

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**İNSANSIZ HEDEF UÇAKLAR İÇİN BİR MİKROŞERİT DİZİ ANTEN
TASARIMI VE ANALİZİ**

Mesut EROL

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

KASIM 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**İNSANSIZ HEDEF UÇAKLAR İÇİN BİR MİKROŞERİT DİZİ ANTEN
TASARIMI VE ANALİZİ**

Mesut EROL

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

KASIM 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNSANSIZ HEDEF UÇAKLAR İÇİN BİR MİKROŞERİT DİZİ ANTEN
TASARIMI VE ANALİZİ**

**Mesut EROL
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bu tez
Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. (TUSAŞ) tarafından gerçekleştirilen “Lift Up +
Yüksek Lisans ve Doktora Bilimsel Araştırmalar Programı” tarafından
desteklenmiştir.**

KASIM 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSIZ HEDEF UÇAKLAR İÇİN BİR MİKROŞERİT DİZİ ANTEN
TASARIMI VE ANALİZİ

Mesut EROL
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 09/11/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN
Prof. Dr. Selçuk HELHEL
Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

ÖZET

İNSANSIZ HEDEF UÇAKLAR İÇİN BİR MİKROŞERİT DİZİ ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

Mesut EROL

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

KASIM 2023; 44 sayfa

Günümüzde teknolojinin ilerlemesi ile ülkelerin savunma birimlerinde insansız hava araçları etkin bir rol almaya başlamıştır. İnsan kaybı riskini azaltması, maliyet etkin sistemler olması ve fiziksel olarak daha az yer kaplaması, insansız hava araçlarını etkili kılmaktadır. Pilot ile insansız hava aracı arasında iletişimin uzaktan olması sebebiyle, kullanımı etkileyen verilerin anlık ve kayıpsız olması, ilgili aracın kullanıldığı görevin başarılı olmasını sağlayan önemli özelliklerdendir. İnsansız hedef uçaklar, insansız hava araçları başlığı altında yer almakta, genellikle eğitim ve test amaçlı kullanılmaktadır. İnsansız hava araçları sınıfının diğer üyelerine kıyasla daha küçük boyutlarda olması sebebiyle manevra kabiliyetleri yüksek uçaklardır.

Bu tez çalışmasında, insansız hedef uçakların hızlı manevraları esnasında oluşan veri kayıplarını azaltmak amacıyla mikroşerit dizi anten tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Analitik yöntemler yardımıyla mikroşerit antenlerin tasarımındaki önemli faktörler değerlendirilmiştir. Çalışmada belirlenen hedef ve isterlere göre temel anten parametreleri incelenmiş, değişkenler tespit edilmiştir. Tasarlanan antenin merkez çalışma frekansı 2,62 GHz seçilmiştir. Dielektrik malzeme olarak FR-4 tercih edilmiştir. Maksimum güç iletiminin sağlanması için iletim hattı ile mikroşerit anten arasında çeyrek dalga boyu empedans uyumlandırması yapılmıştır. Mikroşerit antenin ölçülerinin hesaplanmasının ardından tasarım için CATIA programı kullanılmıştır. Sonlu integrasyon tekniği prensibiyle çalışan CST Studio Suite programı yardımıyla benzetimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında tasarımı gerçekleştirilen mikroşerit dizi anten üretilmiş, yansısız oda içerisinde ölçümler yapılmıştır. Benzetim sonucunda yansıma katsayısı (S_{11}) $-21,63$ dB olurken ölçüm sonucunda yansıma katsayısı $-23,19$ dB olmuştur. Diğer önemli parametre olan duran dalga oranı (DDO) ise benzetim sonucunda 1,18 değeri elde edilirken ölçüm sonucunda 1,14 değeri elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Empedans uyumlandırma, Haberleşme sistemi, İnsansız hedef uçak, Mikroşerit dizi anten, Sonlu integrasyon tekniği, Yansısız oda.

JÜRİ: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF A MICROSTRIP ARRAY ANTENNA FOR UNMANNED TARGET DRONE

Mesut EROL

MSc Thesis in Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

November 2023; 44 pages

Today, with the advancement of technology, unmanned aerial vehicles have started to play an active role in the defense units of countries. Unmanned aerial vehicles are effective because they reduce the risk of human casualties, are cost-effective systems and physically occupy less space. Due to the remote communication between the pilot and the unmanned aerial vehicle, the instantaneous and lossless data affecting the use is one of the important features that ensure the success of the mission in which the relevant vehicle is used. Unmanned target drones fall under the category of unmanned aerial vehicles and are generally used for training and testing purposes. Due to their smaller size compared to other members of the unmanned aerial vehicles class, they are highly maneuverable aircraft.

In this thesis, a microstrip array antenna is designed and analyzed to reduce data loss during fast maneuvers of unmanned target aircraft. With the help of analytical methods, important factors in the design of microstrip antennas are evaluated. Basic antenna parameters are analyzed, and variables are determined according to the targets and requirements determined in the study. The center operating frequency of the designed antenna was chosen as 2.62 GHz. FR-4 was preferred as the dielectric material. Quarter-wavelength impedance matching is performed between the transmission line and the microstrip antenna to ensure maximum power transmission. After calculating the dimensions of the microstrip antenna, CATIA program was used for design. Simulations were performed with the help of the CST Studio Suite program, which works on the principle of finite integration technic. In the light of the results obtained, the designed microstrip array antenna was manufactured, and measurements were made in an anechoic chamber. As a result of the simulation, the reflection coefficient (S11) was -21.63 dB, while the measured reflection coefficient was -23.19 dB. Another important parameter, the standing wave ratio (SWR), was 1.18 in simulation and 1.14 in measurement.

KEYWORDS: Anechoic chamber, Communication system, Finite integration technic, Impedance matching, Microstrip array antenna, Unmanned target drone.

COMMITTEE: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

ÖNSÖZ

İnsansız hedef uçaklar, insansız hava araçları kategorisine girmektedir. Ülkemiz sınırları içerisinde geliştirilen yerli ve milli insansız hava araçlarının gelişimi için üretilen hedef uçaklar, radar sistemlerinin denetlenmesi, haberleşme protokollerinin denenmesi, çoklu hava aracının birlikte kontrolü gibi farklı şartlar altında kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması, Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. (TUSAŞ) tarafından gerçekleştirilen “Lift Up + Yüksek Lisans ve Doktora Bilimsel Araştırmalar Programı” tarafından desteklenmiştir. Ölçümlerin gerçekleştirilmesinde yansız oda imkânı sağlayan Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM) birimine teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının danışmanı olarak bana her türlü konuda destek olan ve olmaya da devam eden Prof. Dr. Şükrü Özen hocama teşekkürü borç bilirim. Projenin çalışmaları sırasında destekleri sayesinde her zorluğu aşmamı sağladı.

Tez çalışmasının yürütülmesinde, yapılan çalışmaların altyapı desteklerini sağlayan, her türlü durumda maddi manevi desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Kayhan Ateş hocama ne kadar teşekkür etsem az gelir.

Bu tezin geliştirilmesinde büyük emekleri olan Büşra Karaca'ya çok teşekkür ediyorum. Mikroşerit antenin tasarımı, üretimi gibi konularda desteklerini hiçbir zaman eksik etmedi.

Tez çalışmasında etkin olmasa da kendimi bildim bileli maddi ve manevi desteklerini hiç kesmeyen, her attığım adımda yanımda duran ve bana her zaman güvenlerini hissettiren canım ailem, benim için çok kıymetli.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Motivasyonu.....	2
1.2. Tezin Yapısı	3
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Antenler Hakkında Bilgiler	4
2.1.1. Kazanç	4
2.1.2. Verim	5
2.1.3. Işıma örüntüsü	5
2.1.4. Bant genişliği.....	6
2.1.5. Yönlülük	7
2.1.6. Empedans uyumlandırma	8
2.2. Temel Bilgiler.....	9
2.3. Literatür İncelemesi.....	11
2.3.1. Bükümlü mikroşerit antenler	11
2.3.2. İnsansız hava araçlarında mikroşerit antenler.....	12
2.3.3. Yarıklı mikroşerit antenler.....	14
3. MATERYAL VE METOT	15
3.1. Hesaplamalar	15
3.2. Tasarım.....	16
3.3. Benzetim.....	20
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	23
4.1. Nihai Tasarımın Belirlenmesi	24
4.2. Farklı Bükülme Açıları Kıyaslaması.....	27
4.3. Benzetim ve Ölçüm Sonuçları.....	28

5. SONUÇLAR	38
6. KAYNAKLAR	40
7. EKLER.....	43
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “İnsansız Hedef Uçaklar İçin Bir Mikroşerit Dizi Anten Tasarımı ve Analizi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

09/11/2023

Mesut EROL

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	: Işık hızı
D	: Yönlülük
D_{max}	: En büyük yönlülük
f_0	: Frekans
G	: Kazanç
h	: Dielektrik kalınlığı
L	: Dielektrik yüksekliği
L_{eff}	: Efektif dielektrik yüksekliği
P_{in}	: Alınan giriş gücü
P_{rad}	: Yayılan giriş gücü
U	: Işınım yoğunluğu
U_0	: Yön bağımsız kaynaktan gelen ışınım yoğunluğu
U_{max}	: En büyük ışınım yoğunluğu
W	: Dielektrik genişliği
Z_0	: İletim hattı empedansı
Z_L	: Yük empedansı
Z_{in}	: Giriş empedansı
e_0	: Toplam verim
e_c	: İletim verimliliği
e_{cd}	: Yayılma verimliliği
e_d	: Dielektrik verimliliği
e_r	: Yansıma verimliliği
ε_{eff}	: Efektif dielektrik sabiti
ε_r	: Dielektrik sabitinin bağlı geçirgenlik katsayısı

λ : Dalga boyu
 Γ : Yansıma katsayısı

Kısaltmalar

DDO : Duran Dalga Oranı
GPS : Küresel Konumlama Sistemi
IEEE : Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IoT : Nesnelerin İnterneti
İHA : İnsansız Hava Aracı
İSHG : İlk Sıfır Hüzme Genişliği
LTE : Uzun Süreli Gelişim
MIMO : Çok Girişli Çok Çıkışlı
NR : Yeni Radyo
PİFA : Planar Ters F Anten
PLA : Polilaktik Asit
RF : Radyo Frekansı
RFID : Radyo Frekansı İle Tanımlama
SİT : Sonlu İntegrasyon Tekniği
SMA : Sub-Minyatür Versiyon-A
VNA : Vektörel Ağ Analizatörü
VSAT : Çok Küçük Diyaframlı Terminal
Wi-Fi : Kablosuz Bağlantı Alanı
WiMAX : Mikrodalga Erişimi İçin Evrensel Çalışılabilirlik
YGHG : Yarı Güç Hüzme Genişliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İHA veri ağı gösterimi	1
Şekil 2.1. Işıma örüntüsü	6
Şekil 2.2. Bant genişliği gösterimi	7
Şekil 2.3. Çeyrek dalga boyu empedans uyumlandırma eşdeğer devresi	8
Şekil 2.4. a) Mikroşerit anten; b) Mikroşerit anten iletim hattı devre modeli	9
Şekil 3.1. Mikroşerit anten gösterimi	15
Şekil 3.2. Temel tasarıma sahip mikroşerit dizi anten	16
Şekil 3.3. Yarıkli mikroşerit yama anten	17
Şekil 3.4. Yarıkli mikroşerit dizi anten	18
Şekil 3.5. Mikroşerit antenlerde çeyrek dalga boyu empedans uyumlandırma gösterimi	18
Şekil 3.6. Çeyrek dalga boyu empedans uyumlandırması sonrası yarıkli mikroşerit dizi anten	19
Şekil 3.7. Tasarımı tamamlanmış mikroşerit dizi antenin teknik çizimi	20
Şekil 3.8. Tasarlanan mikroşerit dizi antenin bükümlü hali (önden görünüm)	21
Şekil 3.9. Tasarlanan mikroşerit dizi antenin bükümlü hali (perspektif görünüm)	21
Şekil 3.10. Üretimi tamamlanmış mikroşerit dizi anten	22
Şekil 4.1. a) Yansımasız oda test düzeneği; b) Yakından incelemesi	23
Şekil 4.2. Temel tasarıma sahip tek yama anten ile dizi antenin yansım katsayıları karşılaştırması	25
Şekil 4.3. Yarıkli tasarıma sahip tek yama anten ile dizi antenin yansım katsayıları karşılaştırması	26
Şekil 4.4. Yarıkli tasarıma sahip dizi antenlerin empedans uyumlandırmadan önce ve sonraki yansım katsayıları karşılaştırılması	27
Şekil 4.5. Farklı bükülme değerlerine göre yansım katsayıları karşılaştırılması	28
Şekil 4.6. Nihai tasarlanan yarıkli mikroşerit dizi antenin benzetim ve ölçüm sonrası yansım katsayısı sonuçları	29
Şekil 4.7. Tasarlanan antenin benzetim ve ölçüm sonrası DDO sonuçları	29
Şekil 4.8. DDO sonucunun yakından gösterimi	30
Şekil 4.9. FR-4 dielektrik malzemesinin $f = 2,62$ GHz’de üç boyutlu ışıma örüntüsü grafiği (gerçekleştirilmiş kazanç); a) Transparan uzak alan gösterimi; b) Transparan olmayan uzak alan gösterimi	32

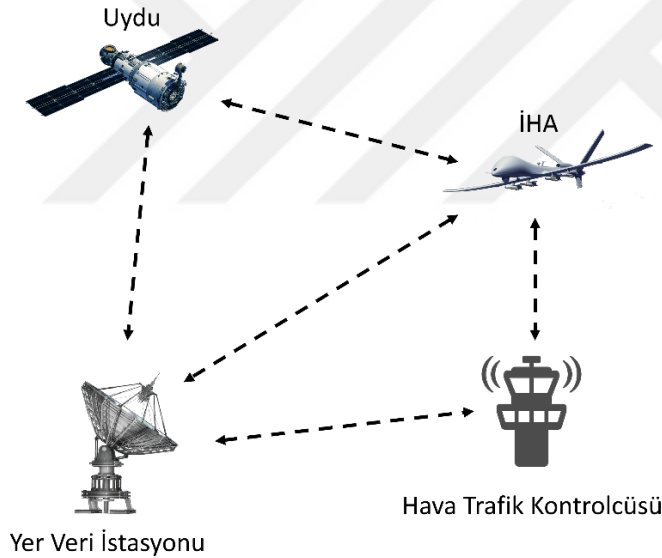
Şekil 4.10. 5880 dielektrik malzemesinin $f = 2,62$ GHz’de üç boyutlu ışıma örüntüsü grafiği (gerçekleştirilmiş kazanç); a) Transparan uzak alan gösterimi; b) Transparan olmayan uzak alan gösterimi	33
Şekil 4.11. FR-4 dielektrik malzemesinin $f = 2,62$ GHz’de üç boyutlu ışıma örüntüsü grafiği (yönlülük); a) Transparan uzak alan gösterimi; b) Transparan olmayan uzak alan gösterimi.....	34
Şekil 4.12. 5880 dielektrik malzemesinin $f = 2,62$ GHz’de üç boyutlu ışıma örüntüsü grafiği (yönlülük); a) Transparan uzak alan gösterimi; b) Transparan olmayan uzak alan gösterimi.....	35
Şekil 4.13. Anten üzerinde $f = 2,62$ GHz’de iki boyutlu uzak alan ışıma örüntüsü; a) FR-4; b) 5880	36
Şekil 4.14. Antensiz $f = 2,62$ GHz’de iki boyutlu uzak alan ışıma örüntüsü karşılaştırılması	36
Şekil 4.15. Tasarlanan antenin yüzey akım benzetim sonuçları; a) FR-4; b) 5880.....	37

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Mikroşerit antenlerin avantajları ve dezavantajları	10
Çizelge 3.1. İlk tasarlanan temel mikroşerit yama anten dizisinin teknik ölçüleri	17
Çizelge 3.2. Hesaplamalar sonucu temel anten tasarım parametreleri	19
Çizelge 3.3. Yarıklı mikroşerit dizi antenin detaylı ölçüleri.....	20
Çizelge 4.1. FR-4 ve Rogers RT5880 dielektrik malzemelerin temel özelliklerinin karşılaştırılması.....	24
Çizelge 4.2. Temel tasarıma sahip tek yama anten ile dizi anten analiz sonuçları karşılaştırılması	24
Çizelge 4.3. Yarıklı tasarıma sahip tek yama anten ile dizi anten analiz sonuçları karşılaştırılması.....	25
Çizelge 4.4. Yarıklı tasarıma sahip dizi antenlerin empedans uyumlandırmadan önce ve sonraki karşılaştırılması	26
Çizelge 4.5. Farklı bükülme açılarındaki sonuçların karşılaştırılması.....	27
Çizelge 4.6. Nihai mikroşerit dizi antenin teknik özellikleri	28
Çizelge 4.7. Benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ($f = 2,62$ GHz)	30
Çizelge 4.8. Analiz çalışmasında kullanılan dielektrik malzemelerin özellikleri	31
Çizelge 5.1. Benzer çalışmalarla kıyaslama tablosu.....	39

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişen teknolojik dönüşüm, uzaktan algılama ve birimler arası iletişim gibi birçok alanı da beraberinde geliştirmektedir (Koç vd. 2018). Yapılan çalışmalar, insan hayatını kolaylaştırmaya ve günlük hayatta uygulaması zaman alan süreçleri hızlandırıp, birincil işlere daha fazla süre ayırmaya olanak sağlayabilmektedir. İyileştirme süreçleri birçok alanda yapılsa da bu tez kapsamında havacılık uygulamalarında yapılan çalışmalar paylaşılacaktır. Teknolojinin gelişmesiyle ülkeler kendi savunma sanayilerine de yatırımlar yapmaktadır. Kara gücüne göre daha etkili ve efektif kullanılabilen hava araçlarının, günümüzde popüler olduğu gibi gelecekte de popüleritesinin süreceği düşünülmektedir. (Molina vd. 2023). Pilotla birlikte uçan hava araçları, bazı tehlikeli operasyonlara ve girilmesi zor olan bölgelerde sorun yaşayabilmektedir. Bazı şartlarda pilotlar hayatlarını kaybetmektedir. Bu durumların olmaması için son zamanlarda insansız hava araçları sıklıkla tercih edilir olmuştur. İHA'ların operasyonda başarısız olması veya saldırıya uğrama durumlarında insan kayıplarının verilmemesi, İHA'ların kullanılmasının en temel sebeplerinden biridir. Aynı zamanda İHA'lar gözetim, istihbarat toplama ve veri iletimi gibi önemli görevleri yerine getirme kapasitesine sahiptirler. Mevcut İHA sistemlerinin basitleştirilmiş veri ağı Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. İHA veri ağı gösterimi

İHA'ların farklı kullanım yöntemleri bulunmaktadır. Kullanıldıkları ortam ve duruma göre tam otonom, yarı otonom ve yer istasyonundan pilotun kumanda ettiği manuel opsiyonları bulunmaktadır (Erdil 2021). Her bir opsiyonda da haberleşmenin sürekli ve kesintisiz şekilde kullanımı, operasyonu başarıyla sonuçlandıracaktır. Pilotun yer istasyonundan İHA'yı kontrol ederken takip etmesi gereken birçok veri bulunmaktadır. İHA'ların etkin bir şekilde çalışabilmesi, güvenilir iletişim altyapısına dayanmaktadır. Bu altyapının temel taşı ise, yüksek performanslı ve özgül ihtiyaçlara uygun tasarlanmış anten sistemleridir.

Uygulama alanlarına ve isterlere göre farklı anten türleri farklı yerlerde kullanılmaktadır (Ateş vd. 2020). Yer veri terminallerinde iletilen verinin daha büyük olması ve uzak mesafelere yollanabilmesi için çanak anten kullanılırken, hava araçlarında aerodinamik şartlar göz önüne alındığında tel antenler, dizi antenler ve mikroşerit antenler tercih edilmektedir. Diğer anten türlerine kıyasla mikroşerit antenler, minimalist yapıda bulunması, kolay ulaşılabilir olması, hafif ve maliyet etkin sistemler olması sebebiyle günümüzde sıklıkla tercih edilir hale gelmiştir. Mikroşerit antenler, daha fazla isteri daha küçük alanda barındırma özelliği sayesinde bu tür hava platformlarında veri iletimi, uzaktan algılama ve seyrüsefer sistemleri için kullanılmaktadır (Kışla ve Şenel 2023). Bu antenler, İHA'ların etkin bir şekilde iletişim kurmasına, çevresini algılamasına ve güvenli bir şekilde seyrüsefer yapmasına olanak tanır. Bu nedenle, mikroşerit antenler, modern insansız hava araçlarının başarılı operasyonları için kritik bir bileşen olarak kabul edilmektedir.

