

# **ÇOK GENİŞ BANTLI DOĞRUDAN BESLENMİŞ RADOMLU ÇİFT KONİK ANTEN ANALİZ VE TASARIMI**

## **ANALYSIS AND DESIGN OF ULTRA WIDEBAND DIRECT-FED BICONICAL ANTENNA WITH RADOME**

**İSMAİL ÇOR**

**Prof. Dr. Birsen Saka Tanatar**  
**Tez Danışmanı**

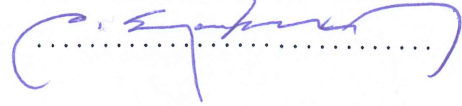
Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak hazırlanmıştır.

2018

**İSMAİL ÇOR'un** hazırladığı **Çok Geniş Bantlı Doğrudan Beslenmiş Radomlu Çift Konik Anten Analiz ve Tasarımı** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

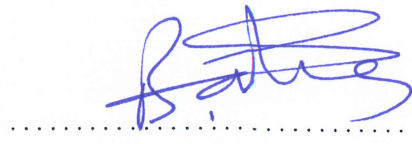
Prof.Dr. Asım Egemen Yılmaz

Başkan



Prof. Dr. Birsen Saka Tanatar

Danışman



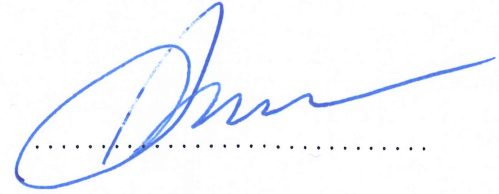
Prof.Dr. Adnan Köksal

Üye



Prof.Dr. Çiğdem Seçkin Gürel

Üye



Doç.Dr. Özlem Özgün

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI 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.

- ☒ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☐ **Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ **Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- ☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

21/ 03 / 2018



İSMAİL ÇOR

## 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 değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

21 / 03 / 2018



İsmail Çor



## ÖZET

### ÇOK GENİŞ BANTLI DOĞRUDAN BESLENMİŞ RADOMLU ÇİFT KONİK ANTEN ANALİZ VE TASARIMI

İSMAİL ÇOR

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen Saka Tanatar

Mart 2018, 92 sayfa

Mevcut eş yönlü antenlerin bir çoğunun dar bantlı olması, farklı frekans bantları için birden fazla anten kullanılması gibi zorluklara neden olur. Eş yönlü antenlerin farklı frekans bantlarında yaygın kullanımı geniş bantlı eş yönlü antenlerin tasarımını ihtiyaç haline getirmiştir. Çift konik anten bu ihtiyacı karşılayan en bilinen eşyönlü antenlerden birisidir. Çift konik antenler literatürde dar açılı ve geniş açılı olmak üzere iki kategoride incelenir. Dar açılı çift konik anten, dipol anten ile benzerlikler gösterir. Bu nedenle çift konik antenlere ait çalışmaların doğrulanmasında dipol antenin referans olarak kullanımı hedeflenmiştir.

Anten tasarımındaki önemli sorunlardan birisi olan empedans uyumsuzluğu, genellikle anten girişine entegre edilen bir empedans uyumlama devresi ile çözülmeye çalışılır. Ancak daha pratik bir çözüm olarak anten empedansı, anten tasarımı sırasında besleme hattının empedansına uygun hale getirilebilir. Doğrudan besleme olarak adlandırılan bu tekniğin çift konik antende kullanımı hedeflenmektedir.

Radom anteni çevresel etkenlerden koruyan yapıdır. Ancak radomun anteni çevresel etkilerden korunurken elektromanyetik dalga geçirgenliğini etkilememesi gerekmektedir. Bu iki özelliği birden sağlamasının gerekli olması, radom tasarımlarını bir mühendislik problemi haline getirmiştir. Sandviç ve tek katman olarak tasarlanan radomların, özellikle sahadaki antenler için kullanımı hayati önemdedir.

Bu tez kapsamında, ilk kısımda geniş bantta bir çift konik antenin doğrudan besleme tekniğine uygun şekilde tasarlanması hedeflenmiştir. İkinci kısımda ise yine geniş bantta çalışmaya uygun bir radom tasarımı üzerine çalışılmış, tasarımların ardından eniyileme çalışmaları yapılarak anten ve radomun üretimi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Eş Yönlü Anten, Geniş Bant, Çift Konik Anten, Doğrudan Besleme, Radom, Sandviç Radom, Tek Katman Radom, Eniyileme



## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS AND DESIGN OF ULTRA WIDEBAND DIRECT-FED BICONICAL ANTENNA WITH RADOME**

**İSMAİL ÇOR**

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

**Supervisor: Prof. Dr. Birsen Saka Tanatar**

**March 2018, 92 pages**

A large number of available omnidirectional antennas are narrow band which causes difficulties such as the use of multiple antennas for different frequency bands. The widespread use of omnidirectional antennas in different frequency bands makes the design of broadband omnidirectional antennas a necessity. The biconical antenna is one of the best-known omnidirectional antennas that meets this necessity. In the literature, biconical antennas are divided into two categories as narrow angle and wide angle. Narrow angle biconical antenna shows similarities with dipole antenna. For this reason, the dipole antenna is intended to be used as a reference in verifying the function of biconical antennas.

Impedance mismatch as one of the important problems in antenna design, is usually solved by an impedance matching circuit integrated into the antenna input. However, as a more practical solution, the antenna impedance can be matched to the impedance of the feed line during antenna design. This technique, called direct feed, is aimed at the use of biconical antenna.

Radome protects the antenna from environmental factors. However, the radome must not affect the electromagnetic wave propagation while the antenna is protected from this environmental factors. Fulfilling these two requirements, makes radom design an engineering problem. The use of radomes designed as sandwich and monolithic, espe-

cially for antennas on the ground, is vital.

In the first part of this thesis, it is aimed to design a wideband biconical antenna in accordance with the direct feed technique. In the second part, a radome design suitable for wideband applications is investigated. Following that, the antenna and radome are both manufactured after optimization process and the test results are included in the thesis.

**Keywords:** Omnidirectional Antenna, Wideband, Biconical Antenna, Direct Feed, Radome, Sandwich Radome, Monolithic Radome, Optimization



## TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşmasında sağladığı değerli fikir ve yardımların yanında, ilk günden bu yana gösterdiği anlayış ve sabırdan dolayı sayın Prof. Dr. Birsen Saka Tanatar'a teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerini paylaşan değerli jüri üyelerine teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve beni daima destekleyen aileme teşekkür ederim.

İlk profesyonel maçına çıktığı andan bu yana oynadığı futbolla motivasyon kaynağım olan Lionel Andrés Messi Cuccitini'ye teşekkür ederim.



# İÇİNDEKİLER

|                                                                 | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET .....                                                      | i            |
| ABSTRACT .....                                                  | iii          |
| TEŞEKKÜR .....                                                  | v            |
| İÇİNDEKİLER .....                                               | vi           |
| ŞEKİLLER .....                                                  | viii         |
| ÇİZELGELER .....                                                | xiii         |
| KISALTMALAR .....                                               | xiv          |
| SÖZLÜK DİZİNİ .....                                             | xv           |
| 1. GİRİŞ .....                                                  | 1            |
| 2. EŞ YÖNLÜ ANTEN TARİHÇESİ .....                               | 3            |
| 3. ÇİFT KONİK ANTEN TEORİSİ .....                               | 8            |
| 3.1. Dipol Anten ve Çift Konik Anten İlişkisi .....             | 8            |
| 3.1.1. Çift Konik Anten Empedans Hesaplamaları .....            | 9            |
| 3.1.1.1. Geniş Açılı Çift Konik Anten Empedans Hesaplamaları .. | 9            |
| 3.1.1.2. Dar Açılı Çift Konik Anten Empedans Hesaplamaları .... | 12           |
| 3.1.2. Dipol Anten Empedans Hesaplamaları .....                 | 15           |
| 4. ÇİFT KONİK ANTEN TASARIMI .....                              | 20           |
| 4.1. Açık Benzetimleri .....                                    | 20           |
| 4.2. Koni Yüksekliği Benzetimleri .....                         | 24           |
| 4.3. Koni Açıklığı Benzetimleri .....                           | 27           |
| 4.4. Anten Performansı Eniyileme Çalışmaları .....              | 30           |
| 5. RADOM TEKNOLOJİSİ, ANALİZİ VE TASARIMI .....                 | 35           |
| 5.1. Radom Malzemelerinin Özellikleri .....                     | 36           |
| 5.2. Radom Yapıları .....                                       | 36           |
| 5.2.1. Tek Katman Radom .....                                   | 36           |

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.2. Sandviç Radom .....                                    | 38 |
| 5.3. Radomun Teorik İncelemesi .....                          | 41 |
| 5.3.1. Tek Katman Radom İncelemesi .....                      | 43 |
| 5.3.2. A-Sandviç Radom İncelemesi .....                       | 48 |
| 5.4. Genetik Algoritma ile Katman Kalınlığı Çalışmaları ..... | 54 |
| 5.4.1. Tek Katman Radoma Genetik Algoritma Uygulaması .....   | 55 |
| 5.4.2. A-Sandviç Radoma Genetik Algoritma Uygulaması .....    | 56 |
| 6. ANTEN VE RADOM ENTEGRE TASARIMI .....                      | 58 |
| 7. SONUÇLAR .....                                             | 63 |
| KAYNAKLAR .....                                               | 69 |
| EK A .....                                                    | 72 |
| A.1. Tek Katman Radom Grafikleri .....                        | 72 |
| A.1.1. Teorik Sonuçlar .....                                  | 72 |
| A.1.2. CST Tasarım Sonuçları .....                            | 76 |
| A.2. A-Sandviç Radom Grafikleri .....                         | 80 |
| A.2.1. Teorik Sonuçlar .....                                  | 80 |
| A.2.2. CST Tasarım Sonuçları .....                            | 85 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                | 91 |

## ŞEKİLLER

### Sayfa

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Işıma örüntüleri a) Yönsüz anten ışıma örüntüsü b) Yönlü anten ışıma örüntüsü c) Eş yönlü anten ışıma örüntüsü ..... | 3  |
| Şekil 2.2. Uzunluklarına göre dipol anten ışıma akım dağılımları [5] .....                                                      | 4  |
| Şekil 2.3. Monopol anten .....                                                                                                  | 5  |
| Şekil 2.4. Marconi tarafından tasarlanan konik anten [8] .....                                                                  | 5  |
| Şekil 2.5. Doğrudan beslemeli çift konik anten [30] .....                                                                       | 7  |
| Şekil 3.1. Çift konik anten geometrisi .....                                                                                    | 8  |
| Şekil 3.2. Çift konik anten yanal uzunluğu ve koni açısı .....                                                                  | 9  |
| Şekil 3.3. $30^\circ$ koni açısında çift konik antenin dalga boyu cinsinden anten boyuna göre empedansı .....                   | 10 |
| Şekil 3.4. $45^\circ$ koni açısında çift konik antenin dalga boyu cinsinden anten boyuna göre empedansı .....                   | 11 |
| Şekil 3.5. $60^\circ$ koni açısında çift konik antenin dalga boyu cinsinden anten boyuna göre empedansı .....                   | 11 |
| Şekil 3.6. $75^\circ$ koni açısında çift konik antenin dalga boyu cinsinden anten boyuna göre empedansı .....                   | 12 |
| Şekil 3.7. Dar açılı çift konik anten .....                                                                                     | 13 |
| Şekil 3.8. Dar açılı çift konik anten direnci .....                                                                             | 14 |
| Şekil 3.9. Dar açılı çift konik anten reaktansı .....                                                                           | 14 |
| Şekil 3.10. Dipol anten giriş ve ışıma direnç ve reaktansları a) Direnç b) Reaktans                                             | 18 |
| Şekil 3.11. Dipol ve dar açılı konik anten giriş direnç ve reaktansları a) Direnç b) Reaktans .....                             | 19 |
| Şekil 4.1. Çift konik anten parametreleri .....                                                                                 | 20 |
| Şekil 4.2. Farklı açılarda geri dönüş kaybı .....                                                                               | 21 |
| Şekil 4.3. Farklı açılarda duran dalga gerilim oranı .....                                                                      | 21 |
| Şekil 4.4. Farklı açılarda için E-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz .....                                    | 22 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.5. Farklı açı değerleri için H-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz .....              | 22 |
| Şekil 4.6. 50° koni yarım açısında anten giriş direnci .....                                                   | 23 |
| Şekil 4.7. 50° koni yarım açısında anten giriş reaktansı .....                                                 | 24 |
| Şekil 4.8. Farklı koni yüksekliği değerlerinde geri dönüş kaybı .....                                          | 25 |
| Şekil 4.9. Farklı koni yüksekliği değerlerinde duran dalga gerilim oranı .....                                 | 25 |
| Şekil 4.10. Farklı koni yüksekliği değerleri için E-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz ..... | 26 |
| Şekil 4.11. Farklı koni yüksekliği değerleri için H-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz ..... | 26 |
| Şekil 4.12. Farklı koni açıklığı değerlerinde geri dönüş kaybı .....                                           | 28 |
| Şekil 4.13. Farklı koni açıklığı değerlerinde duran dalga gerilim oranı .....                                  | 28 |
| Şekil 4.14. Farklı koni açıklığı değerleri için E-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz .....   | 29 |
| Şekil 4.15. Farklı koni açıklığı değerleri için H-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz .....   | 29 |
| Şekil 4.16. Eniyilenmiş anten parametreleri için geri dönüş kaybı .....                                        | 31 |
| Şekil 4.17. Eniyilenmiş anten parametreleri için duran dalga gerilim oranı .....                               | 31 |
| Şekil 4.18. Eniyilenmiş anten parametreleri için E-düzlem ışıma örüntüleri .....                               | 32 |
| Şekil 4.19. Eniyilenmiş anten parametreleri için H-düzlem ışıma örüntüleri .....                               | 33 |
| Şekil 4.20. Eniyilenmiş anten parametreleri için kazanç değerleri .....                                        | 34 |
| Şekil 5.1. Tek parça ve sandviç radom tasarımları .....                                                        | 36 |
| Şekil 5.2. N-Tabakalı radom yapısı .....                                                                       | 41 |
| Şekil 5.3. Farklı radom malzemelerinin 3 mm kalınlıkta iletim katsayısı .....                                  | 43 |
| Şekil 5.4. Teflon malzemenin farklı katman kalınlıklarında iletim katsayısı .....                              | 44 |
| Şekil 5.5. Teflon malzemenin farklı geliş açılarında iletim katsayısı .....                                    | 45 |
| Şekil 5.6. Cam elyaf malzeme için teorik-tasarım karşılaştırması .....                                         | 45 |
| Şekil 5.7. CST ortamında tasarlanan tek katmanlı radom parça tasarımı .....                                    | 46 |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.8. Farklı radom malzemelerinin 3 mm kalınlıkta iletim katsayısı .....                       | 46 |
| Şekil 5.9. Teflon malzemenin farklı katman kalınlıklarında iletim katsayısı .....                   | 47 |
| Şekil 5.10. Teflon malzemenin farklı geliş açılarında iletim katsayısı .....                        | 47 |
| Şekil 5.11. Farklı radom malzemelerinin iletim katsayısı .....                                      | 49 |
| Şekil 5.12. Spectra-Polyester malzeme için farklı dış katman kalınlıklarında iletim katsayısı ..... | 49 |
| Şekil 5.13. Spectra-Polyester malzeme için farklı bal peteği kalınlıklarında iletim katsayısı ..... | 50 |
| Şekil 5.14. Spectra-Polyester malzeme için farklı dalga geliş açılarında iletim katsayısı .....     | 50 |
| Şekil 5.15. CST ortamında tasarlanan A-Sandviç radom tasarımı .....                                 | 51 |
| Şekil 5.16. Farklı radom malzemelerinin iletim katsayısı .....                                      | 52 |
| Şekil 5.17. Spectra-Polyester malzeme için farklı dış katman kalınlıklarında iletim katsayısı ..... | 52 |
| Şekil 5.18. Spectra-Polyester malzeme için farklı bal peteği kalınlıklarında iletim katsayısı ..... | 53 |
| Şekil 5.19. Spectra-Polyester malzeme için farklı dalga geliş açılarında iletim katsayısı .....     | 53 |
| Şekil 5.20. Genetik algoritma akış diyagramı .....                                                  | 55 |
| Şekil 5.21. Tek katman radom katman kalınlığı eniyileme sonuçları .....                             | 56 |
| Şekil 5.22. A-Sandviç radom katman kalınlıkları eniyileme sonuçları .....                           | 57 |
| Şekil 6.1. Çift konik anten ve radom entegre tasarımı .....                                         | 58 |
| Şekil 6.2. Entegre tasarım için geri dönüş kaybı .....                                              | 59 |
| Şekil 6.3. Entegre tasarım için duran dalga gerilim oranı .....                                     | 59 |
| Şekil 6.4. Entegre tasarım için E-düzlem ışıma örüntüleri .....                                     | 60 |
| Şekil 6.5. Entegre tasarım için H-düzlem ışıma örüntüleri .....                                     | 61 |
| Şekil 6.6. Entegre tasarım için elde edilen kazanç değerleri .....                                  | 62 |
| Şekil 7.1. Üretilen çift konik anten ve radom .....                                                 | 65 |
| Şekil 7.2. Üretilen çift konik anten ve radomun entegre yapısı .....                                | 65 |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 7.3. Çift konik anten üretim ve tasarım geri dönüş kaybı .....                                        | 66 |
| Şekil 7.4. Çift konik anten üretim ve tasarım duran dalga gerilim oranı .....                               | 66 |
| Şekil 7.5. Çift konik anten ile radom entegre yapısı için üretim ve tasarım geri dönüş kaybı .....          | 67 |
| Şekil 7.6. Çift konik anten ile radom entegre yapısı için üretim ve tasarım duran dalga gerilim oranı ..... | 68 |
| Şekil A.1. Farklı radom malzemelerinin 1 mm kalınlıkta iletim katsayısı .....                               | 72 |
| Şekil A.2. Farklı radom malzemelerinin 5 mm kalınlıkta iletim katsayısı .....                               | 72 |
| Şekil A.3. Farklı radom malzemelerinin 10 mm kalınlıkta iletim katsayısı .....                              | 73 |
| Şekil A.4. Farklı radom malzemelerinin $15^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..                | 73 |
| Şekil A.5. Farklı radom malzemelerinin $30^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..                | 74 |
| Şekil A.6. Farklı radom malzemelerinin $45^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..                | 74 |
| Şekil A.7. Farklı radom malzemelerinin $60^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..                | 75 |
| Şekil A.8. Farklı radom malzemelerinin $75^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..                | 75 |
| Şekil A.9. Farklı radom malzemelerinin 1 mm kalınlıkta iletim katsayısı .....                               | 76 |
| Şekil A.10. Farklı radom malzemelerinin 5 mm kalınlıkta iletim katsayısı .....                              | 76 |
| Şekil A.11. Farklı radom malzemelerinin 10 mm kalınlıkta iletim katsayısı .....                             | 77 |
| Şekil A.12. Farklı radom malzemelerinin $15^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..               | 77 |
| Şekil A.13. Farklı radom malzemelerinin $30^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..               | 78 |
| Şekil A.14. Farklı radom malzemelerinin $45^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..               | 78 |
| Şekil A.15. Farklı radom malzemelerinin $60^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..               | 79 |
| Şekil A.16. Farklı radom malzemelerinin $75^{\circ}$ dalga geliş açısında iletim katsayısı ..               | 79 |
| Şekil A.17. Farklı radom malzemelerinin 0.1 mm dış tabaka kalınlığında iletim katsayısı .....               | 80 |
| Şekil A.18. Farklı radom malzemelerinin 0.3 mm dış tabaka kalınlığında iletim katsayısı .....               | 80 |
| Şekil A.19. Farklı radom malzemelerinin 1 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı .....                | 81 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil A.20. Farklı radom malzemelerinin 5 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı .....  | 82 |
| Şekil A.21. Farklı radom malzemelerinin 10 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı ..... | 82 |
| Şekil A.22. Farklı radom malzemelerinin 15° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 83 |
| Şekil A.23. Farklı radom malzemelerinin 30° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 83 |
| Şekil A.24. Farklı radom malzemelerinin 45° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 84 |
| Şekil A.25. Farklı radom malzemelerinin 60° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 84 |
| Şekil A.26. Farklı radom malzemelerinin 75° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 85 |
| Şekil A.27. Farklı radom malzemelerinin 0.1 mm dış tabaka kalınlığında iletim katsayısı ..... | 85 |
| Şekil A.28. Farklı radom malzemelerinin 0.3 mm dış tabaka kalınlığında iletim katsayısı ..... | 86 |
| Şekil A.29. Farklı radom malzemelerinin 1 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı .....  | 86 |
| Şekil A.30. Farklı radom malzemelerinin 5 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı .....  | 87 |
| Şekil A.31. Farklı radom malzemelerinin 10 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı ..... | 87 |
| Şekil A.32. Farklı radom malzemelerinin 15° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 88 |
| Şekil A.33. Farklı radom malzemelerinin 30° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 88 |
| Şekil A.34. Farklı radom malzemelerinin 45° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 89 |
| Şekil A.35. Farklı radom malzemelerinin 60° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 89 |
| Şekil A.36. Farklı radom malzemelerinin 75° dalga geliş açısında iletim katsayısı ..          | 90 |

## ÇİZELGELER

|                                                                                                                 | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 4.1. Farklı aç ı değ erleri için benzetim seti .....                                                    | 21           |
| Çizelge 4.2. Farklı koni yüksekli ğ i değ erleri için benzetim seti .....                                       | 24           |
| Çizelge 4.3. Farklı koni açıkl ığı değ erleri için benzetim seti .....                                          | 27           |
| Çizelge 5.1. Baz ı radom plastiklerinin farklı frekanslardaki elektriksel özellikleri ...                       | 37           |
| Çizelge 5.2. Baz ı plaka ve reç inelerin elektriksel özellikleri .....                                          | 39           |
| Çizelge 5.3. Baz ı plakaların reç inelerle birlikte kullanıld ığında X bandındaki elektriksel özellikleri ..... | 40           |



## KISALTMALAR

|       |                               |
|-------|-------------------------------|
| BALUN | Balanced-to-Unbalanced        |
| BSE   | Boresight Error               |
| BSES  | Boresight Error Slope         |
| DF    | Direction Finding             |
| EMC   | Electromagnetic Compatibility |
| EMI   | Electromagnetic Interference  |
| GPR   | Ground Penetrating Radar      |
| SMA   | SubMiniature version A        |
| VSWR  | Voltage Standing Wave Ratio   |
| Wi-Fi | Wireless Fidelity             |

## SÖZLÜK DİZİNİ

|                           |                                 |
|---------------------------|---------------------------------|
| Bal Peteği                | : Honeycomb                     |
| Çift Konik Anten          | : Biconical Antenna             |
| Dar Bant                  | : Narrowband                    |
| Dielektrik Katsayısı      | : Dielectric Constant           |
| Doğrudan Besleme          | : Direct Feed                   |
| Duran Dalga Gerilim Oranı | : Voltage Standing Wave Ratio   |
| Elektromanyetik Girişim   | : Electromagnetic Interference  |
| Elektromanyetik Uyumluluk | : Electromagnetic Compatibility |
| Balun                     | : Balanced-to-Unbalanced        |
| Empedans Uyumsuzluğu      | : Impedance Mismatch            |
| Eniyileme                 | : Optimization                  |
| Eşeksenel                 | : Coaxial                       |
| Eşyönlü                   | : Omnidirectional               |
| Geniş Bant                | : Wideband                      |
| Geri Dönüş Kaybı          | : Return Loss                   |
| Işıma Örüntüsü            | : Radiation Pattern             |
| İletim Hattı              | : Transmission Line             |
| İletim Katsayısı          | : Transmission Coefficient      |
| Kayıp Tanjantı            | : Tangent Loss                  |
| Kazanç                    | : Gain                          |
| Tek Katman                | : Monolithic                    |
| Yan Kulakçık Bozulması    | : Sidelobe Degradation          |
| Yere Nüfuz Radarı         | : Ground Penetrating Radar      |
| Yön Bulma                 | : Direction Finding             |
| Yönlendirme Hatası        | : Boresight Error               |
| Yönlü                     | : Directional                   |
| Yönsüz                    | : Isotropic                     |

# 1. GİRİŞ

Antenler ilk üretilmeye başladığı tarihlerden itibaren farklı özelliklere göre sınıflandırılmışlardır. Bu özelliklerden birisi de anten ışıma örüntüsüdür . Işıma örüntülerine göre antenler, eş yönlü antenler , yönlü antenler ve yönsüz antenler olmak üzere 3 kategoride sınıflandırılır [1]. Yönsüz anten ışıma örüntüsü sadece teorik olarak kullanılırken, eş yönlü ve yönlü antenler gerçek hayatta da kullanılmaktadır.

Eş yönlü antenler sadece bir düzlemde her yöne eşit ışıma yapan antenlerdir ve bu özellikleri yönlü antenlere göre en önemli avantajlarıdır [2]. Bu nedenle kule antenleri, ev içi kablosuz haberleşme sistemleri ve araç antenlerinde eş yönlü antenler kullanılmaktadır [2, 3]. Eş yönlü antenlerin en önemli dezavantajları ise her yöne eşit ışıma yapmalarından dolayı ışıma güçlerinin düşük olmasıdır.

Eş yönlü antenlerin ilk örnekleri 19. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. En bilinen örneği dipol antendir [4, 5]. Monopol anten ve kablosuz haberleşme protokolünün tipik anteni olan rubber duck anten diğer bilinen eş yönlü anten örnekleridir [6, 7]. Bu antenlerin eş yönlü olmaları dışında bir diğer ortak özellikleri ise dar bantlı olmalarıdır. Bir başka eş yönlü anten tipi olan çift konik antenler ise diğerlerinin aksine geniş bantta çalışma avantajı sunmaktadır [8-18]. Bu özellikleri nedeniyle çift konik anten, üstünde sıkça çalışılan ve bir çok alanda kullanılan bir anten türüdür. Çift konik antenlerin sık kullanıldığı alanlar, Elektromanyetik Uyumluluk ve Elektromanyetik Girişim testleri, yön bulma sistemleri, yere nüfuz eden radarlardır [19-29].

Anten sistemlerinin önemli sorunlarından birisi anten ile besleme hattı arasındaki empedans uyumsuzluğudur. Bu uyumsuzluğun giderilmesinin en bilinen yolu besleme hattı ile anten arasında balun kullanmaktır. Balun yapısının kullanımı antenlerde tasarım zorluğuna neden olabilmektedir. Bu nedenle bazı anten tasarımlarında anten empedansının, kullanılması planlanan besleme hattının empedansına uyumlandırılması tasarım esnasında yapılabilir. Böylece anten üretimden sonra balun kullanmadan doğrudan beslemeyle çalışır hale getirilebilir.

Bu tezin ilk kısmında geniş bantta doğrudan beslemeli çalışan bir çift konik anten tasarımı için teorik çalışmalar MATLAB ortamında yapılmıştır. Çift konik antenin geometri

açısından dipol anten ailesinden olması nedeniyle bu iki anten arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma boyunca dar ve geniş açılı çift konik anten olmak üzere iki ana başlık altında incelenen çift konik antenin empedans hesaplamaları yapılmıştır. Tez kapsamında tasarlanacak olan antenin empedans eşleme devresine ihtiyaç duymadan çalışması için, teorik kısımda anten empedansının olası eşeksenel besleme hattının empedansına eşit olmasını sağlayan koni açısı belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu teorik çalışmanın ardından CST Microwave Studio ortamında çift konik anten için tasarım çalışmaları yapılmıştır. Çift konik anten performansını etkileyen 3 ana parametre olan koni açısı, koni yüksekliği ve koniler arası açıklık üzerinden tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Anten performansını gösteren geri dönüş kaybı, duran dalga gerilim oranı ve kazanç değerlerine bakılarak uygun parametreler belirlenmiştir. Daha sonra bu parametreler üstünden eniyileme çalışmaları yapılarak anten tasarım bölümü tamamlanmıştır.

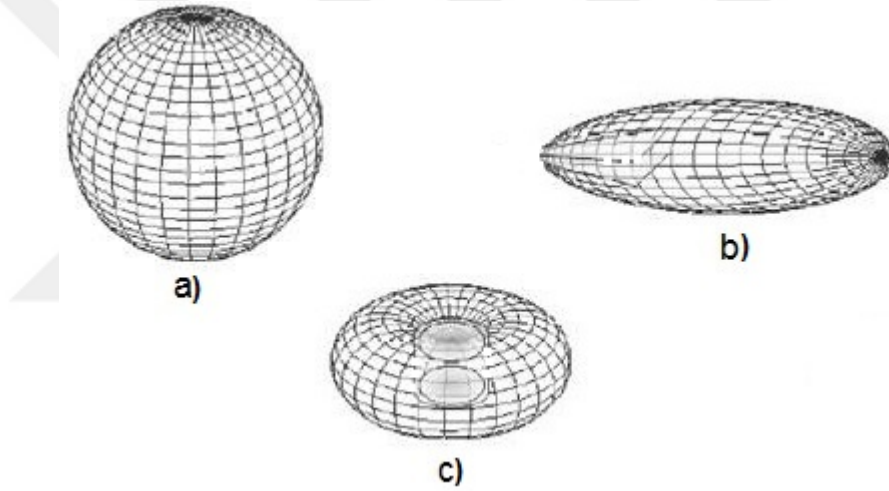
Radom anteni çevresel etkenlerden korunurken elektromanyetik geçirgenliğine etki etmeyen bir yapı olarak tanımlanır. Tezin bir sonraki bölümünde radom yapısına ait çalışmalar yapılmıştır. Radom çalışmaları önce matematiksel olarak MATLAB ortamında A-Sandviç ve tek katman radom tipleri için yapılmıştır. Daha sonra CST Microwave Studio ortamında 3 boyutlu tasarımı yapılan radom kesitlerine ait sonuçlar matematiksel sonuçlarla karşılaştırılarak tutarlılıkları incelenmiştir. Radom çalışmaları radom malzemesinin elektrik özellikleri, katman kalınlığı ve dalganın radom yüzeyine geliş açısı üzerinden yürütülmüştür. Her iki radom tipi için uygun malzemelere ve dalga geliş açılarına karar verildikten sonra katman kalınlıklarının eniyilenmesi için Genetik Algoritma eniyileme yöntemi kullanılmıştır.

Tezin altıncı bölümünde anten ve radom tasarım çalışmalarının tamamlanmasının ardından birlikte kullanılması planlanan bu iki yapı bir araya getirilmiş, entegre yapının benzetim çalışmaları yapılmıştır. Radomun şekli ile ilgili son eniyileme çalışmaları bu kısımda tamamlanmıştır.

Tezin son bölümünde ise üretilen anten ve radom yapılarının ölçümleri yapılmış, tasarım sonuçları ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

## 2. EŞ YÖNLÜ ANTEN TARİHÇESİ

Antenlerin sınıflandırılmasında kullanılan kavramlardan birisi ışıma örüntüsüdür. Işıma örüntülerine göre antenler üç gruba ayrılır: Yönsüz antenler, yönlü antenler ve eş yönlü antenler. Yönsüz antenler her yöne eşit güçte ışıma yapan ve diğer antenler için referans anten olarak kullanılan kayıpsız antenlerdir. Anten kazanç birimi yönsüz antenler referans alınarak dBi cinsinden ifade edilir. Yönlü antenler elektromanyetik dalgayı bir yönde diğer yönler göre daha güçlü yayan veya alan antenler olarak tanımlanır. Eş yönlü antenler ise sadece bir düzlemde her yöne eşit güçte ışıma yapan antenlerdir. Bu üç ışıma örüntüsü için örnekler Şekil 2.1’de gösterilmiştir [1].



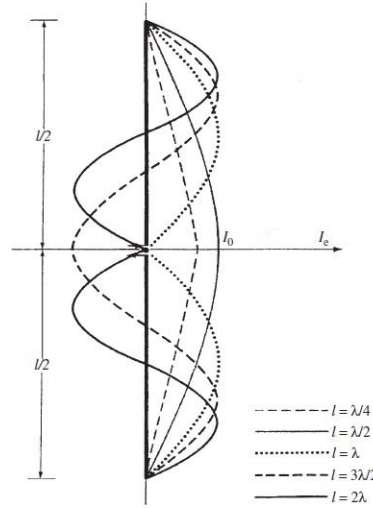
Şekil 2.1. Işıma örüntüleri a) Yönsüz anten ışıma örüntüsü b) Yönlü anten ışıma örüntüsü c) Eş yönlü anten ışıma örüntüsü

Antenler aracılığıyla sinyal iletmeye ve alınmaya başlandığı dönemlerden itibaren anten tasarımları genel çerçevede ikiye ayrılmıştır. Bunlardan ilki sinyali belirli bir noktaya iletmek için dar bir ışıma örüntüsü ve daha yüksek güçle ışıma yapan yönlendirilmiş/yönlü antenlerdir. Diğerisi ise bir ekseninde her yöne eşit güçte ışıma yapan eş yönlü antenlerdir [2]. Eş yönlü antenlerin yönlü antenlere göre daha düşük güçle ışıma yapması dezavantaj gibi görünse de bu durum her kullanım alanı ve şartta geçerli değildir. Özellikle farklı konumlarda birden fazla cihazın birbiri ile haberleşmesini gerektiren durumlarda eş yönlü antenlerin kullanımı gerekmektedir [3]. Eş yönlü antenlerin kullanım alanları arasında ev içi kablosuz haberleşme sistemleri, araç anten sistemleri, yansımanın çok olduğu dağlık veya ormanlık bölgeler, geniş araziler, çok noktaya yayın yapan

kule antenleri sayılabilir.

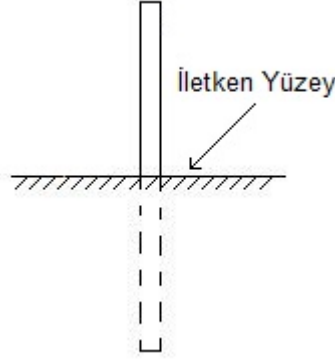
Günümüzde bir anten üzerinden çok noktalı haberleşme özellikle Wi-Fi antenleri ile öne çıkmaktadır. Tek bir Wi-Fi antenine farklı noktalardan çok sayıda bağlantı yapılarak haberleşme yapılması eş yönlü antenlerin avantajını ve önemini oldukça iyi vurgulamaktadır. Eş yönlü antenlerin yüksek kazançla sahip olmaması nedeniyle daha düşük haberleşme menzili sunması ise en önemli dezavantajdır. Eş yönlü antenlerin oldukça fazla çeşidi vardır ancak öne çıkan bazı eş yönlü antenler dipol anten, monopol anten, rubber duck anten ve çift konik anten olarak sıralanabilir.

1. **Dipol Anten:** Haberleşme sistemlerinde en çok kullanılan ve en basit anten tiplerinden biridir. Dipol anten ile ilgili ilk çalışmalar 1886 yılında Heinrich Hertz tarafından yapılmış, o tarihten günümüze kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmıştır [4, 5]. Dipol antenin ışıma örüntüsü anten boyunun dalga boyuna oranı ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki Şekil 2.2'de akım dağılımları ile gösterilmiştir.



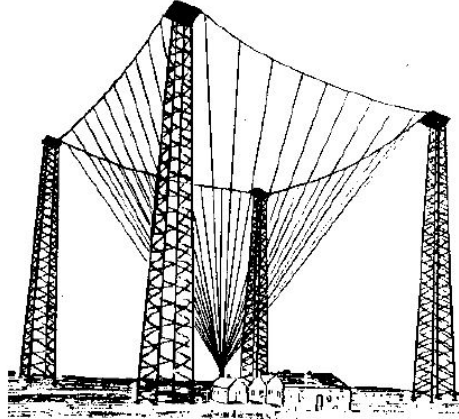
Şekil 2.2. Uzunluklarına göre dipol anten ışıma akım dağılımları [5]

2. **Monopol Anten:** Guglielmo Marconi tarafından 1895 yılında Heinrich Hertz'in daha önce keşfettiği dipol antenden faydalanılarak tasarlanmıştır. Yüksek elektrik iletkenliğine sahip bir yüzeyin üstüne yerleştirilerek tasarlanan monopol anten ışıma örüntüsü olarak dipol antene benzemektedir [6].



Şekil 2.3. Monopol anten

3. **Rubber Duck Anten:** İlk olarak Richard B. Johnson tarafından henüz öğrenciyken 1958 yılında tasarlanmıştır. İsmi antenin üstüne giydirilen kauçuk kılıftan almaktadır. Elektriksel olarak oldukça küçük olan rubber duck anten fonksiyonel olarak monopol antenle benzerlik göstermektedir. Taşınabilir ve küçük olması kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Rubber duck antenlerini önemli bir eş yönlü anten kılan özelliği günümüzde özellikle 2.4 GHz'de yayın yapan IEEE 802.11 kablosuz haberleşme protokolünün/protokollerinin tipik anteni olmasıdır [7].
4. **Çift Konik Anten:** İlk olarak 1897 yılında Oliver Lodge tarafından tasarlanan konik anten, 1905 yılında Marconi tarafından İngiltere'de Şekil 2.4'teki düzenek kurularak kuleler arasında sinyal iletimi için kullanılmıştır [8].



Şekil 2.4. Marconi tarafından tasarlanan konik anten [8]

Çift konik antenin en önemli özelliği geniş bantta yayın yapabiliyor olmasıdır. Yuka-

rıdaki eş yönlü anten örneklerinin tamamı çok dar bantta yayın yaparken çift konik antenin özellikle yüksek frekanslarda geniş bantta çalışabilmesi en büyük avantajıdır [9-18]. Bu tez kapsamında da 8- 18 GHz frekans bandında yayın yapması hedeflenen bir çift konik anten tasarlanmıştır.

