

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GNSS SİSTEMLERİ İÇİN KÜÇÜK BOYUTLU YAMA ANTENİ
VE KOMPAKT ANTEN DİZİSİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Yusuf ŞAHİN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GNSS SİSTEMLERİ İÇİN KÜÇÜK BOYUTLU YAMA ANTENİ
VE KOMPAKT ANTEN DİZİSİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Muhammed Yusuf ŞAHİN
(504221323)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mesut KARTAL

HAZİRAN 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DESIGN OF A COMPACT PATCH ANTENNA AND ANTENNA ARRAY
FOR GNSS SYSTEMS**



M.Sc. THESIS

**Muhammed Yusuf ŞAHİN
(504221323)**

Department of Electronics and Communication Engineering

Telecommunication Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Mesut KARTAL

JUNE 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504221323 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Muhammed Yusuf ŞAHİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GNSS SİSTEMLERİ İÇİN KÜÇÜK BOYUTLU YAMA ANTENİ VE KOMPAKT ANTEN DİZİSİ TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mesut KARTAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Selçuk PAKER**
Nişantaşı Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Nuri AKINCI
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Mayıs 2025**
Savunma Tarihi : **27 Haziran 2025**





Kıymetli eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında bilgi, tecrübe ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, akademik rehberliğini her aşamada hissettiren kıymetli danışmanım Prof. Dr. Mesut KARTAL'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince yanımda olan, sabırla, sevgisiyle ve desteğiyle bana güç veren sevgili eşim Ferhanur ŞAHİN'e; her zaman yanımda olan ve bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan kıymetli anneme, babama, ablama ve abime sonsuz teşekkür ederim.

Bu tezde kullanılan test ekipmanları konusunda verdikleri katkılar için EDGE Elektronik şirketine; aynı zamanda yıllardır birlikte çalışmaktan onur duyduğum değerli dostum Abdulkadir UZUN'a ve desteğini her zaman hissettiren tüm mesai arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Tüm bu süreç boyunca bana destek olan herkese sonsuz teşekkür ederim.

Haziran 2025

Muhammed Yusuf ŞAHİN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Anten Parametreleri	8
2. GNSS SİSTEMİ	15
3. BİRİM ANTEN TASARIMLARI	21
3.1 TMM10 $\epsilon_r = 9.8$ İle Birim Anten Tasarımları	22
3.1.1 2.5 mm kalınlıklı TMM10 ile tasarlanmış birim anten	23
3.1.2 1.27 mm kalınlıklı TMM10 ile tasarlanmış birim anten	26
3.1.3 2.5 mm ve 1.27 mm kalınlıklı TMM10 ile tasarlanmış antenlerin karşılaştırılması	28
3.2 RO3010 $\epsilon_r = 11.2$ İle Birim Anten Tasarımları	29
3.1.1 2.5 mm kalınlıklı RO3010 ile tasarlanmış birim anten	30
3.1.2 1.27 mm kalınlıklı RO3010 ile tasarlanmış birim anten	34
3.1.3 2.5 mm ve 1.27 mm kalınlıklı RO3010 ile tasarlanmış birim antenlerin karşılaştırılması	36
4. DİZİ ANTEN TASARIMLARI	39
4.1 Anten Elemanları Arası Mesafeye Göre Tasarım Sonuçları	41
4.2 2.5 mm Kalınlıklı TMM10 İle Tasarlanmış GNSS Dizi Anten Benzetim Sonuçları	42
4.3 1.27 mm Kalınlıklı RO3010 İle Tasarlanmış GNSS Dizi Anten Benzetim Sonuçları	44
4.4 2.5 mm Kalınlıklı TMM10 ve 1.27 mm Kalınlıklı RO3010 İle Tasarlanmış GNSS Dizi Antenleri Karşılaştırılması	46
5. ÜRETİM VE TEST	49
6. SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	67



KISALTMALAR

AR	: Axial Ratio
BDS	: BeiDou Navigation Satellite System
BVLOS	: Beyond Visual Line of Sight
CRPA	: Controlled Reception Pattern Antenna
DRA	: Dielectric Resonator Antenna
EUSPA	: European Union Agency for the Space Programme
G1	: GLONASS L1 Bant (1602 MHz)
Galileo	: Avrupa GNSS sistemi
GLONASS	: Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems
GPS	: Global Positioning System
IRNSS	: Indian Regional Navigation Satellite System
İHA	: İnsansız Hava Aracı
L1	: GPS/Galileo/BeiDou ortak merkez frekans bandı (1575.42 MHz)
LHCP	: Left Hand Circular Polarization
MEO	: Medium Earth Orbit
PVT	: Position, Velocity, Time
RHCP	: Right Hand Circular Polarization
QZSS	: Quasi-Zenith Satellite System
SNR	: Signal to Noise Ratio
URA	: Uniform Rectangular Array
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio



SEMBOLLER

D	: Anten yönlülüğü (Directivity)
f	: Frekans
G	: Anten kazancı
G_{dBi}	: İzotropik antene göre kazanç (dBi)
RL	: Geri dönüş kaybı (Return Loss)
S₁₁	: Yansıma katsayısı
U	: Anten ışınım yoğunluğu
Z	: Empedans
Γ	: Yansıma katsayısı
λ	: Dalga boyu
ε	: Dielektrik sabiti
η	: Verim
Ω	: Empedans birimi (Ohm)
k₀	: Serbest uzay dalga sayısı
Δφ	: Faz farkı
φ , θ	: Küresel koordinatlardaki açı parametreleri
tan δ	: Kayıp tanjantı
dB	: Desibel
MHz	: Megahertz
GHz	: Gigahertz



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : GNSS takımyıldızlarının yörünge özellikleri.....	17
Çizelge 3.1 : 2.5 mm TMM10 tabanlı anten için fiziksel boyutlar.	24
Çizelge 3.2 : Farklı kalınlıktaki Rogers TMM10 antenlerinin performans karşılaştırması.	29
Çizelge 3.3 : 2.5 mm Rogers RO3010 tabanlı anten için fiziksel boyutlar.	31
Çizelge 3.4 : Farklı kalınlıktaki Rogers RO3010 anten alt malzemesi ile tasarlanan antenlerin performans karşılaştırılması.	37
Çizelge 4.1 : 2.5 mm Rogers TMM10 ve 1.27 mm Rogers RO3010 alt tabakaları ile tasarlanan GNSS dizi antenlerinin performans karşılaştırılması.	47
Çizelge 5.1 : 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 anten alt malzemesi kullanılarak er değeri farklı parametrelerle tasarlanan iki antenin geri yansıma katsayısı (S_{11}), kazanç ve eksenel oran performanslarının karşılaştırılması.....	52
Çizelge 6.1 : 2.5 mm kalınlıktaki Rogers TMM10 ve Rogers RO3010 alt tabakaları ile tasarlanan antenlerin performans karşılaştırılması.	56
Çizelge 6.2 : 1.27 mm kalınlıktaki Rogers TMM10 ve Rogers RO3010 alt tabakaları ile tasarlanan antenlerin performans karşılaştırılması.	57



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Polarizasyon türleri	10
Şekil 1.2: Dairesel polarizasyon elde etmek için kullanılan çift beslemeli kare patch anten yapısı	12
Şekil 1.3: Tek noktalı besleme ile dairesele polarizasyon sağlayan mikroşerit anten geometrisi	12
Şekil 2.1: Bir GNSS alıcısının, en az üç uydu ile yaptığı geometrik üçgenleme (triangulation) işlemi sayesinde konumunun belirlenmesi	16
Şekil 2.2: GNSS takımyıldızlarının yörünge yapısı.	17
Şekil 2.3: GNSS sistemlerine ait frekans bantları	19
Şekil 3.1: Birim antenin tasarım görünümü.	22
Şekil 3.2: Birim GNSS patch anteni için parametrik yapısal değişkenler.	23
Şekil 3.3: 2.5 mm kalınlıklı TMM10 tabanlı birim anten için geri yansımaya katsayısı (S_{11}).	24
Şekil 3.4: 2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 tabanlı birim antenin aksenele oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleşen kazanç (mavi) değerleri. .	25
Şekil 3.5: 2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 tabanlı birim yama antenin ortogonal Phi (ϕ) düzlemlerindeki yönlendirme desenleri: (a) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$ ve (d) 1602 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$	26
Şekil 3.6: 1.27 mm kalınlıklı TMM10 tabanlı birim anten için geri yansımaya katsayısı (S_{11}).	27
Şekil 3.7: 1.27 mm kalınlıklı TMM10 tabanlı birim antenin aksenele oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleşen kazanç (mavi) değerleri	28
Şekil 3.8: 2.5 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim anten için geri yansımaya katsayısı (S_{11}).	32
Şekil 3.9: 2.5 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim antenin aksenele oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleşen kazanç (mavi) değerleri ..	32
Şekil 3.10: 2.5 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim yama antenin ortogonal Phi (ϕ) düzlemlerindeki yönlendirme desenleri: (a) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$ ve (d) 1602 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$	33
Şekil 3.11: 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim anten için geri yansımaya katsayısı (S_{11}).	35

Şekil 3.12:	1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim antenin eksenel oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleşen kazanç (mavi) değerleri ..	35
Şekil 3.13:	1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim yama antenin ortogonal Φ düzlemlerindeki yönlendirme desenleri: (a) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$ ve (d) 1602 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$	36
Şekil 4.1:	Dört elemanlı sıralı döndürülmüş (sequentially rotated) kare dizi yapısı.	40
Şekil 4.2:	GNSS dizisi için 50 mm ile 70 mm arasındaki mesafelerde elemanlar arası uzaklığın geri yansıma katsayısına (S_{11}) etkisi.	41
Şekil 4.3:	2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 dizisinin aktif giriş geri yansıma katsayıları.	43
Şekil 4.4:	2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 dizisinin 3 dB ışınım genişliğinde maksimum eksenel oran ve tepe kazanç değeri.	43
Şekil 4.5:	2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 dizisinin ortogonal ϕ düzlemlerindeki ışınım desenleri: (a) 1575.42 MHz, $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz, $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz, $\phi = 90^\circ$, (d) 1602 MHz, $\phi = 90^\circ$	44
Şekil 4.6:	1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 dizisinin aktif giriş geri yansıma katsayıları.	45
Şekil 4.7:	1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 dizisinin 3 dB ışınım genişliğinde maksimum eksenel oran ve tepe kazanç değeri.	45
Şekil 4.8:	1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 dizisinin ortogonal ϕ düzlemlerindeki ışınım desenleri: (a) 1575.42 MHz, $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz, $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz, $\phi = 90^\circ$, (d) 1602 MHz, $\phi = 90^\circ$	46
Şekil 5.1:	1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı üretilen birim antenin üstten görünümü.	49
Şekil 5.2:	Lehimlenmiş antenin ön ve arka yüzey görüntüleri.....	50
Şekil 5.3:	Simülasyon sonuçları ile üretilen antenin karşılaştırmalı S_{11} ölçümü.	50
Şekil 5.4:	Tasarımın $\epsilon_r = 10.95$ değeriyle yeniden optimize edildiği 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı antenin geri yansıma katsayısı (S_{11}) karakteristiği.	51
Şekil 5.5:	Tasarımın $\epsilon_r = 10.95$ değeriyle yeniden optimize edildiği 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı antene ait eksenel oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleşen kazanç (mavi) karakteristikleri.	51
Şekil 5.6:	Simülasyon sonuçları ile yeniden üretilen antenlerinin karşılaştırmalı S_{11} ölçümü.	53
Şekil 5.7:	Üretilen antenin u-blox GNSS alıcısı ile gerçek uydu sinyallerini alarak konum üretmesi.....	53

GNSS SİSTEMLERİ İÇİN KÜÇÜK BOYUTLU YAMA ANTENİ VE KOMPAKT ANTEN DİZİSİ TASARIMI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri) uygulamalarında kullanılmak üzere sağ el dairesel kutuplaşmalı (RHCP), kompakt boyutlu, tek katmanlı ve düşük profilli bir yama anten tasarlanmıştır. Bu anten temel alınarak dört elemanlı sıralı döndürülmüş (sequentially rotated) bir GNSS anten dizisi geliştirilmiş ve benzetim ortamında analiz edilmiştir.

GNSS sistemleri, konum, hız ve zaman bilgilerini dünya genelindeki kullanıcılara sağlaması nedeniyle hava, kara ve deniz ulaşımı, askeri ve sivil sistemler, otonom araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve haberleşme gibi birçok kritik alanda kullanılmaktadır. GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou gibi küresel uydu sistemleri tarafından gönderilen sinyaller L bandı içerisinde yer almakta olup, özellikle GPS L1, Galileo E1, BeiDou B1C (1575.42 MHz) ve GLONASS G1 (1602 MHz) frekansları sivil kullanıcılar arasında yaygın olarak tercih edilmektedir.

GNSS sinyalleri, yeryüzüne ulaştıklarında oldukça zayıf güç seviyelerine (yaklaşık -130 dBm) sahiptir ve bu nedenle elektromanyetik parazitlere karşı oldukça hassastır. Bu durum, alıcı antenlerin yüksek kazançlı, çok yönlü yayılıma ve parazite karşı dirençli şekilde tasarlanmasını gerekli kılmaktadır. Ayrıca İHA ve otonom platformlar gibi boyut ve ağırlık kısıtlamaları olan sistemlerde, antenlerin düşük profilli, hafif ve küçük hacimli olması büyük önem taşımaktadır.

Tez kapsamında ilk olarak Rogers TMM10 ($\epsilon_r = 9.8$) ve RO3010 ($\epsilon_r = 11.2$) yüksek dielektrik sabitine sahip iki farklı substrat kullanılarak, 1.27 mm ve 2.5 mm olarak iki farklı kalınlıkta toplamda dört farklı birim yama anten tasarımı yapılmıştır. Anten geometrisinde RHCP performansını artırmak ve empedans uyumunu iyileştirmek amacıyla köşe kesitleri, ilave çentikler ve yama kenarlarına yerleştirilen dikdörtgen yarıklar entegre edilmiştir. Simülasyonlar CST Microwave Studio ortamında gerçekleştirilmiş, antenlerin geri dönüş kaybı (S_{11}), yönlülük, kazanç ve eksenel oran (AR) gibi temel RF parametreleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 2.5 mm kalınlıklı yapıların, 1.27 mm kalınlıklı yapılara göre daha geniş bant, daha yüksek kazanç sağladığını göstermektedir. Buna rağmen, daha ince olan 1.27 mm kalınlıklı yapıların ise GNSS L1 bandı için yeterli performans sunduğunu ortaya koymaktadır.

Tezin ikinci aşamasında, 2.5 mm kalınlıklı TMM10 tabanlı birim anten ve 1.27 mm kalınlıklı RO3010 tabanlı birim antenler yapıtaşları olarak seçilmiş ve dört elemanlı anten dizileri tasarlanmıştır. Oluşturulan anten dizileri için anten elemanları arası mesafenin dizi antenin çalışma performansına etkisi araştırılmış ve farklı uzaklıklar denenerek optimum mesafe belirlenmiştir. Her bir birim eleman 55 mm ötelenmiş ve saat yönünde 90° döndürülmesiyle oluşturulmuş, sıralı döndürülmüş (sequentially

rotated) bir geometriye sahiptir. Dizi antenin performansı, aktif geri yansıma katsayısı (active reflection coefficient) üzerinden değerlendirilmiştir. Bu parametre, yalnızca klasik S -parametrelerinin sunduğu empedans uyumu bilgisinin ötesinde, portlar arası faz ilişkilerini ve kuplaj etkisini de dikkate almaktadır. Benzetim programı ortamında uygulanan bu yöntem, anten dizisinin bir 1:4 güç bölücü üzerinden eşzamanlı beslendiği bir senaryoyu taklit ederek gerçekçi bir simülasyon sunmaktadır.

GNSS sistemleri, zayıf sinyal seviyelerinde çalıştığından dolayı kasıtlı parazit (jamming) ve şehir içi binalardan, araçlardan, atmosferik koşullardan yansıyan kasıtsız enterferans sinyallerine oldukça savunmasızdır. Bu nedenle GNSS sinyalinden konum bilgisi oluştururken aynı zamanda enterferansa, karıştırma sinyallerine dayanıklı sistemler olarak bilinen CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna) uygulamaları günümüzde oldukça yaygınlaşmaktadır. CRPA sistemlerinde kullanılması için tasarlanan anten dizilerinin, dijital hüzme yönlendirme (digital beamforming) algoritmaları ile entegre edilerek tehditlere karşı dirençli çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada sunulan anten yapısı, bu tür sistemlerde kullanılacak küçük boyutlu, RHCP karakteristiğine sahip ve dijital hüzme yönlendirme algoritmalarında kullanılabilir uygun bir yapı sunmayı amaçlamıştır. Dizi tasarımında, kuplaj etkisinin minimum seviyede tutulması hedeflenirken aynı zamanda boyutsal kompaktlık da korunmuştur. Elemanlar arası mesafe, kuplaj etkisini artırmayacak şekilde yeterince uzak tutulmuş, fakat sistemin toplam boyutunun artmaması için optimum mesafede sınırlandırılmıştır.

Elde edilen simülasyon sonuçları, önerilen GNSS anten dizisinin GNSS L1 bandında çalışan uydu takımı yıldızları (GPS, Galileo, BeiDou) için tutarlı kazanç, düşük eksenel oran ve kararlı RHCP kutuplaşma sunduğunu göstermiştir. Ayrıca tasarlanan anten dizilerinin ışınım örüntüleri yarımküresel dağılım sergilemekte olup GNSS uygulamaları için uygun yönlülük karakteristikleri taşımaktadır.

Yapılan tasarımlar arasından seçilen 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim anten, prototip olarak üretilmiş ve laboratuvar ortamında vektör ağ analizörü (VNA) ile karakterize edilmiştir. İlk üretim sonrasındaki ölçümlerde gözlemlenen frekans kaymasının, alt malzemenin efektif dielektrik sabitindeki belirsizlikten kaynaklandığı belirlenmiş; gerçekleştirilen parametrik tarama sonucunda ϵ_r değeri 10.95 olarak güncellenmiştir. Optimize edilen bu değerle anten yeniden üretilmiş ve elde edilen S_{11} ölçümleri, simülasyon sonuçlarıyla yüksek oranda örtüşmüştür. Nihai tasarım, GNSS L1 bandında çalışan bir alıcıya bağlandığında güvenilir uydu takibi sağlayarak konum bilgisi üretebilmektedir. Bu birim antenden dört adet üretilmiş ve dört kanallı bir CRPA platformuna başarıyla entegre edilebilir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında GNSS alıcı sistemleri için uygun, üretime hazır, miniaturize edilebilir ve düşük profilli bir anten yapısı geliştirilmiştir. Tasarlanan yapı, özellikle İHA'lar ve taşınabilir GNSS sistemleri gibi fiziksel alan kısıtlanmalı platformlar için uygulanabilir, maliyet etkin ve yüksek performanslı bir çözüm sunmaktadır.

DESIGN OF A COMPACT PATCH ANTENNA AND ANTENNA ARRAY FOR GNSS SYSTEMS

SUMMARY

Throughout human history, the need to determine location, direction, and time has been a fundamental requirement for the advancement of civilizations. With the evolution of technology, solutions to these needs have become increasingly accurate, reliable, and globally accessible. Among the key technologies that facilitate this transformation are Global Navigation Satellite Systems (GNSS), which provide users with real-time Position, Velocity, and Time (PVT) data worldwide. These systems have transformed modern navigation by enabling a wide range of civilian and military applications. GNSS has become a core infrastructure in daily life and critical operations, from air, land, and sea transportation to autonomous vehicles, precision agriculture, disaster management, and mobile communication synchronization.

Antennas are essential components of communication and navigation systems and play a critical role in the overall performance and reliability of GNSS-based applications. Specifically, GNSS receiver antennas are expected to operate under challenging conditions, such as weak signal reception, multipath effects, electromagnetic interference, and intentional jamming, while still maintaining high levels of performance. Therefore, the design of antennas suitable for GNSS receivers must account for several critical criteria such as right-hand circular polarization (RHCP), low axial ratio (AR), stable impedance matching, high gain, and wide radiation coverage.

GNSS systems, including GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou, primarily transmit signals within the L-band frequency range (1–2 GHz). The GPS L1, Galileo E1, BeiDou B1 (1575.42 MHz) and GLONASS G1 (1602 MHz) signals are common in civilian navigation due to their widespread compatibility and accessibility. However, signals arriving from medium Earth orbit (MEO) satellites experience significant free-space path loss, often resulting in received power levels as low as -130 dBm. These signals, which are already at or below the noise floor of most radio receivers, become highly susceptible to degradation from multipath propagation and man-made or natural interference. This makes it essential for GNSS antennas to exhibit robust RHCP characteristics that match the polarization of satellite signals, maintain an axial ratio below 3 dB, and provide a radiation pattern that covers the visible sky hemisphere.

Modern applications such as unmanned aerial vehicles (UAVs), autonomous vehicles, wearable or portable navigation devices, and small-scale IoT platforms introduce additional physical constraints on GNSS antennas. These platforms demand antennas that are not only electromagnetically efficient but also compact, low-profile, lightweight, and simple to integrate. Within this context, patch antennas offer a

favorable trade-off due to their ease of fabrication, low cost, and planar profile, which makes them suitable for embedded systems.

In addition, a literature review was conducted to benchmark existing GNSS antenna and array designs. Studies reveal that traditional single-layer patch antennas are often limited by narrow bandwidth and sensitivity to mutual coupling, especially in dense array configurations. To overcome these limitations, numerous researchers have explored advanced techniques including multi-layer stacking, slot loading, dielectric resonator integration, and artificial magnetic conductor (AMC) layers. These methods aim to improve gain, widen bandwidth, and suppress cross-polarization effects. In particular, AMC-backed patches have demonstrated the ability to reduce profile height while preserving isolation between array elements.

As GNSS receivers increasingly face challenges such as jamming, spoofing, and electromagnetic interference, CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna) systems have emerged as a promising solution. These systems dynamically adjust their beam patterns using digital signal processing to reject unwanted interference while maintaining signal reception from valid satellites. Integration of compact RHCP patch antennas with CRPA systems enhances anti-jamming capabilities and enables deployment in constrained platforms like UAVs and wearable devices. Current literature supports the use of RHCP patch antennas as optimal candidates for CRPA arrays due to their simplicity, polarization performance, and manufacturability.

Moreover, the study emphasizes the growing demand for miniaturized and interference-resilient GNSS antennas, particularly for Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) missions in UAV applications. The proliferation of drones in surveillance, environmental monitoring, and public safety tasks has necessitated robust and miniaturized GNSS receivers. This, in turn, has intensified the need for compact, lightweight, and interference-tolerant antenna architectures that can operate reliably in congested RF environments.

In response to these challenges, this thesis presents the design, simulation, and evaluation of a miniaturized, single-layer RHCP patch antenna, as well as a corresponding four-element sequentially rotated array configuration. The primary objective is to enhance GNSS performance on platforms with stringent size and weight constraints. Literature reviews consistently show that one of the most critical factors in antenna miniaturization is the use of high-permittivity substrate materials. These substrates allow for a substantial reduction in antenna size while preserving resonance characteristics. Accordingly, in this study, two ceramic substrates with high dielectric constants, Rogers TMM10 ($\epsilon_r = 9.8$) and RO3010 ($\epsilon_r = 11.2$) were selected to explore the trade-offs between physical size, bandwidth, gain, and polarization performance. Each substrate material is evaluated at two thickness levels, 1.27 mm and 2.5 mm. Structural optimizations were applied to each unit patch design, such as corner truncation to enable RHCP excitation by generating orthogonal patch modes with a 90° phase shift. Additionally, small rectangular slots were placed near the patch edges to enhance the circular polarization bandwidth and reduce the axial ratio. Feed-point optimization was conducted to ensure impedance matching with standard 50-ohm systems. All simulations were conducted using CST Microwave Studio, a full-wave electromagnetic simulation software.

The simulation results indicate that the 2.5 mm TMM10-based design provided superior performance, achieving an impedance bandwidth of 1563–1594 MHz ($S_{11} < -10$ dB), a peak RHCP gain of 5.28 dBi, and an axial ratio of approximately 2.32 dB at the GPS L1 center frequency of 1575.42 MHz. The patch size for this design was optimized at 29.68 mm.

In comparison, the 1.27 mm TMM10-based design, while being thinner and potentially more suitable for compact integration, exhibited a narrower impedance bandwidth of 1566–1585 MHz and a reduced peak RHCP gain of 4.65 dBi. The axial ratio was approximately 2.6 dB at the same center frequency, and the patch size was slightly increased to 30.19 mm to maintain resonance due to the thinner substrate.

The same design principles were applied to RO3010-based antennas. Owing to its higher dielectric constant, the RO3010 substrate enabled further miniaturization while maintaining acceptable GNSS performance. The 2.5 mm RO3010 patch antenna achieved an S_{11} bandwidth of 1566–1591 MHz, with a minimum return loss of -16 dB, a peak RHCP gain of 5.15 dBi, and an axial ratio of 2.16 dB at 1575.42 MHz. The patch size was optimized at 27.9 mm, which is notably smaller than the corresponding 2.5 mm TMM10 design.

In contrast, the 1.27 mm RO3010-based design, while offering a thinner and more compact form factor, exhibited a narrower bandwidth of 1568–1583 MHz and a lower peak gain of 4.45 dBi. The axial ratio in this case was slightly improved to 1.91 dB, while the patch size increased to 28.32 mm to compensate for the reduced substrate thickness. These results confirm the suitability of high-permittivity ceramic substrates such as RO3010 for size-constrained GNSS applications, where patch miniaturization is desired without compromising critical antenna parameters.

While thinner substrates (1.27 mm) exhibited slightly reduced bandwidth and gain, both TMM10 and RO3010-based designs achieved sufficient performance within the GNSS L1 band, making them suitable for compact systems requiring minimal volume. It is important to highlight that the axial ratio degradation near the lower end of the band, especially around 1600 MHz, led to increased signal distortion and reduced gain, further emphasizing the importance of polarization optimization in GNSS antenna design.

