



**SIĞ YÜZEYALTI GÖRÜNTÜLEME İÇİN İHA ÜZERİNE
ENTEĞRE EDİLEBİLEN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ
YNR SİSTEM GELİŞTİRİLMESİ**

Rasim KADİRHAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIĞ YÜZEYALTI GÖRÜNTÜLEME İÇİN İHA ÜZERİNE ENTEGRE
EDİLEBİLEN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ YNR SİSTEM GELİŞTİRİLMESİ**

Rasim KADIRHAN
0000-0003-2807-5883

Doç. Dr. Enes YİĞİT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

SİĞ YÜZEYALTI GÖRÜNTÜLEME İÇİN İHA ÜZERİNE ENTEGRE EDİLEBİLEN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ YNR SİSTEM GELİŞTİRİLMESİ **Rasim KADİRHAN**

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Enes YİĞİT

Bu tez çalışmasında günümüzde oldukça popüler olan Yere Nüfus eden Radar (YNR) ve İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemlerinin birlikte kullanımı konusu çalışılmıştır. YNR sistemleri toprak altı su kaçaqları, arkeolojik araştırmalar, askeri mühimmat (mayın vb.) tespiti ve jeofizik araştırmaları gibi birçok alanda uygulanmaktadır. Bu uygulamalarda toprak altı farklı tipteki nesnelerin (su, plastik, metal vb.) tespiti yapılmaktadır. Bazı uygulamalarda ise toprak yüzeyinin engebeli olması ve toprak yüzeyine temas edilmesi tehlikeli olması (mayın tarama) gibi durumlarda havadan tarama yapılması gerekmektedir. Havadan tarama ise günümüzün en popüler konularından olan İHA sistemleri ile yapılabilmektedir. Ancak İHA sistemlerinin YNR uygulamalarında kullanılabilmesi için özel anten tasarımı, ek sensör gereksinimleri gibi bazı şartlar oluşmaktadır.

Bu çalışmada bir İHA yapısına uygun YNR uygulamalarında kullanılabilecek 1-3 GHz band aralığında çalışan antipodal vivaldi anten tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Üretilen anten ile YNR sistemi toprak altı nesne tespitine yönelik testler gerçekleştirilmiştir. Başarılı sonuçlar veren YNR sistemi İHA'ya monte edilerek dış ortamda toprak altı nesne tespiti testleri yapılmıştır. Toprağın 20 cm derinliğine kadar başarılı sonuçlar veren çalışma için son bölümde özetlenerek başarı koşullarına değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: YNR, İHA, Vivaldi anten
2023, vii + 54 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

**DEVELOPMENT OF HIGH RESOLUTION YNR SYSTEM THAT CAN BE
INTEGRATED ON THE UAV FOR SHALLOW SUBSURFACE IMAGING**

Rasim KADIRHAN

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronic

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Enes YİĞİT

In this thesis, Ground Penetrating Radar (GPR) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems, which are very popular today, has been studied. GPR systems are applied in many areas such as underground water leaks, archaeological research, military ammunition (mines, etc.) detection and geophysical research. In these applications, different types of underground objects (water, plastic, metal, etc.) are detected. In some applications, aerial scanning is required in cases where the soil surface is uneven, and it is dangerous to touch the soil surface (mine scanning). Aerial scanning can be done with UAV systems, which is one of the most popular topics of today. However, in order for UAV systems to be used in GPR applications, there are some conditions such as special antenna design and additional sensor requirements.

In this study, an antipodal vivaldi antenna operating in the 1-3 GHz band that can be used in GPR applications suitable for a UAV structure has been designed and produced. Tests for underground object detection of the GPR system were carried out with the produced antenna. The GPR system, which gave successful results, was mounted on the UAV, and underground object detection tests were carried out in the external environment. For the study, which gave successful results up to 20 cm depth of the soil, the success conditions were mentioned by summarizing in the last section.

Key words: GPR, UAV, Vivaldi Antenna
2023, vii + 54 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması için hiçbir desteğini esirgemeyen başta tez danışmanım Doç. Dr. Enes YİĞİT' e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmalarım sırasında her zaman maddi manevi arkamda olan başta aileme, Elektronik müh. Sinan ÇANGA' ya ve Yüksek Bilgisayar Müh. Ramazan BOZKIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için 12 aylık bir süre boyunca “Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı” kapsamında verilen maddi destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için 12 aylık bir süre boyunca “BAP Lisansüstü Tez Projesi” kapsamında verilen maddi destekten dolayı Bursa Uludağ Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Rasim KADİRHAN
.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. YNR Tekniği	3
2.1.1. SFCW tekniği.....	4
2.1.2. YNR sistemlerinde menzil ve konum bilgisi	5
2.1.3. YNR sistemleri anten tipleri	10
2.2. İHA Sistemi.....	14
2.3. YNR Sistemleri Benzer Çalışmalar.....	17
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	21
3.1. YNR Sistem Tasarım ve İmalat	21
3.1.1. Anten tasarımı	21
3.1.2. VNA seçimi.....	28
3.2. İHA Analiz ve İmalatı	29
3.3. Deney ve Test Alanı	34
4. BULGULAR	40
4.1. Anten Performansı.....	40
4.2. YNR Sistem Performansı	43
4.2.1. Laboratuvar ortamı testleri	43
4.2.2. Gerçek ortam testleri	47
4.3. YNR Monteli İHA Performansı	48
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	50
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	54

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$\delta(t - \tau)$	Direc delta fonksiyonu
ε	Dielektrik sabiti veya elektriksel geçirgenlik,
ρ	Elektrik yük yoğunluğu
μ	Manyetik geçirgenlik,
σ	Ortamın iletkenliği
λ	Dalga boyu
ΔF	Frekans adımı
B	Manyetik akı yoğunluğu
c	Işık hızı
D	Elektrik akı yoğunluğu
E	Elektrik alan şiddet
f	Frekans
J	Akım yoğunluğu
k	Dalga numarası
w	Açısal frekans

Kısaltmalar	Açıklama
1-B	Bir Boyutlu
2-B	İki Boyutlu
AVA	Antipodal Vivaldi Anten
BW	Bant Genişliği
BPA	Back Projection Algoritması
EM	Elektromanyetik
SFCW	Frekans adımlı sürekli dalga radar
IFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
İHA	İnsansız Hava Aracı
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması
SAR	Sentetik Açıklıklı Radar
VNA	Vektör Network Analizör
YNR	Yere Nüfus Eden Radar

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. YNR sistem genel yapısı	3
Şekil 2.2. YNR sistemi anten hareket eksenine.....	7
Şekil 2.3. Tek hedef için menzıl profil görüntüsü	8
Şekil 2.4. 5 farklı hedef için menzıl profili görüntüsü.....	9
Şekil 2.5. YNR sistemlerinde yaygın kullanılan anten tipleri A) Dipol anten B) Horn anten C) Sprial anten D) Vivaldi anten	10
Şekil 2.6. Klasik AVA yapısı	12
Şekil 2.7. Tek slotlu AVA yapısı.....	13
Şekil 2.8. Fırçasız motor genel yapısı.....	16
Şekil 2.9. Pixhawk 2.4.8 Uçuş kontrol kartı	16
Şekil 2.10. YNR test düzeneği.....	18
Şekil 3.1. Anten flare yapısı	22
Şekil 3.2. Anten slot yapısı	23
Şekil 3.3. Optimizasyon sonucu slot yapısı	26
Şekil 3.4. Anten tasarımı geometrik ölçüler	27
Şekil 3.5. Anten tasarımı. A) CST anten tasarımı B) Üretim sonrası anten ve ağırlığı.....	28
Şekil 3.6. VNA yapısı.....	29
Şekil 3.7. İHA ecalce simülasyon sonucu	30
Şekil 3.8. İHA tasarımı	31
Şekil 3.9. İHA son tasarım.....	32
Şekil 3.10. İHA komponent bağlantıları.....	33
Şekil 3.11. İHA üzerindeki tüm eleman ve komponentler	34
Şekil 3.12. Üretim sonrası İHA görseli	34
Şekil 3.13. Mayın benzeri yapılar	35
Şekil 3.14. Deney alanı.....	36
Şekil 3.15. İHA ile tarama test alanı.....	37
Şekil 3.16. Back projection algoritması akış şeması	38
Şekil 4.1. Anten simülasyon sonuçları. A) S11 parametresi B) Vswr parametresi C) z parametresi.....	41
Şekil 4.2. Anten farfield grafikleri. A) 1 GHz farfield grafiği B) 2 GHz farfield grafiği C) 3 GHz farfield grafiği.....	42
Şekil 4.3. VNA ile ölçülen anten S11 parametresi grafiği	42
Şekil 4.4. A) Yansımaz Oda Ölçümü B) Simülasyon ve Gerçek Ölçüm Grafikleri.....	43
Şekil 4.5. Yansımaz ortam testi. A) Test düzeneği B) Görüntü matrisi	44
Şekil 4.6. Boş kum havuzu görüntü matrisi.....	45
Şekil 4.7. YNR kum havuzu testleri. A) 47 cm yükseklik B) 60 cm yükseklik C) 70 cm yükseklik	47
Şekil 4.8. Gerçek ortam testleri. A) 50 cm yükseklik 31 nokta B) 50 cm yükseklik 41 nokta.....	48
Şekil 4.9. YNR monteli İHA testleri. A) 45-55 cm yükseklik 41 nokta B) 55 cm yükseklik 41 nokta.....	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. İHA yapılarına göre katsayıları.....	15
Çizelge 3.1. Elips yapılarının fonksiyon değişkenleri.....	24
Çizelge 3.2. Line ve Spline yapıları geçiş noktaları.....	25
Çizelge 3.3. Optimizasyon öncesi değişken değer aralığı ve sonrası değerleri...	26
Çizelge 3.4. Spline yapılarının katsayıları.....	28



1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze birçok çağda toprak altı araştırmaları popülerliğini her zaman koruyan bir konu olmuştur. Bu çalışmalar gerek zorunluluktan gerekse bazı bilimsel araştırmalar için insanlık için önem arz etmektedir. Arkeoloji ve jeofizik gibi alanlarda elde edilen bilgiler ile kimi zaman tarihe kimi zaman bilime birçok katkı sağlanmıştır. Bu gibi alanların yanı sıra zorunluluk içeren askeri uygulamalar içinde önemli bir konudur. Birçok ülkenin ortak problemi olan patlamamış askeri mühimmatların tespiti için ülkeler milyonlarca liralık bütçeler harcamaktadırlar. (Ahmed, 2001; Mitchell ve Shannon, 2004)

Gerek askeri gerek bilimsel araştırmalar adına birçok farklı toprak altı araştırma yöntemleri mevcuttur. Gelişen teknoloji ile de toprak altı araştırmaları için en popüler konular arasında Yere Nüfus Eden Radar (YNR) bulunmaktadır. YNR tekniği ile toprak altında bulunan farklı materyal tiplerindeki nesnelerin tespiti sağlanabilmektedir. Özellikle askeri anlamda bu teknik önemli bir rol oynamaktadır. Ancak patlamamış askeri mühimmatların tespitinde YNR sistemleri risk oluşturabilmektedir. Mevcut YNR sistemleri büyük ve ağır olmaları sebebi ile arazi üzerinde bir kara aracına veya tekerlekli bir sistem üzerine monte edilerek ölçümler yapılmaktadır. Bu uygulama ise patlamamış askeri mühimmatların tespiti adına riskli bir durum oluşturmaktadır.

Günümüzün yaygın konularından bir diğeri ise İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemleridir. Bu sistemler gözlem, keşif, saldırı, araştırma, yük taşıma vb. birçok alanda kullanılmaktadır. İHA sistemleri genel olarak sabit ve döner kanat olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Sabit kanat profilindeki İHA sistemleri uzun menzilli görevlerde kullanılırken, döner kanatlı İHA sistemleri yakın menzilli ve sabit hareket sağlanması gereken uygulamalarda kullanılmaktadır. Döner kanat İHA sistemleri aynı zamanda çok yavaş hareket edebilme yeteneklerine sahiptirler. Bu yetenekleri sayesinde son yıllarda YNR uygulamaları için kullanılmaya başlanmıştır (Dobrovolskiy & Brass, 2020; Fernández, ve diğerleri, 2018; Francke & Dobrovolskiy, 2021). Bir YNR sisteminin İHA'ya monte edilmesi fikri ile özellikle askeri anlamda büyük bir adım atılmıştır. Bu sistem gelişimi ile patlamamış askeri mühimmatların tespiti için kullanılan YNR sistemlerinin oluşturduğu risk ortadan kalkmıştır (Cerquera, ve diğerleri, 2017; Colorado ve diğerleri, 2017; Garcia-Fernandez ve diğerleri, 2019).

YNR sistemleri, elektromanyetik dalgaları kullanarak yüzeyin altındaki nesnelerin tespit edilmesini sağlar. Bu nedenle, YNR sistemi için doğru anten seçimi önemlidir. YNR sistemlerinde kullanılan antenler, elektromanyetik dalgaları yayarak yansıyan dalgaların algılanmasını sağlar. Antenler, genellikle frekans bandı, polarizasyon tipi, yayılma modeli ve ölçüm yöntemi gibi özelliklere göre sınıflandırılır. YNR sistemlerinde Dipol, Horn, Sprial ve Vivaldi anten yapıları oldukça çok kullanılan anten tipleri arasındadır (Ali ve diğerleri, 2017; Guo ve diğerleri, 2019; Hertl ve diğerleri, 2007; Memon ve diğerleri, 2018). Ancak YNR sistemi için doğru anten seçimi, yüzeyin altındaki nesnelerin türüne, algılama derinliğine, çözünürlüğe ve uygulamanın tipine göre değişebilir.

Bu çalışmada bir YNR sistemi geliştirilmiş ve bu sistem bir İHA'ya monte edilerek sığ yüzey altı görüntüleme uygulamaları yapılmıştır. YNR sisteminin radar sinyallerinin üretimi için Vektör Network Analizör (VNA) kullanılmıştır. YNR sistemlerinin büyük anten boyutlarından kaynaklanan dezavantajları adına yeni bir anten tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Antenler ve VNA cihazından oluşan YNR sistemi İHA'nın üzerine monte edilmiş ve İHA'ya alçak uçuş kabiliyeti kazandırmak adına ek sensörler kullanılmıştır. İHA'nın X ve Y koordinatlarındaki hareketinin hassasiyetini sağlamak için İHA sistemine ek olarak optik akış kamerası kullanılarak alçak irtifada hassas hareket sağlanmış ve toprak altı ölçümleri yapılabilmektedir. Yapılan bu ölçümler için odaklama algoritmaları kullanılarak toprak altındaki nesnelerin konumlarının tespiti çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan çalışma adına teorik temeller ve benzer çalışmalar Kuramsal Temeller ve Kaynak Araştırması başlığı altında sunulmuştur. Oluşturulan test ortamı ve YNR monteli İHA sistemi Materyal ve Yöntem başlığı altında sunulmuştur. Çalışmanın test sonuçları ise Bulgular kısmında gösterilmiş ve Sonuçlar başlığı altında çalışma özetlenerek gelecek çalışmalar adına bilgilere değinilmiştir.

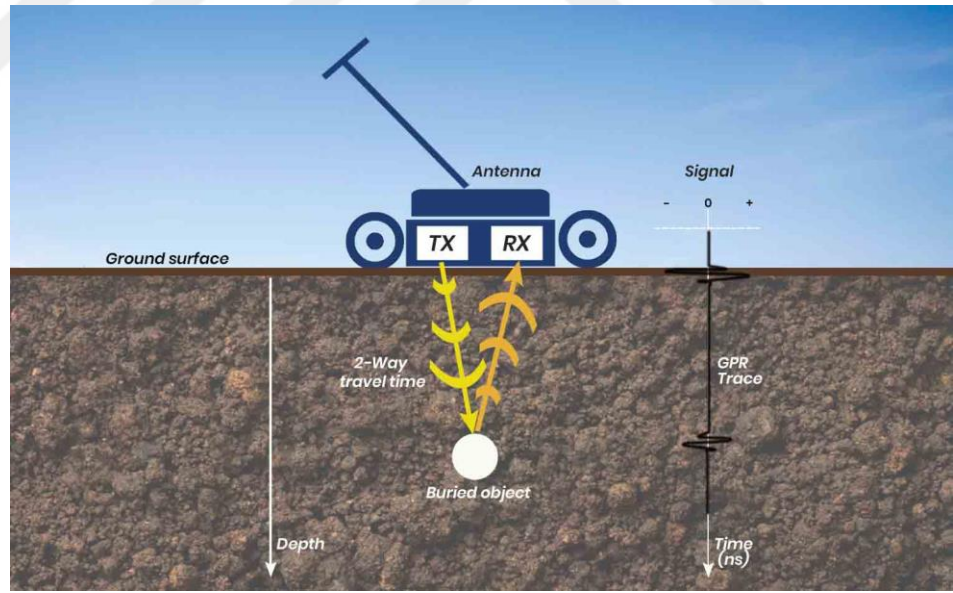
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölüm YNR Tekniği, İHA Tekniği ve Benzer Çalışmalar olmak üzere 3 alt başlıkta incelenmektedir.

2.1. YNR Tekniği

YNR tekniği, yer altında yer alan nesnelerin tespit edilmesi ve çalışmalar için kullanılan bir teknolojidir. Bu sistem, elektromanyetik dalgaların bir anten aracılığıyla toprak altına gönderilmesi ve toprak altından yansımalarının tespit edilmesiyle çalışır. Bu yansımalar, yer altındaki nesnelerin ve yapıların özelliklerine göre değişir ve bu özellikler, yer altındaki nesnelerin tespit edilmesine yardımcı olur.

YNR sistemlerinin genel yapısı Şekil 2.1’de sunulmuştur. YNR sistemleri genel olarak ağır yapılar olması nedeni ile tekerlekli sistemler üzerinde tanıştır ve toprağa yüzeyine minimum uzaklıkta olarak antenleri yerleştirilir. YNR sistemlerinde kullanılan anten tipi, anten kazancı, çalışma frekans band aralığına göre hedef tespit olasılığı artmaktadır.



Şekil 2.1. YNR sistem genel yapısı (İmpulse radar gpr, 2023)

YNR topoloji olarak ortamlar arası ϵ, μ, σ değerlerinde farklılıktan hareketle hedef tespiti yapmayı amaçlar. YNR sisteminin bulunduğu ortam $\epsilon_0, \mu_0, \sigma_0$ değerlerine sahipken toprağın iç yüzeyi $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$ değerlerine sahiptir. Toprak altında bir hedef bulunması

halinde hedefin topraktan farklı $\varepsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ değerlerine sahip olması beklenmektedir. YNR tekniği ise bu değerlerin farklılığından kaynaklanan EM enerjinin farklılığından hedef tespiti yapmayı amaçlamaktadır.

Kullanılan YNR sistemlerinde genel olarak Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) modülasyonlu sinyal kullanılır bu teknik alt başlıklarda daha ayrıntılı anlatılmaktadır.

YNR sistemlerinin en önemli yapılarının birisi de anten yapılarıdır. Anten yapısı YNR sisteminin çalışma derinliği, hedef çözünürlüğü ve sistem gücünü belirleyen en önemli yapıdır. YNR sistemlerinde Dipol, Monopol Helikal, Horn ve Vivaldi anten tipleri kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan anten tipi Horn anten olmasına karşın ağır yapıları gereğinden sistemi yavaşlatmaktadırlar. Aynı zamanda engebeli arazi şartlarında kullanımları oldukça zorlaşmaktadır.

