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Teknopark Birinci Kat Krokisi ve Sensör Düğümü Yerleşimleri

Sensör düğümleri yerleşimi için konumlandırma performansını maksimum düzeyde sağlayacak bir yerleşim yapılmamıştır. İnovasyon Mühendislik firmasına ait ofis odaları ve koridor, giriş boşluğu gibi genel kullanım alanları yerleşim için seçilmiştir.

3.3. Donanım ve Yazılım Özellikleri

Testlerde RB951Ui-2HnD Mikrotik marka modem/yönlendirici, Sony Xperia Z2 ve LG G2 akıllı telefonları kullanılmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Test için Kullanılan Donanımlar

Sensör düğümleri içerisinde de bulunan RB951Ui-2HnD Mikrotik marka modem/yönlendirici sinyal kaynağı olarak kullanılmıştır. Sinyal kaynağı özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 Sinyal Kaynağı Özellikleri

Kablosuz Standartları	802.11 b/g/n	
Anten Kazancı DBI	2.5	
2.4 GHz Kablosuz Teknik Detaylar		
	TX (dBm)	RX
6 Mbit/s	30	-95
54 Mbit/s	35	-80

Sinyal alıcı olarak kullanılan LG G2 ve Sony Xperia Z2 akıllı telefonlarının kablosuz özellikleri sırası ile Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te gösterilmektedir.

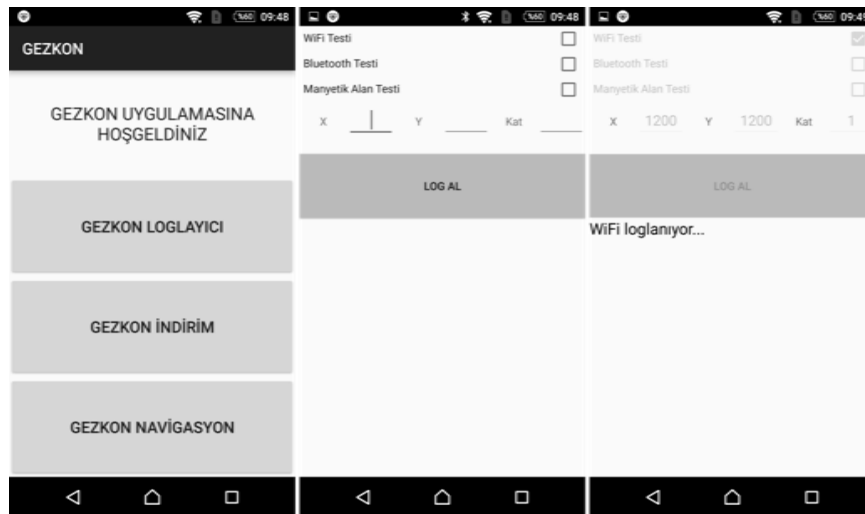
Çizelge 3.3 LG Cihaz Kablosuz Özellikleri

Kablosuz Standartları	802.11 a/b/g/n/ac
Kablosuz Bağlantı Çipi	Broadcom BCM4339 5G Wifi Combo

Çizelge 3.4 Sony Cihaz Kablosuz Özellikleri

Kablosuz Standartları	802.11 a/b/g/n/ac
Kablosuz Bağlantı Çipi	Qualcomm WTR2100

Testler esnasında ölçüm alınırken sinyal kaynağı ve mobil cihazların duruş pozisyonlarının aynı olmasına ve mobil cihazlar için şarj yüzdesinin %100 olmasına dikkat edilmiştir. Mobil cihazlar üzerinde Wi-Fi alınan sinyal gücü okumaları Gezkon Logger yazılımı ile yapılmıştır (Şekil 3.4).



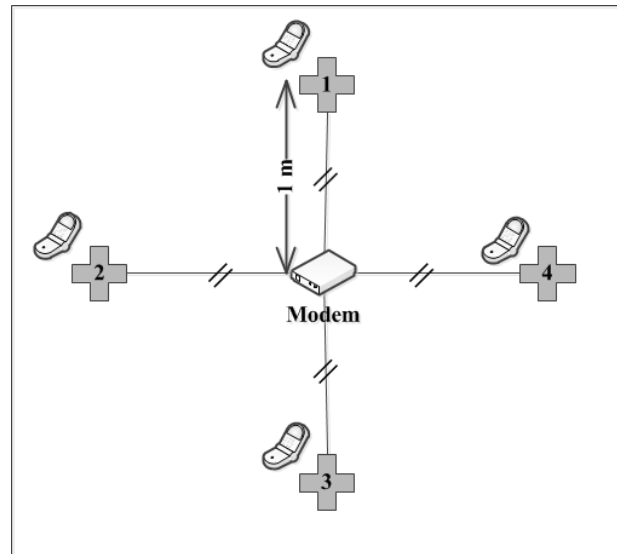
Şekil 3.4 Gezkon Logger Mobil Uygulaması

Yazılım tarama yaparak ortamdaki Wi-Fi ve Bluetooth kaynaklarından sinyal seviyelerini okuyabilmekte ve okunan verileri kayıt altına alabilmektedir. Ayrıca uygulamanın çalıştığı cihaz üzerinden ivmeölçer, jiroskop vb: verileri de okunup kaydedilebilmektedir.

3.4. Test Metodolojileri

Wi-Fi sinyallerinin gerçek kapalı ortamda temel davranışlarının gözlemlenebilmesi için kısmi kontrollü deneysel testler tasarlanmıştır. Referans ölçüm, sinyal emilim ve çok yollu sönümleme testleri için uygun alanlar belirlenmiştir. Ayrıca logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli sonuçları ile gerçek ölçümleri karşılaştırmak üzere RF harita oluşturulmuştur.

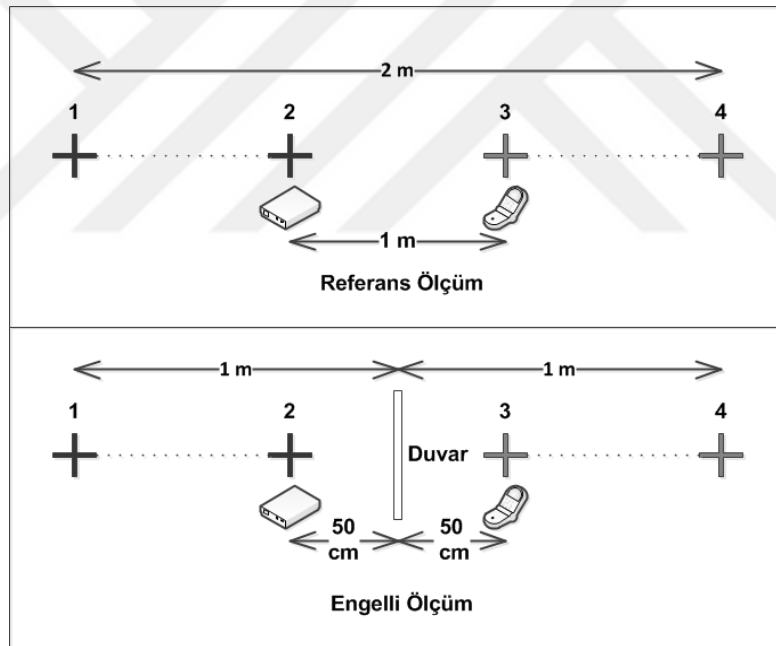
Referans ölçüm testleri yol kayıp modelinde kullanılmak üzere alıcı cihazın 1 metre uzaklığındaki sinyal gücü seviyesini belirlemek üzere yapılmaktadır. Sinyal kaynağının konulduğu merkez nokta etrafında alıcı cihazın oryantasyonu korunarak farklı açılardaki 4 noktada sinyal ölçümleri yapılmaktadır. Sinyal kaynağı ve alıcı cihaz 0,46 metre yüksekliğinde platformlar üzerinde bulunmaktadır. Kaynak ve alıcı arasında herhangi bir engel bulunmayan test düzeneği Şekil 3.5 üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Referans Ölçüm Test Düzeneği

Kaydedilen ölçümler sırası ile aykırı değer ve NaN filtrelerinden geçirilmektedir. Bu sayede ölçümlerde meydana gelebilecek ani değer sıçramaları ve okunamayan değerlerin ortalama hesaplamasını bozması engellenmektedir. Filtrelenmiş ölçüm değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak test edilen alıcı cihazın referans ölçüm verileri deneysel olarak hesaplanabilmektedir.

Sinyal emilim testleri Wi-Fi sinyallerinin farklı yapı materyallerinden geçmesi sonucu zayıflamalarını incelemek için yapılmaktadır. Zayıflama miktarının belirlenebilmesi için sinyal kaynağı ve alıcılar arasında engel içeren ve içermeyen iki farklı koşulda ölçüm alınmaktadır. Her iki test düzeneğinde sinyal kaynağı ve alıcılar 0,46 metre yüksekliğindeki platformlar üzerine yerleştirilmektedir. Test düzenekleri sırası ile Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



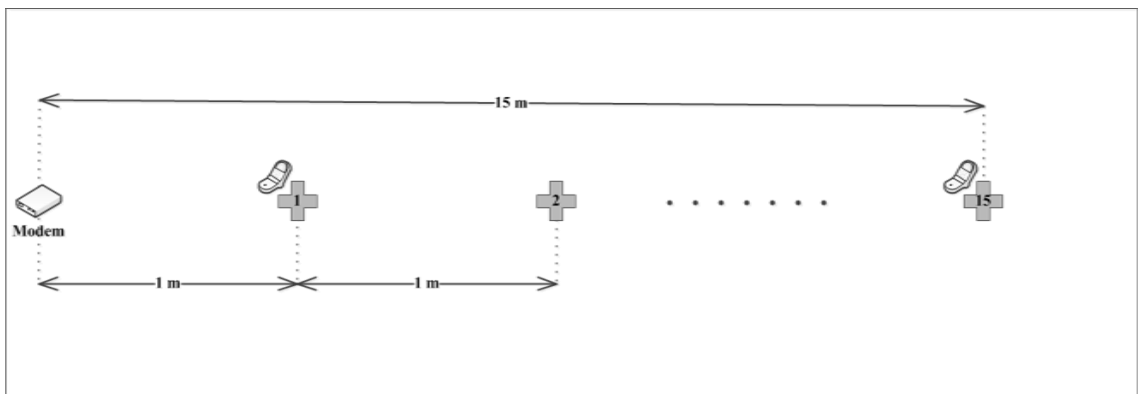
Şekil 3.6 Sinyal Emilim Test Düzeneği

Engel içermeyen koşulda sinyal kaynağı ve alıcı arasındaki mesafe 1 m ve 2 m olacak şekilde yerleştirme yapılarak ölçüm alınmaktadır. Engelli koşulda ise aynı mesafe aralıkları sinyal kaynağı ve alıcı arasındaki mesafenin tam ortasına yapı materyali gelecek şekilde düzenlenmiştir.

Sinyal emilim testleri alçı panel ve tuğla duvar olmak üzere 2 farklı yapı materyali için gerçekleştirilmiştir. Alçı panel için testler Teknopark binasında, tuğla duvar materyali için ise Elektrik-Elektronik Mühendisliği binasında yapılmıştır. Testlerde elde edilen ölçümlerde çevresel etkiler ve donanımdan kaynaklı aykırı değerler okunabilmektedir. Bu nedenle zayıflama etkisi incelenirken alınan ölçüm değerleri aykırı değer filtresi ile ayrıştırılmaktadır. İşlenmiş verilerden emilim için referans ölçüm ve engelli ölçüm değerlerinin farklarından emilim değerleri deneysel olarak çıkartılmaktadır.

Çok yollu sönümleme kapalı ortamlarda RF sinyal özelliklerine etkileyen emilimden daha az tahmin edilebilir bir özelliktir. Yapılan testlerde iki farklı ortamda uzun mesafede alınan testlerle temelde yansıma olmakla birlikte koridor etkisi araştırılmaktadır. Ayrıca emilim dışında kalan diğer radyo frekansını etkileyen faktörlerin sinyaller üzerine etkisi incelenmektedir. Testler açık ve kapalı ortam karşılaştırması ve kapalı ortamda farklı ölçüm metodu kullanılması olarak iki aşamada gerçekleştirilmektedir.