İnsansız hedef uçaklar, İHA kategorisinde bulunan eğitim uçaklarından. Asıl amaçları normal İHA'lardan farklı olarak, yerde bulunan uçaksavar ve füze sistemleri ile radarla takip uygulamalarında hedefe kilitlenme ve tehlike tespiti gibi konularda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Ufak ve minimalist bir yapıda bulunduklarından dolayı kendi kendilerine kalkış özellikleri bulunmamakta, bir hava aracı yardımıyla veya fırlatma rampası ile uçuş yapabilmektedir. Ani manevra yeteneğine sahip olan hedef uçaklarda veri kaybı yaşanabilmektedir. Bu sorunla alakalı çalışmalar devam etmektedir.

1.1. Tezin Motivasyonu

Bu tez çalışmasında, son zamanlarda araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilen mikroşerit antenlerin, İHA kategorisinde yer alan insansız hedef uçaklar üzerinde kullanımı gösterilmiştir. Tez çalışmasına konu olan problemin temeli, insansız hedef uçakların yaptıkları hızlı manevralarda, veri kayıplarının meydana gelmesidir. Veri kayıpları bu tarz askeri kullanımlarda çok kritik bir sorundur. Bu soruna literatürde çözüm önerileri bulunmaktadır fakat bu tez çalışmasındaki öneri, gereksinim düzeyinde incelendiğinde özgün bir çalışma olarak ortaya çıkmaktadır. Tezin amacı, bükümlü yapıya sahip bir mikroşerit dizi anten tasarımı ve analizi yapıp insansız hedef uçaklar üzerinde kullanıldığında veri kayıplarının önüne geçmektir. Bu antenin yönlü bir anten olması, S bandda $f = 2,62$ GHz değerinde çalışabilir olması, düşük maliyetle üretilebilir olması, -20 dB ve daha düşük geri yansıma katsayısına sahip olması ve DDO $\leq 1,80$ değerlerinde olması, tezin hedefleridir. Ayrıca belirtilen frekans, hücrel haberleşme frekanslarından birisi olarak belirtilmektedir (Morsy 2022).

Tasarlanan mikroşerit antenin ölçülerinin hesaplanması, mevcut haberleşme sistemlerinin çalışma frekansına, bant genişliğine ve kazanca, hedef uçak üzerindeki mekanik ölçülere göre belirlenmiştir. Mikroşerit dizi antenin tasarım ve analiz kısımlarında bilgisayar ortamında bulunan CATIA ve CST Studio Suite programları kullanılmıştır. CATIA programı üzerinde antenin tasarım ve çizim aşamaları yapılmış, CST Studio Suite programı üzerinde ise antenin analiz süreçleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analizler kapsamında, optimum sonuçları veren tasarım, FR-4 plaka üzere üretilmiştir. Bu çalışma, mikroşerit dizi antenlerin İHA'lar için gelecekteki uygulamalardaki önemini vurgulamayı amaçlamaktadır, böylece literatürdeki ilerlemelere katkı sağlamaktadır.

1.2. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması, altı farklı başlıktan oluşmaktadır. İlgili başlıklarda nelerden bahsedildiği bu bölümde verilecektir.

İlk başlıkta tez konusunun genel tanımı yapılmıştır. İnsansız hava araçlarının önemi, pilot ile hava aracının haberleşmesinin önemli olduğundan bahsedilmiştir. Literatürdeki uygulamalarda mikroşerit antenlerin insansız hava araçlarında kullanımının öneminden bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasındaki ana problem, çözüm önerisinin amacı ve hedeflerinden, motivasyon başlığı altında bahsedilmiştir.

İkinci başlıkta temel anten parametrelerinden bahsedilmiştir. Antenlerin tasarımında, analizinde ve üretiminde sıklıkla kullanılan terimler için kısa tanımlamalar yapılmış, görsellerle desteklenmiştir.

Üçüncü başlıkta mikroşerit antenlerin özelliklerinden bahsedilmiştir. Farklı besleme yöntemlerinden de bahsedilen bu başlıkta literatürde konu hakkında yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir. Mikroşerit antenin tasarımı için gerekli olan hesaplamalar verilmiştir. Mekaniksel ölçüler hesaplandıktan sonra bilgisayar ortamında mikroşerit antenin tasarımının nasıl yapıldığından bahsedilmiştir. Maksimum güç iletimi için gerekli olan empedans uyumlandırma devresinden de bu bölümde bahsedilmiştir.

Dördüncü başlıkta yapılan benzetim ve ölçümlerin sonuçları paylaşılmıştır. Tez kapsamında iki farklı analiz çalışması olduğundan bahsedilmiştir. Bu iki farklı analiz de detaylıca açıklanmış ve yorumlanmıştır. S_{11} , DDO, kazanç ve yönlülük gibi ifadelerden bahsedilmiştir.

Beşinci başlıkta tez çalışmasının genel anlamda değerlendirilmesi yer almaktadır. Literatüre ve sanayi çalışmalarına nasıl katkı sağlayabileceği paylaşılmıştır. Proje sonunda elde edilen deneyimlere göre bazı öneriler de bu bölümde bulunmaktadır.

2. KAYNAK TARAMASI

Elektromanyetik dalgaların yayılarak iletilmesini ve alınmasını sağlayan birime anten denir. Verici antenler, iletilmek istenen verileri elektromanyetik dalgalar yardımıyla iletmeye yararken alıcı antenler, alınmak istenen verileri elektromanyetik dalgalar yardımıyla almaya yararlar.

Antenlerin ilgili isterlere göre tasarlanması ve analiz edilmesi, bazı özelliklere göre değişkenlik göstermektedir. Anten kazancı, verimi, ışıma örüntüsü, bant genişliği, kutuplanması ve giriş empedansı gibi özellikler, burada açıklanacaktır.

2.1. Antenler Hakkında Bilgiler

2.1.1. Kazanç

Anten kazancı, bir antenin belirli bir yöne doğru yaydığı elektromanyetik dalgaların gücünün, yön bağımsız bir antenin aynı yöne doğru yaydığı elektromanyetik dalgaların gücüne oranının desibel cinsinden ifadesidir.

İzotropik anten, her yöne eşit güçte elektromanyetik dalga yayan, temsili bir antendir. Gerçek antenler ise yön bağımsız değildir. Her anten belli yönlerde güçlü, diğer yönlerde zayıf yayın yapar (Imran vd. 2018). Antenin en güçlü yayın yaptığı yöne maksimum kazanç yönü denilir. Anten bu yönde yön bağımsız antenden daha güçlü yayın yaparken, diğer bazı yönlerde akı yoğunluğu yön bağımsız antenden daha zayıftır (Balanis 2016).

Anten kazancı, antenin şekli, boyutu ve kullanılan malzeme gibi faktörlerden etkilenir. Kazancı temsil eden formül, Denklem (2.1)'de verilmiştir (Balanis 2016). IEEE standartlarına göre kazanç, yansıma kayıplarını ve kutuplanma uyumsuzluğundan kaynaklanan kayıpları içermemektedir (Balanis 2016).

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \text{ (birimsiz)} \quad (2.1)$$

Burada; G kazancı, $U(\theta, \phi)$ ışıma şiddetini, P_{in} ise antenin alınan giriş gücünü (W) belirtir. Yayılan güç (P_{rad}), alınan giriş gücü biriminden ifade edilmek istenirse, Denklem 2.2 elde edilir (Balanis 2016).

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in} \text{ (birimsiz)} \quad (2.2)$$

Burada; e_{cd} antenin yayılma verimliliğini belirtir. Denklem 2.1, Denklem 2.2'de verilenler ile tekrar yazıldığında Denklem 2.3 elde edilir.

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[\frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \text{ (birimsiz)} \quad (2.3)$$

2.1.2. Verim

Anten verimliliği, bir antenin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Yüksek verimli antenler, daha fazla güç yayabilir ve daha az gürültü üretirler. Bu, antenin işaret mesafesini ve kalitesini artırır.

Anten verimliliği, antenin tasarımı, boyutu ve malzemesi ile etkilenir (Balanis 2016). Verimli anten tasarımı, yan hüzmeleri azaltır ve anten boyutunu büyütür. Yüksek iletkenliğe sahip malzemeler, antenin verimliliğini artırır. Ayrıca, antenin besleme sisteminin optimize edilmesi, verimliliği artırabilir. Anten verimliliği, anten tasarımında önemli bir faktördür. Yüksek verimli antenler, daha iyi performans sunar.

Denklem (2.4)'de verilen eşitlik, geri dönüş katsayısının hesaplamasını temsil etmektedir. " Γ " ile gösterilir. Bu değer, yollanan verinin, ne kadarlık kısmının geri yansıdığını temsil etmektedir. Bir verinin yüksek verim oranıyla iletilmesi bekleniyorsa, geri dönüş kaybının düşük olması gerekmektedir (Balanis 2016).

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.4)$$

Burada; Z_{in} anten giriş empedansını, Z_0 anten iletim hattı empedansını belirtir (Balanis 2016). Antenlerde verim hesaplamaları, Denklem 2.5'te verildiği gibidir.

$$e_0 = e_r e_c e_d \text{ (birimsiz)} \quad (2.5)$$

Burada; e_0 toplam verimi, e_r yansıma verimini, e_c iletim verimini ve e_d dielektrik verimini belirtir. Yansıma verimini açıklayan bağıntı Denklem 2.6'da verilmiştir.

$$e_r = (1 - |\Gamma|^2) \text{ (birimsiz)} \quad (2.6)$$

Denklem 2.5 incelendiğinde, iletim verimliliği (e_c) ve dielektrik verimliliği (e_d) değerlerinin hesaplamaları çok zor olduğu için, literatürde genellikle bu iki parametrenin çarpımı, antenin yayılma verimliliği olarak belirtilir. Denklem 2.7'de gösterilmiştir.

$$e_{cd} = e_c e_d \quad (2.7)$$

Bu şartlar altında toplam verim bağıntısı Denklem 2.8'de verilmiştir.

$$e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd} (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.8)$$

2.1.3. Işıma örüntüsü

Antenin yaymış olduğu elektromanyetik dalgaları ne yöne ve nasıl yaydığını açıklayan bir kavramdır. Antenin fiziksel ölçülerine bağlı olarak değişebildiği gibi çalışma frekansı da ışıma örüntüsü için etkin bir değişkendir (Balanis 2016). Işıma örüntüsü, antenin kazancı, yönlülüğü ve verimliliği gibi özellikleri açıklamaktadır. Genellikle iki veya üç boyutlu grafikler halinde incelenmektedir. Grafiklerde, yukarıda bahsedilen anten özellikleri, görsel olarak incelenmektedir.

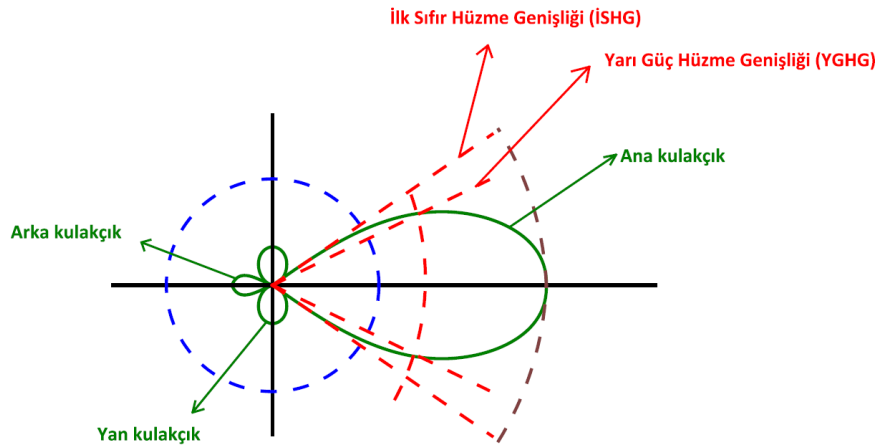
Grafiklerin başarılı bir şekilde yorumlanabilmesi için aşağıdaki özelliklerin bilinmesi gerekmektedir.

Ana hüzme: Antenin, radyasyonu en fazla yaydığı yönü belirtir. Antenin karakteristik özelliğini belirtir.

Yan hüzme: Antenin, istenmeyen yönlerde yaptığı radyasyonu belirtir. İşaret bozulmaları, güç kaybı gibi sorunlara yol açabilmektedir.

Kazanç: Antenin, belirli bir yönde iletebileceği verinin performansını gösterir. Böylece kazanç bilgisi elde edilir.

Hüzme Genişliği: Anten ışıma örüntüsünde, ana hüzmeden sonra gelen ilk sıfır noktasına kadar olan açısal genişliğe İlk Sıfır Hüzme Genişliği (İSHG), ana hüzmedeki ışıma yoğunluğunun yarıya düştüğü yönler arasındaki açısal genişliğe ise Yarı Güç Hüzme Genişliği (YGHG) denir (Balanis 2016). YGHG, antenin yönlülüğünü ve yan hüzme seviyesini belirlemede daha yaygın olarak kullanılan bir ölçümdür. Hüzme genişliği ve yan hüzme seviyesi arasında ters orantı vardır. Hüzme genişliği arttıkça, yan hüzme seviyesi azalır. Bu, antenin istenmeyen yönlerde radyasyon yapmasını azaltır. Hüzme genişliği, bir antenin ışıma kalitesinde önemli bir faktördür. Hüzme genişliği ne kadar dar olursa, antenin istenilen yöne odaklanma yeteneği o kadar iyi olur (Ates vd. 2023). Bu, antenin veri iletim gücünü ve kalitesini artırabilir.



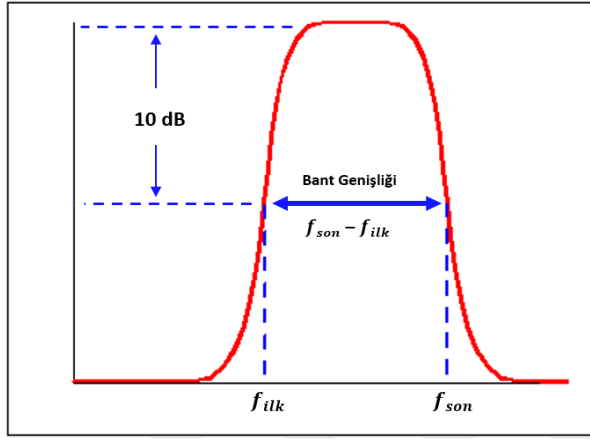
Şekil 2.1. Işıma örüntüsü

2.1.4. Bant genişliği

Bant genişliği, antenlerde önemli parametreler arasında yer almaktadır. Çalışması beklenen frekans aralığını temsil eder (Düzgünsıvacı 2022). Bu aralık kazanç, yönlülük ve verimlilik gibi parametrelere bağlıdır. İsterler dahilinde hesaplanabilmektedir. Literatürde, -3dB ve -10dB olmak üzere iki farklı bant genişliği çeşidi bulunmaktadır. İki çeşit de literatürde sıklıkla kullanılırken, değerleri farklı olsa da hesaplanma yöntemleri benzerdir. Bir veri işaretinin -3dB ve -10dB değerlerini kestiği bölümün frekans olarak genişliği, bant genişliğini temsil eder. Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Antenlerin fiziksel özellikleri de bant genişliğine doğrudan etki gösterebilmektedir. Anten boyutu arttıkça bant genişliği de artar. Farklı malzemelerde de bant genişliği değişkenlik gösterebilmektedir (Balanis 2016).

Antenlerin geniş veya dar bir bant aralığına sahip olması, kullanım amaçlarına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Cep telefonlarının ve kablosuz internet sağlayan modemlerin antenleri geniş bir bant aralığına sahiptir (Aydın 2019). Bunun sebebi, farklı frekanslarda çalışan cihazların bir arada kullanılabilmesidir. Bir diğer taraftan, radyo ve televizyon sistemlerinde kullanılan antenler, dar bir bant aralığına sahiptir. Bunun sebebi ise, belirli frekans bantlarında yayın yapmasıdır.



Şekil 2.2. Bant genişliği gösterimi

2.1.5. Yönlülük

Antenlerde yönlülük tanımı, tasarlanması planlanan antenin hangi yönde ışıma yapacağına karar vermek için belirlenmesi gereken önemli parametreler arasındadır. Bir antenin yönlülüğü “antenden belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun oranı olarak tanımlanmaktadır (Balanis 2016). Eğer bir sistemde yön belirtilmemişse, yönlülük, en büyük radyasyon yoğunluğunun bulunduğu yönü temsil etmektedir. Yön bağımsız bir kaynaktan gelen radyasyon yoğunluğunu temsil eden bağıntı Denklem 2.9’da verilmiştir.

$$U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.9)$$

Burada P_{rad} toplam iletilen gücü belirtir. Bu bağıntı ışığında yönlülüğü veren bağıntı Denklem 2.10’da verilmiştir.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.10)$$

Yönlülük verilmemişse, en büyük radyasyon yoğunluğunun bulunduğu yönü bulmak için kullanılan bağıntı Denklem 2.11’de verilmiştir.

$$D_{max} = D_0 = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.11)$$

Burada D yönlülüğü, D_{max} en büyük yönlülüğü, U ışıma yoğunluğunu, U_{max} en büyük ışıma yoğunluğunu, U_0 yön bağımsız bir kaynaktan gelen radyasyon yoğunluğunu belirtir.

2.1.6. Empedans uyumlandırma

Antenlerde empedans uyumlandırması, anteni besleyen iletim hattının karakteristik empedansının, anten yamasının giriş empedansına eşleştirilmesidir (Saini ve Agarwal 2017). İletim hattı ile anten arasında maksimum güç iletimi uygulanabilmesi için bu işlemin gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Balanis 2016). Uyumlandırmanın başarısız olması durumunda iletilen veri, antenin besleme girişinden yansıma yaparak güç kaybına sebep olmaktadır (Alwareth vd. 2022). Literatürde yaygın olarak kullanılan empedans uyumlandırma çeşitleri aşağıda açıklanmıştır.

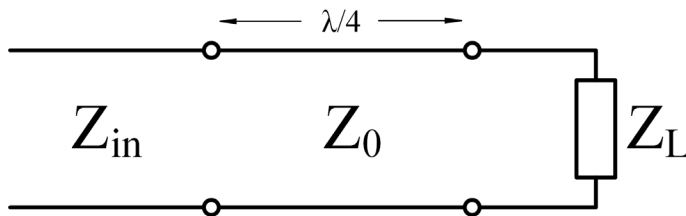
Aktif empedans uyumlandırma; iletim hattı ile antenin besleme girişi arasına aktif elemanlar eklenerek empedans uyumlandırması işlemidir. İletim hattının karakteristik empedansı ile antenin giriş empedansını birbirlerine eşleştirmeye yarar.

Reaktif empedans uyumlandırma; iletim hattı ile antenin besleme girişi arasına reaktif elemanlar eklenerek empedans uyumlandırması işlemidir. İletim hattının karakteristik empedansı ile antenin giriş empedansını birbirlerine eşleştirmeye yarar.

Çeyrek dalga empedans uyumlandırma; antenin giriş kısmına çeyrek dalga boyu uzunluğunda iletim hattı eklenmesiyle empedans uyumlandırması işlemidir. İletim hattının karakteristik empedansı ile antenin giriş empedansını birbirlerine eşleştirmeye yarar.

Bu tez çalışmasında çeyrek dalga empedans uyumlandırması gerçekleştirilmiştir. İletim hattı uzunluğu, dalga boyunun dörtte birine eşittir. İletim hattı uzunluğu $\lambda/4$ olan karakteristik empedansın formülü Denklem 2.12'de, eşdeğer devresi ise Şekil 2.3'te verilmiştir (Balanis 2016).

$$Z_0 = \sqrt{Z_{in}Z_L} \quad (2.12)$$



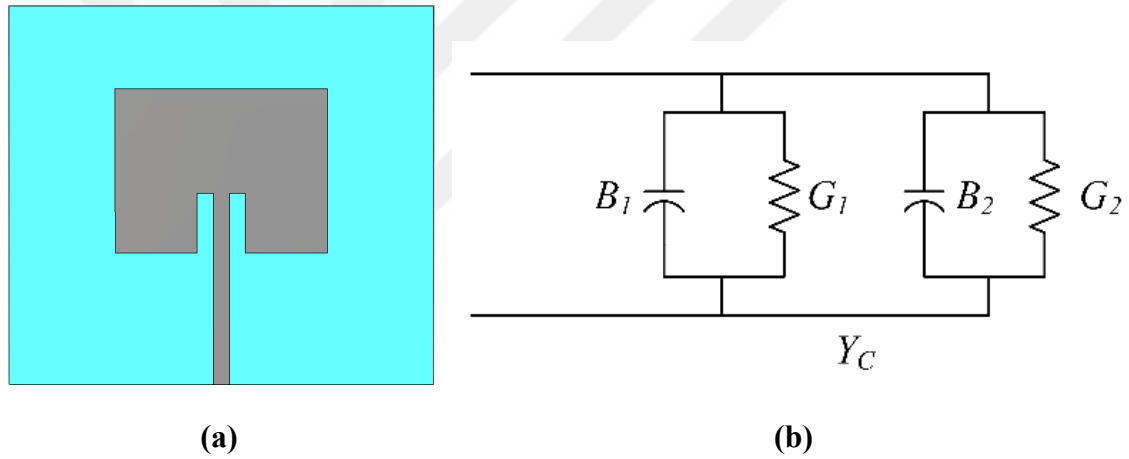
Şekil 2.3. Çeyrek dalga boyu empedans uyumlandırma eşdeğer devresi

Çalışmanın bu başlığında, mikroşerit anten türlerinden ve temel özelliklerinden bahsedilmiştir. Literatürde bulunan ulusal ve uluslararası çalışmalar da bu başlık altında incelenmiştir. İnsansız hava araçlarında mikroşeritlerin kullanım alanları bahsedilmiştir. Tez çalışması ile benzer olarak bükümlü mikroşerit antenlerle alakalı literatürde bulunan çalışmalar açıklanmıştır.

