

**RADOMLU, DAİRESEL POLARİZASYONLU L1 BANT GPS  
VE GNSS ANTENİ TASARIMI**

**DESIGN OF CIRCULARLY POLARIZED L1 BAND GPS AND  
GNSS ANTENNA WITH RADOME**

**ONUR AKTAŞ**

**PROF. DR. BİRSEN SAKA TANATAR**

**Tez Danışmanı**

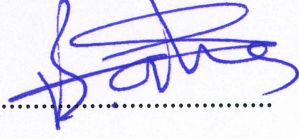
Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

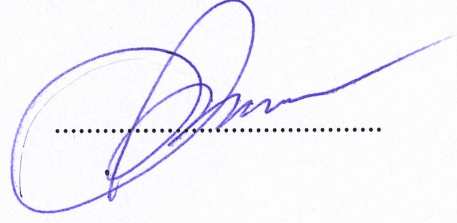
2019

ONUR AKTAŞ'ın hazırladığı "Radomlu, Dairesel Polarizasyonlu L1 Bant GPS ve GNSS Anteni Tasarımı" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

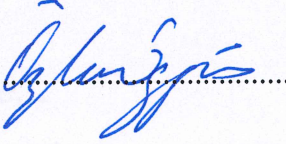
Prof. Dr. Birsen Saka TANATAR  
Danışman



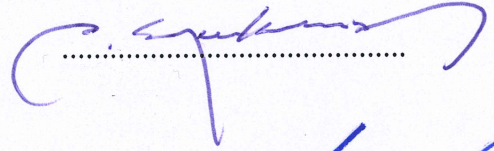
Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL  
Üye



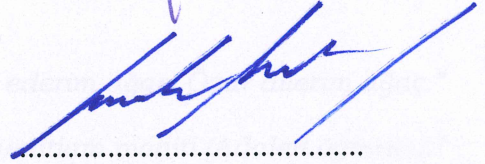
Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN  
Üye



Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ  
Üye



Doç. Dr. Cenk TOKER  
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak ..... / ..... /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

***Değerli kardeşim Ceren'e...***

*“Teşekkür ederim ağaç. Özür dilerim ağaç.”*

*“Discite justitiam moniti (Adaleti öğrenin).”*

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25/09/2019

  
ONUR AKTAŞ

## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayımlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezimin aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

03 / 10 / 2019



ONUR AKTAŞ

## ÖZET

### **RADOMLU, DAİRESEL POLARİZASYONLU L1 BANT GPS VE GNSS ANTENİ TASARIMI**

**Onur AKTAŞ**

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

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR**

**Haziran 2019, 82 sayfa**

Tez içeriğinde radom ile kaplanmış geniş L1 bant frekans aralığında çalışabilen GNSS anten ve L1 bant frekansında çalışabilen GPS anten tasarımı, analizi ve üretimi anlatılmıştır. Üretilen antenlerin ölçüm sonuçları bilgisayar ortamında yapılan simülasyon çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Tasarım aşamasında doğrusal polarizasyona sahip dar bant GPS yama anten tasarımından başlanarak, geniş bant dairesel polarizasyona sahip GNSS yama anten tasarımına ulaşılmış ve tercih edilen yöntemler karşılaştırmalı simülasyonlar ile analiz edilmiştir. Son olarak yama antenler radom malzeme ile kaplanmış; anten parametrelerinde yaşanan değişimlere göre radomlu anten için tasarım son haline getirilmiştir. Geniş bant mikroşerit yama anten elde etmek için kalın alttaş malzeme kullanımı tercih edilmiştir. Bu yöntem farklı kalınlıklar ve farklı alttaş malzemeler için bilgisayar tasarım ortamı olan CST ile analiz edilmiş; sonuçlar yorumlanmıştır. Kalın alttaş kullanımının dairesel polarizasyon tekniklerinden köşe kesme yöntemine olan etkileri ve besleme noktasının değişmesine olan etkileri simülasyonlar ile incelenmiş ve yorumlanmıştır. Dairesel polarizasyona sahip anten

için istenen frekans bandında aksenal oran değerlerinin kalınlık, köşe kesim miktarı ve anten boyutları ile değiştiği incelenmiştir ve gerekli düzenlemeler yapılarak simülasyon analizlerinde tasarım son aşamaya getirilmiştir. retimi yapılan teflon malzeme radom kaplamaya ek olarak antenler farklı radom malzemeleri ile kaplanmış; radom malzemesinin ve radom yama arasındaki mesafenin anten parametrelerine ve tasarımına olan etkileri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** GNSS anten, mikroşerit anten, geniş bant anten, dairesel polarizasyon, radom

# **ABSTRACT**

## **DESIGN OF CIRCULARLY POLARIZED L1 BAND GPS AND GNSS ANTENNA WITH RADOME**

**Onur AKTAŞ**

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics**

**Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR**

**June 2019, 82 pages**

In this thesis design, analysis and production of the radome covered GNSS antenna which can be used in the wide L1 band frequency range and the radome covered GPS antenna which can be used in L1 band frequency are explained. The measurement results of the produced antennas were compared with the simulation studies in computer environment. Starting from the narrow band GPS patch antenna design with linear polarization in the design phase, GNSS patch antenna design with wide band circularly polarized has been reached and preferred methods have been analyzed by comparative simulations. Finally the patch antennas are covered with radom material; according to the changes in the antenna parameters, the design for the radome antenna was finalized. To obtain a broadband microstrip patch antenna, thick and different substrates was preferred. This method has been analyzed by CST, which is a computer design environment, for different thicknesses and different substrate materials, and the results have been interpreted. The effects of thick



substrate usage on the perturbation patch from edge and on the change of the feed point were examined and interpreted by simulations. For the circularly polarized antenna, it has been investigated that the axial ratio values in the desired frequency band are changed with thickness, perturbation amount and antenna dimensions, and the necessary arrangements have been made and the design is brought to the final stage in simulation analysis. In addition to the teflon radome, antennas were simulated with other radome materials with different dielectric constants. Effects of radome material and effects of distance between radome and the patch on antenna parameters are analysed with CST.

**Keywords:** GNSS antenna, microstrip antenna, broadband antenna, circular polarization, radome, superstrate

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında desteklerini esirgemeyen ROKETSAN A.Ş. BLS/Aviyonik Sistem Tasarım Birimi yöneticisi Selçuk ÇAYLAR'a; hem teknik hem manevi desteği için birim arkadaşım M. Yiğit ÜRKMEZTÜRK'e ve L. Deniz BALABAN'a; üretim aşamasında desteği ve emeği için E. Hakan KAVAK'a; tez süresince zamanını ayırarak sorularıma cevap veren ve yol gösteren Mehmet KÜPELİ'ye; yüksek lisans ve tez süresince yol gösteren, olumsuzluklar karşısında destek olan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Birsen Saka TANATAR'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimi sürekli destekleyerek, akademik çalışmalarına uygun bir çalışma ortamı sunan ROKETSAN A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Altı yaşımdan bugüne kadar, eğitim hayatım boyunca kendilerinden ödün veren, bana güvenen, maddi ve manevi desteklerini bir an olsun esirgemeyen, benimle birlikte sınav stresi ve tez stresi yaşayan annem Zeynep Aktaş ve babam Salim Aktaş teşekkürün en büyüğünü hak ediyorlar. Kardeşim Ceren'e, anneme ve babama çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	vi
1. GİRİŞ .....	1
2. YAMA ANTEN, RADOM ve GNSS TEMEL BİLGİLERİ .....	6
2.1 Mikroşerit Yama Anten .....	6
2.1.1 Mikroşerit Yama Anten Analizi .....	6
2.1.2 Yama Antenlerde Polarizasyon .....	8
2.2 Radom .....	10
2.2.1 Radom Türleri ve Sınıflandırması .....	12
2.2.2 Radom ve Anten Etkileşimi.....	14
2.3 Temel GNSS Bilgileri.....	15
3. GENİŞ BANTLI VE DAİRSEL POLARİZASYONLU ANTEN TASARIMLARI ..	20
3.1 Geniş Bant Mikroşerit Yama GPS Anteni Tasarımı.....	20
3.2 Dairesel Polarizasyona Sahip Geniş Bantlı Mikroşerit Yama GPS/GNSS Anten Tasarımı .....	27
4. RADOM İLE KAPLANMIŞ GPS/GNSS ANTENLERİNİN SİMÜLASYON BENZETİMLERİ.....	36
4.1 Radom ile Kaplanmış GPS Anteni Benzetimleri.....	36
4.1.1 Radomlu Düzenlenmemiş GPS Anteni .....	36
4.1.2 Radomlu Düzenlenmiş GPS Anteni .....	38
4.1.3 Radom ve GPS Anteni Yama Kısmı Arasındaki Mesafeye Bağlı Parametrik Analizler .....	41
4.1.4 Radom Malzemesinin Dielektrik Katsayısına Bağlı Parametrik Analizler ...	44
4.2 Radom ile Kaplanmış GNSS Anteni Benzetimleri.....	47
4.2.1 Radomlu Düzenlenmemiş GNSS Anteni .....	47
4.2.2 Radomlu Düzenlenmiş GNSS Anteni .....	49
4.2.3 Radom ve GNSS Anteni Yama Kısmı Arasındaki Mesafeye Bağlı Parametrik Analizler .....	52
4.2.4 Radom Malzemesinin Dielektrik Katsayısına Bağlı Parametrik Analizler ...	54

5. ÜRETİLEN GPS VE GNSS ANTENLERİNİN SİMULASYON SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI .....	59
5.1 Üretimi Gerçekleştirilen GPS Anteni Test Sonuçları .....	62
5.2 Üretimi Gerçekleştirilen GNSS Anteni Test Sonuçları .....	68
6. SONUÇLAR VE YORUMLAMA .....	77
7. KAYNAKLAR.....	81

## ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Uygulamalara göre sık karşılaşılan radar-anten etkileşimleri .....	15
Çizelge 2.2 GPS Frekans Bantları .....	17
Çizelge 2.3 GLONASS Frekans Bandı .....	17
Çizelge 2.4 Galileo frekans bandı.....	18
Çizelge 3.1 Dar bant GPS anteni tasarım parametreleri .....	21
Çizelge 3.2 Alttaş kalınlığına bağlı anten $S_{11}$ sonuçları .....	23
Çizelge 3.3 Alttaş kalınlığına bağlı değişen anten parametreleri ve bant genişliği sonuçları .....	24
Çizelge 3.4 Farklı alttaş malzemeler için anten boyutları ve bant genişliği.....	26
Çizelge 3.5 Dairesel polarizasyona sahip GPS anteni yama boyutları.....	28
Çizelge 3.6 Alttaş kalınlığına bağlı SGEDP sahip anten parametreleri ve bant genişlikleri .....	32
Çizelge 4.1 Radom eklenmiş GPS anteni karşılaştırması.....	36
Çizelge 4.2 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GPS anteni parametreleri .....	39
Çizelge 4.3 Radom ve yama arasındaki mesafeye bağlı değişimler.....	42
Çizelge 4.4 Radom malzemesine bağlı GPS anteni değerleri .....	44
Çizelge 4.5 Radom malzemesine bağlı düzenlenmiş GPS anteni parametreleri .....	46
Çizelge 4.6 Radom eklenmiş GNSS anteni karşılaştırması.....	48
Çizelge 4.7 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GNSS anteni parametreleri .....	50
Çizelge 4.8 Radom ve yama arasındaki mesafeye bağlı değişimler.....	53
Çizelge 4.9 Radom malzemesine bağlı GNSS anteni değerleri .....	54
Çizelge 4.10 Radom malzemesine bağlı düzenlenmiş GNSS anteni parametreleri .....	56
Çizelge 5.1 GPS ve GNSS anteni radom boyutları .....	61
Çizelge 5.2 Simülasyon sonuçlarının üretim sonuçları ile karşılaştırması.....	63

## ŞEKİLLER

### Sayfa

Şekil 2.1 Mikroşerit yama anten analizi a) Saçaklanma etkisi b) Etkili anten boyu .....	7
Şekil 2.2 Polarizasyon ve eksenel oran .....	9
Şekil 2.3 (a-d) sık kullanılan sandviç radom katmanları, (e-g) katmanlar arası yansıma-iletim gösterimi .....	14
Şekil 3.1 Doğrusal polarizasyonlu mikroşerit kare yama GPS anteni.....	20
Şekil 3.2 Dar bantlı, doğrusal polarizasyonlu GPS anteni $S_{11}$ grafiği.....	22
Şekil 3.3 Dar bantlı, doğrusal polarizasyonlu GPS anteni Smith Diyagramı.....	22
Şekil 3.4 Farklı alttaş kalınlıklarına bağlı oluşan $S_{11}$ grafikleri .....	23
Şekil 3.5 Alttaş kalınlığına bağlı olarak düzenlenmiş GPS antenlerinin $S_{11}$ grafikleri.....	25
Şekil 3.6 İki farklı alttaş kullanılan anten tasarımı .....	25
Şekil 3.7 İki tip alttaş malzemesine bağlı düzenlenmiş GPS antenlerin $S_{11}$ grafikleri.....	26
Şekil 3.8 Dairesel polarizasyona ait köşeleri kesilmiş GPS anteni tasarımı .....	28
Şekil 3.9 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenleri $S_{11}$ grafikleri.....	29
Şekil 3.10 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenleri Smith Chart gösterimleri.....	29
Şekil 3.11 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenlerinin frekansa göre eksenel oran grafikleri .....	30
Şekil 3.12 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenlerinin sağ yönlü polarizasyon kazançları	30
Şekil 3.13 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenlerinin sol yönlü polarizasyon kazançları.	31
Şekil 3.14 Antenlerin polarizasyon kazancı polar grafikleri a) SGEDP sahip anten b) SLEDP sahip anten .....	32
Şekil 3.15 Alttaş kalınlığına bağlı SGEDP sahip GPS antenlerin eksenel oran grafikleri..	33
Şekil 3.16 SGEDP sahip GNSS anteni.....	34
Şekil 3.17 SGEDP sahip GNSS anteni $S_{11}$ grafiği .....	34
Şekil 3.18 SGEDP Sahip GNSS Anteni Smith Diyagramı .....	35

Şekil 3.19 SGEDP sahip GNSS anteni frekans vs. eksenel oran grafiği.....	35
Şekil 4.1 GPS anteni radomlu/radomsuz $S_{11}$ grafikleri .....	37
Şekil 4.2 GPS anteni radomlu/radomsuz Smith Diyagramı .....	38
Şekil 4.3 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GPS anteni $S_{11}$ grafikleri.....	39
Şekil 4.4 Radomlu düzenlenmiş GPS anteni polarizasyon kazançları .....	40
Şekil 4.5 Radomlu düzenlenmiş GPS anteni 3 boyutlu kazanç örüntüsü.....	41
Şekil 4.6 Radom ve yama arasındaki mesafe şeması .....	42
Şekil 4.7 Radom ile yama arasındaki yüksekliğe bağlı $S_{11}$ grafikleri .....	43
Şekil 4.8 Radom ile yama arasındaki yüksekliğe bağlı eksenel oran değerleri.....	43
Şekil 4.9 Radom malzemesinin değişmesine bağlı $S_{11}$ grafikleri.....	45
Şekil 4.10 Radom malzemesine bağlı olarak düzenlenmiş GPS anteni $S_{11}$ grafikleri .....	46
Şekil 4.11 Radom malzemesine bağlı olarak düzenlenmiş GPS anteni eksenel oran değerleri.....	47
Şekil 4.12 GNSS anteni radomlu/radomsuz $S_{11}$ grafikleri .....	48
Şekil 4.13 GNSS anteni radomlu/radomsuz Smith Diyagramı .....	49
Şekil 4.14 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GNSS anteni $S_{11}$ grafikleri.....	50
Şekil 4.15 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GNSS anteni eksenel oran grafikleri .....	51
Şekil 4.16 Radomlu düzenlenmiş GNSS anteni 3 boyutlu kazanç örüntüsü.....	51
Şekil 4.17 Radomlu düzenlenmiş GNSS anteni polarizasyon kazanç grafikleri.....	52
Şekil 4.18 Radom ile yama arasındaki yüksekliğe bağlı $S_{11}$ grafikleri .....	54
Şekil 4.19 Radom malzemesine bağlı GNSS anteni $S_{11}$ grafikleri.....	55
Şekil 4.20 Radom malzemesine bağlı GNSS antenleri Smith Diyagramı.....	56
Şekil 4.21 Radom malzemesine bağlı düzenlenmiş GNSS anteni $S_{11}$ grafikleri.....	57
Şekil 4.22 Radom malzemesine bağlı düzenlenmiş GNSS anteni eksenel oran grafikleri .	57
Şekil 5.1 GPS anteni ve GNSS anteni üretim görselleri.....	59
Şekil 5.2 Üretilen radom boyut bilgileri.....	60

Şekil 5.3 GPS/GNSS antenleri performans testi kurulumu.....	62
Şekil 5.4 Üretilen GPS antenine ait radomlu-radomsuz $S_{11}$ grafikleri.....	62
Şekil 5.5 Simülasyon sonucu ile üretilen GPS antenine ait karşılaştırmalı $S_{11}$ grafikleri...	64
Şekil 5.6 Üretilen GPS anteni ve referans anten test sonuçları a) Uydu sayısı b)Yükseklik bilgisi .....	64
Şekil 5.7 Üretilen GPS anteni ve referans anten sinyal seviyesi karşılaştırmaları a) SV4 b) SV10 c) SV15 .....	65
Şekil 5.8 Üretilen GPS anteni ve referans anten sinyal seviyesi karşılaştırmaları a) SV16 b) SV20 c) SV21 .....	66
Şekil 5.9 Üretilen GPS anteni ve referans anten sinyal seviyesi karşılaştırmaları a) SV26 b) SV27 c) SV29 .....	66
Şekil 5.10 Referans anten ve üretilen anten ile takip edilen uydulara ait ortalama $CN_0$ değeri grafiği .....	67
Şekil 5.11 Test zamanına ait GPS uydularının dağılımı.....	67
Şekil 5.12 a) Radom b) RO3003 üzeri yama anten c) Teflon alttaş d) SMA konektör.....	68
Şekil 5.13 İlk üretimi yapılan GNSS anteni radomlu ve radomsuz $S_{11}$ grafikleri.....	69
Şekil 5.14 Üretilen ilk GNSS anteni ve simülasyon sonucu $S_{11}$ karşılaştırması.....	70
Şekil 5.15 İkinci üretim sonucu ve simülasyon sonucu $S_{11}$ karşılaştırması .....	70
Şekil 5.16 Üçüncü üretim sonucu ve simülasyon sonucu $S_{11}$ karşılaştırması .....	71
Şekil 5.17 Üretilen GNSS anteni ve simülasyon sonucu $S_{11}$ grafikleri.....	72
Şekil 5.18 Üretilen GNSS anteni ve referans anten test sonuçları a) Yükseklik bilgisi b) Standart sapma .....	73
Şekil 5.19 Üretilen GNSS anteni ve referans anten test sonuçları a) Takip edilen uydu sayısı b) Çözüme katılan uydu sayısı .....	74
Şekil 5.20 Üretilen GNSS anteni ve referans anten test sonuçları a) referans anten b) üretilen GNSS anteni .....	75
Şekil 5.21 Uydulara ait $CN_0$ değerleri a) referans anteni b) üretilen GNSS anteni.....	75



Şekil 5.22 Takip edilen uydulara ait  $CN_0$  değerlerinin ortalamasının karşılaştırması..... 76

## KISALTMALAR VE SÖZLÜK

### Kısaltmalar

RF	Radio Frequency
GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite System
SGEDP	Sağ El Dairesel Polarizasyon
SLEDP	Sol El Dairesel Polarizasyon
DP	Dairesel Polarizasyon
EO	Eksenel Oran
YGBG	Yarım Güç Bant Genişliği
GDK	Geri Dönüş Kaybı
CST	Computer Simulation Technology
$C/N_0$	Carrier to Noise Ratio
SV	Space Vehicle

### Sözlük

Beam width	Işıma Genişliği
Substrate	Alttaş
Superstrate	Üsttaş
Yama	Yama
Lobe	Hüzme
Plexiglass	Plastik cam
Plywood	Kontrplak
Insertion Loss	Yerleştirme Kayıpları
Wavelength	Dalga Boyu
Cavity Model	Boşluk Modeli
Fringing Effect	Saçaklanma Etkisi
Effective dielectric cons.	Etkili Dielektrik Katsayısı
Monolithic	Tek Katmanlı
Boresight	Işıma Ekseni
Blade Antenna	Bıçak Anten
Slot	Yarık

GNSS	Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
Quartz	Kuvars
Porcelain	Porselen
Alumina	Alümin

# 1. GİRİŞ

Günlük hayatımızda telefonlarımızda, araçlarımızda konumumuzu ve gideceğimiz yere ulaşım için iki nokta arasındaki navigasyonu Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System (GNSS)) uygulamaları sayesinde yapabilmekteyiz. Güncel hayatta bu kadar iç içe olduğumuz uygulamalar savunma sanayii alanında da benzer amaçlar ile kullanılmaktadır. Savunma sanayinde kara, hava ve deniz araçlarında navigasyon sağlayan; hassas konum, hız ve zaman bilgisi üreten, uydu yardımıyla konumlandırma sistemleri aktif olarak kullanılmaktadır. Ayrıca savunma sanayii alanında GNSS tercih edilen güdüm yöntemleri de aktif olarak kullanılmaktadır. Başlangıç noktası ve hedef noktası bilinen bir füze için Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System (GPS)) ya da diğer GNSS sistemlerine ait uydulardan yayılan sinyaller kullanılarak füzelerde güdüm yeteneği katılabilmektedir. Bir füzede konum bulma ve navigasyon işlemleri için temel ekipmanlar GNSS sinyalleri için geliştirilmiş alıcı anteni ve antenler ile alınan sinyallerin çözümlenerek konum, hız ve zaman bilgisi üretmesini sağlayan GNSS alıcılarıdır.

GNSS alıcı antenleri, yaygın olarak kullanılan GPS ya da GLONASS uydularından yayılan sinyalleri toplayarak konum üretmesi için alıcılara ileten elemandır. Antenler tek bir uydu sisteminden yayılan sinyalleri toplayabileceği gibi tasarımlarına göre birden çok uydu sisteminden yayılan sinyalleri de toplayarak alıcıya iletebilirler. Konumlandırma sistemlerinde özellikle sivil uygulamalarda yaygın olarak GPS L1 frekansında görev yapabilecek antenler kullanılmaktadır. Burada GPS uydularında oluşabilecek bir hata ya da sistemin kullanılmasında yaşanacak bir kısıtlamada sadece bu uydu sistemine göre tasarlanmış anten bulunan sistemler için işlevselliğini kaybetmesine sebep olabilecektir. GPS alıcı antenleri geniş bant frekans aralığı için tasarımı yapıldığında, GNSS uydularına ait uydulardan sinyal toplayabilecektir. Güdüm yöntemi olarak füzelerde sadece GPS kullanılması da benzer sebeplerden dolayı yetersiz kalabilecektir. GNSS'e bağlı güdüm yöntemi olan füzelerde genellikle geniş bant frekanslı yama antenleri tercih edilmektedir. Mikroşerit yama antenler küçük boyutları, düşük maliyetleri ve üretim kolaylığı ile birçok alanda sıklıkla tercih edilen anten çeşitlerindedir [1, 2]. Füzelerde de özellikle GNSS alıcıları için yama anten tasarımları ön plandadır.

Antenlerde frekans aralığı kadar kazanç, yönelim, polarizasyon gibi parametreler de tasarım aşamasında kriterleri oluşturmaktadır. GNSS uydularından yayılan sinyaller dairesel polarizasyona (DP) sahip olduğu için bu tip uygulamalarda kullanılacak antenlerin de

polarizasyon kaybı yaşamaması için tasarımlarının DP düşünülerek yapılması gerekmektedir. Anten polarizasyonunu dairesel çevirmek için tek beslemeli antenler için ve çok beslemeli antenler için farklı yöntemler vardır. Tek beslemeli antenlerde en yaygın yöntem anten boyutlarının köşelerden kesilerek düzenlenmesidir. Bu tip uygulamalarda aynı zamanda kare yama tipinde anten seçilerek köşelerden kırılır ve polarizasyon dairesel olarak elde edilmiş olunur. Çift beslemeli antenlerde ekstra devreye de ihtiyaç olduğundan tasarım aşamasında boyut ön plana çıkmaktadır. Birbirine dik iki besleme olan antenlerde 90 derece faz farkı ile iki dik modu aktif etmek için Quadrature Hibrid, 180 Derece Hibrid, Wilkinson güç bölücü ve T-Güç bölücü devreleri kullanılmaktadır [3]. Geniş bantlı anten elde etmek için de tasarım aşamasında istenen bant genişliğine göre yöntemler uygulanabilir. Anten tasarımında kullanılan alttaş seçimi, alttaşın kalınlığı; yama tasarımının şekli; besleme tekniğinin yöntemi ve bazı çoklu yöntemler ile anten bant genişliği artırılabilir [4].

Radom yapılar antenleri çevreleyen ve onları çevresel şartlara karşı koruyan malzemelerdir. Hava araçlarında, deniz araçlarında, karada kurulu radar benzeri sistemlerde bulunan her boyuttaki antenler sürekli dış şartlara maruz kalmaması için koruyucu kubbe de denilebilecek radomlar tarafından korunmaktadırlar. Radom kaplı antenler yağmur, kar, dolu, toz fırtınası, nem, ani sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklar, taş benzeri malzeme çarpmaları gibi kullanıldığı uygulamaya göre değişebilecek dış etmenlere dayanıklıdırlar [5]. Füze gibi yüksek hızlara ulaşan, ani sıcaklık değişimleri yaşayan, hava akışına bağlı yüksek sıcaklıklar ve dış çevresel etmenlere dayanması gereken uygulamalarda da kullanılan antenler radom ile kaplanmaktadır. Füzelerde burun kısmındaki sensörler ya da gövde üzerindeki sarmal, kare yama antenler özellikle yüzeye uyumlu bir şekilde radom ile kaplanmaktadırlar. Burada kullanılan radomlar görev süresince karşılaşılabilecek çevresel zorluklara karşı anteni ve antenin elektriksel performansını korumaktadırlar.

Yang, Lee ve Kishk [6] çalışmalarında tek beslemeli, DP sahip anten benzetimleri yapmıştır. Köşe kesim yöntemi ve U-yarık yöntemini kullanarak doğrudan ve L-şeklinde besleme tekniğini kullandıkları tasarımlarda, DP sahip antenler elde etmişlerdir. Köşelerinden kesilen ve doğrudan beslenen antenlerde alttaş kalınlığı artırılarak bant genişliğine olan etkileri incelenmiştir. Alttaş kalınlığı artarken anten  $S_{11}$  değeri (-10 dB) bant genişliği ve eksenel oran (EO) bant genişliği artmıştır. Alttaş kalınlığı 1 mm'den 4 mm'ye kadar parametrik incelenmiştir. Burada 1 mm alttaş kalınlığında %4 olan  $S_{11}$  değeri (-10 dB) bant genişliği 3

mm için %7.4 genişliğe yükselmiştir. Alttaş kalınlığı 1 mm olan tasarımda EO 3 dB frekans aralığı %0.82 değerindeyken 4 mm için bu frekans aralığı %3.8'e yükselmiştir. U-yarık ve L-şeklinde besleme ile antenin  $S_{11}$  değeri (-10 dB) ve EO bant genişliği frekans aralıkları üst üste getirmeye çalışılmıştır.

Bahl, Bhartia and Stuchly [7], dielektrik bir tabaka ile kaplanan mikroşerit yama antenler için çalışılan frekansa bağlı ve kullanılan üst tabaka malzemesine bağlı olarak anten rezonans frekansında ve bant genişliğinde yaşanan değişimleri incelemişlerdir. Çalışılan frekansa, dielektrik radom kaplama malzemesinin dielektrik katsayısına ve kalınlığına göre anten performansında yaşanan değişimlerin artacağı sonucuna varılmıştır. Anten tasarımında kullanılan dielektrik malzeme ile kaplama için kullanılan malzeme aynı olduğunda, iki malzeme içinde katsayı 2.5 olduğunda, yaklaşık 1 mm kalınlıkta bir tabaka ile 3 GHz çalışma frekansında anten rezonans frekansı %1'den az değişirken, 10 GHz çalışma frekansında bu değişim %5.8 olmuştur. Anten alttaş malzemesinden farklı ve dielektriği 3.2 ile daha yüksek bir malzeme ile kaplandığında 10 GHz çalışma frekansında, rezonans frekansında yaşanan düşüş %7.8 olmuştur. Aynı çalışma yine 10 GHz için kaplama malzeme dielektrik katsayısının 6.6 olduğu durumda rezonans frekansındaki düşme %16 olmuştur. Düşük dielektrik katsayılı malzemeler için bant genişliği dielektrik kaplamanın kalınlığı artarken; yüksek dielektrik katsayılı malzemelerde düşmüştür.

S. Singh, A. Kumar, V. Singh ve S. Division [8] yüksek hızlı hava aracında haberleşme için geniş bantlı DP anten tasarımı çalışmışlardır. Bu çalışmada anteni çevresel tehlikelere karşı korumak için ve aerodinamik sürtünmeleri azaltmak için nozul şeklinde bir radom kaplama ile analizlerini yapmışlardır. Işıma genişliğini artırmak için yükseltilmiş toprak hattı yapısı tercih edilmiştir. Yama etrafını çevreleyen yükseklikteki toprak hattı efektif açıklık alanını ve kazancı azaltsa da ışıma genişliğini artırmıştır. DP elde etmek için çapraz yarık tekniği uygulanmıştır. Anteni kaplayan radom Rexoilte 1422 malzemedan yapılmıştır. Çalışma sonucunda EO 3 dB frekans aralığı %15 elde edilmiştir ve veri transferinde hava aracında kullanılmak üzere nozul radom yapısıyla çevresel şartlara ve aerodinamik etmenlere uygun bir anten elde edilmiştir.

V. Saidulu, K. Rao ve S. Rao [9], 2.4 GHz çalışma frekansında dikdörtgen ve kare yama anten tasarımı yaparak sonuçlarını radom kaplamalı ve kaplamasız olarak karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında anten parametrelerinin, dielektrik kaplamanın

katsayısına ve kalınlığına göre değiştiği sonucuna ulaşmışlardır. Geri dđnüş kaybı (GDK) değerinin artan dielektik kaplama kalınlığı ile ilk başta arttığı ve sonrasında daha da artan kalınlık ile bir yerden sonra dđřtüşüđü görülmüştür. Bant genişliğinin düşük dielektrik katsayılı malzemenin kalınlığı ile arttığını; yüksek dielektrik katsayılı malzeme ile azaldığını görmüşlerdir. Rezonans frekansının üsttaş kalınlığı ile ters orantılı dđřtüşüđünü, güç duran dalga oranı (Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)) değerinin de kalınlık ile arttığını göstermişlerdir. Yarım güç bant genişliği (YGBG) değerinin de yine üsttaş kalınlığı ve dielektrik katsayısı ile orantılı olarak daraldığı gösterilmiştir.

W. F. Silva, I. Bianchi and T. P. Santos [10], 4.97 GHz merkez frekansında çalışan ve metal bir silindir yüzeyde uçak gövdesi benzetimi ile analiz edilen; FR4 radom kaplama ile tasarlanmış bir bıçak anten çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada FR4 malzeme hem anten tasarımında alttaş olarak kullanılmıştır hem de anten radom malzeme olan FR4 içerisine gömülmüşdür. Anten simülasyon çalışmalarında radomlu ve radomsuz hali için analizler yapılmıştır. Radomlu anten tasarımında  $S_{11}$  değeri merkez frekansının, radomsuz anten değerine göre yaklaşık %20 kaydığı ve merkez frekans değerinin küçüldüğü gösterilmiştir.

Literatür taramasında edinilen bilgiler ve yöntemler ışığında, tez içeriğinde belirli bir füze gövdesine uygun yapıda radom kaplamalı anten tasarımına ve analizlerine yer verilmiştir. Tez bölümlerinde okuyucuya sırasıyla genel bilgiler verilerek tasarım aşamasının ve parametrik analizlerin sonuçları verilmiştir. Bu analizler sonucunda gerçek antenler için tasarım yapılmış; radomlu analizleri ile düzenlemeler ve karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir. Bir adet GPS L1 (1575.42 MHz) frekansında yama anteni ve bir adet GNSS L1 bant frekans aralığında (1560-1610 MHz) yama anteni üretimi yapılarak simülasyon çıktıları ile karşılaştırılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde genel literatür bilgilerine yer verilmiştir. Yama antenler hakkında tasarım ve yöntemler anlatılarak okuyucuya tasarımı yapılacak antenler hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Aynı zamanda radomun tanımı, radom sınıflandırması ve radomun anten üzerine etkileri hakkında bilgiler paylaşılmıştır. Son olarak temel GNSS bilgileri verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümüne doğrusal polarizasyonda GPS anteni tasarımı ile başlanmışdır. Bu anten dar bantlı bir yapıda tasarlanmıştır. Geniş bantlı anten elde etmek için alttaş kalınlığı ile parametrik analizler yapılmış; alttaş kalınlığı değiştirilirken ikinci bir alttaş malzemesi

eklenmiş ve bu malzemelerin bant genişliğine etkilerine bakılmıştır. Karşılaştırmalar yapılarak anten ve bant genişliği hakkında alttaş malzeme tipleri ve kalınları hakkında yorumlar paylaşılmıştır. Ayrıca bant genişliği artırılmış bir anten için DP sahip GPS anteni için yama köşesi kırpma işlemi yapılmıştır. Burada da alttaş türüne ve kalınlığına göre etmenler incelenmiştir. Alttaş kalınlığının köşe kırpma miktarına olan etkilerine değinilmiştir. Son olarak GNSS anteni tasarımı verilmiştir.

Dördüncü bölümde, üçüncü bölümde incelemesi yapılan dar bant DP sahip GPS anteni için radom kaplamalı analizler yapılmıştır. Radom kaplamanın anten üzerine etkileri incelenmiştir. Performansı değişen anten radom kaplamalı olarak düzenlenmiş ve tekrar GPS anteni için analizleri yapılarak karşılaştırmalar yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Radomlu olarak son halini alan anten için üretim bilgileri verilmiştir. Radom yüzeyin yama yüzeyine olan mesafesinin anten performansına etkileri incelenmiştir. Farklı radom malzemeleri için anten üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar verilmiştir. DP sahip dar bantlı GPS anteni için yapılan incelemeler ayrıca GNSS anteni için de yapılmıştır.

Tezin beşinci bölümünde, tasarım aşamasından sonra üretilen antenler ile tez simülasyonundaki sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Altıncı bölümde sonuçlar ve çıktılar yorumlanmış; çalışma hakkında gelecekte yapılabilecek iyileştirmeler ve geliştirmelerden bahsedilmiştir.



## 2. YAMA ANTEN, RADOM ve GNSS TEMEL BİLGİLERİ

### 2.1 Mikroşerit Yama Anten

Günümüzde özellikle hava araçları, uzay araçları, uydu sistemleri, füzeler, cep telefonları gibi askeri ve sivil amaçlı uygulamalarda hafif, küçük boyutlu, çevresel koşullara uyarlanabilme, kolay entegre edilebilme ve düşük üretim maliyeti gibi özellikleri ile ön plana çıkan yama antenler kullanılmaktadır. Mikroşerit yama antenin kullanıldığı frekans yelpazesinin geniş olması, tasarım isterine göre polarizasyon ayarlanabilmesi, çeşitli yöntemlerle ışına örüntüsünün, empedansının ayarlanabilmesi, üretim kolaylığına ve küçük entegre devreler ile uyumluluğu gösterilebilecek diğer avantajlardır. Antenlerin dar bant genişliğine sahip olması, kazançlarının düşük olması, verimlerinin düşük olması, besleme türüne göre ikincil yayılımların fazla olması, tarama performanslarının düşük olması sayılabilecek dezavantajlarındandır [11].

Mikroşerit yama antenler, dielektrik bir malzeme olan alttaş üzerinde ışına yapan iletken bir yüzey ve dielektrik malzemenin altında bulunan iletken toprak hattından oluşmaktadır. Kalın ve yüksek dielektrik katsayısına sahip alttaş kullanılması bant genişliğini ve verimi artırmaktadır. İstenmeyen ışınları engellemek için ve küçük boyutlu anten tasarımı için ince ve dielektrik katsayısı yüksek malzemeler seçilmelidir [12, 13].

