

**HÜCRESEL HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE İHA  
HABERLEŞME KANAL MODELLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF UAV COMMUNICATION  
CHANNEL MODELS IN CELLULAR COMMUNICATION  
SYSTEMS**

**EDİZ NAZMİ ORHAN**

**PROF. DR CENK TOKER**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2022

## ÖZET

# HÜCRESEL HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE İHA HABERLEŞME KANAL MODELLERİNİN İNCELENMESİ

**Ediz Nazmi Orhan**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Danışman: Prof. Dr. Cenk Toker**

**02.09.2022, 101 sayfa**

İnsansız Hava Araçlarını gündelik yaşamda insan sağlığına herhangi bir tehdit yaratmayacak şekilde otomatik bir sistem halinde getirmek, uçuş rotaları için hava koridorları belirlemek farklı zorlukları da beraberinde getirir. Bu çalışmada asıl araştırılmak istenen ise yer yüzeyindeki baz istasyonlarının 120 metrelik irtifalara kadar sunduğu kapsama alanının İHA uygulamalarını için incelenmesidir. Bundan dolayı dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri, İnsansız Hava Araçları ile nasıl iletişim kuracağımızdır. Karasal haberleşme sistemlerinin drone haberleşmesinde kullanılabilirliği, gökyüzüne sunulan sinyal gücü ve kapsamanın yeterliliği araştırma konuları arasındadır.

İnsansız Hava Araçlarının dinamik yapısından dolayı bu çalışmada asıl hedef farklı senaryolar için karasal haberleşme sistemlerinde kullandığımız baz istasyonları ile İnsansız Hava Araçları arasında fizksel bir kanal modeli oluşturmaktır. Bu kanal modeli ile farklı etkileşimlere uğrayan çoklu-yol sinyallerinin yol kayıpları ve gerçekleşme olasılıkları gibi özelliklerini incelemek, 5G ve ötesi gibi yeni nesil haberleşme sistemleri için alçak irtifalı insansız hava araçlarının etkileneceği hava kapsamasını irtifalara göre modellemek, ayrıca bu şekilde bir kanal modellemesi yapılırken gerçekçi yaklaşımlar kullanarak kabul

edilebilir hata payları doğrultusunda bir sonuca varmak amaçlanmaktadır. Farklı istatistiksel parametrelere göre şekillenmiş bir Manhattan şehir modeli üzerinde, üç sektörden oluşan karasal bir baz istasyonunun simulasyon modeli hazırlanmış, farklı irtifalar ve şehir yapıları için üç boyutlu ışın izleme yöntemi kullanılmıştır.

Buna ek olarak birden çok baz istasyonunun bulunduğu kırsal bir bölgede 3 farklı irtifa için saha çalışmaları yapılmış, bu saha MATLAB ortamında modellenmiş, modelleme yapılırken eksik görülen bilgiler ITU-R önerilerine göre tamamlanmış ve matematiksel bir yol-kayı modeli çıkartılmıştır. Simulasyon modeli ile ölçüm verileri kıyaslanarak belirli hata payları incelenmiş, iki hücre arasında yapılan frekans geçişleri değerlendirilmiştir. Bitki örtüsünün elektromanyetik özellikleri göz önünde bulundurularak yerden yansıyan sinyallere etkisi de incelenmiştir. İki-ışın modeline eklemeler yapılarak hücresel haberleşme sistemlerinde İHA haberleşme kanal modelleri incelenmiştir.

**Keywords:** İnsansız Hava Aracı (İHA), Kanal Modellemesi, Karasal Baz İstasyonu, Işın İzleme, Manhattan modeli, simulasyon modelleme

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF UAV COMMUNICATION CHANNEL MODELS IN CELLULAR COMMUNICATION SYSTEMS**

**Ediz Nazmi Orhan**

**Master, Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Cenk Toker**

**02.09.2022, 101 pages**

There are a number of challenges involved in establishing air corridors for flight routes and integrating unmanned aerial vehicles into an automated system that will not pose a threat to the society. The primary objective of this thesis study is to examine the received power and coverage area provided by ground-based base stations up to heights of 120 meters for UAV applications. Therefore, how we will communicate with unmanned aerial vehicles is one of the most crucial factors to take into account. Among the research topics are the usefulness of terrestrial communication systems for drone communication, the received signal power values, and the sufficiency of coverage at various altitudes.

Due to the dynamic nature of Unmanned Aerial Vehicles, the main goal in this study is to create a physical channel model between the base stations we use in terrestrial communication systems and Unmanned Aerial Vehicles for different scenarios. In order to model the air coverage that will be affecting the low-altitude unmanned aerial vehicles for next-generation communication systems, the features such as path losses and probabilities of the multi-path signals that undergo different interactions were examined by using realistic approaches while modelling the physical channel in different scenarios. The objective is to

arrive at a conclusion within acceptable errors. Due to that, a simulation model of a terrestrial base station consisting of three sectors is prepared on a Manhattan-grid city model, which is generated according to different statistical parameters. Three-dimensional ray tracing method was used for different altitudes and buildings.

In addition, field studies are carried out for 3 different altitudes in a rural area with multiple base stations. This field is modeled in the MATLAB environment. The missing information during the modelling is completed according to the ITU-R recommendations and a mathematical path-loss model is created. By comparing the simulation data and measurement data in terms of RSRP RSRQ, the validity of the model is determined with acceptable mean average error. Frequency transitions between two cells were also evaluated. Considering the electromagnetic properties of the vegetation, the excessive attenuation due to vegetation is modeled within the ground reflected signals. The thesis work investigation of uav communication channel models in cellular communication systems is concluded by making additions to the two-ray model.

**Keywords:** Unmanned Aerial Vehicle(UAV), channel modelling, terrestrial base station, ray-tracing, Manhattan city model, simulation modelling

## **TEŞEKKÜR**

Tez çalıőmam boyunca ilgisini, yönlendirmelerini ve değerli katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Cenk Toker'e teőekkürlerimi sunarım.

Kendime olan inancımı yitirdiğim zamanlarda bile bana olan güvenlerini hiçbir zaman yitirmeyen, her zaman arkamda olan aileme teşekkür ederim.

Bu alıőma Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu koordinasyonunda yürütülen 5G ve tesi Ortak Lisansüstü Destekleme Programı kapsamında TURKCELL tarafından desteklenmiőtir.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ÇİZELGELER .....	vii
ŞEKİLLER .....	viii
KISALTMALAR .....	x
1. GİRİŞ .....	1
1.1. İnsansız Hava Araçları ve Kullanım Senaryoları.....	1
1.2. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması.....	4
1.3. Geçmişten Günümüze Kablosuz Haberleşme Teknolojileri .....	5
1.4. Literatür Taraması .....	10
1.5. Tezin Kapsamı ve Organizasyon.....	29
2. MODEL 1 - IŞIN İZLEMeye DAYALI MODEL .....	31
2.1. Simülasyon Ortamı ve Özellikleri .....	32
2.2. Işınlaraın Yayılma Mekanizması .....	34
2.3. Havadaki Sinyal Güç Profilinein İncelenmesi .....	47
3. MODEL 2 - DENEYSel ÖLÇÜMLERE DAYALI MODEL .....	53
3.1. Matematiksel Model.....	54
3.2. Sektör Antenleri Modelleme Yöntemi.....	57
3.3. Bitki Örtüsüne Bağlı Ek Zayıflama .....	60
3.4. Havadaki Sinyal Güç Profilinein İncelenmesi .....	62
4. MODEL ÇIKTILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	67
4.1. Model 1 - Işın izlemeye dayalı modelin çıktıları.....	67
4.2. Model 2 - Deneysel ölçümlere dayalı modelin çıktıları .....	73
5. SONUÇLAR .....	78

## ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Simülasyon ortamındaki şehirler için istatistiksel parametreler .....	32
Çizelge 2.2 Deygout yöntemi Fresnel Parametreleri .....	38
Çizelge 2.3 Kentsel bölge - İrtifaya bağlı görüş alanında olma (LOS) ve olmama (NLOS) ihtimalleri .....	42
Çizelge 2.4 Yoğun kentsel bölge - İrtifaya bağlı görüş alanında olma (LOS) ve olmama (NLOS) ihtimalleri .....	43
Çizelge 3.1 Denklemin Ana Parametreleri .....	58
Çizelge 3.2 Bitki örtüsü için hesaplanan karmaşık relatif Dielektrik Sabiti .....	61
Çizelge 3.3 Sahaya etkisi olan baz istasyonlarına yönelik bilgiler .....	63
Çizelge 4.1 Kentsel ortam, 32 m - 60 m irtifalarının doğrusal denklem parametreleri .....	71
Çizelge 4.2 Kentsel ortam, 64 m - 92 m irtifalarının doğrusal denklem parametreleri .....	72
Çizelge 4.3 Kentsel ortam, 96 m - 120 m irtifalarının doğrusal denklem parametreleri (LOS) .....	73



## ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Tüketici ve ticari yönden dron kullanım örnekleri - Qualcomm [3] .....	2
Şekil 1.2 Arama Kurtarma, Emniyet ve Güvenlik, Sanayi ve İnşaat - Nokia [4] ...	3
Şekil 1.3 Dronların önemli bir rol oynamasının beklendiği kullanım senaryoları - Ericsson [5] .....	4
Şekil 1.4 Kanat tiplerine göre İnsansız Hava Araçları [7] .....	5
Şekil 1.5 Mobil internet kullanımını - GSMA [10] .....	9
Şekil 1.6 Üç genel İHA destekli Kablosuz Haberleşme Senaryosu: a)Kapsama Artışı; b)Röle; c)Veri gönderimi ve bilgi toplama [12].....	11
Şekil 1.7 Mesafeye bağlı yol kaybı, gölgeleme, çok yollu sinyallerin etkileri [14]	14
Şekil 1.8 TE ve TM polarizasyon Yansıma ve İletim [13].....	15
Şekil 1.9 Kırılma mekanizması [13] .....	17
Şekil 1.10 METIS harita-tabanlı modeli için verilmiş blok diyagramı [18].....	22
Şekil 2.1 Ortama göre bina yüksekliklerinin dağılımı .....	33
Şekil 2.2 Kentsel ortam şehir örneği(W=24 ve S=20) .....	33
Şekil 2.3 Çatı Yansımaları.....	36
Şekil 2.4 Yatay (Yan Yüzey) Yansıma Mekanizması .....	37
Şekil 2.5 Deygout Yönteminde kullanılan Kırınım Mekanizması .....	38
Şekil 2.6 İki farklı materyele göre yansıma katsayısının özellikleri .....	39
Şekil 2.7 Sektör Antenlerin İç yapısı .....	40
Şekil 2.8 Baz istasyonunun her bir sektöründe bulunan anten modeli .....	41
Şekil 2.9 Sinyal gruplarının 32 metredeki güçleri (dB) .....	46
Şekil 2.10 Üç sektörün sadece LOS-NLOS durumlarında 32 metrede sunulan kapsama (dB).....	46
Şekil 2.11 Her bir sektörden 32 metrede yayılan sinyallerin toplam güçleri (dB) ...	46
Şekil 2.12 32 metre irtifada toplam alınan güç (dB) .....	47

Şekil 2.13 Sinyal gruplarının 32 metredeki güç değerleri ve Sinyal/Girişim oranı (dB) .....	48
Şekil 2.14 36 m ve 40 m SIR değerleri (dB) .....	50
Şekil 2.15 36 metrede alınan güç (dB) .....	51
Şekil 2.16 36 metredeki SIR(dB) .....	51
Şekil 3.1 Gerçek zamanlı test ve simülasyon alanı .....	55
Şekil 3.2 Uçuş Rotası ve Dron Hızları .....	56
Şekil 3.3 İki-Işın Modeli [14] .....	56
Şekil 3.4 Yatay ve Dikey düzlemlerindeki referans anten modeli .....	58
Şekil 3.5 Simülasyonda kullanılan anten kazancı modeli .....	59
Şekil 3.6 Bitki örtüsü relatif karmaşık dielektrik parametresi .....	61
Şekil 3.7 2600 MHz bandında relatif anten kazançları (dB) (50 m) .....	65
Şekil 3.8 1800 MHz bandında relatif anten kazançları (dB) (50 m) .....	65
Şekil 4.1 32 m ve 112 m irtifalarında LOS grubunda alınan güç değerleri .....	68
Şekil 4.2 50 m testi RSRP-RSRQ kıyaslaması .....	74
Şekil 4.3 80 m testi RSRP-RSRQ kıyaslaması .....	75
Şekil 4.4 110 m testi RSRP-RSRQ kıyaslaması .....	76

## KISALTMALAR

<b>İHA</b>	: İnsansız Hava Aracı
<b>FAA</b>	: Federal Aviation Administration, Federal Havacılık İdaresi
<b>FCC</b>	: Federal Communications Commission, Federal İletişim Kurulu
<b>IEEE</b>	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>3GPP</b>	: 3rd Generation Partnership Project, Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi
<b>ITU</b>	: International Telecommunication Union, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği
<b>LTE</b>	: Long Term Evolution
<b>LAP</b>	: Low Altitude Platform, Alçak İrtifa Platformu
<b>HAP</b>	: High Altitude Platform, Yüksek İrtifa Platformu
<b>LOS</b>	: Line of Sight, Görüş Hattında olan
<b>NLOS</b>	: Non Line - of Sight, Görüş Hattında olmayan
<b>KPI</b>	: Key Performance Indicators
<b>BS</b>	: Base Station, Baz İstasyonu
<b>SIR</b>	: Signal to Interference Ratio, Sinyal/Girişim oranı
<b>HPBW</b>	: Half Power Beam Width, Yarı güç hüzme genişliği
<b>MAE</b>	: Mean Average Error, Ortalama mutlak hata
<b>RMSE</b>	: Root Mean Square Error, Ortalama Karekök Sapması
<b>NaN</b>	: Not a Number, bir sayı değildir
<b>RSRP</b>	: Reference Signal Received Power, Referans Sinyali Alınan Güç
<b>RSSI</b>	: Reference Signal Strength Indicator, Alınan İşaret Güç Göstergesi
<b>RSRQ</b>	: Reference Signal Received Quality, Alınan Referans Sinyal Kalitesi

# 1. GİRİŞ

## 1.1. İnsansız Hava Araçları ve Kullanım Senaryoları

Yeni nesil haberleşme teknolojilerinin farklı ihtiyaçlar doğrultusundaki gelişimi, birbirinden farklı uygulamalar için sistem karmaşıklığını, kapsama ve güvenlik performansını, veri trafiği yönetimini, enerji kullanımını ve cihaz maliyetlerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Geçtiğimiz birkaç yılda, teknolojinin hızlı ilerleyişi, insansız hava araçları alanında da büyük bir etki yaratmıştır. Gömülü sistemlerden otonom uygulamalara, güvenlik senaryolarından kablosuz iletişime; sivil, ticari ve askeri uygulama alanında yaygın bir şekilde kullanılan insansız hava araçları, kargo taşımacılığında (ulaştırma ve lojistik) gözetime, haritalandırmadan trafik kontrolüne, uzaktan algılamadan arama kurtarmaya, tarımdan hücresel haberleşme sistemlerine kadar pek çok alana dahil olmuştur. Yangın, sel ve deprem gibi doğal afet durumları için acil-müdahale, arama-kurtarma, gözetim, acil haberleşme ağı kurulumu gibi örneklerini gördüğümüz İHA'lar, özetleyecek olursak birbirinden farklı kullanım senaryolarına gün geçtikçe dahil olmaktadır. Bu araçların sayıları, uçuş şekilleri, irtifaları, manevra kabiliyetleri, uçuş süreleri, boyutları, ağırlıkları ve hızları gibi özellikleri kullanım senaryolarına göre değişkenlik gösterebilir. Yakın gelecekte, farklı irtifalarda birbirinden farklı görevlerde kullanılan insansız hava araçlarını göreceğimiz ise tartışılmaz bir gerçektir.

Federal Havacılık İdaresi (FAA) son raporlarında [1], Amerika'da kayıtlı olan dron sayısının 800 binden fazla olduğunu belirtmiştir. Amazon, Qualcomm, Nokia, Ericsson gibi pek çok firma şu anda yenilikçi dron merkezli uygulamalara yatırım yapmaktadır.

Amazon, akıllı dağıtım sistemlerine odaklanırken, ürünleri müşterilere hızlı, uygun maliyetli ve en önemlisi güvenli bir şekilde bir saatten kısa sürede ulaştırmayı, bunu ölçeklenebilir bir şekilde yapmayı, görüş alanından kısa bir mesafeye hafif bir yük ile uçmak için mevcut teknolojiyi kullanmayı, bunlara ek olarak büyük topluluklardaki müşterilere hizmet verebilecek bir ağ oluşturmayı hedeflemektedir [2].

Qualcomm LTE ve 5G Hücresel Haberleşme sistemlerinin, komuta ve kontrol, medya paylaşımı ve otonom uçuş konularında İnsansız Hava Araçları uygulamalarına uygun olduğunu ve büyük önem teşkil ettiğini belirtmiştir. Görüş hattı üzerinde güvenli bağlantı iyileştirmesi, otonom operasyonlar, görüş hattı ötesi için güvenli haberleşme, navigasyon, hatasız yer belirleme, yüksek kaliteli sensör işleme gibi farklı konulara ek olarak medya paylaşımı ve veri yükü durum güncellemelerini de inceleyen Qualcomm, düşük irtifalı platformlar üzerinde etkisi olabilecek komşu baz istasyonlarının sayısını belirleme, hücreden hücreye geçiş durumlarını optimize etme ve girişim etkilerini azaltma gibi çalışmalar yapmaktadır. Tüketici ve ticari dron kullanım örneklerinin bir bölümü Şekil 1.1'de verilmiştir [3].



Şekil 1.1 Tüketici ve ticari yönden dron kullanım örnekleri - Qualcomm [3]

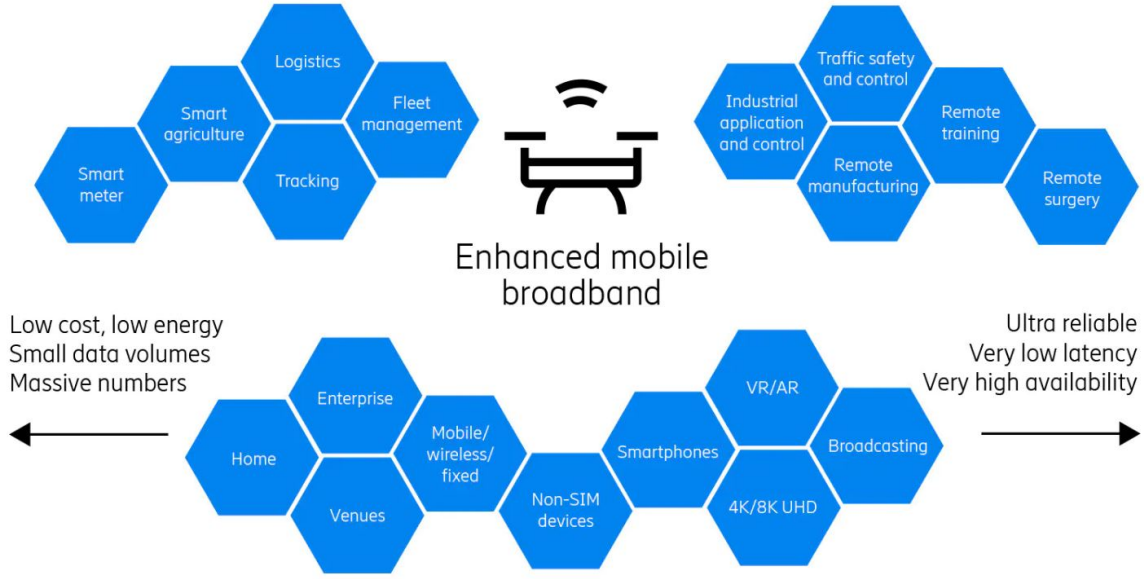
Nokia Digital Automation Cloud tarafından desteklenen Nokia Drone Networks; Nokia dronları, özel ve güvenli mobil geniş bant, bulut bağlantısı ve bir kontrol merkezinden oluşan uçtan uca akıllı bir sistem ile çözüm sunmaktadır. Bir dron filosunun komuta ve kontrol merkezinden yönlendirilmesi ile otomatikleştirilmiş bu sistem sayesinde dronlar özel ve yüksek kapasiteli bir mobil geniş bant ağı üzerinden bağlanarak, ağdaki tıkanıklıktan etkilenmemelerini ve gerektiğinde manuel olarak da çalıştırılabilmesini sağlamaktadır. Örneğin güvenlik ve ulaşım ile ilgili iş ihtiyaçlarını karşılamak, kamu güvenliği gibi kritik görevlerde operasyonları kolaylaştırmak için veri ve bilgi toplanmak, daha genelinde değerlendirecek olursak da tarım, inşaat, madencilik, sağlık, lojistik, telekomünikasyon

gibi belirli sektörlerde dron teknolojisinin kullanımı, insansız hava araçlarına kamera veya sensörler ekleyerek uygulama alanına göre şekillendirilebileceği söylenmektedir [4]. Çevre veya su kalitesini ölçmek, yağ veya buhar sızıntılarının tespiti için termal kameraları kullanmak, video gözetimi aracılığıyla arama-kurtarma operasyonları gerçekleştirmek, emniyet ve güvenliği sağlamak, özetle senaryolara göre hızlı aksiyon alabilmek Nokia Drone Networks çözümleri arasındadır. Akıllı Şehirler şeklinde adlandırılan yaşam alanlarında büyük rol oynayacak olan dronlar, gerçek zamanlı verilerin trafik yönetimini iyileştirebilir ve trafik sıkışıklığını azaltabilir. Buluttaki hızlı ve sağlam handover mekanizması, Nokia dronlarının uzun mesafeleri kat etmesini sağlayarak, dron çözümünü uygun maliyetli noktadan noktaya paket teslimatı için de ideal hale getirmektedir. Nokia Drone Networks altında yapılan çalışmaların bir bölümünü Şekil 1.2’de gösterilmiştir [4].



Şekil 1.2 Arama Kurtarma, Emniyet ve Güvenlik, Sanayi ve İnşaat - Nokia [4]

Ericsson, kendi uygulamalarında dron platformları için mobil ağların gerekli bağlantıyı sağlama yönünden çok uygun olduğunu belirtmiştir. Güvenilir hava iletişiminin mümkün olduğundan emin olmak için, karasal mobil ağların radyo bağlantı performansını ve mobil ağların dron operasyonları ve yönetimi için sağlayabileceği ek yetenekleri belirlemiştir. Dron teknolojisinin potansiyelinin gerçekten ortaya çıkabilmesi için teknolojik yeterliliklerin sağlanması, regülasyonların hazırlanması, görsel görüş alanının ötesinde özerk operasyona izin verilmesi gerekmektedir. Dron operasyonlarını güvenli bir şekilde genişletmek ve ticari uygulamalar için dron teknolojisinin potansiyelini ortaya çıkarmak için geniş alanlı güvenli kablosuz ağ bağlantısı gerekli olduğunu açıklamıştır. Yeni nesil haberleşme sistemlerinin bir parçası olacak dronlar, zamanla pilot uçuşundan otonom uçuşa, görüş hattı senaryolarından görüş hattı dışı senaryolara evrilecektir. İhtiyaca yönelik bir gruplama Şekil 1.3’te gösterilmiştir [5].



Şekil 1.3 Dronların önemli bir rol oynamasının beklendiği kullanım senaryoları - Ericsson [5]

İnsansız Hava Araçları'na olan ilginin artması nedeniyle, kontrol, uzaktan algılama, navigasyon, iletişim, konuşlandırılma gibi pek çok araştırma konusu son yıllarda tekrar gündeme gelmiştir.

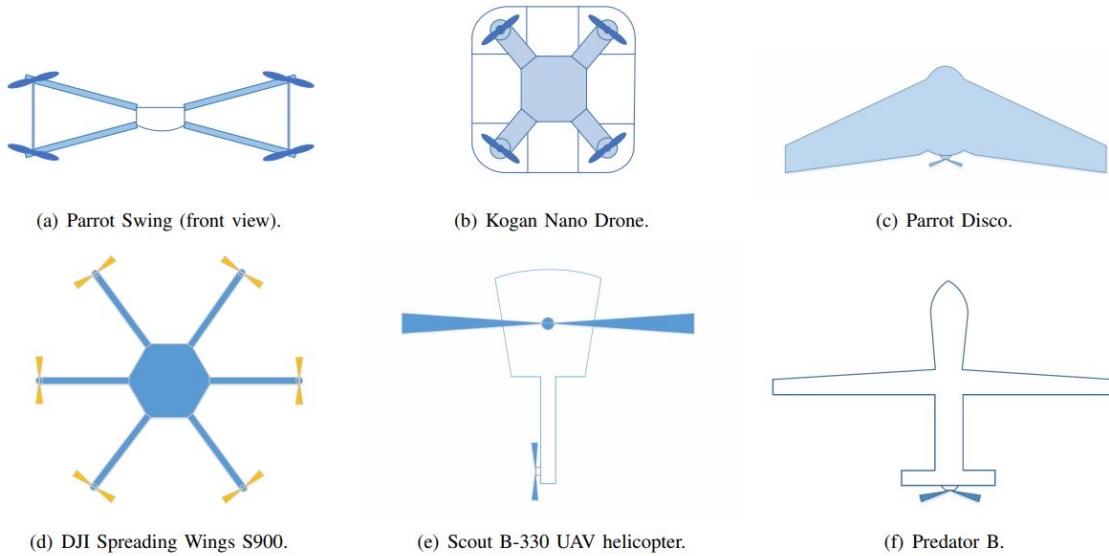
## 1.2. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması

Uzaktan kontrol edilebilen ve çok amaçlı işlevlere sahip insansız robot şeklinde genelleyebileceğimiz “İHA” ve “dron” terimleri, her türlü uçan platform için kullanılabilir. Yine de yapısal özelliklerine (örneğin, boyut, ağırlık, pil ömrü, sensörleri vb.) ve uçuş yeteneklerine (örneğin, irtifa, havada durma yeteneği, dönüş becerileri vb.) bağlı olarak farklı İHA gruplandırmaları yapılabilir. Uygulama bazında bile gruplama yapılabilirse dahi İHA'ları sınıflandırmanın en kolay yolu, uçuş irtifasına göre; alçak irtifa platformları (Low-Altitude-Platform LAP) ve yüksek irtifa platformları (High-Altitude-Platform HAP) olarak ikiye ayırmaktır [6].

Alçak irtifalı platformlar, genellikle onlarca metreden birkaç kilometreye kadar uçabilen, küçük boyutlu, hızlı hareket edebilen ve esnek hareket kabiliyeti olan (daha çevik) İHA'lardır. Örneğin, yakın dönemlerde ağırlıklı olarak son kullanıcı şeklinde değerlendirilen

İHA'lar, bir önceki bölümde anlatılmış olan senaryoların çoğunda alçak irtifalı platformlar arasındadır. Alçak irtifa platformlarındaki İHA'lara örnek verecek olursak, akla ilk gelen Parrot AR Drone ve DJI Phantom Drone serisidir ve Şekil 1.4'te verilmiştir [7]. FAA'ya göre alçak irtifalı platformların izinsiz uçmalarına izin verilecek maksimum irtifa 400 ft yani yaklaşık 120 metredir.

Alçak irtifa platformlarının aksine yüksek irtifa platformları; daha büyük, dayanıklılığı ve yük taşıma kapasitesi daha fazla olan, yarı-statik olarak değerlendirilen İHA'lardır. Yüksek irtifalı operasyonlar için kullanılır. Yarı-durağan yapıları nedeni ile günlerce, belki aylarca sürececek uzun vadeli görev amaçları için kullanılır. Karasal haberleşme sistemlerinin yetersiz kaldığı bölgelere, gökyüzünden yer yüzeyine geniş bir kapsama sunabilirler. Balonlar, zeplinler ve sabit kanatlılar şeklinde örnekleri mevcuttur. Yüksek irtifalı platformların batarya ve bakım ihtiyaçları, alçak irtifa platformlara kıyasla çok daha uzun ömürlüdür. Alçak irtifalı İHA'lar batarya problemleri nedeni ile gitgel yapma durumundadır [7].



Şekil 1.4 Kanat tiplerine göre İnsansız Hava Araçları [7]

### 1.3. Geçmişten Günümüze Kablosuz Haberleşme Teknolojileri

Hücreli Haberleşme Sistemleri kullanım senaryosuna göre efektif bant genişliği kullanımı olan, yüksek kullanıcı memnuniyeti sağlayan, efektif spektrum kullanımına sahip, kablolu



sistemlere nazaran kurulumu daha ucuz ve sürdürülebilirliği daha uzun olan, çok yüksek kullanıcı/abone sayılarında bile geniş kapsama alanı nedeniyle bağlantı kopma ihtimali düşük olan, tek radyo kanalından kullanıcıların aynı anda veri transferi yapabildiği, spektrum paylaşımı sağlayan, çoklu erişim teknikleri ile yüksek kapasiteye ulaşabilen sistemlerdir.

İnsansız Hava Araçları'nın dahil olacağı kablosuz haberleşme sistemlerini daha iyi anlayabilmek için haberleşme teknolojilerini dönemsel olarak incelemek gerekir. İHA'ların dahil olduğu bazı senaryolarda LTE-A ve öncesi teknolojilerin kullanımına ihtiyaç duyulabilir. Doğal afet durumunda bazı baz istasyonlarının çökmesi sonucu düşük veri boyutlarında ve veri hızlarında İHA uygulamalarının örnekleri görülecektir. Ayrıca heterojen bir ağ içinde kullanılacak olan İHA baz istasyonları karasal sistemleri daha iyi anlamayı zorunlu kılar. Geçmiş teknolojilerde kullanılan bant genişlikleri, frekans bantları, tanımlamaları ve protokolleri incelemek gerekir. Önümüzdeki birkaç sayfada, [8] numaralı referansta belirtildiği üzere, haberleşme teknolojilerinin yaşadığı evrimsel süreç, 5G teknolojisinin başlangıcına kadar detaylıca açıklamıştır. 5G ve ötesi uygulamalara yönelik de kısaca bilgi verilmiştir.

Hücre öncesi günlerde, bir mobil operatör aramaları ayarlar ve uygun olan birkaç kanaldan birini kullanmaktaydı. Modern hücreli mobil telefon teknolojisinin ataları olan mobil radyo telefon sistemleri, bazen 0G (0. jenerasyon) olarak adlandırılır. Analog cep telefonu standartları 1980'lerde birinci nesil kablosuz telefon teknolojisi/1G ile başlamıştır. Sesli arama yaklaşık 150MHz'teki bir taşıyıcı frekansına modüle edilmekte ve radyo kuleleri arasında iletilmekteydi. 1G sistemlerin eşsiz özelliği hücreli haberleşme sistemlerinde altıgen şeklinde konumlandırmanın ilk örneklerini içermesidir.

İkinci nesil (2G) mobil sistemler ilk olarak 1980'lerin sonunda tanıtılmıştır. GSM (Groupe Speciale Mobile-Global System for Mobile Communication) çalışmaları 1991 yılında başlamış olan, başlangıçta bir Avrupa sistemi olarak tasarlanmış ancak kullanımı küresel olarak yayılmış ve 2004 yılına kadar bir milyardan fazla kullanıcıya ulaşmış bir cep telefonu sistemidir. Amacı iki yönlüdür: iletim teknolojisini geliştirmek ve Avrupa'da birleşmiş bir

standart oluşturmak. GSM standardının uluslararası seviyede yayılmasının getirilerinden biri, abonelerine dünyanın bir çok yerinde telefonlarını kullanabilme imkanı sunmasıdır.

