

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİYLE HAVA ARACI ÜZERİNDEKİ  
HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN KANAL ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Yasin AKSAN**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ayşe Melda YÜKSEL TURGUT**

**OCAK 2021**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Yasin AKSAN

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİYLE HAVA ARACI ÜZERİNDEKİ HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN KANAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Yasin AKSAN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ayşe Melda YÜKSEL TURGUT

Tarih: OCAK 2021

Havacılık haberleşmesi günümüz haberleşme sistemlerinin oldukça önemli bir parçasıdır. Havacılık haberleşmesinin temeli kablosuz iletişim üzerine kuruludur. Özellikle İHA'larda kablosuz iletişim, gelecekteki kablosuz iletişim sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olacaktır. İHA'larda gerçek zamanlı veri aktarımı çok kritiktir. Çünkü İHA'ların yer sistemlerinden sürekli olarak kontrol edilmesi gerekir ve faydalı yük verilerinin gerçek zamanlı olarak yer sistemlerine iletilmesi gerekir. İHA haberleşmesinin kesilmemesi için haberleşme sisteminin tasarlanması aşamasında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Dikkat edilmesi gereken en önemli konu uçak gövdesi gölgelemesidir. İHA antenleri, uçak gövdesi gölgelemesine eğilimlidir. Antenlerin yerleştirildiği uçak yüzeyleri ana görüş hattı yolunu kapatır. Bu da haberleşmede kesilmelere sebep olur. Bir diğer önemli konu, bağlantı bütçe analizlerinde kullanılan kayıpların, gerçek zamanlı olarak değişkenlik göstermesidir. Tasarım aşamasında dikkate alınan kayıplar pratik uygulamalarda farklılık gösterdiğinden haberleşmede kesilmeler meydana gelmektedir. Bu nedenlerle, pratik

uygulamalarda tüm negatif etkiler dâhil olmak üzere gözlemlenen uçtan-uca kanallar teorik hesaplamalardan oldukça farklıdır. Bu çalışmada, tüm negatif etkiler dâhil olmak üzere uçtan-uca kanal özellikleri belirlenmektedir. Kanal özellikleri modeli için geçmiş uçuşlar sırasında ölçülen verilere makine öğrenme yöntemleri uygulanmaktadır. Geçmiş uçuşlardaki yer anteni konumu, hava aracı konumu, hava aracı Euler açıları ve hava aracı alınan sinyal gücü verileri kullanılmaktadır. Her bir konum ve Euler açısı verisine karşılık gelen, yer modeminin çıkışından İHA modemi girişine kadar sinyalin maruz kaldığı bütün negatif etkiler hesaplanmaktadır. Eksik veriler ise makine öğrenme yöntemleri ile bulunmaktadır. Makine öğrenme yöntemleri ile bulunan modeller içinde en iyi sonuçların ensemble bagged trees (EBT) ve üstel Gaussian process regression (GPR) yöntemleri ile alındığı görülmüştür. Veriler işlenerek bulunan girdilerin test sonuçları, ham verilerin test sonuçlarına göre daha kötü çıkmıştır. Ancak hem işlenmiş hem de ham verilerle alınan sonuçlar teorik analiz sonuçlarından daha iyidir.

**Anahtar Kelimeler:** Uçak gövdesi gölgelemesi, anten ışınım örüntüsü, kanal özelliklerinin belirlenmesi, ensemble bagged trees, üstel Gaussian process regression, bağlantı bütçesi analizi.

## **ABSTRACT**

Master of Science

### **DETERMINING THE CHANNEL CHARACTERISTICS OF COMMUNICATION SYSTEMS ON THE AIRCRAFT BY MACHINE LEARNING METHODS**

Yasin AKSAN

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Ayşe Melda YÜKSEL TURGUT

Date: JANUARY 2021

Aviation communication is a very important part of today's communication systems. Aviation communication is based on wireless communication. Wireless communication, especially in unmanned aerial vehicles (UAVs), will be an integral part of future wireless communication systems. Real-time data transfer is very critical in UAVs. Because UAVs need to be constantly controlled from ground systems and payload data must be transmitted to ground systems in real time. In order not to interrupt the communication of the UAV, there are some points that should be considered during the design of the communication system. The most important issue to be considered is airframe shadowing. UAV antennas are prone to airframe shadowing. Aircraft surfaces where antennas are placed block the main line of sight path. This causes interruptions in communication. Another important issue is that the losses used in link budget analysis vary in real time. Since the losses taken into consideration during the design phase differ in practical applications, interruptions in communication occur. For these reasons, the end-to-end channels observed in practical applications, including all negative effects, are quite different from theoretical

calculations. In this study, an end-to-end channel characterization is made, including all negative effects. For the channel characterization model, machine learning methods are applied to the data measured during past flights. Ground antenna location, aircraft position, aircraft Euler angles and aircraft receive signal strength indicator data on past flights are used. All negative effects of the signal, from the output of the ground modem to the input of the UAV modem, corresponding to each position and Euler angle data are calculated. Missing data are found with machine learning methods. It has been observed that among the models found by machine learning methods, the best results are obtained with ensemble bagged trees and exponential Gaussian process regression methods. The test results of the inputs found by processing the data were worse than the test results of the raw data. However, the results obtained with both processed and raw data are better than the results of theoretical analysis.

**Keywords:** Airframe shadowing, antenna radiation pattern, channel characterization, ensemble bagged trees, exponential Gaussian process regression, link budget analysis.

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübesiyle beni sabırla yönlendiren hocam Doç. Dr. Ayşe Melda Yüksel Turgut'a, kıymetli yardımları için Doç. Dr. Ahmet Murat Özbayoğlu'na, bütün bilgi birikiminin mimarları olan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, ufkumu açıp çalışmalarıma katkı sağladıkları için değerli jüri üyelerine, çalışmalarımda destek veren Türk Havacılık ve Uzay Sanayii İnsansız Hava Araçları Grubu RF Haberleşme Sistemleri Baő Mühendisi Sayın Memduh Serkan Sapaz'a, desteklerini hep arkamda hissettiğim saygıdeğer yöneticilerim ve çalışma arkadaşlarıma, hayattaki her zorlukta yanımda duran annem, ablam ve abim, Birgül Aksan, Özge ve Selahattin Çakır'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca, tez yazım sürecimde vefat eden, bütün öğretim sürecimin destekçisi ve hayattaki duruşumun ilham kaynağı olan kıymetli babam Sebahattin Aksan'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>TEZ BİLDİRİMİ</b> .....	iv
<b>ÖZET</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	ix
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	x
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xii
<b>KISALTMALAR</b> .....	xiii
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	xiv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	5
<b>3. METODOLOJİ</b> .....	15
3.1. Link Bütçesi ve Uçak Gövdesi Gölgelemesi Analizi .....	15
3.2. Hava Aracının Sinyal Alış Noktasının Bulunması .....	17
3.3. Makine Öğrenme Yöntemleri ile Kanal Özelliklerinin Belirlenmesi.....	26
3.3.1. MATLAB Regression Learner App.....	27
3.3.2. Ensemble bagged trees yöntemi.....	30
3.3.3. Üstel Gaussian process regression yöntemi .....	31
<b>4. ÖRNEK ÇALIŞMA</b> .....	33
<b>5. GENEL DEĞERLENDİRME</b> .....	43
<b>KAYNAKLAR</b> .....	45
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	51



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1 : Hava platformları için Euler açılarının tanımı .....	18
Şekil 3.2 : Küresel koordinat sistemindeki açıların tanımı .....	19
Şekil 3.3 : $\Theta$ ve $\Phi$ açılarının üzerine yunuslama açısının etkisi .....	20
Şekil 3.4 : $\Theta$ ve $\Phi$ açılarının üzerine yuvarlanma açısının etkisi .....	23
Şekil 3.5 : MATLAB Regression Learner App akış diyagramı.....	27
Şekil 3.6 : Örnek Regression Learner App eğitim verisi RMSE sonucu.....	29
Şekil 3.7 : Örnek Regression Learner App test verisi RMSE sonucu.....	30
Şekil 3.8 : EBT akış diyagramı .....	30
Şekil 3.9 : Üstel GPR akış diyagramı.....	31
Şekil 4.1 : Bütün veri noktaları için $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$ değerleri .....	35
Şekil 4.2 : Örnek anten ışınım örüntüsü.....	41
Şekil 4.3 : Örnek uçak gövdesi gölgelemesinden etkilenmiş anten ışınım örüntüsü .	42

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : Örnek işlenmiş veriler.....	25
Çizelge 4.1 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları.....	36
Çizelge 4.2 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı yunuslama açısı kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları .....	36
Çizelge 4.3 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı yuvarlanma açısı kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları.....	36
Çizelge 4.4 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı sapma açısı kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları.....	37
Çizelge 4.5 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı Euler açıları kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları .....	37
Çizelge 4.6 : Hava aracı Euler açıları kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları .....	37
Çizelge 4.7 : İşlenmiş verilerin $\Theta$ ve $\Phi$ açılarının varyansları.....	38
Çizelge 4.8 : Bağlantı bütçe analizinde kullanılan kayıp değerleri.....	41

## KISALTMALAR

<b>İHA</b>	: İnsansız Hava Aracı
<b>UAV</b>	: Unmanned Aerial Vehicle
<b>EBT</b>	: Ensemble bagged trees (Toplu torbalanmış ağaçlar)
<b>GPR</b>	: Gaussian process regression (Gauss süreci bağlantımı)
<b>VHF</b>	: Very high frequency (Çok yüksek frekans)
<b>PA</b>	: Power amplifier (Güç Yükselteci)
<b>LNA</b>	: Low noise amplifier (Düşük gürültülü yükselteç)
<b>ITU</b>	: International Telecommunication Union
<b>RMSE</b>	: Root mean square error (kök ortalama kare hatası)
<b>SVM</b>	: Support vector machine (Destek vektör makinesi)
<b>CST-MWS</b>	: Computer simulation technology - microwave studio

## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
Y	Yaw (Sapma)
P	Pitch (Yunuslama)
R	Roll (Yuvarlanma)
Lat <sub>G</sub>	Yer sistemi anteni enlemi
Long <sub>G</sub>	Yer sistemi anteni boylamı
Alt <sub>G</sub>	Yer sistemi anteni irtifası
Lat <sub>A</sub>	Hava aracı enlemi
Long <sub>A</sub>	Hava aracı boylamı
dB	Desibel
Alt <sub>A</sub>	Hava aracı irtifası
P <sub>r</sub>	Alıcı antene ulaşan sinyal gücü
P <sub>t</sub>	Verici antenden çıkan sinyal gücü
G <sub>r</sub>	Alıcı anten kazancı
G <sub>t</sub>	Verici anten kazancı
L <sub>backoff</sub>	Sinyal yansıma kaybı
L <sub>tx</sub>	Verici hat kaybı
L <sub>rx</sub>	Alıcı hat kaybı
L <sub>rain</sub>	Yağmur kaybı
L <sub>atm</sub>	Atmosfer kaybı
L <sub>stat</sub>	İstatistiksel kayıp
L <sub>pol</sub>	Polarizasyon kaybı
L <sub>fs</sub>	Serbest uzay yol kaybı
L <sub>shad</sub>	Uçak gövdesi gölgelemesi

## 1. GİRİŞ

Havacılık haberleşmesinin günümüzdeki önemi hava platformlarının sayısına paralel olarak sürekli artmaktadır. Sivil hava araçları, askeri hava araçları ve keşif ve gözlem uyduları gibi hava platformlarının sürekli veri aktarım ihtiyaçları vardır. Sivil hava araçlarında hava trafik kontrolü için iletişimin hiç kesilmemesi gerekmektedir. Keşif ve gözlem uydularında uydu faydalı yük verileri yer istasyonlarına sürekli indirilmelidir. Askeri hava araçlarında ise hem yer kontrol istasyonlarından hava aracına komuta verileri iletmeli hem de hava aracından yer kontrol istasyonuna faydalı yük ve telemetri verileri gelmelidir.

Günümüz hava araçlarının en popülerleri ise insansız hava araçlarıdır (İHA). Farklı boyutlardaki İHA'lar askeri ve sivil amaçlar ile oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. İHA'lar döner kanatlı ve sabit kanatlı olarak görev çeşidine göre yapısal farklılıklar gösterebilmektedirler. İHA'larda tüketilen enerji miktarı ne kadar fazla olursa yakıt veya batarya sınırlandırmasından dolayı görev süresi de o kadar azalmaktadır. Bu nedenle İHA'larda güç tasarrufu önemli bir konudur.

İHA'lar çoğunlukla askeri havacılıkta keşif ve gözlem maksadıyla kullanılmaktadır. İHA'ların gerçek zamanlı olarak yer kontrol istasyonundan komuta verilerini alması ve faydalı yük verilerini yer kontrol istasyonuna iletmesi gerekmektedir. Yani İHA'larda haberleşmenin kesilmemesi önemli bir konudur. Bağlantının kesilme noktasına geldiği anlarda yer kontrol istasyonuna geri dönüş verilmesi veri kaybı yaşanmadan önlem alınmasını sağlayacaktır.

İHA'larda en çok kullanılan haberleşme sistemi görüş hattı haberleşme sistemidir. Görüş hattı haberleşme sistemlerinde İHA ile yer kontrol istasyonu arasındaki iletişim için İHA üzerindeki anten ile yer anteninin birbirlerini görmesi gerekmektedir. Ayrıca alıcı hassasiyeti sınırlandırmasından dolayı İHA ile yer kontrol istasyonu arasındaki mesafenin tasarım sırasında belirlenen uzaklığı aşmaması gerekir.

İHA'larda gerçekleştirilen amaca göre veri hızı ve menzil ihtiyacı farklılık göstermektedir. Görüş hattı haberleşme sistemlerinde uzak mesafelerden yüksek veri

aktarımı ihtiyacı için hem hava aracında hem de yer kontrol istasyonunda yönlü antenlerden yararlanılmaktadır. İHA üzerinde yönlü antenlerin kullanıldığı durumlarda antenlerin sürekli olarak yer kontrol istasyonu antenini takip etmesi gerekmektedir. Hava aracında yönlü anten kullanımı yüksek veri hızı ihtiyacı ve iyi bir bağlantı kalitesi için etkili bir yöntem olsa da maliyetli ve karmaşık bir çözümdür.

İHA'larda en çok tercih edilen anten türü yönsüz antenlerdir. Yönsüz antenlerin yer kontrol istasyonu antenini takip etme ihtiyacı yoktur. Yönlü anten kullanımına göre ucuz ve basit bir çözümdür. Ancak yönsüz antenlerin kazançları daha düşük olduğu için uzak mesafelerde yüksek veri hızı elde etmek yönlü anten kullanımına göre daha zordur. Bu sebeplerle yönsüz antenlerin kullanıldığı çözümlerde kayıpların ve uçak gövdesi gölgelemesi etkilerinin rolleri daha kritiktir.

Hava aracı gövdesi hava aracına yerleştirilen yönsüz anten ile yer kontrol istasyonu anteninin görüş hattını gölgeleyebilir. Hava aracının bulunduğu konuma ve Euler açılarına (sapma, yunuslama, yuvarlanma) göre hava aracı anteninin yer antenine baktığı noktanın kazancı laboratuvar ortamındaki kazancına göre farklılık gösterebilir. Yani hava aracına yerleştirilen anten ile yer sistemi arasına uçak gövdesi girip haberleşmede kesintiye sebep olabilir ya da haberleşme kalitesini düşürebilir. Bu yaşanan kayba uçak gövdesi gölgelemesi ( $L_{shad}$ ) denir.

Sinyaller yer sistemi modemi ile hava aracı modemi arasında gidip gelirken birçok negatif etkiye maruz kalırlar. Bu etkilere Link Bütçesi Analizlerinde kayıp denir. Analizlerde kullanılan kayıp değerleri gerçek zamanlı olarak büyük farklılıklar gösterebilirler. Yani haberleşme sistemi tasarlanırken hesaba katılan değerler farklılık gösterdiği için haberleşme sistemi performansı değişkenlik gösterir. Bu nedenle haberleşme sisteminde beklenmedik kesintiler oluşur ya da haberleşme kalitesi beklenenin altında kalır. Formül (1.1)'de örnek bir alıcı sinyal gücü hesabı ve kayıp değerleri yer almaktadır.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L_{backoff} L_{tx} L_{rx} L_{rain} L_{atm} L_{stat} L_{pol} L_{fs}} \quad (1.1)$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r - \bar{L}_{total} \quad (1.2)$$

Formül (1.1)'de  $P_r$  alıcı sinyal gücü,  $P_t$  verici sinyal gücü,  $G_r$  alıcı anten kazancı,  $G_t$  verici anten kazancıdır.  $L_{backoff}$  sinyal yansıma kaybı,  $L_{tx}$  verici hat kaybı,  $L_{rx}$  alıcı hat kaybı,  $L_{rain}$  yağmur kaybı,  $L_{atm}$  atmosfer kaybı,  $L_{stat}$  istatistiksel kayıp,  $L_{pol}$

polarizasyon kaybı,  $L_{fs}$  serbest uzay yol kaybıdır.  $L_{backoff}$ ,  $L_{tx}$  ve  $L_{rx}$  ölçüm sonuçlarına göre analize eklenirken,  $L_{fs}$  dışındaki diğer kayıplar için standartlardan ve istatistiklerden yararlanılmaktadır. Ölçüm sonuçları ile ele alınan kayıplar uçuş sırasında diğer sistemlerle çalışırken farklılık gösterebilirler. Standartlardan ve istatistiklerden yararlanılarak ele alınan kayıplar ise uçuş sırasında sürekli değişkenlik gösterirler. Formül (1.2)'de Formül (1.1)'in dB notasyonundaki hali verilmiştir.  $\bar{L}_{total}$  bütün kayıpların toplamını temsil etmektedir.