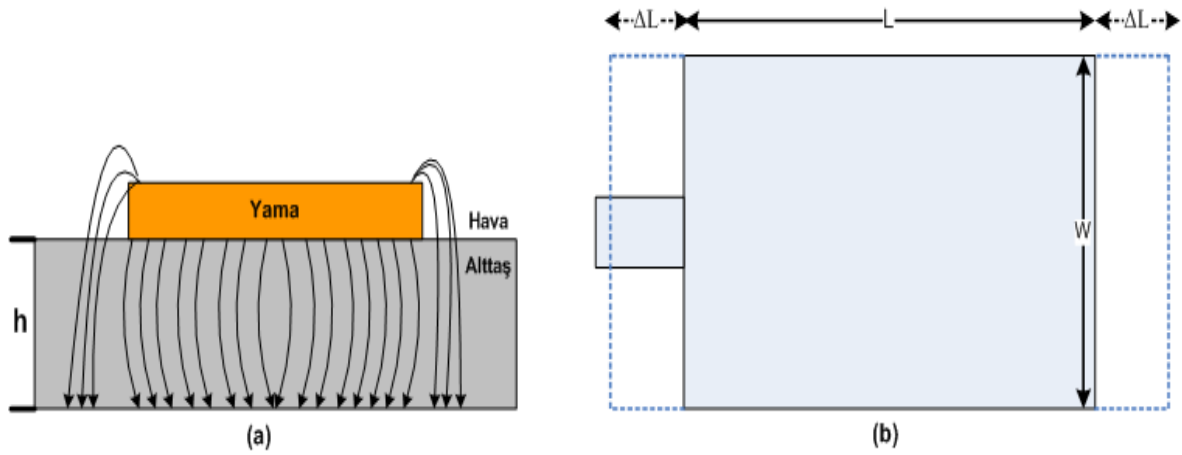
Işıma yapılan yama kısma göre mikroşerit yama antenler isimlendirilebilir. Işıma yapan yama kısım kare, dikdörtgen, dipol, dairesel, üçgen ya da diğer formlarda olabilir. Tasarım gereksinimine ve performans gereksinimine göre kullanıcıya alternatif sunması da bir diğer avantajıdır. Mikroşerit yama antenleri beslemek için en yaygın dört teknik mikroşerit hat besleme, koaksiyel tip besleme, açıklık bağlı besleme ve yakınlık bağlı besleme olarak adlandırılmaktadır [11, 14].

#### 2.1.1 Mikroşerit Yama Anten Analizi

Mikroşerit yama antenler için en yaygın analiz yöntemleri iletim hattı modeli, boşluk modeli ve tam dalga modeli olarak üç tanedir. İletim hattı modeli, doğruluk payı daha az olsa da en basit yöntemdir ve genellikle bu yöntem kullanılmaktadır. İletim hattı modeline göre mikroşerit anten düşük empedanslı L uzunluğundaki iletim hattı ile ayrılmış iki yarıktan oluşmaktadır [4, 11].

Antenin eni ve boyu sonlu bir yapıda olduğu için yama üzerinde bulunan alanlar yamanın köşelerinde saçaklanma oluştururlar. Bu saçaklanma etkisi anten boyuna ( $L$ ), alttaş yüksekliğine ( $h$ ) ve alttaş malzemenin dielektrik katsayısına göre değişmektedir [11, 13].

Elektrik alanın çoğu alttaş içerisinde yayılsa da bir kısmı saçaklanma etkisiyle hava içerisinde yayıldıktan sonra alttaş içerisinde yayılmaktadır. Elektrik alanın çoğu alttaş içerisinde kalsa da saçaklanma etkisi anten boyutunu fiziksel boyutundan fazla hale getirmektedir. Elektrik alan dalgalarının hem havada hem de alttaş içerisinde yayılması etkili dielektrik katsayısını ( $\epsilon_{\text{reff}}$ ) ortaya çıkarmaktadır. Havanın dielektrik katsayısı 1 olduğu için genellikle etkili dielektrik katsayısı, alttaş malzemenin dielektrik katsayısına yakın çıkmaktadır. Etkili dielektrik katsayısı ayrıca uygulama frekansına da bağlıdır. Çalışma frekansı arttıkça zaman saçaklanma etkisi azalmakta ve elektrik alanın çoğu alttaş içerisinde kalmaktadır [4, 11].



Şekil 2.1 Mikroşerit yama anten analizi a) Saçaklanma etkisi b) Etkili anten boyu

Mikroşerit dikdörtgen yama anten tasarımında, pratik tasarım için kullanılan formüller aşağıda verilmiştir [11]. Tasarımda anten yama boyu  $L$ , anten yama eni  $W$ , alttaş kalınlığı  $h$ , çalışma frekansı  $f_r$ , alttaş malzemenin dielektrik katsayısı  $\epsilon_r$ , etkili dielektrik katsayısı  $\epsilon_{\text{reff}}$ , etkili yama boyu  $L_{\text{eff}}$ , saçılma etkisi ile oluşan alan uzunluğu  $\Delta L$ , serbest uzay ışık hızı  $v_0$  olarak verilmiştir.

Yama antenin eni;

$$W = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}, W/h > 1 \quad (2.2)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.3)$$

Saçılma etkisi ile gerçekten boyutundan büyük bir alanda ışışyan antenin etkili anten boyu;

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (2.4)$$

M. Küpeli, ift Bant Mikroşerit GPS Anten Analizi ve Tasarımı isimli yüksek lisans tezinde bu hesaplamalara ek olan diğ r formüllere ve gerekli bilgilere yer vermiştir. Tasarım aşamasında ihtiyaç duyulan ek bilgilere bu kaynaktan ulaşılmıştır [15].

### 2.1.2 Yama Antenlerde Polarizasyon

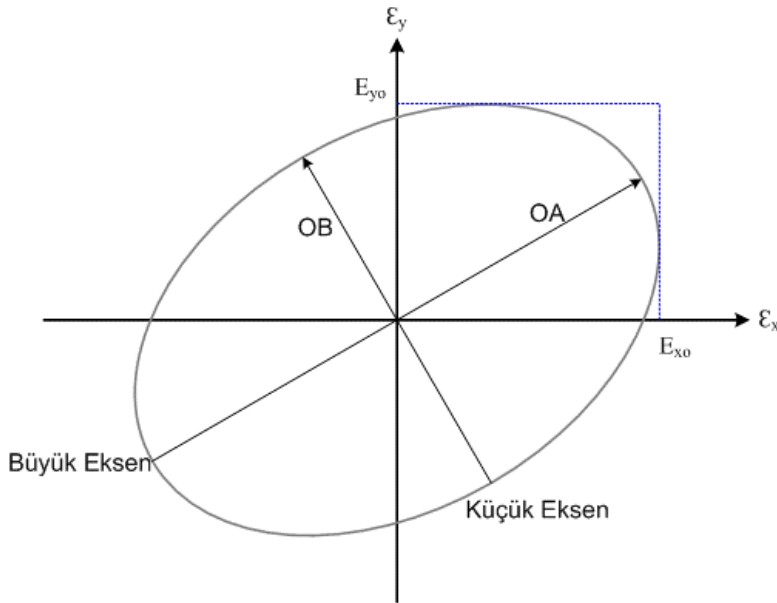
Anten performansını etkileyen ve tasarım kriterini oluşturan en önemli etmenlerden biri anten polarizasyonudur. Anten polarizasyonu, anten tarafından yayılan ya da toplanan dalgaların polarizasyonu ile tanımlanır. Dalganın polarizasyonu zamana bağlı yayılım yönü ve elektrik alan vektörüne bağlı büyüklük ile tanımlanan bir özelliktir. Doğrusal polarizasyon, dairesel polarizasyon ve eliptik polarizasyon olarak gruplandırılan polarizasyonlar için kısa tanımlamalar aşağıda yapılmıştır [11].

Elektrik alan ya da manyetik alan tarafından tanımlanan vektör, zamana bağlı olarak hep aynı doğrultuda yayılıyorsa ve tek bileşeni varsa dalga doğrusal polarizasyona sahiptir. Birbirine dik doğrusal bileşenler, zamanda eş fazlı ya da 180° ve katlarında faz farkına sahiptir [11, 15]

Antenden yayılan ya da toplanan dalganın elektrik alan vektörü ve manyetik alan vektörü arasında 90° varsa, büyüklükleri eşitse ve zamanda 90° faz farkı varsa dalga dairesel

polarizasyona sahiptir. Dalganın dönüş yönü saat yönündeysse sağ el dairesel polarizasyona; saat yönünün tersindeyse sol el dairesel polarizasyona sahiptir [11, 15].

Birbirine dik iki bileşeni olan dalganın bileşenleri aynı büyüklükte ama zaman fazları arasında  $90^\circ$  ve tek katları kadar faz farkı yoksa ya da bileşenler farklı büyüklükte ama zaman fazları arasında  $0^\circ$ ,  $180^\circ$  ve katları kadar faz farkı yoksa dalga eliptik polarizasyona sahiptir. Dalganın dönüş yönü saat yönündeysse sağ el eliptik polarizasyona; saat yönünün tersindeyse sol el eliptik polarizasyona sahiptir. Bir diğer tanımlama ile dalga doğrusal ya da dairesel polarizasyona sahip değilse eliptik polarizasyona sahiptir [11, 15].



Şekil 2.2 Polarizasyon ve eksenel oran

Doğrusal ve dairesel polarizasyon, eliptik polarizasyonun türleri olarak yorumlanabilir. Doğrusal polarizasyona sahip antenlerde eksenel oran değeri tek bileşen olduğundan sonsuza ( $EO=\infty$ ) eşittir. Dairesel polarizasyonda büyük ve küçük eksen birbirine eşit olduğu için eksenel oran değeri 1 ( $EO=1$ ) olur. Eliptik polarizasyona sahip antenlerin eksenel oran değeri 1 ile sonsuz ( $1 < EO < \infty$ ) arasındadır [15].

Dairesel polarizasyona sahip yama anten tasarımında en çok tercih edilen yöntemler kare yama anten tasarımı ve köşe kesim yöntemidir. Bu tez çalışmasında dairesel polarizasyon elde etmek için köşeleri kesilmiş kare yama anten tasarlanmıştır. Köşe kesim yönteminde

antenin köşelerinden ne kadar kesileceğinin hesaplamaları M. Küpeli yüksek lisans tezi [15] içeriğinde yer alan bilgiler kullanılarak yapılmıştır.

## 2.2 Radom

Radom kelimesi, İngilizce “radar” ve kubbe anlamına gelen “dome” sözcüklerinin birleşiminden oluşmuştur. Radom, radarı çevreleyen ve anteni çevresel zararlardan koruyan kubbe anlamını taşımaktadır. Radom yapının en temel işlevi anten ve çevre arasında, çevreden antenin elektriksel performansına etki edecek etmenlere karşı koruyucu olmaktır. İdeal durumda, radom elektriksel açıdan RF dalgalarına karşı görünmezlik işlevine sahip olmalıdır. Günümüzde antenler için radom kaplamalar yer sistemlerinde, deniz sistemlerinde, araçlarda, uçaklarda, uzay araçlarında ve füze elektroniklerinde olmak üzere geniş kullanım alanına sahiptirler [16, 17, 18].

Bir uçakta kullanılan ilk radom basit ve ince katmanlı tasarıma sahiptir. Bir uçağın burun kısmına küresel yapıda ve “plastik cam” malzemedен tasarlanan radom, 1941 yılında B-18A uçağında ilk kez uçuş sırasında kullanılmıştır [18]. İlk radom tasarımlarında kullanılan plastik cam ve kontrplak malzemeler kolay şekil almamaları ve nem geçirgenlikleri sebebiyle yeni radom malzemesi ve tasarım yöntemleri araştırmalarına yön vermiştir. Örneğin 1944 yılında MIT laboratuvarında geliştirilen üç katmanlı A-sandviç tipli radom ile yeni bir dönem başlamıştır [16]. Günümüzde de sandviç yapıda radom koruyucular sıklıkla kullanılmaktadır.

Radom anteni çevresel etmenlerden koruyan bir yapıdır. Radomlar genellikle düşük dielektrik katsayısına sahip malzemelerden yapılan koruyuculardır ve kalınlıkları uygulamada kullanılan anten frekansının dalga boyuna göre seçilmektedir [18]. Radom yapının ana fonksiyonu anten ve çevre arasında yağmur, rüzgâr, sıcaklık gibi elektriksel performansına etkiyi en düşük seviyeye indirmek amacıyla koruyucu kaplama olmaktır. Uçaklarda radom aerodinamik yapıya uygun olarak tasarlanırlar ve uçuş sırasında kuş çarpmalarından; havada uçuş sırasında yağmur, kar, toz ya da buz parçacıkları kaynaklı statik boşalmalardan; yıldırım, fırtına kaynaklı elektriksel alanlardan; şimşek çarpmalarından, su girişlerinden ve pistte toz, taş vb. madde çarpmasından antenleri ya da sensörleri korumak amaçlı kullanılırlar [19].

Radomun temel görevi anteni çevresel zararlardan korumak olduğu için tasarımının rüzgâr, kar, buz, toprak, şimşek, yüksek hızlı uygulamalarda sıcaklık erozyonu, aerodinamik etkiler

gibi etmenlere karşı dayanıklı olmalıdır. Radomun 5 temel mekanik gereksinimi dayanım, katılık (elastik durağanlık sağlamalı), sıcaklı direnci (aşırı sıcak ortamlarda ya da ani sıcaklık değişimlerine dayanıklılık), ortamdaki neme karşı koruma, aşınma ve erozyon direnci olarak sınıflandırılabilir [19].

Radom tasarımında kullanılan malzemeler uygulamanın kullanılacağı çevresel şartlara dayanabilen; sıcaklık, titreşim, darbe gibi tepkilerde sistem performansını koruyabilen ürünler olmalıdır. Ses hızını aşan uygulamalarda kullanılan radomlar hava akışından, ivmeden ve ani sıcaklık değişiminden kaynaklanan aerodinamik yüklere dayanabilmelidir. Füze ve savaş uçakları gibi yüksek hızlı araçlarda kullanılan radomlar için en önemli unsurlardan biri sıcaklık şoklarına maruz kalmasıdır [18]. Gelişen teknoloji ile radom malzemeleri ve mekanik tasarımları birçok çevresel zarara karşı antenleri koruyabilmektedir.

Radomun kullanılacağı uygulamanın çevresel faktörleri radom malzeme seçimini, radom katman tasarımını ve şeklini etkileyen en önemli unsurdur. Örneğin yer sistemi olan uygulamalarda kullanılan radomlar için rüzgâr yükleri radom tasarım kriterlerini oluşturan majör faktördür. Diğer faktörler de nem, toz fırtınası, yağmur, kar, nem, dolu gibi radomun dışına zarar verebilecek ve sistem performansını etkileyecek etmenlerdendir. Füze ve hava araçlarında çevresel ortamın en büyük problemleri aerodinamik yükler ve termal değişimlerdir. Seçilecek malzeme ve radom şekli uygulama alanında araç hızına ve sıcaklık değişimine dayanabilmelidir. Dielektrik malzeme sıcaklık ile performansı ve yapısı bozulmayan ürünlerden seçilmelidir. Uçan araçlarda kullanılan radomlar yağmur, buz, dolu erozyonuna dayanıklı olabilmelidir. Radom tasarımı, şekli bu kriterlere göre yapılmalıdır. Radom malzemenin su sızdırmaması ve aynı zamanda yüzeyde tabaka halinde suyu tutmaması gerekmektedir. Su, dielektrik katsayısı ve tanjant kayıpları yüksek bir malzemedir; tabaka halinde radom yüzeyini kaplarsa bu da radomun ve kapladığı sistemin elektriksel performansını büyük ölçüde bozacaktır. Elektrik boşalmaları, yıldırım düşmesi ve elektriksel alanlar da özellikle uçan araçlardaki radomlar için büyük tehditler oluşturmaktadır. Burada su sızdırmalarını önlemek için koruyucu kaplamalar ve statik elektrik boşalmalarına karşı da ince antistatik kaplamalar kullanılarak zarar seviyeleri azaltılabilmektedir [18].

Radom için duyulan en büyük endişe antenin elektriksel performansını bozmasıdır. Ekleme kayıplarını artırarak antenin alabileceği sinyalleri azaltabilir, anten alıcı hassasiyetini bozarak düşük sinyallerin toplanmasını engelleyebilir, yayılan gücü azaltarak kazancını düşürebilir. Radomlar ayrıca yan hüzmeye seviyesini artırabilir, anten polarizasyonunu etkileyebilir, anten ışınım yönünde kaymaya sebep olabilir. Gereksinimleri karşılayan iyi tasarlanmış bir radom; antenin RF performansını minimal düzeyde etkileyerek, bu yan etkilere karşı sadece anteni korumakla kalmaz sistemin uzun yıllar aynı performans ile çalışabilmesini de sağlar ve sistemlerin uzun ömürlü olması ile maliyet düşmesine fayda sağlar [17].

### 2.2.1 Radom Türleri ve Sınıflandırması

Hava, kara ve deniz araçlarında, füzelerde ve kara sistemlerinde kullanılan radomlar askeri standartlara göre sınıflandırılmış ve kategorilere ayrılmıştır [16, 20]. Radom tasarımında bu sınıflandırmalara göre katman üretimi yapılmaktadır.

Radomlar türlerine göre 6 kategoriye ayrılmıştır [20]:

- a) *Tür 1* kategorisindeki radom kaplamalar düşük frekanslı uygulamalar için kullanılırlar. Kullanıldıkları frekans değeri 2 GHz ve altındaki frekanslardır.
- b) *Tür 2* kategorisindeki radom ürünler yönelimli radomlardır ve belirli bir doğrultuda gereksinimleri sağlamaktadır. Bu tip radomlarda ışınım hataları, anten örüntü bozulmaları ve anten yan hüzmeye zayıflatmaları düşünülerek tasarım yapılır.
- c) *Tür 3* kategorisindeki radomlar dar bant işlevselliğine sahiptir. Görev bant genişlikleri %10 ve aşağısındadır.
- d) *Tür 4* kategorisindeki radomlar çoklu frekans tasarımlar için kullanılırlar. İki ya da daha fazla dar bantlı frekans aralıklarında işlevseldirler.
- e) *Tür 5* kategorisindeki radomlar geniş bantlı uygulamalar için kullanılırlar. Görev yaptıkları bant genişliği 0.1 GHz ile 0.667 GHz arasındadır.
- f) *Tür 6* kategorisindeki radomlar çok geniş bantlı uygulamalar için kullanılırlar. Görev yaptıkları bant genişliği 0.667 GHz'ten fazladır.

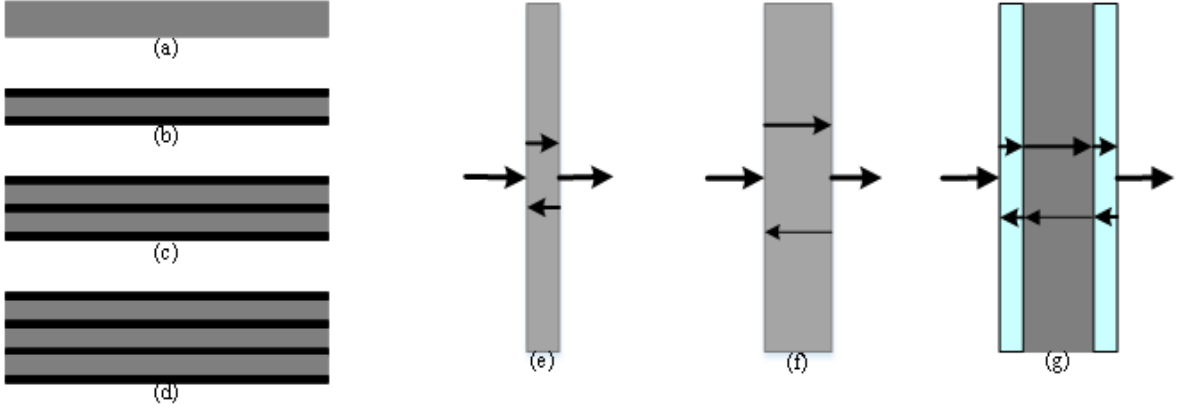
Radomlar türlerin yanı sıra genel uygulama alanlarına göre 3 sınıfa ayrılmıştır. Sınıf 1 uçan araç uygulamalarını, sınıf 2 kara-deniz aracı uygulamalarını ve sınıf 3 sabit yer sistemi kurulumlarını oluşturmaktadır [20].

Radomlar son olarak askeri standartlara göre belirli biçimlerde kategorize edilmişlerdir [16]:

- i. *Biçim a* yarım dalga boyu kalınlıkta, tek katmanlı duvardan oluşan radomlardır.
- ii. *Biçim b* uygulama frekansında duvar kalınlığı 0.1 dalga boyuna eşit ya da bu boydan daha küçük olan, ince duvarlı tek katmanlı radomlardır.
- iii. *Biçim c* dış yüzeyleri yüksek yoğunlukta, iç katmanı düşük yoğunlukta malzemeden üretilen 3 katmanlı radomlardır ve A-sandviç olarak adlandırılırlar. Dış katmanlardaki malzemenin dielektrik katsayısı, iç katmandaki malzemenin dielektrik katsayısından büyüktür.
- iv. *Biçim d* radomlar 5 ya da daha fazla katmandan oluşmaktadır. Tek sayılı katmanlar yüksek yoğunluk ve büyük dielektrik katsayısı olan; çift sayılı katmanlar düşük yoğunluk ve küçük dielektrik katsayısı olan malzemelerdir. Radomun katman sayısı yükselirse, geniş bantlı frekans performansı da gelişir.
- v. *Biçim e* diğer biçimlere uymayan tüm radomlar bu kategoridedir. B-sandviç radomlar bu kategoridedir ve A-sandviçten farklı olarak dış katmanları düşük yoğunluk ve küçük dielektrik katsayısına sahip olan; iç katmanı yüksek yoğunluk ve büyük dielektrik katsayısına sahip olan malzemelerdir.

Şekil 2.3'de radom biçimlerine örnekler ve radomlarda katmanlar arası sinyal iletimine örnekler verilmiştir. (e) görselinde yer alan *Biçim b* örneği radom için iyi bir RF geçirgenliği olmasının sebebi serbest alan / dielektrik yüzey sınırında sinyal yansımaları, dielektrik malzemenin diğer tarafında, dielektrik yüzey / serbest alan geçişinde, faz dışı yansımalar tarafından engellenmiştir. (f) görselinde yer alan *Biçim a* örneği radomda da ince radoma benzer yansıma engellemeleri vardır. Malzeme boyunca 180 derece seyahat eden dalga -180 faz farkı ile yansır ve net 180 derece faz kaymasını engellemek için diğer 180 derece boyunca ters yönde ilerler. (g) görselinde yer alan *Biçim c* örneği radomda dış tabaka 0.25 dalga boyu kalınlıkta olduğundan, dış tabakalardan yansıma katsayısı aynı büyüklük ve fazdadır. İkinci dış tabakadan yansıyan çift yönlü yansıma için diğer dış tabaka 0.5 dalga boyundadır ve yansımalar 180 derece faz dışında olduğundan engellenir [17].





Şekil 2.3 (a-d) sık kullanılan sandviç radom katmanları, (e-g) katmanlar arası yansıma-iletim gösterimi

### 2.2.2 Radom ve Anten Etkileşimi

Radom kaplanması anten performansını ve buna bağlı sistem parametrelerini etkileyebilir. Anten kazancı, yan hüzmeye seviyeleri, ışınma genişliği, sıfır derinlikleri ve anten polarizasyonunu etkileyebilmektedir. Mikroşerit yama bir anten radom ile kaplanırsa radom malzemesinin dielektrik sabiti, kayıp tanjantı, yama ile arasındaki yükseklik ve malzeme kalınlığına bağlı olarak antenin karakteristik empedansı, kayıpları, kalite faktörü ve faz hızları gibi parametreleri dolayısıyla antenin performansını değiştirebilir [7]. Radom yokken antenin kazanç değeri ile radom varken antenin kazanç değeri arasındaki fark radom kaybı olarak adlandırılır [18].

Radom ile kaplanan antenin genellikle yan hüzmeye seviyeleri artar. Bu artmanın sebebi radom içerisinde ilerleyen dalgada yaşanan bozulmalar ve kırılmalardır. Radomun anten üzerinde bir diğer etkisi de polarizasyon değişikliğine sebep olmasıdır. Örneğin SGEDP sahip bir sinyal radom yüzeye girdikten sonra katman içerisinde ilerlerken enerjisinin bir kısmı SLEDP sahip sinyallere dönüşebilir. Bu durum özellikle uydu haberleşmesi ya da navigasyon için kullanılan uygulamalarda sistem etkisini çok azaltabilir [16]. Antene ait GDK çıktıları radom etkisiyle birlikte kaymalar gösterebilir. Anten rezonans frekansı genellikle azalır ve bu durumda anten tasarımının gözden geçirilmesi gerekir. Radomlar sistem gürültü seviyesinin artmasına ve sinyal güç kayıplarına sebep olabilir. Radom içerisinde iletilen elektromanyetik dalgalar ekleme kayıplar ile güç kaybı yaşar ve çoğu hava ile dielektrik yüzeyden yansıyarak anten tarafından alınmaz. Bazı uygulamalarda en sık görülen radom kaynaklı kayıplar aşağıdaki tabloda listelenmiştir [16].

Çizelge 2.1 Uygulamalara göre sık karşılaşılan radar-anten etkileşimleri

Uygulama	Artan Radom Kayıpları	Anten Yan Hüzme Artışı	Radom Polarizasyon Bozukluğu	Işıma Ekseni Hata Artışı	Anten VSWR Artışı
<b>Kara/Deniz/Hava</b>					
Hava Savunma Radarı	X	X	X	X	X
Deniz Radarı	X	X	X	X	X
Mikrodalga İletişim	X				X
Mikrodalga Havadan Karaya İletişim	X				
Radar Altimetre	X	X			X
GPS/Uydu Navigasyon	X		X		
<b>Füze/Mühimmat</b>					
Radar Güdüm	X	X	X	X	X
Pasif anti-ışılma yönelim	X	X			

### 2.3 Temel GNSS Bilgileri

GNSS, yani Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri, uydular ile konum belirleme imkanı sunan bir sistemdir. GNSS uzay (uydu), kontrol ve kullanıcı ana başlıklı üç kısımdan oluşur [21]. Uzay kısmında dünya yüzeyinden ortalama 20000 km yukarıda bulunan konumlama uydularından oluşur. GNSS bütününü oluşturan GPS, Glonass, Galileo, BeiDou, IRNSS,

QZSS sistemler farklı yüksekliklerde farklı sayılarda uydulara sahiptirler. Her bir sistemdeki uyduların yine kendilerine ait yörüngeleri vardır. Bu yörüngeler GPS için uluslararası bir dolaşım sunarken, IRNSS ve QZSS gibi sistemlerde ülkelere ya da bölgelere ait yerel bir yörünge ve erişim imkanı sunmaktadır. Her bir sistemin kendi uyduları zaman, yörünge ve durumlarını bildiren sinyaller yayarlar. Kontrol segmenti yer istasyonları olarak görev yapmaktadır. Kontrol istasyonlarında uyduların yörünge parametreleri, zaman doğrulukları sürekli kontrol altındadır ve düzenlemeler burada yapılır. Kullanıcı, GNSS sistemleri için son elemandır. GNSS sinyallerini toplayan ve işleyen bir alıcı yardımıyla kullanıcıya pozisyon ve zaman bilgisi sağlanmış olur [22].

GNSS sisteminden kullanıcıya ulaşan sinyaller bütününde 5 aşamadan geçmektedir. Basit olarak GNSS konseptini 5 adım ile açıklayabiliriz. GNSS için birinci adım uydulardır. GNSS uyduları dünya yörüngesinde belirli bir rotaya sahiptir. Uydular yörüngelerini ve zamanlarını yüksek hassasiyet ile bilirler. Gerekli durumlarda merkez kontrol istasyonundan uydulara yer ve zaman güncellemesi yapılabilir. İkinci adım yayılmadır. Uydulardan yayılan sinyaller yörünge, zaman ve durumları hakkında bilgi içerirler. Alıcı ekipmanlarına ulaşana kadar atmosferden geçen sinyaller oldukça zayıf güçtedirler. Üçüncü adım alıcı ekipmanlar tarafından uydudan yayılan sinyallerin toplanmasıdır. Burada her uydudan gelen ayrı sinyallerdeki bilgiler ile alıcıya ulaşan zaman ve süre bilgisi işlenir. Dördüncü adım alıcıda yapılan hesaplamalardır. Uydularda gelen sinyaller ile alıcı tarafından zaman ve pozisyon bilgisi üretilir. Son adım alıcının çözdüğü zaman ve pozisyon bilgisinin uygulamada kullanılmasıdır. Daha önce belirtilen alanlarda yaygınca kullanılan çözümler ile konum belirleme ve navigasyon işlemleri gerçekleştirilir.

GPS, Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'ne ait olmakla birlikte ilk konumlama sistemidir. 1970 sonlarında ve 1980 başlarında ilk uydular fırlatılmış ve başlangıçta ABD tarafından askeri amaçlı kullanılmıştır. 1983'te yaşanan bir uçak kazası sonrasında alınan karar ile sivil kullanıma açılmıştır ve günümüzde de hala hem sivil hem de askeri maksatlı kullanım frekans blokları vardır [23]. GPS uzayda yer alan konumları bilinen uydulardan üretilen sinyaller ile kara, deniz, hava ve uzayda konum, hız ve zaman bilgisi oluşturulmasını sağlamaktadır. 27 adet GPS uydusu dünya yüzeyinden yaklaşık 20200 km yukarıda; ekvator eksenini ile 55 derece açığa sahip ve 12 saatlik yörünge periyotlarına sahip olarak işlevlerini yerine getirmektedir [21, 24]. GPS uydularına ait taşıyıcı frekans bilgileri Çizelge 2.2

verilmiştir. L1 bandı tüm kullanıcılar için erişilebilir durumdadır. L2 bandı öncelikli olarak askeri ve sivil radar uygulamalarında kullanılır. L5 bandı askeri bilgi iletişim servislerinde, mesafe ölçme ekipmanlarında ve taktik hava navigasyonunda kullanılır [23].

Çizelge 2.2 GPS Frekans Bantları

Link	Frekans (MHZ)	Dalga Boyu (cm)	Bant Genişliği (MHZ)
L1	1575.42	19	24
L2	1227.60	24.4	24
L5	1176.45	25.5	24

GLONASS kısaltması Rusça “Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema” kelimelerinden oluşmaktadır ve Türkçesi aslında GNSS ile aynı isimlendirmeye sahiptir. GLONASS uyduları ilk olarak Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği tarafından 1982’de fırlatılmıştır ve 1993 yılında tamamen işlevsel hale gelmiştir. GPS gibi ilk olarak Rusya odaklı askeri amaçlı kullanılan sistem 1995 yılında sivil amaçlı da kullanılmaya başlanmıştır. GLONASS’a ait 2002 yılında yayınlanan arayüz dokümanında “dünya üzerinde her yerde ve yakın dünya uzayında havada, denizde ve karada sınırsız sayıda kullanıcı tarafından her koşulda 3 boyutlu pozisyon, hız ve zaman bilgisi üretilmesi” amacıyla kullanılacağı belirtilmiştir. Günümüzde 24 adet uydu 3 yörünge düzleminde dolaşmaktadır. Uydular dünya yüzeyinden 19140 km yukarıda ekvator düzlemi ile 64.8 derece açıda yörüngede dolaşmaktadır. Her bir yörünge periyodu yaklaşık 11 saat 15 dakika sürmektedir [21, 23, 25]. GLONASS frekans bandı Çizelge 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.3 GLONASS Frekans Bandı

Link	Taşıyıcı Merkez Frekansı (MHz)	Dalga Boyu(cm)	Kullanım frekansları $k=0..24$ (MHz)
G1	1602	18.7	$1602+k*0.5625$
G2	1246	24.1	$1246+k*0.4375$
G3	1204.704	25.9	-

Galileo, Avrupa'nın yüksek hassasiyete sahip özellikle sivil uygulamalar için kurulan konumlandırma sistemidir. Galileo, çifte frekans standardı ile diğer sistemlere göre daha hassas konum ve zaman bilgisi üretme hedefine sahiptir. Ayrıca savaş gibi en zor zamanlarda dahi ulaşılabilir bir sistem olmayı amaçlamaktadır. Kullanıcılara bir servis aracılığı ile herhangi bir uydu arıza durumunda saniyeler içerisinde bilgi verecektir. Bu sistem için ilk test uydusu 2005 yılında fırlatılmıştır. Sonrasında 4 adet işlevsel uydu 2011 ve 2012 yılları içerisinde fırlatılmıştır. 2007 yılı itibariyle 27 uydu dünya yüzeyinden 23222 km yukarıda, ekvator eksenini ile 56 derecede 3 yörünge düzleminde dolaşmaktadır. Bir yörünge yaklaşık 14 saat 5 dakikada tamamlanmaktadır. Galileo frekans bandı Çizelge 2.4'te verilmiştir. E5a ve E5b bantları mesafe ölçer ekipmanlarında ve taktik hava navigasyon alanlarında kullanılmaktadır. E6 bandı radar, hassas Doppler radarlarında ya da amatör radyo sinyalleri bandındadır. E5a ve E1, GPS ile aynı bantlarda hassas çözüm ve birlikte kullanım için tercih edilmiştir [21, 23].

Çizelge 2.4 Galileo frekans bandı

<b>Link</b>	<b>Taşıyıcı Merkez Frekansı (MHz)</b>	<b>Dalga Boyu (cm)</b>	<b>Bantgenişliği (MHz)</b>
E1	1575.42	19	32
E6	1278.750	23.4	40.9
E5	1191.795	25.2	51.2
E5a	1176.450	25.5	24
E5b	1207.140	24.8	24

BeiDou Çin'e ait navigasyon sistemidir. İki aşamalı bir planlama ile işlevselliğine başlamıştır. İlk aşama olan bölgesel uygulama 2012 yılında göreve başlamıştır. Bu aşamada Asya Pasifik bölgesi uydu sistemlerinden faydalanmaktadır. Bölgesel uydu sisteminde toplam 14 adet uydu fırlatılmıştır. Bunlardan 4 tanesi 21528 km yukarıda 55 derece ekvator eksenini açısıyla dolaşmaktadır ve 10 tanesi 35787 km yukarıdadır. 2020 yılına kadar küresel sisteme geçiş tamamlanacaktır. Bu aşamada 27 adet uydu 21528 km yukarıda 3 yörünge düzleminde dolaşmakta olacaktır. B1 bandı 1561.098 MHz merkez frekansında sivil uygulamalar için kullanılmaktadır. B2 bandı 1207.14 MHz merkez frekansında lisansı alan kullanıcılar tarafından kullanılabilir. B3 bandı 1268.52 MHz merkez frekansında yine

lisanslıdır ve askeri alanlarda kullanımdadır. B3 bandında askeri haberleşme yeteneği de bulunmaktadır [21].

IRNSS, Hindistan'a ait yerel bir konumlandırma sistemidir. Sistemde, 7 adet uydu dolaşımdadır. IRNSS ile sivil kullanıma açık olan Standart Pozisyon Servisi ve sınırlı kullanımda lisans ile kullanılabilen Kısıtlı Servis uygulamaları vardır. QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) Japonya'ya ait, haberleşme alanında iletişim ve pozisyon bulma amaçlı yerel bir sistemdir. 4 uydudan ilki 2010 yılında fırlatılmıştır. QZSS uyduları GPS ile aynı frekansı kullanmaktadır ve GPS ile senkron zaman saatine sahiptir [21].

GNSS taşıma, makine kontrolü, hassas tarım, inşa, madencilik, haritalama, denizcilikte, arama ve kurtarma alanında, ticari ürünlerde, insansız araçlarda ve savunma alanında yaygın kullanılan bir sistemdir. Savunma alanında kara ve hava unsurları pozisyon bilgisini görev alanlarında kullanabilmektedir. Ayrıca füzelerde bir güdüm yöntemi olarak da kullanılmaktadır.