2.2. Temel Bilgiler

Küçük boyutlu, hafif, düşük maliyet ve kurulum kolaylığı sağlamasıyla bilinen mikroşerit antenler, yüksek performans ihtiyacı duyulan havacılık ve savunma sektöründe aerodinamik koşullar gerekçesinde, sıklıkla tercih edilmektedir. Genellikle bir adet toprak yüzeyi, bir adet iletken yama yüzeyi, bir adet de dielektrik malzeme katmanından oluşmaktadır. Yamaya besleme yapıldığında ortaya çıkan elektromanyetik dalgalar, dielektrik katmanın yan taraflarından ışıma yaparak toprak yüzeye ulaşırlar. Bu şekilde iletim gerçekleşmiş olur.

Temel bir mikroşerit antenin tasarımı ve iletim hattı devre modeli Şekil 2.4'te verilmiştir (Balanis 2016).



Şekil 2.4. a) Mikroşerit anten; b) Mikroşerit anten iletim hattı devre modeli

Ara katman malzemeleri, kalınlıklarına ve dielektrik sabitlerine göre farklılık göstermektedir. Kullanım amacıyla alakalı olan bu seçimlere göre, dielektrik sabiti $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ değerleri arasında olabilmektedir (Balanis 2016). Kalın ve küçük bir dielektrik sabitli malzeme, büyük dielektrik sabitli ve nispeten daha ince bir malzemeye göre daha verimli ve bant genişliği daha yüksektir.

Mikroşerit antenlerin avantajları ve dezavantajları, Çizelge 2.1'de verilmiştir (Balanis 2016), (Düzgünsıvacı 2022).

Çizelge 2.1. Mikroşerit antenlerin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Düşük maliyet	Düşük güç
Yüksek performans	Düşük verim
Düşük ağırlık	Düşük bant genişliği
Geniş kullanım alanı	

Mikroşerit antenler, farklı tiplerde ve boyutlarda tasarlanabilirler (Erol 2020). Bant genişliği, merkez çalışma frekansı gibi parametrelere bağlı olsa da tasarımlar, besleme yöntemlerine göre de değişebilir (Iqbal vd. 2018). Birçok besleme yöntemi bulunmasına rağmen literatürde genellikle dört farklı besleme yöntemi tercih edilmektedir. Bu besleme yöntemleri; koaksiyel prob besleme, mikroşerit (iletim hattı) besleme, açıklık bağlaşımı besleme ve yakınlık bağlaşımı beslemedir (Düzgünsıvacı 2022).

Koaksiyel prob ile besleme yönteminde veri, bir konnektör yardımıyla mikroşerit antene iletilir. Literatürde genellikle SMA tip konnektörler kullanılır. Karmaşık işaretlerin olduğu mikroşerit hattından bağımsız bir şekilde beslendiği için mikroşerit anten, devreden gelebilecek istenmeyen işaretlerden korunmuş olacaktır (Kütük 2012). Koaksiyel kablounun içinde taşıyan iletken kısım, mikroşerit antenin yama yüzeyine; dış iletken tarafı ise alt yüzeydeki toprağa temas edecek şekilde bağlanmaktadır. Besleme noktasının konumu, empedans uyumlandırmasının en çok olacağı nokta hesaplanarak belirlenmektedir (Kütük 2012).

Mikroşerit besleme, koaksiyel proba göre üretimi ve uygulaması nispeten daha kolaydır. Bunun sebebi, yama mikroşerit hattın bir bağlantısı şeklinde olduğundan, tek bir üretimle hem devrenin hem de antenin üretimi yapılabilmektedir (Kütük 2012). Mikroşerit besleme hattının kalınlığı ve uzunluğu, yama ile devrenin empedanslarının, gerekli formüller vasıtasıyla birbirleriyle uyumlu olduğu değerlerde seçilmektedir (Düzgünsıvacı 2022).

Açıklık bağlaşımı besleme, iki katmanlı taban düzleminden oluşmaktadır. Tabanlar arasında toprak yüzeyi bulunmaktadır. Alta bulunan tabanın alt tarafında mikroşerit hat bulunmaktadır. Ana toprak bölümünde bulunan yarık sayesinde yamaya dahil edilir. Bu yarık herhangi bir şekil ve boyutta olabilmektedir. Empedans uyumlandırmasının gerçekleştirilebilmesi için yarık genişliği, dielektrik katsayısı ve kalınlığı değişkenlik gösterebilmektedir. Basit bir örnek ile açıklamak gerekirse, antenin yama yüzeyi düşük dielektrik sabitine sahip kalın bir dielektrik ile kullanılıyorken besleme hattı, yama yüzeyine göre yüksek dielektrik sabitine sahip ince bir dielektrik ile kullanılmalıdır (Kütük 2012).

Yakınlık bağlaşımı besleme, iki katmanlı taban düzleminden oluşmaktadır. Işıma yapan mikroşerit anten yaması üst katmanda bulunurken besleme hattı alt katmanda bulunmaktadır. Besleme hattı, anten yamasının altında açık devre ile sonlanmaktadır.

Elektromanyetik kuplaj olarak da adlandırılan bu besleme türünde kuplaj özelliğinden yararlanır. Yama ile hat arasında kapasitif bir bağlantı bulunmaktadır (Düzgünsıvacı 2022). Kapasitif bağlantının kuplaj kapasitesi, empedans uyumu sağlayacak şekilde hesaplanmaktadır. Katmanların yüzey parametreleri, mikroşerit besleme hattının açık devre ucundan gelen istenmeyen ışımaları azaltacak şekilde seçilmelidir. Alt katman daha ince seçilmesi durumunda bu durum gerçekleşebilir (Kütük 2012).

2.3. Literatür İncelemesi

Literatürde mikroşerit antenlerle alakalı birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlar arasından tez konusuyla alakalı veya benzer konulardaki çalışmalar bu başlıkta incelenecektir. Bükümlü yapıdaki antenler, havacılık sektöründe kullanılan antenler, farklı malzemelerin kullanılmasıyla oluşturulan antenler gibi başlıklar altında literatür taramalarından bahsedilecektir.

2.3.1. Bükümlü mikroşerit antenler

Eğimli yüzeylerde mikroşerit anten uygulaması, farklı besleme ve tasarım yöntemleriyle incelenmiştir. 2.45 GHz Wi-Fi çalışma frekansının tercih edildiği çalışmada araştırmacılar, İHA üzerinde silindirik bir düzlemde planlanmıştır. Hareket kabiliyetleri düşünüldüğünde, İHA'larda haberleşmenin kopmaması ve devamlı olması amacıyla, İHA'nın belirli bir kesitinde silindirik olarak antenin tasarlanması fikri ortaya atılmıştır. Büyük çaplı kesit için dikdörtgen şekilli yama düşünülen çalışmada, küçük kesitli bölgelerde ise PİFA (Planar Inverted-F Antenna) anteni, çözüm önerisi olarak sunulmuştur. Analiz sonuçlarında çok yönlü anten örüntüsü elde edilmiştir (Navarro-Méndez vd. 2015).

Dielektrik malzeme seçimi, antenden elde edilecek kazancı ve yönlülüğü doğrudan etkilemektedir. Daha küçük bir dielektrik sabiti ile kayıplar azaltılabilir. Aynı zamanda dielektrik malzemelerin farklı isteklere göre farklı özellikleri bulunmaktadır. Literatürdeki çalışmada, dielektrik malzeme olarak PLA kullanılmıştır. Dielektrik sabiti 2.41 olan PLA türü ile 3D yazıcı kullanılarak sekizgen kavisli bir anten üretimi yapılmıştır. Çalışmanın amacı, sıvıların dielektrik sabitlerinin ölçülmesidir. Kavisli bölüme, ölçülmesi talep edilen sıvı doldurularak analizler gerçekleştirilmiştir (Bicer 2023).

Mikroşerit antenler, son zamanlarda nesnelerin interneti (IoT) başlığında sıklıkla tercih edilmektedir. Uygun maliyetli ve kolay üretim gibi sebepler, tercih sebeplerindendir. İncelenen bu çalışmada, dielektrik malzeme olarak silikon kauçuk tercih edilmiştir. Esneklik özelliğine sahip silikon kauçuk maddesi sayesinde, bükümlü mikroşerit anten tasarımı, kolaylıkla elde edilmiştir. Büküm seçeneği, farklı açı değerlerinde test edilmiş ve elde edilen sonuç değerlendirilmiştir. Rezonans frekansı, farklı açı değerlerinde farklı sonuçlar vermiştir (Koç vd. 2018).

Giyilebilir teknoloji olarak adlandırılan sistemler, kıyafet içlerine veya yüzeylerine yerleştirilen anten, güneş enerji paneli ve bu tarz teknolojik bileşenleri içerisinde barındırır. Literatürde, S bantda çalışan, kare mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten, birbirinden farklı iletken ve dielektrik kumaşlar ile üretilmiştir ve bu kumaşların verimli bir şekilde kullanılıp kullanılamayacağı tartışılmıştır.

Kumaşların bükülebilme özellikleri düşünüldüğünde, analizler hem normal duruma göre yapılmış hem de bükülmüş şartlar altında yapılmıştır. Bu sayede kumaşların bükülme durumlarında antenin eşleşme durumu araştırılmıştır (Amaro vd. 2011).

Esnek polimer tabanlı giyilebilir sensörler, IoT ile yaygın hale gelmeye başlamıştır. Plastik, tekstil, kâğıt gibi malzemeler ile mikroşerit anten üretimi konusu, literatürde kendine çalışma alanı bulmuştur. Esneyebilen elektronik birimler ile kullanılabilmesi, polimerlerin ham madde olarak kullanımını gittikçe arttırmaktadır. Sensör olarak kullanılması amaçlanan mikroşerit antenin, polimerlerin esneklik ve bükülme yeteneklerini araştırmak ve analiz sonucunda elde edilen bilgileri literatüre kazandırmayı hedefleyen araştırmacılar; malzemelerin mekaniksel, elektriksel ve fiziksel özelliklerini de incelemişlerdir (Ali Khan vd. 2021).

Kısa menzilli kablosuz sensör ağı uygulamaları için eğimli yüzeylere monte edilmek amacıyla bükümlü anten çözümleri literatürde mevcuttur. Eğimli yüzeylere entegre, bükümlü bir anten çözümü olduğu için konik ışın desenini sağlayabilmektedir. Bu sayede bluetooth ve Wi-Fi gibi uygulamalarda kullanılmak için uygun bir ortam yaratmaktadır. Literatürdeki çalışmanın ana mantığı, hedeflenen bir radyasyon performansında, bir düzlem antenin düz olmayan bir yüzey üzerinde kullanılması üzerine optimizasyon çalışması gerçekleştirmektir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, -19 dB ve daha az seviyelerde geri dönüş kaybı elde edilmiş, bu esnada DDO değeri 1.807 olmuştur (Dhar 2023).

2.3.2. İnsansız hava araçlarında mikroşerit antenler

WiMAX ve İHA uygulamalarında, temel haberleşme elemanı olarak kullanılmak üzere bir mikroşerit dizi anten tasarımı, literatürdeki çalışmalar arasında yerini almıştır. Merkez frekansı 3.8 GHz olan dikdörtgen şekline sahip, mikroşerit hat beslemeli dizi anten tasarımı ve benzetimi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Mikroşerit dizi antende yapılan analizler sonucunda 13.2 dB kazanç, 13.5 dBi yönlülük elde edilmiştir. İHA uygulamalarında mikroşerit antenler genellikle data-link ve GPS gibi haberleşme birimlerinde tercih edilirler (Sajjad vd. 2014).

Havacılık sektörünün bir diğer konusu olan uydu haberleşmesi alanında da literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Anlatılacak bu yüksek lisans tezinde yazar, X band uydu uygulamaları için düşük bütçeli mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirmiştir. CST Studio Suite programı üzerinden tasarımlarını ve analizlerini yaptığı tez çalışmasında merkez çalışma frekansı 7.25 GHz değerinde geri dönüş yansıması -14.5 dB, 8.4 GHz çalışma frekansında -15 dB geri dönüş yansıması elde edilmiştir. Bant genişliği, -10 dB düzeyinde ölçüldüğünde, 6.87 – 9.33 GHz değerleri arasında çıkmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalara göre başarılı bir sonuç ortaya koymuştur. Tasarlanan antenin potansiyel kullanım alanları arasında askeri VSAT uydu haberleşmesi, RFID etiket uygulamaları, iç mekân konumlandırma bulunmaktadır (Kuzer 2018).

Literatürde bulunan bir diğer çalışmada, İHA'lar için ultra geniş bant uyumlu bükümlü anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Hava araçlarında sürüklenme kuvvetini azaltmak için planlanan bu anten, düşük profilli bir yapıya sahiptir. Rogers firmasının ürettiği RT5880 model dielektrik malzemeyi tercih eden araştırmacılar, antenin ölçüleri yaklaşık olarak 3-4 cm arasında belirlemişlerdir. Tasarımın ardından ölçüm yapıldığında,

çalışma frekansı 2,9 – 15,9 GHz aralığında -10 dB bant genişliği tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, antenin merkezine yerleştirdikleri parazitik bir dairesel eleman ve Y yuvarlak şeklini kullanarak yüksek bir bant genişliği elde ettiklerini yazılarında belirtmişlerdir (Balderas vd. 2019).

Mikroşerit dizi antenlerin 5G ağları üzerindeki çalışmalar da yoğunluk kazanmıştır. İHA’larda kullanılan 5G teknolojisi için geliştirilen, merkez çalışma frekansı 3.6 GHz olan ve besleme yöntemi olarak koaksiyel beslemeyi tercih eden araştırmacılar, geleneksel dar bantlı mikroşerit antenlerle kıyaslandığında çok daha geniş bir bant aralığına sahip anten tasarımını gerçekleştirmişlerdir. İHA sistemlerinde kullanılacağı için hafif bir yapıda olması beklenen mikroşerit anten, ilk önce Rogers RO4350 dielektrik malzeme, daha sonra ise Rogers RT5880 dielektrik malzeme kullanılarak tasarlanmıştır. Anten yamasının üst kısmında yer alan parazitik bölüm ile antenin asıl yaması arasında Rohacell 31HF malzemesi kullanılarak, hafiflik özelliği sağlanmıştır. CST Studio Suite benzetim programı üzerinde yapılan elektromanyetik analizler ve ölçümler sonrasında, RT5880 dielektrik malzemesinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüş, nihai olarak karar kılınmıştır (Arpaio vd. 2019).

Literatürdeki farklı bir çalışmada ise, X ve Ku bandında çalışan mikroşerit anten tasarımları yapılmıştır. Tasarımda, anten yamasının üzerinde farklı şekillerde yarıklar düşünülmüştür. Çoklu bantta çalışma özelliğinin denenmesi adına, iki farklı dielektrik malzeme üzerinde analizler ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Dielektrik sabitleri sırasıyla 2,2 ve 4,3 olan Rogers RT5880 ve FR4 dielektrik malzemeler, yapılan analizlere göre benzer sonuçlar vermiştir. FR4 dielektrik malzeme kullanılarak yapılan analizlerde, çalışma rezonans frekansı 8,52 GHz, 11,42 GHz ve 13,44 GHz değerleri çıkarken, RT5880 dielektrik malzeme kullanılarak yapılan analizlerde ise çalışma rezonans frekansı 8,51 GHz, 10,53 GHz ve 11,57 GHz değerleri çıkmıştır. Bu sonuçlar altında, RT5880 dielektrik malzemesi ile yapılan analizler sonucunda antenin çalışma aralığı sadece X bandında kalmış, Ku bandında istenilen sonuç elde edilememiştir (Sarıkaya vd. 2023).

MIMO antenler, 5G çalışmaları kapsamında literatürde bulunan bir diğer konulardandır. Çalışmada, çalışma frekansı için 5G NR frekans bantları n38 (2570 – 2620 MHz) ile n41 (2496 – 2690 MHz) uygulamaları için 4-portlu bir MIMO anten tasarımı okuyuculara sunulmaktadır. Yüksek izolasyon uygulamaları ve zarf uyum katsayısı, kanal kapasite kaybı ve ortalama etkin kazanç gibi MIMO anten parametreleri ile verimli bir performans ortaya koymuştur. Antenin ölçüleri 40x100mm² olmakla birlikte 2,5 ile 2,9 GHz frekansları arasında bant genişliği bulunmaktadır. Tasarlanan antenin performansının artırılması için dikdörtgen şekilli çentikler eklenmiştir. 5G NR uygulamaları göz önüne alındığında 6 GHz frekansının altında yer alan n38 ve n41 bandlarında iyi sonuçlar ortaya koymuştur (Morsy 2022).

LTE mobil baz istasyonları için çift bant özelliği bulunan 4x4 MIMO anten tasarımı literatür çalışmalarında yerini almıştır. MIMO özelliği, dört adet koaksiyel prob beslemesi sayesinde elde edilmiştir. Tasarım, 70x90x1,6 mm ölçülerinde gerçekleştirilmiş, çalışma frekansı olarak ise LTE bantlarını (1785 – 1805 MHz ve 2570 – 2620 MHz) kapsamaktadır. Sonlu elemanlar methodu prensibiyle benzetim çalışmalarını gerçekleştiren Altair FEKO programı ile yansıma katsayısı, radyasyon desenleri ve kazanç bazında benzetimler gerçekleştirilmiştir. Çok yönlü

(omnidireksiyonel) bir radyasyon deseni elde edilmiştir. LTE mobil baz istasyonları için kompakt ve verimli anten tasarımı sunulmaktadır (Aung vd. 2017).

2.3.3. Yarıklı mikroşerit antenler

Çok bantta çalışan dikdörtgen eksiltmeli fraktal yapıya sahip yarıklı mikroşerit anten tasarımı gerçekleştiren araştırmacılar, çalışmada iki farklı frekans bandında benzetim yapmayı hedeflemişlerdir. Çalışma frekansları 2450 MHz ve 5800 MHz değerlerinde çalışmışlardır. İhtiyaç doğrultusunda farklı frekans bantlarının kullanılabilir olması, uygulamada bu anten tasarımının işlevselliğini arttırmaktadır. Antenin ölçüleri 125,5 x 121 mm olarak belirlenen çalışmada 2450 MHz frekans bandında yansımaya katsayısı – 21 dB elde edilirken 5800 MHz frekans bandında ise yansımaya katsayısı – 14.9 dB olarak elde edilmiştir. Ara frekans bandlarında da ışınlamalar gözlemlenmiştir.



3. MATERİYAL VE METOT

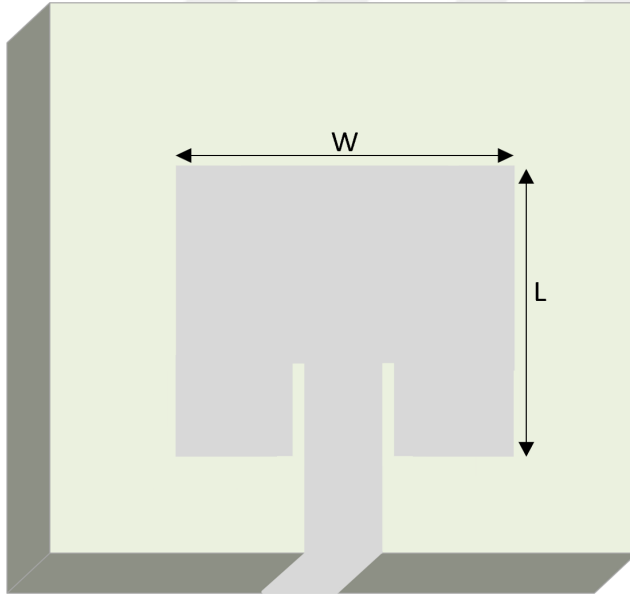
Tez çalışmasının bu bölümünde mikroşerit antenlerin tasarımında kullanılan temel hesaplamalardan bahsedilmiştir. Bu formüller sayesinde mikroşerit dizi antenin mekaniksel ölçüleri belirlenmiş olacaktır. Dielektrik malzemenin özellikleri, istenilen çalışma frekansına göre yamalar arası mesafelerin ayarlanması, üretim teknikleri gibi parametreler, analiz sonuçlarına doğrudan etki ettiği için bu parametrelerin dikkate alınması ve hesaplamalara dahil edilmesi gerekmektedir.

Tasarım yapılırken dikkat edilecek bir diğer başlık empedans uyumlandırmasıdır. Empedans uyumlandırmasının analiz sonuçlarında birçok değeri değiştirebileceği bu bölümde bahsedilmiştir.