2.1.1. SFCW tekniği

SFCW modülasyonu belirlenen frekans aralığında üretilen sinyali belirli aralıklara bölerek faz bilgisindeki kaymaları tespit etmektedir. Örneğin bir YNR sisteminde adım frekanslarına ayrılmış olan radar sinyalinin toprak altından yansıyan sinyaldeki faz ve genlik bilgisi hedef bilgisini oluşturmaktadır. Genlik bilgisinin değiştiği frekans adımına göre hedef uzaklığı tespit edilmektedir.

SFCW modülasyon tipindeki bir sinyal için F_0 başlangıç frekansı ve ΔF ise adım frekansları arasındaki fark olduğunda sinyal aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$F = \sum_{i=0}^N F_i, \quad F_i = F_{i-1} + \Delta F \quad (2.1)$$

Serbest uzayda merkezden d kadar uzaklıktaki noktasal saçıcı için, geri yansıyan elektrik alan sinyali şu şekilde ifade edilir;

$$E_s = \rho e^{-j4\pi \frac{f_i d}{v}} \quad i = 0 \dots N \quad (2.2)$$

Bu denklemdeki ρ hedefin yansıtırlığını ifade etmektedir. v ise EM dalgasının ortamdaki hızını ifade eder. Homojen ve kayıpsız bir ortam için bu dalga hızı ışık hızı ve ortamın elektriksel geçirgenliği ile bağlantılı olup $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ şeklinde ifade edilir.

Sinyalin dalga numarası k cinsinden ifadesi şu şekildedir;

$$E_s(k) = \rho e^{-jk(2d)} \quad (2.3)$$

Bu denklemde dalga numarası $k = 2\pi F_i/v$ olarak ifade edilir. YNR sistemlerinde tarama işlemi belli bir uzunlukta sürekli yapıldığında buna yapay açıklık denir. Bu gibi tarama işlemlerinde 2 boyutlu tarama denklemleri kullanılır. Örneğin Y yatay uzunluklu bir tarama işlemi M adımda tamamlandığında hedef nesnenin yatay ve dikey de bir konumu bulunur ve (y_0, z_0) olarak ifade edilir. YNR sistemine hedefin uzaklığı d olarak ifade edildiğinden uzaklık formülü şu şekildedir;

$$d = \sqrt{z_0^2 + (Y - y_0)^2} \quad Y = 1, 2, 3 \dots M \quad (2.4)$$

Böylece Y uzunlukta 2 boyutlu bir tarama işlemi ifade edilmiş olur. Birden fazla hedef bulunma ve hedeflerin farklı yansıtırlık değerleri göz önüne alındığında L adet hedef için EM dalgasının genel formülünü şu şekilde ifade edilebilir;

$$E_s(y, k) = \sum_{i=1}^L \rho_i e^{-jk(2\sqrt{z_i^2 + (y-y_i)^2})} \quad (2.5)$$

2.1.2. YNR sistemlerinde menzil ve konum bilgisi

Bu tez çalışmasında 2 boyutlu görüntüleme sağlanmaktadır. Formülasyon kolaylığı açısından 1 boyutlu görüntüleme formüllerinden 2 boyutlu görüntüleme ve menzil profili çıkarımı ifade edilecektir. 1 boyutlu bir menzil profili çıkarımı adına G genlikli bir düzlemsel dalga L mesafedeki bir hedeften yansıması olan $E_s(w)$ şu şekilde ifade edilir;

$$E_s(w) = \rho G e^{-j2\frac{w}{c}L} \quad (2.6)$$

$E_s(w)$ ifadesinin ters fourier dönüşümü yapıldığında zaman bölgesine ait ifadesi şu şekildedir;

$$E_s(t) = \frac{\rho G}{\sqrt{2\pi}} \delta(t - 2 \frac{L}{c}) \quad (2.7)$$

Dirak delta fonksiyonuna bağılı olan bu denklemi uzamsal bölgeye geçiş için zaman eksenin de ölçeklendirilmesi gerekmektedir.

$$z = c \frac{t}{2} \quad (2.8)$$

Zamana bağılı olarak ifade edilen 2.7 denklemi uzamsal bölgede şu şekilde ifade edilir;

$$E_s(z) = \frac{\rho G}{\sqrt{2\pi}} \delta(\frac{2}{c}(z - L)) \quad (2.9)$$

Menzil profili olarak adlandırılan bu denklem L uzaklıktaki bir hedefin konum bilgisini sunmaktadır. Verilen bu ifade sabit bir anten ve sabit bir hedef arasında geçerli olan ve kayıpsız mükemmel şartlarda gerçekleşen bir EM dalga yayılımı ile sağlanmaktadır. Gerçek ortam ve hesaplamalarda ortam parametreleri ve kayıplar göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmaktadır.

Sabit tek bir anten ile oluşturulan menzil profili 2.9 da ifade edilmiştir. YNR sistemlerinde ise anten yapısı hareketli olmasından dolayı menzil profili formülleri daha karmaşıktır. Bu menzil profilleri oluşturulurken hareket eden anten eksenindeki her bir adım için menzil profili çıkarılır ve bu profillerin birleşimi ile oluşan hiperbolik yapılardan konum tespiti yapılmaya çalışılır.

Antenin 2 farklı konumunda tek bir hedef için oluşturulan menzil profili 2.10 da ifade edilmiştir. Bu ifadedeki R_1 uzaklığı birinci anten konumu ile hedef arasındaki uzaklığı verirken R_2 antenin ikinci konumu ile hedef arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.

$$E_{s1}(k) = \rho G e^{j2kR_1} \text{ ve } E_{s2}(k) = \rho G e^{j2kR_2} \quad (2.10)$$

2.7 eşitliğinden yararlanarak 2.10 eşitliğini zaman bölgesine aktarıldığında,

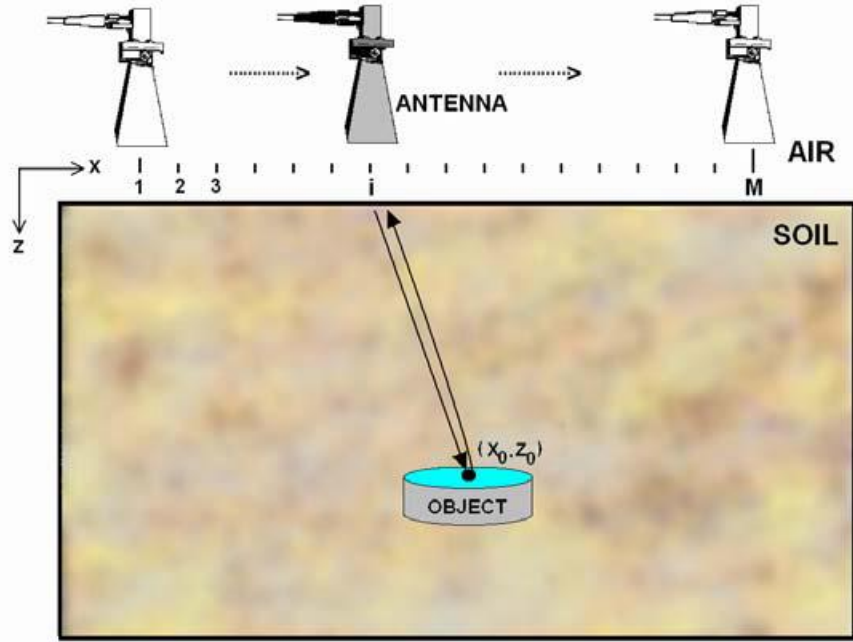
$$E_{s1}(t) = \frac{\rho G}{\sqrt{2\pi}} \delta(t - 2 \frac{R_1}{c}) \text{ ve } E_{s2}(t) = \frac{\rho G}{\sqrt{2\pi}} \delta(t - 2 \frac{R_2}{c}) \quad (2.11)$$

şeklinde olur. 2.9 eşitliğinden yararlanılarak 2.11 eşitliği de uzamsal bölgeye aktarıldığında,

$$E_{s1}(z) = \frac{\rho G}{\sqrt{2\pi}} \delta(z - R_1) \text{ ve } E_{s2}(z) = \frac{\rho G}{\sqrt{2\pi}} \delta(z - R_2) \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilmiş olur.

Tek bir hedef için farklı konumlarda bulunan antenlerden alınan EM dalga bilgisi 2.12 de ifade edildiği gibidir. YNR uygulamaların en genel bu şekilde ifade edilebilir. Bu uygulamalarda sistem hareketli olarak belli bir eksen boyunca doğrusal olarak hareketi sağlanarak toprak altı bilgileri toplanır. Bu hareket esnasında ritmik olarak eş zamanlı hareket yapılmalıdır. Belli uzunluktaki bölgeyi belli adım sayısında taramak gerekmektedir. Şekil 2.2’de bir YNR uygulaması anten hareket yapısı sunulmuştur.



Şekil 2.2. YNR sistemi anten hareket eksenini (Yiğit, 2007)

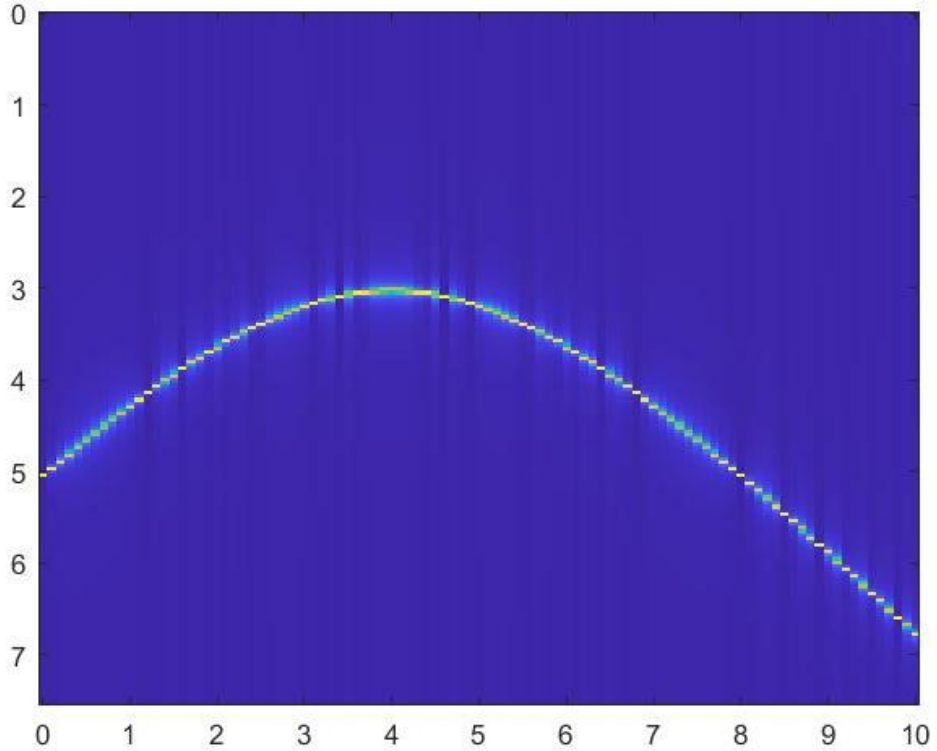
Her bir anten konumundan alınan EM dalga yansımasından menzil profili 2.9 da ki gibi çıkarılmaktadır. Her bir noktada çıkarılan menzil profilleri toplanarak N adımda yapılan bir tarama için 2 boyutlu bir menzil profili çıkarılmış olur. Hedeflerin derinlik bilgisine

$$z = v \cdot t/2 \quad (2.13)$$

Bu denklemdeki v dalganın yayılım ortamındaki hızını belirlemektedir. t ise EM dalgasının anten kaynağından çıkıp hedeften yansıyarak tekrar antene dönüş süresidir. Yatayda hareket ettirilen bir YNR sisteminin hedefe olan uzaklığı ya da diğer bir ifade ile derinliği z_0 olarak ifade edilebilir. Her bir i adım için N adımda gerçekleşen 2 boyutlu tarama işleminde oluşan derinlik bilgisi;

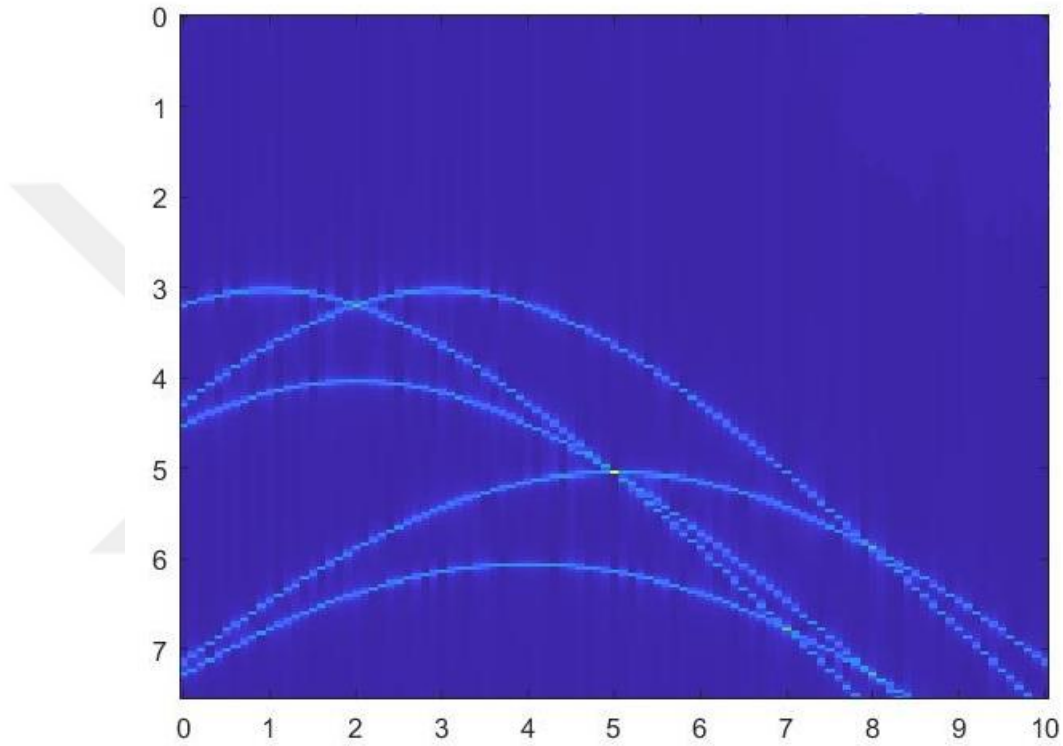
$$z_i = \sqrt{(y_i - y_0)^2 + z_0^2} \quad i = 0, 1, 2 \dots N \quad (2.14)$$

şeklinde olmaktadır. Dolayısıyla bu eşitlikten de anlaşılacağı üzere toprak altındaki her bir hedef için farklı anten konumlarında menziller çıkacaktır ve çıkan görüntü hiperbolik bir yapıya sahip olacaktır. Bu hiperbolik yapının en uç tepe noktası hedef konumunun en doğru kısmı olacaktır. Şekil 2.3’de yatay da 1 metre uzunluğunda ve 101 adımda taranan tarama alanında z_0, y_0 koordinatları (3,4) aşıp tek bir hedef için çıkarılmış menzil profillerinin birleşimi gözükmemektedir.



Şekil 2.3. Tek hedef için menzil profil görüntüsü

Matlab üzerinde gerçekleştirilen bu simülasyondan da görüldüğü üzere 101 adım da hareket ettirilen YNR sisteminde tek bir hedef için hiperbolik bir menzil profili oluşmaktadırdır. Hedefin gerçek koordinatları ise hiperbolün tepe noktası olmaktadır. şekil 2.4’de ise aynı YNR simülasyonu için 5 farklı konumdaki 5 hedef için oluşan menzil profili görülmektedir. Bu sistemdeki hedeflerin z_0, y_0 koordinatları ise sırasıyla (1,3), (2,4), (3,3), (4,6) ve (5,5)’tir.



şekil 2.4. 5 farklı hedef için menzil profili görüntüsü

şekilden de anlaşılacağı üzere birden fazla hedef bulunması halinde YNR sistemlerinde hedef tespitinde konum bilgisi hatalarına sebep olmaktadır. Bu gibi karmaşık durumlar için odaklama algoritmaları geliştirilmiştir. Bu odaklama algoritmaları sayesinde hiperbolik yapılar yerine sadece hedefin gerçek koordinatlarında yansıma gözükmektedir ve bu sayede hedeflerin konum bilgisine doğru ve kolay bir biçimde ulaşılmaktadır.

2.1.3. YNR sistemleri anten tipleri

YNR sistemlerin en önemli kısımların birine antenleridir. YNR sistemlerinde antenler üretilen sinyali iletmek ve geri yansıyan sinyali toplamak ile görevlidir. Bu aşamada anten parametreleri oldukça önemlidir. YNR sisteminin çalışma frekans aralığına göre tasarlanması gereken anten aynı zamanda hangi tip nesnelerin tespit edilebileceğini ve ne kadar derinlikte tarama yapılabileceği belirleyen en önemli yapıdır.

YNR sistemleri ihtiyaca göre değişik tiplerde anten kullanımına açık bir uygulama alanıdır. Şekil 2.5’de YNR sistemlerinde en çok kullanılan anten tiplerine örnek görseller sunulmuştur.



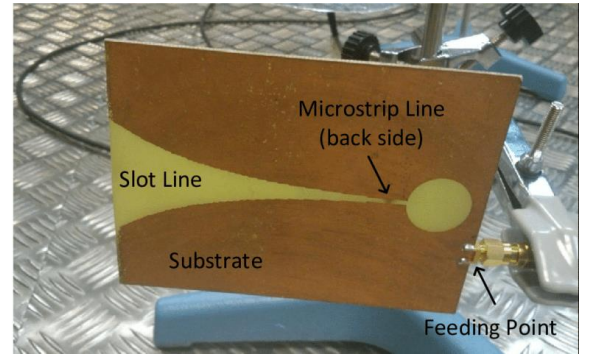
A



B



C



D

Şekil 2.5. YNR sistemlerinde yaygın kullanılan anten tipleri **A)** Dipol anten (Dipol_anten, 2023) **B)** Horn anten (radartutorial, 2023) **C)** Sprial anten (Huang & Lv, 2014) **D)** Vivaldi anten (Albarracin, ve diğerleri, 2015)

Bu anten tipleri yapıları itibariyle bazı farklılıklara sahiptirler. Bu anten tipleri kısaca şu şekilde özetlenebilirler;

Dipol antenler, GPR (Ground Penetrating Radar) uygulamalarında sıklıkla kullanılır ve genellikle GPR sistemlerinin hassaslığını ve çalışma mesafesini artırmak için kullanılır. Dipol antenler, bir GPR sistemine yüksek kaliteli bir giriş işareti sağlar ve sistem için daha fazla enerji toplar. Bu, GPR sisteminin derinlik ve çözünürlük kapasitesini artırır.

Horn antenler YNR uygulamalarında en çok kullanılan anten çeşididir. Bu anten yapıları düşük frekanslarda çok daha güçlü sinyaller üreterek daha derin hedefleri için kullanılır. Dipol antenlere göre daha fazla kazanç sağlarlar ancak daha ağır ve daha pahalıdır.