Building on the results of the unit patch antenna analysis, the second stage of the study focused on the design and evaluation of a four-element GNSS antenna arrays using the 2.5 mm TMM10 and 1.27 mm RO3010 based patches as the unit element. The arrays were arranged in a 2×2 square configuration, with each antenna rotated 90° clockwise relative to its neighbor, forming a sequentially rotated structure. This layout enhances polarization purity, stabilizes radiation patterns, and enables more uniform hemispherical gain distribution—essential characteristics for mobile and dynamic GNSS platforms.

To evaluate the performance of the arrays, parametric analyses were conducted to determine the optimal inter-element spacing. A distance of 55 mm was found to offer the best trade-off between minimizing mutual coupling and maintaining a compact footprint. Additionally, the study adopted the active reflection coefficient methodology to evaluate the real-world performance of the array under simultaneous excitation.

Unlike traditional S -parameters that consider individual ports, the ARC incorporates mutual coupling and phase relationships among ports, thereby modeling scenarios involving a 1:4 power divider or digitally controlled beamforming circuits.

The final optimized arrays demonstrated consistent RHCP performance across the GNSS L1 band (1575.42 MHz), with the 2.5 mm TMM10-based array achieving a peak gain of 7.22 dBi in the L1 band and 5.20 dBi at the GLONASS G1 frequency (1602 MHz). In this configuration, axial ratios remained below 1.5 dB across the entire L1 range, accompanied by broad hemispherical radiation coverage. In contrast, the 1.27 mm RO3010-based array exhibited axial ratios below 1.5 dB within a narrower bandwidth (1570–1580 MHz), with reduced gains of 6.19 dBi in the L1 band and only 0.62 dBi at G1. These results clearly demonstrate the influence of substrate thickness on bandwidth and gain, highlighting the trade-off between compactness and electromagnetic performance. Overall, the achieved metrics confirm the suitability of the proposed antenna arrays for integration into UAVs, vehicle-mounted GNSS systems, and portable receivers, where directional stability, compactness, and signal robustness are essential.

Among the designs evaluated in this study, the unit patch antenna based on the 1.27 mm thick Rogers RO3010 substrate was selected for prototyping and fabricated using standard PCB techniques. The manufactured antenna was characterized using a vector network analyzer (VNA), and discrepancies between the measured and simulated return loss were observed due to the variation in the substrate's effective dielectric constant. Through a parametric sweep, the dielectric constant ϵ_r was revised from 11.2 to 10.95 to match the measured response better. The antenna was subsequently re-fabricated using the updated design, resulting in excellent agreement between measured S_{11} values and simulated data. When connected to a GNSS receiver, the final antenna design demonstrated successful satellite acquisition and position fix within the L1 band. A total of four identical units were fabricated and integrated into a four-channel CRPA platform. Integration tests confirmed that the antennas operate compatibly with CRPA beamforming algorithms even under jamming conditions, maintaining signal tracking and interference suppression capabilities.

This thesis delivers a practical and technically rigorous antenna solution tailored for modern GNSS platforms. By combining miniaturized, high-performance RHCP unit elements with a sequentially rotated array configuration, the design achieves key goals in bandwidth coverage, polarization purity, and mechanical simplicity. The proposed antenna is easy to fabricate, cost-effective, and ready for mass production using standard PCB processes. Its potential for integration into adaptive CRPA systems further enhances its value for future GNSS applications in navigation, timing, and secure communication infrastructures.

Through an extensive design, simulation, and validation process, this work not only addresses the pressing needs of GNSS antenna miniaturization but also contributes a scalable and future-proof architecture for resilient satellite-based positioning systems. As GNSS technology continues to evolve and integrate with emerging autonomous and critical systems, the relevance and applicability of compact, high-performance antenna designs such as the one presented in this thesis will only increase.

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinin her döneminde lokasyon belirleme, yön tayini ve zaman takibi medeniyetlerin gelişimi açısından temel ihtiyaçlar arasında yer almıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu ihtiyaçlara yönelik çözümler daha hassas, daha güvenilir ve daha küresel hale gelmiştir. Bu bağlamda, haberleşme teknolojilerinin temel yapıtaşlarından biri olan anten sistemleri, özellikle konumlandırma ve navigasyon uygulamalarının verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Elektromanyetik dalgaların iletimini sağlayan antenler; askeri operasyonlardan sivil kullanımlara, havacılıktan taşımacılığa kadar geniş bir yelpazede stratejik önem kazanmıştır. Anten teknolojisinin öne çıktığı önemli alanlardan biri de Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) için kullanılan alıcı antenlerdir.

Günümüzde Küresel Konumlama Uydu Sistemleri (GNSS - Global Navigation Satellite Systems), ücretsiz, güvenilir ve dünya genelinde erişilebilir olması sebebiyle oldukça yaygınlaşmıştır. Konum, hız ve zaman (PVT - Position, Velocity, Time) bilgilerine sürekli erişim sağlanabilmesi, bu sistemlerin farklı disiplinlerde kullanılmasına olanak tanımaktadır [1]. GNSS hava, kara ve deniz ulaşımında rota ve hız takibi; otomotiv sektöründe ve açık hava sporlarında, kişisel navigasyon sistemlerinde konum takibi; iletişim altyapısında ise baz istasyonlarının zaman senkronizasyonunun sağlanması gibi birçok alanda aktif rol oynamaktadır [2]. Tüm bu sistemlerin kullanıcı tarafında işlevsel hale gelmesini sağlayan temel bileşenlerden biri GNSS alıcı antenleridir. Bu antenler, uydulardan gelen düşük güçlü sinyalleri toplayarak alıcı cihaza iletmekte ve böylece konum, hız ve zaman bilgisi elde edilmektedir. GNSS antenlerinin belirli performans kriterlerini sağlaması beklenmektedir. Bu kriterler arasında antenin ışınma örüntüsü, polarizasyonu, yönlülüğü, ışınma verimliliği, kazancı, bant genişliği, yansıma katsayısı, geri dönüş kaybı (return loss) ve gerilim duran dalga oranı (VSWR) gibi çeşitli parametreler yer almaktadır [3]–[5]. Literatürde, GNSS sistemlerinin ihtiyaç duyduğu performans

kriterlerini karşılayan birçok anten tasarımı önerilmiştir, ancak anten boyutları, eksenel oran (axial ratio), kazanç ve bant genişliği gibi kritik parametrelerde çeşitli tasarım kısıtları halen varlığını sürdürmektedir. Özellikle son yıllarda insansız hava araçları (İHA) ve otonom sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, GNSS antenlerinde kompakt boyut, düşük profil ve hafiflik gibi yeni tasarım gereksinimleri ortaya çıkmıştır. Avrupa Uzay Programı Ajansı'nın (EUSPA) yayınladığı piyasa raporuna göre, GNSS destekli drone sevkiyatlarının bu on yıl içerisinde yıllık 10 milyon adedin üzerine çıkması beklenmektedir [6]. Bu öngörü, bugün olduğu gibi gelecekte de GNSS alıcı antenlerinin yaygın biçimde kullanılacağını göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, GNSS alıcıları için gereksinimlere uygun bir anten tasarımı ele alınmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle literatürde yer alan mevcut yaklaşımlar incelenmiş ve bu alana katkı sağlayacak özgün bir anten yapısı önerilmiştir. Ardından, GNSS sistemi hakkında genel bir bilgilendirme sunulmuş ve anten tasarımında karşılaşılan temel problemler tanımlanmıştır. Önerilen tasarımın elektromanyetik simülasyonları gerçekleştirilmiş, performansı değerlendirilmiş ve belirli tasarım parametrelerine bağlı olarak duyarlılık analizleri yapılmıştır. Son bölümde ise elde edilen bulgular ışığında tasarım sonuçları yorumlanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, GNSS uygulamalarında kullanılmak üzere boyut açısından kompakt ve yapısal olarak sade bir mimariye sahip, sağ el dairesel kutuplamalı (RHCP), tek katmanlı yama antenlerin tasarımı ve bu antenlerden oluşturulan dizi yapılar aracılığıyla CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna) sistemleri için uygun alternatif dizi anteni geliştirilmesi hedeflenmiştir. Anten tasarımları, GNSS sistemlerinin çalıştığı frekans bantlarını kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, birim anten boyutunu küçültmek ve yüksek kazançlı anten yapıları elde etmek amacıyla, yüksek dielektrik sabitine sahip iki farklı anten alt tabakası (Rogers TMM10, $\epsilon_r = 9.8$ ve Rogers RO3010, $\epsilon_r = 11.2$) kullanılmıştır. Bu malzemelerin her biri için iki farklı kalınlık (2.5 mm ve 1.27 mm) seçilerek toplamda dört farklı birim yama anten tasarlanmıştır. Tasarımlar, dielektrik sabit

ve kalınlık değişiminin anten performans kriterlerine etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, tasarlanan dört birim anten arasından 2.5 mm kalınlıkta TMM10 ve 1.27 mm kalınlıkta RO3010 kullanılarak elde edilen iki anten seçilmiştir. Bu antenler, iki ayrı dört elemanlı dizi yapısında temel yapıtaşı olarak kullanılmıştır. Böylece, farklı alt tabaka özelliklerine sahip dizi antenlerin elektromanyetik performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tasarım sürecinde, antenlerin polarizasyon özelliklerini, bant genişliğini, empedans uyumunu ve genel performansını iyileştirmek amacıyla çeşitli optimizasyon teknikleri uygulanmıştır.

Tasarlanan birim antenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen anten ölçülmüş ve tasarımdan farklı sonuçlar vermiştir. Tasarım anteni, üretim sonuçlarına göre yeniden revize edilerek üretim yeniden gerçekleştirilmiş ve GNSS alıcısı ile birlikte uyumlu çalıştığı test edilmiştir. Birim antenden toplamda dört adet olacak şekilde yeniden üretim gerçekleştirilmiştir. Dört elemanlı dizi anten tasarımı gerçekleştirilerek CRPA sistemlerinde kullanılmak için tasarım tamamlanmıştır.

Bu çalışma ile, GNSS uygulamalarında kullanılan geleneksel anten yapılarına ve CRPA sistemlerinde tercih edilen çözümlere alternatif olarak, daha kompakt, yüksek performanslı ve uygulama odaklı bir anten tasarım yaklaşımı sunulması amaçlanmıştır. Tasarımlarda kullanılan anten alt tabakalarının dielektrik sabiti ve kalınlık değerlerinin performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, dört elemanlı dizi yapılarında anten elemanları arasındaki mesafenin performansa etkisini belirlemek amacıyla bir yerleşim optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

GNSS sistemlerinden elde edilen konum verisinin güvenilir biçimde kullanılabilmesi, yalnızca uyduların performansına değil, kullanıcı tarafındaki GNSS sinyali alıcı antenlerinin niteliklerine de doğrudan bağlıdır. GNSS anten tasarımında performans gereksinimlerinin anlaşılması açısından GPS sistemine yönelik anten parametreleri iyi bir referans noktası sunmaktadır. Tipik bir üç frekanslı GPS anteni, L1

(1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) ve L5 (1176.45 MHz) merkez frekanslarında çalışmakta olup, yarım küresel yönlendirme deseni, 3–5 dB aralığında kazanç ve sağ el dairesel kutuplama (RHCP) ile karakterize edilmektedir. Ayrıca antenin geri yansıma kaybının –10 dB'nin altında olması ve 50 ohm giriş empedansına sahip olması beklenmektedir [7]. Günümüzde bu isterleri sağlayan GNSS anten tasarımları, özellikle mobil ve otonom sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte akademik ve endüstriyel araştırmaların önemli bir odağı haline gelmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar boyut optimizasyonu, uygun hüzmeye yapısı, kazanç ve polarizasyon gibi çok sayıda parametre üzerinden değerlendirilmekte ve farklı metodolojilerle anten performansı artırılmaya çalışılmaktadır.

GNSS teknolojisinin GPS'ten çok sistemli yapıya evrilmesiyle birlikte, antenlerde daha geniş bant aralıklarını ve farklı elevasyon açılarını kapsamasını destekleyen tasarımlar zorunlu hale gelmiştir. Bu gelişmeler, özellikle farklı uygulama platformlarına göre değişen fiziksel kısıtlar altında tasarım yapılmasını gerektirmiştir. Büyük sabit platformlarda çok bantlı, yüksek kazançlı ve geniş hüzmeye yapılarına sahip antenlere ihtiyaç duyulurken; elde taşınabilir, hafif platform sistemlerde küçük boyut, düşük profil ve maliyet etkinliği ön plandadır. Bu bağlamda yama antenler, düşük maliyetleri, üretim kolaylıkları ve düz yüzeylere entegre edilebilme avantajları sayesinde GNSS uygulamalarında en yaygın tercih edilen anten türü haline gelmiştir [8,9]. Ancak rezonant yapılarının doğası gereği sınırlı bant genişliğine sahip olmaları, geniş bant kapsamı gereken uygulamalarda bazı tasarım zorluklarını da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, bant genişliğini artırmak amacıyla oyuk yükleme, çok katmanlı yapı, besleme noktasında optimizasyon ve farklı geometrik düzenlemeler gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır.

Konumlandırma sistemlerinde tercih edilen çok elemanlı GNSS anten dizileri, sağladıkları yönlülük ve uygun sistemlerle kullanıldığında girişim sinyallerine karşı geliştirilmiş bastırma kapasitesi sayesinde, akıllı kara araçları, insansız hava araçları (İHA) gibi mobil sistemlerde tercih edilen çözümler arasında öne çıkmaktadır [10]. Bu diziler, yönlendirilmiş desen kontrolüne sahip anten sistemleri (CRPA - Controlled Reception Pattern Antenna) ile entegre edilerek özellikle kasıtlı sinyal bozucu, istenmeyen enterferans sinyalleri gibi tehditlerin baskılanmasında etkin

şekilde kullanılabilir [11]–[17]. GNSS alanında enterferans bastırma ile ilgili farklı alanlarda çalışmalar yapılmaktadır [18]–[21]. Bu durum konum bulma teknolojilerinin kullanıldığı alanlarda enterferans baskılama çözümlerinin de ihtiyaç haline geldiğini göstermektedir. [18]’de klasik 2×2 URA (Uniform Rectangular Array) yapıların otomobillerde uygulanabilirliğinin sınırlı olması nedeniyle, araç gövdesine dağıtılmış küçük alt dizilerden (subarray) oluşan yeni bir dağıtılmış CRPA mimarisi göstermektedir. Anten dizilerinde elemanlar arası yerleşim düzeni, yönlü ışın performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu doğrultuda literatürde, farklı dizilim geometrilerine dayanan çeşitli yerleşim stratejileri önerilmiştir. [22] çalışmasında dört elemanlı iki farklı anten dizisi tasarlanarak, anten elemanlarının konumlandırılmasının performansa etkisi araştırılmıştır. İlk dizilimde elemanlar arası $\lambda/2$ mesafe olacak şekilde 2×2 kare matris formunda yerleştirilmiştir. Bu simetrik yapı, hem yönlü bastırma hem de girişim azaltma açısından dengeli ve kararlı bir ışın deseni sağlarken, ikinci dizilimde ise, anten elemanlarının 45° kaydırılmasıyla, anten elemanları arasında 0.55λ mesafe ile oluşturulmuş ve “+” şeklinde bir yapı elde edilmiştir. Elemanlar arası mesafenin açılması ve asimetrik yapı sebebi ile dizinin ışın deseninde istenmeyen yan topuzlar oluşmuştur ve enterferans bastırma performansını olumsuz etkilemiştir. Dolayısıyla, mekanik kısıtlamalar nedeniyle dizilim geometrisinin değiştirilmesi ve anten elemanları arası mesafenin uygun olmayan değerler seçilmesi CRPA gibi yüksek bastırma kabiliyeti gerektiren uygulamalarda performans kayıplarına neden olabilmektedir. [19]’da Y şeklinde dizilen anten grubunun kare dizilime göre daha dar ışın genişliği sunduğu ancak bu dizilimde kuplaj etkisinin daha az olduğunu göstermektedir.

Kontrollü ışın desenine sahip anten (CRPA) dizilerinde kullanılan eleman sayısının artması enterferans bastırmak için üretilen sıfırlı alan bölge sayısını artırmakta, enterferans bastırma performansını iyileştirmektedir, bu sebeple kısıtlı alanda eleman sayısını artırmaya yönelik çalışmalar yer almaktadır [23]–[28]. Beş elemanlı bir anten dizisi kullanılarak dört farklı yönden gelen girişim sinyallerinin bastırılabilirdiği ve GNSS sistemlerinin konumlama yeteneğini koruyabildiği gösterilmiştir. Tüm GNSS sistemlerinden elde edilen uydu verisiyle yapılan simülasyonlarda, anten deseninde yönlü sıfır noktaları oluşturularak fiziksel bastırma gerçekleştirilmiş, farklı

sistem kombinasyonlarında kabul edilebilir GDOP değerleri korunmuştur [28]. Anten dizisinde eleman sayısının artırılması, sistemin anti-jam performansını iyileştirmekte önemli bir rol oynasa da, bu durum aynı zamanda antenler arası mesafenin azalmasına bağlı olarak karşılıklı bağlaşım (kuplaj) etkisini artırmaktadır. Artan etkileşim, rezonans frekanslarında kaymalara neden olarak empedans uyumunu bozmakta ve ışıma verimliliğini düşürmektedir [29]–[31]. Şehir içi ortamlarda karşılaşılan çoklu yol yansımaları, enterferans, spektrumda bulunan diğer sinyallerden kaynaklanan bozulmalar ve özellikle kasıtlı karıştırma sinyali gibi etkilere karşı çözüm sunabilen CRPA sistemleri ve bu sistemlere özel olarak tasarlanmış GNSS antenleri; askeri uygulamalardan insansız hava araçlarına (İHA), otonom kara ve deniz araçlarından kritik altyapı güvenliğine kadar, parazite karşı dayanıklılığın ve yüksek konum hassasiyetinin gerekli olduğu birçok farklı alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır. [20]’da insan tarafından giysi üzerinde taşınabilen enterferans baskılama (CRPA) çözümü sunulmaktadır. CRPA mimarisinde, anten dizisi girişim kaynaklarına karşı uyarlanabilir boşluklar (null) anten hüzmelendirme (beamforming) metodu ile oluşturularak bastırma sağlar ve bu nedenle diziyi oluşturan elemanların faz ve genlik açısından iyi eşlenmiş olması, sağ el dairesel kutuplamada (RHCP) çalışması ve GNSS bantlarıyla uyumlu performans göstermesi kritik öneme sahiptir. İHA’ların çevresel gözlem, afet yönetimi ve kamu güvenliği gibi geniş uygulama alanlarında hızla yaygınlaşması [32], bu platformlara entegre edilebilecek küçük boyutlu GNSS dizilerine olan talebi artırmaktadır [33]. GNSS alıcı anteninin kullanıldığı insansız hava araçlarının üretim sayısındaki artış gözle görülür bir şekildedir. Spesifik kategoriye giren BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) görevlerin artışıyla birlikte, bu tür operasyonlar için konum, kimlik ve uçuş bilgilerini dijital olarak iletmelerini sağlayan sistemler zorunlu hale gelmiştir [6]. Bu bağlamda, GNSS’e olan bağımlılık arttıkça sistemin güvenliğinin artması için önlemlerin alınması da ihtiyaç olmaktadır. Hassas yön bulma ve güvenli navigasyon gerektiren ufuk ötesi görevlerde, CRPA sistemleri gibi adaptif anten çözümleri, sinyal bütünlüğünü koruyarak operasyonel güvenliği artırmakta ve düzenleyici gereksinimlerin karşılanmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle 2022 yılında Doğu Avrupa’da yaşanan ve Şubat–Ağustos ayları arasında sivil hava trafiğinin %60’ını etkileyen GNSS karıştırma, enterferans

olayları [34], anten donanımlarının parazite karşı dayanıklılığını öncelikli mühendislik kriterlerinden biri haline getirmiştir. GNSS teknolojisinin İHA'larda yaygın biçimde kullanılması [35], hem boyutsal hem de elektromanyetik açıdan optimize edilmiş anten tasarımlarına olan gereksinimi beraberinde getirmiştir.

GNSS anten dizilerinin minyatürleştirilmesi, elemanlar arası artan kuplaj etkisi ve azalan bant genişliği gibi iki temel performans dezavantajını beraberinde getirir. Bu nedenle tasarımcılar, elemanlar arası mesafeyi genellikle L1 bandında (1575.42 MHz) yaklaşık 100 mm olan $\lambda/2$ seviyesinde tutarak etkileşimi azaltmayı hedeflerler, ancak anten boyutu küçüldükçe bant genişliği de daralmaktadır [36]. GNSS anten dizilerinde küçültme (miniatürizasyon) yalnızca eleman boyutlarının küçültülmesini değil, aynı zamanda elemanlar arası mesafenin optimize edilmesini ve bu süreçte antenin yönlülük, kazanç ve radyasyon karakteristiklerinin kontrol altında tutulmasını da zorunlu kılar [37]. Bu kapsamda literatürde çeşitli minyatürleştirme teknikleri önerilmiştir. Bunların en başında, yüksek dielektrik sabitine sahip malzemeler kullanılarak üretilen yama antenler boyut küçültme avantajı sağlasa da, genellikle kazançta belirli bir düşüşe neden olmaktadır [24,38]–[40]. Dizide bulunan eleman sayısı ve elemanlar arası mesafe azaltılarak boyut küçülmesi önerilmiş ancak bu yöntem sistem performansının düşmesine sebep olmuştur [41]. Anten boyutlarının küçültülmesine yönelik bir diğer etkili yöntem ise, yama antenlerin altına yerleştirilen geleneksel metal zemin düzlemi yerine, yapay manyetik iletken (Artificial Magnetic Conductor - AMC) yapısının kullanılmasıdır [42,43]. Bu bağlamda [42] çalışmasında, GNSS L1 bandında çalışmak üzere yedi elemanlı ve kompakt yapıya sahip bir CRPA tasarımı sunulmuştur. Tasarımda kullanılan AMC tabanlı sanal toprak düzlemi, anten yüksekliğinin önemli ölçüde azaltılmasına olanak sağlamış ve izole edilmiş patch yapısı sayesinde elemanlar arası karşılıklı bağlaşım, kuplaj, etkisi de sınırlandırılmıştır. Ancak, ölçümler L1 bandının üst frekans sınırında çapraz kutuplaşma seviyelerinde artış olduğunu göstermekte olup, bu durum geniş bantlı uygulamalar açısından ilave optimizasyon gereksinimini ortaya koymaktadır. [36]'da geniş bant performansı ve çapraz konuşma izolasyonunu koruyarak anten dizisinin minyatürleştirilmesi amacıyla dielektrik rezonatör anten (DRA) teknolojisi tercih edilmiştir. Her bir DRA elemanı, iki pinle doğrusal olarak beslenmiş ve bu sinyaller geniş bant hibrit devrelerle

birleştirilerek sağ el dairesel polarizasyon (RHCP) elde edilmiştir. Bu yaklaşım, minyatürleştirme açısından önemli avantajlar sağlarken, elemanlar arası mesafenin azalmasına bağlı olarak karşılıklı bağlaşımı artırmış ve anten kazanç deseninin bozulması gibi performans düşürücü etkiler de ortaya çıkarmaktadır.

GNSS antenlerinin kullanıldığı CRPA uygulamalarında, anten eleman sayısı sistem için oldukça önemli bir parametredir. Eleman sayısı arttıkça karıştırma sinyali bastırma performansı artarken, dizi anten boyutunu artırmaktadır. Literatürdeki birçok çalışma 4 elemanlı anten dizileri üzerine yoğunlaşmıştır [11,44,45] ancak bu çalışmaların kapsamaları birbirinden oldukça farklıdır. Örneğin [11], anten dizisinin sinyal bozucuya karşı bastırma kapasitesine odaklanmakta ancak kazanç, eksenel oran gibi temel performans göstergelerine dair sınırlı veri sunmaktadır. [44] çalışmasında kompakt yapıda bir öneri getirilmekte fakat soğurucu katman kullanımı nedeniyle kazançta kayıplar oluşmaktadır. Geniş bantlı antenler üzerine yapılan çalışmalar [46,47] ya da yüksek kazanç hedefleyen dizaynlar [29] genellikle çok katmanlı ve karmaşık yapılarla gerçekleştirilmekte olup, bu durum pratik entegrasyon açısından bazı sınırlamalar doğurmaktadır. Kompakt yama anten elemanlarının CRPA sistemlerine optimum eleman aralığı ile entegre edilmesine odaklanan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır. Bu bağlamda [48] tarafından sunulan çalışmada, beş elemanlı bir anten dizisi kullanılarak dört farklı yönden gelen aldatici sinyalleri eşzamanlı olarak bastırılmış ve sıfırlı nokta yönlendirme algoritması sayesinde sistemin kullanılabilir uydu sayısını yeterli düzeyde koruyabildiği gösterilmiştir.

1.3 Anten Parametreleri

Tüm bu çalışmaların ışığında, tasarlanacak GNSS anteninin karşılaması gereken bazı temel teknik gereksinimler bulunmaktadır. Bu gereksinimlerin başında, antenin çalışacağı frekans bandı gelmektedir. GNSS sistemlerinde kullanılan çeşitli frekans bantları arasından, GPS L1, Galileo E1 ve BeiDou B1 sinyallerinin ortak merkez frekansı olan 1575.42 MHz, bu çalışma kapsamında hedeflenen frekans olarak belirlenmiştir. Bantgenişliği olarak, GPS uyduları tarafından ilgili merkez frekanslarda iletilen tüm sinyalleri kapsayabilmek için ± 10.23 MHz'lik ortak bir bant genişliği

gereksinimi belirtilmiştir. GNSS alıcı antenleri için, her yönden gelen uydulardan alım yapabilmesi için ışına deseni yarım küresel olmalıdır. [7].