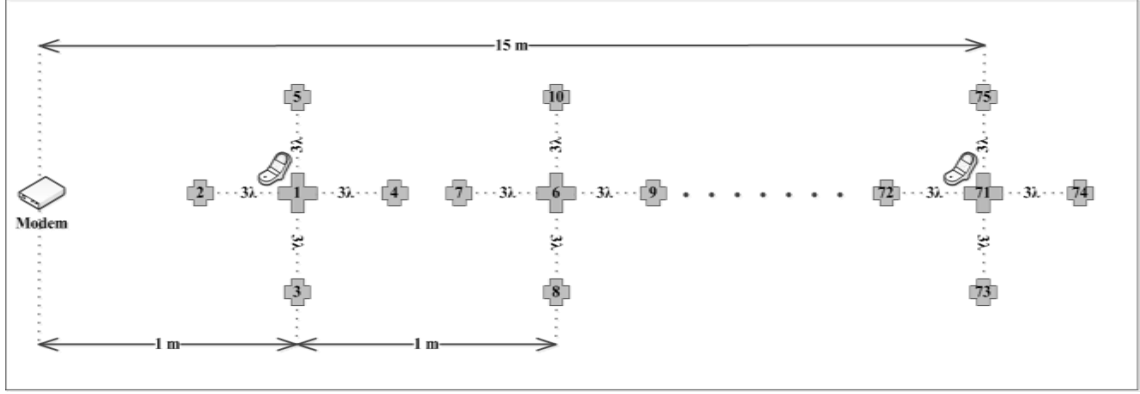
İlk aşama testi için Teknopark binası koridoru ve Teknopark binası önünde bulunan açık alan olmak üzere 2 farklı ortam kullanılmıştır. Sinyal kaynağı 0,46 m yükseklikteki bir platform ile sabit bir noktaya yerleştirilmiştir. Mobil alıcı cihazlar ile aynı yükseklikteki platform üzerinde 15 m mesafeye dek 1 m mesafe aralığı ile ölçüm alınmıştır. Test düzeneği şeması Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Çok Yollu Sönümleme Test Düzeneği - 1

İkinci aşama testinde ise kapalı ortamda çok yollu sönümleme etkisinin azaltılması için bir önceki deney düzeneğinde yer alan ölçüm noktalarının birkaç Wi-Fi sinyali dalga boyu uzunluğundaki komşuluklarında ölçümler tekrar edilmektedir (Şekil 3.8). Bu yöntem

ile kapalı ortamlarda sinyalin dalga boyu uzaklığında meydana gelen sinyal değişimlerinin (küçük ölçekli sönümlenme) durumu incelenmektedir.

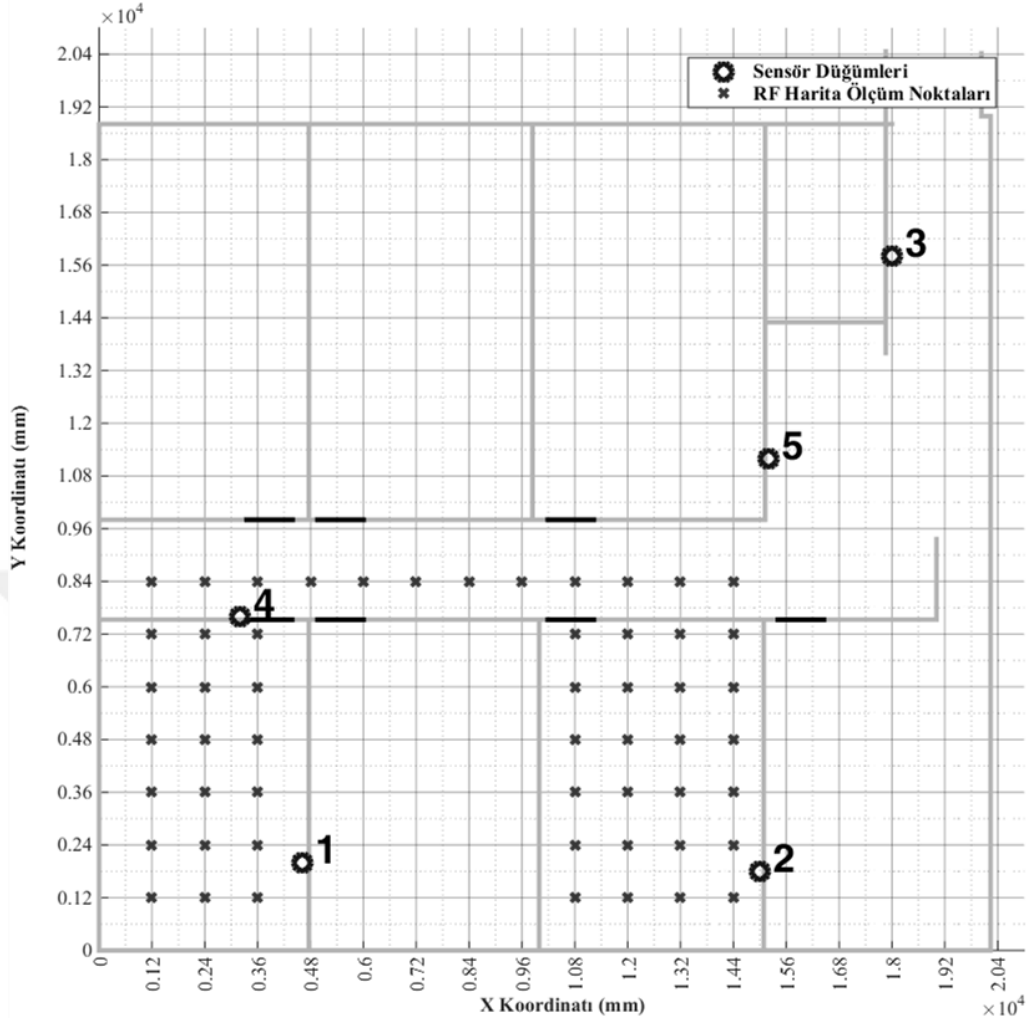


Şekil 3.8 Çok Yollu Sönümlenme Test Düzenegi – 2

Ölçümler toplandıktan sonra işlenerek kapalı ve açık ortam için elde edilen ölçüm değerleri grafik üzerinde karşılaştırılarak açık ve kapalı ortamlarda sinyalin yayılım davranış farkları gösterilmektedir. İkinci aşama test düzeneginde ise ölçüm noktası komşuluğunda alınan ölçümlerin yalnızca ölçüm noktalarından elde edilen değerler ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Aynı ortamda farklı metotlar ile elde edilen ölçümler üzerinden çok yollu sönümlenme etkisi araştırılmaktadır.

Referans ve emilim test sonuçları kullanılarak logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli Teknopark binası içerisinde iki aşamalı olarak test edilmektedir. Yapılan testlerde modelin üreteceği tahmini değerlerin doğruluğunu karşılaştırmak üzere gerçek ölçümlerden elde edilen RF harita verileri kullanılmaktadır.

RF harita; sensör düğümü Wi-Fi RSS verileri dâhil olmak üzere ortamda bulunan Wi-Fi sinyal kaynaklarından alınan ölçümlerin kayıt altına alınarak veritabanı haline getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Teknopark binasında Wi-Fi RF haritası oluşturmak için birinci katta 54 ve ikinci katta 44 olmak üzere toplam 98 noktadan ölçüm alınmaktadır. Ölçüm noktaları 1,2 metre ızgara aralığı ile seçilmektedir. Bu noktalarda LG G2, Sony Xperia Z2, Samsung S4 Mini, Samsung Tablet ve Nexus Tablet olmak üzere 5 farklı cihazdan Wi-Fi RSS ölçümleri yapılarak kayıt altına alınmaktadır. Birinci katta yapılan ölçümler 2 ofis odası ve koridorun belli bir bölümünde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 RF Harita için Ölçüm Alınan Noktalar

Gösterilen 54 adet ölçüm noktasında sensör düğümleri dâhil erişilebilen her Wi-Fi sinyal kaynağından ortalama 80 adet RSS değeri Gezkon Logger yazılımı ile kaydedilmektedir. Kaydedilen veriler tahmini oluşturulacak RSS değerleri ile karşılaştırılmadan önce ayrıştırılmaktadır. Tahmini değerler yalnızca bilinen Wi-Fi kaynakları olan sensör düğümlerinden üretileceği için RF harita verileri yalnızca birinci katta yer alan 5 sensör düğümüne ait Wi-Fi RSS verileri kalacak biçimde filtrelenmektedir. Sensör düğümlerine ait ölçüm değerleri ise kendi içerisinde sensör düğümü bazında gruplanarak, ayrıştırılan her grup için aykırı değer ve NaN filtresi uygulanmaktadır. Sensör düğümü bazında ayrılarak işlenmiş ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak ilgili ölçüm noktasına ait tek bir RSS değeri elde edilmektedir. Bunun nedeni model testlerinde RSS tahmini yapılacak ölçüm noktasında yalnızca bir değer elde edilmesidir.

Model testinin ilk aşamasında temel logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli çalıştırılmaktadır. Referans ölçüm uzaklığı ve yayılım zayıflama katsayısı sırası ile $d_0 = 1 \text{ metre}$ ve $n = 2$ (free space) alındığında (x_k, y_k) sensör düğümü koordinatı ve (x_i, y_i) tahmin noktası koordinatı olmak üzere Denklem 3.5 ile istenen ölçüm noktasında RSS tahmin değeri üretilmektedir.

$$P_r(x_i, y_i) = P_r(d_0) - 20 * \log_{10} \left(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \right) \quad (3.5)$$

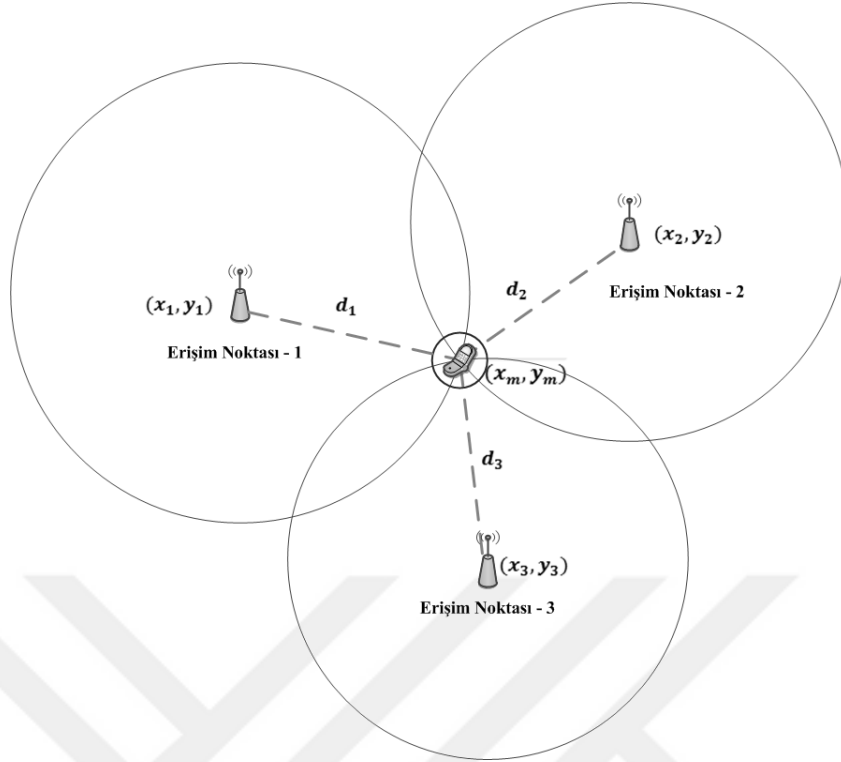
İkinci aşamada ise temel modele sinyal emilim test sonuçları eklenmektedir. Koordinat bazında denklem düzenlendiğinde Denklem 3.6'da gösterildiği üzere türetilmiş modelden aynı ızgara yapısında yeni tahmini RSS değerleri aynı koşullar altında birinci katta yer alan sensör düğümleri için hesaplanmaktadır.

$$P_r(x_i, y_i) = P_r(d_0) - 20 * \log_{10} \left(\sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \right) - k * P_{duvar} \quad (3.6)$$

Model testinin her iki aşamasında elde edilen tahmini değerler gerçek ölçümlerin alındığı 54 nokta için (bkz. Şekil 3.9) karşılaştırılmaktadır. Logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli ile gerçek ortam davranışları arasındaki hatalar incelenmektedir.

3.5. Konumlandırma Yöntemi

Önerilen modelin konumlandırma sonuçları üzerine etkisinin incelenmesi için yapılan çalışmalarda mesafe tabanlı geometrik yöntemlerden biri olan iki boyutta çember kesişimi yöntemi (trilaterasyon) kullanılmaktadır. Bu yöntemin seçilmesinin temel sebebi alınan sinyal gücündeki değişimlerin hesaplanan mesafeleri doğrudan etkilemesi ve dolayısı ile konum hatalarının doğrudan alınan sinyal gücüne bağlı olarak değişiminin gösterilebilmesi içindir. Çember kesişimi yönteminde Şekil 3.10'da gösterildiği üzere mobil cihazın en az 3 erişim noktasından ölçtüğü alınan sinyal gücü değerleri uzaklık değerlerine dönüştürülür. Uzaklık değerleri konumu bilinen erişim noktasının etrafına çizilecek çemberin yarıçap değeri olmaktadır. Her erişim noktası için çizilen çemberlerin kesişim noktası ise mobil cihazın konum bilgisini vermektedir.