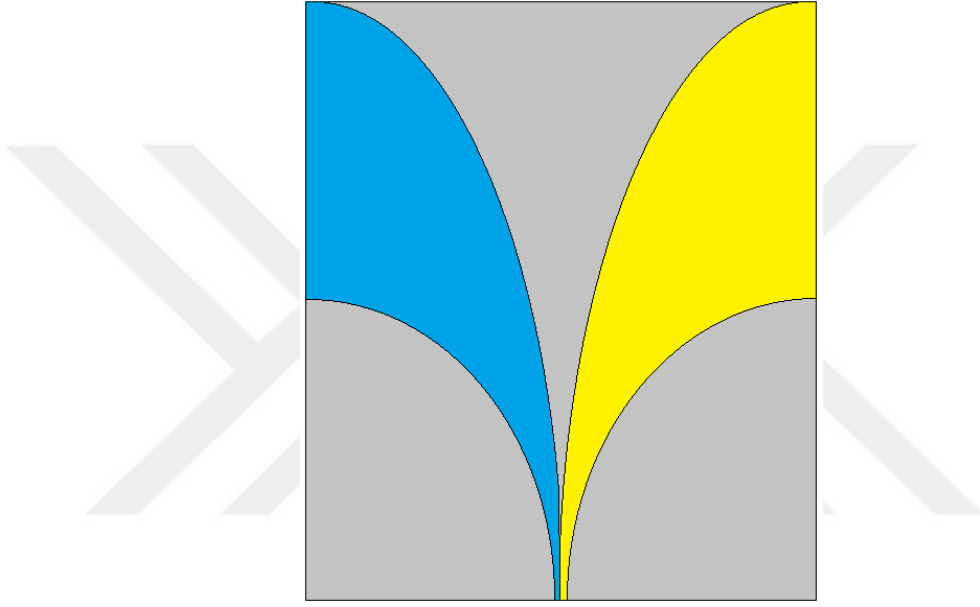
Spiral antenler frekansa bağımsız anten olarak kabul edilirler ve çalışma frekans aralığını anten üzerindeki kolların uzunluğu belirlemektedir. Sağ ve sol dairesel polarizasyon elde edildiği için daha çok toprak altındaki silindirik yapıların tespitine yönelik tarama uygulamalarında kullanılmaktadır. Daha çok çalışma yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılır.

Vivaldi antenler sonsuz frekanslı antenler olarak isimlendirilirler. Yapıları itibariyle çok geniş bir çalışma frekans aralığı sahiptirler ve diğer anten tiplerine oranla çok daha kompakt bir yapı ile geniş band çalışma frekans aralığı sunmaktadır. PCB kart üzerine tasarlanan bu anten yapısı hem üretim kolaylığı hem uygun maliyeti hem de geniş frekans band aralığında doğrusal bir kazanç grafiğine sahip olduğundan YNR uygulamalarında oldukça sık kullanılmaktadır (Travassos, ve diğerleri 2018; Pajewski, ve diğerleri 2015).

Bu tez çalışmasında YNR sisteminin bir İHA'ya monte edilmesi işlendiğinden bu anten tipleri arasında bir İHA'nın aerodinamik yapısına uygunluğu ve taşıma kapasitesini en az etkileyecek olan vivaldi anten tasarımı üzerine yoğunlaşmıştır.

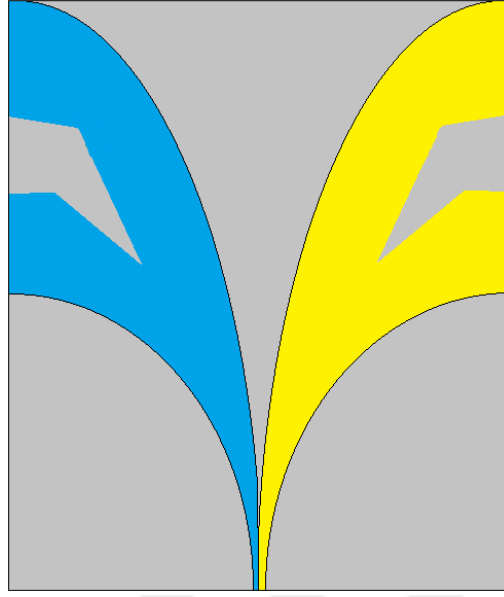
YNR anten tasarımında kullanılacak anten topolojisinin seçimi ve tasarımın İHA'ya uygunluk açısından çok önemlidir. Geniş bant özellikleri, ışıma örüntüsü (yere dik olarak yerleştirildiğinden yatay tiptekilere göre az yer kaplıyor), düşük ağırlığı ve ucuz maliyeti ile antipodal Vivaldi antenler bu nedenle tasarım için uygun görülmüştür. Vivaldi antenler teorik olarak sınırsız frekans bant genişliğine sahiptir. Ayrıca önemli bir kazanç

seviyesine ve lineer polarizasyona sahiptirler. (Gibson & Peter , 1979) tarafından ilk defa 1979 yılında önerilen bu antenler yüksek kazanç değerleriyle dikkat çekmiş ve 1988 yılında (Gazit, 1988)Antipodal Vivaldi Anten (AVA) yapısını önermiştir. AVA yapısı yüksek kazancı, yüksek verimliliği, düşük return loss değeri geniş bant genişliği sebepleriyle aynı zamanda yan lob seviyelerini düşürdüğü ve kararlı radyasyon paterni sağladığı için Vivaldi antenlere kıyasla tercih edilmektedir (Dixit & Kumar, 2020). Şekil 2.6’da klasik bir AVA yapısı sunulmuştur.



Şekil 2.6. Klasik AVA yapısı

Klasik bir AVA yapısı çalışma frekans band aralığının optimize edilmesinde yeterli olmayabilir. Bu gibi durumlar için anten yapısındaki iletken bölgelerde belli simetrik yapılar çıkartılır. Çıkartılan bu yapılar slot yapısı olarak isimlendirilmekte ve anten çalışma frekans band aralığını ayarlamakta önemli bir parametre olmaktadır. Şekil 2.7’de ise tek slot yapıları bir AVA yapısı örneği sunulmuştur.



Şekil 2.7. Tek slotlu AVA yapısı

Şekil 2.7’de görülen bu slot yapısı sayesinde AVA tasarımında alt kesme frekansı en alt seviyeye indirilir, yan lob seviyeleri azaltılır ve ana lob seviyesini artırılır. Bu slot yapısı ve flare yapılarının şekillerini belirleyen herhangi bir denklem bulunmamaktadır. Genel olarak eliptik denklemler üzerinden flare yapıları oluşturulur ve dikdörtgensel veya dairesel denklemler ile de slot yapıları eklenmektedir. Ancak deneme-yanılma yöntemine dayalı olan bu işlemler oldukça uzun zamanlar gerektirmektedir.

Son yıllarda gelişen yazılım ve yapay zeka uygulamaları ile problemlerin çözüm süreleri de oldukça kısalmış durumdadır. Anten tasarımı gibi uygulamalar içinse çeşitli optimizasyon uygulamalarından faydalanılmaktadır. Parçacık sürü algoritması (PSO), genetik algoritma (GA) ve karınca kolonisi algoritması (KKA) gibi birçok popüler optimizasyon algoritması bulunmaktadır. Bu algoritmalar kullanılarak değişkenlere sahip bir fonksiyon için girilen değişken aralıklarında istenen sonucu sağlayan parametreleri bulmakta kullanılır. Anten tasarımı gibi birçok değişkene sahip yapılarda istenen değer aralıkları hesaplanarak optimizasyon algoritmaları çalıştırıldığında, istenen çalışma frekans band aralığı, kazanç değer aralığı gibi değerleri optimum olarak sağlayan değişkenlerin değer kısa sürede hesaplanabilmektedir. Ancak tasarımda oluşturulacak yapılar değişkenlere ve belli yapı (hiperbolik, dairesel, spline v.b.) fonksiyonlarına bağlı olarak belirlenmesi ve tasarlanması gerekmektedir.

2.2. İHA Sistemi

İnsansız Hava Araçları yapıları itibariyle en genel olarak sabit kanat ve döner kanat olmak üzere 2 sınıfa ayrılmaktadır. Motor yapısı gereği sadece tek eksenle itme uygulayan ve kaldırma kuvvetini kanat yapısından sağlayan uçak formundaki İHA'lar sabit kanatlı İHA olarak isimlendirilmektedir. Bu gibi yapılar kalkış yaptıkları anda sürekli olarak hareket etmek ve minimum hızlarının altına düşmemeleri gerekmektedir. Diğer bir sınıf olan döner kanat İHA'lar birden fazla motorlu olarak çalışmakta ve bir kanat yapısına sahip değildir. Genel olarak 4 motorlu olarak üretilen bu İHA sistemleri havada belli noktalarda sabit olarak durabilmeleri sabit kanat İHA'lar ile aralarındaki en büyük farkı oluşturmaktadır. Gerekli durumlarda havada sabit kalabilir, çok alçak irtifalarda uçuş gerçekleştirebilir ve sabit konumda kendi etrafında dönüş hareketi yapabilirler.

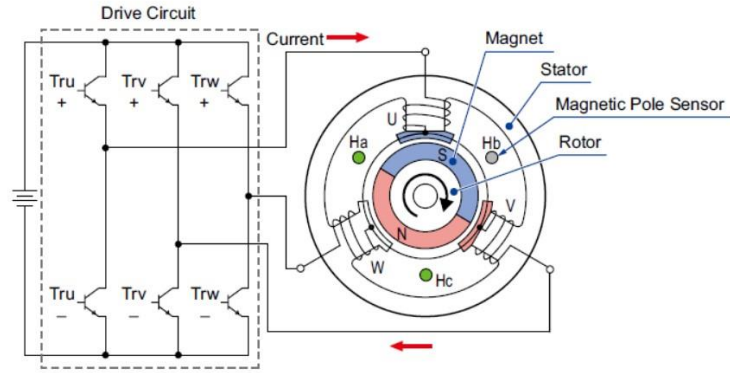
Bu tez çalışması toprak altı tarama uygulaması üzeri olduğundan bu uygulamaya uygun olan döner kanatlı İHA konfigürasyonları incelenmiştir.

Çok motorlu yapıya sahip bu İHA'larda öncelikle kullanım amacına göre motor sayısı belirlenmektedir. Çizelge 2.1'de en genel kullanılan İHA konfigürasyonları ve amacına uygun parametreler verilmiştir. Tablodaki katsayılar ise bu tez çalışması adına önem sırasına göre 0-5 arasında bir değere karar verilmiştir.

Çizelge 2.1. İHA yapılarına göre katsayıları

	Katsayı	BiCopter	TriCopter	QuadCopter	Y6	Hexa/Octo Copter
						
Boyut	1	1	1	0	-1	1
Hız	2.5	-1	-1	0	1	1
Yük Kapasitesi	0.5	-1	-1	0	-1	1
Motor Sayısı	1.5	1	1	0	-1	-1
Güç Harcaması	1.5	1	1	0	-1	-1
Kontrol Kolaylığı	5	-1	-1	1	-1	0
Toplam		-4	-4	5	-7	1

İHA'lar da kullanılan motor yapıları ise genel olarak fırçasız motor olarak isimlendirilen çok yüksek hızlarda çalışan motorlardır. Bu motor 3 fazlı olarak çalışır ve genel yapısı Şekil 2.8'de sunulmuştur. PWM sinyalleriyle çalışan bu motorlar her bir adım için motor içindeki fazlardan birine doğru akım, diğerine ters akım vererek motorun hareket etmesini aynı zamanda üçüncü fazdan da motorun hareket etmesiyle içindeki mıknatısların bobin üzerindeki indüklenen akım ölçülerek motorun konum bilgisine ulaşılır ve bir sonraki adımda fazlar yer değiştirir. Bu sayede çok hızlı çalışan motorlar aynı zaman da konum bilgisi için hiçbir ek sensöre ihtiyaç duymamaktadırlar. Fazlar arası geçiş ve motor dönüş hızına ise Elektronik Speed Controller (ESC) sürücü devresi karar vermektedir. Herbir motor için bir adet ESC kullanılması gerekmektedir.



Şekil 2.8. Fırçasız motor genel yapısı (orientalmotor, 2023)

İHA'nın yön bilgisine, dengede kalmasını veya belli hareketi yapmasına ise uçuş kontrol kartı karar verir. Bu uçuş kontrol kartları dahili olarak barometre, ivme ölçer, haberleşme birimleri gibi yapıları içinde barındırır. Bu kontrol kartlarının en yaygın olarak kullanılanı Pixhawk 2.4.8 uçuş kontrol kartıdır ve Şekil 2.9'da sunulmuştur. Bu uçuş kontrol kartı açık kaynaklı olarak programlanabilmekte ve ek sensör kullanım bağlantıları açık bir karttır. İçerisinde barındırdığı PID kontrolcüler ve kalman filtreleri ile İHA sisteminin dengesini ve yönelimi mükemmel bir biçimde sağlamaktadır. Harici olarak bağlanabilen GPS sistemi ile küresel koordinatları belirleyerek daha stabil bir uçuş sağlamaktadır. Üzerinde bulunan ivme ölçer ve GPS bilgisini kalman filtreleri değerlerini analiz ederek uçuş kontrolü sağlamaktadır.



Şekil 2.9. Pixhawk 2.4.8 Uçuş kontrol kartı

İHA sisteminin diğ er bir önemli kısmı batarya yapısıdır. İHA sisteminde kullanılan fırçasız motorların anlık akım çekim değerleri çok yüksek olduğundan bu akım değerleri karışılabilecek C değerlerine sahip batarya kullanımı gerekmektedir. İHA sistemleri genel olarak bu akım değerlerini karışılayabilen Li-Po batarya teknolojisini kullanmaktadır. Pil voltaj değerleri motorların çalışma voltaj aralığına göre seçilirken pil kapasitesini (2.15) deki formül hesabı ile hesaplanmaktadır. Buradaki U_t uçuş süresini, B_{ah} amper saat cinsinden batarya kapasitesini, A_t ise İHA sisteminin toplamda çektiği ortalama akım değerini göstermektedir.

$$U_t = \frac{B_{ah}}{A_t} \times 60 \quad (2.15)$$

Tüm bu İHA sisteminin değerlerini belirleyecek en önemli husus ağırlık değeridir. Havacılık uygulamalarında en çok dikkat edilen nokta hava aracının oldukça hafif aynı zamanda bir o kadar verimli olması beklenir. Burada da döner kanatlar için ağırlık hesabı yapıldıktan sonra kullanılacak motora uygun pervane seçimi yapılması gerekmektedir. 4 motorlu bir İHA sistemi için 4 motorun toplam itkisi stabil bir uçuş adına, minimum toplam ağırlığın 1,8 katı olmalıdır.

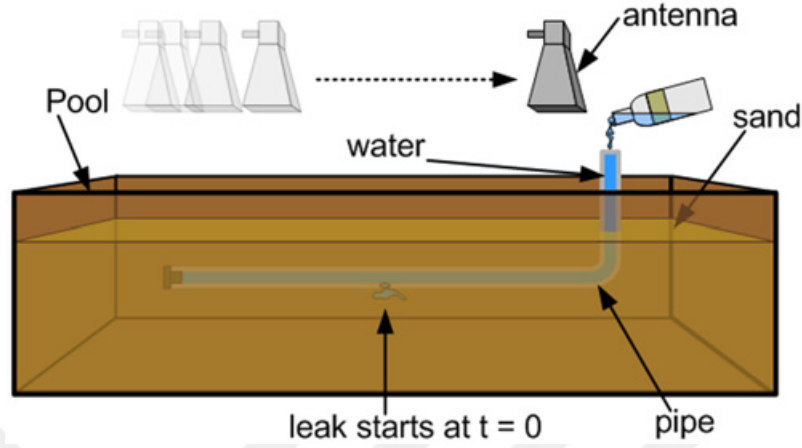
Tüm bu parametrelere karar verilmesi ile İHA şase üretimine geçilerek uygun tasarım ve aerodinamik özelliklere karar verilir. Yapılan simülasyon ve test sonuçlarına göre İHA şasesi üretilir ve diğ er elektronik komponentler monte edilir. İHA'nın görev amacına göre ek sensör ve elektronik birimler yerleştirilerek İHA  retimi tamamlanır.

2.3. YNR Sistemleri Benzer  alışmalar

Bu başlık altında YNR monteli İHA çalışmalarına ve benzer uygulamalara dair  zet bilgiler sunulmuştur.

2011 yılında (Demirci, ve diğ erleri, 2012) yapmış olduğu bir YNR sistemi ile yaklaşık 27 cm derinliğindeki plastik bir borudaki su sızıntısını tespit etmişlerdir. Bu çalışmalarında geri yansıma metodunu kullanarak 0.8 – 5 GHz bant aralığında deneylerini gerçekleştirmişlerdir. 190 cm x 100 cm x 80 cm boyutlarına sahip bir kum havuzu oluşturarak laboratuvar ortamında testlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu YNR sisteminde

yüksek kazanç değerlerine sahip 40 cm yükseklik ve 30 cm genişlikte olan horn tipi anten kullanılmıştır. Laboratuvar ortamındaki test düzeneği Şekil 2.10’da sunulmuştur.



Şekil 2.10. YNR test düzeneği (Demirci, ve diğerleri, 2012)

Laboratuvar ortamındaki testlerde su kaçağı koordinatları doğru olarak bulunduğu açık hava ortamındaki testlere geçilmiş ve farklı metotlarla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ancak dış ortamdaki toprak yapısından kaynaklı nem, boşluk gibi parametrelerden sızıntı tespitinde sıkıntılar yaşamışlardır.

Benzer bir çalışma olarak (Kim, ve diğerleri, 2005) yaptığı çalışmada su kaçaqları için 100 – 400 MHz bant aralığında çalışan bir YNR sistemi için 1 metre derinliğinde çapı 20 cm olan bir borudan kaçak tespiti için FMCW ve darbe tipi YNR sistemlerinin karşılaştırması yapmıştır. Yapılan çalışmada 1m x 1m x 1m boyutlarında YNR sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Büyük boyutlara sahip bu YNR sistemi ancak bir tekerlekli bir sistem ile taşınabilmektedir. Üretilen bu sistemin anten yapısı olarak dipol anten tipi tercih edilmiştir. Karşılaştırılan iki metod arasından darbe tipi YNR sisteminin su kaçağı tespitinde daha etkili olduğu savunulmuştur.

(Heggy, ve diğerleri, 2013) çalışmalarında 2011 yılında helikopter üzerine takılan bir YNR sistemi ile buzul ve çöl ortamlarında toprak altı su havzalarını incelenmiştir. 40 - 50 MHz band aralığında çalışan sistem sayesinde çok daha derin noktalarda hedef taraması yapabilmektedir. Dar band aralığında çalışmanın dezavantajı olarak bu çalışmada çözünürlük sadece 10 metre düzeyinde bir değer elde etmişlerdir. Buzul

ortamında yapılan tarama işlemlerinde yüzeyin 1km derinliğinde su tabakası tespit edilirken, çöl ortamında 55 m derinlikte su tabakası tespiti yapılabilmektedir.

(Fernández, ve diğerleri, 2018) yapmış oldukları çalışmada İHA ya monte ettikleri bir YNR ile mayın tespitine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Öncelikle İHA'ya monte edilen bir YNR sistemi ile mayın tespiti yapmanın avantajından bahsedilmiş ve sonrasında tasarlanan sistemin ayrıntılarına değinilmiştir. Yapılan bu çalışmada 5 kg kalkış ağırlığına sahip bir İHA, RTK modül ve çeşitli yardımcı sensörler kullanarak kararlı bir uçuş yapılmaya çalışılmıştır. Yerden 75 cm yükseklikte yaptıkları deneylerde zeminin 15 cm altındaki demir boruyu ve plakayı tespit etmişlerdir. Bu çalışmada 2-5 GHz bant aralığında çalışılmıştır. Yapılan çalışmada helix anten yapısı kullanılmıştır.