Çift konik antenler birçok alanda kullanılan, üstünde çokça çalışılan anten türlerinden biridir. En yoğun kullanıldığı alanlardan birisi Elektromanyetik Uyumluluk ve Elektromanyetik Girişim testleridir [9, 19-21]. Elektromanyetik uyumluluk, alıcı bir cihaz, alet veya sistemin kendi işlevlerini yerine getirirken, aynı zamanda ve aynı ortamda bulunan diğer cihaz, alet ve sistemlerin tolerans gösteremeyeceği düzeyde elektromanyetik rahatsızlık vermeme yeteneğidir [22]. Elektromanyetik uyumluluk testlerinde kullanılan antenlerin giriş empedansı, yönlülük, kazanç gibi parametreler açısından oldukça hassas ve yanlızsız antenler olması önemli bir gerekliliktir. Çift konik antenler geniş bantta ilgili (bahsi geçen) parametrelere dair gereklilikleri sağlamış anten türlerinden birisidir [9].

Çift konik antenin kullanıldığı diğer bir alan da yön bulma sistemleridir [23-26]. Yön bulma sistemi, elektromanyetik ışıma yapan bir anten ya da sistemin yerinin tespit edilmesi için kullanılan sistemlerin genel adıdır. Birden fazla alıcı anten ya da tek bir mobil alıcının hareketi ile nirengi yöntemi kullanılarak vericinin konumu tespit edilir. Vericinin yaydığı sinyalin frekansı, genliği ya da faz/zaman değerleri kullanılarak konum tespiti yapılır.

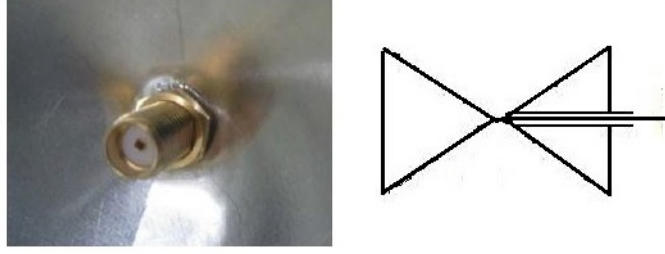
Bir diğer çift konik anten kullanım alanı ise yere nüfuz eden radardır. Yere nüfuz eden radarlarda kullanılan antenlerin çok yüksek frekans bant genişliğine sahip olması gerekliliği çift konik antenleri öne çıkarmaktadır [27, 28]. Kablosuz haberleşmede ve elektromanyetik destek ölçümlerinde de çift konik anten kullanılmaktadır. 20. yy ortalarında yarım-dalga antenden daha hassas olduğu gerekçesiyle televizyon anteni olarak çift konik anten kullanımı da mevcuttur [29].

Anten sistemlerinde besleme empedansı ile anten empedansı arasındaki uyumsuzluk önemli bir sorundur. Bu uyumsuzluğun giderilmesi için çözüm yollarından birisi empedans uyumlandırma bileşeni olan balun kullanmaktır. Çift konik antenlerin beslemesi sırasında da balun yapısına sıkça başvurulmaktadır. Balunların empedans uyumlandırma dışında besleme noktasında oluşabilecek dengesiz



akımlardan korumak ve istenmeyen frekansları bastırmak gibi faydaları da vardır.

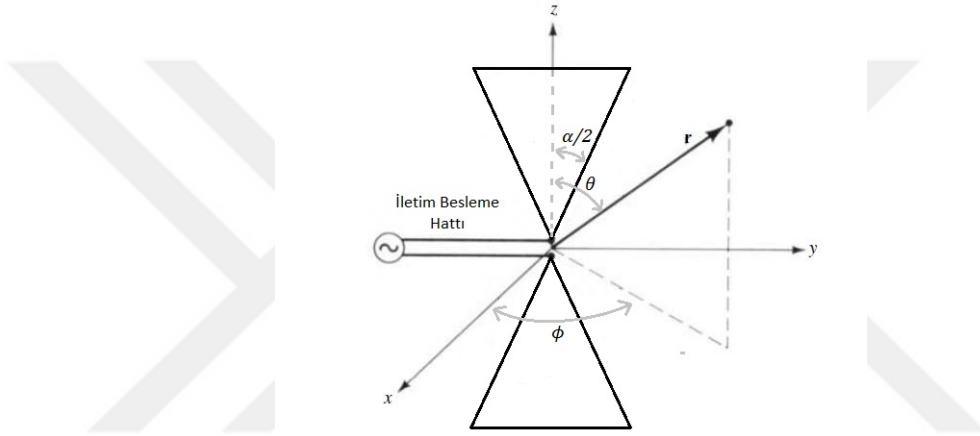
Çift konik antenlerin balun kullanılarak tasarlanan örneklerinin yanı sıra özellikle son yıllarda Şekil 2.5'te bir örneği gösterilen doğrudan beslemeli türleri üstünde de çalışılmaktadır [21, 30]. Tez kapsamında tasarlanan çift konik anten de doğrudan beslemeli olarak tasarlanmış, tasarım sırasında besleme ve anten empedansı uyumlandırılmaya çalışılmıştır.



Şekil 2.5. Doğrudan beslemeli çift konik anten [30]

### 3. ÇİFT KONİK ANTEN TEORİSİ

Eş yönlü antenlerin en sık kullanılanlarından dipol antenin en büyük dezavantajı dar bantlı olmasıdır. Bu nedenle eş yönlü anten tasarımlarında geniş bantta yayın yapan antenler önemli çalışma konularından birisi olmuştur. Dipol anten ailesinden sayılabilecek çift konik antenler bu dezavantajı ortadan kaldırmaktadır. İki koni anten yapısının Şekil 3.1'de olduğu gibi tasarlanmasıyla geniş bantta eş yönlü ışıma sağlanmıştır [31].



Şekil 3.1. Çift konik anten geometrisi

Bu tasarımda koniler arası uygulanan gerilimin orta noktadan dışa doğru yaydığı küresel dalgalar her  $(r, \theta = \theta_c, \phi)$  noktasında yüzey akımı  $I$  ve koniler arasında  $V$  gerilimine neden olur.

#### 3.1 Dipol Anten ve Çift Konik Anten İlişkisi

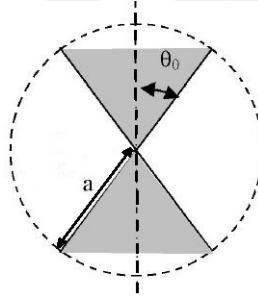
Hem ışıma hem de tasarım açısından dipol anten ile çift konik antenler arasında benzerlikler vardır. Çok dar açılı bir çift konik anten yapısal olarak dipol antene yakınsayacağından antenlerin teorik incelemelerinde de benzerlikler beklenmektedir. Bu bağlamda dipol ve çift konik antene ait empedans analiz çalışmaları yapılmıştır. Antenler incelenirken geniş açılı çift konik anten, dar açılı çift konik anten ve dipol anten olmak üzere 3 grupta incelenmiştir [5, 31, 32].

### 3.1.1 Çift Konik Anten Empedans Hesaplamaları

Çift konik anten tasarımında en kritik parametrelerden birisi koni açısıdır. Koni açısı anten ışımasına, bant genişliğine ve anten empedansına doğrudan etki eder. Çift konik antenler geniş açılı çift konik antenler ve dar açılı çift konik antenler olarak iki ana başlık altında incelenebilir [12, 33-36]. İki tür için de anten empedans hesaplamaları aşağıda gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1.1.1 Geniş Açılı Çift Konik Anten Empedans Hesaplamaları

Çift konik antenin performansında dolayısıyla da empedans hesaplamalarında Şekil 3.2'de gösterilen koninin yarıçapı  $\theta_0$  ve koni yanal uzunluğu  $a$  önemli rol oynar. Çift konik antenin karakteristik empedansı  $Z_0$  koni açısının bir fonksiyonudur ve Eşitlik 3.1'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır [12].



Şekil 3.2. Çift konik anten yanal uzunluğu ve koni açısı

$$Z_0 = 120 \ln \left( \cot \left( \frac{\theta_0}{2} \right) \right) \quad (3.1)$$

Çalışmalar sırasında geniş açılı çift konik anten için koni açısının  $30^\circ$ 'den büyük olduğu durumlar alınmış ve empedans hesaplamaları bu değerler için yapılmıştır. Anten giriş empedansı yukarıdaki eşitlikte hesaplanan karakteristik empedans değeri kullanılarak Eşitlik 3.2'de gösterildiği gibi hesaplanır [12, 35].

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 - \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \quad (3.2)$$

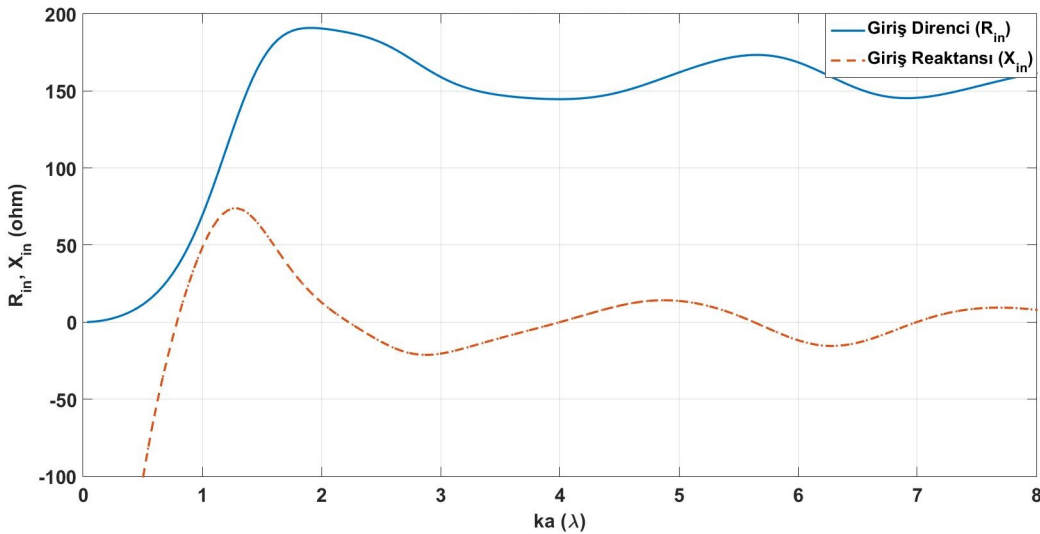
Eşitlik 3.2’de verilen  $\frac{\beta}{\alpha}$  oranı anten bölgesinde TEM dalgasının yansımaya-yayılma oranı olarak tanımlanır [35]. Eşitlik 3.3’te verildiği şekilde hesaplanır.

$$\frac{\beta}{\alpha} = e^{-j2ka} \frac{1 + j \frac{120}{Z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [P_n(\cos \theta_0)]^2 \zeta_n(ka)}{-1 + j \frac{120}{Z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [P_n(\cos \theta_0)]^2 \zeta_n(ka)} \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3’te kullanılan  $P_n$ , 1. dereceden Legendre Polinomunu simgelemektedir.  $\zeta$  ise 2. dereceden küresel Hankel fonksiyonu ile oluşturulmuş olup Eşitlik 3.4’te olduğu gibi hesaplanır.

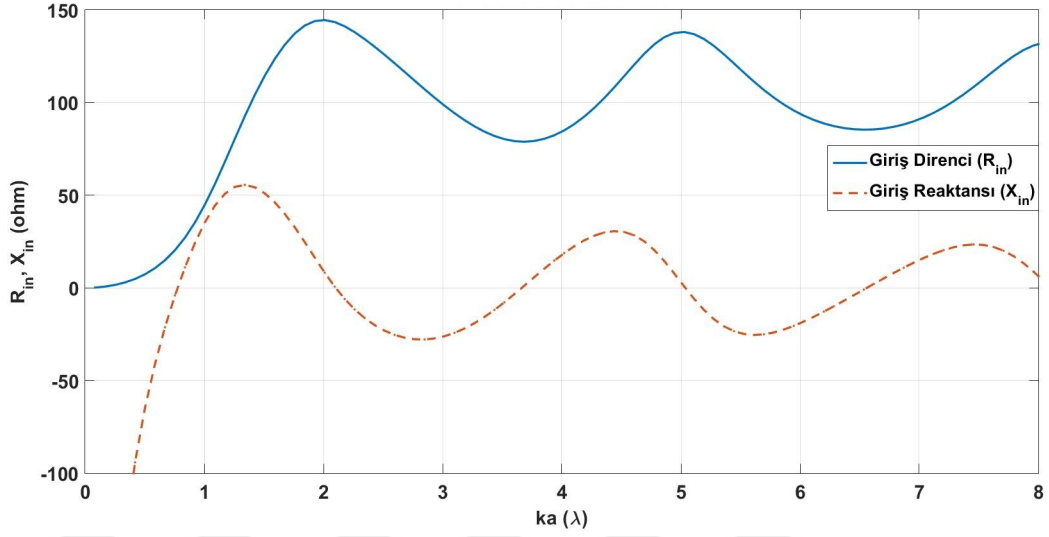
$$\zeta_n(ka) = \frac{h_n^{(2)}(ka)}{h_{n-1}^{(2)}(ka) - \frac{n}{ka} h_n^{(2)}(ka)} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak geniş açılı çift konik anten için empedans değerleri MATLAB ortamında hesaplanmıştır. Hesaplamalarda koni açıları  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  alınmış bu değerler için anten uzunluğuna karşılık hesaplanan anten direnci ve reaktansı gösterilmiştir.



Şekil 3.3.  $30^\circ$  koni açısında çift konik antenin dalga boyu cinsinden anten boyuna göre empedansı

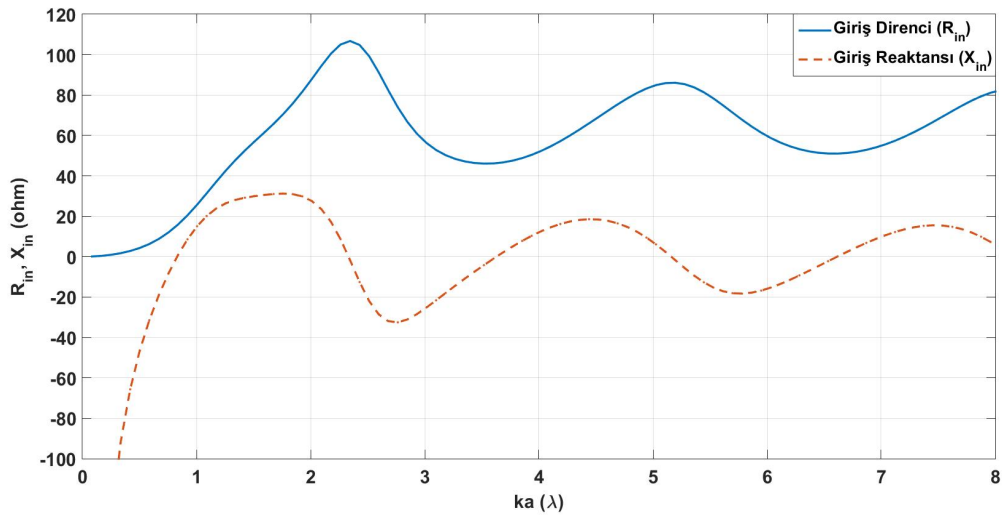
Şekil 3.3’te  $30^\circ$  koni açısına ait empedans değerleri gösterilmiş, direnç değerinin anten boyunun  $2\lambda$ ’ya yakın olduğu noktada  $190 \Omega$  seviyesine çıktığı ve daha büyük değerlerde



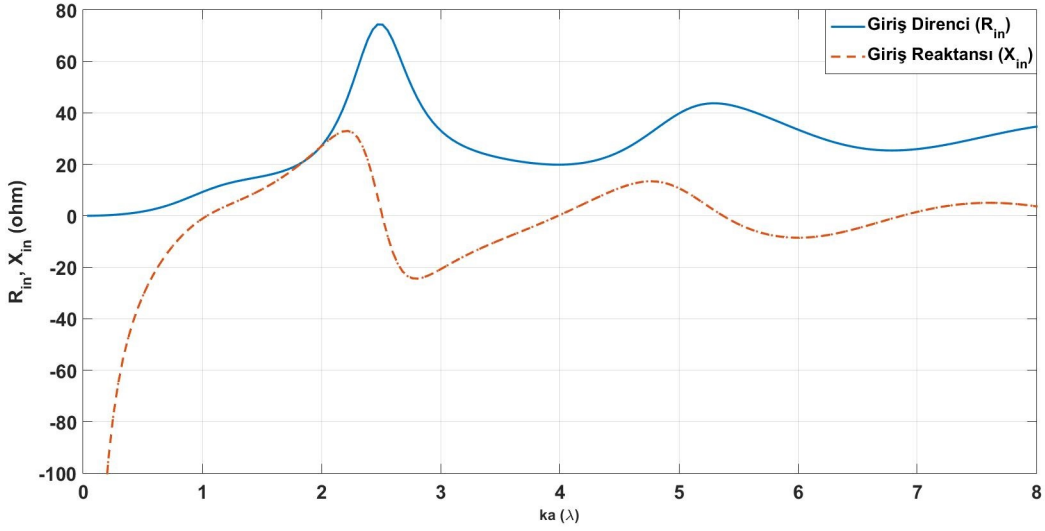
Şekil 3.4.  $45^\circ$  koni açısında çift konik antenin dalga boyu cinsinden anten boyuna göre empedansı

biraz düşerek  $150 \Omega$  seviyesinde kaldığı görünmektedir. Reaktans değerinin ise  $0 \Omega$  dolaylarında kaldığı görünmektedir.

Şekil 3.4'te  $45^\circ$  koni açısına ait empedans değerleri gösterilmiş, direnç değerinin neredeyse tüm anten boylarında  $100 \Omega$  civarında, reaktans değerinin ise  $0 \Omega$  dolaylarında kaldığı görünmektedir.



Şekil 3.5.  $60^\circ$  koni açısında çift konik antenin dalga boyu cinsinden anten boyuna göre empedansı



Şekil 3.6.  $75^\circ$  koni açısında çift konik antenin dalga boyu cinsinden anten boyuna göre empedansı

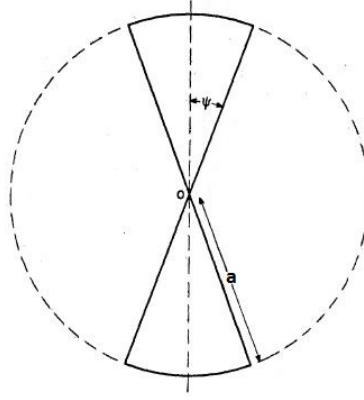
Şekil 3.5'te  $60^\circ$  koni açısına ait empedans değerleri gösterilmiş, direnç değerinin neredeyse tüm anten boylarında  $60 \Omega$  civarında, reaktans değerinin ise  $0 \Omega$  dolaylarında kaldığı görülmektedir.

Şekil 3.6'da ise  $75^\circ$  koni açısına ait empedans değerleri gösterilmiş, direncin iyice düştüğü ve genel olarak  $25 \Omega$  seviyelerinde kaldığı, reaktansın ise yine  $0 \Omega$  civarında olduğu gözlemlenmiştir.

Empedans değerlerinin bir anten tasarımında önemli ayak basma noktalarından olduğu düşünülerek ilerideki bölümlerde anten tasarımı sırasında bu kısımdan faydalanılacaktır.

### 3.1.1.2 Dar Açılı Çift Konik Anten Empedans Hesaplamaları

Dar açılı çift konik antenler pratikte sık kullanılmasa da geniş açılı çift konik antenler ve dipol antenler arasındaki geçiş açısından önem arz etmektedir [34]. Dar açılı çift konik antenlerde empedans hesaplamaları geniş açılı çift konik antenlerden farklı şekilde hesaplanmaktadır. Şekil 3.7'de verilen dar açılı çift konik anten için karakteristik empedans Eşitlik 3.5'te gösterildiği gibi hesaplanır.



Şekil 3.7. Dar açılı çift konik anten

$$Z_{0d} = \frac{\eta}{\pi} \log\left(\cot\frac{\Psi}{2}\right) = 120 \log\left(\cot\frac{\Psi}{2}\right) \quad (3.5)$$

Antenin faz uzunluğu olarak nitelendirilen  $L$  değişkeni, dalga boyu  $\lambda$  ve anten boyu  $a$ 'nın bir fonksiyonudur.

$$L = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (3.6)$$

Dar açılı çift konik antenlerin giriş empedansı  $Z_{ind}$ , Schelkunof eşitliği ile hesaplanır [33, 37].

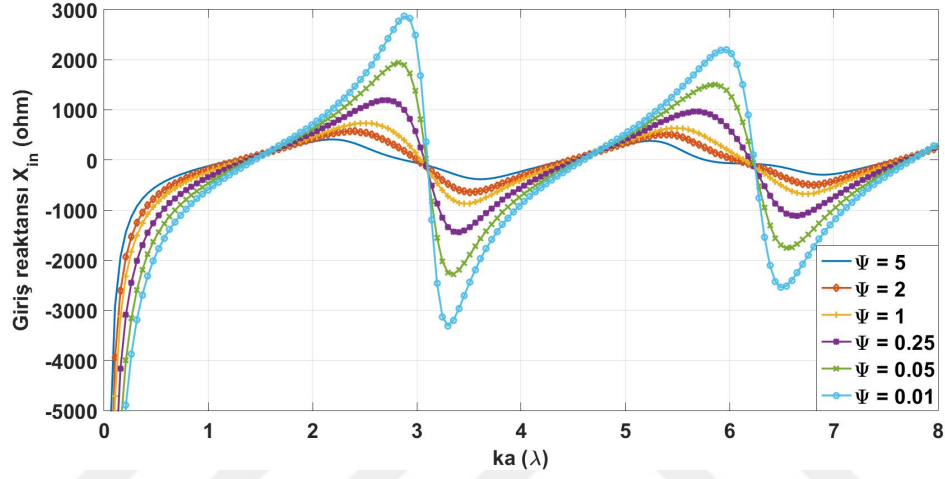
$$\begin{aligned} Z_{ind} &= Z_{0d} \frac{(G + iF)\cos(L - \frac{\pi}{2}) + iZ_{0d}\sin(L - \frac{\pi}{2})}{Z_{0d}\cos(L - \frac{\pi}{2}) + i(G + iF)\sin(L - \frac{\pi}{2})} \\ &= Z_{0d} \frac{G\sin L + i(F\sin L - Z_{0d}\cos L)}{(Z_{0d}\sin L + F\cos L) - iG\cos L} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.7'deki  $G$  ve  $F$ ,  $L$ 'nin birer fonksiyonu olup Eşitlik 3.8'de olduğu şekilde hesaplanır.

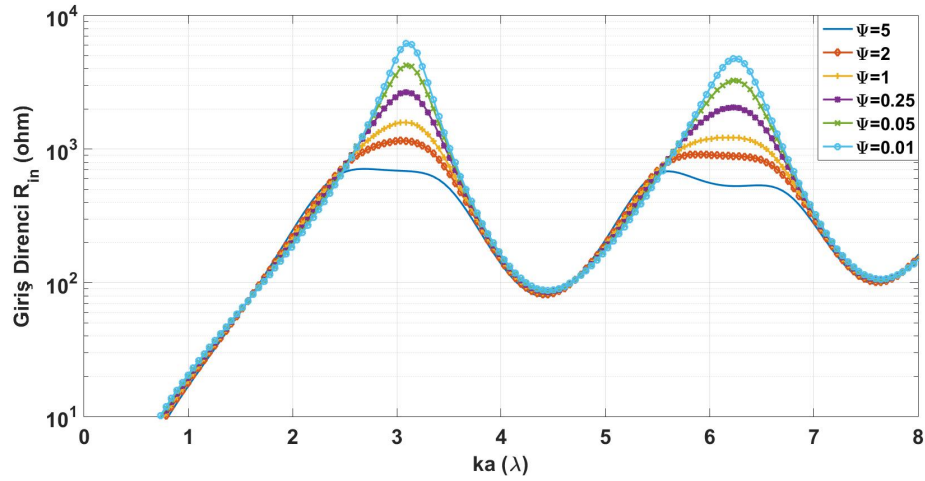
$$G(L) = 30\pi L \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4m+3}{(m+1)(2m+1)} J_{2m+\frac{3}{2}}^2(L) \quad (3.8a)$$

$$F(L) = -30\pi L \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4m+3}{(m+1)(2m+1)} J_{2m+\frac{3}{2}}(L) N_{2m+\frac{3}{2}}(L) \quad (3.8b)$$

Eşitlik 3.8'deki  $J$  birinci tür Bessel fonksiyonu  $N$  ise ikinci derece Bessel fonksiyonunu simgelemektedir.



Şekil 3.8. Dar açılı çift konik anten direnci



Şekil 3.9. Dar açılı çift konik anten reaktansı

Bu eşitlikler ışığında,  $5^\circ, 2^\circ, 1^\circ, 0.25^\circ, 0.05^\circ, 0.01^\circ$   $\Psi$  koni açı değerleri için giriş direnç ve reaktans değerlerinin MATLAB ortamında benzetimi yapılmış ve 3.1.1.2 ile Şekil 3.9'daki grafikler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar [31]'deki hesaplamalar ile uygundur.



Anten direnci koni açısı arttıkça düşmüş ancak geniş açı değerlerine göre çok yüksek değerlere ulaşmıştır. Anten reaktans değerleri ise yine 0  $\Omega$  civarında salınmış yalnız en yüksek ve en düşük değer arasındaki farkın oldukça fazla olduğu gözlenmiştir.

### 3.1.2 Dipol Anten Empedans Hesaplamaları

Anten empedans değeri anten performansını önemli ölçüde etkileyen parametrelerden biridir. Anten ışıma gücü  $P_{rad}$  ile anten empedansı arasında doğrudan bir ilişki vardır [5]. Dipol antene ait ışıma gücü formülü Eşitlik 3.9'da verilmiştir.

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} W_{av} r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.9)$$

$$= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^{\pi} \frac{[\cos(\frac{kl}{2} \cos\theta) - \cos(\frac{kl}{2})]^2}{\sin\theta} d\theta$$

Eşitlik 3.9'da verilen ışıma gücü bazı matematiksel değişimlerle Eşitlik 3.10'daki şekilde gösterilebilir [5].

$$P_{rad} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \left\{ C + \ln(kl) - C_i(kl) + \frac{1}{2} \sin(kl) [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] \right. \quad (3.10)$$

$$\left. + \frac{1}{2} \cos(kl) [C + \ln(\frac{kl}{2}) + C_i(2kl) - 2C_i(kl)] \right\}$$

Bu eşitlikte  $C = 0.5772$  Euler sabitini,  $C_i$  kosinüs fonksiyonunu,  $S_i$  ise sinüs fonksiyonunu sembolize eder. Bu bağlamda kosinüs fonksiyonu  $C_i(x)$  ve sinüs fonksiyonu  $S_i(x)$  Eşitlik 3.11'de verilmiştir.

$$C_i(x) = - \int_x^{\infty} \frac{\cos(y)}{y} dy = \int_{\infty}^x \frac{\cos(y)}{y} dy \quad (3.11a)$$

$$S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin(y)}{y} dy \quad (3.11b)$$

Eşitlik 3.11a'da verilen  $C_i(x)$  fonksiyonu kullanılarak Eşitlik 3.12'de verilen  $C_{in}(x)$  fonksiyonu türetilir.

$$\begin{aligned} C_{in}(x) &= \ln(\gamma x) - C_i(x) = \ln(\gamma) + \ln(x) - C_i(x) \\ &= 0.5772 + \ln(x) - C_i(x) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$C_{in}(x) = \int_0^x \left( \frac{1 - \cos y}{y} \right) dy \quad (3.13)$$

Yukarıdaki eşitliklerde verilen  $C_i(x)$ ,  $S_i(x)$  ve  $C_{in}(x)$  fonksiyonları kullanılarak ışıma direnci ifade edilebilir. Işıma gücü ve akım ilişkisinden faydalanılarak hesaplanan ışıma direnci  $R_r$  Eşitlik 3.14'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} R_r &= \frac{2P_{rad}}{|I_0|^2} = \frac{\eta}{2\pi} \{ C + \ln(kl) - C_i(kl) \\ &+ \frac{1}{2} \sin(kl) [S_i(2kl) - 2S_i(kl)] \\ &+ \frac{1}{2} \cos(kl) [C + \ln\left(\frac{kl}{2}\right) + C_i(2kl) - 2C_i(kl)] \} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $\eta$  boş uzayın öz empedansı,  $k$  dalga numarasını ve  $l$  ise antenin dalga boyu cinsinden uzunluğunu sembolize etmektedir. Işıma gücüne ait empedansın sanal kısmı ise Eşitlik 3.15'te verilmiştir.

$$X_m = \frac{\eta}{4\pi} \{ 2S_i(kl) + \cos(kl)[2S_i(kl) - S_i(kl)] - \sin(kl)[2C_i(kl) - C_i(kl) - C_i(\frac{2ka^2}{l})] \} \quad (3.15)$$

Anten giriş empedansı ve ışıma direnci arasında doğrudan bir ilişki vardır. İdealde anten giriş empedansının sanal kısmı ve ışıma sırasındaki kaybın sifıra eşit olması ve dolayısıyla anten ışıma direncinin giriş empedansına eşit olması beklenir. Anten performansı için kriter olabilecek bu ilişkiden yararlanılarak anten tasarımında iyileştirme çalışmaları yapılır. Dipol anten için giriş empedansının gerçel ve sanal kısmı ise matematiksel olarak, yukarıda anlatılan ışıma direnci ve reaktansından faydalanılarak Eşitlik 3.16'da gösterildiği gibi ifade edilebilir.

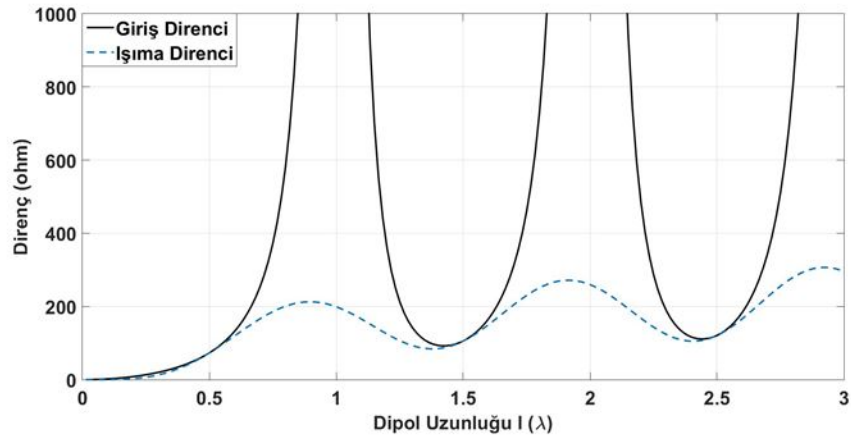
$$R_{in} = \left(\frac{l_0}{l_{in}}\right)^2 R_r = \frac{R_r}{\sin(\frac{kl}{2})^2} \quad (3.16a)$$

$$X_{in} = \left(\frac{l_0}{l_{in}}\right)^2 X_m = \frac{X_m}{\sin(\frac{kl}{2})^2} \quad (3.16b)$$

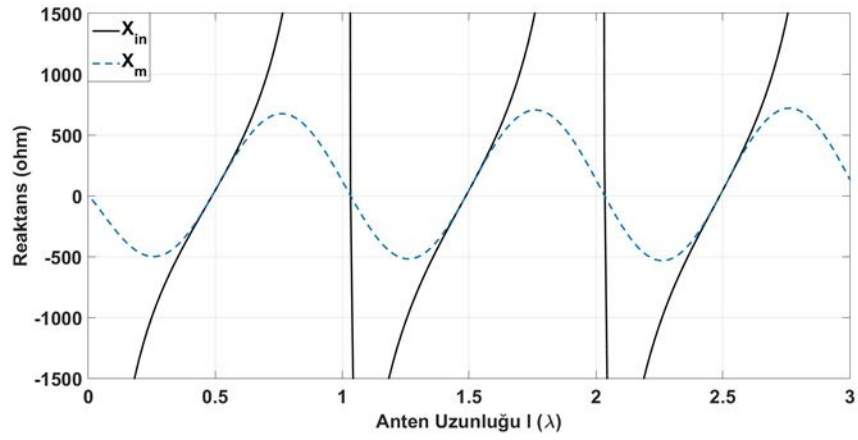
Tüm bu teorik değerlendirme ışığında MATLAB ortamında yapılan çalışmalarla anten ışıma direnci ve giriş direncine ait grafikler Şekil 3.10'daki gibidir. Grafiklerde dipol anten tel yarıçapı  $a = 10^{-5} \lambda$  alınmıştır.

Yapılan çalışmalar boyunca çift konik anten geniş ve dar açılı olmak üzere ikiye ayrılarak incelenmiş ve farklı açı değerleri için empedans hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Ardından dipol anten için de benzer empedans hesaplamaları üstünde çalışılmıştır. Tasarım gereği çok dar açılı bir çift konik antenin dipol antene yakınsamasının empedans hesaplamalarına olan etkisi de MATLAB ortamında yapılan benzetimlerle incelenmiş ve Şekil 3.11'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Aynı boydaki dipol anten ve dar açılı çift konik antenin giriş direnç ve reaktans değerlerinin tutarlı olması bu iki antenin tasarım olarak benzerliğini anten performansı olarak da desteklemektedir.

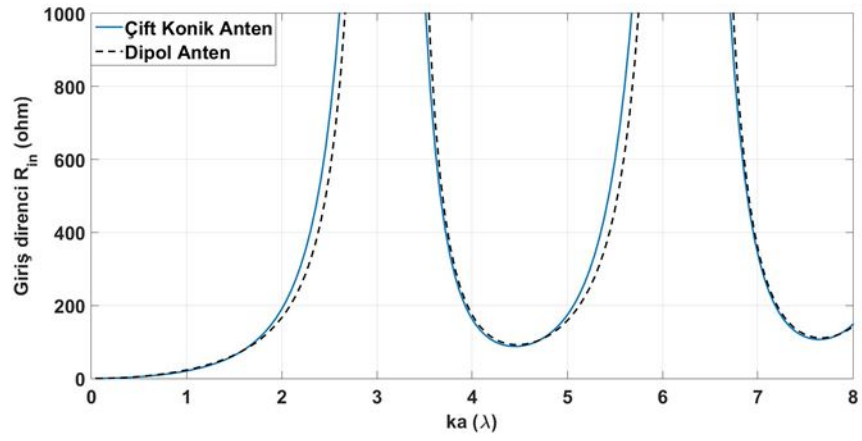


a)

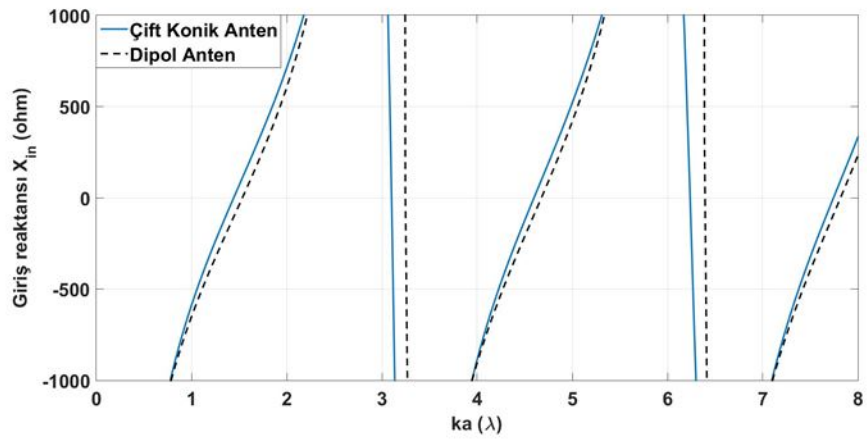


b)

Şekil 3.10. Dipol anten giriş ve ışıma direnç ve reaktansları a) Direnç b) Reaktans



a)

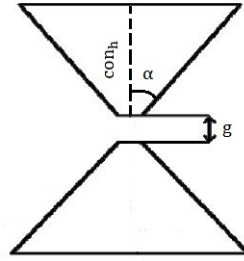


b)

Şekil 3.11. Dipol ve dar açılı konik anten giriş direnç ve reaktansları a) Direnç b) Reaktans

## 4. ÇİFT KONİK ANTEN TASARIMI

Bu bölümde önceki bölümde teorik olarak incelenen ve MATLAB'da empedans benzetimleri yapılan dipol anten ile dar ve geniş açılı çift konik antenlere ait verilerden faydalanılarak geniş açılı çift konik anten için tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmaları boyunca CST Microwave Studio programı kullanılmıştır. Çift konik anten tasarımında kritik olan parametreler koni yüksekliği, koniler arası açıklık ve koni açısıdır. Önceki bölümde dipol anten ve çift konik antenler, koni açısı üzerinden karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bu bölümde ise bu üç ana parametre ile tasarım yapılmış ve farklı değerler için anten performansları incelenmiştir.



Şekil 4.1. Çift konik anten parametreleri

Benzetimler üç aşamada gerçekleştirilmiş, her aşamada bir parametrenin değiştirilip diğer parametrelerin sabit değerleri için gözlem yapılmıştır. Anten performansını ortaya koyan geri dönüş kaybı, Duran Dalga Gerilim Oranı, kazanç değerleri dikkate alınarak tüm parametreler için en iyi değerler belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlerin üstünden CST'nin sunduğu eniyileme yöntemleri kullanılarak en iyi performansı sağlayan parametreler bulunmuştur.