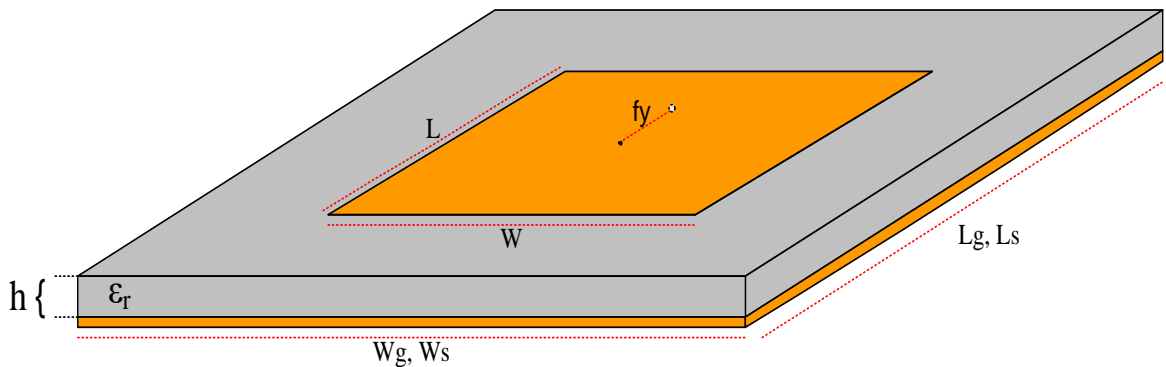
### 3. GENİŞ BANTLI VE DAİRSEL POLARİZASYONLU ANTEN TASARIMLARI

Tezin bu bölümünde dar bant genişliğine ve doğrusal polarizasyona sahip bir GPS anten tasarımı başlangıç alınarak, mikroşerit yama antenlerde bant genişliğini artırmak için kalın alttaş kullanımının etkileri ve sonuçları incelenmiştir. DP elde etmek için kare mikroşerit yama anten ve köşe kesim yöntemi tercih edilmiştir. Alttaş kalınlığının artması ile köşe kesim miktarı arasındaki bağlantı simülasyon analizleri ile gösterilmiştir. Sağ el dairesel polarizasyon (SGEDP) ve sol el dairesel polarizasyon (SLEDP) elde etmek için besleme noktasının anten eksenleri üzerindeki yeri değiştirilmiştir ve sonuçları incelenmiştir.

#### 3.1 Geniş Bant Mikroşerit Yama GPS Anteni Tasarımı

Bu alt bölümde bant genişliği dar olan 1575 MHz merkez frekansında GPS anteni tasarlanmış ve sonrasında bant genişliğini artırmak için kullanılan, alttaş kalınlığını artırma tekniği ile elde antenler tasarlanarak, sonuçları karşılaştırılmıştır. Alttaş malzemesinin kalınlığının anten boyutuna, bant genişliğine, besleme noktası yerine etkileri sonuçlar ile yorumlanmıştır. Ayrıca farklı bir malzemeden iki alttaş kullanımının anten parametrelerine ve bant genişliğine olan etkileri incelenerek yorumlanmıştır.

Kare mikroşerit yama anten tasarımı ile bant genişliği dar olan ve doğrusal polarizasyona sahip olan GPS anteni CST kullanılarak tasarlanmıştır. Anten parametrelerine ait isimlendirme ve tasarım değerleri Şekil 3.1’de ve Çizelge 3.1’de verilmiştir. Anten performansını gösteren geri dönüş kaybı grafiği Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu anten, alttaş kalınlığı artırılarak elde edilecek geniş bantlı antenlerin gösteriminde referans olarak kullanılacaktır.



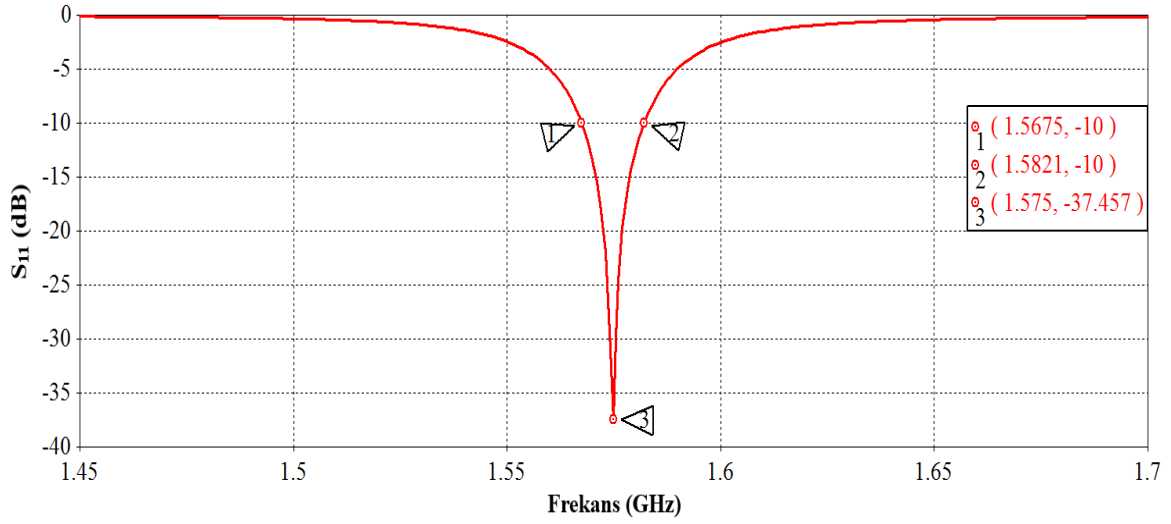
Şekil 3.1 Doğrusal polarizasyonlu mikroşerit kare yama GPS anteni

Çizelge 3.1 Dar bant GPS anteni tasarım parametreleri

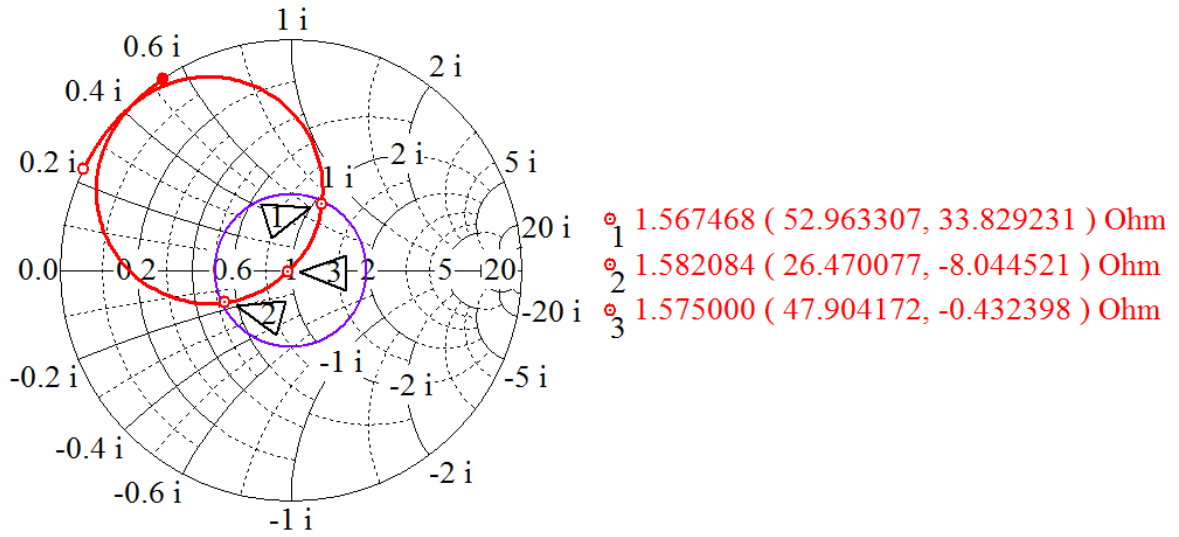
<b>Anten Parametreleri</b>	<b>Parametre Tanımı</b>	<b>Tasarım Değeri</b>
L	Yama anten boyu	53.44 mm
W	Yama anten eni	53.44 mm
h	Altaş kalınlığı	1.524 mm
fy	Besleme noktasının y-eksenindeki uzaklığı	7.89 mm
fx	Besleme noktasının x-eksenindeki uzaklığı	0 mm
Wg, Lg	Toprak hattı eni ve boyu	70 mm
Ws, Ls	Altaş eni ve boyu	70 mm
$\epsilon_r$ (RO3003)	Altaş malzemesi dielektrik katsayısı	3

CST ile tasarlanan ve simülasyonu yapılan GPS anteni 1575 MHz merkez frekansına göre tasarlanmıştır. Simülasyon sonucunda, anten merkez frekansında (-37.46 dB) GDK okunarak,  $S_{11}$  değeri için (-10 dB) altında olma hedefi sağlanmıştır. Tasarımı gerçekleştiren GPS anteninin GDK (-10 dB) bant genişliği 15 MHz ile rezonans frekans değerine göre %1 elde edilmiştir. Şekil 3.3’de dar bantlı, doğrusal polarizasyonlu GPS antenine ait Smith Diyagramı verilmiştir. Bu diyagramda mor daire ile VSWR değerinin 2’den küçük olduğu alanlar referans olması amaçlı verilmiştir.  $S_{11}$  grafiğinde (-10 dB) değerinin altında olması amaçlanan aralıklar bu diyagramda da referans dairesinin içerisinde kalan frekans aralığını göstermektedir.





Şekil 3.2 Dar bantlı, doğrusal polarizasyonlu GPS anteni S<sub>11</sub> grafiği



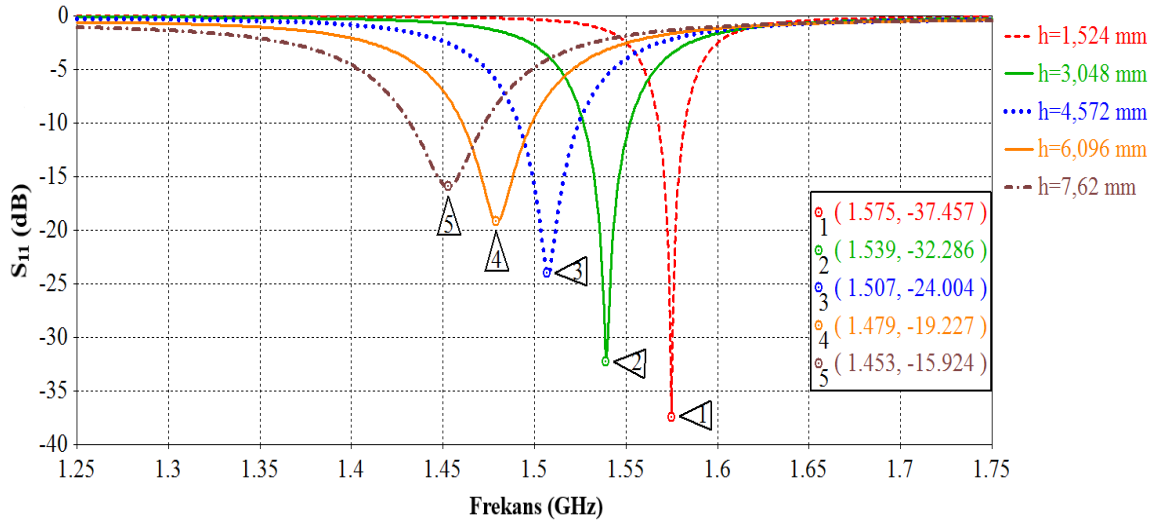
Şekil 3.3 Dar bantlı, doğrusal polarizasyonlu GPS anteni Smith Diyagramı

Çizelge 3.1’de verilen GPS anteni tasarımında, alttaş kalınlığı (h), diğer parametreler sabit tutularak değiştirilmiştir. Alttaş kalınlığına bağlı olarak S<sub>11</sub> değerlerinde ve bant genişliklerinde yaşanan değişimler Çizelge 3.2’de ve Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Alttaş kalınlığına bağlı anten  $S_{11}$  sonuçları

<b>h</b> <b>(mm)</b>	<b><math>S_{11}</math> Merkez</b> <b>Frekans</b> <b>(MHz)</b>	<b>Minimum Geri</b> <b>Dönüş Kaybı (dB)</b>	<b>Bant Genişliği</b> <b>(MHz)</b>	<b>Bant Genişliği</b> <b>Oranı</b>
1.524	1575	-37.457	15	%1
3.048	1539	-32.286	20	%1.3
4.572	1507	-24.004	30	%2
6.096	1479	-19.227	35	%2.4
7.62	1453	-15.924	40	%2.8

Çizelge 3.2’de verilen anten simülasyon çıktılarına göre alttaş kalınlığı diğer parametreler sabit tutulurken değiştirildiğinde; anten merkez frekansının küçüldüğü, bant genişliğinin arttığı ve GDK performansının merkez frekanslara göre azaldığı Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.4 Farklı alttaş kalınlıklarına bağlı oluşan  $S_{11}$  grafikleri

Alttaş kalınlığı arttıkça merkezi kayan anten frekansını ve dönüş kayıplarını düzeltmek için anten boyutlarında ve besleme noktasının yerinde değişiklik yapılması gerektiği düşünülmüştür. Şekil 3.4’de alınan sonuçlara göre GPS anteni tasarımı için alttaş kalınlığı artarken anten boyutu küçülmelidir. Aynı zamanda geri yansımaya kayıplarını azaltmak için besleme noktasının yeri de anten merkez noktasından y-ekseni doğrultusunda

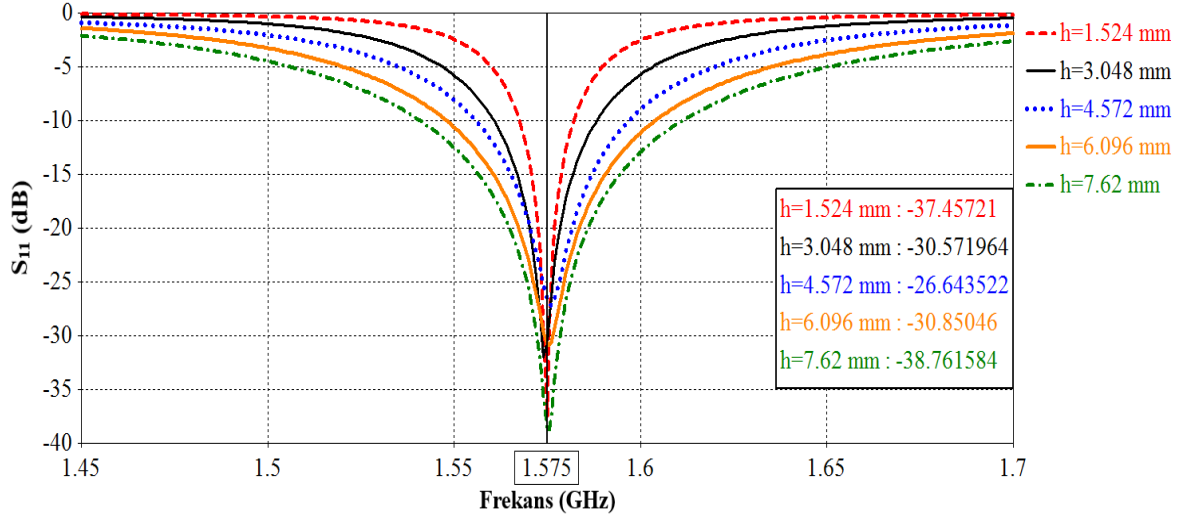
uzaklaştırılmalıdır. Bu kriterleri göz önüne alarak Çizelge 3.2’de verilen alttaş kalınlıkları için anten boyutları değiştirilmiş ve 1575 MHz için bant genişliği artırılmış GPS antenleri yeniden tasarlanmıştır. Antenlerde toprak hattı boyutları ve alttaş boyutları 70 mm alınmıştır.

Çizelge 3.3’te verilen sonuçlara göre alttaş kalınlığı arttığında (-10 dB) bant genişliğinin arttığı da görülmüştür. Kalınlık 5 katına çıktığında anten boyutu ilk değerine göre yaklaşık %7 küçülmüştür. Bu çalışmada alttaş kalınlığı ilk anten tasarımına göre sırasıyla 2, 3, 4 ve 5 katına çıkarılmış; bunun sonucunda bant genişliği frekans değeri de yaklaşık olarak ilk anten tasarımında çıkan değerlerin aynı katlarında ölçülmüştür. Alttaş kalınlığını artırmanın bir diğer etkisi de besleme noktasının yerinin değişmesi olmuştur. Merkez frekansta daha iyi bir 50 Ohm eşleşmesi için ve bunun etkisi olarak daha iyi bir GDK alabilmek için anten besleme noktasının merkezden uzaklaştığı, anten kenarına yaklaştığı görülmüştür. Alttaş kalınlığının 1.524 mm olduğu tasarıma göre kalınlık 5 katına çıkarıldığında anten besleme noktası y-ekseni doğrultusunda anten kenarına yaklaşık olarak %21 oranında yaklaşmıştır.

Çizelge 3.3 Alttaş kalınlığına bağlı değişen anten parametreleri ve bant genişliği sonuçları

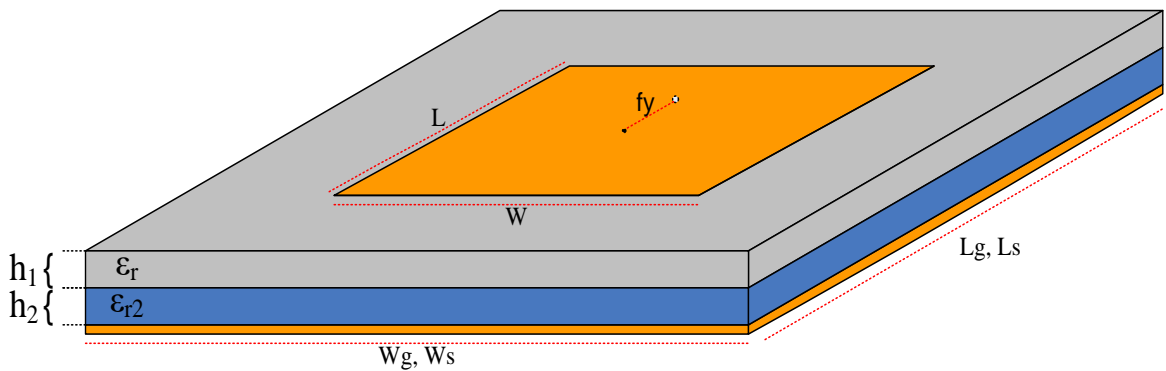
<b>h (mm)</b>	<b>L, W (mm)</b>	<b>(fx; fy) (mm)</b>	<b>Bant genişliği (MHz)</b>	<b>Bant Genişliği</b>
1.524	53.44	(0; 7.89)	14.6	%1
3.048	52.25	(0; 7.89)	27.7	%1.8
4.572	51.12	(0; 8.2)	41.1	%2.6
6.096	50.3	(0; 9)	55.9	%3.6
7.62	49.7	(0; 10)	70.3	%4.4

Şekil 3.5’te kırmızı ve kalın kesikli çizgiler ile gösterilen  $S_{11}$  grafiği, dar bantlı GPS anteni tasarımına aittir ve alttaş kalınlığı 1.524 mm alınarak tasarlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda alttaş kalınlığını artırmanın bant genişliğini artırdığı sonucuna ve anten yama boyutunu küçülttüğü sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.5 Alttaş kalınlığına bağlı olarak düzenlenmiş GPS antenlerinin S<sub>11</sub> grafikleri

Geniş bant anten elde etmek amaçlı alttaş kalınlığının artırılması iki tip alttaş malzeme kullanarak da sağlanmaktadır. Bant genişliğini artırmaya yönelik diğer çalışmada 1.524 mm kalınlıktaki RO3003 malzemesi ile toprak hattı arasına sırayla hava, teflon ve Alümin malzeme koyulmuştur ve sonuçlar incelenmiştir. İki farklı alttaş malzeme kullanılan tasarımlarda RO3003 malzeme 1.524 mm ( $h_1$ ) kalınlığa ve ikinci alttaş malzeme de 1.524 mm ( $h_2$ ) kalınlığa sahiptir. Toplamda 3.048 mm kalınlığa sahip iki tip alttaş malzemeye sahip antenler; sadece RO3003 malzeme ile 3.048 mm kalınlığa sahip anten tasarımı ile karşılaştırılmıştır.

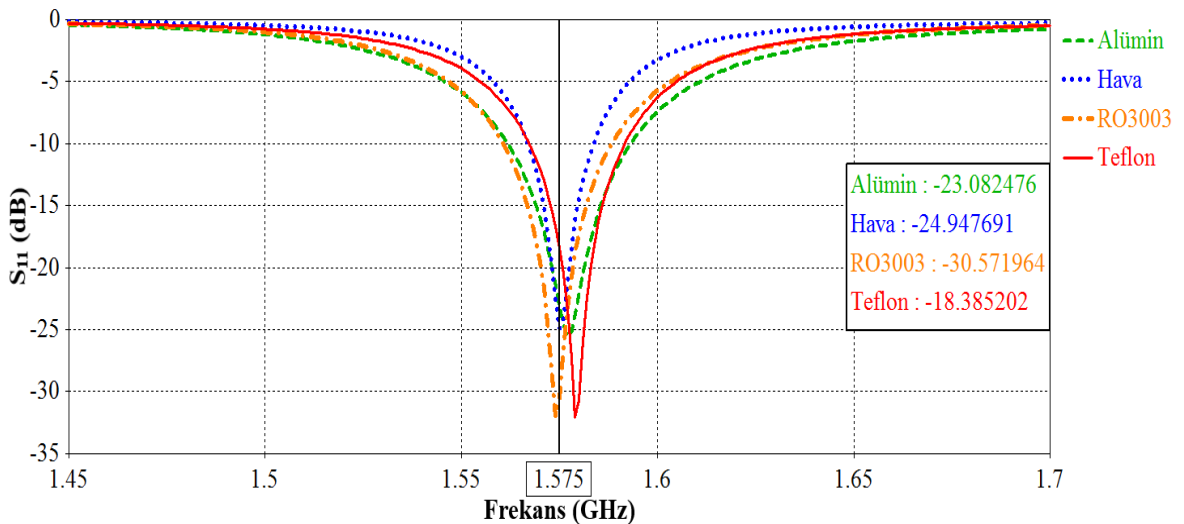


Şekil 3.6 İki farklı alttaş kullanılan anten tasarımı

Çizelge 3.4 Farklı alttaş malzemeler için anten boyutları ve bant genişliği

Malzeme	$\epsilon_{r2}$ (dielektrik katsayısı)	Lg, Wg, Ls, Ws (mm)	L, W (mm)	fy (mm)	Bant Genişliği	Bant Genişliği
Hava	1	80	71.8	9	16 MHz	% 1
Teflon	2.1	70	56.8	8.29	24 MHz	% 1.5
RO3003	3	70	52.25	7.89	28 MHz	% 1.8
Alümin	9.9	70	43.2	6.85	32 MHz	% 2

Çizelge 3.4'te bilgileri verilen 1575 MHz merkez frekansındaki GPS antenler için simülasyon sonuçları alınmış ve incelenmiştir. Alttaş kalınlığı 3.048 mm RO3003 kullanımı yerine; 1.524 mm RO3003 ve ikinci alttaş olarak 1.524 mm kalınlığa, RO3003 malzemesinden daha düşük dielektrik katsayısına sahip teflon ve hava alttaş olarak kullanıldığında anten boyutlarının arttığı ve bant genişliğinin azaldığı görülmüştür. RO3003 malzemesine göre dielektrik katsayısı oldukça büyük olan Alümin malzeme kullanılırsa anten yama boyutunun %17 azaldığı, bant genişliğinin %14 arttığı ve anten besleme noktasının anten kenarına y-ekseni doğrultusunda %20 yaklaştığı görülmüştür. Bu çalışmaya ait  $S_{11}$  değerlerini gösteren grafikler Şekil 3.7'te verilmiştir.

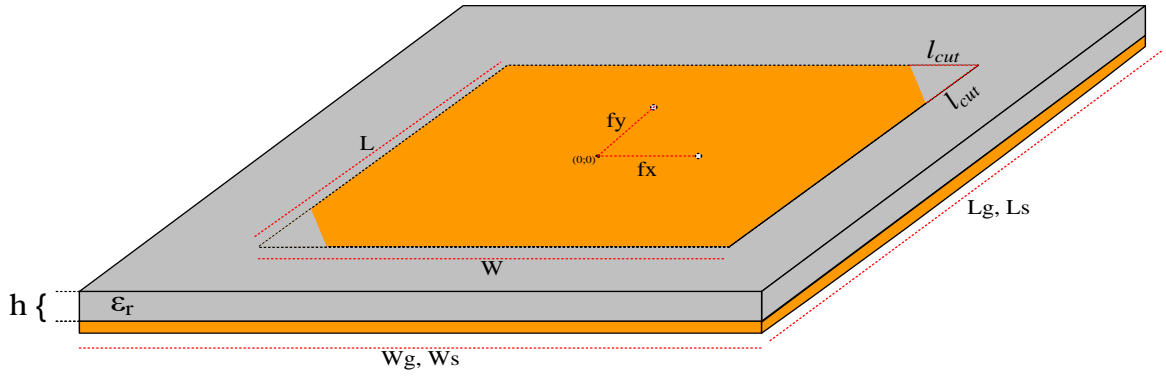


Burada yapılan çalışmalarda kare mikroşerit yama anten için bant genişliği artırma yöntemlerinden alttaş malzemenin kalınlığını artırma tekniği incelenmiştir. Tek tip alttaş kullanılan yama antenlerde bant genişliğini artırmak için malzemenin kalınlığını artırmanın etkisinin yüksek olduğu görülmüştür. Buna ek olarak toplam kalınlığı tek alttaş kullanılan anten ile aynı olacak şekilde, dielektrik katsayısı referans malzemedeki büyük olan ikinci alttaş kullanımında bant genişliğinin daha fazla olacağı görülmüştür. Anten alttaş malzemesinin kalınlaşması yama boyutunu bir miktar etkilese de farklı dielektrik katsayısına sahip ikinci alttaş kullanımının anten boyutlarını daha fazla etkilediği görülmüştür. Burada yapılan çalışmaların sonucunda edinilen bilgiler ışığında ve malzemenin dayanıklılığının daha iyi olmasının etkisiyle; üretimi yapılacak ve radomlu analizi yapılacak geniş bantlı antenlerde ikinci alttaş olarak teflon malzeme kullanılmıştır.

### **3.2 Dairesel Polarizasyona Sahip Geniş Bantlı Mikroşerit Yama GPS/GNSS Anten Tasarımı**

Bu bölümde, ilk bölümde doğrusal polarizasyona sahip tasarımı yapılan 1575 MHz merkez frekansında GPS anteni DP sahip olacak şekilde tasarlanmış ve simülasyonları yapılmıştır. SGEDP ve SLEDP sahip anten tasarımları yapılmış ve bunların aksel oranlarında okunan değerler karşılaştırılarak, nasıl yorumlanacağı anlatılmıştır. Bant genişliği dar olan DP sahip anten tasarımından sonra ilk bölümdeki teknik ile bant genişliği artırılmış DP sahip GPS antenleri için  $S_{11}$  grafikleri verilmiştir. Alttaş kalınlığı artırmanın boyut ve besleme noktasına olan etkisine ek olarak köşeden kesilecek miktar üzerindeki etkisi de gösterilmiştir. Son olarak GNSS bandını da kapsayan ve SGEDP sahip bir anten tasarımı sonuçları verilmiştir.

Anten polarizasyonunun dairesel olabilmesi için uygulanan yaygın tekniklerden biri olan köşelerden kesme yöntemi ile GPS anteni tasarlanmıştır. Anten besleme noktası y-ekseninde (0;  $f_y$ ) tercih edildiğinde SGEDP elde edildiği görülmüştür. Besleme noktası x-ekseninde ( $f_x$ ; 0) yerleştirildiğinde antenin SLEDP sahip olduğu görülmüştür. Antenlerin alttaş ve toprak boyutları 70 mm alınmıştır ve RO3003 seçilen alttaş kalınlığı 1.524 mm alınmıştır.



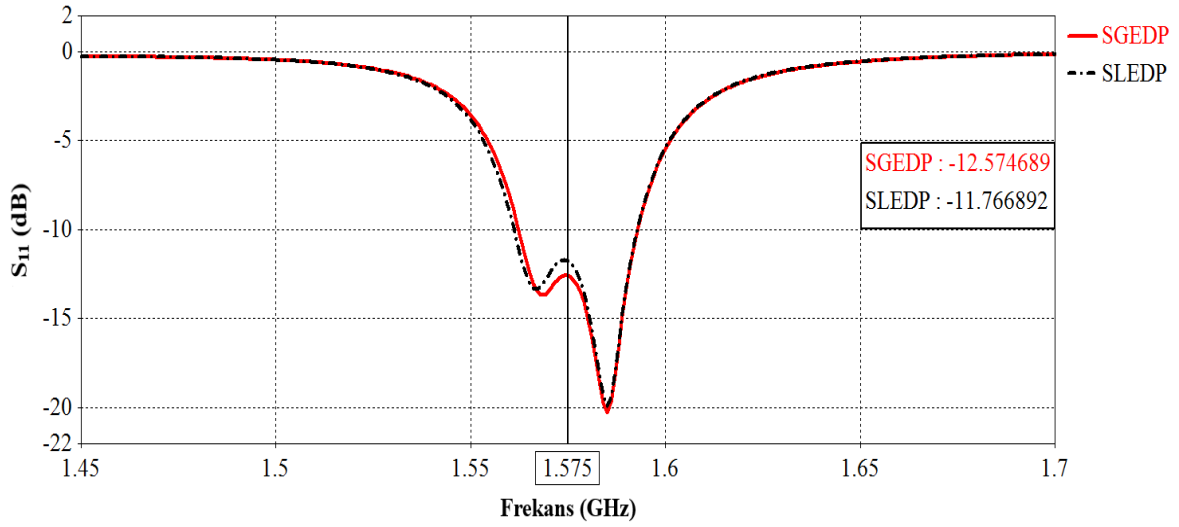
Şekil 3.8 Dairesel polarizasyona ait köşeleri kesilmiş GPS anteni tasarımı

Çizelge 3.5 Dairesel polarizasyona sahip GPS anteni yama boyutları

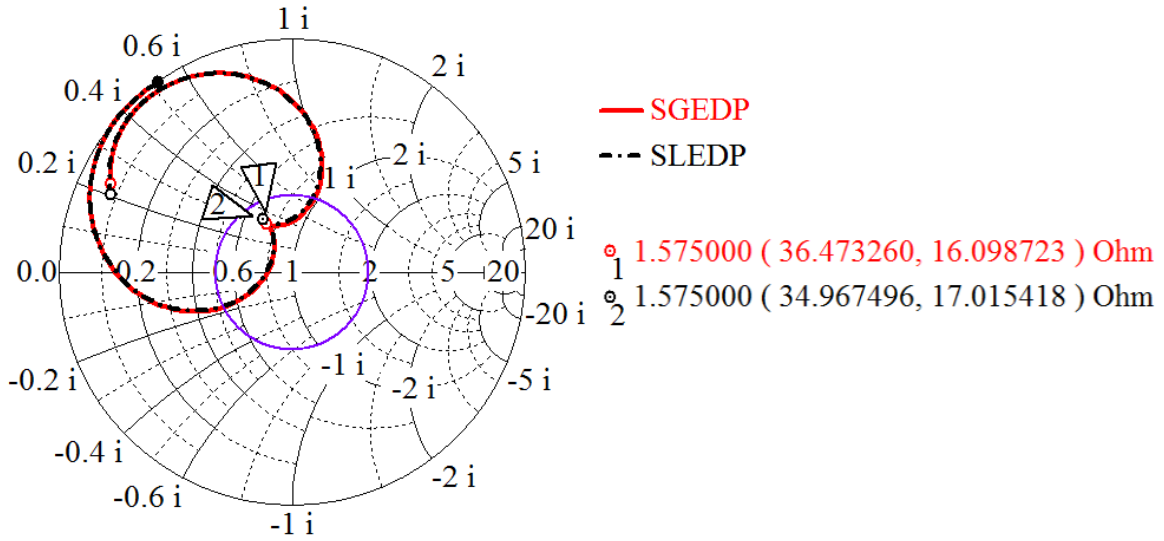
	<b>L, W</b>	<b>(fx; fy)</b>	<b>Kesim Miktarı (<math>l_{cut}</math>)</b>
<b>SGEDP Sahip Anten</b>	53.60 mm	(0; 9.2) mm	4.25 mm
<b>SLEDP Sahip Anten</b>	53.62 mm	(9.2; 0) mm	4.28 mm

Şekil 3.9’da L1 bant GPS merkez frekansında tasarımı yapılmış, SGEDP ve SLEDP sahip antenlere ait GDK grafikleri verilmiştir. Burada tasarımı gösterilen SGDEP sahip GPS anteni radomlu analizler için referans olarak kullanılmış ve gerekli düzenlemeler bu tasarım üzerinden yapılmıştır.

DP sahip antenlerin  $S_{11}$  grafiklerinde doğrusal polarizasyondan farklı olarak yerel maksima ya da ikinci bir rezonans frekansı diyebileceğimiz farklılık görülmektedir. Bu yerel maksimumun olduğu yerlerde dairesel polarizasyon merkez frekansı bulunmaktadır. Şekil 3.10’de verilen Smith Diyagramında mor renkli daire VSWR değeri 2 olan bölgeleri sınırlamaktadır ve bu daire içerisinde kalan kısımlarda anten VSWR değeri 2’den küçüktür ve tasarım hedefine uygundur. Ayrıca bu diyagramda düz bir daire yerine içeri doğru çentik oluştuğu görülmektedir. Doğrusal polarizasyondan farklı olarak bu çentiklerin oluştuğu frekansların  $S_{11}$  grafiğinde de yerel maksima noktaları olduğu ve DP sahip antenlerde olduğu görülmektedir.



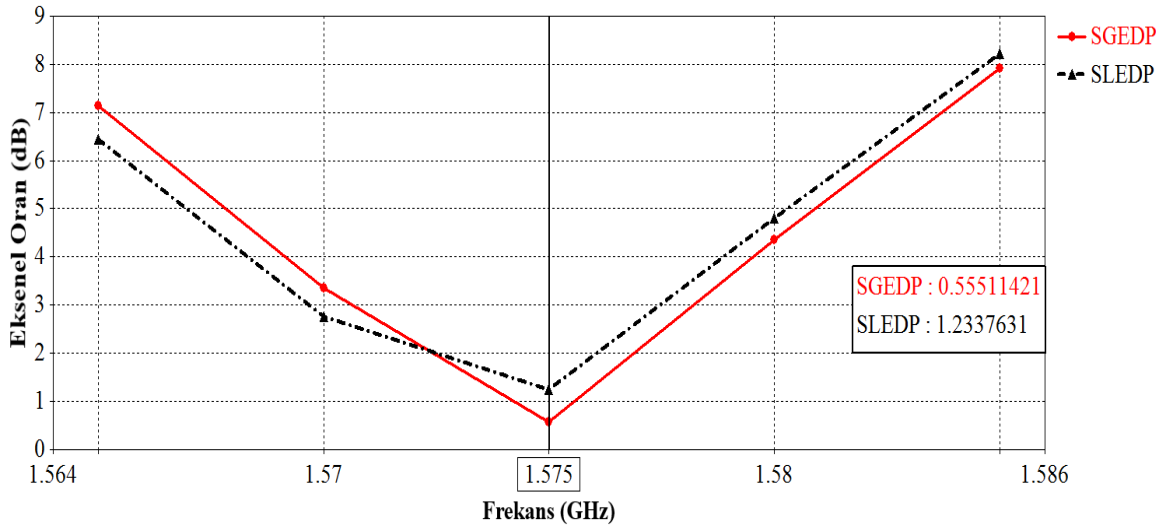
Şekil 3.9 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenleri  $S_{11}$  grafikleri



Şekil 3.10 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenleri Smith Chart gösterimleri

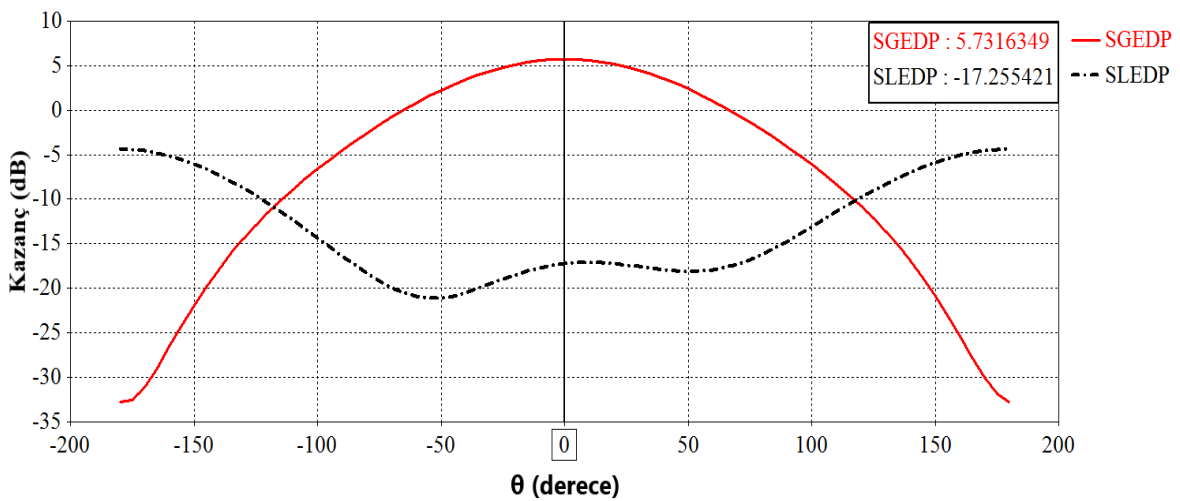
Şekil 3.10’de diyagramda bulunan çentik uçlarındaki frekans değerlerinin, SGEDP ve SLEDP sahip antenlerin aksel oran sonuçlarının yani DP değerlerinin en iyi olduğu noktalara denk geldiği görülmektedir. Şekil 3.11’de antenlerin frekansa göre EO sonuçları görülmektedir. Burada EO sonucunun istenen frekans olan 1575 MHz için 3 dB altında olması, antenin bu frekansta polarizasyon kaynaklı kayıplarının çok az olduğunu göstermektedir. 6 dB sınırı altında kalan frekanslarda polarizasyon kaynaklı kayıp olsa da alıcı konumundaki anten için o frekanslarda da yayın toplamasına imkan sağlayabilmektedir.