Gerçekleştirilen uçuşlardan elde edilen veriler ile İHA'ya yerleştirilen yönsüz antenin kullanıldığı haberleşme sisteminin küresel koordinat sistemindeki bütün  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarındaki kanal özellikleri belirlenebilir. Ancak elde edilen veriler küresel koordinat sistemindeki her açıyı içermez. Bu nedenle eksik verilerin tamamlanabilmesi için elde edilen sonuçlar makine öğrenme yöntemlerine girdi olarak kullanılır. Yani elde edilen sonuçlar gözetimli öğrenme yöntemleri ile değerlendirilir ve kanal özellikleri modelleri elde edilir. Kanal özellikleri modelleri farklı veriler ile test edilir. Hem öğrenme verilerindeki model hata miktarları hem de test verilerindeki model hata miktarları göz önünde bulundurularak en iyi kanal özellikleri modelleri seçilir.

Bu tez çalışmasında hem ham verilere hem de işlenmiş verilere farklı makine öğrenme yöntemleri uygulanmıştır. Hem eğitim verilerinin hem de test verilerinin sonuçları karşılaştırılmaktadır. Eğitim verileri ile test verilerinin sonuçları yakın olan ve ayrıca test verilerinde en az hata yapan kanal özellikleri modelleri seçilmiştir. Elde edilen kanal özellikleri modelleri ile gerçek zamanlı olarak çıkış gücü ayarlanarak güç tasarrufu yapılabilir. Ayrıca modeller kullanılarak hava aracı linkinin kalitesi ile ilgili yer kontrol istasyonuna geri dönüş verilebilir.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde kapsamlı literatür araştırmasına yer verilmiştir. Öncelikle İHA haberleşmesine dair yapılan çalışmalar aktarılmıştır. Daha sonra kanal özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili önemli hususları belirten çalışmalar özetlenmiştir. Devamında kanal özelliklerinin belirlenmesinin tarihçesi kısaca aktarılıp, kanal özelliklerinin belirlenmesi için makine öğrenme uygulamaları kullanan makalelerin özetlenmesi ile bölüm sonlandırılmıştır. Üçüncü bölümde kanal özelliklerinin belirlenmesi için tezde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. Ham konum ve Euler açı verilerin işlenerek küresel koordinat sisteminde  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılara dönüştürülmesi anlatılmıştır. Sonrasında hem ham veriye hem de işlenmiş veriye uygulanan makine öğrenme yöntemlerinin uygulanışı ve seçilen yöntemlerin akış şeması gösterilmiştir.

Dördüncü kısımda tezde anlatılan yöntem ile elde edilen nümerik sonuçlara yer verilmiştir ve sonuçlar teorik hesaplama sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde ise tez çalışmasının genel değerlendirmesi yapılmıştır.





## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Tez çalışmasında İHA'lara ait geçmiş uçuş verileri kullanılarak makine öğrenme yöntemlerinin de yardımıyla kanal özellikleri belirlenmektedir. Bu nedenle öncelikle İHA'lar ve İHA'lardaki kablosuz haberleşme sistemleri ile ilgili literatür taraması yapılmıştır.

Farklı boyut ve özelliklere sahip İHA'lar gelecekteki kablosuz iletişim sistemlerinde çok sayıda uygulamada önemli bir yere sahip olacaktır. Örnek olarak İHA'lar sevkiyat teslimi, afet durumlarında acil durum iletişimi, yaban hayatı için gözetim ve trafik izleme gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. İHA'lar, sabit karasal iletişim altyapılarının yerleştirilmesinin mümkün olmadığı uzak konumlara erişimde de hayati öneme sahiptir. [1]'de temel amaç, İHA destekli kablosuz iletişime genel bir bakış sunmaktır. Temel ağ mimarisi, ana kanal özellikleri ve tasarım hususlarının yanı sıra İHA hareketlerini kullanan anahtar performans geliştirme teknikleri çalışma içerisinde sunulmaktadır.

Pilotsuz uçak veya uzaktan kumandalı uçak olarak da bilinen İHA'lar, yüksek hareket kabiliyetleri ve düşük maliyetleri ile son zamanlarda geniş bir uygulama yelpazesi bulmuşlardır [2]. Tarihsel olarak İHA'lar ilk olarak askeri amaçlar ile kullanılmıştır. Düşman bölgelerdeki pilot kayıplarını azaltmak amacı ile görev yapmışlardır. Sürekli olarak azalan maliyetleri ve küçülen boyutları ile de sivil amaçlar için erişilebilir hale gelmişlerdir. Bu nedenlerle İHA'lar hava durumu takibi, orman yangınlarının önlenmesi, trafik kontrolü, kargo taşıma, acil durum arama ve kurtarma, yabani hayat gözetleme ve baz istasyonu gibi özel amaçlarda da kullanılmaya başlanmıştır [3]. İHA'lar sabit kanatlı ve döner kanatlı olarak farklı güçlü ve zayıf yönleri sahip şekilde iki kategoriye ayrılabilirler. Örneğin, sabit kanatlı İHA'lar genellikle yüksek hıza ve ağır yük taşıyabilme kabiliyetlerine sahiptirler. Ancak havada kalmak için sürekli ileri yönlü hareketi sürdürmeleri gerekir. Bu nedenle yakın izleme gibi sabit duruş gereken uygulamalar için uygun değildirler. Buna karşılık, döner kanatlı İHA'lar, sınırlı hareket kabiliyetlerine ve faydalı yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Ancak havada sabit

kalabilirler ve herhangi bir yönde hareket edebilirler. Yani uygulama türünü göre uygun İHA türü seçimi önemlidir.

İHA'ların gelecekteki iletişim sistemlerinde yüksek hızlı kablosuz haberleşme sağlayıcısı olarak önemli bir rol alması bekleniyor. Kentlerde veya dağlık arazilerde meydana gelen haberleşme görüş hattının gölgelenmesi durumlarında ve doğal afetler sebebiyle iletişim altyapılarının zarar görmesi veya kullanılamaz hale gelmeleri durumlarında İHA destekli kablosuz iletişim sistemleri haberleşmenin devamlılığı için umut verici bir çözüm sunar [4].

İHA'lar örneğin spor etkinliğinde veya bir konser alanında sabit karasal servis sağlayıcılarına destek vermek için görev yapabilirler. İHA'ların bu tür durumlarda baz istasyonu olarak tercih edilmelerinin birkaç önemli sebebi vardır. İlk olarak, İHA'lar uygun maliyetlidir ve hızlı konuşlandırılabilir sistemlerdir. Bu sebeplerle İHA'lar, beklenmedik durumlar ve sınırlı süreli görevler için oldukça uygundur. Ayrıca düşük irtifalarda görev yapabilen İHA'lar, çoğu senaryoda önemli olan kaynak ve hedef arasındaki doğrudan iletişimi, kısa menzilli görüş hattı kurarak daha sağlıklı bir şekilde kurabilirler. Ek olarak İHA'lar, manevra kabiliyetleri sayesinde iletişim durumunu en iyi hale getirerek haberleşme kanalı için dinamik olarak performans geliştirme de sağlayabilirler [5].

Umut verici birçok faydaları olmasına rağmen İHA'lar kablosuz iletişimde birkaç tasarım zorluğuna sahiptirler. Birincisi, karasal kablosuz haberleşme sistemlerinde olduğu gibi kritik haberleşme fonksiyonlarına sahip olmaları gerekliliklerinin yanı sıra İHA'lar gerçek zamanlı olarak güvenli bir hat ile kontrol edilebilmelidir, haberleşme gecikmeler düşük olmalıdır ve birden çok İHA'nın görev yapması durumunda çarpışma durumundan kaçınmaları için seyrek ve dinamik ağ topolojilerine sahip olmaları gerekmektedir [6]. Sonuç olarak, çoklu İHA koordinasyonlarının, güvenilir ağ bağlantısı sağlayabilecek şekilde ve bağlantı kesinti olasılığını hesaba katarak tasarlanması gerekir [7]. Diğer bir temel zorluk, İHA'ların görev süresini sınırlayabilecek boyut, ağırlık ve güç kısıtlarından kaynaklanmaktadır. İHA'larda enerji verimliliği ve enerji tüketimi uçuş süresini ve iletişim kalitesini belirlediğinden son derece önemlidir. Bu nedenle İHA'larda boyut, ağırlık ve güç ödünleşiminin en verimli şekilde planlanması gerekmektedir [8], [9]. Son olarak çoklu İHA operasyonlarında komşu hücreler arasındaki girişim koordinasyonu, karasal

hücresel sistemlere göre daha zordur. Bu nedenle, İHA destekli hücresel kapsama için özel olarak tasarlanmış etkili girişim yönetimlerinin kullanılmasına ihtiyaç vardır [1].

Birçok uygulama için İHA'lar, yer kontrol istasyonundan komut verilerini gerçek zamanlı olarak almalı ve faydalı yük verileri yer kontrol istasyonlarında sürekli izlenebilmelidir. Bu nedenle, İHA iletişimlerinde iletişim kesintileri veya yeniden iletiler oldukça istenmeyen bir durumdur [10]. Kanal kesintilerini ve yeniden iletileri en aza indirmek ve enerji verimliliğini artırmak için uçtan-uca kanal özelliklerinin belirlenmesi İHA haberleşmesi için gereklidir [11].

İHA haberleşmesinde havadan yere ve yerden havaya iletişim için kanal özelliklerinin eksiksiz belirlenmesi kapsamlı bir işlemdir ve çok sayıda faktör rol oynar [12]. Kanal özelliklerinin belirlenmesinde dikkate alınacak önemli hususlar vardır. Bu hususların ilki uçak gövdesi gölgelemesidir. İHA'lar daha önce belirtildiği gibi döner veya sabit kanatlı olabilirler. Manevralar sırasında sinyaller İHA gövdesi tarafından engellendiğinde ortaya çıkan uçak gövdesi gölgelemesi, döner veya sabit kanatlı İHA'lar için oldukça farklıdır [13]. Ayrıca, İHA anteninin İHA gövdesindeki montaj yeri, yer sistemi anteninin ve İHA'nın coğrafi koordinatları da uçak gövdesi gölgelemesini etkiler [14]. Benzer şekilde İHA'lar taksi yaparken, park durumundayken, uçarken, inerken ve kalkarken farklı kanal özellikleri gösterirler. İHA'ların seyir hızı Doppler yayılmasını etkiler. Ek olarak, İHA'ların daha yüksek hızlarda hareket etmesi artan hava sürtünmesine ve mekanik türbülansa neden olur. Bu durumlar da daha yüksek gürültülere maruz kalınmasına yol açar [15]. İHA'ların maksimum çalışma irtifaları çok yönlü bileşenleri etkiler. Bir İHA'nın irtifasını artırması genellikle çevredeki saçıcıların sayısının azalmasını sağlar [16]. Ayrıca, operasyon bölgelerinin de çok yönlü bileşenler üzerinde etkisi vardır. Bir İHA dağlık bir bölgede ise daha fazla saçıcı etkisine maruz kalırken, deniz üzerinde görev yapan bir İHA saçıcı etkisi basit bir 2-ışınlı model ile ifade edilebilir [12].

Tez çalışmasının temel konusu olan kanal özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili literatür oldukça geniştir [17]. Bu nedenle kanal özelliklerinin belirlenmesi konusundaki gelişimin daha anlaşılır olması için incelemede kronolojik sıraya olabildiğince dikkat edilmiştir.

Havadan yere veri iletim kanalları üzerine yapılan en eski çalışmalardan biri [18]'dir. Yazarlar farklı irtifalarda VHF bandında okyanus üzerinde testler yapmışlardır.

Çalışma sonunda en uygun bağlantı aralıklarını günlük atmosferik etkilerin bir sonucu olarak ifade etmişlerdir. Atmosferik etkilerin azaldığı zaman aralıklarında görüş hattı ötesinde haberleşme sağlanabileceğini göstermişlerdir. Bir diğer öncül makale olan [19]'da ise L-bantta okyanus üzerinde çok yollu yayılma özellikleri belirlenmiştir. Belirli yükseklik açısı aralıklarında yapılan testler ile uydu haberleşmesi modellenmeye çalışılmıştır. Okyanustan yansıyan çok yollu yayılma, rastgele bir zaman değişiminin fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Çok yollu gecikmeler ayrıntılı olarak incelenmese de belirtilen bir örnekte yansıma gecikmesi 16  $\mu$ s olarak belirtilmiştir.

[20]'de çok yollu sönümlenmenin frekans seçimli olmadığı bir dar bant sinyal koşulu ele alınmaktadır. Yazarlar, düz sönümlenme etkisini modellemek için geometriden ve bazı matematiksel yaklaşımlardan faydalanmışlardır. Oluşturulan model görüş hattı bileşenine eklenen çok yollu yansımaların karmaşık Gauss bileşenine sahip olması nedeniyle rastgeledir. [21]'de ise yazarlar, Gauss sonucunu veren yansıma katsayıları için elektromanyetik tabanlı bir model kullanmışlardır. L-Bantta yapılan testlerde arazi özellikleri ayrıntılı olarak belirtilmemiş, sinyal bant genişlikleri ve dolayısıyla gecikme yayılımları sağlanmamıştır. Ancak, elde edilen girişim modeli 2-ışın modeli ile uyushmaktadır. [22]'de esasen hava aracından uyduya giden sinyal kanalı incelenmektedir. Yansıma bileşeninin Doppler spektrumu için VHF ve L-banttaki analitik model parametreleri kullanılmıştır.

[23]'te, L-bant havadan yere haberleşme kanalının 2-ışınlı davranış gösteren dar bant modellemesi için 5-12m yer anten yükseklikleri ve farklı uçak irtifaları kullanılmaktadır. Çalışmada gecikme yayılma verileri ve açık modeller sağlanmamıştır.

[24]'te, havadan yere haberleşme kanalının zayıflamalarını tahmin etmek amaçlanmıştır. Hava aracının bir ağaç korusu içinden geçtiği senaryoda zemin yansımaları geometrik kırınım teorisi ile açıklanmaktadır. VHF bantta yapılan testlerde yapraklar nedeniyle 10dB'ye yakın kayıp yaşandığı gösterilmiştir.

Kanalın tamamen olasılık tanımını yapmaya çalışan havadan yere haberleşme kanalındaki ilk makalelerden biri [25]'tir. Yazar çalışmasında dar bant varsayımı ile zeminden yansıyan bileşenlerin Gauss olarak modellenebileceğini varsaymıştır. [26]'da eş yönlü saçılan karasal hücrel spektrumun modifikasyonuna dayalı olarak Doppler spektrumu için analitik bir formülasyon sağlanmıştır. Bu modifikasyon,

saçılmanın yer istasyonu etrafındaki küçük azimut açıları aralığında tekdüze olduğunu varsayar. Varsayılan Doppler spektrumundan, dar bant zarf fonksiyonu tahmin edilir. Çalışmada yer istasyonu anten yüksekliği belirtilmemiştir.

[27], havadan yere haberleşme kanalının geniş bant modellemesine ilişkin ilk makaleyi temsil etmektedir. Burada sonuçlar, yaklaşık 5 MHz bant genişliğine sahip VHF banttaki sinyaller ile elde edilmiştir. Sonuçlarda tipik 2-ışınlı modeller gözlemlenmiştir. Ricean K-faktörleri ortalama 16dB alınmıştır. K faktörüne ilişkin başka istatistik sağlanmamıştır. İki havalimanında yapılan uçuş testleri için gecikme yayılma sonuçları sağlanmıştır. Gecikme yayılmasının ortalama değeri yaklaşık 4  $\mu$ s'dir. Gecikme yayılımları kabaca Gauss olarak tanımlanmıştır ve standart sapmaları 1,2-1,5  $\mu$ s aralığındadır. Arazi veya bina engeliyle ilgili ek ayrıntı verilmemiştir.

[28]'deki çalışmada, VHF bandındaki havadan yere haberleşme kanal modelinin tanımı için çok sayıda yazarın sonuçları özetlenmektedir. Çalışmadaki model üç bileşenden oluşmaktadır: görüş hattı bileşeni, yerden yansıyan bileşen ve küçük ölçekli sönümlenme bileşeni. Görüş hattı bileşeninin ve yerden yansıyan bileşenin genlikleri ve fazları, geometri ve zemin yansıma katsayılarının tahminleri kullanılarak gerçeğe en yakın anten kazanç katsayıları ile birlikte tahmin edilmektedir. Görüş hattı bileşeni ve yerden yansıyan bileşen etkili bir şekilde 2 ışınlı bir model oluşturur. Önceki referanslarda olduğu gibi 2-ışınlı modelin ortalama olarak kanal kazancı ölçümleri ile uyduğu gösterilmiştir. Küçük ölçekli sönümlenme bileşeninin tartışması daha az ayrıntılıdır ve önceki çalışmalara ve karasal kanal varsayımlarına atıfta bulunmaktadır.

[29]'da yazarlar, [28]'de olduğu gibi istatistiksel havadan yere haberleşme kanalının eksiksiz bir açıklamasını denemektedir. Çalışmada hava aracı ile haberleşme birkaç sınıfa ayrılır: hava aracı taksi yaparken, park durumundayken, uçarken, inerken ve kalkarken. Hava aracının taksi yaparken ve park durumundayken havaalanı yüzey alanından etkilenmesi karasal hücreli modellerin istatistikleriyle ifade edilmektedir. Elde edilen modeller VHF bandı içindir ancak C-bantta havaalanı yüzey alanı etkisini inceleyen [30]-[32]'deki modeller gibi kötümserdir. Yazarlar [29]'daki kanal modelinde görüş hattı bileşeni için Ricean genlik istatistiğine ve yerden yansıma bileşeni için Rayleigh genlik istatistiğine sahip 2-ışınlı bir kanal varsaymaktadır. Maksimum Doppler kaymalarının, hız ve frekans ile kolayca hesaplanabilir olduğu belirtilmiştir. Yazarlar ayrıca [25]'de olduğu gibi küçük azimut açıları aralığında

uygulanabilen bir Doppler spektrumunu kullanırlar. Çalışmada iniş ve kalkış modelleri uçarken ve havaalanı yüzeyindeyken (taksi yaparken ve park durumundayken) elde edilen modellerin arasında birer modeldir şeklinde kısaca ifade edilmiştir.