3G (Üçüncü Nesil Teknoloji), Uluslararası Mobil Telekomünikasyon programı, IMT-2000 kapsamındaki Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) standartlar ailesine dayanmaktadır. Teknolojisinin temel özelliği veri aktarım hızının daha yüksek olmasıdır. 3G teknolojilerinde, mobil televizyon, GPS (küresel konumlandırma sistemi) ve video konferans gibi katma değerli hizmetlerin kullanımı görülür. Yeni mobil geniş bant ağları 3GPP ve 3GPP2 şeklinde iki farklı 3G ailesi oluşturmuştur. Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi (3GPP), GSM'den türeyen 3G ağlarının dağıtımını teşvik etmek için 1998'de kurulmuştur. LTE Evolved UMTS Karasal Radyo Erişimi (E-UTRA), artırılmış bant genişliği, çoklu mobil uygulamalar ve dijital sinyallerin netliği için yeni bir soluktur. Bir çok multimedya servisinin çalışmasına yardımcı olarak mobil kullanıcılara daha gelişmiş hizmetler sunar. 3G teknolojisinin spektral verimliliği 2G teknolojilerinden çok daha iyidir.

Dördüncü Nesil Teknoloji (4G), 3G ve 2G ailelerinin halefidir. Wireless World Research Forum (WWRF), 4G'yi internet teknolojisi üzerinde çalışan ve Wi-Fi ve WiMax gibi diğer uygulamalarla birleştiren bir ağ olarak tanımlar. 3G'nin aksine, yeni 4G yapısının; kullanıcı deneyimli ve çoklu hizmet kapasitesini yeni seviyelere çıkartması ve buna ek olarak tüm mobil teknolojileri (örn. GSM, GPRS/IMT-2000, Wi-Fi, Bluetooth) içermesi hedeflenmektedir. ALL-IP'ye geçişin temel nedeni, bugüne kadar geliştirilen tüm teknolojiler için ortak bir platforma sahip olunması ve kullanıcıların beklentilerine uygun olmasıdır. 4G, "kullanıcının istediği herhangi bir hizmeti makul servis kalitesinde ve uygun fiyatla, her zaman, her yerde seçme özgürlüğüne ve esnekliğine sahip olmasını" amaçlar. 4G hizmetleri 2012'de başlamıştır ancak 2014-2015'te kitlesel pazar haline gelmiştir.

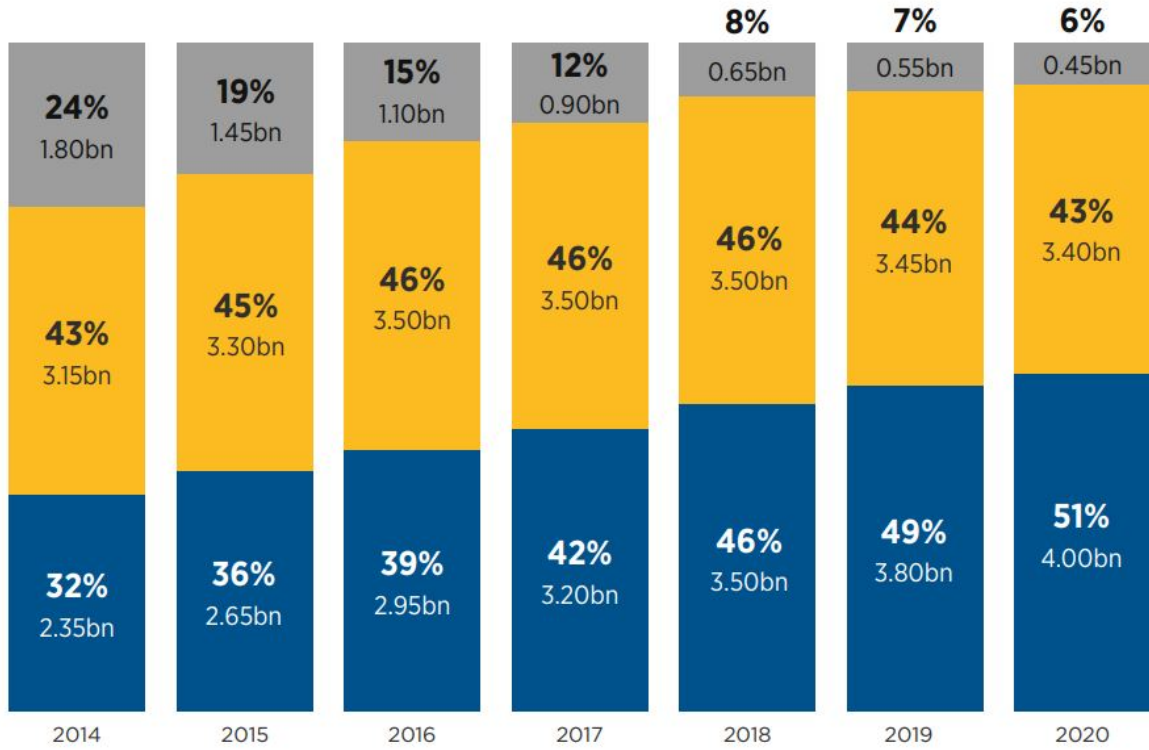
Mevcut nesiller ve beklenen 5G teknikleri arasındaki en büyük fark, artan veri hacminden farklı bir şey olmalıdır. Düşük pil tüketimi, hücre kenarlarında daha iyi kapsama, daha yüksek veri hızları, daha iyi bilişsel radyo güvenliği, düşük altyapı dağıtımı, ucuz trafik ücretleri diğer gereksinimler arasında verilebilir. 5G teknolojisi, halihazırda var olan iletişim altyapılarının çoğunu birbirine bağlayan ve tek bir evrensel cihazı kullanan, tüm olası

uygulamaların gerçekleştirilmesine olanak sağlayan yeni bir teknolojidir. Yazılım tanımlı radyo modülasyon şemalarına sahip olacaktır. 5G mobil ağları, farklı kablosuz teknolojilere eş zamanlı erişimesi gereken kullanıcı terminallerinin geliştirilmesine odaklanır. 5G teknolojisi 2015 yılında geliştirilmeye başlanmıştır. Mobilitede 1Gbps ve üzeri veri hızı hedeflenir. Dikey ve yatay olarak baz istasyonları ve hücreler arasında geçiş sağlamalıdır. 6 GHz altında 3.5 GHz, 6 GHz üzerinde ise 24.25 ve 27.5 GHz gibi frekans bantları kullanılabilir. FCC, 57-64 GHz arasında lisanssız çalışmalar için benzeri görülmemiş 7GHz'lik bir spektrum tahsis etmiştir [9]. 5G NR (Yeni Radyo), 5G (beşinci nesil) mobil ağ için 3GPP tarafından geliştirilen yeni bir radyo erişim teknolojisidir (RAT). 5G ağlarının hava arayüzü için küresel standart olarak tasarlanmıştır. Daha yüksek frekanslar için MIMO teknolojileri, iki ve üç boyutlu hüzme oluşturma (beamforming) teknikleri, İHA sistemleri ve akıllı yansıtıcı yüzeyler yeni nesil teknolojilerin önemli bir parçası olacaktır. Bu süreçte sistemlerin her jenerasyonda daha çok mobil veriye doğru kaydığı görülmektedir.

Haberleşme teknolojilerinin 0G'den 5G'ye kadarki evrimi daha detaylı bir şekilde [8]'de verilmiştir. Sadece ses sinyallerinin analog olarak modülasyonu yapıldıktan sonra iletiği zamanlardan, herkesin mobil veriye erişiminin mümkün olduğu, yüksek kapsamada ve kalitede çalışan sistemlerin kullanıldığı dönemlere gelmiştir. Günümüzde dünyanın büyük bir bölümü mobil veri kullanmaktadır. Bu sebeple yapılan tez çalışmasının ilk modeli, hücresel yapıdaki bir baz istasyonunun farklı şehir ortamlarındaki havaya sunduğu sinyal performansını incelemeyi hedeflemektedir.

Geçtiğimiz yıllar içerisinde mobil internet kullanımı çok daha kolay bir hale gelmesi sonucunda dünya nüfusunun yarısından fazlası mobil internet kullanmaya başlamıştır. Mobil internet kullanımındaki bu radikal artış 2023 yılının sonuna kadar bu şekilde devam ederse kişi başına düşen ortalama cihaz sayısı 3.6 olarak tahmin edilmektedir. GSMA (Global System for Mobile Communications) gözlemlerine göre mobil kapsama dışında kalan kişi sayısı 450 milyona düşmüştür. Dünyadaki mobil internet kullanım durumu mavi renkle, bulunduğu bölgede mobil geniş bant ağ erişimi olmasına rağmen mobil internet kullanımı olmama durumu sarı renkle, kapsama olmayan bölgeler ise gri renkle, Şekil 1.5'te verilmiştir [10]. 750den fazla operatörü ve yaklaşık 400 şirket için dünya genelinde mobil operatörlerin

çıkarlarını temsil eden GSMA raporlarında 5G alanına yatırım yapan yüzlerce operatör olduğunu belirtmiş. Dünyanın farklı yerlerinde 3GPP ile 5G hizmeti sunulmaya başlamıştır. Bunun sonucunda global 5G kapsamı yüzde on yediye yükselmiştir ve her geçen gün daha da yükselmektedir.



Şekil 1.5 Mobil internet kullanımı - GSMA [10]

Yeni nesil haberleşme sistemlerinde daha yüksek frekans bantlarının kullanımı nedeniyle engel yaratan objelere bağlı olarak yaşanılacak ek zayıflamalar, sistem hassasiyetini artıracaktır. Aynı sorun 5G'ye bağlı İHA'lar ve pek çok teknolojinin bir arada kullanılacağı 5G-6G sistemleri için de geçerlidir. Bu eksikliği kapatmak için daha küçük hücreler, yüksek yoğunluktaki ağlar, efektif görüş açılı haberleşme ve röleleme teknikleri kullanılabilir. Bu tür durumlarda özellikle farklı operasyonlarda görev alan (uçan baz istasyonları, acil-yardım dronu, görüntüleme ve koruma) gibi İHA uygulamaları için, daha farklı modellere ve akıllı çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. 5G'ye bağlı İHA'lar acil durumlarda yer ekipleri ile afet alanı arasında iletişimi kurmak için kullanılabilir. Yer ekipleri, dron cihazından gelen gerçek zamanlı bilgiye göre hareket edip, afet sırasında ve sonrasında özel kameralar ve

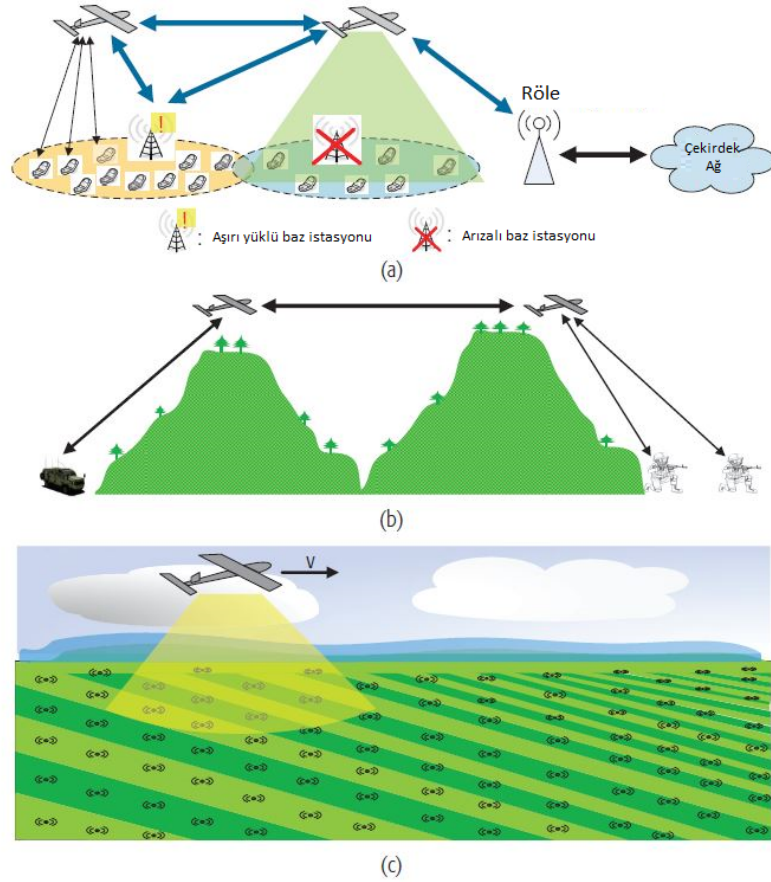
gerçek zamanlı görüntülerle arama kurtarma operasyonları da yürütülebilecektir. Özellikle acil durumlar için dron cihazlarının kullanılması, 5G'nin ne kadar kritik bir yere sahip olduğunu göstermektedir. İHA'lar ile dakikalar içerisinde olay yerine gelip, hızlı 360 derece görüntüler ile alan taraması yapılabilecek ve termal kameralar yardımı ile olay yerinde mahsur kalmış insanlar tespit edilebilecektir. Ayrıca, afet sonrasında oluşan zararın belirlenmesinde de İHA'lar kolaylık sağlayacaktır. Ormanlık alanlar gibi ulaşılması oldukça güç yerlerde kuş bakışı görüntü elde edilip, anında ilgili merkezlere bildirerek olası yangınlara da hızlı müdahale fırsatı elde edilebilecektir. 5G ile birlikte İHA'lar hayati öneme sahip durumlarda kullanılabilir, can ve mal kayıplarının önüne geçilebilecektir. Ayrıca vahşi yaşam alanlarının sürdürülebilmesi için bu alanlarda sürekli olarak görüntüleme yapılarak doğal alanların korunmasına ve gelecek nesillere aktarılabilmesinde çok büyük öneme sahip olacaktır [11]. Yeni nesil haberleşme teknolojilerinde kullanılacak olan İHA senaryoları için verilen örnekler, kanal modelleme teknikleri, yayılma mekanizması bir sonraki bölümde verilmiştir.

#### **1.4. Literatür Taraması**

Literatürde İnsansız Hava Araçlarına yönelik yapılan çalışmalar her geçen gün artış göstermektedir. Çarpışmadan kaçınma, komuta-kontrol ve uygulama verilerinin optimizasyonu, minimum enerji ihtiyacı ile optimal uçuş yüksekliklerinin ve rotalarının belirlenmesi, otonom sistemler, heterojen haberleşme ağları, dronun fiziksel yapısının etkileri gibi pek çok farklı başlıkta yapılan çalışmalar mevcuttur. Yeni nesil haberleşme sistemlerine geçerken İnsansız Hava Araçlarının günümüzde kullanılan sistemler ile heterojen bir yapıda çalışacağı, düşük irtifalı uygulamalarda dron destekli karasal haberleşme sistemlerinin dışında, alçak irtifalı platformların yer kullanıcıları ve yüksek irtifalı platformlar arasındaki bir katmanda bulunacağı tartışılmaz bir gerçektir.

Görüş hattı kurma ihtimalinin yüksek oluşu, üç boyutlu hareket esnekliği, manevra kabiliyeti göz önüne alındığında, yerden havaya, havadan havaya ve havadan yere haberleşme imkanı kolaylaştıran İnsansız Hava Araçları, yer kullanıcıları için baz istasyonlarının kapsama

alanını genişletebilir, ihtiyaç duyulan bölgelerde performansı yükseltebilir, cihazdan cihaza veri iletişimini kolaylaştırabilir.



Şekil 1.6 Üç genel İHA destekli Kablosuz Haberleşme Senaryosu: a)Kapsama Artışı; b)Röle; c)Veri gönderimi ve bilgi toplama [12]

Kablosuz ağların enerji kısıtları, geniş mobil ağlardaki girişim problemleri, karasal baz istasyonlarında bulunan antenlerinin yere dönük oluşu, İnsansız Hava Araçlarının dinamik yapısındaki avantajlardan tam olarak yararlanmamıza engel teşkil etmektedir. Standardizasyonlar sağlandıktan sonra, uygulama bazında hayatımıza entegre olacak olan İnsansız Hava Araçları, kablosuz haberleşme performansını arttırmak amacıyla hareketli baz istasyonu/röle olarak kullanılabilir.

İHA'lar için kablosuz iletişimde genel ağ mimarileri, Kontrol & Yük Dışı bağlantısı ve veri bağlantısı şeklinde iki tip veri bağlantısına ayrılır [12]. Kontrol & Yük Dışı

bağlantısı İHA sistemlerinin güvenli bir şekilde çalışması için aşırı önemlidir. Bir başka deyişle komuta-kontrol verileri İHA sistemi için kritik değer taşır. İleri derece güvenilir düşük gecikmeli ve iki yönlü iletişim, genellikle düşük veri hızı gereksinimleriyle İHA'lar arasındaki kritik bilgilerin paylaşımına ek olarak İHA ve yer kontrol istasyonları arasındaki veri alışverişi de bu bağlantılar tarafından desteklenmelidir. Ana Kontrol & Yük Dışı bağlantısında bilgi akışı genel olarak; yer kontrol istasyonundan İHA'lara komuta ve kontrol, İHA'lardan yere uçak durum raporu, İHA'lar arasında algıla ve kaçın bilgileri şekilde sınıflandırılabilir. Şekil 1.6'da üç farklı senaryo için örnek verilmiştir.

Gerçek zamanlı insan kontrolüne ihtiyaç duymayan otonom İHA'lar için bu bağlantılar çok önemlidir, çünkü acil durumlarda dışarıdan müdahale gerekebilir. Bu müdahalede Kontrol & Yük Dışı bağlantı yardımıyla yapılır [12].

Karasal ağların özellikleri değerlendirildiğinde, bu sistemlerde ağırlıklı olarak 2 boyutlu modeller kullanılır. Düşük görüş hattı olasılığı nedeniyle genellikle görüş hattı dışı iletişim teknikleri kullanılır. Kanal modeli daha statiktir, enerji kısıtlamaları bir sorun teşkil etmez ve mobilite etkileri farklı kullanım senaryoları için mevcuttur. İHA ağları için hazırlanan modeller ağırlıklı olarak 3 boyutludur, yüksek görüş hattı olasılığına sahiptir, İHA'nın hareketliliği nedeni ile daha dinamik kanal modelleri gerekmektedir, enerji kısıtlamaları vardır ve mobilite etkileri hala araştırma konuları arasındadır.

Kablosuz iletişim sistemlerinde teknik zorluklardan en dikkat çekici olanlarıysa, çok yönlü yayılım durumu yani, gönderilen sinyalinin alıcıya farklı yollarla ulaşabileceği gerçeği (örneğin, binalardan veya dağlardan yansımalar), spektrum sınırlamaları, enerji sınırlamaları ve kullanıcı hareketliliğidir.

Kablosuz iletişim için iletim ortamı, vericiler arasındaki radyo kanalüdür. Verici ve alıcı arasındaki sinyaller, bir dizi farklı yayılma yoluyla ilerleyebilir. Bazı durumlarda bu sinyaller Görüş Hattı (LOS) bağlantısıyla iletilirken, görüş hattının mümkün olmadığı durumlarda yansıma, kırınım ve saçılma yolları ile iletilir. Alıcı-verici arasında çeşitli boyutlarda ve sayılarda objeler olabilir. Dış ortamlar için bu objeler binalar, pencereler, çatılar, duvarlar, yollar, dağlar, denizler vb. iken, iç ortamlarda duvarlar, masalar, insanlar şeklinde olabilir.

Bu nedenle olası yayılma yollarının sayısı çok fazladır. Bu yolların her birinin ayrı bir genliği, gecikmesi (sinyalin ulaşma süresi) ve yönü vardır. Her bir çoklu yol bileşeni birbirlerine göre faz farklılıkları gösterebilir. Bu faz farklılıkları alıcı tarafında toplanırken yapıcı veya yıkıcı etkiler ile sonuçlanarak sistem performansını etkileyebilir [13, 14].

Gerçek hayatta çoklu yolların hepsini birebir ölçmek imkansızdır. Çünkü verici, alıcı ve engel yaratan objeler hareketli olabilir. Hareketli bir alıcı, vericinin doğrudan görüş hattında olabilirken, başka bir anda etkileşim yaratan objenin gölgesinde kalabilir.

Etkileşime uğrayan sinyaller ile doğrudan alıcıya ulaşan sinyalleri karakterize ederken, bu sinyallerin yaşadığı zayıflamalar şu şekilde açıklanabilir. Yol kaybı, sinyalin vericiden alıcıya ulaşırken kat ettiği mesafeye bağlı olan yaşadığı kayıpları gösterir ve genellikle belirli bir gönderme-alma mesafesinde yol kaybının aynı olduğunu varsayar. Alıcı-Verici arasındaki objeler nedeniyle soğurma, yansıma, kırılma, saçılma gibi olayların yarattığı zayıflamalar da, gölgeleme kaybı olarak adlandırılabilir.

Alıcı tarafından alınan sinyalin gücündeki değişim; uzak mesafelerde yol kaybı etkilerini gösterirken; daha yakın mesafelerde verici-alıcı arasında bulunan objelerin ya da küçük mesafeli hareketlerin etkisini gösterir. Yol kaybı ve gölgeleme nedeniyle alıcı tarafından alınan güçteki değişiklikler nispeten büyük mesafelerde olduğu için, bu varyasyonlar bazen büyük ölçekli yayılma etkileri olarak adlandırılır. Yapıcı ve yıkıcı ekleme nedeniyle çok yollu sinyal bileşenlerinin yarattığı varyasyonlar ise çok kısa mesafelerde meydana gelir. Bu kısa mesafeler sinyalin dalga boyuyla orantılı olduğundan dolayı, bu etkiler küçük ölçekli yayılma olarak adlandırılır [13, 14].





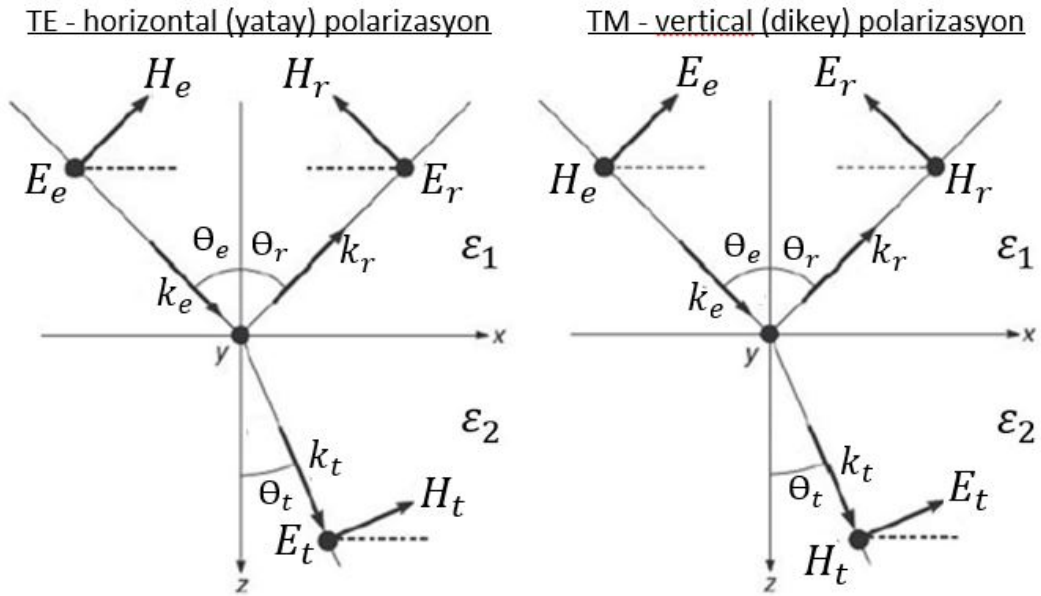
Şekil 1.7 Mesafeye bağlı yol kaybı, gölgeleme, çok yollu sinyallerin etkileri [14]

Radyo sinyalleri elektromanyetik dalgalar ve bu sinyalleri modellerken yayılma mekanizmalarını ve sistemi doğru bir şekilde anlamalıyız. Sistemlerde kullanılan antenlerin yönlü antenler olması nedeni ile bir sinyalin çıkış ve varış açılarına bağlı olarak anten kazançları değişkenlik gösterir. Sinyalin iletiği ortamın ve ortamda bulunan objelerin elektromanyetik özellikleri, gönderilen sinyallerin alıcıya ulaşana kadar yaşadığı etkileşimleri, alıcıya ulaşan çoklu yol sinyallerinin sayısını ve bu sinyallerin alıcıya varana kadar geçirdiği toplam etkileşim sayısını bilmek neredeyse imkansızdır. Yine de, teorik olarak bazı yaklaşımları, bilgisayar destekli modelleri ve saha ölçümlerini kullanarak verici-alıcı arasındaki kanalı modelleyebiliriz.

Elektromanyetik dalgaların temel yayılma mekanizmalarına baktığımızda akla ilk gelen boş-alan yayılımıdır. Bu tür bir yayılda verici-alıcı arasında herhangi bir engelin bulunmadığı ve gönderilen sinyalin alıcıya en kısa yoldan ulaştığı kabul edilir. Gerçek hayattaysa çoğunlukla etkileşim olasılığı bulunan, dielektrik ve iletken engeller mevcuttur. Bu objeler pürüzsüz bir yüzeye sahipse, gelen dalgaları yansıtılır ve yüzey gelen sinyalin enerjisinin bir kısmını soğurur, başka bir deyişle gelen sinyal bir bölümü objenin içine iletilir. Yüzeyler pürüzlüyse, yansıyan sinyal daha dağınık bir şekilde saçılır. Son olarak sinyaller bu objelerin kenarlarında gelirse kırınım gerçekleşebilir. Bu tip yayılma mekanizmalarının, alıcı tarafına ulaşan sinyalin gücünde ve fazında değişimler yaratır.

Yansıma ve iletim mekanizmaları, yüzeye gelen sinyalin yüzey normali ile yaptığı geliş açısına, sinyalin geldiği ortamın ve yansıtıcı objenin elektriksel karakteristiğine (dielektrik katsayıları ve iletkenliklerine) bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yansıma ve iletim katsayıları da gelen sinyalin ne kadarının yansıtacağını ve iletileceğini modellerken kullanılır. Yansıma ve iletim mekanizmaları sayesinde baz istasyonundan gelen sinyallerin ne kadarının yansıdığını (ör. yerden, duvardan, çatıdan vb.), ne kadarının etkileşim noktasından objenin içine doğru iletildiği incelenebilir.

Bu iki durum için yansıma ve iletim katsayıları hesaplanırken polarizasyon durumuna göre Denklemler (1)-(5) kullanılır [13], katsayıların genliği ve fazları değişkenlik gösterir. Gelen sinyalin Elektrik Alan bileşeninin etkileşim yüzeyine dik olduğu (Manyetik Alan bileşeninin etkileşim yüzeyine paralel olduğu) durumlara Transversal Magnetic (TM) - vertical (dikey) polarizasyon durumu, Elektrik Alan bileşenini etkileşim yüzeyine paralel olduğu durumlara da Transversal Electric (TE) - horizontal (yatay) polarizasyon durumu denir. Şekil 1.8 TE ve TM polarizasyona göre gelen sinyalin yansıyan ve iletilen sinyallere ayrılma durumunu gösterir [13, 14].



Şekil 1.8 TE ve TM polarizasyon Yansıma ve İletim [13]

Matematiksel olarak yansıma ve iletim katsayıları hesaplanırken, gelen sinyalin yüzey normali ile yaptığı açının ( $\theta_e$ ), yansıyan sinyalin yüzey normali ile yaptığı açıyla ( $\theta_r$ ) eşit olduğu Snell Yasası'na göre kabul edilir.  $k_e$ ,  $k_r$ ,  $k_t$  sırasıyla gelen, yansıyan, iletilen sinyallerin yön vektörleridir. Yansıma yüzeyine geliş açısı ( $\theta_e$ ) ve yansıma yüzeyinin ayırdığı 2 farklı bölgenin dielektrik sabitlerinin oranına göre iletilen sinyalin açısı ( $\theta_t$ ) Denklem (1)'de gösterildiği şekilde bulunur.  $\theta_e$ ,  $\theta_t$  ve materyallerin dielektrik sabitleri kullanılarak TM ve TE polarizasyonları için yansıma ve iletim katsayıları Denklemler (2)-(5) kullanılarak hesaplanabilir.  $\Gamma_{TM}$ ,  $T_{TM}$  TM polarizasyon için yansıma ve iletim katsayılarıdır.  $\Gamma_{TE}$ ,  $T_{TE}$  TE polarizasyon için yansıma ve iletim katsayılarını ifade eder [13]. Bazı özel durumlarda (TM polarizasyon için) yansımanın gerçekleşmediğini (Brewster açısı) ve yansıma katsayısının büyüklüğünün 0 (veya 0'a çok yakın) olduğu görülebilir [13]. Materyallerin elektromanyetik özellikleri değişkenlik gösterir ve bunun sonucunda değişken dielektrik sabitlerinin sanal kısımlarının gerçel kısımlarına oranı, o materyeller için kayıp faktörünü verir. Mobil iletişimde karşılaşılan çoğu yüzey için kayıp faktörleri birden daha küçüktür [15].

$$\frac{\sin\theta_t}{\sin\theta_e} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2}\cos(\theta_e) - \sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_t)}{\sqrt{\varepsilon_2}\cos(\theta_e) + \sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_t)} \quad (2)$$

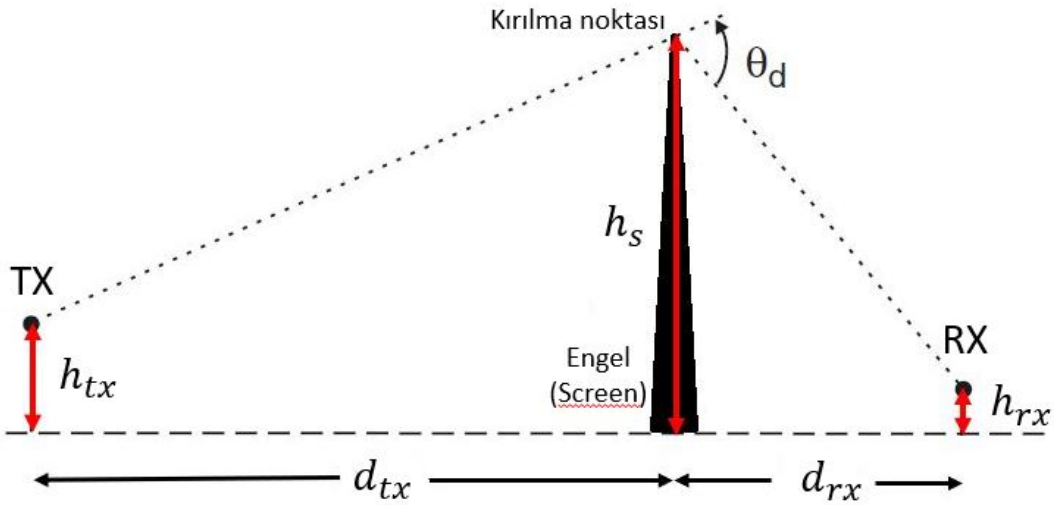
$$T_{TM} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_e)}{\sqrt{\varepsilon_2}\cos(\theta_e) + \sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_t)} \quad (3)$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_e) - \sqrt{\varepsilon_2}\cos(\theta_t)}{\sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_e) + \sqrt{\varepsilon_2}\cos(\theta_t)} \quad (4)$$

$$T_{TE} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_e)}{\sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_e) + \sqrt{\varepsilon_2}\cos(\theta_t)} \quad (5)$$

Kırınım yaratan objelerin boyutları ve şekilleri farklılık gösterebilir. Bu tür durumlarda objelerin arkasında oluşan gölge bölgesi, keskin bir şekilde görünmeyecektir. Kırınım yaratan objeler düzgün şekilli olsa bile, elektromanyetik sinyaller için objelerin yarattığı gölge, bir ışığın yarattığı mükemmel gölge şeklinde olmayacaktır. Kırılma mekanizması için birbirinden farklı modeller mevcuttur. Kırınım problemini anlayabileceğimiz en basit senaryo, homojen bir düzlem-dalganın (plane-wave), yarı-sonsuz düz bir engele etkileşimiyle gösterilmiştir. Huygen prensibi dalga-cephesindeki (wavefront) her bir noktayı, küresel-dalgaların kaynağı olarak açıklamıştır. Normal şartlarda bu küresel-dalgaların süperpozisyonu (toplamı) yeni bir düzlem-dalga verecektir. Fakat yarı-sonsuz bir engel bu noktaların bir bölümünü elimine ettiği için kırılan dalganın artık düzlem-dalga şeklinde olmayacağını göstermiştir. Gelen dalganın elektrik alanını  $exp(-jk_0x)$  olarak ifade edersek kırılma sonucunda elde edilen toplam elektrik alan Denklem (6) şeklinde ifade edilebilir [13].  $v_f$  Fresnel parametresi ve  $F(v_f)$  Fresnel integralidir. Fresnel parametrelerinin hesaplanması için kullanılan geometrik yapı Şekil 1.9’da gösterilmiştir.

$$E_{toplam} = exp(-jk_0x) \left( \frac{1}{2} - \frac{exp(j\pi/4)}{\sqrt{2}} F(v_f) \right) \quad (6)$$



Şekil 1.9 Kırılma mekanizması [13]

$$\theta_d = \arctan\left(\frac{h_s - h_{tx}}{d_{tx}}\right) + \arctan\left(\frac{h_s - h_{rx}}{d_{rx}}\right) \quad (7)$$

$$v_f = \theta_d \sqrt{\frac{2d_{tx}d_{rx}}{\lambda(d_{tx} + d_{rx})}} \quad (8)$$

$$F(v_f) = \int_0^{v_f} \exp\left(-j\pi \frac{t^2}{2}\right) dt \quad (9)$$

Kırılma sonucunda gerçekleşen zayıflamayı bulmak için, ilk önce kırılma açısı ( $\theta_d$ ) Denklem (7) kullanılarak bulunur. Fresnel parametresi bu açığa, verici ve alıcının engele olan 2 boyutlu uzaklıklarına ( $d_{tx}$ ,  $d_{rx}$ ) ve verici-engel-alıcı yüksekliklerine ( $h_{tx}$ ,  $h_s$ ,  $h_{rx}$ ) bağlıdır ve Denklem (8) yardımıyla hesaplanır. Bu parametre kullanılarak tek engel için Fresnel integrali Denklem (9)'da gösterildiği şekilde hesaplanır. Ayrıca, ortaya çıkan kırınım kaybını genellikle kapalı formda bulamayız. Görüş hattı yol kaybına göreceli olarak bıçak-ucu kırınım yolu kaybı yaklaşık olarak bulunabilir. Denklemler (6)-(9)'da verilen sonuç, gelen dalganın elektrik alanının polarizasyon etkilerinin ihmal edildiği bir yaklaşımdır. [13, 14, 16].