Tasarımın hangi aşamalardan geçerek nihai sonuca ulaştığı da bu başlık altında açıklanmıştır.

3.1. Hesaplamalar

Mikroşerit antenlerin tasarımı, iletilen işaretin verimi, yönlülüğü, ışıma örüntüsü, kutuplanması gibi değişkenlere bağlıdır. Bu parametreler ise, mekaniksel ölçüler yardımıyla ayarlanabilmektedir (Balanis 2016).



Şekil 3.1. Mikroşerit anten gösterimi

Antenlerin formülleri incelenirken, genişlik W , yükseklik L olarak kabul edilecektir. Bu şartlar altında ilgili formüller şöyledir:

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}} \quad (3.1)$$

Burada; c ışık hızını (3×10^8), ϵ_r dielektrik sabitinin bağıl geçirgenlik katsayısını, f_0 merkez çalışma frekansını temsil eder. Yükseklik değerini veren formül Denklem (3.2)'de verilmiştir (Balanis 2016).

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (3.2)$$

Burada L_{eff} efektif uzunluğu, ΔL uzunluğun uzama miktarını temsil eder. Efektif uzunluğu açıklayan formül Denklem (3.3)'te verilmiştir (Balanis 2016).

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.3)$$

Burada ϵ_{eff} efektif dielektrik sabitini temsil eder. Efektif dielektrik sabitini açıklayan formül Denklem (3.4)'te verilmiştir (Balanis 2016).

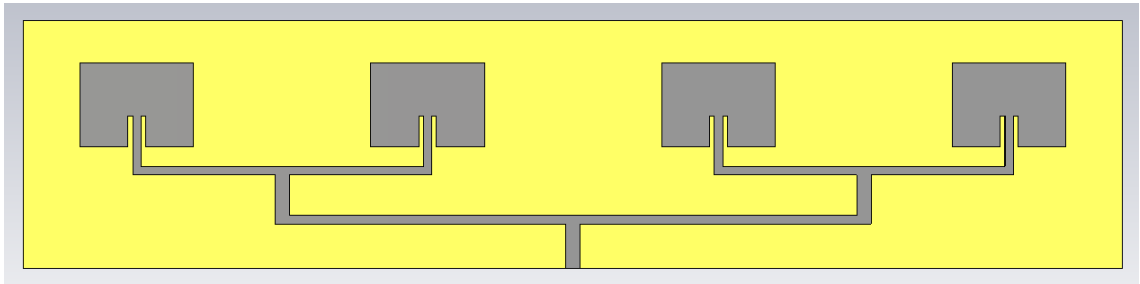
$$\epsilon_{eff} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Burada h dielektrik malzemenin yüksekliğini temsil eder. Uzunluğun uzama miktarını açıklayan formül Denklem (3.5)'te verilmiştir (Balanis 2016).

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3)\left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258)\left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (3.5)$$

3.2. Tasarım

Önceki bölümdeki formüller kullanılarak temel bir mikroşerit yama anten tasarımı için gerekli ölçüler elde edilmiştir. Bu ölçülerle gerçekleştirilen benzetim sonuçları ileriki bölümlerde verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde çalışmanın amaç ve hedeflerine uygun olmadığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda öncelikle temel tasarım üzerinde dizi anten çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan mikroşerit dizi anten Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Temel tasarıma sahip mikroşerit dizi anten

Geliştirilen dizi antenin benzetimi yapıldığında elde edilen sonuçlar, çalışmanın hedeflerini tam olarak karşılamadığını göstermiştir. Teknik ölçüleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Bükülebilir yapıda olması, insansız hedef uçak üzerinde uygun bir yapıda olması gibi hedefleri sağlarken çalışma frekansının istenen değerlerde ve seviyede olmaması tasarımda değişikliğe gidilmesine neden olmuştur. Bu kapsamda yapılan

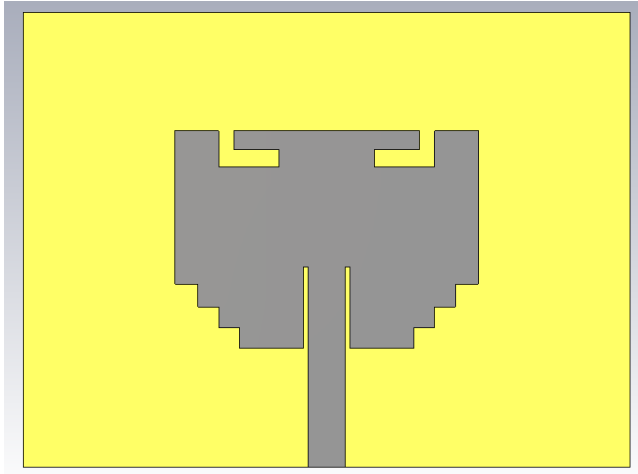
literatür çalışmalarında, yamalara eklenebilecek bazı yapılar olduğu görülmüştür (Ateş vd. 2023; Altinel ve Kahrman 2016). Merdivenli parça eksiltmesi ve yama üzerine yarıklar oluşturulması bu yapılardan birkaçıdır (Khasiyev 2023; Bagus vd. 2023). Yama üzerinde parça çıkarılması işlemi, temelinde yamanın yüzey alanını azalttığından, empedans düzenlemesini sağlamaktadır (Balanis 2016).

Çizelge 3.1. İlk tasarlanan temel mikroşerit yama anten dizisinin teknik ölçüleri

Parametreler	Değerler
Yama Genişliği (W) (mm)	39
Yama Yüksekliği (L) (mm)	29,25
Çalışma frekansı (f) (GHz)	2,4
Dielektrik katsayısı (Er)	4,3
Dielektrik kalınlığı (h) (mm)	1,6

W değerinin değişmesi, antenin ışıma yapacağı rezonans frekansını değiştirmektedir (Olatujoye ve Saturday 2023). L değerinin değişmesi de rezonans frekansına doğrudan etki etmektedir. L değerini elde etmek için kullanılan efektif dielektrik sabiti, antenin yapısında kullanılan malzemenin dielektrik katsayısına bağlı olduğundan, farklı bir dielektrik malzeme seçiminde L değeri değişecektir. Farklı dielektrik malzemelerin birbirlerinden farklı dielektrik kalınlıkları bulunmaktadır. Kalınlık da etkin parametreler arasındadır.

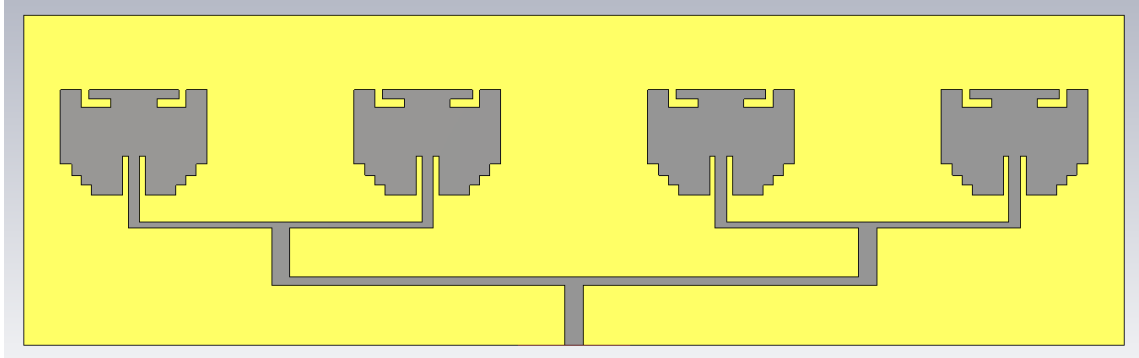
Yarık eklenmesi ve fiziksel ölçülerin değiştirilmesi sonucunda ortaya çıkan anten yaması Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Yarıklı mikroşerit yama anten

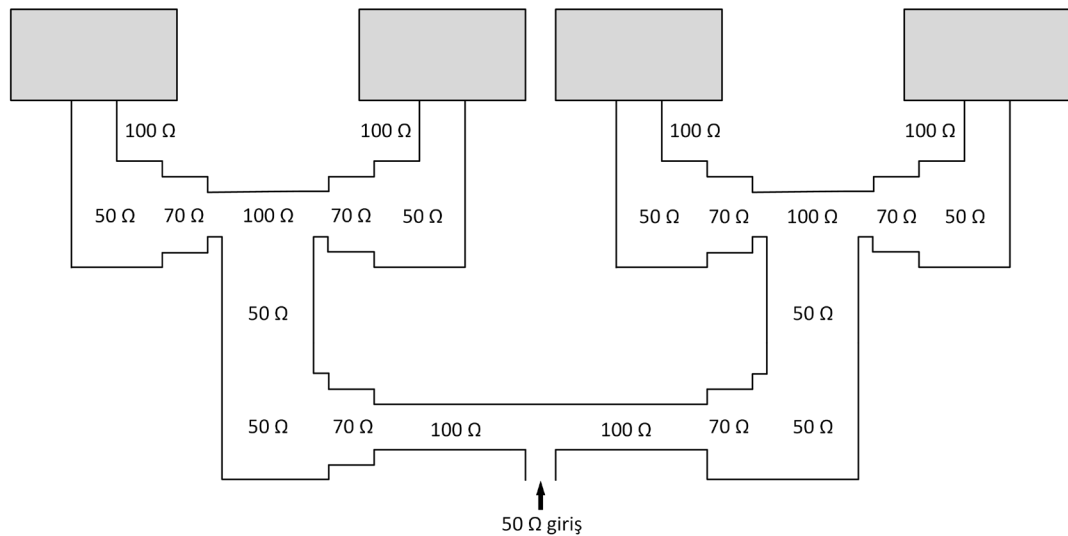
Yarık ekleme işlemi, yansımaya katsayısı değerini daha düşük değerlere indirmiştir ve yapılan işlemin doğru adım olduğunu göstermektedir. İnsansız hedef uçak sisteminin

istenen bölgesine fiziksel olarak tekli yama anten uyum sağlayamamaktadır. Bundan dolayı dizi anten kullanılması gerekmektedir. Bundan sonraki aşamada yarıklı tek yama antenin ölçülerinde yarıklı dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



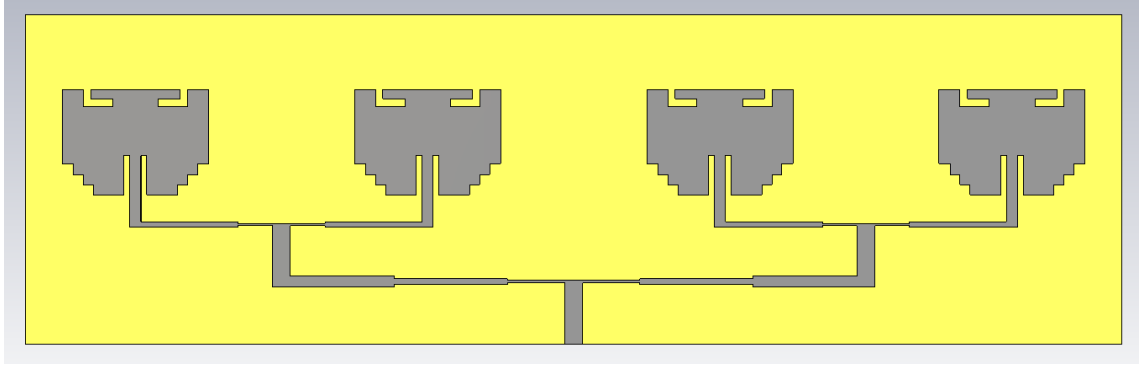
Şekil 3.4. Yarıklı mikroşerit dizi anten

Benzetim sonuçlarında Şekil 3.4'te verilen yarıklı mikroşerit dizi antenin, çalışmanın hedefleri arasında yer alan 2,62 GHz frekans değerinde ışınım yapmasına yaklaşıldığı görülmektedir. Fakat yansıma katsayı analiz sonucu hedeflenen değerler arasında bulunmamaktadır. Bundan dolayı, yarıklı dizi anten üzerinde empedans uyumlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlem kısaca açıklanmak istenirse, antenin giriş besleme empedansı 50 ohm değerinde olup 100 ohm değerindeki yamaların ve iletim hatlarının 50 ohm düzeyinde tutulabilmesi için Şekil 3.5'teki gibi bir hesaplama gerçekleştirilmiştir (Balanis 2016).



Şekil 3.5. Mikroşerit antenlerde çeyrek dalga boyu empedans uyumlandırma gösterimi

Empedans uyumlandırma işlemi sonrası anten tasarımı Şekil 3.6’da verilmiştir. Bu işlemin literatürdeki birçok çalışmada uygulandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.6. Çeyrek dalga boyu empedans uyumlandırması sonrası yarıklı mikroşerit dizi anten

Empedans uyumlandırması da gerçekleştirilen yarıklı mikroşerit dizi antenin elde edilen fiziksel ölçüleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Hesaplamalar sonucu temel anten tasarım parametreleri

Parametreler	Değerler
Yama Genişliği (W) (mm)	40
Yama Yüksekliği (L) (mm)	28,75
Çalışma frekansı (f) (GHz)	2,62
Dielektrik katsayısı (ϵ_r)	4,3
Dielektrik kalınlığı (h) (mm)	1,6

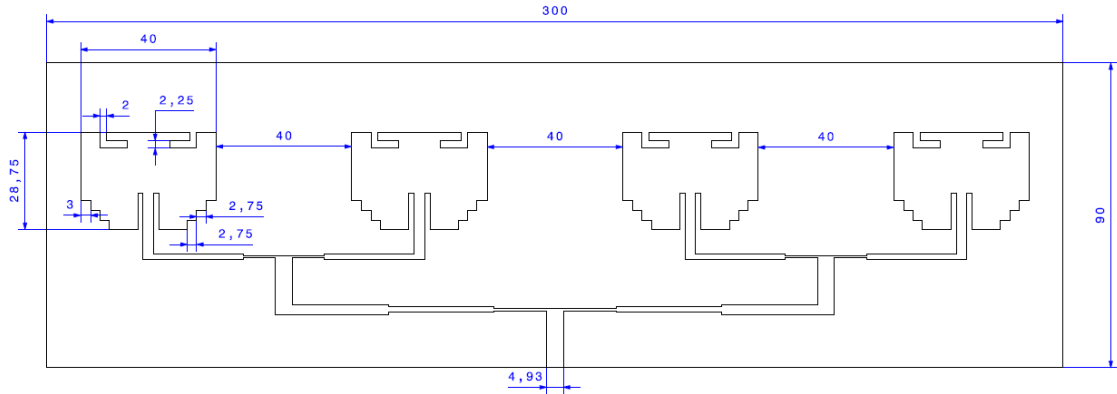
Bu değerler, mikroşerit dizi antende bulunan yamaların uzunluk ve genişlik değerleridir. Dizi anten tasarımı yapılacağı için, antenlerin birbirleri arasındaki uzaklık da analiz sonuçlarına doğrudan etki etmektedir. Yamalar arası uzaklık, çalışma frekansını etkileyen parametreler arasında yer almaktadır (Balanis 2016). Yüksek frekanslarda çalışması beklenen mikroşerit dizi antenin yamaları arası uzaklık daha az olurken, düşük frekanslarda çalışması beklenen mikroşerit dizi antenin yamaları arası uzaklık ise daha fazla olmalıdır. Bu tez çalışmasında, mikroşerit dizi anten üzerindeki yamalar arası uzaklık Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Hesaplamalarda kullanılan ϵ_r ifadesi, dielektrik malzemenin özelliğidir. Tasarlanacak antenin isterlerine göre farklı dielektrik malzemeler tercih edilebilir (Jain ve Kushwah 2021). Bazı çalışmalarda dielektrik katsayısının düşük olmasından dolayı daha küçük fiziksel özelliklerde antenler istenirken bazı çalışmalarda ise daha yüksek dielektrik katsayısına sahip daha büyük fiziksel ölçülerde bir mikroşerit anten tercih edilmektedir (Arvas 2019). Bu tez çalışmasında dielektrik katsayısı $\epsilon_r = 4,3$ olan FR-4 malzemesi tercih edilmiştir. Uygun fiyatlı ve kolay erişilebilir olması, bu malzemenin tercih sebeplerindendir. Tasarım çalışmaları bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Tasarım süreçlerinin tamamlanmasının ardından detaylı ölçüler Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yarıklı mikroşerit dizi antenin detaylı ölçüleri

Parametreler	Değerler (mm)
Dielektrik Malzeme (En)	300
Dielektrik Malzeme (Boy)	90
Yama Eni	40
Yama Yüksekliği	28,75
Yamalar Arası Uzaklık	40
İletim Hattı Kalınlığı	4,93

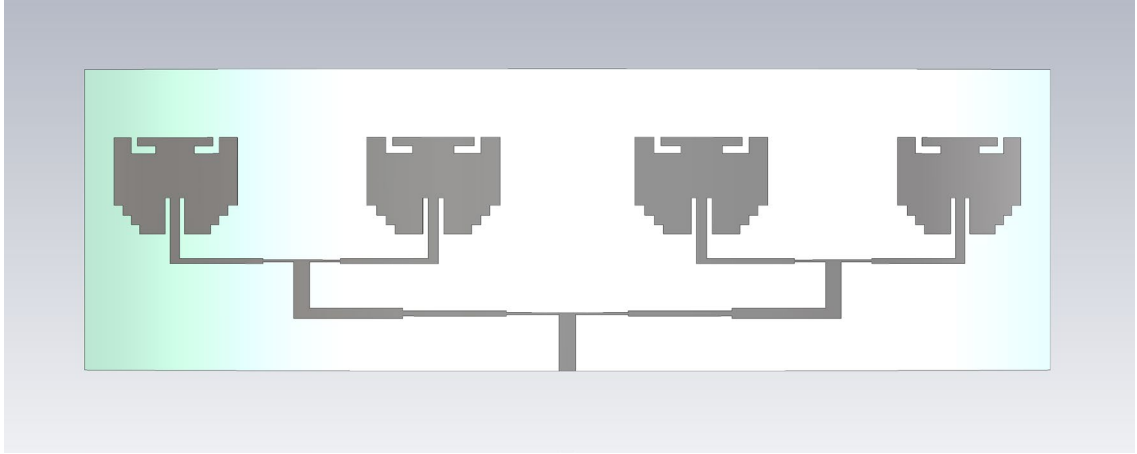
Bu şartlar altında tekrarlanan benzetim çalışmalarında, hedeflenen verilerin elde edildiği görülmüştür. Benzetim sonuçları Bölüm 4'te detaylıca açıklanmıştır. Yarıklı, empedans uyumu gerçekleştirilmiş mikroşerit dizi antenin teknik çizimi Şekil 3.7'de verilmiştir.

**Şekil 3.7.** Tasarımı tamamlanmış mikroşerit dizi antenin teknik çizimi

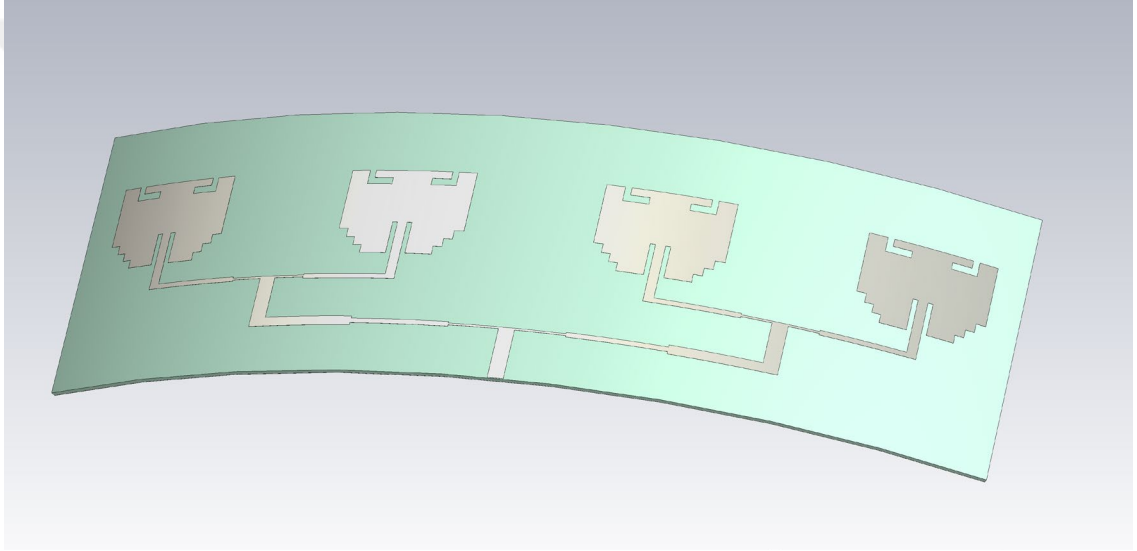
3.3. Benzetim

Mikroşerit antenlerin tasarımları birçok program üzerinde gerçekleştirilebilir. Bu tez çalışmasında CATIA programı kullanılarak tasarım yapılmıştır. Tasarım konusunda daha kolay bir arayüz sunması, kullanım kolaylığı, tasarımın farklı uzantılara dönüştürülme kolaylığı gibi faydalar bu programın tercih edilme nedenlerindendir.