### 4.1 Açı Benzetimleri

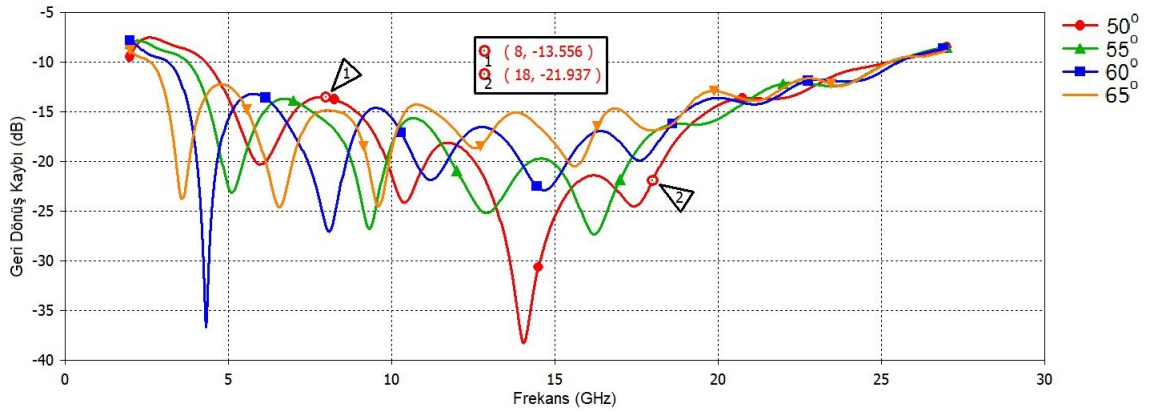
Anten performansı gösteren önemli parametrelerden birisi olan empedans değerleri önceki bölümde farklı açı değerleri için incelenmiştir. Koni açısının anten empedansına etkisi açığı dayalı benzetimlerin önemini ortaya koymaktadır.

Koni açısının anten performansına etkisinin ve uygun açı değerinin belirlenmesi için

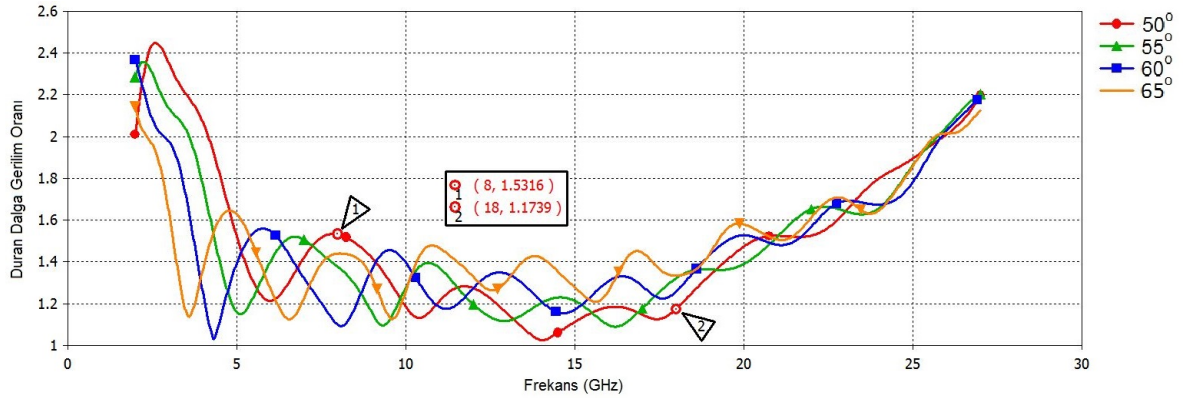
Çizelge 4.1. Farklı açı değerleri için benzetim seti

| Koni Açısı (Derece) | Koni Yüksekliği (mm) | Açıklık (mm) |
|---------------------|----------------------|--------------|
| 50                  | 20                   | 3            |
| 55                  | 20                   | 3            |
| 60                  | 20                   | 3            |
| 65                  | 20                   | 3            |

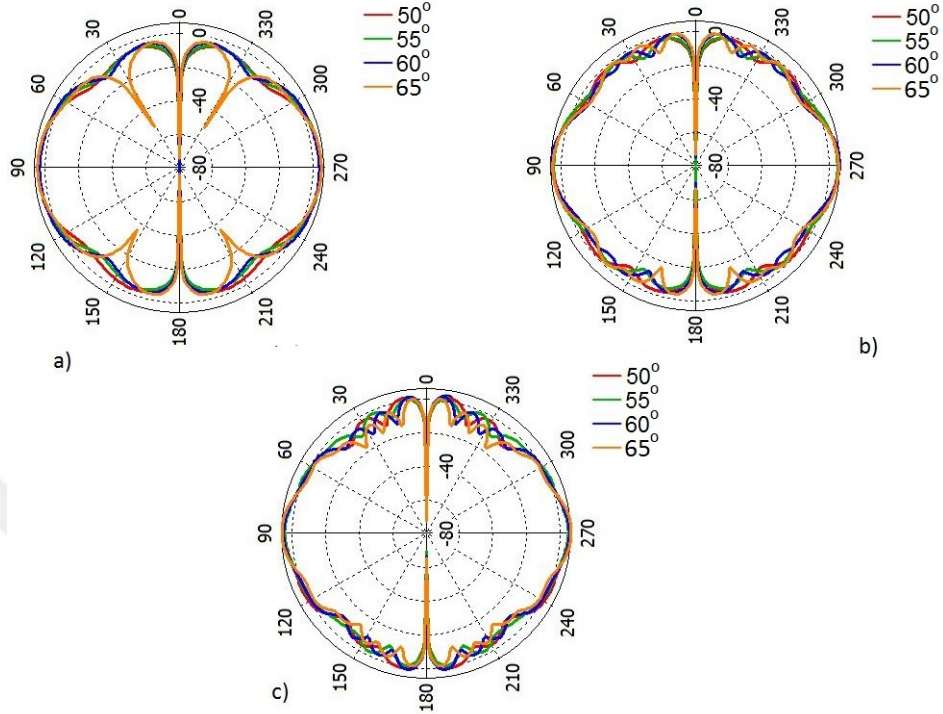
CST'de benzetimleri yapılmak üzere hazırlanan veri seti Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu set için ortaya çıkan geri dönüş kaybına ait grafikler Şekil 4.2'de, VSWR grafikleri Şekil 4.3'te, kazanç değerleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.



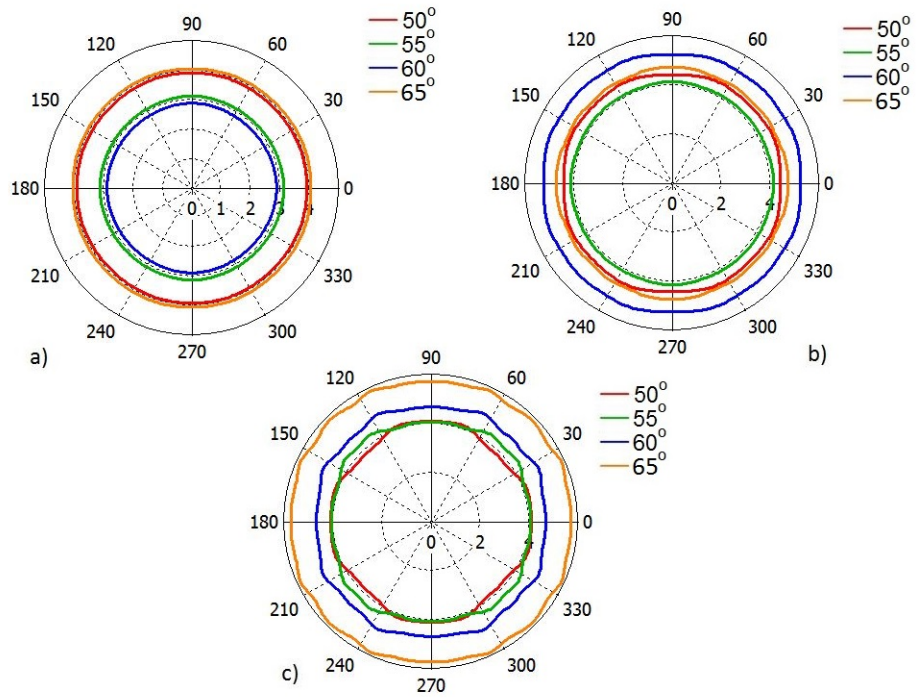
Şekil 4.2. Farklı açı değerlerinde geri dönüş kaybı



Şekil 4.3. Farklı açı değerlerinde duran dalga gerilim oranı



Şekil 4.4. Farklı açı değerleri için E-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz

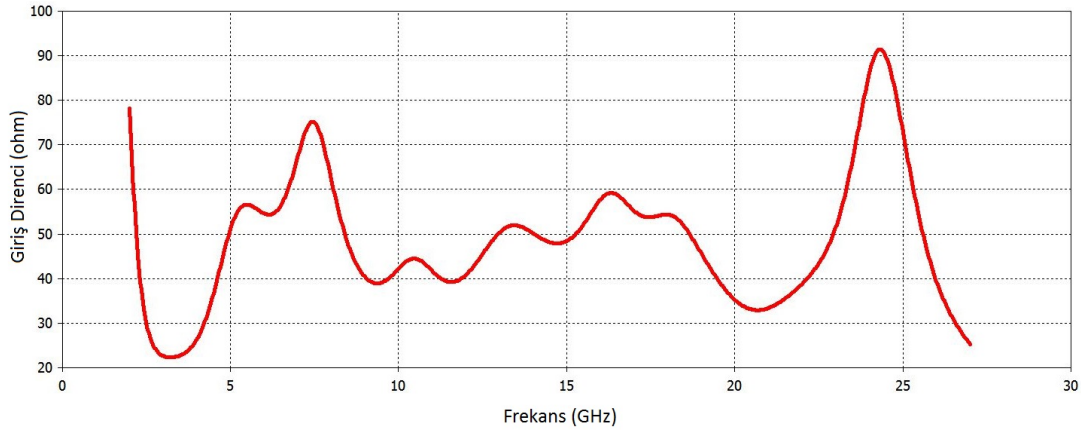


Şekil 4.5. Farklı açı değerleri için H-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz



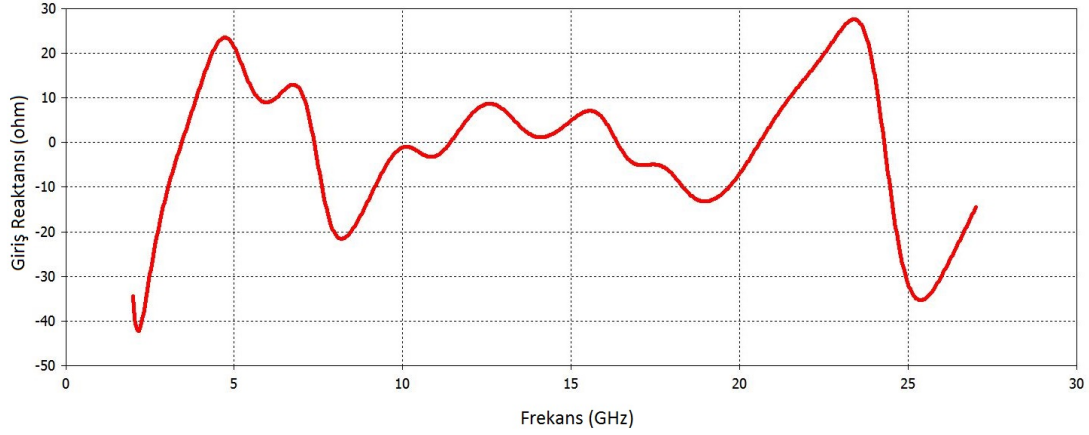
Şekil 4.2’de verilen grafiklerde anten performansları birbirine yakın olmakla birlikte 50°’ye ait grafiğin 8- 18 GHz frekans bandında diğerlerinden daha iyi bir performans sergilediği ve tüm bant boyunca -13.55 dB’den daha az geri dönüş kaybına neden olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.3’te sunulan duran dalga gerilim oranı grafikleri de geri dönüş kaybında görülen sonucu destekler nitelikte olup yine 50°’ye ait grafiğin nispeten daha iyi performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te çift konik anten ışıma karakteristiğini göstermesi açısından oldukça önemli olup E ve H düzlemde antenin ışıma örüntüsünü polar koordinatlarda göstermektedir.

En iyi anten performansını gösteren açı değeri olan 50°’ye ait anten giriş direnci ve reaktansını gösteren grafikler Şekil 4.6’da ve Şekil 4.7’de sunulmuştur.



Şekil 4.6. 50° koni yarım açısında anten giriş direnci

Yapılan CST benzetimleri sonucu en iyi anten performansını sağlayan koni açısı 50°’ye ait anten giriş direnci değerleri, özellikle 8- 18 GHz arasında 50  $\Omega$  dolaylarında elde edilmiştir. Yine 50°’ye ait giriş reaktansı değerleri ise 8- 18 GHz arasında 0  $\Omega$  civarında elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar 50  $\Omega$  luk olası besleme hattı için uygun görünmektedir.



Şekil 4.7.  $50^\circ$  koni yarım açısında anten giriş reaktansı

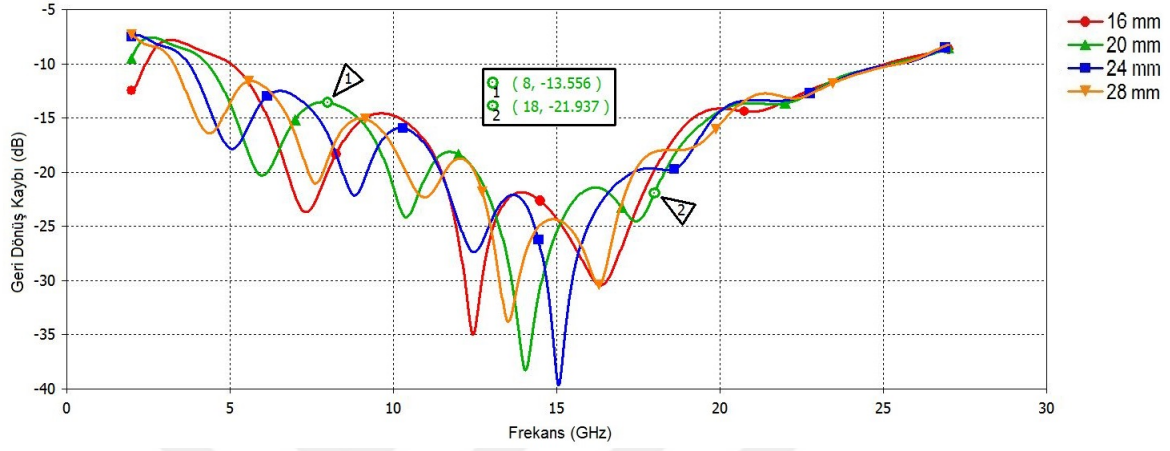
## 4.2 Koni Yüksekliği Benzetimleri

Önceki kısımda yapılan çalışmaların ardından koni açısı  $50^\circ$  olduğu durumda anten performansının daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle koni yüksekliğinin etkisinin incelendiği bu kısımda koni açısı  $50^\circ$  alınmıştır. Dipol antende olduğu gibi anten boyunun antenin çalışma frekansı ile doğrudan bir ilişkisi vardır. Bu nedenle yarım dalga dipol anten hesabı ile yaklaşık anten boyu hesaplanmış ve bu değere yaklaşık değerler üstünden en iyi koni yüksekliği bulunmaya çalışılmıştır. Bu kısımda benzetimleri yapılan veri seti Çizelge 4.2’de verilmiştir.

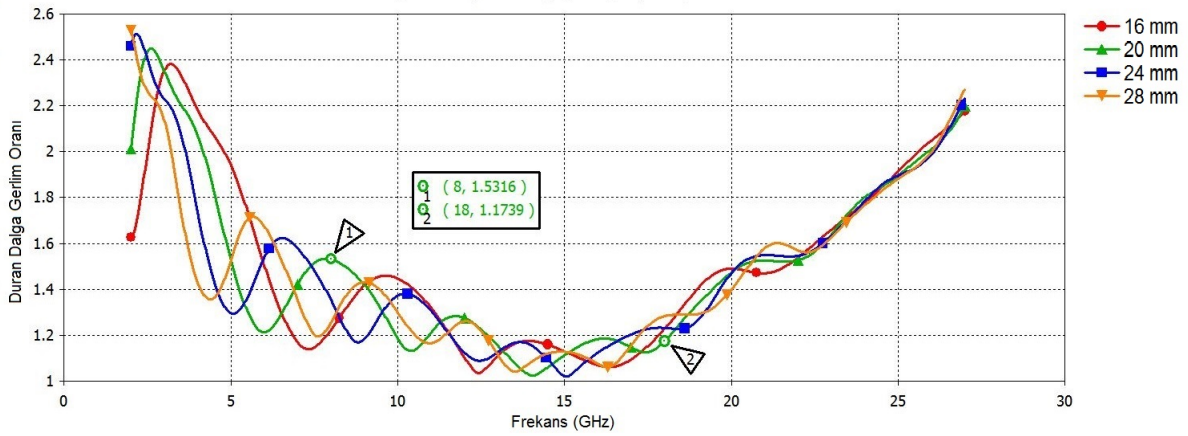
Çizelge 4.2. Farklı koni yüksekliği değerleri için benzetim seti

| Koni Açısı (Derece) | Koni Yüksekliği (mm) | Açıklık (mm) |
|---------------------|----------------------|--------------|
| 50                  | 16                   | 3            |
| 50                  | 20                   | 3            |
| 50                  | 24                   | 3            |
| 50                  | 28                   | 3            |

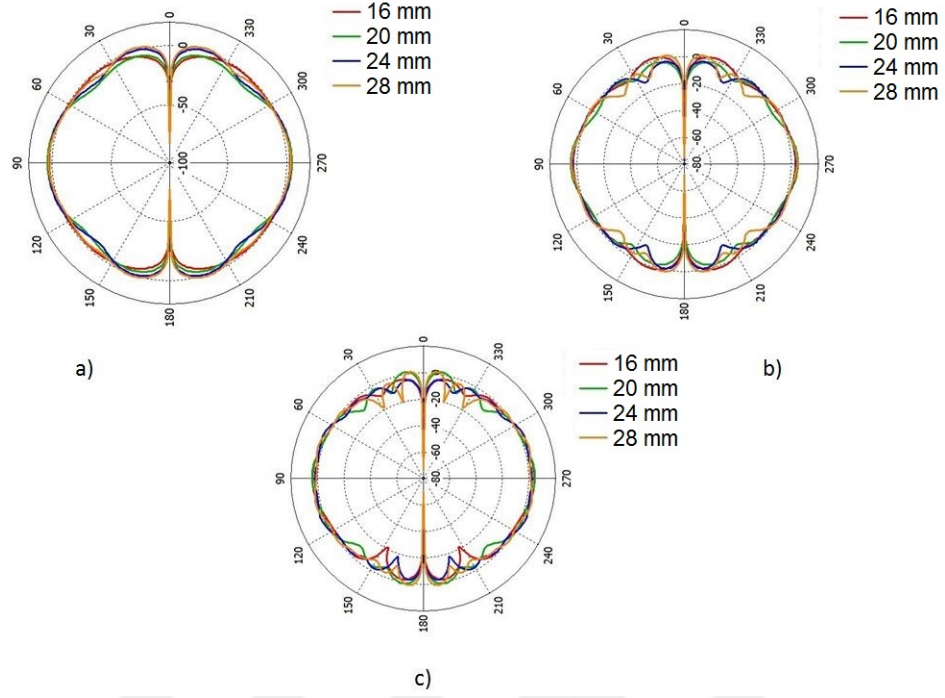
Çizelge 4.2’de verilen değerler ile benzetimleri yapılan tasarımın geri dönüş kaybına ait grafikler Şekil 4.8’de, duran dalga gerilim oranı grafikleri Şekil 4.9’da, kazanç değerleri Şekil 4.10’da ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



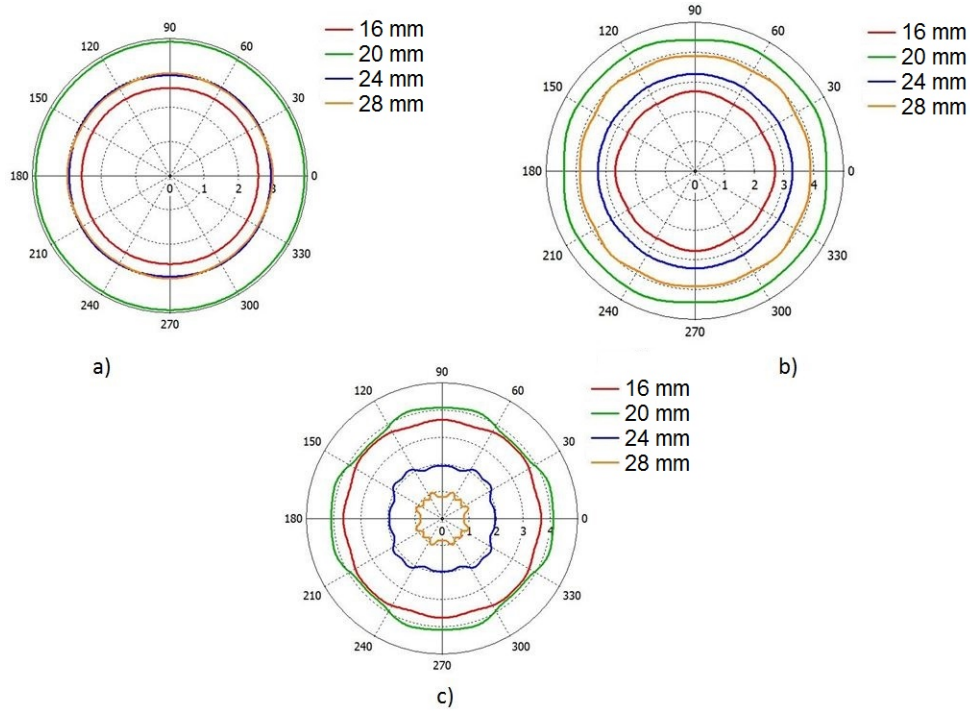
Şekil 4.8. Farklı koni yüksekliği değerlerinde geri dönüş kaybı



Şekil 4.9. Farklı koni yüksekliği değerlerinde duran dalga gerilim oranı



Şekil 4.10. Farklı koni yüksekliği değerleri için E-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz



Şekil 4.11. Farklı koni yüksekliği değerleri için H-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz

Şekil 4.8’de görülen grafikler koni yüksekliğinin çalışma frekansını net bir şekilde etkilediğini göstermektedir. Tüm koni yüksekliği değerlerinde geri dönüş kaybı ve merkez frekansı antenin planlanan çalışma frekans bandı olan 8- 18 GHz arasında kalsa da en iyi performansı sergileyen koni yüksekliği değeri için ışıma örüntüleri de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle Şekil 4.10’da ve Şekil 4.11’de verilen ışıma örüntülerinde hem yan kulakçık değerleri hem de kazançları incelendiğinde performans olarak öne çıkan değerin 20 mm olduğu görülmektedir.

### 4.3 Koni Açıklığı Benzetimleri

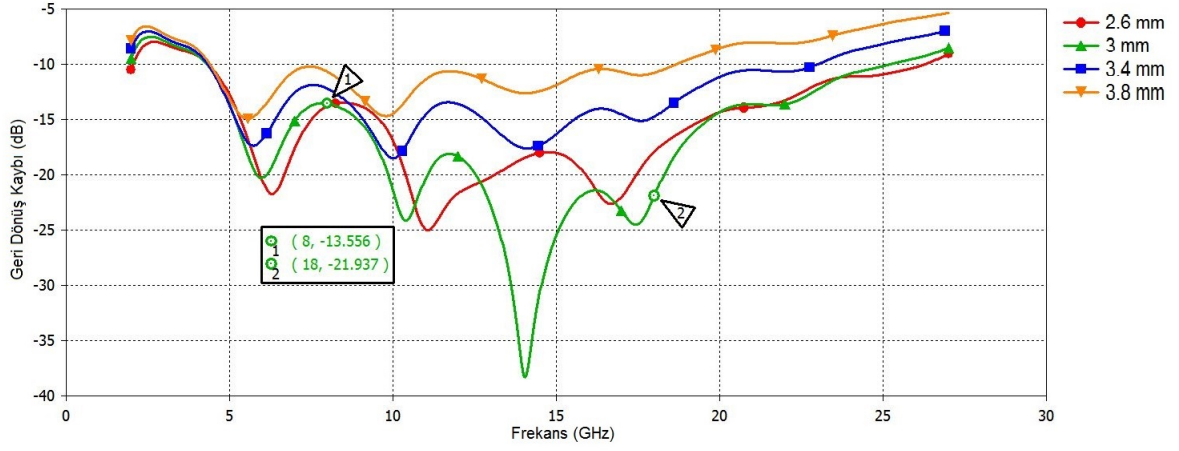
Bu bölümde çift konik anten performansını antenlerin kendi geometrileri dışında etkileyen parametre olan iki koni arasındaki açıklık için benzetimler yapılmıştır. Önceki bölümlerde belirlenen uygun koni açısı ve uygun koni yüksekliği belirlenerek bazı koni açıklığı değerleri için Çizelge 4.3’te sunulan veri seti oluşturulmuştur.

Çizelge 4.3. Farklı koni açıklığı değerleri için benzetim seti

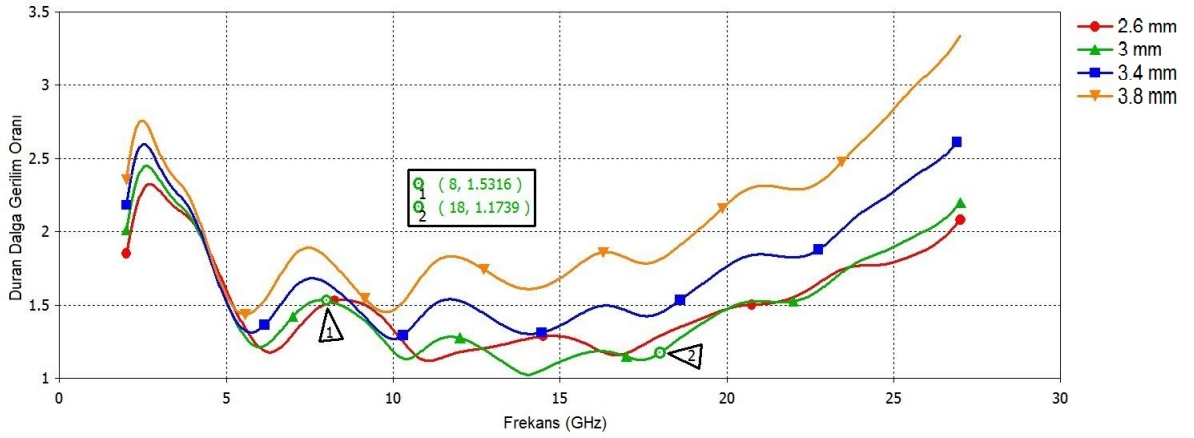
| Koni Açısı (Derece) | Koni Yüksekliği (mm) | Açıklık (mm) |
|---------------------|----------------------|--------------|
| 50                  | 20                   | <b>2.6</b>   |
| 50                  | 20                   | <b>3</b>     |
| 50                  | 20                   | <b>3.4</b>   |
| 50                  | 20                   | <b>3.8</b>   |

Çizelge 4.3’te verilen değerler ile benzetimleri yapılan tasarımın geri dönüş kaybına ait grafikler Şekil 4.12’de, VSWR grafikleri Şekil 4.13’te, kazanç değerleri Şekil 4.14’te ve Şekil 4.15’te verilmiştir.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te verilen grafikler incelendiğinde koni açıklığının anten ışıma örüntüsü üstünde ciddi bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ancak geri dönüş kaybı ve duran dalga oranını gösteren Şekil 4.12’de ve Şekil 4.13’te ise grafikler arasında ciddi farklar olduğu, özellikle açıklık değerinin 3 mm’den büyük olduğu değerlerde performans kaybının arttığı gözlemlenmektedir. Bu nedenle bu bölümde belirlenen en iyi koni açıklığı değeri 3 mm olmuştur.

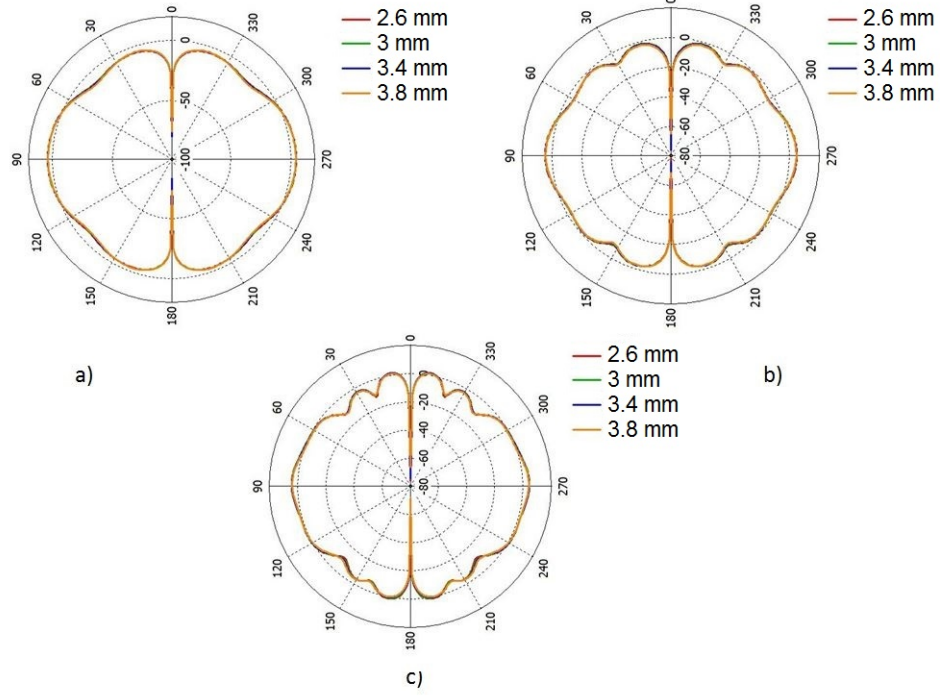


Şekil 4.12. Farklı koni açıklığı değerlerinde geri dönüş kaybı

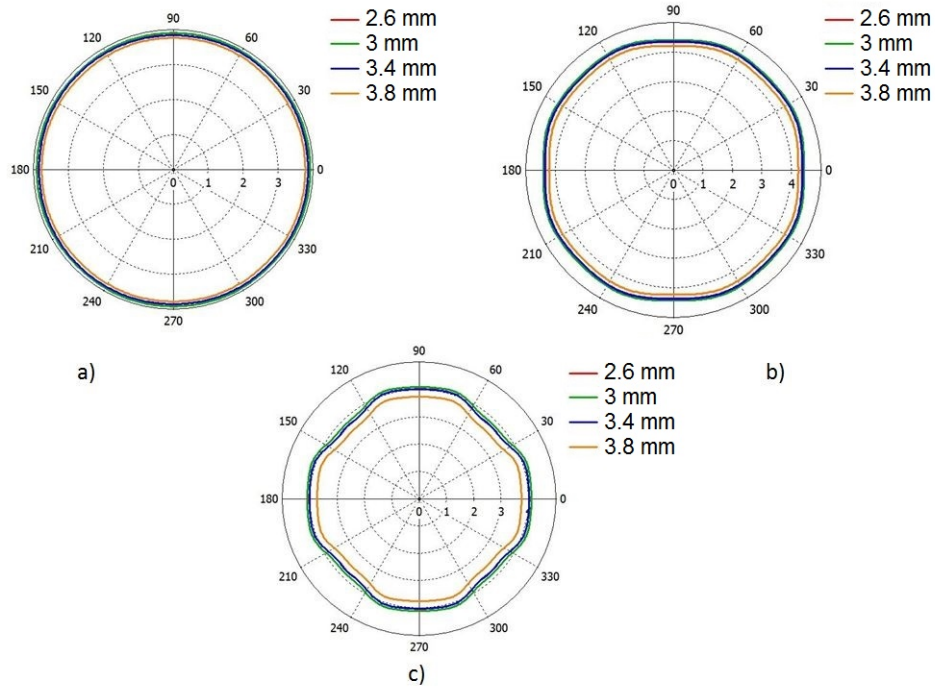


Şekil 4.13. Farklı koni açıklığı değerlerinde duran dalga gerilim oranı





Şekil 4.14. Farklı koni açıklığı değerleri için E-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz



Şekil 4.15. Farklı koni açıklığı değerleri için H-düzlem ışıma örüntüleri a) 8 GHz b) 13 GHz c) 18 GHz

Tüm bu benzetimler sonunda tasarımda kullanılmak üzere ortaya çıkan ön değerler aşağıda verilmiştir.

- Koni Açısı:  $50^{\circ}$
- Koni Yüksekliği: 20 mm
- Koni Açıklığı: 3 mm

Bundan sonraki aşamada bu değerlerden yararlanılarak anten performansında iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

#### **4.4 Anten Performansı Eniyileme Çalışmaları**

Önceki bölümde çift konik anten performansını etkileyen 3 ana parametre için uygun değer belirleme adına benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu değerler bu bölümde gerçekleştirilecek tasarımın son hali için ön bilgi olarak kullanılmıştır. Bu bölümde ise CST Microwave Studio ortamında tasarımı yapılan antenin performans iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan eniyileme çalışmaları sonunda anten parametreleri;

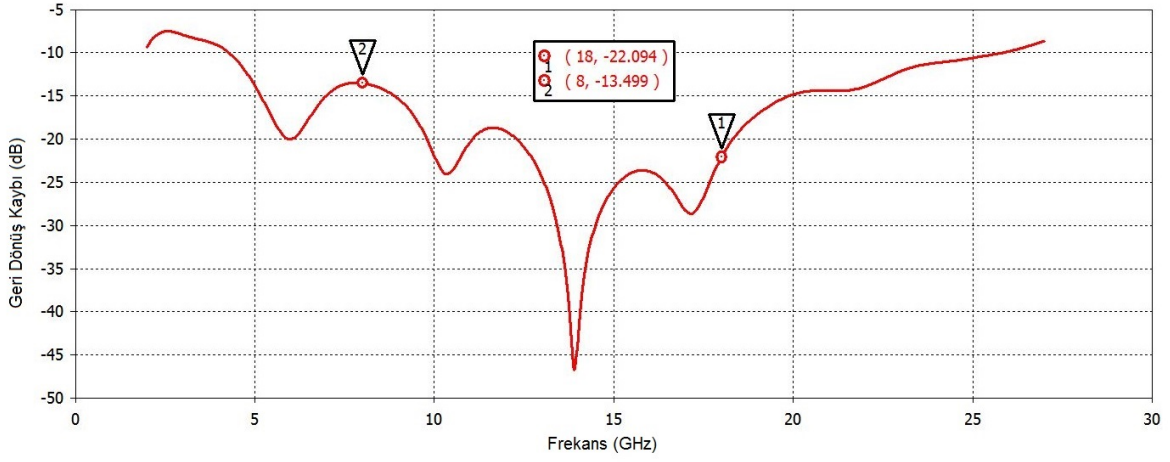
- Koni Açısı:  $49.5^{\circ}$
- Koni Yüksekliği: 20.5 mm
- Koni Açıklığı: 3 mm

olarak belirlenmiş ve anten performansını gösteren geri dönüş kaybı, duran dalga gerilim oranı, polar koordinatlarda ışıma örüntüleri aşağıda sunulmuştur.

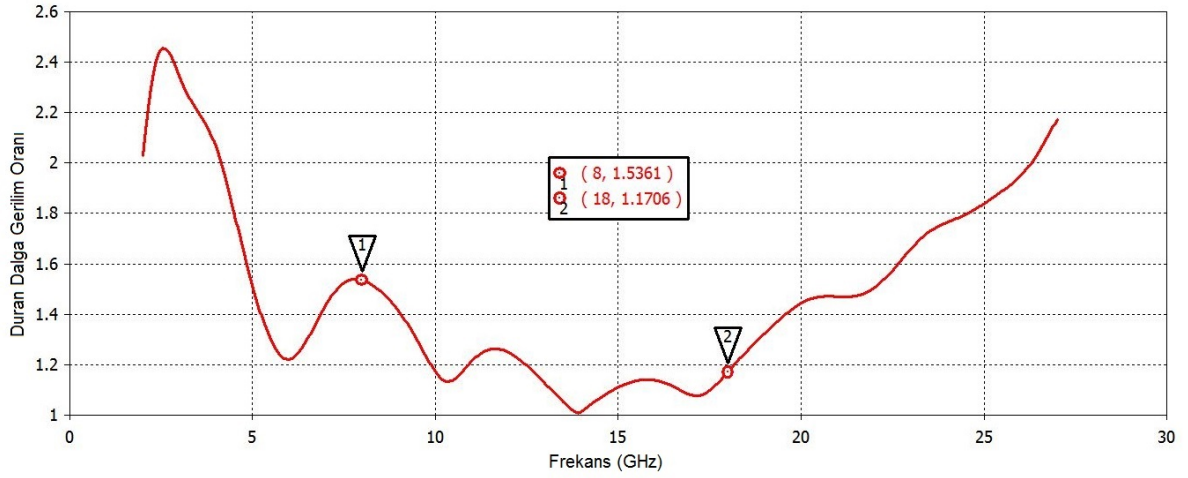
Eniyilenmiş anten parametrelerinin CST Microwave Studio programının sunduğu eniyileme yöntemleri kullanılarak tespit edilmesi sonucu bu değerlerle benzetim yapılmıştır. Bu benzetimin sonucu ortaya çıkan geri dönüş kaybı Şekil 4.16'da, duran dalga gerilim oranı ise Şekil 4.17'de sunulmuştur. Özellikle 8- 18 GHz bandında gönderilen sinyalin yüzde 95'inden daha fazlasının iletildiği görülmektedir. Diğer yandan Şekil 4.18'de ve Şekil 4.19'da verilen ışıma örüntüleri incelendiğinde ise yüksek frekanslarda bir miktar



bozulma görünse de geniş frekans bandına rağmen eş yönlü anten ışıma karakteristiğinin korunduğu gözlemlenmektedir.