Verici-alıcı arasındaki engel yaratan obje sayısı birden çok olduğu durumlarda ise kırılma mekanizması farklı yollar ile modellenenabilir. Bullington yöntemi, verici-aracı arasındaki tüm binaların yüksekliklerini kullanarak, her bir binanın degeceği eğriler çizer ve bu binalara eşdeğer yeni bir engel tanımlar. Bina sayısı artıkça yüksekliği artan bu engel, kırınım kaybı hesaplanırken yüksek hata payına sahiptir. Epstein–Petersen yöntemi aradaki binaları sıralı bir şekilde değerlendirir, doğruluğu yetersiz olan Bullington metoduna kıyasla daha iyi sonuçlar verse de aradaki binaların boyları değişken olduğu için bu metod da hatalı sonuçlar çıkartabilir. Deygout yöntemi, Epstein–Petersen yönteminin yinelemeli şekilde çalışan iyileştirilmiş bir versiyonu olarak özetlenebilir. Aradaki binalardan maksimum kırınım kaybını yaratan bina bulunduktan sonra, diğer binaların bu bina üzerine yarattığı ek kırınım etkisini hesaplar. Bu kırınım yöntemlerinin detaylı gösterimleri [13]'te bulunabilir.

Kırınım kaybı için ampirik ve deterministik yöntemler bir arada kullanılarak daha gerçekçi modeller de elde edilebilir. [13, 14, 16].

Kablosuz sistemlerin tasarımı, testi ve planlaması için yayılım modellerine ihtiyacımız vardır. Önceki bölümlerde kablosuz kanallarda çoklu yol bileşenlerinin bazı temel özelliklerinden, yaşayabilecekleri etkileşimlerden ve nasıl tanımlanabileceklerden bahsetmiştik. Bu özellikler farklı yollar yardımıyla daha somut bir şekilde açıklanabilir ve genel simülasyon modellerine dönüştürülerek parametrelendirilebilir. Bu yöntemler açıklandıktan sonra kabul görmüş farklı kanal modellerinden ve literatürde yapılan farklı çalışmalardan bahsedeceğiz. Yayılma kanallarının bazı özellikleri, sistem performansına ışık tutar. Eğer kapalı formda hazırlanmış denklemlere ulaşabilirsek, lokasyon farketmeksizin bu denklemler doğrultusunda sistem performansını inceleyebiliriz. Buna ek olarak kablosuz ağ tasarım mühendisleri, bir sistemi belirli bir coğrafi bölgeye göre optimize etmekle ilgilenirler. Yeni bir sistem kurmak veya kullanılan sistemi değiştirmek pahalı bir iş olduğu için, bu optimizasyon işlemi saha testleri ve deneme yanılma yoluyla değil bilgisayar yardımıyla yapılabilir. Coğrafi bölgenin özelliklerine göre optimize edildiği için, bu tür modeller bölgeden bölgeye değişkenlik gösterir ve her yerde aynı performansla çalışmaz. Kanal modellemesi için kullanılan yöntemler üçe ayrılır [13].

Depolanmış kanal darbe yanıtları: bir channel sounder ölçer, sayısallaştırır ve dürtü yanıtlarını  $h(t, \tau)$  depolar. Elde edilen dürtü tepkilerinin en avantajlı tarafı gerçekçi olmasıdır. Ayrıca, veriler süresiz olarak yeniden kullanılabilirdiği için, depolanan verileri kullanan sistemler için farklı simülasyonlar tekrarlanabilir. Dürtü yanıtının zaman içerisinde sabit kalacağına garanti olmadığı için gelecekte sahanın değişmesi gibi durumlar için saha denemelerinde önemli bir ayırım yaratır. Depolanmış impuls yanıtlarını kullanmanın dezavantajlarıysa veriyi elde etme ve saklamadaki büyük çabaya ek olarak verilerin yalnızca belirli bir alanı karakterize etmesidir. Genel bir yayılma modeli için uygun olmayabilir [13].

Deterministik kanal modelleri: Bu modeller, Maxwell denkleminin deterministik bir çözümü veya bunun bir yaklaşıklığı için bir veri tabanından alınan coğrafi ve morfolojik bilgileri kullanır. Belirli bir coğrafi konumda dürtü yanıtını matematiksel olarak belirlemek

depolanmış dürtü yanıtlarıyla aynı felsefeye dayanır. Bu nedenle bu yöntemlerin her ikisi de genellikle sahaya özgü modeller olarak kabul edilir. Depolanmış (ölçülen) dürtü yanıtları ile karşılaştırıldığında deterministik (hesaplanmış) kanal modellerinin dezavantajları şunlardır: Büyük hesaplama yükü ve temel alınan veri tabanlarında hata ihtimalleri ve sayısal hesaplama yöntemlerinin yaklaşık doğası nedeniyle sonuçlar hata oranlarına sahip olabilir. Ana avantajı, bilgisayar simülasyonlarının ölçüm senaryolarından daha kolay gerçekleştirilmesidir. Ayrıca, belirli türdeki hesaplama yöntemleri (örneğin, ışın izleme) farklı yayılma mekanizmalarının etkilerinin ayrıca incelenebilmesine olanak sağlar [13].

Stokastik kanal modelleri: Bunlar, kanal dürtü yanıtının (veya eşdeğer fonksiyonların) olasılıksal yoğunluk fonksiyonunu (pdf) modeller. Bu yöntemler, belirli bir konumdaki dürtü yanıtını doğru bir şekilde tahmin etmeye çalışmaz, daha ziyade geniş bir alan üzerinde pdf'yi tahmin etmeye çalışır. Bu yaklaşımın en basit örneği Rayleigh ve Rician sönmüleme modelidir. Stokastik geniş bant modelleri de aynı yaklaşımla oluşturulabilir. Genel olarak konuşursak, stokastik modeller daha çok sistemlerin tasarımı ve karşılaştırılması için kullanılırken, sahaya özel modeller ağ planlaması ve sistem dağıtımı için tercih edilir. Ayrıca, bir modelin verimliliğini artırmak için deterministik ve stokastik yaklaşımlar birleştirilebilir: Örneğin, bir ortalama alan içindeki varyasyonlar stokastik olarak modellenirken, deterministik modellerden büyük ölçekli ortalama güç hesaplamaları için kullanılabilir. Yukarıdaki modellerin hiçbirinin mükemmel doğruluk sağlayamayacağı açıktır. “Tatmin edici doğruluk” için bir kriter oluşturmak bu nedenle önemlidir. Tamamen bilimsel bir bakış açısından bakarsak, herhangi bir yanlışlık tatmin edici değildir. Ancak mühendislik açısından bakıldığında, modelleme doğruluğunu (ve dolayısıyla çabayı) belirli bir noktanın ötesinde artırmanın bir anlamı yoktur [13].

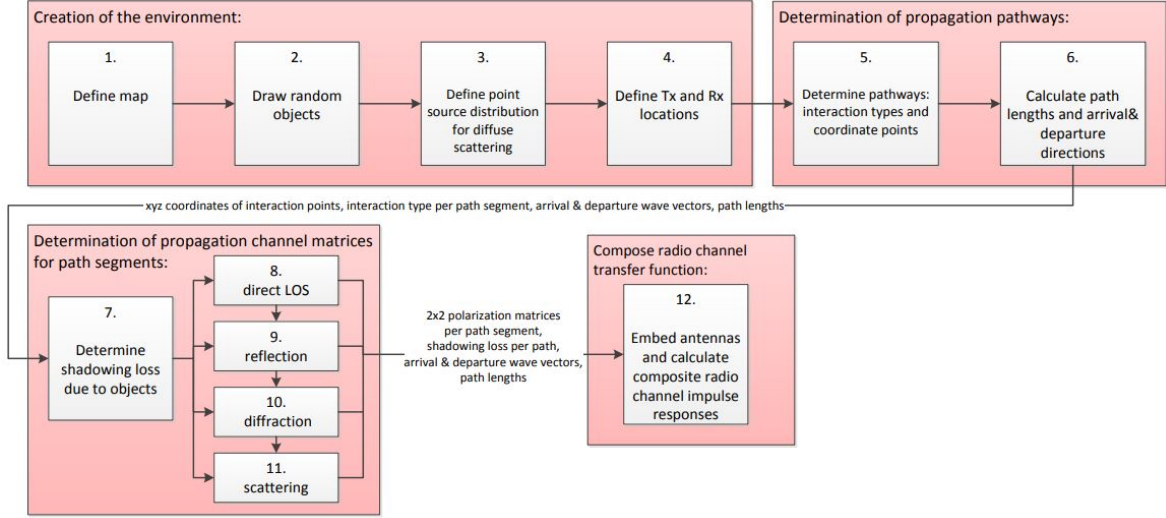
Deterministik modelleme yöntemleri için temel veri tabanlarındaki yanlışlıklar, kaçınılmaz hatalara yol açar. Bundan dolayı saha olabildiğince detaylı modellenmelidir. Ölçümlerden türetilen stokastik modeller için, temel alınan ölçüm noktalarının sonlu sayısı ve ölçüm hataları, olası doğruluğu sınırlar. İdeal olarak, belirli bir modelleme yönteminden kaynaklanan hatalar, bu kaçınılmaz yanlışlıklar nedeniyle oluşan hatalardan daha küçük

olmalıdır. Modelleme doğruluğuna ilişkin gereksinimler, aşağıdaki pragmatik kriterle daha da gevşetilebilir: modeldeki yanlışlıklar, bir sistem tasarımı veya dağıtım planını “önemli ölçüde” değiştirmemelidir. Bu tanım için sistem tasarımcısının “önemli”nin ne olduğunu belirlemesi gerekir.

3GPP ve 3GPP dışında kalan üçüncü partiler tarafından gerçekleştirilen kanal modelleme çalışmaları, 2014 yılından beri devam eden [17] teknik raporunda, yüksek frekanslarda mevcut bilgilerin durumunun/beklentisinin belirlenmesini, spektrum tahsisini, ilgilenilen senaryoları, ölçümleri ve 100 GHz’e kadar kullanılacak farklı frekans bantları için kanal modeli/modellerini içerir. METIS (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society), MiWEBA (Millimetre-Wave Evolution for Backhaul and Access), ITU-R M, COST2100, IEEE 802.11, NYU WIRELESS: disiplinlerarası akademik araştırma merkezi, Fraunhofer HHI tarafından QuaDRiGa kanal modeli gibi üçüncü partilerin kanal modelleri, dökümanın içinde kısaca açıklanmıştır.

METIS Kanal Modelleri’nde belirlenen 5G gereksinimlerine; geniş frekans aralığı, yüksek bant genişliği, masif MIMO, 3-D ve doğru polarizasyon modellemesi örnek olarak verilebilir, D1.4 numaralı dökümanlarında her yönden daha detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Gereksinimler doğrultusunda 2 GHz ile 60 GHz arasındaki çeşitli bantlarda kanal ölçümleri yapılmıştır ve sağlanan farklı kanal modeli metodolojileri (harita tabanlı model, stokastik model veya hibrit model) kullanılmıştır. Stokastik model için önerilen kanal, açık meydan, kapalı kafeterya ve kapalı alışveriş merkezi senaryolarına odaklanmıştır [18].





Şekil 1.10 METIS harita-tabanlı modeli için verilmiş blok diyagramı [18]

METIS, harita-tabanlı kanal modeli oluşturmak için izlenmesi gereken yolu özet bir şekilde [18] dökümanında paylaşmıştır. Haritanın tanımlanması, rastgele objelerin yerleştirilmesi, kırınım ve saçılma noktalarının tanımlanması, verici ve alıcıların konumlandırılması simülasyon ortamını yaratırken yapılmalıdır. Çoklu-yol bileşenleri için sinyallerin izleyeceği yolların ve etkileşime uğradığı noktaların belirlenmesi, sinyallerin aldığı yolların, çıkış ve geliş açılarının belirlenmesi; yayılım yollarına karar verirken yapılır. Çoklu yollar için kanal matrisleri oluşturulurken, objelerden dolayı oluşan gölgeleme kayıpları belirlendikten sonra görüş hattı, yansımalar, kırınımlar ve saçılmalar için çoklu yol bileşenleri gruplandırılır. Anten kazançları eklendikten sonra radyo kanalının dürtü-tepkisi elde edilir.

MiWEBA Kanal Modelleri gölgeleme, uzamsal tutarlılık, çevre dinamikleri, küresel dalga modelleme, çift hareketli Doppler modeli, dağınık ve aynasal yansımalar arasındaki oran gibi çeşitli zorluklara değinmiştir. Önerilen yarı-deteministik kanal modeli, 60 GHz'de kanal ölçümleri ile incelenmiş, Üniversite kampüsü, sokak kanyonu, otel lobisi, backhaul ve D2D senaryolarına odaklanmıştır [17].

ITU-R M Kanal Modelleri mmW'de yayılma kaybı ve atmosferik kaybı ele almıştır. Etkinleştirilen(enabling) anten dizisi teknolojisini ve yarı iletken teknolojisini tanıtmıştır. Yüksek veri hızlı hizmet için yoğun kentsel ortama odaklanmışlardır. İç mekan alışveriş

merkezi, iç mekan işletmesi, evde, meydana/sokakta kentsel erişim noktasında, şehirde mobilite olarak farklı senaryolar değerlendirilmiştir [19].

COST2100 and COST IC1004 Kanal Modelleri, geometri tabanlı stokastik kanal modelleridir ve MIMO kanallarının zaman, frekans ve uzayda stokastik özelliklerini yeniden üretir. Küme-seviyeli(Cluster-level) bir modeldir. Büyük-ölçekli parametrelerin istatistikleri, her kanal örneğinde her zaman garanti edilir [17].

NYU WIRELESS Kanal Modelleri, 28/38/60/73 GHz bantlarında hem dış hem de iç kanallar için birçok kentsel yayılım ölçümü yapılmış olup, ölçümler devam etmektedir. 5G mmW kanal modellemesi için 3GPP'ye bir uzantı olarak 3 bölge önermiştir. Görüş hattında olma/olmama ve engellenme durumlarının modellenmesi, geniş bant güç profilleri, fiziksel tabanlı yol kaybı modeli, tüm farklı taraflar, senaryolar ve frekanslar arasında standart ve istikrarlı bir "üstel yol kaybı parametresi" tanımını amaçlar. Frekans, bant genişliği, senaryo, simulasyon ortamının özelliği (ör. görüş hattı durumu), alıcı-verici arası mesafelerin alt üst limitleri, çıkış gücü, barometrik basınç, nem, sıcaklık, yağmur oranı, polarizasyon, verici ve alıcı anten tipleri, antenlerdeki eleman sayısı, anten elemanları arası mesafe, antenlerin dikeyde ve yatayda yarı güç hüzmeye genişlikleri gibi parametrelerin tanımlanabildiği, MATLAB destekli çalışan, açık erişimi bulunan, güncel teknolojileri de modelleyebildiğimiz simulasyon uygulamaları, bahsedilen incelemelerin kullanıcı dostu bir şekilde yapılmasını sağlar [20].

Havadan yere (İHA'dan yer kullanıcılarına), yerden havaya (karasal sistemlerden İHA'lara) ve havadan havaya (birden fazla İHA'lar arası) kablosuz kanallar, geleneksel karasal kanal modellerinden önemli ölçüde farklı olabilir ve bu tür kanallar için yapılan saha ölçümleri ve oluşturulacak kanal modelleri günümüzde hala büyük önem taşımaktadır. İHA sistemlerinden yararlanan tam teşekküllü kablosuz hücresel ağ yapısına ulaşmak için üstesinden gelmesi gereken zorluklar hala araştırma konuları arasındadır.

Son yıllarda, İHA tabanlı bu iletişim konularına yönelik hem akademik hem de endüstriyel ilginin artması, yeni nesil sistemlerde dron iletişiminin öneminin ve ihtiyacının bir göstergesi olarak dronların Sürüm 17 ile resmi olarak 3GPP standartlarına girmesiyle sonuçlanmıştır

[21, 22]. Dronların gelişmiş özellikleri sayesinde mobil ve kablosuz iletişim alanında faydalı çözümler sunabildiğinden, dronlar acil durum ve afet zamanlarında mevcut bir karasal baz istasyonunun bir şekilde hizmet dışı kalması gibi kritik görevlerde kullanılabilirliğinden bahsetmiştik. Bir kapsama alanı oluşturmak veya ek kapasite sağlamak ve o alandaki trafik yoğunluğunu azaltmak için talep üzerine uçan bir baz istasyonu, hızlı bir şekilde devreye girebilir. Ayrıca, özellikle esnek hareket, konuşlanma ve yörünge hareketliliği gibi önemli avantajları ile bu hava araçları, mm-Dalga iletişimde uçan anten, IoT iletişimi, hücresel ağ bağlantılı uçan kullanıcı ekipmanı, uçan geçici ağlar, karasal ağlar için uçan ana taşıyıcı/röle görevlerinde çalışabilir ve akıllı şehirlerde kullanılabilir [12].

İnsansız Hava Araçlarını farklı kılan en önemli özellik ise üç boyutlu hareket edebilme ve keskin manevra becerileridir. Engellerden kaçınma, optimal rotayı bulma, uygulama bazında uçuş özelliklerine yönelik minimum enerji ihtiyacının tespiti, bu cihazların ihtiyaç duyacağı komuta-kontrol ve uygulama verilerinin trafik yönetimi gibi birden çok araştırma konusu ortaya çıkmıştır.

Dron iletişimi kapsamında faydalı yük iletişimi ve komuta kontrol iletişiminden de bahsedilmelidir. Payload iletimi için video aktarımı, sensör veri aktarımı (yüksek veri aktarım hızları gerektiren) gibi örnekler verilebilir. Otonom uçuş veya fiziksel görüş mesafesi ötesi pilot kontrollü uygulamalar için dronun uzaktan kontrolü için komuta ve kontrol verileri ve telemetri verileri gereklidir. Bu tür operasyonların gerçekleştirebilmesi için, daha düşük veri aktarım hızları yeterliyken, ultra yüksek güvenilirlik ve düşük gecikme süresi bir gerekliliktir [23].

İHA'ların ve aynı ağdaki karasal kullanıcıların mobilite ve farklı iletişim gereksinimlerinden dolayı ortaya bazı zorluklar çıkar. Dronların karasal LTE ağlarında, özellikle kentsel, banliyö, kırsal vb. gibi farklı ortamlarda kullanımını, bu senaryolarda irtifa değişiminin etkileri önemlidir [24].

İHA'larda güvenilir haberleşme sağlayabilmek için, özellikle 5G sistemlerde Komuta-Kontrol verileri uygulama verilerinden ağ dilimleme (network slicing) yöntemi kullanılarak ayrılabilir. Yazarlar, 5G test alanında dron kullanımı durumunda ağ

dilimlemenin etkinliğini gözlemlemiştir ve dron kontrol diliminin ağır yüklü dron yük diliminden etkilenmediğini belirtilmiştir [25].

Yukarıda bahsedildiği gibi iletişim mesafesi genel olarak dron sistemleri için ciddi bir dezavantaj gibi görünmektedir. Mevcut karasal haberleşme ağlarında, LTE ve 5G, kısa iletişim mesafesini ortadan kaldırmak amacıyla kesintisiz ve güvenli iletişim, drona takılan düşük maliyetli modemler yardımıyla sağlanabilir [26, 27]. Karasal ağlar, yer kullanıcılarına maksimum verimlilik sağlamak için optimize edilmiştir (örn. aşağı eğik baz istasyonu antenleri). Güvenilir bir haberleşme için İHA'ların havadaki mobilitesi, büyük bir optimizasyon problemini de beraberinde getirir. Bu problem özellikle yüksek irtifalar için İHA'nın yer sistemlerinin görüş hattının dışına çıkılması olarak tanımlanır.

İHA tabanlı hücreli haberleşme sistemleri yüksek verimli ve kullanışlı olması gerekir. Yeterli kapsama sahip olması, uygun sayıda kullanıcıya hizmet vermesi, sağlanan veya alınan hizmetin kalitesinde herhangi bir azalma veya kesinti olmaması İHA tabanlı hücreli haberleşme sistemleri için tanımlanan sorunlar arasında, İHA senaryoları için bu sorunlar, analizler ve çözüm önerileri [28] makalesinde belirtilmiştir.

Yukarıda belirtilen sorunlara ithafen farklı akademik çalışmalarda, hücreli ağ verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için, 3D dron baz istasyonu konumlandırmak, İHA destekli iletişimde kanal modellemesi için matematiksel araçlar ve teknikler, uygulanabilecek yaklaşımlar ve araştırmalar [29] verilmiştir. Yerde maksimum radyo kapsama alanı için irtifa optimizasyonu ve yer alıcısı ile İHA arasındaki geometrik Görüş Hattı olasılığının hesaplanması [30] yapılırken; Hizmet Kalitesi (QoS) gereksinimlerinin, ağla ilgili görev parametrelerinin, veri gereksinimlerinin ve sivil kullanımda iletilecek minimum veri boyutunun belirlenmesi [31] makalesinde bulunabilir.

Farklı kanal modelleri (havadan havaya, havadan yere ve yerden havaya kanal modelleri) düşük gecikmeli ve yüksek güvenilirlikte iletişim sağlanabilmek için kullanılır. Bu modelleri karakterize etmek ve doğru parametreler ile kullanmak, ağların performans optimizasyonu yapılırken büyük önem taşır. İletim kanalının karakteristiği; büyük-ölçekli parametrelerin kullanılması sonucunda alıcı tarafında alınan sinyal gücünün tanımlanması ve yayılma

mekanizmaları sonucunda yaşanan kayıpların belirlenmesinden sonra, yakın objelerin etkileri ve küçük-ölçekli parametrelerin kullanımı ile hesaplanır. Rayleigh solması, Rician solması, hızlı solma efektleri, alıcı-verici tarafındaki fiziksel hareket nedeni ile ortaya çıkan Doppler kaymaları, zamana göre oluşan varyasyonlar, kısa menzilli dalga boyu aralığındaki değişiklikler, gecikme dağılımı profili ve çoklu yol etkileri incelenebilir. Kentsel, banliyö, kırsal ve arazi gibi spesifik bölgelerde dağlar, ormanlar, su yüzeyi, çöller vb. gibi yerler de kanal karakteristiğini etkileyen yerler arasındadır. Dahası, baz istasyonlarının (örn. 2G, 3G, 4G veya 5G) ve diğer cihazların yarattığı girişim etkileri de kanal özelliklerini ve performansını etkileyen ana faktörler olarak incelenmiştir [32, 33].

İHA iletişimi için analizi yapılmış kanal modelleri, literatüre bakıldığında yeni çalışmalara yol göstermek ve karşılaştırmaları olası kılmak amacıyla detaylı bir şekilde dökümanite edilmiştir. Havadan yere, yerden yere ve havadan havaya kanal ölçümleri ve mevcut kanal modelleri İHA ve havacılık iletişimi için farklı senaryolarda değerlendirilmiş, buna ek olarak çoklu anten destekli İHA haberleşmesi incelenmiştir [32].

Sınırlamalar, büyük-ölçekli ve küçük ölçekli kanal parametrelerini, mevcut havadan yere kanal ölçümlerini, İHA haberleşme senaryoları için geleceğe yönelik araştırma yöntemleri [33] numaralı referansta kapsamlı bir şekilde anlatmıştır.

Kanal modelleme için simülasyon çalışmaları kapsamında ışın izleme yöntemi, saha testlerinin deneysel maliyetleri ve güvenlik nedenlerinden dolayı daha uygun ve verimli bir teknik olarak kabul edilir. Bu yöntem kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarından birinde, İHA iletişimi için farklı frekanslarda ve farklı irtifalarda yayılma karakteristiklerini incelemiştir. Yer kullanıcıları ve İHA'lar arasında ışın izleme yöntemine dayalı geleneksel geometrik görüş hattı olasılık modelindeki parametreler kapsamlı bir şekilde kıyaslanmıştır [34].

Işın izleme yöntemi kullanılarak havadan yere kanal modeli L (1.2 GHz) ve C (4.2 GHz) bantlarında farklı yükseklikler için simüle edilmiştir. [35]'te yol kaybı, k faktörü, çoklu-yol bileşenleri, gecikme dağılımı ve güç-gecikme profili parametrelerinin irtifa değişimi ile ilişkileri incelenmiştir.

Simülasyon tabanlı dikkat çeken bir başka çalışma, İHA'nın baz istasyonu olarak istatistiksel parametrelerle oluşturulmuş bir şehir modelinde konumlandırıldığı, yer kullanıcılarına ulaşan çoklu yol bileşenlerinin gerçekleşme olasılıklarının çıkartıldığı, literatürde kabul görmüş olan havadan yere kanal modelidir. [36] numaralı referansta şehir modelinin oluşturulması, yayılma mekanizmasının belirlenmesinden bahsedilmiştir. Devamında sinyal gruplarının ve gerçekleşme olasılıklarının elevasyon açısına bağlı olarak parametrize edilmesi ve her sinyal grubunda alınan güç değerlerinin bir modele oturtulması anlatılmıştır,

Simulasyon çalışmaları dışında gerçek hayattaki kullanım durumları için havadan ölçümlerle kanal modeli analizleri literatürde yaygın olarak bulunmaktadır. Daha güncel çalışmalardan biri olan [37], yol kabını, gölgelemeye bağlı zayıflamayı, RMS gecikmesini, Doppler frekans dağılımını ve K-faktörü gibi parametreleri, alçak irtifa için havadan yere kanal modeli çıkartmak amacıyla bir banliyö bölgesinde farklı irtifalar için incelenmiştir. Ayrıca farklı tip anten kullanımlarını kıyaslayan bir çalışmadır. Bir başka çalışma ise LTE karasal ağların kapsama alanını analiz etmek amacı ile yapılan saha ölçümleri sonucunda farklı irtifalarda ortaya çıkacak olan handover(bir hücresel ağ içinde bir hücreden diğer hücreye geçiş) problemlerine dikkat çekmektedir [38].

Çeşitli uçuş rotalarında kırsal bir alanda hizmet veren LTE ağının aşağı bağlantı (downlink) sinyallerinin kanal dürtü tepkilerini analiz edildiği bir başka çalışmaya benzer özellikler gösteren ve İHA'ya yerleştirilmiş bir Evrensel Yazılım Radyo Çevre Birimi (USR) cihazı yardımı ile baz istasyonunun LTE aşağı bağlantı sinyalinin güç gecikme profilini inceleyen çalışmalar da mevcuttur [39, 40].

Yayıma karakteristiği farklı saçılma yollarından (ör. ofis binaları, küçük yapılar, ağaçlar gibi çevresel faktörlerden) etkilenebilir. Bitki örtüsü ve şehir içi bina etkileri birbirinden farklı olacaktır. Bundan dolayı düşük irtifalı açık alanların kanal parametreleri üzerindeki etkileri arasında kıyaslama yapabilmek için açık çim/çimenlik bir ortam ve kentsel bir alanda ofis binalarının bulunduğu bölgede iki farklı ortam belirlenmiştir. Yol kaybı, K-faktörü ve RMS gecikme dağılımı gibi parametreler bu ortamlar için incelenmiştir [41].

Uçan düğüm (node) ile yer baz istasyonu arasındaki ana taşıyıcı bağlantının kalitesi, sistem performansı için büyük önem taşımaktadır. Buna dayanarak yapılan başka bir çalışmada yer ve hava LTE sinyallerinin bazı parametrelerine bağlı olan İHA irtifalarına dayalı hücreler arası geçiş sayıları, sinyal gücü, girişim ve gürültü etkileri uçan röleler için incelenmiştir. 60m ve 150m irtifalarının hücreler arası geçişe daha çok imkan sunduğu görülürken, 40 m veya 120 m irtifalarının yüksek kapasiteli ana taşıyıcı bağlantılarını gerçekleştirmek için iyi seçimler olduğu saptanmıştır. 40 metrenin potansiyel hava düğümü için yüksek kapasiteli bağlantılar sağlamasına ek olarak daha fazla hücreden hücreye geçiş ihtimali olması nedeniyle İHA senaryoları için uygun olduğu saptanmıştır. Bu çalışmaya ek olarak yetersiz hizmet alan kırsal bir alanda ve bir şehrin kentsel merkezinde iki farklı operasyonel senaryo için dört pervaneli İHA kullanılarak, saha ölçümleri yapılmıştır, LTE sinyal gücü ve sinyal/girişim-gürültü (SINR) oranları incelenmiştir. İlk senaryoda radyo kapsama alanını geliştirebilecek, 10 dB'den büyük sinyal kaliteleri ölçülürken, kentsel alanda, İHA irtifası yükseldikçe daha fazla baz istasyonunun görüş hattına girmesi nedeniyle sinyal performansı etkilenmiştir [42, 43].

Son olarak; mesafeye, baz istasyonu ile İHA arasındaki açıya ve bazı istatistiksel parametrelere bağlı değişen, hücre baz istasyonundan havadaki bir İHA'ya doğru ulaşan sinyallerin yol kaybının istatistiksel davranışı modellenmiştir. Sağlanan model, hem karasal (sürüş testi ile) hem de hava kapsama alanı (UAV kullanarak) için tipik bir banliyö ortamında yürütülen kapsamlı deneysel veri ölçümlerine dayalı olarak türetilmiştir. Ortalama 4,8 m/sn hızında uçan ticari bir drona bağlanan sony Xperia marka telefondan, LTE-850 Mhz bandında 15, 30, 60, 90 ve 120 metrelerde alınan ölçümler yardımıyla baz istasyonunun aşağıya doğru çevrilmiş olmasından dolayı oluşabilecek ek yol kaybını incelemek amacıyla Victoria, Avustralya'da yapılmıştır Bu çalışmadaki model, hem araştırmacılar hem de ağ operatörleri için faydalıdır [44].