[33]'te, 2,2 GHz frekansında çok yüksek kazançlı yer sistemi antenine sahip bir havacılık telemetri kanalının dar bant modeli açıklanmaktadır. Çalışmada kullanılan antenler çok yönlü yansımaları ve saçılmaları çok etkili bir şekilde bastırır. Bu nedenle buradaki model, 2-ışınlı bir modele ek olarak [28]'dekine benzer bir Rayleigh bileşendir. Yerden yansıma genliğinin görüş hattı genliğe oranının 0,5 ila 0,9 aralığında ve görüş hattı gücünün yerden yansıyan bileşenlerin gücüne oranının 11 ila 15 dB aralığında olduğu belirtilmiştir. Bu oranlar ters orantılıdır ve anten huzme genişliğine ve yan lob büyüklüğüne göre değişkendir. Modelde gecikme yayılımı hakkında bilgi verilmemiştir.

[29]'un ikinci yazarı [34]'te çalışmalarını biraz daha ayrıntılı olarak genişletmiştir. Çalışmada özellikle olasılık modellerin oluşturulması, frekans etki alanındaki karşılık modelleri ve çok taşıyıcılı modülasyonların kullanımı gibi konular açıklanmıştır. [34]'te yeni deneysel sonuçlar verilmemiştir.

[35], havadan yere haberleşme kanalına uzamsal bir model tasarlamak için geometriyi kullanır. Çalışmada, varsayılan bir saçılma koşulu ile gecikme değerinin ortak olasılık yoğunluk fonksiyonu, yükseklik açısının bir fonksiyonu olarak türetilir. Yüksek frekans ve pürüzsüz zemin yüzeyi varsayımları sayesinde bu geometrik model neredeyse frekans bandından bağımsızdır.

[36]'da yazarlar, 2 GHz'de çalışan havadan yere haberleşme kanalı için deneysel geniş bant kanal modelleme sonuçlarını açıklamaktadır. Bu çalışmada yer istasyonu anteni bir üniversite kampüsünde birkaç metre yüksekliktedir ve kampüsün etrafında birkaç bina mevcuttur. Kullanılan antenler tek kutupludur. Yazarlar, 7,5 ila 30 derece arasındaki yükseklik açıları için gecikme yayılımlarını ölçmüşlerdir. En büyük gecikme yayılımı değeri olan 100ns, 7,5 derecelik yükseklik açısında elde edilmiştir ve açı değeri büyüdükçe gecikme yayılımı değeri küçülmektedir. Yazarlar, görüş hattı bileşeninin aynı yükseklik açısında sabit olduğunu ve yerden yansıma bileşeninin modelinin Ricean olduğunu belirtmişlerdir.

[37]'de, [33]'ün başyazarı çalışmalarını 10 MHz sinyaller kullanarak geniş bant durumunda iletmiştir. 2,2 GHz frekansında çok yüksek kazançlı yer sistemi

antenine sahip bir havacılık telemetri kanalını modellemiştir. Çalışmada kullanılan antenler yine çok yönlü yansımaları ve saçılmaları çok etkili bir şekilde bastırır. Dolayısıyla çalışmadaki gecikme yayılımları yalnızca 75 ns düzeyindedir. 3-ışınlı modelin yer yansıması bileşeni 0,7 ila 0,96 aralığında bir genliğe sahip olacak şekilde modellenmiştir. Küçük ölçekli sönümlenme bileşeni ise 0,02 ila 0,8 aralığında bir genliğe sahiptir. Çalışmada gecikme tahminleri verilmemiştir.

[38]'de karmaşık kentsel alanlarda bulunan yer istasyonlarının yol kaybı için analitik bir model sağlanmıştır. Yazarlar modeli geleneksel mesafenin değil, yükseklik açısının bir fonksiyonu olarak tasarlamışlardır. Çalışmada yalnızca yol kaybı modellendiğinden gecikme yayılma analizi sağlanmamıştır. Ancak çalışmada gölgeleme tahmini de yapılmıştır.

[39]'da bir L-bant havadan yere haberleşme kanalı modeli geliştirilmiştir. Çalışmanın temeli ölçülen yansıma katsayılarına dayanmaktadır ve dağlık bir ortamda gecikme yayılımlarını tahmin etmek için ışın izleme modellerini kullanmaktadır. Ortalama gecikme yayılımı 1,4  $\mu$ s olarak bulunmuştur. Işın izleme modelinden ise 3  $\mu$ s'lik maksimum gecikme yayılımları elde edilmiştir. Görüş hattı bileşeni Ricean istatistiklerine ve diğer bileşenler Rayleigh istatistiklerine göre tasarlanmıştır. Doppler spektrumları ile ilgili bilgi verilmemiştir. Model sonuçları iyi olsa da ışın izleme modeli çok karmaşıktır. Çünkü ilgili her ortam için özelleştirilmesi gerekir. Ek olarak, nihai model ölçümlerle desteklenmemiştir.

[40]'ta yazarlar, havacılık telemetri kanalı için uçağın bazı kısımları tarafından gölgelenmenin azaltılmasına yönelik çok antenli bir yaklaşımı açıklamaktadır. Belirli bir kanal modeli sunulmamaktadır. Ancak analizler, uçaktaki iki verici anten üzerinden elde edilen en iyi sonuçlarla gölgelemeyi azaltmak için ilginç bir yöntem sunmaktadır. Çalışmada yerden havaya çoklu anten bağlantısına değinilmemiştir. Ancak çalışma sonucuna göre iki antenli tasarım uçak gövdesi gölgelemesini azaltmaktadır.

[41], C-bant havadan yere haberleşme kanalları üzerine yapılan çok yeni bir çalışmadır. Hem yol kaybı hem de saçılmalar için ölçülen değerler kullanılmıştır. Bu ölçümler, yer istasyonu anten yüksekliği yaklaşık 18 m olan küçük bir havalimanında alınmıştır. Yol kaybı için özel bir model geliştirilmemiştir. Gecikme yayılımları

ortalama yaklaşık 80 ns, maksimum yaklaşık 400 ns olarak bulunmuştur. Uçak gövdesi gölgelemesinin etkisi ise 10 dB seviyesindedir.

[42]'de havadan yere haberleşme kanallarında C-banttaki sinyaller ile yapılan testlerde manevraya bağlı olarak uçak gövdesi gölgelemesinin etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, uçak yer istasyonu antenine dik olarak doğrusal bir rota izlediğinde etki 10 dB'ye, uçak dairesel uçuşunda ise etki 28 dB'ye kadar çıkmaktadır. Çalışmada uçak gövdesi gölgelemesi için hiçbir istatistiksel model sağlanmamıştır.

[43]'te, alçak irtifa hava platformları için kanal modellemesi hakkında ayrıntılı incelemeler verilmiştir. Deneysel kanal modellerinin yanı sıra analitik kanal modelleri de sağlanmıştır. Analitik kanal modelleme yöntemleri rastgele olmayan, rastgele ve geometri tabanlı olarak kategorize edilir. Ek olarak çalışmada, uçak gövdesi gölgelemesi, sabit olmayan kanallar ve çok yönlü alışı tekniklerinin uygulanabilirliği açıklanmıştır.

[44]'te, yol kaybı ve kanal gecikmesi, geometri tabanlı tekniklerle su üstü ortamları için modellenmiştir. Çalışmada geliştirilen yarı sonlu iki ışınlı çok yönlü modeller, yalnızca görüş hattı engellenmediğinde geçerlidir. Bu nedenle, uçak gövdesi gölgelemesinin yaşandığı koşullarda geçerli değildir. [45]'te, benzersiz ve daha az çalışılmış bir kanal bozukluğu olan uçak gövdesi gölgelemesi, ölçülen veriler üzerinde istatistiksel yöntemler kullanılarak çalışmaya dâhil edilmiştir.

Günümüzde herhangi bir uygulama için bol miktarda veri toplanıp bu veriler kolay bir şekilde depolanabilmektedir. Ayrıca toplanan veriler teknolojinin desteği ile istenen şekilde işlenebilmektedir. Veri depolama ve işlemenin kolaylaşması ile de makine öğrenme yöntemleri muazzam bir popülerlik kazanmıştır. Birçok uygulamada kullanıldığı gibi kanal özelliklerinin belirlenmesinde ve haberleşme problemlerinin çözümünde makine öğrenme yöntemlerinden yararlanılmaktadır.

[12]'de yazarlar tarafından havadan yere veri aktarımı kanal ölçümü üzerine çalışma yapılmıştır. Ancak deneysel olarak dahi olsa istatistiksel kanal modellemesi için birçok farklı alan ve zaman aralığında kapsamlı veri ölçümleri gereklidir [46].

[47]'de havadan yere olasılığa dayalı kanal modellemesi için 3 boyutlu ışın izleme modeli kullanılmıştır. Çalışmada görüş hattı ve görüş hattı olmayan haberleşme ortamlarının olasılıkları incelenmiştir. Ayrıca İHA irtifası ve İHA'nın yer sistemi antenine göre irtifa açısı bilgilerinden de çalışmada yararlanılmıştır. Bu tür kanal



modelleme çalışmalarının bol miktarda coğrafi koordinat ihtiyacı olduğundan geniş kapsamda uygulanmaları oldukça zordur.

[48]'de yazarlar olasılıksal kanal modellemesi önermektedir. Çalışmada olasılıksal kanal modellemesi, 3 boyutlu ışın izleme modelleri yerine, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU-R) tarafından sağlanan çeşitli ortamların genel geometrik istatistiklerine dayalı olarak yapılır [49]. Bu olasılığa dayalı istatistiksel model ile havadan yere iletişim kanalının temel özelliklerinin basitçe gösterilmesine rağmen, model sonuçları daha fazla doğrulamaya ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, mevcut elde edilmiş kanal modellerinin eksikliklerinin giderilmesi için havadan yere iletişim kanal özelliklerini genel olarak değerlendirebilen daha fazla kanal ölçümü ve örnek modeller gereklidir.

[50]'de makine öğrenme yöntemleri yayılma kanalını kümeleme ve modelleme için uygulanmıştır. [51]'de havadan yere iletişim bağlantıları için görüş hattı ve görüş hattı olmayan kanal durumları sınıflandırılmaktadır. Ayrıca çalışmada bina konumları ve yükseklikleri gibi saçılma üzerinde etkisi olan diğer faktörleri modellemek için makine öğrenme yöntemleri uygulanmaktadır. [52]'de iç mekân yerleşim ayarlamaları için görüş hattı olmayan kanal özelliklerini belirlemek amacı ile makine öğrenme yöntemleri kullanılır. Ancak iç ortamlar, daha karmaşık ve dinamik olarak sürekli değişen dış ortamlardan oldukça farklıdır. Bu nedenle, İHA'lar için güvenilir ve doğru kanal modelleme teknikleri elzemdir. [53]'te İHA'nın ve yer sistemi anteninin coğrafi koordinatları, nem, sıcaklık ve atmosferik basınç makine öğrenme algoritmalarına (en yakın komşular, bağlantım ağaçları ve yapay sinir ağları) girdi olarak kullanılmaktadır.

[54]'te İHA'ların dış ortamlardaki 3 boyutlu kanal durum modellemeleri gerçek zamanlı olarak yapılmaktadır ve ayrıca mobil kullanıcıların iletişim bağlantı kaliteleri de gerçek zamanlı olarak tahmin edilmektedir. Mobil kullanıcıların görüş hattı ve görüş hattı olmayan kanal durum bilgileri düşük gecikmeli ve gerçek zamanlı olarak alınan sinyal gücü bilgisi ile gözetimsiz olarak tahmin edilmektedir. Ayrıca modelleme için serbest uzay yol kaybı ve uçak gövdesi gölgelemesi de incelenmektedir. Önerilen yöntem ile oluşturulan modelin etkinliği benzetim ortamı sonuçları ile karşılaştırılmaktadır.

Literatürde bu tez çalışmasında yapılan çalışmaya benzer çalışma yapmış iki makale bulunmaktadır. [45]'te yazarlar uçak gövdesi gölgelemesi üzerinde çalışmışlar ancak

yalnızca İHA'nın yuvarlanma açısını ele almışlardır. Sapma ve yunuslama açılarını, yer sistemi anteninin ve İHA'nın coğrafi koordinatlarını kullanmamışlardır. Benzer şekilde, [54]'te yazarlar kanal özelliklerinin belirlenmesi için uçak gövdesi gölgelemesini incelemişlerdir. Ancak sonuçlar çok düşük irtifa platformları içindir. Ek olarak, analizde İHA Euler açıları, yer sistemi anteninin ve İHA'nın coğrafi koordinatları kullanılmamıştır. Bu tez çalışmasında, orta irtifa platform verileri kullanılarak yerden havaya İHA haberleşmesi için bağlantı bütçe analizi ve uçak gövdesi gölgelemesi incelenmektedir. Ayrıca analizlerde İHA Euler açıları, yer sistemi anteninin ve İHA'nın coğrafi koordinatları kullanılmaktadır. İletilen sinyaller üzerine etki eden bütün kayıpları ifade edebilmek için makine öğrenme yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu nedenle problem denetimli bir regresyon öğrenme problemi olarak modellenmektedir. Sonuçlar için EBT ve üstel GPR yöntemleri kullanılmaktadır.

### 3. METODOLOJİ

Çalışmadaki temel amaç daha önce de belirtildiği gibi geçmiş uçuş verileri ham veya işlenmiş şekilde kullanılarak İHA'lar için kanal özelliklerinin belirlenmesidir. Geçmiş uçuşlardan yer sisteminin çıkış gücü, yer sistemi anteninin konumu ve kazancı kullanılır. Hava aracının ise aldığı güce ek olarak konumu ve Euler açıları kullanılır. Özetleyecek olursak yer sisteminden çıkan sinyalin hava aracına ulaşana kadar maruz kaldığı bütün negatif etkiler için, hava aracı ve yer sistemi anteninin konumu ve hava aracının Euler açıları kullanılarak kanal özellikleri belirlenir.

Bu bölümde öncelikle yer sistemi anteninin ve hava aracının konumuna ek olarak hava aracının Euler açıları kullanılarak hava aracı antenine gelen sinyalin antenin hangi noktasından girdiğinin küresel koordinat sisteminde bulunması anlatılacaktır. Daha sonra hem ham verilere (yer sistemi anteni konumu, hava aracı konumu ve hava aracı Euler açıları) hem de işlenmiş verilere (küresel koordinat sisteminde hava aracı antenine sinyal giriş noktası) makine öğrenme algoritmalarının uygulanışı ve en uygun yöntemin seçilişi anlatılacaktır. Seçilen ve uygulanan yöntemler kısaca anlatılıp bölüm sonlandırılacaktır.

#### 3.1.Link Bütçesi ve Uçak Gövdesi Gölgelemesi Analizi

Havacılık haberleşmesinde güvenilir, yüksek verimli ve enerji tasarruflu iletişim sağlamak için, doğru bir bağlantı bütçe analizi oldukça gereklidir.

[55]'te yer sisteminden iletilen ve hava aracında alınan güç seviyeleri arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{\bar{L}_{total}} \quad (3.1)$$

Formül 3.1'de,  $P_r$  hava aracında alınan sinyal gücüdür ve  $P_t$  yer sistemindeki güç yükseltecinin maksimum çıkış gücüdür.  $G_r$  ve  $G_t$  parametreleri sırasıyla alıcı ve verici anten kazançlarıdır ve  $\bar{L}_{total}$  tüm kayıpların toplamıdır.  $\bar{L}_{total}$  için yer sisteminden

çıkan sinyalin hava aracına ulaşana kadar maruz kaldığı bütün negatif etkiler ifadesi de kullanılabilir ve  $\bar{L}_{total}$  genel olarak şu şekilde yazılabilir:

$$\bar{L}_{total} = L_{backoff} L_{tx} L_{rx} L_{rain} L_{atm} L_{stat} L_{pol} L_{fs} \quad (3.2)$$

Burada sırasıyla  $L_{backoff}$ ,  $L_{tx}$ ,  $L_{rx}$ ,  $L_{rain}$ ,  $L_{atm}$ ,  $L_{stat}$ ,  $L_{pol}$  ve  $L_{fs}$ , geri yansıma değerini, güç yükselteci (PA) ile verici anten arasındaki vericideki kayıpları, alıcı anten ile düşük gürültülü yükselteç (LNA) arasındaki alıcıdaki kayıpları, yağmur kaybını, atmosferik kaybı, istatistiksel kayıpları, polarizasyon kaybını ve serbest uzay yol kaybını gösterir. Serbest uzay yol kaybı ayrıca  $L_{fs} = [(4\pi d)/\lambda]^2$  olarak yazılabilir. Formülde  $\lambda$  dalga boyu ve  $d$  verici ve alıcı antenler arasındaki mesafedir.

Formül 3.2 kullanılarak bağlantı bütçe analizi yapılırken  $L_{backoff}$ ,  $L_{tx}$  ve  $L_{rx}$  için ölçüm sonuçları kullanılır. Yani özetle kablo kayıpları laboratuvar ortamında ölçülerek denkleme katılır. Ancak bu kayıplar pratikte genellikle farklı değerler gösterirler. Örneğin, bir kablo üzerinden kayıp belirli bir değer ölçülebilir, ancak kablo bir hava aracına yerleştirildiğinde, elektromanyetik girişim ve sarsılmalar gibi bütün etkiler dâhil olmak üzere birçok faktör nedeniyle kayıp artabilir.

Serbest uzay yol kaybı, tasarım sırasında sağlıklı bir haberleşmenin kurulması için planlanan maksimum mesafeye göre teorik olarak hesaplanır. Kalan diğer bütün kayıp değerleri ITU-R [56] gibi standartlarda tablo halinde verilmiştir, ancak teori ve uygulama genel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir. Örneğin, atmosferik kayıp ortalama olarak alınan kayıp değerinden farklı bir değer gösterebilir.