Şekil 3.10. İki Boyutta Çember Kesişimi Yöntemi

Çember kesişimi yönteminin ilk adımında Denklem 3.7, Denklem 3.8 ve Denklem 3.9 ile ifade edilen çember denklemleri yazılmaktadır.

$$(x_m - x_1)^2 + (y_m - y_1)^2 = d_1^2 \quad (3.7)$$

$$(x_m - x_2)^2 + (y_m - y_2)^2 = d_2^2 \quad (3.8)$$

$$(x_m - x_3)^2 + (y_m - y_3)^2 = d_3^2 \quad (3.9)$$

Erişim noktasının bir tanesi referans olarak seçilerek diğer iki çember denklemini referans denklemden çıkarılarak Denklem 3.10 ve Denklem 3.11 ifadeleri elde edilmektedir.

$$2(x_2 - x_1)x_m + 2(y_2 - y_1)y_m = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \quad (3.10)$$

$$2(x_3 - x_1)x_m + 2(y_3 - y_1)y_m = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (3.11)$$

Elde edilen iki denklem matris formunda yazıldığında Denklem 3.12 elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Cramer kuralı kullanılarak çözülen doğrusal denklem sisteminden X ve Y koordinatları doğrudan Denklem 3.13 ve Denklem 3.14 ile gösterilen formüllere göre elde edilmektedir.

$$x_m = \frac{\begin{vmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) & 2(y_2 - y_1) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (3.13)$$

$$y_m = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ 2(x_3 - x_1) & (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (3.14)$$

Alınan sinyal gücü kullanan konumlandırma sistemlerinde çember yarıçapı değerleri, RSS değerlerinin uzaklık değerlerine dönüştürülmesi ile yukarıdaki denklemlerde verilen uzaklık değerleri yerine konulduğunda konum hesaplaması yapılabilmektedir.

Konumlandırma testleri Teknopark binası birinci katında bulunan bir oda ve mevcut bulunan koridor üzerinde yapılmaktadır. Oda ve koridor üzerinde seçilen test noktaları iki koşula göre belirlenmektedir. İlk koşul, konum hesaplanacak noktanın seçili üç erişim noktasının oluşturduğu geometri içerisinde kalmasıdır. Çünkü çember kesişimi yönteminin sağlıklı konum bilgileri üretebilmesi için erişim noktası yerleşimi önem arz etmektedir. İkinci koşul ise ölçüm testlerinden elde edilen sonuçlara göre -50 dB değerden daha zayıf sinyal değerlerinin konumlandırma için kullanıma elverişli olmamasıdır. Bu nedenle konum hesaplaması yapılacak test noktasında eşik değeri -50 dB belirlenerek, %1 pay ile en az üç erişim noktasından minimum -55 dB sinyal

gücü elde edilmesi durumunda hesaplanan konum geçerli bir konum olarak nitelendirilmektedir. İkinci koşulun sağlanması için logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modelinin emilim etkisi dâhil edilmiş hali kullanılmaktadır.

Konumlandırma için seçilen test noktalarında yapılan ölçümler ile beş erişim noktasından RSS değerleri okunmaktadır. Temel logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli, emilim etkisi eklenmiş türetilmiş model ve önerilen model kullanılarak konum hesaplaması yapılmaktadır. Bu modeller RSS değerlerinden konumlandırma algoritmasında kullanılacak mesafe değerlerinin üretilmesi için kullanılmaktadır.

Çizelge 3.5 Kullanılan Erişim Noktası Kombinasyonları

Kombinasyon No	Erişim Noktası - 1	Erişim Noktası - 2	Erişim Noktası - 3
1	1	2	3
2	1	2	4
3	1	2	5
4	1	3	4
5	1	3	5
6	1	4	5
7	2	3	4
8	2	3	5
9	2	4	5
10	3	4	5

Konum bulunurken erişim noktalarından 3 tanesi seçilerek hesap yapılmaktadır. Seçilecek erişim noktaları kombinasyonuna göre hesaplanan konum değeri değişmektedir. En uygun erişim noktası kombinasyonunu belirlemek ayrı bir çalışma alanı olup tez çalışmalarında bu konu üzerinde durulmamaktadır. Bu nedenle konumlandırma çalışmalarında 5 erişim noktasının 3'lü kombinasyonları oluşturularak her test noktasında 10 farklı kombinasyon için konum hesaplanmaktadır. Buradaki amaç ham verilerden temel logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli kullanılarak konum hesabı yapıldığında en iyi konum sonucunu veren kombinasyonu bulmaktır. Benzer şekilde konumu iyileştirmek için emilim etkisi dahil edilmiş model kullanıldığında en iyi sonuç veren kombinasyon

sonucuna bakılarak karşılaştırma yapılmakta, bulunabilecek en iyi değerlerin iyileşme durumu gözlenmektedir. Bu şekilde temel yöntemden farklı olarak bulunan konum bilgilerinin gerçekte ürettiği sonuçların iyileşme durumu doğrulanmaktadır. Her bir test noktası için konum hesabı yapılacak erişim noktaları kombinasyonları Çizelge 3.5'te gösterilmektedir.

Konumlandırma çalışmalarının ilk aşamasında ölçümler doğrudan Denklem 3.15'te gösterilen uzaklık dönüşüm formülü kullanılarak konum hesaplaması yapılmaktadır. Formül temel logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modelinden uzaklık değerinin çekilmesi ile elde edilmektedir. Formülde $P_r(d_0)$ referans uzaklıktaki RSS değerini, $P_m(EN_i)$ erişim noktasından okunan RSS değerini, n yayılım zayıflama katsayısını ve $d(EN_i)$ milimetre cinsinden hesaplanan uzaklık değerini göstermektedir.

$$d(EN_i) = 10^{\left[\frac{P_r(d_0) - P_m(EN_i)}{10 * n} \right]} * 1000 \quad (3.15)$$

İkinci aşamada ise temel modele ek olarak emilim etkisinin dahil edildiği modelden uzaklık değerinin çekilmesi ile uzaklık dönüşümü Denklem 3.16'da verilen formüle göre yapılmaktadır. Bu denklemden temel modele ek olarak engel durumunda sinyal zayıflama değeri ve sinyalin geçtiği engel sayısı uzaklık dönüşümüne eklenmektedir.

$$d(EN_i) = 10^{\left[\frac{P_r(d_0) - P_m(EN_i) - (k_i * P_{engel})}{10 * n} \right]} * 1000 \quad (3.16)$$

Son aşamada önerilen model kullanılarak hesaplanan uzaklık dönüşümlerinden konum hesaplaması yapılmaktadır. Oda içerisinde ve koridorda yer alan test noktaları için her aşamada konum hata değerleri hesaplanmakta ve karşılaştırma yapılmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında kapalı ortamlarda etkin olan RF sinyal karakteristiklerinin gerçek ortamda incelenmesi, RF yayılım modellerinden biri olan yol kayıp modelinin kapalı ortamlarda uygulanması ve önerilen yol kayıp modelinin konumlandırma üzerine etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilen bulgular ve birbiri ile bağlantıları alt başlıklarda verilmektedir.

4.1. Referans Ölçüm ve Emilim Testleri

Referans ölçüm testleri için LG G3 ve Sony Xperia Z2 mobil cihazları kullanılmaktadır. Belirlenen ölçüm metoduna göre referans ölçüm testinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1 üzerinde gösterilmektedir. Aynı sinyal kaynağı ile aynı test düzeneğinde toplanan verilerde cihazların farklı referans ölçüm değerlerine sahip olduğu gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlar model testlerinde kullanılmaktadır.

Çizelge 4.1 Referans Ölçüm Testi Sonuçları

Cihaz	Referans Ölçüm Değeri (dBm)
LG G3	-22,5896
Sony Xperia Z2	-25,2225

Sinyal emilim testlerinde ise gerçek ortamda alçı panel ve tuğla duvar engellerinden sinyal zayıflaması miktarı ölçülmektedir. Yapılan ölçümlerin birbirini doğrulaması için iki farklı cihaz kullanılmaktadır. Referans testine göre cihazlar aynı uzaklıkta farklı seviyede RSS değeri okumaktadır. Fakat sinyal emilimi için referans ve engelli ölçümler arasında değer farkı alındığından cihazdan bağımsız olarak benzer değerler elde edilmesi öngörülmektedir. Çizelge 4.2 üzerinde her iki cihaz için ölçülen fark değerleri alçı panel ve tuğla duvar için verilmektedir.

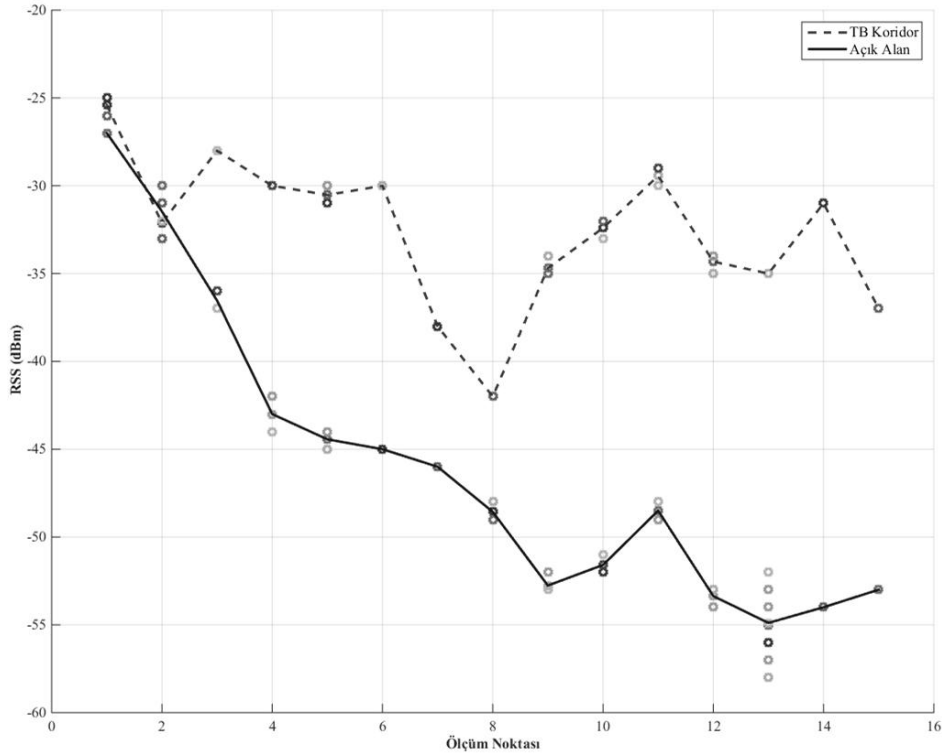
Çizelge 4.2 Gerçek Ortam Sinyal Emilim Test Sonuçları

	Alçı panel (dBm)	Tuğla Duvar (dBm)
LG G3	2,876	15,439
Sony Xperia Z2	3,085	17,291

Yaklaşık olarak aynı değerlere sahip sinyal zayıflama değerleri aynı zamanda Bölüm 2.3'de kapalı ortam yapısı ilgili literatür çalışmalarında verilen değerler ile doğrulanabilmektedir. Alçı panel için ölçülen değerler yayılım modeli ve konumlandırma testlerinde kullanılmaktadır.

4.2. Çok Yollu Sönümlenme Testleri

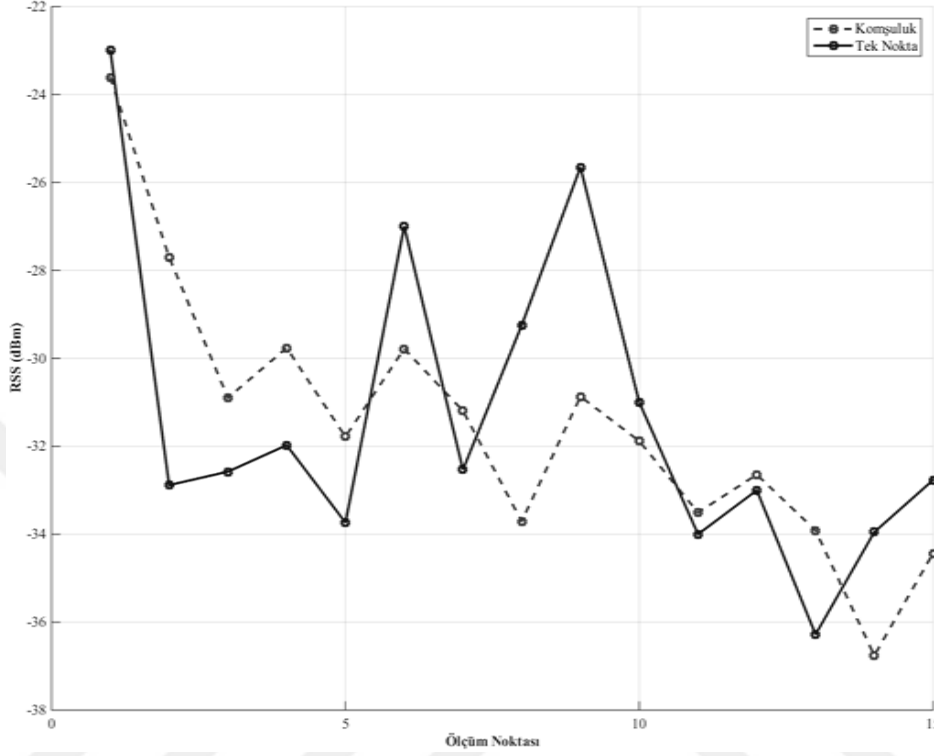
Çok yollu sönümlenme etkisi kapalı ortamlarda sinyal bozan etkin bir davranış olması nedeniyle açık ve kapalı ortamlarda ölçümler alınarak bu davranışın etkisi gözlemlenmektedir. Şekil 4.1 üzerinde gösterildiği üzere düz çizgi ile açık alanda alınan ölçümler uzaklık ile düzgün bir şekilde azaldığı görülmektedir. Aynı cihaz ile iç ortamda aynı mesafe aralıklarında alınan ölçümler ise RF sinyallerin iç ortamda maruz kaldığı etkiler nedeniyle benzer karakteristik göstermemektedir. Kapalı ortamda koridorda yapılan ölçümler dalgalanmakta ve açık alandaki değerlere göre daha güçlü sinyaller olmaktadır.