## 1.5. Tezin Kapsamı ve Organizasyon

Karasal haberleşme sistemlerine entegre edilecek insansız hava araçları için bir kanal modeli oluşturmak, çoklu yol bileşenlerinin olasılıklarını ve etkilerini modellemek, kapsamaya yönelik zorlukları ve fırsatları tespit etmek, kablosuz iletişimin konularından biri olan girişim etkilerini farklı senaryolarda sistem seviyesinde incelemek tezin hedefleri arasındadır. Oluşturulmuş iki farklı modelde kullanılan ana denklemler, uygulanan ışın izleme yöntemi, modellerin avantajları ve dezavantajları ikinci ve üçüncü bölümde verilecektir.

Oluşturulan bu iki model için kısaca bilgi verecek olursak, iki model için de ışın-izleme yöntemi kullanılmıştır. İki model de tek etkileşim ile sınırlandırılmıştır. Bunun iki sebebi vardır. İlk sebep, hesaplama yükünü düşürmek ve daha hızlı çalışan bir simülasyon modeli hazırlayarak sistem seviyesinde bir inceleme yapabilmektir. İkinci sebep ise ileriye yöneliktir. Yeni nesil haberleşme teknolojilerinde kullanılacak olan yüksek frekans bantları düşünüldüğünde radyo sinyallerinin etkileşimlere karşı daha hassas oluşu, tek etkileşimli modeli ileriye yönelik bir yatırım olarak değerlendirmeyi mümkün kılar.

İlk modele kısaca değinecek olursak, [36] numaralı referansta verilen bu çalışmada havadan yere kanal modeli için bir simülasyon hazırlanmış ve bu simülasyonun verileri kullanarak sinyal gruplamaları, olasılıksal dağılımları ve tahmini yol kayıpları modellenmiştir. Bu çalışmadaki yöntemle benzer şekilde hazırlanmış bir simülasyon modeli kullanılarak karasal bir baz istasyonu için yerden havaya sunulan kapsama, farklı irtifalar için çoklu yol bileşenlerinin grup ihtimalleri, gerçekçi bir baz istasyonu için yol kayıpları ve SINR değerleri incelenir.

İkinci model ise kırsal bir senaryoda baz istasyonları arasındaki mesafenin 2km'den fazla olduğu, çoklu yol bileşenlerinin sayılarının düşük olduğu ve bitki örtüsüne bağlı yaşanan ek zayıflamayı içeren bir modeldir. Sistemde kullanılan model iki-ışın modeline benzemektedir. Dikkat edilmesi gereken ilk husus bitki örtüsünün baz istasyonundan çıkan sinyallere yarattığı ek zayıflama değildir. İki-ışın modeline evrilen senaryoda bazı değişiklikler yapılmıştır. Gerçek bir senaryo için sahaya yönelik eksik bilgiler farklı yaklaşımlar ile



tamamlanmıştır. Yapılan saha çalışması ile model sonucunda elde edilen RSRP-RSRQ sonuçları kıyaslanarak modelin kullanılabilirliği gösterilmiştir. Frekanslar ve hücreler arası geçişlerin testipine yönelik basit bir trend analizi önerilmiştir. Yapılan saha çalışmasının verileri ve sahada bulunan anten bilgileri Turkcell Teknoloji A.Ş. tarafından sağlanmıştır. Model 2, tüm detayları ile bir konferans bildirisi haline getirilmiş [45], The 2022 INT'L conference on unmanned aircraft systems (ICUAS) isimli konferansta sunulmuştur.

## 2. MODEL 1 - IŞIN İZLEMeye DAYALI MODEL

Çalışmanın çıkış noktası, [36] numaralı referansta havadan yere doğru yapılmış olan çalışmadır. Bu tezde ise, kullanılan metotların farklı bir şekilde değerlendirilmesi sonucu yerden havaya bir kanal modelinin incelenmesi hedeflenmektedir. Yerden havaya kanal modeli için benzer bir simülasyon modeli hazırlandıktan sonra bu model incelenmiştir. Birbirinden farklı şehir ortamları için baz istasyonlarının havaya sunduğu performansı ve farklı irtifalarda alınan sinyal güçlerini bir modele oturtmak tezin hedefleri arasındadır. İlerleyen bölümde modele yönelik özellikler verilmiştir. Her senaryoda gökyüzüne dağılmış binlerce örnek nokta için ışın izleme yöntemi kullanılarak şehir içindeki yayılma mekanizması (yansıma ve kırınım durumları) değerlendirilir. Örnek noktalara yollanan ışınların yaşadıkları etkileşimler belirlenir. Bu işlem tamamlandıktan sonra o noktalarda alınan güç değerleri bulunur. Verilerin doğrusal denklemlere oturtulmasıysa şu şekilde gerçekleşir. Tüm noktalar için önce görüş hattında olma ve olmama durumları kontrol edilir. İlgili noktalar bu duruma göre iki farklı gruptan birine yerleştirilir. Sonra bu gruplar içerisindeki noktaların baz istasyonu noktasına olan uzaklıkları belirlenir. Bu uzaklık değerleri küçükten büyüğe sıralanır ve sıralamanın indeksleri kaydedilir. Bu indeksler toplam alınan güç değerlerinin olduğu vektörde kullanılır ve bu işlem sonucunda alınan güç değerleri mesafe artışına göre sıralanır. Bu veriler üç parçalı doğrusal denklemlere oturtularak modellenmiştir.

Bu modelleme işlemi yapılırken irtifa performansları ve sistem modelinin SIR (Sinyal/Girişim oranı) değerleri de incelenmiştir. Bu senaryolarda kullanılan baz istasyonunun gerçekçi olması için LTE-A 2.6 GHz bandında 20 MHz bant genişliğinde kapsama sunduğu kabul edilmektedir. Yerden havaya bir modelleme yapabilmek için oluşturulan örnek noktaların yükseklikleri, baz istasyonu seviyesinde ya da daha yüksek olarak seçilmektedir. Her irtifa için örnek uzayımız iki boyutta dörder metrelik aralıklarla gökyüzüne dağılmış noktalardan oluşmaktadır, her irtifada 63 bin nokta bulunmaktadır. Her şehir modeli için onar defa tekrarlanan bu model sonucunda elde edilen veriler irtifalara

göre incelenmiştir ve gruplandırılmıştır. Gruplanan veriler doğrusal denklemlere oturtularak kapalı formda bir sonuç elde edilmiştir.

## 2.1. Simülasyon Ortamı ve Özellikleri

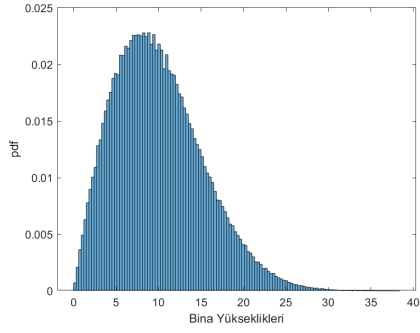
Modelin ilk kısmı simülasyon yapılacak şehir yapılarını oluşturmayı hedeflemektedir. Şehir yapıları Üç ana parametre kullanılarak oluşturulmuştur. Bu parametreler sırası ile,  $\alpha_0$  yerleşik arazi alanının toplam arazi alanına oranını (boyutsuz),  $\beta_0$  kilometre karede bulunan ortalama bina sayısı ve  $\gamma_0$  bina yükseklikleri için Rayleigh olasılıksal yoğunluk fonksiyonunda kullanılan ölçeklendirme parametresini temsil etmektedir ve bu parametreler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Simülasyon ortamındaki şehirler için istatistiksel parametreler

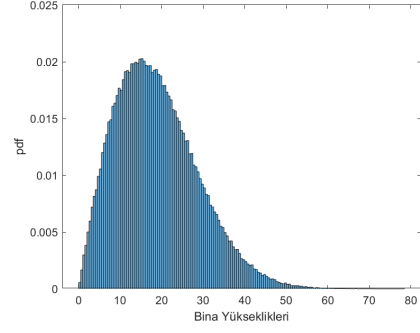
Ortam	$\alpha_0$	$\beta_0$	$\gamma_0$
Banliyö	0.1	750	8
Kentsel	0.3	500	15
Yoğun kentsel	0.5	300	20
Yüksek-katlı Kentsel	0.5	300	50

Bu parametreler banliyö/kenar mahalle, kentsel, yoğun kentsel, yüksek-katlı-kentsel senaryoları için şehir modelleri oluşturulurken kullanılır. Belirli bir şehrin genel geometrik istatistikleri bu şekilde çıkartılır. Binalar arası mesafeler sabittir. Bina şekilleri kare prizma şeklindedir. Simülasyon ortamı için üretilen her şehir bu yönden Manhattan şehir modeline benzer. Binaların iki boyuttaki enleri ve boyları  $W = 1000\sqrt{\frac{\alpha_0}{\beta_0}}$  parametresi ile 1000 metre için belirlenebilir. Binalar arası mesafe de  $S = \frac{1000}{\sqrt{\beta_0}} - W$  şeklinde belirlenebilir [36].  $W$  değerleri banliyö, kentsel ve yoğun-kentsel bölgeler için yaklaşık olarak 12 ,20 ,41 metre;  $S$  değerleri ise yaklaşık olarak 25, 20, 17 metre olarak hesaplanmış ve kullanılmıştır. (Çok katlı kentsel ortamın  $(W, S)$  değerleri yoğun kentselinki ile aynıdır.)

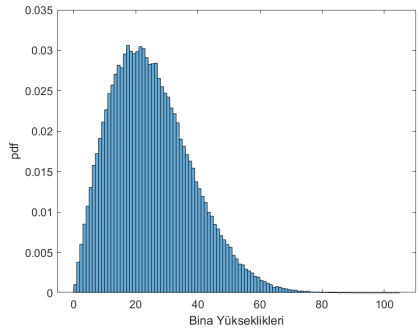
Bina yüksekliklerinin ortam tipine göre dağılımları Şekil 2.1’de verilmiştir. Şehir modelinin bir örneği Şekil 2.2’de verilmiştir.



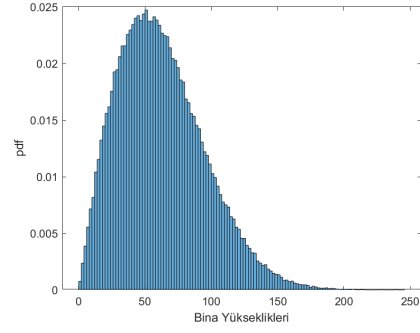
(a) Banliyö ortamı



(b) Kentsel ortam

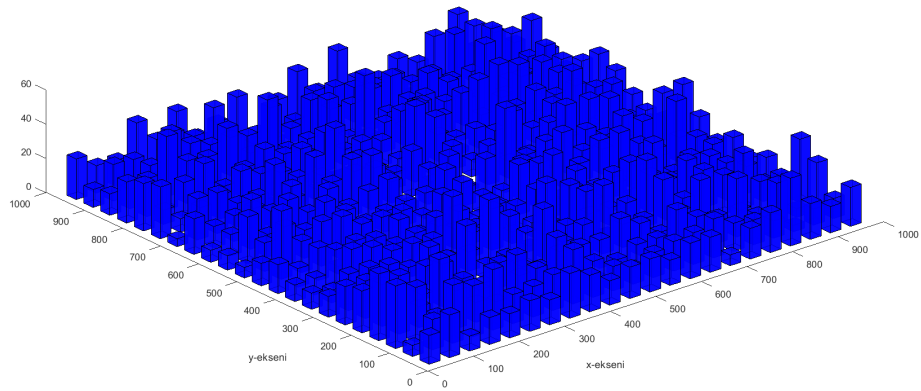


(c) Kentsel ortam



(d) Çok-katlı Kentsel ortam

Şekil 2.1 Ortama göre bina yüksekliklerinin dağılımı



Şekil 2.2 Kentsel ortam şehir örneği(W=24 ve S=20)

Sinyal gruplarının model içinde belirlenebilmesi için bazı sınırlar belirlenmelidir. Bu sınırlar doğru belirlenmezse modelin çalışma süresi yükselebilir. Işının kat edebileceği

toplam mesafe, ışın sayısı, ışının denetleneceği örnek uzay, etkileşim sayısı gibi sınırlar bir arada kullanılabilir. Bu parametrelerin seçimi modeli tasarlayan kişinin insiyatiflerine göre değiştirilebilir ve yeniden ayarlanabilir.

## **2.2. Işınlara Yayılma Mekanizması**

Bu modelin farklı şartlarda kolay tekrarlanabilmesi ve farklı irtifalardaki noktaların daha kolay incelenebilmesi için gönderilen ışınlar, farklı çıkış açılarında yinelemeli bir şekilde kullanılmamıştır. Bunun yerine sinyalin yaşayabileceği tek etkileşim durumları doğrudan geometrik yaklaşımlar ile birleştirilmiştir. Modelde verici nokta, baz istasyonu noktası olarak, alıcı noktaların her biriyse örnek nokta olarak ifade edilmiştir. Işın izleme mekanizması özetle şu şekilde çalışmaktadır.

Yerden havaya kanal modeli için 32 metreden 120 metreye olan yükseklikler dörder metre aralıklarla seçilmiştir. Her irtifada x ve y eksenleri 1km ile sınırlanmıştır. Her irtifa için dörder metrelik aralıklarla 63001 örnek nokta oluşturulur. Modelde kullanılan baz istasyonu, her irtifa için örnek noktaların (XY düzleminde) tam ortasındadır. Modelde verici-alıcı noktaları arasında en fazla tek etkileşime izin verilerek model daha basit bir formda hazırlanmıştır.

Seçilmiş yükseklikteki 63001 nokta sırasıyla aynı işlemde geçer. Bir nokta için ilk yapılacak işlem, noktanın görüş hattı (LOS) grubu içinde olup olmadığını kontrol etmektir. Bu işlem yapılırken merkezde bulunan baz istasyonundan, örnek noktaya bir ışın çizildiğinde bu ışının geçtiği bölgede bulunan bina indeksleri, konum bilgilerine dayalı basit eşitsizlikler yardımı ile belirlenir ve ışının bu binalar ile etkileşime girip girmediği kontrol edilir.

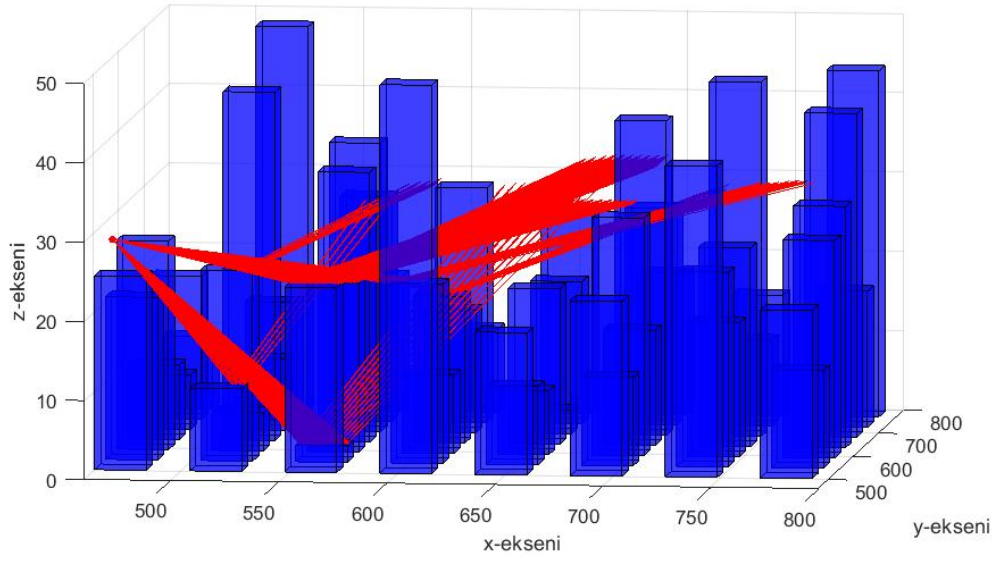
Eğer bir etkileşim yoksa incelenen nokta görüş hattı (LOS) grubundadır. Binaların arkasında kalan noktalar görüş hattının dışındaki (NLOS) gruptadır.

Işının LOS grubunda olma durumu, yatayda aynı çıkış açısını paylaşan ışınlar için dikey yansımaların incelenmesini kolaylaştırır. Yer yansımalarının gerçekleşebileceği tahmini noktada aranırken, baz istasyonu ve örnek noktanın arasındaki iki boyutlu mesafe bilgisi

ve verici-alıcı yükseklik bilgileri kullanır. Vericinin yere göre simetrik yansıma kopyası oluşturulur. Yansıma kopyasından örnek noktaya bir ışın çizilir ve bu ışının yer yüzeyini kestiği nokta olan olası yansıma noktası bulunur. Daha sonra baz istasyonu noktasından olası yansıma noktasına bir ışın gönderilir. Eğer ışın belirlenen noktaya ulaşırken ara binalardan biriyle kesişiyorsa, yer yansıması gerçekleşmemiştir. Eğer ışın etkileşim yaşamadan yer yansıma noktasına ulaşıyorsa, bu sefer yansıma noktasından örnek noktaya bir denetleme yapmak gerekir. Aynı kontrol işlemi bu sefer yansıma noktası ile alıcı arasında tekrarlanır. Bu işlem sonucunda hiçbir bina ile kesişim yoksa yer yansıması gerçekleşmiştir. Işının aldığı toplam yol, çıkış açıları ve yansıma açısı kaydedilir.

Eğer yer yansıması gerçekleşmiyorsa çatı yansımaları denetlenir. Baz istasyonu ve örnek nokta arasında belirlenen bina indeksleri kullanılır. Baz istasyonu noktasından daha alçakta olan binalar için çatı yüzeylerine gönderilecek olan ışınlar kontrol edilir. Bu binalar için baz istasyonu noktasının incelenen çatının yükseklik bilgisine göre yansıma kopyası oluşturulur (-z yönünde, xy sabit). Yansıma kopyasından örnek noktaya gönderilen ışının, incelenen binanın çatısını hangi noktada kestiği bu şekilde bulunur. Eğer kesmiyorsa, bu çatıdan yansıyan bir ışın örnek noktaya ulaşmıyordur. Kestiği durumdaysa asıl baz istasyonu noktasından bu noktaya bir ışın gönderilir ve aradaki binalarla ışının etkileşim durumu kontrol edilir. Bir etkileşim yoksa, aynı kontrol işlemi çatı noktasından örnek noktaya doğru gönderilen ışın için tekrarlanır. Bu işlem sonucunda hiçbir etkileşim gerçekleşmemişse, bu ışın dikey yansıma grubundadır ve bu grupta olan ışınlar Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Aynı yansıma mekanizmasının yatayda gerçekleşen durumu aşağıda açıklanmıştır.

Yatay (yan yüzey) yansımaların yaşayacağı tekli etkileşimler belirlenirken, bir önceki paragrafta dikey yansıma grubu için izlenen yol tekrarlanır ancak arada iki tane fark vardır. Bu farklardan ilki yansıma kopyaları oluşturulurken bina çatıları yerine binaların yan yüzeylerinin kullanılmasıdır. Bu durumda şehir yapısının kare prizmalardan oluşması bir avantaj yaratır. İkinci farksa yan yüzey yansımalarının gerçekleşebileceği binaların belirlenmesidir. Baz istasyonu noktasından daha yüksek olan ve baz istasyonu noktasıyla örnek nokta arasında bulunmayan binalar belirlenir. Bu şartı sağlayan binaların ilgili yan yüzeylerine göre baz istasyonu noktasının yansıma kopyaları oluşturulur (z sabit). Bu



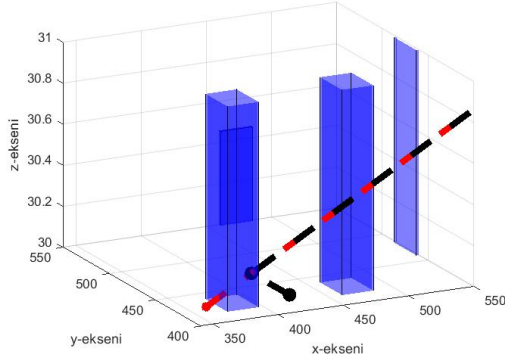
Şekil 2.3 Çatı Yansımaları

durumun bir örneği Şekil 2.4'te verilmiştir. Siyah renk asıl vericimizden çıkan ışını, kırmızı renge vericinin yansıma kopyasından çıkan ışını ifade eder. Yansımanın gerçekleştiği nokta ise bu iki ışının yüzeyi kestiği ortak noktadır.

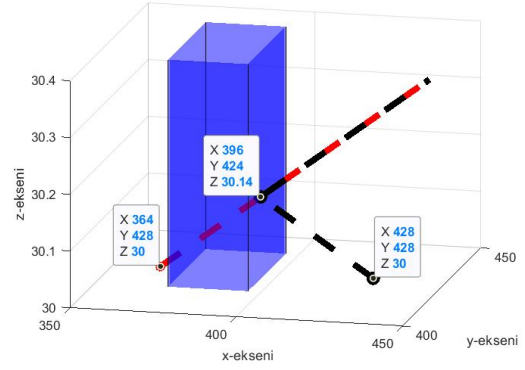
Modelin bir zorluğuysa her bir örnek nokta için kaç tane yan yüzey yansımasının (kaç tane yansıma kopyasının) kontrol edileceğidir. Bu sayı çok küçük olursa bazı ışınların etkileri gözden kaçabilir. Bu sebebe dayanarak her örnek nokta için yan-yüzey yansımaları farklı şehir ortamlarında farklı irtifalarda birkaç defa denenmiş, yan yüzey yansıma sayısının tek bir örnek nokta için değerlendirildiğinde ortalama sekizi geçmediği görülmüştür. Modeldeki şehrin mesafe sınırlarının artması ve daha geniş şehirler için incelemeler yapılabilmesi için yan yüzey yansımalarının sayısı arttırılmalıdır. Modelde yan yüzey yansıma sayısı modeli daha esnek hale getirebilmek amacıyla her bir örnek nokta için 16 olarak belirlenmiştir.

Bu yatay yansıma işlemi 16 tane ışın için tekrarlanır. Verici noktasının yansıma kopyaları bina yüzeylerine göre oluşturulur ve bu yüzeylerdeki tahmini etkileşim noktaları belirlenir. Işınlar önce ilgili yan yüzeylereki etkileşim noktalarına gönderilir ve yol üstünde bulunan binaların engel teşkil edip etmediği belirlenir. Etkileşim durumunun gerçekleşmediği zamanlarda ışınlar olası yan yüzey yansıma noktalarına ulaşır. Daha sonra yüzeydeki bu

noktadan örnek noktaya bir ışın gönderilir. Bu ışın da herhangi bir etkileşim yaşamadan ulaşıyorsa, o örnek noktada yan yüzey yansımalarından biri gerçekleşmiştir.



(a) Yatayda Yansıma Mekanizması



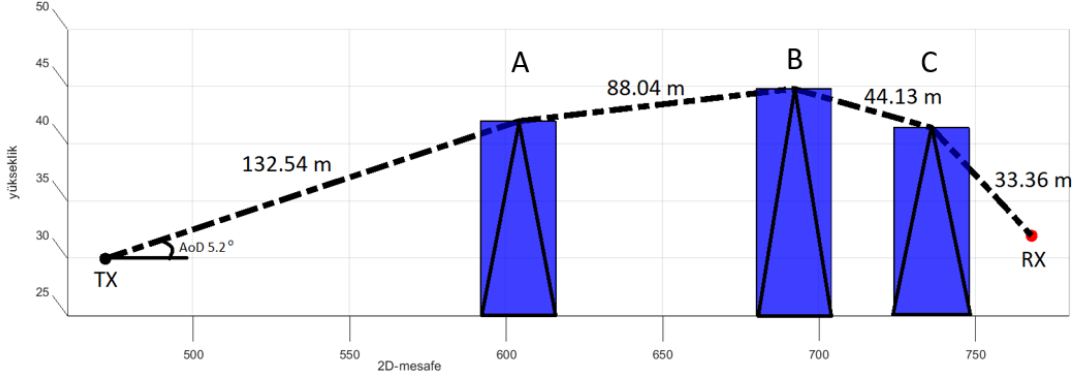
(b) Sırasıyla; yansıma kopyası, ışının yansıma noktası, verici

Şekil 2.4 Yatay (Yan Yüzey) Yansıma Mekanizması

Kırınım durumu günümüzde hala üzerine çalışmalar yapılan ve net olarak çözümlenmemiş karmaşık bir durumdur. Farklı yöntemler kullanılarak modellenenbilir. Her binayı birer ekran olarak değerlendiren Epstein-Petersen yöntemi, her ekran için ayrı ayrı kırınım kayıplarını hesaplar. Belirli bir ekranın zayıflaması bunun ön ve arkasındaki ekranların uçlarına sanal bir “TX” ve “RX” koyarak hesaplar. Deygout yöntemi ise bu işlemin yinelemeli olarak maksimum kırınım kaybı yaratan binanın üstüne diğer ekranların etkilerinin eklenmesiyle değerlendirir.

Modeldeki kırınım kaybının hesaplanması için Deygout yöntemi seçilmiştir. NLOS durumundaki her nokta için aradaki binalar xy ekseninde doğrusal bir yol üzerinden belirlenmiş ve Şekil 2.5’te gösterilmiştir. Sonra engel yaratan binalar yinelemeli bir şekilde incelenir. NLOS durumuna sebep olabilecek binalar sıralanır, bu binaların baz istasyonuna, örnek noktaya ve birbirlerine olan mesafeleri belirlenir. Sonrasında ise Deygout yöntemindeki yinelemeli inceleme NLOS grubu noktaları için yapılır, Işının ifade ettiği sinyal için ortalama yaşanan ek zayıflama  $L_{DIF}$  bu şekilde hesaplanır. Bu yöntemde sadece çatılardan yaşanan kırınım etkileri hesaplanmıştır. İleride yapılacak çalışmalarda binaların yan yüzeylerinden kırılan sinyaller değerlendirilmeli ve daha detaylı bir modelleme yapılmalıdır.





Şekil 2.5 Deygout Yönteminde kullanılan Kırınım Mekanizması

Çizelge 2.2 Deygout yöntemi Fresnel Parametreleri

Engel	A	B	C
$\theta_d$ (rad)	0.1517	0.2409	0.3321
$v_f$	5.4001	7.5365	7.3873
$L$ (dB)	27.6039	30.4974	30.3238

Bir önceki paragrafta verilen yöntemi kısaca özetleyecek olursak ilk aşamada her bir engel tek başına değerlendirilir. 2.6 GHz için Çizelge 2.2'de verilen değerler Şekil 2.5 örneğine aittir ve A-B-C engellerinden sadece biri varmış gibi bir hesaplama yapılır. Fresnel parametresi ve Fresnel integrali literatür taraması bölümünde detaylı bir şekilde Denklem (6)-(9)'da verilmiştir.

$$L = -20 \log_{10} \left( \frac{1}{2} - \frac{\exp(j\pi/4)}{\sqrt{2}} F(v_f) \right) \quad (10)$$

Maksimum kaybı yaratan bina B engelidir ve kayıp  $L_1$  Denklem (10) yardımıyla 30.4974 dB olarak bulunmuştur. Daha sonra A ve C engellerinin yarattığı ek kayıp bulunur. TX ve B engelinin uç noktası arasında bulunan A engelini yarattığı ek kırınım kaybı hesaplandığında  $v_f$  1.7117,  $L_2$  17.8206 dB olarak hesaplanmıştır. Aynı işlem B engelini uç noktası ile RX arasında bulunan C engelini yarattığı ek kayıp hesaplanırken tekrarlanmış ve  $v_f$  3.7490,  $L_3$  24.4426 dB olarak hesaplanmıştır. Bulunan  $L$  değerleri Denklem (11)'de gösterildiği şekilde toplanarak toplam kırınım kaybı 72.7606 dB olarak hesaplanır.

$$L_{DIF} = L_1 + L_2 + L_3 \quad (11)$$

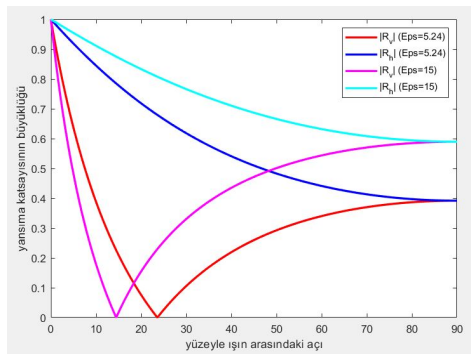
Bahsedilen ışın izleme yöntemi her örnek nokta için tekrarlandığında LOS, NLOS, dikey yansıma, yatay yansıma grupları şeklinde farklı etiketlere sahip olabilir. Işınlardan yolda aldığı toplam mesafeler, çıkış açıları, yüzey normalleriyle yapılan açılar(yansıma grupları için) gibi değerler kaydedilir. Bu sayede kaydedilen modellerdeki ışın bilgileri farklı değerlendirmeler için kullanılabilir.

Gerçek hayatta binaların, çatıların ve yer yüzeyinin elektriksel özelliklerinin birbirinden farklıdır. Yansıma katsayıları hesaplanırken yansıma grubunun tek başlıkta incelenebilmesi için yer ve bina yüzeylerinin dielektrik sabitleri ( $\epsilon_r$ ) sırasıyla 15 (Orta kuru zemin) ve 5.24 (Beton) olarak seçilmiştir [46]. Yansıma katsayıları bu parametreler ve sinyalin yansıma yüzeyi ile yaptığı açı kullanılarak Denklemler (12)-(14) yardımı ile hesaplanır [14]. Şekil 2.6 yansıma katsayısının bu iki materyal için dikey ve yatay polarizasyon durumları için büyüklük ve faz değerlerini gösterir.