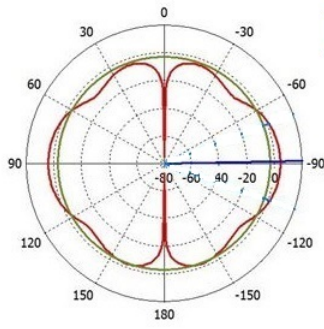


Şekil 4.16. Eniyilenmiş anten parametreleri için geri dönüş kaybı

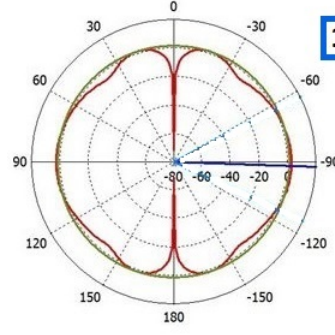


Şekil 4.17. Eniyilenmiş anten parametreleri için duran dalga gerilim oranı

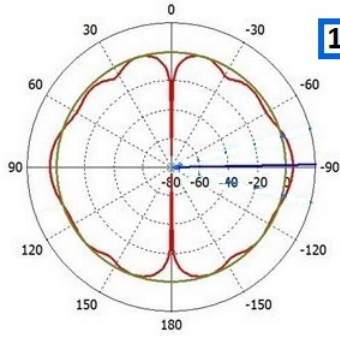
Antenin tüm frekanslardaki kazanç değerlerine ait grafik Şekil 4.20’de verilmiştir. Kazanç değerleri 8-18 GHz bandında incelendiğinde 8 GHz değeri dışında tüm frekans değerlerinin 3-4 dB kazanç değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.



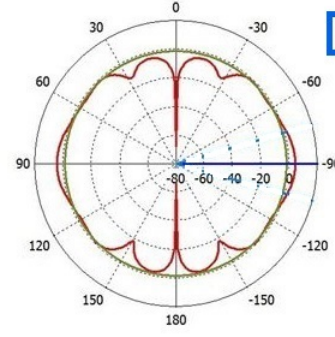
**8 GHz**



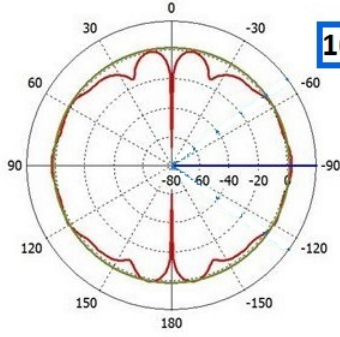
**10 GHz**



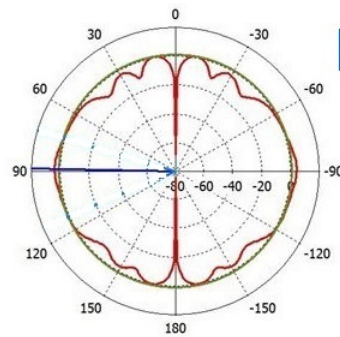
**12 GHz**



**14 GHz**

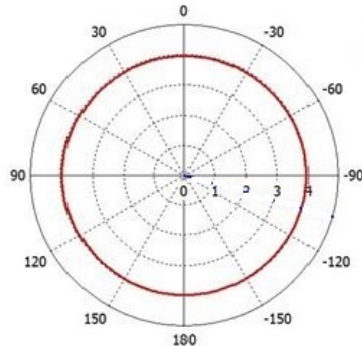


**16 GHz**

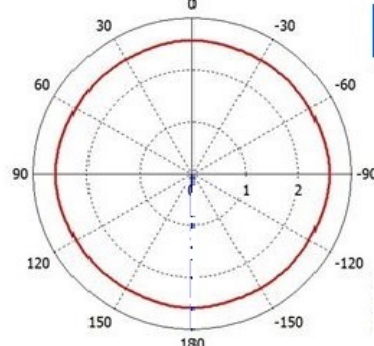


**18 GHz**

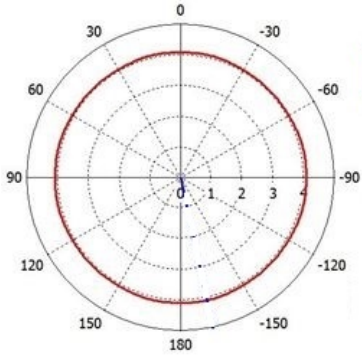
Şekil 4.18. Eniyilenmiş anten parametreleri için E-düzlem ışıma örüntüleri



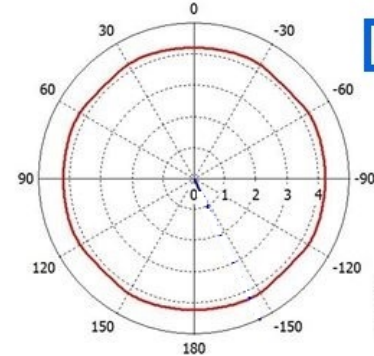
**8 GHz**



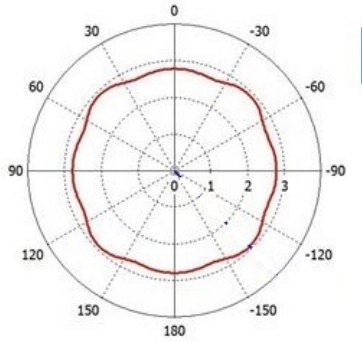
**10 GHz**



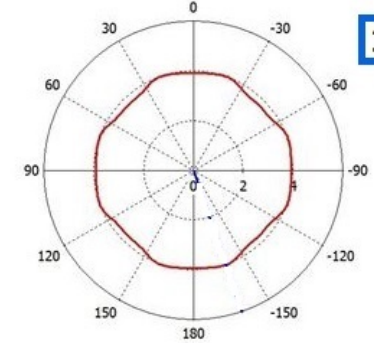
**12 GHz**



**14 GHz**

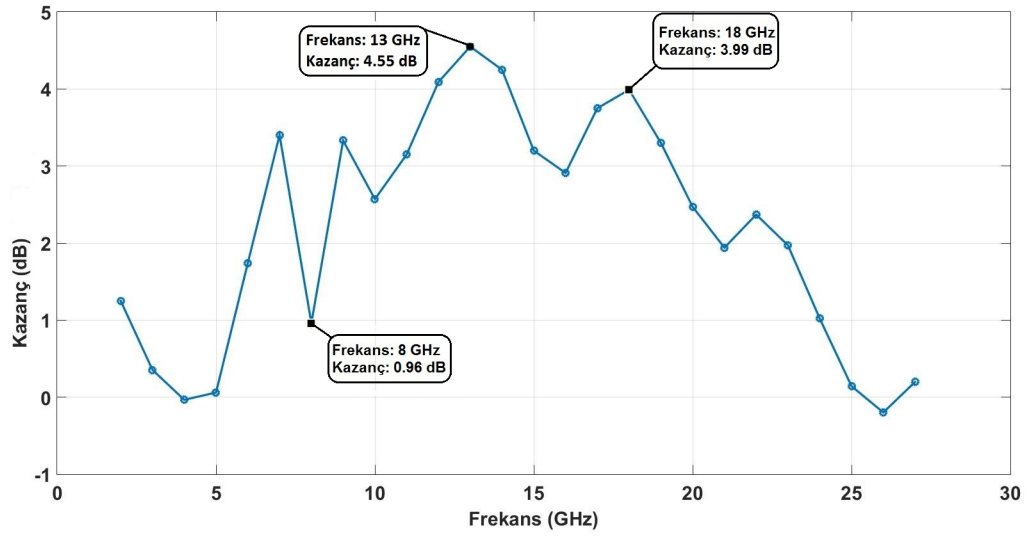


**16 GHz**



**18 GHz**

Şekil 4.19. Eniyilenmiş anten parametreleri için H-düzlem ışıma örüntüleri



Şekil 4.20. Eniyilenmiş anten parametreleri için kazanç değerleri

## 5. RADOM TEKNOLOJİSİ, ANALİZİ VE TASARIMI

Anteni yağmur, kar, ısı, rüzgar, kum, şimşek gibi çevresel etmenlerden koruyan yapılara radom denir. Radomun bu korumayı sağlarken idealde elektromanyetik dalga geçirgenliğine hiç etki etmemesi dolayısıyla anten performansını kötüleştirmemesi esastır [38]. Ancak gerçekte bu mümkün değildir. Radom özellikle açık alanda kullanılan antenler için vazgeçilmez olup performansının iyileştirmesi için yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez kapsamında da tasarlanan antenin çevresel etmenlerden korunmasını sağlamak için radom analiz ve tasarım çalışmaları yapılmıştır.

Radomun anten performansını doğrudan etkilemesi nedeniyle, performans kaybına neden olan radom hataları tanımlanarak giderilmeye çalışılmıştır. Radom etkisi olarak tanımlanan bu olumsuz radom etkileri şu şekilde sıralanabilir [39].

- **Yönlendirme Hatası ve Yönlendirme Hatası Eğimi:** Yönlendirme hatası, göreceli sinyal gelme açısının gerçek gelme açısıyla farkıdır. Yönlendirme hatası eğimi ise yönlendirme hatasının radom içindeki antenin tarama açısına göre değişim hızıdır.
- **Yan Kulakçık Bozulması:** Anten yan kulakçıklarının radom içindeki bozulmalar ve duvar iletim etkisi nedeniyle büyümesidir.
- **Depolarizasyon:** Antene gelen sinyalin bir kısmının radom duvarından geçerken polarizasyonunun değişmesi sonucu ortaya çıkan hatadır.
- **Anten Duran Dalga Gerilim Oranı:** RF sinyalin radom duvarına çarparak geri dönmesi sonucu anten duran dalga gerilim oranını artıran hatalardır.
- **Radomdan Kaynaklanan Geçiş Kaybı:** Radomun içindeki antenden yayılan elektromanyetik dalganın radom duvarından geçerken gücünün zayıflamasıdır.

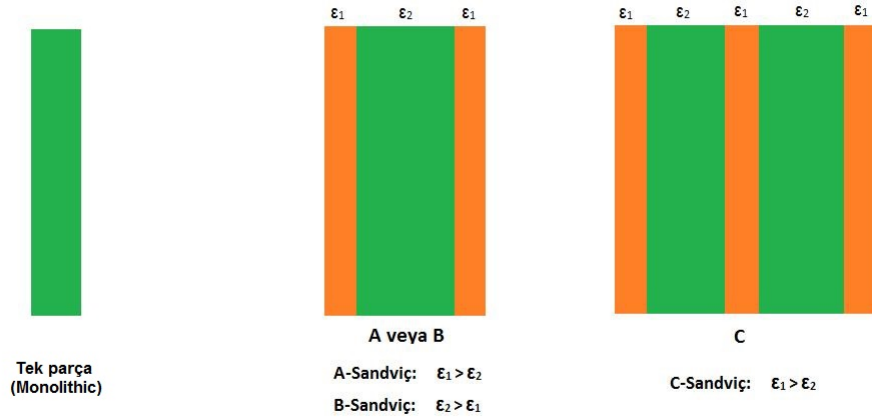
## 5.1 Radom Malzemelerinin Özellikleri

Radomu oluşturan malzemelerin karakteristiği elektriksel özellikler ve yapısal özellikler olmak üzere genel çerçevede iki başlık altında incelenebilir. Elektriksel özellikler göreceli dielektrik katsayısı, kayıp tanjantı yapısal özellikler ise mekanik olarak eğilme katsayısı, direnç ve sertlik, malzemenin yoğunluğu, su emme yeteneği, yağmur etkisine direnç şeklinde sıralanabilir [39].

## 5.2 Radom Yapıları

Radomun yapısı performansını etkileyen faktörlerden birisidir. Radomlar tasarımsal açıdan iki farklı yapıda tasarlanabilir.

- Tek katman (Monolithic) radomlar
- Sandviç radomlar



Şekil 5.1. Tek parça ve sandviç radom tasarımları

### 5.2.1 Tek Katman Radom

Radomların çoğu elektriksel olarak oldukça ince şekilde tek katman olarak tasarlanır. Bu tip radomlar doğrudan tek katmanlı radom malzemelerinden ya da reçineye

batırılmış plastik malzemeden üretilerek kullanıma sunulur. Tek katmanlı radom yapısının sağladığı en büyük avantaj kolay üretilmesinden kaynaklanan düşük maliyetidir. Reçineye batırılarak oluşturulan bir radom yapısında kullanılan reçinenin de radomun dielektrik katsayısını etkilemesinden dolayı radom performansına doğrudan bir etkisi vardır. Reçine ve plastik malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu radom yapısının dielektrik katsayısı Eşitlik 5.1’de olduğu gibi hesaplanır.

$$\varepsilon_m = \frac{V_R \log(\varepsilon_R) + V_P \log(\varepsilon_P)}{V_R + V_P} \quad (5.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $\varepsilon_m$ , karışımın dielektrik katsayısını,  $\varepsilon_R$ , reçinenin dielektrik katsayısını,  $\varepsilon_P$ , plastik malzemenin dielektrik katsayısını,  $V_R$ , reçinenin hacmini,  $V_P$ , destek malzemenin hacmini temsil eder.

Milimetre dalga boyu bandı uygulamalarında tek katmanlı radom yapıları reçinesiz olarak kullanılır [40]. Milimetre dalga boyu uygulamalarda kullanılan bazı radom plastikleri ve frekansa göre değişen elektriksel özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Bazı radom plastiklerinin farklı frekanslardaki elektriksel özellikleri

| Malzeme Adı    | Dielektrik Katsayısı (X-Bant) | Kayıp Tanjantı (X-Bant) | Dielektrik Katsayısı (Ka-Bant) | Kayıp Tanjantı (Ka-Bant) |
|----------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Rexolite       | 2.54                          | 0.0005                  | 2.6                            | 0.002                    |
| Nylon          | 3.03-3.21                     | 0.014-0.02              | 3.6                            | 0.02                     |
| Teflon         | 2.1                           | 0.0003                  | 2.08-2.1                       | 0.0006-0.001             |
| Polystyrene    | 2.55                          | 0.0004                  | 2.54                           | 0.00053-0.001            |
| IparPlexiglass | 2.59                          | 0.015                   | 2.61                           | 0.02                     |
| Polyethylene   | 2.25                          | 0.0004                  | 2.28                           | 0.007                    |

### 5.2.2 Sandviç Radom

Yüksek ve göreceli düşük dielektrik katsayılı birden fazla malzemeden oluşan radom yapısıdır. Şekil 5.1’de olduğu gibi üç farklı tasarımdan bahsedilebilir.

**A-Sandviç** yapısı dış katmanların dielektrik katsayısının yüksek, ara malzemenin dielektrik katsayısının ise daha düşük olduğu tasarım yapısına sahiptir [38]. A-Sandviç yapısında ara malzeme olarak genellikle balpeteği (honeycomb) veya çok düşük dielektrik katsayısına sahip cam elyaf (fiberglass) seçilir. Bal peteği oldukça düşük dielektrik katsayısına sahip olmasının yanında yüksek mekaniksel dirence sahip olması nedeniyle bu tip radomlarda uygun bir ara malzemedir. A-Sandviç radomlar düşük dalga geliş açısının kullanıldığı uygulamalarda iyi performansa sahipken geliş açısının yüksek olduğu uygulamalar için iyi bir tercih değildir.

**B-Sandviç** radomlar A-Sandviç yapısıyla aynı tasarıma sahip olup ara malzeme olarak yüksek dielektrik, dış katmanlar için ise düşük dielektrik katsayısına sahip malzemeler kullanılır.

**C-Sandviç** radomlar ise beş veya daha fazla katmana sahip radomlardır. Katman sayısı tek sayılar olarak artmakta olup geniş bant uygulamalarında bu sayının artışı performansa olumlu etki yapar [41].

Radomların dış katmanlarında kullanılan malzemeler yüzey plakalarının reçineye batırılmasıyla üretilir. Radomun performansını etkileyeceğinden hem kullanılan plakanın hem de reçinenin elektrik ve mekanik özellikleri dikkate alınır. Radom tasarımında sıklıkla kullanılan bazı yüzey plakaları ile reçinelere ait elektriksel özellikler Çizelge 5.2’de bu plakaların X bandında reçinelerle birlikte kullanıldığında ortaya çıkan elektriksel özellikleri ise Çizelge 5.3’te verildiği gibidir [41].



Çizelge 5.2. Bazı plaka ve reçinelerin elektriksel özellikleri

| Malzeme Adı            | Dielektrik Katsayısı | Kayıp Tanjantı |
|------------------------|----------------------|----------------|
| <b>Plaka</b>           |                      |                |
| E-glass                | 6.06                 | 0.004          |
| S-glass                | 5.2                  | 0.007          |
| D-glass                | 4                    | 0.005          |
| Polyethylene (Spectra) | 2.25                 | 0.0004         |
| Kevlar                 | 4.1                  | 0.02           |
| Quartz                 | 3.8                  | 0.0001         |
| <b>Reçine</b>          |                      |                |
| Polyester              | 2.95                 | 0.007          |
| Bismaleimide           | 3.32                 | 0.004          |
| Polybutadiene          | 3.83                 | 0.015          |
| Epoxy                  | 3.6                  | 0.04           |
| Polyimide              | 3.1                  | 0.0055         |
| Polycyanate            | 2.86                 | 0.005          |

Çizelge 5.3. Bazı plakaların reçinelerle birlikte kullanıldığında X bandındaki elektriksel özellikleri

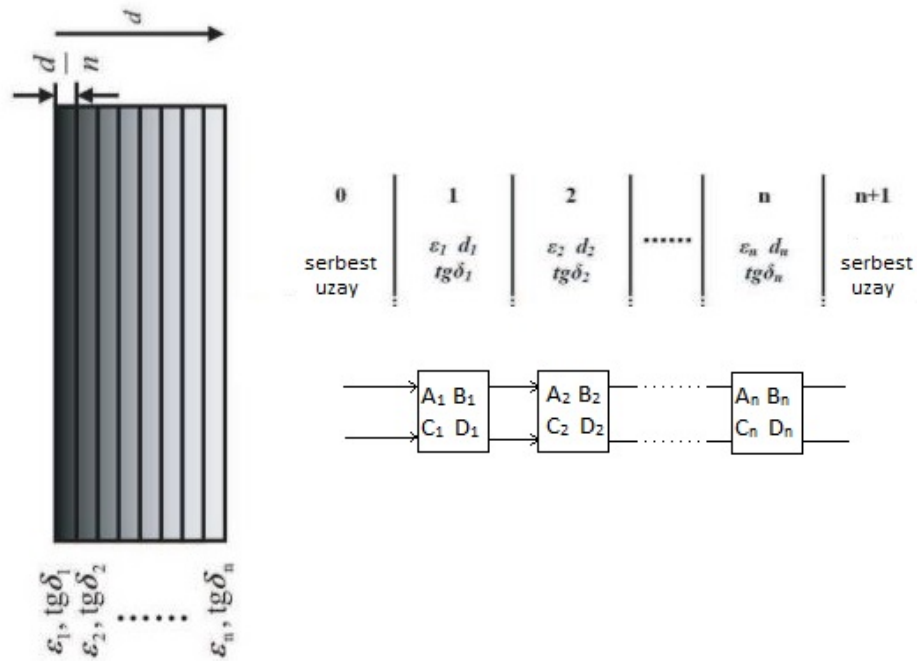
| Plaka                         | Reçine        | Dielektrik Katsayısı | Kayıp Tanjantı |
|-------------------------------|---------------|----------------------|----------------|
| <b>E-glass</b>                | Epoxy         | 4.4                  | 0.016          |
|                               | Polyester     | 4.15                 | 0.015          |
|                               | Polyimide     | 4.7                  | 0.014          |
| <b>D-glass</b>                | Polycyanate   | 3.45                 | 0.009          |
| <b>Polyethylene (Spectra)</b> | Epoxy         | 2.8                  | 0.004          |
|                               | Polyester     | 2.52                 | 0.007          |
|                               | Polycyanate   | 2.65                 | 0.003          |
| <b>Kevlar</b>                 | Polyester     | 3.5                  | 0.05           |
| <b>Quartz</b>                 | Epoxy         | 3.12                 | 0.011          |
|                               | Polyester     | 3.6                  | 0.012          |
|                               | Polyimide     | 3.34                 | 0.005          |
|                               | Polycyanate   | 3.23                 | 0.006          |
|                               | Polybutadiene | 3.1                  | 0.003          |
|                               | Bismaleimide  | 3.35                 | 0.009          |

### 5.3 Radomun Teorik İncelemesi

Radomun elektromanyetik dalga geçirgenliğine ait performansı bir anten sistemi için hayati önem taşımaktadır. Radom performansını etkileyen başlıca parametreler katman sayısı, dielektrik katsayısı, kayıp tanjantı, katman kalınlığı, dalga geliş açısı olarak sıralanabilir.

Tez kapsamında hem tek katman hem de A-Sandviç radom yapıları için tasarımlar yapılmış, yapılan matematiksel çalışmalar MATLAB ortamında yapılan benzetimlerle desteklenmiş, CST ortamında ise 3 boyutlu olarak tasarlanarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

Şekil 5.2'de gösterildiği gibi N katmandan oluşan bir radom yapısı, iletim hattı (Transmission Line) modellemesi uygulanarak matematiksel olarak ifade edilebilir. Tek katmanlı yapılarda bu çözüm kolay olsa da katman sayısının artışı çözümü karmaşık hale getirmektedir [42, 43].



Şekil 5.2. N-Tabakalı radom yapısı

İletim katsayısı (Transmission Coefficient) gönderilen elektromanyetik dalganın bir ortamdan karşıya geçme oranı olarak tanımlanır ve Eşitlik 5.2'de verildiği şekilde hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_1 d_1) & j \frac{Z_1}{Z_0} \sin(k_1 d_1) \\ j \frac{Z_0}{Z_1} \sin(k_1 d_1) & \cos(k_1 d_1) \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \cos(k_n d_n) & j \frac{Z_n}{Z_0} \sin(k_n d_n) \\ j \frac{Z_0}{Z_n} \sin(k_n d_n) & \cos(k_n d_n) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$k_n = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon'_n - \sin^2(\theta_0)} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon'_n = \varepsilon_n(1 - j \tan(\delta_n)) \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.2 ile Eşitlik 5.3 ve 5.4'te kullanılan  $d$ , katman kalınlığını,  $\lambda_0$ , dalga boyunu,  $\theta_0$ , dalga geliş açısını,  $Z_0$ , gelen dalga empedansını,  $\delta_n$ , katman kayıp tanjantı,  $\varepsilon$ , dielektrik katsayısını ve  $\varepsilon'$ , karmaşık dielektrik katsayısını temsil eder.

Empedans hesaplaması dalganın polarizasyonuna göre farklı şekillerde hesaplanır. Dik (Perpendicular) polarizasyon için empedans;

$$\frac{Z_n}{Z_0} = \frac{\sqrt{\varepsilon'_n - \sin^2(\theta_0)}}{\varepsilon'_n \cos(\theta_0)} \quad (5.5)$$

iken paralel polarizasyon için;

$$\frac{Z_n}{Z_0} = \frac{\cos(\theta_0)}{\sqrt{\varepsilon'_n - \sin^2(\theta_0)}} \quad (5.6)$$

şeklindedir. T değişkeninin;

$$T = \frac{2}{A + B + C + D} \quad (5.7)$$

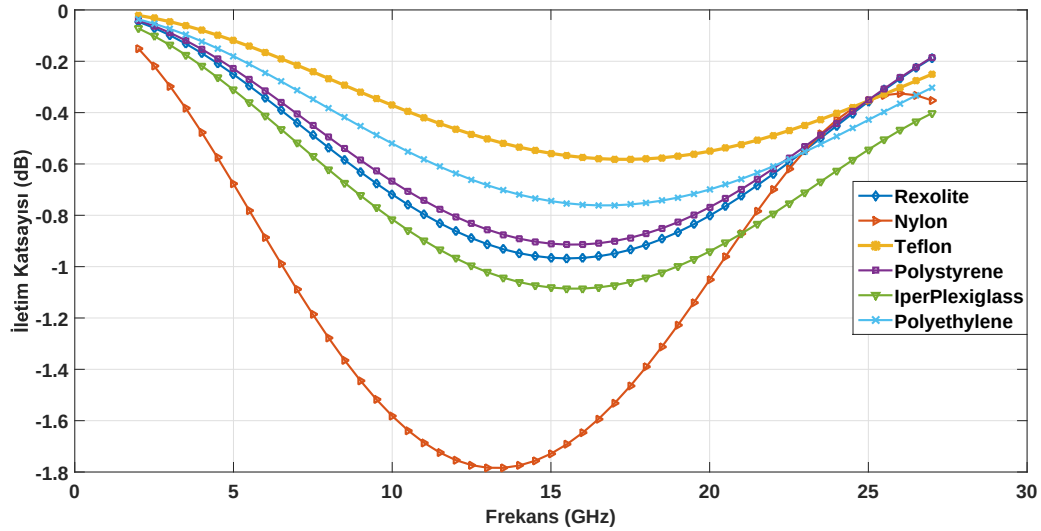
şeklinde elde edildiği durumda tek veya çok katmanlı bir radom yapısından kaynaklanan iletim katsayısı  $|T|^2$  olarak hesaplanabilir. Bu bağlamda MATLAB ortamında tek

katman ve A-Sandviç yapı modellenerek iletim katsayıları hesaplanmış, aynı değerler için CST ortamında radom yapıları tasarlanarak benzetim sonuçları teorik değerler ile karşılaştırılmıştır.

### 5.3.1 Tek Katman Radom İncelemesi

Tek katmanlı radomlar tasarım ve analiz açısından çok katmanlı radom tasarımlarına göre avantajlı durumdadır. Üretim açısından da büyük kolaylık sağlayan tek katmanlı radomların Çizelge 5.1’de verilen örnekleri için iletim katsayısı performansları incelenmiştir. Çalışma boyunca MATLAB ortamında radom performansını etkileyen tabaka kalınlığı ve dalga geliş açısının etkisi de incelenmiş CST ortamından elde edilen benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

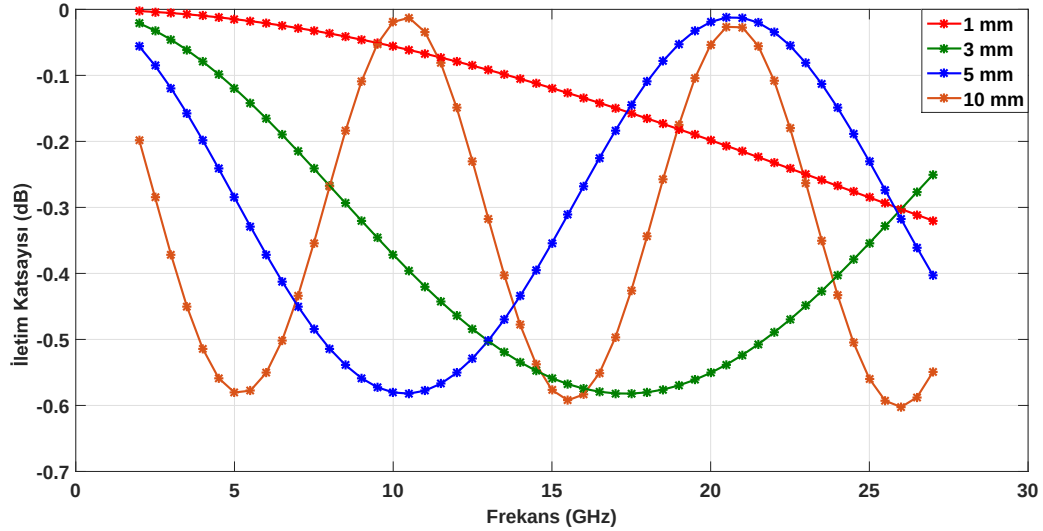
Tek katman radom malzemelerinin farklı kalınlık ve farklı dalga geliş açıları için iletim katsayısı performansları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Farklı radom malzemelerinin 3 mm kalınlıkta iletim katsayısı

Şekil 5.3’te farklı radom malzemeleri için MATLAB ortamında yapılan matematiksel incelemenin sonuçları verilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda en iyi performansı gösteren radom malzemesinin teflon olduğu görülmüştür. Dalga geliş açısının  $0^\circ$ , katman kalınlığının ise 3 mm olduğu durumda yapılan hesaplamada teflon malzemenin iletim katsayısı yaklaşık -0.6 dB olmuştur.

En iyi performansı gösteren teflon malzemesine ait farklı kalınlıklardaki radom performansını gösteren grafik Şekil 5.4'te verilmiştir. Benzetimler sonucu farklı katman kalınlıklarının farklı frekanslarda daha yüksek iletim katsayısı sağladıkları görülmüştür. Bu nedenle seçilecek katman kalınlığının çalışma frekansı dikkate alınarak belirlenmesi önem taşımaktadır.



Şekil 5.4. Teflon malzemenin farklı katman kalınlıklarında iletim katsayısı

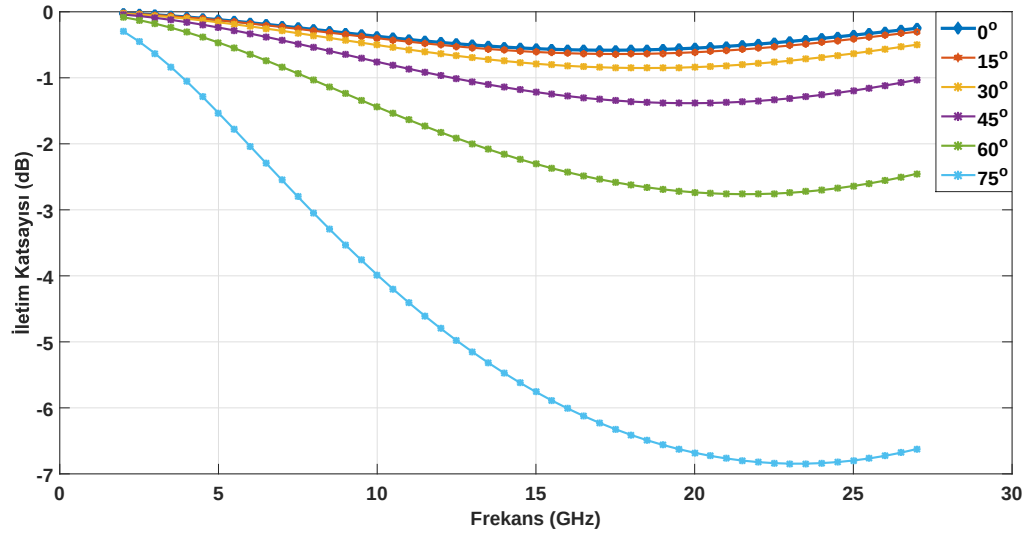
Radom performansına dalga geliş açısının etkisi ise teflon malzemesi için yine MATLAB ortamında hesaplanmış ve sonuçları Şekil 5.5'te verilmiştir.

Şekil 5.5'teki grafikler  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  için 3 mm kalınlığındaki teflon malzeme için elde edilmiştir. Dalga geliş açısının  $0^\circ$  olduğu durumdaki radom performansı en iyi,  $75^\circ$  olduğu durumda ise en kötü sonucu vermiştir.

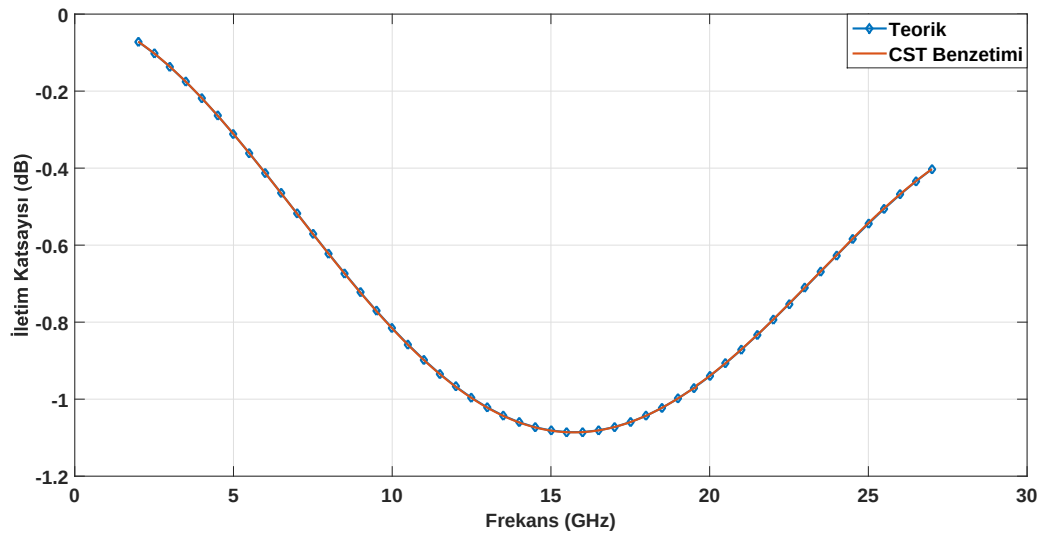
Farklı açılar ve farklı kalınlıklar için diğer malzemelerin radom performansına ait grafikler EK A'da paylaşılmıştır.

Teorik ve tasarım sonuçlarının tutarlılığı 1 mm kalınlığında Plexiglass malzeme üzerinde  $0^\circ$  dalga geliş açısı için yapılan çalışmanın sonucunu sunan grafik Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

MATLAB ortamında teorik çalışmaların ürünü olarak sunulan sonuçlar, CST ortamında

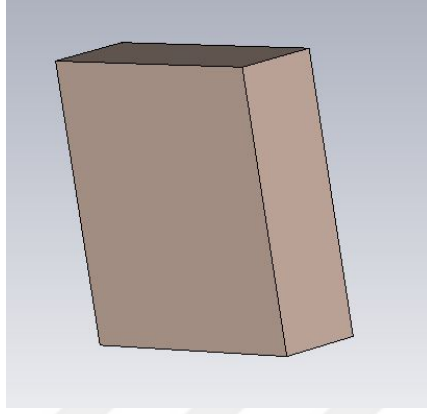


Şekil 5.5. Teflon malzemenin farklı geliş açılarında iletim katsayısı



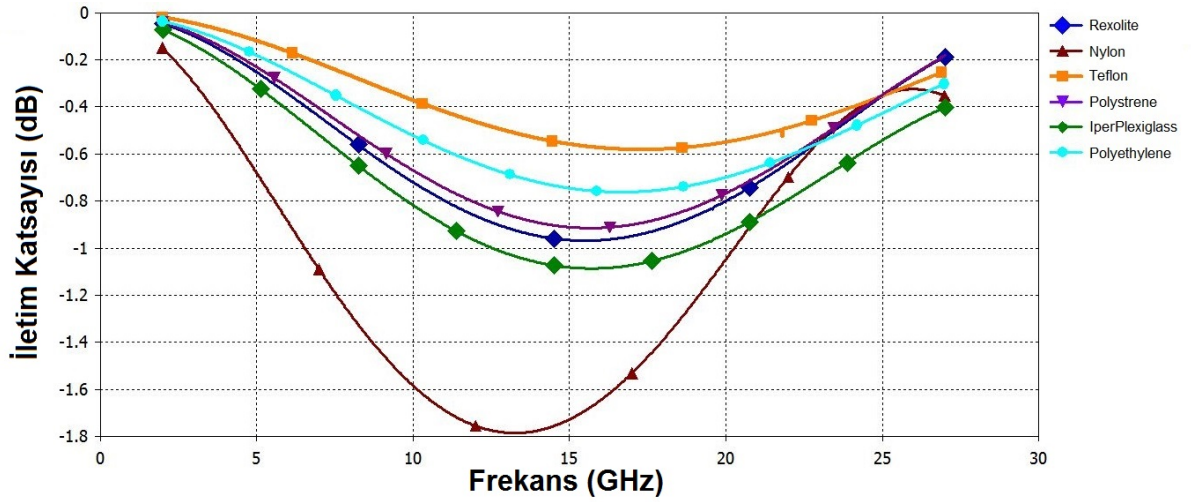
Şekil 5.6. Cam elyaf malzeme için teorik-tasarım karşılaştırması

3 boyutlu tasarım üstünden yapılan benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.7. CST ortamında tasarlanan tek katmanlı radom parça tasarımı

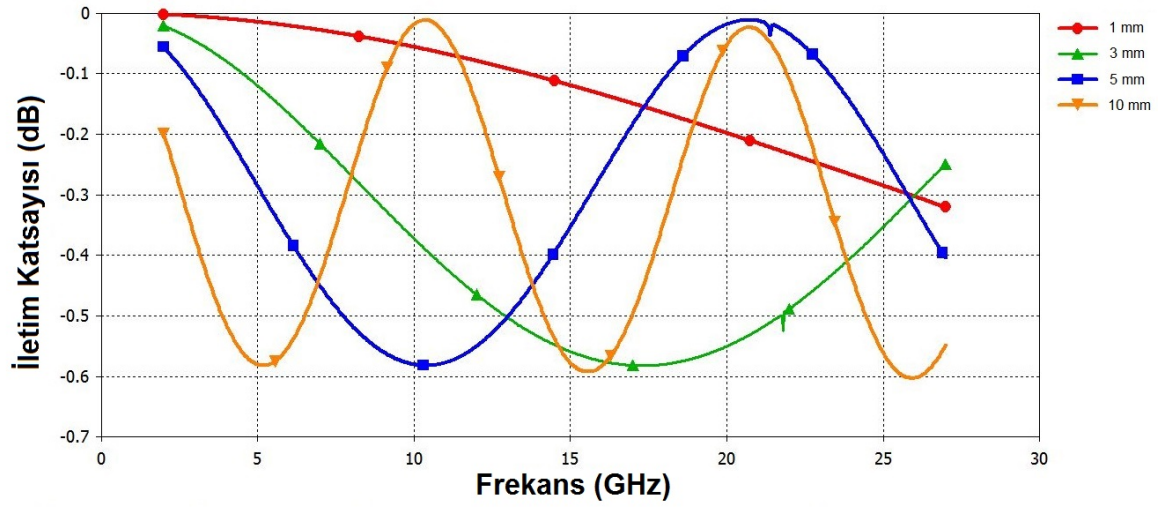
Teorik çalışmaların sonucunu farklı malzeme, farklı kalınlık ve farklı açı değerlerinin etkisi üstünden gösteren grafiklerin benzerleri tasarım sonuçları için de hazırlanmış ve Şekil 5.8'de, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



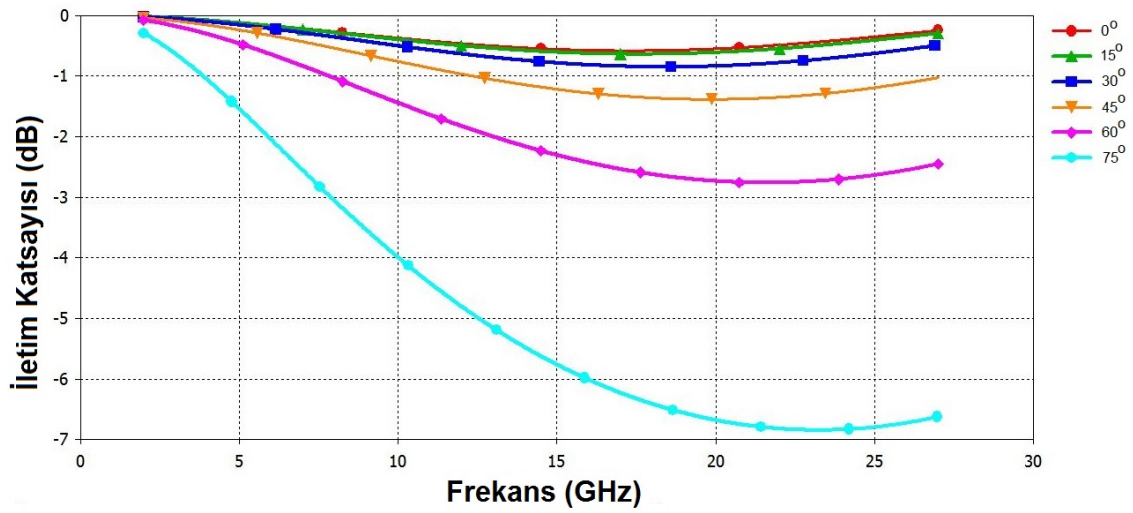
Şekil 5.8. Farklı radom malzemelerinin 3 mm kalınlıkta iletim katsayısı

CST ortamında yapılan radom tasarımlarının benzetim sonuçları teorik değerlerle örtüşmekte olup teflon malzemesinin 8- 18 GHz bandı için tasarlanan bir antende iyi bir performans göstereceği düşünülmektedir. Radom tasarlanırken dikkat edilmesi gereken parametrelerin malzemenin elektriksel özellikleri, katman kalınlığı ve dalga geliş





Şekil 5.9. Teflon malzemenin farklı katman kalınlıklarında iletim katsayısı



Şekil 5.10. Teflon malzemenin farklı geliş açılarında iletim katsayısı

açısı olduğu hem teorik hem tasarım sonuçlarında açıkça görülmektedir. CST ortamında yapılan tasarıma ait diğer sonuçlar teorik değerlerle karşılaştırılmak üzere yine EK A'da sunulmuştur.