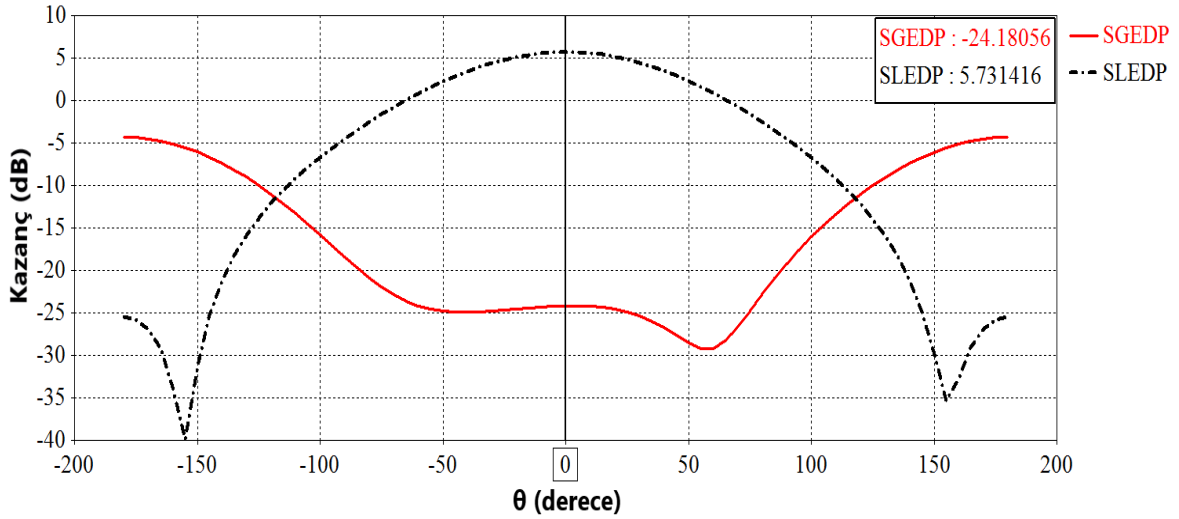
Şekil 3.11 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenlerinin frekansa göre eksenel oran grafikleri

Bir antenin SGEDP ya da SLEDP sahip olması, ilgili frekanslarda polarizasyon yönündeki kazanç değerlerinde görülen farklar ile ayırt edilebilmektedir. Antenin polarizasyon kazancı hesaplamalarında sahip olduğu yöndeki kazanç değeri daha yüksektir. Şekil 3.12’de SGEDP ve SLEDP antenleri için sağ yönlü polarizasyon kazançları gösterilmiştir. Antenlerin ışınım yönünde sağ el kazanç değerleri SGEDP sahip anten için maksimum 5.73 dB; SLEDP sahip anten için ise -17.25 dB olarak ölçülmüştür. SGEDP sahip antenin sağ yöndeki polarizasyon kazancı diğer antenin polarizasyon kazancından fazladır. SLEDP sahip alıcı anten için kazancın her açıda ekside olması, sağ yönlü polarizasyonda yayılan sinyallerin toplanmasında büyük kayıplar yaşayacağını göstermektedir.



Şekil 3.12 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenlerinin sağ yönlü polarizasyon kazançları

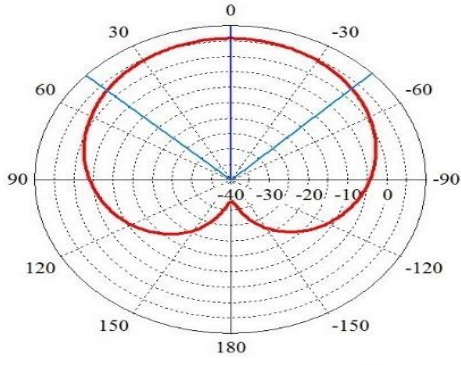
Şekil 3.13’da SGEDP ve SLEDP antenleri için sol yönlü polarizasyon kazançları gösterilmiştir. . Antenlerin ışınma yönünde sağ el kazanç değerleri SGEDP sahip anten için maksimum -24.18 dB; SLEDP sahip anten için ise 5.73 dB olarak ölçülmüştür SLEDP sahip antenin sol yöndeki polarizasyon kazancı diğer antenin polarizasyon kazancından fazladır. SGEDP sahip alıcı anten için kazancın her açıda eksiye olması, sol yönlü polarizasyonda yayılan sinyallerin toplanmasında büyük kayıplar yaşayacağını göstermektedir.



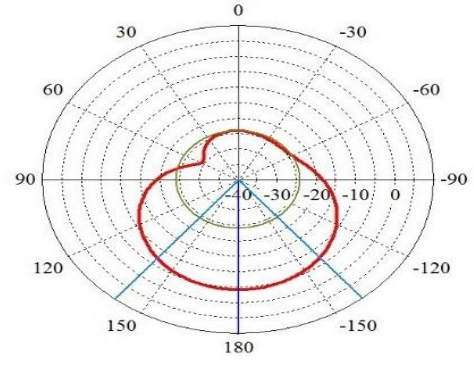
Şekil 3.13 SGEDP ve SLEDP sahip GPS antenlerinin sol yönlü polarizasyon kazançları

Şekil 3.14’te SGEDP sahip ve SLEDP sahip GPS antenlerine ait sağ ve sol el polarizasyon kazanç değerleri polar grafikler ile verilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi bir anten SGEDP sahip ise sağ yönlü kazanç değerleri, sol yönlü kazanç değerlerinden yüksektir. Sol yönlü kazanç değerinde yan hüzmeye seviyesi olarak çok büyük değerler görülmektedir. Bu duruma benzer şekilde SLEDP sahip antenler için de aynı tespit yapılabilmektedir.

SGEDP Sahip Antenin Sağ El Kazancı

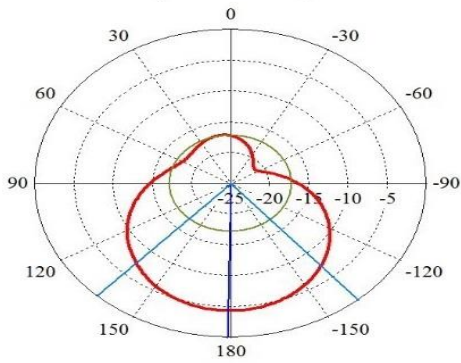


SGEDP Sahip Antenin Sol El Kazancı

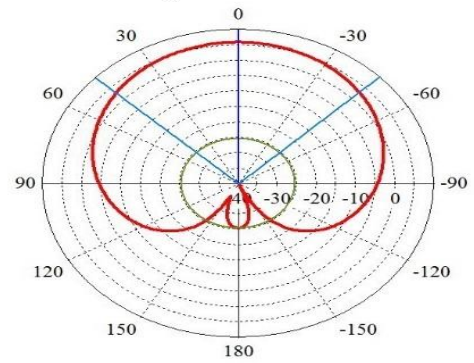


(a)

SLEDP Sahip Antenin Sağ El Kazancı



SLEDP Sahip Antenin Sol El Kazancı



(b)

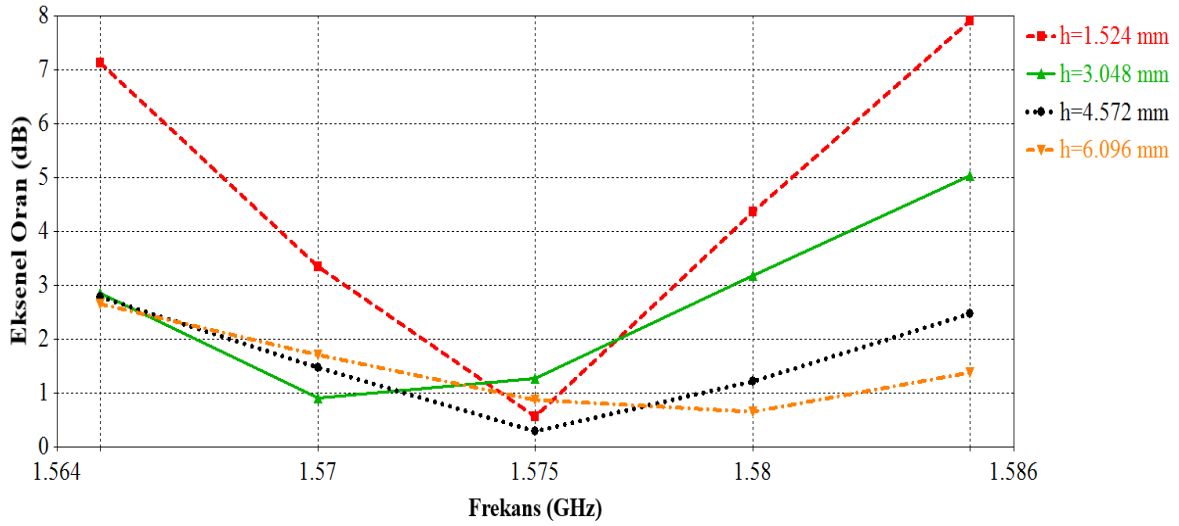
Şekil 3.14 Antenlerin polarizasyon kazancı polar grafikleri a) SGEDP sahip anten b) SLEDP sahip anten

DP sahip geniş bant genişliği olan anten elde etmek için bir önceki bölümde kullanılan kalın alttaş tekniği tercih edilmiştir. L1 bant GPS anteni tasarımında sırasıyla alttaş malzemesi olarak kullanılan RO3003 kalınlığı değiştirilmiş ve anten boyutları yeniden düzenlenerek 1575 MHz frekansta SGEDP sahip geniş bantlı anten tasarımları yapılmıştır.

Çizelge 3.6 Alttaş kalınlığına bağlı SGEDP sahip anten parametreleri ve bant genişlikleri

<b>h (mm)</b>	<b>L, W (mm)</b>	<b>(fx; fy) (mm)</b>	<b>Köşe Kesim Miktarı (mm)</b>
1.524	53.6	(0; 9.2)	4.25
3.048	52.2	(0; 9.7)	5.5
4.572	51.5	(0; 10)	7.5
6.096	50.6	(0; 12)	9

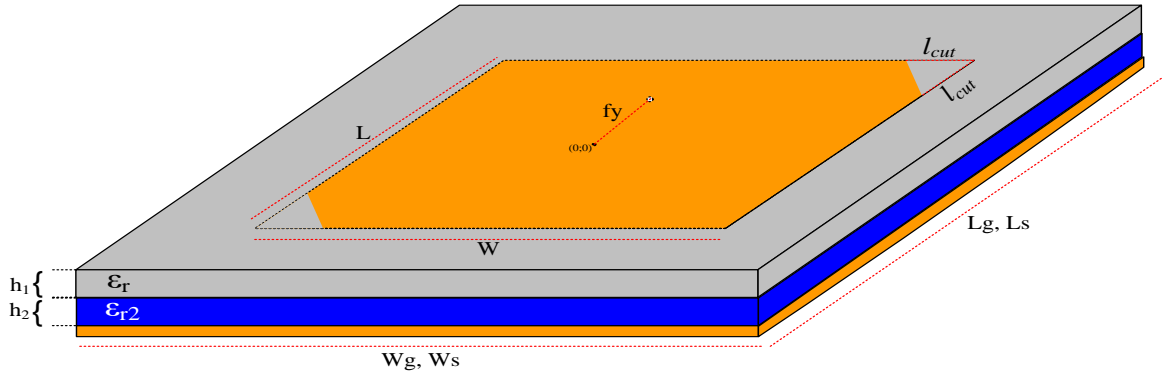
Alttaş kalınlığının artması sonrasında aynı merkez frekansına sahip anten elde etmek için anten boyutlarının kalınlık ile ters orantılı olarak küçülmesi gerektiğini önceki bölümde görmüştük. Burada da alttaş kalınlığı ile anten boyutu küçülüyor ve besleme noktası merkezden uzaklaşıyor. Bu bilgilere ek olarak dairesel polarizasyon elde etmek için kesilen köşe miktarını da alttaş kalınlığı ile birlikte arttırmak gerekiyor. Alttaş kalınlığı 4 katına çıkarıldığında kesim miktarı da yaklaşık 2 katına çıkmış görünmektedir.



Şekil 3.15 Alttaş kalınlığına bağlı SGEDP sahip GPS antenlerin eksenel oran grafikleri

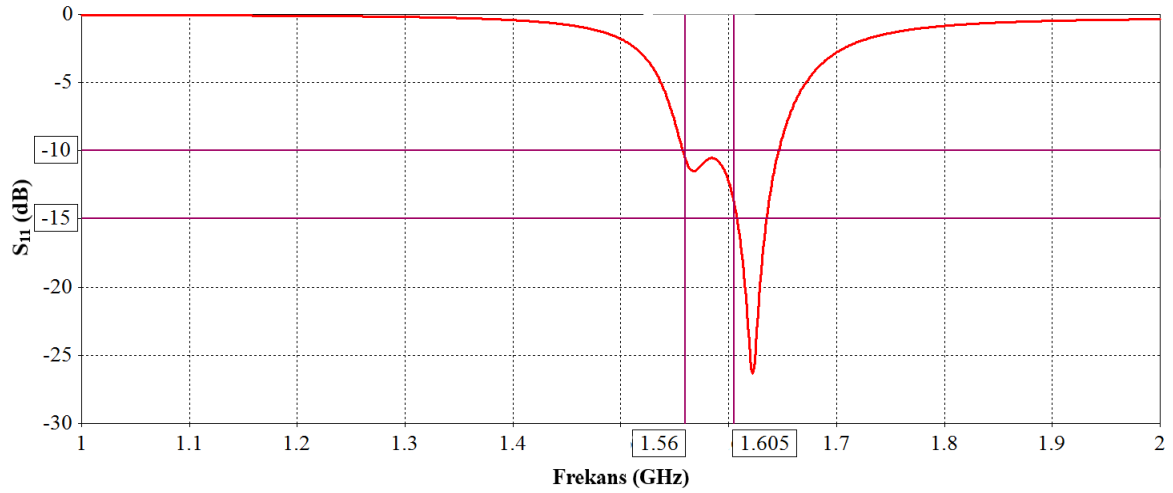
Bant genişliğini artırmak için kullanılan alttaş kalınlığını artırma tekniği ile DP elde etmek için kullanılan köşe kesme yöntemi birleştirilerek GNSS anteni tasarımı yapılmıştır. Bu bölümde GNSS anteni parametre bilgileri ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Burada tasarımı gösterilen GNSS anteni radomlu analizlerde referans olarak kullanılmış ve gerekli düzenlemeler bu anten üzerinden yapılmıştır.

SGEDP sahip GNSS anten tasarımında, 1.524 mm ( $h_1$ ) RO3003 alttaş malzemeye ek olarak, RO3003 ile toprak hattı arasında daha önce sonuçları incelenen ve dayanıklılığı sebebi ile tercih edilen teflon alttaş 4 mm ( $h_2$ ) kalınlıkta koyulmuştur. Anten yama boyutu  $L=57.35$  mm; besleme noktası y-ekseni boyunca merkezden  $f_y=10.5$  mm uzakta; köşe kesim miktarı  $l_{cut}=8.1$  mm olarak alınmış ve 70x70 mm boyutlarında toprak hat ve alttaş malzemeler ile tasarım yapılmıştır. Şekil 3.16'de anten parametreleri ve tasarım bilgileri görsel ile sunulmuştur.

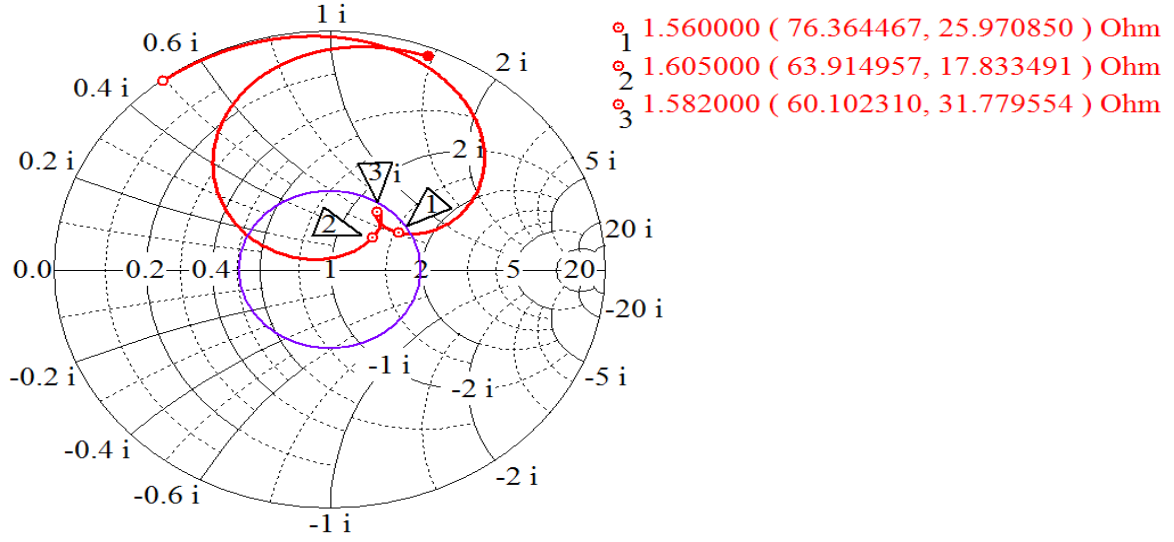


Şekil 3.16 SGEDP sahip GNSS anteni

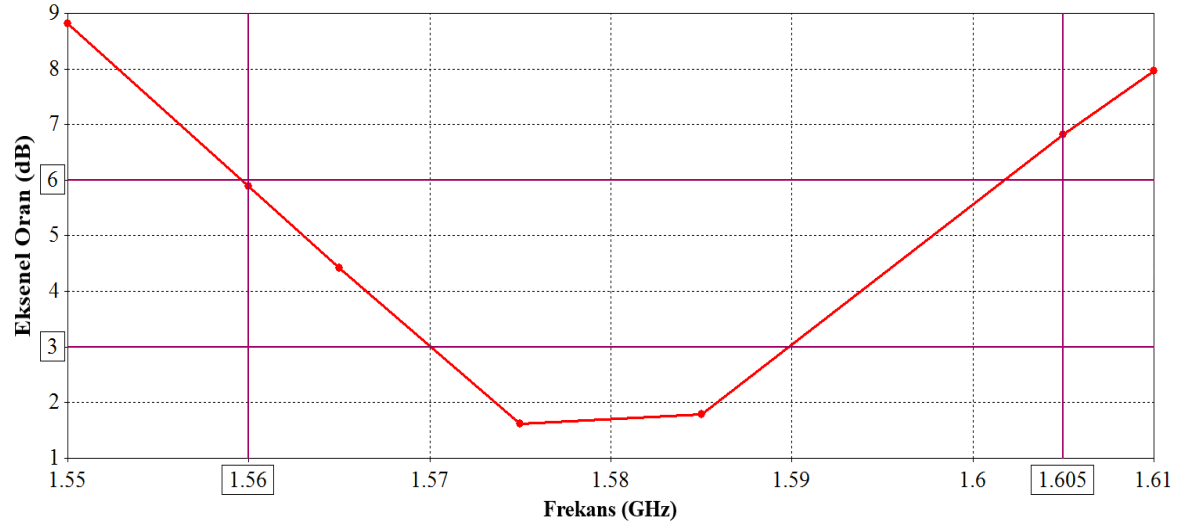
GNSS anteni için 1560 MHz – 1610 MHz frekans aralığında (-10 dB) GDK değerinden düşük bir sonuç hedeflenmiştir. Aynı zamanda 1560 MHz – 1602 MHz aralığında 6 dB eksenel oran; merkez olarak alınan 1570 MHz – 1590 MHz arasında 3 dB eksenel oran ölçüm sonuçlarına sahip olması istenmiştir. Simülasyon çıktısında bu değerlerin sağlandığı Şekil 3.17’de, Şekil 3.18’de ve Şekil 3.19’de görülmektedir.



Şekil 3.17 SGEDP sahip GNSS anteni S<sub>11</sub> grafiği



Şekil 3.18 SGEDP Sahip GNSS Anteni Smith Diyagramı



Şekil 3.19 SGEDP sahip GNSS anteni frekans vs. eksenel oran grafiği

## 4. RADOM İLE KAPLANMIŞ GPS/GNSS ANTENLERİNİN SİMÜLASYON BENZETİMLERİ

Bu bölümde antenlerin radom ile kaplanması sonucunda, anten sonuçlarında yaşanan değişimler anlatılmıştır. GPS anten tasarımı ve GNSS anten tasarımı için iki ayrı bölümde radom malzemenin dielektrik katsayısının değişmesi, radom ve yama arasındaki mesafenin değişmesi parametrik olarak incelenerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca radom ile kaplanmış antenlerden üretimi gerçekleştirilecek olan GPS ve GNSS antenleri belirlenmiş ve detaylı sonuçları verilmiştir. Tasarımlarda kullanılan ana radom malzemesi dielektrik katsayısı 2.1 olan teflon seçilmiştir. Radom malzemesinin değiştirildiği durumlarda karşılaştırmalar kuvars, porselen ve alümin malzemeleri ile yapılmıştır.

### 4.1 Radom ile Kaplanmış GPS Anteni Benzetimleri

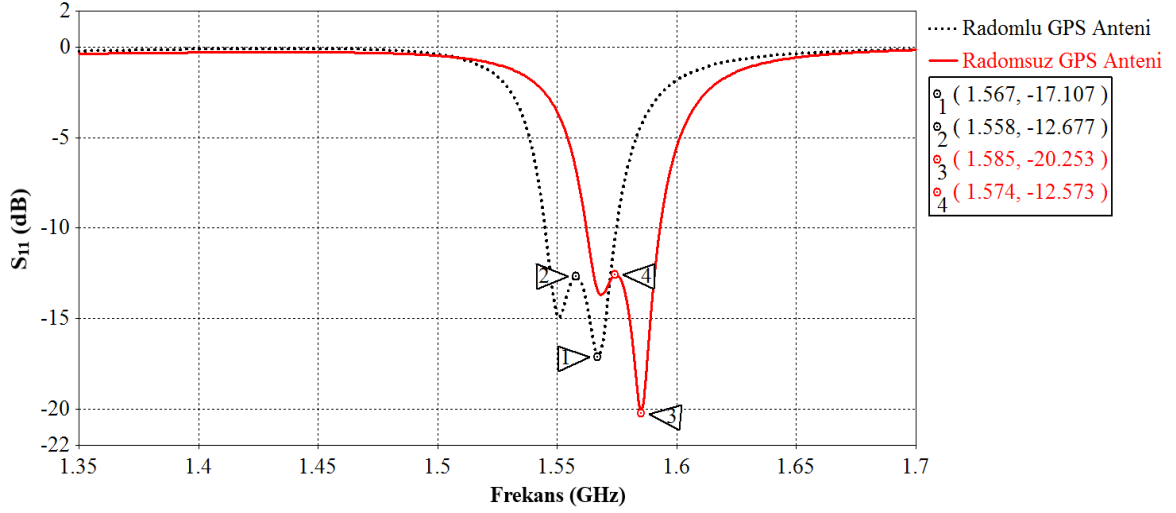
Bölüm 3.2’de SGEDP sahip GPS anten tasarımı verilmiştir. Bu anten referans alınarak radom malzeme ile kaplanmış ve anten parametrelerinde yaşanan değişimler incelenmiştir. Radom ve yama arasındaki mesafe parametrik olarak incelenmiş ve sonuçları verilmiştir. Son olarak radom malzemesi farklı dielektrik katsayısına sahip malzemeler ile değiştirildiğinde antende yaşanan değişimler incelenmiştir.

#### 4.1.1 Radomlu Düzenlenmemiş GPS Anteni

Bu bölümde daha önce tasarımı yapılmış SGEDP sahip GPS anteni hiçbir düzenleme yapılmadan teflon radom ile kaplanmış ve sonuçları incelenmiştir. GPS anteni eni ve boyu 53.6 mm; toprak hattı ve alttaş boyutları 70x70mm; RO3003 alttaş malzeme kalınlığı 1.524 mm; köşe kesim miktarı 4.25 mm ve besleme noktası y-ekseni boyunca merkezden uzaklığı 9.2 mm olan anten seçilmiştir.

Çizelge 4.1 Radom eklenmiş GPS anteni karşılaştırması

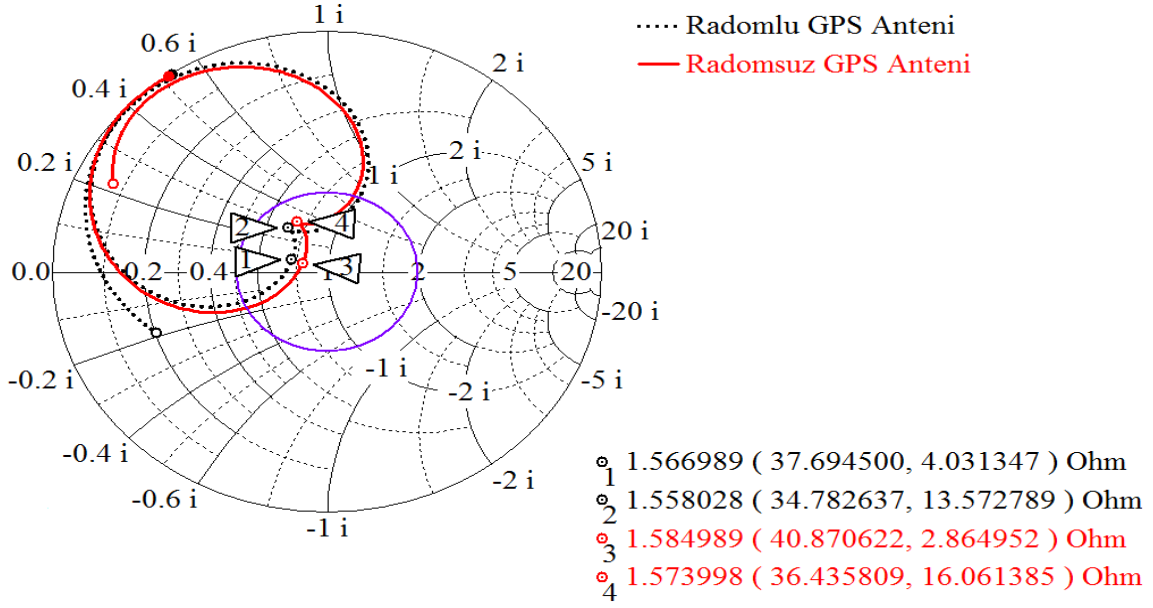
	GPS Anteni	Radomlu Düzenlenmemiş GPS Anteni
<b>Merkez Frekans Değeri</b>	1585 MHz	1567 MHz
<b>S<sub>11</sub> (1575 MHz)</b>	-12.57 dB	-9.6 dB
<b>Eksenel Oran (1575 MHz)</b>	0.55 dB	11.82 dB
<b>Dairesel Polarizasyon Merkez Frekansı</b>	1574 MHz	1558 MHz



Şekil 4.1 GPS anteni radomlu/radomsuz S<sub>11</sub> grafikleri

Çizelge 4.1’de ve Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bir anten radom ile kaplandığında rezonans frekansında ve GDK değerlerinde büyük değişimler yaşanmaktadır. Burada L1 bant GPS frekansı için tasarımı yapılmış bir anten teflon malzemeli radom ile kaplandığında hem rezonans frekansında hem de dairesel polarizasyon merkez frekansında kayma olduğu görülmektedir. Radom ile kaplandıktan sonra rezonans frekansı 18 MHz kaymıştır. 1575 MHz için tasarlanan ve radomsuz halinde S<sub>11</sub> değeri (-10 dB) altındayken ve bu frekansta SGEDP için gerekli eksenel oran değerine ulaşmışken; radom eklenmiş halinde iki özelliğini de istenen frekans değerleri için kaybetmiştir. Şekil 4.2’de Smith Diyagramında dairesel polarizasyona ait ikincil rezonans frekansını gösteren çentik oluşumunun kaydığı görülebilmektedir.





Şekil 4.2 GPS anteni radomlu/radomsuz Smith Diyagramı

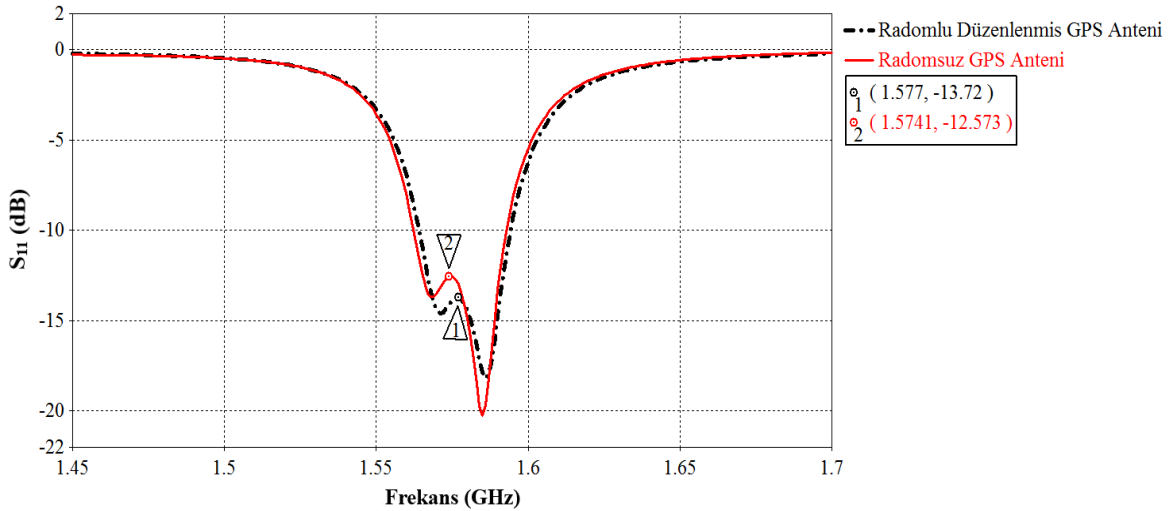
Bu bölümde yapılan analiz çalışmasına göre anten tasarımının radomsuz düşünülerek tasarlanması hatalara sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İstenilen frekanslarda radomlu anten tasarımı yapılabilmesi için iki yöntem karşımıza çıkmaktadır. Birinci yöntem öncelikle radomsuz düşünülerek antenin tasarlanması ve sonrasında radom ile kaplandığında yaşanan kaymalara göre yeniden düzenlenerek antenin son halini almasıdır. İkinci yöntem anten tasarımına radom malzeme içerisinde düşünülerek başlanmasıdır. Burada yapılan çalışmalarda bir antenin farklı dielektrik katsayılı malzemeler ile kaplanmasına bağlı olarak frekanslarda ne kadar kaymalar olacağı örneklenecektir.

#### 4.1.2 Radomlu Düzenlenmiş GPS Anteni

Bir önceki bölümde radom ile kaplanan antende yaşanan değişimlerin düzeltilerek, radomlu GPS anteni frekansına oturtmak için çalışma yapılmıştır. Burada son halini alan radom ile kaplanmış SGEDP sahip L1 bant GPS anteni üretilmiştir ve sonuçlar 5.1 numaralı başlıkta karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.2’de radom olmadan tasarımı yapılan GPS anteni boyutları ve sonuçları ile radom eklendiğinde yaşanan değişimlerden dolayı tekrar 1575 MHz baz alınarak yapılan tasarıma ait anten boyutları ve sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.2 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GPS anteni parametreleri

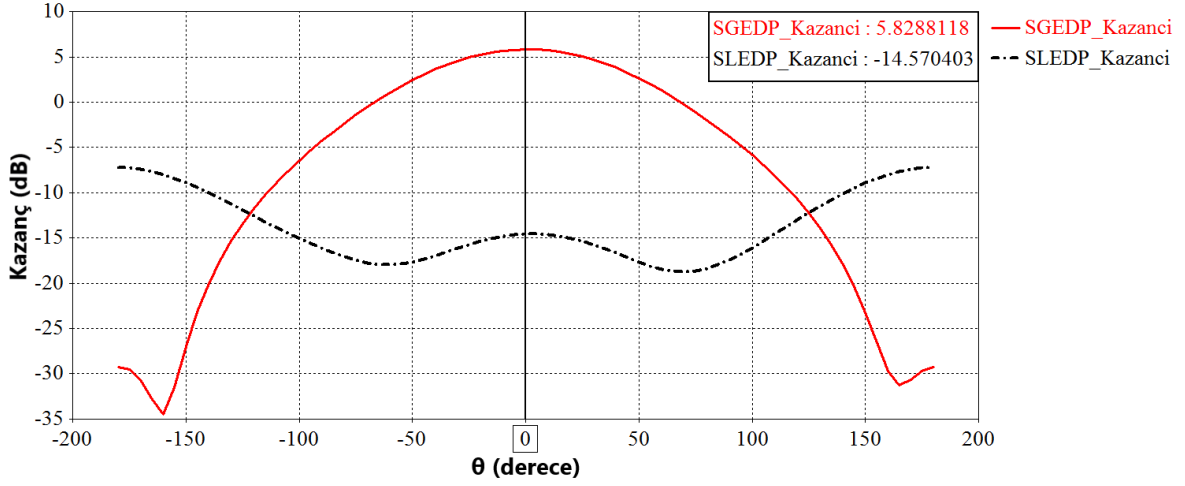
	<b>Radomsuz GPS Anteni</b>	<b>Radomlu Düzenlenmiş GPS Anteni</b>
<b>L, W</b>	53.6 mm	52.85 mm
<b>(fx; fy)</b>	(0; 9.2) mm	(0; 9.2) mm
<b>Köşe kesim miktarı</b>	4.25 mm	4.25 mm
<b>S<sub>11</sub> merkez frekans değeri</b>	1585 MHz	1586 MHz
<b>S<sub>11</sub> (1575 MHz)</b>	-12.57 dB	-13.88 dB
<b>Eksenel oran (1575 Mhz)</b>	0.56 dB	1.66 dB
<b>Dairesel polarizasyon merkez frekansı</b>	1574 MHz	1577 MHz
<b>Ana hüzmeye büyüklüğü</b>	5.74 dBi	5.87 dBi
<b>Ana hüzmeye yönü</b>	0 deg	1 deg
<b>3 dB açısız genişlik</b>	93.8 deg	95.3 deg
<b>Yan hüzmeye büyüklüğü</b>	-10 dB	-13.1 dB



Şekil 4.3 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GPS anteni S<sub>11</sub> grafikleri

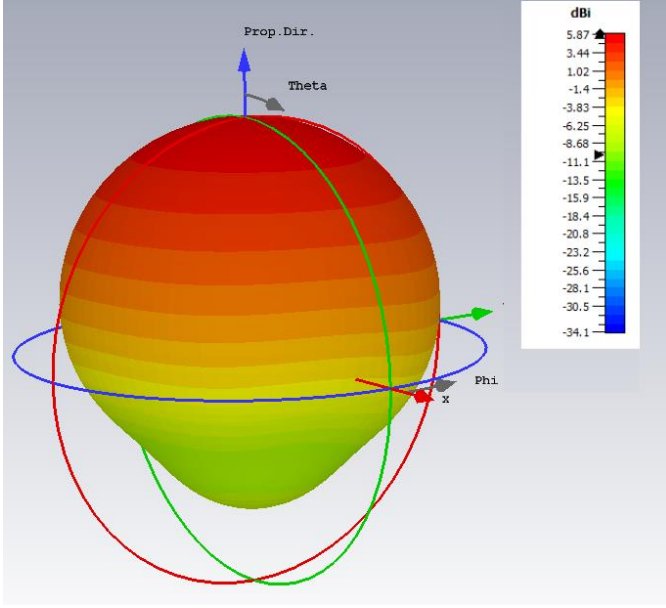
Radom ile kaplandıktan sonra düzenlenen GPS anteni istenilen frekans olan 1575 MHz'de tekrar (-10 dB)'den düşük GDK değerine sahip olmuştur. Ayrıca yama boyutunda yapılan değişikliklerle rezonans frekansı istenen değere geldiğinde, DP isteri de kesim miktarını değiştirmeye gerek kalmadan 1575 MHz'de SGEDP isterini karşılamaktadır. 1575 MHz EO

değeri 1.66 dB çıkmış ve üretimi yapılacak antenin SGEDP sahip olduğu, Şekil 4.4'te polarizasyon kazanç farklarından görülmektedir. İki polarizasyon arasında 20.4 dB gibi bir polarizasyon kazancı farkı sağlanmıştır. Böylece anten sağ yönlü polarizasyona sahip sinyalleri polarizasyon kaybı olmadan alabilecektir.