(Francke & Dobrovolskiy, 2021) yaptıkları bir çalışmada ise son yıllarda popüler olan iki alanın birleşimi olan YNR monteli İHA lar hakkında yasal ve fiziksel sınırlandırmalar üzerine ayrıntılı bir çalışma yapmışlardır. Öncelikle yapılan YNR uygulamalarına değinilen çalışmada ülkelere göre bu sistemlerin yasal zorunluluklarından ve değişikliklerden bahsetmektedir. YNR sistemlerinin fiziksel kısıtlamaları kısmında ise farklı zemin yapılarına dair dielektrik geçirgenlik katsayılarından ve yüzey yansımalarından bahsetmektedir. Bu yüzey yansımalarından dolayı sistem antenlerinin zemine yakın olması gerekliliği ve bunun ise İHA aerodinamik yapısında problemlere yol açabileceğinden bahsetmektedir. Ayrıca çalışmada İHA üzerinde bulunan alıcı-verici antenler ve motorlardan kaynaklı oluşan gürültü frekanslarının YNR sistemi üzerine olabilecek muhtemel etkilerinden ve çözüm önerilerinden bahsedilmiştir. İHA'ların kararlı bir uçuş yapabilmenin gerekliliğinden ve zorluklarından bahsederek, kullanılabilecek ve daha önceki çalışmalarda kullanılan sensör ve yöntemlerden bahsedilmektedir. YNR kısmına da değinen çalışma, daha önceki çalışmalara atıfta bulunarak kullanılan frekans aralığının 30-500 MHz bandında olduğundan bahsedilmiş ve toprak altı görüntüleme için bu frekans aralığında çalışılması gerekliliğinden bahsetmişlerdir. İHA'ya monte edilecek anten yapılarının da oldukça hafif olması gerekliliğinden ve İHA sistemleri için tasarlanmış bir vivaldi anten tasarımına atıfta bulunulmuştur.

(McMichael, ve diğerkleri, 2013) yaptıkları çalışmada yer altı mayınları tespitine yönelik daha düşük boyutlarda 1.36 – 1.75 GHz frekans bandında antenler kullanılmıştır. (Xie, ve diğerkleri, 2021)' de Şangay metro inşaatında dolgu malzemeleri ve inşaat demirlerinin tespiti işlemi için 400 – 900 MHz frekans bandında anten kullanılırken (Loizos & Plati, 2014)' de asfalt zemin yüzeyinin inceleme işleminde 0.5 – 2 GHz frekans bandında çalışan boynuz tipi antenler kullanılmıştır.

Son olarak YNR monteli İHA tasarımı için gerekli olan şartlar genel olarak şu şekilde sıralanabilir.

- Yüksek frekanslarda çalışma
- Geniş bant aralığı
- Yüksek çözünürlük için odaklama algoritmaları kullanımı
- FMCW radar kullanımı
- İHA üzerine ek sensörler ve GPS modülü ile yüksek kararlılıkta uçuş
- İHA üzerine monteli lazer tarayıcı veya sonar sensörler ile kararlı bir uçuş irtifası

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında YNR sistem tasarımı tamamlanması sonrasında İHA tasarımı ve montajı gerçekleştirilmiştir. YNR sistem tasarımının en önemli yapısı olan anten tasarımı YNR sistemi başlığı altında anlatılmıştır. Bu kısımda tasarım, üretim ve test düzenekleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

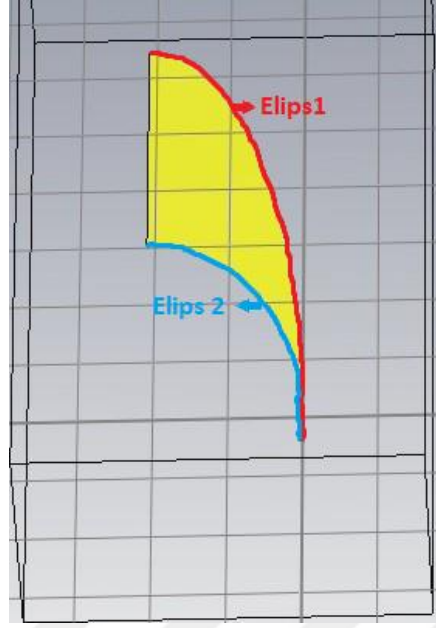
3.1. YNR Sistem Tasarım ve İmalat

YNR sistem tasarımını belirleyen başlıca nokta anten yapısı olduğundan öncelikle anten tasarım süreci anlatılmıştır.

3.1.1. Anten tasarımı

YNR sisteminin bir İHA'ya monte edileceğinden dolayı anten tasarımı olarak hafif ve boyutlarına göre kazanç değerleri oldukça yüksek olan antipodal vivaldi anten yapısı seçilmiştir. Anten tasarım ve test simülasyonları CST programı (CST, 2022) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle anten yapısının geometrik yapılarına karar verilmiştir. Yapılan anten tasarımında antipodal vivaldi anten yapısında klasik olarak kullanılan eliptik şekiller ile flare yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yapılar Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Anten flare yapısı

Tasarlanan anten yapısı daha sonrasında optimizasyon algoritmaları ile optimize edileceğinden eliptik yapılar değişkenler cinsinden ifade edilmiştir. Eşitlik 3.1 ve eşitlik 3.2 de elips 1 ve 2 nin x ve y kartezyen koordinatlarındaki yarıçaplarına bağlı fonksiyonları ve merkez noktaları verilmiştir. Bu iki elipsin merkez noktaları ve yarıçaplarını ifade eden denklemleri değişkenlere bağlı olarak ifade edilmiştir. Elips yapılarının merkez noktalarının ve fonksiyonlarının bağlı olduğu değişkenler Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

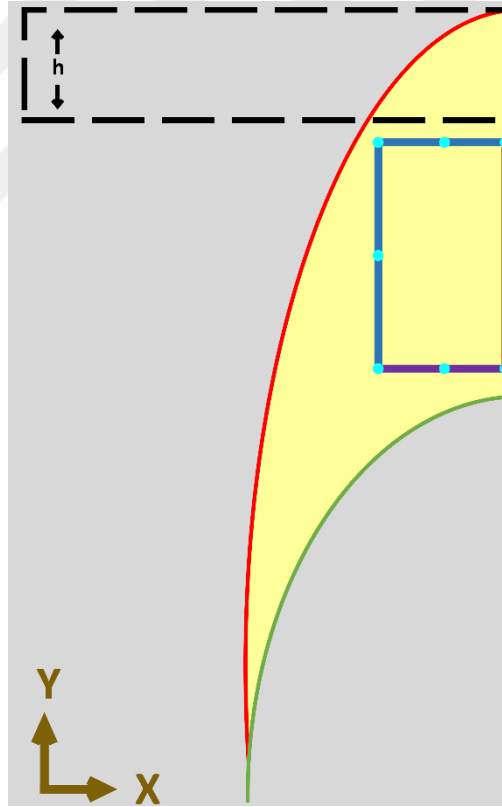
$$\text{Elips 1 : } \frac{x^2}{x_{1r}^2} + \frac{y^2}{y_{1r}^2} = 1 \quad \text{Merkez}(x,y): x_{1c} , y_{1c} \quad (3.1)$$

$$\text{Elips 2 : } \frac{x^2}{x_{2r}^2} + \frac{y^2}{y_{2r}^2} = 1 \quad \text{Merkez}(x,y): x_{2c} , y_{2c} \quad (3.2)$$

Çizelge 3.1. Elips yapılarının fonksiyon değişkenleri

Radius		Center	
$x_{1r} = d_1$	$y_{1r} = d_2$	$x_{1c} = d_5 + d_6$	$y_{1c} = 0$
$x_{2r} = d_3$	$y_{2r} = d_4$	$x_{2c} = d_5$	$y_{2c} = 0$

Flare yapısı tasarımı tamamlanması ile antipodal vivaldi anten tipinin kazanç ve çalışma frekansını belirleyen ana faktör olan slot yapısı tasarlanmıştır. Slot yapısı Şekil 3.2’de görüldüğü üzere flare yapısının üst bölgesinde dikdörtgensel olarak oluşturulmuştur. Eşitlik 3.3, 3.4 ve 3.5 de ise bu slot yapısında kullanılan 1 adet line ve 2 adet kübik spline yapılarının fonksiyonları sunulmuştur.



Şekil 3.2. Anten slot yapısı Kırmızı: Ellipse 1, Yeşil: Ellipse 2, Kahverengi: Line, Mor: Spline 1, Mavi: Spline 2, Siyah: h

$$S_1(X) = \begin{cases} k_0(X - S_{1X_0})^3 + k_1(X - S_{1X_0})^2 + k_2(X - S_{1X_0}) + k_3 & S_{1X_0} < X \leq S_{1X_1} \\ k_4(X - S_{1X_1})^3 + k_5(X - S_{1X_1})^2 + k_6(X - S_{1X_1}) + k_7 & S_{1X_1} < X \leq S_{1X_2} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$S_2(X) = \begin{cases} k_8(X - S_{2X_1})^3 + k_9(X - S_{2X_1})^2 + k_{10}(X - S_{2X_1}) + k_{11} & S_{2X_0} < X \leq S_{2X_1} \\ k_{12}(X - S_{2X_2})^3 + k_{13}(X - S_{2X_2})^2 + k_{14}(X - S_{2X_2}) + k_{15} & S_{2X_1} < X \leq S_{2X_2} \\ k_{16}(X - S_{2X_3})^3 + k_{17}(X - S_{2X_3})^2 + k_{18}(X - S_{2X_3}) + k_{19} & S_{2X_2} < X \leq S_{2X_3} \\ k_{20}(X - S_{2X_4})^3 + k_{21}(X - S_{2X_4})^2 + k_{22}(X - S_{2X_4}) + k_{23} & S_{2X_3} < X \leq S_{2X_4} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$L(x) = \{ L_{y_0} < L(x) < L_{y_1} \quad x = L_{x_0} \quad (3.5)$$

7 farklı noktadan geçen bu slot yapısı da optimizasyon algoritması için değişkenler ile ifade edilmiştir. Slot yapısı tasarımı için toplam 12 farklı değişken kullanılmıştır. 2 noktadan geçen line 1, 5 noktadan geçen spline 1 ve 3 noktadan geçen spline 2 nin geçiş noktaları ifade eden değişkenler Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Line ve Spline yapıları geçiş noktaları

	X	Y
$S_1(x)$	$S_{1X_0} = d_5$	$S_1(S_{1X_0}) = d_7$
	$S_{1X_1} = d_5 + d_8$	$S_1(S_{1X_1}) = d_9$
	$S_{1X_2} = d_5 + d_{10}$	$S_1(S_{1X_2}) = d_{11}$
$S_2(x)$	$S_{2X_0} = d_5 + d_{10}$	$S_2(S_{2X_0}) = d_{11}$
	$S_{2X_1} = d_5 + d_{12}$	$S_2(S_{2X_1}) = d_{13}$
	$S_{2X_2} = d_5 + d_{14}$	$S_2(S_{2X_2}) = d_{15}$
	$S_{2X_3} = d_5 + d_{16}$	$S_2(S_{2X_3}) = d_{17}$
	$S_{2X_4} = d_5$	$S_2(S_{2X_4}) = d_{18}$
$L(x)$	$L_{x_0} = d_5$	$d_7 \leq L(x) \leq d_{18}$

Toplamda 18 farklı değişken ile oluşturulan antipodal vivaldi anten tasarımının 1- 3 GHz band genişliğinde çalışması ve S11 parametresi minimum -10dB olması gerekmektedir. CST programı üzerinde bu koşullar baz alınarak PSO optimizasyon algoritması (Shi, 2004) ile 18 değişken optimize edilmiştir. Optimizasyon öncesinde belirlenen değer

aralıkları ve optimizasyon sonrası elde edilen değişken değerleri Çizelge 3.3’de görülmektedir.

Çizelge 3.3. Optimizasyon öncesi değişken değer aralığı ve sonrası değerleri

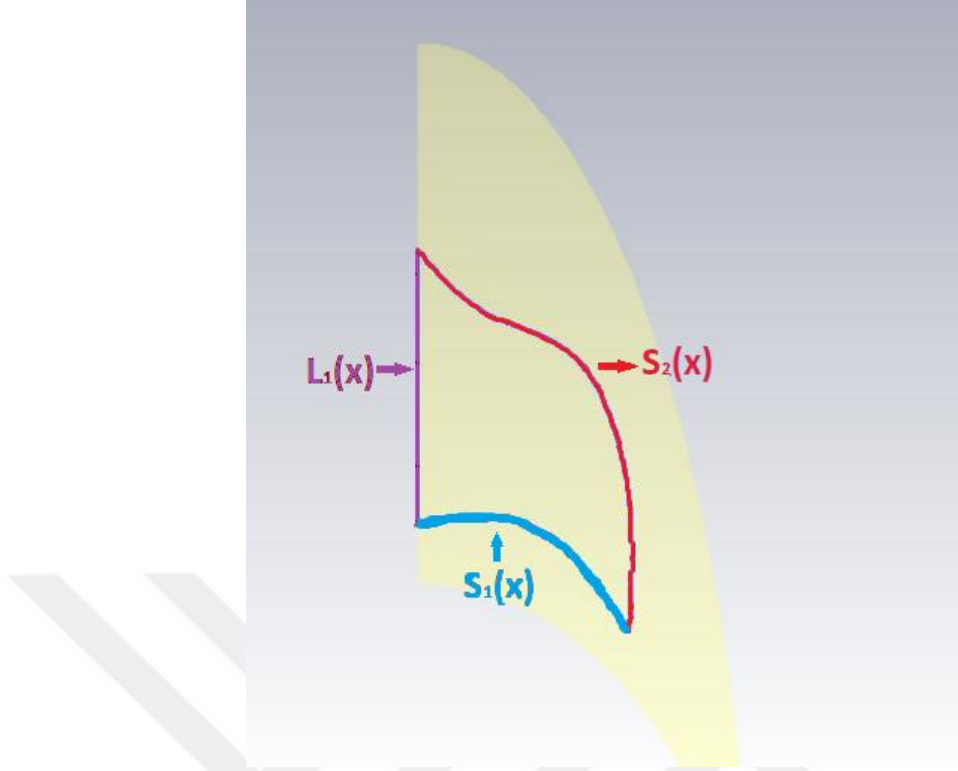
Değişken	Aralık	PSO Sonucu	Değişken	Aralık	PSO Sonucu
d_1	$40 \leq d_1 \leq 120$	75,69	d_{11}	$80 \leq d_{11} \leq 120$	98,83
d_2	$150 \leq d_2 \leq 300$	232,2	d_{12}	$20 \leq d_{12} \leq 60$	45,21
d_3	$20 \leq d_3 \leq 100$	75,69	d_{13}	$120 \leq d_{13} \leq 160$	142,43
d_4	$60 \leq d_4 \leq 130$	109,8	d_{14}	$10 \leq d_{14} \leq 40$	32,23
d_5	$-100 \leq d_5 \leq 0$	-75,96	d_{15}	$150 \leq d_{15} \leq 200$	163,58
d_6	$0 \leq d_6 \leq 4$	0,27	d_{16}	$10 \leq d_{16} \leq 40$	15,69
d_7	$110 \leq d_7 \leq 160$	123,46	d_{17}	$150 \leq d_{17} \leq 240$	170,87
d_8	$20 \leq d_8 \leq 40$	25,41	d_{18}	$150 \leq d_{18} \leq 240$	185,18
d_9	$110 \leq d_9 \leq 160$	122,86	d_{19}	$0 \leq d_{19} \leq 80$	54,72
d_{10}	$20 \leq d_{10} \leq 60$	47,8			

Elde edilen değişkenler değerleri ile anten tasarımında değişkenler bağlı olarak ifade edilen anten kenar fonksiyonları artık belirlenmiştir. Eşitlik 3.6, 3.7 de elips 1 ve elips 2 nin fonksiyonları ve merkez noktaları ifade edilmiştir.

$$\text{Elips 1 : } \frac{x^2}{42,05^2} + \frac{y^2}{129^2} = 1 \quad \text{Merkez } (x, y) : -42,05, 0 \quad (3.6)$$

$$\text{Elips 1 : } \frac{x^2}{42,05^2} + \frac{y^2}{61^2} = 1 \quad \text{Merkez } (x, y) : -42,2, 0 \quad (3.7)$$

Optimizasyon sonucunda elde edilen slot yapısı Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Optimizasyon öncesi dikdörtgensel yapıya sahip olan slot yapısı optimizasyon sonucunda eğrisel bir yapıya dönüşmüştür.



Şekil 3.3. Optimizasyon sonucu slot yapısı

Slot yapısında kullanılan Line 1, spline1 ve spline2 fonksiyonları ise sırasıyla 3.8, 3.9 ve 3.10 da ifade edilmiştir.

$$L(x) = \{ X = -42,02 \quad 68,59 < L(x) < 102,88 \quad (3.8)$$

$$S_1(x) = \begin{cases} k_0(X + 42,2)^3 + k_1(X + 42,2)^2 + k_2(X + 42,2) + k_3 & -42,2 < X \leq -28,08 \\ k_4(X + 28,08)^3 + k_5(X + 28,08)^2 + k_6(X + 28,08) + k_7 & -28,08 < X \leq -15,64 \end{cases} \quad (3.9)$$

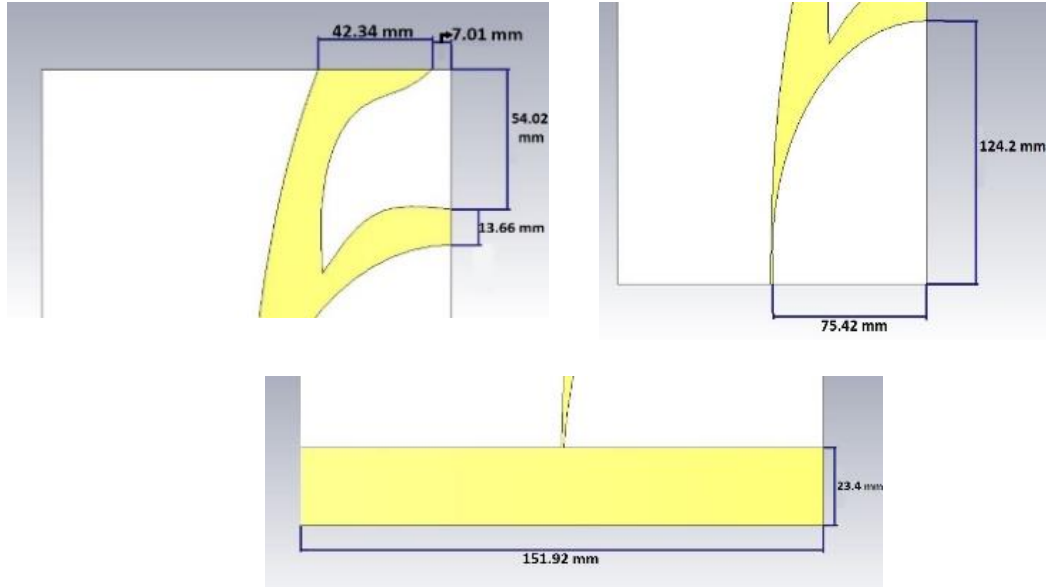
$$S_2(x) = \begin{cases} k_8(X + 17,08)^3 + k_9(X + 17,08)^2 + k_{10}(X + 17,08) + k_{11} & -15,64 < X \leq -17,08 \\ k_{12}(X + 24,29)^3 + k_{13}(X + 24,29)^2 + k_{14}(X + 24,29) + k_{15} & -17,08 < X \leq -24,29 \\ k_{16}(X + 33,48)^3 + k_{17}(X + 33,48)^2 + k_{18}(X + 33,48) + k_{19} & -24,29 < X \leq -33,48 \\ k_{20}(X + 42,02)^3 + k_{21}(X + 42,02)^2 + k_{22}(X + 42,02) + k_{23} & -33,48 < X \leq -42,02 \end{cases} \quad (3.10)$$