Antenin yönlülüğü (D) (1.1), belirli bir yöndeki ışınma şiddetinin (U), izotropik bir anten için birim katı açı başına yayılan güç oranı olan $P_{\text{rad}}/(4\pi)$ değerine oranlanması ile elde edilir.

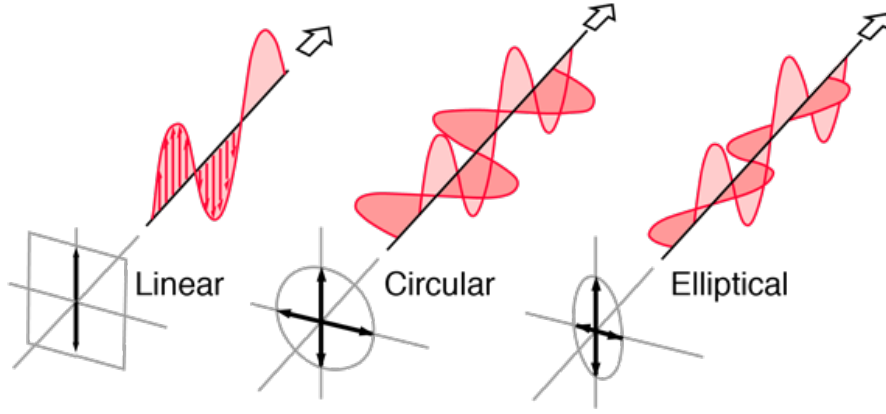
$$D = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} \quad (1.1)$$

Antenin kazancının desibel cinsinden ifadesi (G_{dBi}) (1.2), kayıpsız ideal bir izotropik antene kıyasla belirli bir yönde ne kadar iyi güç alıp iletebildiğini gösteren maksimum elektromanyetik dalga yoğunluğu olarak tanımlanır. Doğrusal kazanç (G), antenin yönlülüğü (D) ile verimliliğinin (e) çarpımı olarak ifade edilir $G = e \cdot D$. Anten kazancı dBi ile ifade edilir bu notasyon kazancın izotropik bir anten referansına göre ifade edildiğini belirtir.

$$G_{\text{dBi}} = 10 \cdot \log_{10}(G) \quad (1.2)$$

Anten tasarımında dikkat edilmesi gereken bir başka parametre ise antenin polarizasyonudur. Elektrik ve manyetik alan vektörleri, antenin ışınma yaparak yaydığı elektromanyetik dalgalardan oluşur. Anten kutuplaması, yani polarizasyonu, elektrik alan vektörünün yatay düzleme olan durumuna göre belirlenir. Eğer bu vektör yatay düzleme paralel ise anten yatay polarizasyonlu, dik ise dikey polarizasyonlu olarak sınıflandırılır. GNSS sistemlerinde ise polarizasyon ne yatay ne de dikeydir, bunun yerine sağ el dairesel polarizasyon (RHCP) kullanılmaktadır. Bu durum, elektrik alanının eşit genliğe sahip ve aralarında 90° faz farkı bulunan iki dik dalga bileşeninden oluştuğu anlamına gelir. Bu bileşimin sonucu olarak, E-alanı zamanla saat yönünde dönen dairesel bir hareket izler.

Uzayda yayılan elektromanyetik bir dalga için polarizasyon, elektrik alan vektörünün sabit bir noktada zaman içinde nasıl bir dönüş hareketi sergilediğini tanımlar. Alıcı ve verici antenlerin polarizasyonları uyumlu olduğunda, sinyal kayıpsız şekilde iletilip alınabilir [50]. GPS uyduları ile yer istasyonlarındaki alıcı antenler arasındaki



Şekil 1.1: Elektromanyetik dalgaların başlıca polarizasyon türleri: doğrusal, dairesel ve eliptik polarizasyon [49].

mesafe oldukça fazladır. Bu nedenle, enerji kayıplarını en aza indirmek ve verici ile alıcı antenler arasında kutuplaşma uyumsuzluğu oluşmasını önlemek amacıyla sağ el dairesel kutuplama (RHCP) tercih edilmektedir. Sağ el dairesel polarizasyon kullanımı sayesinde antenlerin fiziksel olarak hizalanmasına gerek kalmaz. Ayrıca, sağ el dairesel polarizasyon (RHCP) iletilen bir sinyal bir yansımaya yüzeyine çarptığında polarizasyon yönü değişerek sol el dairesel polarizasyona (LHCP) dönüşür; bu durum da çoklu yol etkisinin ve yansılardan kaynaklanan bozucu etkilerin azaltılmasına katkı sağlar [51]. Dairesel polarizasyon, elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörünün zamanla dönmesiyle oluşur. Sağ el dairesel kutuplama (RHCP), elektrik alanının iki dik bileşeni olan \vec{E}_θ ve \vec{E}_ϕ bileşenlerinin uygun faz ve genlik ilişkisi ile birleştirilmesiyle elde edilir. Rao [52] tarafından tanımlandığı üzere, RHCP aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$RHCP = \vec{E}_\theta - j\vec{E}_\phi \quad (1.3)$$

Bu bileşenler hem genlik hem de faz bilgisi içerir. Her bir bileşen aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\vec{E}_\phi = E_\phi \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) e^{-j\phi} \quad (1.4)$$

$$\vec{E}_\theta = E_\theta \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) e^{-j\theta} \quad (1.5)$$

Burada θ ve ϕ , faz kaymalarını (radyan cinsinden), E_θ ve E_ϕ ise elektrik alanın θ ve ϕ yönündeki genliklerini ifade eder.

Dairesel kutuplamanın fiziksel olarak gerçekleşebilmesi için, elektrik alanın bu iki bileşenin genliklerinin eşit olması ve aralarındaki faz farkının $\pi/2$ 'nin tek katları şeklinde olması gerekir. Balanis [53] bu koşulu şu şekilde tanımlar:

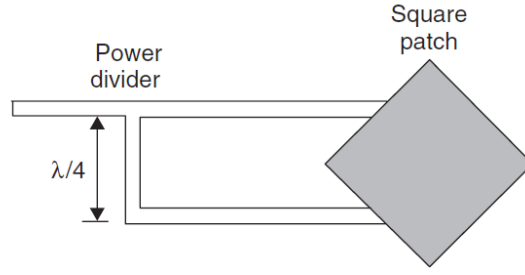
$$|\mathcal{E}_x| = |\mathcal{E}_y| \Rightarrow E_{x0} = E_{y0} \quad (1.6)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \begin{cases} + \left(\frac{1}{2} + 2n \right) \pi, & n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{saat yönünde dönüş için}) \\ - \left(\frac{1}{2} + 2n \right) \pi, & n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{saat yönünün tersine dönüş için}) \end{cases} \quad (1.7)$$

Bu koşullar sağlandığında, elektromanyetik dalga sağ el yönünde dönerek RHCP özelliği taşır. Eğer yayılma yönü ters çevrilirse (örneğin $+z$ eksenı boyunca), saat yönü ve saat yönü tersine ilişkin koşullar birbirleriyle yer değiştirmelidir.

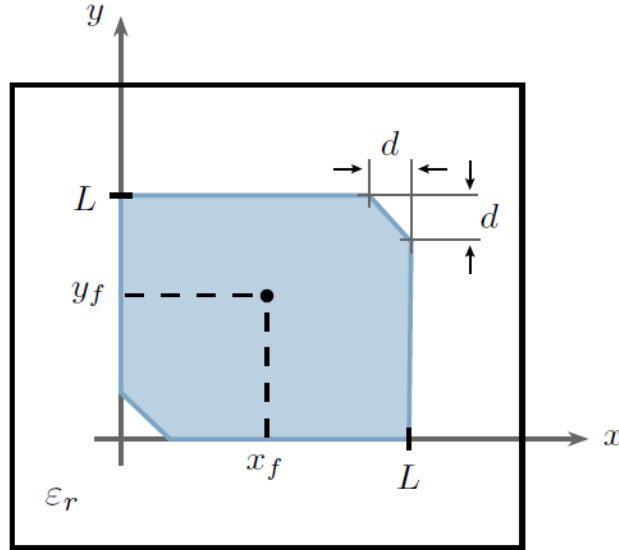
Bir yama anteni dairesel polarizasyon elde etmek için literatürde genellikle iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki çift beslemeli yöntem olup yama antenlerde, antenin bitişik iki kenarından yapılan beslemeyle 90° faz farkı oluşturularak TM_{100} ve TM_{010} modları aynı anda uyarılır. Ancak bu yöntem, anten dizileri için sınırlı yerleşim alanı ve artan karşılıklı bağlaşım gibi dezavantajlar nedeniyle uygun değildir [51]. Bu yöntem Şekil 1.2 ile gösterilmektedir. Çift besleme ile dairesel polarizasyon elde etme yöntemi diğer yöntemle kıyasla daha karmaşık yapıdır ve anten dizisinde yer ihtiyacına sebep olmaktadır.

Dairesel polarizasyon elde etmek için kullanılan ikinci yöntemde ise yama anten tek noktada beslenerek dikdörtgen yama antenin karşılıklı köşelerinden küçük bir parça kesilerek modlar arasında gerekli frekans farkı oluşturulur ve böylece antenin RHCP karakteristiği sağlanır [54]. Şekil 1.3'de gösterilen bu yöntem hem tasarım kolaylığı hem de üretim pratikliği açısından tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında dairesel polarizasyon elde etmek için bu tasarım yöntemi tercih edilmiştir. Dairesel



Şekil 1.2: Dairesel polarizasyon elde etmek için kullanılan çift beslemeli kare patch anten yapısı [51].

polarizasyonlu antenlerin başarımını değerlendirmede kullanılan temel ölçüt eksen oranıdır (axial ratio, AR). Literatürde, 3 dB'nin altındaki AR değerleri, yeterli dairesel polarizasyon sağlandığını göstermektedir.



Şekil 1.3: Köşe kesimli ve tek noktali besleme yöntemiyle dairesel polarizasyon elde etmeyi sağlayan dikdörtgen patch anten yapısı [55].

Anten tasarımında dikkate alınması gereken bir diğer önemli tercih ise antenin besleme yapısıdır. Yama antenlerin beslenmesi için kullanılabilir çeşitli yapılandırmalar mevcuttur. En yaygın kullanılan besleme teknikleri arasında koaksiyel prob beslemesi, mikroserit hat beslemesi, elektromanyetik olarak bağlanmış yakın besleme, açıklık bağlantılı besleme ve eş düzlemlı dalga kılavuzu beslemesi yer almaktadır [56]. Bu çalışmada, üretim sürecinin sadeliği ve tasarım kolaylığı nedeniyle koaksiyel prob besleme yöntemi tercih edilmiştir.

Anten sistemlerinde empedans uyumu, iletim hattından antene aktarılan gücün maksimum verimle iletilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, yansıma katsayısı (S_{11}) ve geri dönüş kaybı, bir antenin gelen gücü ne ölçüde soğurabildiğini değerlendirmede kullanılan temel parametrelerdir. Yansıma katsayısı, iletilen güçten anten tarafından geri yansıtılan kısmın oranını belirtir. Genellikle antenler 50Ω empedans değeri ile uyumlu olacak şekilde tasarlanır. Bu empedans değeri, sistemin diğer RF bileşenleriyle uyumlu çalışmasını sağlar. Geri dönüş kaybı ise bu yansıma oranını logaritmik ölçekte ifade eder ve çoğunlukla -10dB 'den düşük olması istenir. Bu değer, antene ulaşan gücün en az %90'ının etkin şekilde ışıma için kullanıldığını gösterir. Geri dönüş kaybı yerine zaman zaman yansıma katsayısı (S_{11}) ya da voltaj dalga duran oranı (VSWR) gibi ifadeler de anten veri tablolarında yer alabilir. Bu parametreler, iletilen ve yansıyan alan genliklerinin oranına dayanır ve aşağıdaki denklemlerle geri dönüş kaybına dönüştürülebilir:

$$\text{Geri Dönüş Kaybı} = -20 \log |s_{11}| = -20 \log \left| \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} \right| \quad (1.8)$$

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde, GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri) teknolojisine ilişkin genel bilgiler verilmiş, sistemin çalışma prensipleri açıklanmış ve GNSS alıcı antenlerinin karşılaması gereken temel gereksinimler detaylandırılmıştır. .

Çalışmanın üçüncü bölümünde, yüksek dielektrik sabitine sahip bir alt tabaka üzerinde kompakt ve tek katmanlı bir GNSS patch anten tasarlanmıştır. Tasarımda boyut küçüklüğü ve yapısal sadelik ön planda tutulmuş, sağ el dairesel polarizasyon (RHCP) elde etmek amacıyla yama antenin sağ üst ve sol alt köşelerine köşe kesimleri (corner truncation) uygulanmıştır. Ayrıca, empedans bant genişliğini daha da iyileştirmek amacıyla yamanın sol üst köşesine ilave bir kesim entegre edilmiştir. Antenin dairesel polarizasyon performansını artırmak ve aksiyel oranı iyileştirmek için dört adet küçük dikdörtgen oyuk (slot), yama kenarlarına simetrik olarak yerleştirilmiştir. Bu yapısal değişiklikler sayesinde anten hem RHCP karakteristiği hem de genişletilmiş bant genişliği açısından optimize edilmiştir. Bu kapsamda, yüksek dielektrik sabitine sahip iki farklı substrat malzeme olan Rogers TMM10 ($\epsilon_r = 9,8$) ve RO3010 ($\epsilon_r = 11,2$) kullanılarak, $1,27\text{ mm}$ ve $2,5\text{ mm}$ kalınlıklarında dört farklı mikroşerit patch

anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımların geri dönüş kaybı (S_{11}), RHCP kazanç desenleri, aksiyel oran (AR) değerleri ve maksimum kazanç gibi temel RF parametreleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın devamında, bu tekli yama anten yapıtaşı olarak kullanılarak, sırasıyla döndürülmüş elemanlardan oluşan dört elemanlı kompakt bir GNSS anten dizisi geliştirilmiştir. Dizi konfigürasyonunda dikkat edilmesi gereken en önemli etmenlerden bir tanesi de, anten elemanlarının birbirinin çalışma performansını değiştirdiği karşılıklı kuplaj etkisi. Anten dizilerinde karşılıklı bağlaşım, bir elemanın yakınındaki diğer elemanlardan yayılan elektromanyetik alanların etkisiyle, bu eleman üzerinde istenmeyen akımların oluşmasıdır. Özellikle elemanlar arası mesafe azaldığında bu etkileşim daha belirgin hale gelir. Bu durum, dizinin genel ışımada deseninde değişikliklere yol açabilir, her bir elemanın giriş empedansını etkileyebilir ve sonuç olarak dizinin performansını olumsuz yönde etkileyebilir [53]. Anten elemanlarının birbirine göre dizilim açıları, elemanlar arasındaki mesafeler bu noktada dikkat edilmesi gereken hususlardır. Dizi anten tasarımında sıralı döndürülmüş (sequentially rotated) yapı benimsenmiş ve anten elemanları arasındaki mesafenin dizi performansına etkisi analiz edilmiştir. Bu bölümde, dizinin ışınım karakteristikleri ve aktif geri yansıma katsayısı (active reflection coefficient) gibi ileri düzey simülasyon çıktıları da sunulmuştur. Elde edilen nihai anten dizisi, GPS L1 bandı boyunca tutarlı kazanç, düşük aksiyel oran ve kararlı RHCP ışımada deseni göstermektedir. r.

Beşinci ve son bölümde ise çalışmanın genel bulguları özetlenmiş, tasarlanan antenlerin ve anten dizilerinin GNSS L1 bandındaki kompakt ve düşük profilli uygulamalar için uygunluğu vurgulanmıştır. Elde edilen sonuçların, özellikle insansız hava araçları (İHA) ve taşınabilir GNSS sistemleri gibi dar alanlı platformlarda pratik uygulama potansiyeli taşıdığı ifade edilmiştir.

2. GNSS SİSTEMİ

Amerika Birleşik Devletleri'nin Küresel Konumlama Sistemi (GPS), 1970'lerdeki başlangıcından bu yana gelişimini sürdürmekte olup, 1993'ten beri tam operasyonel olarak hizmet vermektedir. 3 Temmuz 2023 itibarıyla sistemde 31 aktif uydu bulunmaktadır [57]. Başlangıçta askeri amaçlarla geliştirilen bu teknoloji, zamanla sivil kullanım alanlarına da entegre olmuş ve günümüzde en yaygın kullanılan küresel navigasyon uydu sistemlerinden (GNSS) biri haline gelmiştir. Diğer ülkeler de benzer şekilde kendi uydu sistemlerini geliştirmiştir [58]–[60]. GPS'in Rusya'daki karşılığı olan GLONASS (Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema) takımyıldızı 24 aktif uydudan oluşmaktadır [61,62]. Avrupa'nın Galileo sistemi [63,64], Çin'in BeiDou'su (COMPASS olarak da bilinir) [65], Japonya'nın QZSS sistemi [66] ve Hindistan'ın IRNSS (NavIC) sistemi [67] hâlihazırda aktif olarak görev yapmaktadır. GNSS uydu sistemlerine uyumlu alıcılar gün geçtikçe yaygınlaşmakta ve bu alana olan ilgi artmaktadır. Artan ilgi, sistemlerin teknolojik olarak gelişmesini de beraberinde getirmiş özellikle alıcı donanımlarının daha kompakt boyutlarda üretilmesi, anten yapılarına yönelik minyatürleştirme gereksinimini ortaya çıkarmıştır [33]. GNSS teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, kullanıcı seviyesinde yer alan alıcı sistemlerinin performansı her zamankinden daha kritik hale gelmiştir.

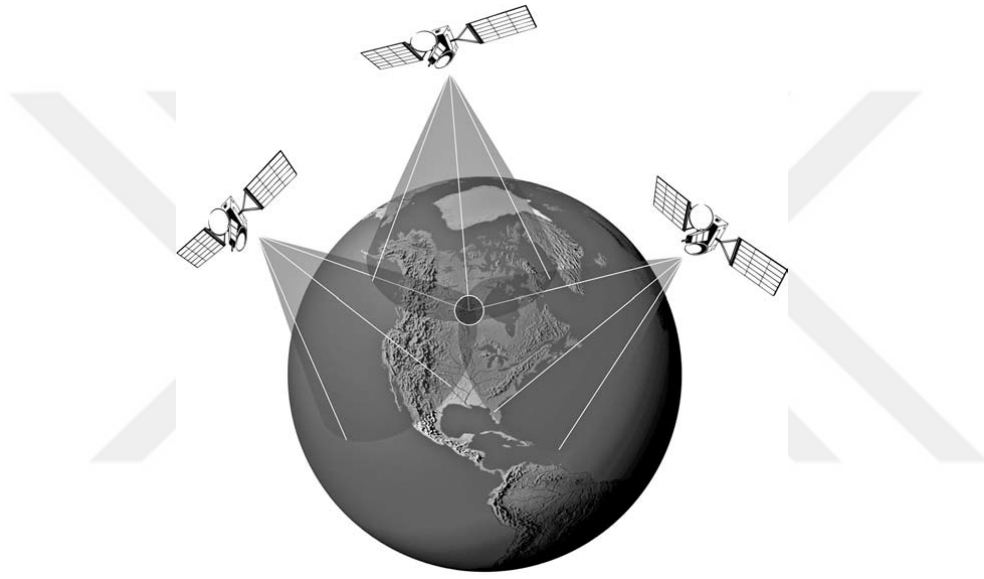
GNSS sistemleriyle konum belirleme işleminde, yer alıcısının uzaydaki konumunu tanımlamak için en az üç bilinmeyen çözülmesi gerekir: x , y , z koordinatları (enlem, boylam ve yükseklik bilgisi). Bu üç bilinmeyeni çözebilmek için en az üç farklı uydudan sinyal alınması gereklidir. Her bir uydudan alınan sinyal, alıcı ile uydu arasındaki mesafenin belirlenmesini sağlar.

Kullanıcının üç boyutlu konumu ve zaman farkı, aşağıdaki doğrusal olmayan denklemler sisteminin eşzamanlı çözülmesi ile elde edilir:

$$(x_u - x_i)^2 + (y_u - y_i)^2 + (z_u - z_i)^2 = c^2(t_i - t_u + \Delta t)^2 \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de alt indis olarak (i) bulunan (x, y, z) terimleri uydunun bilinen konum bileşenlerini, (t) ise sinyalin gönderildiği zamanı ifade eder. Alt indis olarak (u) kullanılan terimler ise kullanıcının bilinmeyen konum ve zaman bilgilerini temsil etmektedir. (c) ışık hızıdır; (Delta t) ise kullanıcı saati ile uydu saatleri arasındaki zaman farkını göstermektedir [68,69].

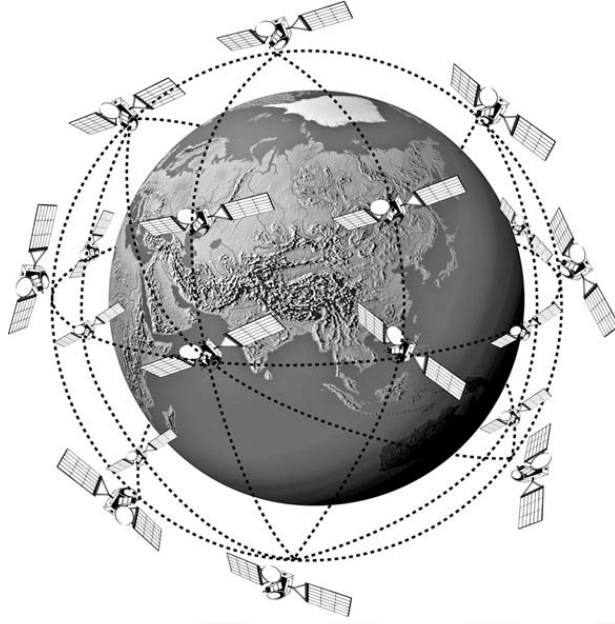
Bu işlem, geometrik üçgenleme (triangulation) prensibine dayanır ve Şekil 2.1’de teknik olarak gösterilmektedir. Şekilde uyduların kapsadığı alanlar daire içerisinde gösterilmektedir, kullanıcı bu üç uydunun kapsadığı alanların kesişimi içerisinde yer almaktadır.



Şekil 2.1: Bir GNSS alıcısının en az üç uydu ile yaptığı geometrik üçgenleme işlemi sayesinde konumunun belirlenmesi [70].

Ancak, alıcıdaki saat ile uydularda bulunan yüksek hassasiyetli atomik saatler arasında zaman uyumsuzluğu oluşabileceğinden, bu zaman farkının da bir bilinmeyen olarak modele dahil edilmesi gerekir. Bu dördüncü bilinmeyi çözümleyebilmek için dördüncü bir uydu sinyaline ihtiyaç duyulur. Böylece, dört bilinmeyen (üç konumsal, bir zamansal) tamamı çözülerek alıcının kesin ve mutlak konumu hesaplanabilir.

Bu sistemler, Şekil 2.2’deki gibi farklı yörünge türlerine yerleştirilmiş çeşitli uydu takımyıldızlarından oluşmaktadır ve buldukları mesafeden yeryüzündeki kullanıcılara konum, hız ve zaman (PVT) bilgilerini içeren sinyalleri sürekli olarak iletmektedir.



Şekil 2.2: Uydu takımyıldızlarının yörünge yapısının temsili görünümü [70].

Küresel konumlandırma hizmeti sunan GPS, GLONASS ve Galileo sistemleri MEO (Orta Dünya Yörüngesi) seviyesinde faaliyet göstermektedir. Çin'in BeiDou sistemi ise MEO'nun yanı sıra jeosenkron (GEO) ve eğimli jeosenkron (IGSO) yörüngelerde de uydular barındırarak hem küresel hem bölgesel kapsama sağlamaktadır. Yalnızca bölgesel hizmet sunmayı amaçlayan Japonya'nın QZSS ve Hindistan'ın IRNSS sistemleri ise GEO ve IGSO yörüngelerinde konumlanmış uydularla hizmet vermektedir. Her sistemin yörünge yapısı ve uydu sayısı, kapsama alanı ve operasyonel gereksinimlere göre optimize edilmiştir. GNSS takımyıldızlarının yörünge türleri ve uydu sayıları Çizelge 2.1'te özetlenmektedir [71].

Çizelge 2.1: GNSS takımyıldızlarının yörünge özellikleri.

Sistem	Yörünge Türü	Uydu Sayısı
GPS	MEO	32 (6 düzlemde)
GLONASS	MEO	21 (3 düzlemde)
BDS	MEO	27 (3 düzlemde)
	GEO	5
	IGSO	10
Galileo	MEO	25 (3 düzlemde)

GNSS uydularından yayılan sinyaller, buldukları yörüngeden uzak mesafedeki Dünya'ya ulaştıklarında, serbest uzaydaki zayıflama nedeniyle çok düşük güç seviyelerine inmektedir. Örneğin, GPS L1 C/A ve GLONASS G1 sinyallerinin alıcı

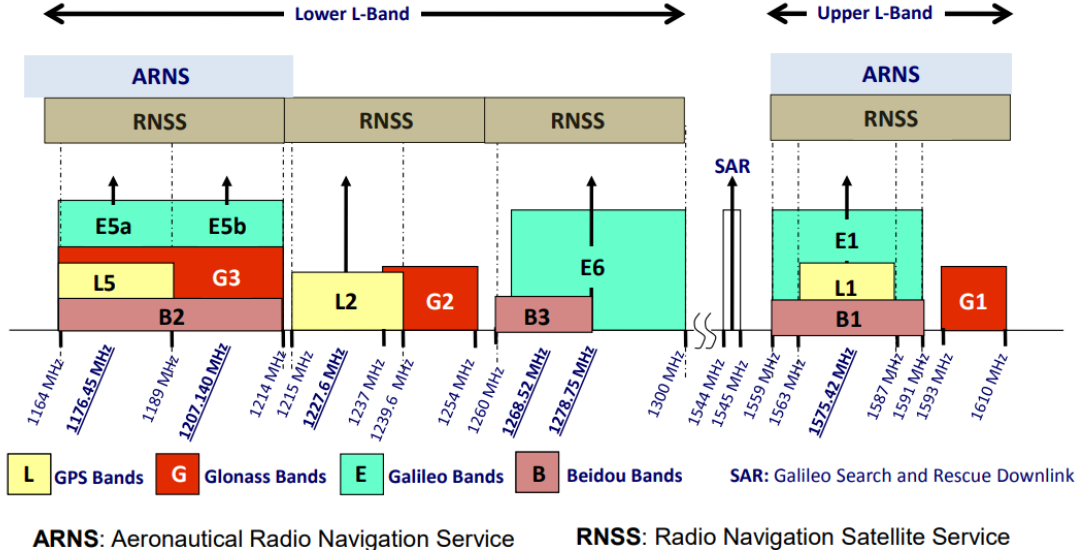
ucundaki minimum güç seviyeleri sırasıyla yaklaşık -158.5 dBW (-128.5 dBm) ve -161 dBW (-131 dBm) düzeyindedir [72,73]. Bu değerler çoğu zaman alıcının termal gürültü taban seviyesinin bile altındadır ve bu nedenle GNSS alıcı sistemleri oldukça savunmasız hale gelmektedir [33].