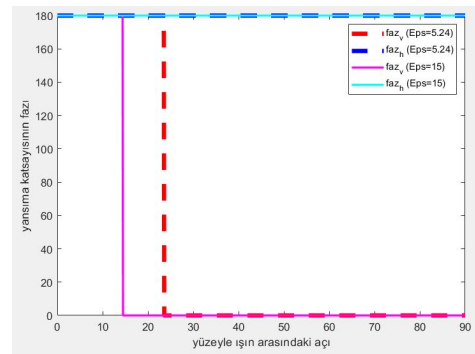
$$Z_v = \sqrt{\epsilon_r - \cos^2(\theta)} / \epsilon_r \quad (12)$$

$$Z_h = \sqrt{\epsilon_r - \cos^2(\theta)} \quad (13)$$

$$\Gamma_{v,h} = \frac{\sin(\theta) - Z_{v,h}}{\sin(\theta) + Z_{v,h}} \quad (14)$$

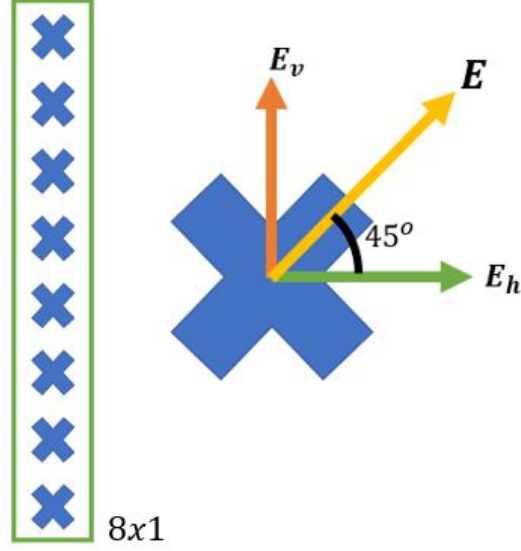


(a) Yansıma katsayısının büyüklüğü ( $\epsilon_r$  5.24 ve 15)



(b) Yansıma katsayısının fazı ( $\epsilon_r$  5.24 ve 15)

Şekil 2.6 İki farklı materyale göre yansıma katsayısının özellikleri



Şekil 2.7 Sektör Antenlerin İç yapısı

Baz istasyonunun sektör antenlerinde çapraz bir şekilde konumlandırılmış dipol antenler bulunmaktadır. 8X1 yapıda çapraz bir şekilde konumlandırılmış anten elementleri aynı sinyal kaynağı tarafından beslenir. Sektör antenden çıkan sinyallerin dikey (v) ve yatay (h) bileşenleri Şekil 2.7’de gösterildiği şekilde modellenebilir. Yansıma gerçekleşikten sonra bu sinyal bileşenlerinin süperpozisyonu alınır. Bu sinyallerin dikey ya da yatay bileşenleri farketmeksizin ışın izleme yönteminde verici-alıcı noktaları arasında ışının kat ettiği toplam yol, çıkış açısı ve bu açığa bağlı olan anten kazanç değerleri aynıdır. Bunun sonucunda yansıyan sinyalin dikey yatay bileşenleri Denklem (17)’da gösterildiği şekilde toplanabilir.

$$E_v = \sin(45^\circ)E \quad (15)$$

$$E_h = \cos(45^\circ)E \quad (16)$$

$$E_r = \Gamma_v E_v + \Gamma_h E_h \quad (17)$$

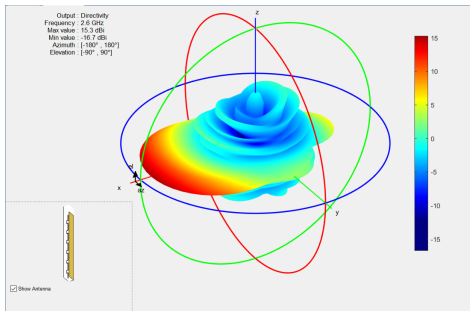
$$|E_r| = |\Gamma||E| \quad (18)$$

$$|\Gamma| = \sqrt{(\Gamma_v \sin(45^\circ))^2 + (\Gamma_h \cos(45^\circ))^2} \quad (19)$$

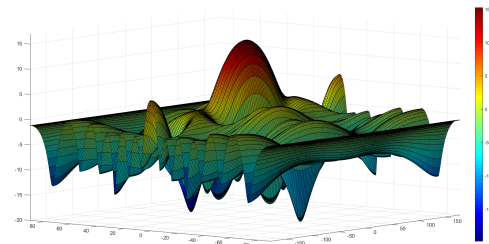
Dikey ve yatay bileşenler birbirine dik olduğu için, yansıma sonrasında elde edilecek alanın büyüklüğü Denklem (18) de gösterildiği şekilde hesaplanabilir. Denklem (19)'da bu duruma dayanan ortalama yansıma katsayısının büyüklüğü hesaplanabilir.

Polarizasyon etkisinin incelenebilmesi için alıcı tarafındaki geliş açıları ve alıcı üzerinde bulunan anten özellikleri ileride yapılacak çalışmalarda dahil edilmelidir. Bu sayede antenler arasında yaşanan polarizasyon uyumsuzluğunun etkisi incelenebilir. Bu çalışmada farklı yayılma durumlarında görülen yol kaybı üzerine bir modelleme yapılmaktadır. Polarizasyon uyumsuzluğu göz ardı edilmiştir.

Modelde kullanılan verici antenler baz istasyonunun her bir sektörü için modellenmiştir. Sektör antenler MATLAB AntennaDesigner kullanılarak 2.6 GHz için üretilmiştir. Sektör antenin dikey yarı güç hüzme genişliği  $7^\circ$ , yatay yarı güç hüzme genişliği  $67^\circ$ 'dir. Maksimum anten kazancı 15.26 dBi'dir. Şekil 2.8'de verilmiştir.



(a) Anten Kazancı



(b) Açılara göre 3 boyuttaki anten kazancı

Şekil 2.8 Baz istasyonunun her bir sektöründe bulunan anten modeli

Simülasyonun gerçeğe yakın olması için antenler üzerinde dört derecelik elektronik eğim açısı kullanılmıştır. Bu eğim açısına bağlı olarak ortaya çıkan relatif açı ve relatif anten kazançları ilgili referansta açıklanmıştır[47].

Literatür taramasının başında detaylı bir şekilde bahselen yayılım mekanizmaları farklı sinyal grupları için bu modelde kullanılmıştır. Görüş hattındaki sinyaller serbest uzay yol kaybı formülünü kullanır. Yatay ya da dikeydeki tekli yansımalar serbest uzay yol kaybı modeli içine yansıma katsayısını bir çarpan olarak eklenir ve hesaplanır. Kırılan ışınlar

ise serbest uzay yol kaybı modeli üstüne kırılmaya bağlı olan ek kaybı Deygout yöntemi kullanarak ekler. Sistemdeki yaklaşımın havadaki profili çıkartmak üzerine olmasından dolayı alıcı anten kazançları 0 dBi olarak kabul edilmiştir. Alıcı antene geliş açısından kaynaklanan polarizasyon uyumsuzluğu gözardı edilmiştir. Antenlerin iletim gücü 1 watt olarak normalize edilmiştir. Anten yüksekliği 30 m olarak belirlenmiştir. Örnek uzaydaki her nokta için bu sinyaller dar-bant yaklaşımı ile birbirine eklenmiş (çoklu yol bileşenlerinin süperpozisyonu alınabilir) ve sonucunda o noktada tahmini olarak görebileceğimiz sinyal gücü hesaplanmıştır.

İrtifa(m)	32.0	36.0	40.0	44.0	48.0	52.0	56.0	60.0	64.0
LOS	52.0	61.63	68.41	74.82	81.46	85.61	88.39	91.18	92.7
NLOS	44.09	36.27	30.73	24.79	18.41	14.39	11.61	8.82	7.3
İrtifa(m)	64.0	68.0	72.0	76.0	80.0	84.0	88.0	92.0	96.0
LOS	93.96	95.38	96.61	97.61	98.23	98.47	98.73	99.01	99.29
NLOS	6.04	4.62	3.39	2.39	1.77	1.53	1.27	0.99	0.71

Çizelge 2.3 Kentsel bölge - İrtifaya bağlı görüş alanında olma (LOS) ve olmama (NLOS) ihtimalleri

Modeldeki noktaların irtifalara göre görüş hattında olma ve olmama olasılıkları şu şekilde çıkartılmıştır. İncelenen irtifada LOS/NLOS gruplarındaki nokta sayılarının ilgili irtifadaki toplam nokta sayısına oranıdır. Kentsel ortamda 96 metre irtifanın üzerinde LOS ihtimalinin ağırlıklı olarak 1'e yaklaştığı görülmüştür. Modelde banliyö ortamında yüzde 95'in üzerinde LOS durumu içerdiği için sadece kentsel ve yoğun kentsel senaryolarının LOS-NLOS olasılık değerleri yüzde olarak Çizelge 2.3 ve 2.4'te verilmiştir.

İrtifa(m)	32.0	36.0	40.0	44.0	48.0	52.0	56.0	60.0
LOS	22.19	30.49	37.97	42.21	47.02	50.92	55.14	59.72
NLOS	66.08	62.57	57.41	54.98	51.32	48.09	44.37	40.11
İrtifa(m)	64.0	68.0	72.0	76.0	80.0	84.0	88.0	92.0
LOS	64.24	68.58	73.11	77.78	81.41	84.38	87.01	89.49
NLOS	35.6	31.42	26.89	22.22	18.59	15.62	12.99	10.51
İrtifa(m)	96.0	100.0	104.0	108.0	112.0	116.0	120.0	NaN
LOS	91.28	92.42	93.36	94.26	94.79	95.04	95.3	NaN
NLOS	8.72	7.58	6.64	5.74	5.21	4.96	4.7	NaN

Çizelge 2.4 Yoğun kentsel bölge - İrtifaya bağlı görüş alanında olma (LOS) ve olmama (NLOS) ihtimalleri

Banliyö senaryolarının ağırlıklı olarak iki ışınlı modele kaydığı gözlemlenmiştir. Yoğun kentsel ve çok-katlı kentsel ortamlarında bulunan bina irtifalarının çok yüksek oluşu simülasyonun çalışmasını büyük ölçüde yavaşlatmaktadır çünkü yansıyan ve kırılan sinyallerin ihtimalleri kentsel senaryoya kıyasla daha yüksektir. Etkileşim ihtimalinin çok olduğu şehir yapılarını tek etkileşim modeli ile incelemek 2.6 GHz frekansı için yeterli sonuçlar doğurmamıştır. Bu noktadan sonra yapılan incelemeler, bina yüksekliklerinin daha gerçekçi olduğu kentsel ortama ağırlık verilerek yapılmıştır.

$$r_{LOS}(t) = Re \left\{ \sqrt{G_l} \left[ \frac{\lambda}{4\pi l} \right] e^{-j2\pi \frac{l}{\lambda}} u(t) e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (20)$$

$$r_{REF}(t) = Re \left\{ \sqrt{G_r} \Gamma \left[ \frac{\lambda}{4\pi x} \right] e^{-j2\pi \frac{x}{\lambda}} u(t - \tau_x) e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (21)$$

$$r_{DIF}(t) = Re \left\{ \sqrt{G_d} \frac{1}{\sqrt{L_{DIF}}} \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right] e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda}} u(t - \tau_d) e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (22)$$

Örnek noktalarda üç farklı yayılma durumuna göre alınan sinyaller Denklemler (20)-(22) kullanılarak hesaplanabilir.  $G_l$ ,  $G_r$ ,  $G_d$ , sektör antenlerden örnek noktaya doğru gönderilen ışınların sırasıyla görüş hattı (LOS), yansıma (REF), kırılma (DIF) durumları için çıkış

açılara bağlı olarak hesaplanan relatif anten kazancı değerleridir. LOS, REF ve DIF durumları belirlenirken bu açı değerleri bir önceki bölümde kaydedilmiştir. "l, x, d" değerleri sırasıyla LOS, REF, DIF ışınlarının örnek noktaya ulaşana kadar kat ettiği toplam mesafelerdir.  $\Gamma$  ortalama yansımaya katsayısıdır ve Denklem (19) yardımı ile hesaplanır.  $L_{DIF}$  Deygout yöntemi sonucu elde edilen ek kırınım kaybıdır tek engel durumunda Denklem (10), çok engel durumunda Deygout yöntemi kullanılarak Denklem (11) yardımıyla hesaplanır.  $\tau_x$  ve  $\tau_d$  yansımaya ve kırılma durumlarında izlenen ışınların LOS durumuna göre yaşadığı relatif gecikmelerdir.  $f_c$ ) taşıyıcı frekansı ifade eder. Sayısal haberleşmede alıcıya ulaşan sinyaller darbe olarak değerlendirilir ve bu darbelerdeki gecikmeler de sistemin bant genişliğine bağlı olarak etkilerini gösterebilir. Sistem dar-bant yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımda çoklu yol bileşenleri, örnek noktada alınan toplam güç hesaplanırken LOS durumuna etkisi olan yansımalar Denklem (23)'te; NLOS durumuna etkisi olan yansımalar Denklem (24)'te verildiği şekilde toplanarak hesaplanır (  $u(t) \approx u(t - \tau_{x,d})$  ) [14]. Alıcı anten nokta kaynak olarak değerlendirildiği ve alıcı antene geliş açılarına bağlı olarak relatif anten kazancı değişikliği dahil edilmediği için, çoklu-yol bileşenleri toplanırken Denklem (23)-(24)'te görülebilecek polarizasyon uyumsuzluğu göz ardı edilmiştir. Başka bir deyişle yansımaya katsayısı ve kırınım kaybı parametreleri çoklu yol bileşenlerinin aldığı yol kayıplarının üzerine eklenen ek kayıpları modellemek için kullanılmıştır.

$$P_{LOS} = 10 \log_{10} \left\{ P_t \left| \sqrt{G_l} \left[ \frac{\lambda}{4\pi l} \right] e^{-j2\pi \frac{l}{\lambda}} + \sum_{i=1}^{18} \left\{ \sqrt{G_{r_i}} \Gamma_i \left[ \frac{\lambda}{4\pi x_i} \right] e^{-j2\pi \frac{x_i}{\lambda}} \right\} \right|^2 \right\} \quad (23)$$

$$P_{NLOS} = 10 \log_{10} \left\{ P_t \left| \sqrt{G_d} \frac{1}{\sqrt{L_{DIF}}} \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right] e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda}} + \sum_{i=3}^{18} \left\{ \sqrt{G_{r_i}} \Gamma_i \left[ \frac{\lambda}{4\pi x_i} \right] e^{-j2\pi \frac{x_i}{\lambda}} \right\} \right|^2 \right\} \quad (24)$$

Her bir sektör için modeldeki örnek noktaya ulaşan ışınlar yol kayıpları, yansımaya durumu ve kırınım durumuna bağlı olarak değerlendirilmiş, [14]'te verildiği şekilde örnek noktalarda gelen sinyaller toplanmış ve toplanan değerler sonucunda çoklu yol bileşenlerinin örnek noktada birbirleri üstüne yaptığı yapıcı-yıkıcı etkiler incelenmiştir. Üç sektör için bu işlem tekrarlanır. Denklem (23)'te seçili noktada bulunan LOS sinyali ile o noktaya gelen yansımaya

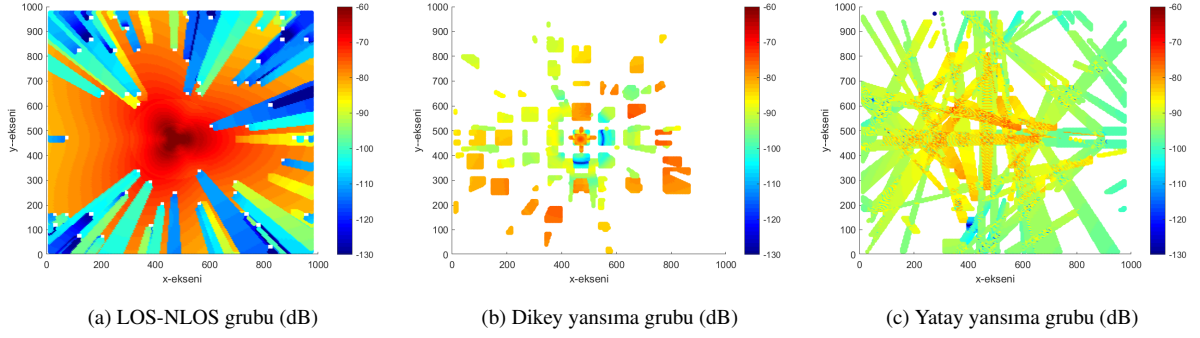
sinyalleri(yer, çatı, yan yüzeyler için mevcut olanları) toplanır. Denklem (24)'te ise NLOS durumundaki örnek noktaya gelen kırınım (DIF) sinyali ve yansıma sinyalleri toplanır. Burada asıl hedeflenen örnek noktadaki tahmini yol kaybı modelini LOS ve NLOS olarak ana iki grup altında çıkartmaktır.

$P_t$  verici gücüdür ve 1 watt olarak kabul edilmiştir.  $P_{LOS}$  ve  $P_{NLOS}$  ise örnek noktada LOS veya NLOS gruplarında aldığı toplam güç değerleridir (dB).

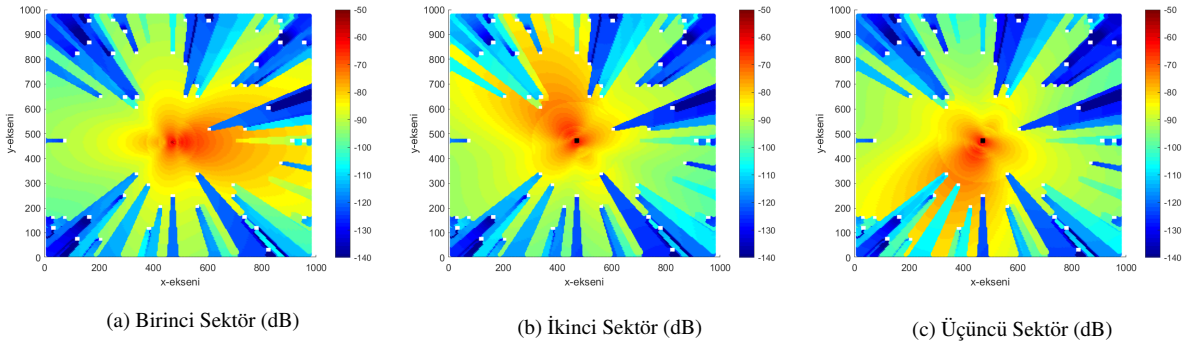
Modelde yer yüzeyinden ve çatılardan yansıyan sinyaller sırasıyla Denklem (23)'te  $i = 1$  ve  $i = 2$  indeksleri ile ifade edilir. Yan yüzey yansımalarıysa Denklem (23) ve Denklem (24)'te  $i = 3$ 'ten başlamak üzere  $i = 18$ 'e kadar gruplanmış, bu indeksler ile ifade edilmiştir. Eğer bu durumlar örnek nokta için gerçekleşmiyorsa, alınan güç değerleri bu indekslerde sıfır olarak kabul edilir. Kentsel bölgede ortalama en fazla 5 yan yüzey yansıması gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumda  $i = 3$ 'ten  $i = 18$ 'e kadar denenen yan yüzey yansımalarından sadece gerçekleşmiş olanları Denklem (23) ve Denklem (24)'teki toplam gücü etkiler.

Modelde yansımaları göz-ardı ederek baz istasyonunu her bir sektörü için sadece LOS-NLOS durumlarında alınacak güçleri değerlendirebildiğimiz gibi sinyal gruplarının o sektördeki toplam sinyal güçlerini de inceleyebiliriz. Ayrıca her irtifa için LOS, NLOS, dikey ve yatay yansıma durumları da ayrı ayrı incelenebilir. Bu incelemeye örnek verecek olursak 32 m irtifalı noktalar farklı gruplamalar yapıldıktan sonra görselleştirilebilir. 32 m yüksekliğindeki alınan güç değerleri 1 kilometrekarelik alan için Şekil 2.9, 2.10 ve 2.11'de verilmiştir. Her noktada alınan güç değerleri -50 dB'den -140 dB'ye renklendirilerek verilmiştir. Şekil 2.12'de ise üç sektörden alınan toplam gücün (dB) bir görseli mevcuttur.

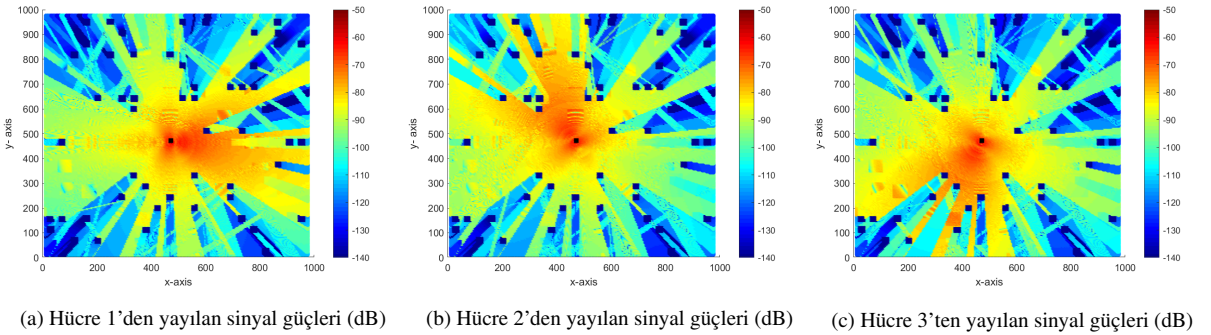




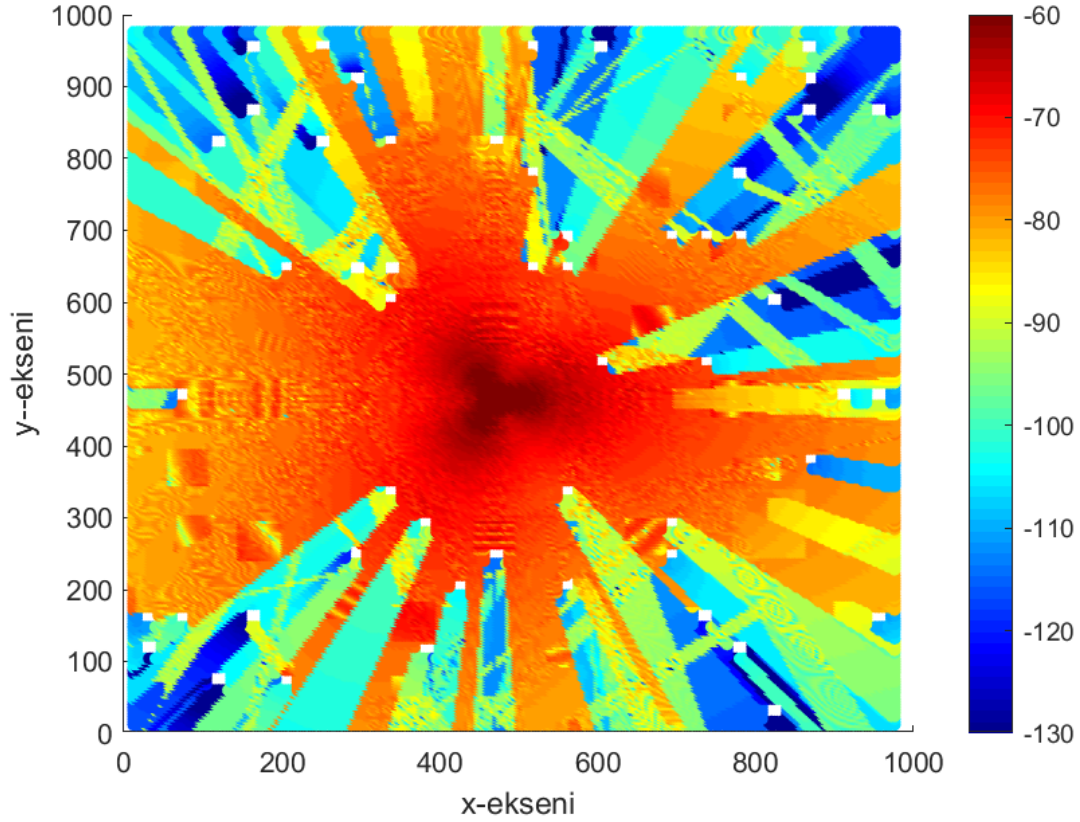
Şekil 2.9 Sinyal gruplarının 32 metredeki güçleri (dB)



Şekil 2.10 Üç sektörün sadece LOS-NLOS durumlarında 32 metrede sunulan kapsama (dB)



Şekil 2.11 Her bir sektörden 32 metrede yayılan sinyallerin toplam güçleri (dB)



Şekil 2.12 32 metre irtifada toplam alınan güç (dB)

### 2.3. Havadaki Sinyal Güç Profilinin İncelenmesi

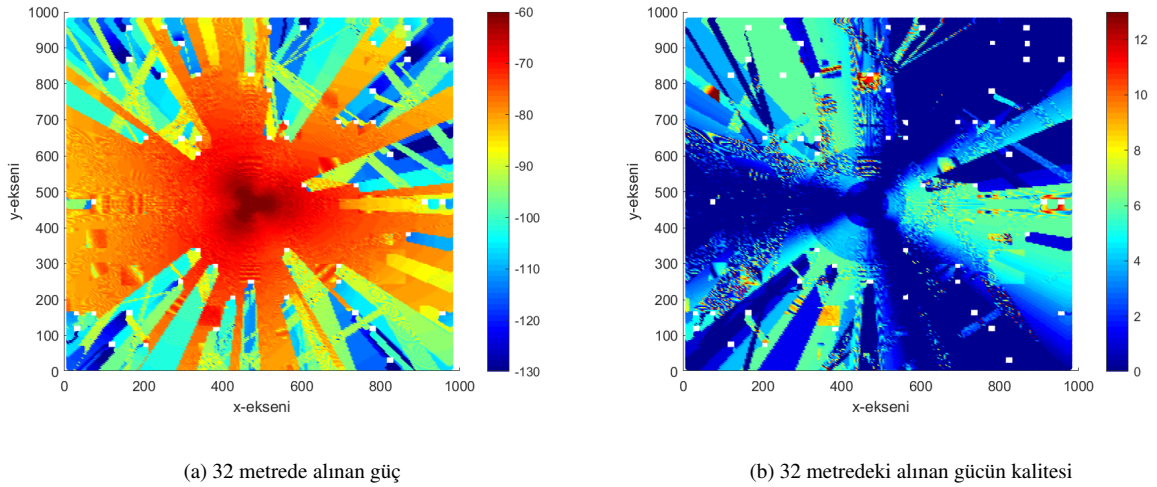
Modeldeki örnek irtifalardan biri şu şekilde incelenebilir. 32 metre için LOS sinyal grubunda bulunan ışınlar, bu irtifada ilk 120-200 metrelik bölgede daha küçük çıkış açılarından ve antenin yere eğik olmasından dolayı düşük anten kazançları görür ve çok güçlü bir sinyal gücü sağlayamaz. Ancak bu durum kat edilen yolun kısa olması ve yatayda kat edilen mesafenin artması sonucu sinyallerin dikey çıkış açısı antenin ana-hüzmesinde iyi bir rota izler. Daha stabil ve zayıf bir kayıp görülür.

LOS grubu üzerinde binaların yan yüzeylerinden yansıyan sinyal grubunun etkisi çok düşükken, dikey yansıma grubunun etkilerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun iki sebebi vardır. Antenlerdeki aşağıya doğru olan eğilmeye bağlı olarak çıkış gücünün

artması ilk sebeptir. Dikey yansımaya grubunun aldığı yolun yatay yansımaya grubunun aldığı yola kıyasla daha kısa olması da ikinci sebebi olarak gözlemlenmiştir.

Yatay yansımaya grubunun etkileri alçak irtifalar (32 m, 36 m , 40 m) değerlendirildiğinde baz istasyonuna olan 200-400 m aralığında daha sık görülmektedir. Daha uzak mesafelerde bu grubun sinyal güçlerinin düştüğü, bunun asıl sebebinin de yaşanan yol kabı ve değişken çıkış açıları olduğu gözlemlenmiştir. Etkileşim sayısı yakın bölgelerde artırılarak daha detaylı incelemeler farklı modellerde kullanılabilir. Düşük irtifalar için yatay yansımaya grubu iki komşu sektörün birbiri üzerine bazı aralıklarda girişim yaratması ile sonuçlanabilir. Bu durumdan ilk 3-4 blokluk mesafede bulunan binalar ve bu binalardan gerçekleşen yan yüzey yansımaları sorumludur.

Dikey yansımaya grubunun davranışını özetleyecek olursak, yansımalar çatılardan gerçekleşebilir. Çatıdan gerçekleşen yansımaya sinyalleri antenlerin doğrultulduğu bölgelerde daha güçlü olur. Bu durumda sinyal performansının arttığı bölgeler gözlemlenmiştir. İlk 5 blokluk mesafede bulunan binaların yükseklikleri bu durum için belirleyici parametredir. 32 metrede alınana toplam güç ve SIR değerleri Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13 Sinyal gruplarının 32 metredeki güç değerleri ve Sinyal/Girişim oranı (dB)

Sinyalin bağılı olduğu hücreden aldığı gücün diğer hücrelerden alınan toplam güce oranı Sinyal/Girişim oranını (SIR'ı) verir. Her sektör anten,  $\phi$  açısında  $0^\circ$  (sektör-1),  $120^\circ$  (sektör-2) ve  $240^\circ$  (sektör-3) yönlerine konumlandırılmıştır. Bu sayede her antenin diğer iki antenden daha güçlü olduğu üç bölge oluşmuştur. Baz istasyonlarının baktığı yönlerde alınan güç değerlerinin, diğer iki hücreden aldığı toplam güç değerlerine oranı Denklemler (25)-(27)'de her sektör için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Her sektör için SIR yönünden incelemeler yapılmıştır.

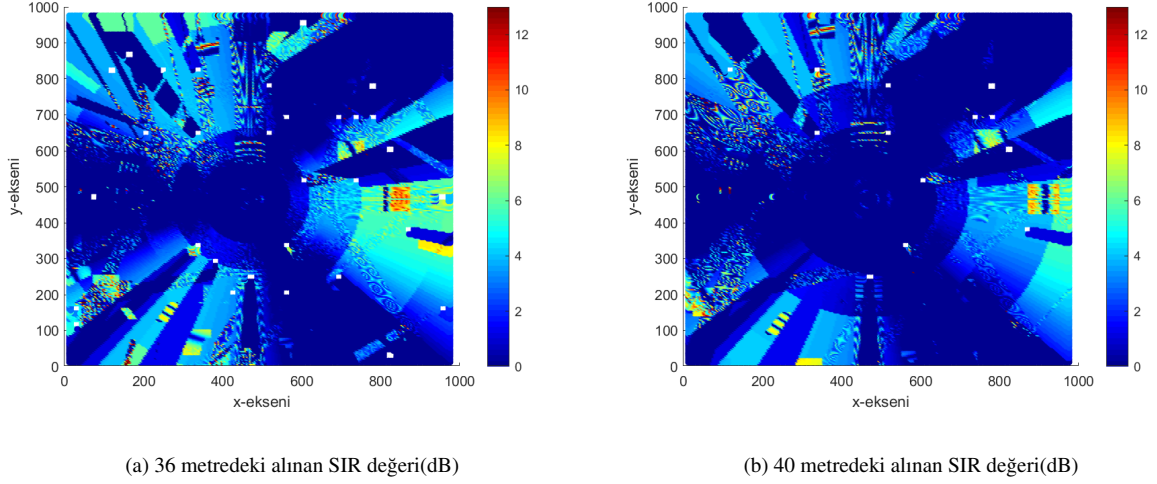
$$SIR_{s1} = \frac{P_{s1}}{P_{s2} + P_{s3}} \quad (25)$$

$$SIR_{s2} = \frac{P_{s2}}{P_{s1} + P_{s3}} \quad (26)$$

$$SIR_{s3} = \frac{P_{s3}}{P_{s1} + P_{s2}} \quad (27)$$

Antenlerin ana hüzmelerinin yatayda baktığı yönlerde çok daha iyi SIR sonuçları verir. Dikey yansıma etkileri düşük irtifalarda açık bir şekilde görülür. Sinyal gücü ve SIR değerleri kullanılarak incelenmiştir. SIR incelemesi de dahil edildiğinde 44 metreye kadar olan irtifalar drone uygulamaları için ilk 200 metrelik mesafenin dışında 4-6dB aralığında performans sağlar. Bir önceki paragrafta bahsedilen dik yansımaların etkileri yakın mesafede yapıcı/yıkıcı olarak görülebilir. İrtifa artışı gerçekleştikçe baz istasyonlarından çıkan sinyaller yönlü anten kazançlarından yeterince faydalanamaz ve 50 metreden yüksek olan irtifalardaki ortalama SIR değerleri bu sebeple 2dBden daha düşüktür.

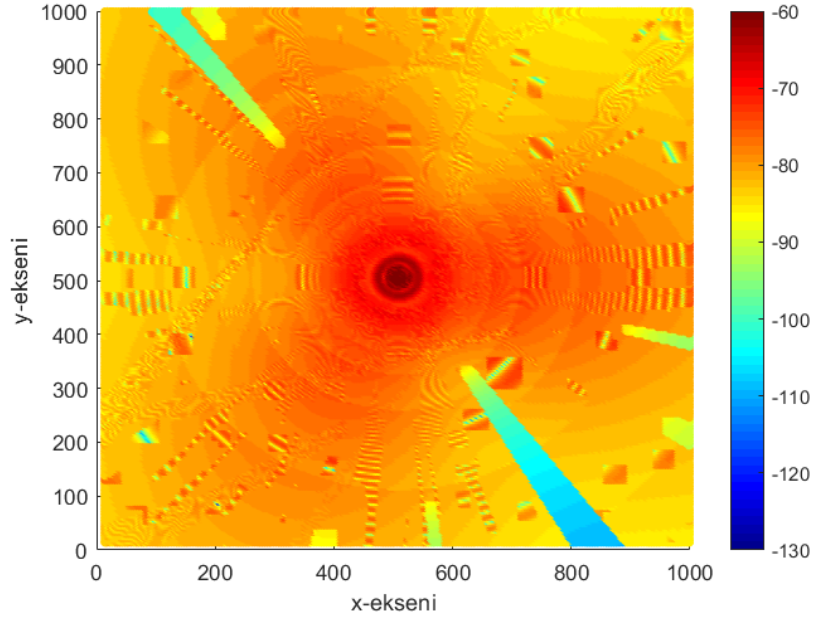
SIR durumları bölgedeki anten sayılarına ve bölgeye bağlı olduğu için bu model sonucunda 32, 36 ve 40 metre irtifalarının alıcılar için tek baz istasyonlu bir senaryo değerlendirildiğinde antenlerin baktıkları bölgede İHA haberleşmesi için çok daha iyi performans verdiği görülmüştür. İrtifa arttıkça SIR'da görülen profil merkezden gitgide uzaklaştığı Şekil 2.14'te verilmiştir. Model sonucu elde edilen veriler modellerin değerlendirilmesi bölümünde verilmiştir.