Şekil 4.1 Gerçek Ortam Çok Yollu Sönümlenme Testi

Küçük ölçekli sönümlenme nedeniyle birkaç dalga boyundaki değişimler çok yollu sönümlenme etkileri ile meydana gelmektedir. Bu nedenle koridor boyunca alınan ölçümler

aynı zamanda ölçüm alınan noktanın dalga boyu komşuluklarında da alınarak iki durum arasındaki fark karşılaştırılmaktadır.

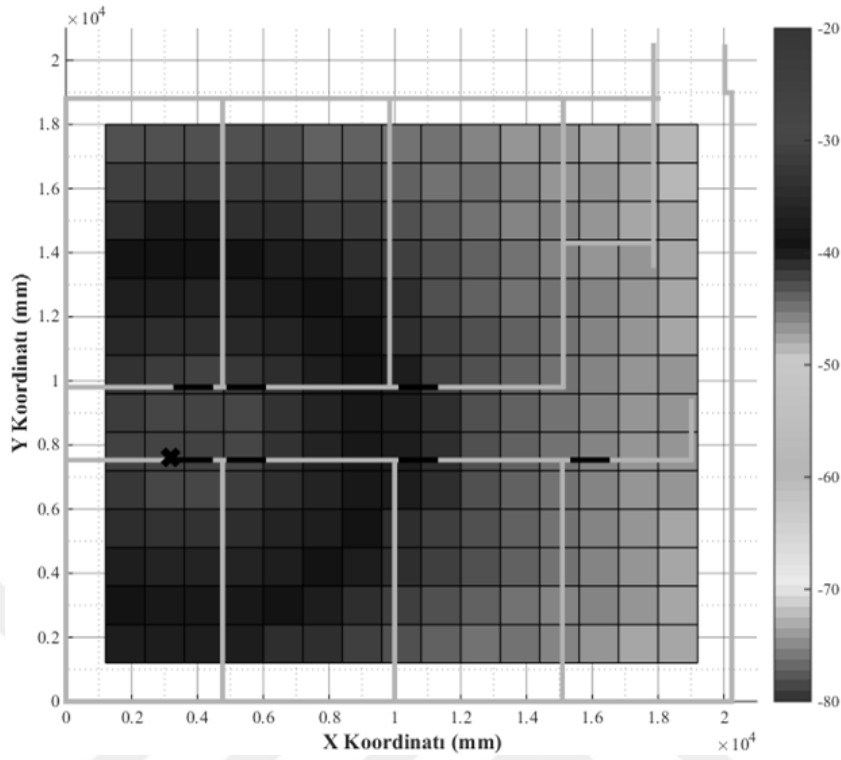


Şekil 4.2 Dalga Boyu Komşuluğunda Çok Yollu Sönümlenme

Şekil 4.2'de düz çizgi ile gösterilen tek noktada alınan ölçümler bulunmaktadır. Kesikli çizgi ise ölçüm alınan ana noktanın komşuluklarında fazladan ölçümler alınması ile elde edilmektedir. Dalga boyu komşuluğunda yeterince ölçüm alındığında RSS ölçüm seviyelerindeki dalgalanmaların azaldığı gözlenmektedir.

4.3. Yayılım Modeli Testleri

Yayılm modellerinin konumlandırma amaçlı kullanımı için logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli kullanılarak kapalı ortamda RF sinyal davranışını modelleyen iki test yapılmaktadır. Birinci testte temel model uygulanarak ortam bulunan engeller dahil olmak üzere RF sinyalleri etkileyen hiçbir faktör modele dahil edilmemektedir. Bu durumda işaretli erişim noktasından Şekil 4.3'te gösterilen yayılım elde edilmektedir. Ortama dair parametrelerin dâhil edilmediği modelde yayılım modelin doğasına bağlı olarak halkalar şeklinde uzaklığa bağlı olarak azalmaktadır.



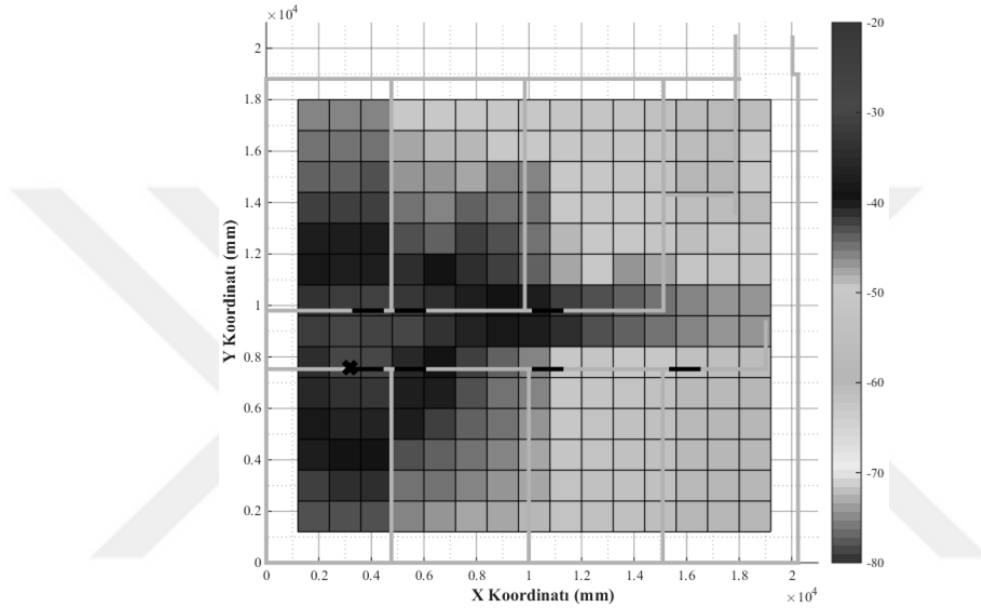
Şekil 4.3 Temel Yayılım Modeli

Bu model ile RF haritası çıkarılmış 54 test noktasında karşılaştırma yapılarak modelin tahmin ettiği RSS değerlerinin hata seviyeleri incelenmektedir. Tüm erişim noktalarının için elde tahmin değerlerinin gerçek ölçüm değerleri ile karşılaştırıldığında hata değerleri yüzdelik olarak Çizelge 4.3'te gösterilmektedir. Elde edilen hata dağılımları gerçek ölçüm değerlerinin alındığı noktalardan uzakta kalan erişim noktaları için 20 – 25 dBm değerlerine ulaşabilmektedir. Bu durum temel model ile yapılan tahminlerin yeterince doğruluk sağlamadığını göstermektedir.

Çizelge 4.3 Temel Model ve Gerçek Ölçümlerin Karşılaştırılması

	0-5 dBm	5-10 dBm	10-15 dBm	15-20 dBm	20-25 dBm	>25 dBm
Erişim Noktası-1	70,37	24,07	5,56	0	0	0
Erişim Noktası-2	75,93	24,07	0	0	0	0
Erişim Noktası-3	20,37	25,93	25,93	16,67	11,11	0
Erişim Noktası-4	62,96	29,63	7,41	0	0	0
Erişim Noktası-5	55,56	27,78	11,11	3,70	1,85	0

Yapılan ikinci test uygulamasında sinyal emilim testlerinden elde edilen zayıflama değerleri model içerisinde kullanılarak elde edilen yayılım Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Aynı erişim noktası için gösterilen yayılımda engelden geçen sinyaller emilim etkisiyle daha fazla zayıflamaktadır. Bu nedenle koridorda yer alan erişim noktasının koridor boyunca yayılımının oda içerisindeki seviyelere nazaran daha az sönümlendiği görülebilmektedir.



Şekil 4.4 Yayılım Model Testi Sinyal Emilim Etkisi

Sinyal emilimi etkisi ile gerçek ortam davranışına yakın yayılım sergileyen model çıktıları için ilk testte olduğu gibi 54 gerçek ölçüm noktasında alınan ölçümlerle karşılaştırılmaktadır. Çizelge 4.4 ile gösterildiği gibi duvarlardan emilen sinyallerin modele dâhil edilmesi hata dağılımında belirgin bir düzeltme etkisi göstermektedir.

Çizelge 4.4 Emilim Etkisi Model ve Gerçek Ölçüm Karşılaştırılması

	0-5 dBm	5-10 dBm	10-15 dBm	15-20 dBm	20-25 dBm	>25 dBm
Erişim Noktası-1	42,59	37,04	16,67	3,70	0	0
Erişim Noktası-2	55,56	38,89	3,70	1,85	0	0
Erişim Noktası-3	48,15	37,04	14,81	0	0	0
Erişim Noktası-4	29,63	46,30	24,07	0	0	0
Erişim Noktası-5	46,30	37,04	16,67	0	0	0

Gelinen aşamada yapılan testlerle ortaya konan emilim, çok yollu sönümleme ve koridor etkilerinin kapalı ortamdaki davranışları incelenmektedir. Bu davranışların konumlandırma süreci için etkisi araştırılmak üzere konumlandırma testleri yapılmaktadır.

4.4. Konumlandırma Testleri

Testlerde temel logaritmik uzaklığa bağlı model, emilim etkisi dâhil edilen model ve önerilen model kullanılarak uzaklık dönüşümleri elde edilerek geometrik yöntem ile konum hesaplanmaktadır.

Koridor ve oda içerisinde belirlenen konumlandırma bölgesi içerisinde 21 test noktası bulunmaktadır. Bu noktalarda 5 erişim noktasından en iyi konum veren üçlü kombinasyonlar seçilerek, elde edilen konumun ortalama karekök hatası hesaplanmaktadır. Alınan ölçümler ile oluşturulan veri seti ve temel yayılım modeli kullanılarak oda içerisindeki 8 test noktasında elde edilen sonuçlar ve sonucun elde edildiği erişim noktası kombinasyonu Çizelge 4.5'te gösterilmektedir. Veri seti dâhilinde yalnızca bir noktada temel model ile konum hesaplaması yapılamamaktadır.

Çizelge 4.5 Temel Yayılım Modeli İle Oda İçi Konumlandırma Sonuçları

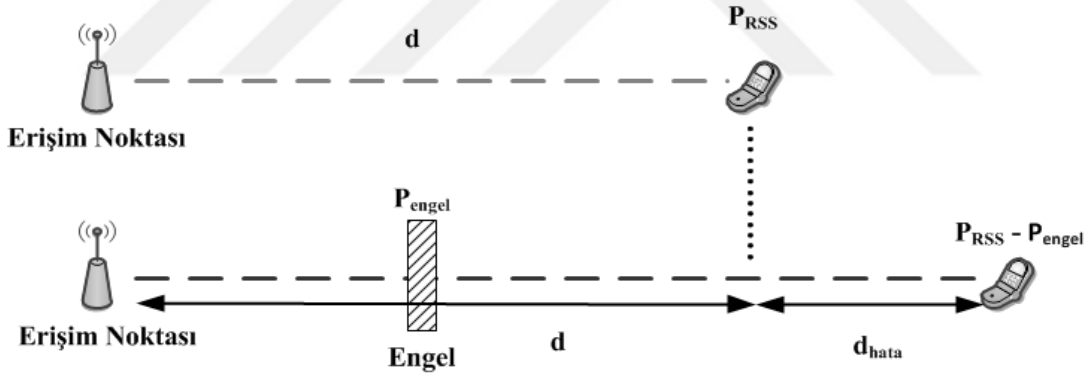
Ölçüm Noktası	Erişim Noktası Kombinasyonu	Konum Hata Değeri (mm)
1	[2 4 5]	6037,44
2	[2 4 5]	6211,33
3	[1 2 4]	6038,98
4	[1 2 5]	5294,12
5	[1 4 5]	4096,26
6	[2 4 5]	5921,26
7	-	-
8	[1 2 4]	8307,98

Koridor için ise belirlenen 13 ölçüm noktasında elde edilen sonuçlar ve hata değerleri Çizelge 4.6'da gösterilmektedir. Her iki tabloda hesaplanan konum hataları ortalama 4 ile 5 metre arasında değişmektedir. Bu hataların oluşmasında en tahmin edilebilir ve belirgin sebep alçı panel içerisinde geçen sinyallerin yapılan testlerde görüldüğü üzere belli oranda sönümlenmesidir.