Sinyal gücünün bu denli zayıf olması, GNSS alıcılarını atmosferik etkiler, çok yönlü yayılım, solma gibi doğal bozuculara karşı hassaslaştırmakta; bununla birlikte, karasal radyo frekansı girişimleri (RFI) nedeniyle performansları ciddi ölçüde düşebilmektedir. Bu girişim sinyalleri kasıtlı (örneğin, jamming cihazları) veya kasıtsız (örneğin, iletişim sistemleri, elektrikli cihazlar) kaynaklı olabilir [52,74]. Girişim sinyalleri, GNSS sinyallerine kıyasla genellikle çok daha yüksek güç seviyesine sahip olduğundan, alıcının sinyal işleme birimini doyurabilir ve sinyalin çözülmesini engelleyebilir.

GNSS sistemlerinin İHA'lar, otonom araçlar ve taşınabilir cihazlar gibi boyutsal olarak kısıtlı platformlara entegrasyonu, anten tasarımını ayrı bir mühendislik sorunu haline getirmiştir. Bu tür platformlara yönelik antenlerin yalnızca küçük boyutlu olması yeterli olmayıp, aynı zamanda yüksek kazançlı, yüksek bant genişliği, doğru polarizasyonlu, GNSS uygulamaları için uygun hüzmeye sahip olmalıdır. Dizi antenlerde ise antenler arasındaki etkileşimin düşük seviyede olması gerekmektedir. CRPA sistemleri için her antenin ayrı besleme hattına sahip olması gerekmektedir. Bu sayede her antenden gelen sinyal bilgisi, sayısal olarak hüzmelendirme algoritmasına dahil edilerek karıştırma sinyali bastırılmış şekilde alıcı tarafına iletilmektedir.

GNSS sistemleri, farklı frekans bantlarında çalışan çok sayıda uydu sinyali aracılığıyla konumlama, zaman senkronizasyonu ve yön belirleme hizmeti sunar. Bu sinyallerin büyük bölümü, 1–2 GHz aralığındaki L bandı içerisinde yer alır [52,64,75]. Her GNSS sisteminin kendine özgü sinyal yapıları ve frekans yerleşimleri bulunmaktadır. Bu frekansların genel dağılımı Şekil 2.3'de sunulmuştur. Sivil kullanım açısından en yaygın kullanılan bant, 1575.42 MHz merkez frekansına sahip olan ve GPS L1, Galileo E1 ile BeiDou B1 sinyallerini barındıran ortak frekans bölgesidir.

Bir sonraki bölümde, GNSS sistemlerinin zayıf sinyal ortamlarında karşılaştığı performans sınırlamalarını azaltmak amacıyla özel bir GNSS birim anteni tasarımı



Şekil 2.3: GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou sistemlerine ait GNSS frekans bantları [76].

ve dizi anten tasarım detaylarına yer verilmiştir. Özellikle GPS L1 frekansında (1575,42 MHz) çalışan anten, aynı zamanda Galileo E1 ve BeiDou B1 sinyallerini de kapsayan genişletilmiş uyumluluğu nedeniyle tercih edilmiştir. Anten tasarımında kullanılan geometri, alt tabaka malzemesinin farklı kalınlıklarda ve farklı dielektrik sabiti sahip olmasının etkisi, besleme yöntemi ve yansıtıcı düzlem gibi yapısal parametreler ayrıntılı biçimde incelenmiş ve optimize edilmiştir. Tasarım süreci boyunca, antenin temel RF karakteristikleri ve GNSS uygulamaları açısından kritik performans ölçütleri değerlendirilmiştir. Bilgisayar ortamında yapılan benzetimler aracılığıyla analiz edilmiş ve elde edilen yapı prototip üretime uygun hale getirilmiştir.



3. BİRİM ANTEN TASARIMLARI

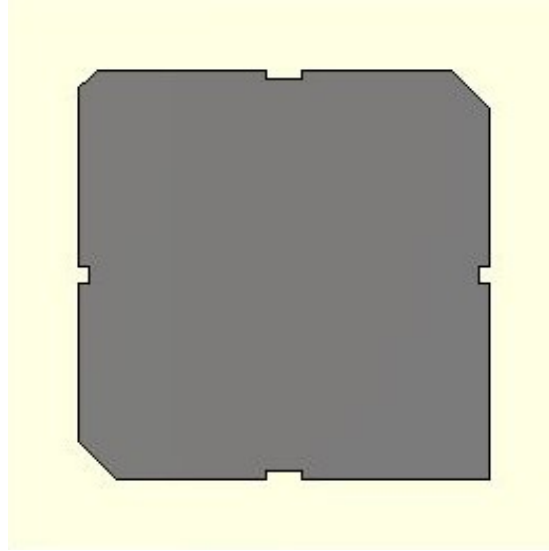
Bu bölümde, GNSS sistemleri için geliştirilen birim yama anten yapıları detaylı biçimde ele alınmaktadır. Önceki bölümlerde GNSS uygulamalarının gereksinimleri ve literatürdeki yaklaşımlar değerlendirilmiş ve bu çalışmada kompakt boyutlu, geniş bantlı, yüksek kazançlı ve sağ el dairesel kutuplaşmalı (RHCP) anten tasarımları hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında, yüksek dielektrik sabitine sahip iki farklı Rogers malzemesi, TMM10 ($\epsilon_r = 9.8$) ve RO3010 ($\epsilon_r = 11.2$), üzerinde, 1.27 mm ve 2.5 mm kalınlıklarında dört farklı birim anten yapısı tasarlanmıştır. Tüm yapılar, CST Microwave Studio ortamında optimize edilmiştir.

Tasarımlar, merkez frekans, geri yansıma katsayısı (S_{11}), aksenal oran (axial ratio – AR), yönlendirme desenleri ve kazanç gibi temel performans parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Özellikle aksenal oran, RHCP performansını değerlendirmek adına temel bir kriter olarak ele alınmıştır. Ayrıca, anten boyutu ve alt tabaka kalınlığı gibi fiziksel parametrelerin performans üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Anten geometrisinde çeşitli yapısal iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Sağ üst ve sol alt köşelere uygulanan kesitlerle dairesel kutuplaşma elde edilmiştir. Empedans bant genişliğini artırmak amacıyla yamanın sol üst köşesine ek bir kesim daha entegre edilmiştir. Ayrıca, yama kenarlarına yerleştirilen dikdörtgen yarıklar sayesinde aksenal oran ve bant genişliği performansında iyileşme sağlanmıştır. Tüm bu yapısal düzenlemeler, tek katmanlı, kompakt ve RHCP karakteristiğine sahip bir GNSS anteninin elde edilmesini mümkün kılmıştır. Şekil 3.1’de optimize edilmiş birim antenin üstten görünümü sunulmaktadır.

Bu tasarım yaklaşımı sonucunda, GNSS alıcıları için tek katmanlı, kompakt ve yapısal olarak sade bir yama anten modeli ortaya konmuştur. Gerçekleştirilen optimizasyonlar



Şekil 3.1: Birim antenin önden görünümü.

sayesinde anten, GPS L1 bandında (merkez frekansı 1575.42 MHz olan) kararlı kazanç, düşük eksnel oran ve uyumlu kutuplaşma karakteristiği sergilemektedir.

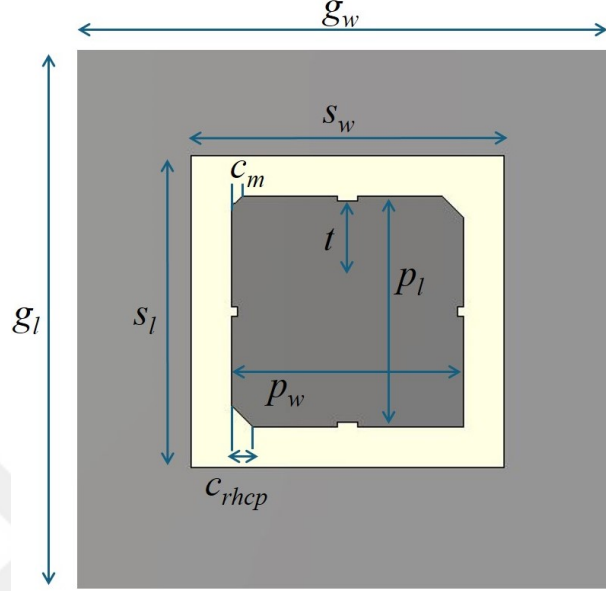
Elde edilen bu yapı, GNSS sinyallerinin güvenilir bir şekilde alınması için gerekli olan temel parametreleri sağlamaktadır ve ilerleyen aşamalarda oluşturulacak dizi yapılar için bir temel teşkil etmektedir. Ayrıca, antenin düşük profil yapısı ve tek katmanlı oluşu, onu özellikle İHA'lar, otonom araçlar ve taşınabilir sistemler gibi boyutsal sınırlamaların önemli olduğu platformlar için uygun hale getirmektedir. GNSS tabanlı uygulamalarda hem birim anten olarak hem de çoklu anten sistemleri için güçlü bir aday haline getirmektedir.

3.1 TMM10 $\epsilon_r = 9.8$ İle Birim Anten Tasarımları

Bu alt bölümde, Rogers TMM10 malzemesi kullanılarak tasarlanan birim GNSS patch anten yapısı sunulmaktadır. TMM10, $\epsilon_r = 9.8$ olan yüksek dielektrik sabitine sahip bir seramik bazlı malzeme olup, minyatür anten uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu malzemenin tercih edilmesindeki temel amaç, sınırlı fiziksel alanda çalışabilen, küçük boyutlu ancak performansı düşmeyen anten yapıları elde etmektir.

Tasarım sürecinde iki farklı anten alt malzeme kalınlığı ele alınmış ve 1.27 mm ile 2.5 mm kalınlıktaki yapıların performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kalınlık değişiminin, özellikle giriş empedansı uyumu, geri yansımaya katsayısı ve

daireysel kutuplaşma kalitesi (eksenel oran, AR) üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Tüm birim anten yapıları için Şekil 3.2’de görülen tasarım parametreleri, her malzeme ve kalınlık için GNSS L1 bandında optimum performans sağlayacak biçimde CST Microwave Studio ortamında yeniden optimize edilmiştir.



Şekil 3.2: Birim GNSS patch anteni için parametrik yapısal değişkenler.

3.1.1 2.5 mm kalınlıklı TMM10 ile tasarlanmış birim anten

Bu tasarımda yüksek kalınlığa sahip (2.5 mm) TMM10 dielektrik tabaka kullanılmıştır. Kalınlığın artırılması, özellikle bant genişliği ve empedans uyumu ve kazanç üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Tasarımın performans karakteristikleri bu bölümde ayrıntılı şekilde sunulmaktadır. Şekil 3.2’de gösterilen yapısal parametreler, 2.5 mm kalınlığa sahip Rogers TMM10 alt tabakası üzerinde GNSS L1 bandında çalışacak şekilde optimize edilmiştir.

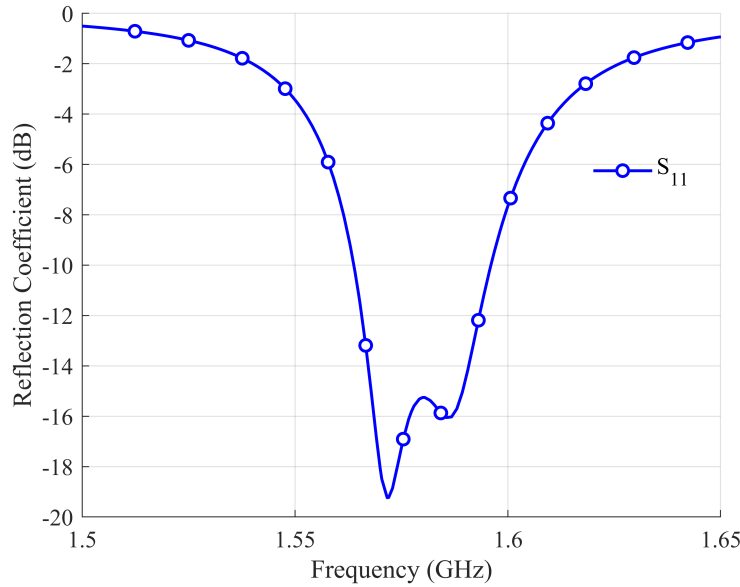
Tüm parametreler CST Microwave Studio ortamında optimize edilmiş ve aşağıda Tablo 3.1’de sunulmuştur. Anten, koaksiyel besleme yöntemiyle beslenmekte olup, dış iletken toprak düzlemi ile temas halindedir.

Tasarımda belirtilen parametre değerlerine göre 2.5 mm kalınlıklı TMM10 dielektrik malzemesi üzerinde tasarlanan birim anten yapısının geri yansıma katsayısı (S_{11}) Şekil 3.3’de verilmiştir. Anten, 1575.42 MHz merkez frekansı çevresinde yaklaşık -19 dB seviyesinde minimum geri yansıma katsayısı sergilemektedir. Bu değer,

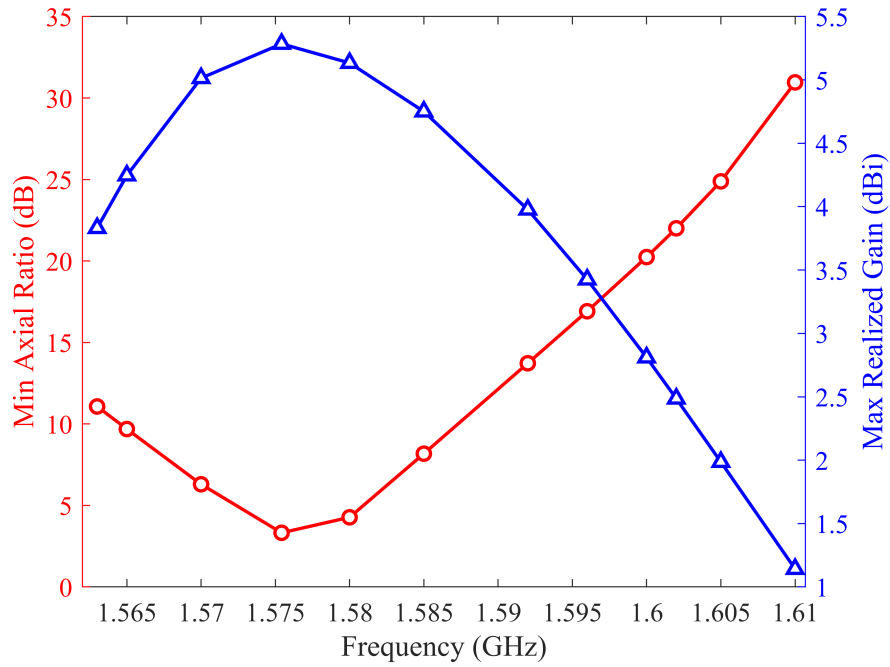
Çizelge 3.1: 2.5 mm TMM10 tabanlı anten için fiziksel boyutlar.

Sembol	Tanım	Değer
s_w	Alt tabaka genişliği	40 mm
s_l	Alt tabaka uzunluğu	40 mm
p_w	Patch genişliği	29.68 mm
p_l	Patch uzunluğu	29.68 mm
g_w	Toprak düzlemi genişliği	$3 \times p_w$
g_l	Toprak düzlemi uzunluğu	$3 \times p_l$
h_s	Alt tabaka kalınlığı	2.5 mm
t	Besleme çentiği boyu	9.78 mm
c_{rhcp}	Dairesel kutuplaşma için köşe kesimi genişliği	2.76 mm
c_m	Empedans uyumu için köşe kesimi genişliği	1.29 mm
rl_d	Sağ/sol kenar yarık derinliği	0.74 mm
rl_w	Sağ/sol kenar yarık genişliği	0.62 mm
tb_d	Üst/alt kenar yarık derinliği	0.65 mm
tb_w	Üst/alt kenar yarık genişliği	1.30 mm
ϵ_r	Bağıl dielektrik sabiti	9.8
$\tan \delta_k$	Tanjant kaybı	0.002

antenin hedeflenen frekans bandında başarılı bir empedans uyumu sağladığını göstermektedir. Ayrıca, -10 dB sınırının altında kalan çalışma bandı oldukça geniş bir frekans aralığına yayılmış olup, 1563 MHz ile 1594 MHz arasında tanımlanmaktadır. Bu bant genişliği, antenin GPS L1 bandı uygulamaları için gerekli olan geniş bantlı çalışma koşulunu sağladığını ortaya koymaktadır.

**Şekil 3.3:** 2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 tabanlı birim anten için geri yansımaya katsayısı (S_{11}).

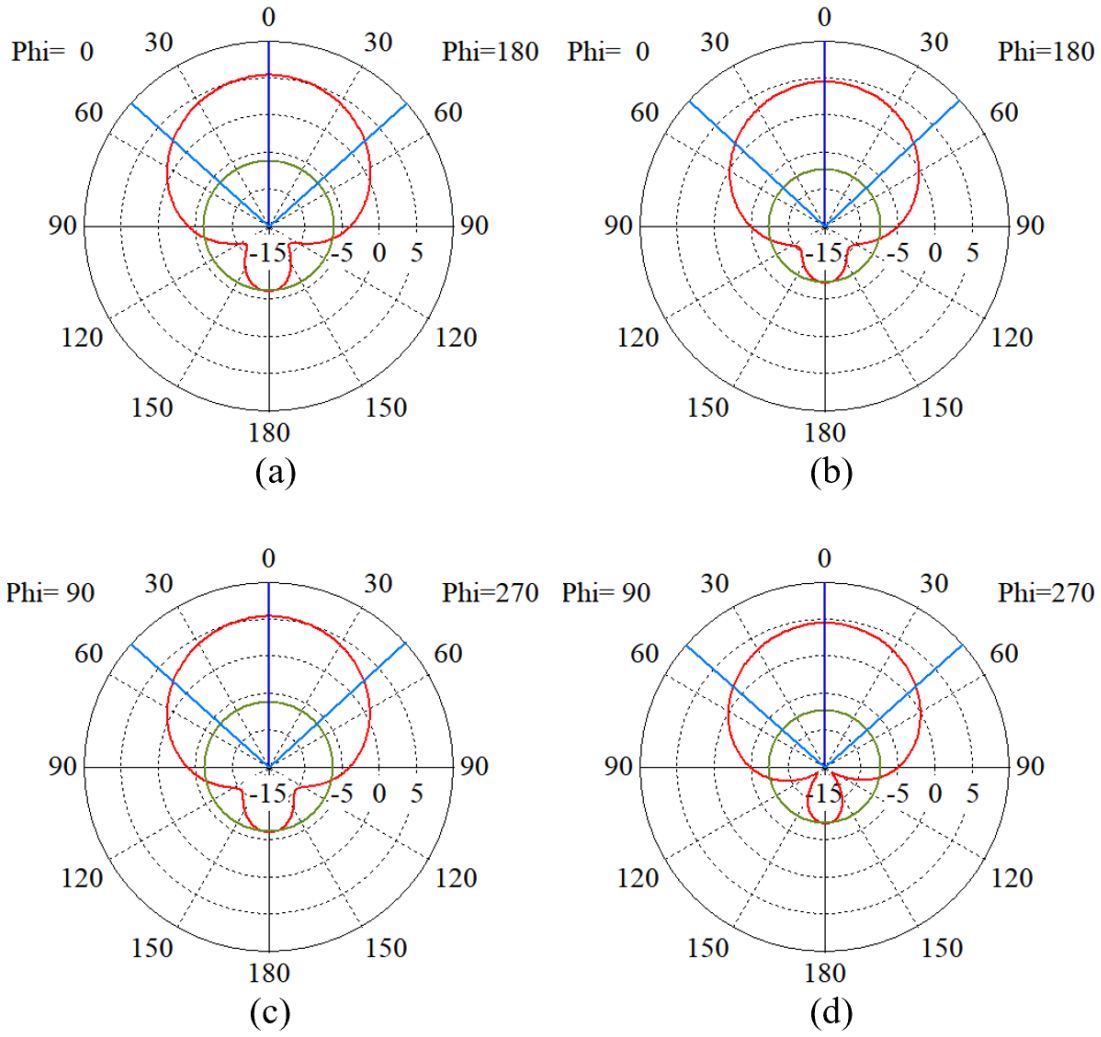
Çalışma frekans bandı içerisindeki minimum aksel oran (axial ratio) ve tepe RHCP kazanç değeri, antenin dairesel kutuplaşma başarımını göstermekte olup, bu iki performans ölçütü Şekil 3.4’de aynı grafikte verilmiştir. 1575.42 MHz (L1 merkez frekansı) civarında elde edilen sağ el dairesel kutuplaşmaya (RHCP) karşılık gelen kazanç 5.28 dBi seviyesindedir. Aynı frekans civarında minimum aksel oran değeri ise yaklaşık 2.32 dB olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, tekil patch antenin L1 bandında istenen kutuplaşma karakteristiğini başarıyla sağladığını göstermektedir.



Şekil 3.4: 2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 tabanlı birim antenin aksel oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleştirilen kazanç (mavi) değerleri.

Şekil 3.5’de, tekil GNSS yama antenine ait benzetimle elde edilen sağ el dairesel kutuplaşmalı (RHCP) ışın desenleri gösterilmektedir. Sonuçlar, L1 ve G1 bantlarının merkez frekanslarında $\phi = 0^\circ$ ve $\phi = 90^\circ$ düzlemlerinde elde edilen gerçekleştirilmiş RHCP kazanç desenlerini ortaya koymaktadır. Elde edilen desenlerdeki simetri ve yarımküresel yayılan düzenli ışınlar, uydu sinyallerinin verimli bir şekilde alınabilmesini sağlamakta olup, anteni GNSS tabanlı İHA uygulamaları, otonom, insansız araçlar için oldukça uygun hale getirmektedir.

Bir sonraki bölümde aynı anten malzemesinin daha ince bir formu kullanılarak yapılan tasarımdan bahsedilecektir.



Şekil 3.5: 2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 tabanlı birim yama antenin ortogonal Φ (ϕ) düzlemlerindeki yönlendirme desenleri: (a) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$ ve (d) 1602 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$.