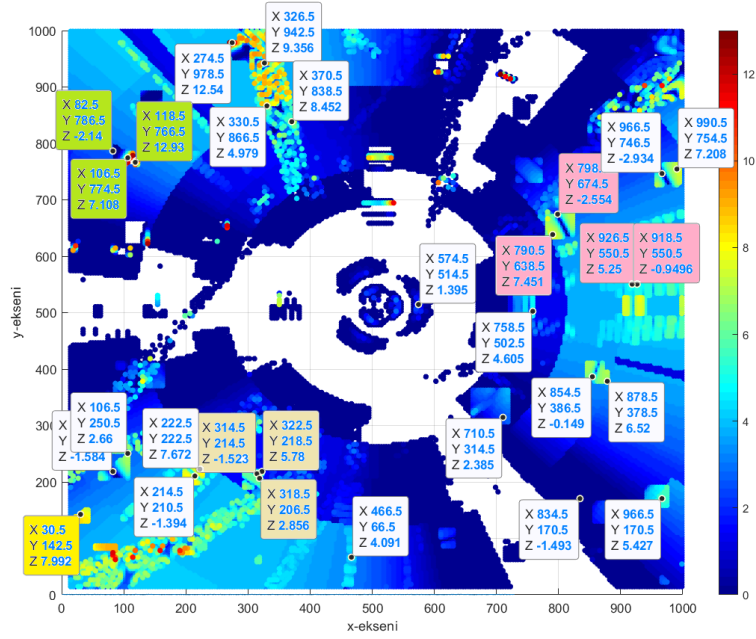
Şekil 2.14 36 m ve 40 m SIR değerleri (dB)

Neredeyse 1'e yakın LOS ihtimali bulunan Banliyö senaryosu için çoğu irtifada dikey yansımaların etkileri görülür. Bu etkiler sinyal gücünde 5-14 dB arası değişimler yaratabilir. Banliyö bölgelerindeki ortalama baz istasyonu yüksekliği 15-30 m aralığında değişebilir. Senaryonun daha gerçekçi sonuçlar vermesi için gerçek hayatta olduğu gibi anten yüksekliği 20 m olarak güncellenmiştir. Buna rağmen dikey yansıma alanı kentsel bölgede verilen örneğin daha geniş halidir. Bina boyutları daha küçüktür ( $W = 12$  m), sokak mesafeleri ise daha büyüktür ( $S = 25$  m). Baz istasyonuna yakın olan binaların çoğunun çatısından gerçekleşen dikey yansımalar sonucunda 200 metre yarıçapı olan bölge için sinyal performansı SIR cinsinden çok düşüktür. Yakın binaların çatısından gerçekleşen yansımaların görüldüğü bölgelerde SIR 3 dB'ye kadar yükselebilir. 200 metrelik mesafe aşıldığında çatı ve yer yansımalarının etkileri daha net görünmeye başlar. SIR değerlerinde 9 dB değerine ulaşan geçişler görünür. Bu da yer yansımalarının o bölgedeki etkisinin açık bir örneğidir. 350 metreyi aştığımız durumlarda da yer yansımalarına bağlı etkiler düşük irtifalarda net bir şekilde görülür. Banliyö ortamının hazırlanmış modele uygunluğu incelenmiş, çatı yüksekliklerinin model üzerindeki etkileri incelenmiştir. Son olarak Şekil 2.15'te banliyö bölgesi için 32 metrede alınan güç değerleri gösterilirken alınan güç

değerlerinde dikey yansımaların etkileri net bir şekilde görülmüştür. SIR değerleri ve bu değerlerdeki ani değişimler Şekil 2.16’da verilmiştir.



Şekil 2.15 36 metrede alınan güç (dB)



Şekil 2.16 36 metredeki SIR (dB)

Görüldüğü üzere dikey yansımaların yarattığı varyasyon çoğu bölgede sınırlı mesafeler için iyi performans yaratmıştır. Bu değişimin daha gerçekçi modeller ve saha ölçümleri ile daha detaylı olarak incelenmesi gerekir. 500 metrelik simülasyon mesafemizden daha uzağa gidildiğinde düşük irtifalardaki yer yansımasının yüksek irtifalarda da etkileri incelenebilir. Binaların çatı şekillerine farklı yapılar katılarak daha gerçekçi bir model oluşturulabilir.

Bir sonraki bölümde kırsal bir senaryo için hazırlanmış ve test edilmiş olan ikinci model anlatılır. Sahayı, anten kazançlarını ve ek zayıflamayı modellerken kullanılan farklı yaklaşımları içerir.

### 3. MODEL 2 - DENEYSEL ÖLÇÜMLERE DAYALI MODEL

Günümüzde, hücresel bağlantılı drone operasyonları ve havadan mobilite gereksinimleri, 5G sistemlerine dönüşmeye çalışan mobil ağ operatörleri için büyük önem taşımaktadır. Konunun öneminden hareketle, havadaki kapsamanın analizi için deterministik bir model oluşturulmuştur. Bu bölümde yapılan çalışma ve bu çalışmanın sonuçları [45] numaralı konferans bildirisi olarak yayınlanmıştır.

Bu modelin ilk kısmı, saha testinin yapıldığı bölgenin özelliklerini, modelde kullanılacak parametrelerin belirlenmesini ve bu parametreler kullanılarak iki-ışın modeline yapılan ekleme sonucunda ortaya çıkan matematiksel denklemleri içerir. Modelin ikinci kısmı kırsal bir bölgede 50 m, 80 m, ve 110 m irtifalarında gerçekleştirilmiş olan saha ölçümlerinin, model çıktıları ile karşılaştırmalarını ve analiz yöntemini içerir ve Bölüm 4.2’de açıklanmıştır.

Alınan verilerin enlem ve boylam değerlerindeki sapmayı olabildiğince düşürmek ve doğru bir şekilde veri toplayabilmek için, aynı uçuş rotasında fakat farklı irtifalarda uçabilen, otomatik pilot özelliğine sahip bir dron kullanılmıştır. Dron platformunun üzerine sabitlenmiş bir Android Akıllı telefon içinde bir ölçüm yazılımı kullanılarak, baz istasyonlarının sunduğu ağın anahtar performans indikatörlerini (Key Performance Indicators - KPIs) toplanmıştır. Bu indikatörler sırasıyla; sinyal gücü açısından (Referans Sinyali Alınan Güç; RSRP, Alınan İşaret Güç Göstergesi; RSSI), sinyal kalitesi yönünden (Alınan Referans Sinyal Kalitesi; RSRQ), gecikme süresi, paket kaybı, DL/UL verimi, modülasyon seviyeleri ve hücreden hücreye geçiş performans metrikleri şeklindedir.

Havada yapılan ölçümler, İstanbul’un Asya yakasında belirlenen bir kırsal/banliyö bölgesinde, tamamen LTE ağı ve hizmet sürekliliği altındaki bölgede, iki hücresel kule arasında yapılmıştır. Bu çalışma sırasında elde edilen bulgular ve deneyimler, buradaki ağ operatörünün havadaki radyo ağı optimizasyonu ve dikey kapsama amaçları açısından da



kritik öneme sahiptir. İHA tabanlı ölçüm detayları ve baz istasyonu bilgileri bir sonraki altbaşlıkta verilmektedir.

### **3.1. Matematiksel Model**

Tipik bir kentsel ortamda, bir radyo sinyali sabit bir kaynaktan iletilir. İletilen sinyalin kopyaları, diğer bir deyişle çoklu yol bileşenleri, iletim ortamındaki bir çok objeden yansyarak, kırılarak, saçılarak oluşabilir. Birinci bölümde bu sinyallerin yaşayabileceği değişimlerden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Alıcı tarafına gelen bu çoklu yol bileşenleri, yapıcı ve yıkıcı bir biçimde toplanarak alınan sinyal gücünde varyasyonlar yaratır. Bu durum hem iç hem de dış ortamlar için geçerlidir. Işın izleme yöntemiyle bu çoklu yol bileşenlerini modellemek diğer tekniklere nazaran daha kolaydır. Bu yöntem temel olarak dalga cephelelerini(wavefront) basit parçacıklar olarak temsil ederek elektromanyetik dalgaların yayılımını yaklaşık bir şekilde modellemek için kullanılabilir. Buna ek olarak basit geometrik formüller yardımı ile bu işlem kolaylaştırılabilir [14].

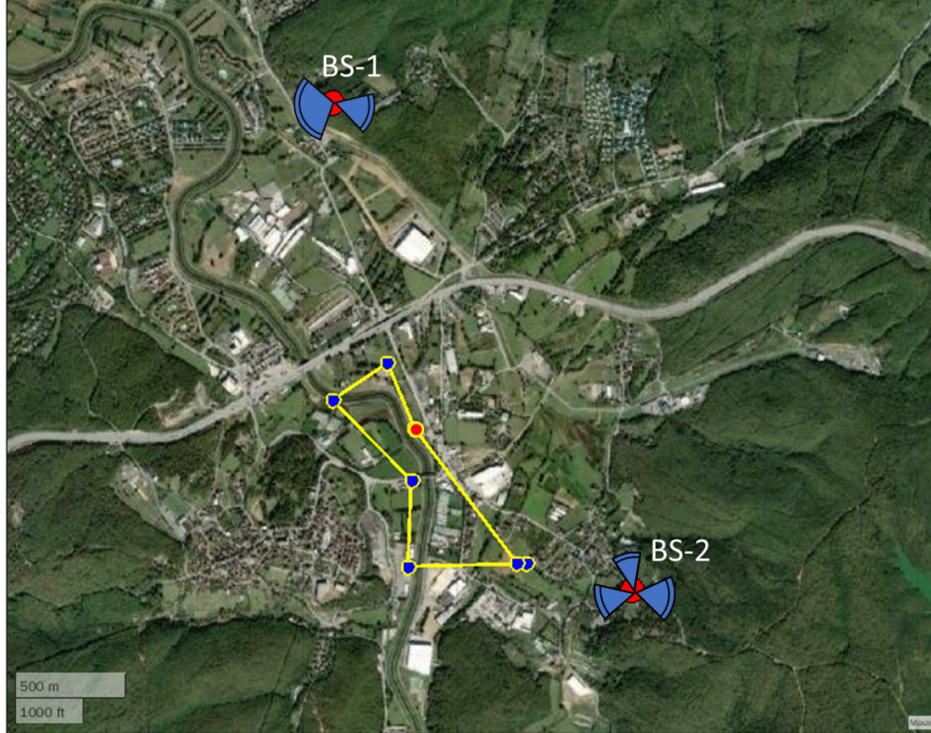
Radyo dalgası yayılımını ışın izleme yöntemi kullanarak simüle etmek ne kadar kolay olsa da, esas olarak iki dezavantaja sahiptir. Birincisi sahaya yönelik detaylı bir veri tabanı gereklidir. Veri tabanının güncel olmadığı durumlarda sahaya yönelik yapılmış değişiklikler atlanacaktır ve bu durum büyük hatalar doğuracaktır. Bu veri tabanının geçerliliği yoksa, o zaman yeni bir veri tabanına ihtiyaç duyulur. Sahanın detaylı bir şekilde modellenmesi gerekir. İkinci dezavantaj ise önceden bahsettiğimiz ağır hesaplama yüküdür. Işın izleme yönteminde kullanılan ışınların sayısı arttığı takdirde hesaplama yükünde daha radikal artışlar görülür. Aynı zamanda ışınların yayılma mekanizmalarında yaşanacak etkileşimlerin kullanılan ışın izleme modelinde sınırlandırılması gerekir. Modeldeki her bir ışının kaç etkileşimden sonra duracağı da tartışmaya açık bir konudur. Bu çalışma, kırsal bir alanda İHA iletişimi için yol kaybını hesaplamaya yönelik deterministik bir metodoloji önermektedir.

Sahaya yönelik bilgilerimizin çok sınırlı olması ve elimizde hazır bir veri tabanın bulunmaması büyük bir problem yaratmaktadır. Baz istasyonlarında kullanılan antenlerin

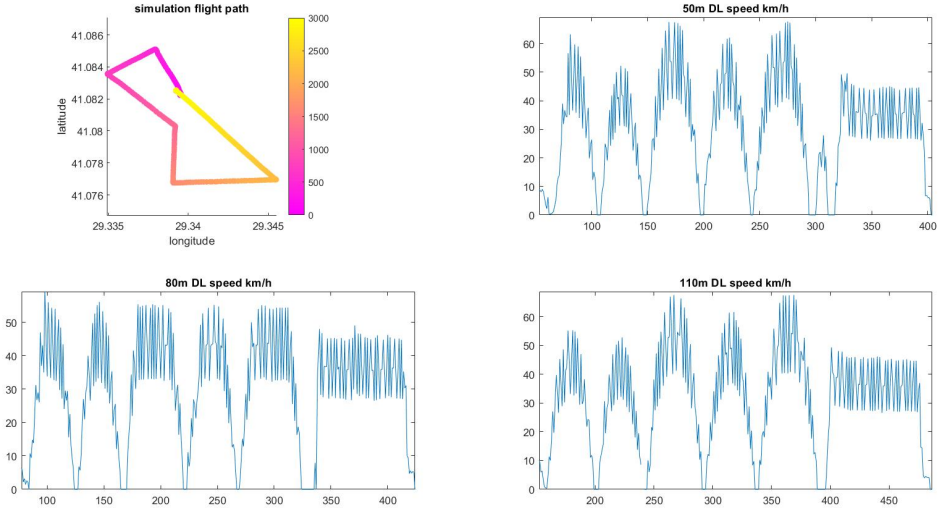
gerçek anten paternleri, sahadaki bitki örtüsünün ve toprağın elektriksel özellikleri mevcut değildir. Modeli oluşturmak için sahayı ve baz istasyonlarını modellerken ışın izlemenin dezavantajlarından kurtulmak amacıyla, ihtiyaç duyulan bilgiler üç farklı ITU-R dökümanı kullanılarak tamamlanmıştır [47–49].

Alçak İrtifa Platformları için güvenlik kısıtlamaları ve yasal izin nedeniyle, çalışma sırasındaki simülasyon ve ölçümler için drone irtifaları 50 m, 80 m ve 110 m olarak belirlenmiş ve her irtifa için sadece birer kez hava testleri gerçekleştirilmiştir. Uçuş yolu xy düzleminde sabittir, bu da normal uçuş senaryolarının aksine daha küçük bir veri seti ile modelin doğrulanmasını kolaylaştırır.

Her veri noktası birer saniyelik periyotlarla belirlenmiştir. Uçuş yolu sarı olarak verilmiştir; kalkış ve iniş noktaları sırasıyla kırmızı ile Şekil 3.1’de verilmiştir. Her iki istasyon için, uçuş yolunun büyük bir kısmı, hizmet veren antenin yatay Yarım Güç Işın Genişliği (HPBW) dışındadır. Bu durumu gösteren gerçek zamanlı test ve simülasyon alanı aşağıda verilmiştir.

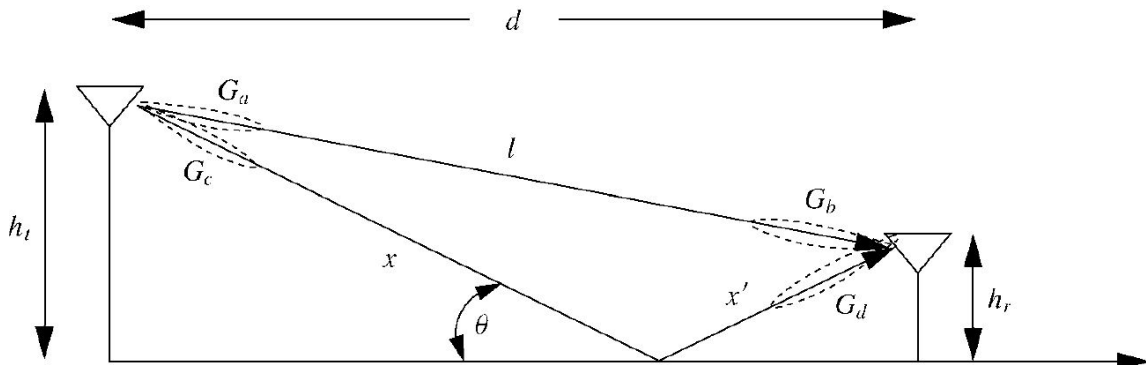


Şekil 3.1 Gerçek zamanlı test ve simülasyon alanı



Şekil 3.2 Uçuş Rotası ve Dron Hızları

ITU-R teknik raporlarında önerilen yaklaşımlara değinmeden önce dronun saha testindeki maximum hızı 68 km/h olarak ölçülmüştür ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu hızın yarattığı Doppler frekans kaymaları çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Son olarak saha ölçümleri 800 MHz, 1800 MHz ve 2600 MHz LTE-Advanced bantlarında yapılmıştır.



Şekil 3.3 İki-Işın Modeli [14]

Kırsal senaryolar düşünülduğünde, etkileşimli nesnelerin sayısı kentsel senaryolara göre çok daha azdır, bu nedenle çok yollu bileşenlerinin sayıları sınırlıdır. Buna dayanarak saha testinin yapıldığı bölgede olası yer yansımalarının bitki örtüsü bulunan bölgelerden

gerçekleştiği harita üzerinden incelenmiş, modelde ağırlıklı olarak Görüş Hattı (LOS) sinyalleri ve yer yansıma (GND) sinyallerinin kullanılacağı belirlenmiştir. Buna dayanarak senaryomuzun iki-Işın modele benzer bir yapıda olacağı öngörülmüştür. Kırsal senaryo için yapılan çalışmanın çıkış noktası Şekil 3.3'te verilen iki-ışın modeldir [14].  $h_t$  ve  $h_r$  verici ve alıcı yüksekliklerini,  $l$  ve  $x + x'$  sırasıyla LOS ve GND ışınlarının kat ettikleri toplam yolu,  $\theta$  yansıyan sinyalin yer yüzeyi ile arasında kalan açığı ifade eder.  $G_a$  ve  $G_b$  görüş hattında bulunan sinyalin verici ve alıcı tarafında göreceği anten kazançlarını,  $G_c$  ve  $G_d$  yerden yansıyan sinyalin verici ve alıcı tarafında göreceği anten kazançlarını ifade eder.

$$P_r = P_t \left[ \frac{\lambda}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_l}}{l} + \frac{\Gamma \sqrt{G_r} e^{-j\Delta\phi}}{x + x'} \right|^2 \quad (28)$$

Denklem (28)'deki parametreler:  $P_t$  verici gücü,  $\lambda$  dalga boyu,  $\Gamma$  yer yansıma katsayısı,  $G_l$  ve  $G_r$ , sırasıyla LOS yönündeki ve GND yönündeki verici ve alıcı anten kazançlarının çarpımlarıdır.  $\Delta\phi$ , LOS ve yerden yansıyan sinyaller arasındaki faz farkıdır.  $l$  ve  $x + x'$  LOS ve GND ışınları için kat edilen toplam mesafedir.  $P_r$  alınan güçtür.

### 3.2. Sektör Antenleri Modelleme Yöntemi

Gerçek antenlerle ilgili belirli bilgiler mevcut olmadığında, girişim değerlendirme senaryoları için referans radyasyon modelleri kullanılmalıdır [47]. Yönlü anten kazancı için tepe yan lob yaklaşım (peak side lobe approximation) modeli kullanılabilir. Sabit serviste ve mobil serviste kullanılan antenlerin referans modelleri [47]'te verilmiştir ve 400MHz'ten 70 GHz'e çok yönlü ve sektörel antenler için tepe ve ortalama kazanç modellerini içerir. Kullanılan model parametreleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

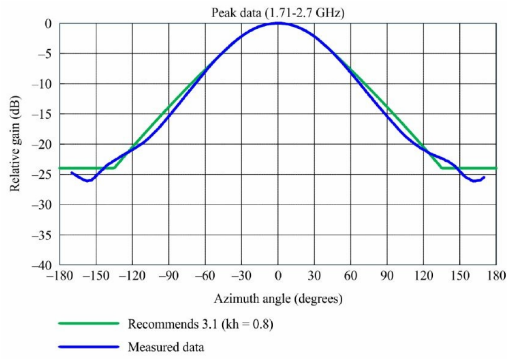
Modelde açılara bağlı anten kazancı hesaplanırken, maksimum anten kazancı, normalleştirilmiş açıda yatay düzlemindeki referans anten kazancı, yatay kazanç sıkıştırma oranı ve normalleştirilmiş açıda elevasyon düzlemindeki referans anten kazancı kullanılır. Denklem (29)'te verildiği şekilde hesaplanır.

Çizelge 3.1 Denklem 3.1'in Ana Parametreleri

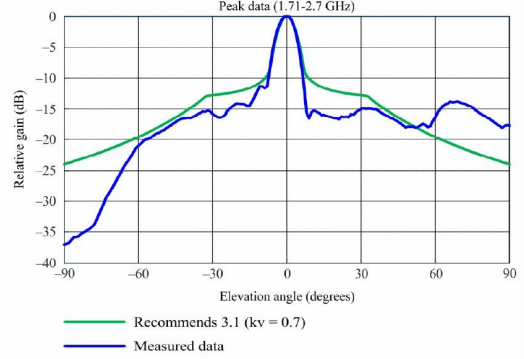
Sembol	Açıklama
$G(\theta, \phi)$ (dB)	$(\theta, \phi)$ açılarındaki relatif kazanç
$G_0$ (dB)	maksimum anten kazancı
$G_{h_r}(x_h)$ (dB)	normalleştirilmiş açıda yatay düzlemindeki referans anten kazancı $(x_h, 0)$
$G_{v_r}(x_v)$ (dB)	normalleştirilmiş açıda elevasyon düzlemindeki referans anten kazancı $(x_v, 0)$
$x_h$	$\phi / \phi_{3dB}$
$x_v$	$\theta / \theta_{3dB}$
$R$	yatay kazanç sıkıştırma oranı azimut açısı $0^\circ$ 'den $\phi$ ye kaydığında

$$G(\theta, \phi) = G_0 + G_{h_r}(x_h) + R.G_{v_r}(x_v) \quad (29)$$

Bu işlem sonucunda oluşan referans anten radyasyon modeli, antenin maksimum kazancından yan-lobların tepe noktalarına doğru dağılır. [47]'de verilen referans anten kazanç modelinin(normalize edilmiş) gerçek ölçümlerle kıyaslanması ve simülasyon modelinde kullanılan anten kazançları sırası ile Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.

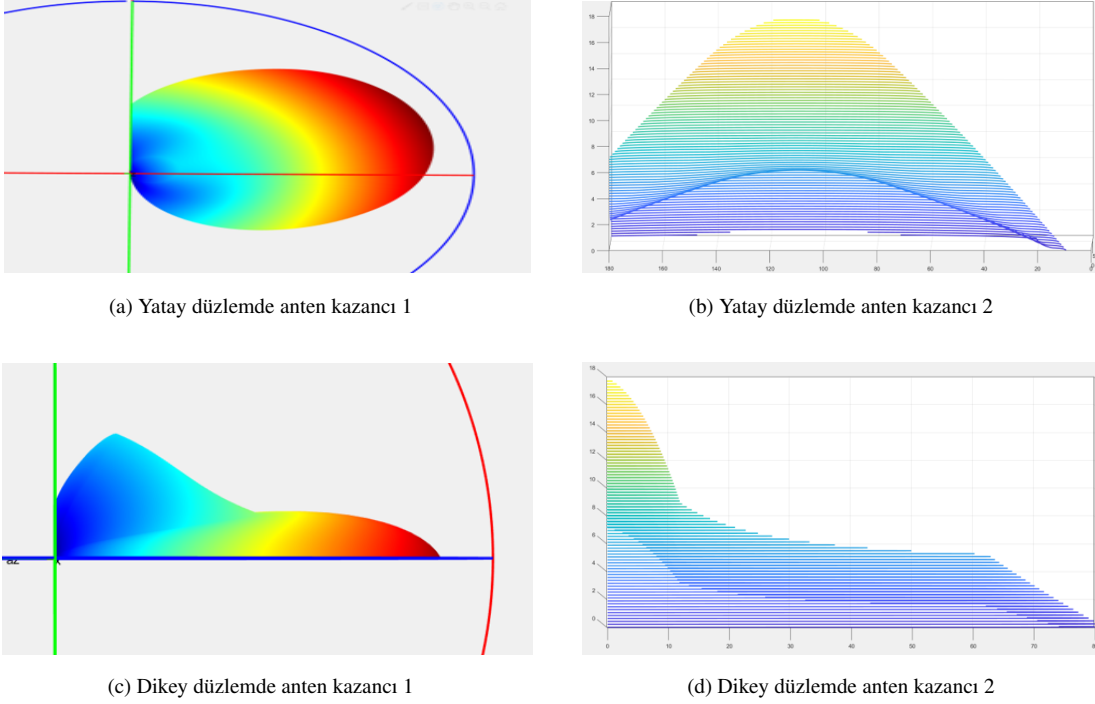


Yatay düzlemdeki anten kazancı



Dikey düzlemdeki anten kazancı

Şekil 3.4 Yatay ve Dikey düzlemlerindeki referans anten modeli



Şekil 3.5 Simülasyonda kullanılan anten kazancı modeli

Bu istasyonun anteninin aşağı eğimi de dikkate alınır, çünkü mekanik ve elektriksel eğimler Baz İstasyonu için eksen dışı açığı ve göreceli  $\theta$  açısını etkiler. Göreceli  $\theta$  açısının nasıl hesaplanacağı [47]'te verilmektedir.

Modeldeki sinyaller TM dalgaları olarak kabul edilmiştir. Yer yansıma katsayısı Denklemler (30)-(31) kullanılarak bulunur.

$$\frac{\sin\theta_t}{\sin\theta_e} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2}} \quad (30)$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2}\cos(\theta_e) - \sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_t)}{\sqrt{\varepsilon_2}\cos(\theta_e) + \sqrt{\varepsilon_1}\cos(\theta_t)} \quad (31)$$

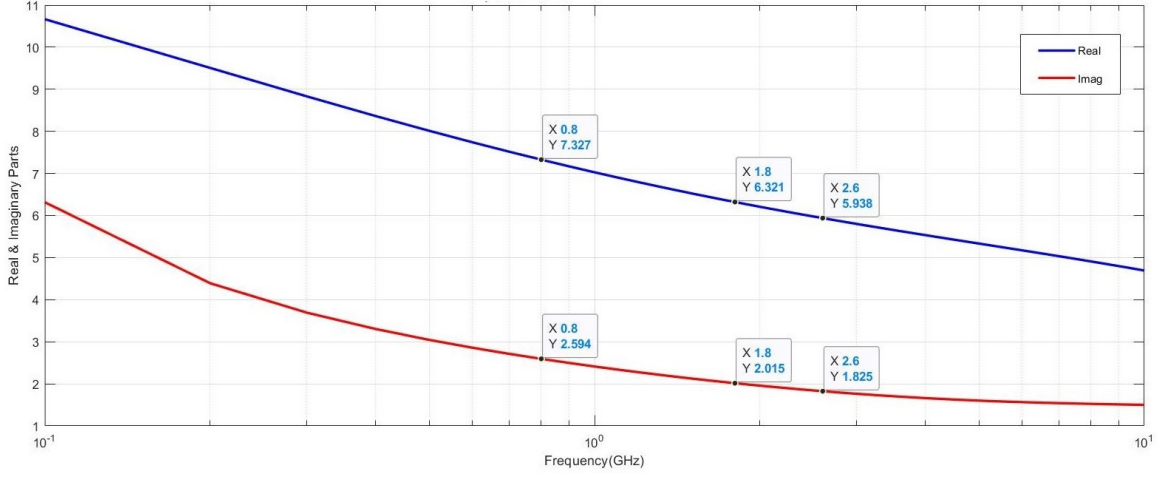
$\theta_e$  ve  $\theta_t$  sırasıyla gelen dalganın ve iletilen dalganın açılarıdır. Havanın dielektrik katsayısı  $\varepsilon_1$  1 olarak kabul edilir. Zeminin dielektrik katsayısı  $\varepsilon_2$  yaklaşık 15'tir ve bu genellikle toprak

veya yol yüzeyleri için saf bir dielektrik olarak kabul edilir [13]. Bitki örtüsü için bu değer daha değişkendir.

### 3.3. Bitki Örtüsüne Bağlı Ek Zayıflama

Yer yansımalarının gerçekleştiği noktalar basit geometrik formüller yardımı ile saptandıktan sonra baz istasyonu lokasyonlarından yer yansıma noktalarına ışınlar çizilir. Işınlardan çıkış açıları ve yansıma yüzeyinin normali ile yaptığı açılar hesaplanır. Yansıma noktalarının çoğu bitki örtüsüne denk gelmektedir. Yansıma katsayısının hesaplanabilmesi için bitki örtüsünün elektriksel özelliklerine ihtiyaç vardır. Ne yazık ki alt yüzey bitki örtüsü nadiren homojendir. Dikkate alınması gereken farklı kalınlıklarda ve farklı elektriksel özelliklerde çok sayıda katmandan oluşan bitki örtüsünün dielektrik katsayısına ulaşabilmek için efektif parametreler belirlenir. Bitki örtüsünün donma sıcaklığının üzerindeki karmaşık dielektrik sabiti için tahmin yöntemleri sağlar. Bitki örtüsünün karmaşık relatif dielektrik sabiti, frekansın  $f$  (GHz), sıcaklığın ( $^{\circ}\text{C}$ ) ve bitki örtüsünün gravimetrik su oranının  $M_g$  bir fonksiyonudur. Hava testlerinin yapıldığı sırada sıcaklık 22-23 derecedir. Toplu bitki örtüsünde ağırlıklı olarak meşe ağaçları vardır ve test bölgesinde toprak türü kahverengi orman toprağıdır. Gravimetrik su içeriği parametresi ortama bağlıdır ve ölçüm zamanına göre değişir. Bu parametreyi ölçmenin birkaç farklı yolu vardır. Toprağına yönelik bu ölçümler saha birimleri tarafından yapılamadığı için  $M_g$  parametresi, zemin özelliklerinden biri olan sınırlı su hacmi fraksiyonu ( $v_{fw}$ ) kullanılarak simülasyon modeli için yaklaşık olarak Denklem (32) yardımıyla hesaplanabilir. Sınırlı su hacim oranı yüzey gerilimi gibi kuvvetlerle toprak parçacıklarına bağlanan sudur. Su tabakasının kalınlığının ve dielektrik sabitinin ve gevşeme frekanslarının bilinmediğini belirtmemiz gerekir. Bölgesel toprak tipi için ( $v_{fw}$ ) 0,17 ile 0,25 arasında değişir. Burada 0,21 olarak kabul edilmektedir. O zaman  $M_g$  0,26'ya çok yakın bir değer olarak çıkar. Model için  $M_g$  0,26'ya yuvarlanmıştır. [48] dökümanının 5.3.1 altbaşlığında çok daha detaylı açıklamalar mevcuttur.

$$v_{fw} = M_g(0.5M_g - 0.076) \quad (32)$$



Şekil 3.6 Bitki örtüsü relatif karmaşık dielektrik parametresi

Üç çalışma frekansı için bitki örtüsünün ilgili karmaşık relatif dielektrik katsayısı Çizelge 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.6’da bitki örtüsü için relatif dielektrik sabitinin farklı frekanslardaki hesaplanmış değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Bitki örtüsü için hesaplanan karmaşık relatif Dielektrik Sabiti

Frekans	Hesaplanan dielektrik parametresi
2600 (MHz)	5.938 - 1.825i
1800 (MHz)	6.321 - 2.015i
800 (MHz)	7.327 - 2.594i

Yerden yansıyan sinyal ile ilgili olarak, ek yol kaybının bitki örtüsünden kaynaklandığı düşünülmelidir. Bitki örtüsüne dayalı farklı yol kayıp modelleri ITU-R tarafından verilmiştir [49]. Burada verilen modeller basitten karmaşığa doğru sıralanmıştır. İlk modelde radyo sinyalinin ormanın içinde yatay olarak ilerleyişinde yaşanacak zayıflama dB cinsinden verilirken, ikinci modelde uydular için yerden havaya daha büyük eğimle yükselen bir model mevcuttur. Üçüncü model ise ağaçların çevresinden kırılan sinyalleri daha ağır bir formatta modellemiştir. Yaprak boyutundan gövdeden dışarıya doğru ulaşan dal sayılarına kadar modellenilebilir.