Çizelge 4.6 Temel Yayılım Modeli İle Koridor Konumlandırma Sonuçları

Ölçüm Noktası	Erişim Noktası Kombinasyonu	Konum Hata Değeri (mm)
1	[1 4 5]	3591,76
2	[1 4 5]	1394,07
3	[1 4 5]	3270,27
4	[1 2 4]	1804,66
5	[2 4 5]	3259,17
6	[2 4 5]	4225,31
7	[2 4 5]	5204,41
8	[1 2 5]	4383,98
9	[2 4 5]	2710,33
10	[2 4 5]	2331,43
11	[2 4 5]	5264,58
12	[2 3 4]	4886,88
13	[2 3 4]	11487,55

Temel yayılım modelinde RSS değerlerinin uzaklık dönüşümü esnasında kaynak ile alıcı arasında engel bulunduğu takdirde RSS değerindeki azalmadan dolayı Şekil 4.5'te gösterildiği üzere kaynak ile alıcı arasındaki mesafe daha uzun hesaplanmaktadır.



Şekil 4.5 Emilim Etkisinden Kaynaklı Uzak Dönüşüm Hatası

Konumlandırma testinin ikinci aşamasında emilim etkisi nedeniyle meydana gelen uzaklık hataları bu etkinin modele dâhil edilmesi ile konum hataları belirli oranda iyileşmektedir. Oda içerisinde temel model sonuçları ile karşılaştırılan hata sonuçları Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.7 Emilim Modeli ile Oda İçi Konumlandırma Hataları

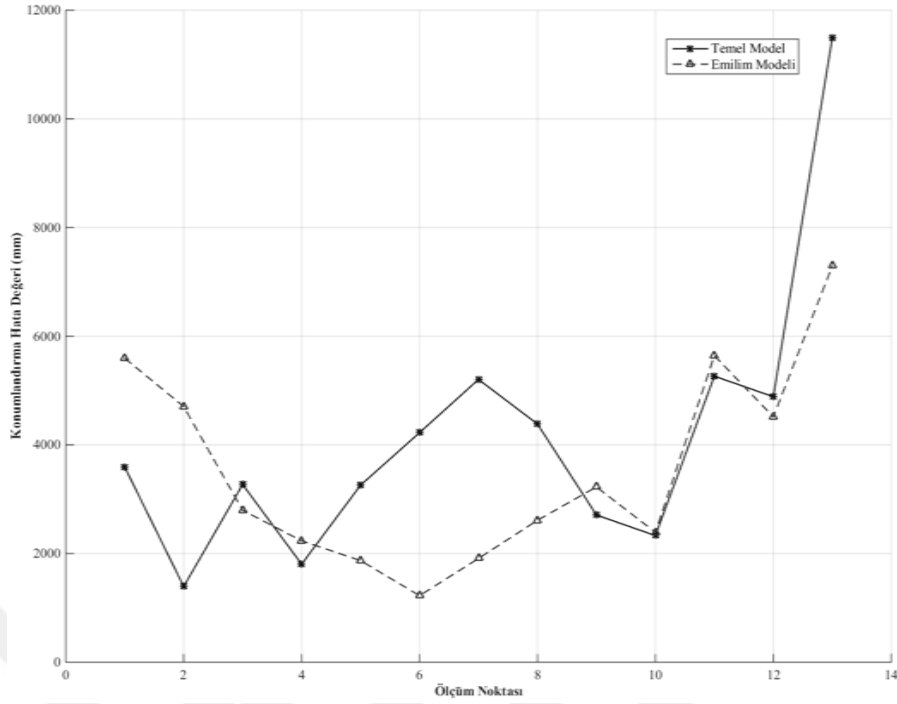
Ölçüm Noktası	Erişim Noktası Kombinasyonu	Temel Model Konum Hata Değeri (mm)	Emilim Model Konum Hata Değeri (mm)
1	[2 4 5]	6037,44	946,94
2	[2 4 5]	6211,33	2061,04
3	[1 2 4]	6038,98	1610,29
4	[1 2 5]	5294,12	1418,02
5	[1 4 5]	4096,26	1375,89
6	[2 4 5]	5921,26	2252,17
7	-	-	1764,91
8	[1 2 4]	8307,98	2928,93

Koridor için hesaplanan değerler benzer şekilde temel model ile karşılaştırılarak Çizelge 4.8'de verilmektedir. Oda içerisindeki test noktalarında hatalar incelendiğinde her nokta için 2,5 ile 5 metre arasında iyileşme sağlanmakta ve konumlandırma hatası ortalama 1,8 metre olarak bulunmaktadır.

Çizelge 4.8 Emilim Model Koridor Konumlandırma Hataları

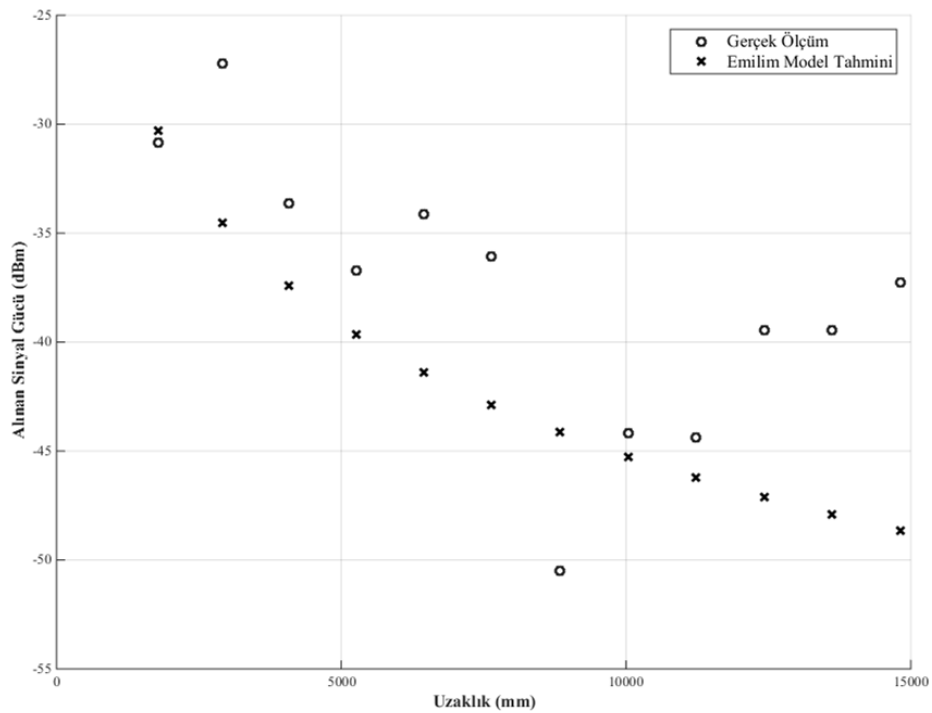
Ölçüm Noktası	Erişim Noktası Kombinasyonu	Temel Model Konum Hata Değeri (mm)	Emilim Model Konum Hata Değeri (mm)
1	[1 4 5]	3591,76	5594,02
2	[1 4 5]	1394,07	4706,5
3	[1 4 5]	3270,27	2797,08
4	[1 2 4]	1804,66	2234,91
5	[2 4 5]	3259,17	1871,1
6	[2 4 5]	4225,31	1226,03
7	[2 4 5]	5204,41	1910,53
8	[1 2 5]	4383,98	2612,52
9	[2 4 5]	2710,33	3226,53
10	[2 4 5]	2331,43	2391,11
11	[2 4 5]	5264,58	5642,73
12	[2 3 4]	4886,88	4516
13	[2 3 4]	11487,55	7293,2

Koridor için elde edilen sonuçlar oda içerisindeki noktalarda olduğu gibi her nokta için iyileşme göstermemektedir. Şekil 4.6'da gösterildiği gibi yalnızca koridorun orta noktasında yer alan ölçüm noktaları için daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.



Şekil 4.6 Temel ve Emilim Modeli Koridor Konumlandırma Sonuçları

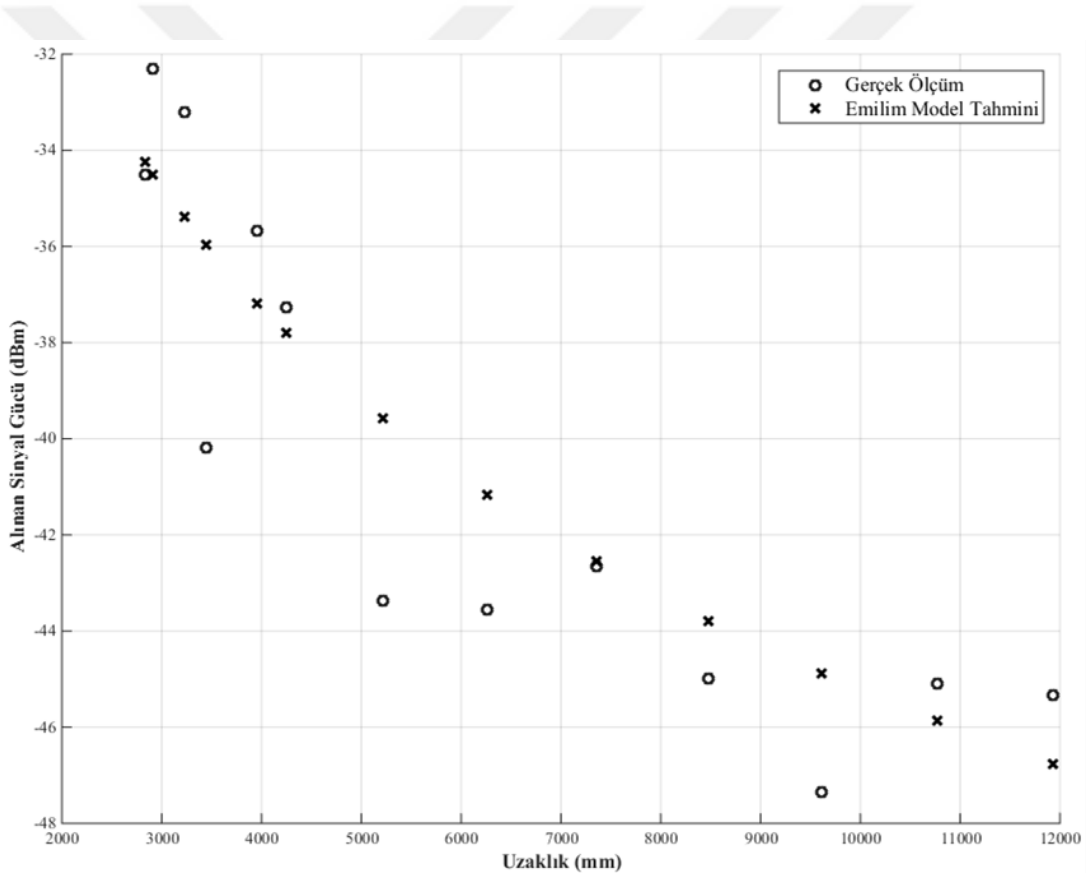
Detaylı incelemeler sonucunda koridorun iki uç bölgesinde meydana gelen hataların kaynağı, çok yollu sönümlenme ve koridor etkisi test sonuçları ile ilişkilendirilmektedir.



Şekil 4.7 Dördüncü Erişim Noktası Koridor Yayılımı Karşılaştırılması

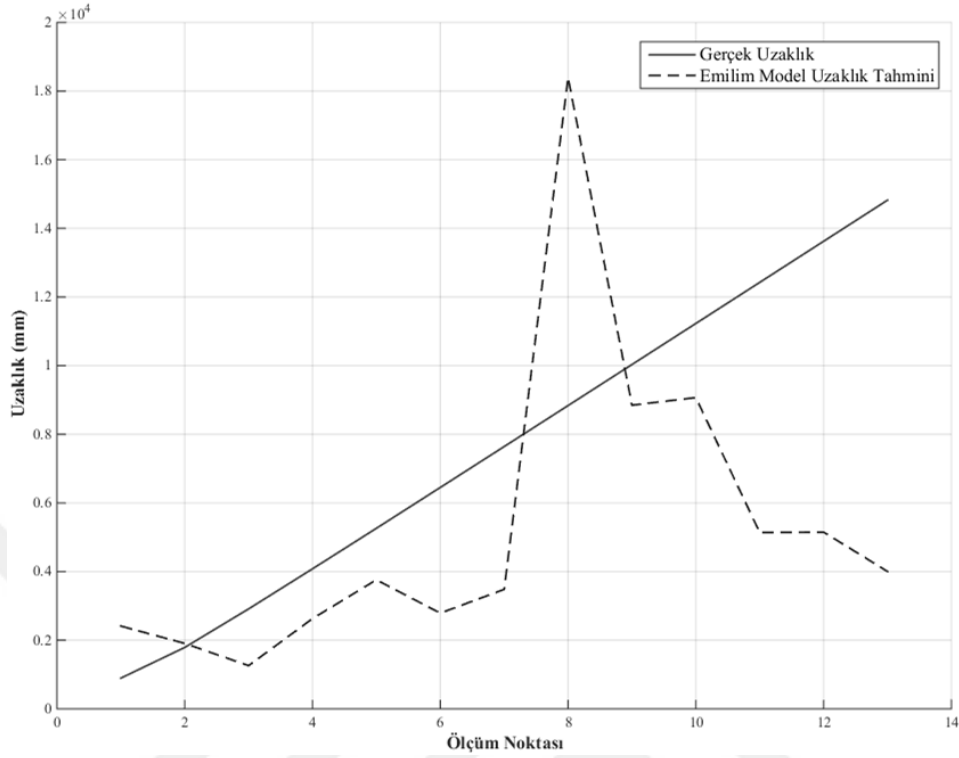
Bu ilişkiye göre; koridorda yer alan 4. ve 5. erişim noktalarının koridor boyunca dağılımı incelendiğinde tüm ölçüm noktalarında alınan sinyal gücü değerlerinin koridor etkisi nedeniyle Wi-Fi sinyallerinin yayılım karakteristiğine uygun olmadığı gözlemlenmiştir. Veri setinden yalnızca 4. erişim noktasına ait RSS verileri filtrelenerek Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Aynı grafik üzerinde uzaklık dönüşümü için kullanılan modelden elde edilen verilerin RSS tahmin değerleri çizdirilmektedir.