Bağlantı bütçe analizi için dB gösterimi genel olarak daha kullanışlıdır. Formül 3.1 dB'ye dönüştürüldüğünde formül 3.3'teki gibi yazılabilir.

$$P_r^{[dB]} = P_t^{[dB]} + G_t^{[dB]} + G_r^{[dB]} - \bar{L}_{total}^{[dB]} \quad (3.3)$$

Ayrıca hava aracı gövdesi yer sistemi anteni ile hava aracı anteni görüş hattı arasına girebilir. Bu durum gerçekleşirse haberleşme de ek bir kayıp meydana gelir. Bu kayba uçak gövdesi gölgelemesi denir. Uçak gövdesi gölgelemesi meydana gelirse, kendisini formül 3.3'e ek bir terim olarak sunar:

$$P_r^{[dB]} = P_t^{[dB]} + G_t^{[dB]} + G_r^{[dB]} - \bar{L}_{total}^{[dB]} - L_{shad}^{[dB]} \quad (3.4)$$

Formül 3.4'teki kayıp değerleri  $L_{total}^{[dB]} = \bar{L}_{total}^{[dB]} + L_{shad}^{[dB]}$  formülü ile bir araya getirilerek formül 3.5 elde edilir.

$$P_r^{[dB]} = P_t^{[dB]} + G_t^{[dB]} + G_r^{[dB]} - L_{total}^{[dB]} \quad (3.5)$$

Yer sistemindeki verici anten yönlüdür, her zaman hava aracını izler ve görüş hattındaki anten kazancı sabittir varsayımını yaparız. İletilen ve alınan güç seviyeleri de ölçüldüğünde formül 3.5'teki bilinen tüm bu terimleri formül 3.6'da sağ tarafta toplayarak yazabiliriz:

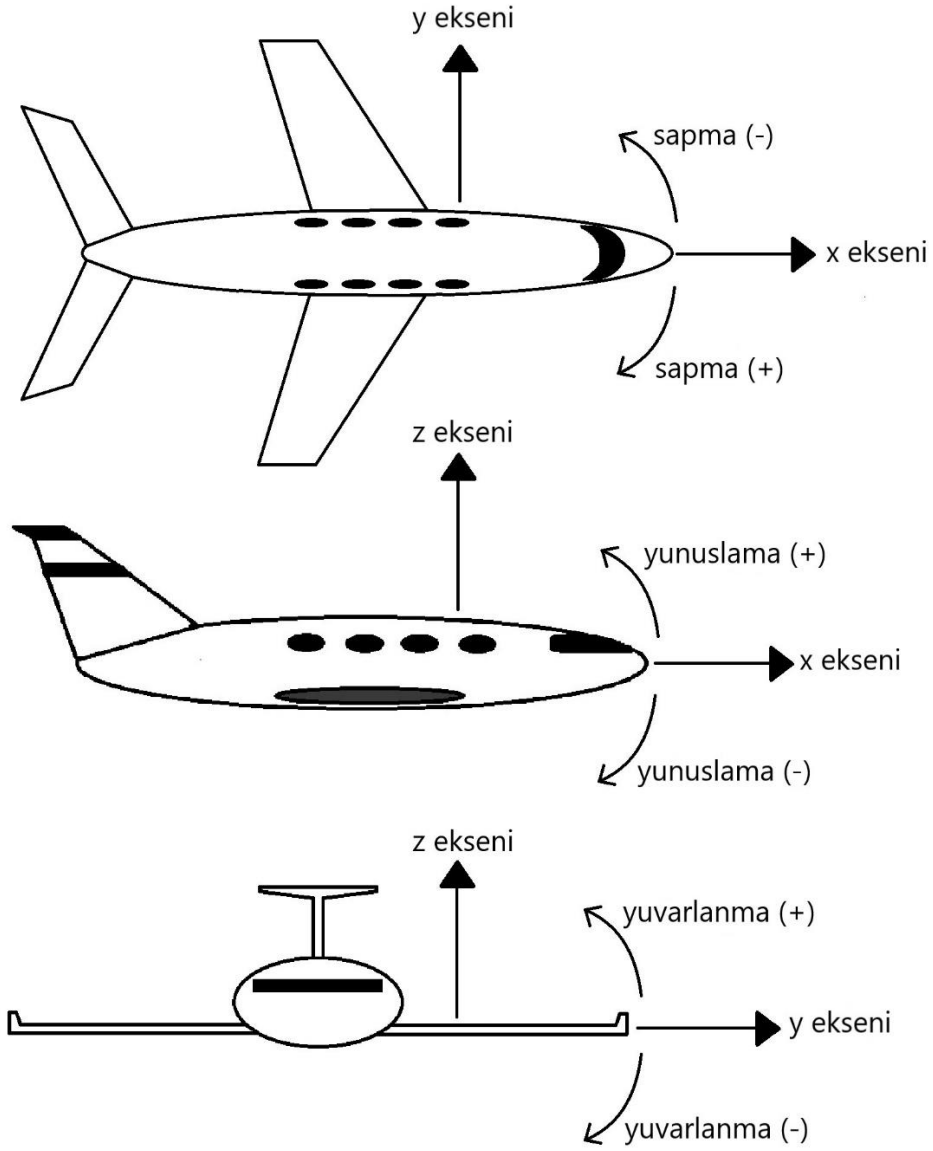
$$L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]} = P_t^{[dB]} + G_t^{[dB]} - P_r^{[dB]} \quad (3.6)$$

Bu sayede hava aracında yerleştirilmiş halde bulunan alıcı anten kazancı ile birlikte sinyalin maruz kaldığı bütün negatif etkiler bulunmuş olur.

Formül 3.6'da, alıcı anten kazancı genel olarak bilinmemektedir. Hava aracı üzerindeki anten yönsüzdür ve hava aracının ve yer istasyonunun coğrafi koordinatları ve hava aracının Euler açıları, gözlemlenen anten kazancı olan  $G_r^{[dB]}$ 'yi etkiler. Dahası, bu parametreler, İHA gövdesi sürekli hareket ettiğinden uçak gövdesi gölgelemesi olan  $L_{shad}^{[dB]}$  'yi de etkiler [57].

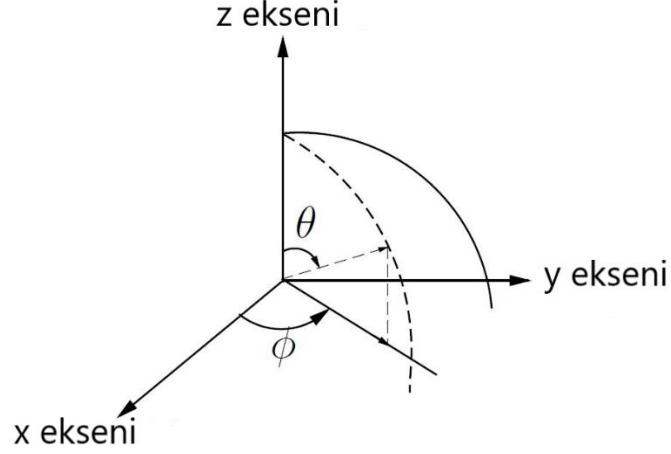
### 3.2.Hava Aracının Sinyal Alış Noktasının Bulunması

Uçağın kendi gövdesine göre konumu, Şekil 3.1'de gösterilen sapma, yunuslama ve yuvarlanma (yaw, pitch ve roll) açıları cinsinden ifade edilir. Bu açıları çalışma içerisinde sırasıyla Y, P ve R olarak radyan cinsinden ifade edeceğiz. Coğrafi koordinatları ifade eden  $Lat_G$ ,  $Long_G$ ,  $Alt_G$  ve  $Lat_A$ ,  $Long_A$ ,  $Alt_A$  (yer sistemi enlemi, yer sistemi boylamı, yer sistemi irtifası ve hava aracı enlemi, hava aracı boylamı, hava aracı irtifası) sırasıyla yer istasyonu ve hava aracı için coğrafi koordinatlardır. Çalışmada koordinatlar hesaplama kolaylığı için metre cinsinden ifade edilmiştir.



Şekil 3.1 : Hava platformları için Euler açılarının tanımı

Y, P, R, Lat<sub>G</sub>, Long<sub>G</sub>, Alt<sub>G</sub>, Lat<sub>A</sub>, Long<sub>A</sub> ve Alt<sub>A</sub> kullanılarak karşılık gelen küresel koordinatlar olan  $\Theta_{Y,P,R}$  ve  $\Phi_{Y,P,R}$  elde edilebilir.  $\Theta_{Y,P,R} \in [0^\circ, 180^\circ]$  ve  $\Phi_{Y,P,R} \in [0^\circ, 360^\circ]$ 'dir. İşlemler öncelikle ifade kolaylığı için radyan cinsinden yapıлып daha sonra derece cinsine çevrilecektir. Bu dönüştürme işlemi oldukça ayrıntılıdır ve [57]'de daha detaylı açıklaması bulunabilir. Küresel koordinat sistemindeki  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarının ifadesi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Küresel koordinat sistemindeki açılarının tanımı

Öncelikle Y, P, R değerlerinin tamamı 0 olarak kabul edilir ve hava aracı ile yer sistemi arasındaki enlem, boylam ve irtifa değerlerinin farkı bulunur. Bu farklar  $\Delta_{Lat}$ ,  $\Delta_{Long}$  ve  $\Delta_{Alt}$  değerleriyle ifade edilir. Y, P ve R değerlerinin 0 kabul edildiği ilk  $\Theta$  değeri formül 3.7’de ve ilk  $\Phi$  değeri formül 3.8’de verilmiştir.

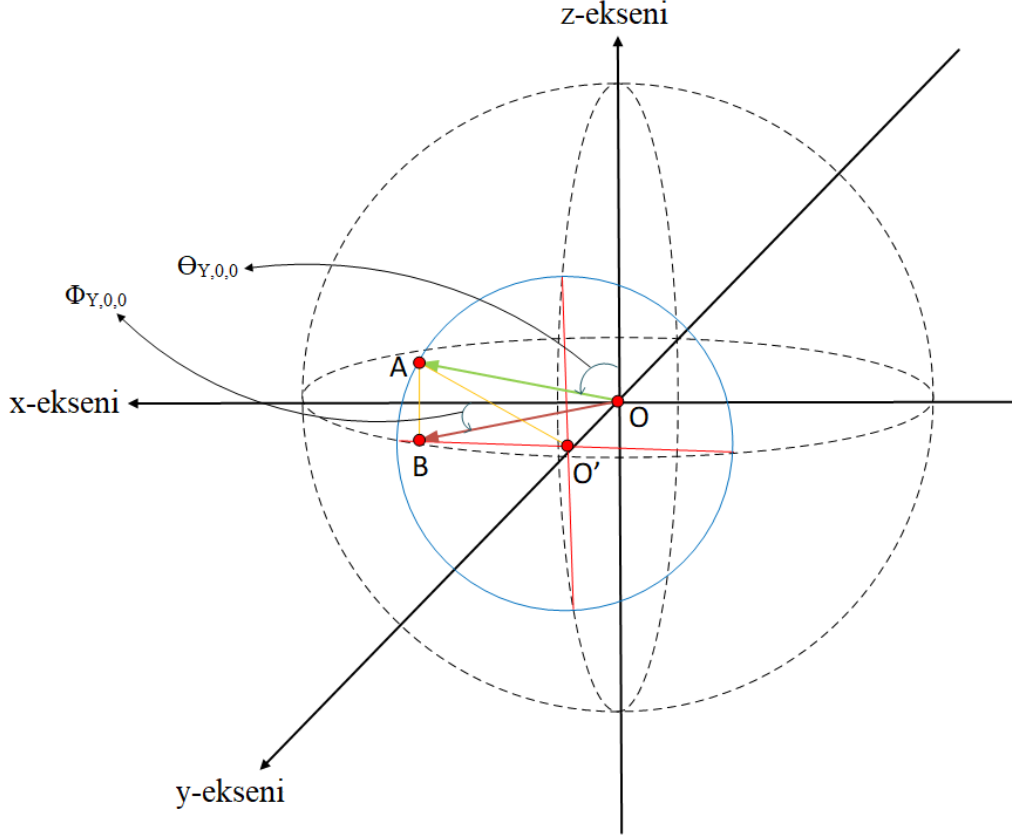
$$\Theta_{0,0,0} = \begin{cases} \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{\Delta_{Lat}^2 + \Delta_{Long}^2}}{\Delta_{Alt}} \right), & \text{eğer } \Delta_{Alt} \geq 0 \\ \pi + \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{\Delta_{Lat}^2 + \Delta_{Long}^2}}{\Delta_{Alt}} \right), & \text{eğer } \Delta_{Alt} < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\Phi_{0,0,0} = \begin{cases} \tan^{-1} \left( \frac{\Delta_{Long}}{\Delta_{Lat}} \right), & \text{eğer } \Delta_{Lat} \geq 0, \Delta_{Long} \geq 0 \\ \pi + \tan^{-1} \left( \frac{\Delta_{Long}}{\Delta_{Lat}} \right), & \text{eğer } \Delta_{Lat} < 0, \Delta_{Long} > 0 \\ 2\pi + \tan^{-1} \left( \frac{\Delta_{Long}}{\Delta_{Lat}} \right), & \text{eğer } \Delta_{Lat} > 0, \Delta_{Long} < 0 \\ \pi + \tan^{-1} \left( \frac{\Delta_{Long}}{\Delta_{Lat}} \right), & \text{eğer } \Delta_{Lat} \leq 0, \Delta_{Long} \leq 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

İlk  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarının elde edilmesinin ardından sırasıyla bu açılara Y, P ve R açılarının etkilerini ekleyeceğiz. Sapma açısının yani Y’nin  $\Theta$  açısı üzerine etkisi yoktur. Yani  $\Theta_{Y,0,0} = \Theta_{0,0,0}$  şeklinde ifade edilebilir. Sapma açısının  $\Phi$  değeri üzerine olan etkisi  $\alpha_{Y,0,0} = \Phi_{0,0,0} + Y$  iken formül 3.9’da verilmiştir.

$$\Phi_{Y,0,0} = \begin{cases} \alpha_{Y,0,0}, & \text{eğer } 0 \leq \alpha_{Y,0,0} < 2\pi \\ \alpha_{Y,0,0} - 2\pi, & \text{eğer } 2\pi \leq \alpha_{Y,0,0} \\ \alpha_{Y,0,0} + 2\pi, & \text{eğer } \alpha_{Y,0,0} < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

$\Theta$  ve  $\Phi$  açıların üzerine sapma açısının etkisinin bulunmasının ardından yunuslama açısının yani P'nin etkisine bakılır. Şekil 3.3'ten yararlanılarak elde edilen açılar yardımıyla  $\Theta_{Y,P,0}$  ve  $\Phi_{Y,P,0}$  bulunur.



Şekil 3.3 :  $\Theta$  ve  $\Phi$  açıların üzerine yunuslama açısının etkisi

$|AO| = \rho$  iken  $|AB| = \rho \cos \theta_{Y,0,0}$ ,  $|BO| = \rho \sin \theta_{Y,0,0}$ ,  $|BO'| = \rho \sin \theta_{Y,0,0} \cos \phi_{Y,0,0}$  ve  $|O'O| = \rho \sin \theta_{Y,0,0} \sin \phi_{Y,0,0}$  olarak bulunur.  $O'$  merkezli çemberin yarıçapı  $\rho'$  olarak alınırsa,  $\rho'^2 + |O'O|^2 = \rho^2$  iken  $\rho' = \rho \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}}$  olarak bulunur.  $\widehat{AO'B}$  açısı  $\gamma_P$  olarak tanımlanırsa formül 3.10 elde edilir.

$$\gamma_P = \tan^{-1} \left( \frac{|AB|}{|BO'|} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\tan \theta_{Y,0,0} \cos \phi_{Y,0,0}} \right) \quad (3.10)$$

$|AB|$ ,  $|BO|$  ve  $|BO'|$ ,  $\gamma_P$  yardımıyla tekrar yazılırsa formül 3.11 bulunur.



$$\begin{aligned}
|AB| &= \rho' \sin \gamma_P = \rho \sin \gamma_P \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}} \\
|BO'| &= \rho' \cos \gamma_P = \rho \cos \gamma_P \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}} \\
|O'O|^2 + |BO'|^2 &= |BO|^2 \\
|BO| &= \rho [\cos^2 \gamma_P - \cos^2 \gamma_P \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0} \\
&\quad + \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}]^{1/2}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

P değıştiğinde yeni gelen nokta  $A'$  ve noktanın x-y düzlemindeki izdüşümü  $B'$  olarak alınabilir. Yeni oluşan  $\widehat{A'O'B'} = \gamma_P - P$  olur. Bu ilişkiye göre  $|A'B'|$ ,  $|B'O|$  ve  $|B'O'|$  tekrar yazılırsa formül 3.12, formül 3.13 ve formül 3.14 elde edilir.

$$\begin{aligned}
|A'B'| &= \rho \sin(\gamma_P - P) \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}} \\
|B'O'| &= \rho \cos(\gamma_P - P) \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}} \\
|B'O| &= \rho [\cos^2(\gamma_P - P) - \cos^2(\gamma_P - P) \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0} \\
&\quad + \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}]^{1/2}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\alpha_{Y,P,0} = \tan^{-1}(|B'O|/|A'B'|)$$

$$\beta_{Y,P,0} = \tan^{-1}(|O'O|/|B'O'|)$$

$$\alpha_{Y,P,0} = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{\cos^2(\gamma_P - P) - \cos^2(\gamma_P - P) \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0} + \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}} \sin(\gamma_P - P)} \right) \tag{3.13}$$

$$\beta_{Y,P,0} = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta_{Y,0,0} \sin \phi_{Y,0,0}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,0,0} \sin^2 \phi_{Y,0,0}} \cos(\gamma_P - P)} \right) \tag{3.14}$$