Bitki örtüsünün yarattığı ek zayıflamayı bulabilmek için bir önceki paragrafta verilen ilk zayıflama modeli seçilmiştir, çünkü ilk modelin sahaya uygunluğuna karar verilmiştir.



Yerden yansıyan ışının ormanlık alanda kat ettiği mesafe,  $d_v$ , bitki örtüsünün o bölgedeki ortalama yüksekliği, yerden yansıma açısı ve ormanın içinde ilerlediği yolda bulunan ağaç sayısı kullanılarak tahmin edilebilir. Bitki örtüsünün ortalama yüksekliği 3 m civarındadır ve yerden yansıyan ışının yolundaki ağaç sayısı 3 ila 10 arasında değişkenlik gösterir.  $\gamma$  dB/m cinsinden verilen çok kısa ormanlık yollar için belirtilmiş özel zayıflamadır.  $A_m$  bir terminal için maksimum zayıflamadır.  $\gamma$  ve  $A_m$  değerleri, ITU-R P.833 [49] belgesinden alınmıştır. Bitki örtüsünün varlığından kaynaklanan ek zayıflama,  $A_{ev}$ , farklı simülasyon noktalarında 4 ile 10 dB aralığında hesaplanmıştır.

$A_{ev}$  parametresi, modelimizi sonuçlandırmak için yerden yansıyan ışının payda kısmına eklenmiştir. Denklem (33), yalnızca iki farklı Baz İstasyonunun sadece birer hücresinden servis sunulduğu durumlarda İHA ekipmanı tarafından alınan güçlerin hesaplanması için geçerlidir.

$$P_r = P_t \left[ \frac{\lambda}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_l}}{l} + \frac{\Gamma \sqrt{G_r} e^{-j\Delta\phi}}{(x + x') \sqrt{10^{A_{ev}/10}}} \right|^2 \quad (33)$$

### 3.4. Havadaki Sinyal Güç Profilinin İncelenmesi

Ancak senaryolarımızda baz istasyonu ve hücre sayısı birden fazladır ve bu durumun dikkate alınması gerekir. Baz istasyonlarındaki antenlerin yüksekliklerinin ve yönlerinin birbirinden farklı olması havada daha değişken bir profil çıkartacaktır. Kullanılan antenlerin dikey yarı güç hüzmeye genişliği  $6^\circ$  ile  $8^\circ$  arasında, yatay yarı güç hüzmeye genişliği ise  $63^\circ$  ile  $67^\circ$  arasında değişir. İki baz istasyonu için ilgili anten bilgileri Çizelde 3.3'te gösterilmiştir. BS1/BS2 hangi baz istasyonu olduğunu, s1/s2 saha testinin yapıldığı bölgeye bakan sektörleri, yön antenin yatayda baktığı açığı ifade eder. BW bant genişliğidir. Frekans ve BW değerleri çizelgede MHz cinsinden verilmiştir.  $G$  antenlerin maksimum kazanç değerleridir ve dB cinsinden verilmiştir. Yükseklik, ilgili baz istasyonunda ve bu istasyonun ilgili sektöründe antenlerin sabitlendiği yüksekliği verir. Antenler üzerindeki elektriksel ve mekanik eğilmeler de E-tilt ve M-tilt olarak verilmiştir. Çizelgenin ilk satırı şu şekilde okunabilir: "1 numaralı baz istasyonunun birinci sektörü  $110^\circ$ 'ye doğrultulmuştur. 2600 MHz frekansında 20

MHz'lik bir bant genişliği sunar. Maksimum anten kazancı 18.1 dB ve buradaki sektör anten baz istasyonu üzerinde 57 metre yüksekliğine bulunur. Elektriksel eğilme (E-tilt) 0°, mekanik eğilme (M-tilt) 2° olarak verilmiştir”.

Çizelge 3.3 Sahaya etkisi olan baz istasyonlarına yönelik bilgiler

BS	Sektör	Yön	Frekans	BW	G	Yükseklik	E-tilt	M-tilt
BS1	s1	110	2600	20	18,1	57	0	2
BS1	s2	230	2600	20	18,1	80	0	2
BS2	s1	340	2600	20	18,1	50	0	0
BS1	s1	110	1800	20	21,0	57	0	2
BS1	s2	230	1800	20	21,0	80	0	2
BS2	s1	340	1800	20	17,2	50	4,4	0
BS2	s2	260	1800	20	17,2	50	3,4	0
BS1	s1	110	800	10	14,8	57	6	2
BS1	s2	230	800	10	14,8	80	2	2
BS2	s1	340	800	10	14,8	50	6,4	0
BS2	s2	260	800	10	14,8	50	2	0

Baz istasyonlarında bulunan her anten için göreceli anten kazancı değerleri, yansıma katsayıları ve bitki örtüsüne yönelik ek kayıplar hesaplanmıştır. Bu şekilde sahaya etkisi olan tüm sinyaller iki ışınla modellenmiştir. Görüş hattı sinyalleri ve yerden yansıyan sinyaller kullanılarak alınan toplam güç hesaplanabilir. Belirlenen frekansta servis sağlayan her bir anten için bu işlem her örnek noktada (üç farklı irtifada bulunan örnek noktalarımızda) tekrarlanır. Görüş hattı ve yerden yansıyan sinyallerin incelenen noktada farklı sektörlerden aldığı sinyallerin güçlerinin toplamı Denklem (34)'te verildiği şekilde hesaplanır. Bu alınan sinyaller birleştirilirken bitki örtüsüne bağlı olan ek kayıp yerden yansıyan sinyal grubunun yanına bir çarpan olarak eklenmiştir. Çoklu yol bileşenleri incelenen örnek noktalarda yapıcı/yıkıcı bir şekilde etki gösterebilir.

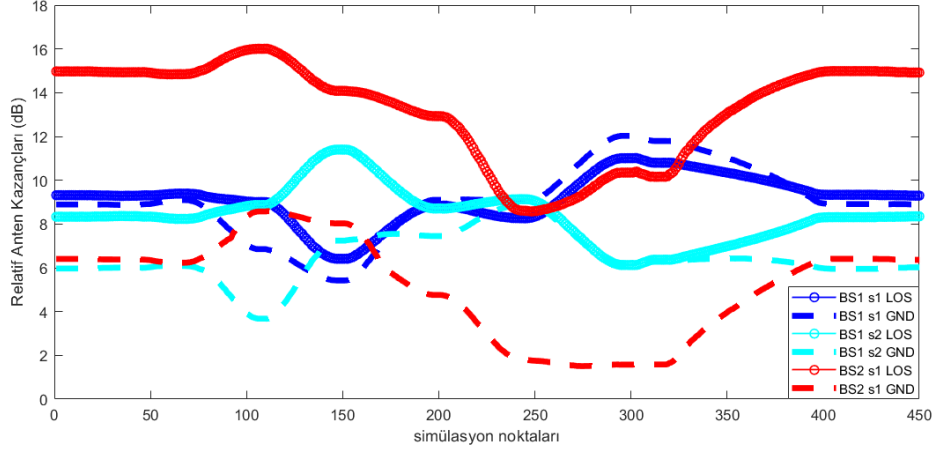
Örnek verecek olursak 50 m irtifasındaki her örnek nokta için taşıyıcı frekansımız 2600 MHz olduğu durumda Çizelge 3.3'te verilen ilk 3 anten etkilidir. Denklem (34)'teki 'n' değeri bu durumda 3 olacaktır.  $i = 1, 2, 3$  indeksleri Çizelge 3.3'te verilen ilk üç antenin incelen örnek noktalarda yarattığı toplam güçleri hesaplarırken kullanılır.  $P_t$  antenlerin iletim gücü,  $\lambda$  dalga boyudur. Bir örnek noktanın  $i$ 'nci antene olan görüş hattı mesafesi  $l_i$ , bu noktaya yerden yansıyarak ulaşan ışının kat ettiği toplam mesafe  $x_i$  olarak ifade edilmiştir. Görüş hattı ve yer

yansımasını ifade eden ışınların çıkış açıları belirlenir.  $G_{l_i}$  ve  $G_{r_i}$  değerleri  $i$ 'nci antenden bu noktaya gönderilen görüş hattı ve yer yansıması ışınlarının çıkış açlarına bağlı olarak değişen relatif anten kazançlarıdır ve Denklem (29) kullanılarak hesaplanır.  $A_{ev}$  (dB) bitki örtüsüne bağlı yaşanan ek zayıflama değeridir.  $\Gamma_i$   $i$ 'nci antenden çıkan ve yerden yansıyan sinyalin yansıma katsayısıdır. Denklem (34), 2600 MHz frekansı için 50 m'de bulunan bir örnek nokta için kullanılır ve bu noktada alınan toplam güç bulunur. Aynı işlem 50 m irtifasındaki tüm alıcı noktalarımız için tekrarlanır. İrtifa değiştirilerek (80 m ve 110 m) bu işlem tüm örnek noktalar için yapılır ve kaydedilir. Daha sonra diğer taşıyıcı frekanslarımız için aynı işlemler tekrarlanılarak model tamamlanır.

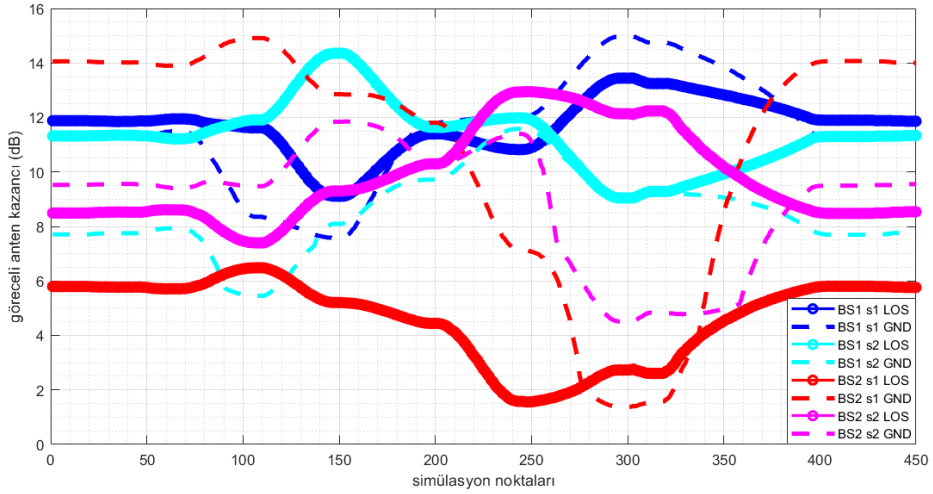
$$P_{sum} = 10 \log_{10} \left\{ P_t \left| \sum_{i=1}^n \left\{ \sqrt{G_{l_i}} \left[ \frac{\lambda}{4\pi l_i} \right] e^{-j2\pi \frac{l_i}{\lambda}} + \frac{1}{\sqrt{10^{A_{ev}/10}}} \sqrt{G_{r_i}} \Gamma_i \left[ \frac{\lambda}{4\pi x_i} \right] e^{-j2\pi \frac{x_i}{\lambda}} \right\} \right|^2 \right\} \quad (34)$$

Alıcı anten kazanç değerleri, simülasyonu basitleştirmek için 0 dBi olarak kabul edilmiştir. Baz istasyonu içinde bulunan komşu hücrelerin alınan güçte yarattığı varyasyonlar incelenmiştir. Bu yöntem, çoklu hücre senaryolarında RSRP, RSSI ve RSRQ değerlerini hesaplayabilmemiz için bize yeterli sonuçları vermiştir. Bu model deterministik bir model olmakla birlikte aynı zamanda harita-tabanlı bir modeldir. Modelin geliştirilebilmesi için farklı kırsal/banlı bölgelerinde saha testinin pek çok kez tekrarlanması gerekmektedir. 2600 MHz ve 1800 MHz bandında kullanılan sektör antenlerin LOS ve GND ışınları için relatif anten kazanç değerleri Şekil 3.7'de ve Şekil 3.8'de verilmiştir. Kesikli çizgiler LOS sinyallerinin, kalın çizgiler GND sinyallerinin örnek noktadaki relatif anten kazançlarını belirtir.

Model 2 için tezin bu bölümüne kadar anlatılan kısımları özetle üç farklı irtifa için yapılan ölçümleri, saha özelliklerini, modelleme yapılabilmesi için gerekli olan parametreleri ve kullanılan yöntemi kapsar. İki-ışın modeli [14] için bitki örtüsündeki ek zayıflama dahil edilmiş, kırsal senaryolar için alınan güç değerlerini hesaplayan bir yol hazırlanmıştır. İHA'nın uçuş rotasında örneklenen noktaların koordinatları kullanılarak baz istasyonlarına



Şekil 3.7 2600 MHz bandında relatif anten kazançları (dB) (50 m)



Şekil 3.8 1800 MHz bandında relatif anten kazançları (dB) (50 m)

olan mesafeleri, çıkış açıları, relatif anten kazançları gibi gerekli parametreler bulunmuştur. Bu parametreler kullanılarak örnek noktalarda alınan güç değerleri hesaplanmıştır. Şirket politikaları veri paylaşımına izin vermediği için alınan güç değerleri sadece model sonuçlarının gerçek verilerle kıyaslandığı bölümde verilmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar ile ölçüm verilerininin kıyaslaması Bölüm 4.2'de anlatılmaktadır.

2600 MHz ve 1800 MHz frekans bantlarında bant genişliği 20 MHz, 900 MHz frekans bandı için 10 MHz kabul edilmiştir. RSRP ve RSRQ hesaplamaları yapılmış, devamında kolay bir post-process işleminden geçirilmiştir. Bu işlem sonrası grafiklerdeki trendler incelenmiştir.

Burada trend dediğimiz şey aslında verilerin MATLAB'ın içinde hazır bir şekilde bulunan 'smooth', 'smoothdata' ve 'envelope' fonksiyonlarını kullanarak yumuşatılmasını ve izlediği artış azalış senaryolarını ifade eder. 'Smooth' operasyonu düzleme/yumuşatma anlamında kullanılabilir. Hareketli ortalama (moving average - MA) seçeneği MATLAB'ın kendi içerisinde tanımlı fonksiyonlarda veriyi yumuşatma yöntemi olarak kullanılmıştır. Bu trend analizi sonucunda İHA ekipmanının RSRP ve RSRQ verilerindeki değişimler, yaşadığı hücreler arası geçişler incelenmiştir. Eğer alıcı hücreler arası geçişi tetikleyecek düşük RSRQ seviyelerine doğru ilerliyorsa, sistem performansını yükseltmek için geçiş senaryosu daha erken farkedilebilir. Bu trend analizinin en önemli noktası yumuşatma işlemi yapılırken kullanılan pencere genişliğini doğru seçmektir. Büyük pencere seçimleri bazı önemli noktaların atlanması ile sonuçlanırken küçük pencere seçimleri birbirine yakın aralıklarda gerçekleşen ani değişimlere karşı incelemeyi savunmasız bırakır.

## 4. MODEL ÇIKTILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

İkinci ve Üçüncü bölümlerde hazırlanmış olan iki model için ayrı başlıklarda değerlendirmeler verilmiştir.

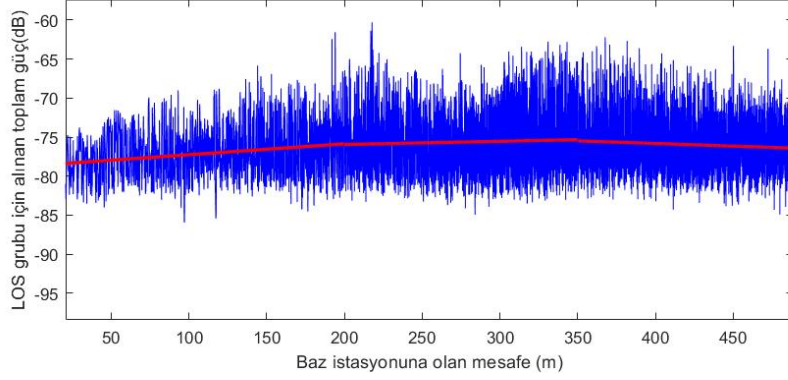
### 4.1. Model 1 - Işın izlemeye dayalı modelin çıktıları

Model 1, kentsel senaryoda farklı gruplamalar ve incelemeler yapmak için kullanılabilir. İncelenen irtifaların görüş hattında olma ve olmama durumları bir önceki bölümde incelenmiştir. Bu gruplama sonucunda görüş hattı grubunda olan sinyaller için alınan sinyal gücü, her irtifada ayrı ayrı değerlendirilir (farklı elevasyon açısı aralıklarına göre de bir inceleme yapılabilir fakat modelin amacı irtifaları kendi özelinde incelemektir).

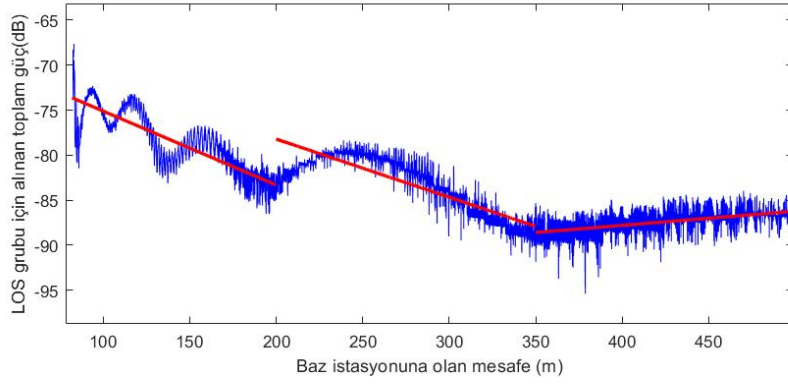
Kentsel senaryo için mesafeye göre sıralanmış ortalama alınan güç değerleri parçalı doğrusal denklemlere oturtulabilir. 32 m ve 112 m irtifalalarındaki alınan güç değerleri Şekil 4.1'de bu duruma örnek olarak verilmiştir. Eğer parçalı doğrusal denklemler birbiriyle bitişmiyorsa bunun asıl sebebi küçük mesafe aralıklarında elde edilen ortalama alınan güç değerlerinin sayısının, diğer mesafe aralığında bulunan güç değerleri sayısından daha fazla olmasıdır.

Bu işlemde önce örnek noktaların baz istasyonu noktasına olan mesafeleri belirlenir. Devamında LOS ve NLOS gruplarına ayrılan noktalar, baz istasyonuna olan mesafelerine göre sıralanır. Daha kolay bir modelleme yapılabilmesi amacıyla yakın, orta ve uzak olmak üzere 3 farklı gruba ayrılır. Modelde hangi mesafede hangi sinyal gücünün daha sık gerçekleştiği bu şekilde incelenir.

İlk aralıktaki noktalar, baz istasyonuna 200 metre uzaklıktaki noktalar grubudur. Bu noktaların bu aralıkta aldığı güç değerleri birinci doğruya oturtulurken kullanılır, ikincisi 200 m ve 350 m arasındaki güç değerlerini, üçüncüsüyse 350 m ve 500 m aralığında bulunan noktaların güç değerlerini birer doğru denklemine oturtur. Bu gruplar sinyal gücünün trendini gösterecek şekilde MATLAB içerisinde bulunan 'polyfit' ve 'fitdist' fonksiyonları yardımı ile hesaplanmıştır.



(a) Alınan güç değerlerinin mesafeye göre dağılımı (dB) (32 m - LOS)



(b) Alınan güç değerlerinin mesafeye göre dağılımı (dB) (112 m - LOS)

Şekil 4.1 32 m ve 112 m irtifalarında LOS grubunda alınan güç değerleri

Mesafe aralıkları için yapılan doğrusal oturtma işlemi sonucunda elde edilen doğru denklemleri, simülasyon modelinin sonuçlarından çıkartılarak her doğrunun hata verileri bulunur. Bu hata normal dağılıma (Gaussian) oturtulur ve gerekli parametreler elde edilir. Bir önceki paragrafta bahsedilen metot, görüş hattı dışında kalan veriler için tekrarlanır. Doğrusal denklem parametreleri kentsel ortam için her bir irtifada 4.1, 4-2 ve 4.3 numaralı çizelgelerde verilmiştir. Çizelgelerde 'NaN' olarak verilen kısımlar NLOS sinyal grubunun o mesafe aralığı içerisinde bulunma durumunun ağırlıklı olarak gerçekleşmediğini gösterir. Bu durum doğrusal denklemler kullanılarak bir modelleme yapıldığında modeli bazı durumlar için sınırlar.

$a_{i=1,2,3}$  ve  $b_{i=1,2,3}$ , LOS durumu için üç farklı doğru parçasının parametreleridir.  $a_{i=4,5,6}$

ve  $b_{i=4,5,6}$ , üç farklı doğru parçasının NLOS grubu için parametreleridir. Farklı mesafe aralıkları için çıkartılmış olan bu parametreleri daha net açıklamak gerekirse, belirli bir irtifada incelemek istediğimiz noktada tahmini alınacak gücü hesaplamak için bu noktanın LOS ve NLOS durumunu belirlememiz gerekir. Daha sonra bu noktanın vericiye olan mesafesi bahsettiğimiz üç mesafe aralığından birinde olmalıdır. İlk aralık için (200 metreye kadar)  $i=1,4$ , ikinci aralık için (200 m - 350 m aralığı)  $i=2,5$ , üçüncü aralık için (350 m - 500 m)  $i=3,6$  olarak seçilmelidir.

Örnek verecek olursak incelenmek istenen noktanın yüksekliği 32 m ve baz istasyonuna olan uzaklığı 100 m ise, bu nokta ilk mesafe aralığına (0 m - 200 m) girdiği için bu noktada alınacak tahmini güç hesaplanırken Çizelge 4.1’de verilen  $a_{1,4}$ ,  $b_{1,4}$ ,  $mean_{1,4}$ ,  $std_{1,4}$  değerleri Denklemler (37)-(38)’de kullanılır. Bu mesafede LOS durumu ve NLOS durumu için iki farklı güç değeri elde edilebilir. Kentsel senaryo için kullanılacak diğer irtifalar Bölüm 4.1’in sonunda Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Bu işlem mesafeye bağlı değişen tahmini LOS ve NLOS güçlerini irtifalar için hesapladıktan sonra, bu güçleri ikinci bölümde verilen LOS ve NLOS ihtimalleri ile ağırlıklandırılarak toplar.

$$P_{LOS}(d) = (d \times a_{i=1...3}) + b_{i=1...3} + \mathcal{N}(mean_{i=1...3}, std_{i=1...3}), \quad (35)$$

$$P_{NLOS}(d) = (d \times a_{i=4...6}) + b_{i=4...6} + \mathcal{N}(mean_{i=4...6}, std_{i=4...6}), \quad (36)$$

Bu şekilde her bir irtifa için elde edilen doğrusal denklemler, o irtifadaki LOS ve NLOS durumlarına göre iki farklı güç değeri verir. İrtifalara göre mesafeye bağlı olan tahmini alınan güç değerleri için modelleme sonuçlanmıştır. Etkileşimin sınırlı olması ve noktalar arası mesafenin 4 metre olarak belirlenmesi model incelenirken hassasiyeti düşürmektedir. Buna bağlı olarak bu modelin geçerliliği ileride yapılacak olan çalışmalar ile denetlenebilir. Model daha karmaşık gruplandırılmalar yapılarak, daha fazla nokta kullanarak(hassasiyeti yükselterek) ve birden fazla etkileşim durumları dahil edilerek geliştirilebilir. SNR değerleri



incelendikten sonra 32-40 irtifaların en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Modelin başka bir sınırı kentsel senaryolar için irtifa 92 metreyi geçtikten sonra modelin sadece LOS durumları için hesaplama yapmasıdır.

Banliyö bölgelerindeki yatay yansımaların düşük ihtimalle gerçekleşmesi, buna ek olarak diğer sinyal gruplarına kıyasla daha çok yol kat etmesi sinyal gücünde yaşanan zayıflamayı büyük ölçüde arttırır. Bunun sonucunda banliyö bölgeleri için model, dikey yansımali bir hale döner. İlk 2 irtifanın sinyal performansı daha iyidir. Bunun sonucunda Banliyö bölgeleri için 32 metre en iyi performanslı irtifa olarak seçilmiştir. Banliyö bölgesinin yüzde 95'in üzerindeki LOS ihtimaline dayanarak, sadece  $P_{LOS}$  değerleri kullanılarak sinyal gücündeki değişim incelenir.

Yoğun-kentsel ortamda LOS sinyal grubunun dahil olduğu durumlarda SIR 5-6 dB seviyelerinde olabilirken (200m dışındaki bölgeler için), kentsel senaryoya kıyasla bu değer düşük irtifalar için ortalama 2dB değerinden düşüktür. Bunun asıl sebebi LOS ihtimalinin bu şehir ortamında daha düşük olmasıdır. Bu ortam için belirlenen kullanılabilir irtifalar kentsel senaryo ile aynıdır. 32-40 metre aralığı alınan güç seviyeleri ve sinyal performansı dengesi daha iyidir. Bina yükseklikleri diğer ortamlara kıyasla çok daha yüksek olan çok katlı kentsel senaryoları için LOS ihtimalleri yoğun-kentsel senaryoya göre çok daha düşüktür. Bu durum NLOS bölgesinde kalan sinyallerin daha sık görülmesine yol açar. NLOS bölgesinde ikinci ve üçüncü sinyal etkileşimlerinin de etkili olduğu bilinmektedir. Tek etkileşimli modelin bu senaryolar için hata payı büyük ölçüde artacaktır. Ayrıca irtifa yükselişi LOS ihtimalini yükseltse bile modelde gönderilen sinyaller olasılıksal olarak daha fazla kırılma ve yansıma durumları içinde bulunacaktır. Sonuç olarak ilk etkileşim modeli yapılan incelemeler sonucu banliyö, kentsel ve yoğun-kentsel ortamlar için uygunken, çok katlı kentsel bölge için verimli sonuçlar vermemektedir.

irtifa	32.0	36.0	40.0	44.0	48.0	52.0	56.0	60.0
$a_1$	0.02	0	0.01	-0.01	-0.01	-0.03	-0.01	-0.01
$b_1$	-78.96	-77.64	-78.92	-78.28	-78.27	-74.09	-78.85	-80.86
$mean_1$	0	0	0	0	0	0	0	0
$std_1$	4.3	4.18	4.5	3.58	3.01	4.74	4.13	2.76
$a_2$	0	0	-0.01	0	-0.01	-0.02	-0.01	0.01
$b_2$	-75.38	-77.95	-76.4	-80.77	-78.53	-75.79	-77.28	-83.72
$mean_2$	0	0	0	0	0	0	0	0
$std_2$	5.58	4.51	3.93	3.58	4.42	3.32	4.25	3.77
$a_3$	-0.01	-0.01	-0.01	0	-0.01	0	-0.01	-0.01
$b_3$	-72.47	-74.84	-75.86	-79.85	-78.84	-83.23	-79.74	-79.01
$mean_3$	0	0	0	0	0	0	0	0
$std_3$	5.01	4.45	3.75	4.38	3.69	3.1	3.12	4.14
$a_4$	0.02	0.07	0.02	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$b_4$	-105.96	-114.07	-105.33	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$mean_4$	0	0	0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$std_4$	11.22	9.24	8.69	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$a_5$	0.02	0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.08	NaN	NaN
$b_5$	-107.01	-102.92	-102.52	-99.08	-103.23	-75.4	NaN	NaN
$mean_5$	0	0	0	0	0	0	NaN	NaN
$std_5$	11.93	10.53	9.61	7.94	6.99	5.92	NaN	NaN
$a_6$	-0.01	0.01	-0.02	0	0.02	0.01	0.01	-0.01
$b_6$	-94.26	-101.95	-92.54	-100.32	-108.04	-104.9	-104.57	-97.19
$mean_6$	0	0	0	0	0	0	0	0
$std_6$	11.78	9.28	8.88	8.49	8.59	8.21	7.68	7.5

Çizelge 4.1 Kentsel ortam, 32 m - 60 m irtifalarının doğrusal denklem parametreleri

<i>irtifa</i>	64.0	68.0	72.0	76.0	80.0	84.0	88.0	92.0
$a_1$	-0.01	0	0	0	0.01	-0.06	-0.05	-0.05
$b_1$	-80.23	-79.07	-80.05	-82.67	-83.34	-69.56	-70.57	-70.55
$mean_1$	0	0	0	0	0	0	0	0
$std_1$	3.47	4.18	4.05	2.45	2.91	2.82	2.84	2.81
$a_2$	-0.01	-0.02	-0.02	0	-0.01	0	-0.01	-0.02
$b_2$	-79.37	-75.15	-77.51	-83.31	-80.94	-83.71	-81.69	-79.01
$mean_2$	0	0	0	0	0	0	0	0
$std_2$	4.4	3.23	3.71	3.6	4.29	1.87	2.03	2.19
$a_3$	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01
$b_3$	-81.1	-80.19	-81.58	-76.56	-80.2	-78.41	-79.36	-79.16
$mean_3$	0	0	0	0	0	0	0	0
$std_3$	3.14	2.74	2.71	3.57	2.95	1.92	1.75	1.41
$a_4$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$b_4$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$mean_4$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$std_4$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$a_5$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$b_5$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$mean_5$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$std_5$	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
$a_6$	-0.02	0	0.06	0.03	0.06	0.07	0.06	0.03
$b_6$	-91.04	-100.1	-127.99	-115.21	-129.19	-130.5	-124.83	-107.25
$mean_6$	0	0	0	0	0	0	0	0
$std_6$	7.09	6.89	6.88	6.9	6.72	5.86	5.74	4.66

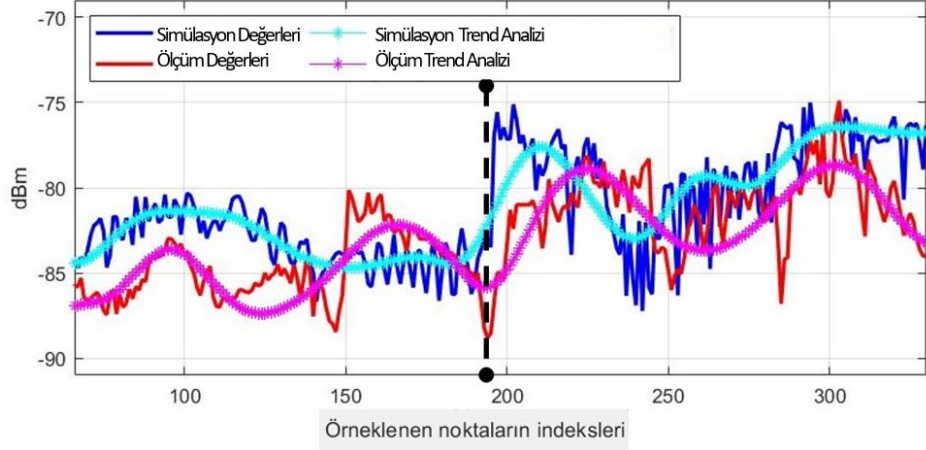
Çizelge 4.2 Kentsel ortam, 64 m - 92 m irtifalarının doğrusal denklem parametreleri

irtifa	96.0	100.0	104.0	108.0	112.0	116.0	120.0
$a_1$	-0.06	-0.07	-0.08	-0.08	-0.09	-0.08	-0.07
$b_1$	-69.65	-68.79	-67.24	-67.09	-66.48	-67.08	-68.68
$mean_1$	0	0	0	0	0	0	0
$std_1$	2.71	2.48	2.15	1.84	1.79	1.81	1.8
$a_2$	-0.04	-0.05	-0.06	-0.06	-0.06	-0.04	-0.02
$b_2$	-73.83	-70.72	-67.17	-67.83	-65.33	-70.97	-76.68
$mean_2$	0	0	0	0	0	0	0
$std_2$	2.37	2.39	2.32	2.38	1.65	1.9	1.93
$a_3$	-0.01	0	0	0	0.02	0.02	0.01
$b_3$	-82.62	-84.1	-88.04	-88.28	-94.39	-95.02	-92.59
$mean_3$	0	0	0	0	0	0	0
$std_3$	1.64	1.56	1.42	1.63	1.07	1.11	1.23

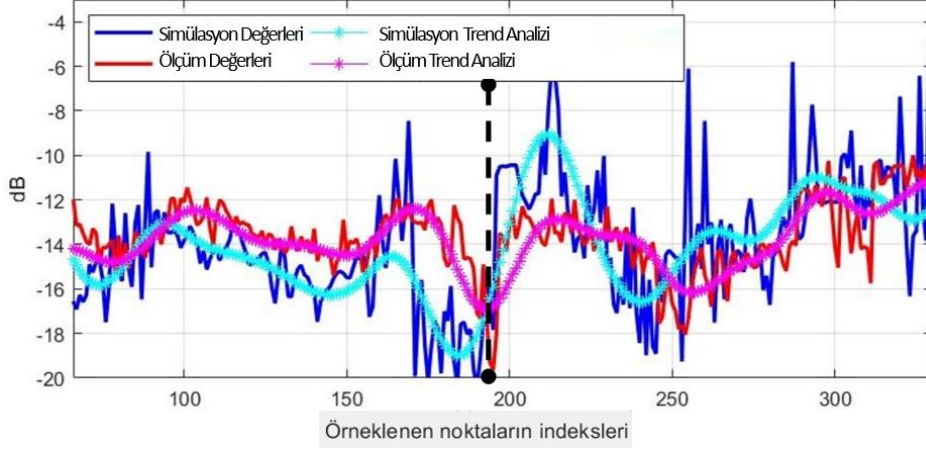
Çizelge 4.3 Kentsel ortam, 96 m - 120 m irtifalarının doğrusal denklem parametreleri (LOS)

## 4.2. Model 2 - Deneysel ölçümlere dayalı modelin çıktıları

Hüresel ağ özelliklerinden bilindiği gibi, hizmet veren hücrenin ve komşu hücrelerin sinyal gücü ve sinyal kalite göstergeleri, hücreler arası ve/veya frekanslar arası geçiş için belirleyicidir. Çalışmanın bu bölümünde RSRP ve RSRQ davranışları ve geçiş süreçleri için üç farklı irtifa incelenmiştir. Az sayıda baz istasyonu bulunan kırsal alanlarda hava kapsamı ve hücreler arası geçiş sürecine odaklanmak için kalkış ve iniş verileri ölçümlerden çıkarılmıştır. Hesaplanan veriler ve ölçüm verileri, Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Ortalama Kare Hata (RMSE) açısından gözlemlenir ve karşılaştırılır. Simülasyon verileri ve ölçüm verileri sırasıyla mavi ve kırmızı olarak verilmiştir. Frekanslar arası geçiş (Inter-Freq Handover), aynı hücre veya başka bir hücre içindeki başka bir taşıyıcıya bağlanmaya karşılık gelir. Aynı banda bağlanma durumu Intra-Frekans geçiş olarak adlandırılır. Hücreden hücreye ve/veya frekanslar arası geçişlerin tümü kesikli siyah çizgiler ile verilmiştir.