Spline fonksiyonların optimizasyon sonucunda geçiş noktaları belirlenmiş olsa da fonksiyon katsayıları CST programının varsayılan ayarlarında bulunmaktadır. Spline fonksiyonunun katsayılarını ifade eden birden fazla çözüm kümesi bulunmaktadır. Bu çözüm kümelerinden bir tanesi Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Spline yapılarının katsayıları

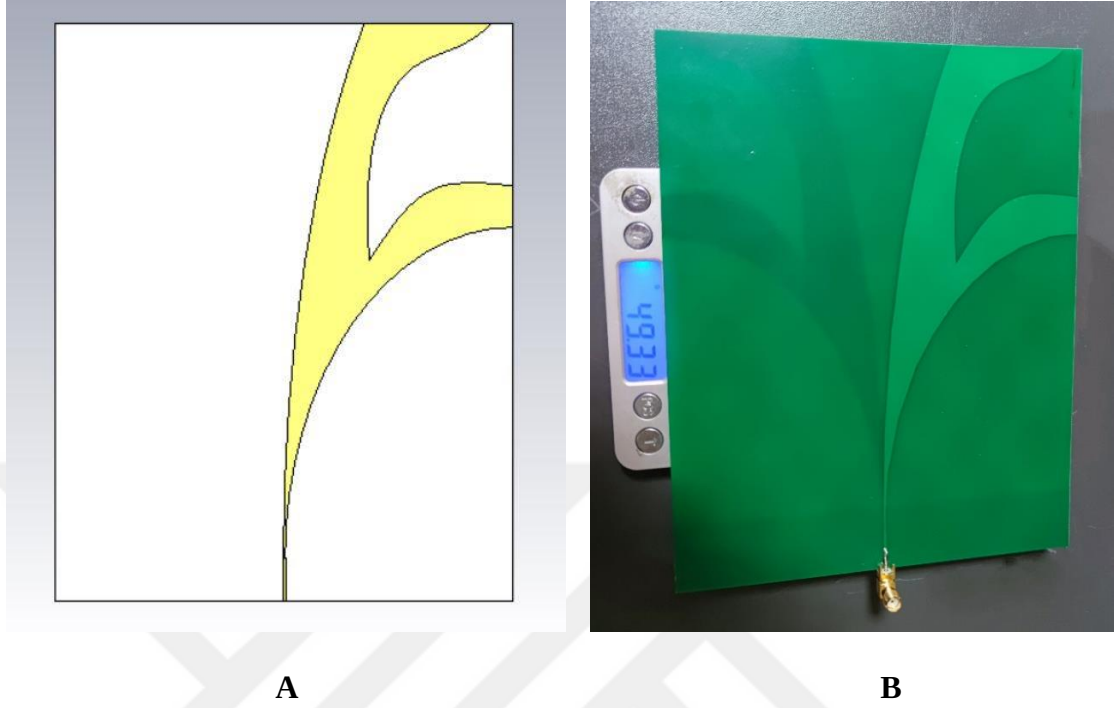
k_0	-0.0011	k_6	-0.3640	k_{12}	-0.0157	k_{18}	-0.3619
k_1	0.0066	k_7	68.2600	k_{13}	-0.0283	k_{19}	94.9300
k_2	0.1000	k_8	-6.1852	k_{14}	-0.6102	k_{20}	-0.0071
k_3	68.5900	k_9	-0.3676	k_{15}	90.8800	k_{21}	0.1866
k_4	-0.0014	k_{10}	-3.4645	k_{16}	-0.0011	k_{22}	-2.0000
k_5	-0.0395	k_{11}	79.1300	k_{17}	0.0013	k_{23}	102.8800

Karar verilen bütün değişkenler PSO algoritması sonucunda belirlenir iken son adım olarak anten uzunluğunu kısaltmak adına h değişkeni ile belirlenen dikdörtgensel bölge anten yapısından çıkarılmıştır. Bu aşamada anten kazancında bir etki olmadığı gözlemlenmiştir. Bütün parametrelerin belirlenmesi ile anten geometrisine ait detaylı ölçüler Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Anten tasarımı geometrik ölçüler

Anten tasarımının belirlenmesi ile anten üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5’de anten tasarımının tamamı ve üretim sonrası görselleri gösterilmektedir.



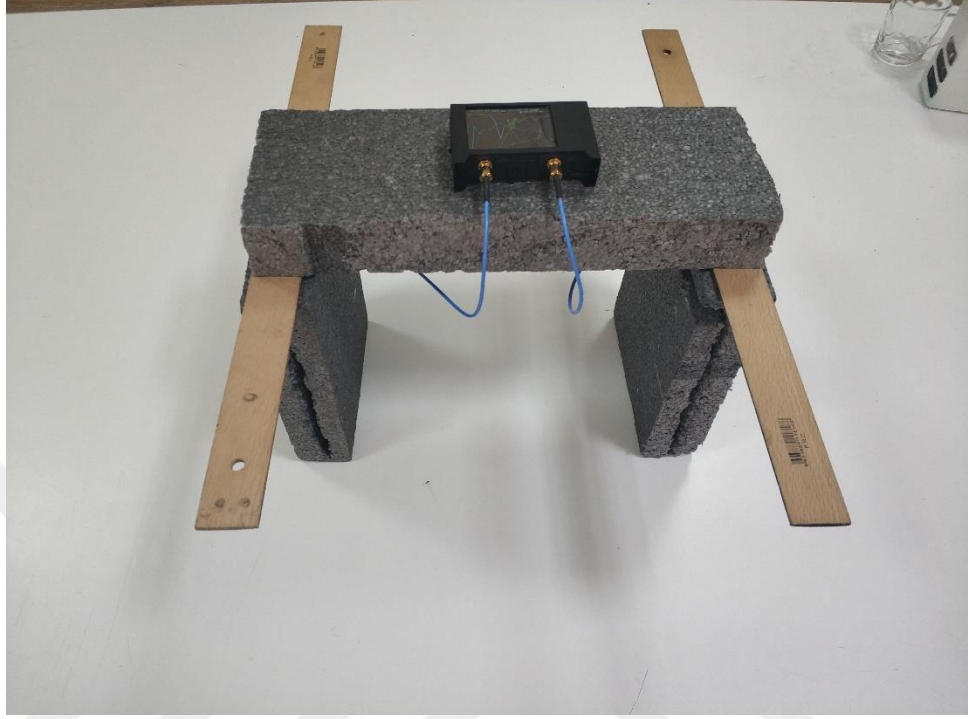
Şekil 3.5. Anten tasarımı. **A)** CST anten tasarımı **B)** Üretim sonrası anten ve ağırlığı

3.1.2. VNA seçimi

Vector network analyzer (VNA) cihazı belli frekans aralığında belirli adımlara bölünmüş sinyaller üretir. Bu tez çalışması kapsamında YNR sistemi İHA'ya monte edileceğinden VNA cihazının da oldukça hafif olması gerekmektedir. Bu gibi uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilen mini VNA cihazları bulunmaktadır. Bu cihazlar arasından yapılmak istenen YNR sistem gereksinimi olan 1-3 GHz band aralığında çalışabilecek ve bilgisayar destekli bir arayüzü bulunan nanoVNA cihazı tercih edilmiştir. NanoVNA cihazı 50 kHz - 3GHz aralığında sinyal üretebilmekte ve bu sinyali 201 noktaya kadar adımlayabilmektedir. Ayrıca 2 port yapısına sahip cihaz S11, S12, S21 ve S22 değerlerini okuyabilmektedir. Dahil bir batarya ve ekranı sayesinde kolay ve kullanışlı bir yapıya sahip olmasının yanında USB bağlantısı ile bilgisayar bağlantısı sağlayabilmektedir.

Şekil 3.6’da oluşturulan VNA yapısı gösterilmiştir. VNA cihazı bir yardımcı bilgisayar olan raspberry pi 3'e bağlıdır. Bu sayede verileri kaydedebilmekte ve arayüz kontrolü ile

hızlı müdahale edilebilmektedir. Portlarına bağlanan 2 antipodal vivaldi anten ile de S21 parametreleri okunarak toprak altı taramaları yapılacaktır.



Şekil 3.6. VNA yapısı

3.2. İHA Analiz ve İmalatı

YNR sisteminin monte edileceği İHA yapısı kullanım amacına uygun olarak 4 motorlu bir döner kanat İHA profili tercih edilmiştir. Bu tez çalışması daha çok YNR sistem tasarımı ve imalatı üzerine yoğunlaştığı için İHA profil ve ekipmanları hazır komponentlerden oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu aşama bazı durumlarda özgün tasarımlar yapılarak İHA profiline eklenmiştir.

Elektronik komponentleri belli olan İHA da motor, pervane ve pil seçimi için ecalce simülasyonu üzerinde analiz yapılmıştır. Yaklaşık ağırlığı 2000 gr olan İHA yapısı için araştırılan fırçasız motorlar arasından Sunnysky x3108s motor kullanımına karar verilmiştir. Bu motor için ecalce üzerinde yapılan simülasyon sonucu Şekil 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3.7. İHA ecalce simülasyon sonucu

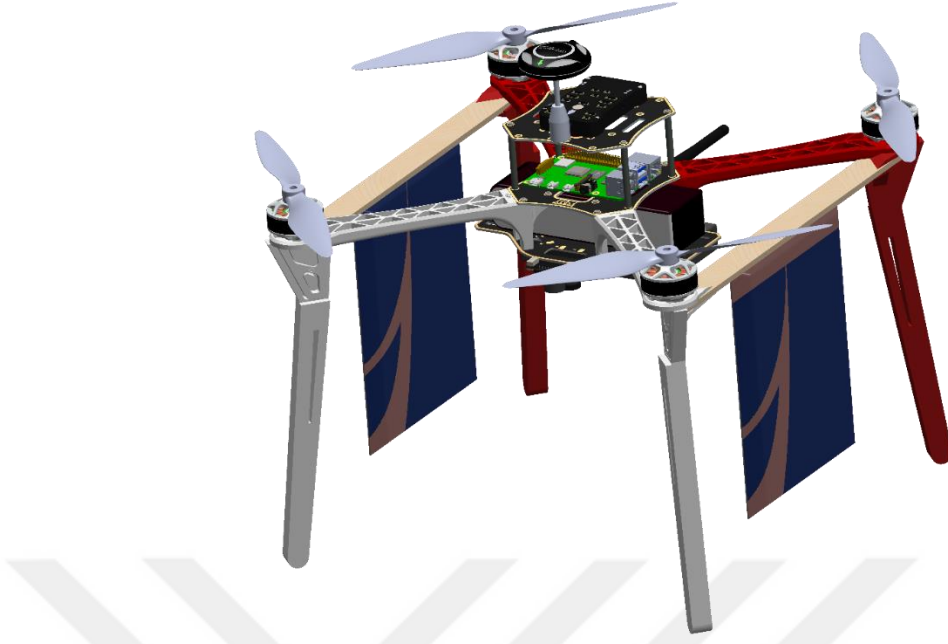
Ecalce sonuçlarına göre Sunnysky x3108s motoru, 11x4.7 ölçülerinde pervane ve 4S 5000 mah batarya kullanımı ile 13.5 dk uçuş süresi sağlanmıştır. Minimum 1.8 olması gereken itki-ağırlık oranı 2.1 değerlerinde ve ideal bir değerdir. Motor akım değerleri ortalama 4.7 Amper iken maksimum 14.7 Amper değerlerindedir. İHA için motor, pil ve pervane seçimlerinin tamamlanması ile İHA şase tasarımı adımına geçilmiştir.

4 motorlu bir şase yapısına sahip olan F450 profili üzerine tasarlanan İHA yapısı tamamı SolidWorks üzerinde tasarlanmıştır. Tasarım ve akış analizleri tamamlanan İHA yapısının SolidWorks üzerinde oluşturulan tasarımının üstten ve alttan görselleri Şekil 3.8'de görülmektedir.



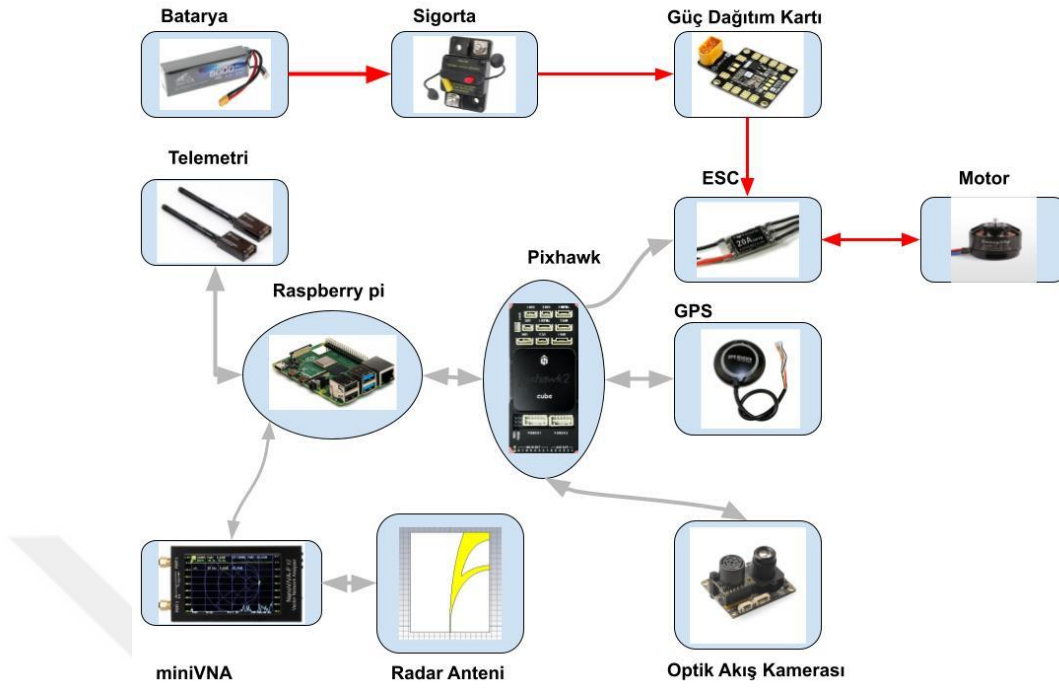
Şekil 3.8. İHA tasarımı

Yapılan İHA tasarımında hazır olarak kullanılan F450 şasesi için YNR sisteminde kullanılacak antenler için bir montaj olanağı bulunmamaktadır. Şekil 3.8 de İHA şasesinde bulunan ayak yapısı ise anten boyutlarına göre çok küçük olduğu için yetersiz kalmaktadır. Tasarımdaki bu yetersizlikler için özgün olarak bir ayak yapısı ve anten tutucu yapısı geliştirilmiştir. İHA üretimi sonrası antenlerin zarar görmemesi için antenler köpük malzeme ile korunacaktır. Bu eklentiler ile İHA son tasarımı Şekil 3.9’da sunulmuştur.



Şekil 3.9. İHA son tasarım

Tasarımı tamamlanan İHA üretime hazır hale gelmiştir. Şaseye ek olarak tasarlanan ayak yapıları 3 boyutlu yazıcı ile PLA malzemedan üretilmiştir. Şekil 3.10'da ise İHA üzerindeki komponentler ve YNR sisteminin bağlantı şeması verilmiştir. Bu şekildeki kırmızı oklar elektriksel bağlantıyı sağlarken gri oklar ise haberleşmeyi sağlayan bağlantılardır.



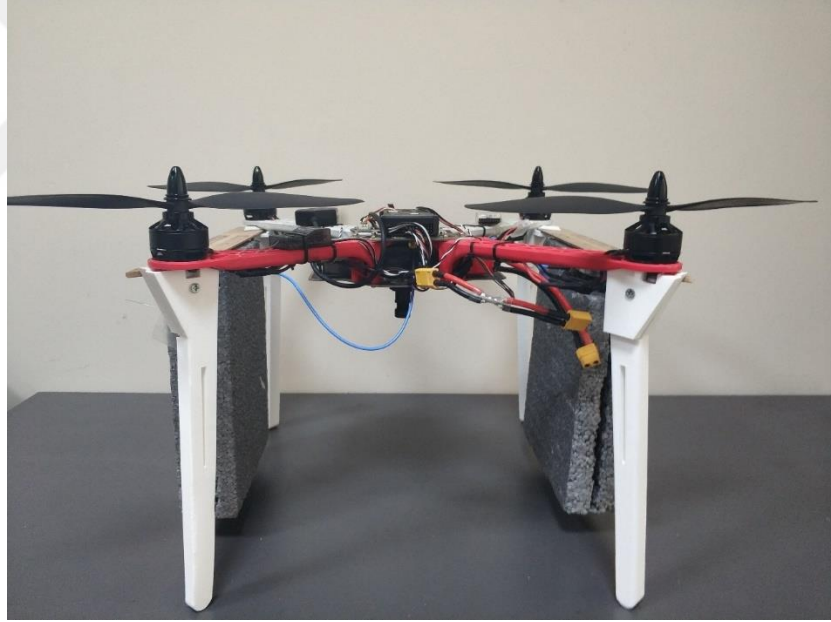
Şekil 3.10. İHA komponent bağlantıları

Şekil 3.10’da görüldüğü üzere kararlı bir uçuş sağlanabilmesi adına ihtiyaç duyulan bazı sensörler kullanılmıştır. GPS sensörü küresel konumlama sistemindeki İHA’nın koordinat bilgilerini vermektedir. Optik akış kamerası ise GPS sinyalinin yetersiz kaldığı durumlar için kullanılmaktadır (Hsiu-Wen Cheng, 2019). İHA sisteminin alt yüzeyine monte edilen optik akış kamerası ile alttaki görüntünün akışından x ve y eksenlerinde ivme değerlerini vermektedir. Bu sayede İHA YNR sistemleri için hayati önemdeki 2 eksen de kararlı bir hareket sağlamış olacaktır. Montaj öncesi bütün komponentler ise Şekil 3.11’de sunulmuştur.



Şekil 3.11. İHA üzerindeki tüm eleman ve komponentler

Tüm elektronik ve mekanik parçaların montajı sonrası uçuşa hazır hale getirilen İHA sistemi ise Şekil 3.12’de sunulmuştur.