### 5.3.2 A-Sandviç Radom İncelemesi

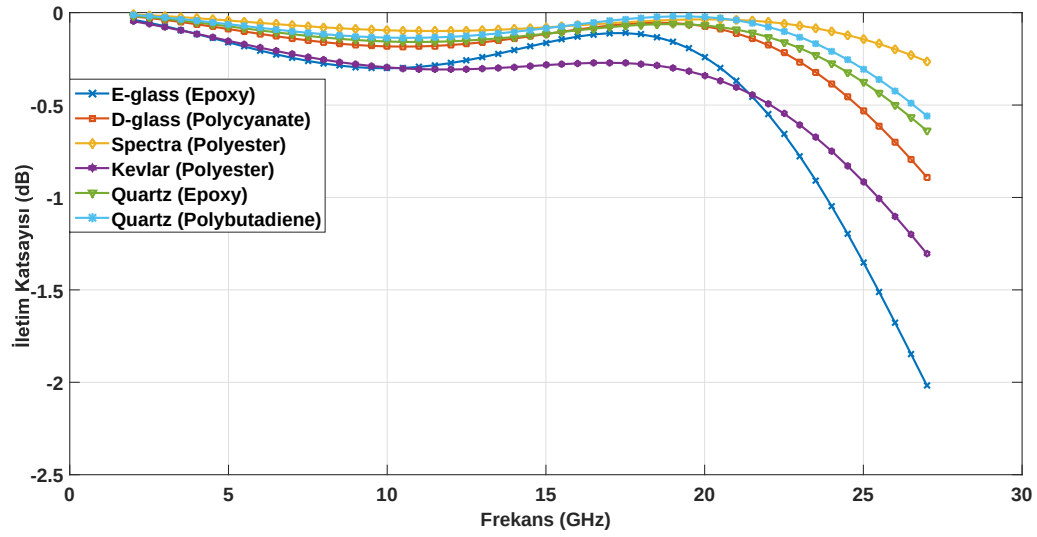
İki özdeş dış katman ve düşük dielektrik katsayısına sahip ara katmanın birlikte kullanıldığı A-Sandviç radom yapısı da tek katman radom gibi tasarlanan çift konik anten için kullanılabilir. Tez kapsamında tasarım çalışmaları A-Sandviç için de yapılmıştır.

Çalışmalar sırasında dış katman için Çizelge 5.3'te verilen farklı radom malzemeleri, ara malzeme olarak bal peteği (honeycomb) kullanılmıştır.

Çalışmaların teorik kısmı MATLAB ortamında uygulanmış, 3 boyutlu tasarım kısmı ise CST programında yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda teorik sonuçlar ile tasarıma ait benzetimler karşılaştırılmıştır. A-Sandviç radomda da radom performansını etkileyen parametreler yine katman kalınlığı, malzemelerin dielektrik katsayıları ve dalga geliş açısıdır. Tek katman radomdan farklı olarak bu yapıda hem ara malzemenin katman kalınlığı hem de dış katmanların kalınlıkları iletim katsayısını etkilemektedir. Bu bağlamda önce aynı kalınlık ve aynı dalga geliş açısı değeri için malzemelerin elektriksel özelliklerinin etkisi incelenmiştir. Şekil 5.11'de verilen grafikte farklı malzemelerin iletim katsayısına etkisi MATLAB ortamında yapılan teorik çalışmanın sonucu ile gösterilmiştir.

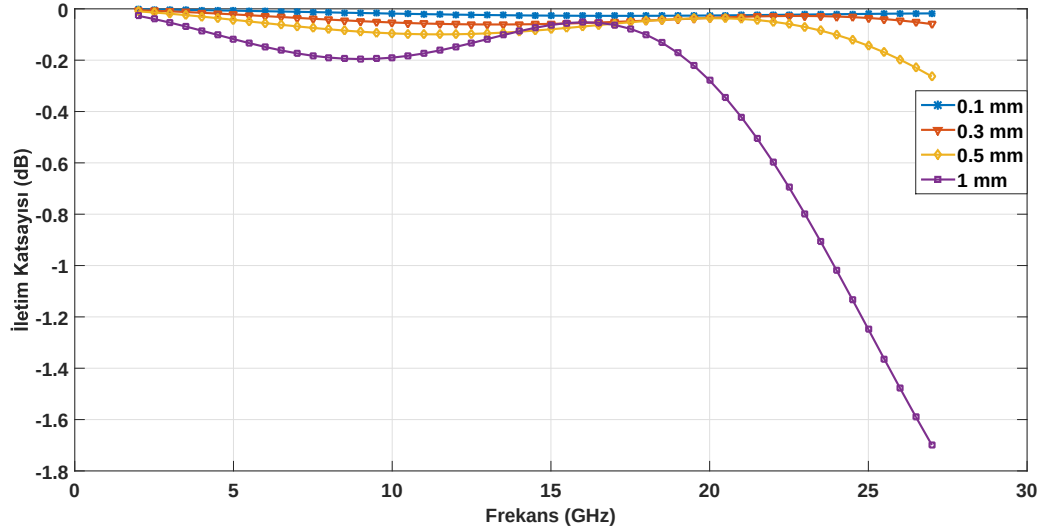
Şekil 5.11'de sonucu verilen incelemede dış katman radom kalınlığı 0.5 mm bal peteği kalınlığı ise 3 mm alınmış ve dalga geliş açısı  $0^\circ$  olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında en iyi performansı Polyester ile desteklenmiş Spectra göstermiştir. İletim katsayısı tüm frekanslarda -0.3 dB'nin üstündedir.

Sandviç radom tasarımı sırasında iletim katsayısı performansı incelenirken tek katman radom tasarımından farklı olarak hem ara malzemenin katman kalınlığı hem de dış tabakaların kalınlıkları dikkate alınmalıdır. Bu nedenle en iyi performansı sergileyen dış tabaka malzemesi (Spectra-Polyester) için dış tabaka kalınlığının etkisi incelenmiş ve sonuçları Şekil 5.12'de verilmiştir. Ara malzeme olan bal peteği kalınlığının iletim



Şekil 5.11. Farklı radom malzemelerinin iletim katsayısı

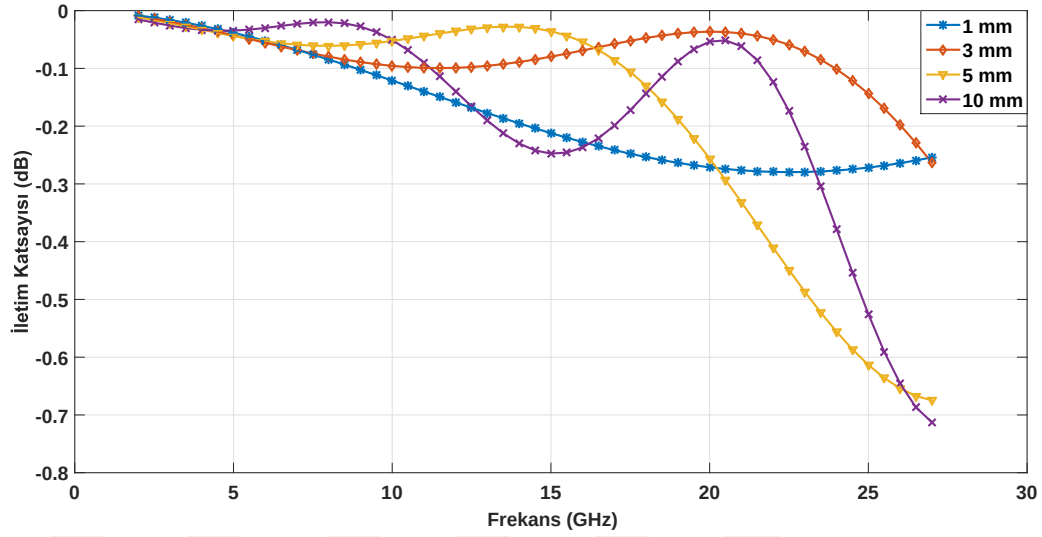
katsayısına etkisi ise Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Spectra-Polyester malzeme için farklı dış katman kalınlıklarında iletim katsayısı

Dış katman kalınlığı incelenirken ara malzeme kalınlığı 3 mm dalga geliş açısı ise  $0^\circ$  alınmıştır. Dış tabaka katman kalınlığının iletim katsayısına etkisi kalınlık arttıkça olumsuz şekilde artmaktadır.

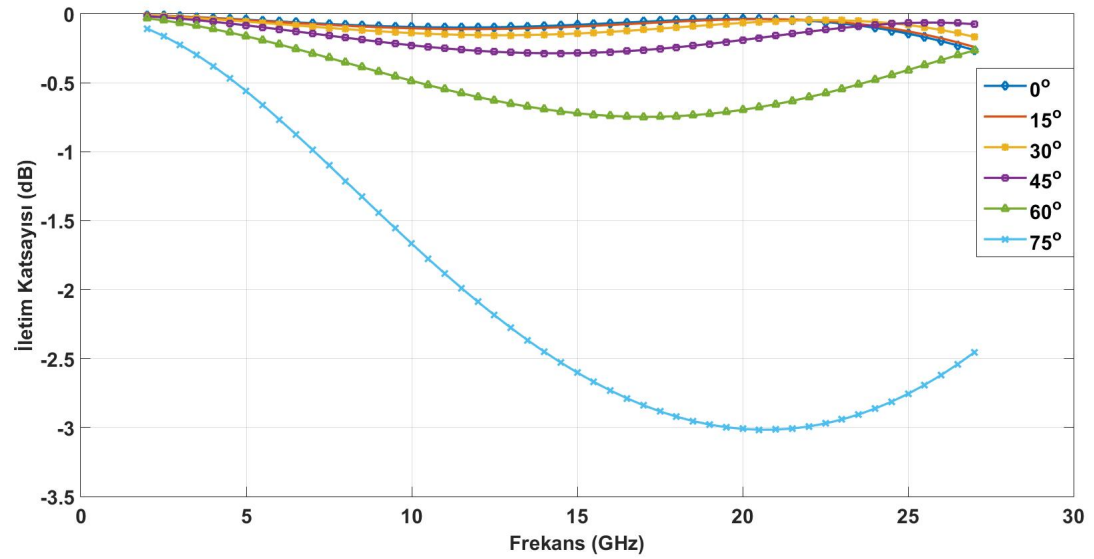
Ara malzemenin kalınlığı incelenirken dış tabaka katman kalınlığı 0.5 mm, dalga ge-



Şekil 5.13. Spectra-Polyester malzeme için farklı bal peteği kalınlıklarında iletim katsayısı

liş açısı ise  $0^\circ$  alınmıştır. Ara malzemenin kalınlığı ise frekanslara göre değişen iletim katsayısı performansları göstermektedir.

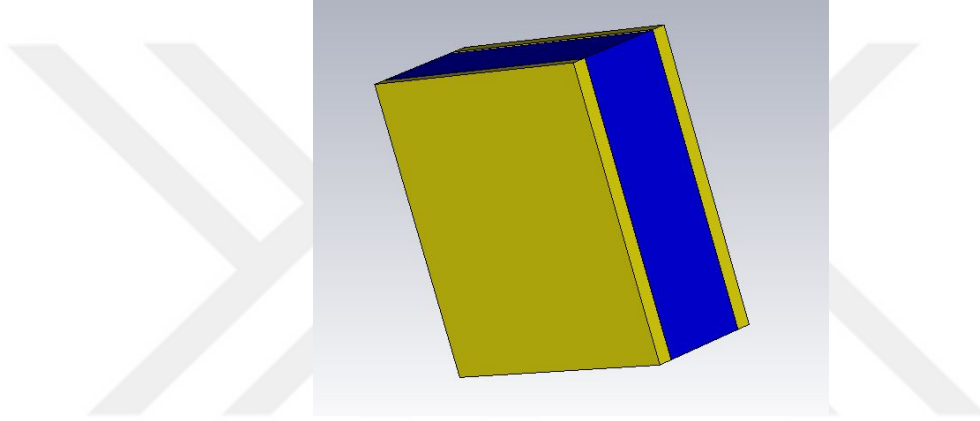
A-Sandviç radom tasarımında performansı etkileyen bir diğer parametre ise dalga geliş açısıdır. Dalga geliş açısının A-Sandviç radom tasarımında iletim katsayısına etkisi Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Spectra-Polyester malzeme için farklı dalga geliş açılarında iletim katsayısı

Dalga geliş açısının etkisinin incelendiği çalışma boyunca dış katman kalınlığı 0.5 mm ara malzeme kalınlığı ise 3 mm alınmıştır. Şekil 5.14'te verilen grafiklerde dalganın radom yüzeyinin normali ile yaptığı açı arttıkça iletim katsayısının azaldığı gözlemlenmektedir.  $0^\circ$  dalga geliş açısında iletim katsayısı 0 dB'ye oldukça yakınken  $75^\circ$ 'de -3 dB'ye kadar düşen iletim katsayısı değerleri elde edilmiştir.

Teorik inceleme sonuçları gösterilen A-Sandviç radomun Şekil 5.15'te gösterilen 3 boyutlu tasarımı CST ortamında yapılmıştır.

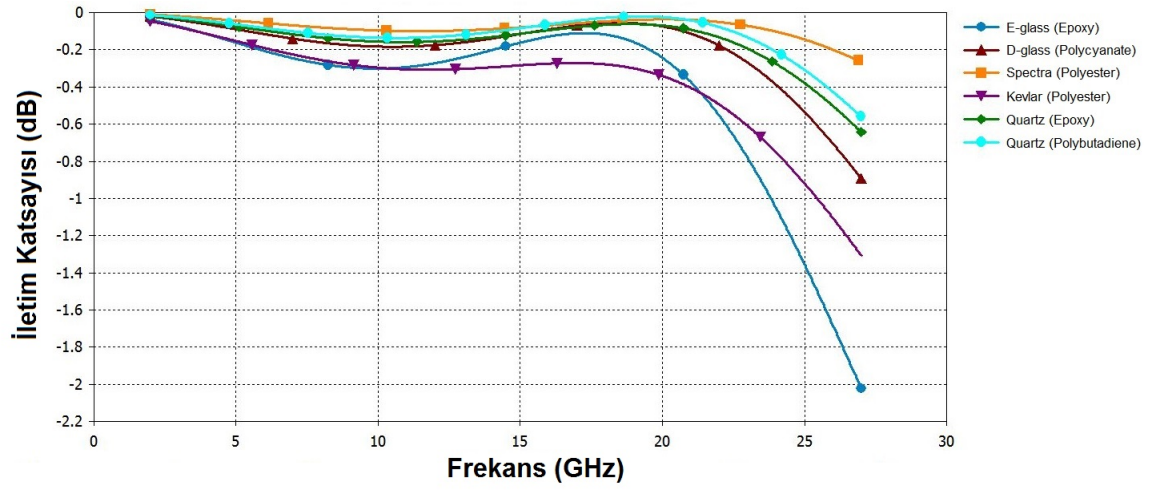


Şekil 5.15. CST ortamında tasarlanan A-Sandviç radom tasarımı

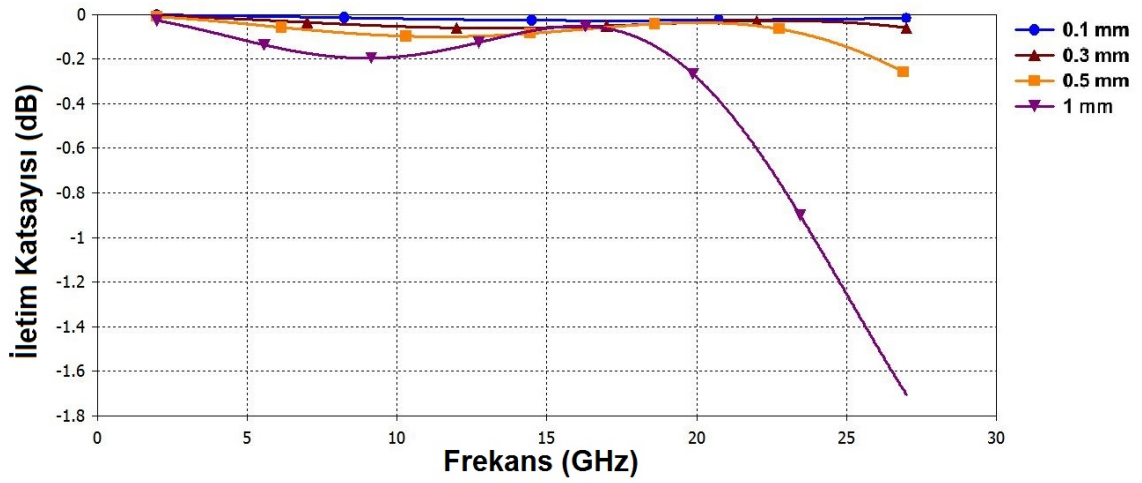
Elektriksel özelliklerin etkisi Şekil 5.16'da, dış tabaka kalınlığının etkisi Şekil 5.17'de, ara malzeme kalınlığının etkisi Şekil 5.18'de, dalga geliş açısının etkisi ise Şekil 5.19'da verilmiştir.

Şekil 5.16'da ara malzeme kalınlığı 3 mm dış katman kalınlığı ise 0.5 mm alınmışken dalga geliş açısı  $0^\circ$  olarak benzetim yapılmıştır. Şekil 5.17'de ara malzeme kalınlığı 3 mm, dalga geliş açısı  $0^\circ$  alınmıştır. Şekil 5.18'de dış tabaka kalınlığı 0.5 mm, dalga geliş açısı  $0^\circ$  alınmıştır. Şekil 5.19'da ara malzeme kalınlığı 3 mm, dış katman kalınlığı ise 0.5 mm alınarak benzetimler yapılmıştır.

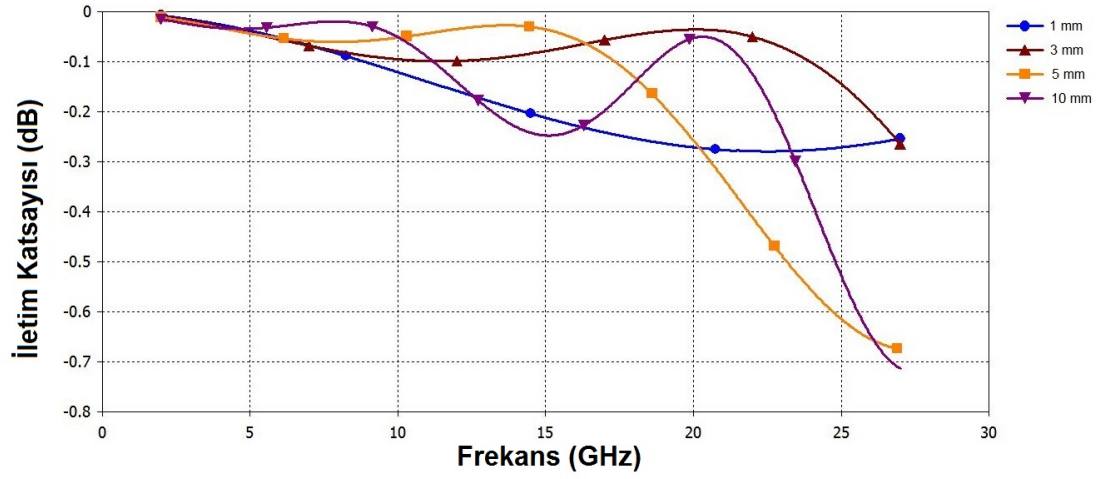
Yapılan tek katman ve A-Sandviç radom çalışmalarında iletim katsayısını etkileyen parametreler hem teorik hem tasarım üzerinden incelenmiştir. Yapılan literatür taramasında ve ön çalışmalarda elde edilen kritik parametreler üstünde çalışılıp bu parametrelerin iletim katsayısını nasıl değiştirdiği üstünde durulmuştur. Piyasada bulunan malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda her iki radom için de en iyi malzemeler



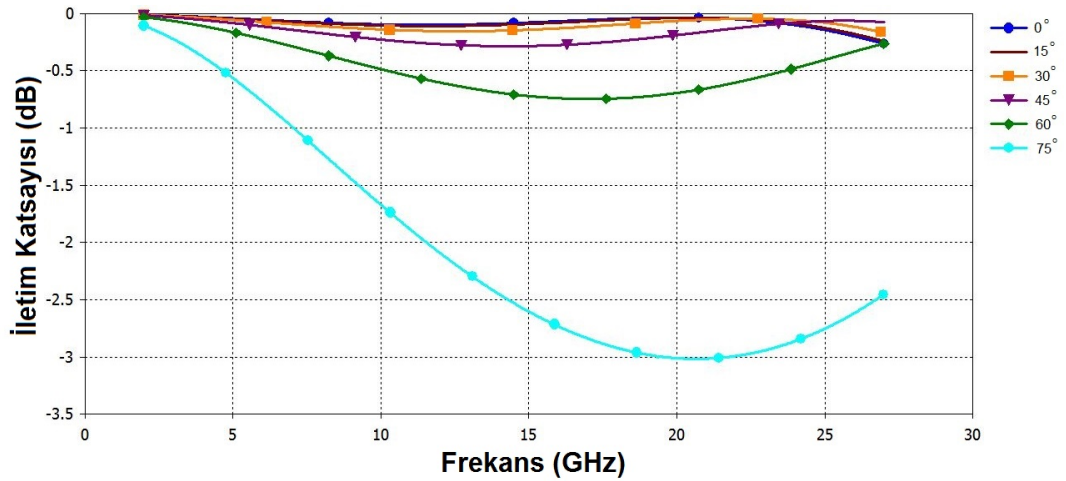
Şekil 5.16. Farklı radom malzemelerinin iletim katsayısı



Şekil 5.17. Spectra-Polyester malzeme için farklı dış katman kalınlıklarında iletim katsayısı



Şekil 5.18. Spectra-Polyester malzeme için farklı bal peteği kalınlıklarında iletim katsayısı



Şekil 5.19. Spectra-Polyester malzeme için farklı dalga geliş açılarındaki iletim katsayısı

belirlenmiştir. Dalga geliş açısının incelendiği örneklerde ise dalganın radom yüzeyiyle yaptığı açının küçük olmasının radom tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husus olduğu belirlenmiştir. Katman kalınlıklarını incelendiği benzetimlerde ise farklı katman kalınlıkları değerleri kullanılmış ve katman kalınlığının iletim katsayısına etkisi gözlenmiştir. Ancak katman kalınlığının en iyi değeri diğer parametrelerde olduğu kadar net değildir. En iyi performansı sağlayan katman kalınlıklarını belirlemek için en iyileme yöntemleri kullanılır [44]. Çalışmanın bir sonraki adımında radomun en iyi performansını sağlayan katman kalınlıklarını belirlemek için genetik algoritma eniyileme tekniği kullanılmıştır.

#### **5.4 Genetik Algoritma ile Katman Kalınlığı Çalışmaları**

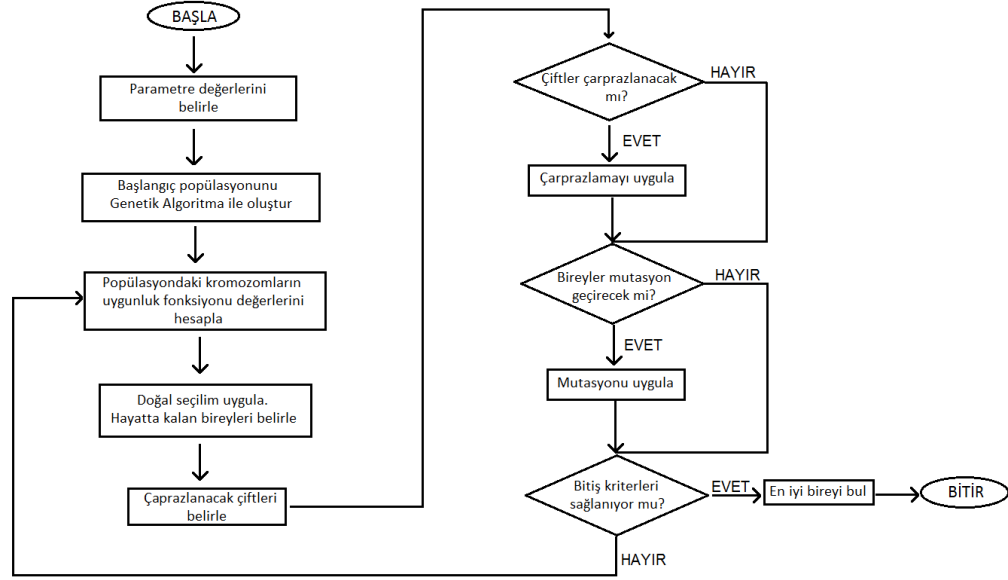
Önceki bölümde farklı parametreler için radom tasarımlarının iletim katsayısı performansları incelenmiştir. Kritik parametrelerden dalga geliş açısı ve elektriksel özellikler için herhangi bir eniyileme yöntemine ihtiyaç duyulmadan en iyi değerler belirlenebilmektedir. Tek katmanlı radom tasarımı için elektriksel özellikler açısından en iyi sonucu teflon malzemesi  $0^\circ$  dalga geliş açısı için vermişken, A-Sandviç tasarımda en az iletim katsayısına neden olan dış katman malzeme olarak polyester reçineye batırılmış spectra ortaya çıkmış ve yine  $0^\circ$  en iyi radom performansını sağlayan dalga geliş açısı değeridir. Ancak radom katman kalınlıklarının hangi değerde en iyi performansı sergilediğinin belirlenmesi için bir eniyileme yöntemine başvurulmuştur. En uygun katman kalınlıkları için hem MATLAB hem CST ortamında genetik algoritma eniyileme yöntemi kullanılmıştır.

Genetik algoritma rassal arama tekniklerini kullanarak en iyi sonucu bulmaya çalışan bir eniyileme tekniğidir [45]. Kendi içinde üç aşamayla en uygun parametre değerine ulaşmayı hedefler. Bu adımlar sırasıyla;

- Doğal Seçilim
- Çaprazlama
- Mutasyon



olarak tanımlanır. Şekil 5.20’de genetik algoritmaya ait akış diyagramı verilmiştir.



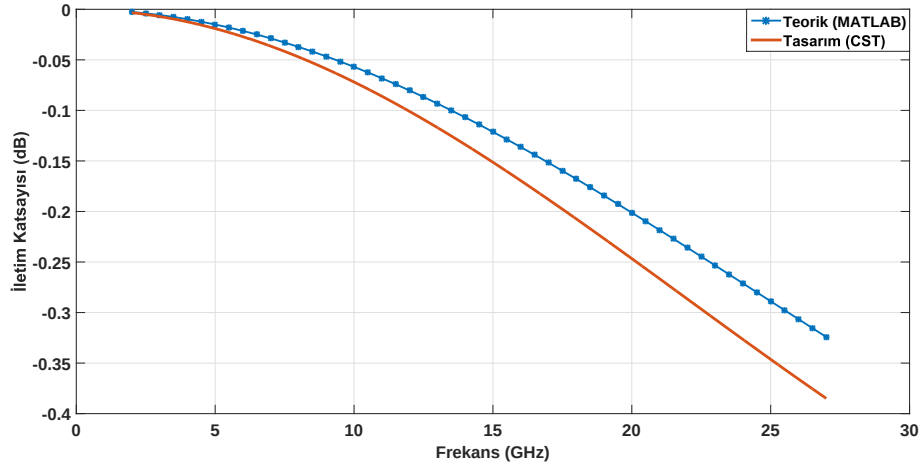
Şekil 5.20. Genetik algoritma akış diyagramı

Genetik algoritmanın belli sınırlar içinde yerel eniyi sonuçlara takılmaması sayesinde evrensel çözüm sunması önemli bir avantajdır. Çalışma sırasında MATLAB’ın hazır olarak sunduğu tek ve çok parametre genetik algoritma fonksiyonları iletim katsayısı denkleminde uygulanmış ve teorik değerler üzerinden en uygun katman kalınlığı belirlenmeye çalışılmıştır. Tasarım üzerinde de genetik algoritma CST aracılığıyla uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### 5.4.1 Tek Katman Radoma Genetik Algoritma Uygulaması

Tek katman radom tasarımı için genetik algoritma sadece o katmanın kalınlığının eniyilenmesi için uygulanmıştır. Uygulama teflon malzemesi ve  $0^\circ$  dalga geliş açısı için yapılmıştır. Şekil 5.21’de matematiksel modele uygulanan genetik algoritma sonucu ile 3 boyutlu tasarıma uygulanan genetik algoritma sonucu gösterilmiştir.

Her iki benzetimde de tüm frekanslarda -0.4 dB’den yüksek iletim katsayısı değerleri elde edilmiştir. MATLAB ortamında matematiksel modelle yapılan çalışma ile Şekil 5.21’deki sonucu veren katman kalınlığı 1 mm iken, CST ortamında tasarım üstünde

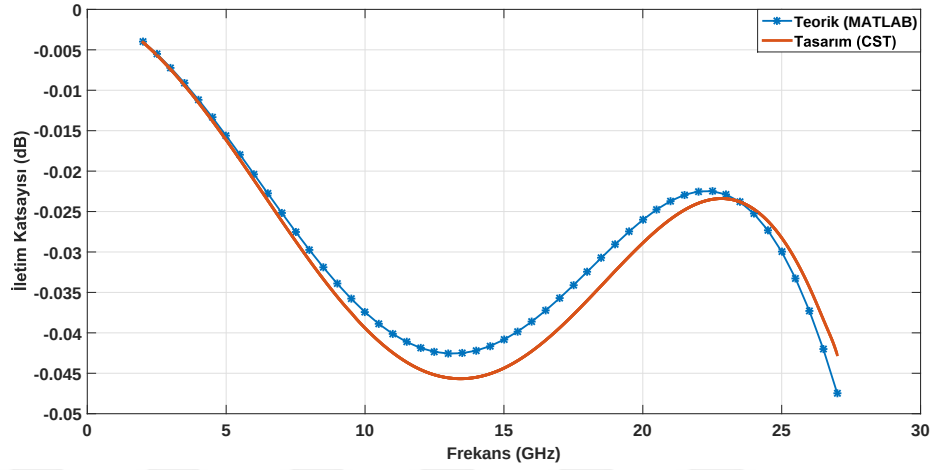


Şekil 5.21. Tek katman radom katman kalınlığı eniyileme sonuçları

yapılan eniyileme sonucu katman kalınlığı 1.14 mm elde edilmiştir.

#### 5.4.2 A-Sandviç Radoma Genetik Algoritma Uygulaması

A-Sandviç radom tasarımı için hem ara hem de dış katman malzeme kalınlıklarının belirlenmesi için genetik algoritma uygulanmıştır. Uygulama, ara katman malzemesi olarak bal peteği, dış katman malzemesi olarak polyestere batırılmış spectra ve  $0^\circ$  dalga geliş açısı için yapılmıştır. Şekil 5.22’de matematiksel modele uygulanan genetik algoritma sonucu ile 3 boyutlu tasarıma uygulanan genetik algoritma sonucu gösterilmiştir.

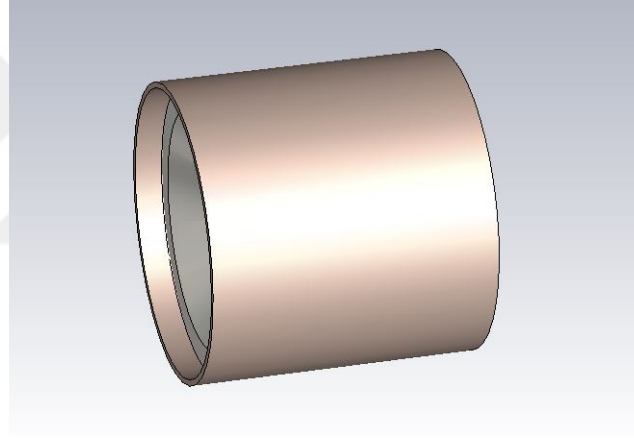


Şekil 5.22. A-Sandviç radom katman kalınlıkları eniyileme sonuçları

Her iki benzetimde de tüm frekanslarda -0.05 dB'den yüksek iletim katsayısı değerleri elde edilmiştir. MATLAB ortamında matematiksel modelle yapılan çalışma ile Şekil 5.22'deki sonucu veren dış katman kalınlığı 0.2 mm ara katman kalınlığı 3.2 mm iken, CST ortamında tasarım üstünde yapılan eniyileme sonucu dış katman kalınlığı için 0.23 mm ve ara katman kalınlığı için 3.23 mm elde edilmiştir.