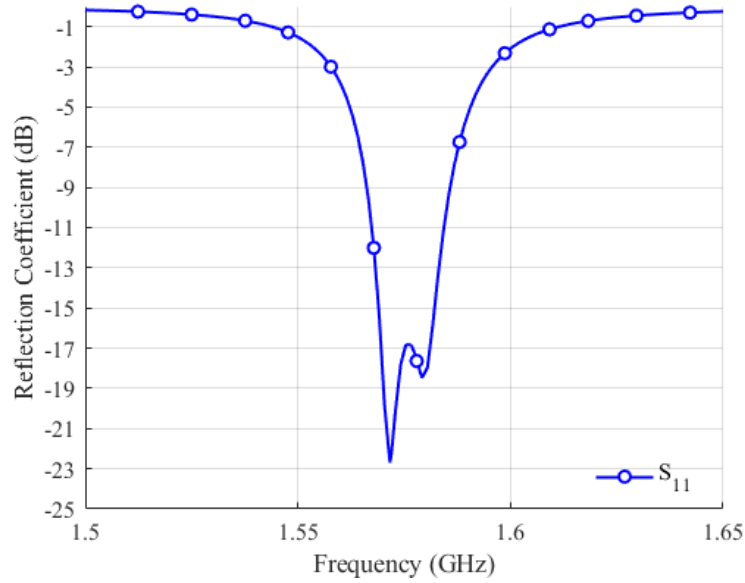
3.1.2 1.27 mm kalınlıklı TMM10 ile tasarlanmış birim anten

Bu bölümde, bir önceki bölüme kıyasla daha düşük kalınlıktaki dielektrik bir tabaka üzerinde tasarlanan bu yapı ile antenin fiziksel inceliği artırılırken, kazanç, eksenel oran (AR) ve empedans uyumu gibi temel performans kriterleri 2.5 mm kalınlıklı yapıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Rogers TMM10 malzemesinin kalınlığı 2.5 mm'den 1.27 mm'ye düşürülerek tasarım ortamında yeniden optimize edilmiştir. Tablo 3.1'de sunulan boyutsal parametreler bu yeni kalınlığa uygun şekilde güncellenmiştir. Yama antenin genişliği ve uzunluğu

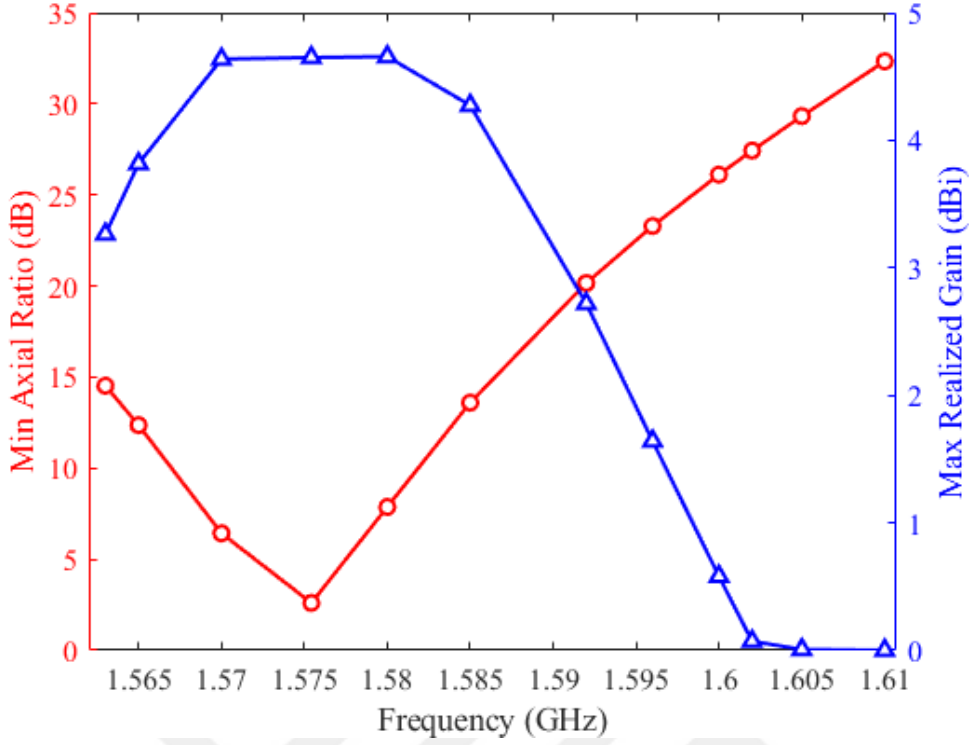
29.68 mm'den 30.19 mm'ye yükseltilmiştir. Ayrıca, köşe kesimleri ve kenar yarıkları gibi yapısal açıklıklarda yapılan küçük değişikliklerle antenin hedef frekans bandı olan GPS L1 merkez frekansı (1575.42 MHz) korunmuştur. Bu yeni yapı, GNSS uygulamaları için uygun eksenel oran ve kazanç performansı göstermektedir. Ancak, alt tabaka kalınlığının azalması nedeniyle empedans bant genişliğinde daralma gözlemlenmiştir.

1.27 mm kalınlıklı TMM10 malzemesiyle yapılan tasarımda elde edilen geri yansımaya katsayısı (S_{11}) Şekil 3.6'de sunulmuştur. Anten, 1575.42 MHz merkez frekansına yakın bir bölgede yaklaşık -22 dB seviyesinde minimum geri yansımaya sergilemektedir. -10 dB eşliğinin altındaki çalışma aralığı yaklaşık 1566–1585 MHz arasında olup, bu durum antenin hedeflenen frekans bandında başarılı bir empedans uyumu sunduğunu göstermektedir.



Şekil 3.6: 1.27 mm kalınlıklı Rogers TMM10 tabanlı birim anten için geri yansımaya katsayısı (S_{11}).

Hedeflenen çalışma frekans bandı olan L1 bandı içerisindeki minimum eksenel oran (axial ratio) ve tepe RHCP kazanç değeri Şekil 3.7'de verilmiştir. 1575.42 MHz (L1 merkez frekansı) civarında elde edilen sağ el dairesel kutuplaşmaya (RHCP) karşılık gelen kazanç 4.65 dBi seviyesindedir. Aynı frekans civarında minimum eksenel oran değeri ise yaklaşık 2.6 dB olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, tekil patch antenin L1 bandında istenen kutuplaşma karakteristiğini başarıyla sağladığını göstermektedir.



Şekil 3.7: 1.27 mm kalınlıklı Rogers TMM10 tabanlı birim antenin aksel oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleşen kazanç (mavi) değerleri.

Elde edilen desenlerdeki simetri ve yarımküresel yayılan düzenli ışınlar GNSS sinyallerinin alınabilmesi için uygun olan yarımküresel formda olup, GNSS tabanlı uygulamalarda kullanım için elverişli olduğunu göstermektedir.

3.1.3 2.5 mm ve 1.27 mm kalınlıklı TMM10 ile tasarlanmış antenlerin karşılaştırılması

Bu çalışmada, anten alt tabaka kalınlığının GNSS anten performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, aynı yama anten geometrisine sahip fakat farklı dielektrik kalınlıklara (2.5 mm ve 1.27 mm) sahip iki ayrı tasarım gerçekleştirilmiştir. Her iki anten yapısı da GPS L1 bandında çalışmak üzere optimize edilmiştir. İki farklı kalınlıktaki alt tabaka malzemesi ile tasarlanan antenlerin karşılaştırması Çizelge 3.2’de verilmiştir.

2.5 mm kalınlıklı anten tasarımında, geri yansımaya katsayısı (S_{11}) -10 dB altında kalan frekans aralığı 1563–1594 MHz olarak belirlenmiştir. Bu yapı, merkez frekans olan 1575.42 MHz civarında yaklaşık -19 dB seviyesinde minimum geri yansımaya katsayısı

Çizelge 3.2: Farklı kalınlıktaki Rogers TMM10 antenlerin performans karşılaştırması.

Parametre	2.5 mm TMM10	1.27 mm TMM10
Yama boyutu	29.68 mm	30.19 mm
Alt tabaka kalınlığı	2.5 mm	1.27 mm
S_{11} minimum	-19 dB	-22 dB
$S_{11} < -10$ dB bant aralığı	1563–1594 MHz	1566–1585 MHz
RHCP kazanç (1575.42 MHz)	5.28 dBi	4.65 dBi
Minimum eksenel oran (AR)	2.32 dB	2.6 dB

göstermiştir. Aynı frekans için elde edilen sağ el dairesel kutuplaşmaya (RHCP) karşılık gelen maksimum kazanç 5.28 dBi, minimum eksenel oran (axial ratio, AR) değeri ise yaklaşık 2.32 dB'dir. Yama antenin kenar uzunluğu 29.68 mm olarak optimize edilmiştir.

1.27 mm kalınlıklı anten tasarımında ise -10 dB altında kalan empedans uyum aralığı 1566–1585 MHz ile sınırlı kalmış, bu da daha dar bir bant genişliğine işaret etmektedir. Aynı merkez frekansta, minimum geri yansıma değeri -22 dB olarak elde edilmiştir. Bu yapıdaki RHCP kazancı 4.65 dBi, eksenel oran değeri ise yaklaşık 2.6 dB'dir. Bu yapı için yama kenar uzunluğu 30.19 mm'ye yükseltilmiştir.

Daha ince dielektrik malzeme kullanılması, antenin yataydaki boyutunu artırmış, bant genişliği, kazanç ve eksenel oran bakımından bazı performans kayıplarına yol açmıştır. Özellikle 1.600 MHz civarında, eksenel oranın sağlanamaması sebebi ile sağ el dairesel polarizasyon sonuçları yeterli kalmadığı için, kazanç değerlerinin 0 dBi seviyesine yaklaşması, antenin verimli çalıştığı aralığın daraldığını göstermektedir. Buna rağmen, 1.27 mm kalınlıklı yapı GNSS L1 bandı için gerekli temel kriterleri sağlayarak sınırlı alan gereksinimi olan platformlar için uygun bir çözüm sunmaktadır.

3.2 RO3010 $\epsilon_r = 11.2$ İle Birim Anten Tasarımları

Bu alt bölümde, Rogers RO3010 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen birim GNSS patch anten tasarımı sunulmaktadır. RO3010, $\epsilon_r = 11.2$ gibi oldukça yüksek bir dielektrik sabitine sahip olup, özellikle minyatür anten yapılarında üstün performans sunmasıyla öne çıkmaktadır. Bu özellik, GNSS uygulamalarında daha küçük fiziksel boyutlara sahip antenlerin tasarlanmasını mümkün kılmakta ve kompakt sistemlerde yer kazanımı sağlamaktadır.

Tasarım sürecinde, daha önce TMM10 için kullanılan anten geometrisi temel alınmış ve RO3010 malzemesi ile uyumlu olacak şekilde yeniden optimize edilmiştir. Böylece malzeme değişiminin, özellikle rezonans frekansı, geri yansıma katsayısı (S_{11}) ve aksenal oran (AR) gibi temel anten parametreleri üzerindeki etkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Diğer tüm birim antenlerde olduğu gibi bu yapı için de iki farklı alt tabaka kalınlığı (1.27 mm ve 2.5 mm) incelenmiş; kalınlık değişiminin performansa etkisi değerlendirilmiştir.

RO3010 ile gerçekleştirilen tasarımda, köşe kesimleri ve kenar yarıkları gibi önceki yapısal iyileştirmeler korunmuş; antenin RHCP performansı, empedans uyumu ve bant genişliği kriterleri GNSS L1 bandı için optimize edilmiştir.

Bu tasarım, özellikle çok sınırlı alana sahip platformlarda GNSS alım performansından ödün vermeden çalışan yüksek kazançlı, düşük profil bir anten ihtiyacına yönelik etkili bir çözüm sunmaktadır. RO3010 ile elde edilen yapı, ilerleyen bölümlerde sunulacak dizi anten mimarileri için de uygun bir birim hücre alternatifi olarak değerlendirilmektedir.

3.2.1 2.5 mm kalınlıklı RO3010 ile tasarlanmış birim anten

Bu tasarımda, $\epsilon_r = 11.2$ dielektrik sabitine sahip yüksek permittivite özellikli Rogers RO3010 malzemesi kullanılmıştır. Malzemenin yüksek dielektrik sabiti, antenin rezonans frekansında daha küçük fiziksel boyutlarla çalışmasını mümkün kılmakta ve böylece kompakt sistem entegrasyonuna katkı sağlamaktadır. Ayrıca düşük kayıplı yapısı sayesinde yüksek frekanslarda kararlı bir performans sunmaktadır.

Bu bölümde, Rogers RO3010 malzemesiyle gerçekleştirilen tasarımın performans karakteristikleri ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Şekil 3.2’de gösterilen yapısal parametreler, 2.5 mm kalınlıktaki Rogers RO3010 alt tabakası kullanılarak, GNSS L1 bandında optimum performans elde edecek şekilde CST Microwave Studio ortamında yeniden optimize edilmiştir.

Anten, koaksiyel besleme yöntemiyle beslenecek şekilde tasarlanmış olup, dış iletken yapısı toprak düzlemi ile elektriksel temas halindedir. Malzeme değişimi ile birlikte

anten geometrisinde yapılan güncellemeler ve tüm tasarım parametreleri Tablo 3.3’de sunulmaktadır.

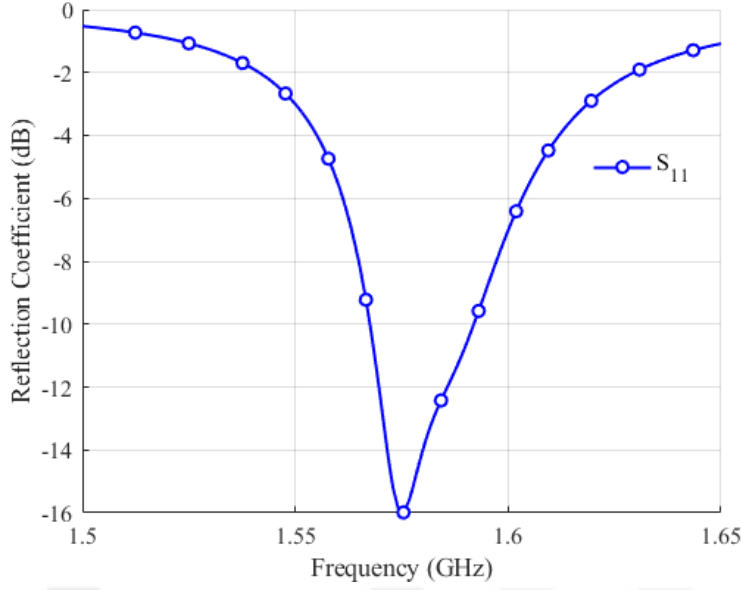
Çizelge 3.3: 2.5 mm Rogers RO3010 tabanlı anten için fiziksel boyutlar.

Sembol	Tanım	Değer
s_w	Alt tabaka genişliği	40 mm
s_l	Alt tabaka uzunluğu	40 mm
p_w	Patch genişliği	27.93 mm
p_l	Patch uzunluğu	27.93 mm
g_w	Toprak düzlemi genişliği	$3 \times p_w$
g_l	Toprak düzlemi uzunluğu	$3 \times p_l$
h_s	Alt tabaka kalınlığı	2.5 mm
t	Besleme çentiği boyu	8.7 mm
c_{rhcp}	Dairesel kutuplaşma için köşe kesimi genişliği	3.19 mm
c_m	Empedans uyumu için köşe kesimi genişliği	2.71 mm
rld	Sağ/sol kenar yarık derinliği	0.60 mm
rlw	Sağ/sol kenar yarık genişliği	0.64 mm
tbd	Üst/alt kenar yarık derinliği	0.65 mm
tbw	Üst/alt kenar yarık genişliği	1.22 mm
ϵ_r	Bağlı dielektrik sabiti	11.2
$\tan \delta_k$	Tanjant kaybı	0.002

Rogers RO3010 malzemesinin yüksek dielektrik sabiti sayesinde, önceki tasarımlarla aynı merkez frekansta (1575.42 MHz) çalışacak şekilde daha küçük boyutlara sahip bir patch anten yapısı elde edilmiştir. Şekil 3.8’de, tasarlanan yapının geri yansımaya katsayısı (S_{11}) karakteristiği sunulmaktadır. Anten, hedeflenen GPS L1 bandı merkez frekansında yaklaşık -16 dB seviyesinde bir minimum geri yansımaya değeri göstermektedir. Bu değer, antenin empedans uyumunun kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu ortaya koymaktadır.

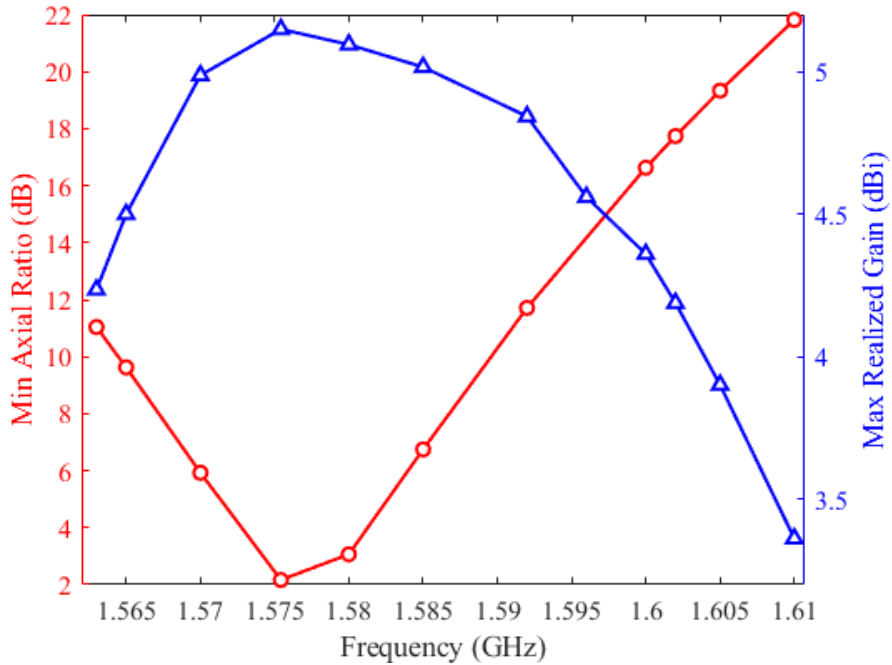
Ayrıca, antenin -10 dB yansımaya eşiği altında kaldığı çalışma bandı 1566 MHz ile 1591 MHz aralığında olup, bu bant genişliği GPS L1 uygulamaları için oldukça yeterli düzeydedir. Yapılan optimizasyonlar sonucunda, malzeme kaynaklı boyutsal küçülmeye rağmen bant genişliğinden ödün verilmemiş, istenen frekans aralığında kararlı bir performans elde edilmiştir.

Rogers RO3010 malzemesiyle tasarlanan 2.5 mm kalınlıklı yapıda, geri yansımaya katsayısının (S_{11}) -10 dB sınırının altında kaldığı çalışma bandı 1566–1591 MHz aralığında elde edilmiştir. Anten, 1575.42 MHz merkez frekansı civarında yaklaşık -16 dB seviyesinde minimum geri yansımaya değeri göstermektedir. Aynı frekansta



Şekil 3.8: 2.5 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim anten için geri yansımaya katsayısı (S_{11}).

sağ el dairesel kutuplaşmaya (RHCP) karşılık gelen maksimum kazanç 5.15 dBi olarak hesaplanmış, minimum aksenal oran (axial ratio) değeri ise yaklaşık 2.16 dB seviyesinde gözlemlenmiştir. Bu değerler Şekil 3.9'de gösterilmektedir.

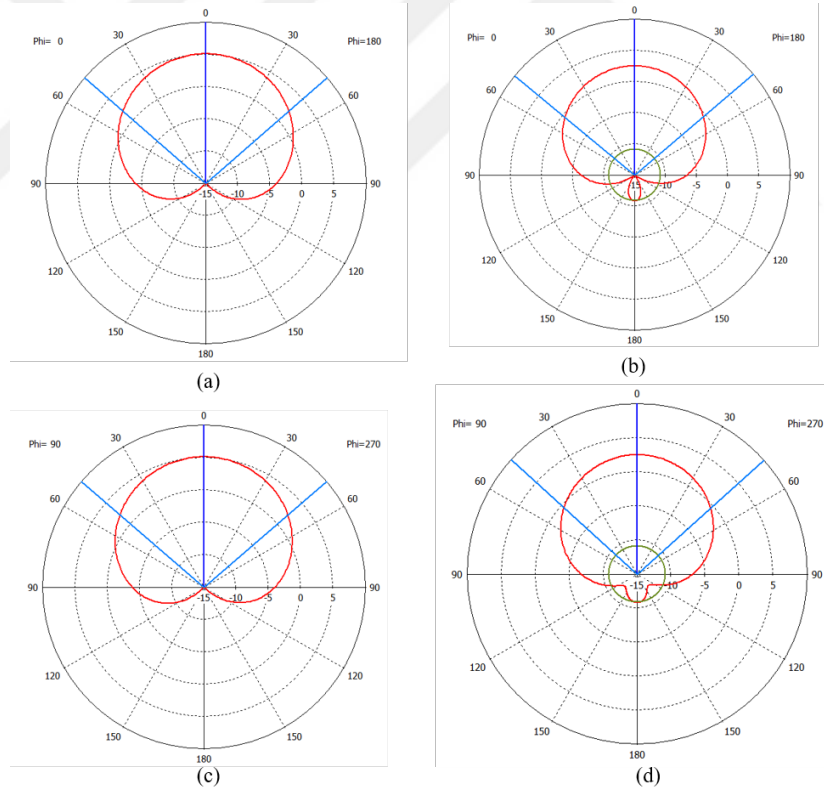


Şekil 3.9: 2.5 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim antenin aksenal oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleşen kazanç (mavi) değerleri.

Rogers RO3010'un yüksek dielektrik sabiti sayesinde, antenin patch boyutu TMM10 tabanlı yapıya kıyasla küçülerek 27.93 mm'ye düşürülmüştür. Bu değişim, yaklaşık olarak %6 oranında bir boyutsal azalmaya karşılık gelmekte olup, sınırlı alanlara entegre edilecek anten sistemleri için önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu boyutsal avantaj, kompakt sistemler için daha uygun bir anten geometrisi sağlarken, L1 bandındaki yönlü kazanç ve kutuplaşma performansında anlamlı bir düşüşe yol açmamış, dolayısıyla minyatürizasyon sürecinde performans kaybı yaşanmamıştır.

Ek olarak, GLONASS G1 bandında da antenin RHCP kazancı 4.18 dBi olarak ölçülmüş ve bu değer, antenin çoklu GNSS sistemleriyle uyumlu çalışabildiğini, özellikle entegre navigasyon çözümleri gerektiren uygulamalarda işlevsel bir yapı sunduğunu göstermektedir.

Şekil 3.10'de antenin ışınma örüntüleri yer almaktadır. Işınma örüntüsü yarıküresel şekilde olup GNSS uygulamaları için uygun olduğu gözükmektedir.



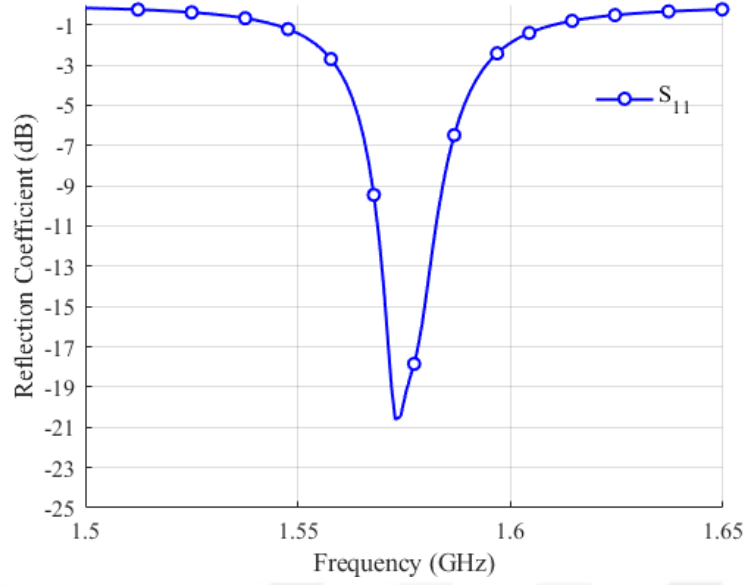
Şekil 3.10: 2.5 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim yama antenin ortogonal Phi (ϕ) düzlemlerindeki yönlendirme desenleri: (a) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$ ve (d) 1602 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$.

3.2.2 1.27 mm kalınlıklı RO3010 ile tasarlanmış birim anten

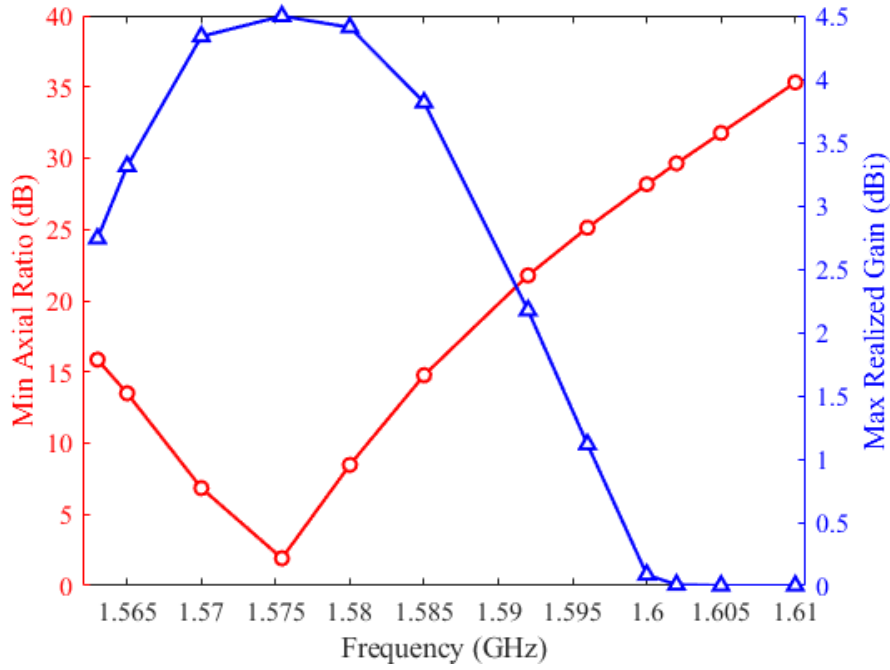
Bu alt bölümde, daha ince bir dielektrik tabaka olan 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen yama anten yapısının performans karakteristikleri detaylı bir Şekilde sunulmaktadır. Yüksek dielektrik sabiti ve düşük kayıplı yapısıyla bilinen RO3010 malzemesi, bu uygulamada hem kompakt boyutlarda hem de GNSS uyumlu bir anten tasarımı elde edebilmek amacıyla tercih edilmiştir. Malzeme kalınlığındaki azalmaya bağlı olarak elektromanyetik alan dağılımında meydana gelen değişiklikler doğrultusunda, tasarım parametreleri yeniden optimize edilmiştir. Bu kapsamda, patch boyutu 27.93 mm'den 28.3 mm'ye yükseltilmiştir. Yapısal güncellemeler sayesinde, GPS L1 merkez frekansı olan 1575.42 MHz çevresinde rezonans sağlanmış ve hedeflenen frekans aralığına uyum başarıyla korunmuştur. Ancak ince alt tabaka malzeme kullanımı antenin çalıştığı frekans bant genişliğinde daralmaya sebep olmuştur. 1600 MHz'e doğru eksenel oran değerinde artmaya sebep olmuştur, bu da anteni daha dar bantta çalışır ve bu dar bant içinde kazanılı hale getirmiştir.

Şekil 3.11'de gösterilen geri yansıma katsayısı (S_{11}) eğrisine göre, anten 1575.42 MHz merkez frekansı yakınında yaklaşık -20 dB minimum geri yansıma değeri sergilemiştir. -10 dB sınırı altındaki çalışma bandı yaklaşık 1568–1583 MHz arasında olup, bu durum empedans uyumunun korunduğunu, ancak alt tabaka kalınlığındaki azalma nedeniyle bant genişliğinde daralma yaşandığını göstermektedir.