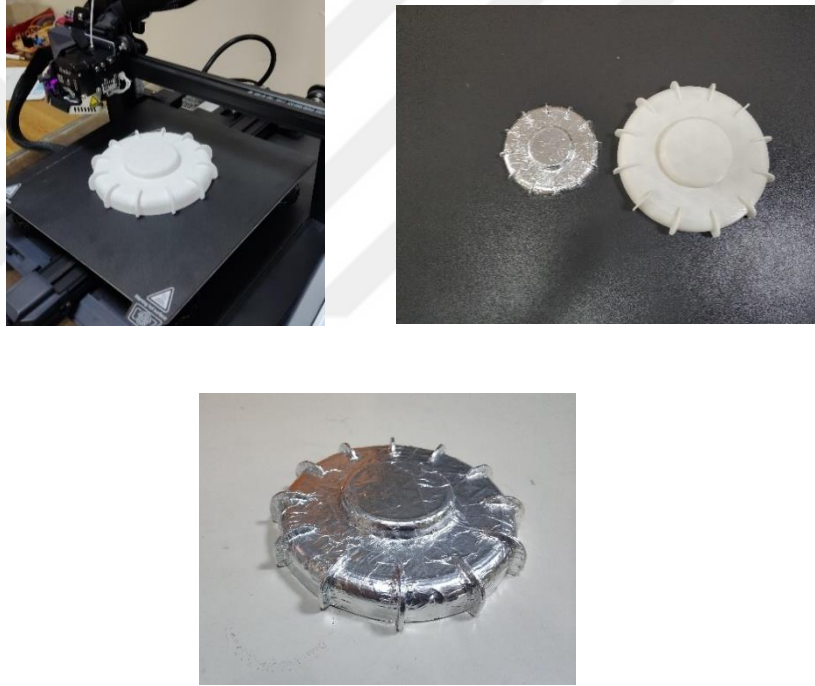
Şekil 3.12. Üretim sonrası İHA görseli

3.3. Deney ve Test Alanı

Üretimi tamamlanan İHA sistemi öncelikle PID katsayılarının ayarlanması adına ön uçuş testlerine tabi tutulmuştur. Gerekli PID katsayılarının ayarlanması ve sensör değerlerinin optimize edilmesi ile İHA sistemi tarama işlemleri için hazır duruma gelmiştir.

Test düzenekleri iki farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle laboratuvar ortamında YNR sisteminin ve antipodal anten sistemlerinin performans testleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında başarılı sonuçlar elde eden sistem dış ortam testlerine tabi tutulmuştur.

YNR sisteminin performansını ölçebilmek adına toprak altına nesneler yerleştirmiştir. Bu nesneler gerçek mayın boyutlarında olup 3 boyutlu yazıcıda PLA malzemeden üretilmiştir. Mayın benzeri yapıların gerçek mayınlar ile yakın karakterler göstermesi adına üretim sonrası bu nesnelerin etrafı alüminyum malzeme ile kaplanmıştır. şekil 3.13’de farklı boyutlarda üretilen mayın benzeri yapıların üretim ve kaplamasına dair görseller sunulmuştur.



şekil 3.13. Mayın benzeri yapılar

YNR sistem ve antenleri toprak altı performanslarını test edebilmek için 2 metre uzunluğunda 1 metre genişliğinde ve 40 cm derinliğinde bir kum havuzu oluşturulmuştur. Bu kum havuzu gerçek toprak karakteri göstermesi için çakıl karışımı dış ortam kumu ile doldurulmuştur. Kum havuzu üzerinde 2 metrelik hat boyunca doğrusal bir hareket yaparak YNR sistemi test edilmiştir. Antenlerin zarar görmemesi için havanın ortamı ile aynı elektromanyetik karakterizasyona sahip köpük ile kaplanmıştır. Bu köpük ile hem

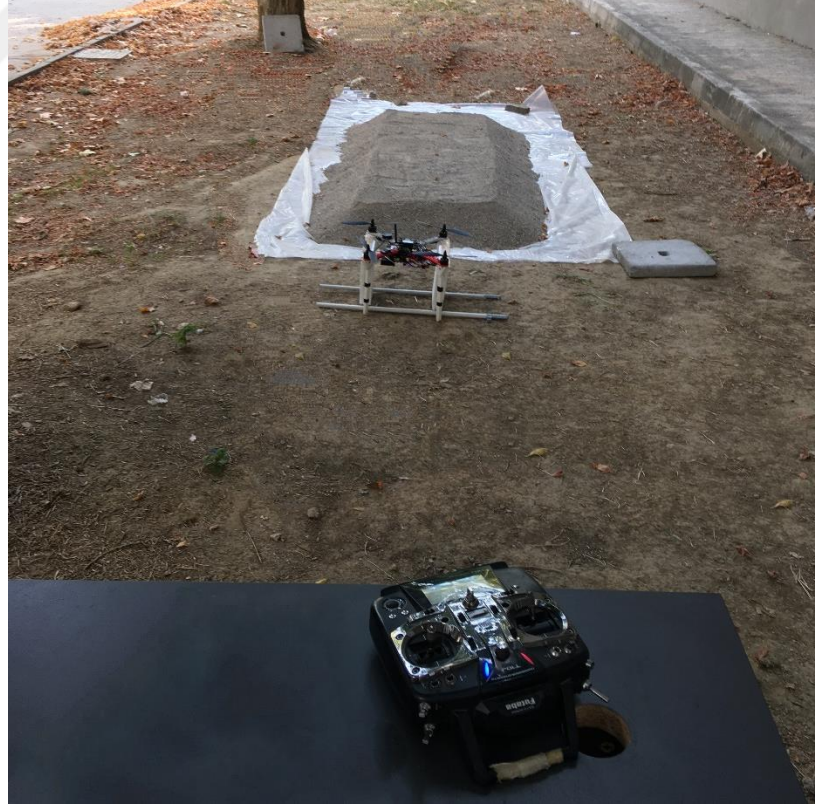
antenler korunmuş olmakta hem de ölçümlere bir etkisi olmamaktadır. Tüm YNR sistemi hareketli ve ölçeklenebilir bir sistem üzerine inşa edilmiştir. Sistemin tekerlekli bir yapıda olması İHA uçuş yapısına benzer hareketler yapabilmesi için tasarlanmıştır. Bu sayede 2 metrelik hat boyunca farklı konumlardaki hedefler için toprak yüzeyinden farklı yüksekliklerde ölçümler alınabilmektedir. Şekil 3.14’de bu deney alanına dair görseller sunulmuştur.



Şekil 3.14. Deney alanı

Kum havuzu üzerinde farklı yüksekliklerde yapılan testlerin ardından İHA uçuş yüksekliği belirlenmiştir. Belirlenen yükseklik ve performans testleri İHA üzerine monte edilmiş YNR ile yapılabilmesi için dış ortam test alanı oluşturulmuştur. Oluşturulan test alanında hedeflerin gerçek görüntülerini elde edebilmek adına toprak yüzeyi üzerine 15 cm kalınlığında olacak şekilde kum serilmiştir. Bu sayede toprak kazılarak gömülen hedeflerin toprak kazısından kaynaklanan boşluk yansımaları ile hedef tespiti belirlenliğinin önüne geçilmiş ve homojen bir kum dağılımı ile daha doğru sonuçlar elde etmek amaçlanmıştır.

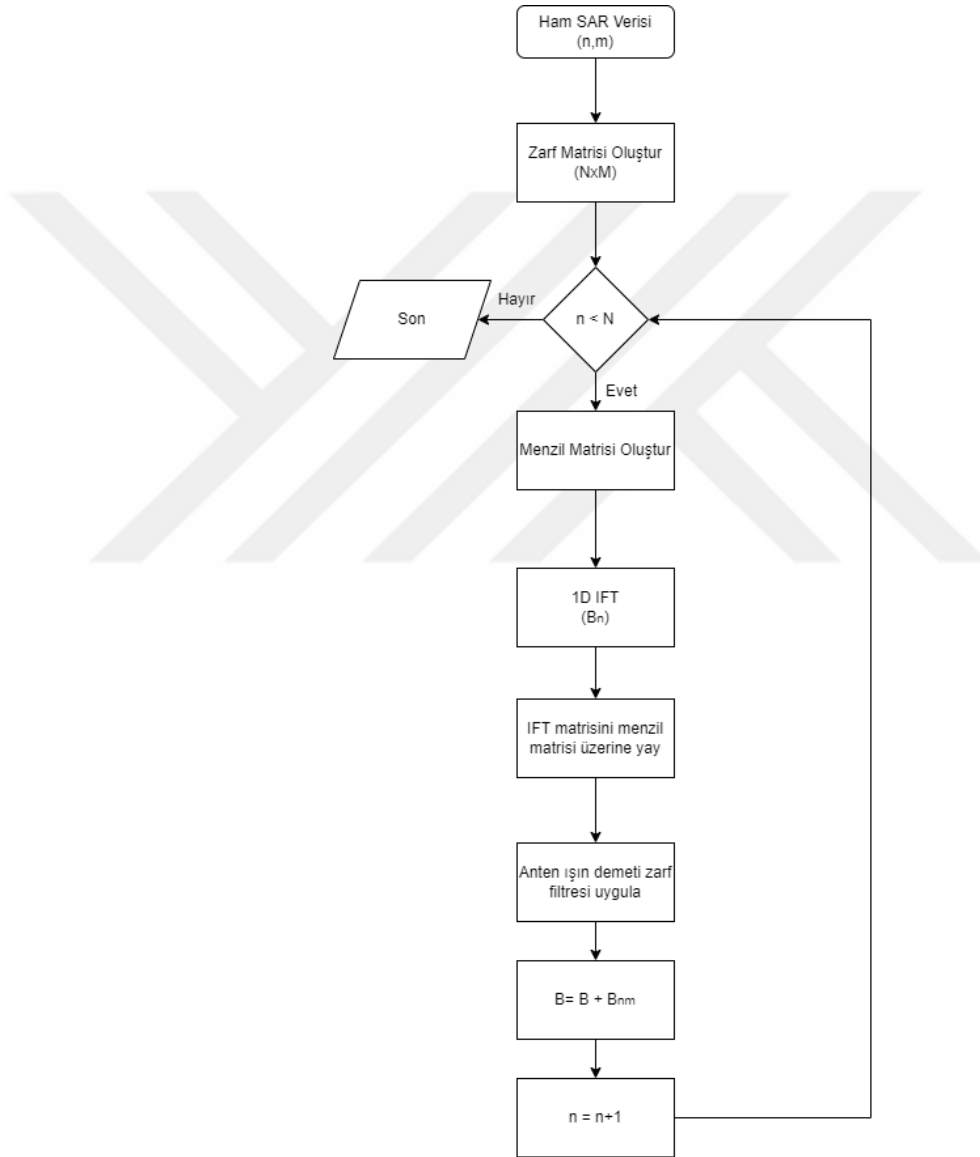
Oluşturulan test ortamı 2 metre uzunluğunda ve 50 cm genişliğindedir. Laboratuvar ortamında test edilen ve başarılı sonuçlar elde edilen YNR sistemi İHA şasesine monte edilmiş ve dış ortam testleri yapılmıştır. Şekil 3.15’de ise gerçek ortam deney düzenekleri ile YNR monteli İHA yapısı sunulmuştur.



Şekil 3.15. İHA ile tarama test alanı

Tarama işlemlerinin ardından hareket eksenindeki her bir adım için S21 bilgisi kaydedilmiştir. Kaydedilen bu bilgilerin tamamı Matlab üzerinde işlenmiştir. YNR görüntüsü elde edebilmek adına geliştirilen odaklama algoritmalarından en kararlı çalışan back projection algoritması (BPA) tercih edilmiş ve işlenmiştir (Özdemir ve diğerleri, 2014).

Şekil 3.16’da Back Projection algoritmasının akış diyagramı sunulmuştur.



Şekil 3.16. Back projection algoritması akış şeması

Temel olarak BPA elektromanyetik dalganın geri yansımalarını toplayıp belli bir aydınlatma penceresi üzerine yayarak hedef tespitini yapmak üzere çalışır. BPA algoritmasının işleyiş adımları şu şekilde sıralanabilir;

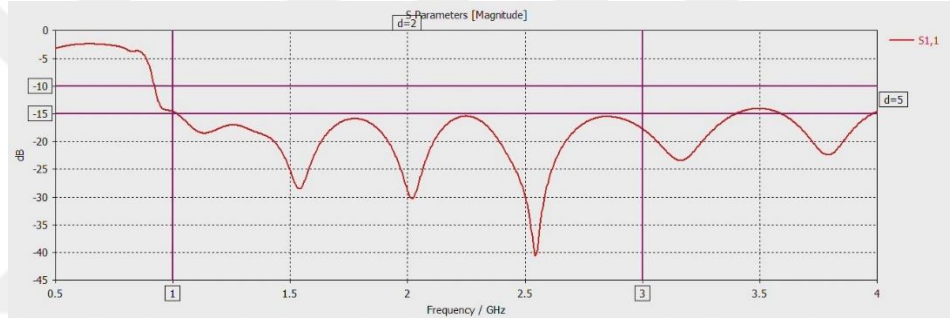
- Tarama yüzeyine ait ham Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) verileri alınır.
- $N \times M$ boyutlarında zarf matrisi oluşturulur.
- Hedef yansımaları için menzil matrisi oluşturulur.
- Oluşturulan menzil matrisi aydınlatma penceresi için zarf matrisi yayılarak filtrelendir.
- Bu işlem N sayısı kadar tekrarlanır.
- Döngü tamamlandığında hedefin gerçek konumu diğer piksellerden daha parlak olacağını için konum tespiti doğru olarak yapılabilmektedir.

4. BULGULAR

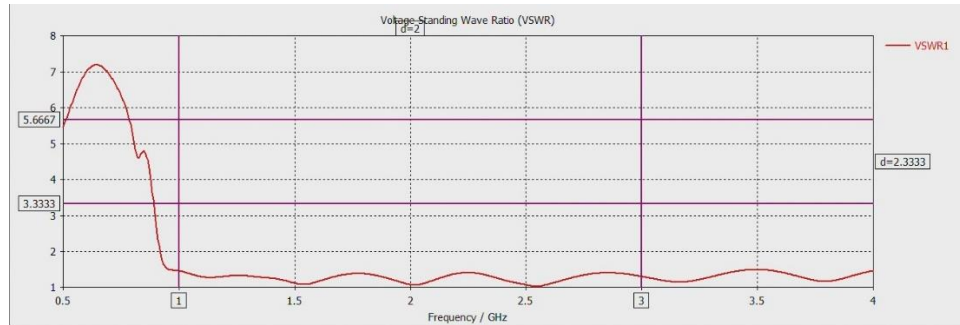
YNR monte edilmiş İHA çalışma performansı farklı ortamlarda test edilmiş ve başarılı sonuçlar vermiştir. Sistem performansı başlıklar halinde anten performansı, YNR sistem performansı ve YNR monteli İHA performansı şekilde incelenecektir.

4.1. Anten Performansı

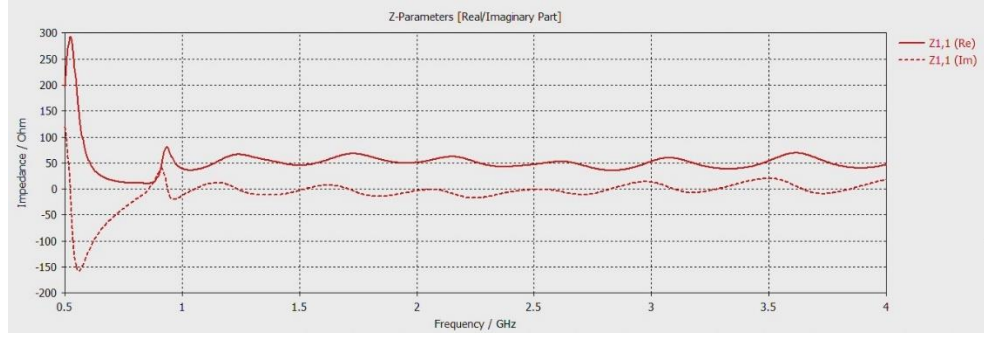
CST programı üzerinde tasarımı tamamlanan antipodal vivaldi anten yapısı benzer anten yapılarına karşın özgün bir slot yapısı ile farkını belli etmektedir. 1-3 GHz band aralığında çalışan anten için aşağıdaki Şekil 4.1’de sırasıyla CST programı üzerinde ölçülen S11 parametresi, vswr ve z paremetre sonuçları verilmiştir.



A



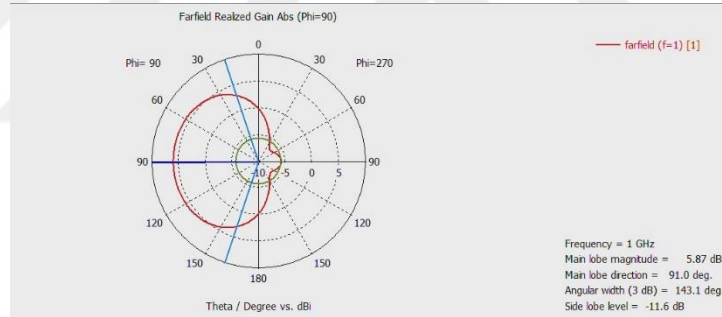
B



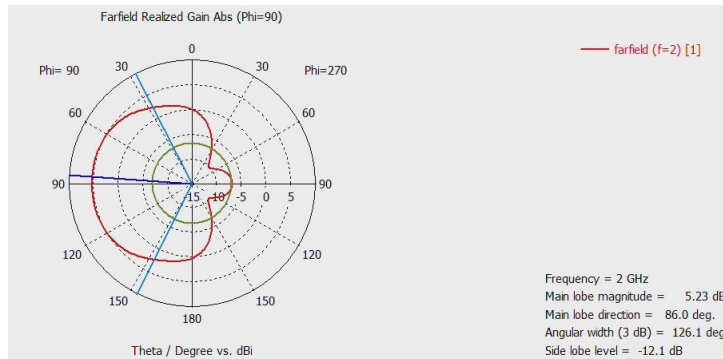
C

Şekil 4.1. Anten simülasyon sonuçları. **A)** S11 parametresi **B)** Vswr parametresi **C)** z parametresi

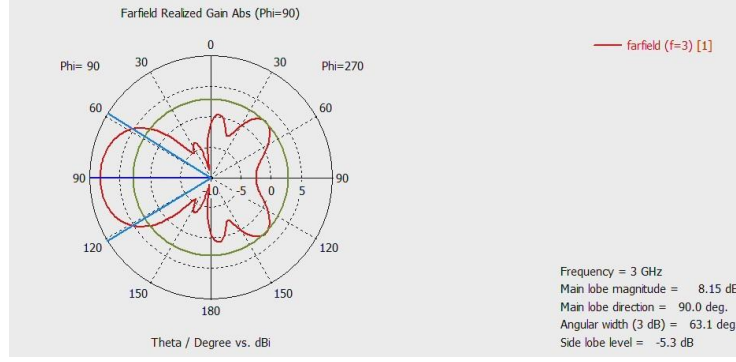
Minimum -10 dB olması gereken S11 parametreleri oldukça yüksek kazanç değerleri sağlanarak anten performansını arttırmıştır. Anten performansını ifade eden diğer bir parametre olan farfield grafikleri ise Şekil 4.2’de sunulmuştur.