Şekil 4.4 Radomlu düzenlenmiş GPS anteni polarizasyon kazançları

Üretimi yapılacak antenin kazanç değerleri ve hüzme bilgileri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Radom ile kaplanmış antenin, radomsuz antene göre ışınma yönü ve büyüklüklerinde çok büyük farklar oluşmadığı görülmüştür. Radomlu üretilecek GPS antenine ait 3B kazanç çizimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Antenin maksimum kazanç değerinin 5.87 dBi olduğu görülmektedir.

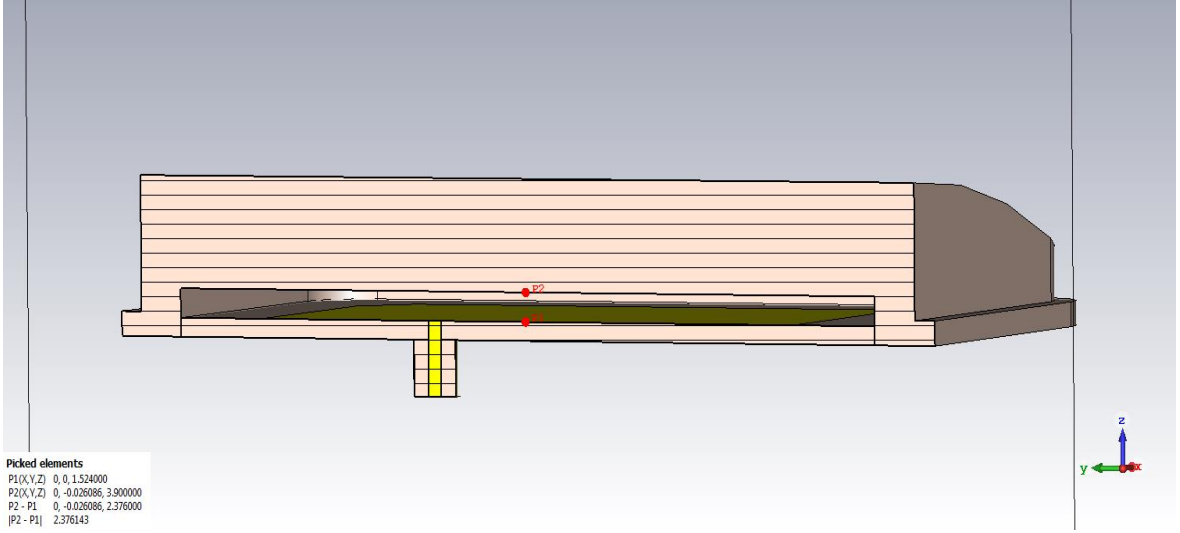


Şekil 4.5 Radomlu düzenlenmiş GPS anteni 3 boyutlu kazanç örüntüsü

#### 4.1.3 Radom ve GPS Anteni Yama Kısmı Arasındaki Mesafeye Bağlı Parametrik Analizler

Radomlu mikroşerit yama anten tasarımlarında, antenin yama kısmı ile radom malzeme arasındaki mesafe; antenin ışımasını ve rezonans frekanslarını etkilemektedir. Bu çalışmada radomsuz olarak tasarlanmış GPS anteni üzerine teflondan tasarlanan radom malzeme, radom ve yama arasındaki mesafe farklı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Üretilen antenlerde yama ve radom arasındaki mesafe minimum değer olan 0.37 mm olacağından bu mesafe referans olarak alınmıştır. Düzenleme yapılmadan, radomsuz düşünülerek tasarlanan GPS anteni seçilmesinin sebebi mevcut bir antende radomun yakınlık etkisinin ne kadar olacağını incelemek istenmesidir. Bu mesafe değişimine bağlı radom etkisi düşünülerek daha sonra radomlu anten tasarımı için antende düzenlemeler yapılmalıdır.

Şekil 4.6’da gösterildiği gibi P1 noktası yama üzerinde, P2 noktası radom malzemenin yama tarafındaki yüzeyindedir. P1 ve P2 arasındaki mesafe üretilen antenlerde 0.37 mm olarak tasarlanmıştır. Parametrik analizde 0.37 – 5.37 mm arasındaki mesafeler 1 mm arayla incelenmiştir.



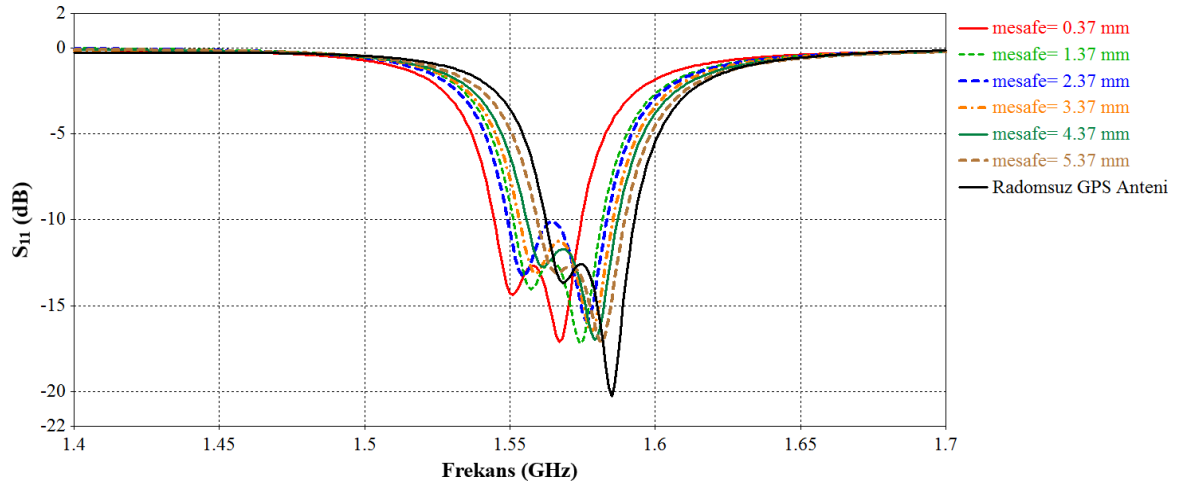
Şekil 4.6 Radom ve yama arasındaki mesafe şeması

Çizelge 4.3 Radom ve yama arasındaki mesafeye bağlı değişimler mesafeye bağlı, antende yaşanan rezonans frekansı kaymaları verilmiştir. Çizelgede ilk satırda verilen bilgiler radomsuz GPS antenine ait değerlerdir. Bu anten düzenlenmeden radom eklenmiş ve radom ile yama arasındaki mesafeye bağlı değişimler çizelgede verilmiştir. Buradan çıkan ilk sonuçta radom ile yama arasındaki mesafe ne kadar yakınsa, radomsuz antene göre frekansta yaşanan kayma o kadar fazladır. Yama ile radom yüzey arasındaki mesafe artırıldığında, anten radomsuz haline yakın bir performansa sahip olmaktadır.

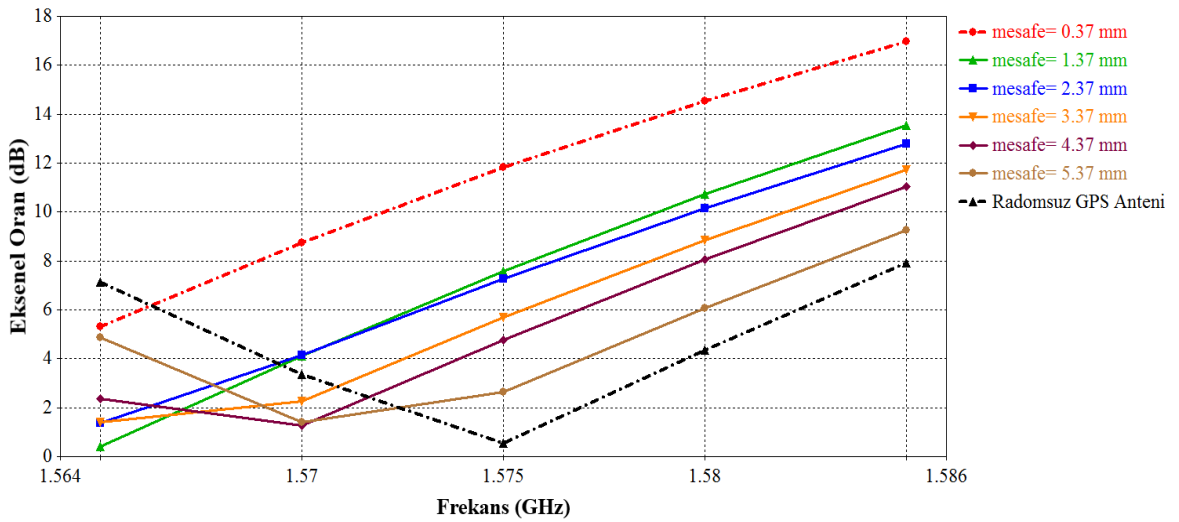
Çizelge 4.3 Radom ve yama arasındaki mesafeye bağlı değişimler

<b>Radom ve Yama Arasındaki Mesafe (mm)</b>	<b>Merkez Frekans (MHz)</b>	<b>Kazanç (@1575 MHz)</b>	<b>Eksenel Oran (@1575 MHz)</b>
-	1585	5.72	0.55
0.37	1567	4.49	11.83
1.37	1574	5.14	7.59
2.37	1577	5.19	7.26
3.37	1578	5.44	5.69
4.37	1579	5.55	4.78
5.37	1581	5.77	2.64

Radom ve yama arasındaki mesafe analizlerinde EO'daki değişim dikkat çekmektedir. Radom-yama arasındaki mesafe düşük olduğunda  $S_{11}$  sonuçlarında kaymanın fazla olduğu görölmektedir.  $S_{11}$  grafiğinde DP sahip antenlerde görölen yerel maksimumun mesafeye bağlı olarak büyüklüğünde değişkenlik görölmektedir. Frekans noktasının da kayması ile EO büyüklükleri yama ile radom arasındaki mesafe arttıkça antenin radomsuz performansına yaklaşmaktadır. Şekil 4.7'de ve Şekil 4.8'de radom ile yama arasındaki yüksekliğe bağlı oluşan  $S_{11}$  ve eksenel oran sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.7 Radom ile yama arasındaki yüksekliğe bağlı  $S_{11}$  grafikleri



Şekil 4.8 Radom ile yama arasındaki yüksekliğe bağlı eksenel oran değerleri

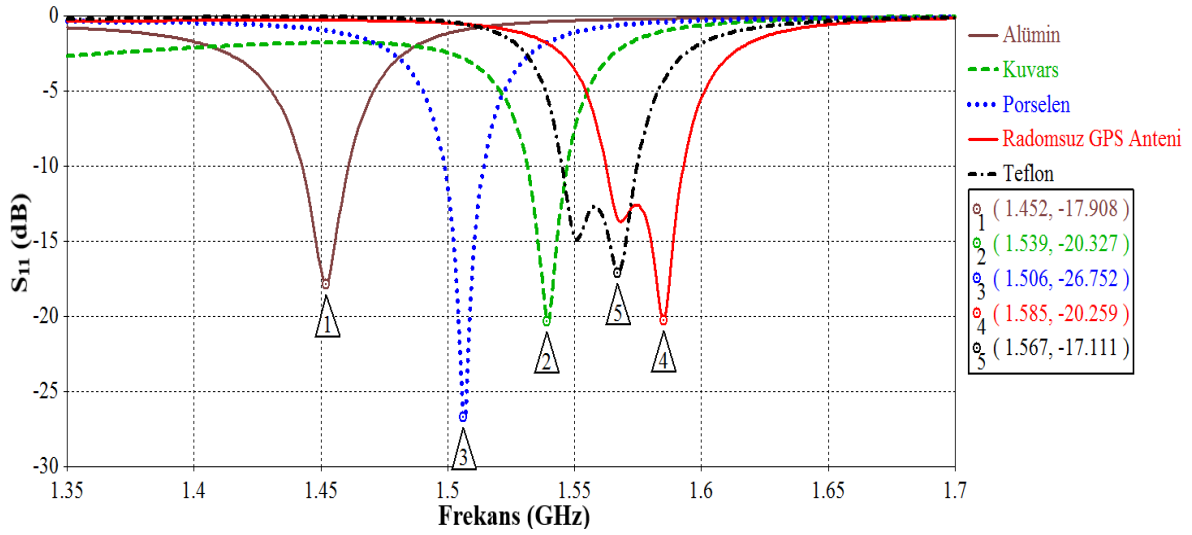
#### 4.1.4 Radom Malzemesinin Dielektrik Katsayısına Bağlı Parametrik Analizler

Radomsuz tasarlanan GPS anteni sırasıyla teflon, Kuvars, porselen ve Alümin malzemelerinden tasarlanan ve boyutları aynı olan radom malzemeler ile kaplanmıştır. İlk çalışmada radomsuz GPS anteninin, farklı dielektrik katsayısına sahip radom malzemelerine bağlı olarak anten performansındaki değişimleri incelenmiştir. Daha sonra her malzeme için radomlu olarak GPS antenleri düzenlenmiştir. Düzenlenen ve farklı malzemeler olan radom ile analizleri yapılmış; GDK ve eksenel oran sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Çizelge 4.4 Radom malzemesine bağlı GPS anteni değerleri

Radom Malzeme	Dielektrik Katsayısı	Merkez Frekansı
-	-	1585 MHz
Teflon (PTFE)	2.1	1567 MHz
Kuvars	3.75	1539 MHz
Porselen	6	1506 MHz
Alümin	9.9	1452 MHz

Çizelge 4.4'te ve Şekil 4.9'da radomsuz GPS anteninin, farklı dielektrik katsayıları olan malzemelerden üretilen radom tasarımları ile analiz sonuçları verilmiştir. Radomsuz GPS anteni dielektrik katsayısı 2.1 olan teflon malzemeli radom ile bir düzenleme yapılmadan analiz edildiğinde rezonans frekansı 1585 MHz'den 1567 MHz'e kaymış ve %1.1 değişmiştir. Aynı GPS anteni, dielektrik katsayısı 9.9 olan alümin malzemeli radom ile düzenleme yapılmadan analiz edildiğinde rezonans frekansı 1585 MHz'den 1452 MHz'e kaymış ve %8.4 oranında değişme görülmüştür. Daha önce radom yüzey ve yama arasındaki mesafenin parametrik incelemesinde anten rezonans frekansının kaydığı görülmüştü. Farklı dielektrik malzeme kullanılması bu frekans kaymasını daha çok etkilemiştir.



Şekil 4.9 Radom malzemesinin değişmesine bağlı S<sub>11</sub> grafikleri

Şekil 4.9’da radomsuz GPS antenin S<sub>11</sub> değerleri en sağda görülmektedir. Dielektrik katsayısı yüksek radom malzemesi tercih edildiğinde anten rezonans frekansı değiştiği görülürken; antenin DP özelliği de kaybolmaktadır. DP sahip yama antenlerde yerel maksima olarak görülen kıvrımlar, radom malzemesinin dielektrik katsayısı arttığında kaybolmaktadır. Antende yüksek dielektrik katsayısına bağlı polarizasyon uyumsuzlukları ve kayıpları artmakta; anten doğrusal polarizasyona sahip bir antene dönüşmektedir.

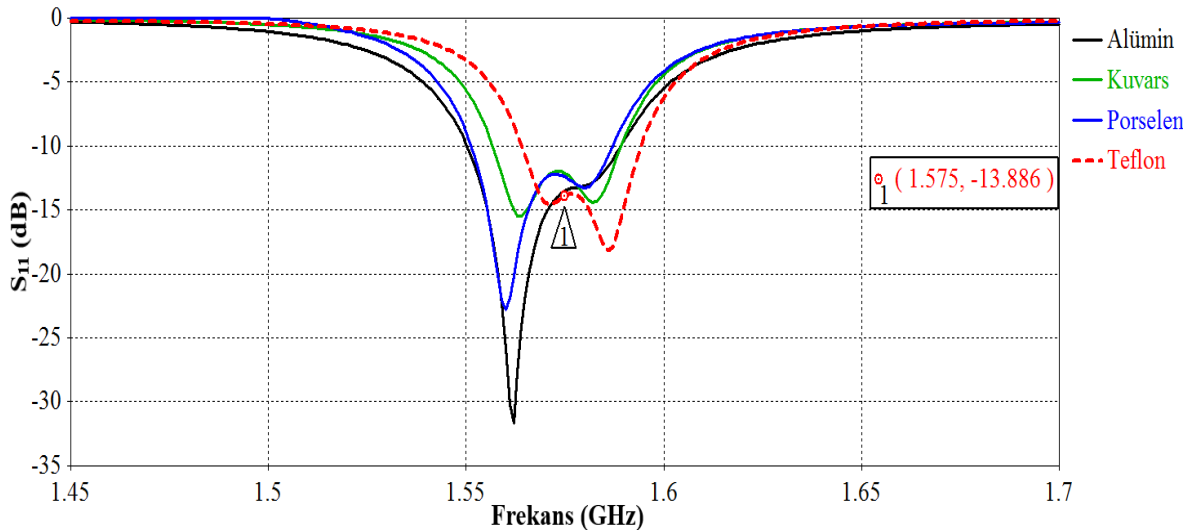
Farklı dielektrik katsayıları olan malzemeler ile tasarlanan radomlar için her anten düzenlenerek, SGEDP sahip GPS antenleri elde edilmiştir. Çizelge 4.5’te her bir antenin yeni boyutları verilmiştir. Yüksek dielektrik katsayılı malzeme radom olarak tercih edildikçe anten merkez frekansı daha fazla küçüldüğü için düzenlenen antenleri istenen frekansa getirmek için boyutlarının da daha küçük olması gerekmektedir. Köşe kesim miktarı, DP seviyesini ve EO sonucunu yükseltmek için artmaktadır.



Çizelge 4.5 Radom malzemesine bağlı düzenlenmiş GPS anteni parametreleri

Radom Malzemesi	Dielektrik Katsayısı	L, W (mm)	Köşe Kesim Miktarı (mm)	Besleme Noktası (fx; fy) (mm)
Teflon (PTFE)	2.1	52.85	4.25	(0; 9.2)
Kuvars	3.75	52.05	4.25	(0; 9.2)
Porselen	6	51.05	4.35	(0; 10)
Alümin	9.9	49.6	4.5	(0; 11.5)

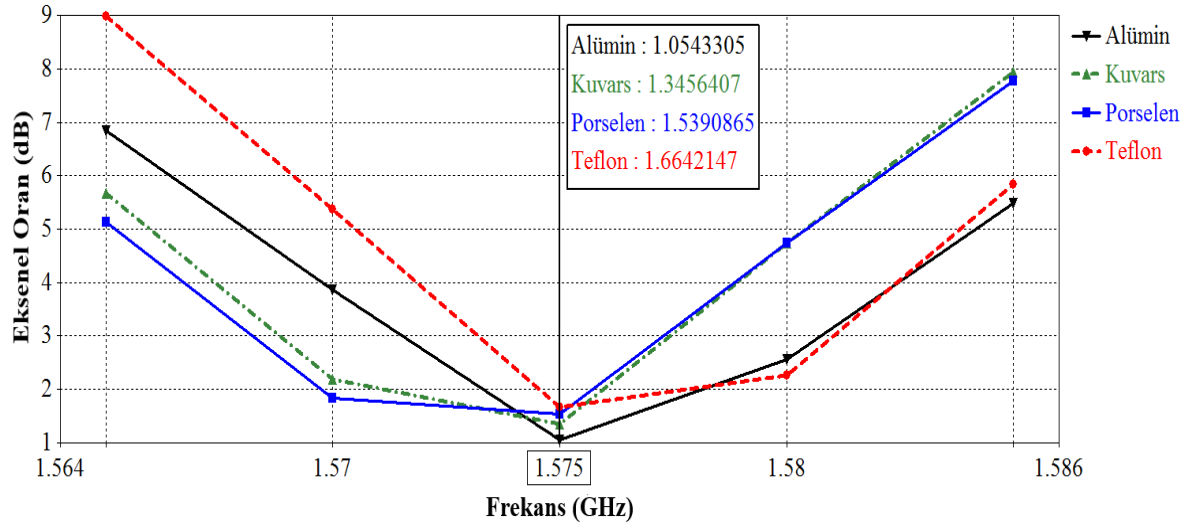
Şekil 4.10’da görüldüğü gibi düzenlenen antenlerde  $S_{11}$  değerleri 1575 MHz için istendiği gibi (-10 dB) altına düşürülmüştür. DP merkez frekansları yakın olan antenler için radom malzemesinin dielektrik katsayısı yüksek olanlarında bant genişlikleri de artmıştır.



Şekil 4.10 Radom malzemesine bağlı olarak düzenlenmiş GPS anteni  $S_{11}$  grafikleri

Şekil 4.11’de radom malzemesine bağlı olarak düzenlenmiş GPS antenlerine ait EO sonuçları verilmiştir. Antenin (-10 dB) bant genişliğinin yüksek dielektrik katsayılı malzeme kullanılan radom tasarımlarında arttığını Şekil 4.10’da görmüştük. EO grafiğinde 3 dB bant genişliğinin de radom malzemenin dielektrik katsayısı arttıkça genişlediğini görebiliyoruz. Alümin malzeme kullanılan radom ile analiz yapıldığında eksenel oran 3 dB bant genişliğinin 1571.5 MHz – 1580.8 MHz aralığında 9.3 MHz olduğunu; teflon malzeme kullanılan radom ile kaplandığında 1573.2 MHz – 1581 MHz aralığında 7.8 MHz olduğunu

görüyoruz. Dielektrik katsayısı yüksek olan alümin radom analizinde bant genişliği, teflon kullanılan radom analizine göre yaklaşık %19 daha fazla çıkmıştır.



Şekil 4.11 Radom malzemesine bağlı olarak düzenlenmiş GPS anteni eksenel oran değerleri

Radom malzeme ile kaplanan antenler için yapılan analizde rezonans frekansında kayıplar yaşanabileceği görülmüştür. Anten tasarımlarının radom malzemenin yama ile arasındaki mesafesine ve radom malzemenin dielektrik katsayısına bağlı olarak yapılması gerekmektedir.

## 4.2 Radom ile Kaplanmış GNSS Anteni Benzetimleri

Bölüm 3.2’de SGEDP sahip geniş bantlı GNSS anten tasarımı verilmiştir. Bu anten referans alınarak radom malzeme ile kaplanmış ve anten parametrelerinde yaşanan değişimler incelenmiştir. Radom ve yama arasındaki mesafe parametrik olarak incelenmiş ve sonuçları verilmiştir. Son olarak radom malzemesi farklı dielektrik katsayısına sahip malzemeler ile değiştirildiğinde antende yaşanan değişimler incelenmiştir.

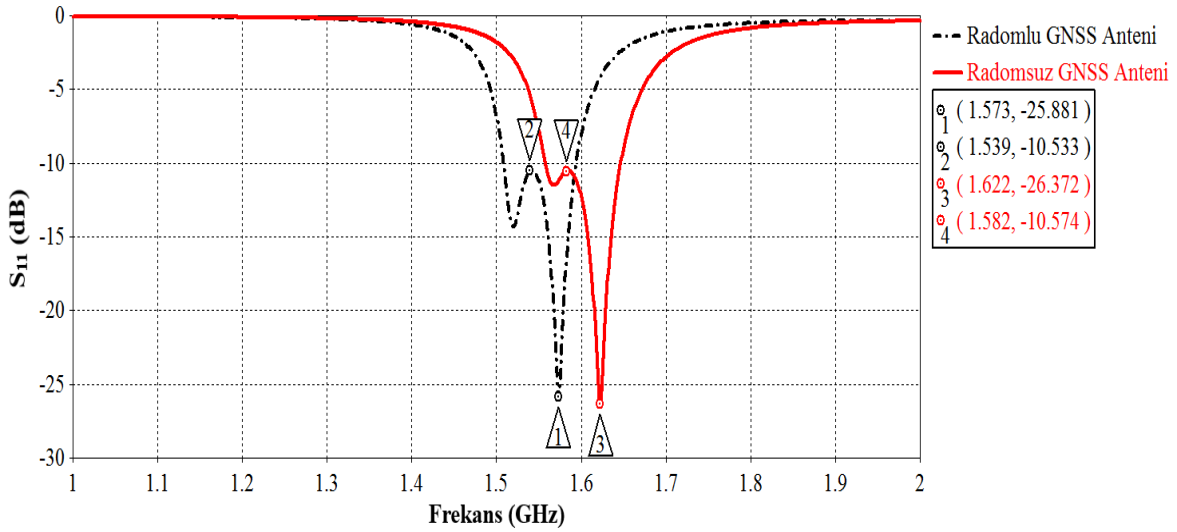
### 4.2.1 Radomlu Düzenlenmemiş GNSS Anteni

Bu bölümde daha önce tasarımı yapılmış SGEDP sahip geniş bantlı GNSS anteni hiçbir düzenleme yapılmadan teflon radom ile kaplanmış ve sonuçları incelenmiştir. Geniş bantlı elde etmek için daha önce analizi yapılan iki farklı alttaş malzemesi kullanılmıştır. GNSS anteni eni ve boyu 57.35 mm; toprak hattı ve alttaş boyutları 70x70mm; RO3003 alttaş malzeme kalınlığı 1.524 mm ve teflon alttaş malzeme kalınlığı 4 mm; köşe kesim miktarı

8.1 mm ve besleme noktası y-ekseni boyunca merkezden uzaklığı 10.5 mm olan anten seçilmiştir.

Çizelge 4.6 Radom eklenmiş GNSS anteni karşılaştırması

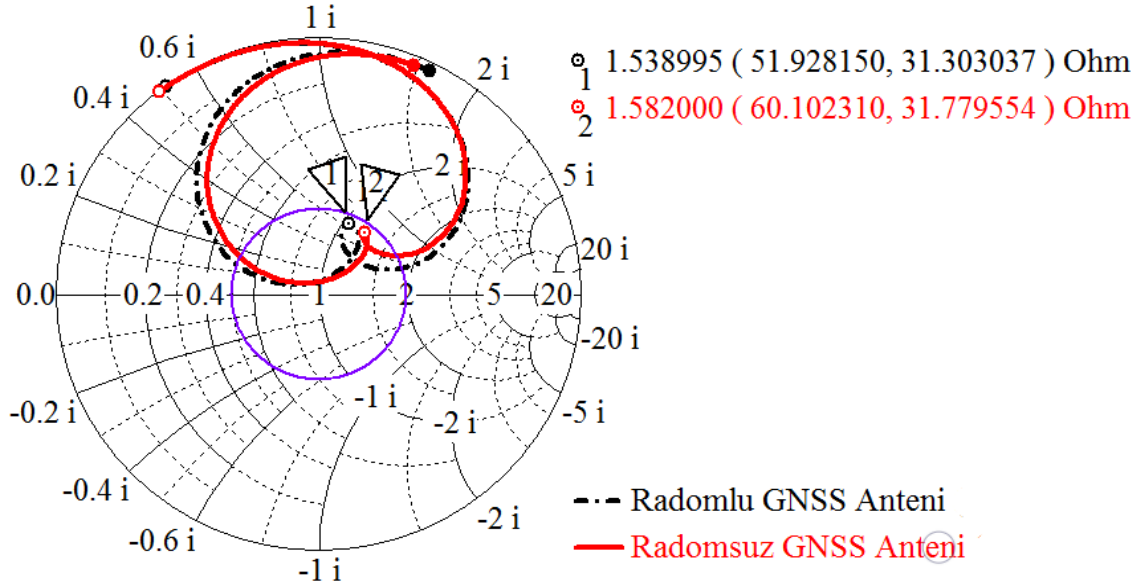
	GNSS Anteni (MHz)	Radomlu Düzenlenmemiş GNSS Anteni
<b>Merkez Frekans Değeri</b>	1622	1573 MHz
<b>S<sub>11</sub> -10 dB Frekans Bandı</b>	1557-1646	1508-1593 MHz
<b>Dairesel Polarizasyon Merkez Frekansı</b>	1582	1539 MHz



Şekil 4.12 GNSS anteni radomlu/radomsuz S<sub>11</sub> grafikleri

Çizelge 4.6’da ve Şekil 4.12’de görüldüğü gibi geniş bantlı anten radom ile kaplandığında rezonans frekansında ve GDK değerlerinde değişimler yaşanmıştır. Burada geniş bantlı GNSS frekansı için tasarımı yapılmış bir anten teflon malzemeli radom ile kaplandığında hem rezonans frekansında hem de DP frekansında kayma olduğu görülmektedir. Radom ile kaplandıktan sonra rezonans frekansı 49 MHz, yaklaşık olarak %3 kaymıştır. 1585 MHz merkez alınarak tasarlanan ve radomsuz halinde S<sub>11</sub> (-10 dB) frekans bandı 1557-1646 MHz aralığındayken ve 1582 MHz merkez frekansında SGEDP için gerekli eksenel oran değerine ulaşmışken; radom eklenmiş halinde (-10 dB) bant genişliği 1508-1593 MHz aralığına kaymıştır ve SGEDP merkezi 1539 MHz’e kaymıştır. Rezonans frekansında yaşanan

kaymaya benzer değişim dairesel polarizasyon frekansında da yaşanmıştır ve DP merkez frekansı radom etkisi ile %3 kaymıştır. Şekil 4.13’de Smith Diyagramında, DP ait çentik oluşumunun kaydığı görülebilmektedir.



Şekil 4.13 GNSS anteni radomlu/radomsuz Smith Diyagramı

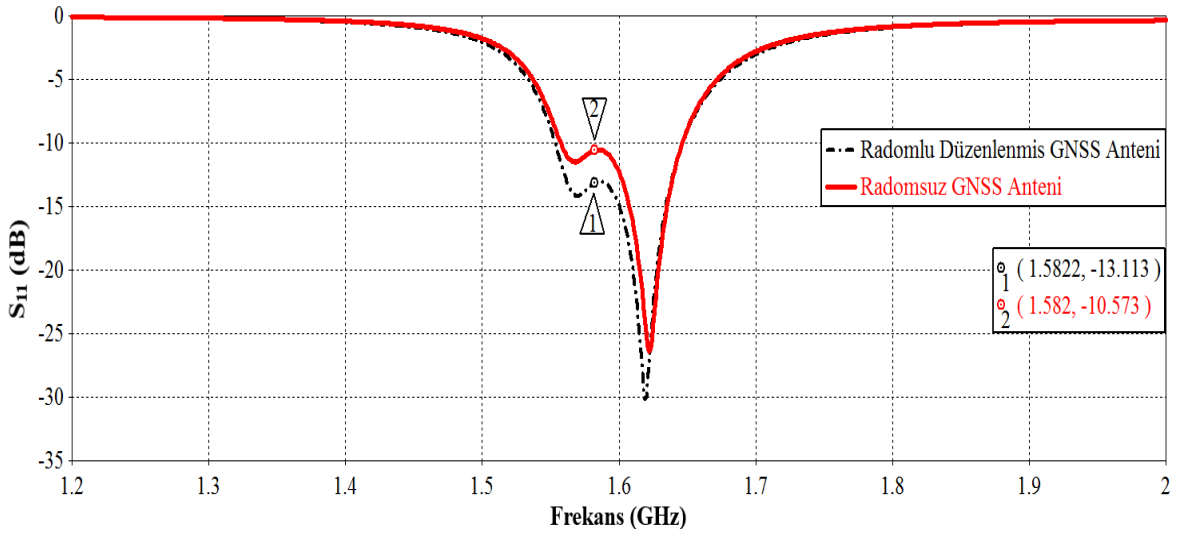
#### 4.2.2 Radomlu Düzenlenmiş GNSS Anteni

Bir önceki bölümde antende yaşanan rezonans frekansı kaymasını düzeltmek amaçlı, radomlu anten için düzenlemeler yapılmıştır ve anten yeniden GNSS frekans bandı aralığına getirilmiştir. Burada son halini alan, radom ile kaplanmış SGEDP sahip geniş bantlı GNSS yama anteni üretilmiştir ve sonuçlar 5.2 numaralı başlıkta karşılaştırılmıştır.

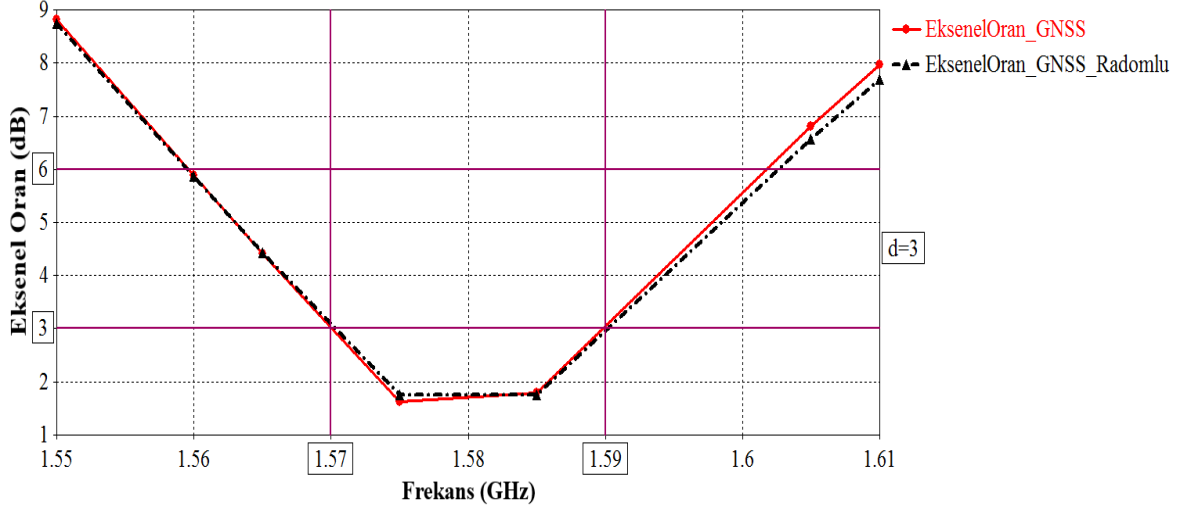
Çizelge 4.7’de ve Şekil 4.14’te teflon malzemeden tasarlanan radom ile kaplanmış GNSS anteninin düzenlenmiş ve radomsuz halinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Radomlu hali için GNSS anten tasarımında yama boyutu %3.7 küçülmüştür. Aynı zamanda SGEDP sahip olması için kesim miktarı da azaltılmıştır. Tasarım sonucunda radomlu geniş bantlı GNSS anten istenilen bant aralığında (-10 dB)’den daha düşük  $S_{11}$  değerini sağlamıştır. DP için planlanan merkez frekans olan 1582 MHz’de eksene oran sonucu istenen değerde bulunmuştur.