## 6. ANTEN VE RADOM ENTEGRE TASARIMI

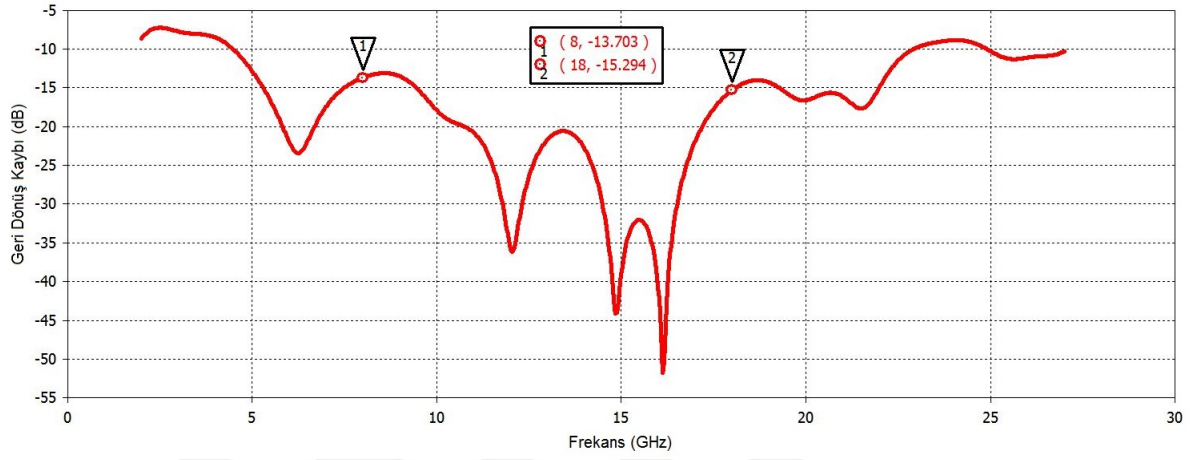
Önceki bölümlerde çift konik anten ve radom tasarımı üstüne yapılan çalışmaların ardından bu bölümde anten ve radom yapısının entegre tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Entegre tasarım için en iyi anten performansını sergileyen anten ile iletim katsayısı performansı açısından en iyi tek katmanlı radom birleştirilerek benzetimler yapılmıştır. A-Sandviç radom performans sonuçlarının daha iyi sonuç vermesine rağmen üretim kolaylığı da düşünülerek tek katmanlı tasarıma karar verilmiştir. Tek katmanlı radomlar arasında en iyi iletim katsayısı değerlerine sahip olan teflon malzemesi tercih edilmiştir. Şekil 6.1'de görüldüğü biçimde antenin çevresinin teflon ile sarılmasıyla yapı oluşturulmuş ve antenin performansı gözlemlenmiştir.



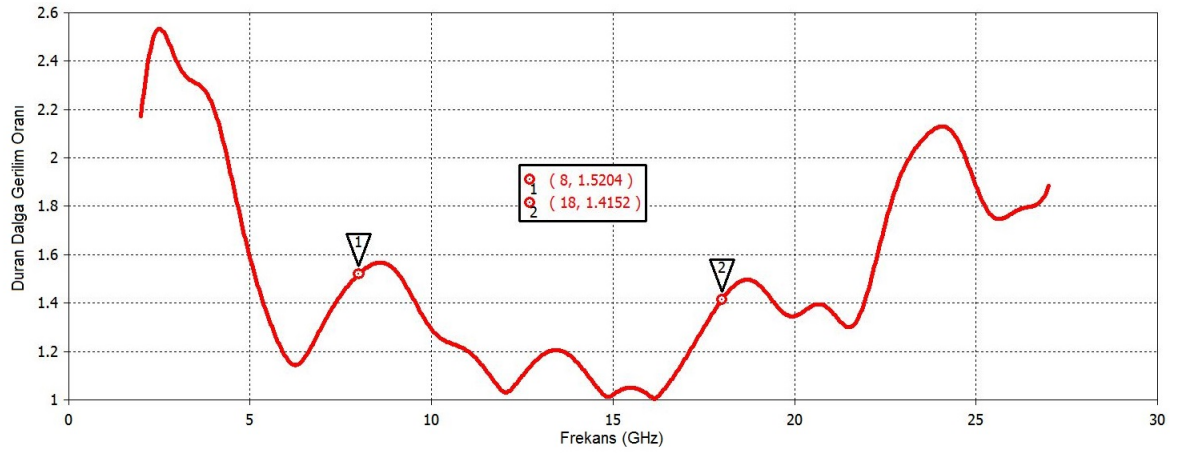
Şekil 6.1. Çift konik anten ve radom entegre tasarımı

Anten tasarımlarında olduğu gibi antenin geri dönüş kaybı, duran dalga oranı ve gerçek kazanç değerleri incelenmiş ve sonuçları Şekil 6.2'de, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te sunulmuştur.

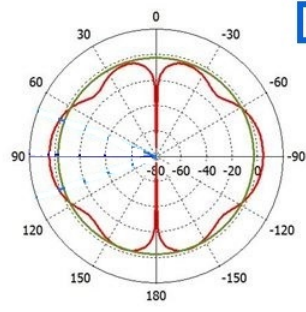
Anten geri dönüş kaybı incelendiğinde anten merkez çalışma frekansının kaydığı ancak değerlerin çok fazla kötüleşmediği gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar duran dalga oranı grafiklerinde de görülmektedir. Işıma örüntülerinde ise özellikle yüksek frekanslarda eş yönlü anten ışıma karakteristiğine göre bozulmalar meydana gelmiştir. Buna rağmen elde edilen gerçek kazanç değerleri 8- 18 GHz bandında radomsuz tasarımda elde edilen değerlere yakındır. Entegre tasarıma ait gerçek kazanç değerlerine ait grafik Şekil 6.6'da sunulmuştur.



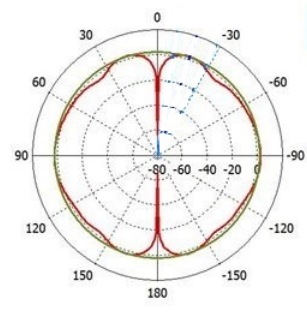
Şekil 6.2. Entegre tasarım için geri dönüş kaybı



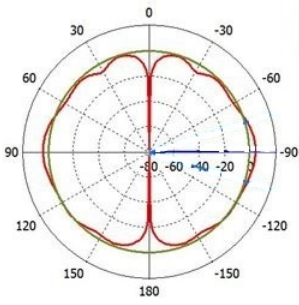
Şekil 6.3. Entegre tasarım için duran dalga gerilim oranı



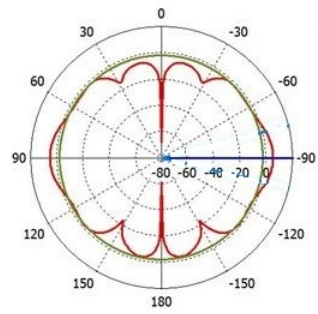
**8 GHz**



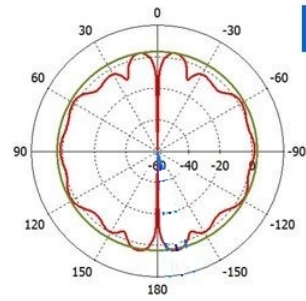
**10 GHz**



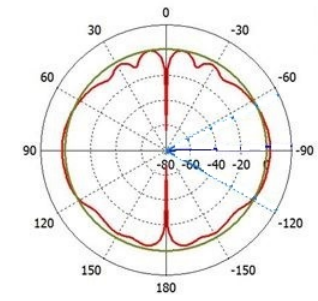
**12 GHz**



**14 GHz**

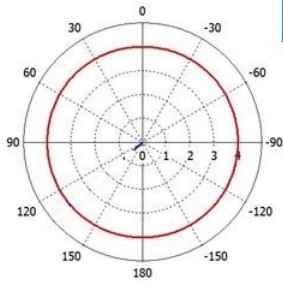


**16 GHz**

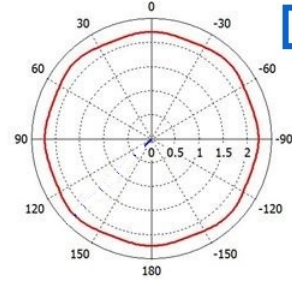


**18 GHz**

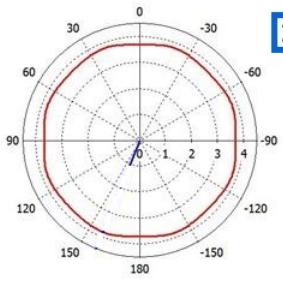
Şekil 6.4. Entegre tasarım için E-düzlem ışıma örüntüleri



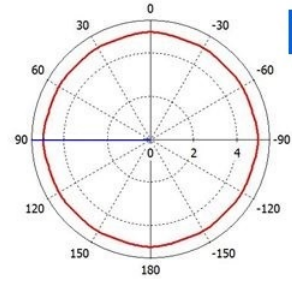
**8 GHz**



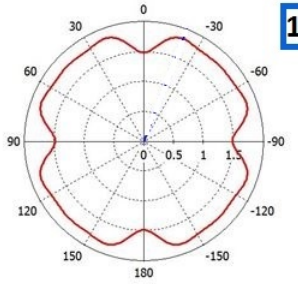
**10 GHz**



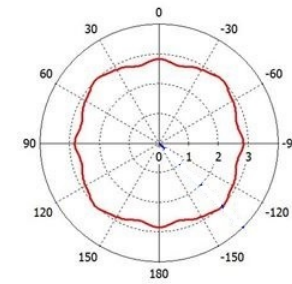
**12 GHz**



**14 GHz**

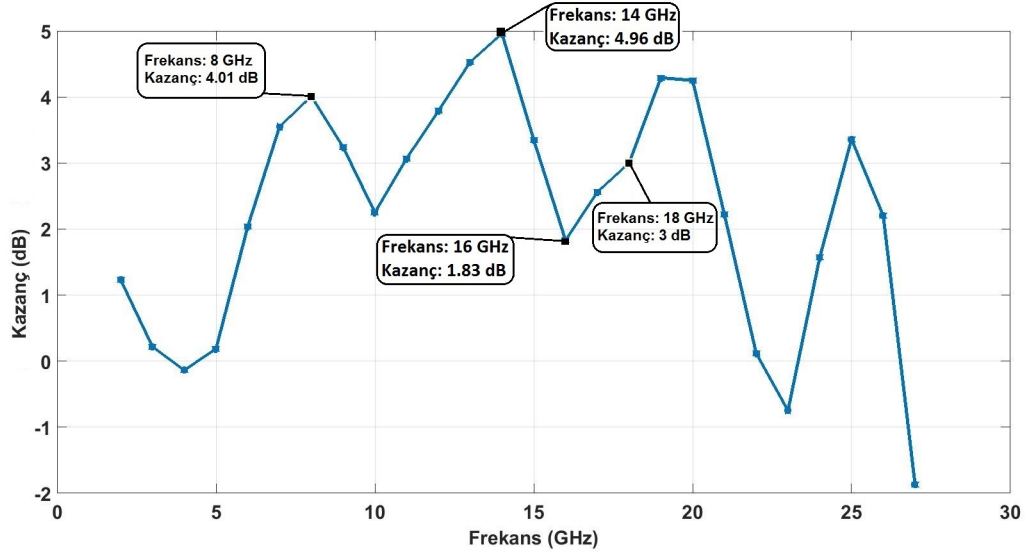


**16 GHz**



**18 GHz**

Şekil 6.5. Entegre tasarım için H-düzlem ışıma örüntüleri



Şekil 6.6. Entegre tasarım için elde edilen kazanç değerleri



## 7. SONUÇLAR

Tez kapsamında,  $50 \Omega$  empedans değerine sahip eşeksenel hat ile doğrudan beslenerek kullanılan çift konik anten tasarım ve üretim çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca bir antenin çevresel etkenlerden korunması için elzem olan radom yapısının tasarım ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

Antene ait teorik çalışma bölümünde çift konik antenin empedans hesaplamaları üstüne çalışılmıştır. Eş yönlü anten karakteristiği gösteren çift konik anten dipol anten ailesinden sayılabileceği için dipol anten ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Çift konik anten dar açılı ve geniş açılı olmak üzere iki kategoride ele alınmıştır. Dipol anten, dar açılı çift konik anten ve geniş açılı çift konik antene ait empedans çalışmaları matematiksel olarak yapılmıştır. Dar açılı çift konik antenin açısı değeri küçüldükçe dipol antene fiziksel olarak yakınsayacağı, dolayısıyla da benzer ışıma karakteristiği sergileyeceği yaklaşımıyla bu iki antenin empedans değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarımın doğrudan beslemeli bir çift konik anten olması nedeniyle anten empedansını olası besleme empedansına eşleme çalışmaları yapılmıştır. Bu bağlamda besleme empedansını sağlayan uygun koni açısı tasarım çalışmaları öncesi geniş açılı çift konik anten empedans çalışmaları sırasında belirlenmeye çalışılmıştır.

Anten tasarımı bölümünde CST Microwave Studio programında çift konik anten için tasarım çalışmaları yapılmıştır. Çift konik anten performansını etkileyen üç ana parametrenin koni açısı, anten boyu ve koniler arası açıklık olması nedeniyle tasarım çalışmaları bu parametreler üstünden yürütülmüştür. Anten performansını gösteren geri dönüş kaybı, duran dalga gerilim oranı ve kazanç değerlerine bakılarak bu parametreler için uygun değerler seçilmesi için çalışılmıştır. İlk aşamada koni açısı üstüne çalışmalar yapılmış diğer parametreler sabit tutulmuştur. Sonraki aşamada koni yüksekliği üstüne, en son aşamada da koniler arası açıklık üstüne tasarım çalışmaları yapılmıştır. Her aşamada üstünde çalışılan parametrenin en iyi anten performansını sağlayan değeri belirlenip diğer aşamaya geçilmiştir. Tüm aşamalar tamamlandıktan sonra elde edilen değerler üstünden eniyileme çalışmaları yapılarak anten performansını iyileştirmek amaçlanmıştır. Eniyilenmiş parametrelere göre tasarlanan antenin performansı incelendiğinde 4-26 GHz frekans bandında -10 dB'den daha düşük geri dönüş kaybı

gözlemlenmiştir. Hedef bant olan 8-18 GHz arasında en yüksek geri dönüş kaybı -13.5 dB değerine sahiptir. Duran dalga gerilim oranı ise benzetim yapılan 2-27 GHz frekans bandının tamamında 2.5'tan daha düşüktür. Elde edilen kazanç değerleri ise 8-18 GHz arasında 0.96 dB ile 4.55 dB arasında değişmektedir.

Sonraki aşamada radom tasarımına yönelik teorik ve tasarım çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalar Tek katman ve A-Sandviç radom tiplerinde farklı malzemeler için yapılmıştır. Önce iletim hattı modellemesinden yararlanılarak MATLAB ortamında katman kalınlıkları ve malzemelerin elektrik özelliklerinin etkisi incelenmiş, ardından aynı parametreler için CST Microwave Studio ortamında tasarım sonuçları değerlendirilmiştir. Ardından bu teorik ve tasarım sonuçları karşılaştırılıp tutarlılıkları incelenmiştir. Hem A-Sandviç hem de tek katman radomda en iyi performansı sergileyen radom malzemeleri seçildikten sonra katman kalınlıkları için en uygun parametrelerin belirlenmesi amacıyla genetik algoritma eniyileme yönteminden yararlanılmıştır. Teorik ve tasarım çalışmaları üstünde yapılan eniyileme çalışmaları karşılaştırılmış ve her iki radom tipi için katman kalınlıklarına karar verilmiştir.

Tüm teorik ve tasarım çalışmalarının ardından A-Sandviç radom için en iyi sonucu veren dış katman malzemesi polyestere batırılmış spectra, ara malzeme ise bal peteği olarak belirlenmiştir. Tek katman radom içinse en iyi performansı teflon malzeme sergilemiştir. İlgilenilen frekans bandında A-Sandviç radom tek katman radomdan daha iyi performans sergilese de üretim kolaylığı ve iletim katsayısının -0.4 dB'den düşük olmaması nedeniyle tek katman radomun üretimine karar verilmiştir.

Anten ve radom tasarımının ardından seçilen radom malzemesiyle tasarlanan çift konik anten bir araya getirilerek CST Microwave Studio programında benzetimleri yapılmıştır. Benzetimler sonucu entegre yapının merkez çalışma frekansı 16 GHz seviyesine kaymıştır. Çift konik anten ölçümlerine kıyasla 14-21 GHz arasında geri dönüş kaybının arttığı, diğer frekanslarda önemli bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Elde edilen kazanç değerleri ise 1.83 dB ile 4.96 dB arasında değişmektedir.

Önceki bölümlerde teorik ve tasarım çalışmaları yapılan çift konik anten ile radoma ait yapıların üretim sonuçları değerlendirilmiştir. Anten bakır malzemeden, radom ise en iyi

sonuçları veren tek katman radom malzemesi olan teflondan üretilmiştir.

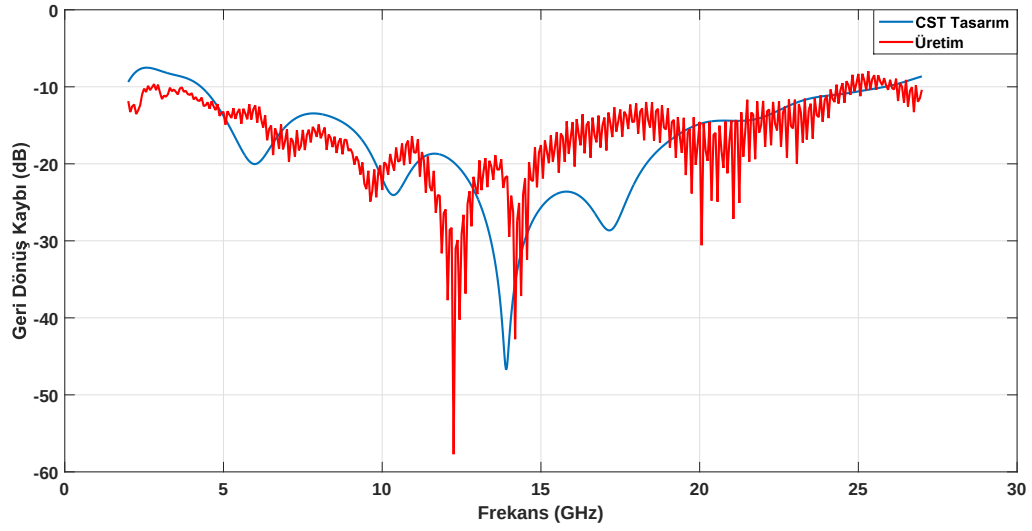


Şekil 7.1. Üretilen çift konik anten ve radom

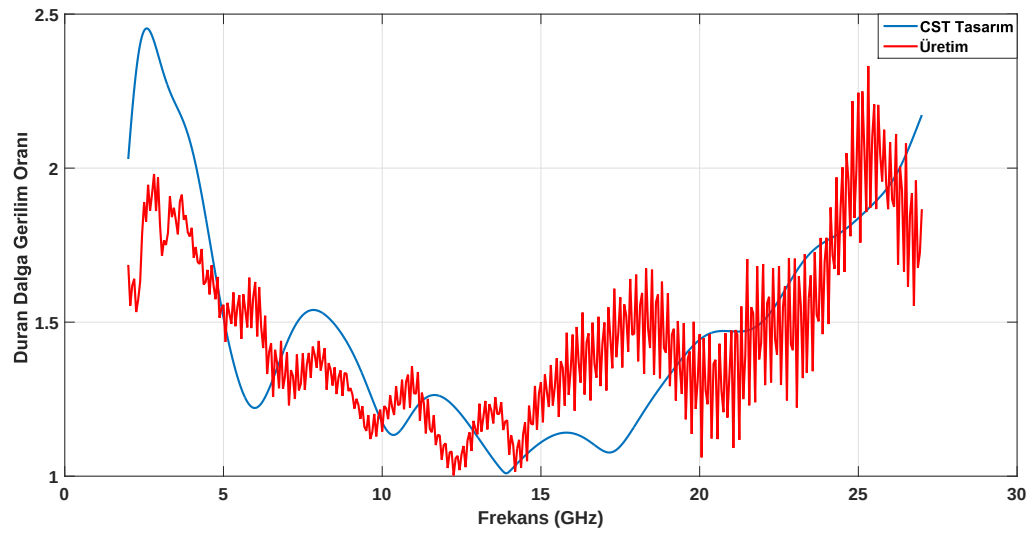


Şekil 7.2. Üretilen çift konik anten ve radomun entegre yapısı

Üretim yapılırken tasarım çalışmaları sırasında elde edilen eniyilenmiş parametrelere üretim teknolojileri imkan verdiği ölçüde sadık kalınmıştır. Anten beslemesi için ise Amphenol firmasına ait 18 GHz'e kadar çalışan SMA tipi konektör seçilmiştir [46]. Üretilen antene ait geri dönüş kaybı ve duran dalga gerilim oranı verileri Network Analizör yardımı ile ölçülmüş, sonuçlar tasarım çalışmaları sırasında elde edilen eniyilenmiş sonuçlarla karşılaştırılarak Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te sunulmuştur.



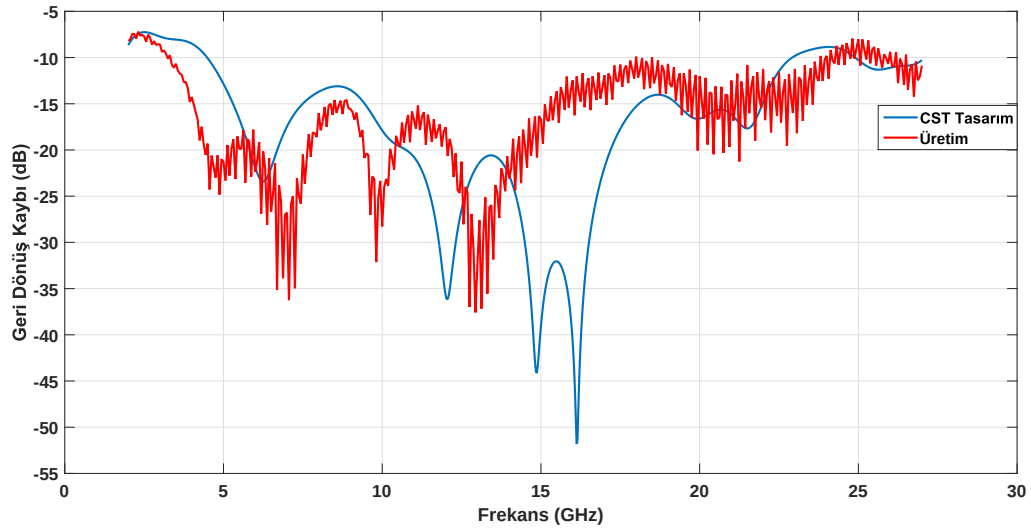
Şekil 7.3. Çift konik anten üretim ve tasarım geri dönüş kaybı



Şekil 7.4. Çift konik anten üretim ve tasarım duran dalga gerilim oranı

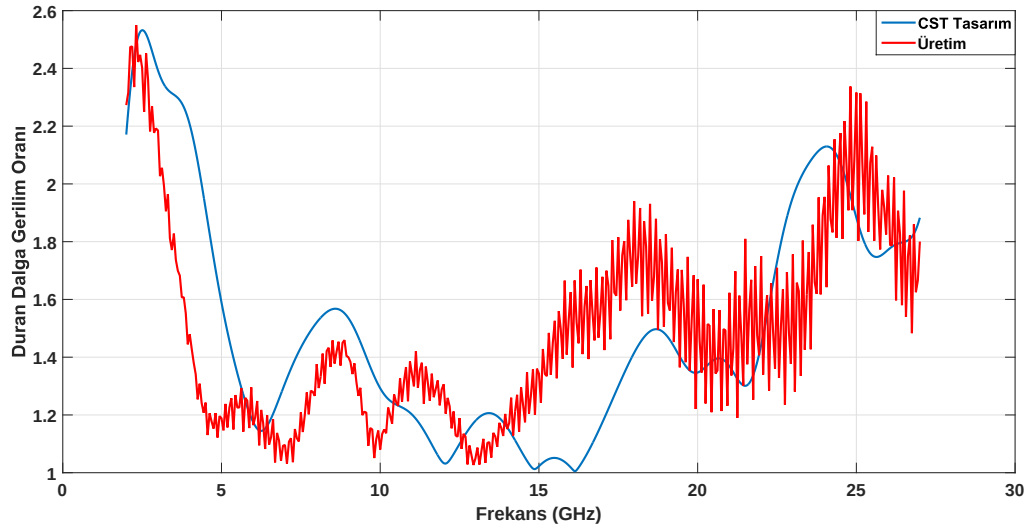
Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te üretilen anten sonuçları tasarım sonuçlarına göre farklılık göstermiştir. Tasarlanan antenin parçalarının milimetrenin onda biri hassasiyetinde olması ve antenin lehim tutması için bakır malzeme seçilmesi üretimi zorlaştırmıştır. Tüm bunlar özellikle Ku bandında geri dönüş kaybının artmasına neden olmuştur. Bunun yanında merkez çalışma frekansı da 14 GHz'den 12 GHz'e kaymıştır. 14-19 GHz arasında 10 dB'nin üstünde geri dönüş kaybı farkı görülmektedir. 2-5 Ghz arasında ise üretilen antenin geri dönüş kaybının tasarım sonuçlarından 3-4 dB daha az olduğu, bunun sonucunda duran dalga gerilim oranının da 2'nin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Diğer frekanslarda tasarım sonuçları ile benzer geri dönüş kaybı değerleri elde edilmiştir.

Üretilen anten performansı incelendikten sonra anten radom ile birlikte kullanılarak ölçümler tekrarlanmış ve entegre tasarım kısmında elde edilen eniyilenmiş sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 7.5'te ve Şekil 7.6'da sunulmuştur.



Şekil 7.5. Çift konik anten ile radom entegre yapısı için üretim ve tasarım geri dönüş kaybı

Anten ile radomun birlikte kullanılarak yapılan ölçümlerde ise anten üretiminden kaynaklı performans kayıplarına ek olarak radomun üretiminden kaynaklanan kayıplar da Şekil 7.5'te ve Şekil 7.6'da gözlemlenmiştir. Radom tasarımı sırasında diğer radom malzemelerine göre daha iyi performans gösteren teflon kalınlığının üretim aşamasında sağlanamaması en önemli performans kaybı nedenidir. Radomun da etkisiyle özellikle Ku bandında geri dönüş kayıplarının arttığı ve merkez frekansın kaydığı gözlemlenmiş olsa



Şekil 7.6. Çift konik anten ile radom entegre yapısı için üretim ve tasarım duran dalga gerilim oranı

da entegre yapının geri dönüş kaybı ve duran dalga gerilim oranına ait en kötü değerler aynı seviyededir. 14-19 GHz arasında geri dönüş kaybı -11 dB'ye kadar yükselmiştir. 2-10 GHz arasında ise ortalama 5 dB daha düşük bir geri dönüş kaybı gözlemlenmektedir. Diğer frekanslarda ise tasarım sonuçlarına yakın geri dönüş kaybı değerleri elde edilmiştir.

Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar, ileride doğrudan besleme yöntemi ile daha farklı ve daha geniş frekans bantlarında yapılacak çift konik anten tasarım çalışmaları için yardımcı olabilir. Radom kısmındaki çalışmalar ise A-Sandviç ve tek katman radom yapılarında doğru radom malzemesi ve katman kalınlığı belirlenmesinde ilerideki radom çalışmalarında destek sağlayabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Balanis C.A., *Antenna Theory Analysis And Design*, Chapter-2, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 32-33, **2005**.
- [2] Carr, J.J., Directional or Omnidirectional Antenna, *Joe Carr's Radio Tech-Notes*.
- [3] S., Birkett, Point to Multipoint Vs. Mesh Topology for Wireless Deployments, <https://www.linkedin.com/pulse/point-multipoint-vs-mesh-topology-wireless-shaun-birkett>.
- [4] Balanis C.A., *Modern Antenna Handbook*, John Wiley & Sons, **2008**.
- [5] Balanis C.A., *Antenna Theory Analysis And Design*, 4th Chapter, 3rd Edition, John Wiley & Sons, **2005**.
- [6] <http://www.antenna-theory.com/antennas/monopole.php>
- [7] <http://www.abominablefirebug.com/rduckey.html>
- [8] Kraus, C.D., *Antennas*, 2nd Edition, Tata McGraw-Hill Edition, **1988**.
- [9] Liu, N., Zhang, Z., Gangfu, Liu, S., Gotta, Q., Wang L., A Compact Biconical Antenna for Ultrawideband Applications, *National Key Laboratory of Science and Technology on Antennas and Microwaves*, 327-332, **2013**.
- [10] Sapuan, S.Z., Herie, F.H, Jenu, M.Z.M. , A New Small Sized Wideband Biconical Antenna For Electromagnetic Compatibility (EMC) Measurements *Research Center for Applied Electromagnetics*, 222-256, **2016**.
- [11] Yu, D., Zhai, W., Xie, G., Zhang, L., A Novel Omni-Directional UWB Biconical Antenna with Band-Notched, 1172-1175, *IEEE CIE International Conference*, **2011**.
- [12] Black D.N., Brunasso T.A. , An Ultra-Wideband Bicone Antenna, *EMS Technologies*, **2006**.
- [13] Kudpik R., Siripon N., Meksamoot, K., Kosulvit, S., Design of a Compact Biconical Antenna for UWB Applications, *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, **2011**.
- [14] Gronich, I., Omni Directional Ultra Wideband Asymmetric Biconical Antenna, *Antenna Department, Elta, Israel*, **2009**
- [15] Monow, J.D., Shorted Biconical Antenna for Ultra-Wideband Applications, *Cushcraft Corporation*, 143-146, **2003**.
- [16] Wade, G., *Signal coding and processing*, Cambridge University Press, **1994**.
- [17] Qing, X., Chen, Z.N., Chia, M.Y.W., UWB Characteristics of Disc Cone Antenna *Institute for Infocomm Research*, New Jersey: Prentice Hall, 97-100, **2005**.

- [18] Ghannoum, H., Bories, S., Roblin, C., Sibille, A., Biconical Antennas for Intrinsic Characterization of the UWB Channel, *Laboratory of Electronics and Computer Engineering*, 101-104, **2005**.
- [19] Kai, Z., Wanli, L., Xiwei, C., Study on the Biconical Antenna in the EMC Test Suitable for Engineering Machinery, *World Congress on Computer Science and Information Engineering*, 82-84, **2009**.
- [20] Austin, B.A., Fourie, A.P.C., Characteristics of the Wire Biconical Antenna Used for EMC Measurements, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 33, no. 3, 179-187, **1991**.
- [21] Sapuan, S.Z., Jenu, M.Z.M., Kazemipour, A., Calibration of Calculable Wideband Direct Feed Biconical Antenna for EMC Measurements, **2013**.
- [22] Saka, B., Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)- Ders Notu, *Hacettepe Üniversitesi-Elektrik-Elektronik Mühendisliği*, **2014**.
- [23] Chick, D.F., Collins, P.J., Goodman, S.A., Martin, R.K., Terzuoli Jr., A.J., Direction Finding With Mutually Orthogonal Antennas, *Air Force Institute of Technology*, 2853-2856, **2011**.
- [24] Svantesson, T., Multimode Based Direction Finding *Department of Signals and System Chalmers University of Technology*, 595-599, **2000**.
- [25] Honey, R.C., Jones, E.M.T. Versatile Multiport Biconical Antenna, *PROCEEDINGS OF THE IRE*, 1374-1383, **1957**.
- [26] <http://www.dopsys.com/products/components.html>
- [27] Pennock, S.R., Jenks, C.H.J., Wideband Loaded Bicone Antennas for GPR Applications, *15th International Conference on Ground Penetrating Radar - GPR 2014*, 777-782, **2014**.
- [28] Sharma, Divya., Verma, S., Sharma, K., Network Topologies in Wireless Sensor Networks: A Review, *International Journal of Electronics & Communication Technology*, 4, 3, 93-97, **2013**.
- [29] Biconical Television Antenna, *New AIEE Committee Organization*, 1011, **1947**.
- [30] Sapuan, S.Z., Kazemipour, A., Jenu, M.Z.M., Direct Feed Biconical Antenna as a Reference Antenna, *2011 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM 2011)*, 5-8, **2011**.
- [31] Balanis C.A., Antenna Theory Analysis And Design, 9th Chapter, 3rd Edition, *John Wiley & Sons*, 500-505, **2005**.
- [32] Balanis C.A., Antenna Theory Analysis And Design, 8th Chapter, 3rd Edition, *John Wiley & Sons*, 465-467, **2005**.



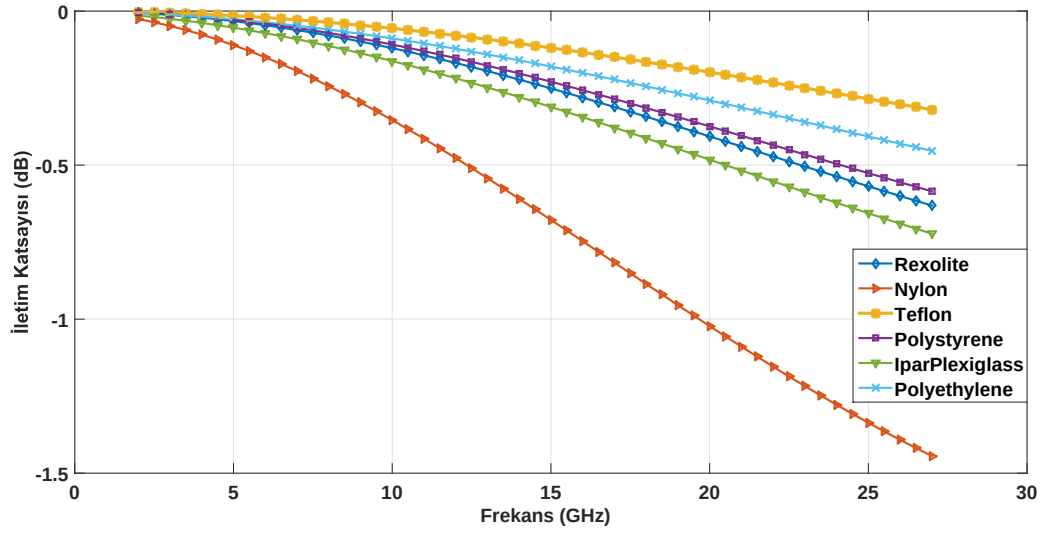
- [33] Schelkunoff, S.A., Theory of Antennas of Arbitrary Size and Shape, *Proceedings of the I.R.E.*, 493-521, **1941**.
- [34] Richard, C.J., *InProceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 13-24, **2004**.
- [35] Papas, C.H., King, R., Input Impedance of Wide-Angle Conical Antennas Fed by a Coaxial Line *Proceedings of the I.R.E.*, 1269-1271, **1949**.
- [36] Papas, C.H., King, R., Radiation from Wide-Angle Conical Antennas Fed by a Coaxial Line, *Proceedings of the I.R.E.*, 49-51, **1951**.
- [37] Schelkunoff, S.A., Advanced Antenna Theory, *Bell Telephone Laboratories*, **1952**.
- [38] Ece, M., Küçük Ebatlı Radomların Test Edilmesi, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü- Yüksek Lisans Tezi*, **Kasım 2006**.
- [39] Kozakoff, D. J., Analysis of Radome Enclosed Antennas- Chapter 4, 2nd Edition *ARTECH HOUSE*, **2010**.
- [40] Skolnik, M.I., Radar Handbook, *McGraw Hill*, **1990**.
- [41] Kozakoff, D. J., Analysis of Radome Enclosed Antennas- Chapter 5, 2nd Edition *ARTECH HOUSE*, **2010**.
- [42] Chen, F., Shen, Q., Zhang, L., Electromagnetic Optimal Design and Preparation of Broadband Ceramic Radome Material with Graded Porous Structure, *Progress In Electromagnetics Research, Vol. 105*, 445- 461, **2010**.
- [43] Ishimaru, A., Electromagnetic Wavr Propagation Radiation and Scattering from Fundamentals to Applications, 2nd Edition, *IEEE Antennas and Propagation Society*, **2017**.
- [44] Michielssen, E., Sajer, J., Ranjithan, S., Mittra, R., Design of Lightweight, Broad-Band Microwave Absorbers Using Genetic Algorithms, *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, 1024-1031, **1993**.
- [45] Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning , *ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC.* , **1989**.
- [46] <https://www.digikey.com/product-detail/en/amphenol-rf-division/901-9891-RFX/ARFX1224-ND/272182>

## EK A

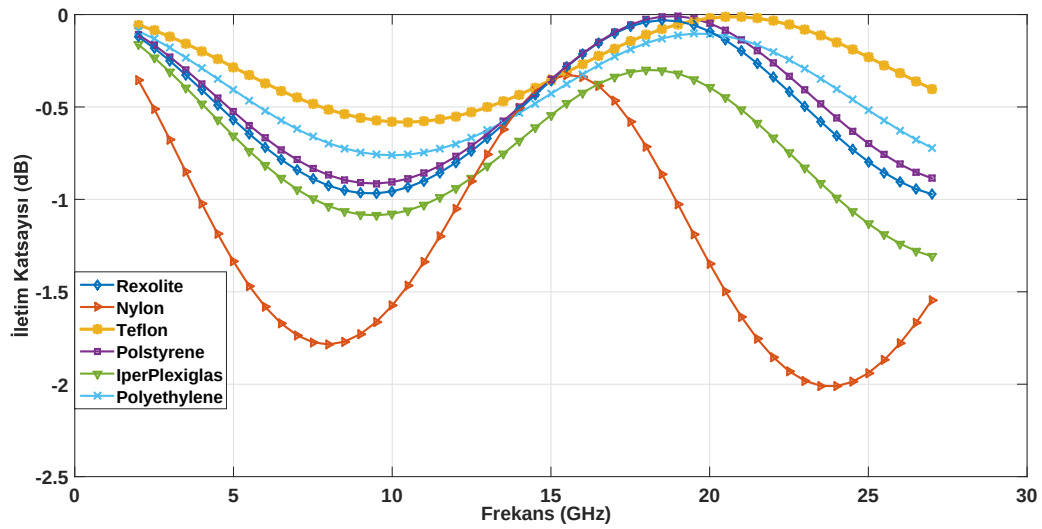
### A.1 Tek Katman Radom Grafikleri

#### A.1.1 Teorik Sonuçlar

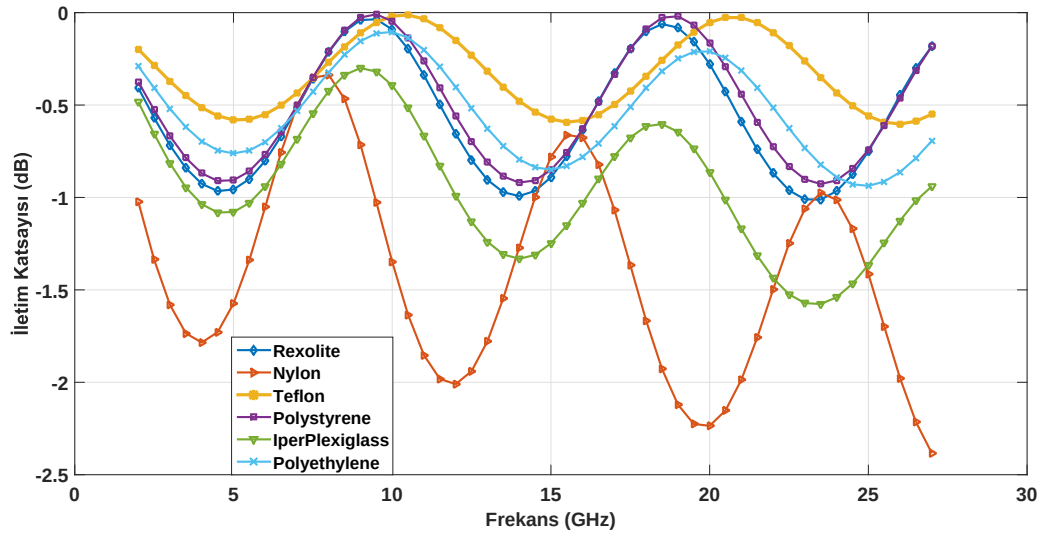
#### Radom Malzemelerinin $0^\circ$ İçin Farklı Kalınlıklarda İletim Katsayıları