Yerleşimi 4. Erişim noktasından farklı olan fakat koridora doğrudan bağlantılı hol bölgesinde bulunan 5. Erişim noktasının koridordaki ölçüm değerleri de incelendiğinde koridor etkisi görülmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Beşinci Erişim Noktası Koridor Yayılımı Karşılaştırılması

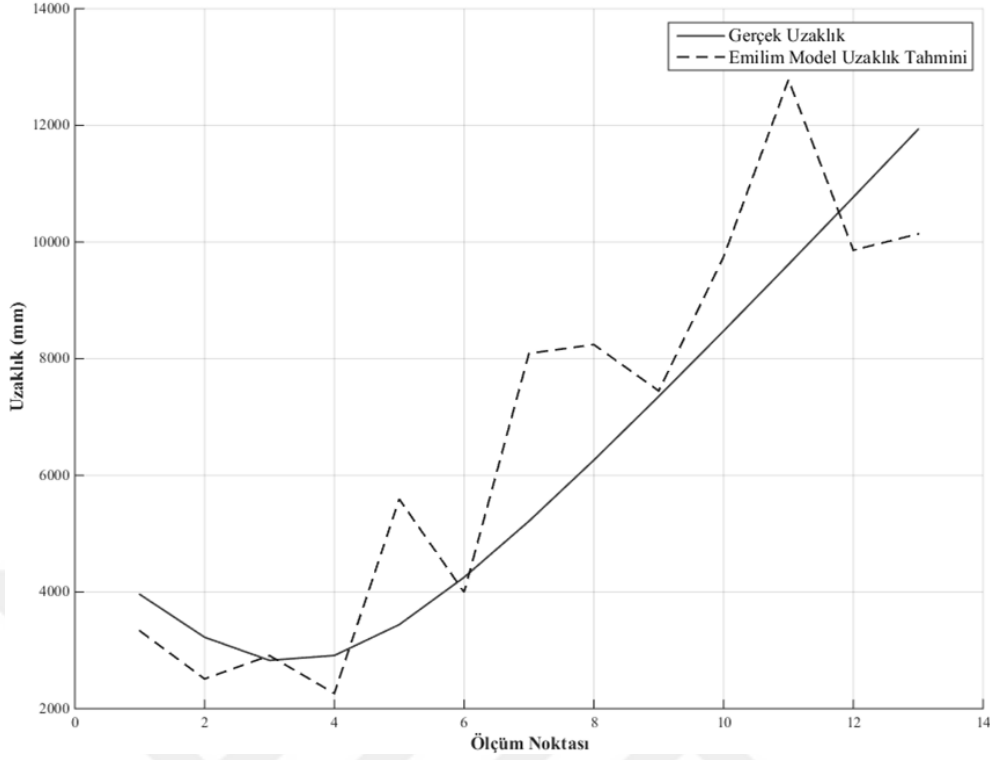
Her iki grafik incelendiğinde 4. Erişim noktası için 8.test noktasına dek sinyal yayılımı teoriye uygun karakteristiğini sürdürmekte fakat bu noktadan sonra sinyal azalması durmakta, aksine güçlenmektedir. Bu durum; temel model ve sinyal emilim etkisinin dâhil edildiği model ile elde edilen sonuçlara bakıldığında konum hatalarının artmasını açıklamaktadır.



Şekil 4.9 Dördüncü Erişim Noktası Koridor Uzaklık Dönüşüm Karşılaştırılması

Sinyal değeri koridorun uç bölgelerinde koridor etkisi nedeniyle güçlendiğinden 4. Erişim noktası için yapılan uzaklık dönüşümlerinde hata giderek artmaktadır. Aynı şekilde 4. Erişim noktasının koridorun uç bölgelerinde konum hesaplanması için kullanılan erişim noktası kombinasyonlarında yer alması sebebiyle meydana gelen hataların bu erişim noktasından alınan ölçüm değerlerinden kaynaklandığı gözlenmektedir. Bu erişim noktasından elde edilen uzaklık dönüşümleri Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Erişim noktasından uzaklaşan mesafe değerlerinde koridor etkisi nedeniyle dönüşüm uzaklık değerlerindeki hata artmaktadır.

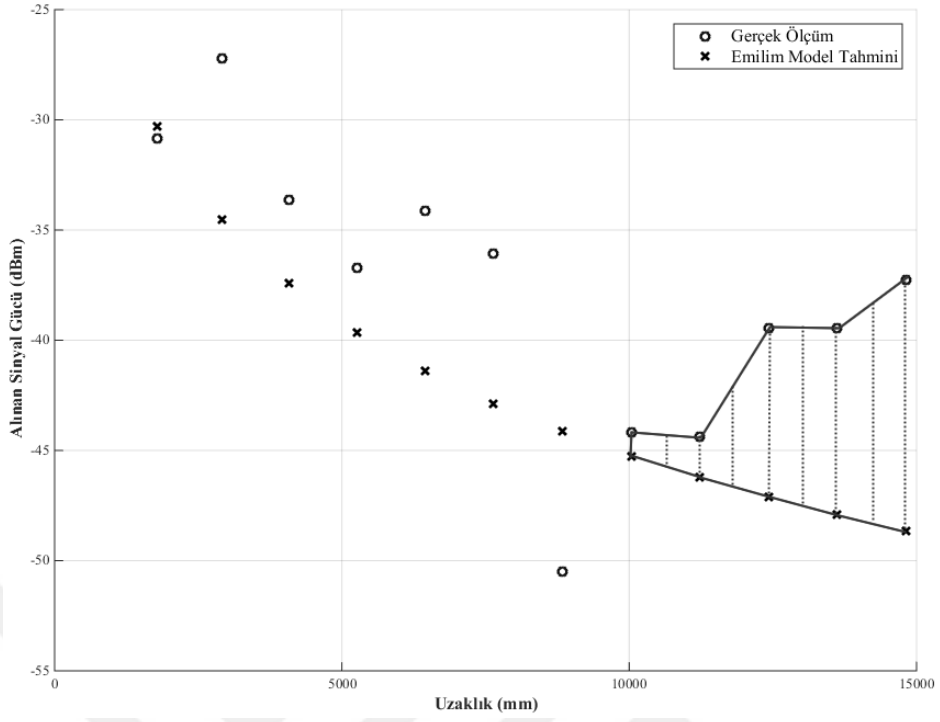
Koridorun diğer ucunda koridora yakın şekilde yerleştirilmiş 5. erişim noktasından alınan değerler uzak noktadaki 2 ölçüm noktasında benzer etkiyi göstermektedir. Erişim noktasına ait dönüşüm sonuçları ve gerçek mesafe değerleri Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Beşinci Erişim Noktası Koridor Uzaklık Dönüşüm Karşılaştırılması

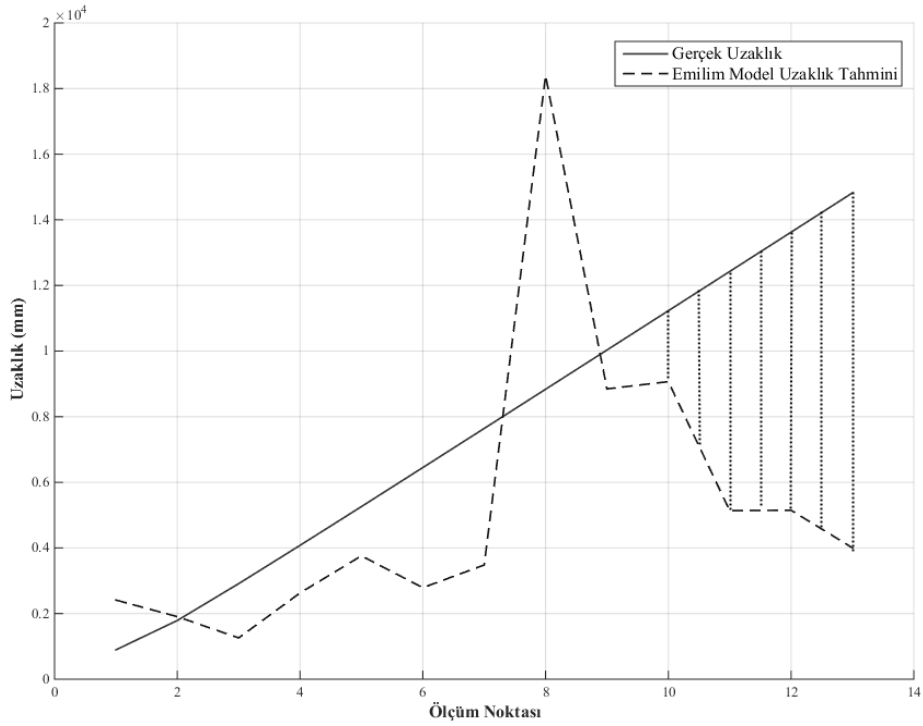
Emilim etkisinin dâhil edildiği model yalnızca çeşitli materyallerden geçişte sinyal düşümünü modellemektedir. Koridorun orta bölgesi haricinde emilim dışında koridor etkisi görülmektedir. Bu etki literatürde tünel etkisi olarak da bilinmektedir. Erişim noktasından yayılan sinyaller bu etki nedeniyle pozitif olarak etkileşmekte ve sinyal gücünün azalması beklenen noktalarda daha güçlü sinyal değerleri elde edilmektedir. Dolayısı ile Wi-Fi sinyalinin materyale göre emilim karakteristiğinin biliniyor olması koridor gibi alanlarda yeterli gelmemektedir. Wi-Fi alınan sinyal gücü değerlerinin kullanıldığı bu etki üzerine yapılan çalışmalar genellikle haberleşme sistemlerinin tasarımları ile alakalıdır. Bu nedenle emilim etkisinin dâhil edildiği model, konumlandırma amaçlı koridor etkisini içine alacak biçimde geliştirilerek yeni model önerilmektedir.

Konumlandırma testlerinin son aşamasında önerilen model ile koridor üzerinde bulunan test noktaları için konum bulunarak ilk iki aşamada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma yapılmaktadır. Önerilen model ile Şekil 4.11’de gösterilen RSS hataları düzeltilmek üzere model içerisinde kullanılan parametreler deneysel olarak belirlenmektedir.



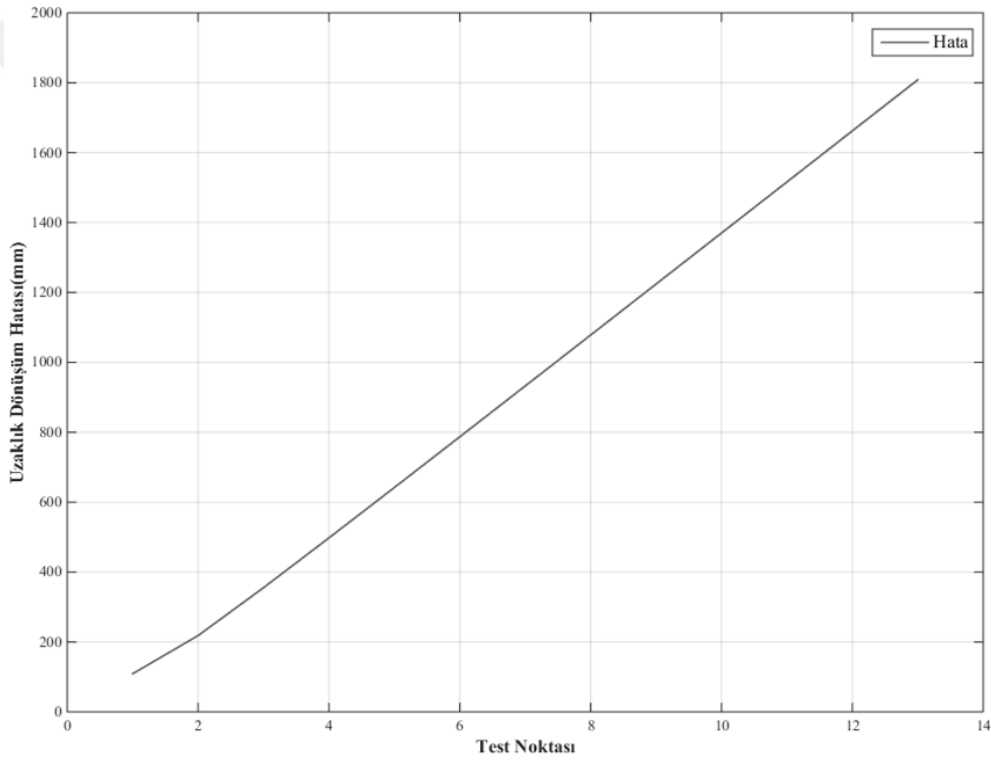
Şekil 4.11 Dördüncü Erişim Noktası RSS Hata Bölgesi

RSS hatalarından kaynaklı uzaklık hata bölgesi ise Şekil 4.12'de ayrıca verilmektedir.