Benzetim çalışmalarının gerçekleştirildiği CST Studio programında analizler, antenin bükümlü durumuna göre gerçekleştirilmiştir. Mikroşerit dizi antenin bükümlü haline ait görseller Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.

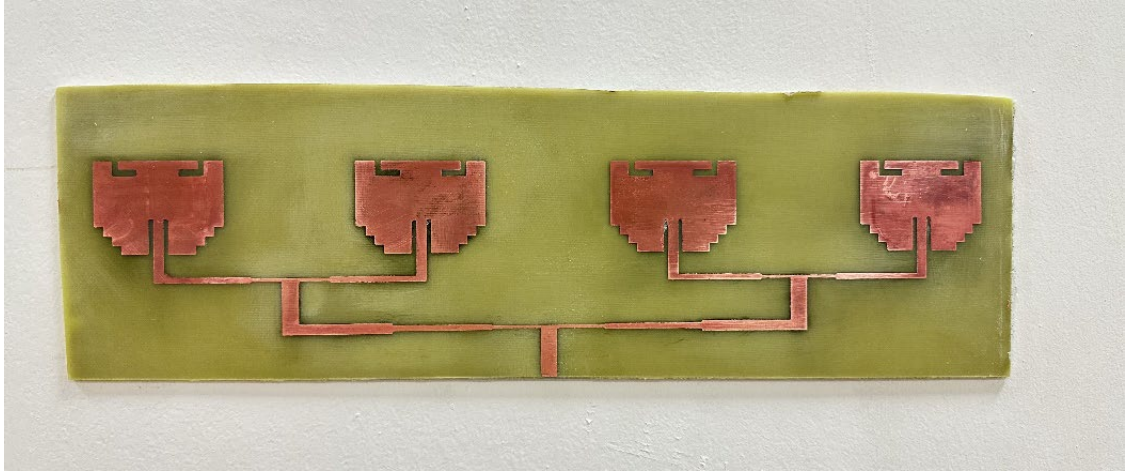


Şekil 3.8. Tasarlanan mikroşerit dizi antenin bükümlü hali (önden görünüm)



Şekil 3.9. Tasarlanan mikroşerit dizi antenin bükümlü hali (perspektif görünüm)

Yapılan tasarım çalışmalarının ardından elde edilen sonuçlar Bölüm 4'te sunulmuştur. Tasarım sürecinde birçok farklı tasarım denemeleri gerçekleştirilmiştir. Yarıklı tasarım, literatürde sıklıkla tercih edilen bir modeldir. Mevcutta bulunan çalışmalar incelenmiş, onların ışığında yeni ve özgün bir tasarım ortaya koyulmuştur. İnsansız hedef uçak için genişlik olarak uzun, yükseklik olarak kısa bir anten ihtiyacı bulunduğu için mikroşerit dizi antenler tercih edilmiştir. Her bir farklı tasarım denemesinde benzetimler gerçekleştirilerek sonuçları kaydedilmiştir. Çalışmanın amaç ve hedeflerini karşılayan tasarım, en son gerçekleştirilen tasarım olmuştur. Tasarım ve benzetim süreçlerinde CATIA ve CST programları interaktif kullanılmıştır. Hesaplamaların yapılmasının ardından CATIA üzerinde çizimler yapılmış, CST formatında dışarı aktarılarak CST üzerinde benzetimler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada nihai tasarıma karar verilen antenin üretimi gerçekleştirilerek yansız oda koşullarına ölçümleri alınmıştır. Üretilmiş yarıklı mikroşerit dizi anten Şekil 3.10'da verilmiştir.



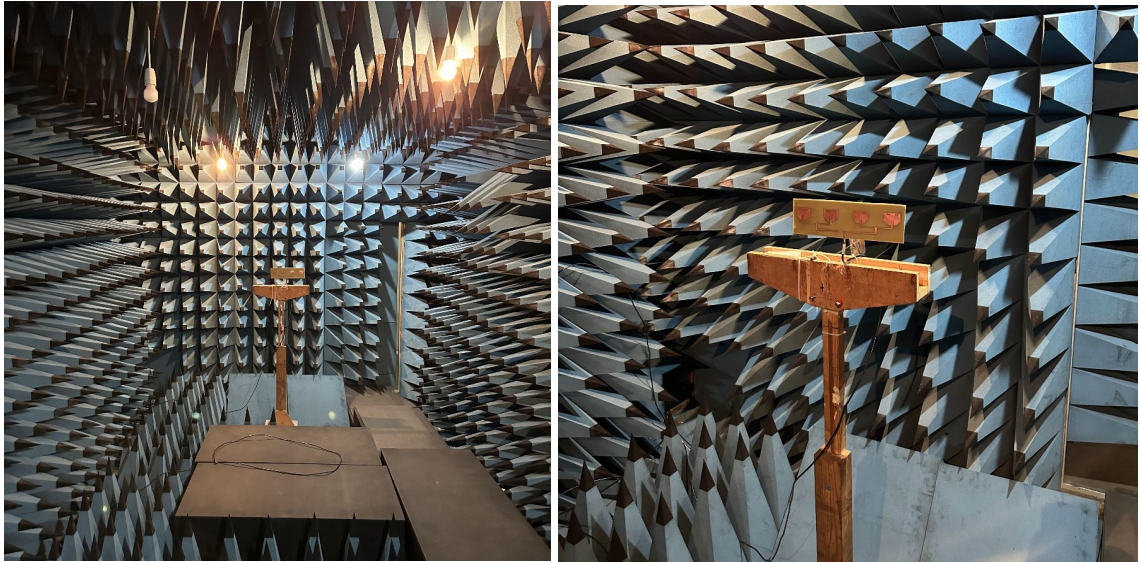
Şekil 3.10. Üretimi tamamlanmış mikroşerit dizi anten

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında tasarlanan mikroşerit antenin benzetim ve ölçüm sonuçları bu başlık altında paylaşılacaktır.

Bu tez çalışmasında iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerin ilkinde, FR-4 dielektrik malzemesi kullanılarak yapılan bükümlü mikroşerit dizi antenin bilgisayar ortamında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında verimli olduğu düşünülen tasarımın üretimi FR-4 dielektrik malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilmiş bükümlü mikroşerit antenin ölçümü yapılmış, benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır. Diğer analiz çalışması üretim aşamalarını içermemekle birlikte sadece benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen mikroşerit dizi anten tasarımında aynı mekaniksel ölçülerde FR-4 malzeme yerine Rogers RT5880 dielektrik malzemesinin kullanımı ile dielektrik sabitin ve dielektrik kalınlığın değişmesinin analiz sonuçlarında ne gibi değişiklere neden olacağı araştırılmıştır.

Analizler; benzetim sonuçları CST Studio programı kullanılarak, ölçümler ise VNA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu integrasyon tekniği ile problem çözme becerisine sahip CST programı, literatürde de sıklıkla tercih edilen programlar arasında yer almaktadır (Ates vd. 2019). Üretim sonrası ölçümler Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM) içerisinde bulunan yansısız odada gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği Şekil 5.1’de verilmiştir. Yansısız oda içerisinde LibreVNA model VNA kullanılmıştır. Açık kaynak erişime sahip LibreVNA, 2 port giriş/çıkış özelliği ile 100 kHz – 6 GHz frekans bandında çalışma özelliğine sahiptir.



(a)

(b)

Şekil 4.1. a) Yansısız oda test düzeneği; b) Yakından incelemesi

Analiz sonuçlarının toplanıp tek bir grafik üzerinde ve daha düzenli bir halde gösterilmesinde literatürde de sıklıkla kullanılan MATLAB programı tercih edilmiştir. Matematik ve veri analizi için güçlü bir kütüphane barındıran MATLAB, analiz sonuçlarının yorumlanması ve görselleştirilmesinde geniş bir bakış açısı sağlamaktadır. Evrensel olduğu için, başka alanlarda çalışan araştırmacılar da yapılan çalışmadaki sonuçları daha rahat anlayabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı analiz sonuçlarının gösterilmesinde MATLAB programı tercih edilmiştir.

Çizelge 4.1. FR-4 ve Rogers RT5880 dielektrik malzemelerin temel özelliklerinin karşılaştırılması

Özellikler	FR-4	Rogers RT5880
Dielektrik Sabiti	4,3	2,2
Kalınlık (mm)	1,6	0,78 – 1,57 – 3,17
Maliyet	Düşük	Yüksek
Esneyebilme	Düşük	Yüksek
Literatürde Kullanım Oranı	Orta	Yüksek

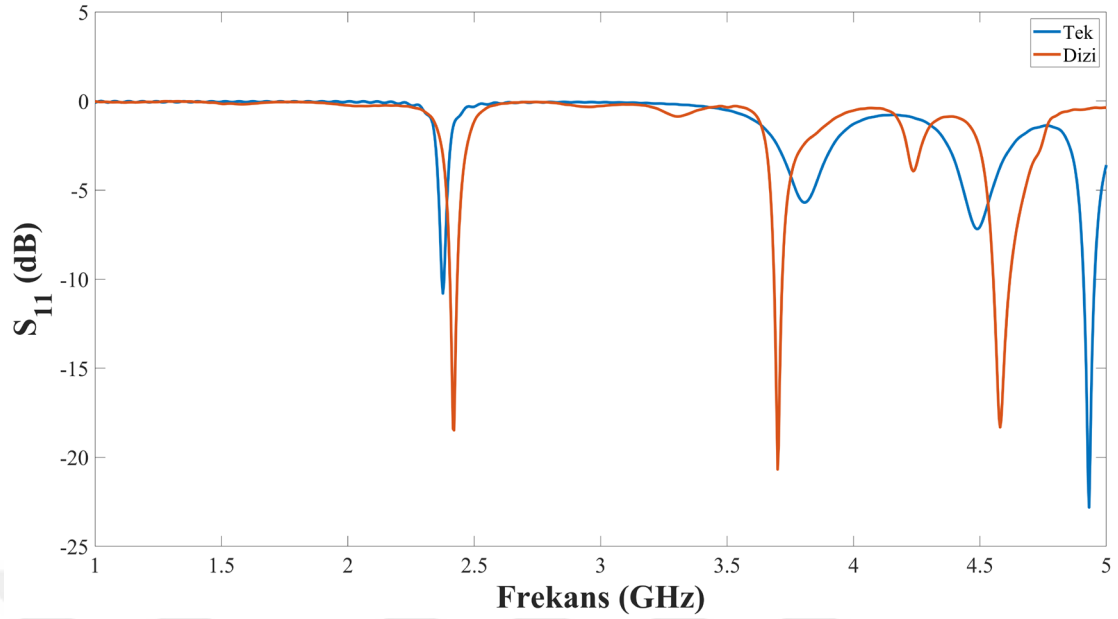
Analiz sonuçları, nihai tasarıma ulaşılmış yarıklı mikroşerit dizi anten ve bu antenin üretilmiş halinin kıyaslamalarını içermektedir. Nihai tasarım elde edilene kadar yapılan benzetim sonuçları burada paylaşılacaktır. Bu sonuçların paylaşımından sonra analizlerin sonuçlarına geçilecektir.

4.1. Nihai Tasarımın Belirlenmesi

Tasarım süreçlerinde ilk olarak temel tasarıma sahip mikroşerit antenin benzetimiyle başlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda yansıma katsayısı, çalışma frekansı gibi değerlerin uyuşmaması sebebiyle aynı tasarımda dizi anten çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Temel tasarımdaki yama anten ile dizi antenin mekaniksel kıyaslamasına ait sonuçlar Çizelge 5.2’de, yansıma katsayılarının kıyaslama sonuçları Şekil 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Temel tasarıma sahip tek yama anten ile dizi anten analiz sonuçları karşılaştırılması

Parametreler	Sonuçlar	
	Tek Yama Anten	Dizi Anten
Yama genişliği (mm)	38	39
Yama yüksekliği (mm)	29	29
Yamalar arası mesafe (mm)	–	60
Dielektrik genişliği (mm)	76	377
Dielektrik yüksekliği (mm)	68	85
Çalışma frekansı (GHz)	2,37	2,42
S ₁₁ (dB)	– 10,8	– 18,47
Yönlülük (dBi)	6,87	13,6

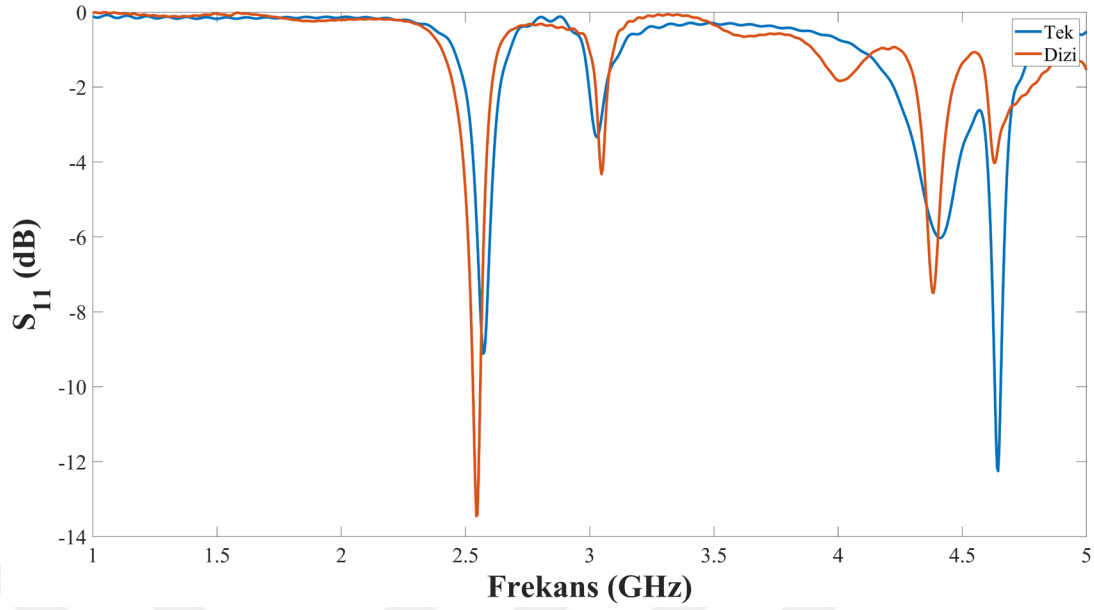


Şekil 4.2. Temel tasarıma sahip tek yama anten ile dizi antenin yansımaya katsayıları karşılaştırması

Yarıklı tasarıma sahip mikroşerit yama anten ve mikroşerit dizi antenin sonuçlarının karşılaştırılması burada verilmiştir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi insansız hedef uçaklar için mikroşerit dizi antenlerin kullanımı, fiziksel ölçülerde daha uygun bulunmuştur. Mekaniksel kıyaslama sonuçları Çizelge 5.3'te, yansımaya katsayılarının kıyaslama sonuçları Şekil 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yarıklı tasarıma sahip tek yama anten ile dizi anten analiz sonuçları karşılaştırılması

Parametreler	Sonuçlar	
	Tek Yama Anten	Dizi Anten
Yama genişliği (mm)	40	40
Yama yüksekliği (mm)	28,75	28,75
Yamalar arası mesafe (mm)	—	40
Dielektrik genişliği (mm)	80	300
Dielektrik yüksekliği (mm)	60	90
Çalışma frekansı (GHz)	2,57	2,54
S_{11} (dB)	-9,11	-13,44
Yönlülük (dBi)	4,71	13,6

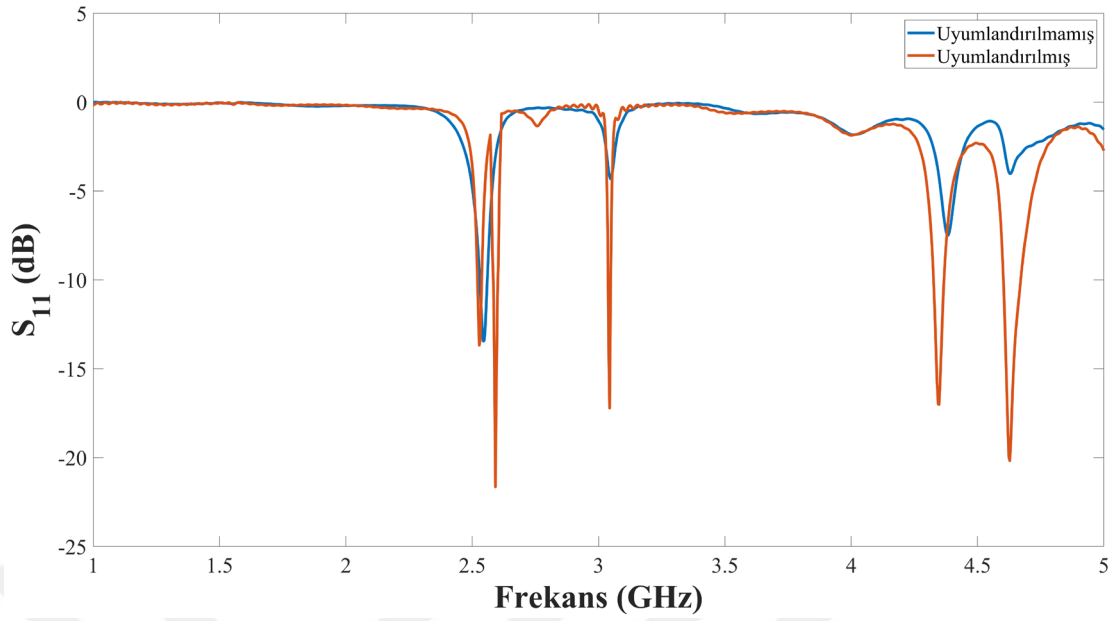


Şekil 4.3. Yarıklı tasarıma sahip tek yama anten ile dizi antenin yansımaya katsayıları karşılaştırması

Elde edilen sonuçlar ışığında çalışma frekansı hedefe yaklaşmış fakat yansımaya katsayısı değeri istenen değerden uzaktadır. Bundan dolayı empedans uyumlandırması gerçekleştirilmiştir. Uyumlandırma yapıldıktan sonraki analiz sonuçları, yarıklı tasarımdaki dizi anten ile kıyaslanmıştır ve mekaniksel karşılaştırma Çizelge 5.4’te, yansımaya katsayısı karşılaştırması Şekil 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Yarıklı tasarıma sahip dizi antenlerin empedans uyumlandırmadan önce ve sonraki karşılaştırılması

Parametreler	Sonuçlar	
	Uyumlandırma Yapılmamış Dizi Anten	Uyumlandırma Yapılmış Dizi Anten
Yama genişliği (mm)	40	40
Yama yüksekliği (mm)	28,75	28,75
Yamalar arası mesafe (mm)	40	40
Dielektrik genişliği (mm)	300	300
Dielektrik yüksekliği (mm)	90	90
Çalışma frekansı (GHz)	2,54	2,59
S_{11} (dB)	- 13,44	- 21,64
Yönlülük (dBi)	13,6	13



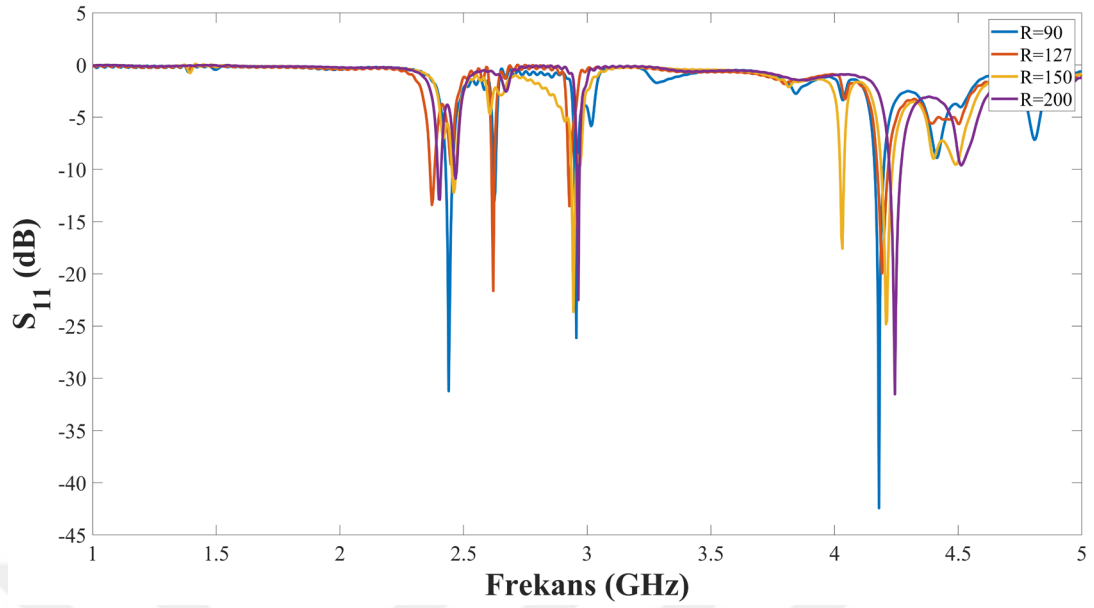
Şekil 4.4. Yarıklı tasarıma sahip dizi antenlerin empedans uyumlandırmadan önce ve sonraki yansıma katsayıları karşılaştırılması

4.2. Farklı Bükülme Açıları Kıyaslaması

Empedans uyumlandırması sonucu hedeflenen değerlere yaklaştığı görülmüştür. Çalışma kapsamında tasarlanan antenin bükümlü olması hedeflendiği için farklı büküm değerlerinde benzetimler yapılmış ve mekaniksel karşılaştırma sonuçları Çizelge 5.5'te, yansıma katsayıları karşılaştırılması Şekil 5.5'te verilmiştir. Bükülme değerleri, antenlerin altında bulunan hayali bir silindirin çap değeri belirtilerek bükülmektedir.