Şekil A .1. Farklı radom malzemelerinin 1 mm kalınlıkta iletim katsayısı

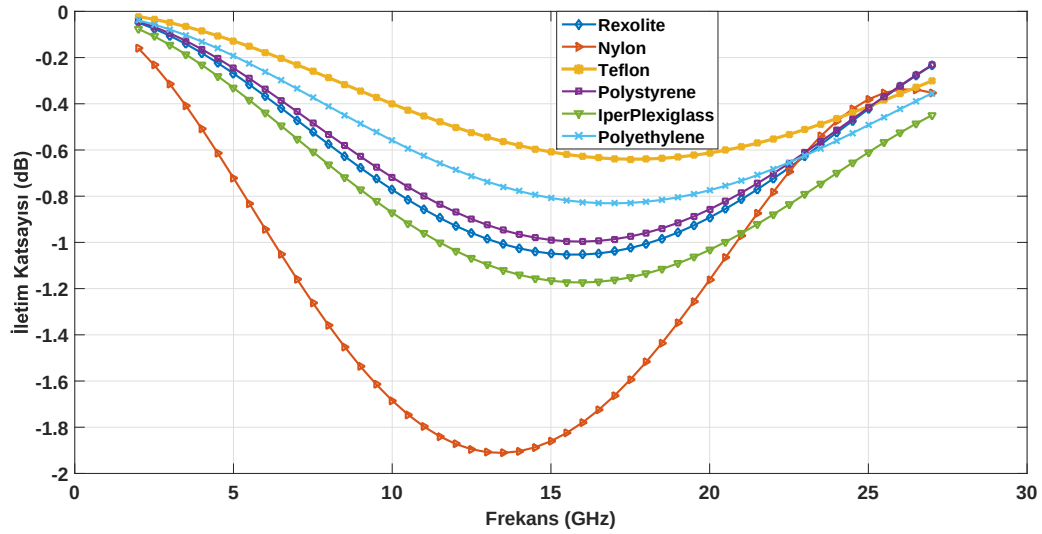


Şekil A .2. Farklı radom malzemelerinin 5 mm kalınlıkta iletim katsayısı

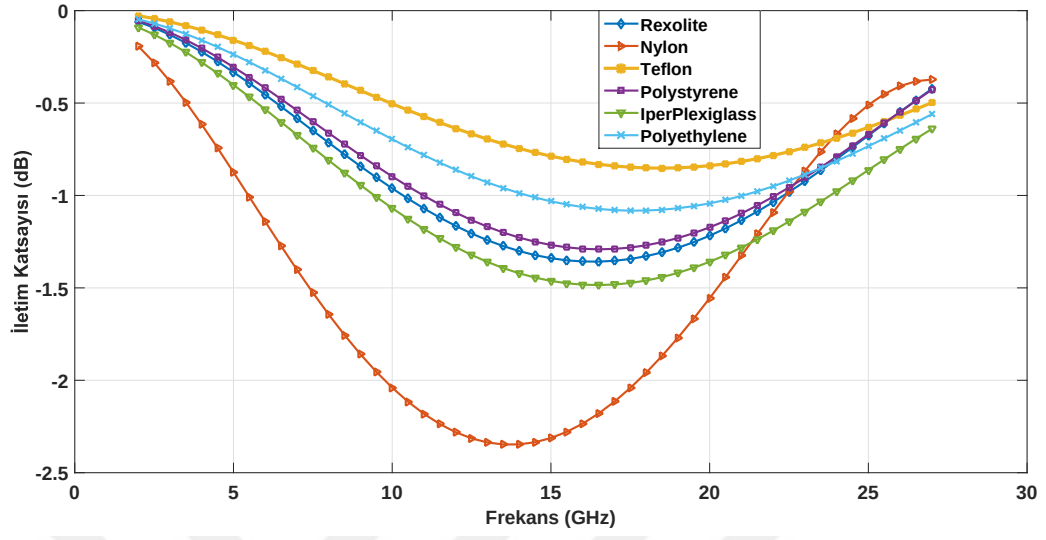


Şekil A .3. Farklı radom malzemelerinin 10 mm kalınlıkta iletim katsayısı

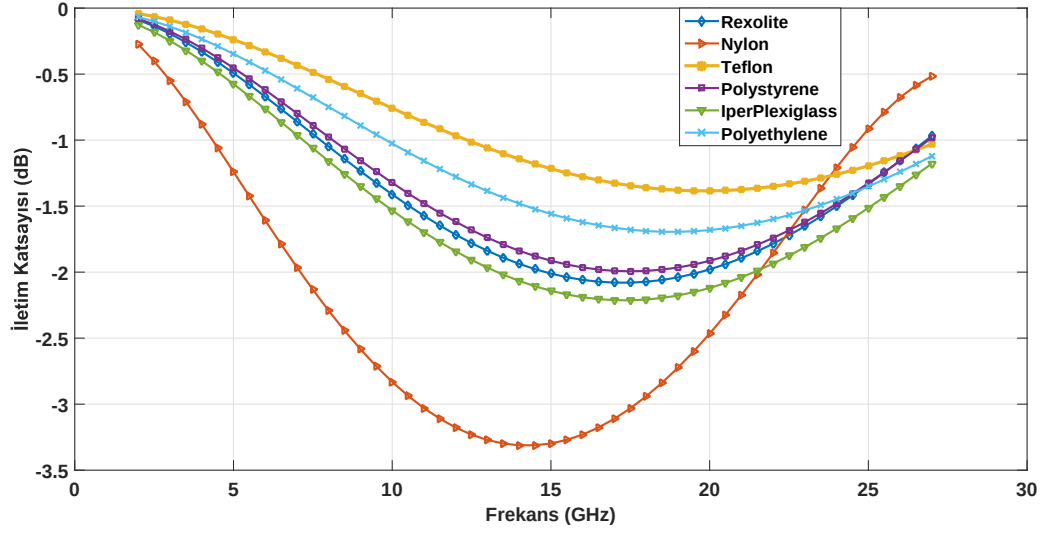
### Radom Malzemelerinin 3 mm Kalınlık İçin Farklı Dalga Geliş Açılarında İletim Katsayıları



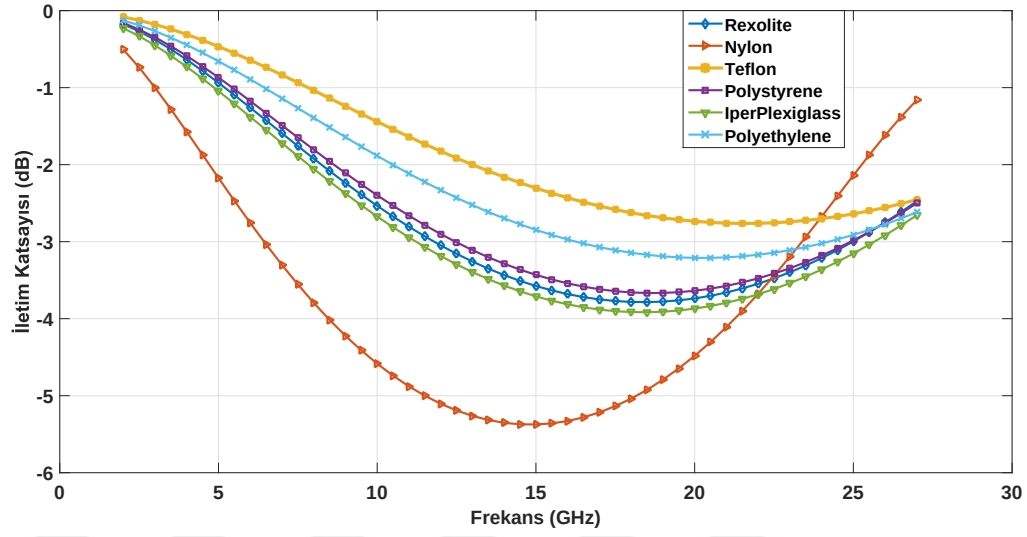
Şekil A .4. Farklı radom malzemelerinin 15° dalga geliş açısında iletim katsayısı



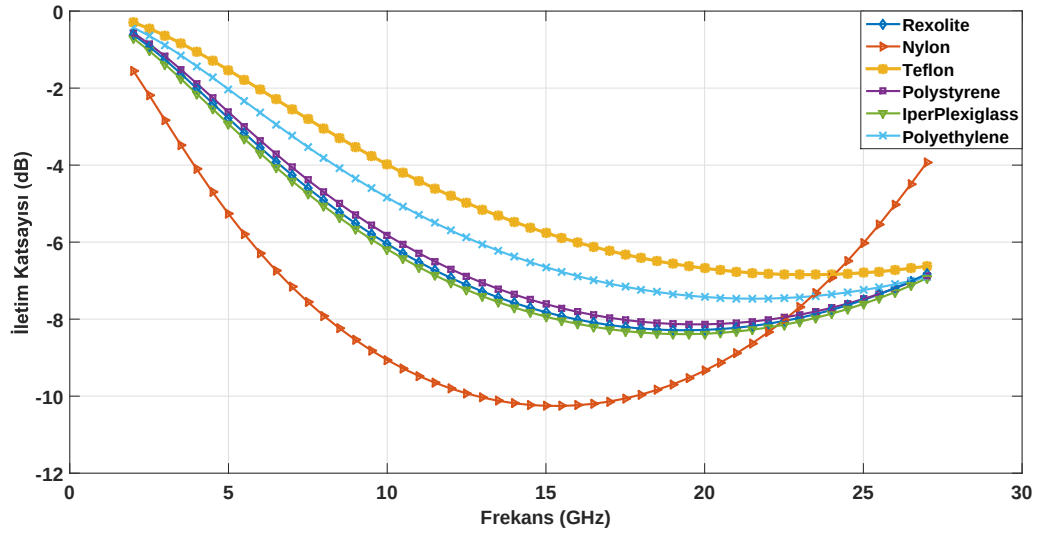
Şekil A .5. Farklı radom malzemelerinin  $30^\circ$  dalga geliş açısında iletim katsayısı



Şekil A .6. Farklı radom malzemelerinin  $45^\circ$  dalga geliş açısında iletim katsayısı



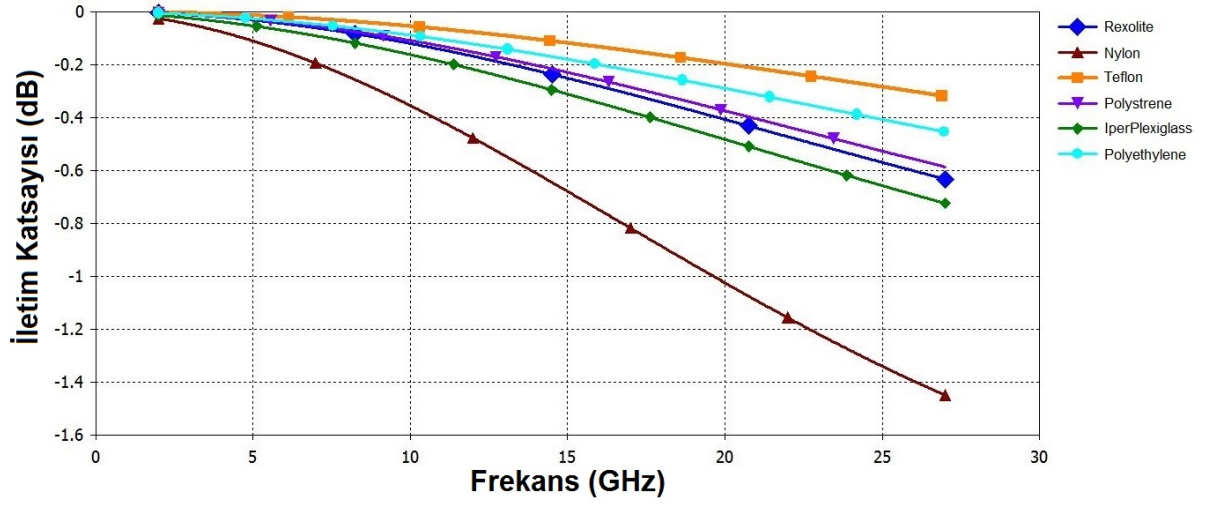
Şekil A .7. Farklı radom malzemelerinin  $60^\circ$  dalga geliş açısında iletim katsayısı



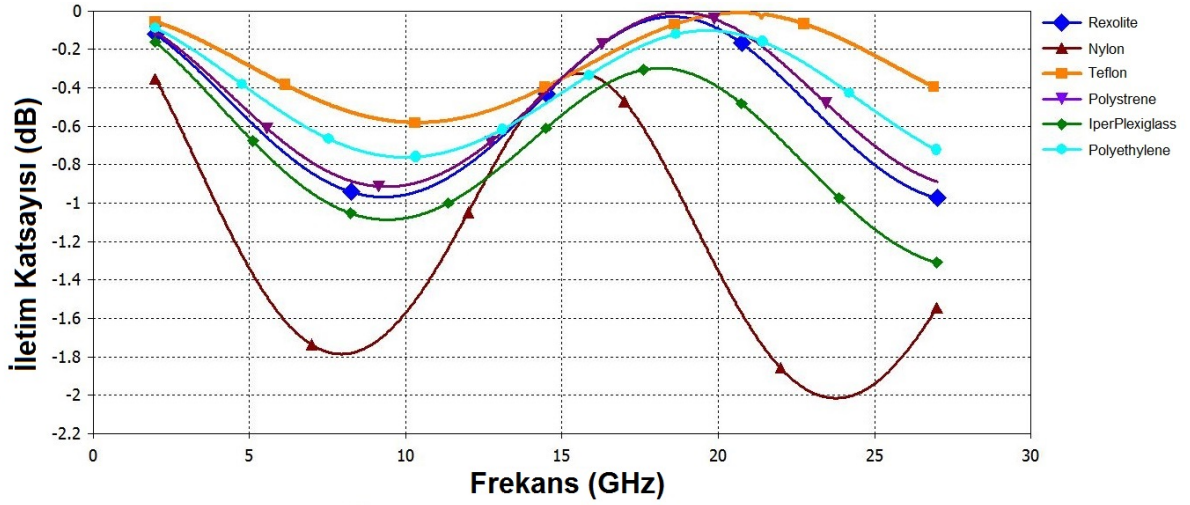
Şekil A .8. Farklı radom malzemelerinin  $75^\circ$  dalga geliş açısında iletim katsayısı

### A.1.2 CST Tasarım Sonuçları

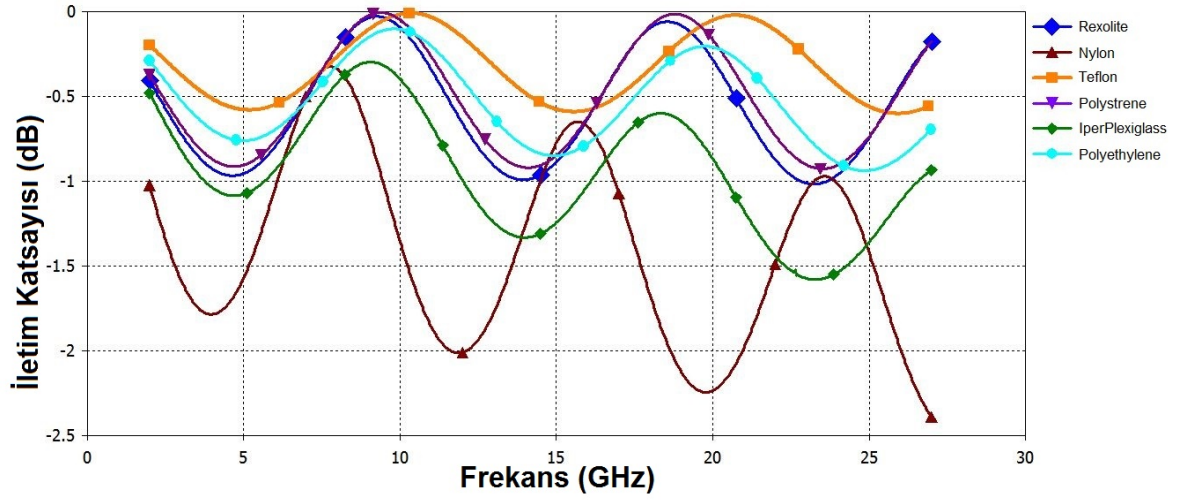
#### Radom Malzemelerinin $0^\circ$ İçin Farklı Kalınlıklarda İletim Katsayıları



Şekil A .9. Farklı radom malzemelerinin 1 mm kalınlıkta iletim katsayısı

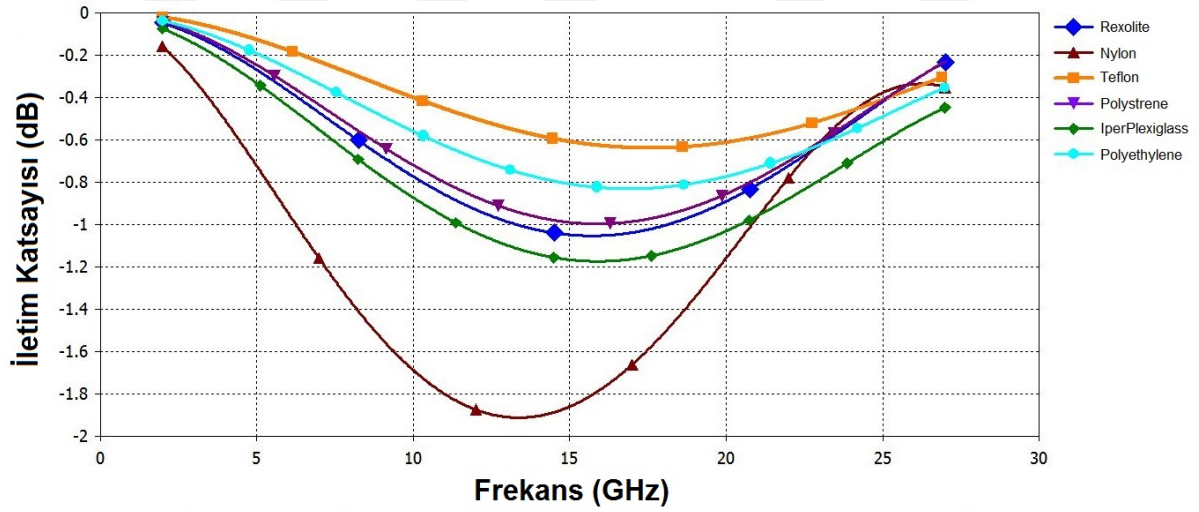


Şekil A .10. Farklı radom malzemelerinin 5 mm kalınlıkta iletim katsayısı



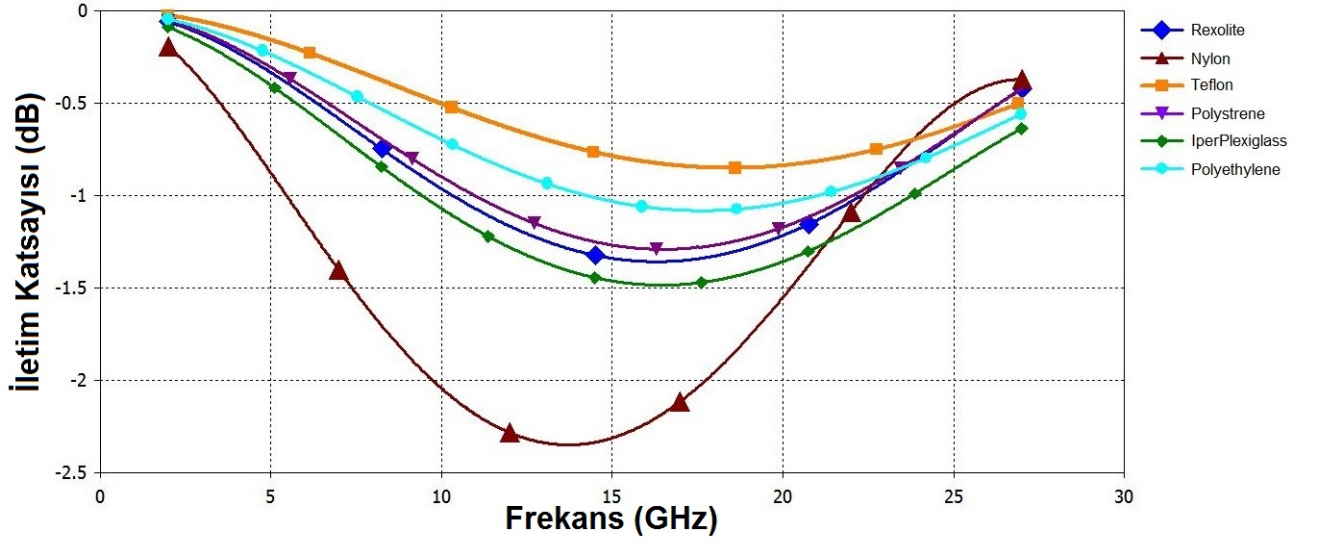
Şekil A .11. Farklı radom malzemelerinin 10 mm kalınlıkta iletim katsayısı

**Radom Malzemelerinin 3 mm Kalınlık İçin Farklı Dalga Geliş Açılarında İletim Katsayıları**

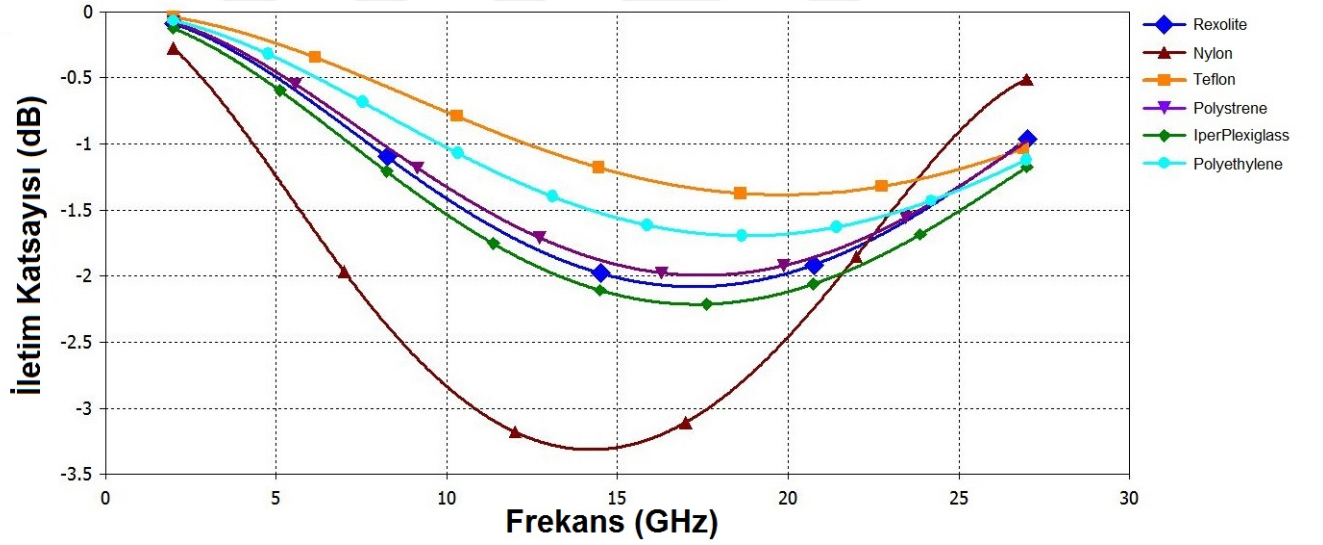


Şekil A .12. Farklı radom malzemelerinin 15° dalga geliş açısında iletim katsayısı



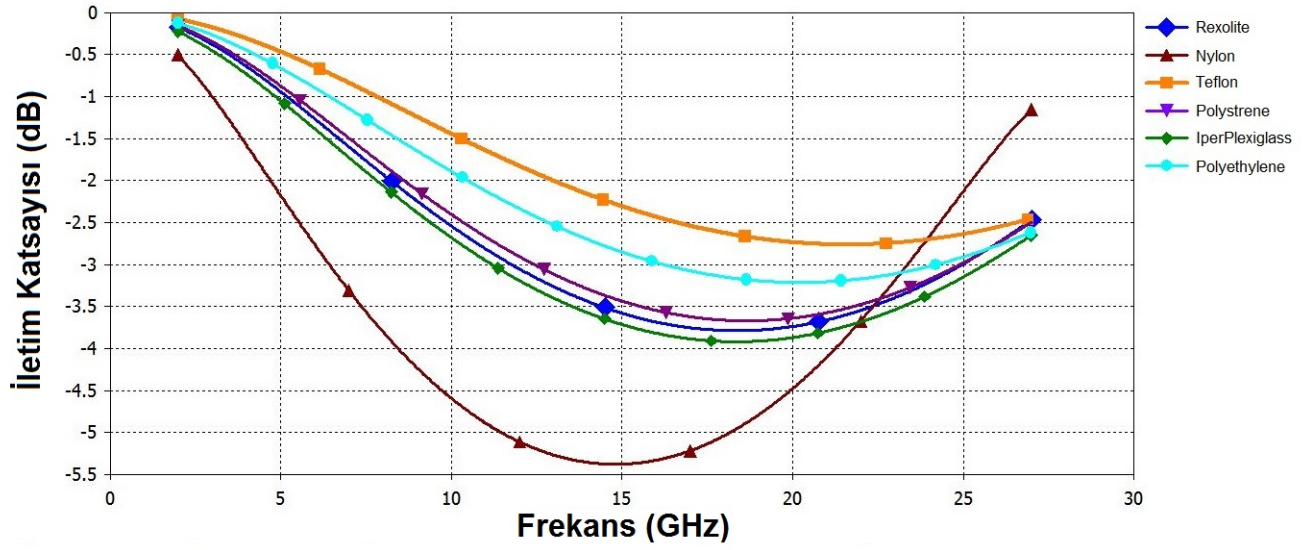


Şekil A .13. Farklı radom malzemelerinin 30° dalga geliş açısında iletim katsayısı

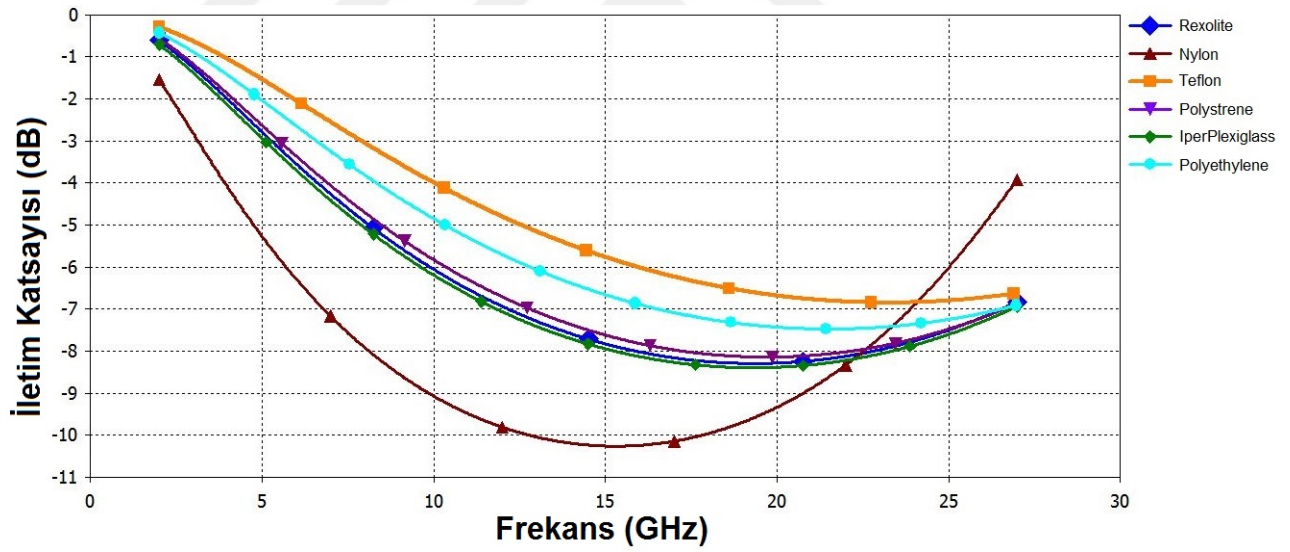


Şekil A .14. Farklı radom malzemelerinin 45° dalga geliş açısında iletim katsayısı





Şekil A .15. Farklı radom malzemelerinin  $60^\circ$  dalga geliş açısında iletim katsayısı

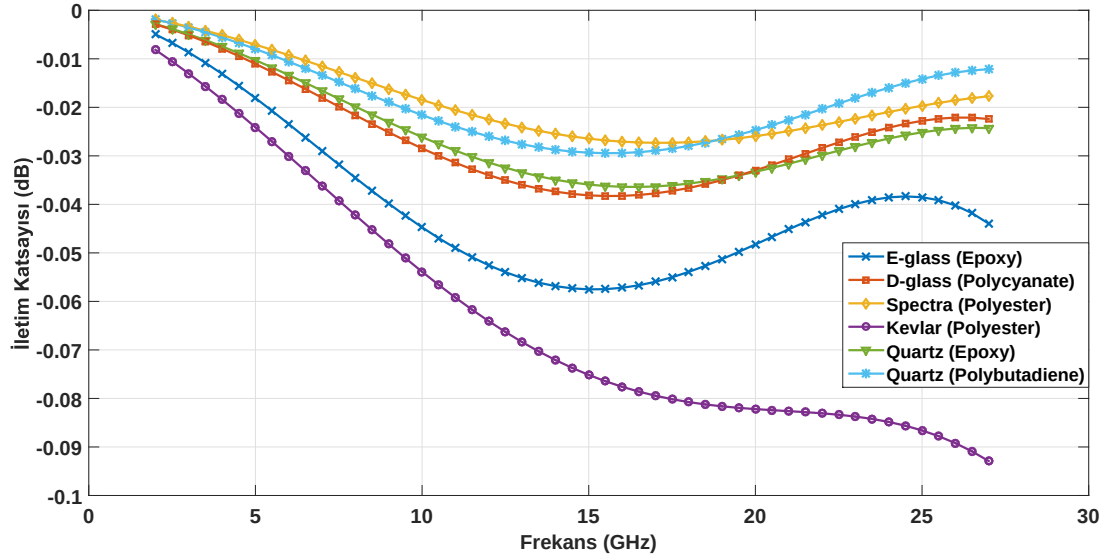


Şekil A .16. Farklı radom malzemelerinin  $75^\circ$  dalga geliş açısında iletim katsayısı

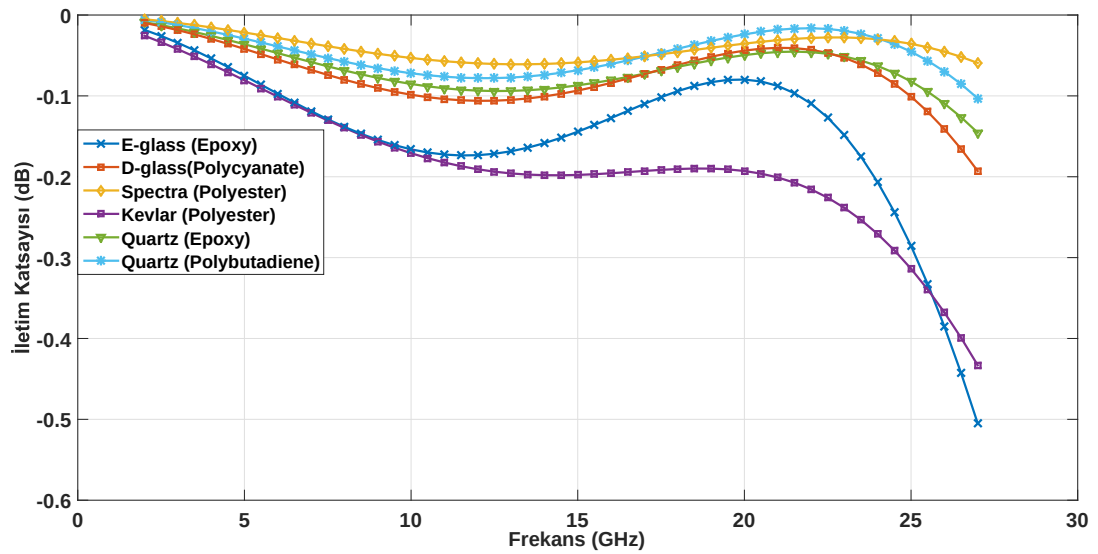
## A.2 A-Sandviç Radom Grafikleri

### A.2.1 Teorik Sonuçlar

Radom Malzemelerinin  $0^\circ$  ve 3 mm Ara Malzeme Kalınlığı İçin Farklı Dış Tabaka Kalınlıklarında İletim Katsayıları

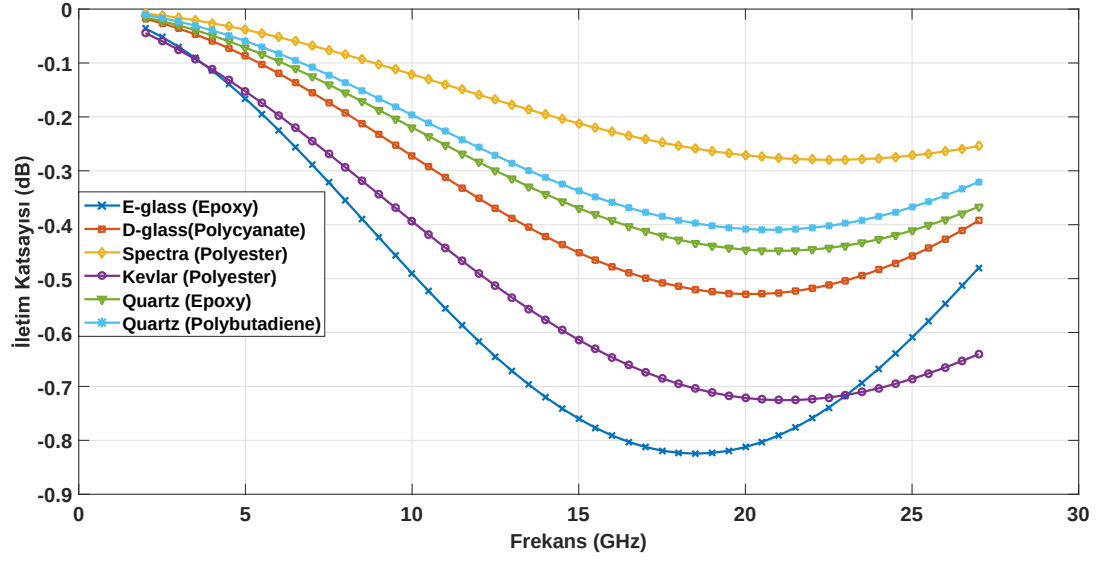


Şekil A .17. Farklı radom malzemelerinin 0.1 mm dış tabaka kalınlığında iletim katsayısı

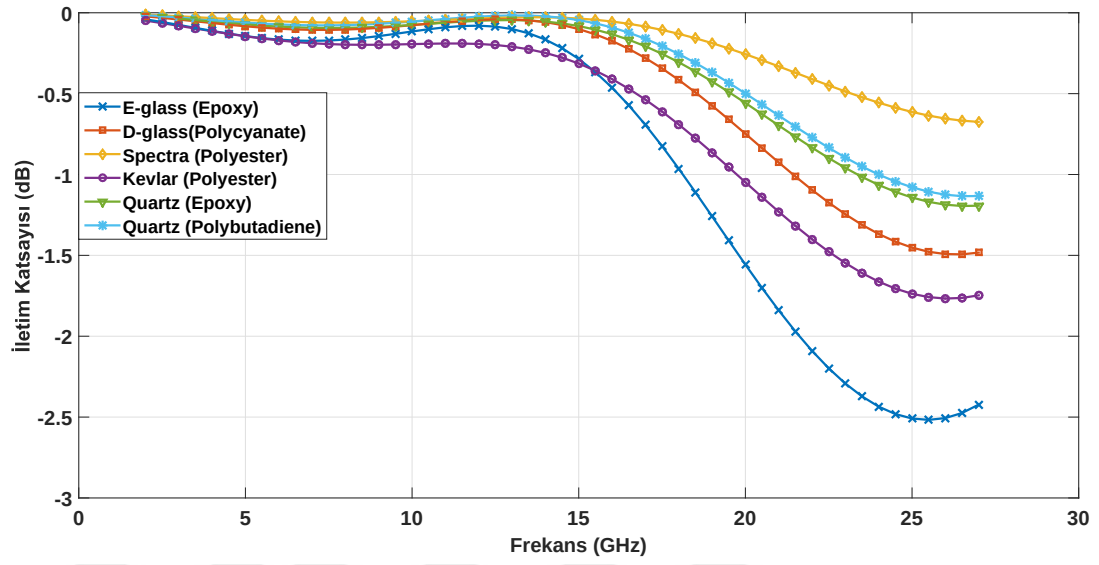


Şekil A .18. Farklı radom malzemelerinin 0.3 mm dış tabaka kalınlığında iletim katsayısı