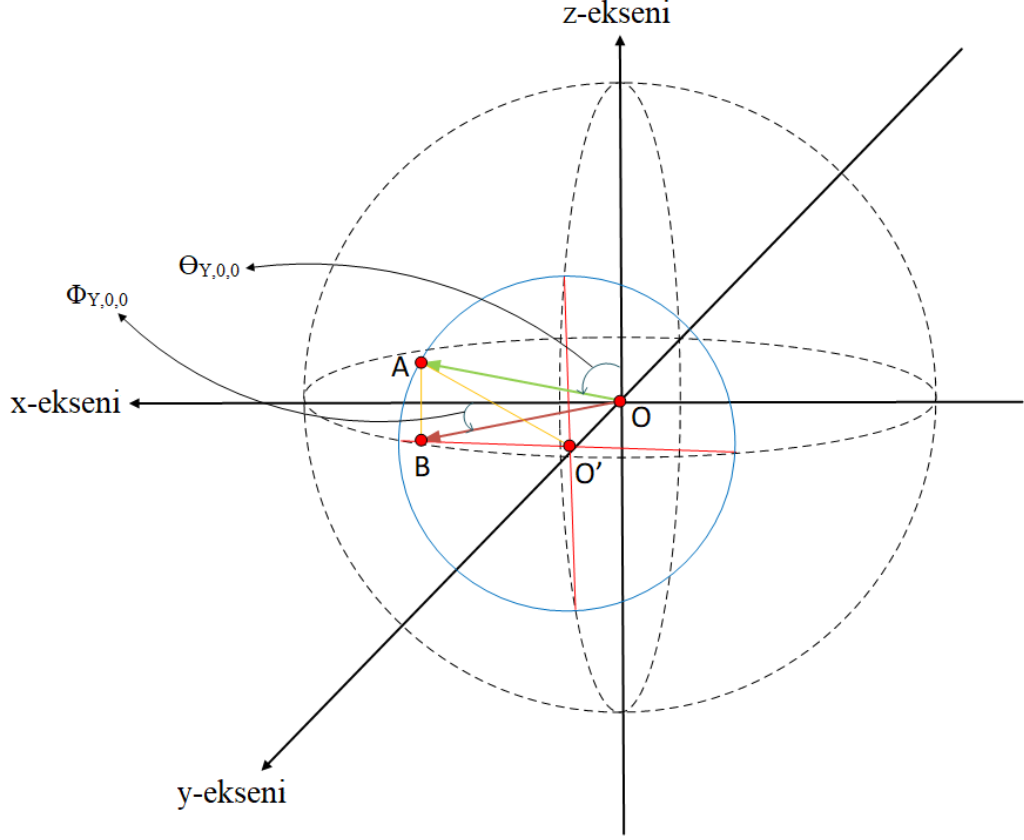
Bu denklemlerden yararlanılarak elde edilen  $\Theta_{Y,P,0}$  değeri formül 3.15'te ve  $\Phi_{Y,P,0}$  değeri formül 3.16'da verilmiştir.

$$\theta_{Y,P,0} = \begin{cases} \alpha_{Y,P,0}, & \text{eğer } 0 \leq \phi_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \leq P \leq \gamma_P \\ \pi + \alpha_{Y,P,0}, & \text{eğer } 0 \leq \phi_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_P < P \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \alpha_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} \leq \frac{3\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \leq P \leq \gamma_P \\ -\alpha_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} \leq \frac{3\pi}{2}, \gamma_P < P \leq \frac{\pi}{2} \\ \alpha_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{3\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} < 2\pi, -\frac{\pi}{2} \leq P \leq \gamma_P \\ \pi + \alpha_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{3\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} < 2\pi, \gamma_P < P \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3.15)$$

$\phi_{Y,P,0}$

$$= \begin{cases} \pi + \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } 0 \leq \phi_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \theta_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \leq P < \gamma_P - \frac{\pi}{2} \\ \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } 0 \leq \phi_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \theta_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_P - \frac{\pi}{2} \leq P \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} \leq \pi, 0 \leq \theta_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \leq P < \gamma_P + \frac{\pi}{2} \\ -\beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} \leq \pi, 0 \leq \theta_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_P + \frac{\pi}{2} \leq P \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \pi < \phi_{Y,0,0} \leq \frac{3\pi}{2}, 0 \leq \theta_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \leq P < \gamma_P + \frac{\pi}{2} \\ 2\pi - \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \pi < \phi_{Y,0,0} \leq \frac{3\pi}{2}, 0 \leq \theta_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_P + \frac{\pi}{2} \leq P \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi + \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{3\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} < 2\pi, 0 \leq \theta_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} \leq P < \gamma_P - \frac{\pi}{2} \\ 2\pi + \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{3\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} < 2\pi, 0 \leq \theta_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_P - \frac{\pi}{2} \leq P \leq \frac{\pi}{2} \\ \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } 0 \leq \phi_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,0,0} \leq \pi, -\frac{\pi}{2} \leq P < \gamma_P + \frac{\pi}{2} \\ \pi + \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } 0 \leq \phi_{Y,0,0} \leq \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,0,0} \leq \pi, \gamma_P + \frac{\pi}{2} \leq P \leq \frac{\pi}{2} \\ -\beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} \leq \pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,0,0} \leq \pi, -\frac{\pi}{2} \leq P < \gamma_P - \frac{\pi}{2} \\ \pi - \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} \leq \pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,0,0} \leq \pi, \gamma_P - \frac{\pi}{2} \leq P \leq \frac{\pi}{2} \\ 2\pi - \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \pi < \phi_{Y,0,0} \leq \frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,0,0} \leq \pi, -\frac{\pi}{2} \leq P < \gamma_P - \frac{\pi}{2} \\ \pi - \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \pi < \phi_{Y,0,0} \leq \frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,0,0} \leq \pi, \gamma_P - \frac{\pi}{2} \leq P \leq \frac{\pi}{2} \\ 2\pi + \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{3\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} < 2\pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,0,0} \leq \pi, -\frac{\pi}{2} \leq P < \gamma_P + \frac{\pi}{2} \\ \pi + \beta_{Y,P,0}, & \text{eğer } \frac{3\pi}{2} < \phi_{Y,0,0} < 2\pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,0,0} \leq \pi, \gamma_P + \frac{\pi}{2} \leq P \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3.16)$$

$\Theta$  ve  $\Phi$  açılarının üzerine yunuslama açısının etkisinin de bulunmasının ardından yuvarlanma açısının yani  $R$ 'nin etkisine bakılır. Şekil 3.4'ten yararlanılarak elde edilen açılar yardımıyla  $\Theta_{Y,P,R}$  ve  $\Phi_{Y,P,R}$  bulunur.



Şekil 3.4 :  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarının üzerine yuvarlanma açısının etkisi

$|AO| = \rho$  iken  $|AB| = \rho \cos \theta_{Y,P,0}$ ,  $|BO| = \rho \sin \theta_{Y,P,0}$ ,  $|BO'| = \rho \sin \theta_{Y,P,0} \sin \Phi_{Y,P,0}$  ve  $|O'O| = \rho \sin \theta_{Y,P,0} \cos \Phi_{Y,P,0}$  olarak bulunur.  $O'$  merkezli çemberin yarıçapı  $\rho'$  olarak alınırsa,  $\rho'^2 + |O'O|^2 = \rho^2$  iken  $\rho' = \rho \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,P,0} \cos^2 \Phi_{Y,P,0}}$  olarak bulunur.  $\widehat{AO'B}$  açısı  $\gamma_R$  olarak tanımlanırsa formül 3.17 elde edilir.

$$\gamma_R = \tan^{-1} \left( \frac{|AB|}{|BO'|} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\tan \theta_{Y,P,0} \sin \Phi_{Y,P,0}} \right) \quad (3.17)$$

R değiştiğinde yeni gelinen nokta  $A'$  ve noktanın x-y düzlemindeki izdüşümü  $B'$  olarak alınabilir. Yeni oluşan  $\widehat{A'O'B'}$   $= \gamma_R - R$  olur. Bu ilişkiye göre tıpkı P açısı için yapıldığı gibi  $|A'B'|$ ,  $|B'O|$  ve  $|B'O'|$  tekrar yazılırsa formül 3.18, formül 3.19 ve formül 3.20 elde edilir.

$$|A'B'| = \rho \sin(\gamma_R - R) \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,P,0} \cos^2 \Phi_{Y,P,0}} \quad (3.18)$$

$$|B'O'| = \rho \cos(\gamma_R - R) \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,P,0} \cos^2 \Phi_{Y,P,0}}$$

$$|B'O| = \rho \left[ \cos^2(\gamma_R - R) - \cos^2(\gamma_R - R) \sin^2 \theta_{Y,P,0} \cos^2 \Phi_{Y,P,0} + \sin^2 \theta_{Y,P,0} \cos^2 \Phi_{Y,P,0} \right]^{1/2}$$

$$\alpha_{Y,P,R} = \tan^{-1}(|B'O|/|A'B'|)$$

$$\beta_{Y,P,R} = \tan^{-1}(|B'O'|/|O'O|)$$

$$\alpha_{Y,P,R} = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{\cos^2(\gamma_R - R) - \cos^2(\gamma_R - R) \sin^2 \theta_{Y,P,0} \cos^2 \Phi_{Y,P,0} + \sin^2 \theta_{Y,P,0} \cos^2 \Phi_{Y,P,0}}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,P,0} \cos^2 \Phi_{Y,P,0}} \sin(\gamma_R - R)} \right) \quad (3.19)$$

$$\beta_{Y,P,R} = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_{Y,P,0} \cos^2 \Phi_{Y,P,0}} \cos(\gamma_R - R)}{\sin \theta_{Y,P,0} \cos \Phi_{Y,P,0}} \right) \quad (3.20)$$

Bu denklemlerden yararlanılarak elde edilen  $\Theta_{Y,P,R}$  değeri formül 3.21'de ve  $\Phi_{Y,P,R}$  değeri formül 3.22'de verilmiştir. Bu değerler nihai  $\Theta$  ve  $\Phi$  açı değerleridir.

$\theta_{Y,P,R}$

$$= \begin{cases} \pi + \alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } 0 \leq \Phi_{Y,P,0} \leq \pi, 0 \leq \theta_{Y,P,0} \leq \frac{\pi}{2}, -\pi \leq R < \gamma_R - \pi \\ \alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } 0 \leq \Phi_{Y,P,0} \leq \pi, 0 \leq \theta_{Y,P,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_R - \pi \leq R < \gamma_R \\ \pi + \alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } 0 \leq \Phi_{Y,P,0} \leq \pi, 0 \leq \theta_{Y,P,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_R \leq R \leq \pi \\ \pi - \alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } \pi < \Phi_{Y,P,0} < 2\pi, 0 \leq \theta_{Y,P,0} \leq \frac{\pi}{2}, -\pi \leq R < \gamma_R \\ -\alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } \pi < \Phi_{Y,P,0} < 2\pi, 0 \leq \theta_{Y,P,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_R \leq R < \gamma_R + \pi \\ \pi - \alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } \pi < \Phi_{Y,P,0} < 2\pi, 0 \leq \theta_{Y,P,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_R + \pi \leq R \leq \pi \\ \alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } 0 \leq \Phi_{Y,P,0} \leq \pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,P,0} \leq \pi, -\pi \leq R < \gamma_R \\ \pi + \alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } 0 \leq \Phi_{Y,P,0} \leq \pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,P,0} \leq \pi, \gamma_R \leq R < \gamma_R + \pi \\ \alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } 0 \leq \Phi_{Y,P,0} \leq \pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,P,0} \leq \pi, \gamma_R + \pi \leq R \leq \pi \\ -\alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } \pi < \Phi_{Y,P,0} < 2\pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,P,0} \leq \pi, -\pi \leq R < \gamma_R - \pi \\ \pi - \alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } \pi < \Phi_{Y,P,0} < 2\pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,P,0} \leq \pi, \gamma_R - \pi \leq R < \gamma_R \\ -\alpha_{Y,P,R}, & \text{eğer } \pi < \Phi_{Y,P,0} < 2\pi, \frac{\pi}{2} < \theta_{Y,P,0} \leq \pi, \gamma_R \leq R \leq \pi \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\Phi_{Y,P,R} = \begin{cases} 2\pi + \beta_{Y,P,R}, & \text{eğer } 0 \leq \Phi_{Y,P,0} \leq \frac{\pi}{2}, -\pi \leq R < \gamma_R - \frac{\pi}{2} \\ \beta_{Y,P,R}, & \text{eğer } 0 \leq \Phi_{Y,P,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_R - \frac{\pi}{2} \leq R < \gamma_R + \frac{\pi}{2} \\ 2\pi + \beta_{Y,P,R}, & \text{eğer } 0 \leq \Phi_{Y,P,0} \leq \frac{\pi}{2}, \gamma_R + \frac{\pi}{2} \leq R \leq \pi \\ \pi + \beta_{Y,P,R}, & \text{eğer } \frac{\pi}{2} < \Phi_{Y,P,0} \leq \pi \\ \pi - \beta_{Y,P,R}, & \text{eğer } \pi < \Phi_{Y,P,0} \leq \frac{3\pi}{2} \\ -\beta_{Y,P,R}, & \text{eğer } \frac{3\pi}{2} < \Phi_{Y,P,0} < 2\pi, -\pi \leq R < \gamma_R - \frac{\pi}{2} \\ 2\pi - \beta_{Y,P,R}, & \text{eğer } \frac{3\pi}{2} < \Phi_{Y,P,0} < 2\pi, \gamma_R - \frac{\pi}{2} \leq R < \gamma_R + \frac{\pi}{2} \\ -\beta_{Y,P,R}, & \text{eğer } \frac{3\pi}{2} < \Phi_{Y,P,0} < 2\pi, \gamma_R + \frac{\pi}{2} \leq R \leq \pi \end{cases} \quad (3.22)$$

Tez çalışmasında, geçmiş ölçümlerden 252000 veri noktası kullanılmıştır. Her veri noktası Y, P, R, Lat<sub>G</sub>, Long<sub>G</sub>, Alt<sub>G</sub>, Lat<sub>A</sub>, Long<sub>A</sub>, Alt<sub>A</sub>,  $P_r^{[dB]}$ ,  $P_t^{[dB]}$  ve  $G_t^{[dB]}$  değerlerini içermektedir. Yukarıdaki formüller ile elde edilen nihai  $\Theta$  ve  $\Phi$  değerlerine ek olarak formül 3.6'da bulunan dönüşümü de kullanarak ham veriler Çizelge 3.1'de gösterilen eşdeğer bir forma dönüştürülür.

Çizelge 3.1 : Örnek işlenmiş veriler

$\Theta$ (derece)	$\Phi$ (derece)	$L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$
89.16862983	354.1374976	45.91030912
89.16862983	354.1374976	45.91030912
89.10335157	352.8667412	49.91030958
89.10335157	352.8667412	49.91030958

Geçmiş uçuşlar sırasında ölçülen veriler küresel koordinat sistemindeki her açıyı kapsamaz. Başka bir deyişle, veriler tüm açılara ( $\Theta$  ve  $\Phi$ ) eşit olarak dağıtılmaz. Tez çalışmasında önceki ölçümlerde bulunmayan  $\Theta$  ve  $\Phi$  değerleri dâhil olmak üzere tüm  $\Theta$  ve  $\Phi$  değerleri ile kanal özelliklerini tahmin edebilmek için makine öğrenme

yöntemlerini kullanmayı öneriyoruz. Bu amaçla, sonraki bölümde hem ham verilere hem de ilenmiş verilere denetimli öğrenme yöntemlerini uyguluyoruz [58], [59]. Öğrenilen kanal özellikleri modellerini farklı verilerle test ediyoruz ve hem eğitim hem de test verilerinin hata değerlerini dikkate alarak en iyi iki modeli seçiyoruz.

### 3.3.Makine Öğrenme Yöntemleri ile Kanal Özelliklerinin Belirlenmesi

Önceki bölümde bahsedildiği gibi bu tez çalışmasında geçmiş uçuşlardan elde edilen  $Y$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $Lat_G$ ,  $Long_G$ ,  $Alt_G$ ,  $Lat_A$ ,  $Long_A$ ,  $Alt_A$ ,  $P_r^{[dB]}$ ,  $P_t^{[dB]}$  ve  $G_t^{[dB]}$  değerleri kullanılarak İHA'lar için yerden havaya haberleşme kanalı özellikleri belirlenmektedir. Bu maksat ile  $Y$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $Lat_G$ ,  $Long_G$ ,  $Alt_G$ ,  $Lat_A$ ,  $Long_A$  ve  $Alt_A$  değerlerinin işlenip hava aracı yönsüz antenin veri alışı noktasının küresel koordinat sisteminde bulunması Bölüm 3.2'de anlatılmıştır.

$P_r^{[dB]}$ ,  $P_t^{[dB]}$ ,  $G_t^{[dB]}$  değerleri ve formül 3.6'da bulunan dönüşüm kullanılarak haberleşme sinyalinin yer sistemi modeminden hava aracı modeme ulaşana kadar maruz kaldığı bütün negatif etkiler bulunmuştur. Sinyalin maruz kaldığı bütün negatif etkileri ifade eden  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değeri bütün makine öğrenme algoritmalarının testlerinde kullanılmıştır.

$Y$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $Lat_G$ ,  $Long_G$ ,  $Alt_G$ ,  $Lat_A$ ,  $Long_A$  ve  $Alt_A$  değerleri ise hem ham olarak hem de  $\Theta$  ve  $\Phi$  değerlerine dönüştürülmüş olarak kanal özelliklerinin belirlenmesi hesaplamalarında kullanılmıştır. Yer sistemi antenin coğrafi koordinatlarının, hava aracının coğrafi koordinatlarının ve hava aracının Euler açılarının, hem ham olarak hem de  $\Theta$  ve  $\Phi$  değerlerine dönüştürülmüş olarak, ayrı ayrı ve birlikte kanal özellikleri üzerine olan etkileri incelenmiştir.

Makine öğrenme modelleri, duruma özgü girdi-çıkı ilişkisi için temelde teorik bir temele sahip olmadıklarından dolayı veriye dayalı sistemlerdir. Çok boyutlu doğrusal olmayan örtük özellik dönüşümleri yoluyla girdi-çıkı eşleştirme hatasını en aza indirmeye çalışırlar ve yinelemeli olarak çalışırlar. Bu tek fenomen, makine öğrenme algoritmalarını karmaşık fonksiyon yaklaşımları için veya girdi ile çıkı arasındaki ilişkiyi tanımlamanın çok zor veya bazen imkansız olduğu durumlar için çok güçlü bir araç haline getirir. Çoğu durumda, makine öğrenme modelleri, girdi-çıkı eşleştirmeleri söz konusu olduğunda, sorunları daha iyi temsil ederler. Aslında, makine

öğrenme modelleri, normalde teorik modellerde temsil edilmeyen veya göz ardı edilen gizli kalıpları veya ilişkileri de bulabilirler. Makine öğrenme modellerinin bizim sorunumuzda daha iyi çalışmasının beklenmesinin nedeni budur.