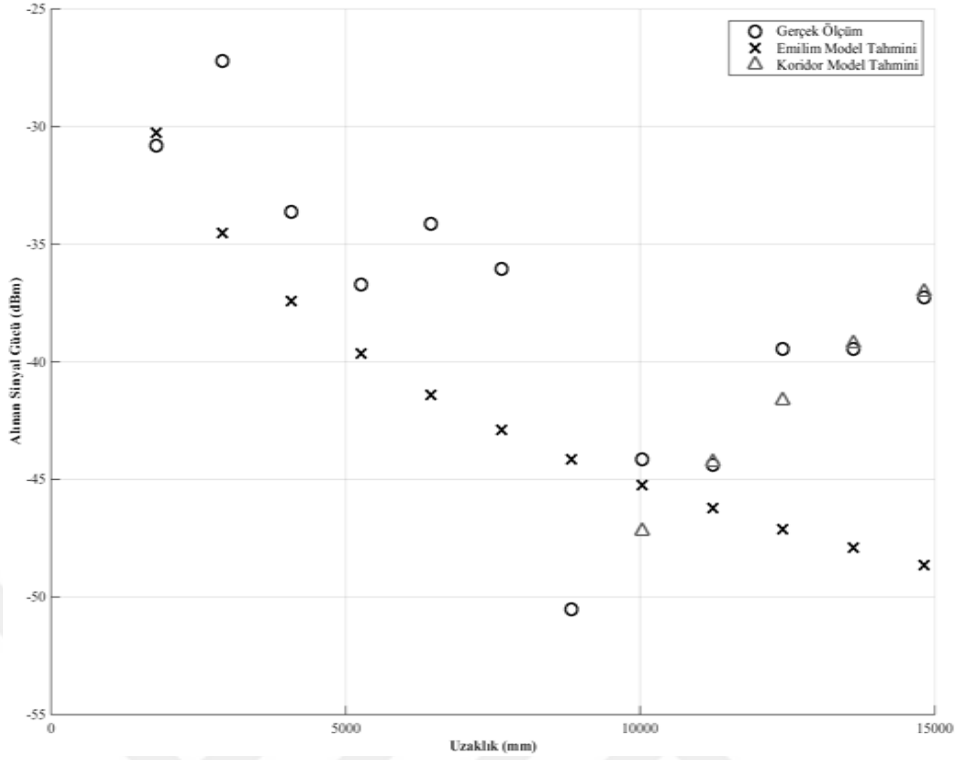
Şekil 4.12 Dördüncü Erişim Noktası Uzaklık Hata Bölgesi

Gösterilen hatalar için önerilen modelde logaritmik uzaklık tabanlı bir düzeltme uygulanmaktadır. Bunun nedeni logaritmik olarak değişen sinyal gücü erişim noktasından belli uzaklıktaki noktalarda 1 dBm değişim için farklı RSS-uzaklık dönüşüm hatası vermektedir. Erişim noktasına yakın bir mesafede ölçülen değere 1 dBm'lik hata katılması uzaklık dönüşümünde 200 mm altında bir hataya sebebiyet vermektedir. Bunun aksine erişim noktasından uzaklaşan mesafe değerlerinde aynı büyüklükte RSS hatası verildiğinde elde edilen uzaklık dönüşüm hatası 2000 mm'ye çıkmaktadır. RSS değerlerindeki 1 dBm hatalı ölçüm için uzaklık dönüşümünde meydana gelecek hata grafiği Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Bir dBm RSS Farkının Uzaklığa Bağlı Hata Grafiği

Bölge tanımlaması ile yayılım karakteristiğini iki bölgede inceleyen önerilen modelde 4. Erişim noktası için yapılan RSS tahminleri Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Grafik üzerinde gösterilen yayılımın bütün hali gerçekte erişim noktasının yayılımına benzerlik göstermektedir. Buna göre uzaklık dönüşümlerindeki hataların azalması ve buna bağlı olarak konum hatalarının da azalması öngörülmektedir.



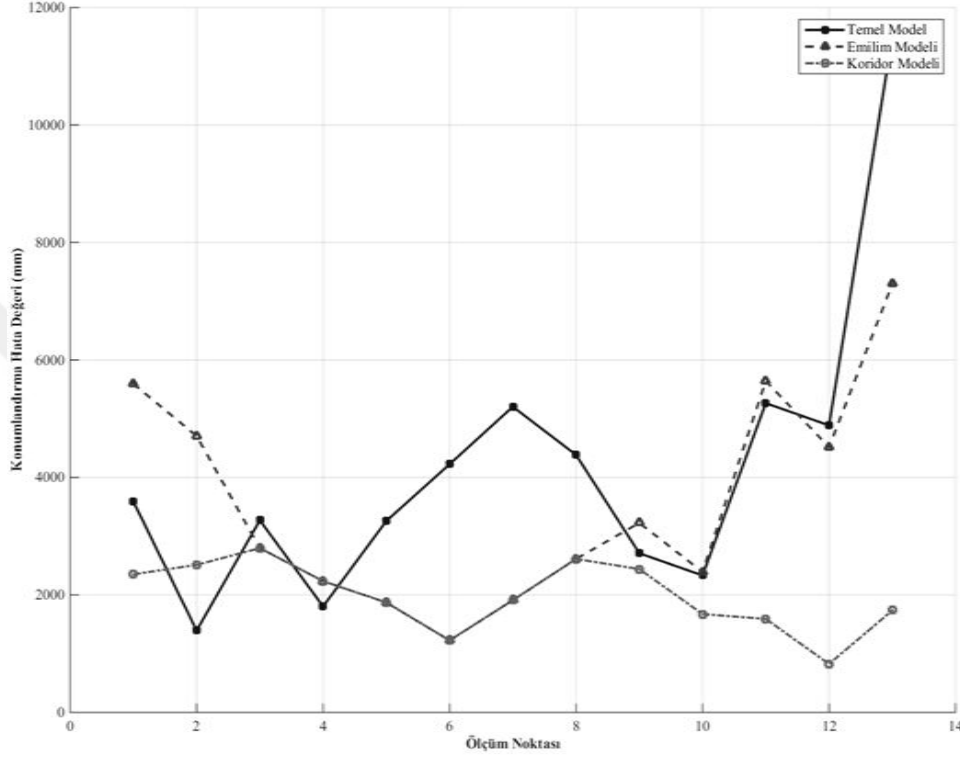
Şekil 4.14 Dördüncü Erişim Noktası İçin Koridor Modeli Uygulanması

Önerilen modelin de yer aldığı tüm konumlandırma test sonuçları Çizelge 4.9'da gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre temel modelden önerilen modele doğru sinyal emilim etkisi ve koridor etkisi modele dâhil edilerek konum hataları iyileştirilmektedir.

Çizelge 4.9 Önerilen Model Konumlandırma Sonuçları Karşılaştırılması

Ölçüm Noktası	Erişim Noktası Kombinasyonu	Temel Model Konum Hata Değeri (mm)	Emilim Model Konum Hata Değeri (mm)	Koridor Modeli Konum Hata Değeri (mm)
1	[1 4 5]	3591,76	5594,02	2350,81
2	[1 4 5]	1394,07	4706,5	2512
3	[1 4 5]	3270,27	2797,08	2797,08
4	[1 2 4]	1804,66	2234,91	2234,91
5	[2 4 5]	3259,17	1871,1	1871,1
6	[2 4 5]	4225,31	1226,03	1226,03
7	[2 4 5]	5204,41	1910,53	1910,53
8	[1 2 5]	4383,98	2612,52	2612,52
9	[2 4 5]	2710,33	3226,53	2440,35
10	[2 4 5]	2331,43	2391,11	1673,95
11	[2 4 5]	5264,58	5642,73	1591,52
12	[2 3 4]	4886,88	4516	824,07
13	[2 3 4]	11487,55	7293,2	1737,16

Test ortamında emilim etkisi ve koridor etkisinin neden olduğu hatalar tek bir grafikte birleştirilerek Şekil 4.15'te gösterilmektedir. Bu grafikte gösterildiği üzere temel modelin hata değerleri erişim noktasından uzaklaşan mesafelerde konum hatası giderek artmakta ve 10 m değerlere ulaşmaktadır.



Şekil 4.15 Temel, Emilim ve Koridor Modellerinin Karşılaştırılması

Alçı panel engellerden kaynaklanan emilim etkisi modele dâhil edildiğinde koridorun orta bölgesinde, koridor etkisi modele dâhil edildiğinde ise koridorun uç bölgelerinde konum hataları iyileşmektedir. Temel model, emilim modeli ve koridor modeli için elde edilen maksimum ve ortalama konum hatası değerleri Çizelge 4.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.10 Modellerin Maksimum ve Ortalama Konum Hataları Karşılaştırması

Model	Maksimum Konum Hata Değeri (mm)	Ortalama Konum Hata Değeri (mm)
Temel Model	11487,55	4139,57
Emilim Modeli	7293,2	3540,17
Koridor Modeli	2797,08	1983,23

Emilim modeli kullanıldığında temel modele göre ortalama konum hatası %14,48 oranında iyileşmektedir. Temel modelin doğasına uygun olarak emilim etkisini de içine alarak geliştirilen koridor modeli sonuçlarına göre ise ortalama hata değeri %52,09 oranında iyileştirilerek ortalama 2 metre hata ile konum hesaplaması yapılabilmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında kapalı ortam konumlandırmada yaygın kullanılan RF sinyal teknolojilerinden Wi-Fi sinyalinin karakteristikleri incelenerek, konumlandırma hassasiyeti üzerine etkileri çalışılmaktadır. Yapılan literatür araştırmasında, RF sinyalinin yayılımında maruz kaldığı etkiler ve bu etkilerin modellenmesinde kullanılan yayılım modelleri incelenmektedir. Yapılan çalışmalarda referans, emilim, çok yollu sönümlenme ve tünel etkisi için gerçek ortamda testler yapılmaktadır. Aynı zamanda konumlandırma sistemlerinde kabul görmüş deneysel bir yöntem olan logaritmik uzaklığa bağlı yol kayıp modeli ile ortam benzetim testlerine yer verilmektedir. Çalışmaların sonucunda kapalı ortamlarda tünel etkisinin var olduğu ortamlarda mevcut yayılım modellerinin yetersiz olduğu gözlemlenmektedir. Önerilen yayılım modeli ile yapılan konumlandırma testlerinde tünel etkisi nedeniyle ortaya çıkan konumlandırma hataları mevcut yayılım modeli sonuçları ile karşılaştırıldığında, önerilen model kullanılarak hataların önemli oranda azaldığı görülmektedir.

Tez kapsamında yürütülen çalışmalarla alınan sinyal gücü bilgisinin kullanıldığı konumlandırma sistemlerinde ortamı oluşturan parametrelerin ve buna bağlı olarak erişim noktası yerleşimlerinin kritik olduğu gözlemlenmektedir. Ortamı oluşturan yapı materyalleri ve koridor gibi bölgelerin sinyal davranışları üzerine etkisi değerlendirmeye alınmalıdır. Bu etkiler dahilinde konumlandırmaya uygun sinyal gücü seviyelerinin elde edilmesi için uygun erişim noktası yerleşimi yapılmalıdır. Bu sayede hesaplamasal maliyeti düşük deneysel yayılım modelleri ile geometrik yöntemler kullanılarak daha az karmaşıklığa sahip, konum doğruluğu tatmin edici ve kurulumu kolay sistemler elde edilebilir.