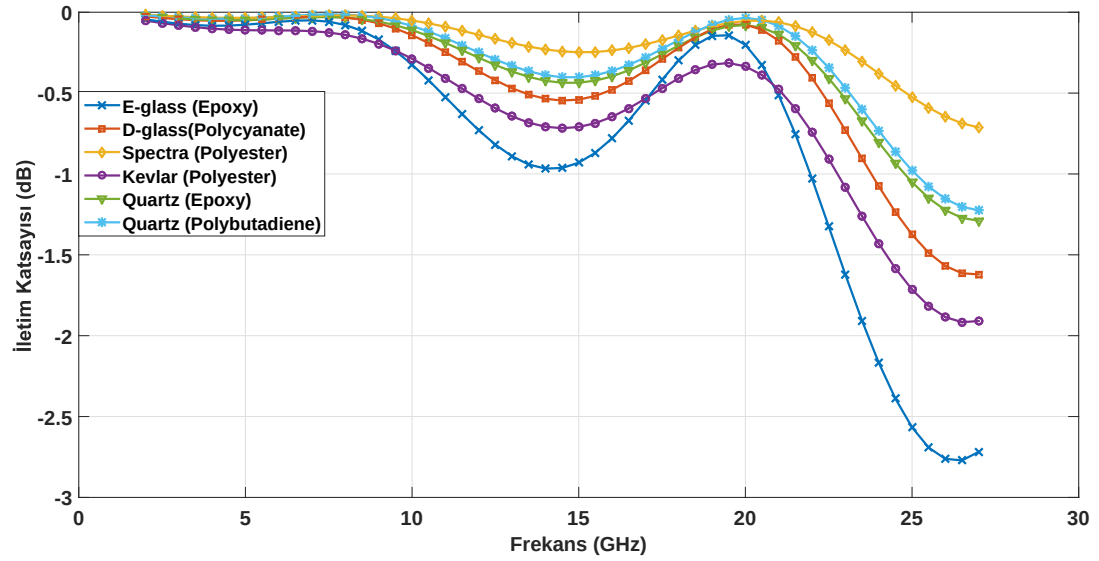
## Radom Malzemelerinin $0^\circ$ ve 0.5 mm Dış Tabaka Kalınlığı İçin Farklı Ara Malzeme Kalınlıklarında İletim Katsayıları



Şekil A .19. Farklı radom malzemelerinin 1 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı

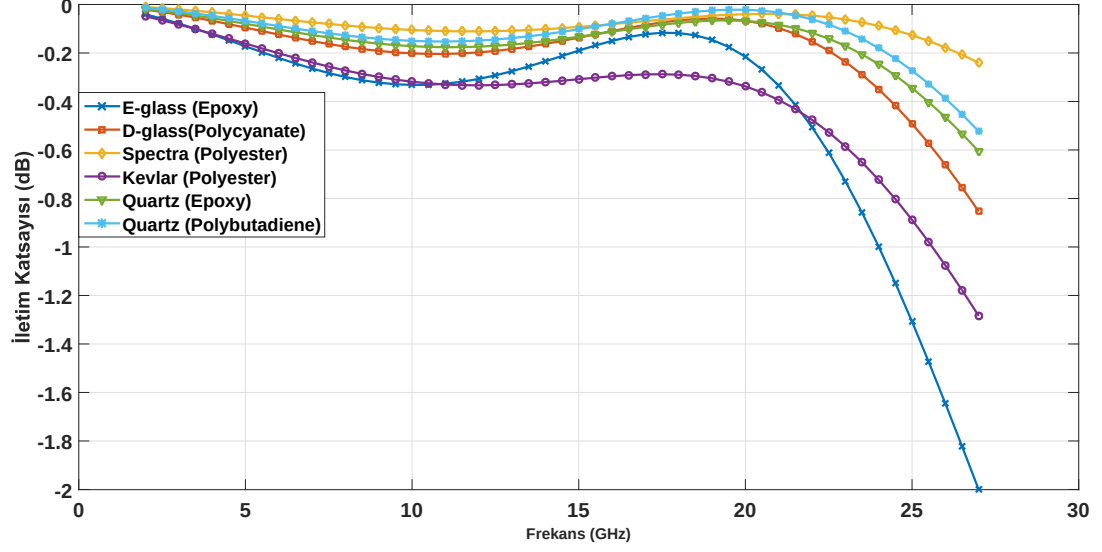


Şekil A .20. Farklı radom malzemelerinin 5 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı

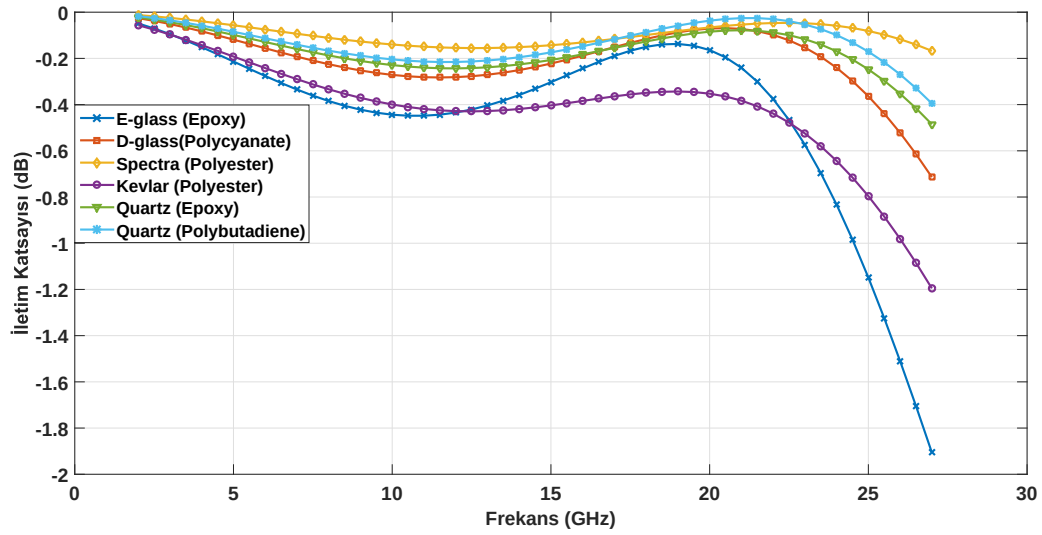


Şekil A .21. Farklı radom malzemelerinin 10 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı

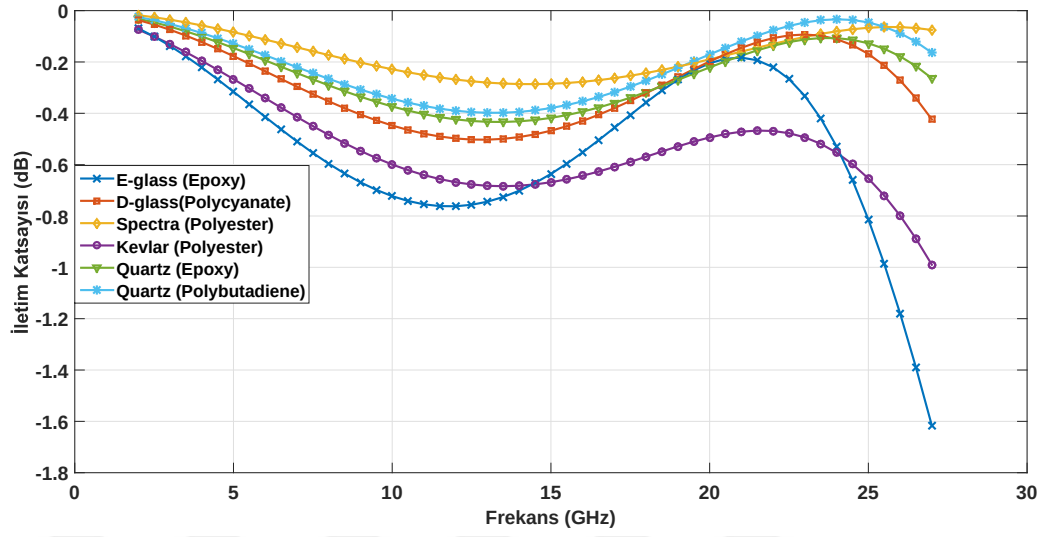
## Radom Malzemelerinin 0.5 mm Dış Tabaka ve 3mm Ara Malzeme Kalınlığı İçin Farklı Dalga Geliş Açılarında İletim Katsayıları



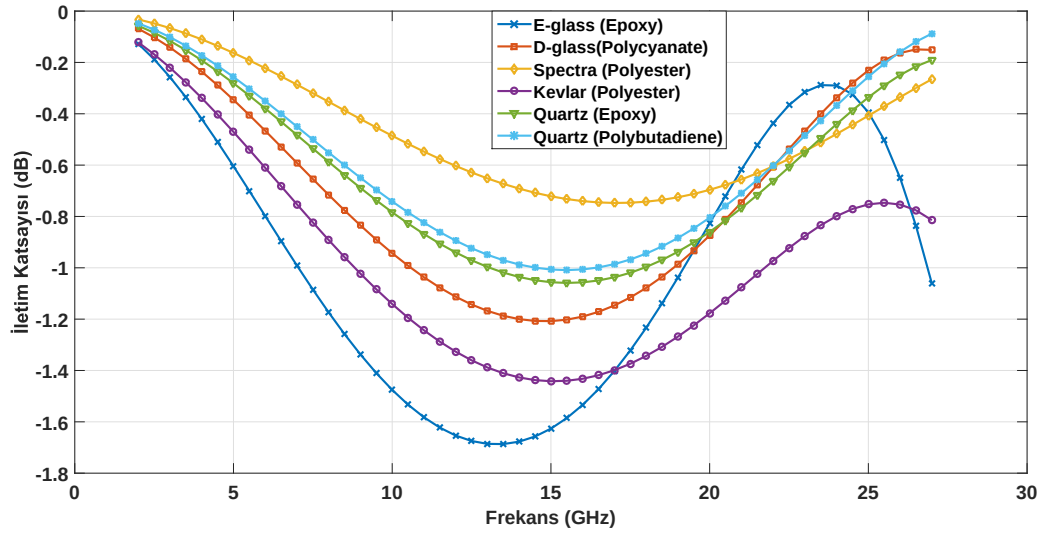
Şekil A .22. Farklı radom malzemelerinin 15° dalga geliş açısında iletim katsayısı



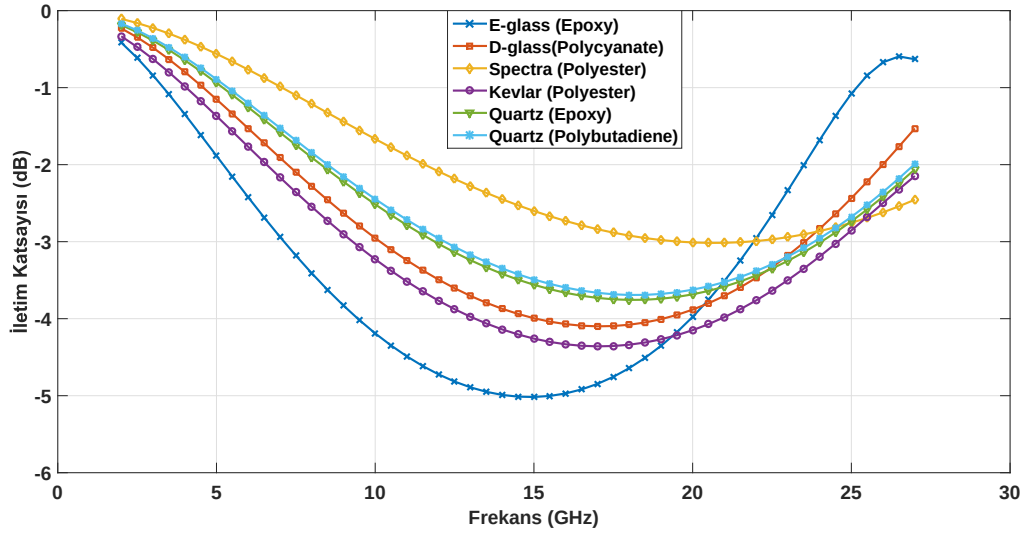
Şekil A .23. Farklı radom malzemelerinin 30° dalga geliş açısında iletim katsayısı



Şekil A .24. Farklı radom malzemelerinin 45° dalga geliş açısında iletim katsayısı



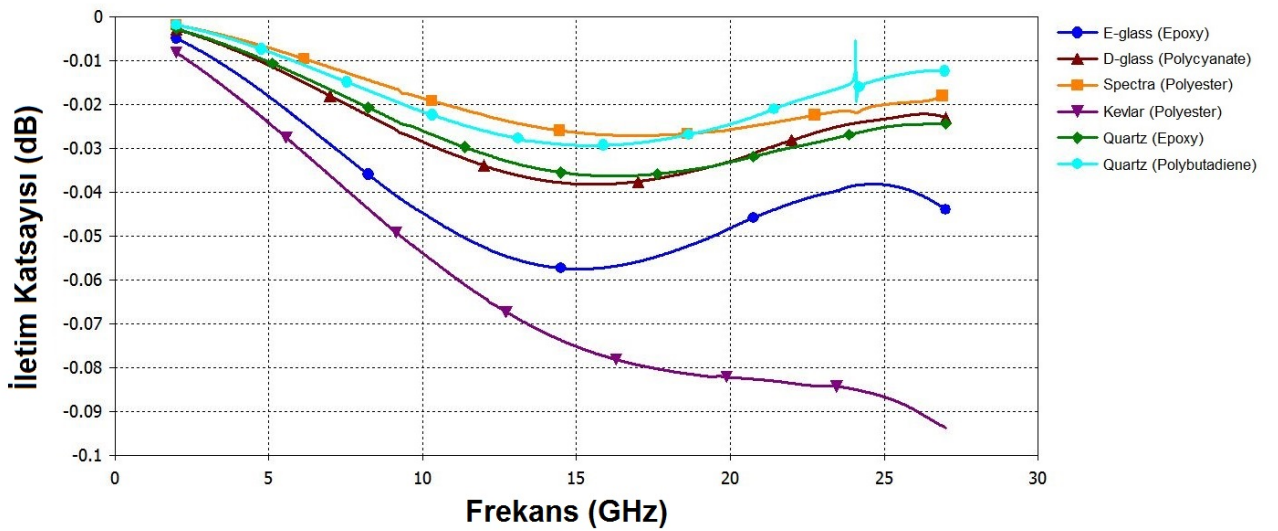
Şekil A .25. Farklı radom malzemelerinin 60° dalga geliş açısında iletim katsayısı



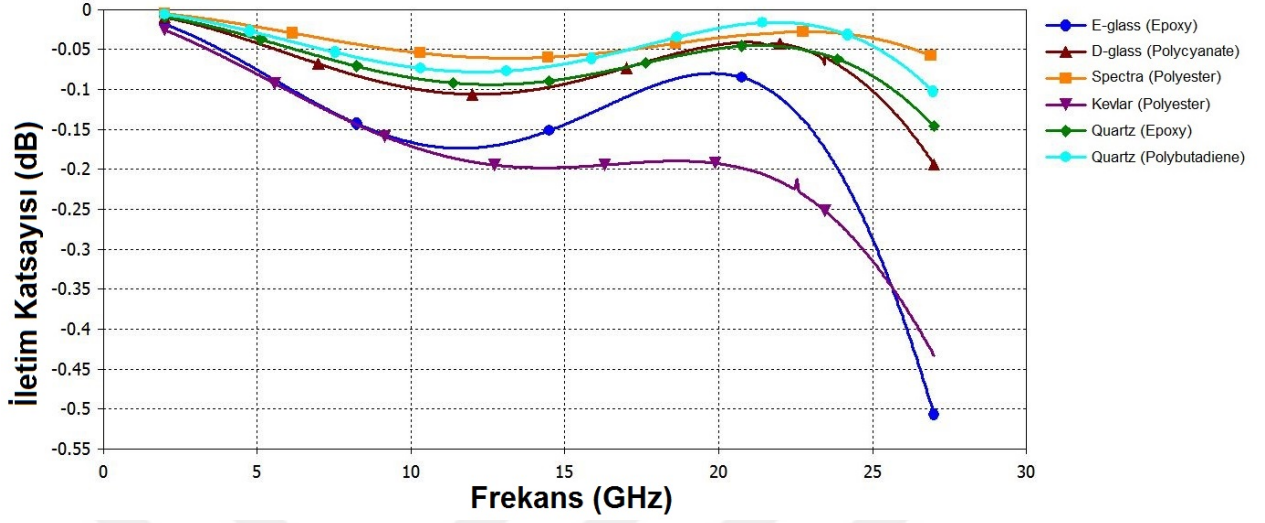
Şekil A .26. Farklı radom malzemelerinin 75° dalga geliş açısında iletim katsayısı

#### A.2.2 CST Tasarım Sonuçları

**Radom Malzemelerinin 0° ve 3 mm Ara Malzeme Kalınlığı İçin Farklı Dış Tabaka Kalınlıklarında İletim Katsayıları**

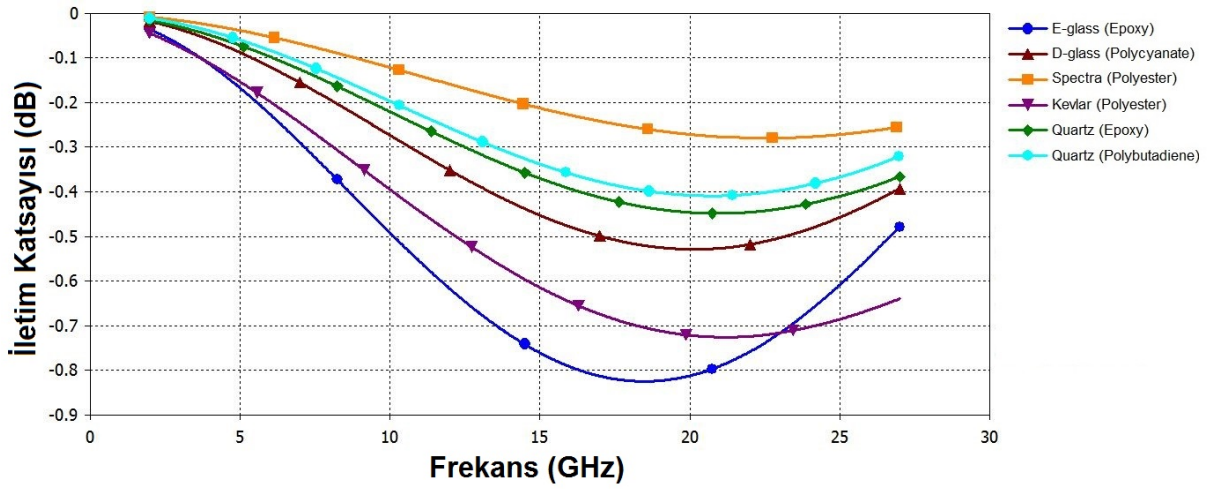


Şekil A .27. Farklı radom malzemelerinin 0.1 mm dış tabaka kalınlığında iletim katsayısı



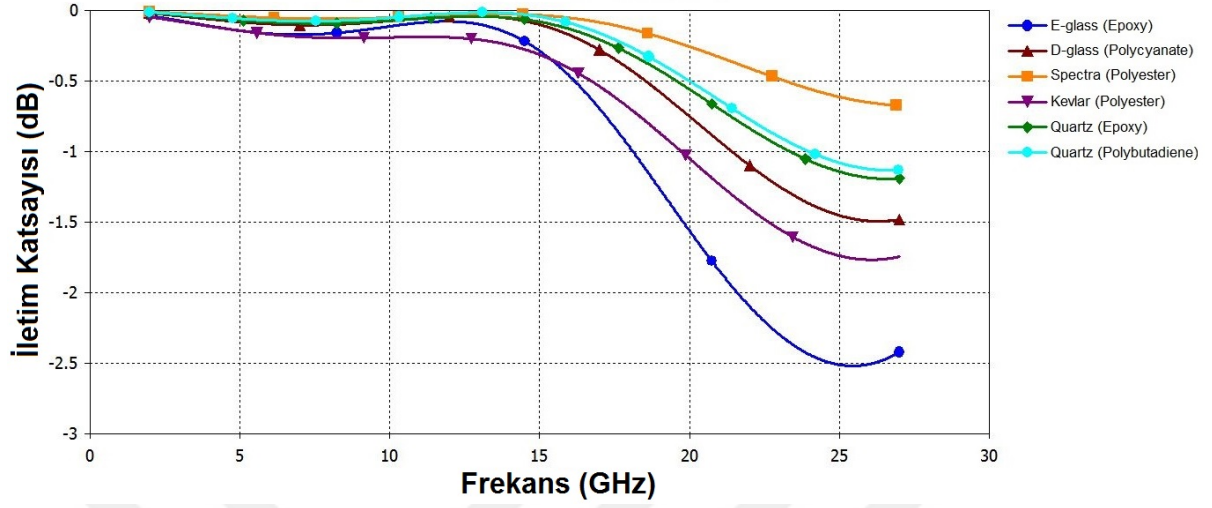
Şekil A .28. Farklı radom malzemelerinin 0.3 mm dış tabaka kalınlığında iletim katsayısı

### Radom Malzemelerinin 0° ve 0.5 mm Dış Tabaka Kalınlığı İçin Farklı Ara Malzeme Kalınlıklarında İletim Katsayıları

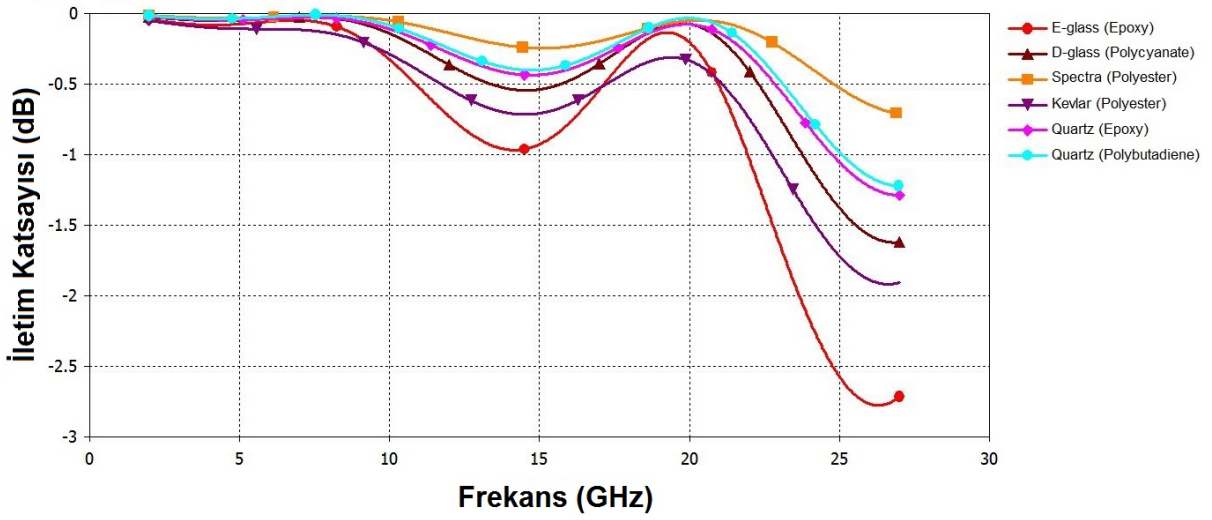


Şekil A .29. Farklı radom malzemelerinin 1 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı



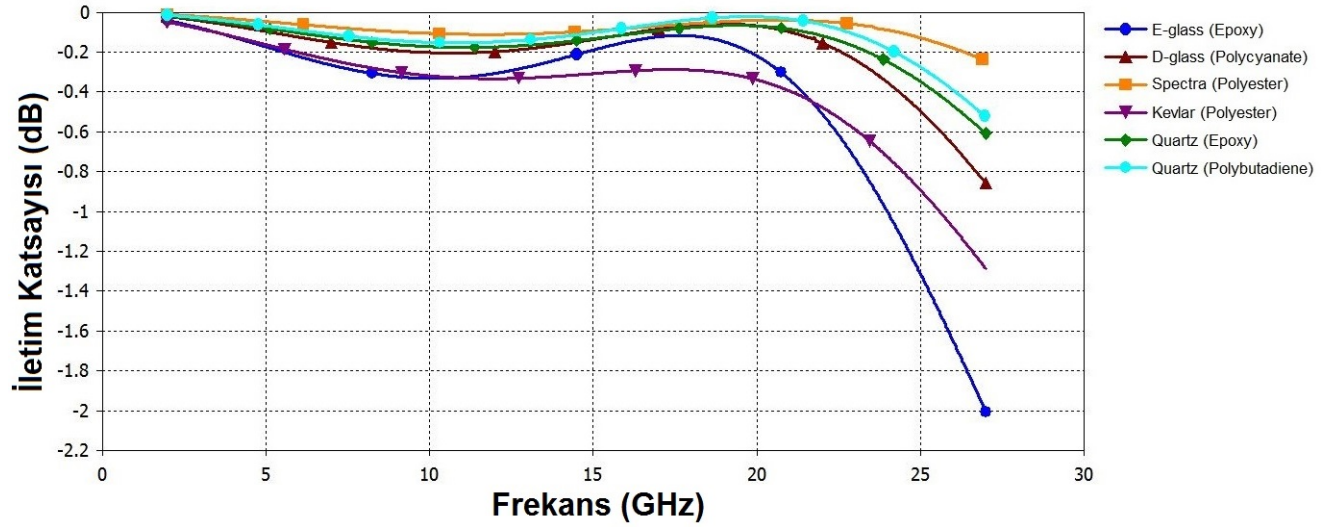


Şekil A .30. Farklı radom malzemelerinin 5 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı

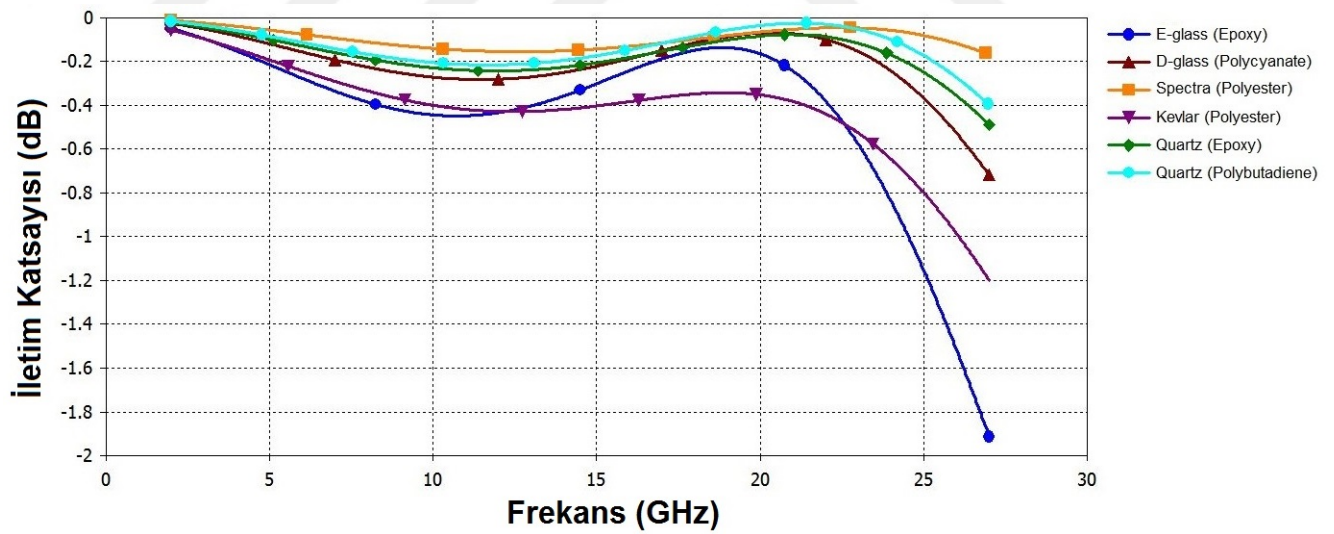


Şekil A .31. Farklı radom malzemelerinin 10 mm ara malzeme kalınlığında iletim katsayısı

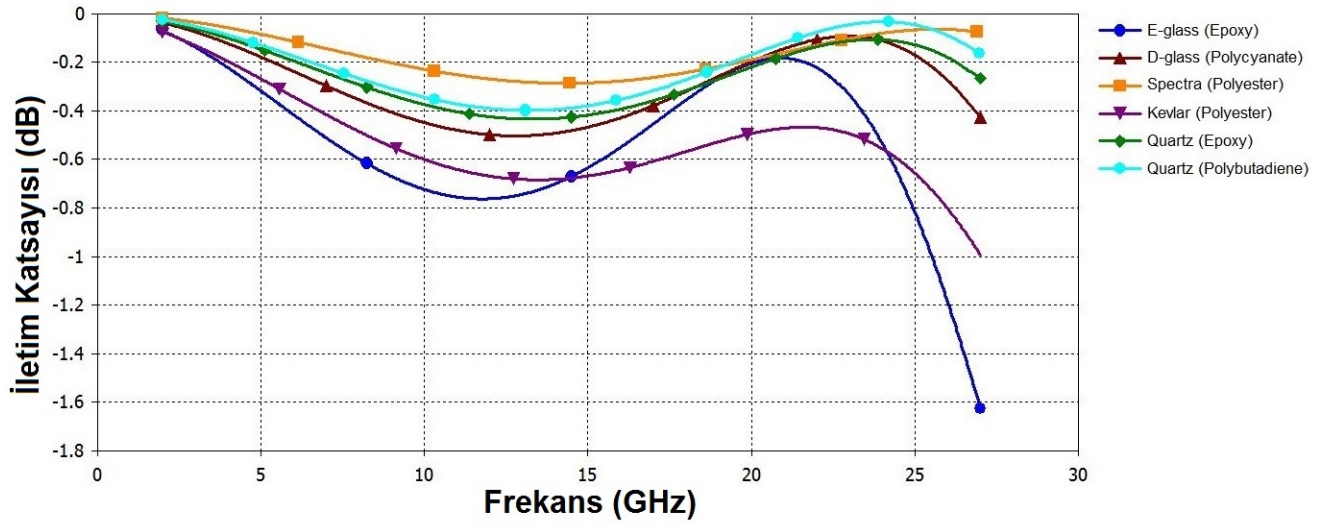
## Radom Malzemelerinin 0.5 mm Dış Tabaka ve 3mm Ara Malzeme Kalınlığı İçin Farklı Dalga Geliş Açılarında İletim Katsayıları



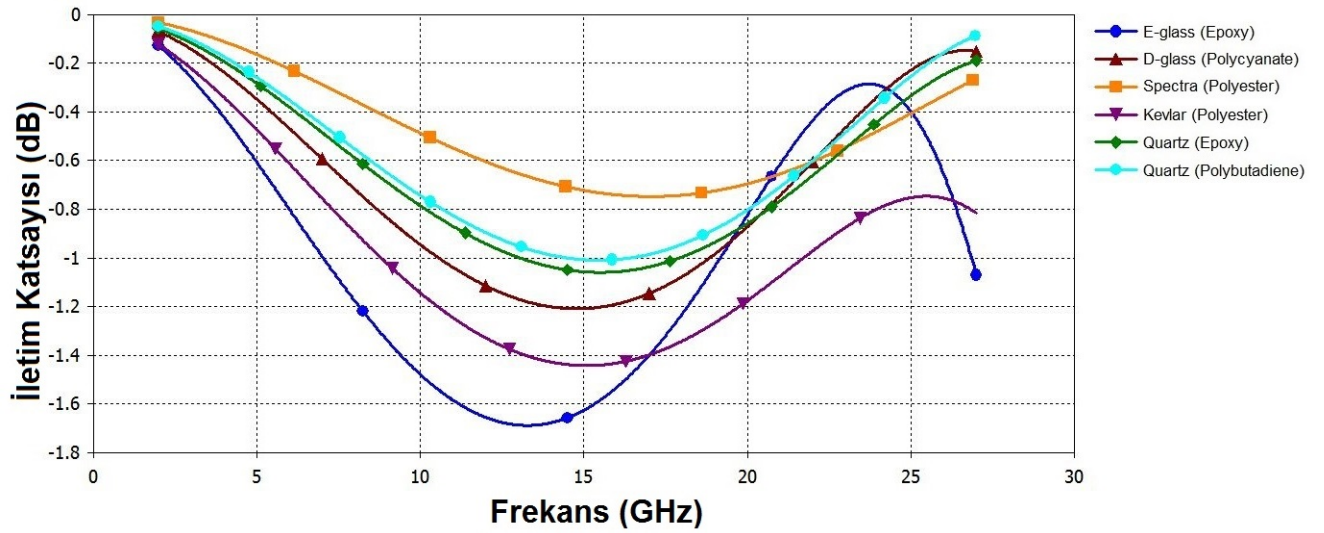
Şekil A .32. Farklı radom malzemelerinin 15° dalga geliş açısında iletim katsayısı



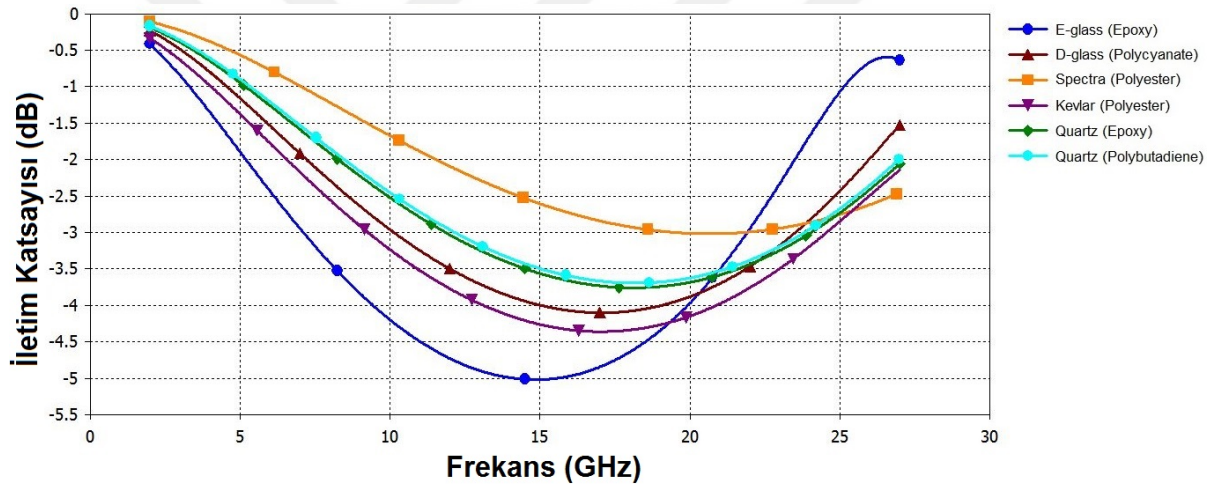
Şekil A .33. Farklı radom malzemelerinin 30° dalga geliş açısında iletim katsayısı



Şekil A .34. Farklı radom malzemelerinin  $45^\circ$  dalga geliş açısında iletim katsayısı



Şekil A .35. Farklı radom malzemelerinin  $60^\circ$  dalga geliş açısında iletim katsayısı



Şekil A .36. Farklı radom malzemelerinin 75° dalga geliş açısında iletim katsayısı

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: İsmail Çor

Doğum Yeri: ÇANKIRI

Medeni Hali: Bekar

E-posta:

Adresi: Yenimahalle/ANKARA

### Eğitim

Lise: Batıkent Lisesi, Ankara

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

### Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İyi

### İş Deneyimi

Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Eylül 2013 - Nisan 2015: Proje Asistanı, ANKARA

Başkent Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Ekim 2013 - Ocak 2016: Araştırma Görevlisi, ANKARA

TÜBİTAK BİLGEM- BTE, Ocak 2016- Ocak 2017: Anten Tasarım Mühendisi, KOCAELİ  
HAVELSAN TEKNOLOJİ RADAR A.Ş. , Nisan 2017- ... : Ar-Ge Mühendisi, ANKARA

### Deneyim Alanları

-

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

### **Tezden Üretilmiş Yayınlar**

-

### **Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar**

Geniş Bantlı Radom Analizi ve Eniyilenmesi, *İ. Çor, B. Saka*, SİU 2018, Sinyal İşleme Kurultayı, İzmir, Türkiye (Kabul edildi)







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

**HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHÜRNDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA**

Tarih:21.03.2018

Tez Başlığı / Konusu: Çok Geniş Bantlı Doğrudan Beslenmiş Radomlu Çift Konik Anten Analiz ve Tasarımı

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 69 sayfalık kısmına ilişkin, 21/03/2018 tarihinde ~~çalışmam~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4 'tür.

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 Orjinallik 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.

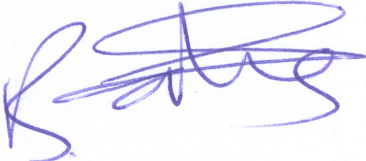
Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: İsmail Çor  
Öğrenci No: N13128990  
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)