Çizelge 4.5. Farklı bükülme açılarındaki sonuçların karşılaştırılması

Parametreler	Sonuçlar			
	R = 90	R = 127	R = 150	R = 200
Çalışma Frekansı (GHz)	2,44	2,62	2,94	2,96
S11 (dB)	- 31,22	- 21,63	- 23,64	- 22,5
Yönlülük (dBi)	5,62	6,54	4,38	6,13



Şekil 4.5. Farklı bükülme değerlerine göre yansıma katsayıları karşılaştırılması

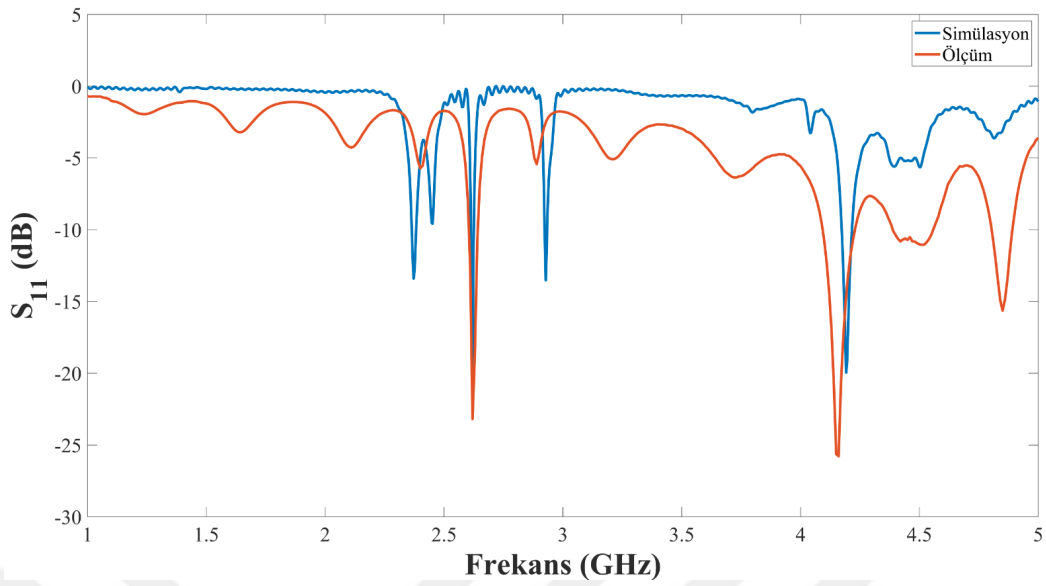
Çalışmada amaç ve hedeflere en yakın değerler $R=127$ mm bükülmedeki sonuçlarda elde edilmiştir. Benzetim ve ölçüm sonuçları bu değere göre devam edecektir. Nihai tasarımın özellikleri Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Nihai mikroşerit dizi antenin teknik özellikleri

Parametreler	Sonuçlar
Yama genişliği (mm)	40
Yama yüksekliği (mm)	29,75
Yamalar arası mesafe (mm)	40
Dielektrik genişliği (mm)	300
Dielektrik yüksekliği (mm)	90
Çalışma frekansı (GHz)	2,62
S11 (dB)	- 21,63
Yönlülük (dBi)	6,54
Bükülme (mm)	127

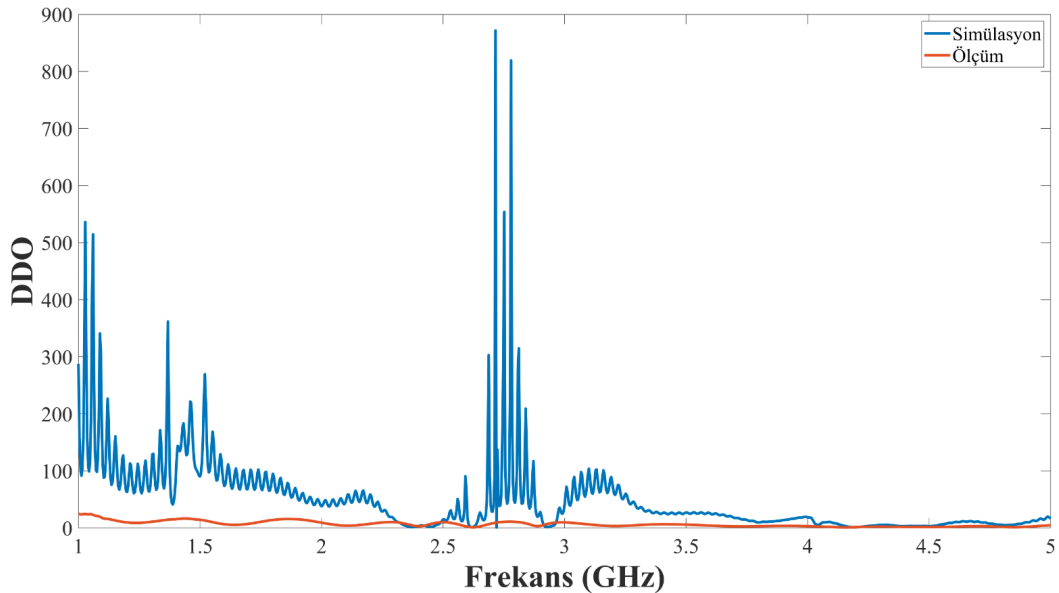
4.3. Benzetim ve Ölçüm Sonuçları

Farklı tasarım ve bükülme açılarına göre karşılaştırmalar yapılmış, nihai tasarım ve bükülme değeri elde edilmiştir. Bu değerler ile birinci analiz çalışmasının sonuçları burada paylaşılmıştır. Benzetim çalışmalarının ve ölçümlerin sonuçları Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Nihai tasarlanan yarıkli mikroşerit dizi antenin benzetim ve ölçüm sonrası yansımaya katsayısı sonuçları

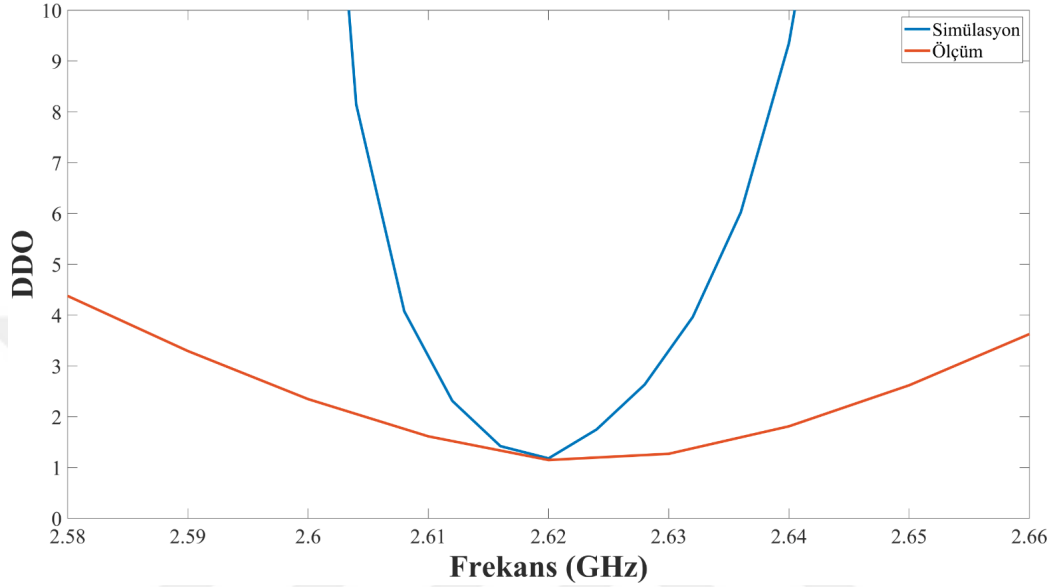
S_{11} parametresi, çalışma frekansı $f = 2,62$ GHz değerinde incelendiğinde; bilgisayar ortamında gerçekleştirilen benzetim sonucunda yansımaya katsayısı $S_{11} = -21,63$ dB değeri elde edilirken, yansımaz odada VNA ile gerçekleştirilen ölçüm sonucunda yansımaya katsayısı $S_{11} = -23,19$ dB değeri elde edilmiştir. Bu değerler tez çalışmasının hedefleri arasında yer alan S_{11} değerinin altında olup, hedefe ulaşıldığını göstermektedir. Değerlerin birbirleriyle tutarlı olması, benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçlarının birbirleriyle uyumlu ve doğru sonuçlar verdiğini kanıtlar niteliktedir.



Şekil 4.7. Tasarlanan antenin benzetim ve ölçüm sonrası DDO sonuçları

Duran dalga oranı, çalışma frekansı $f = 2,62$ GHz değerinde incelendiğinde; bilgisayar ortamında gerçekleştirilen benzetim sonucunda $DDO = 1,18$ değeri elde

edilirken, yansısız odada VNA ile gerçekleştirilen ölçüm sonucunda $DDO = 1,14$ değeri elde edilmiştir. Bu değerler tez çalışmasının hedefleri arasında yer alan DDO değerinin altında olup, hedefe ulaşıldığını göstermektedir. Değerlerin birbirleriyle tutarlı olması, benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçlarının birbirleriyle uyumlu ve doğru sonuçlar verdiğini kanıtlar niteliktedir. Hedeflenen frekans değerindeki DDO sonucu, Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. DDO sonucunun yakından gösterimi

S_{11} ve DDO parametreleri incelendikten sonra, diğer önemli parametrelerden yönlülük ve kazanç sonuçları incelenmiştir. Bu parametreler deneysel olarak incelenmediği için sadece benzetim sonuçları paylaşılmıştır. Aynı sonuçlar hem birinci analiz hem de ikinci analiz sonuçları olarak paylaşılacağından, yönlülük ve kazanç grafikleri ikinci analiz kısımlarında paylaşılmıştır.

Çizelge 4.7. Benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ($f = 2,62$ GHz)

İncelenen Parametre	Analiz Türü	Sonuçlar
DDO	Benzetim	1,18
DDO	Ölçüm	1,14
S_{11} (dB)	Benzetim	-21,63
S_{11} (dB)	Ölçüm	-23,19
Yönlülük (dBi)	Benzetim	6,54
Gerçekleştirilmiş Kazanç (dBi)	Benzetim	-0,67

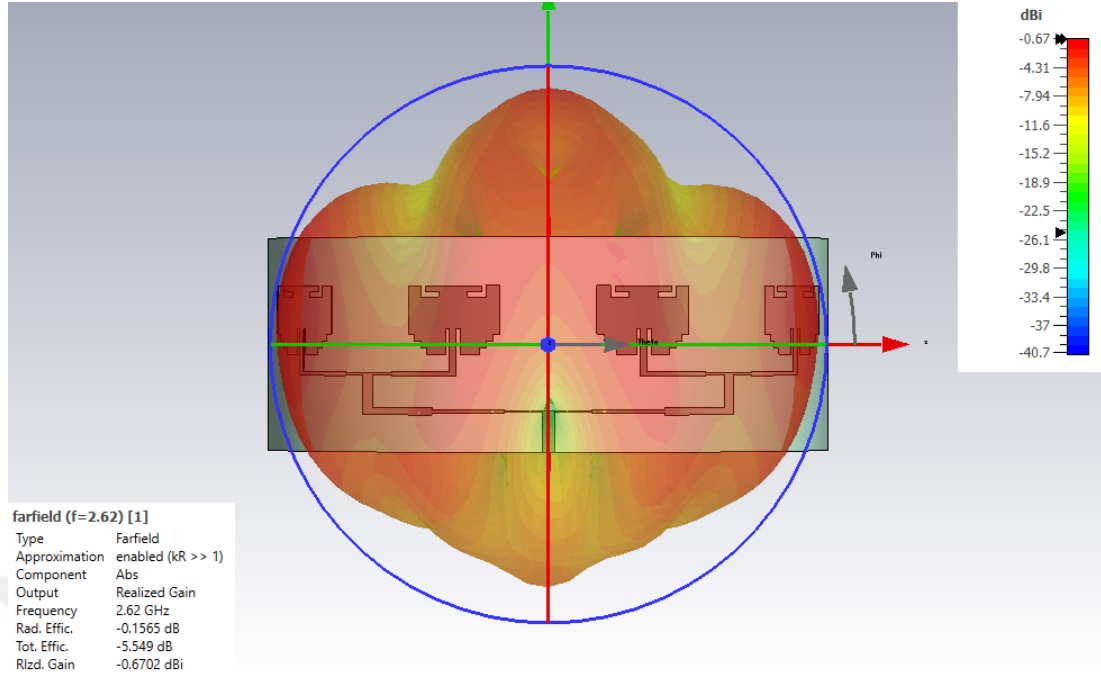
İkinci analiz çalışmasının sonuçları burada paylaşılmıştır. Benzetim sonuçlarının farklı dielektrik malzemeler altında incelenmesini içermektedir.

Farklı dielektrik malzemelerde temel özelliklerin değişmesi, bir antenin çalışma özelliklerine doğrudan etkide bulunmaktadır. Bu analiz çalışmasında asıl hedef, bu etkilerin incelenmesidir. Analizin içeriğinde kullanılan dielektrik malzemelerin özellikleri Çizelge 5.8’de verilmiştir. Çizelgenin içeriğindeki bilgiler ile yapılan benzetim çalışmalarında elde edilen veriler ve grafikler, Şekil 5.5-5.8 arasında paylaşılmıştır.

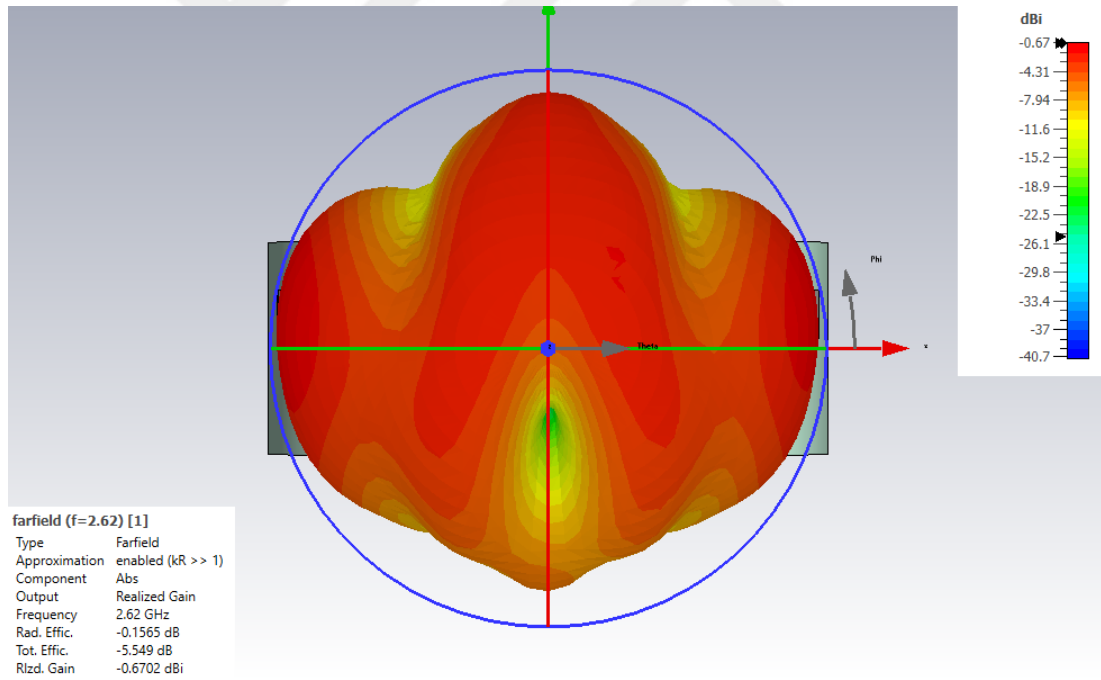
Çizelge 4.8. Analiz çalışmasında kullanılan dielektrik malzemelerin özellikleri

Özellikler	FR-4	Rogers RT5880
Dielektrik Sabiti	4,3	2,2
Dielektrik Kalınlığı (mm)	1,6	1,57
Bakır İletken Yol Kalınlığı (mm)	0,035	0,035

Benzetim sonuçlarının uzak alan ışıma örüntüsü grafikleri verilmiştir. Yönlülük ve gerçekleştirilmiş kazanç verileri bu grafiklerde verilmiştir.

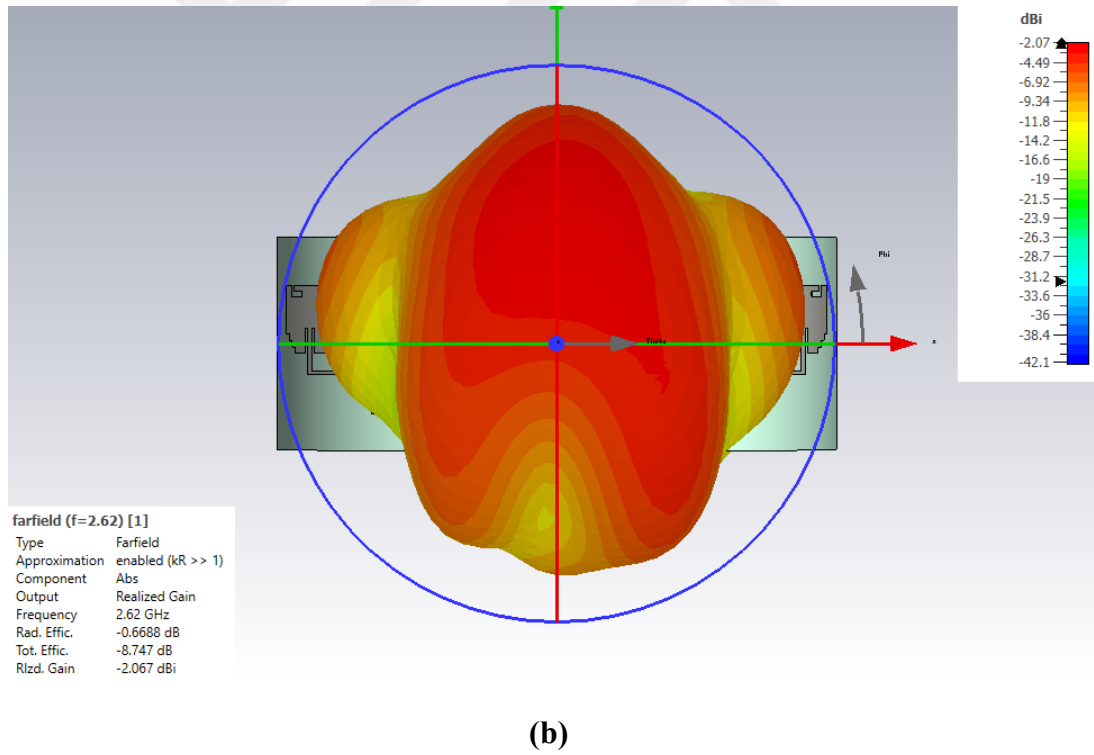
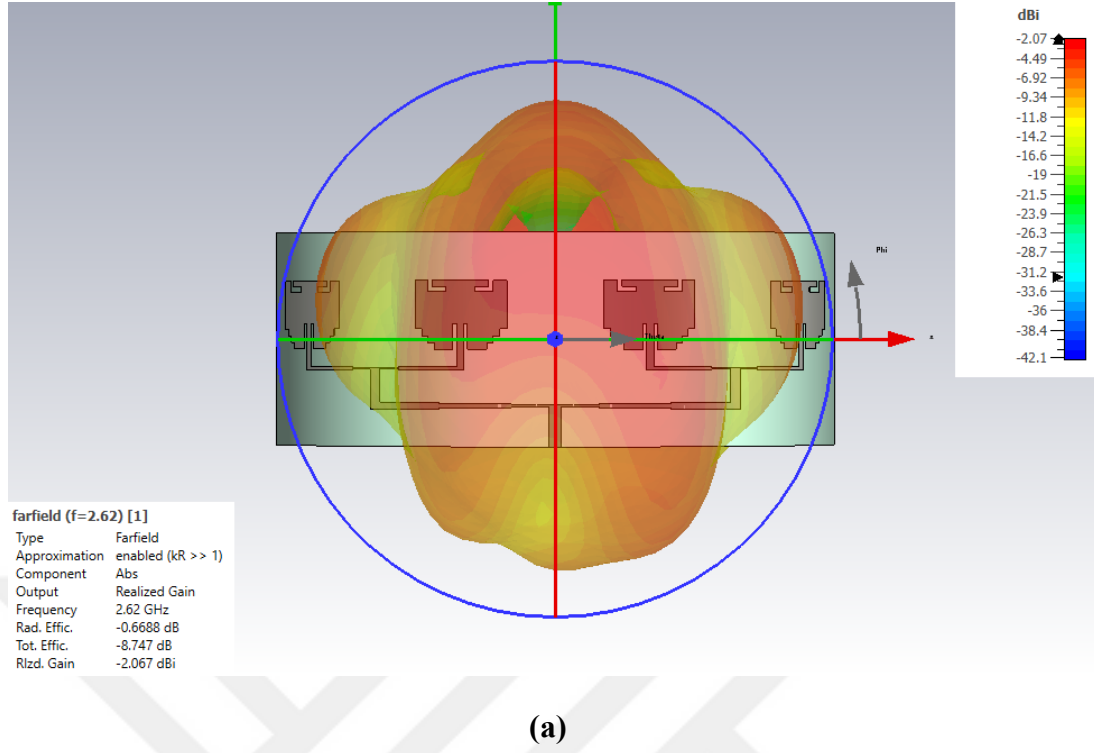