Çizelge 4.7 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GNSS anteni parametreleri

	<b>Radomsuz GNSS Anteni</b>	<b>Radomlu Düzenlenmiş GNSS Anteni</b>
<b>L, W</b>	57.35 mm	55.21 mm
<b>(fx; fy)</b>	(0; 10.5) mm	(0; 11.5) mm
<b>Köşe kesim miktarı</b>	8.1 mm	7.61 mm
<b>S<sub>11</sub> merkez frekans değeri</b>	1622 MHz	1619 MHz
<b>S<sub>11</sub> (-10 dB) frekans bandı</b>	1557-1646	1553-1646 MHz
<b>6 dB eksenel oran frekans bandı (MHz)</b>	1559-1602	1559-1603
<b>Dairesel polarizasyon merkez frekansı</b>	1582 MHz	1582 MHz
<b>Ana hüzmeye büyüklüğü (1585 MHz)</b>	6.67 dBi	6.86 dBi
<b>Ana hüzmeye yönü (1585 MHz)</b>	2 deg	2 deg
<b>3 dB açısız genişlik (1585 MHz)</b>	90.5 deg	90.8 deg
<b>Yan hüzmeye büyüklüğü (1585 MHz)</b>	-9.7 dB	-11.2 dB

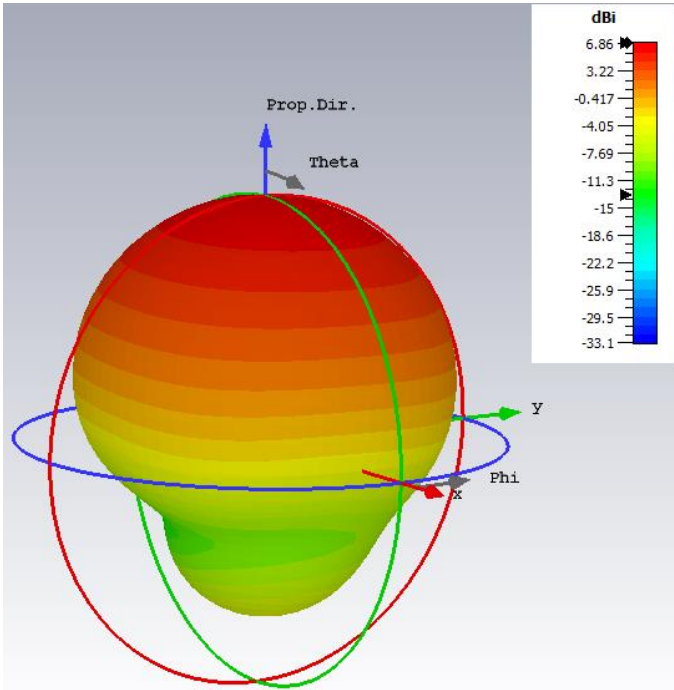


Şekil 4.14 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GNSS anteni S<sub>11</sub> grafikleri

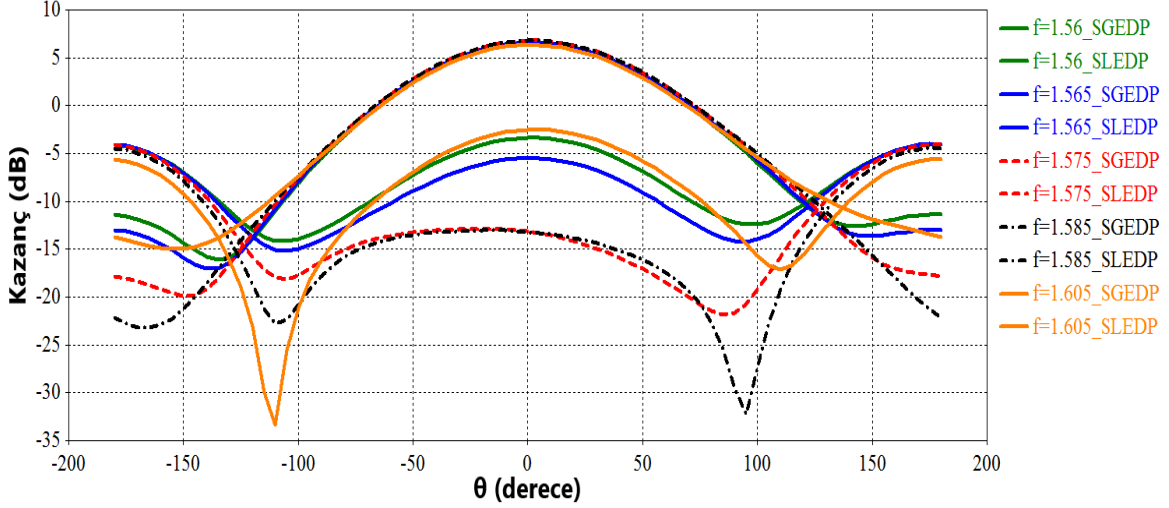


Şekil 4.15 Radomlu düzenlenmiş / radomsuz GNSS anteni eksenel oran grafikleri

Üretimi yapılacak antenin kazanç değerleri ve hüzme bilgileri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Radom ile kaplanmış antenin, radomsuz antene göre ışınım yönü ve büyüklüklerinde çok büyük farklar oluşmadığı görülmüştür. Radomlu üretilecek GNSS antenine ait 3B kazanç örüntüsü Şekil 4.16’da verilmiştir. Antenin maksimum kazanç değerinin 6.86 dBi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.16 Radomlu düzenlenmiş GNSS anteni 3 boyutlu kazanç örüntüsü



Şekil 4.17 Radomlu düzenlenmiş GNSS anteni polarizasyon kazanç grafikleri

Geniş bantlı GNSS anteni polarizasyon kazanç değerleri Şekil 4.17’de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi 1560 MHz – 1605 MHz aralığında SGEDP kazanç değerleri, SLEDP kazanç değerlerinden yüksektir. Bandın uç frekanslarında aralarındaki fark 10 dB olarak görülmüştür. 1585 MHz merkezli antende geniş bant aralığında DP sağlanmıştır. Radom ile kaplanmış geniş bantlı GNSS anteni  $S_{11}$  değerleri, EO sonuçları, kazanç değerleri ve polarizasyon kazanç sonuçları ile istenen değerleri sağlamıştır.

#### 4.2.3 Radom ve GNSS Anteni Yama Kısmı Arasındaki Mesafeye Bağlı Parametrik Analizler

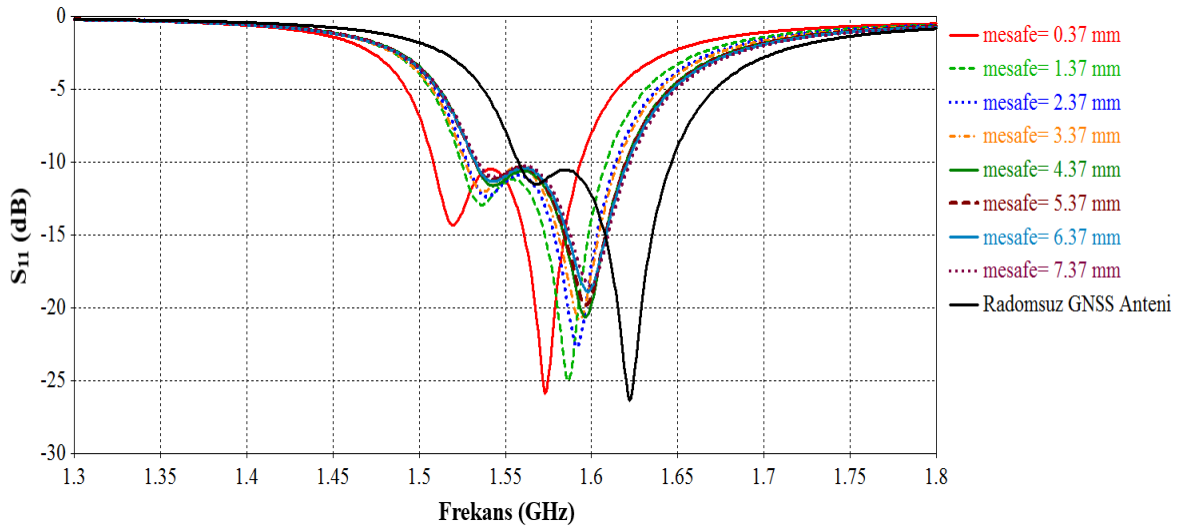
Bu çalışmada radomsuz olarak tasarlanmış GNSS anteni üzerine teflondan tasarlanan radom malzeme; radom ve yama arasındaki mesafe farklı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Üretilen antenlerde yama ve radom arasındaki mesafe minimum değer olan 0.37 mm olacağından bu mesafe referans olarak alınmıştır. Şekil 4.6’da gösterildiği gibi P1 noktası yama üzerinde, P2 noktası radom malzemenin yama tarafındaki yüzeyindedir. P1 ve P2 arasındaki mesafe üretilen antenlerde 0.37 mm olarak tasarlanmıştır. Parametrik analizde 0.37 – 7.37 mm arasındaki mesafeler 1 mm arayla incelenmiştir.

Çizelge 4.8 Radom ve yama arasındaki mesafeye bağlı değişimler

<b>Radom ve Yama Arasındaki Mesafe (mm)</b>	<b>Merkez Frekans</b>	<b>Kazanç (1575 MHz)</b>	<b>Eksenel Oran (1575 MHz)</b>
Radomsuz	1622 MHz	6.5 dBi	1.7 dB
0.37	1573 MHz	5.49 dBi	12.65 dB
1.37	1586 MHz	5.93 dBi	9.57 dB
2.37	1592 MHz	6.07 dBi	8.48 dB
3.37	1593 MHz	6.1 dBi	8.36 dB
4.37	1597 MHz	6.22 dBi	7.47 dB
5.37	1597 MHz	6.2 dBi	7.45 dB
6.37	1598 MHz	6.23 dBi	7.15 dB
7.37	1599 MHz	6.26 dBi	6.91 dB

GNSS anteni yama yüzeyi ile radom yüzeyi arasındaki mesafe arttığında anten rezonans frekansındaki kaymalar azalmaktadır. Radomun yakın olması ışın yaparken yansıyan dalgaların ve engellenen dalgaların etkisini artırmaktadır. 2-3 mm açıklıktan sonra radomun frekans kaydırma etkisi azalmakta ve radomlu hali için anten rezonans frekansa oturmaktadır. DP olan etkisi de yine mesafe artırıldıkça azalmıştır. Anten radomsuz haline yakınlaşan bir performansa sahip olmaya başlamaktadır. Antenin radomlu performansının, radomsuz ile aynı olması için boyut ile ilgili düzenlemeler yapmak gerekmektedir. Yama ile radom arasındaki mesafe ne kadar küçükse, antendeki düzenlemenin son halinde boyut da o kadar küçük olacaktır. Radom mesafesi, düzenlenecek antenlerin son halinde yama boyutunu, kesim miktarını ve besleme noktasının yerini belirleyecektir. Şekil 4.18’de radom mesafesine bağlı olarak GNSS antenlerinin  $S_{11}$  değerleri verilmiştir.





Şekil 4.18 Radom ile yama arasındaki yüksekliğe bağlı  $S_{11}$  grafikleri

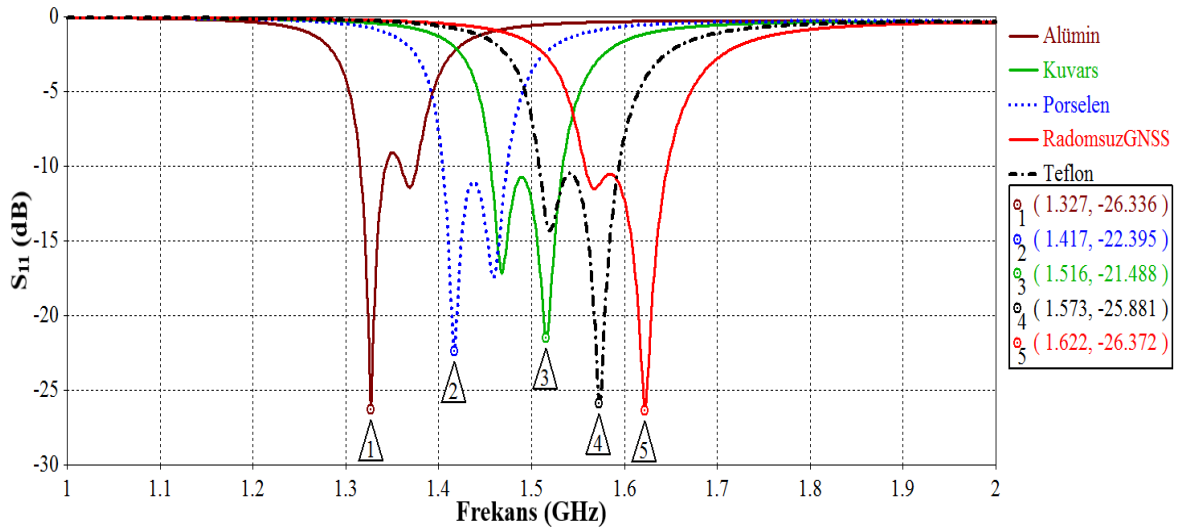
#### 4.2.4 Radom Malzemesinin Dielektrik Katsayısına Bağlı Parametrik Analizler

Radomsuz tasarlanan GNSS anteni sırasıyla teflon, kuvars, porselen ve alümin malzemelerinden tasarlanan ve boyutları aynı olan radom malzemeler ile kaplanmıştır. İlk çalışmada radomsuz GNSS antenin, farklı dielektrik katsayısına sahip radom malzemelerine bağlı olarak anten performansındaki değişimleri incelenmiştir. Daha sonra her malzeme için radomlu olarak GNSS antenleri düzenlenmiştir. Düzenlenen ve farklı malzemeler olan radom ile analizleri yapılmış;  $S_{11}$  ve eksenel oran sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Çizelge 4.9 Radom malzemesine bağlı GNSS anteni değerleri

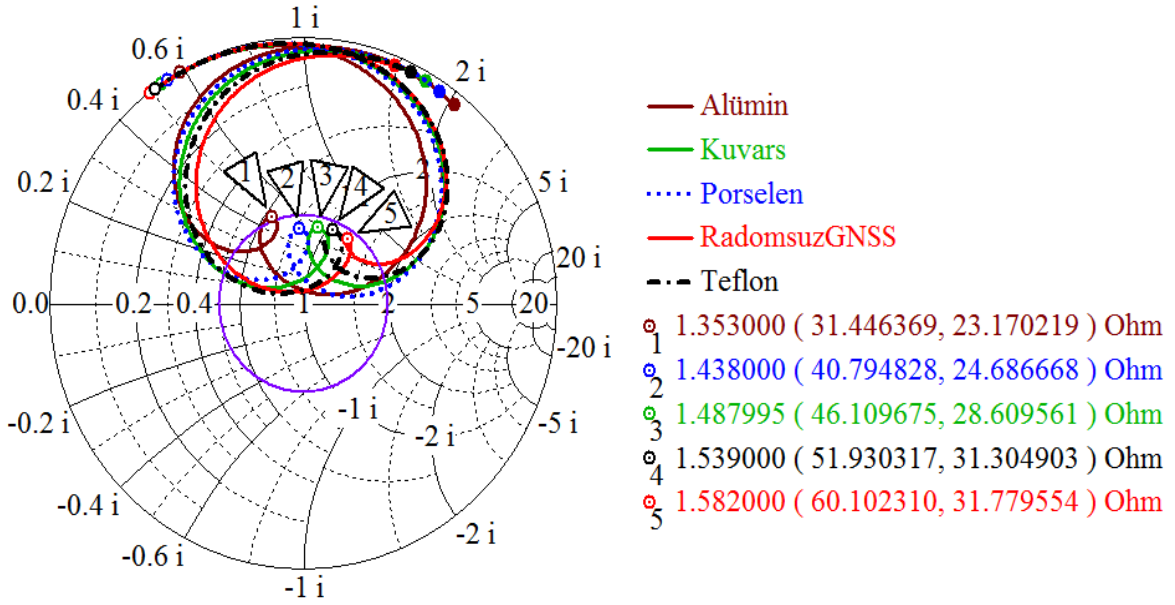
Radom Malzeme	Dielektrik Katsayısı	$S_{11}$ Merkez Frekans	Dairesel Polarizasyon Merkez Frekans
Radomsuz	-	1622 MHz	1582 MHz
Teflon (PTFE)	2.1	1573 MHz	1539 MHz
Kuvars	3.75	1516 MHz	1488 MHz
Porselen	6	1417 MHz	1438 MHz
Alümin	9.9	1327 MHz	1354 MHz

Radomsuz olacak şekilde tasarlanan GNSS anteni bilgileri Çizelge 4.9'da ilk satırda verilmiştir. Bu anten üzerine yama boyutlarında değişiklik yapılmadan teflon, kuvars, porselen ve alümin malzemeden tasarlanan ve boyutları aynı olan radomlar kaplanarak analiz yapılmıştır. Bu analiz sonucunda dielektrik katsayısı en yüksek değer olan alümin malzemeli radom ile kaplanan antenin rezonans frekansı, radomsuz antenin rezonans frekans değerine göre %18.2 oranında kayma göstermiştir. Bölüm 4.1.4'de GPS anteni ile yapılan benzer çalışmada kayma oranı %8.4 olduğu halde geniş bantlı GNSS anten tasarımı için bu kayma değeri daha fazla çıkmıştır. Geniş bantlı GNSS antenin tasarımında toplamda daha kalın bir alttaş kullanıldığı için kaymaların daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Radom malzemeye bağlı olarak alümin ile yapılan analizde polarizasyon merkez frekansı da %14.4 oranında kaymıştır.



Şekil 4.19 Radom malzemesine bağlı GNSS anteni S<sub>11</sub> grafikleri

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 dielektrik katsayısı farklı malzemelerden radom ile kaplanmış GNSS antenlerine ait GDK ve Smith Diyagramı grafiklerini göstermektedir. Rezonans frekansındaki kaymalar, düzenlenecek antenlerin yama boyutlarının GPS anten düzenlemelerine göre daha küçük olacağını göstermektedir.



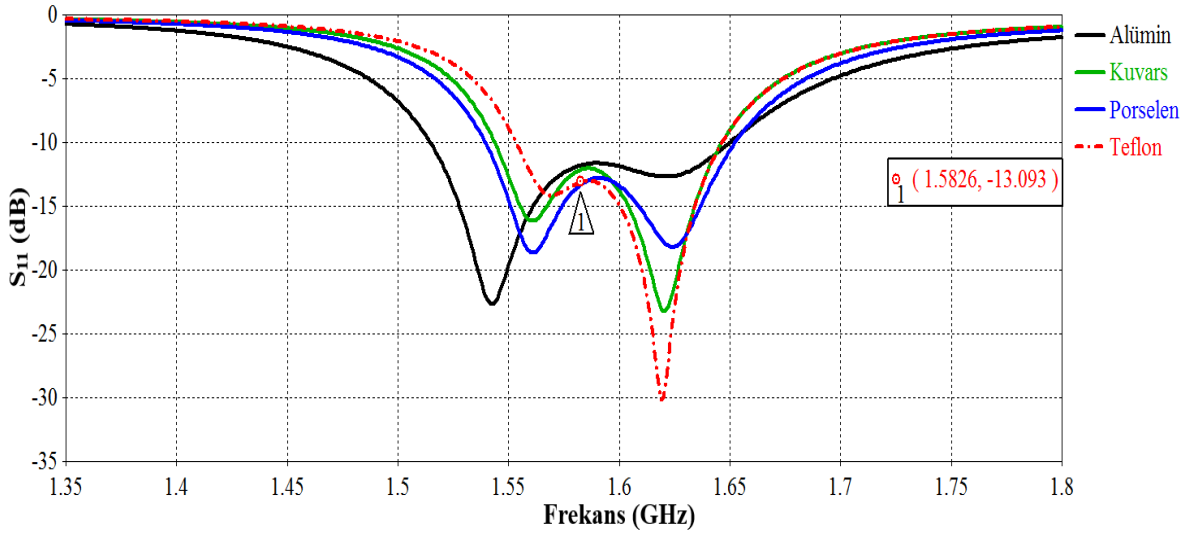
Şekil 4.20 Radom malzemesine bağlı GNSS antenleri Smith Diyagramı

Farklı dielektrik katsayıları olan malzemeler ile tasarlanan radomlar için her anten düzenlenerek, SGEDP sahip geniş bantlı GNSS antenleri elde edilmiştir. Çizelge 4.5'te her bir antenin yeni boyutları verilmiştir. Yüksek dielektrik katsayılı malzeme radom olarak tercih edildikçe, anten merkez frekansı daha fazla küçüldüğü için düzenlenen antenleri istenen frekansa getirmek için boyutlarının da daha küçük olması gerekmektedir. Köşe kesim miktarı DP seviyesini ve eksenel oran sonucunu yükseltmek için artmaktadır.

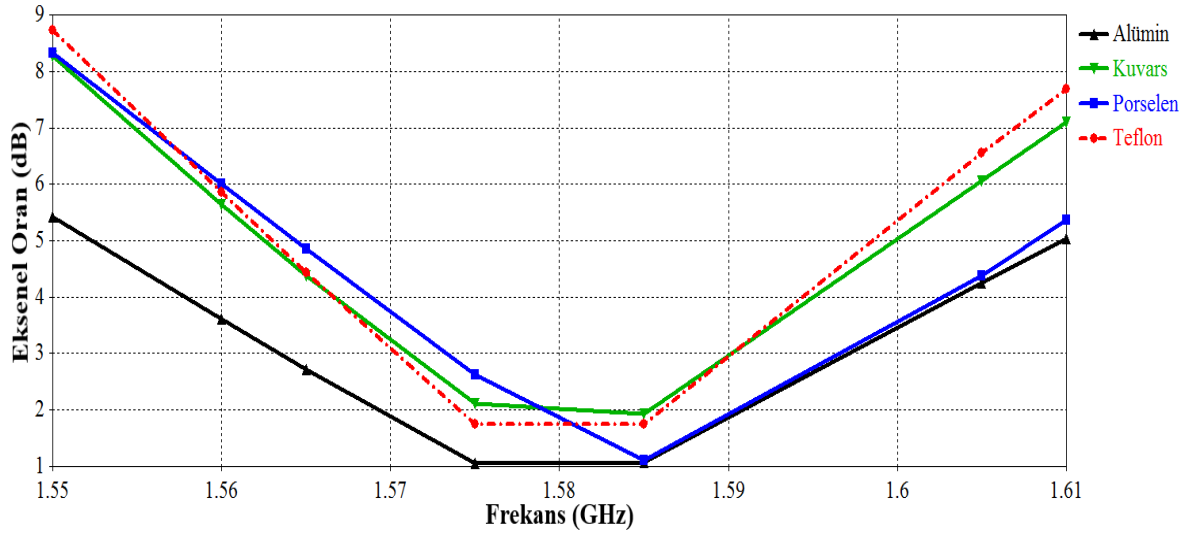
Çizelge 4.10 Radom malzemesine bağlı düzenlenmiş GNSS anteni parametreleri

Radom Malzemesi	Dielektrik Katsayısı	L, W (mm)	Köşe Kesim Miktarı (mm)	Besleme Noktası (fx; fy) (mm)
Radomsuz	-	57.35	8.1	(0; 10.5)
Teflon (PTFE)	2.1	55.21	7.61	(0; 11.5)
Kuvars	3.75	53	8.1	(0; 11.2)
Porselen	6	50	8.45	(0; 11.75)
Alümin	9.9	45.8	9.5	(0; 13)

Radomsuz GNSS anten ait boyutlar Çizelge 4.10’da ilk satırda verilmiştir. GNSS antenin alümin radom ile düzenlenmiş halinde yama boyutu %20 oranında küçülmüştür. Bölüm 4.1.4’de GPS anten benzetiminde radomsuz GPS anteni yama boyutu 53.6; alümin radomlu yama boyutu 49.6 mm olarak düzenlenmişti. GPS anteninde alümin radomlu düzenlemede yama boyutu %7.5 oranında küçülmüştü. GNSS anteni için yama boyutunda yaşanan yüksek orandaki küçülmeler kalın alttaş malzeme kullanımından dolayı gerçekleşmiştir.



Şekil 4.21 Radom malzemesine bağlı düzenlenmiş GNSS anteni  $S_{11}$  grafikleri



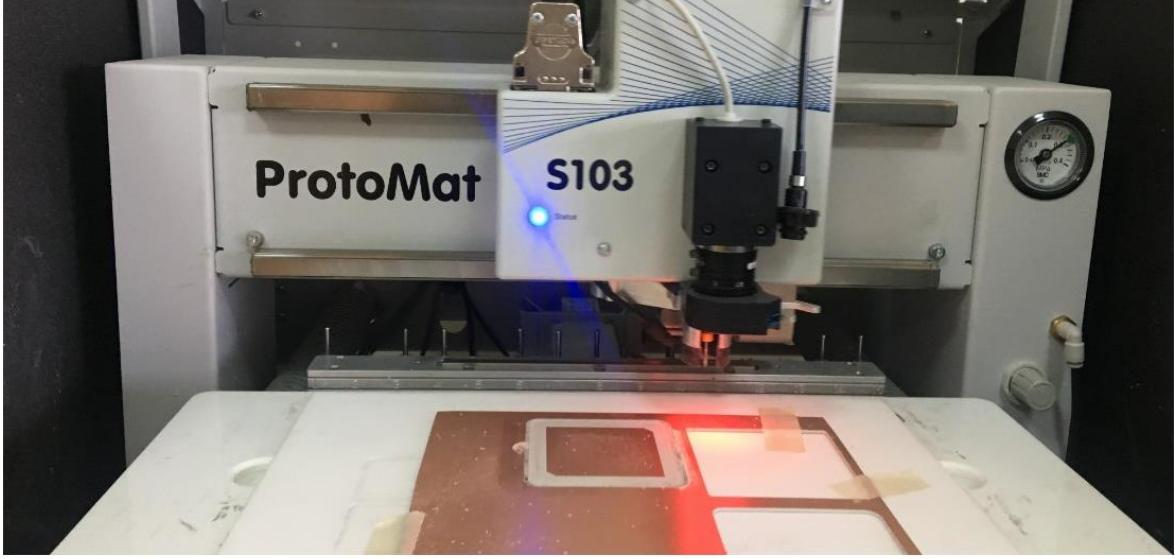
Şekil 4.22 Radom malzemesine bağlı düzenlenmiş GNSS anteni eksenel oran grafikleri

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi düzenlenen antenlerde  $S_{11}$  değerleri 1560 MHz – 1610 MHz frekans bandı için istendiği gibi (-10 dB) altına düşürülmüştür. DP merkez frekansları yakın olan antenler için radom malzemesinin dielektrik katsayısı yüksek olan antenlerin bant genişlikleri de artmıştır.

Şekil 4.22’de radom malzemesine bağlı olarak düzenlenmiş GNSS antenlerine ait EO sonuçları verilmiştir. Antenin (-10 dB) bant genişliğinin yüksek dielektrik katsayılı malzeme kullanılan radom tasarımlarında arttığını  $S_{11}$  grafiğinde görmüştük. EO grafiğinde 3 dB ve 6 dB bant genişliğinin de radom malzemenin dielektrik katsayısı arttıkça genişlediğini görebiliyoruz. Alümin radom malzemesi ile yapılan analizde 3 dB bant genişliği 1563 MHz – 1597 MHz frekans aralığında 34 MHz olarak görülmektedir. Teflon malzeme radom ile yapılan analizde 3 dB bant genişliği GNSS anteni için 1570 MHz – 1590 MHz frekans aralığında 20 MHz çıkmıştır. Dielektrik katsayısı yüksek olan alümin radom için eksenel oran 3 dB bant genişliği, teflonu göre %70 daha büyük çıkmıştır.

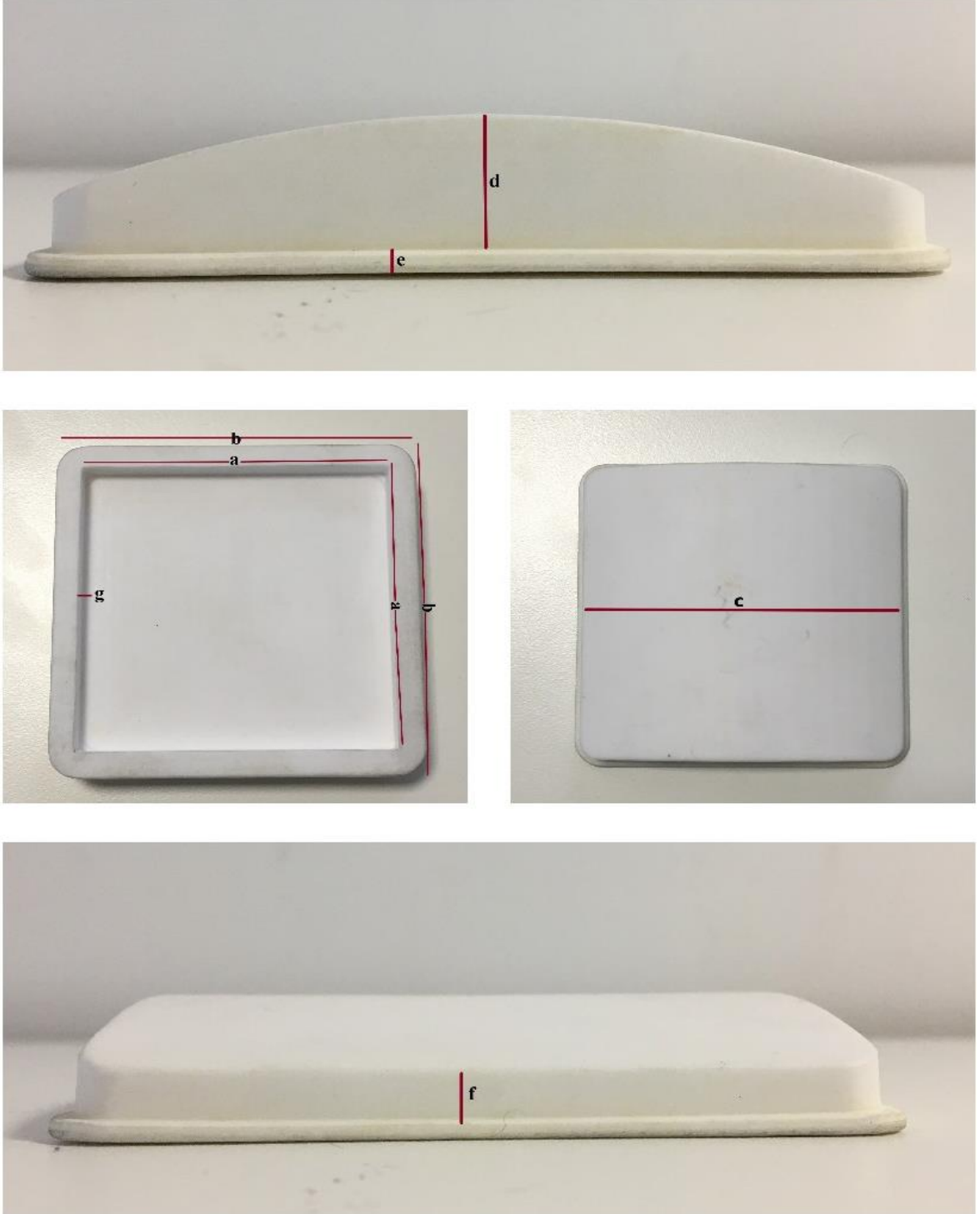
## 5. ÜRETİLEN GPS VE GNSS ANTENLERİNİN SİMULASYON SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Tezin bu bölümünde daha önce simülasyon sonuçları ile tasarımları CST programında tamamlanan GPS ve GNSS antenlerinin üretim aşaması anlatılarak; yapılan ölçüm ve testlerin sonuçları incelenmiştir. Anten üretimleri ROKETSAN A.Ş. bünyesindeki LPKF ProtoMat S103 PCB üretim cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Anten üretim aşamasına ait resimler aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1 GPS anteni ve GNSS anteni üretim görselleri

Üretimi gerçekleştirilen teflon malzeme ile tasarlanan radomun boyut bilgisi aşağıda verilmiştir. GNSS ve GPS anteni için radomun iç derinliği ve et kalınlığı gibi bazı değerleri GNSS anteni alttaş kalınlığı daha yüksek olduğu için farklı tasarlanmıştır.



Şekil 5.2 Üretilen radom boyut bilgileri

Çizelge 5.1 GPS ve GNSS anteni radom boyutları

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>g</b>
<b>GPS anteni radomu</b>	70 mm	82 mm	78 mm	9 mm	2 mm	1.21 mm	1.9 mm
<b>GNSS anteni radomu</b>	70 mm	82 mm	78 mm	13 mm	2 mm	5.21 mm	5.9 mm

Üretimi gerçekleştirilen antenlere ait sonuçlar alt başlıklarda GPS ve GNSS için ayrı olarak değerlendirilmiştir. Antenlerin  $S_{11}$  ve Smith Diyagramı sonuçları ROKETSAN A.Ş. bünyesindeki Rohde&Schwarz Vector Network Analyzer test cihazı ile yapılmıştır. Ayrıca anten performansının piyasada bulunan referans bir ürün ile karşılaştırması yapılarak yorumlanmıştır.

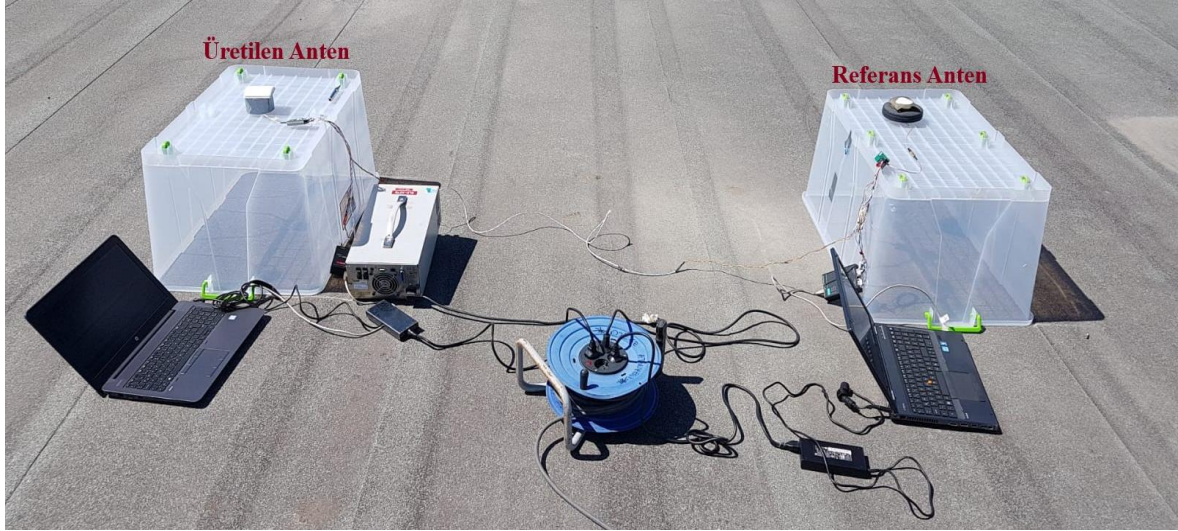
ROKETSAN A.Ş. bünyesinde bulunan referans GPS/GNSS alıcıları ve gereksinimleri karşıladığı bilinen referans anten kullanılarak eş zamanlı kayıtlar alınmıştır. Test sırasında aynı özelliklerdeki iki alıcı ile eş zamanlı alınan kayıtlarda referans antenin gördüğü uydu sayısı üretilen antenin gördüğü uydu sayısı ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca görülen uyduların sahip olduğu taşıyıcı/gürültü güç oranı yoğunluğunu simgeleyen  $C/N_0$  (Carrier to Noise Ratio) değerleri de anten performansı hakkında bilgi verdiği için karşılaştırılmıştır.

$C/N_0$  değeri genellikle desibel-Hertz (dB-Hz) birimi ile ifade edilir.  $C/N_0$  değeri taşıyıcı sinyal gücünün birim bant genişliğindeki gürültü sinyali gücüne oranını simgelemektedir. Taşıyıcı gücünü simgeleyen  $C$  değeri dBm ya da dBW birimi; gürültü yoğunluğunu simgeleyen  $N_0$  değeri dBm-Hz ya da dBW-Hz birimi ile verilir. GPS/GNSS alıcılarına ait çıktılarda verilen ve takip edilen uyduların  $C/N_0$  değeri yaklaşık olarak 37-50 dB-Hz aralığında olduğunda, alıcının ilgili uyduları konum hesaplama çözümünde kullanabilmesini sağlamaktadır [26].