L1 frekansı civarında minimum eksenel oran değeri 1.91 dB olarak elde edilmiştir. Aynı frekans bölgesinde maksimum kazanç ise yaklaşık 4.45 dBi olarak ölçülmektedir. Ancak bant daralması sebebi ile antenin G1 frekansındaki kazanı, eksenel oranındaki kötüleşmeler anteni, merkez frekansı 1602 MHz olan Glonass G1 frekans bandı için kullanışlı olmaktan çıkarmaktadır. Birim anten L1 frekansında yüksek kazanılı Şekilde uygun rezonans frekans aralığında çalışabilmektedir. 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim anten için, bu değerlere ilişkin ayrıntılı grafikler Şekil 3.12'de sunulmaktadır.

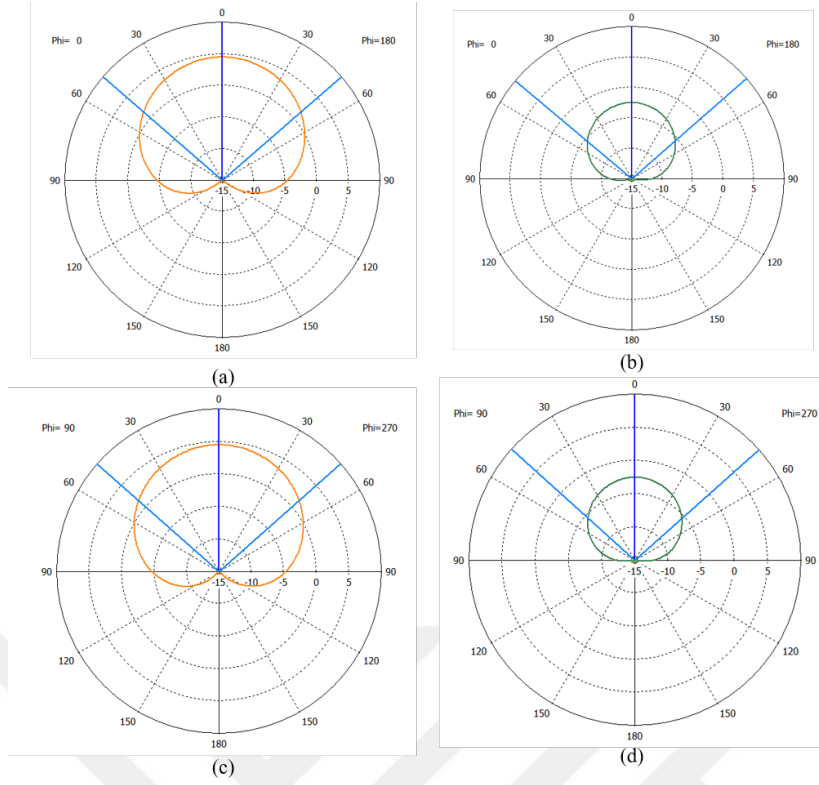


Şekil 3.11: 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim anten için geri yansımaya katsayısı (S_{11}).



Şekil 3.12: 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim antenin eksenel oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleşen kazanç (mavi) değerleri.

Antene ait ışınım karakteristiği ise Şekil 3.13'te verilmiştir. Elde edilen ışınım desenleri, GNSS uygulamaları için oldukça uygun olan yarımküresel forma sahiptir ve bu sayede farklı yönlerden gelen uydu sinyallerini yeterli seviyede alabilecek bir kapsama sağlamaktadır.



Şekil 3.13: 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı birim yama antenin ortogonal Φ (ϕ) düzlemlerindeki yönlendirme desenleri: (a) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz frekansında $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$ ve (d) 1602 MHz frekansında $\phi = 90^\circ$.

3.2.3 2.5 mm ve 1.27 mm kalınlıklı RO3010 ile tasarlanmış birim antenlerin karşılaştırılması

Anten alt malzemesi olarak yüksek dielektrik sabitine ($\epsilon_r = 11.2$) sahip Rogers RO3010 kullanılarak tasarlanan iki farklı kalınlıktaki (2.5 mm ve 1.27 mm) yama antenin performans parametreleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.4’de özetlenen bu değerlendirme kapsamında, kalınlık değişiminin anten performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kalın alt tabaka (2.5 mm) kullanılan tasarımda, anten boyutu daha küçük tutulabilmiş ve $S_{11} < -10$ dB aralığında daha geniş bir bant genişliği elde edilmiştir (1566–1591 MHz). Buna karşılık, daha ince alt tabaka (1.27 mm) kullanılan tasarımda kazanç bir miktar azalsa da (4.45 dBi), eksenel oran (AR) değeri daha düşük çıkmış (1.91 dB) ve bu durum daha iyi bir dairesel polarizasyon performansına işaret etmiştir.

Her iki antenin de GNSS L1 merkezi frekansı olan 1575.42 MHz etrafında yeterli kazanç ve bant genişliği sunduğu göz önüne alındığında, her iki tasarımın da GNSS uygulamaları için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Görülmektedir ki daha kalın alt tabakalar, genellikle kazanç ve bant genişliği gibi parametrelerde iyileşme sağlarken, fiziksel yama boyutunun küçülmesine de olanak sağlamaktadır.

Çizelge 3.4: Farklı kalınlıktaki Rogers RO3010 anten alt malzemesi ile tasarlanan antenlerin performans karşılaştırması.

Parametre	2.5 mm 3010	1.27 mm 3010
Yama boyutu	27.9 mm	28.32 mm
Alt tabaka kalınlığı	2.5 mm	1.27 mm
S_{11} minimum	-16 dB	-20 dB
$S_{11} < -10$ dB bant aralığı	1566-1591 MHz	1568-1583 MHz
RHCP kazanç (1575.42 MHz)	5.15 dBi	4.45 dBi
Minimum eksenel oran (AR)	2.16 dB	1.91 dB



4. DİZİ ANTEN TASARIMLARI

Bu bölümde, birim anten tasarımlarında elde edilen yapıların çoklu yerleşimiyle oluşturulan 4 elemanlı GNSS anten dizileri ele alınmaktadır. Özellikle CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna) uygulamaları gibi yönlü bastırma ve parazit önleme gerektiren senaryolarda, çok elemanlı anten dizileri kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, her biri bağımsız besleme hattına sahip dört birim anten elemanından oluşan bir dizi yapı geliştirilmiştir. Bu bölümde sunulan tasarım ve analizler, GNSS tabanlı İHA sistemleri gibi yönlü parazit bastırma ve kararlı sinyal alımı gerektiren platformlar için uygun bir anten dizisi yapısı ortaya koymayı amaçlamaktadır.

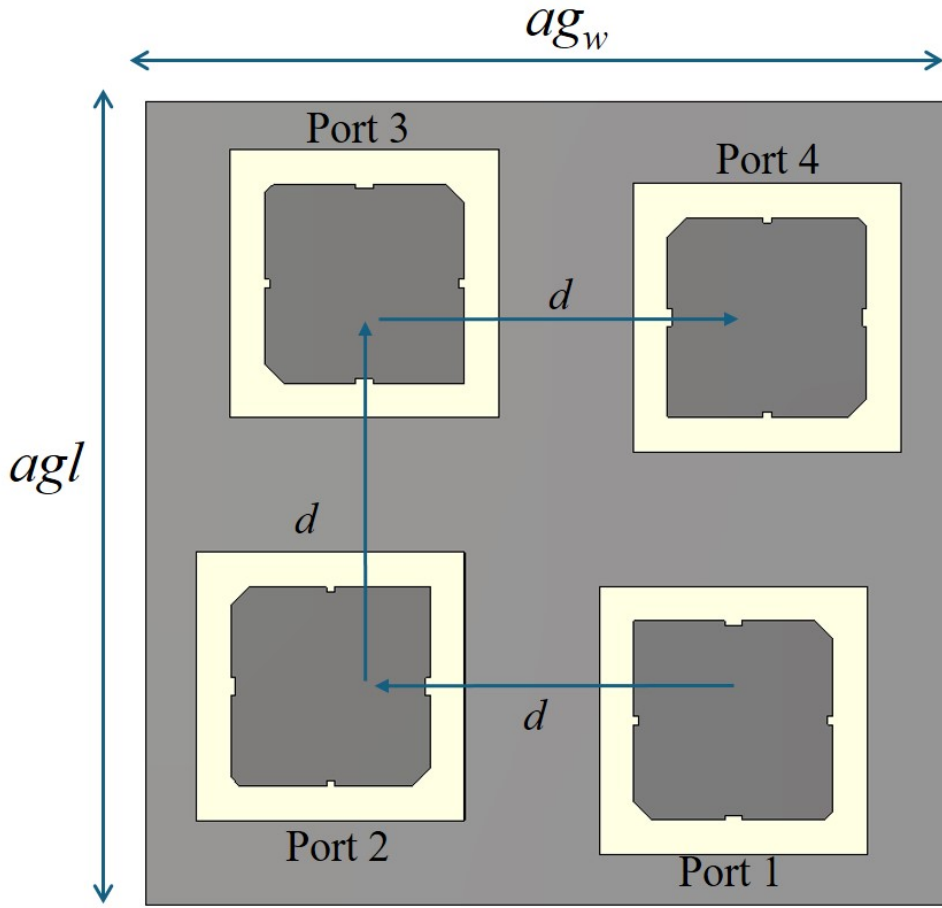
Dizi tasarımı sürecinde, anten elemanları arasındaki yerleşim mesafesi, mutual coupling etkilerini minimize edecek ve kompaktlık hedefini koruyacak şekilde 55 mm olarak belirlenmiştir. CST ortamında yapılan simülasyonlarda, tüm elemanlar belirli faz farklarıyla eşzamanlı olarak beslenmiş; böylece aktif yansıma katsayısı (active reflection coefficient) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, klasik S-parametre analizlerine kıyasla, çok elemanlı sistemlerin gerçek çalışma koşullarını daha doğru modellemektedir.

Anten dizisinin performansı, eksenel oran, RHCP kazancı ve yönlendirme desenleri üzerinden değerlendirilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları 1575.42 MHz (GPS L1) ve 1602 MHz (GLONASS G1) merkez frekansları için sunulmuştur. Ayrıca, CST simülasyonları üzerinden dizinin ışınım karakteristikleri farklı düzlemlerde incelenmiş ve simetrik, geniş açılı bir yayılım deseni sağlandığı gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında önerilen çok elemanlı GNSS anten dizisi, kare matris biçiminde düzenlenmiş dört özdeş GNSS patch anten elemanından oluşmaktadır. GNSS patch antenleri, $(a_{gw} \times a_{gl})$ boyutlarında bir toprak düzlemi üzerine yerleştirilmiş olup, elemanlar arası mesafe parametrik anlamda d mm olarak belirlenmiştir. Her bir anten elemanı, kendi besleme noktasının eksenine etrafında saat yönünde 90° döndürülerek

dizinin simetrik ve düzgün bir ışınlım deseni sergilemesi sağlanmış, böylece sıralı döndürülmüş (sequentially rotated) bir dizi yapısı elde edilmiştir.

2×2 dizi konfigürasyonu, uzamsal çeşitliliğin (spatial diversity) sağlanması ile kompakt ve hafif bir anten yapısının korunması arasında optimum bir denge sunduğu için tercih edilmiştir. Uzamsal çeşitlilik, farklı yönlerden veya yollarla gelen GNSS sinyallerinin farklı anten elemanları tarafından algılanmasını sağlayarak, özellikle sinyal çok yollu yayılım (multipath) ve zayıf sinyal koşullarında sistemin genel performansını artırmaktadır. Her bir anten elemanına uygulanan faz kaydırması, döndürme açısına zıt işaretli olacak şekilde verilmiştir. Önerilen çok elemanlı GNSS anten dizisi Şekil 4.1’te gösterilmektedir.

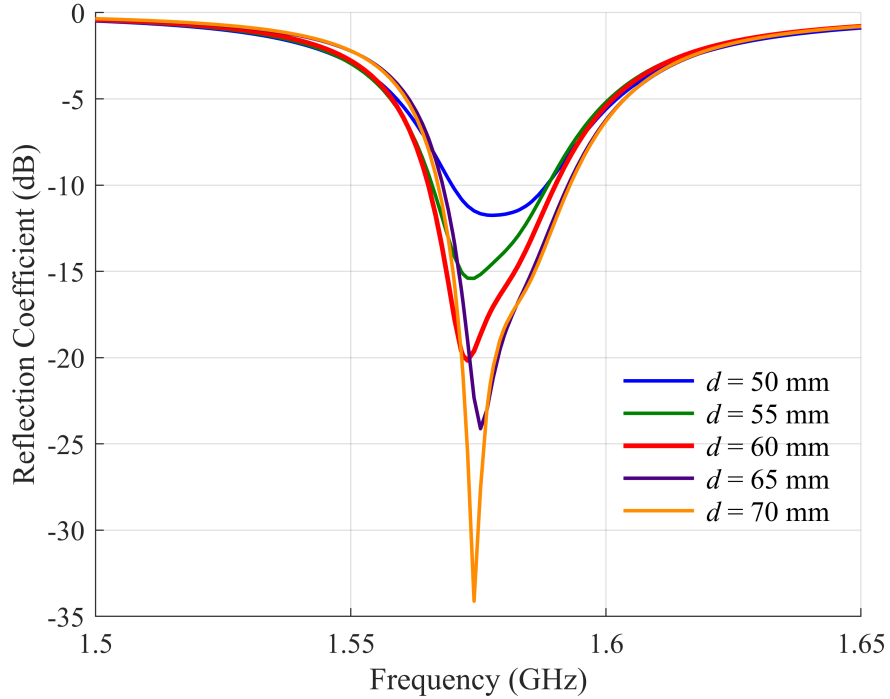


Şekil 4.1: Dört elemanlı sıralı döndürülmüş (sequentially rotated) kare dizi yapısı.

4.1 Anten Elemanları Arası Mesafeye Göre Tasarım Sonuçları

Önerilen dizi yapısı, özellikle L1 bandındaki dairesel kutuplaşma saflığını artırmak ve genel ışınım karakteristiklerini iyileştirmek amacıyla sıralı döndürülmüş (sequentially rotated) bir yapı olarak tasarlanmıştır. Tasarımda her bir anten elemanı saat yönünde 90° döndürülmüştür. Dört anten elemanı eşzamanlı olarak uyarılmış ve her birine kendi döndürülme açısına göre faz kayması uygulanmıştır.

Başlangıçta elemanlar arası mesafe $\lambda/2$ olarak belirlenmiş ve bu uzaklıktaki karşılıklı bağlaşım ile empedans bant genişliğinin iyileştirilmesi için patch parametreleri optimize edilmiştir. Elemanlar arası mesafenin dizi performansına etkisini incelemek amacıyla, 50 mm ile 70 mm arasında parametrik bir tarama gerçekleştirilmiştir. 50 mm ile 70 mm arasındaki farklı elemanlar arası mesafeler için aktif geri yansıma katsayısının (S_{11}) etkisi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: GNSS dizisi için 50 mm ile 70 mm arasındaki mesafelerde elemanlar arası uzaklığın geri yansıma katsayısına (S_{11}) etkisi.

Empedans bant genişliği farklı elemanlar arası mesafelerde neredeyse sabit kalmasına rağmen, daha büyük mesafelerde karşılıklı bağlaşımın azalmasına bağlı olarak

uyumun bir miktar iyileştiği görülmüştür. Anten dizisi kompakt platformlar için tasarlandığından, boyutsal kısıtlar önemli bir faktördür. Bu nedenle, karşılıklı bağlaşım ile boyut sınırlamaları arasında denge sağlamak amacıyla optimum elemanlar arası mesafe olarak 55 mm belirlenmiştir. Antenler arası mesafenin 55 mm olarak belirlendiği analize dayanarak, hem 2.5 mm kalınlıklı TMM10 ile hem de 1.27 mm kalınlıklı RO3010 anten alt malzemesi ile GNSS dizi anten tasarımı çalışılmıştır.

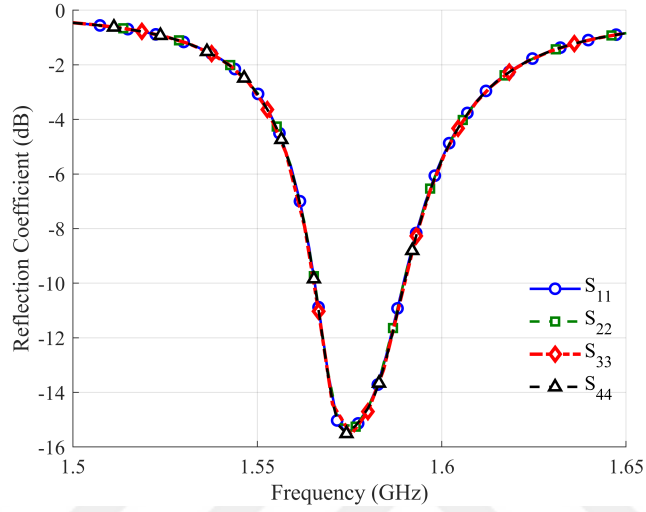
4.2 2.5 mm Kalınlıklı TMM10 İle Tasarlanmış GNSS Dizi Anten Benzetim Sonuçları

Bu çalışmada sunulan GNSS anten dizisi, her biri bağımsız besleme hattına sahip dört ayrı birim anten elemanından oluşmaktadır. CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna) uygulamaları için geliştirilen bu yapı, elemanlar arası belirli faz farklarıyla beslenerek yönlü bastırma ve girişim azaltma gibi aktif dizilim özelliklerini destekleyecek şekilde optimize edilmiştir. Bu tür dizilerde, klasik geri yansıma katsayısı (S_{11}) yerine, antenlerin eşzamanlı ve faz farklı beslenmesini dikkate alan aktif geri yansıma katsayısı (active reflection coefficient) kullanımı daha anlamlı hale gelmektedir.

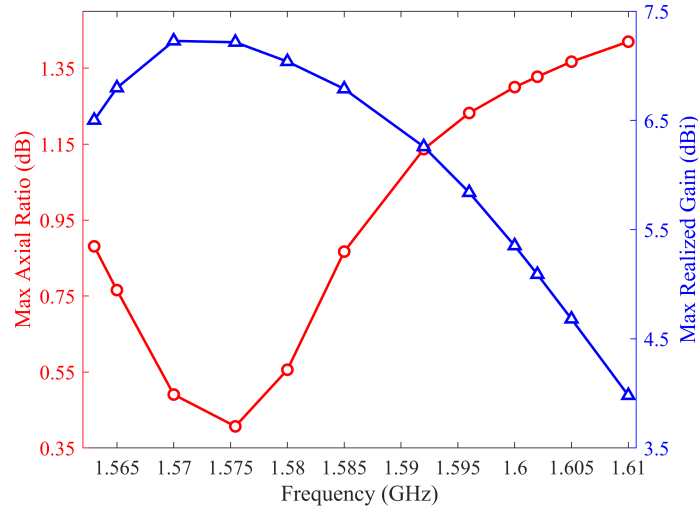
Aktif yansıma katsayısı, her bir anten elemanının yalnızca kendi portundan yansıyan gücünü değil, aynı zamanda diğer elemanlardan gelen sinyallerin faz ilişkilerini de hesaba katar. Böylece, çoklu antenlerin eşzamanlı çalıştığı gerçekçi senaryolarda portlar arası karşılıklı etkileşim (mutual coupling) daha doğru bir şekilde modellenmiş olur. CST ortamında uygulanan bu analiz, dizinin 1:4 güç bölücü üzerinden faz kontrollü olarak beslendiği koşullara benzer bir simülasyon ortamı sağlayarak, anten dizisinin sistem seviyesindeki performans değerlendirmesini mümkün kılmaktadır. Anten elemanları arası mesafe 55 mm olarak belirlenmiş ve bu geometri, kompakt yapı hedefi, geniş bant gereksinimi ve dairesel kutuplaşma optimizasyonu kriterlerine göre tasarlanmıştır.

Şekil 4.3'de GNSS anten dizisinin her bir elemanı için simüle edilen aktif geri yansıma katsayıları sunulmuştur. 3 dB ışınım genişliği içinde maksimum eksenel oran değişimi ile elde edilen RHCP kazanç tepe değerleri Şekil 4.4'de verilmiştir. Gerçekleşen RHCP kazanç tepe değerleri, 1575.42 MHz (L1) ve 1602 MHz (G1) frekanslarında

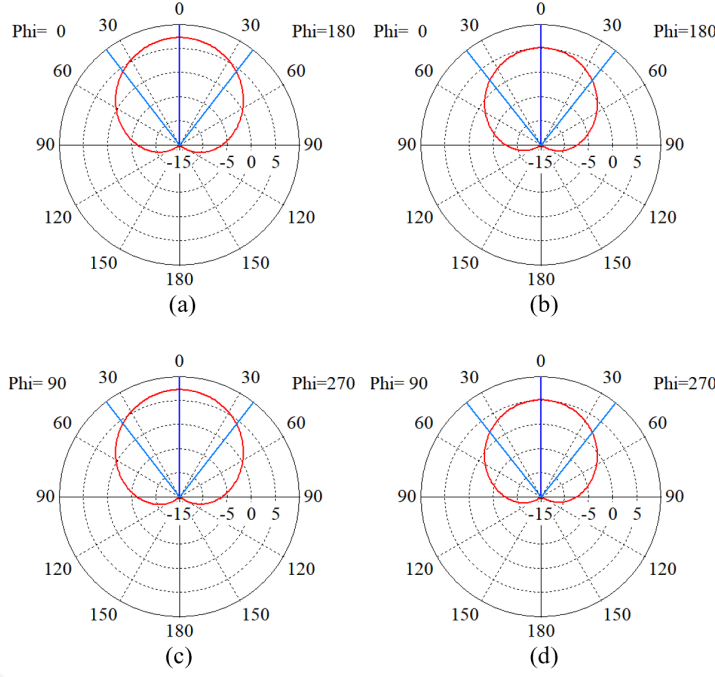
sırasıyla 7.21 dBi ve 5.1 dBi'dir. Eksenel oran, hem L1 hem de G1 bantlarında 1.5 dB seviyesinin altında kalarak kararlı dairesel kutuplaşmayı doğrulamaktadır. GNSS anten dizisinin simüle edilen ışınma diyagramları Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu figürde, L1 ve G1 merkez frekanslarında $\phi = 0^\circ$ ve $\phi = 90^\circ$ düzlemlerindeki gerçekleşen RHCP kazanç desenleri sunulmaktadır. Dizi yapısında hem desen simetrisi hem de geniş ışınım açısı elde edilmiştir.



Şekil 4.3: 2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 dizisinin aktif giriş geri yansımaya katsayıları.



Şekil 4.4: 2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 dizisinin 3 dB ışınım genişliğinde maksimum eksenel oran ve tepe kazanç değeri.



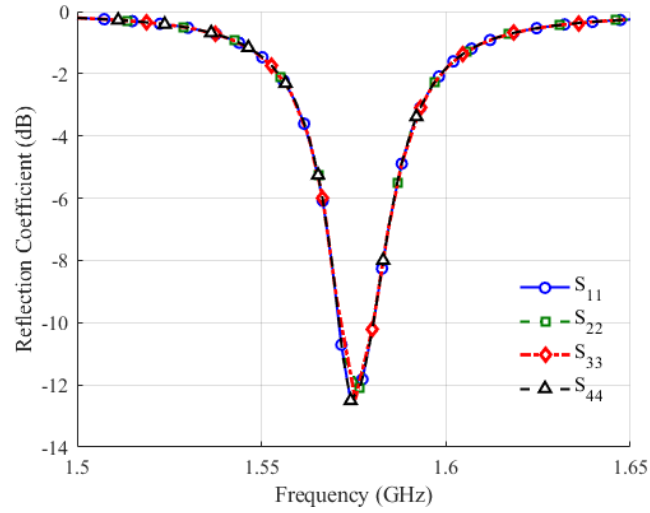
Şekil 4.5: 2.5 mm kalınlıklı Rogers TMM10 dizisinin ortogonal ϕ düzlemlerindeki ışınma desenleri: (a) 1575.42 MHz, $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz, $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz, $\phi = 90^\circ$, (d) 1602 MHz, $\phi = 90^\circ$.

4.3 1.27 mm Kalınlıklı RO3010 İle Tasarlanmış GNSS Dizi Anten Benzetim Sonuçları

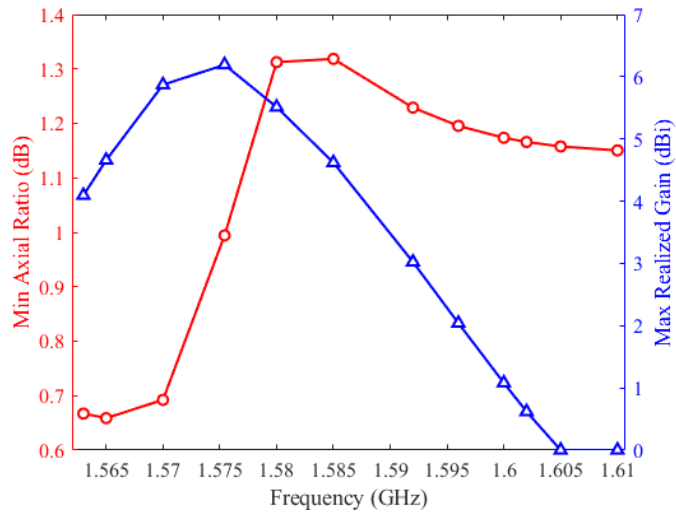
Bu bölümde, 1.27 mm kalınlığa ve yüksek dielektrik sabitine ($\epsilon_r = 11.2$) sahip Rogers RO3010 alt tabaka kullanılarak tasarlanan GNSS anten dizisine ait benzetim sonuçları sunulmaktadır. Daha önce 2.5 mm TMM10 ile elde edilen anten dizisiyle benzer şekilde, bu yapı da dört bağımsız anten elemanından oluşmakta ve her bir eleman ayrı ayrı beslenmektedir.