Var olan bir veri setini kullanarak bir öğrenme modeli oluşturmaya gözetimli öğrenme denir. Gözetimli öğrenmede amaç, bilinen girdi-çıkı çiftlerine dayalı girdiler ve çıktılar arasındaki eşlemeyi öğrenmektir. Anten ışınım örüntüsü veya  $G_r^{[dB]}$ ,  $\Theta$  ve  $\Phi$  değerlerinin sürekli bir fonksiyonu olduğundan, düşündüğümüz gözetimli öğrenme problemi, regresyon probleminin özel bir kategorisine girer [58].

Çalışmada formül 3.6 yardımıyla elde edilen  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değeri, Y, P, R, Lat<sub>G</sub>, Long<sub>G</sub>, Alt<sub>G</sub>, Lat<sub>A</sub>, Long<sub>A</sub> ve Alt<sub>A</sub> değerlerinin ham veya işlenmiş hallerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmeye çalışılmıştır. Fonksiyonlar da gözetimli makine öğrenme yöntemleri ile elde edilmiştir.

### 3.3.1. MATLAB Regression Learner App

MATLAB Regression Learner App, verilere gözetimli makine öğrenme yöntemlerinin uygulanmasında kullanılmaktadır [60]. MATLAB Regression Learner App akış diyagramı Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 : MATLAB Regression Learner App akış diyagramı

Öncelikle modellenmek istenen verinin seçilip uygulamaya yüklenmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında veriler excel dosyalarından okunarak uygulama için girdi haline getirilmiştir.

Verilerin yüklenmesinin ardından verilerin uygulamada yer alan hangi yöntemler yardımı ile modellenmek istendiği seçilmelidir. Uygulama içerisinde aşağıda verilen 19 yöntemin tamamı ile model oluşturulabilmektedir.

- Linear Regression
- Interactions Linear Regression

- Robust Linear Regression
- Stepwise Linear Regression
- Fine Tree
- Medium Tree
- Coarse Tree
- Linear SVM
- Quadratic SVM
- Cubic SVM
- Fine Gaussian SVM
- Medium Gaussian SVM
- Coarse Gaussian SVM
- Ensemble Boosted Trees
- Ensemble Bagged Trees
- Squared Exponential GPR
- Matern 5/2 GPR
- Exponential GPR
- Rational Quadratic GPR

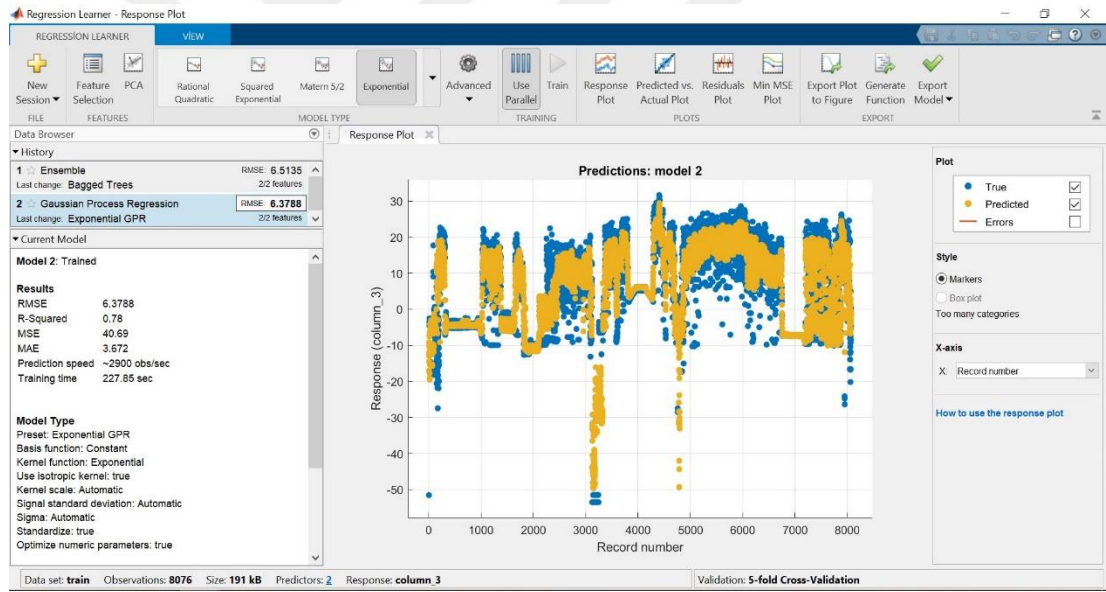
Model seçiminin ardından eğitim verileri ile modeller oluşturulur. Oluşan modellerin sonuçları uygulama içerisinde detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Bu tez çalışmasında odaklanılan model sonuç parametresi en küçük kök ortalama kare hata (RMSE) değeridir. RMSE'nin yanı sıra verimlilik de önemli olduğu için yakın sonuç veren yöntemlerin sonuç verme sürelerine de dikkat edilmiştir. Ayrıca istendiği takdirde model parametrelerinin elenmesi imkânı da uygulama tarafından kullanıcılara sağlanmaktadır.

Model sonuçlarının değerlendirilmesinin ardından en iyi sonuçları veren modeller dışa aktarılabilir. Modeller bir MATLAB fonksiyonuna dönüştürülüp test verileri ile tekrar koşuturur. Bu sayede modelin daha önce karşılaşmadığı veriler için etkinliği gözlemlenmiş olur. Test verileri ile elde edilen sonuçların RMSE değerleri de nihai model seçiminde etkili olmaktadır.

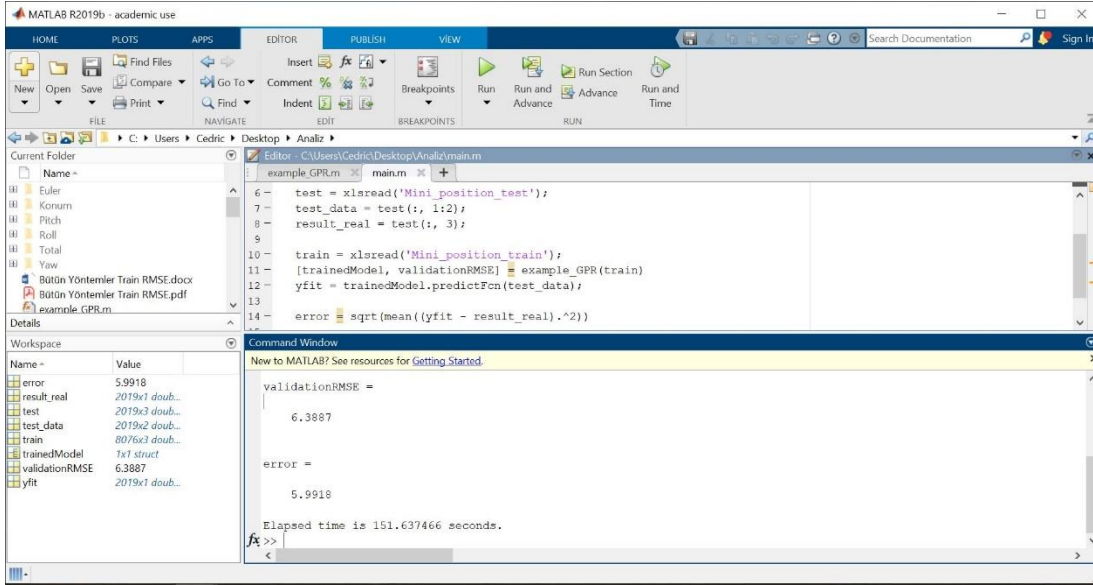
Çalışmada en iyi sonuçları veren makine öğrenme yöntemlerinin seçimi için önceki uçuşlardan elde edilen  $2,52 * 10^5$  veri noktası kullanılmıştır. Veri noktalarının %80'i



eğitim verisi olarak ve kalan %20'si de test verisi olarak rastgele ayrılmıştır. Ardından, eğitim verileri kullanılarak Regression Learner App'te var olan bütün yöntemler ile kanal özellikleri modelleri oluşturulmuştur. Modellerin RMSE değerleri incelenmiştir ve en iyi sonuçların gözlemlendiği üç model seçilmiştir. Bu modeller Gauss destek vektör makinesi (SVM), EBT ve stel GPR yöntemleri kullanılarak elde edilen modellerdir. Daha sonra seçilen modellere test verileri girdi olarak verilmiştir ve RMSE sonuçları incelenmiştir. Seçilen modellerin eğitim ve test verilerinin RMSE sonuçları karşılaştırılmıştır. Hem eğitim hem de test verileri için  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değerinin tahmini yapılırken yani kanal özellikleri modeli oluşturulurken EBT ve stel GPR yöntemlerinin en iyi sonuçları verdikleri gözlemlenmiştir. Bu iki yöntem ile elde edilen modellerin eğitim ve test verisi RMSE sonuçları da birbirlerine yakın çıkmıştır. rnek Regression Learner App eğitim verisi RMSE sonucu ekran görüntüsü şekil 3.6'da, test verisi RMSE sonucu ekran görüntüsü şekil 3.7'de verilmiştir.



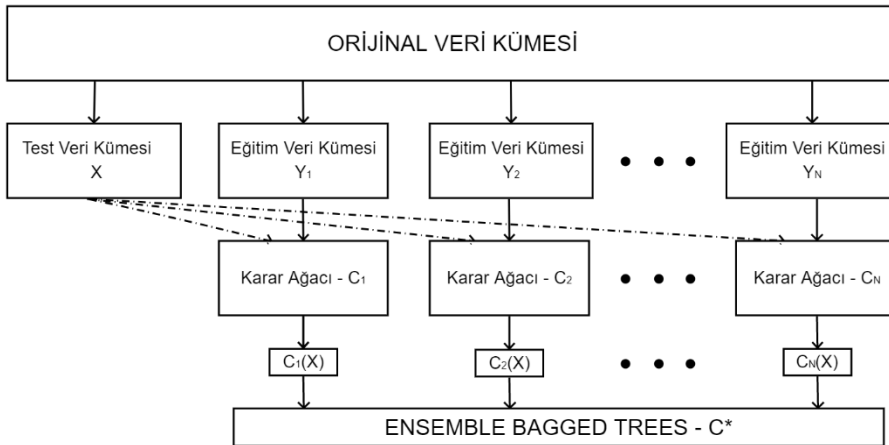
şekil 3.6 : rnek Regression Learner App eğitim verisi RMSE sonucu



Şekil 3.7 : Örnek Regression Learner App test verisi RMSE sonucu

### 3.3.2. Ensemble bagged trees yöntemi

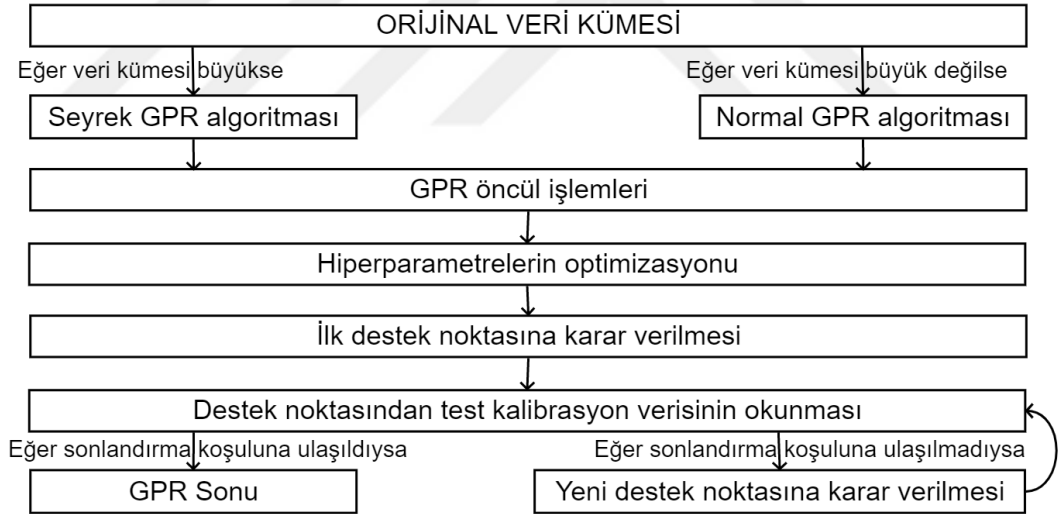
Model oluşturmak için kullanılan yöntemlerden biri EBT yöntemidir. Ensemble yöntemleri, ayrıık öğrenme algoritmalarının tahmin doğruluğunu geliştirmek için birden çok öğrenme yöntemini birleştirirler. Çoklu modelleme yöntemlerinin doğrusal bir kombinasyonunu oluştururlar ve önemli bir karmaşıklık artışı olmadan daha iyi tahmin sonuçları sağlarlar. En popüler ensemble yöntemlerinden ikisi bagged ve boosted yöntemleridir [61]. Bagged yöntemler, kurucu öğrenme algoritmaları için bir hata varyansı azaltma yöntemi olarak hareket ederken, boosted yöntemler öncelikle kurucu öğrenme algoritmalarının yanlılık değerini azaltır. Bu çalışmada, tahmin performansını ve varyansını iyileştirmek için bagged yöntemi kullanılmıştır [62]. EBT için akış diyagramı Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 : EBT akış diyagramı

### 3.3.3. Üstel Gaussian process regression yöntemi

Model oluşturmak için kullanılan bir diğer yöntem ise üstel GPR yöntemidir. GPR yöntemi parametrik olmayan bir Bayes yöntemidir [63]. GPR için akış diyagramı Şekil 3.9'da verilmiştir. Teorik olarak, GPR sonsuz sayıda parametre kullanır ve Bayesçi yaklaşıma dayanarak verilerin karmaşıklık seviyesinin belirlenmesine izin verir. Bu şekilde, girdi ve çıktı arasındaki bir ilişki yakalar [64]. GPR, belirli bir fonksiyonun parametrelerinin olasılık dağılımını hesaplamak yerine, verilere uyan tüm fonksiyonlar üzerindeki olasılık dağılımını hesaplar. GPR'nin temel işlevlerinin daha sezgisel bir anlamı vardır. Aşırı uyuma karşı koruma sağlarlar ve tahmin sırasında yalnızca ortalama bir tahmin değil, aynı zamanda tahminin varyansını da sağlarlar. Bu varyans, tahminlerdeki belirsizliğin bir göstergesidir ve belirli uygulamalar için oldukça değerli bir bilgi olabilir [65]. GPR'nin de sınırlamaları vardır. Özelliklerin sayısı birkaç düzineyi aşarsa, GPR verimliliğini kaybeder. Ayrıca, GPR seyrek değildir, yani bir tahmin yapmak için tüm örnekleri ve özellikleri kullanır. Son olarak, GPR'yi verimli bir şekilde optimize etmek de karmaşık bir konudur [66].



Şekil 3.9 : Üstel GPR akış diyagramı



#### 4. ÖRNEK ÇALIŞMA

Örnek çalışmada  $2,52 * 10^5$  veri noktası kullanılarak en iyi iki öğrenme modeli için RMSE sonuçları verilmektedir. Bu iki model EBT ve üstel GPR yöntemleriyle elde edilmiştir. İşlenmiş veri olarak ifade edilen veriler bölüm 3.2’de açıklanan yöntemle elde edilen  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarıdır. Ham veri olarak ifade edilen veriler ise verilerin herhangi bir işlem görmeden model elde etmek için direkt kullanılmasıdır. Modeller elde edilirken aşağıda belirtilen altı farklı veri seti kullanılmıştır. Bütün veri setlerinde ortak kullanılan parametre formül 3.6’da  $P_r^{[dB]}$ ,  $P_t^{[dB]}$  ve  $G_t^{[dB]}$  değerleri kullanılarak elde edilen  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değeridir.

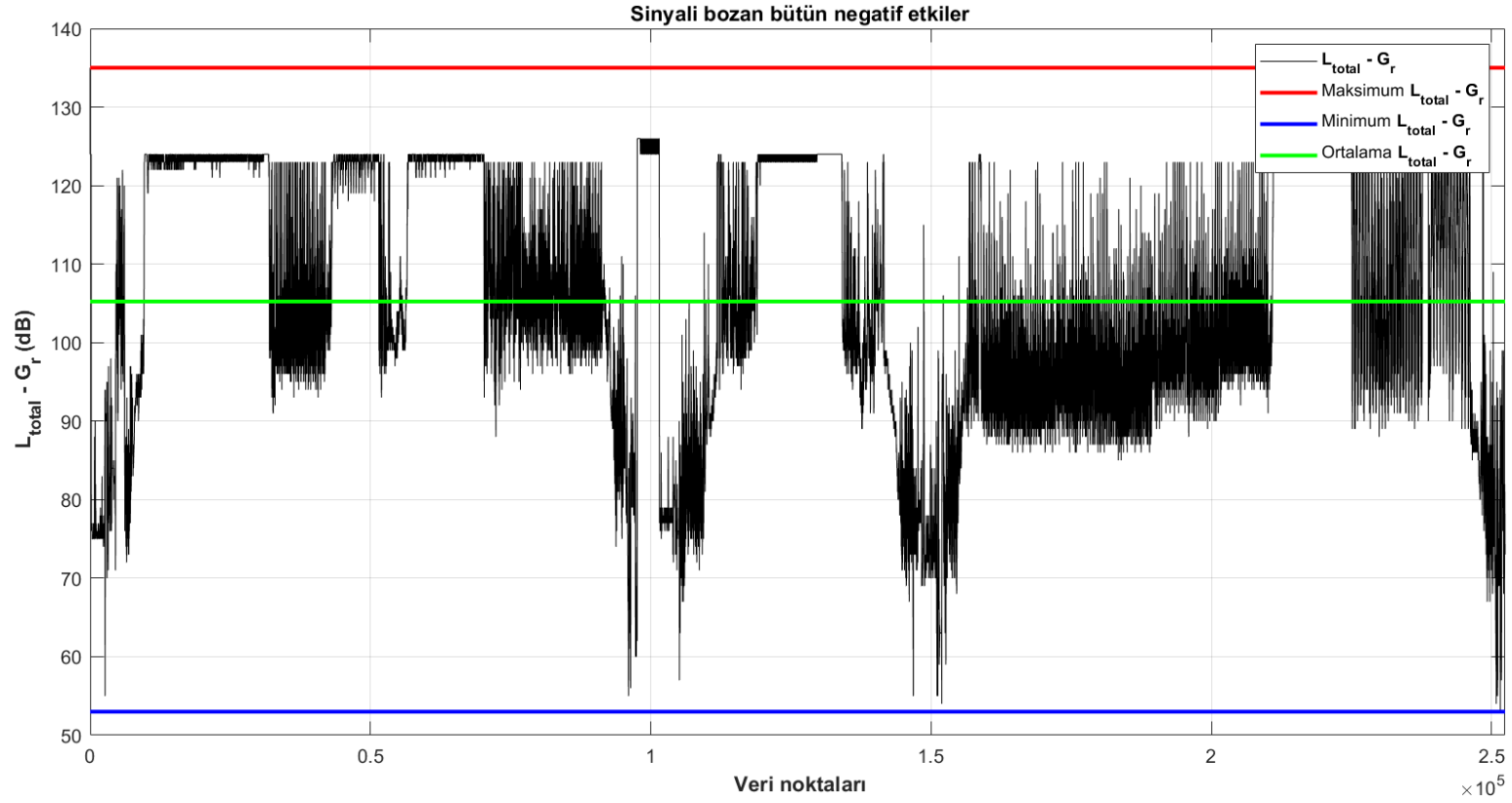
- Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları
- Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı yunuslama açısı
- Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı yuvarlanma açısı
- Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı sapma açısı
- Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı Euler açıları
- Hava aracı Euler açıları

Bütün veri setleri ham ve işlenmiş olarak model oluşturmada kullanılmıştır. Oluşturulan modeller test verileri ile test edilmiş ve ayrıca test RMSE sonuçları da incelenmiştir. Sistem tasarlanırken kullanılan bağlantı bütçe analizi parametreleri ve kullanılan veri setinin gerçek sonuçları kullanılan teorik hesaplama hatası hesaplanmıştır. Teorik hesaplama hatası sonucu ile test RMSE sonuçları karşılaştırılarak bölüm sonlandırılmıştır.