(a)

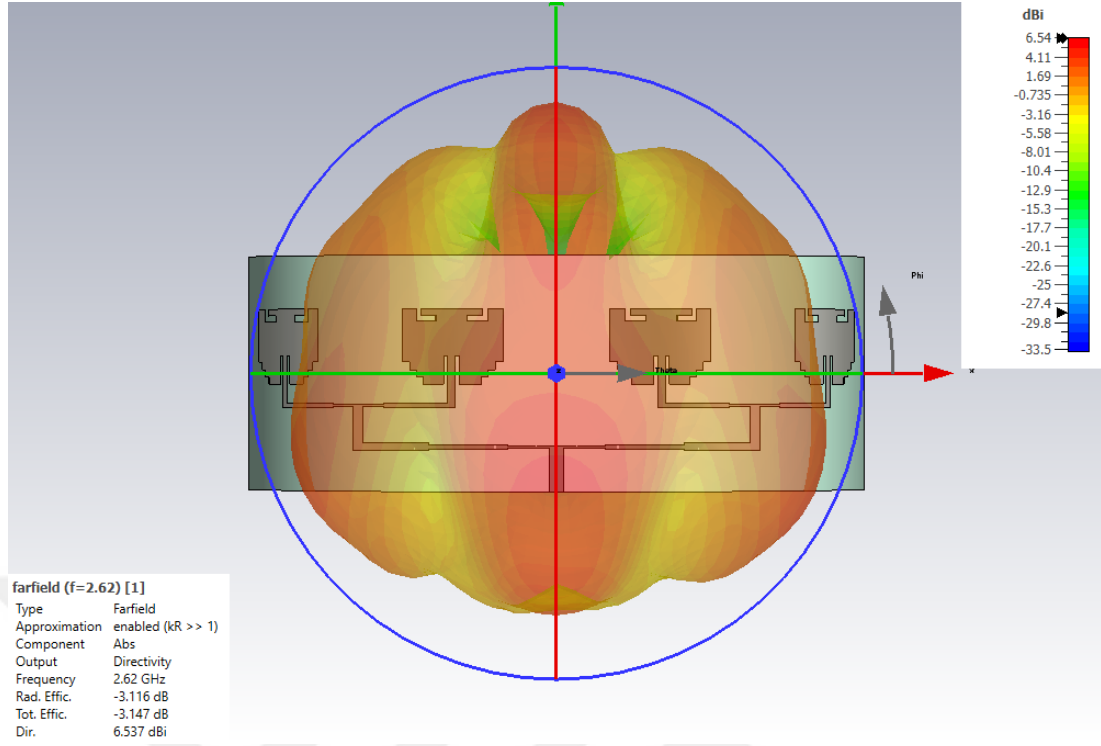


(b)

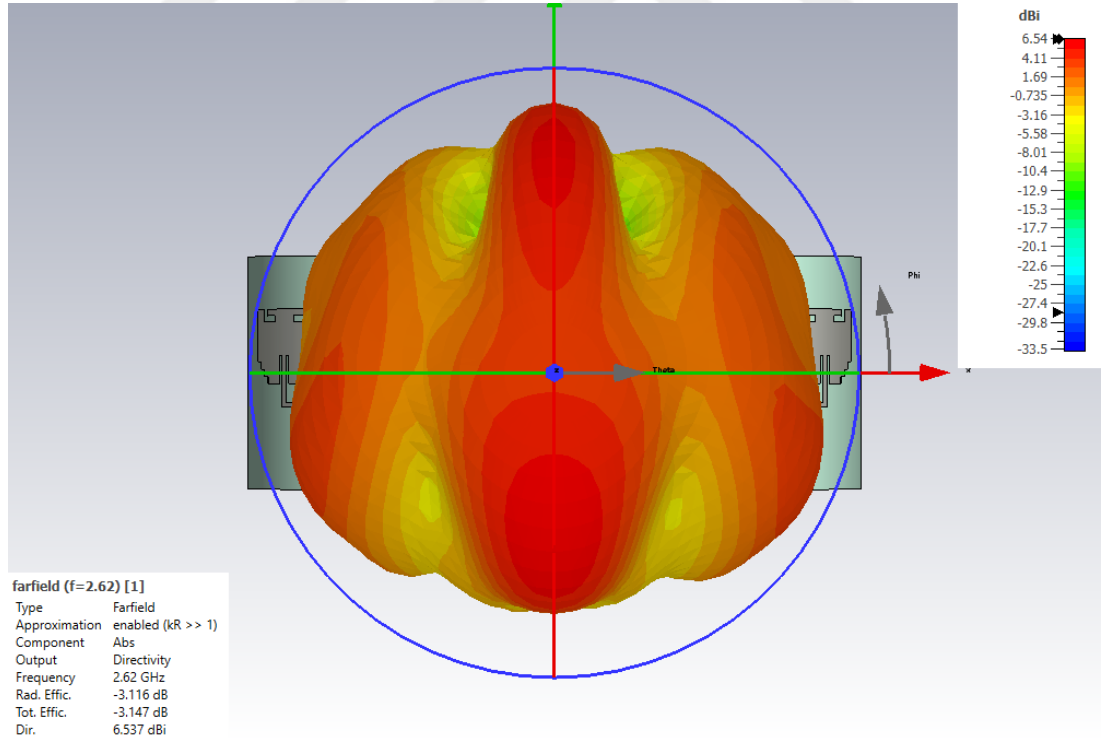
Şekil 4.9. FR-4 dielektrik malzemesinin $f = 2,62$ GHz’de üç boyutlu ışıma örüntüsü grafiği (gerçekleştirilmiş kazanç); **a)** Transparan uzak alan gösterimi; **b)** Transparan olmayan uzak alan gösterimi



Şekil 4.10. 5880 dielektrik malzemesinin $f = 2,62$ GHz’de üç boyutlu ışıma örüntüsü grafiği (gerçekleştirilmiş kazanç); **a)** Transparan uzak alan gösterimi; **b)** Transparan olmayan uzak alan gösterimi

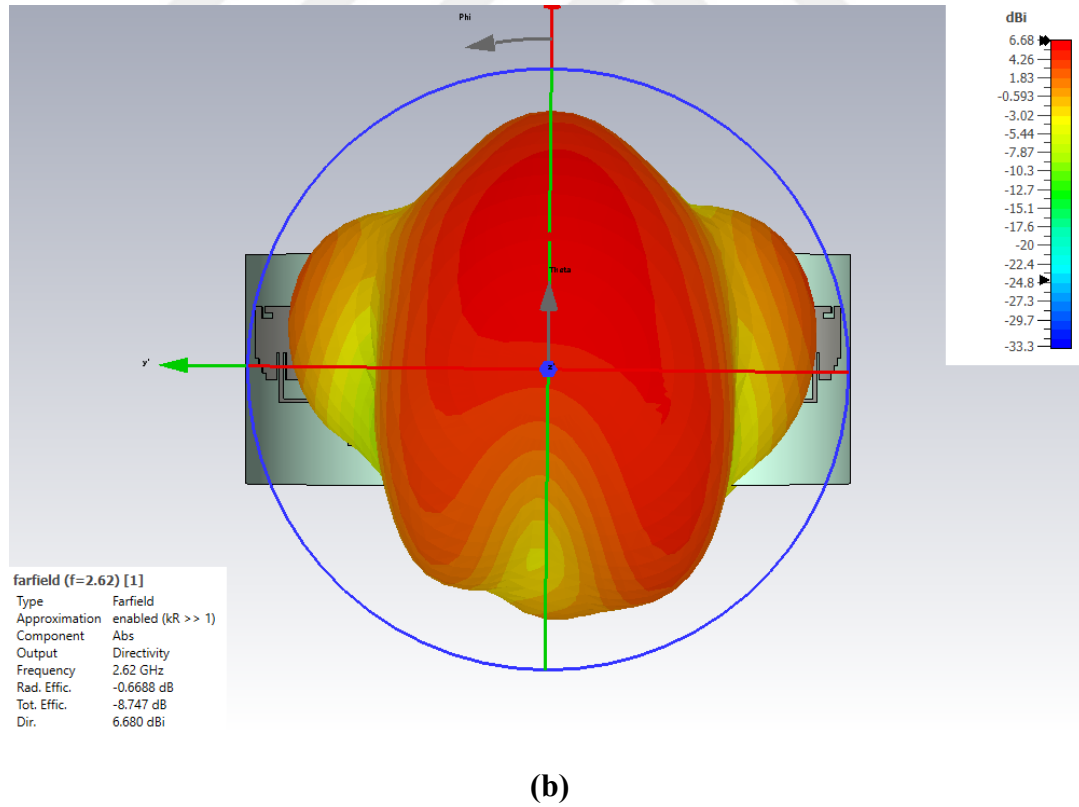
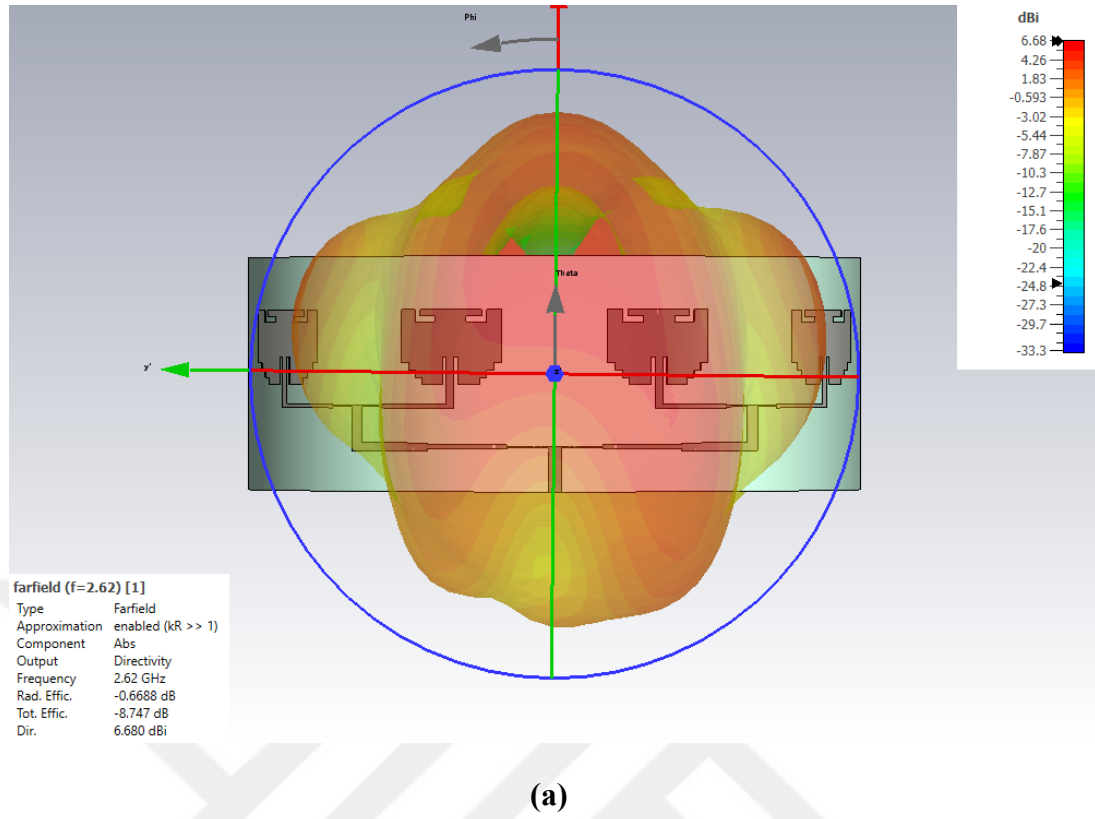


(a)

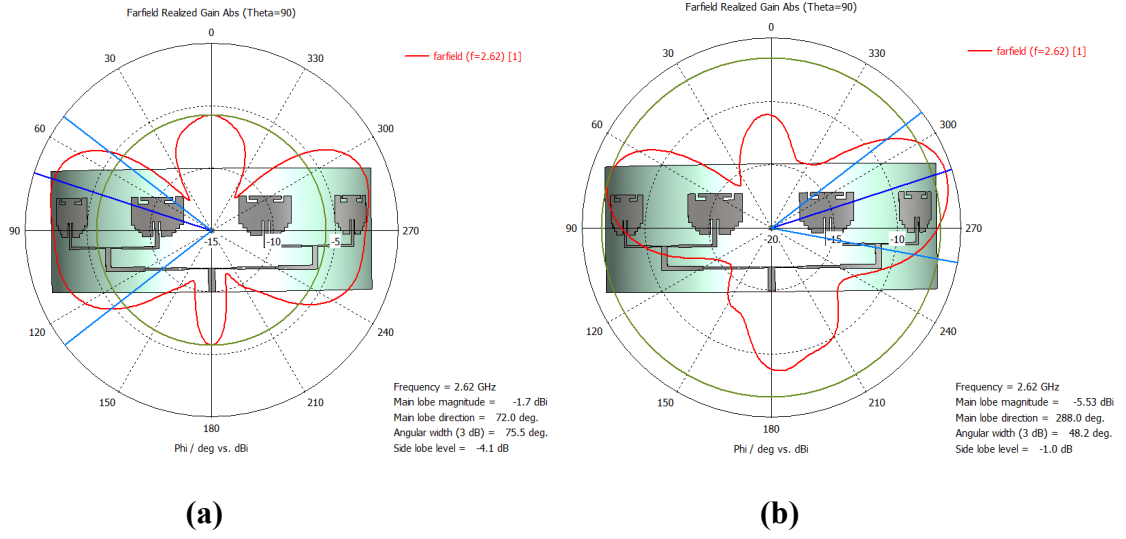


(b)

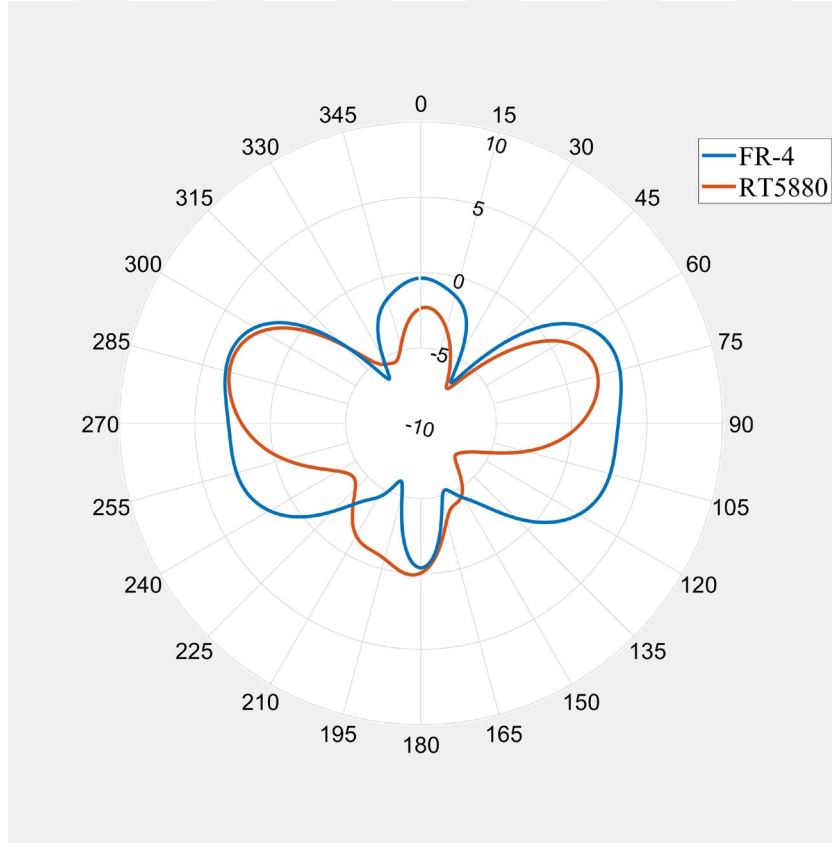
Şekil 4.11. FR-4 dielektrik malzemesinin $f = 2,62$ GHz’de üç boyutlu ışınma örüntüsü grafiği (yönlülük); **a)** Transparan uzak alan gösterimi; **b)** Transparan olmayan uzak alan gösterimi



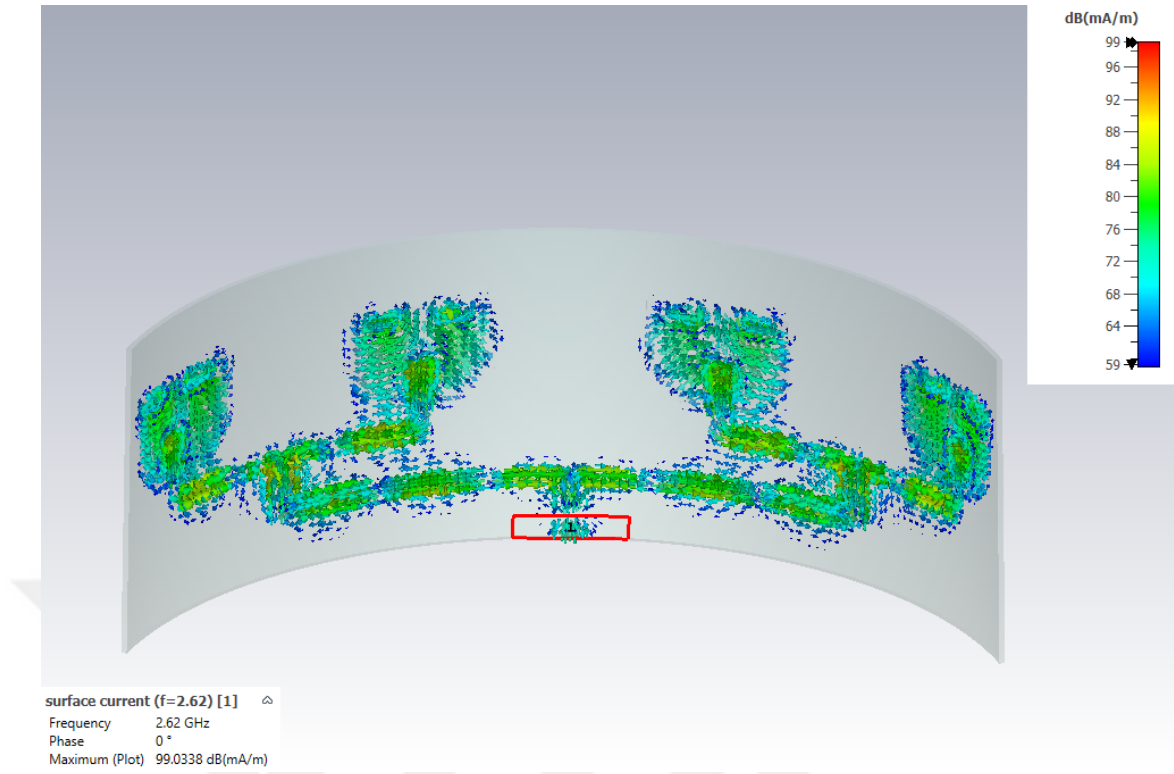
Şekil 4.12. 5880 dielektrik malzemesinin $f = 2,62$ GHz’de üç boyutlu ışıma örüntüsü grafiği (yönlülük); **a)** Transparan uzak alan gösterimi; **b)** Transparan olmayan uzak alan gösterimi



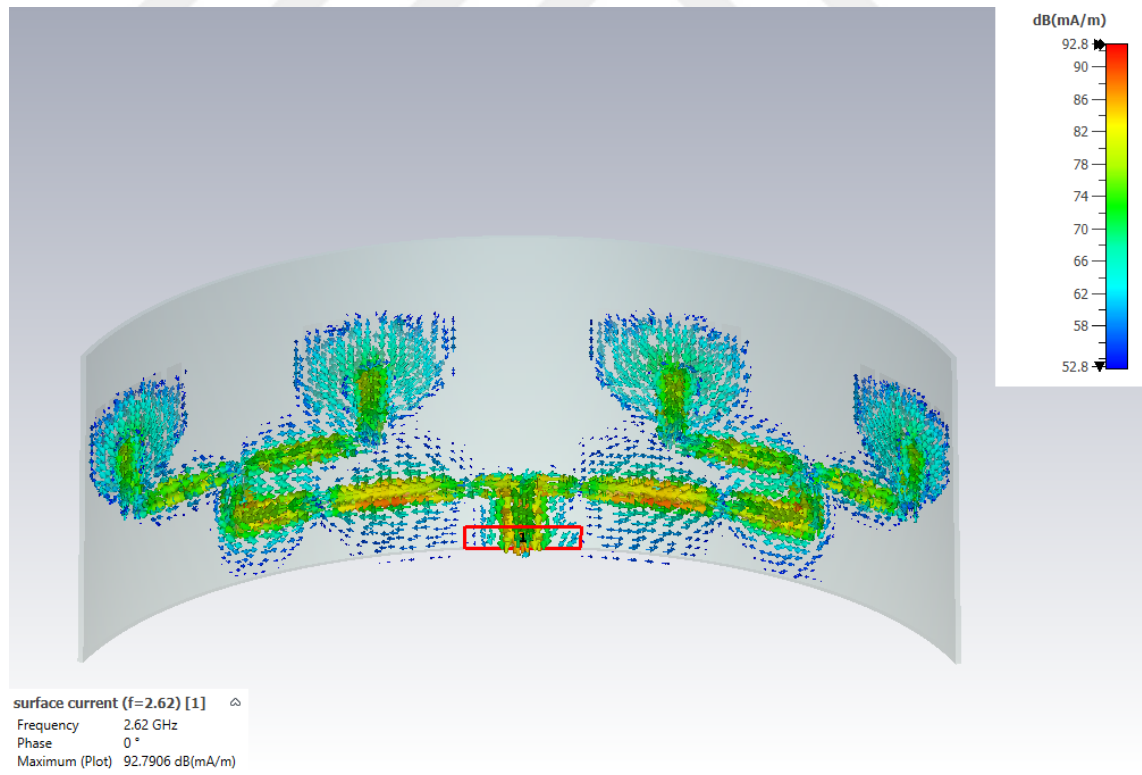
Şekil 4.13. Anten üzerinde $f = 2,62$ GHz’de iki boyutlu uzak alan ışıma örüntüsü; **a)** FR-4; **b)** 5880



Şekil 4.14. Antensiz $f = 2,62$ GHz’de iki boyutlu uzak alan ışıma örüntüsü karşılaştırılması



(a)



(b)

Şekil 4.15. Tasarlanan antenin yüzey akım benzetim sonuçları; a) FR-4; b) 5880

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, insansız hedef uçaklar için bükümlü mikroşerit dizi anten tasarımı ve analizi konusu araştırılmıştır. İnsansız hedef uçakların aerodinamik yapısını bozmamak için bükümlü bir yapıda tasarımı yapılan mikroşerit antenin, hava aracının ölçülerinde bükülme özelliği sayesinde kolaylık sağlamaktadır.