TMM10 bazlı tasarımla karşılaştırıldığında, Rogers RO3010 alt tabakası hem farklı bir dielektrik sabiti hem de daha düşük kalınlık sunarak elektromanyetik davranış açısından farklılık göstermektedir. Bu nedenle, anten elemanlarının bir araya gelerek oluşturduğu dizinin hem mutual coupling davranışı hem de ışınma performansı yeniden değerlendirilmiştir. Bu yapı, özellikle aksenal oran kararlılığı, kazanç performansı ve bant genişliği gibi kritik parametreler bakımından detaylı şekilde analiz edilmiştir.

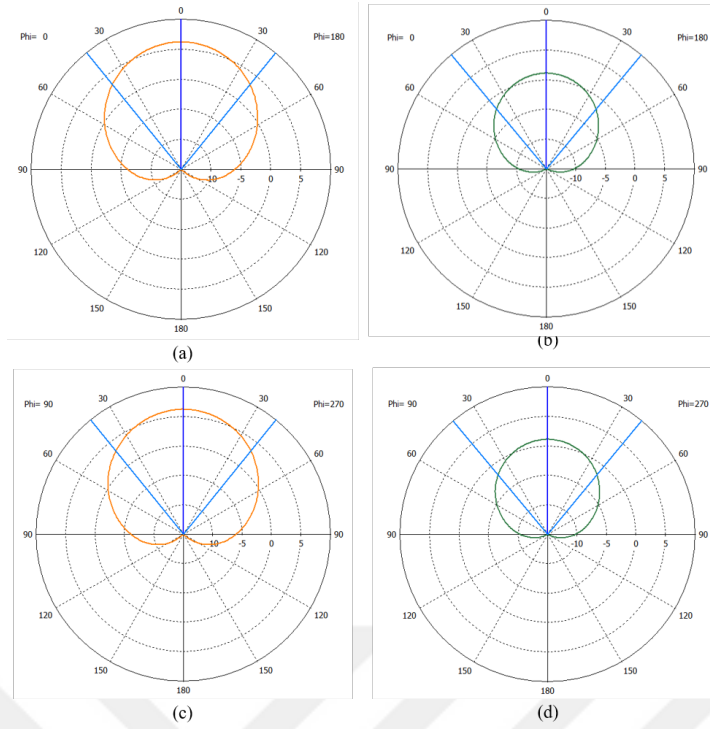
Dizinin her bir elemanı için elde edilen aktif yansımaya katsayıları Şekil 4.6'da sunulmuştur. RHCP kazanç tepe değerleri ve eksenel oran dağılımları ise Şekil 4.7'da verilmiştir. Gerçekleşen RHCP kazanç tepe değerleri, 1575.42 MHz (L1) ve 1602 MHz (G1) frekanslarında sırasıyla 6.19 dBi ve 0.62 dBi'dir. Eksenel oran, dairesel polarizasyonu L1 bandında doğrulamaktadır ve 1.5 dB seviyesinin altında kaldığı gösterilmektedir. İlgili frekanslardaki ışınma desenleri Şekil 4.8'da gösterilmiş, bu sayede 2.5 mm TMM10 tabanlı dizilimle doğrudan performans karşılaştırması yapılabilmektedir.



Şekil 4.6: 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 dizisinin aktif giriş geri yansımaya katsayıları.



Şekil 4.7: 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 dizisinin 3 dB ışınım genişliğinde maksimum eksenel oran ve tepe kazanç değeri.



Şekil 4.8: 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 dizisinin ortogonal ϕ düzlemlerindeki ışınma desenleri: (a) 1575.42 MHz, $\phi = 0^\circ$, (b) 1602 MHz, $\phi = 0^\circ$, (c) 1575.42 MHz, $\phi = 90^\circ$, (d) 1602 MHz, $\phi = 90^\circ$.

4.4 2.5 mm Kalınlıklı TMM10 ve 1.27 mm Kalınlıklı RO3010 İle Tasarlanmış GNSS Dizi Antenleri Karşılaştırması

Bu çalışmada, benzer boyutlara ve aynı yama geometrisine sahip, GNSS L1 bandı için uygun frekans aralığında çalışabilecek iki farklı GNSS dizi anteni tasarlanmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Her iki dizide de sağ el dairesel polarizasyona (RHCP) sahip birim yama antenler kullanılmış olup, yalnızca alt tabaka malzemesi ve kalınlığı farklılık göstermektedir. Bu farklılıkların, dizi seviyesinde ortaya çıkan performans üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla, TMM10 (2.5 mm) ve RO3010 (1.27 mm) malzemeleri seçilerek karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Özellikle 2.5 mm kalınlığındaki TMM10 alt tabakasıyla tasarlanan dizi antenin, hem kazanç hem de bant genişliği bakımından daha üstün bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Buna karşın, daha ince bir alt tabaka olan 1.27 mm kalınlığındaki RO3010 malzemesiyle tasarlanan anten dizisinin, daha dar bir bant genişliği ve görece

daha düşük kazanç sunduğu, ancak yine de L1 bandı için yeterli performans gösterdiği görülmektedir.

Her iki dizide de elde edilen aksel oran (AR) değerleri 1.5 dB'in altında kalmakta olup, bu durum antenlerin RHCP koşulunu sağladığını ve GNSS uygulamaları açısından gerekli olan düzgün polarizasyon özelliklerini karşıladığını göstermektedir. Bu bağlamda, aksel oranın düşük olması, çoklu yol etkilerinin azaltılması ve sinyal kalitesinin artırılması açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, kalın ve dielektrik kayıpları düşük bir alt tabaka (TMM10) ile tasarlanan dizi antenin daha yüksek kazanç, daha geniş bant kapsama alanı ve daha kararlı bir ışınım karakteristiği sunduğu, dolayısıyla GNSS sistemleri için daha uygun bir yapı ortaya koyduğu söylenebilir. Öte yandan, RO3010 gibi daha ince tabakalar, kompakt tasarımlar için tercih edilebilir olsalar da, bant genişliği ve kazanç açısından sınırlayıcı olabilir. Karşılaştırmaya ilişkin sayısal değerler Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

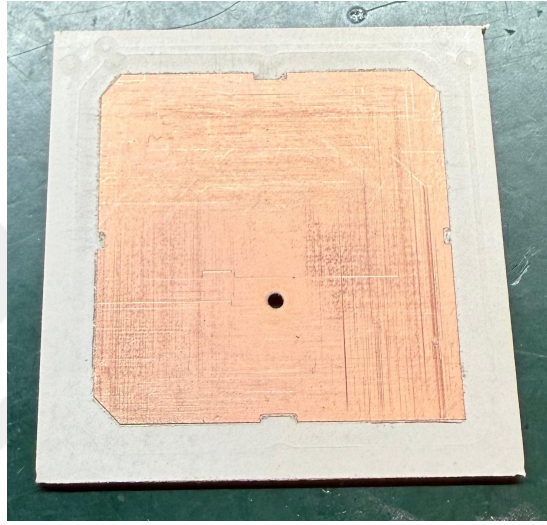
Çizelge 4.1: 2.5 mm Rogers TMM10 ve 1.27 mm Rogers RO3010 alt tabakaları ile tasarlanan GNSS dizi antenlerinin performans karşılaştırması.

Parametre	1.27 mm RO3010	2.5 mm TMM10
Toplam dizi boyutu	12 × 12 cm	12 × 12 cm
Alt tabaka kalınlığı	1.27 mm	2.5 mm
$S_{11} < -10$ dB bant aralığı	1570–1580 MHz	1565–1589 MHz
RHCP kazanç (1575.42 MHz, L1)	6.19 dBi	7.22 dBi
RHCP kazanç (1602 MHz, G1)	0.62 dBi	5.10 dBi
Minimum aksel oran (AR)	< 1.5 dB	< 1.5 dB



5. ÜRETİM VE TEST

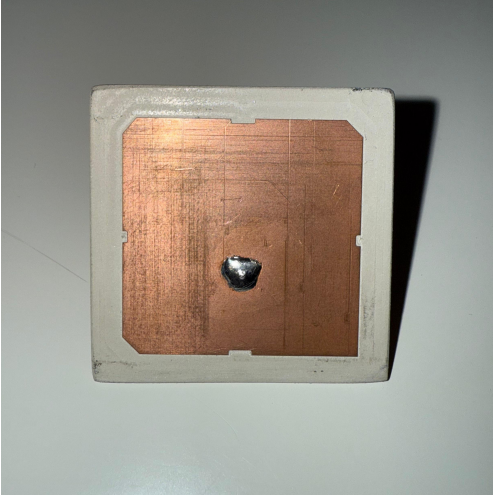
Tasarlanan birim antenlerden, 1.27 mm kalınlığında Rogers RO3010 tabanlı olan modelin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen antenin üstten görünümü Şekil 5.1’de sunulmuştur. Anten, uygun bir RF konnektör ile lehimlenmiş ön ve arka yüzeyleri, sırasıyla Şekil 5.2 (a) ve (b)’de sunulmaktadır.



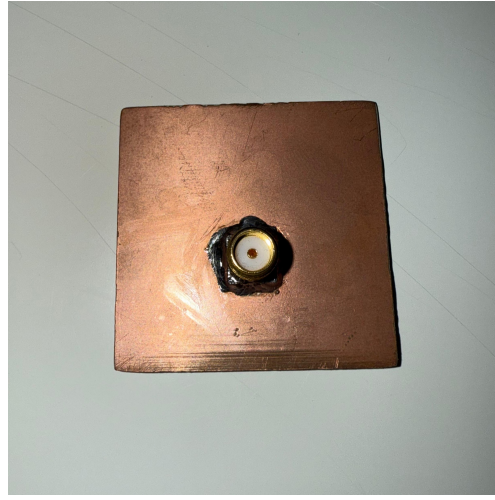
Şekil 5.1: 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı üretilen birim antenin üstten görünümü.

Üretim sonrası yapılan vektör ağ analizörü (VNA) ölçümleriyle antenin geri yansımaya katsayısı (S_{11}) belirlenmiştir. Şekil 5.3’de görüldüğü üzere, ölçüm sonuçları antenin merkez frekansında bir kayma olduğunu ortaya koymaktadır. Antenin etkin çalışma bant genişliği, -10 dB referansına göre 1581 MHz ile 1594 MHz aralığında gerçekleşmiş ve bu aralık hedeflenen merkez frekans olan 1575.42 MHz’in biraz üzerinde konumlanmıştır.

Bu frekans kaymasının, antenin alt malzemesi olarak kullanılan Rogers RO3010’un dielektrik geçirgenlik katsayısındaki (ϵ_r) sapmadan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Başlangıçta $\epsilon_r = 11.2$ olarak kabul edilen bu değer, üretim sonrası yapılan ölçümlerle uyumlu sonuçlar elde edebilmek amacıyla parametrik bir tarama ile

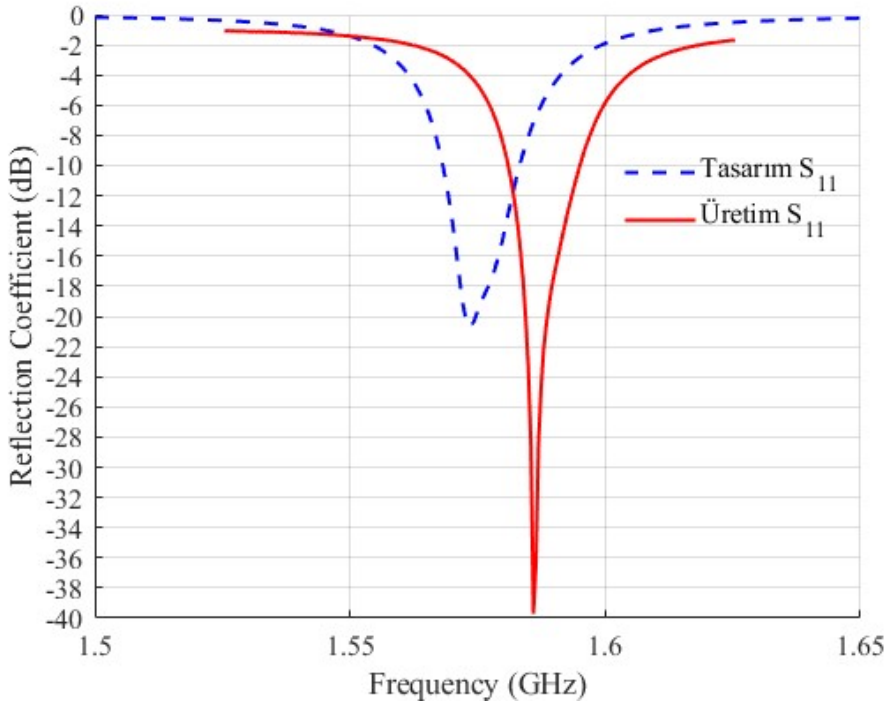


(a) Antenin lehimlenmiş ön yüzü



(b) Antenin lehimlenmiş arka yüzeyi

Şekil 5.2: Uygun RF konnektör ile lehimlenmiş antenin ön (a) ve arka (b) yüzey görüntüleri.

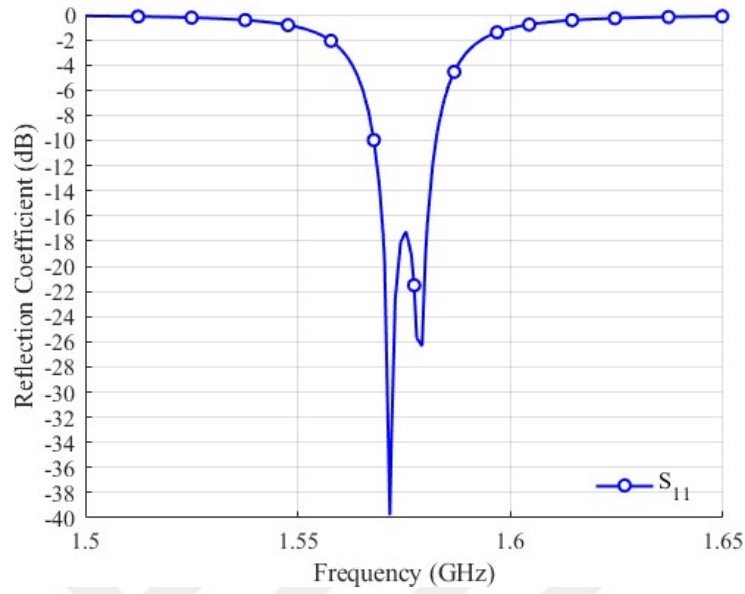


Şekil 5.3: Simülasyon sonuçları ile üretilen antenin karşılaştırmalı S_{11} ölçümü.

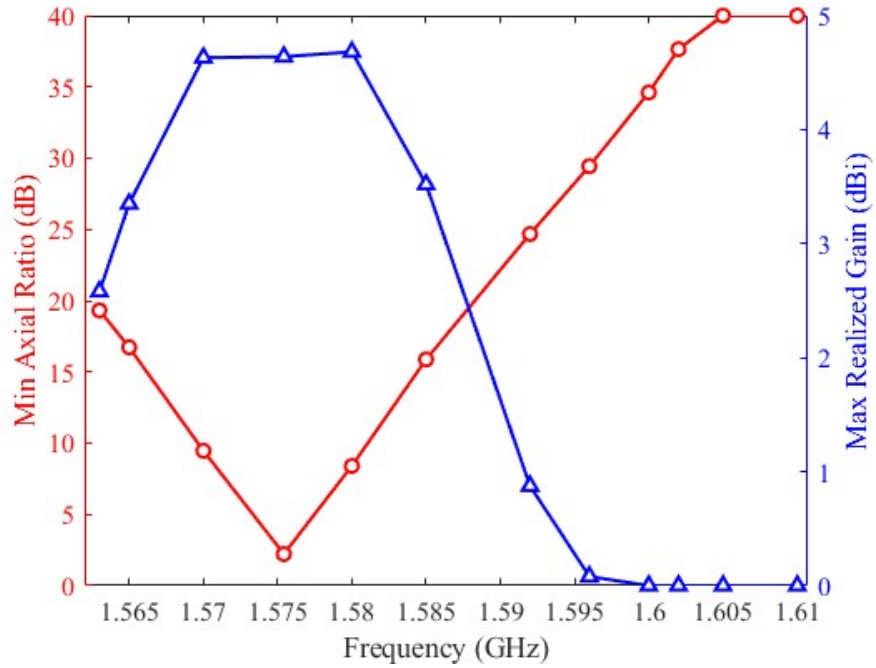
yeniden analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, antenin gerçek davranışını en iyi şekilde temsil eden efektif dielektrik sabiti $\epsilon_r = 10.95$ olarak tespit edilmiştir.

Parametrik analizler sonucunda elde edilen $\epsilon_r = 10.95$ değeri doğrultusunda, antenin fiziksel boyutları ve geometrik parametreleri yeniden optimize edilmiştir. Güncellenen

tasarıma ait geri yansımaya katsayısı (S_{11}), kazanç dağılımı ve eksenel oran (AR) değerleri aşağıdaki şekillerde detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Tasarımın $\epsilon_r = 10.95$ değeriyle yeniden optimize edildiği 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı antenin geri yansımaya katsayısı (S_{11}) karakteristiği.



Şekil 5.5: Tasarımın $\epsilon_r = 10.95$ değeriyle yeniden optimize edildiği 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı antene ait eksenel oran (kırmızı) ve maksimum gerçekleşen kazanç (mavi) karakteristikleri.

Parametrik analizler sonucunda, anten tasarımında başlangıçta kullanılan $\epsilon_r = 11.2$ değerinin üretim sonrası ölçümlerle tam örtüşmediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, dielektrik sabit değeri $\epsilon_r = 10.95$ olarak güncellenmiş ve anten boyutları ile geometrik parametreler yeniden optimize edilmiştir. Güncellenen tasarım, GNSS L1 bandı ile uyumlu şekilde 1566–1580 MHz aralığında $S_{11} < -10$ dB koşulunu sağlamış ve daha yüksek geri yansıma bastırımı ile ölçüm sonuçlarında başarılı bir performans sergilemiştir. Bu iyileştirme, üretim süreçlerine daha uygun bir tasarım sunarken performanstan da kayıp olmadan gerçekleştirilmiştir.

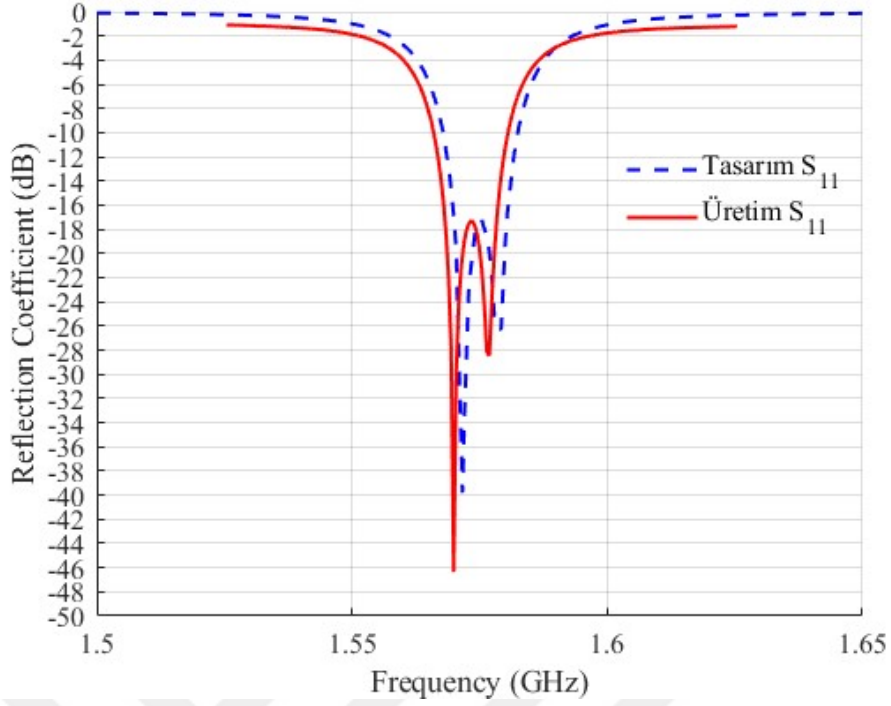
Çizelge 5.1’de, farklı ϵ_r değerleri ile tasarlanan iki antenin boyutları, S_{11} karakteristikleri, kazanç ve eksenel oran (AR) değerlerinin karşılaştırmalı tablosu sunulmuştur. Bu tablo, güncellenen tasarımın üretim açısından avantaj sağlarken benzer performans düzeyini koruduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.1: 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 anten alt malzemesi kullanılarak ϵ_r değeri farklı parametrelerle tasarlanan iki antenin geri yansıma katsayısı (S_{11}), kazanç ve eksenel oran performanslarının karşılaştırması.

Parametre	$\epsilon_r = 11.2$	$\epsilon_r = 10.95$
Yama boyutu	28.32 mm	28.65 mm
Alt tabaka kalınlığı	1.27 mm	1.27 mm
S_{11} minimum	-20 dB	-39 dB
$S_{11} < -10$ dB bant aralığı	1568–1583 MHz	1567–1582 MHz
RHCP kazanç (1575.42 MHz)	4.45 dBi	4.64 dBi
Minimum eksenel oran (AR)	1.91 dB	2.21 dB

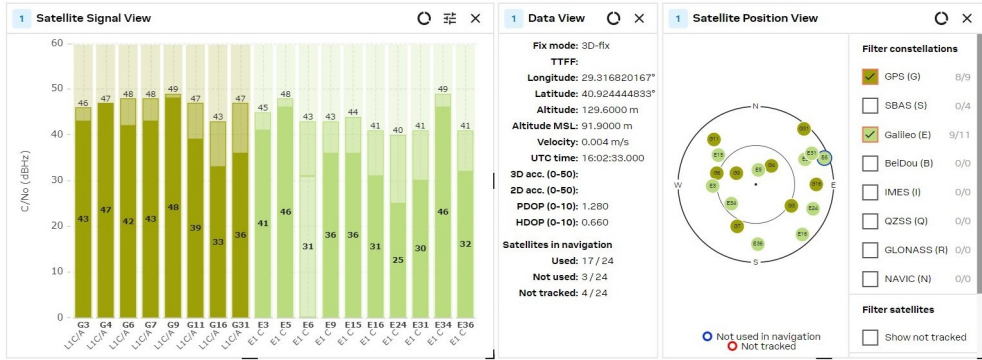
Bu düzenleme sonrasında anten yeniden üretilmiştir. Üretim koşullarına göre optimize edilen tasarımın başarılı olduğu görülmüş, elde edilen yeni anten, $S_{11} < -10$ dB kriterini 1566 MHz ile 1580 MHz frekans aralığında sağlamıştır. Bu sonuçlar, antenin GNSS L1 bandı için uygun bir rezonans frekans aralığına sahip olduğunu göstermektedir. Vektör ağ analizörü (VNA) ile gerçekleştirilen ölçüm sonuçları Şekil 5.6’de tasarım sonuçları ve üretim sonuçlarını karşılaştırmalı olarak sunulmuş, üretimin tasarım ile benzer olduğu gösterilmiştir.

Üretilen birim yama anten, u-blox GNSS alıcısına bağlanarak gerçek ortamda test edilmiştir. Şekil 5.7’de GNSS L1 merkez frekansında bulunan, GPS L1 ve Galileo E1 uydularından alınan sinyaller görülmektedir. Anten, 1575.42 MHz merkez frekansındaki GNSS L1 bandında çok sayıda uyduyu başarıyla algılamıştır.



Şekil 5.6: Simülasyon sonuçları ile yeniden üretilen antenin karşılaştırmalı S_{11} ölçümü.

Antenin geniş ışınım paternine sahip olması sayesinde, ufuk çizgisine yakın (düşük elevasyon açısındaki) uydulardan dahi sinyal alımı sağlanabilmektedir. Görülen uydular navigasyonda kullanılmakta olup, bu durum sistemin 3D konum çözümü ve antenin sahadaki etkinliğini göstermektedir.



Şekil 5.7: Üretilen antenin u-blox GNSS alıcısı ile gerçek uydu sinyallerini alarak konum üretmesi.



6. SONUÇLAR

Konum, zaman ve yönelim bilgisine duyulan ihtiyaç, insanlık tarihi boyunca hem gündelik yaşamda hem de kritik teknolojik uygulamalarda merkezi bir yer tutmuştur. Bu ihtiyacı karşılamada en önemli teknolojilerden biri haline gelen GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri), günümüzde sivil ve askeri pek çok uygulamada temel bir altyapı bileşeni olarak konumlanmıştır. Özellikle İHA'lar, otonom araçlar, afet yönetim sistemleri, askeri platformlar ve taşınabilir cihazlar gibi sistemlerde GNSS sinyalinin doğruluğu ve sürekliliği kritik öneme sahiptir. Ancak GNSS sinyalleri, orta dünya yörüngesinden (MEO) gelen düşük güçlü elektromanyetik dalgalar olup (-130 dBm), hem çevresel parazitlere hem de kasıtlı girişim (jamming) ve yanıltma (spoofing) saldırılarına karşı oldukça savunmasızdır. Bu bağlamda, GNSS alıcılarının performansını belirleyen en önemli bileşenlerden biri olan antenlerin tasarımı, sistemin güvenilirliği ve doğruluğu açısından hayati rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, GNSS L1 bandında çalışacak şekilde optimize edilmiş, düşük profilli, kompakt boyutlu ve sağ el dairesel kutuplaşmalı (RHCP) bir yama anten ile bu anteni temel alan, sıralı döndürülmüş dört elemanlı bir GNSS anten dizisi geliştirmektir. Çalışmada, yüksek dielektrik sabitine sahip seramik bazlı Rogers TMM10 ($\epsilon_r = 9.8$) ve RO3010 ($\epsilon_r = 11.2$) substratları kullanılarak farklı kalınlıklarda toplam dört adet birim patch anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılarda köşe kesimleri, kenarlara eklenen yarıklar ve simetrik çentikleme gibi tekniklerle RHCP üretimi optimize edilmiş, 50 ohm empedans uyumu sağlanmıştır.