Şekil 5.3’de antenlere yapılan testin kurulumu verilmiştir. Görselde antenler arasındaki mesafe 2 metre, antenlerin yerden yüksekliği yarım metre olacak şekilde düzenek kurulmuştur. Üretilen anten ve referans anten aynı yazılıma ve donanıma sahip iki GNSS



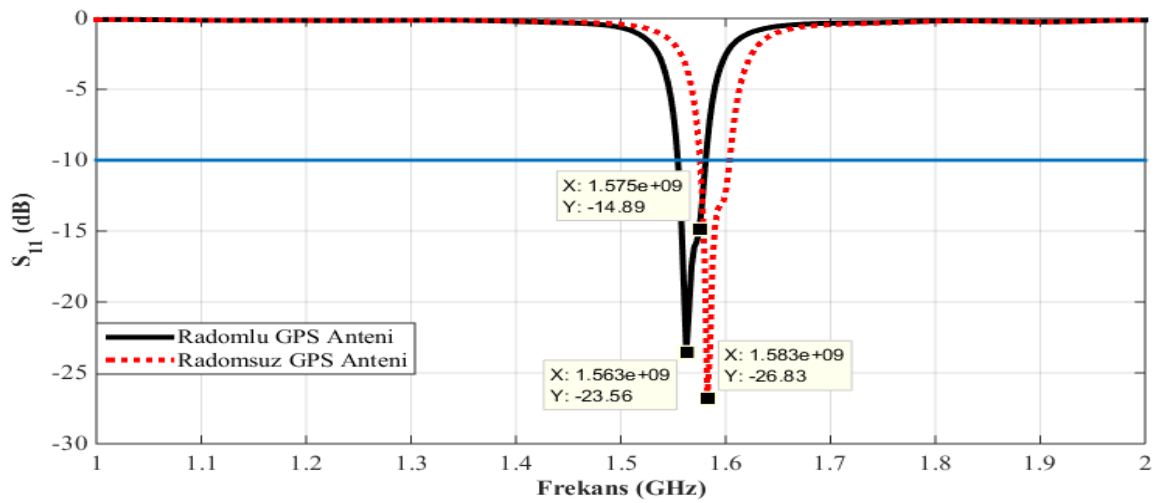
alıcıya bağlanmış ve kayıtlar alınmıştır. Birinci testte referans anten ile üretilen GPS anteni karşılaştırılmıştır. İkinci testte referans anten ile GNSS anteni test edilmiştir. Üretilen antenlerin sonuçları ve referans anten ile yapılan testlerin sonuçları 5.1’de ve 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.3 GPS/GNSS antenleri performans testi kurulumu

### 5.1 Üretimi Gerçekleştirilen GPS Anteni Test Sonuçları

CST programı ile radomlu yapıda tasarlanan ve simülasyon sonuçları 4.1.2 numaralı başlıkta verilen GPS anteni, LPKF cihazı kullanılarak üretilmiştir. Üretimi tamamlanan GPS anteninin radomlu ve radomsuz olarak geri dönüşüm kaybı oranını gösteren  $S_{11}$  grafikleri karşılaştırılmıştır.



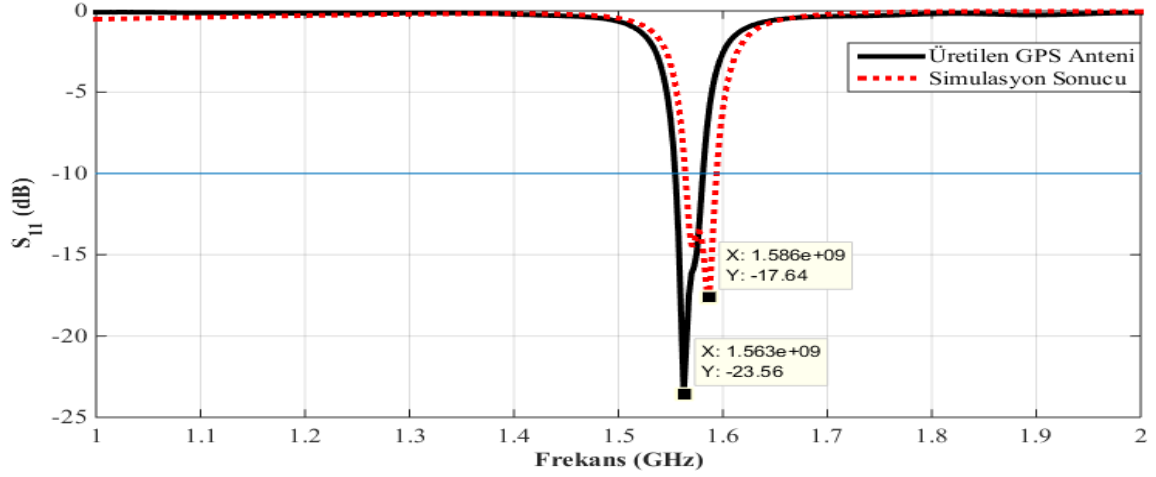
Şekil 5.4 Üretilen GPS antenine ait radomlu-radomsuz  $S_{11}$  grafikleri

4.1.1 numaralı başlıkta anten radom ile kaplandığında yaşanan frekans kaymasının 18 MHz olduğu gösterilmiştir. Üretilen antenin radomsuz ölçümünde merkez frekansı 1583 MHz elde edilmişken; radomlu ölçümünde merkez frekansı 1563 MHz elde edilmiştir. Üretilen antenin radomsuz merkez frekansı ile radomlu halinin merkez frekansı arasındaki kayma 20 MHz olarak ölçülmüştür. Antenin radom ile kaplanması sonucu simülasyon ortamında elde edilen etki benzer şekilde üretim aşamasında da görülmüştür. Antenlere ait dairesel polarizasyon merkez frekansları radomsuz antenin 1595 MHz, radomlu antenin 1570 MHz olarak ölçülmüştür. Burada da antene radom eklendiğinde dairesel polarizasyon merkez frekansının 25 MHz kaydığı görülmüştür. Simülasyon sonucunda radomun antene ait dairesel polarizasyon merkez frekansını 16 MHz kaydıracağı 4.1.1 numaralı başlık altında verilmişti. Üretilen antende polarizasyon frekansının 9 MHz fazla kayması, üretim toleransları ve radom malzemesinin toleransları ile yorumlanmıştır.

Üretimi gerçekleştirilen GPS antenine ait radomlu ölçüm sonuçları, simülasyon ortamında elde edilen sonuçlar ile üst üste çizdirilerek karşılaştırılmıştır. Üretimi gerçekleştirilen GPS anteni merkez frekansı 1563 MHz’de elde edilmiştir. Simülasyon sonucu ile karşılaştırıldığında merkez frekansının 23 MHz kaydığı görülmüştür. Üretilen ve simülasyonda elde edilen sonuçlarda elde edilen GDK değerleri  $S_{11}$  grafiğinde görüldüğü gibi üretilen antende daha iyi sonuç vermiştir. Dairesel polarizasyonun elde edildiği merkez frekans değeri simülasyon sonucunda 1577 MHz iken üretilen antende 1570 MHz çıkmıştır. Çizelge 5.2’de ve Şekil 5.5’te sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

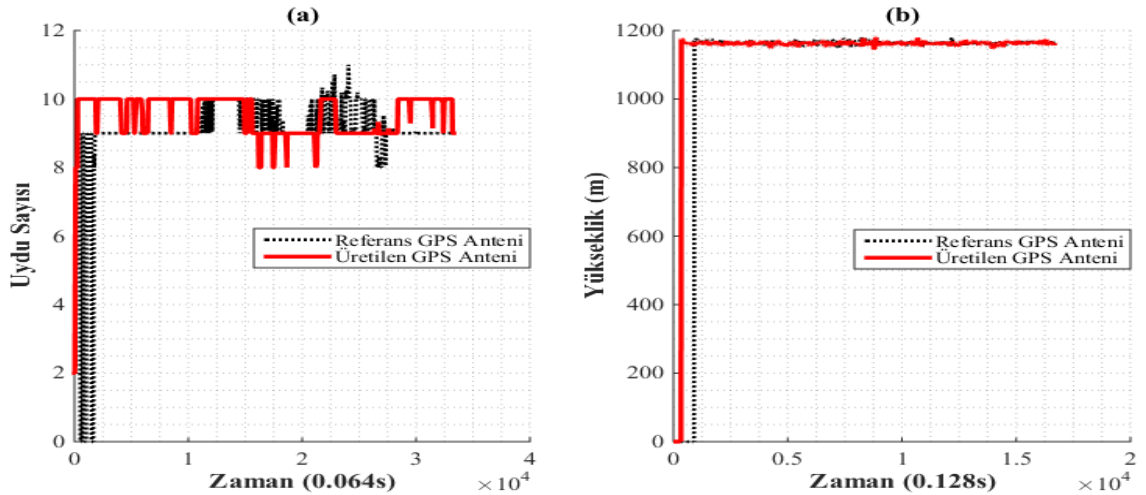
Çizelge 5.2 Simülasyon sonuçlarının üretim sonuçları ile karşılaştırması

	<b>Simülasyon Sonucu</b>	<b>Üretilen Anten Sonucu</b>
<b>Merkez Frekans Değeri</b>	1586 MHz	1563 MHz
<b>Dairesel Polarizasyon Merkez Frekansı</b>	1577 MHz	1570 MHz
<b>1575 MHz <math>S_{11}</math> Değeri</b>	-13.63 dB	-14.89 dB



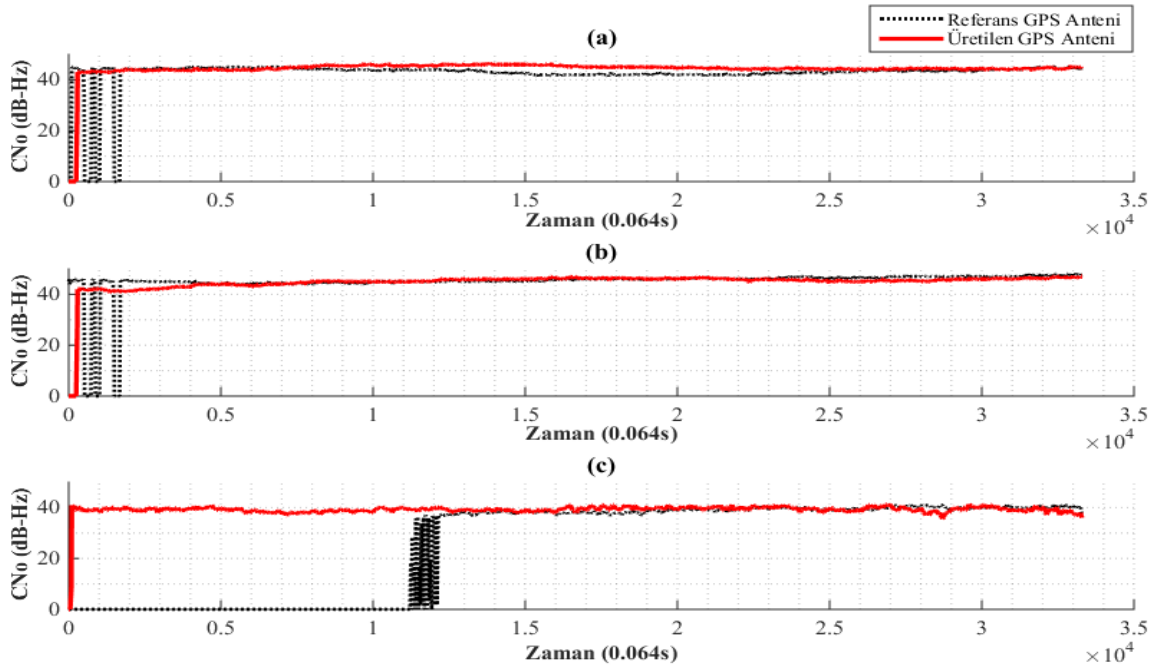
Şekil 5.5 Simülasyon sonucu ile üretilen GPS antenine ait karşılaştırmalı  $S_{11}$  grafikleri

Üretim sonuçları verilen GPS anteni, performansı bilinen referans bir anten ile GPS alıcı bağlanarak test edilmiştir. Üretilen GPS anteninın bağlandığı alıcıdan ve referans antenin bağlandığı aynı özelliklerdeki diğer alıcıdan, açık bir alanda yaklaşık 30 dakika süreyle kayıtlar alınmıştır. Alıcılardan alınan kayıtlardan sonra pozisyon ve uydu bilgilerini gösteren çözümler, alıcı mesaj içeriğine uygun bir kod yardımı ile çözülmüştür. Şekil 5.6’te antenlerin gördükleri uydu sayıları ve ürettikleri yükseklik çözümlerini karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kayıtların eş zamanlı alınmasına bağlı olarak, üretilen GPS anteninın bağlandığı sistemde uydu takibi daha kısa sürede gerçekleşmiş ve çözüm bilgisi de daha kısa sürede elde edilmiştir. Ayrıca kayıt boyunca üretilen GPS anteni sonuçları, gereksinimleri sağladığı bilinen anten ile yapılan testin sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir.

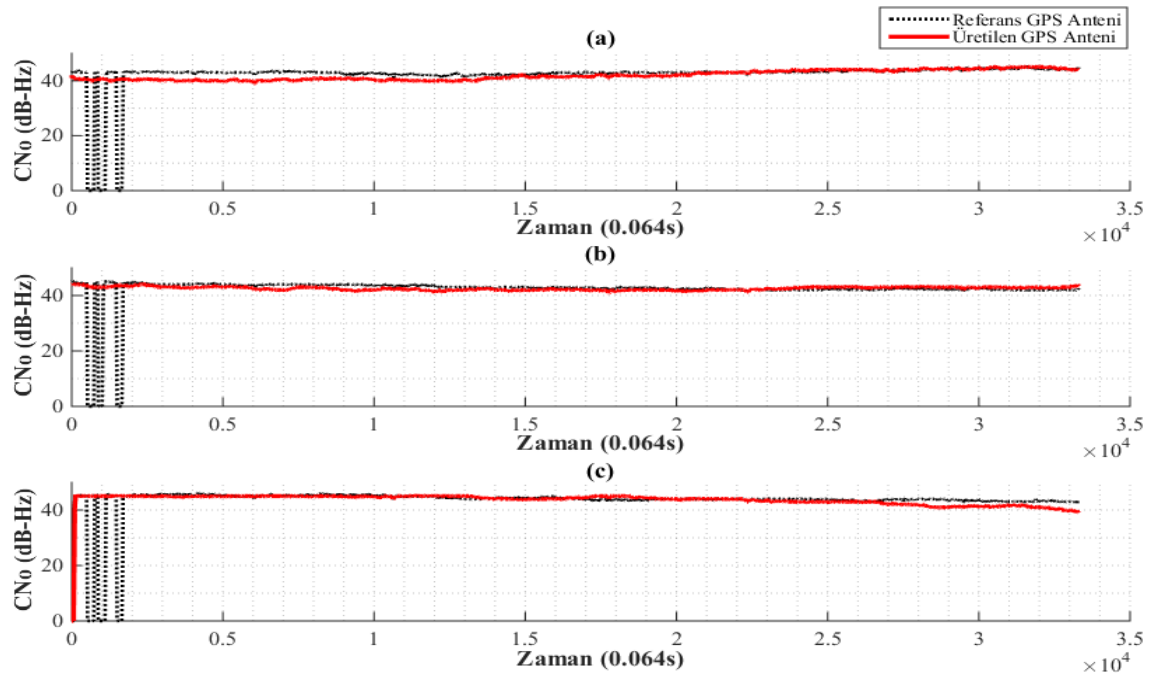


Şekil 5.6 Üretilen GPS anteni ve referans anten test sonuçları a) Uydu sayısı b)Yükseklik bilgisi

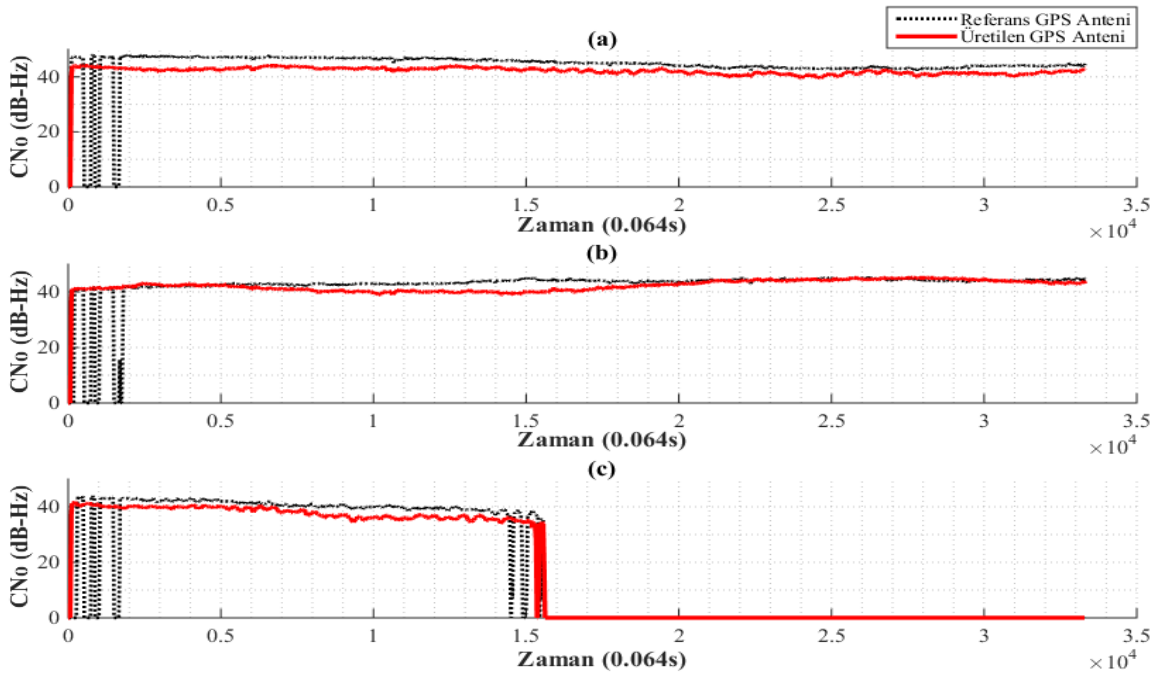
Çözüm ve uydu sayısı bilgisine ek olarak, antenler aracılığı ile tam takip yapılarak çözüme katılan uyduların seri numaraları olarak adlandırılan SV(space vehicle) numaraları ve bu uydularda belirlenen  $C/N_0$  değerleri karşılaştırılmıştır. SV numaraları bazında incelediğimizde bazı antenlerin takibinde üretilen GPS anteninin daha iyi performans gösterdiği; bazılarında benzer performans gösterdikleri ve geri kalanlarda referans antenin iyi olduğu görülmüştür. Tüm uydular için performans değerlendirmesinde ortalama bir sonuç aldığımızda üretilen GPS anteninin, gereksinimleri karşıladığı bilinen anten ile benzer bir performans gösterdiği görülmüştür. Şekil 5.7’de, Şekil 5.8’de ve Şekil 5.9’de verilen grafiklerde SV numarası özelinde iki anten için  $C/N_0$  değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.10’da antenlerin takip ettiği uydulara ait  $C/N_0$  değerlerinin ortalaması karşılaştırılmıştır.



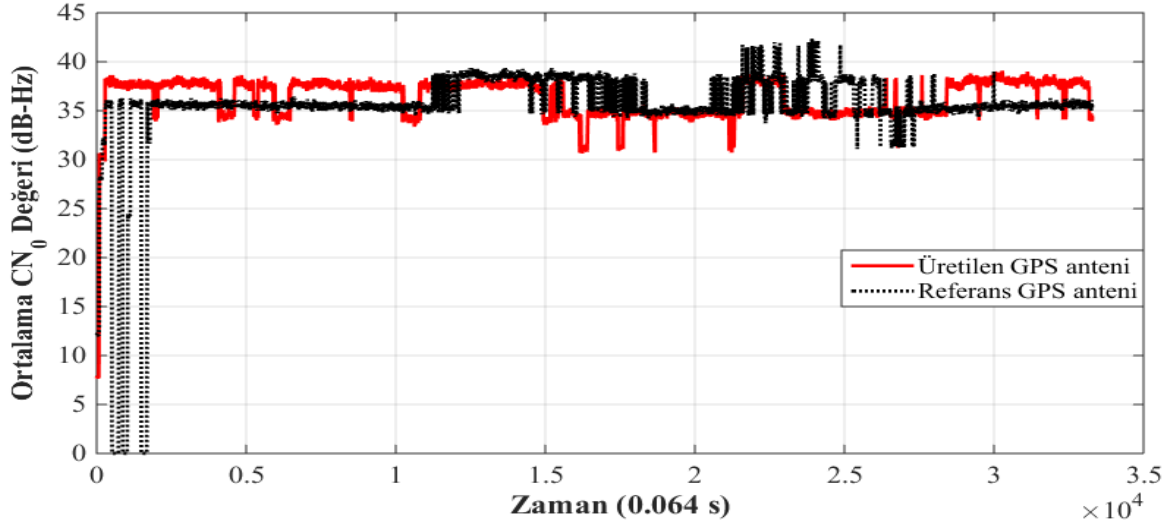
Şekil 5.7 Üretilen GPS anteni ve referans anten sinyal seviyesi karşılaştırmaları a) SV4 b) SV10 c) SV15



Şekil 5.8 Üretilen GPS anteni ve referans anten sinyal seviyesi karşılaştırmaları a) SV16 b) SV20 c) SV21

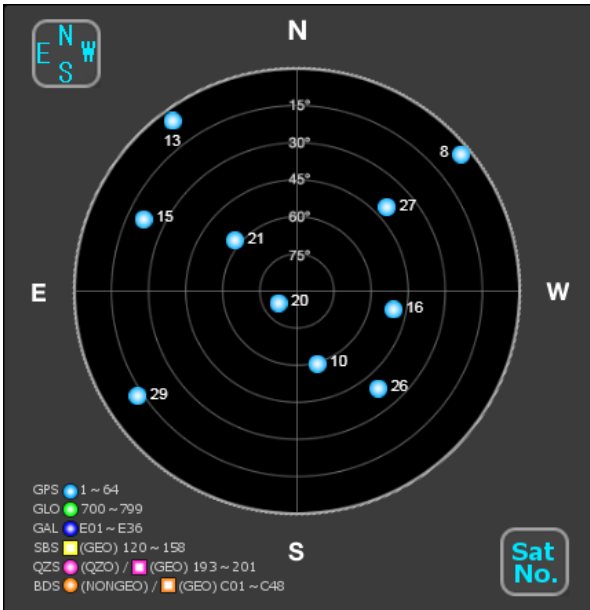


Şekil 5.9 Üretilen GPS anteni ve referans anten sinyal seviyesi karşılaştırmaları a) SV26 b) SV27 c) SV29



Şekil 5.10 Referans anten ve üretilen anten ile takip edilen uydulara ait ortalama  $CN_0$  değeri grafiği

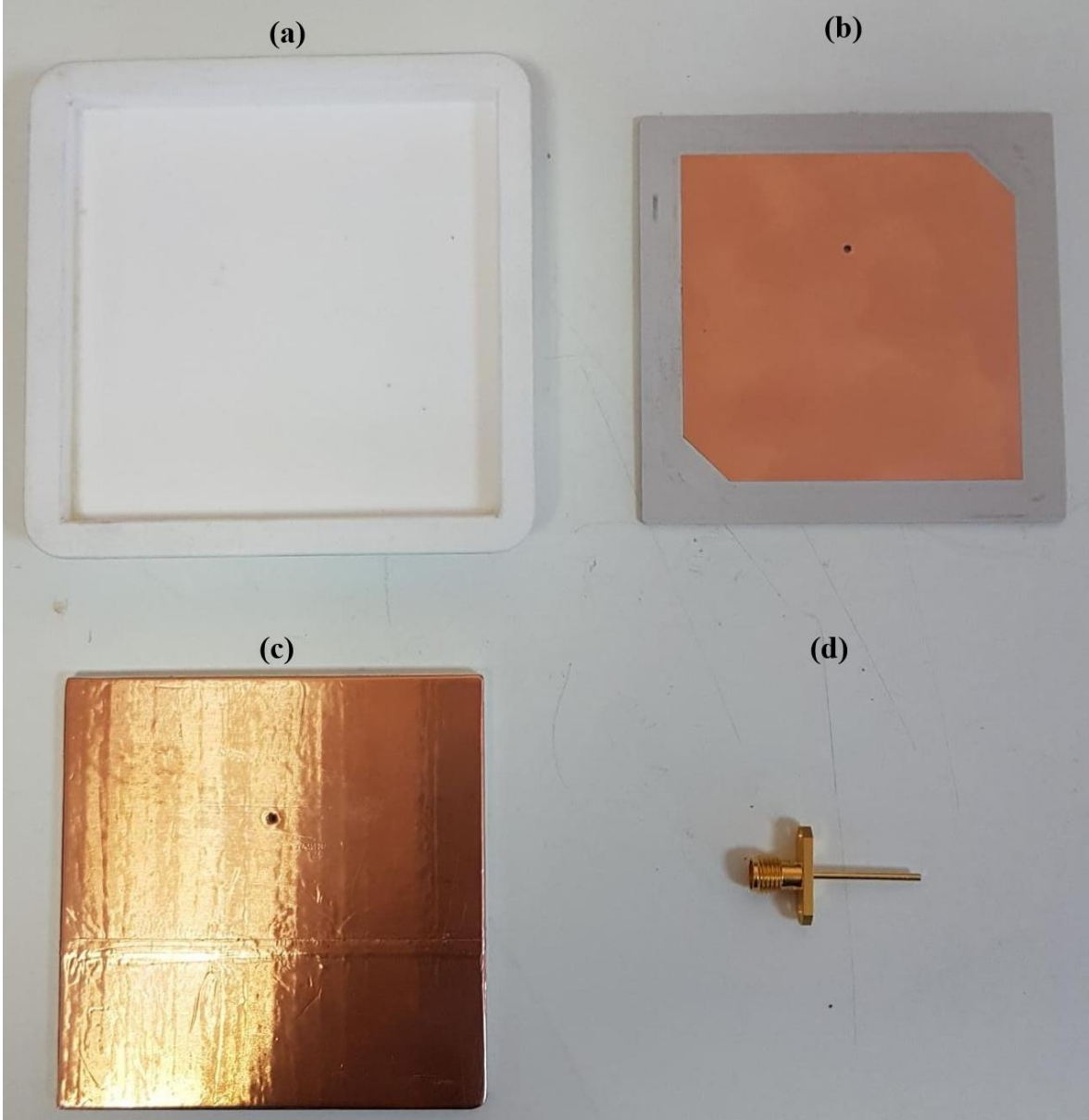
Referans anten ile karşılaştırmak için yapılan testler sırasında takibi sağlanan ve çözüme katılan uyduların SV numaraları grafiklerde verilmiştir. Ayrıca testin yapıldığı konumda bulunan ve görülebilir durumda olan uyduların gökyüzündeki dağılımı da Şekil 5.11’de verilmiştir. Antenler aracılığıyla alıcılar tarafından takip edilebilecek uyduların aşağıdaki SV numaralarına sahip uydular olması beklenmektedir. Yapılan testte burada verilen uydular takip edilebilmiştir.



Şekil 5.11 Test zamanına ait GPS uydularının dağılımı

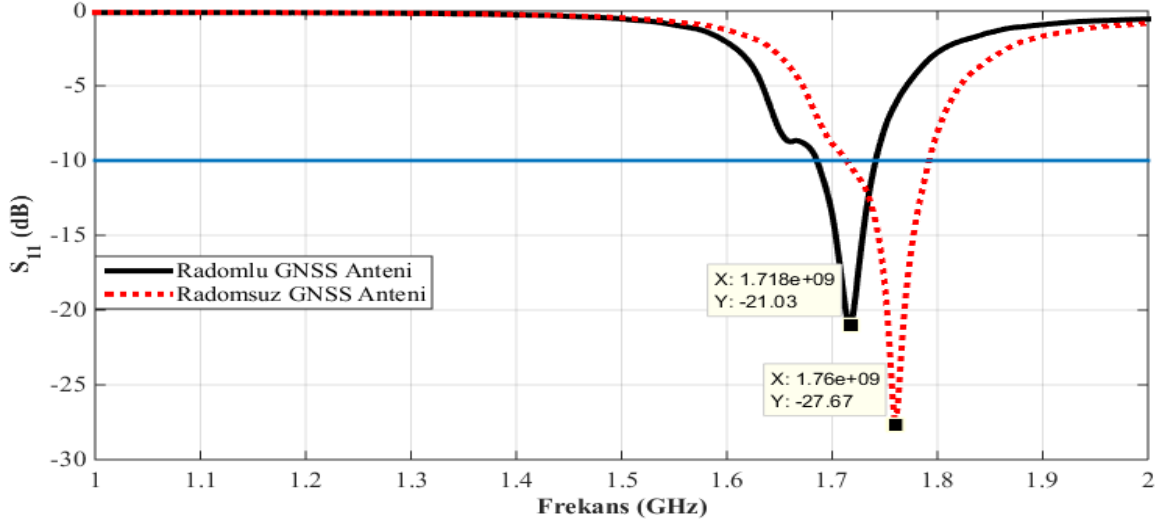
## 5.2 Üretimi Gerçekleştirilen GNSS Anteni Test Sonuçları

CST programı ile radomlu yapıda tasarlanan ve simülasyon sonuçları 4.2.2 numaralı başlıkta verilen GNSS anteni, LPKF cihazı kullanılarak üretilmiştir. Üretimi yapılan radom, teflon alttaşı ve RO3003 malzeme üzerine işlenen yama anten Şekil 5.12’de verilmiştir. Toprak yüzey ile RO3003 alttaşı arasında ikinci alttaşı katmanı olarak kullanılan teflon alttaşı için alt yüzeyinde bakır bant kullanılarak toprak yüzey oluşturulmuştur.



Şekil 5.12 a) Radom b) RO3003 üzeri yama anten c) Teflon alttaşı d) SMA konektör

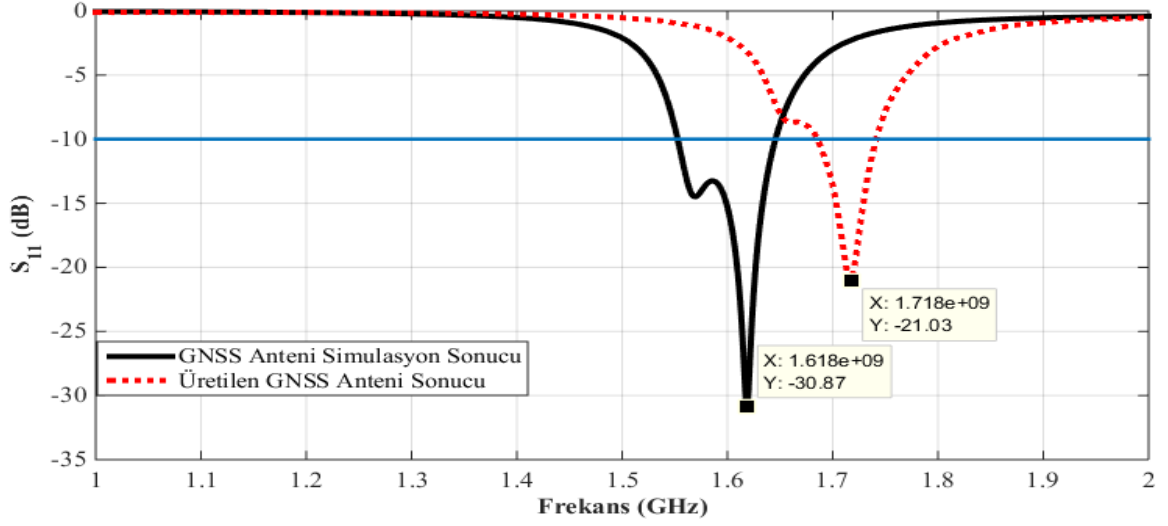
Üretimi tamamlanan GNSS anteninın radomlu ve radomsuz olarak geri dönüşüm kaybı oranını gösteren  $S_{11}$  grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.13’da, simülasyon sonuçlarına göre düzenlenen GNSS anteni boyutlarında ilk üretim yapılan antenin radomlu ve radomsuz  $S_{11}$  grafikleri verilmiştir. Daha önce 4.2.1 numaralı bölümde simülasyon ortamında radom ile kaplanan antenin merkez frekansının 49 MHz kaydığı görülmüştü. Üretimi yapılan geniş bantlı anten radom ile kaplandığında 42 MHz bir kayma görülmüştür. Simülasyon ortamında görülen radom etkisinin üretim aşamasında da benzer olduğu kanıtlanmıştır.



Şekil 5.13 İlk üretimi yapılan GNSS anteni radomlu ve radomsuz  $S_{11}$  grafikleri

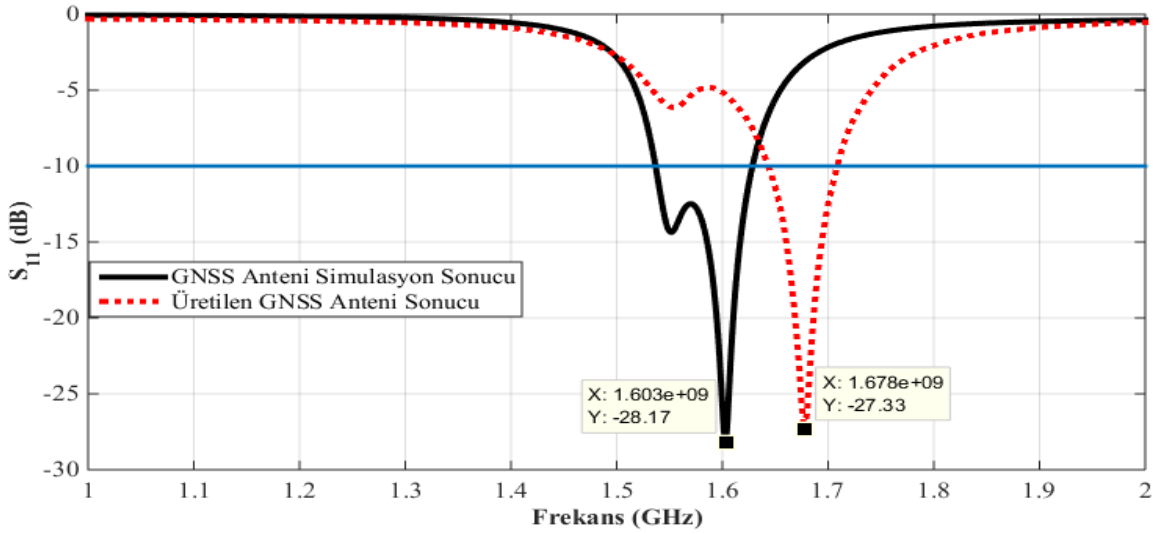
Yukarıda  $S_{11}$  grafiğı verilen ve simülasyon ortamında çalıştığı bilinen antenin boyutlarında üretilen ilk prototipte beklenenden fazla bir tolerans farkı görülmüştür. Daha önce GPS anteni için gerçekleştirilen ilk üretimde simülasyon sonucuna göre yaklaşık 20 MHz bir fark görülmüştü ve anten üzerinde yapılan değişiklikler ile bu problem giderilerek ikinci prototipte istenen sonuçlar elde edilmişti. GNSS antenine ait ilk prototip sonuçları Şekil 5.14’da görüldüğü gibi simülasyon ile arada 100 MHz büyüklüğünde bir performans kaybı görülmüştür.





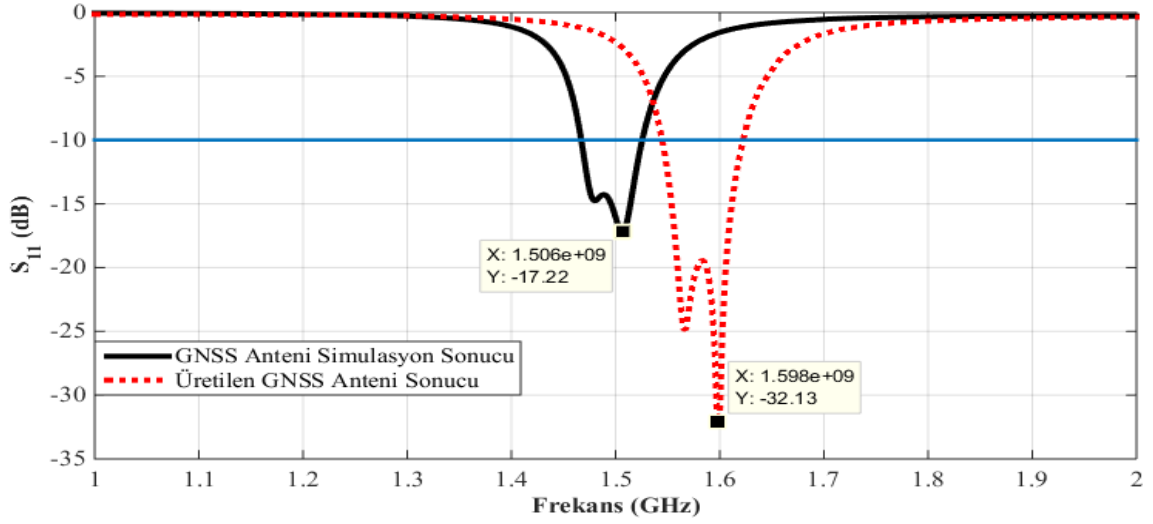
Şekil 5.14 Üretilen ilk GNSS anteni ve simülasyon sonucu  $S_{11}$  karşılaştırması

İlk üretim sonrası alınan sonuca göre  $S_{11}$  değeri merkez frekansı daha büyük frekansta kaymış olarak görüldüğü için anten üzerinde düzenleme ile anten boyutu 55.21 mm'den 55.85 mm uzunluğa çıkarılmıştır. Aynı değişiklik simülasyon ortamında da yapılarak eşit uzunluktaki üretilen anten ile simülasyon sonucu ikinci kez karşılaştırılmıştır. Şekil 5.15'de görüldüğü gibi ikinci karşılaştırmada anten merkez frekansı arasında 75 MHz büyüklüğünde bir kayma görülmüştür.