Bütün veri setlerinde ortak kullanılan  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değerleri Şekil 4.1’de tüm veri noktaları için çizilmiştir. Bu değer önceki bölümlerde belirtildiği gibi sinyalin yer

sistemi modeminden hava aracı modeme ulaşana kadar maruz kaldığı bütün negatif etkileri ifade etmektedir. Şekil 4.1'deki siyah çizgi  $2,52 * 10^5$  veri noktasının her birindeki  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değerlerini göstermektedir. Şekildeki kırmızı çizgi en büyük  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değerini göstermektedir ve bu değer 135 dB'dir. Şekildeki mavi çizgi en küçük  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değerini göstermektedir ve bu değer 53 dB'dir. Şekildeki yeşil çizgi ise  $2,52 * 10^5$  veri noktasının ortalama  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değerini temsil etmektedir. Sinyallerin maruz kaldığı ortalama negatif etki değeri 105,2 dB'dir.





Şekil 4.1 : Bütün veri noktaları için  $L_{total}^{[dB]} - G_r^{[dB]}$  değerleri

Bütün veri setleri ile oluşturulan modellerin eğitim ve test RMSE sonuçları Çizelge 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6’da verilmiştir. Bütün çizelgelerde, hem ham hem de işlenmiş veriler için oluşturulan öğrenme modellerinde eğitim ve test RMSE değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu gözlemliyoruz, bu da öğrenmenin bütün modellerde sağlandığını göstermektedir. Çizelgeler işlenmiş verilerin eğitim ve test RMSE sonuçlarına göre en iyiden en kötüye şeklinde sıralanmıştır.

Çizelge 4.1 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları

	<b>Eğitim RMSE (dB)</b>	<b>Test RMSE (dB)</b>
<b>Ham veriler ile EBT</b>	6,3923	6,5251
<b>İşlenmiş veriler ile EBT</b>	3,5270	4,0718
<b>İşlenmiş veriler ile üstel GPR</b>	4,0423	4,6849

Çizelge 4.2 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı yunuslama açısı kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları

	<b>Eğitim RMSE (dB)</b>	<b>Test RMSE (dB)</b>
<b>Ham veriler ile EBT</b>	3,1566	3,5152
<b>İşlenmiş veriler ile EBT</b>	4,3511	4,9471
<b>İşlenmiş veriler ile üstel GPR</b>	4,8656	5,4780

Çizelge 4.3 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı yuvarlanma açısı kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları

	<b>Eğitim RMSE (dB)</b>	<b>Test RMSE (dB)</b>
<b>Ham veriler ile EBT</b>	3,2571	3,6592
<b>İşlenmiş veriler ile EBT</b>	4,6228	5,2326
<b>İşlenmiş veriler ile üstel GPR</b>	4,9998	5,5335



Çizelge 4.4 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı sapma açısı kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları

	<b>Eğitim RMSE (dB)</b>	<b>Test RMSE (dB)</b>
<b>Ham veriler ile EBT</b>	3,2013	3,4499
<b>İşlenmiş veriler ile EBT</b>	4,7822	5,4251
<b>İşlenmiş veriler ile üstel GPR</b>	5,2567	5,8012

Çizelge 4.5 : Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı Euler açıları kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları

	<b>Eğitim RMSE (dB)</b>	<b>Test RMSE (dB)</b>
<b>Ham veriler ile EBT</b>	2,5169	2,9370
<b>İşlenmiş veriler ile EBT</b>	7,0518	7,8780
<b>İşlenmiş veriler ile üstel GPR</b>	8,1449	8,4903

Çizelge 4.6 : Hava aracı Euler açıları kullanıldığında elde edilen eğitim ve test RMSE sonuçları

	<b>Eğitim RMSE (dB)</b>	<b>Test RMSE (dB)</b>
<b>Ham veriler ile EBT</b>	6,9126	7,7289
<b>İşlenmiş veriler ile EBT</b>	7,4293	8,2078
<b>İşlenmiş veriler ile üstel GPR</b>	8,8321	9,4217

İşlenmiş veriler kullanılarak elde edilen RMSE sonuçları incelendiğinde, EBT modelinin hem eğitim hem de test RMSE sonuçlarının üstel GPR modelinin RMSE sonuçlarından daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. Bu nedenle, çizelgelerde yalnızca EBT yöntemi ile oluşturulan ham veri modellerinin RMSE sonuçlarını gösterilmiştir. Aşağıdaki işlenmiş verilere ilişkin EBT modelleri hakkında yapılan tüm yorumlar ve açıklamalar üstel GPR modelleri için de geçerlidir. Ayrıca, kullanılan veri kümesinde EBT yöntemi üstel GPR yönteminden yaklaşık 28.000 kat daha hızlı çalışmaktadır.

Hem verimlilik hem de elde edilen sonuçlar açısından bu tez çalışmasında oluşturulan kanal özellikleri modeli için EBT yöntemi, üstel GPR yönteminden daha uygundur.

İşlenmiş veriler ile oluşturulan modellerin eğitim ve test RMSE sonuçları incelendiğinde, en iyi sonuçların Çizelge 4.1’de yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanılarak elde edildiğini ve en kötü sonuçların Çizelge 4.6’da hava aracı Euler açıları kullanılarak elde edildiğini gözlemleriz. Bu durum Çizelge 4.7’de verilen işlenmiş verilerin  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarının varyansları ile açıklanabilir. Artan varyans, daha iyi bir öğrenme modeli inşa etmenin daha zor olduğu anlamına gelir.  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarının her ikisinin de varyansları yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanıldığında en küçükken, hava aracı Euler açıları kullanıldığından en büyüktür. İşlenmiş veriler için  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarının varyans sıralaması aynı zamanda eğitim ve test RMSE sonuçlarının en küçüğe en büyüğe sıralamasıdır.

Çizelge 4.7 : İşlenmiş verilerin  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarının varyansları

	$\Theta$	$\Phi$
<b>Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanılırsa</b>	3,35	59,92
<b>Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı yunuslama açısı kullanılırsa</b>	3,45	59,97
<b>Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı yuvarlanma açısı kullanılırsa</b>	3,52	59,99
<b>Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı sapma açısı kullanılırsa</b>	3,65	101,04
<b>Yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı Euler açıları kullanılırsa</b>	5,08	101,18
<b>Hava aracı Euler açıları kullanılırsa</b>	5,96	128,33

İşlenmiş veriler ile oluşturulan modeller arasında en iyi sonuçlar, yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanılarak elde edilen  $\Theta$  ve  $\Phi$  açıları EBT yöntemine girdi olarak verildiğinde elde edilmiştir. Bu kanal özellikleri modelinde RMSE değerleri eğitim ve test için sırasıyla 3,5270 ve 4,0718 olarak bulunmuştur. İşlenmiş veriler ile oluşturulan modeller arasında en kötü sonuçlar ise hava aracı Euler açıları kullanılarak elde edilen  $\Theta$  ve  $\Phi$  açıları üstel GPR yöntemine girdi olarak verildiğinde elde edilmiştir. Bu kanal özellikleri modelinde RMSE değerleri eğitim ve test için sırasıyla 8,8321 ve 9,4217 olarak bulunmuştur.

Bütün çizelgeler incelendiğinde, işlenmiş veriler öğrenme modellerine girdi olarak kullanıldığında, hava aracı Euler açılarının veri ilişkisini bozduğunu ve en iyi RMSE sonuçlarının yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanıldığında elde edildiğini gözlemleriz. Euler açıları veriler işlenirken, yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatlarına ek olarak, ayrı ayrı kullanılsalar da birlikte kullanılsalar da model sonuçlarını kötüleştirmektedirler. Verileri işlerken yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanılmadan, sadece hava aracı Euler açıları kullanılarak model oluşturulursa en kötü RMSE sonuçları elde edilmektedir.

Ham veriler EBT yöntemine girdi olarak verilerek oluşturulan kanal özellikleri modelleri incelendiğinde en iyi sonuçların, yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı Euler açıları birlikte kullanıldığında elde edildiğini gözlemleriz. Bu model sonuçları aynı zamanda oluşturulan bütün modeller arasındaki en iyi sonuçlardır. En kötü sonuçlar ise, tıpkı işlenmiş veriler ile oluşturulan model sonuçlarında olduğu gibi, sadece hava aracı Euler açıları kullanıldığında elde edilmiştir. En kötü sonuç veren ikinci model ise sadece yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanılarak oluşturulan modeldir.

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.1'teki ham veri sonuçlarını karşılaştırdığımızda, yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatlarının, hava aracı Euler açılarından daha değerli bilgiler olduğu sonucuna varırız. Çünkü sadece hava aracı Euler açıları kullanıldığında elde edilen RMSE değerleri daha büyüktür (eğitim verileri için RMSE sonuçları  $6,3923 < 6,9126$  ve test verileri için RMSE sonuçları  $6,5251 < 7,7289$ ).

Çizelge 4.5'te, yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları ile hava aracı Euler açıları birlikte kullanıldığında, EBT yöntemi için ham veri ve işlenmiş veri test RMSE değerleri sırasıyla 2,9370 dB ve 7,8780 dB'dir. Şekil 4.1'de gösterilen sinyalin

maruz kaldığı bütün negatif etkilerin ortalaması olan 105,2 dB değeriyle karşılaştırıldığında bu değerler sırasıyla %2,79 ve %7,49 hataya karşılık gelmektedir. Üstel GPR yöntemine işlenmiş veriler girdi olarak verilerek oluşturulan modelin test RMSE sonucu ise 8,4903 dB'dir. Bu değeri de sinyalin maruz kaldığı bütün negatif etkilerin ortalaması ile karşılaştırırsak %8,07 hataya karşılık gelmektedir. Son teknoloji araç üstü sistemlerin %2'lik bir hataya sahip olduğu göz önüne alındığında, oluşturulan modellerin tolere edilebilir hata miktarlarına sahip olduklarını söyleyebiliriz.

Çizelge 4.1'de, yalnızca yer sistemi anteni ve hava aracı coğrafi koordinatları kullanıldığında ham verilerin EBT'ye girdi olarak verildiğindeki performansın işlenmiş verilerin EBT'ye girdi olarak verildiğindeki performanstan daha kötü olduğu gözlemlenmektedir. Ham veriler ile oluşturulan modeller işlenmiş veriler ile oluşturulan modellerden bir tek bu çizelgede daha kötü sonuç vermiştir. Bu durum, ham verilerdeki EBT modelinin, bölüm 3.2'de anlatılan yöntem kullanılarak elde edilen  $\Theta$  ve  $\Phi$  açıları arasındaki karmaşık ilişkiyi öğrenmede başarısız olduğunu göstermektedir.

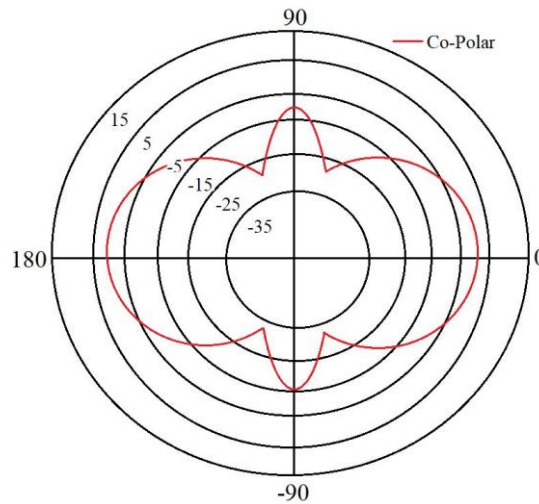
Çizelgelerdeki sonuçlar incelendiğinde, işlenmiş verilerle oluşturulmuş model sonuçları genel olarak ham verilerle oluşturulmuş model sonuçlarından daha kötüdür. Ayrıca, veriler işlenirken yeni veri türlerinin eklenmesi de çoğu zaman oluşturulan model sonuçlarını bozmaktadır. Bu durum, verilerin işlenmesinin veya çıkarılmasının daha fazla bilgi ile sonuçlanamayacağını gösteren teorik beklentilerle uyumludur [67].

Ham veriler ve işlenmiş veriler ile oluşturulan kanal özellikleri modellerinin sonuçlarını teorik bir yaklaşımla karşılaştırabiliriz. Bu amaçla bağlantı bütçe analizi için çizelge 4.8'de listelenen kayıp değerlerini Formül 3.2'de yerlerine koyarız. Çalışmada kullandığımız geçmiş uçuş verilerindeki ortalama serbest uzay kaybı ( $L_{fs}$ ) 111,38 dB'dir. Sırasıyla  $L_{backoff}$ ,  $L_{tx}$ ,  $L_{rx}$ ,  $L_{rain}$ ,  $L_{atm}$ ,  $L_{stat}$  ve  $L_{pol}$  kayıp değerleri ise, 1 dB, 1 dB, 1 dB, 2dB, 2dB, 5dB ve 1 dB'dir.

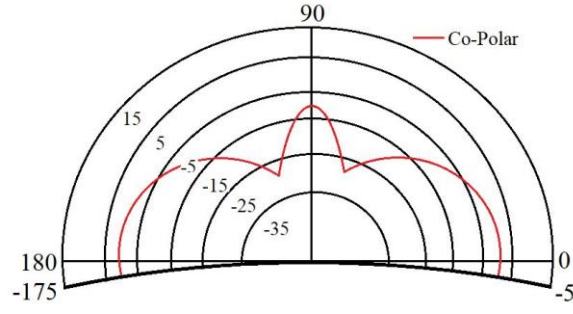
Çizelge 4.8 : Bağlantı bütçe analizinde kullanılan kayıp değerleri

Kayıp türü	Kayıp değeri (dB)
$L_{\text{backoff}}$	1
$L_{\text{tx}}$	1
$L_{\text{rx}}$	1
$L_{\text{rain}}$	2
$L_{\text{atm}}$	2
$L_{\text{stat}}$	5
$L_{\text{pol}}$	1
$L_{\text{fs}}$	111,38

Örnek bir teorik alıcı anten ışınım örüntüsü Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Burada ışınım modeli bütün  $\Phi$  açıları için aynıdır. Hava aracı anteni olarak Şekil 4.2'de teorik ışınım örüntüsü verilen anten kullanılırsa ve hava aracının  $[-175, -5]$  derece arasında mükemmel bir uçak gövdesi gölgelemesine maruz kaldığı varsayılırsa, Şekil 4.3'te gösterilen örnek uçak gövdesi gölgelemesinden etkilenmiş anten ışınım örüntüsü elde edilir. Uçak gövdesi gölgelemesini modellemek karmaşık bir problemdir. Anten ışınım örüntüsünü ve uçak gövde tipini kullanan sayısal yöntemler daha doğru bir gölgeleme değeri sağlayabilir. Örneğin [68]'de, uçak gövdesi gölgelemesinden etkilenen, bir uçağa yerleştirilmiş tek kutuplu bir antenin ışınım örüntüsü, computer simulation technology - microwave studio (CST-MWS) benzetim aracı ile modellenmiştir. Ancak bu yaklaşımın karmaşıklığı oldukça yüksektir.



Şekil 4.2 : Örnek anten ışınım örüntüsü



Şekil 4.3 : Örnek uçak gövdesi gölgelemesinden etkilenmiş anten ışınlam örüntüsü

Bu çalışmada, uçak gövdesi gölgelemesinden etkilenmemiş, teorik ışınlam modeli için ortalama anten kazancı  $-11,0824$  dB'dir. Öte yandan, uçak gövdesi gölgelemesinden etkilenmiş ortalama anten kazancı ise  $-14,9457$  dB'dir. Bu nedenle, ortalama uçak gövdesi gölgeleme kaybı olan  $L_{shad}$   $3,8632$  dB olarak bulunur. Ortalama değerlerini hesaplayabilmek için veriler analiz edilmiştir ve  $\Theta$  değerlerinin  $[0, 180]$  derece aralığında düzgün dağılıma sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle,  $\Theta$  değerleri üzerindeki düzgün dağılım baz alınarak, tam ve uçak gövdesi gölgelemesi etkisindeki anten ışınlam örüntülerinin ortalaması alınmıştır. Işınlam modeli bütün  $\Phi$  değerleri için aynı olduğundan,  $\Phi$  dağılımının ortalama değerler üzerinde bir etkisi yoktur.  $L_{total}$  değerinin elde edilebilmesi için çizelge 4.8'deki kayıp değerleri ve  $L_{shad}$  değeri toplanır.  $L_{total}$  değeri  $128,2432$  dB olarak bulunmuştur. Bu değer ile Şekil 4.1'de gösterilen sinyalin maruz kaldığı bütün negatif etkilerin ortalaması olan  $105,2$  dB değerinin arasındaki fark  $23,0432$  dB'dir. Yani teorik yaklaşımın hata oranı  $\%21,9$ 'a karşılık gelir. Ham veriler ve EBT yöntemi kullanılarak oluşturulan model sonucunun uçtan uca hata miktarının  $\%2,79$  olduğu göz önüne alınırsa, teorik sonuçlara göre oldukça iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmektedir.