Gelecek çalışmalarda kapalı ortamlarda tünel etkisi oluşturan ortamlar için detay incelemeler yapılabilir. Konumlandırma amaçlı kullanılan sistemlerde bu etkinin yapı materyalleri ile bağlantısı, ortama ait uzunluk, genişlik ve kesit gibi parametreler ile ilişkisini ele alan modeller ortaya konması beklenmektedir. Benzer şekilde verilen bu parametreleri ele alarak konumlandırma amaçlı erişim noktası yerleşimi hakkında çalışmalar sürdürülebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahsan, S., Zeeshan, A., Iftikhar, A., 2013, Analysis and Measurement of Wi-Fi Signals in Indoor Environment, International Journal of Advances in Engineering & Technology, 6, 2, 678-687.
- Alkası, U., Shayokh, M., Partal, H.P., 2013, An Experimental Comparison Study on Indoor Localization: RF Fingerprinting and Multilateration Methods, International Conference on Electronics, Computer and Computation, 255-259.
- Alsmadi, N., Saif, K., 2015, Mobile Phone Antenna Design, Bachelor Thesis, Department of Applied Signal Processing Blekinge Institute of Technology, 68 p.
- AT & T, 2009, Antenna Fundamentals Technical Brief, p.8-16.
- Baala, O., Caminada, A., 2006, WLAN-based Indoor Positioning System: Experimental Results for Stationary and Tracking MS, International Conference on Communication Technology.
- Bahl, P., Padmanabhan, V.N., 2000, RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies, 775-784.
- Bayar, V., 2014, Kapalı Ortamlarda Konum Belirleme Yapabilen Ticarileşmiş veya Ticarileşme Aşamasındaki Ürünlerin Araştırması, Araştırma Raporu, İnovasyon Mühendislik Teknoloji Geliştirme, Danışmanlık San. ve Tic. Ltd. Şti., 34 s.(yayımlanmamış).
- Bras, L., Carvalho, N.B., Pinho, P., Kulas, L., Nyka, K., 2012, A Review of Antennas for Indoor Positioning Systems, International Journal of Antennas and Propagation.
- CCIR, 1990, XVIIth Plenary Assembly.
- Chen, Y., Francisco, J., Trappe, W., Martin, R.P., 2006, A Practical Approach to Landmark Deployment for Indoor Localization, 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 1, 365-373.
- Chen, Y.M., Sohn, T., Chmelev, D., Haehnel, D., Hightower, J., Hughes, J., LaMarca, A., Potter, F., Smith, I., Varshavsky, A., 2006, Practical Metropolitan-Scale Positioning for GSM Phones, UbiComp'06 Proceedings of the 8th International Conference on Ubiquitous Computing, 225-242.
- Chopard, B., Droz, M., 1998, Cellular Automata Modeling of Physical Systems, Cambridge University Press.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chuku, N., Pal, A., Nasipuri, A., 2013, An RSSI based Localization Scheme for Wireless Sensor Networks to Mitigate Shadowing Effects, The Proceedings of IEEE Southeastcon, 1-6.
- Dao, T.K., Pham, T.T., Castelli, E., 2013, A Robust WLAN Positioning System based on Probabilistic Propagation Model, 9th International Conference on Intelligent Environments, 24-29.
- Devasirvatham, D.M.J., Banerjee, C., Murray, R.R., Rappaport, D.A., 1991, Four-Frequency Radiowave Propagation Measurements of the Indoor Environment in a Large Metropolitan Commercial Building, Global Telecommunication Conference, 1282-1286.
- El-Kafrawy, K., Youssef, M., El-Keyi, A., 2011, Impact of the Human Motion on the Variance of the Received Signal Strength of Wireless Links, IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1208-1212.
- European Commission, 1999, COST Action 231 Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems, p.135-140.
- Fan, W.H., Yu, L., Wang, Z., Xue, F., 2014, The Effect of Wall Reflection on Indoor Wireless Location Based on RSSI, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 1380-1384.
- Fink, A., Beikirch, H., 2015, MineLoc – Personnel Tracking System for Longwall Coal Mining Sites, International Federation of Automation Control by Elsevier, 215-221.
- Flattie, A.G., 2012, Optimizing the Existing Indoor Propagation Prediction Models, International Conference on Wireless Networks, 49, 202-207.
- Gabriel, C., 1996, Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies, Technical Report, Texas Air Force Material Command Brooks Air Force Base, 21 p.
- Goldsmith, A., 2005, Wireless Communications, Cambridge University Press, p.24-46.
- Graffin, J., Rots, N., Pedersen, G.F., 2000, Radiations Phantom for Handheld Phones, Vehicular Technology Conference, 853-860.
- Hashemi, H., 1993, The Indoor Radio Propagation Channel, Proceedings of the IEEE, 81, 7, 943-968.
- Hata, M., 1980, Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 29, 3, 317-325.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hrovat, A., Kandus, G., Javornik, 2011, Impact of Tunnel Geometry and its Dimension on Path Loss at UHF Frequency Band, Recent Researches in Circuits, Systems, Communications and Computer, 253-258.
- Hrovat, A., Kandus, G., Javornik, 2012, Path Loss Analyses in Tunnels and Underground Corridors, International Journal of Communications, 3, 6, 136-144.
- Hrovat, A., Kandus, G., Javornik, T., 2014, A Survey of Radio Propagation Modeling for Tunnels, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16, 2, 658-669.
- InLocation Alliance, 2012, <http://inlocationalliance.org/>, erişim tarihi:13.11.2016.
- Jadhavar, B.R., Sontakke, T.R., 2012, 2.4 GHz Propagation Prediction Models for Indoor Wireless Communications Within Building, International Journal of Soft Computing and Engineering, 2, 3, 108-113.
- Ji, Y., 2012, Dynamic 3-D Indoor Radio Propagation Model and Applications with Radios from 433 MHz to 2.4 GHz, International Journal of Communications, Networks and System Sciences, 5, 753-766.
- Kleisoruis, K., Chen, Y., Yang, J., Martin, R.P., 2010, Empirical Evaluation of Wireless Localization when Using Multiple Antennas, IEEE Transactions On Parallel and Distributed Systems, 21, 11, 1595-1610.
- Kaemarungsi, K., Krishnamurthy, P., 2004, Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting, Proceedings of the First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services.
- Kaemarungsi, K., 2006, Distribution of WLAN Received Signal Strength Indication for Indoor Location Determination, 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing.
- Kjærgaard, M.B., 2006, Automatic Mitigation of Sensor Variations for Signal Strength Based Location Systems, LoCA'06 Proceedings of the Second International Conference on Location and Context Awareness.
- Klepal, M., 2003, Novel Approach to Indoor Electromagnetic Wave Propagation Modelling, Doctoral Thesis, Electrical and Informatics Engineering in Czech Technical University, 174 p.
- Lassabe, F., Canalda, P., Chatonnay, P., Spies, F., Baala, O., 2005, A Friis-based Calibrated Model for WiFi Terminals Positioning, Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lawton, M., McGeehan, J., 1994, The application of a Deterministic Ray Launching Algorithm for the Prediction of Radio Channel Characteristics in Small-Cell Environments, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43, 4, 955-969.
- Lim, H., Kung, L., Hou, J.C., Luo, H., 2006, Zero-Configuration, Robust Indoor Localization Theory and Experimentation, 25th IEEE International Conference on Computer Communications.
- Lima, A.G.M., Menezes, L.F., 2005, Motley-Keenan Model Adjusted to the Thickness of the Wall, *International Conference on Microwave and Optoelectronics*, 180-182.
- Luo, M., 2013, Indoor Radio Propagation Modeling for System Performance Prediction, Doctoral Thesis, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 143 p.
- Mai, A.A., Alhadhrami, S., Al-Salman, A., Alarifi, A., Al-Khalifa, H.S., Alnafessah, A., Alsaleh, M., 2014, Comparative Study of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms, *International Conference of Cyberworlds*, 245-252.
- Motley, A.J., Keenan, J.M.P., 1988, Personal Communication Radio Coverage in Buildings at 900 MHz and 1700 MHz, *Electronic Letters*, 24, 12, 763-764.
- Mrazovac, B., Todorovic, B.M., Bjelica, M.Z., Kukolj, D., 2013, Device-free Indoor Human Presence Detection Method based on the Information Entropy of RSSI Variations, *Electronics Letters*, 49, 22, 1386-1388.
- Namik, S., Ferner, U.J., Sowerby, K.W., 2008, Localization in Harsh Propagation Environments, *Communications Theory Workshop*, 161-166.
- Neskovic, A., Neskovic, N., Pauvonic, G., 2000, Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment, *IEEE Communication Surveys*, 2-12.
- Okumura, T., Ohmori, E., Fukuda, K., 1968, Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Services, *Review Electrical Communication Laboratory*, 16, 9-10, 825-873.
- Östlin, E., 2009, On Radio Wave Propagation Measurements and Modelling for Cellular Mobile Radio Networks, Doctoral Thesis, Department of Electrical Engineering School Blekinge Institute of Technology, 192 p.
- Park, J., Curtis, D., Teller, S., Ledlie, J., 2011, Implications of Device Diversity for Organic Localization, *IEEE INFOCOM*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pelosi, M., Franek, O., Knudsen, M.B., Christensen, M., Pedersen, G.F., 2009, A Grip Study for Talk and Data Modes in Mobile Phones, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 57, 4, 856-865.
- Pelosi, M., Knudsen, M.B., Pedersen G.F., 2012, Multiple Antenna Systems With Inherently Decoupled Radiators, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60, 2, 503-515.
- Porrat, D., 2002, Radio Propagation in Hallways and Streets for UHF Communications, Doctoral Thesis, Department of Electrical Engineering of Stanford University, 130 p.
- Porrat, D., Cox, D.C., 2004, UHF Propagation in Indoor Hallways, IEEE Transactions on Wireless Communications, 3, 4, 1188-1198.
- Priwgharm, R., Cherntanomwong, P., 2011, A Comparative Study on Indoor Localization based on RSSI Measurement in Wireless Sensor Network, Eighth International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering.
- RADAR, 2001, <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/radar/>, erişim tarihi: 12.11.2016.
- Rappaport, T.S., 2002, Wireless Communications Principles and Practice, Prentice-Hall Inc., p.105-248.
- Rosa, F.D., Pelosi, M., Nurmi, J., 2012, Human-Induced Effects on RSS Ranging Measurements for Cooperative Positioning, International Journal of Navigation and Observation.
- Sapumohotti, C., Alias, M.Y., Tan, S.W., 2013, Access Point Selection for WLAN Indoor Localization Systems Using RF Walk Test Data, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, 199-202.
- Sarkar, T.K., Ji, Z., Kim, K., Medouri, A., Salazar-Palma, M., 2003, A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 45, 3, 51-82.
- Sati, G., Singh, S., 2014, A Review on Outdoor Propagation Models in Radio Communication, International Journal of Computer Engineering and Science, 4, 2, 64-68.
- Saunders, S., Aragon-Zavala, A., 2007, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, John Wiley & Sons, p.285.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Seidel, S.Y., Rappaport, T.S., 1992, 914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 40, 2, 207-217.
- Sinopoli, J., 2013, Indoor Positioning Systems: We Know Where You Are, <http://www.smart-buildings.com/uploads/1/1/4/3/11439474/2013febindoor.pdf>, erişim tarihi: 13.11.2016.
- Söderman, D., 2012, A 2D Indoor Propagation Model Based on Waveguiding, Mode Matching and Cascade Coupling, Master Thesis, KTH Electrical Engineering and Ericsson Research, 95 p.
- Sun, Z., Akyildiz, I.F., 2008, Channel Modeling of Wireless Networks in Tunnels, IEEE GLOBECOM 2008 Proceedings.
- Sun, Z., Akyildiz, I.F., 2010, Channel Modeling and Analysis for Wireless Networks in Underground Mines and Road Tunnels, IEEE Transactions on Communications, 58, 6, 1758-1768.
- Svalastog, M.S., 2007, Indoor Positioning – Technologies, Services and Architectures, Cand. Scient. Thesis, University of Oslo Department of Informatics, 133 p.
- Tayebi, A., Gomez, J., Adana, F.S., Gutierrez, O., 2009, Ray-Tracing Application to Mobile Localization in Multipath Indoor Environments, Electromagnetics in Advanced Applications, 412-415.
- Tsui, A.W., Chuang, Y., Chu H., 2009, Unsupervised Learning for Solving RSS Hardware Variance Problem in WiFi Localization, Mobile Networks and Applications, 14, 5, 677-691.
- Wang, S., 2010, Radio Wave Attenuation Character in the Confined Environments of Rectangular Mine Tunnel, Modern Applied Science, 4, 2, 65-70.
- Wölfle, G., Landstorfer, F.M., 1998, Dominant Paths for The Field Strength Prediction, Vehicular Technology Conference, 552-556.
- Yang, H., Yoon, G., Han, D., 2011, Floor Accuracy Improvement of Wireless LAN based Large Scale Indoor Positioning, Intelligent Radio for Future Personal Terminals (IMWS-IRFPT).
- Yarkoni, N., Blaunstein, N., 2006, Prediction of Propagation Characteristics in Indoor Radio Communication Environments, Progress in Electromagnetics Research, 151-174.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yayan, U., Yücel, H., Yazıcı, A., 2015, A Low Cost Ultrasonic Based Positioning System for the Indoor Navigation of Mobile Robots, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 78, 3, 541-552.
- Yin, X., Cheng, X., 2016, Propagation Channel Characterization, Parameter Estimation And Modelling For Wireless Communications, John Wiley & Sons Singapore Pte Ltd., p.15-38.
- Yücel H., Edizkan, R., Özkır, T., Yazıcı, A., 2012, Development of Indoor Positioning System with Ultrasonic and Infrared Signals, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, 1-4.
- Zvanovec, S., Pechac, P., Klepal, M., 2003, Wireless LAN Networks Design: Site Survey or Propagation Modeling?, *Radioengineering*, 12, 4, 42-49.