Genel hatlarıyla mikroşerit antenler geniş bir kullanım alanına sahiptir. Akıllı ev sistemleri, sağlık, kablosuz şarj sistemleri gibi sosyal konularda da tercih edilirken askeri alanlarda da hava ve kara araçlarında, kablosuz iletişim için tercih edilen anten türlerinden biridir. Kullanım yerlerine göre dar bant genişliğine sahip olması bazı durumlarda avantaj haline gelebilmektedir. Diğer anten türlerine kıyasla hafif ve ergonomik yapıda olmasından dolayı tercih sebebi haline gelmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı, insansız hedef uçakların yaptıkları manevralarda veri kaybı yaşamamaları için silindirik bükümlü bir mikroşerit dizi anten tasarımı ve analizi gerçekleştirmektir. Bu amacın yanında, tasarlanan antenin yönlü bir anten olması, S bandda ve $f = 2,62$ GHZ değerinde çalışabilir olması, -20 dB ve daha düşük geri yansıma katsayısına sahip olması ve $DDO \leq 1,80$ değerlerinde olması, tez çalışmasının hedefleridir. Yapılan çalışmalar, geliştirilen farklı tasarımlar, çok zaman alan benzetimler, üretim aşamalarında yaşanan problemlerin ardından elde edilen sonuçlara bakıldığında, tezin amacının ve hedeflerinin başarıyla gerçekleştirildiği görülmüştür. Proje, başarıyla tamamlanmış kabul edilmektedir.

Literatürde konuyla alakalı hem lisansüstü çalışmalar hem de makale çalışmaları sıklıkla gerçekleştirilmektedir. Mikroşerit antenlerin birçok alanda kullanılabilir olması, geniş bir çalışma alanı sunmaktadır. Farklı frekans bantlarında farklı görevlerde de kullanılabilir olması, temelinde haberleşme sorununa çözüm olan birçok probleme ışık tutmaktadır. Mikroşerit antenlerin kullanımıyla alakalı son zamanlarda ülkemizde ve uluslararası pazarda yeni girişimci sayısı artmakta, böylece farklı sektörlerde de mikroşerit antenin kullanım alanı genişleyerek büyümektedir. Ulusal ve uluslararası pazarda ticaretlerin gerçekleşmesi, ülke ekonomisine doğrudan katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışma ile literatüre ve sanayiye kazandırılması düşünülen konular şöyle verilmiştir:

- Bu tez çalışmasında elde edilen teorik ve uygulamaya dayalı bilgilerin, gelecek çalışmalara yol gösterici olacağı düşünülmektedir. İnsansız hava araçlarında mikroşerit antenlerin araç içi haberleşme, X ve Ku bandı gibi askeri frekanslarda çalışma, esnek yapısı sayesinde en ufak boşluklarda dahi çalışabilme gibi daha farklı görevlerde de kullanılabilir olacağı, son zamanlarda yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Lisans ve lisansüstü düzeylerde bu konularda yapılacak çalışmalarda, bu tez çalışmasındaki elde edilen verilerin kullanılabileceği düşünülmüştür.
- Anten tasarımı ve haberleşme konularında ülkemizde faaliyet gösteren girişimcilerin, bu tez çalışmasında elde edilen verilerden yararlanabileceği, gelecekteki projelerine ışık tutabileceği düşünülmüştür.
- Tasarlanan mikroşerit antenin, bilgisayar destekli hesaplama ve tasarım

programlarında geliştirildiği önceki başlıklarda belirtilmiştir. Bu bilgisayar programları, uluslararası şirketler tarafından yönetilmektedir ve akademi haricinde özellikle sanayide ekonomik olarak şirketleri zorlayan durumlar arasında yer almaktadır. Lisans ücretlerinin değişkenlik göstermesi, gelişmekte olan birçok girişi olumsuz etkilemektedir. Yurt içinde geliştirilen hesaplama ve tasarım programlarının geliştirilmesi, birçok araştırmacı ve sanayi personeli için önem arz etmektedir.

Literatürde bulunan çalışmalar ile mevcut çalışmanın karşılaştırıldığı tablo Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Benzer çalışmalarla kıyaslama tablosu

Çalışmalar	Parametreler				
	Boyut (mm)	S11 (dB)	Bant Genişliği (MHz)	Yönlülük (dBi)	Çalışma Frekansı (GHz)
(Bicer, 2023)	30 x 30	- 28	1000	-	7,2
(Düzgüncü, 2022)	830 x 92	-20,20	175,5	-	1,28
(Navarro-Mendez vd, 2015)	90 x 50	- 30	100	-	2,45
(Bai vd, 2021)	800 x 800	-23,5	1900	-	15 ; 17
(Altınel ve Kahrıman, 2016)	125,5 x 121	-21 ; -14,9	710	-	2,45 ; 5,8
<i>Mevcut Çalışma</i>	300 x 90	-23,19	20	5,6	2,62

Mikroşerit antenlerin üretimi konusunda, uluslararası ticaretin ekonomiye olumsuz etkileri göz önüne alındığında yurt içinde yerli ve milli mikroşerit antenlerin üretimine doğrudan katkı sağlayabilen girişimlerin desteklenmesi önerilmektedir. Dielektrik malzeme üretiminin ülkemizde çok az sayıda yapıyor olması, yine bu alandaki çalışmaları kısıtlamaktadır.

Elde edilen sonuçlar, dielektrik katsayısı daha küçük olan dielektrik malzemelerin mikroşerit anten üretiminde tercih edilmesini destekler niteliktedir. İmkanlar dahilinde, mikroşerit antenlerin araştırılması ve üretilmesi konusunda yapılan çalışmalarda, daha düşük dielektrik katsayısına sahip malzemelerin kullanılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Ali Khan, M.U., Raad, R., Tubbal, F., Theoharis, P.I., Liu, S., Foroughi, J. 2021. Bending analysis of polymer-based flexible antennas for wearable, general IoT applications: A Review. *Polimers*, 13(3): 357.
- Altinel, G., Kahriman, M. 2016. Çok bantta çalışan dikdörtgen eksiltmeli fraktal yapıda yarıkli anten tasarımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(3): 185-188.
- Alwareth, H., Ibrahim, I.M., Zakaria, Z., Al-Gburi, A.J.A., Ahmed, S., Nasser, Z.A. 2022. A wideband high-gain microstrip array antenna integrated with frequency-selective surface for Sub-6 GHz 5G Applications. *Micromachines*, 13(8):1215.
- Amaro, N., Mendes, C., Pinho, P. 2011. Bending Effects on a Textile Microstrip Antenna. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), pp. 1-4, 03-08 July, Washington, USA.
- Arpaio, M.J., Fuschini, F., Vitucci, E.M., Degli Esposti, V., Barbiroli, M., Masotti, D. 2019. Lightweight Microstrip Patch Array for Broadband UAV Applications over 5G Networks. Conference on Microwave Techniques (COMITE), pp. 1-5, 16-18 April, Pardubice, Czech Republic.
- Arvas, M. 2019. Directivity enhancement of 60 GHz microstrip patch antennas using dielectric fabry-perot resonators, MSc Thesis, Istanbul Medipol University, İstanbul, 130 p.
- Ates, K., Kocaer, T.Z., Ozen, S., Kockal, N.U. 2023. Electromagnetic interference shielding effectiveness and microwave absorption performance of plaster mortars containing metal waste chips in X-band frequency range. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 57(3): 230-244.
- Ates, K., Ozen, S., Keskin, H.İ., Ozdinc Polat, L.N. 2019. Design and Modeling of a Microstrip Patch Antenna by Using Finite Difference Time Domain (FDTD) Method and Computer Aided Simulations. Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring), pp. 1-7, 17-20 June, Rome, Italy.
- Ateş, K., Shui, H., Özen, Ş. 2023. 5G Uygulamaları İçin İki Bantlı Milimetre Dalga Mikroşerit Anten Tasarımı. URSİ-TÜRKİYE XI. Bilimsel Kongresi, ss. 1-3, 31 Ağustos-2 Eylül, İstanbul, Türkiye.
- Ateş, K., Yeter, C., Özen, Ş. 2020. WLAN Uygulamaları İçin 4x4 MIMO Antenin Elektromanyetik Dozimetri Karakteristiğinin İncelenmesi. Tıp Teknolojileri Kongresi (TIPTEKNO'20), ss. 1-4, 19-20 Kasım, Antalya, Türkiye.
- Aung, M.S., Lwin, Z.M., Tun, H.M. 2017. Development of a dual band 4x4 microstrip MIMO antenne for LTE mobile base stations. *International Journal Of Scientific Engineering And Technology Research*, 06(15): 2838-2841.
- Aydın, E. 2019. Microstrip patch antenna design for ultra-wideband communications. MSc Thesis, Alparslan Türkeş Science and Technology University, Adana, 111 p.
- Bagus, H.B., Pambudiyatno, N., Suprpto, Y., Oka, I.A.M., Faizah, F. 2023. Wideband Microstrip Array Antenna Using Defected Ground and Microstrip Structure for Monopulse Secondary Surveillance Radar Application. Proceedings of the International Conference on Advance Transportation, Engineering, and Applied

- Science (ICATEAS 2022), pp. 15-25, 21 February, Surabaya, Indonesia.
- Bai, T., Jiang, D., Luo, S., Zhu, K. 2021. Design of cylindrical conformal array antenna based on Microstrip patch unit. *ACES Journal*, 36(8): 1008-1014.
- Balanis, C.A. 2016. Antenna Theory: Analysis and Design Fourth Edition. Wiley. 1104 s.
- Balderas, L.I., Reyna, A., Panduro, M.A., Del Rio, C., Gutierrez, A.R. 2019. Low-Profile conformal UWB antenna for UAV applications. *IEEE Access*, vol.7: 127486-127494.
- Bicer, M.B. 2023. Design of an octagonal-shaped curved sensor antenna for dielectric characterization of liquids. *Measurement*, 207(1): 1-10.
- Dhar, P.K. 2023. Optimization of a circularly polarized conical beam microstrip antenna array conformed on a cylindrical surface using HFSS. *Progress In Electromagnetics Research C*, 130(1): 183-199.
- Düzgünsıvacı, S. 2022. Geniş bant küresel seyrüsefer uydu sistemleri mikroşerit yama anten dizisi analizi ve tasarımı. Yüksek lisans tezi, Milli Savunma Üniversitesi, Ankara, 117 s.
- Erdil, B. 2021. İnsansız hava araçlarının kullanım alanları ile bu araçların Türkiye'nin yurt dışı operasyonlarındaki yer ve önemi. *Bölgesel Araştırmalar Dergisi*, 5(2): 581-607.
- Erol, L.Y. 2020. Design and implementation of microstrip patch antennas from narrowband to ultra-wideband with high interport isolation for in band full duplex communication systems, MSc Thesis, Sabancı University, İstanbul, 75 p.
- Imran, D., Farooqi, M.M., Khattak, M.I., Ullah, Z., Khan, M.I., Khattak, M.A., Dar, H. 2018. Millimeter Wave Microstrip Patch Antenna For 5g Mobile Communication. International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), pp. 1-6, 22-23 February, Lahore, Pakistan.
- Iqbal, A., Sani, F.R., Ullah, Z., Khattak, M.I., Khattak, M.A., Saqib, N., Masood, H. 2018. Comparative Study of Micro Strip Patch Antenna for X Band Using Micro Strip Line Feed and Coaxial Feed. International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), pp. 1-6, 22-23 February, Lahore, Pakistan.
- İl, N., Ateş, K., Özen, Ş. 2023. Electromagnetic field exposure to human head model with various metal objects at sub-6 GHz frequencies. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 42(3): 114-122.
- Jain, K. and Kushwah, V.S. 2021. Design and development of dual band antenna for sub-6 frequency band application. *Materials Today: Proceedings*, 47(19): 6795-6798.
- Khasiyev, M. 2023. 28 GHz frekansında 5G kablosuz haberleşme için S-şekilli mikroşerit anten tasarımı ve analizi. Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, 70 s.
- Kışla, B.C., Şenel, B. 2023. Havacılık Uygulamaları için C Bandı Konformal Anten Tasarımı. URSI-TÜRKİYE XI. Bilimsel Kongresi, ss. 1-3, 31 Ağustos-2 Eylül, İstanbul, Türkiye.
- Koç, H., Geyikoğlu, M.D., Kaburcu, F., Çavuşoğlu, B., Ertuğrul, M. 2018. Silisyum

- Kauçuk Tabanlı Silindir Yapılar Üzerine Mikroşerit Yama Anteni Çalışması. 26th Signal Processing and Communication Applications Conference (SIU), pp. 1-4, 02-05 May, İzmir, Turkey.
- Kuzer, M.M. 2018. Low-cost microstrip patch array antenna for x band satellite applications. MSc Thesis, Istanbul Technical University, İstanbul, 65 p.
- Kütük, H. 2012. 3.3 GHz mikroşerit anten tasarımı ve farklı besleme yöntemleri için analizi. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 83 s.
- Molina, A.A., Huang, Y., Jiang, Y. 2023. A review of unmanned aerial vehicle applications in construction management: 2016 – 2021. *Standarts*, 3(2): 95-109.
- Morsy, M.M. 2022. 4-port planar MIMO antenna using open-slot radiators for 5G new radio (NR) frequency bands n38 (2570 to 2620 MHz) and n41 (2496 MHz – 2690 MHz) applications. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 104: 87-94.
- Navarro-Méndez, D.V., Moy-Li, H.C., Carrera-Suarez, L.F., Ferrando-Bataller, M., Baquero-Escudero, M. 2015. Antenna Arrays for Unmanned Aerial Vehicle. 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-5, 13-17 April, Lisbon, Portugal.
- Olatujoye, B., Saturday, J.C. 2023. Design and performance analysis of 4-element multiband circular microstrip antenna array for wireless communications. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 18(1): 1-7.
- Saini, J., Agarwal, S.K. 2017. Design a Single Band Microstrip Patch Antenna at 60 GHz Millimeter Wave for 5G Application. International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix), pp. 1-4, 01-02 July, Jaipur, India.
- Sajjad, H., Sethi, W.T., Zeb, K., Mairaj, A. 2014. Microstrip Patch Antenna Array at 3.8 GHz for WiMax and UAV Applications. International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Novel EM Structures and Materials, and Applications (iWAT), pp. 1-4, 04-06 March, Sydney, Australia.
- Sarıkaya, K., Hakanoğlu, B.G., Keser, S. 2023. X ve Ku bandı için dikdörtgen ve simetrik l-şekilli yarıklara sahip çoklu bant yama antenlerde malzeme etkileri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknik Dergisi*, 11(2): 1094-1104.

7. EKLER

EK-1: Mikroşerit Yama Antenin Ölçülerini Hesaplayan Matlab Programı

% Yazar: Mesut EROL

clc; clear all; close all;

```
c = 3*(10^8); % c ışık hızını ifade eder.
Er = input('Dielektrik sabitini giriniz:'); % dielektrik sabiti
f0 = input('Çalışma frekansını giriniz:'); % çalışma frekansı
h = input('Dielektrik yüksekliğini giriniz:'); % dielektrik yükseklik
```

% w: yama genişliği ve L: yama yüksekliği olmak üzere

w = c / ((2*f0)*sqrt((er+1)/2));

eff = ((er+1)/2)+((er-1)/2) * ((1+12*(h/w))^(-0.5)); % efektif dielektrik sabiti

Leff = c / ((2*f0)*sqrt(eff)); % efektif uzunluk

dL = (0.412*h)*(((eff+0.3)*((w/h)+0.264)) / ((eff-0.258)*((w/h)+0.8)));
% uzunluğun değişimi

L=Leff-(2*dL); % yama yüksekliği

EK-2: Benzetim ve Ölçüm Sonuçlarını Karşılaştıran Matlab Programı

% Yazar: Mesut EROL

clc; clear all; close all;

cst = importdata('benzetim_sonuc.txt');
vna = importdata('olcum_sonuc.txt');

f_cst= cst.data(:,1); % Veride frekansı değişkene atama
mag_cst = cst.data(:,2); % Veride büyüklüğü değişkene atama
plot(f_cst,mag_cst) % Frekans ve büyüklüğe bağlı grafik çizdirme

xlabel('Frekans (GHz)'); % X eksenine başlık ataması
ylabel('S₁₁ (dB)'); % Y eksenine başlık ataması
hold on

f_vna = vna.data(:,1); % Veride frekansı değişkene atama
mag_vna = vna.data(:,2); % Veride büyüklüğü değişkene atama
plot(f_vna,mag_vna); % Frekans ve büyüklüğe bağlı grafik çizdirme

ÖZGEÇMİŞ

Mesut EROL

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2021-2023	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya/Türkiye
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2017-2021	Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya/Türkiye

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Sistem Tasarım Mühendisi	Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.
2022 – Devam Ediyor	
Proje Uzman Yardımcısı	Akdeniz Üniversitesi
Ağustos 2021 – Aralık 2021	Teknoloji Transfer Ofisi, Antalya
Stajyer Mühendis	Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMİ)
Haziran 2020 – Ağustos 2020	Elektronik Birim Müdürlüğü, Antalya

BURSLAR VE BAŞARILAR

1- Manyetik kuplajlı güç transferiyle elektrikli arabaların şarj edilmesi ve elektromanyetik ölçümü. TÜBİTAK 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Desteği Programı, (Proje No: 1139B412000755).

2- Lift Up + Yüksek Lisans ve Doktora Bilimsel Araştırmalar Programı, Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş. (TUSAŞ).

ESERLER

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Erol M., Ateş K., Özen Ş. (2023). Elektrikli Araçlarda Kablosuz Güç Transferi Sistemi Tasarımı ve Elektromanyetik Alan Maruziyetinin Değerlendirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(1), 605-618. Doi: 10.47495/okufbed.1063629

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Shui H., Erol M., Ateş K., Carlak H.F., Özen Ş. (2023). SAR and Thermal Effects of a Novel Dual-band Microstrip Patch Antenna Design for Sub-6 GHz 5G Applications. Microwave and Optical Technology Letters. (*Değerlendirme Aşamasında*)