## 5. GENEL DEĞERLENDİRME

Tez çalışmasının ilk kısmında neden bu konu üzerine çalışıldığına dair motivasyon aktarılmıştır. Özellikle insansız hava araçlarındaki haberleşmelerde teorik sonuçlarla yapılan haberleşme kalite analizleri gerçek hayatta beklenen sonuçlardan farklı çıktılar vermektedir. Uçak gövdesi gölgelemesi ve teorik hesaplamalarda kullanılan diğer parametreler hava aracının konumu ve Euler açılarına bağlı olarak ciddi farklılıklar göstermektedir. Bu nedenlerle gerçek uçuş verilerinin makine öğrenme yöntemleriyle modellenip, model sonuçlarının teorik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmasına karar verilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında literatür araştırması sonuçları aktarılmıştır. Çalışmanın merkezinde İHA'lar olduğu için İHA haberleşmesi üzerine yapılan önemli araştırmalara yer verilmiştir. Çalışmanın temel amacı kanal özelliklerinin belirlenmesidir. Bu sebeple kanal özelliklerinin belirlenmesinin önemli hususlarını anlatan çalışmalara literatür araştırmasında yer verilmiştir. Devamında kanal özelliklerinin belirlenmesine dair geçmişten günümüze yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Literatür araştırmasının son kısmında ise kanal özelliklerinin belirlenmesi için makine öğrenme uygulamaları kullanan makaleler özetlenmiştir.

Çalışmanın devamında kanal özelliklerinin belirlenmesi için tezde kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde aktarılmıştır. Öncelikle hava aracı ve yer sistemi konumlarını ve hava aracı Euler açılarını kullanarak küresel koordinat sisteminde  $\Theta$  ve  $\Phi$  açılarının elde edilmesi anlatılmıştır. Sonrasında geçmiş uçuşlardan elde edilen hem ham veriye hem de işlenmiş veriye uygulanan makine öğrenme yöntemlerinin uygulanışından bahsedilmiştir. Uygulanan yöntemler arasından seçilen yöntemlerin hangi kıstaslar ile seçildiği belirtilmiştir. Seçilen yöntemlere dair bilgiler aktarılmış ve yöntemlerin akış şemaları gösterilmiştir.

Çalışmanın dördüncü kısmında çalışma içerisinde önerilen yöntemlerin uygulandığını gerçek veri sonuçlarına yer verilmiştir. Hem ham veriler kullanılarak hem de işlenmiş

veriler kullanılarak elde edilen sonuçlar bu bölümde yorumlanmıştır. Çalışma içerisinde önerilen yöntemlerle elde edilen sonuçlar teorik hesaplama sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Uygulanan yöntemler arasında hem ham veriler ile hem de işlenmiş veriler ile en iyi sonuçları veren yöntemler EBT ve üstel GPR yöntemleridir. İki yöntemin sonuçlarını kıyaslırsak EBT yöntemi hem ham verilerde hem de işlenmiş verilerde üstel GPR yönteminden daha iyi sonuçlar vermiştir. EBT yöntemi ayrıca üstel GPR yöntemine göre 28000 kat daha hızlı sonuç vermektedir. Veri işleme için, uçağın ve yer istasyonunun coğrafi koordinatlarından veya uçak Euler açılarından veya her iki bilginin birleşiminden küresel koordinat değerleri elde ederiz. Uçağın ve yer istasyonunun coğrafi koordinatlarından ve de uçak Euler açılarından yararlanılarak elde edilen işlenmiş veriler için uçtan uca hata miktarları EBT yönteminde %7,49 iken üstel GPR yönteminde %8,07 olmaktadır. Bu veriler işlenmeden ham olarak kullanıldığında ise EBT yönteminin uçtan uca hata miktarı %2,79 olmaktadır. Teorik tahmin hatasının %21,9 olduğu göz önüne alındığında, elde edilen sonuçlar oldukça umut vericidir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim**, “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, 2016.
- [2] **K. P. Valavanis and G. J. Vachtsevanos**, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Springer Netherlands, 2015.
- [3] **US Department of Transportation**, “Unmanned Aircraft System (UAS) Service Demand 2015–2035: Literature Review & Projections of Future Usage,” tech. rep., v.0.1, DOT-VNTSC-DoD-13-01, Sept. 2013.
- [4] **A. Merwaday and I. Guvenc**, “UAV Assisted Heterogeneous Networks for Public Safety Communications,” *Proc. IEEE Wireless Commun. Net. Conf.*, 9–12 Mar. 2015, pp. 329–34.
- [5] **A. Osseiran et al.**, “Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: the Vision of the METIS Project,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, May 2014, pp. 26–35.
- [6] **E. W. Frew and T. X. Brown**, “Airborne Communication Networks for Small Unmanned Aircraft Systems,” *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 12, Dec. 2008, pp. 2008–27.
- [7] **N. Goddemeier, K. Daniel, and C. Wietfeld**, “Role-Based Connectivity Management with Realistic Air-to-Ground Channels for Cooperative UAVs,” *IEEE JSAC*, vol. 30, no. 5, June 2012, pp. 951–63.
- [8] **Y. Zeng and R. Zhang**, “Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 6, pp. 3747–3760, 2017.
- [9] **E. Bertran and A. Sanchez-Cerda**, “On the tradeoff between electrical power consumption and flight performance in fixed-wing UAV autopilots,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 11, pp. 8832–8840, 2016.
- [10] **L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun**, “Survey of important issues in UAV communication networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123–1152, 2015.
- [11] **D. W. Matolak**, “Channel characterization for unmanned aircraft systems,” in *proceedings of 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2015, pp. 1–5.

- [12] **W. Khawaja, I. Guvenc, D. W. Matolak, U.-C. Fiebig, and N. Schneckenburger**, “A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2361–2391, 2019.
- [13] **X. Cheng, Y. Li, and L. Bai**, “UAV communication channel measurement, modeling, and application,” *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 32–43, 2019.
- [14] **J. Chen, D. Raye, W. Khawaja, P. Sinha, and I. Guvenc**, “Impact of 3D UWB antenna radiation pattern on air-to-ground drone connectivity,” in *proceedings of IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [15] **C. Yan, L. Fu, J. Zhang, and J. Wang**, “A comprehensive survey on UAV communication channel modeling,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107 769–107 792, 2019.
- [16] **Y. S. Meng and Y. H. Lee**, “Measurements and characterizations of air-to-ground channel over sea surface at C-band with low airborne altitudes,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 4, pp. 1943–1948, 2011.
- [17] **X. Cao, P. Yang, M. Alzenad, X. Xi, D. Wu, and H. Yanikomeroglu**, “Airborne communication networks: A survey,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 9, pp. 1907–1926, 2018.
- [18] **W. C. Vergara, J. L. Levatich, W. C. Carroll**, “VHF Air- Ground Propagation Far Beyond the Horizon and Tropospheric Stability,” *IRE Trans. Antennas & Prop.*, pp. 608-621, September 1962.
- [19] **R. W. Sutton, E. H. Schroeder, A. D. Thompson, S. G. Wilson**, “Satellite-Aircraft Multipath and Ranging Experiment Results at L-Band,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 21, no. 5, pp. 639- 647, May 1973.
- [20] **J. H. Painter, S. C. Gupta, L. R. Wilson**, “Multipath Modeling for Aeronautical Communications,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 21, no. 5, pp. 658-662, May 1973.
- [21] **P. Beckmann, A. Spizzichino**, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon Press, Elmsford, NY, 1963.
- [22] **P. A. Bello**, “Aeronautical Channel Characterization,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 21, no. 5, pp. 548-563, May 1973.
- [23] **J. R. Child**, “Air to Ground Propagation at 900 MHz,” *Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf.*, 21-23 May 1985.
- [24] **K. Chamberlin**, “The Effect of Tree Cover on Air-Ground, VHF Propagation Path Loss,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. COM- 34, no. 9, pp. 958-962, September 1986.
- [25] **S. Elnoubi**, “A Simplified Stochastic Model for the Aeronautical Mobile Radio Channel,” *Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf.*, Denver, CO, 10-13 May 1992.
- [26] **W. C. Jakes**, *Microwave Mobile Communications*, John Wiley & Sons, 1974.

- [27] **G. Dyer, T. Gilbert, S. Hendrickson, E. Sayadian**, “Mobile Propagation Measurements using CW and Sliding Correlator Techniques,” Proc. IEEE Ant. Propagation Symposium, Atlanta, GA, 1998.
- [28] **Aeronautical Mobile Communications Panel (AMCP), Working Group D**, “A General Model for VHF Aeronautical Multipath Propagation Channel,” AMCP/WG-D/WP6, Honolulu, HI, January 1999.
- [29] **P. Hoehner, E. Haas**, “Aeronautical Channel Modeling at VHF Band,” Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf., Amsterdam, The Netherlands, 19-22 September 1999.
- [30] **D. W. Matolak, I. Sen, W. Xiong**, “The 5 GHz Airport Surface Area Channel: Part I, Measurement and Modeling Results for Large Airports,” IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. 57, no. 4, pp. 2014-2026, July 2008.
- [31] **I. Sen, D. W. Matolak**, “The 5 GHz Airport Surface Area Channel: Part II, Measurement and Modeling Results for Small Airports,” IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. 57, no. 4, pp. 2027-2035, July 2008.
- [32] **S. Gligorevic, R. Zierhut, T. Jost, W. Wang**, “Airport Channel Measurements at 5.2 GHz,” Proc. European Conf. On Antennas & Propagation, Berlin, Germany, 23-27 March 2009.
- [33] **M. D. Rice, R. Dye, K. Welling**, “Narrowband Channel Model for Aeronautical Telemetry,” IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems, vol. 36, no. 4, pp. 1371-1377, October 2000.
- [34] **E. Haas**, “Aeronautical Channel Modeling,” IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. 51, no. 2, pp. 254-264, March 2002.
- [35] **W. G. Newhall, J. H. Reed**, “A Geometric Air-to-Ground Radio Channel Model,” Proc. MILCOM '02, Anaheim, CA, 7- 10 October 2002.
- [36] **W. G. Newhall, R. Mostafa, C. Dietrich, C. R. Anderson, K. Dietze, G. Joshi, J. H. Reed**, “Wideband Air-to-Ground Radio Channel Measurements using an Antenna Array at 2 GHz for Low-Altitude Operations,” Proc. MILCOM 2003, Monterey, CA, 13-16 October 2003.
- [37] **M. Rice, A. Davis, C. Bettweiser**, “Wideband Channel Model for Aeronautical Telemetry,” IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems, vol. 40, no. 1, pp. 57-69, January 2004.
- [38] **Q. Feng, J. McGeehan, E. K. Tameh, R. R. Nix**, “Path Loss Models for Air-to-Ground Radio Channels in Urban Environments,” Proc. IEEE Spring Vehicular Tech. Conf., Melbourne, Australia, 7-10 May 2006.
- [39] **J. Berger**, “L-Band Channel Modeling,” Proc. IEEE/AIAA Integrated Comm., Navigation, & Surveillance Conf., Baltimore, MD, 1-3 May 2006.
- [40] **M. A. Jensen, M. D. Rice, A. L. Anderson**, “Aeronautical Telemetry using Multiple-Antenna Transmitters,” IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems, vol. 43, no. 1, pp. 262-272, January 2007.
- [41] **J. Kunisch, I. de la Torre, A. Winkelmann, M. Eube, T. Fuss**, “Wideband Time-Variant Air-to-Ground Radio Channel Measurements at 5 GHz,”

Proc. 5th European Conf. On Antennas & Propagation, Rome, Italy, 11-15 April 2011.

- [42] **Y. S. Meng, Y. H. Lee**, “Study of Shadowing Effect by Aircraft Maneuvering for Air-to-Ground Communication,” to appear, *Int. Journal of Electronics & Communication (Elsevier)*, 2011.
- [43] **A. A. Khuwaja, Y. Chen, N. Zhao, M.-S. Alouini, and P. Dobbins**, “A survey of channel modeling for UAV communications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2804–2821, 2018.
- [44] **D. W. Matolak and R. Sun**, “Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—part i: Methods, measurements, and models for over-water settings,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 26–44, 2016.
- [45] **R. Sun, D. W. Matolak, and W. Rayess**, “Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—part iv: Airframe shadowing,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 9, pp. 7643–7652, 2017.
- [46] **K. Wang, R. Zhang, L. Wu, Z. Zhong, L. He, J. Liu, and X. Pang**, “Path Loss Measurement and Modeling for Low-Altitude UAV Access Channels,” *IEEE VTC-Fall*, Toronto, ON, Canada, Sept 2017.
- [47] **N. Sharma, M. Magarini, L. Dossi, L. Reggiani, and R. Nebuloni**, “A Study of Channel Model Parameters for Aerial Base Stations at 2.4 GHz in Different Environments,” *Consumer Communications & Networking Conference*, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2018.
- [48] **E. Kalantari, H. Yanikomeroğlu, and Abbas Yongacoglu**, “On the Number and 3D Placement of Drone Base Stations in Wireless Cellular Networks,” *IEEE VTC-Fall*, Montreal, QC, Canada, Sep. 2016.
- [49] **ITU-R**, “Rec. p.1410-2 Propagation Data and Prediction Methods for The Design of Terrestrial Broadband Millimetric Radio Access Systems,” *Series, Radiowave propagation*, 2003.
- [50] **R. He, B. Ai, A. F. Molisch, G. L. Stuber, Q. Li, Z. Zhong, and J. Yu**, “Clustering enabled wireless channel modeling using big data algorithms,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 5, pp. 177–183, 2018.
- [51] **O. Esrafilian and D. Gesbert**, “3D city map reconstruction from UAVbased radio measurements,” in *proceedings of Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [52] **Z. Xiao, H. Wen, A. Markham, N. Trigoni, P. Blunsom, and J. Frolik**, “Non-line-of-sight identification and mitigation using received signal strength,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 3, pp. 1689–1702, 2014.
- [53] **A. Tahat, T. Edwan, H. Al-Sawwaf, J. Al-Baw, and M. Amayreh**, “Simplistic machine learning-based air-to-ground path loss modeling in an urban environment,” in *proceedings of Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*. IEEE, 2020, pp. 158–163.

- [54] **J.-L. Wang, Y.-R. Li, A. B. Adege, L.-C. Wang, S.-S. Jeng, and J.- Y. Chen**, “Machine learning based rapid 3D channel modeling for UAV communication networks,” in proceedings of 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [55] **M. Salehi and J. Proakis**, “Digital communications,” McGraw-Hill Education, vol. 31, p. 32, 2007.
- [56] **I. T. Union**, “ITU-R standards,” <https://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>.
- [57] **M. C. Erturk and Y. Aksan**, “A tool for beamforming and real-time link budget analysis in aeronautical communications using kinematics,” International Journal of Aerospace Engineering, 2016.
- [58] **E. Alpaydin**, Introduction to machine learning. MIT press, 2020.
- [59] **X. Zhou, M. Sun, G. Y. Li, and B.-H. F. Juang**, “Intelligent wireless communications enabled by cognitive radio and machine learning,” China Communications, vol. 15, no. 12, pp. 16–48, 2018.
- [60] **Regression learner app**, <https://www.mathworks.com/help/stats/regression-learner-app.html>.
- [61] **P. Bühlmann**, “Bagging, boosting and ensemble methods,” in Handbook of Computational Statistics. Springer, 2012, pp. 985–1022.
- [62] **L. Breiman**, “Bagging predictors,” Machine learning, vol. 24, no. 2, pp. 123–140, 1996.
- [63] **S. J. Gershman and D. M. Blei**, “A tutorial on Bayesian nonparametric models,” Journal of Mathematical Psychology, vol. 56, no. 1, pp. 1–12, 2012.
- [64] **C. K. Williams**, “Prediction with Gaussian processes: From linear regression to linear prediction and beyond,” in Learning in graphical models. Springer, 1998, pp. 599-621.
- [65] **E. Schulz, M. Speekenbrink, and A. Krause**, “A tutorial on Gaussian process regression: Modelling, exploring, and exploiting functions,” Journal of Mathematical Psychology, vol. 85, pp. 1–16, 2018.
- [66] **C. K. Williams and C. E. Rasmussen**, Gaussian processes for machine learning. MIT press Cambridge, MA, 2006, vol. 2, no. 3.
- [67] **T. M. Cover**, Elements of information theory. John Wiley & Sons, 1999.
- [68] **M. Ural and C. Bayseferogullari**, “Solution of the antenna placement problem by means of global optimization techniques,” in proceedings of 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON). IEEE, 2014, pp. 1–4.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Yasin AKSAN  
**Uyruğu** : Türk  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 19.09.1993, Kayseri  
**E-posta** : yaksan@etu.edu.tr, yaksan93@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2021, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2017-2018	Meteksan Savunma Sanayii A.Ş.	Haberleşme Sistem Mühendisi
2018-2021	Türk Havacılık Uzay Sanayii A.Ş.	Haberleşme Sistem Tasarım Müh.

### YABANCI DİL:

İngilizce (Profesyonel Çalışma Düzeyi); İspanyolca (Başlangıç)

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR:

Y. Aksan, M. Yuksel, and A. Ozbayoglu, “Channel characterization for aircraft integrated antennas via machine learning,” in proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) Nanjing, China, Mar. 2021.