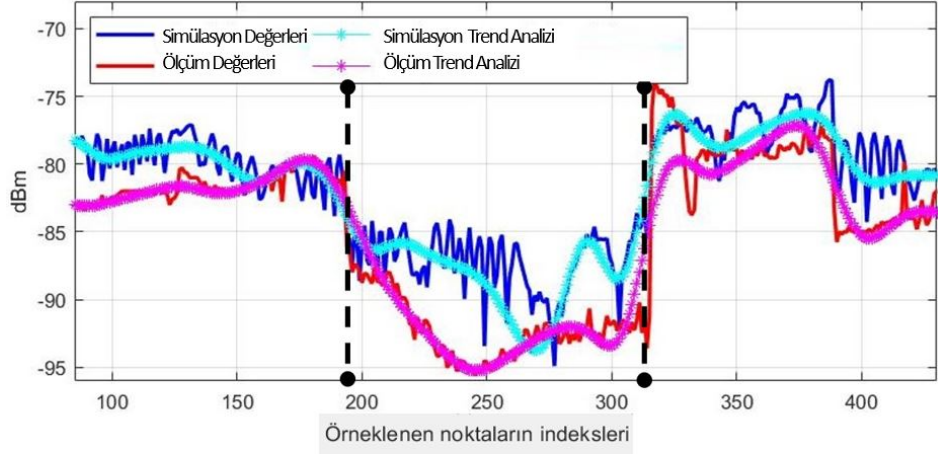
(a) 50m için RSRP değerleri (dBm)



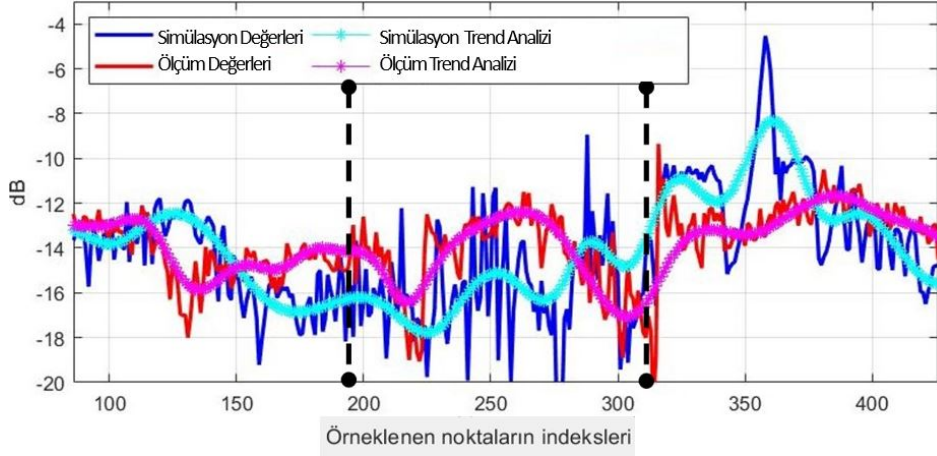
(b) 50m için RSRQ değerleri (dB)

Şekil 4.2 50 m testi RSRP-RSRQ kıyaslaması

50 m testinde LOS ışınının dikey düzlemdeki ayrılma açısı çoğunlukla antenlerin dikey yarı güç hüzmeye genişliğindedir. LOS sinyali yansıyan sinyalden daha güçlüdür. Ana bağlantı olarak BS1-sektör1 ve BS2-sektör1 antenleri kullanılmaktadır ve komşu hücre aktarımına izin verilmemektedir. RSRQ değeri -18,5 dB'ye düştüğünde ve iki hücre arasındaki RSRP farkı 8 dB'den büyük olduğunda, interfrekans ve intra-frekans geçişi başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Tek geçiş, toplam veri setini yarı yarıya böler. Simülasyon verileri ile ölçüm verileri arasındaki karşılaştırma sonucunda RSRP MAE 3dB, RSRP RMSE 3.6dB ve ardından RSRQ MAE 2.1dB, RSRQ RMSE 2.8dB'dir.



(a) 80m için RSRP değerleri (dBm)

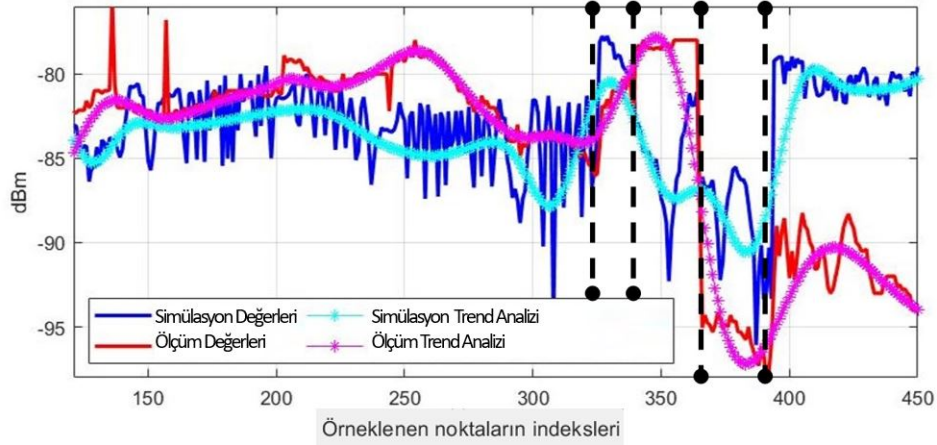


(b) 80m için RSRQ değerleri (dB)

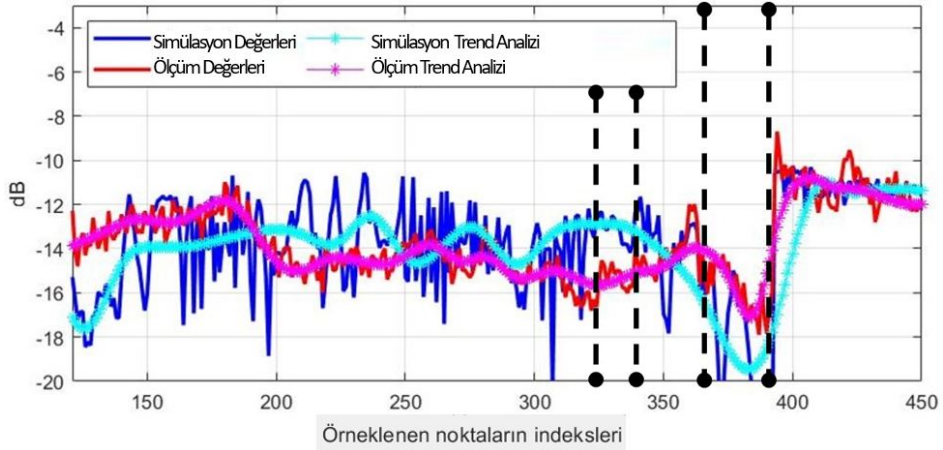
Şekil 4.3 80 m testi RSRP-RSRQ kıyaslaması

80 m testindeki sinyal güçleri 50 m testine kıyasla daha düşüktür, bunun asıl sebebi antenlerin yere eğik olması ve irtifadaki hızlı artış İHA'yı dikey yarı güç hüzmeye genişliklerinin dışına daha hızlı çıkartmasıdır. UE yalnızca BS1-sektör1'e bağlıdır. inter-frekans geçiş süreci incelenmiştir. 2600 MHz'e bağlantıya öncelik verilmesine rağmen, testin başlangıcında minimum geçiş gereksinimi karşılanmaz, bu nedenle UE 1800 MHz'e bağlanır. Ardından 1800 MHz'den 2600 MHz'e ilk geçiş gerçekleşir, ancak RSRP değerleri -87 dBm civarındadır ve hala azalmaktadır. İkinci devir 2600 MHz'den 800 MHz'e gerçekleştirilir, ancak 800 MHz bandı, 1800/2600 MHz'den yükü kaldırmak için geçici bir frekans olarak

kullanılır. Gereksinimler karşılandığında, üçüncü ve son geçiş 800 MHz'den 1800 MHz'e gerçekleşir. Bu irtifada UE baz istasyonunun 1 ila 2 km menzilindeyken 1800 MHz bandının drone için daha kararlı olduğunu söyleyebiliriz. Toplam veri seti, yaklaşık olarak üçe ayrılmıştır ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Simülasyon verileri ile ölçüm verilerinin karşılaştırması verilmiştir. RSRP MAE 3.6dB, RSRP RMSE 4.3dB ve RSRQ MAE 2.1dB, RSRQ RMSE 2.7dB'dir.



(a) 110m için RSRP değerleri (dBm)



(b) 110m için RSRQ değerleri (dB)

Şekil 4.4 110 m testi RSRP-RSRQ kıyaslaması

110 m testindeki sinyal güçleri 80 m testine göre daha değişkendir. Dikey düzlemde LOS ışınının Ayrılma Açısı (AoD), çoğunlukla antenlerin dikey yarı güç hüzmeye genişliğinin dışındadır. 2600 MHz'e öncelik verilmesine rağmen, RSRP değerleri çoğunlukla -90

dBm'nin altındadır ve devir gereksinimleri çoğu zaman karşılanmaz. Başlangıçta, UE tüm uçuş rotasının üçte ikisinde 1800 MHz'de çalışan BS1-sektörüne bağlıdır. RSRP değeri -85 dBm'den düşük olduğunda, RSRQ -16 dB'ye düşer ve 8 dB RSRP fark gereksinimi karşılanır, böylece frekans içi BS2-sektör2'ye geçiş gözlemlenir. Devir teslim başarısına rağmen, RSRQ değerinin hiç artmadığı gözlemlenmiştir. İkinci frekans içi geçişi meydana gelir ve UE birinci hücreye geri bağlanır. RSRQ -12 dB'ye kadar yükselse de RSRP seviyesi -90 dBm'nin altına düşer. Çıkış Açısı (AoD), çoğu anten için dikey ve yatay yarı güç hüzm genişliğinin dışındadır. Bir noktada mevcut olan tek hücre BS1-sektör1 2600 MHz'dir, inter-frekanslar geçiş 1800 MHz'den 2600 MHz'e gerçekleşir. RSRQ değeri -18 dB'ye düşer ve RSRP değeri de düşer. RSRP farkı 8 dB'yi aştığında, BS2-sektör1'e frekans içi geçişi gerçekleştirilir. 110 m hava testi, İHA ile BS arasındaki iki boyutlu mesafenin 1,5 km'den fazla olduğu durumlarda alınan sinyal gücü ve kalitesinin çok dengesiz olduğunu ortaya koymaktadır ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Toplamda, veri setinin yüzde otuzunda dört devir gerçekleşmiştir, bu da sinyal gücünün ne kadar kararsız olduğunu bir kez daha göstermiş olur. Relatif anten kazancı modeli side-lobe ve null etkilerini net bir şekilde gösteremediği için artan irtifalarda genellikle ana hüzmünün dışına çıktığımız için side-lobe etkilerini ancak gerçekçi anten kazanç modelleri kullanarak görebiliriz. Gerçekçi anten kazançları ile arasındaki bu farktan dolayı 110 m testinin hata oranı da daha yüksek çıkmıştır. Simülasyon verileri ile ölçüm verilerinin karşılaştırması verilmiştir ve RSRP MAE 4.6 dB, RSRP RMSE 5.9 dB ve RSRQ MAE 1.9 dB, RSRQ RMSE 2.5 dB'dir.



## 5. SONUÇLAR

İlk modelin geçerliliğini göstermek için gerçek şehir senaryolarında ölçümler yapmak gerekmektedir. Şehir merkezi senaryolarında gerekli ölçümlerin yapılabilmesi için farklı rotalarda İHA'lar uçurularak saha testlerine yönelik bir veri tabanı oluşturulmalıdır fakat güvenlik sınırlamaları nedeni ile şehir içi uçuşlara izin verilmemektedir. Ayrıca modelde kaydedilmiş etkileşim noktaları kullanılarak ikinci ve üçüncü etkileşimlere yönelik çalışmalar yapılabilir, bu şekilde simülasyon modeli sağlanabilir. Havadaki her bir örnek noktada toplanan sinyaller dBm'e geçildikten sonra RSSI olarak düşünülebilir. Bu şekilde havada alınabilecek toplam sinyal kuvveti incelenebilir.

Antenlerin yataydaki yarım güç hüzmeye genişliği dışında kalan bazı noktalarında alınan güç ve sinyal performanslarında anlık artışlar gözlemlenmiştir. Bu girişim problemi ve uygulanabilecek model [21] dökümanında anlatılmaktadır. Çok sayıda hücrenin olduğu senaryolara yönelik araştırmalar hala sürmektedir. Her irtifa için alınan gücün mesafeye göre değişimi, hangi irtifalarda ve mesafe aralıklarında daha kaliteli sinyal-girişim oranlarının görüldüğü incelenmiştir. Vericinin görüş hattında bulunan havasal kullanıcılar için ortalama SNR değerleri ve mesafeye bağlı doğrusal denklemler için parametreler çıkarılmıştır. Model sonuçları olarak hava performansının yakın bölgelerde yer yansımaları ve yataydaki yansımalarından daha çok etkilendiği, baz istasyonu çevresindeki binaların yükseklik dağılımı küçükse yer yansımalarının havadaki sinyal kalitesi üzerinde varyasyonlar yarattığı; sabit bir irtifadaki sinyallerin katettiği yol arttıkça, sinyallerin antenin ana hüzmesine doğru yaklaştığı ve bu yaklaşımın mesafe artışına bağlı olarak yaşanan yol kaybını kompanse ettiğini görürüz. Banliyö, kentsel ve yoğun kentsel senaryolarında 32m, 36m ve 40m irtifaları, düşük irtifalı uygulamalar için en iyi sonuçları vermektedir. Daha geniş bir şehir senaryosunda, çok sayıda verici noktası altıgen yapıda yerleştirilerek havada yaratılan karmaşık kapsama ve baz istasyonları arası hareket eden drone-baz istasyonu üzerinde yaşanabilecek girişim problemi incelenebilir. Bu çalışmada tek bir baz istasyonu için incelemeler yapılmıştır. Farklı mesafelerde, daha hassas aralıklarla dağıtılmış noktalarda bu incelemeler tekrarlanabilir.

İkinci modelin amacı, havadan ölçüm ve simülasyona dayalı bulguları kullanarak, iki -LTE özellikli- baz istasyonu tarafından hizmet verilen kırsal bir alanda İHA iletişimi için bir yol kaybı modeli tasarlamak ve doğrulamaktır. Özetlemek gerekirse simülasyon ve ölçüm verileri arasında yapılan karşılaştırma sonucu elde edilen RSRP ortalama hatalarının 5 dB'den az olduğunu ve RSRQ ortalama hatalarının ise 3 dB'den az olduğunu gösterir. Bu sayede modelin kabul edilebilir hata oranı ile çalıştığını söyleyebiliriz. LOS ve GND çok yollu bileşenleri arasındaki farklılıklar ve benzerlikler, çalışmadaki tüm hücreler için açıkça gözlemlenebilir. Bu çalışma ayrıca, artan irtifa ile frekanslar ve/veya hücreler arası geçiş özelliklerinin daha kararsız hale geldiğini kanıtlamaktadır. Frekanslar arası geçiş süreci farklı koşullar altında farklılık gösterse de, bu deterministik metodoloji ile inter-frekans geçişi ve intra-frekans geçişi senaryoları erkenden tespit edilebilmektedir.

Bir Kırsal senaryo için İki-Işınlı modelin geçerli olduğu durumlarda bölgenin topografik özellikleri incelenebilir ve çalışmada kullanılan yöntemlerle eksik parametreler tamamlanabilir. Ağaç cinsine, yoğunluğuna ve yer yansıma noktalarının denk geldiği koordinatlara göre gerekli ayarlamalar yapılabilir. Bölgeye özgü tahmini bir  $M_g$  değeri, toprak/bitki örtüsü ve su oranı koşulları incelenerek elde edilebilir veya  $M_g$  parametresi doğrudan ölçülebilir. Bitki örtüsündeki su miktarı arttıkça  $M_g$  değeri artar ve karmaşık bağıl geçirgenlik artar [48]. Buna göre farklı bölge ve hava koşullarında yeni ölçümler yapılarak  $M_g$  değişkeni uyarlanabilir ve model güçlendirilebilir. Bitki örtüsündeki ek zayıflama, sadece ağaçlara veya araziye bağlıdır. Bu nedenle, test alanına daha fazla detay ekleyerek veya bitki örtüsü için daha karmaşık bir zayıflama modeli kullanarak daha hassas sonuçlara varılabilir.

Her iki model için sinyallerin alıcıya geliş açısının etkilerini, polarizasyon uyumsuzluğu durumlarını gözlemek için İHA üzerinde yönlü bir anten kullanılabilir. Bu sayede verici antenin baktığı yön dışında diğer yönlerden gelen sinyallerin yaratacağı girişim etkileri büyük ölçüde azalabilir. Ayrıca, LTE-Advanced şebekesinde gerçekleşen bu çalışma, 5G radyo şebekesi performans ölçütlerini dahil edilerek ve dikey kapsamanın yanı sıra hava hareketliliği açısından ölçümler yapılarak genişletilebilir.

## REFERENCES

- [1] Federal Aviation Administration FAA. Unmanned Aircraft Systems/Resources & Other Topics/Drones by the Numbers. *URL: [https://www.faa.gov/uas/resources/by\\_the\\_numbers/](https://www.faa.gov/uas/resources/by_the_numbers/) [accessed 2022-05-31], 2022.*
- [2] Amazon. Amazon prime air drone delivery. *URL: <https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-prime-air-prepares-for-drone-deliveries/> [Accessed 2022-06-13], 2022.*
- [3] Qualcomm. Cellular drone communication presentation - leading the world to 5g evolving cellular technologies for safer drone operation. *URL: <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/leading-the-world-to-5g-evolving-cellulartechologies-for-safer-drone-operation-v2.pdf> [accessed 2022-05-10], 2016.*
- [4] Nokia. Nokia drone networks. *URL: <https://www.dac.nokia.com/applications/nokia-drone-networks/> [accessed 2022-03-09], 2022.*
- [5] Ericsson White Paper. Ericsson drones and networks: Ensuring safe and secure operations. *URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/drones-and-networks-ensuring-safe-and-secure-operations/> [accessed 2022-03-09], 2022.*
- [6] Junfei Qiu, David Grace, Guoru Ding, Muhammad D. Zakaria, and Qihui Wu. Air-ground heterogeneous networks for 5g and beyond via integrating high and low altitude platforms. *IEEE Wireless Communications*, 26(6):140–148, 2019. doi:10.1109/MWC.0001.1800575.

- [7] Azade Fotouhi, Haoran Qiang, Ming Ding, Mahbub Hassan, Lorenzo Galati Giordano, Adrian Garcia-Rodriguez, and Jinhong Yuan. Survey on uav cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 21(4):3417–3442, **2019**.
- [8] Sarmistha Mondal, Anindita Sinha, and Jayati Routh. A survey on evolution of wireless generations 0g to 7g. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering (IJARSE)*, 1(2):5–10, **2015**.
- [9] Notice of Proposed Rulemaking (NPRM) FCC ET Docket 07-113. Matter of revision of the commission’s rules regarding operation in the 57-64 ghz band. *URL:https://www.fcc.gov/document/part-15-rules-unlicensed-operation-57-64-ghz-band [accessed 2020-03-19]*, **2013**.
- [10] GSM Association et al. The state of mobile internet connectivity 2021. *URL:https://www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2021/09/The-State-of-Mobile-Internet-Connectivity-Report-2021.pdf [accessed 2022-05-14]*, **2021**.
- [11] Türk Telekom. Türk Telekom 5G+ Bilgi Notu: 5GTT. *URL:https://btk.gov.tr/uploads/announcements/5g-ve-otesi-beyaz-kitap/5g-ve-otesi-beyaz-kitap.pdf [accessed 2022-02-23]*, **2018**.
- [12] Yong Zeng, Rui Zhang, and Teng Joon Lim. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5):36–42, **2016**. doi:10.1109/MCOM.2016.7470933.
- [13] Andreas F. Molisch. *Wireless communications – 2nd ed.* John Wiley Sons Ltd, John Wiley Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, **2011**.
- [14] Andrea Goldsmith. *WIRELESS COMMUNICATIONS*. Cambridge University Press, United States of America by Cambridge University Press, New York, **2005**.

- [15] R. Vaughan and J. B. Andersen. *Channels, Propagation and Antennas for Mobile Communications*. The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, **2003**.
- [16] W. C.Y. Lee. *Mobile Communications Engineering*. McGraw-Hill, New York, **1982**.
- [17] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 ghz. **2022**.
- [18] Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS). Metis channel models - deliverable d1.4. **2015**.
- [19] ITU-R M. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020 - report ITU-R M.2412-0. **October 2017**.
- [20] Shu Sun, George R. MacCartney, and Theodore S. Rappaport. A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5g wireless communications. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–7. **2017**. doi:10.1109/ICC.2017.7996792.
- [21] 3GPP. Enhanced lte support for aerial vehicles. **2021**.
- [22] 3GPP. 3gpp technical report 22.829. technical specification group radio access network; enhancement for unmanned aerial vehicles; stage 1. **2021**.
- [23] J. Haque-T. Magesacher N. Hosseini, H. Jamal and D. W. Matolak. Uav command and control, navigation and surveillance: A review of potential 5g and satellite systems. *IEEE Aerospace Conference*, pages 1–10, **2019**. doi:10.1109/AERO.2019.8741719.
- [24] L. Globus-T. Luc I. Gheorghisor, A. Chen and P. Schrader. Reliable 4g/5g-based communications in the national airspace: a uas c2 use case. *2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, pages 2A3–1–2A3–14, **2022**. doi:10.1109/ICNS50378.2020.9222950.

- [25] A. E. Garcia. Performance evaluation of network slicing for aerial vehicle communications. *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages pp. 1–6, **2019**. doi:10.1109/ICCW.2019.8756738.
- [26] P. Xia Z. Xiao and X. Xia. Enabling uav cellular with millimeter-wave communication: potentials and approaches. *IEEE Communications Magazine*, 54(5):pp. 66–73, **2016**. doi:10.1109/MCOM.2016.7470937.
- [27] A. Fotouhi et al. Survey on uav cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4):pp. 3417–3442, **2019**. doi:10.1109/COMST.2019.2906228.
- [28] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. H. Nam and M. Debbah. A tutorial on uavs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3):pp. 2334–2360, **2019**. doi:10.1109/COMST.2019.2906228.
- [29] R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi and H. Yanikomeroglu. Efficient 3-d placement of an aerial base station in next generation cellular networks. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages pp. 1–5, **2016**. doi:10.1109/ICC.2016.7510820.
- [30] A. Al-Hourani, S. Kandeepan and S. Lardner. Optimal lap altitude for maximum coverage. *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(6):pp. 569–572, **2014**. doi:10.1109/LWC.2014.2342736.
- [31] E. Yanmaz S. Hayat and R. Muzaffar. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint.
- [32] Chaoxing Yan, Lingang Fu, Jiankang Zhang, and Jingjing Wang. A comprehensive survey on uav communication channel modeling. *IEEE Access*, 7:107769–107792, **2019**. doi:10.1109/ACCESS.2019.2933173.

- [33] Wahab Khawaja, Ismail Guvenc, David W. Matolak, Uwe-Carsten Fiebig, and Nicolas Schneckenburger. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21(3):2361–2391, **2019**. doi:10.1109/COMST.2019.2915069.
- [34] Muhammad Usman Sheikh, Kalle Ruttik, Norshaida Saba, Edward Mutafungwa, Riku Jäntti, and Jyri Hämäläinen. Analysis of drone propagation with ray tracing from sub-6 ghz upto terahertz frequencies in a real world urban environment. In *2021 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pages 169–174. **2021**. doi:10.1109/ICOIN50884.2021.9333892.
- [35] Xi Chu, Cesar Briso, Danping He, Xuefeng Yin, and Jianwu Dou. Channel modeling for low-altitude uav in suburban environments based on ray tracer. In *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, pages 1–5. **2018**. doi:10.1049/cp.2018.0815.
- [36] Akram Al-Hourani, Sithamparanathan Kandeepan, and Abbas Jamalipour. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments. In *2014 IEEE Global Communications Conference*, pages 2898–2904. **2014**. doi:10.1109/GLOCOM.2014.7037248.
- [37] X. Cai Z. Huang J. Rodríguez-Piñeiro, T. Domínguez-Bolaño and X. Yin. Air-to-ground channel characterization for low-height uavs in realistic network deployments. In *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, volume 69, pages pp. 992–1006. **2021**. doi:10.1109/TAP.2020.3016164.
- [38] Laurențiu Gabriel Militaru, Dan Popescu, and Loretta Ichim. 4g/lte issues of low altitude uav flying systems. In *2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, pages 874–879. **2020**. doi:10.1109/ICSTCC50638.2020.9259755.
- [39] Xuesong Cai, Nanxin Wang, José Rodríguez-Piñeiro, Xuefeng Yin, Antonio Pérez Yuste, Wei Fan, Guojin Zhang, Gert Frølund Pedersen, and

- Li Tian. Low altitude air-to-ground channel characterization in lte network. In *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pages 1–5. **2019**.
- [40] Xuesong Cai, José Rodríguez-Piñeiro, Xuefeng Yin, Nanxin Wang, Bo Ai, Gert Frølund Pedersen, and Antonio Pérez Yuste. An empirical air-to-ground channel model based on passive measurements in lte. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2):1140–1154, **2019**. doi:10.1109/TVT.2018.2886961.
- [41] Zhi Yang, Lai Zhou, Guangyue Zhao, and Shidong Zhou. Channel model in the urban environment for unmanned aerial vehicle communications. In *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, pages 1–5. **2018**. doi:10.1049/cp.2018.1078.
- [42] Michael C. Batistatos, George V. Tsoulos, Dimitra A. Zarbouti, Georgia E. Athanasiadou, and Sotirios K. Goudos. Lte measurements for flying relays. In *2018 7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, pages 1–4. **2018**. doi:10.1109/MOCASST.2018.8376626.
- [43] Michael C. Batistatos, Georgia E. Athanasiadou, Dimitra A. Zarbouti, George V. Tsoulos, and Nikos C. Sagias. Lte ground-to-air measurements for uav-assisted cellular networks. In *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, pages 1–5. **2018**. doi:10.1049/cp.2018.1160.
- [44] Akram Al-Hourani and Karina Gomez. Modeling cellular-to-uav path-loss for suburban environments. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(1):82–85, **2018**. doi:10.1109/LWC.2017.2755643.
- [45] Ediz Nazmi Orhan, Atakan Yılmaz, Gökhan Kalem, and Mehmet Akif Durmaz. Aerial coverage analysis for mobile network operator: A comparison model of simulation and uav based measurement in the different altitudes. In *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 1274–1282. **2022**. doi:10.1109/ICUAS54217.2022.9836171.



- [46] Recommendation ITU-R P.2040-2. Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 mhz. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-2-202109-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-2-202109-I!!PDF-E.pdf) [accessed Jan.2022], **2021**.
- [47] ITU-R Recommendation F.1336-5. Reference radiation patterns of omnidirectional, sectoral and other antennas for the fixed and mobile services for use in sharing studies in the frequency range from 400 mhz to about 70 ghz. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1336-5-201901-I/en/> [accessed Jan. 11, 2022], **2021**.
- [48] ITU-R Recommendation P.527-6. Electrical characteristics of the surface of the earth. [https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1336-5-201901-I/en](https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1336-5-201901-I/en/) [accessed Jan. 2022], **2021**.
- [49] ITU-R Recommendation P.833-10. Attenuation in vegetation. [https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1336-5-201901-I/en](https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1336-5-201901-I/en/) [accessed Jan. 2022], **2021**.