A



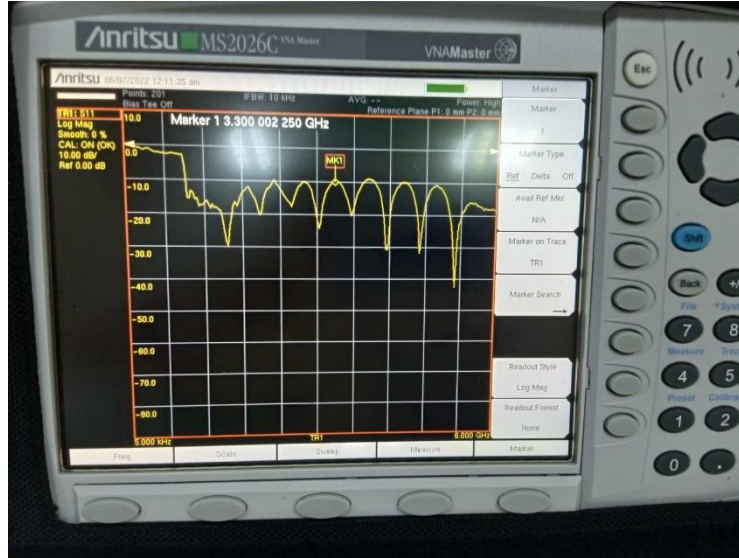
B



C

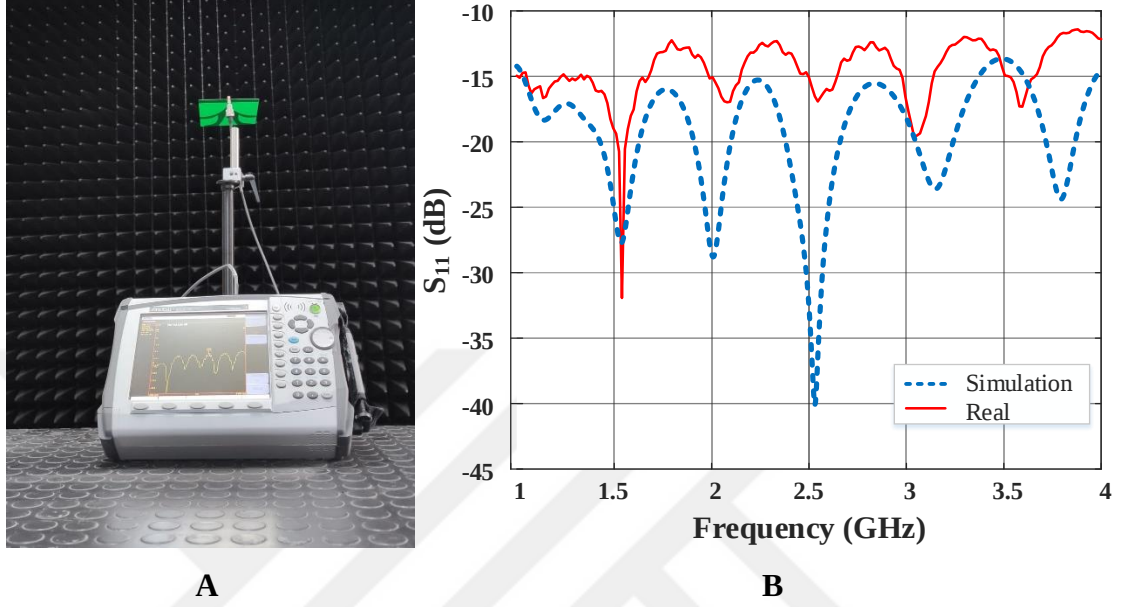
Şekil 4.2. Anten farfield grafikleri. **A)** 1 GHz farfield grafiği **B)** 2 GHz farfield grafiği **C)** 3 GHz farfield grafiği

CST programı üzerinde testlerden başarılı sonuçlar elde eden anten üretim sonrası VNA cihazı ile S11 parametre ölçümlerine tabi tutulmuştur. Şekil 4.3’de VNA cihazı ile yapılan S11 parametre ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere anten S11 parametreleri CST programı üzerinde yapılan test sonuçlarına yakın değerler vermiştir. Yaklaşık -15 dB kazanç sağlayan anten diğer bir anlatımla iletilen sinyalin %95’lik kısmını geri toplayabilmektedir.



Şekil 4.3. VNA ile ölçülen anten S11 parametresi grafiği

VNA ile yansısız ortam testlerine tabi tutulan anten için ölçüm görselleri ve simülasyon ile gerçek ölçüm sonuçlarının kıyaslandığı grafik Şekil 4.4’de sunulmuştur. Sunulan grafik de de görüldüğü üzere gerçek ölçüm sonuçları simülasyon sonuçlarına benzer sonuçlar vermiştir.



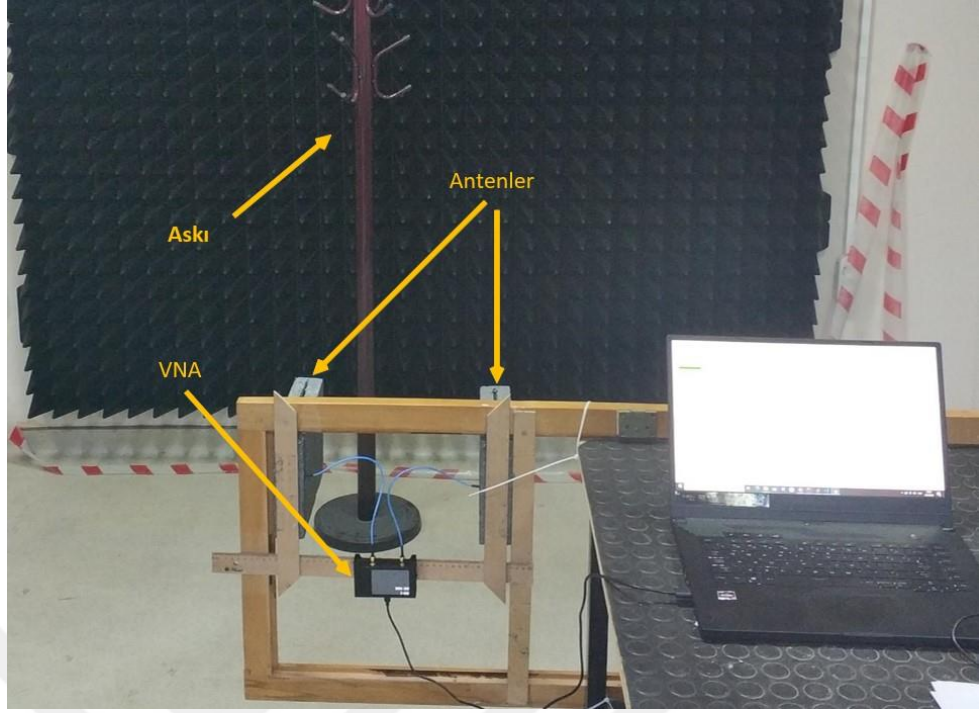
Şekil 4.4. A) Yansısız Oda Ölçümü B) Simülasyon ve Gerçek Ölçüm Grafikleri

4.2. YNR Sistem Performansı

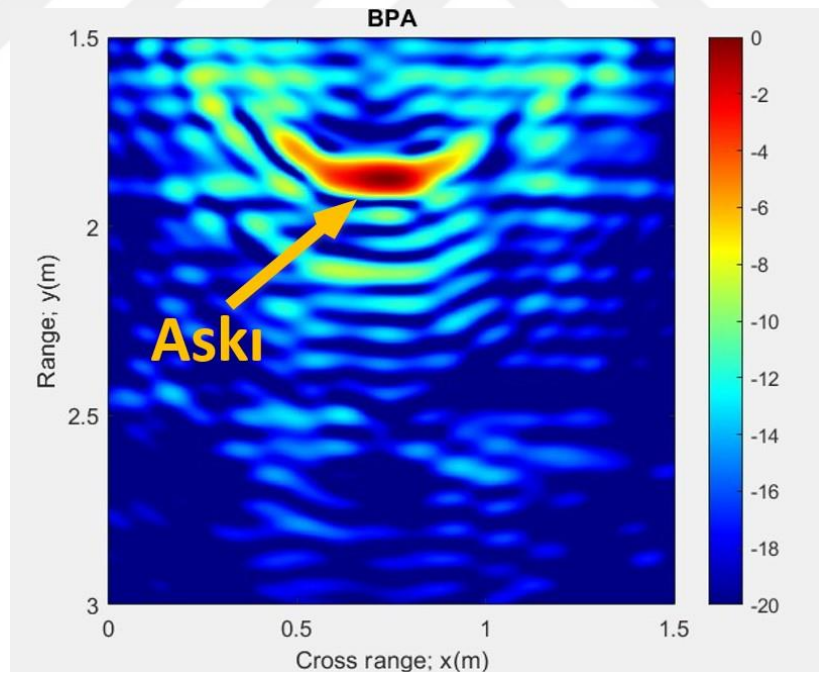
YNR sistem testleri iki farklı ortamda test edilmiştir. Laboratuvar ortamında oldukça sağlıklı sonuçlar veren sistem gerçek ortam olan dış ortamda testlere tabi tutulmuştur.

4.2.1. Laboratuvar ortamı testleri

Anten performansı başarılı olan sistem için yansısız ortamda demir bir askılık için görüntüleme testleri yapılmıştır. Yapılan testlerde demir askılığın gövdesindeki oval yapıdan kaynaklı olarak görüntüde eliptik bir yapı oluşmuştur. 1.5 metre bir hat boyunca 30 adımda her bir adımda 5 cm ilerletilerek ve 101 frekans adımında yapılan test düzeneği ve görüntü çıktısı Şekil 4.5’te verilmiştir. Anten ve askı arası 1,8 metre olan mesafe, görüntü matrislerinde de aynı uzunlukta olarak görülmektedir.



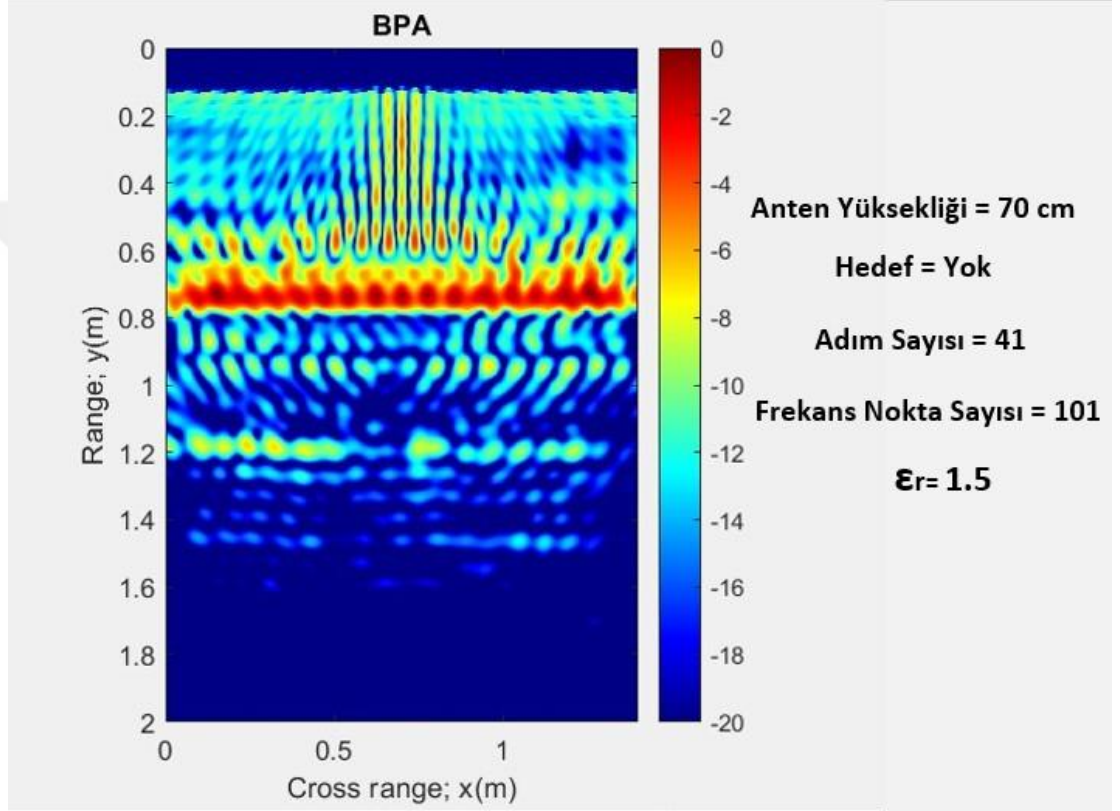
A



B

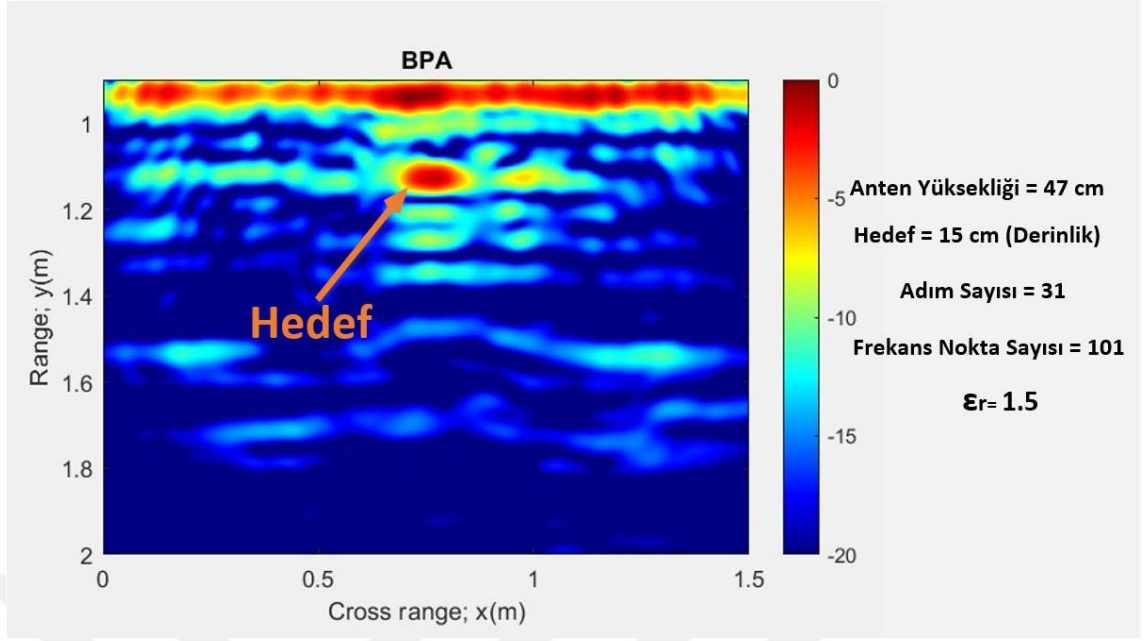
Şekil 4.5. Yansimasız ortam testi. A) Test düzeneği B) Görüntü matrisi

Yansımaz ortamda başarılı sonuçlar elde eden YNR sistemi kum havuzunda anten ve kum yüzeyi arasında farklı mesafelerde, yatay ekseninde farklı adım sayılarında, farklı frekans adım sayılarında testler gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda kum içerisinde bulunan nesnelerde farklı derinliklere gömülerek performansları test edilmiştir. Şekil 4.6’de içinde gömülü nesne bulunmayan kum havuzunun anten-kum yüzeyi arası 70 cm olan ve 41 adımı ile oluşan radar görüntü matrisi verilmiştir.

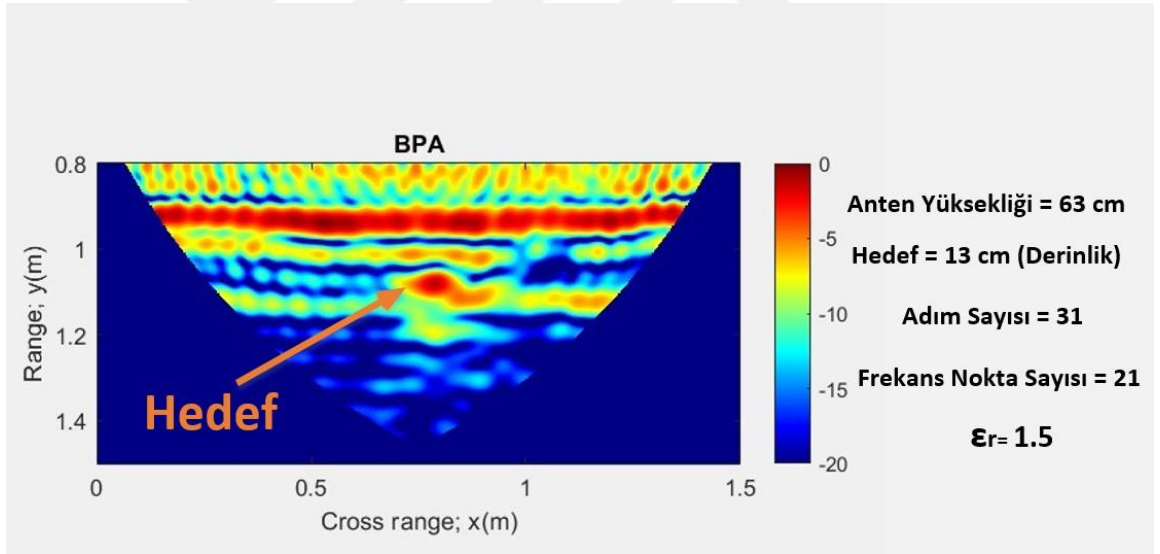


Şekil 4.6. Boş kum havuzu görüntü matrisi

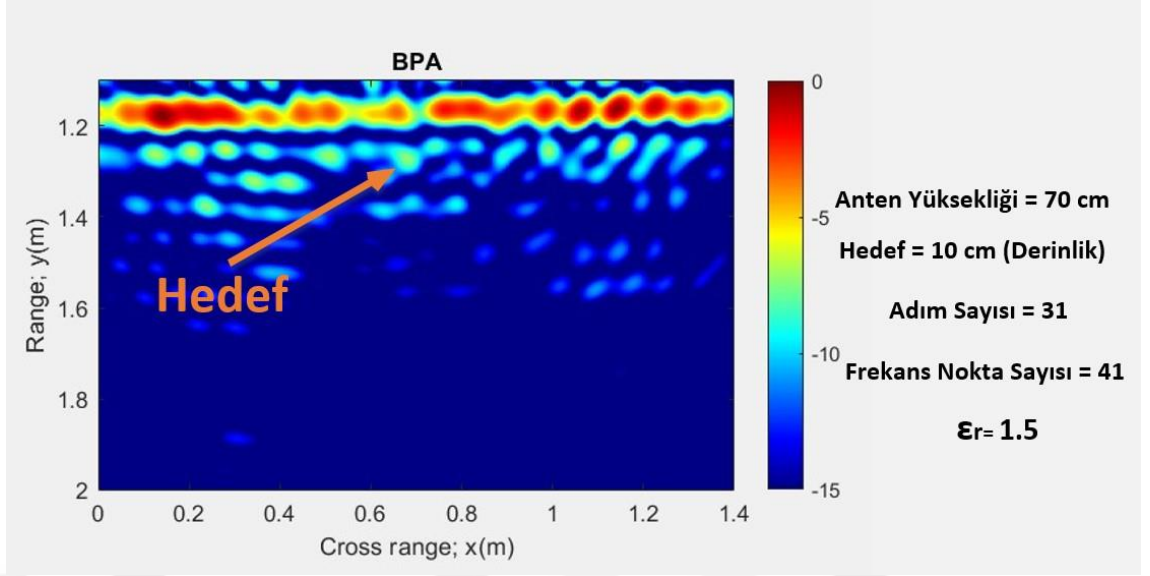
Kum içerisine farklı nesneler gömülerek farklı değişkenler (anten yüksekliği, derinlik, yatay eksen adım sayısı ve frekans adım sayısı) yapılan testler Şekil 4.7’da gösterilmiştir.