Tasarımları yapılan dört farklı GNSS yama antenine ilişkin performans karşılaştırmaları, Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de sunulmaktadır. Bu karşılaştırmalar antenlerin alt tabaka kalınlığı ve dielektrik sabiti gibi temel parametrelerinin, antenin kazanç, bant genişliği, eksenel oran (AR) ve boyutsal gereksinimlerine olan etkilerini analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1’de yer alan 2.5 mm kalınlıklı RO3010 ve TMM10 alt tabakalarıyla tasarlanan antenler incelendiğinde, her iki yapının benzer kalınlıkta olmasına rağmen farklı dielektrik sabitlerine ($\epsilon_r = 11.2$ ve $\epsilon_r = 9.8$) sahip olması nedeniyle önemli farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Daha yüksek dielektrik sabitine sahip RO3010 malzemesiyle elde edilen anten, daha iyi eksenel oran ve daha küçük bir yama boyutuyla çalışmakta olup, bant genişliği ve kazanç bakımından TMM10’un az farkla üstünlük sağladığı gözlemlenmektedir. Malzemelerin birbirine üstünlük kurduğu farklı alanlar, ihtiyaca göre GNSS uygulamaları için uygun bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.1: 2.5 mm kalınlıktaki Rogers TMM10 ve Rogers RO3010 alt tabakaları ile tasarlanan antenlerin performans karşılaştırması.

Parametre	2.5 mm 3010	2.5 mm TMM10
Dielektrik sabiti	$\epsilon_r = 11.2$	$\epsilon_r = 9.8$
Yama boyutu	27.9 mm	29.68 mm
Alt tabaka kalınlığı	2.5 mm	2.5 mm
S_{11} minimum	-16 dB	-19 dB
$S_{11} < -10$ dB bant aralığı	1566–1591 MHz	1563–1594 MHz
RHCP kazanç (1575.42 MHz)	5.15 dBi	5.28 dBi
Minimum eksenel oran (AR)	2.16 dB	2.32 dB

Çizelge 5.2’de ise her iki antenin alt tabaka kalınlığının sabit tutulduğu (1.27 mm) ancak dielektrik sabitlerinin farklı olduğu bir senaryo değerlendirilmiştir. Bu durumda yüksek ϵ_r değerine sahip RO3010 malzemesiyle elde edilen anten, daha kompakt bir yama boyutuna ve eksenel orana sahip olmasına rağmen, TMM10 kazanç ve bant genişliği bakımından daha iyi sonuçlar sunmuştur. Her iki anten de S_{11} değeri bakımından yeterli seviyede olup GNSS uygulamalarında kullanılmaya uygundur. Bu değerler, daha kalın malzemelerdeki karakteristikleri ile örtüşmekte olup, anten alt malzemelerinin öncelik verilen parametreye göre birbirlerine üstünlük kurdukları alanları göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, daha kalın alt tabaka kullanılan antenlerin (2.5 mm), daha geniş bant aralıkları ve daha yüksek kazanç seviyeleri sağladığı, bu nedenle geniş frekans aralığında çalışan GNSS sistemleri için daha elverişli olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan, daha yüksek dielektrik sabitine sahip malzemeler ile tasarlanan antenlerin

Çizelge 6.2: 1.27 mm kalınlıktaki Rogers TMM10 ve Rogers RO3010 alt tabakaları ile tasarlanan antenlerin performans karşılaştırması.

Parametre	1.27 mm RO3010	1.27 mm TMM10
Dielektrik sabiti	$\epsilon_r = 11.2$	$\epsilon_r = 9.8$
Yama boyutu	28.32 mm	30.19 mm
Alt tabaka kalınlığı	1.27 mm	1.27 mm
S_{11} minimum	-20 dB	-22 dB
$S_{11} < -10$ dB bant aralığı	1568–1583 MHz	1566–1585 MHz
RHCP kazanç (1575.42 MHz)	4.45 dBi	4.65 dBi
Minimum eksenel oran (AR)	1.91 dB	2.6 dB

kompakt boyut avantajı sağladığı, fakat kazanç ve bant genişliği açısından daha dikkatli tasarım optimizasyonu gerektirdiği görülmektedir.

Sonuç olarak, alt tabaka kalınlığı ve dielektrik sabiti gibi parametreler, GNSS anten tasarımında doğrudan performans kriterlerini etkileyen kritik faktörlerdir. Uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak, kompaktlık, geniş bant veya yüksek kazanç önceliklerine göre uygun malzeme ve yapı seçimi yapılmalıdır.

Birim anten tasarımlarının devam aşamasında, tasarlanan birim antenler yapıtaşları olarak temel alınarak 2x2 konfigürasyonda dört elemanlı anten dizileri tasarlanmıştır. Her bir antenin saat yönünde 90° döndürülmesiyle elde edilen sıralı döndürülmüş geometri, dizinin dairesel kutuplaşma saflığını ve yönlülüğünü artırarak GNSS uygulamaları için ideal ışınım desenleri elde edilmesini sağlamıştır. Elemanlar arası mesafenin kuplaj üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve optimum değer belirlenmeye çalışılmıştır. Bu mesafe, eksenel oranın azaltılması ile dizi boyutunun makul seviyede tutulması arasında bir denge kurmaktadır. Ayrıca, klasik S-parametrelerinin ötesine geçilerek aktif yansıma katsayısı hesaplamaları yapılmış ve antenlerin eşzamanlı besleme altında nasıl davrandığı gerçekçi biçimde analiz edilmiştir.

Tasarımları yapılan iki farklı kalınlıklı ve dielektrik sabitli birim elemanlara sahip dizilerin, simülasyon sonuçları, geliştirilen diziler GNSS L1 frekansında kararlı RHCP ışınım, düşük eksenel oran ve yarımküresel ışınım örüntüleri sunduğunu ortaya koymuştur. Bu özellikler, özellikle hareketli platformlarda yönelime duyarlı, çok yönlü ortamlarda bile güçlü sinyal alımı sağlayan bir çözüm elde edildiğini göstermektedir. Tasarlanan yapı, kompaktlığı ve üretilebilirliği ile CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna) sistemlerine de entegre edilebilir bir temel sunmaktadır.

Bu sayede, dijital hüzme yönlendirme teknikleriyle entegre çalışan, karıştırma sinyali, şehir içi yansımalar, enterferans gibi tehditlere karşı dirençli GNSS çözümlerinin geliştirilmesine katkı sağlanmaktadır.

Tez kapsamında tasarlanan birim antenlerden 1.27 mm kalınlıklı Rogers RO3010 tabanlı model, prototip olarak üretilmiş ve laboratuvar ortamında karakterize edilmiştir. İlk üretim sonrası yapılan S_{11} ölçümleri ile simülasyon sonuçları arasında fark gözlemlenmiş; bu farkın dielektrik sabitindeki sapmadan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen parametrik analiz sonucunda $\epsilon_r = 10.95$ olarak revize edilmiş ve anten bu yeni değer ile yeniden üretilmiştir. Yeniden üretim sonrası elde edilen geri yansıma katsayısı değerleri simülasyon ile yüksek uyum göstermiştir. Nihai tasarım, GNSS L1 bandında çalışan bir alıcıya bağlandığında başarılı şekilde uydu alımı ve konum bilgisi üretmiştir. Bu birim antenden dört adet üretilmiş, dört kanallı bir CRPA platformuna entegre edilmiş ve karıştırma senaryoları altında beamforming algoritmalarıyla uyumlu çalıştığı testlerle doğrulanmıştır.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında GNSS L1 bandında çalışacak şekilde RHCP özellikli birim anten tasarımları ve üretimi gerçekleştirilmiş ve birim antenlerde yüksek dielektrik sabitine sahip substratlar kullanılarak anten boyutları başarıyla minyatürize edilmiştir. Tasarlanan sıralı döndürülmüş 2×2 dizi mimarisi sayesinde hem yönlülük hem de dairesel kutuplaşma saflığı artırılmıştır. Dizi tasarımında elemanlar arası kuplajın azaltılmasıyla birlikte dizinin anten hüzmelendirme gibi ileri seviye uygulamalara uygunluğu da doğrulanmıştır. Elde edilen anten yapısı, İHA'lar ve mobil GNSS alıcıları gibi fiziksel alanın sınırlı olduğu sistemlere entegre edilebilecek, üretime hazır ve yüksek performanslı bir çözüm olarak sunulmuştur. Bu bağlamda çalışma, hem akademik literatüre katkı sunmakta hem de üretime hazır, maliyet etkin ve teknik olarak güçlü bir anten platformu önermektedir. GNSS teknolojisinin gelecekte artan güvenlik ihtiyaçlarına cevap verebilmesi için önerilen yapının CRPA sistemleriyle birlikte kullanılması, sinyal güvenliğini artırma potansiyeline sahiptir.

KAYNAKLAR

- [1] **URL-1.** *NASA Earthdata: GNSS and Space Geodesy Applications*, <<https://www.earthdata.nasa.gov/data/space-geodesy-techniques/gnss>>, erişim tarihi: 11.05.2025.
- [2] **Fernandez-Prades, C., Closas, P., Vila-Valls, J., Figueroa Naharro, M. ve Torne Sanjose, A.** (2012). Assisted GNSS in LTE-Advanced Networks and its Application to Vector Tracking Loops, *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville, TN, United States, s.1462–1476.
- [3] **Volakis, J.L.** (2007). *Antenna Engineering Handbook*, McGraw-Hill, New York, 4. sürüm.
- [4] **Kraus, J.D. ve Marhefka, R.J.** (2002). *Antennas for All Applications*, McGraw-Hill, New York, 3. sürüm.
- [5] **Balanis, C.A.** (2008). *Modern Antenna Handbook*, Wiley, New York.
- [6] **EUSPA** (2022). *EUSPA EO and GNSS Market Report*, issue 1, doi: 10.2878/94903.
- [7] **Maqsood, M., Gao, S. ve Montenbruck, O.,** (2017). Antennas, **P.J. Teunissen ve O. Montenbruck**, (düzenleyenler), *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Springer Handbooks, Springer, Cham, s.505–534, doi: 10.1007/978-3-319-42928-1_17.
- [8] **Wang, J.J.H.** (2012). Antennas for Global Navigation Satellite System (GNSS), *Proceedings of the IEEE*, 100(7), 2349–2355, doi: 10.1109/JPROC.2011.2179630.
- [9] **GPS World** (2018). *GPS World Antenna Survey*, <<https://www.gpsworld.com/gps-world-antenna-survey/>>, erişim tarihi: 05.05.2025.
- [10] **Liu, Q., Chen, Z.N., Liu, Y. ve Li, C.** (2017). Compact ultrawide-band circularly polarized weakly coupled patch array antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(4), 2129–2134, doi: 10.1109/TAP.2017.2671455.
- [11] **Reynolds, D., Brown, A. ve Reynolds, A.** (1999). Miniaturized GPS antenna array technology and predicted anti-jam performance, *Proceedings of the 12th ION GPS Conference*, Nashville, TN, United States, s.777–785.

- [12] **Jr., J.J.S., Axelrad, P., Parkinson, B.W. ve Enge, P.** (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC.
- [13] **Byun, G., Choo, H. ve Kim, S.** (2016). Design of a small arc-shaped antenna array with high isolation for applications of controlled reception pattern antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(4), 1542–1546, doi: 10.1109/TAP.2016.2526098.
- [14] **Rezazadeh, N. ve Shafai, L.** (2018). A controlled reception pattern antenna array with dual-mode circular microstrip antenna elements for increased angular availability, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(5), 2594–2598, doi: 10.1109/TAP.2018.2804619.
- [15] **Maloney, J.A., Kwon, D.H., Keller, S.D. ve Janaswamy, R.** (2017). Realistic GPS coverage prediction for dual-polarized controlled reception pattern antennas, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 1907–1910, doi: 10.1109/LAWP.2017.2686581.
- [16] **Lee, T., Lee, D.H., Choo, H. ve Byun, G.** (2017). A method of substrate shaping to improve gain of active-element pattern for small arrays, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 1601–1604, doi: 10.1109/LAWP.2017.2653191.
- [17] **Hwang, S., Lee, B., Kim, D.H. ve Park, J.Y.** (2018). Design of S-band phased array antenna with high isolation using broadside coupled split ring resonator, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 18(2), 108–116, doi: 10.26866/jees.2018.18.2.108.
- [18] **Brachvogel, M., Niestroj, M., Zorn, S., Meurer, M., Hasnain, S.N., Stephan, R. ve Hein, M.A.** (2020). A New Array Concept Using Spatially Distributed Subarrays for Unambiguous GNSS Interference Mitigation in Automotive Applications, *NAVIGATION*, 67(1), 23–41, doi: 10.1002/navi.353.
- [19] **Chen, Y.H.** (2012). A Study of Geometry and Commercial Off-The-Shelf (COTS) Antennas for Controlled Reception Pattern Antenna (CRPA) Arrays, *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Institute of Navigation, Nashville, TN, s.907–914.
- [20] **Maloney, J.A.** (2020). *Anti-Jam GPS Controlled Reception Pattern Antennas for Man-Portable Applications*, University of Massachusetts Amherst, doi: 10.7275/15998807.
- [21] **Kraus, R.F. ve T., E.B.** (2014). Use of the Signal Polarization for Anti-Jamming and Anti-Spoofing with a Single Antenna, *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014)*, s.3495–3501.

- [22] **Neel, A.** (2023). *Adaptive GPS Antenna Array Beam Nulling Effectiveness Under Varying Antenna Element Positioning*, <https://digitalrepository.unm.edu/ece_etds/603>, erişim tarihi: 14.04.2025.
- [23] **Fante, R.L. ve Vaccaro, J.J.** (2000). Wideband cancellation of interference in a GPS receive array, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 36(2), 549–564, doi: 10.1109/7.845241.
- [24] **Brown, A. ve Morley, D.** (2001). Test results of a 7-element small controlled reception pattern antenna, *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001)*, s.2022–2029.
- [25] **Byun, G., Choo, H. ve Kim, S.** (2015). Improvement of pattern null depth and width using a curved array with two subarrays for CRPA systems, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(6), 2824–2827.
- [26] **Byun, G., Hyun, J.C., Seo, S.M. ve Choo, H.** (2016). Optimum array configuration to improve null steering time for mobile CRPA systems, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 16(2), 74–79.
- [27] **Ha, S.G., Cho, J. ve Jung, K.Y.** (2017). Design of miniaturized microstrip patch antennas using non-Foster circuits for compact controlled reception pattern antenna array, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 17(2), N/A, doi: 10.5515/JKIEES.2017.17.2.108.
- [28] **Konin, V., Averyanova, Y. ve Ishchenko, O.** (2023). Antenna Array Application to Support Operation of GNSS Receivers under Interfering Signals, *Radioelectronics and Communications Systems*, 66(6), 305–314, doi: 10.3103/S0735272723100023.
- [29] **Hur, J., Byun, G. ve Choo, H.** (2018). Design of Small CRPA Arrays with Circular Microstrip Loops for Electromagnetically Coupled Feed, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 18(2), 129–135.
- [30] **Zhang, Y. ve Zhao, H.** (2015). Failure diagnosis of a uniform linear array in the presence of mutual coupling, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 1010–1013.
- [31] **Song, H.J., Bekaryan, A., Schaffner, J.H., Hussain, A. ve Kildar, P.S.** (2014). Effects of mutual coupling on LTE MIMO capacity for monopole array: comparing reverberation chamber tests and drive tests, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 454–457.
- [32] **Maeng, S.J., Park, J. ve Güvenç, İ.** (2023). Analysis of UAV Radar and Communication Network Coexistence With Different Multiple Access Protocols, *IEEE Transactions on Communications*, 71(11), 6578–6592.

- [33] **Gupta, I.J., Weiss, I.M. ve Morrison, A.W.** (2016). Desired features of adaptive antenna arrays for GNSS receivers, *Proceedings of the IEEE*, 104(6), 1195–1206.
- [34] **Figuet, B., Waltert, M., Felux, M. ve Olive, X.** (2022). GNSS jamming and its effect on air traffic in Eastern Europe, *Engineering Proceedings*, 28(12).
- [35] **Morales-Ferre, R., Richter, P., Falletti, E., de la Fuente, A. ve Lohan, E.S.** (2020). A Survey on Coping With Intentional Interference in Satellite Navigation for Manned and Unmanned Aircraft, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(1), 249–291.
- [36] **Perez-Marcos, E., Caizzone, S., Cuntz, M., Konovaltsev, A. ve Meurer, M.** (2020). Interference Mitigation and Miniaturized Antenna Array Spatial Pattern Compensation with STAP, *2020 European Navigation Conference (ENC)*, IEEE, Dresden, Germany, s.1–10, doi: 10.23919/ENC48637.2020.9317501.
- [37] **Basta, N., Dreher, A., Caizzone, S., Sgammini, M., Antreich, F., Kappen, G., Irteza, S., Stephan, R., Hein, M.A. ve Richter, A.** (2012). System Concept of a Compact Multi-Antenna GNSS Receiver, *Proceedings of the 7th German Microwave Conference (GeMiC)*, Ilmenau, Germany, s.1–4.
- [38] **Fasenfest, K.D.** (2015). Wideband Patch Antennas for Multi-Constellation GNSS Connectivity, *Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Dana Point, CA, United States, s.811–821.
- [39] **Lin, S.Y. ve Huang, K.C.** (2005). A compact microstrip antenna for GPS and DCS application, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(3), 1227–1229.
- [40] **Qamar, Z., Naeem, U., Khan, S.A., Chongcheawchamnan, M. ve Shafique, M.F.** (2016). Mutual coupling reduction for high-performance densely packed patch antenna arrays on finite substrate, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(5), 1653–1660.
- [41] **Zhou, Y., Chen, C.C. ve Volakis, J.L.** (2009). A compact 4-element dual-band GPS array, *2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, North Charleston, SC, USA, s.1–4.
- [42] **Konforta, A., Horn, S., Bertuch, T. ve Knott, P.** (2019). A Miniaturized GNSS Controlled Reception Pattern Antenna Array with AMC Virtual Ground Plane, *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, s.1–4.
- [43] **Tchapwou, C.C. ve Bertuch, T.** (2007). Investigation of EBG surface performance for high-precision GPS applications, *Electronics Letters*, 43(24), 1327–1329, doi: 10.1049/el:20071775.

- [44] **Awais, M., Madni, A. ve Khan, W.T.** (2022). Design of a Compact High Isolation 4-Element Wideband Patch Antenna Array for GNSS Applications, *IEEE Access*, 10, 13780–13786.
- [45] **Madni, A. ve Khan, W.T.** (2024). A High Efficiency and Low Mutual Coupling Four-Element Antenna Array for GNSS Applications, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 116, 63–70.
- [46] **Caizzone, S., Elmarissi, W., Buchner, G. ve Sgammini, M.** (2016). Compact 6+1 Antenna Array for Robust GNSS Applications, *Proceedings of the 2016 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, Barcelona, Spain, s.1–4.
- [47] **Byun, G., Seo, S.M., Park, I. ve Choo, H.** (2014). Design of Small CRPA Arrays for Dual-Band GPS Applications, *IEICE Transactions on Communications*, E97-B(6), 1130–1138.
- [48] **Kutsenko, O., Averyanova, Y. ve Konin, V.** (2021). Simulation of Four-Directional Spoofing Suppression with Five-Elements Antenna Array, *Proceedings of the 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, s.213–216, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575929.
- [49] **Nave, R.** (2024). *Polarization of Electromagnetic Waves*, <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>>, erişim tarihi: 05.04.2025.
- [50] **Neff, H.P.** (1991). *Introductory Electromagnetics*, Wiley, New York.
- [51] **Chen, X., Parini, C.G., Collins, B., Yao, Y. ve Rehman, M.U.** (2012). *Antennas for Global Navigation Satellite Systems*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, U.K., doi: 10.1002/9781119969518.
- [52] **Rao, W.F.R.M.K. ve Kunysz, R.B.** (2012). *GPS/GNSS Antennas*, GNSS Technology and Application Series, Artech House.
- [53] **Balanis, C.A.** (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons.
- [54] **Haneishi, M. ve Yoshida, S.** (1981). A Design Method of Circularly Polarized Rectangular Microstrip Antenna by One-Point Feed, *Electronics and Communications in Japan*, 64(4), 46–54.
- [55] **Valle, R.L.L., García, J.G. ve Roncagliolo, P.A.** (2019). Antenna Coupling and Out of Band Interference Effects on a High Precision GNSS Receiver, *2019 Argentine Conference on Electronics (CAE)*, s.47–51, doi: 10.1109/CAE.2019.8709271.
- [56] **Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. ve Ittipiboon, A.** (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, Norwood, MA, 1. sürüm.

- [57] **URL-2.** *U.S. Global Positioning System, GPS Space*, <<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>>, erişim tarihi: 17.02.2025.
- [58] **Parkinson, B.W. ve Spilker, J.J.** (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications*, cilt 1, AIAA, Washington, DC.
- [59] **Kaplan, E.D.** (1996). *Understanding GPS: Principles and Applications*, Artech House, Boston, MA.
- [60] **Misra, P. ve Enge, P.** (2006). *Global Position System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna, Lincoln, MA, 2. sürüm.
- [61] **URL-3.** *GLONASS Uydu Takımyıldızının Operasyonel Durumu*, <<https://glonass-iac.ru/en/sostavOG/>>, erişim tarihi: 17.02.2025.
- [62] **Kumar, A., Kumar, S., Lal, P., Saikia, P., Srivastava, P.K. ve Petropoulos, G.P.** (2021). Introduction to GPS/GNSS technology, Elsevier, s.3–20, doi: 10.1016/B978-0-12-818617-6.00001-9.
- [63] **Benedicto, J., Dinwiddy, S., Gatti, G., Lucas, R. ve Lugert, M.** (2000). *Galileo: Satellite System Design*.
- [64] **Liu, W., Zhan, X., Liu, L. ve Niu, M.** (2010). *GNSS RF compatibility assessment – Interference among GPS, Galileo, and Compass*, <<https://www.gpsworld.com/gnss-rf-compatibility-assessment-10837/>>, erişim tarihi: 10.04.2025.
- [65] **Montenbruck, O., Hauschild, A., Steigenberger, P., Hugentobler, U., Teunissen, P. ve Nakamura, S.** (2013). Initial Assessment of the COMPASS/BeiDou-2 Regional Navigation Satellite System, *GPS Solutions*, 17, 211–222.
- [66] **Zaminpardaz, S., Wang, K. ve Teunissen, P.J.G.** (2018). Australia-First High-Precision Positioning Results with New Japanese QZSS Regional Satellite System, *GPS Solutions*, 22, 101, doi: 10.1007/s10291-018-0763-5.
- [67] **Odiijk, D., Nadarajah, N., Zaminpardaz, S. ve Teunissen, P.J.G.** (2017). GPS, Galileo, QZSS and IRNSS Differential ISBs: Estimation and Application, *GPS Solutions*, 21, 439–450, doi: 10.1007/s10291-016-0536-y.
- [68] **Bancroft, S.** (1985). An Algebraic Solution of the GPS Equations, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-21(1), 56–59, doi: 10.1109/TAES.1985.310538.
- [69] **Srinivas, V.S. ve Yedukondalu, K.** (2019). Position Domain analysis of modernized GPS Ionosphere-free Code Observations, *2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, s.1–4, doi: 10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738577.

- [70] **Mendizaba, S.J., Berenguer, R. ve Melendez, J.** (2009). *GPS and GALILEO: Dual RF Front-End Receiver Design, Fabrication and Test*, McGraw-Hill, New York.
- [71] **Jiao, F., Hu, Y. ve Yu, X.** (2024). Performance of GNSS Space Service for Geostationary Autonomous Operations, *Journal of Navigation*, 77(2), 257–275, doi: 10.1017/S0373463324000304.
- [72] **URL-4** (2022). *GPS Interface Specification IS-GPS-200, Revision N*, <<https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf>>, erişim tarihi: 17.02.2025.
- [73] **URL-5**. *Global Navigation Satellite System GLONASS Open Service Performance Standard (OS PS), Edition 2.2*, <https://glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos_en.pdf>, erişim tarihi: 17.02.2025.
- [74] **Dovis, F.** (2015). *GNSS Interference Threats and Countermeasures*, Artech House.
- [75] **Stansell, T.A., Hudnut, K.W. ve Keegan, R.G.** (2011). *Future wave L1C signal performance and receiver design*, <<https://www.gpsworld.com/gnss-systemgps-modernizationfuture-wave-11401/>>, erişim tarihi: 20.04.2025.
- [76] **European Space Agency** (2023). *Fundamentals of Global Navigation Satellite Systems: Volume I*, ESA Communications, Noordwijk, The Netherlands, eSA TM-23, Volume I.



ÖZGEÇMİŞ

Adı SOYADI: Muhammed Yusuf ŞAHİN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 09/19-03/22 tarihleri arasında Turkcel’de IP network mühendisi olarak çalıştı.
- 03/22-10/23 tarihleri arasında Aselsan’da elektronik harp sistem mühendisi olarak çalıştı.
- 11/23-06/24 tarihleri arasında ERA Haberleşme’de proje yöneticisi olarak çalıştı.
- 10/24 tarihinden itibaren EDGE Elektronik’te sistem mühendisi olarak çalışmaktadır.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Şahin, M. Y.,** Uzun, A., Kartal, M. (2025). Design of a GNSS Patch Antenna and a Small Form Factor GNSS Antenna Array. *5th International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2025)*, 3–6 July 2025, Paris, France.
- **Şahin, M. Y.,** Kartal, M. (2025). Design and Inter-Element Spacing Optimization of GNSS Array. *4th International Graduate Research Symposium (IGRS’25)*, 12–14 May 2025, Istanbul, Turkey.