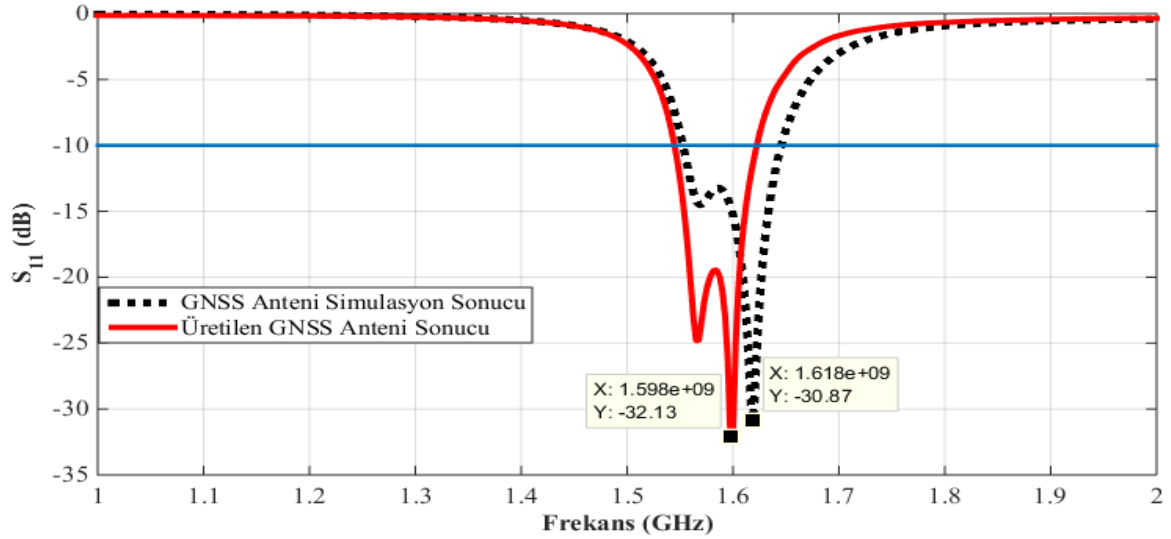
Şekil 5.15 İkinci üretim sonucu ve simülasyon sonucu  $S_{11}$  karşılaştırması

İkinci üretim ve karşılaştırma ile alınan sonuçlara göre yaklaşık tolerans farkının 85-90 MHz olduğu düşünülmüş ve üçüncü tasarımda anten boyutu 59.8 mm yapılarak simülasyon sonuçları alınmıştır. Üçüncü denemeye ait üretim ve simülasyon sonucu karşılaştırması Şekil 5.16'de verilmiştir. Bu deneme sonucunda tahmin edildiği gibi simülasyon ortamındaki anten ile aynı boyutlarda üretilen antenin sonuçlarında üretim toleranslarının sebep olduğu kaymanın 92 MHz olduğu görülmüştür.



Şekil 5.16 Üçüncü üretim sonucu ve simülasyon sonucu S<sub>11</sub> karşılaştırması

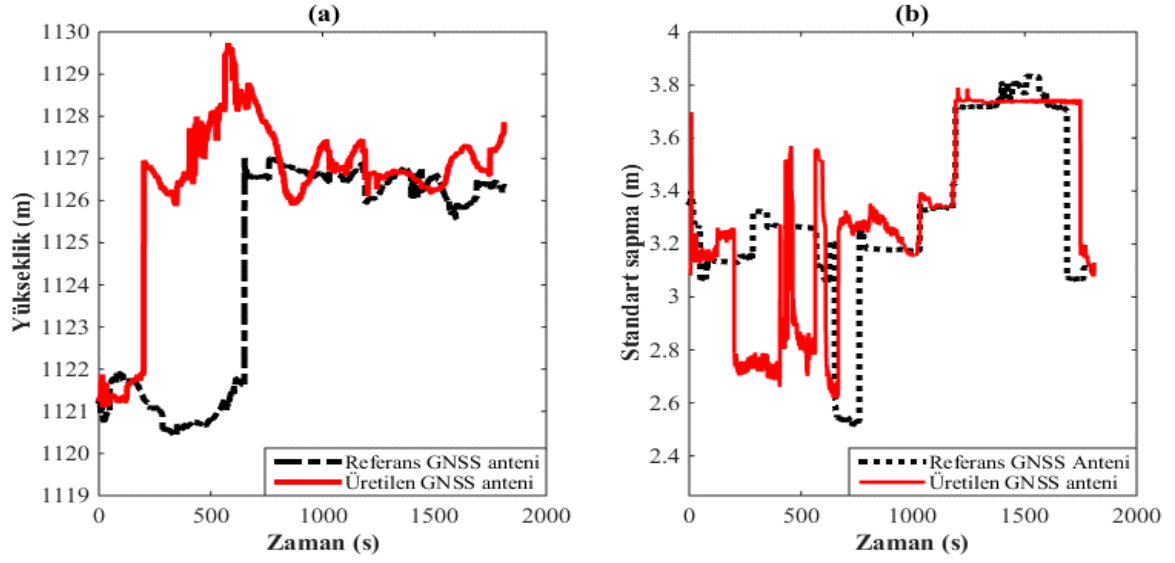
Üçüncü deneme sonucunda istenilen frekans aralığında ve geri dönüşüm kaybı değerine sahip anten tasarımı tamamlanmıştır. Aynı zamanda dairesel polarizasyon merkez frekansının da istenildiği gibi 1583 MHz bandında yakalandığı görülmüştür. Görüldüğü gibi simülasyon ortamında elde edilen GNSS anteni ile üretimi gerçekleştirilen GNSS anteni sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.17 Üretilen GNSS anteni ve simülasyon sonucu  $S_{11}$  grafikleri

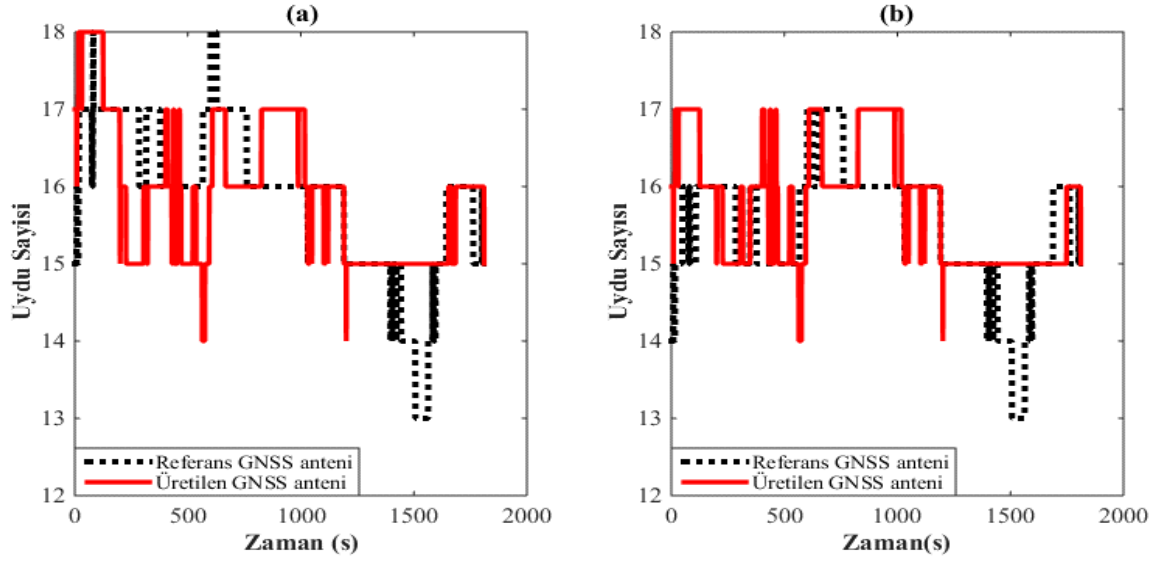
Simülasyon ortamında 55.21 mm ile elde edilen GNSS anteni, üretim aşamasında 59.8 mm ile tasarlanmıştır. Anten boyutunda yaşanan %8.4 oranındaki değişimin üretim toleransına ek olarak ikinci alttaş olarak kullanılan teflon malzemenin tolerans farkından oluştuğu düşünülmüştür. Simülasyon ortamında hem radom hem de alttaş olarak kullanılan teflon malzemenin dielektrik katsayısı 2.1 olarak alınmıştır. Piyasada bulunan teflon malzemelerinde dielektrik katsayısının 2.1 isterini tam sağlamadığı ve farklılık gösterdiği düşünülmektedir. Benzer durumlar diğer alttaş malzeme katsayıları için de geçerlidir ve bu bilinen bir durumdur. Üretim sonucunda görülen değerlerde simülasyon ortamında elde edilen sonuçtan daha iyi bir anten üretildiği görülmüştür. Simülasyon ortamında dairesel polarizasyon merkez frekansı olan 1582 MHz  $S_{11}$  değeri (-13.37 dB) elde edilmişken; üretilen antende dairesel polarizasyona ait merkez frekans olan 1583 MHz’de  $S_{11}$  değeri (-19.42 dB) elde edilmiştir. Üretilen GNSS anteni, gereksinimleri karşıladığı bilinen referans anten ile aynı özellikteki iki GNSS alıcıya bağlanarak test edilmiştir ve karşılaştırılmıştır.

İki farklı anten ile yapılan test sonuçlarına göre Şekil 5.18’de alıcılardan elde edilen yükseklik bilgisi verilmiştir. Yükseklik bilgisi ve yükseklik bilgisine ait standart sapma sonuçlarında büyük oranda benzer sonuçlar görülmüştür.



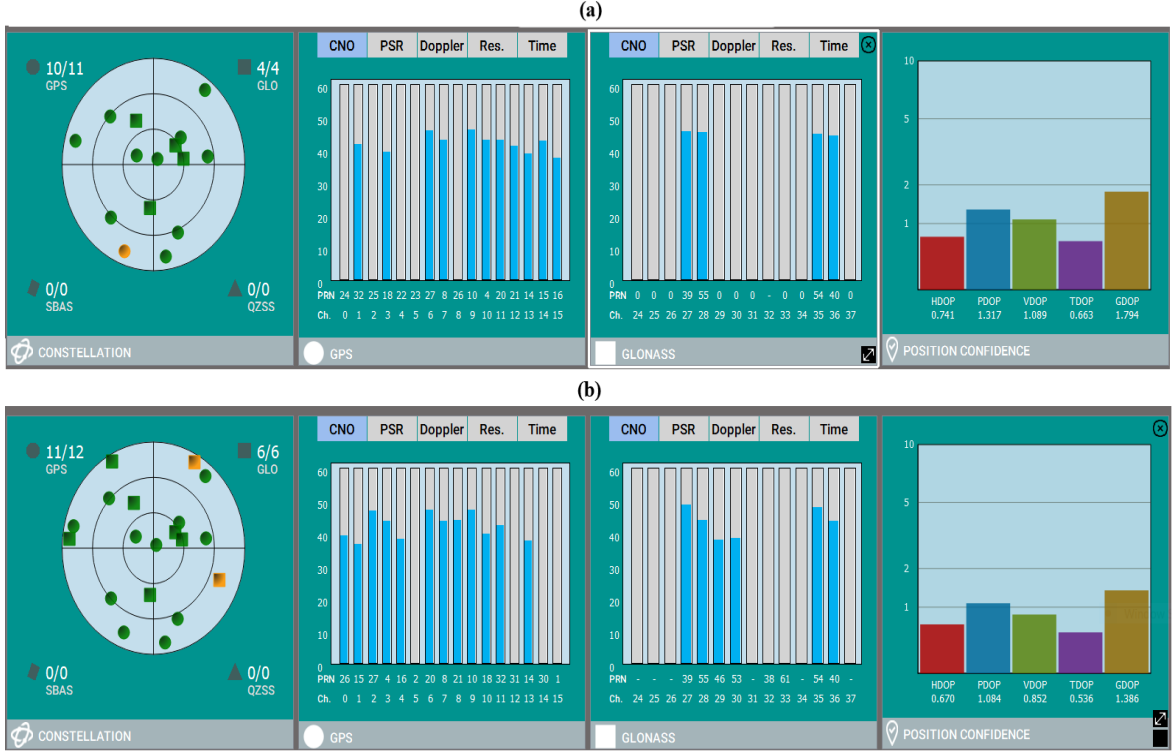
Şekil 5.18 Üretilen GNSS anteni ve referans anten test sonuçları a) Yükseklik bilgisi b) Standart sapma

Yükseklik bilgisine ek olarak anten performansları uydu sayıları karşılaştırılarak da gözlenmiştir. Alıcıdan çözülen bilgilerde takip edilen uydu sayısı ve çözüme katılan uydu sayısı değerleri Şekil 5.19’de verilmiştir. Takip edilebilen uydu sayısı ve çözüme katılan uydu sayısı bilgisinde iki anten performansı benzer sonuçlar göstermiştir. Gereksinimi karşıladığı bilinen referans antene göre üretilen GNSS anteni de yüksek sayıda uydu görebilmiştir.

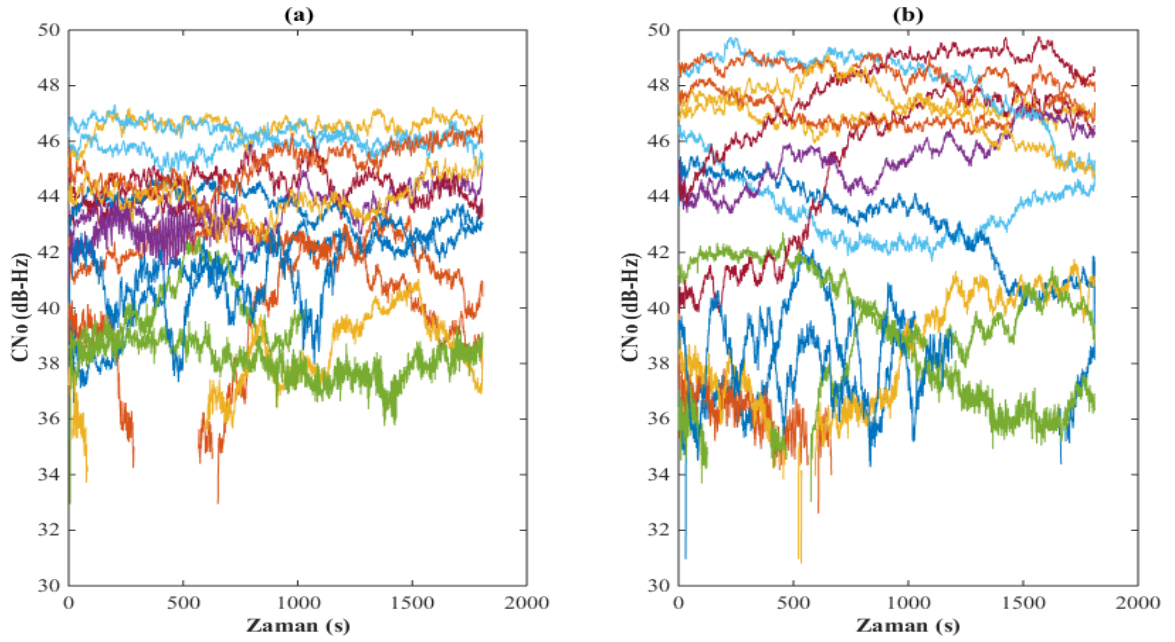


Şekil 5.19 Üretilen GNSS anteni ve referans anten test sonuçları a) Takip edilen uydu sayısı  
b) Çözüme katılan uydu sayısı

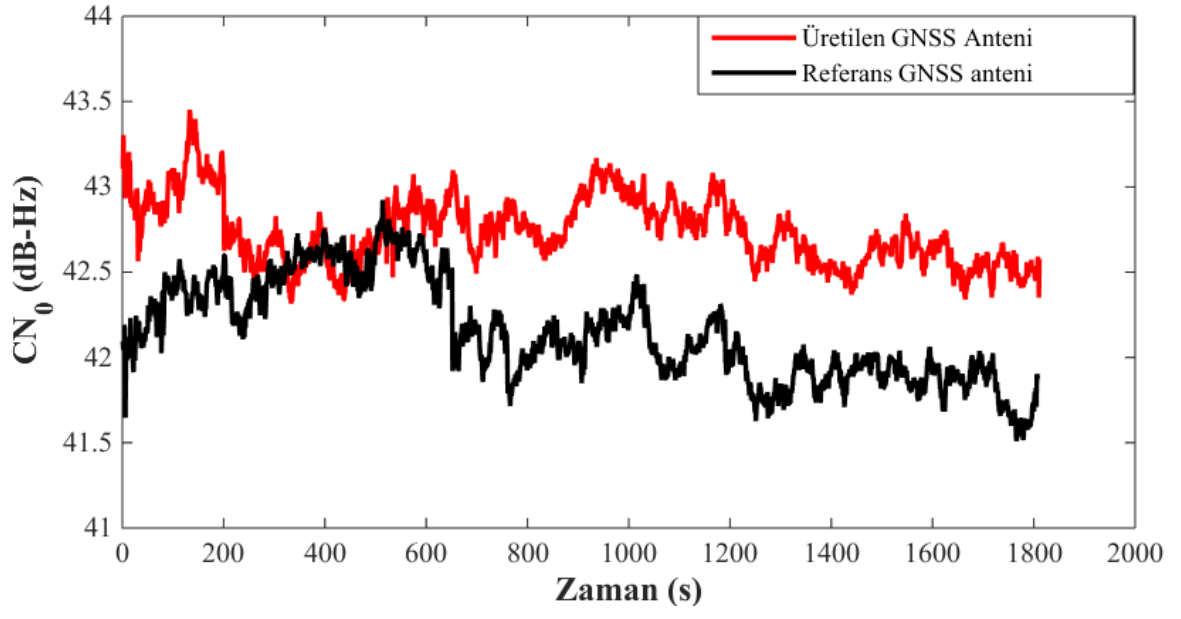
Yukarıda toplam uydu sayısı verilen bilgilere ek olarak iki anten için de görülen uyduların GPS ve GLONASS dağılımları verilmiştir. Test sistemi kurulduktan sonra kayıtlara başlamadan önce alınan görselde anlık değerlerde üretilen antenin daha fazla GLONASS uydusu gördüğü Şekil 5.20’de verilmiştir. Referans antenin gördüğü 11 GPS uydusundan 10 tanesi çözüme katılabilecek seviyededir ve gördüğü 4 adet GLONASS uydusunu da çözümde kullanabilmektedir. Üretilen GNSS anteni ise 12 GPS uydusu görürken 11 tanesi çözümde kullanılmıştır ve gördüğü 6 GLONASS uydusu da çözümde kullanılmıştır. Şekil 5.21’de iki farklı anten ile alınan kayıtlarda elde edilen sinyal seviyeleri çizdirilmiştir. Üretilen antenin gördüğü uydulara ait  $C/N_0$  değerlerinin, referans antene ait uydu  $C/N_0$  değerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 5.22’de iki antenin de takip ettiği uydulara ait sinyal seviyelerinin ortalaması verilmiştir. Sinyal seviyelerinin ortalaması incelendiğinde, test süresince üretilen GNSS antenini ile takip edilen uyduların sinyal seviyelerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Testin çoğunda üretilen GNSS anteni tarafından takip edilen uyduların referans antene göre 1 dB daha fazla olduğu görülmüştür. Üretilen antenin kazanç seviyesinin ve eksenel oran değerinin referans antene göre biraz daha iyi olduğu düşünülmüştür.



Şekil 5.20 Üretilen GNSS anteni ve referans anten test sonuçları a) referans anten b) üretilen GNSS anteni



Şekil 5.21 Uydulara ait CNo değerleri a) referans anteni b) üretilen GNSS anteni



Şekil 5.22 Takip edilen uydulara ait CN<sub>0</sub> değerlerinin ortalamasının karşılaştırması

## 6. SONUÇLAR VE YORUMLAMA

Mikroşerit yama antenler kolay üretilmesi, küçük boyutları, ucuz maliyetleri ile birçok alanda tercih edilmektedirler. Askeri alanda füzelerde, uçan araçlarda da sıkça kullanılan mikroşerit yama antenler özellikle konumlandırma sistemlerinin etkin bir elemanı olarak tasarlanmaktadır. Sivil uygulamalarda ve askeri uygulamalarda yaygın bir kullanım alanına sahip olan GNSS alıcılar için birçok avantajı olan mikroşerit yama GNSS antenleri tasarlanmaktadır ve aktif olarak kullanılmaktadır.

Anten performansını etkilemeden, zorlu çevre şartlarına karşı anteni koruyan ve antenin görev süresini uzatmaya yarayan radomlar sabit ya da hareketli kara ve deniz sistemlerinde, sivil ya da askeri alanda uçan araçlarda sıklıkla kullanılan bir üründür. Askeri alanda güdümlü füzelerde kullanılan telemetri antenleri ya da GNSS antenleri de radom malzemeler yardımıyla daha zorlu çevre koşullarından antenleri korumakta ve işlevselliğinin devam etmesini sağlamaktadırlar.

Tez içeriğinde antenler, konumlandırma sistemleri ve radomlar hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca radomlu ve geniş bantlı anten tasarımlarını içeren literatür taramaları da örneklerle incelenmiştir. Tezin sonuç kısmında yapılan simülasyon ve üretim çalışmaları özetlenerek elde edilen kazanımlardan söz edilmiştir.

- Doğrusal polarizasyona sahip dar bantlı anten tasarımı ile başlanan ilk bölümde anten alttaş kalınlığı ve alttaş malzemesinin türü değiştirilerek bant genişliğinde yaşanan değişimler analiz edilmiştir. Sadece alttaş kalınlığı değiştirilen parametrik simülasyonlarda bant genişliği artarken anten merkez frekansı da kaydığı için antende düzenlemeler yapılması gerektiği sonucuna varılmış ve farklı alttaş kalınlıkları için GPS L1 bant frekansı olan 1575 MHz'de çalışacak şekilde antenler elde edilmiştir.
- Alttaş kalınlıkları farklı anten tasarımlarında  $S_{11}$  (-10 dB) bandı için bant genişliğinin kalınlık arttıkça arttığı görülmüştür. Alttaş kalınlığı 5 katına çıkarıldığında anten boyutu %7 küçülmüştür. Bant genişliği frekans aralığı da 15 MHz'den 70 MHz'e çıkmıştır ve 1575 MHz merkez frekansında (-10 dB) bant genişliği %1'den %4.4 değerine çıkmıştır.



- Alttaş malzemesini değiştirmeden sadece alttaş kalınlığı artırıldığında, boyutunda küçülme ve bant genişliğinde artış görülmüştür.
- Alttaş malzemesi olarak dielektrik katsayısı 3 olan RO3003 malzemesine ek olarak ikinci alttaş olarak dielektrik katsayısı 9.9 olan Alümin kullanıldığında; aynı kalınlıkta sadece RO3003 kullanılmasına göre bant genişliğinin %14 daha fazla olduğu ve anten boyutunun %17 daha küçük olduğu görülmüştür.
- Dielektrik katsayısı yüksek alttaş kullanımının daha geniş bant genişliği sağladığı ve anten boyutunu daha çok küçülttüğü sonucu elde edilmiştir.
- İkinci parametrik analizlerde doğrusal polarizasyon yerine dairesel polarizasyona sahip geniş bantlı anten tasarımları çalışılmıştır.
- Doğrusal polarizasyona sahip kare yama antenin köşeleri kesilerek anten polarizasyonunda yaşanan değişimler gösterilmiştir. Anten köşelerinden belirli bir oranda kesildiğinde ve sadece y-ekseni üzerinde beslendiğinde antenin SGEDP anten tasarımı elde edildiği görülmüştür. Besleme noktası sadece x-ekseni üzerine taşındığında polarizasyon yönünün değiştiği ve antenin SLEDP sahip olduğu görülmüştür.
- Dairesel polarizasyona sahip antenin alttaş kalınlığı artırıldığında bant genişliğinin de büyüdüğü görülmüştür. Buna ek olarak alttaş kalınlığı artan antende köşe kesim miktarının da anten performansını aynı frekansta sağlamak için artırılması gerekmiştir. Alttaş kalınlığı 4 katına çıkarılan bir tasarımda merkez frekansında kayma olmaması için köşe kesim miktarı da 2 katına çıkarılmıştır. Anten boyutu küçülürken besleme noktasının yama merkezinden y-ekseni doğrultusunda uzaklaştığı ve yama kenarına yaklaştığı görülmüştür.
- GPS ve GNSS frekansları için simülasyon tasarımı yapılan antenler radom malzemeler ile kaplanmıştır. Radomun antene etkileri, radom malzemesine göre antene etkileri ve radomun anten ile olan mesafesinin antene etkileri parametrik analizler ile incelenmiştir.
- GPS frekansında tasarlanan dairesel polarizasyonlu bir antene teflon malzeme radom kaplandığında anten merkez frekansının ve dairesel polarizasyon frekansının daha küçük değerlere kaydığı görülmüştür. Radom ile kaplı antenin merkez frekansı radomsuz olana göre 18 MHz kaymıştır. Radom malzemesi farklı dielektrik katsayılarla sahip olan kuvars, porselen ve alümin malzemeler ile değiştirildiğinde

anten üzerindeki etkisinin arttığı görülmüştür. Dielektrik katsayısı 2.1 olan teflona göre dielektrik malzemesi 9.9 olan alümin malzeme ile tasarlanmış radom kaplandığında anten merkez frekansı 133 MHz kaymıştır. Teflondan tasarlanan radom kullanıldığında kayma merkez frekansa göre %1.1 olmuşken, alümin malzeme ile tasarlanan radom kullanıldığında kayma %8.4 olmuştur.

- Radoma ve radomun malzemesine bağlı olarak merkez frekansı kayan antenlerin boyutlarında değişimler yapılarak; radomlu durumda yeniden GPS anteni tasarımları sağlanmıştır. Teflon malzemeli radom ile kaplanan anten boyutu radomsuz haline göre %1.3 küçülmüşken; Alümin malzemeli radom ile kaplanan anten boyutu radomsuz haline göre %7.5 küçülmüştür. Köşe kesim miktarını büyük oranda etkilemediği; besleme noktasının anten kenarına yaklaşmasına neden olduğu görülmüştür.
- Radom iç yüzeyinin, GPS anteni yama yüzeyine mesafesine bağlı parametrik analizlerin sonucunda; radom yüzeyinin, yama yüzeyinden uzaklaştıkça radom etkisinin azaldığı görülmüştür.
- GNSS frekansında tasarlanan dairesel polarizasyonlu bir antene teflon malzeme radom kaplandığında anten merkez frekansının ve dairesel polarizasyon frekansının daha küçük değerlere kaydığı görülmüştür. Radom ile kaplı antenin merkez frekansı radomsuz olana göre 49 MHz kaymıştır. Radom malzemesi farklı dielektrik katsayılarına sahip olan kuvars, porselen ve alümin malzemeler ile değiştirildiğinde anten üzerindeki etkisinin arttığı görülmüştür. Dielektrik katsayısı 2.1 olan teflona göre dielektrik malzemesi 9.9 olan alümin malzeme ile tasarlanmış radom kaplandığında anten merkez frekansı 295 MHz kaymıştır. Teflondan tasarlanan radom kullanıldığında kayma merkez frekansa göre %3 olmuşken, alümin malzemedan tasarlanan radom kullanıldığında kayma %18.2 olmuştur. GPS anteni ile yapılan çalışmalara göre daha çok kayma yaşanma sebebi radom etkisi ve kalın alttaş kullanımından kaynaklanmıştır. Radomun anten bant genişliği miktarını bozacak bir etkisi olmamıştır.
- Radomun malzemesine bağlı olarak merkez frekansı kayan antenlerin boyutlarında değiştirmeler yapılarak; radomlu durumda yeniden GNSS anteni performansı görülen tasarımlar elde edilmiştir. Teflon malzemeli radom ile kaplanan anten boyutu radomsuz haline göre %3.7 küçültülmüşken; alümin malzemeli radom ile

kaplanan anten boyutu radomsuz haline göre %20 küçültülmüştür. Köşe kesim miktarını büyük oranda etkilemediği; besleme noktasının anten kenarına yaklaşmasına neden olduğu görülmüştür.

- Radom iç yüzeyinin, GNSS anteni yama yüzeyine mesafesine bağlı parametrik analizlerin sonucunda; radom yüzeyinin, yama yüzeyinden uzaklaştıkça radom etkisinin azaldığı görülmüştür.
- Simülasyon sonuçlarında elde edilen anten boyutuna göre üretimler yapıldığında GPS anteninin simülasyon ile üretim sonuçları arasında, üretim ve malzemelerin kendilerinden kaynaklı tolerans etkileri 15-20 MHz düzeyinde olmuştur. GPS anteni üzerinde simülasyonda yapılan oynamalar sonucunda ne kadarlık değişim yapılacağı tek seferde görülmüştür ve üretilen ikinci GPS anteni ile isterler sağlanmıştır. Radom etkisi, simülasyon sonucundaki etki ile çok benzerlik göstermiştir. Üretilen GPS anteni, referans anten ile karşılaştırılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır.
- Simülasyon sonuçlarında elde edilen anten boyutuna göre üretimler yapıldığında GNSS anteninin simülasyon ile üretim sonuçları arasında, üretim ve malzemelerin kendilerinden kaynaklı tolerans etkileri 75-100 MHz düzeyinde olmuştur. Beklenenden fazla çıkan üretim farkları 3 ayrı üretim ile simülasyon değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Üçüncü üretim ve deneme sonucunda anten tasarımı istenilen performansa gelmiştir. Üretilen GNSS anteni, referans anten ile karşılaştırılmıştır ve sonuçların olumlu olduğu görülmüştür.

Üretilen antenlerde yaşanan tolerans farklarında üretim aşamasının ve üretim cihazının etkileri, kullanılan alttaş malzemelerinin kendi tolerans etkileri ve radom malzemesinin elektriksel tolerans etkilerinin olduğu düşünülmektedir. Burada yapılan çalışmalara ek olarak geniş bantlı ve çift bantlı anten tasarımı yapılarak GNSS L1 ve L2 bandını kapsayan daha küçük antenler tasarlanabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda yama antenin boyutunun küçültülerek dizi halinde sarmal bir yapıda tasarlanabileceği ve radom ile kaplanabileceği düşünülmüş ve geliştirme aşamasında değerlendirilecektir. Bu çalışmalarda tasarlanan antenler pasif anten olduğundan, bu sistemlerin aktif anten tasarımlarının da yapılabileceği ve üretilebileceği düşünülmüştür.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] J.R. James, P.S. Hall, Handbook of Microstrip Antennas, Vol. 2, Peter Peregrinus Ltd., London, 1989.
- [2] D.G. Fang, Antenna Theory and Microstrip Antennas, CRC Press, New York, 2010.
- [3] S. Gao, Q. Luo, F. Zhu, Circularly Polarized Antennas, Wiley, UK, 2014.
- [4] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Design Handbook, Artech House, Boston-London, 2001.
- [5] E. G. Geterud, Design and Optimaization of Wideband Hat-Fed Reflector Antenna with Radome for Satellite Earth Station, Lisans Tezi, Department of Signals and Systems Chalmer University of Technology, Göteborg, 2012.
- [6] S.L.S. Yang, K.F. Lee, A.A. Kishk, Design and Study of Wideband Single Feed Circularly Polarized Microstrip Antennas, PIER 80, 45-61, 2008.
- [7] I.J. Bahl, P. Bhartia, S.S. Stuchly, Design of Microstrip Antennas Covered with a Dielectric Layer, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. Ap-30, No. 2, 1982.
- [8] S.P. Singh, A. Kumar, V.K. Singh, Sagar, A Broadband Wide Beamwidth Circularly Polarized Microstrip Yama Antenna with Conformal Radome for High-Speed Airborne Communication, IEEE, 2017.
- [9] V. Saidulu, K.S. Rao, P.V.D.S. Rao, The Characteristics of Rectangular and Square Yama Antennas with Superstrate, IJESSET, Vol. 6, 298-307, 2013.
- [10] W. F. Silva, I. Bianchi, T. P. Santos, Design of a Blade Antenna Embedded in Low-Cost Dielectric Substrate, Journal of Microwaves Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 16, No. 1, March 2017.
- [11] C. A. Balanis, Antenna Theory - Analysis and Design, Wiley, Third Edition, USA, 2005.
- [12] D. M. Pozar, Microstrip Antennas, Proc. IEEE, Vol. 80, No. 1, pp. 79-81, January 1992.
- [13] D. R. Jackson, Antenna Engineering Handbook, Chapter 7, McGraw-Hill, 2007.
- [14] D. M. Pozar, D. H. Schaubert, Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays, Wiley, New York, 1995.
- [15] M. Küpeli, Çift Bant Mikroşerit GPS Anten Analizi ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2017.

- [16] D.J. Kozakoff, Analysis of Radome-Enclosed Antennas, 2nd Edition, Artec House, Boston-London, 2010.
- [17] L. Griffiths, A Fundamental and Technical Review of Radomes, MPDIGEST, 2008.
- [18] D.G. Burks, Antenna Engineering Handbook, Chapter 53 Radomes, McGraw-Hill, 2007.
- [19] D. Davis, F. Mathew, N. Seenivasaraja, A. Karthikeyan, Design and Analysis of Different Types of Aircraft Radome, IJERT, 2015.
- [20] Military Specification, MIL-R-7705B, ABD, 1975.
- [21] NovAtel, An Introduction to GNSS, 2nd Edition, NovAtel Inc., Kanada, 2015.
- [22] X. Chen, C.G. Parini, B. Collins, Y. Yao, M.U. Rehman, Antennas for Global Navigation Satellite Systems, First Edition, Wiley, 2012.
- [23] B.H. Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle, GNSS-Global Navigation Satellite Systems, Springer, Wien, 2008.
- [24] Princeton University, Global Navigation Satellite System (GNSS), <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf> , (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2019).
- [25] J.H. Wang, Antennas for Global Navigation Satellite System (GNSS), IEEE, Vol. 100, No. 7, 2012.
- [26] A. Joseph, GNSS Solutions: Measuring GNSS Signal Strength, InsideGNSS, November-December 2010.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/~~DOKTORA~~ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 01/10/2019

Tez Başlığı / Konusu: RADOMLU, DAİRESEL POLARİZASYONLU L1 BANT GPS VE GNSS ANTENİ TASARIMI

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 82 sayfalık kısmına ilişkin, 01/10/2019 tarihinde şahsım/~~tez danışmanım~~ tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

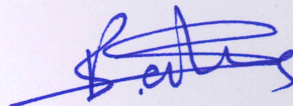
Tarih ve İmza

01/10/2019

Adı Soyadı: Onur AKTAŞ  
Öğrenci No: N16126643  
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği  
Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

  
Prof. Dr. Birsen Saka  
(Unvan, Ad Soyad, İmza)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Onur AKTAŞ  
Doğum yeri : Antalya  
Doğum tarihi : 06/07/1991  
Medeni hali : Bekar  
Yazışma adresi : ROKETSAN A.Ş. Elmadağ/ANKARA  
Telefon : 05352379857  
Elektronik posta adresi : [aktas.onurr@gmail.com](mailto:aktas.onurr@gmail.com) / onur.aktas@roketsan.com.tr  
Yabancı dili : İngilizce

### EĞİTİM DURUMU

Lise : Maltepe Askeri Lisesi  
Lisans : Hacettepe Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği

### İş Tecrübesi

Temmuz-Ekim 2016 : Mühendis, ATEL Teknoloji ve Savunma Sanayi A.Ş.  
Kasım 2016- ... : Aviyonik Sistem Tasarım Mühendisi, ROKETSAN A.Ş.