A



B

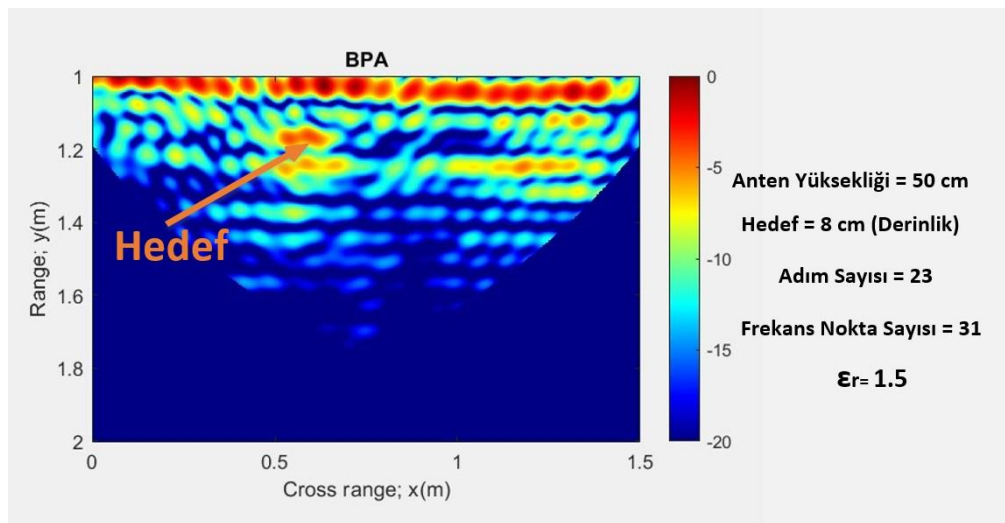


C

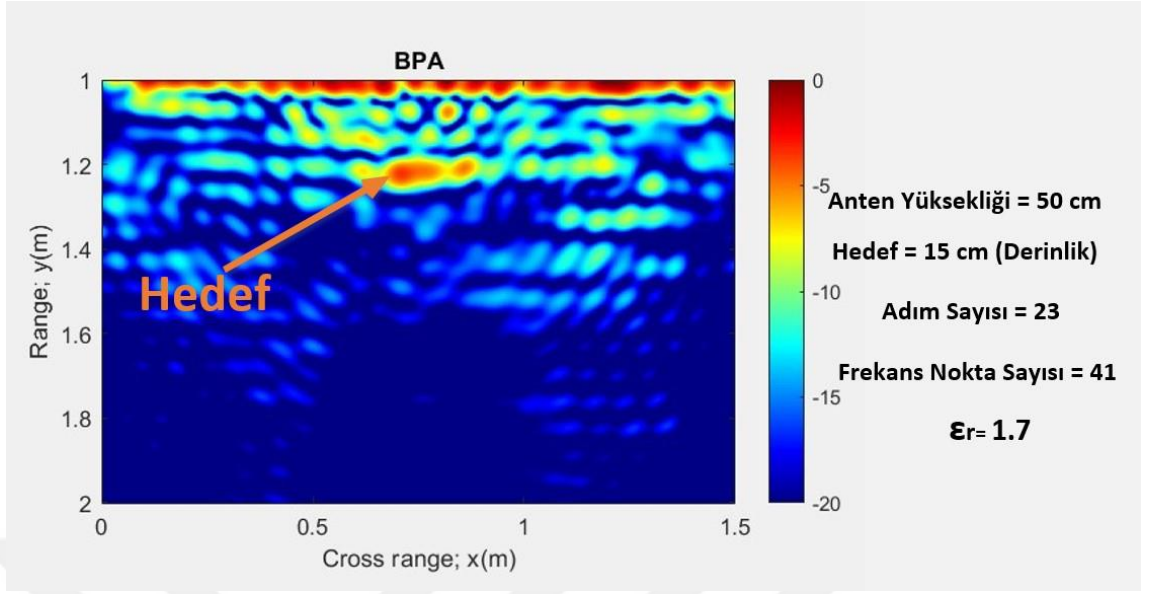
Şekil 4.7. YNR kum havuzu testleri. **A)** 47 cm yükseklik **B)** 60 cm yükseklik **C)** 70 cm yükseklik

4.2.2. Gerçek ortam testleri

Laboratuvar ortamındaki testlerin tamamlanması ile gerçek ortam testlerine geçilmiş ve benzer ölçümler tekrarlanmıştır. Yapılan ölçümlere dair radar görüntü matrisi çıktıları Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



A

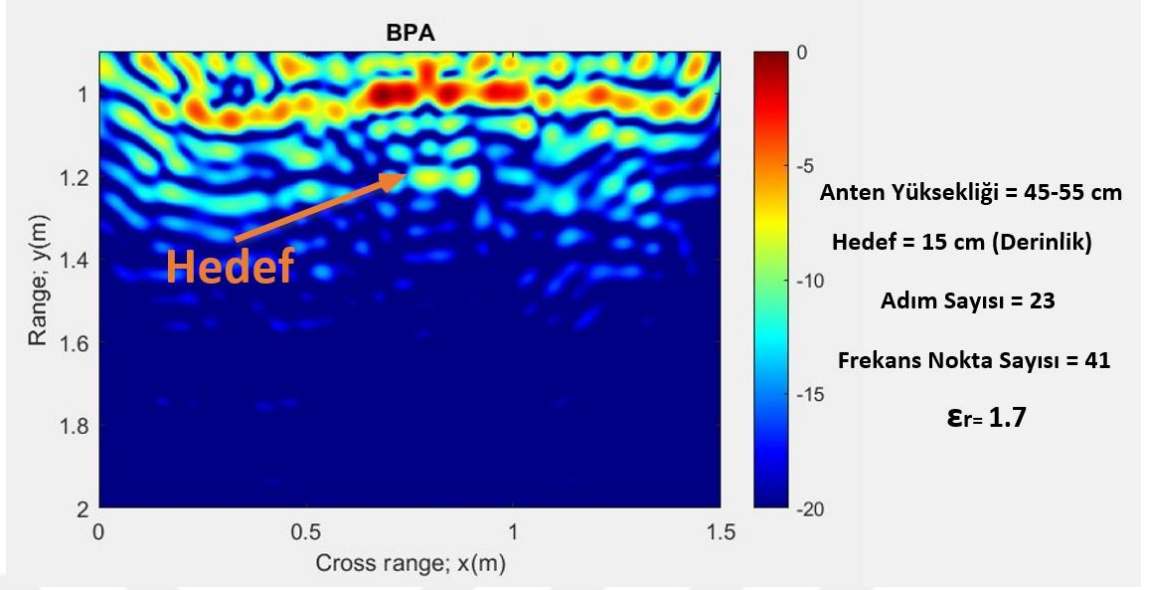


B

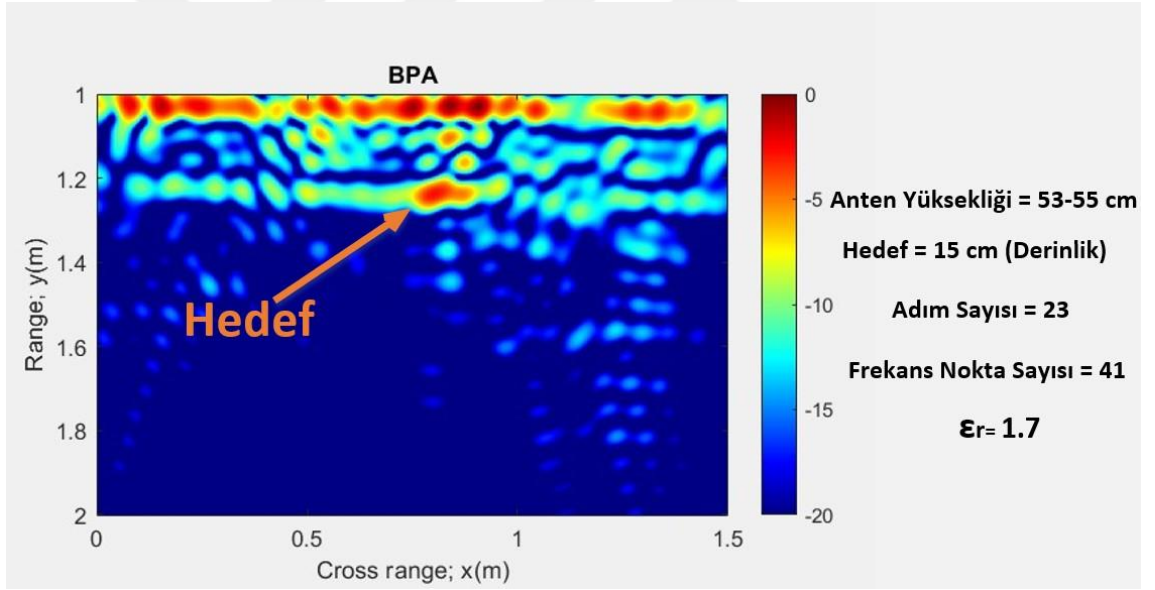
Şekil 4.8. Gerçek ortam testleri. **A)** 50 cm yükseklik 31 nokta **B)** 50 cm yükseklik 41 nokta

4.3. YNR Monteli İHA Performansı

YNR sisteminin toprak altı tarama işlemlerinde elle yapılan deneylerde toprak altındaki farklı nesnelerin koordinatlarını hesaplayabildiği ve görüntülerini oluşturabildiği ortaya koyulmuştur. YNR sisteminin İHA monte edilmesi ile yapılan testlerde ise Şekil 4.9'deki gibi görüntü matrisleri çıkmıştır.



A



B

Şekil 4.9. YNR monteli İHA testleri. **A)** 45-55 cm yükseklik 41 nokta **B)** 55 cm yükseklik 41 nokta

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yapılan testler sonucunda YNR sisteminde anten performansının oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Benzer anten yapılarına oranla daha küçük boyutlarda olmasına karşın daha yüksek değerlerde kazanç değerleri elde etmiştir. Anten performans testleri incelendiğinde S11 parametreleri -15 dB değerleri ile antenin çalışma performansını en iyi gösteren parametredir. Ayrıca bir İHA için tasarlanan bu anten yapısı 49 Gr ağırlığı ile İHA sistemleri için oldukça ideal bir yapıya sahiptir.

YNR sistem testlerinde farklı yüksekliklerde yapılan testlerde hedef görüntülemeye en ideal yükseklik anten ile toprak yüzeyi arasında yaklaşık 50 cm düzeylerinde olması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu değer yapılan test sonuçlarında ortaya koyulmuştur. Farklı toprak tiplerinde ise değişen ϵ değerlerine göre yaklaşımlar yapılması gerekmektedir. Bu değeri belirlemenin iki yolu bulunmaktadır. Birinci yol olarak toprak yapısının karakterizasyonunu belirlemektir. Ancak bu yol oldukça zahmetli ve maliyetlidir. İkinci yol ise koordinatları bilinen nesne için ölçümler yapılarak en doğru koordinat bilgisini veren ϵ değeri yakalanmaya çalışılır. Bu tez çalışmasında ikinci yol izlenerek ϵ değerinin 50 cm yükseklikte bir tarama için 1.7 olduğu gözlemlenmiştir.

YNR sistemlerinin en önemli parametrelerinden olan adım sayısı ve frekans nokta sayısı bu çalışmada farklı değerlerde incelenmiştir. 2 m uzunluğundaki tarama alanı 21,23,31,41 gibi farklı değerlerde adım sayıları ile taranmıştır. Görüntü matrisleri incelendiğinde minimum adım sayısının 31 olması gerektiği gözlemlenmiştir. Frekans nokta sayısı ise 21,31,41,101 değerlerinde testlere tabi tutulmuştur. Bu değerin ise minimum 41 olması gerektiği grafiklerden görülmektedir. Minimum değerleri arttırmak çözünürlük için çok iyi sonuçlar verse de İHA uçuş kabiliyeti gereği minimum uçuş hızına denk gelen 31 adım ve 41 noktada tarama yapılması gerekmektedir. Bu değerlerden daha düşük değerler hedef tespitine olanak vermemektedir.

Farklı nesneler için yapılan testlerde ise plastik olan nesneleri bulmakta YNR sisteminin yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde metal dahi olsa çapı 10 cm'den küçük yapıların tespiti derinlikle birlikte zor olduğu gözlemlenmiştir. Bu gibi hedeflerin tespiti için daha güçlü anten ve VNA yapıları gerekmektedir. Bu gereklilik ise ağırlığı

beraberinde getirmesinden dolayı daha büyük boyutlarda İHA platformlarına ihtiyaç duymaktadır.

İHA sistemine monte edilen YNR sistemi sonucunda yapılan testlerde farklı parametrelerde farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. İHA sisteminin x,y kartezyen koordinatlarda kararlı bir uçuş yapmasının zorunluluğu bulunmaktadır. Bunun için İHA sisteminde ek olarak kullanılan optik akış kamerasının bazı durumlarda yetersiz kaldığı bu durumlarda ise görüntü matrisinde kaymalar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kararlı bir uçuş yüksekliği hayati önem taşımaktadır. Tez çalışmasında kullanılan tek boyutlu lidar sensör çok şiddetli güneş bulunan ortamlarda kararlı çalışmadığı ve bu yüzden toprak altı nesnelerin koordinatlarında hatalara yol açtığı gözlemlenmiştir. İHA sisteminin x,y,z eksenlerinde kararlı ve lineer bir uçuş sergilemesi gerekliliği ortadadır.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında toprak yüzeyinden 20 cm derinliğe kadar gömülmüş metal yapılı nesneler tespit edilebilmiştir. Bu sistemin bir İHA'ya monte edilmesi ile de mayın gibi riskli bölgelerde veya engebeli arazi şartlarında kolay ve hızlı bir tarama yapılabileceği ortaya koyulmuştur. Bu sayede ulaşılması zor veya tehlikeli bölgelerde uzaktan kontrol ile toprak altı taramaları gerçekleştirilebilmekte olup daha büyük bir İHA sistemi kullanılarak farklı anten tipleri ile toprak yüzeyinden daha fazla derinlik taranabilir ve plastik benzeri yapıların tespiti yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, M. A. (2001). The Impact of Landmines on Socio-Economic Development in Southern Lebanon. *Journal of Mine Action*.
- Albarracin, R., Robles, G., Martinez-Tarifa, J., & Ardila-Rey, J. (2015). Separation of sources in radiofrequency measurements of partial discharges using time–power ratio maps. *ISA transactions*, 389-397.
- Ali, J., Abdullah, N., Ismail, M. Y., Mohd, E., & Shah, S. M. (2017). Ultra-wideband antenna design for GPR applications: A review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(7).
- Cerquera, M. R., Montaña, J. D., & Mondragón, I. (2017). UAV for Landmine Detection Using SDR-Based GPR technology. *Robots Operating in Hazardous Environments*, 26-55.
- Colorado, J., Perez, M., Mondragon, I., Mendez, D., Parra, C., Devia, C., ... & Neira, L. (2017). An integrated aerial system for landmine detection: SDR-based Ground Penetrating Radar onboard an autonomous drone. *Advanced Robotics*, 31(15), 791-808.
- CST. (2022). (Dassault Systèmes) Retrieved 2022, from <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- Demirci, Ş., Yiğit, E., Eskidemir, İ., & Özdemir, C. (2012). Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method. *Ndt & E International*(47), 35-42.
- Dipol_anten. (2023, Ocak 15). Retrieved from Dipol_anten: https://tr.wikipedia.org/wiki/Dipol_anten
- Dixit, S. A., & Kumar, S. (2020). *A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna*. IEEE Access.
- Dobrovolskiy, A., & Brass, K. (2020). GPR on a drone—practical experience gained in the past 2 years. *18th International Conference on Ground Penetrating Radar*(113-116).
- Fernández, G. M., Lopez, Y., Arboleya, A. A., Valdes, B., Vaqueiro, Y., Andres, F.-H., & Garcia, A. (2018). *Synthetic Aperture Radar Imaging System for Landmine Detection Using a Ground Penetrating Radar on Board a Unmanned Aerial Vehicle*. IEEE Access.
- Francke, J., & Dobrovolskiy, A. (2021). Challenges and opportunities with drone-mounted GPR. SEG Technical Program Expanded Abstracts.
- Garcia-Fernandez, M., López, Y. Á., & Andrés, F. L. H. (2020). Airborne multi-channel ground penetrating radar for improvised explosive devices and landmine detection. *IEEE Access*, 8, 165927-165943.
- Gazit, E. (1988). Improved design of the Vivaldi antenna. IET Digital Library.
- Gibson, & Peter, J. (1979). The vivaldi aerial. IEEE.
- Guo, J., Tong, J., Zhao, Q., Jiao, J., Huo, J., & Ma, C. (2019). An ultrawide band antipodal Vivaldi antenna for airborne GPR application. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(10), 1560-1564.
- Hertl, I., & Strycek, M. (2007). UWB antennas for ground penetrating radar application. In *2007 19th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications* (pp. 1-4). IEEE.
- Heggy, E., Rosen, P., Beatty, R., Freeman, T., & Gim, Y. (2013). Orbiting Arid Subsurface and Ice Sheet Sounder (OASIS): Exploring desert aquifers and polar

- ice sheets and their role in current and paleo-climate evolution. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- Hsiu-Wen Cheng, T.-L. C.-H. (2019). Motion Estimation by Hybrid Optical Flow Technology for UAV Landing in an Unvisited Area. *MDPI*.
- Huang, H., & Lv, Z. (2014). A Spiral Antenna with Integrated Parallel-Plane Feeding Structure. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, pp. 45-50.
- İmpulse radar gpr. (2023, Ocak 15). Retrieved from İmpulse radar gpr: <https://impulseradargpr.com/technology/>
- Kim, Sang-Wook, & Se-Yun Kim. (2005). Comparison of FMCW and pulse type groundpenetrating radar (GPR) for water leakage detection. In *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- Loizos, A., & Plati, C. (2014). Accuracy of Ground Penetrating Radar Horn-Antenna Technique for Sensing Pavement Subsurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*(13), 523-527.
- McMichael, I., Nallon, E., Schnee, V., & Scott, W. (2013). EBG Antenna for GPR Colocated With a Metal Detector for Landmine Detection. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(10), 1329-1333.
- Memon, S. S., Jamali, A. A., Anjum, M. R., Memon, M. M., & Qadri, S. F. (2018). Vivaldi Antenna for Ground Penetrating Radar Applications. *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)*, 50(01), 7-12.
- Mitchell, Shannon. K. (2004). Death, disability, displaced persons and development: the case of landmines in Bosnia and Herzegovina. *World Development*, 32(12), 2105-2120.
- Orientalmotor. (2023, Ocak 15). Retrieved from orientalmotor: <https://blog.orientalmotor.com/technical-manual-series-brushless-motor-structure-and-rotation-principles>
- Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., & Yılmaz, B. (2014). *A review on migration methods in B-scan ground penetrating radar imaging*. Mathematical Problems in Engineering.
- Pajewski, L., Fabio, T., & Wolfgang, K. (2015). *Antennas for GPR systems*. Springer.
- radartutorial. (2023, Ocak 15). Retrieved from radartutorial: <https://www.radartutorial.eu/03.linetheory/Boynuz%20I%C5%9F%C4%B1y%C4%B1c%C4%B1.tr.html>
- Shi, Y. (2004). Particle Swarm Optimization. *IEEE connections* 2.1, 8-13.
- Travassos, X. L., Avilla, S. L., Adriano, R. L., & Ida, N. (2018). A Review of Ground Penetrating Radar Antenna Design and Optimization. *Journal of microwaves, optoelectronics and electromagnetic applications*.
- Xie, X., Zhai, J., & Biao, Z. (2021). Back-fill grouting quality evaluation of the shield tunnel using ground penetrating radar with bi-frequency back projection method. *Automation in Construction*.
- Yiğit, E. (2007). *Elektromagnetik alan ölçümleriyle yeraltındaki nesnelerin tespit edilmesi ve yere nüfuz eden radar (ynr) görüntülerinin elde edilmesi*. Retrieved from <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>