

GENİŞ BANTLI YENİ BİR RADAR SOĞURUCU YAPI TASARIMI

DESIGN OF A NEW WIDEBAND RADAR ABSORBING STRUCTURE

ALİ ZİYA ÖZER

PROF. DR. BİRSEN SAKA TANATAR

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

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

2018

ALİ ZİYA ÖZER' in hazırladığı "**GENİŞ BANTLI YENİ BİR RADAR SOĞURUCU YAPI TASARIMI**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Özlem AYDIN ÇIVI
Başkan



Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR
Danışman



Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN
Üye



Prof. Dr. Adnan KÖKSAL
Üye



Doç. Dr. Cenk TOKER
Üye



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

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitü 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 seçenikle 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**

08/06/2018



Ali Ziya ÖZER

Sevgili eşim Şule ve biricik kızım Elif'e....

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 tamamını kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

15/05/2018



ALİ ZİYA ÖZER

ÖZET

GENİŞ BANTLI YENİ BİR RADAR SOĞURUCU YAPI TASARIMI

Ali Ziya ÖZER

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Mayıs 2018, 100 sayfa

Radar soğurucu yapılar radar kesit alanı azaltım tekniklerinin başında yer almaktadır. Maksimum soğuruculuğun elde edilmesi hedeflenen bant genişliğinin artması, soğurucu yapının toplam kalınlığının artması ve yapıda kullanılan malzemelerin ilgili frekans bandında yüksek kayıplı olması gerekliliklerini de beraberinde getirmektedir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile Duroid, Epoksi, Arlon gibi düşük kayıplı dielektrik malzemeler ve düşük elektriksel iletkenliğe sahip Grafit malzemesi kullanılarak geniş bantta minimum yansıtıcılığa sahip ince bir radar soğurucu yapının tasarlanması amaçlanmaktadır.

Öncelikle, uyumlaştırma katmanı, Dallenbach tabakası, Salisbury tabakası, piramit soğurucu gibi temel radar soğurucu yapıların parametrik analizleri gerçekleştirilerek yansıma katsayılarının frekansa göre değişimi incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ışığında tasarlanan kesik piramit radar soğurucu dizisinin toplam 2.5 cm kalınlığa ve 2 - 18 GHz aralığında maksimum -10 dB, minimum -45 dB ve ortalama -18 dB yansıma katsayısına sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: radar kesit alanı, radar soğurucu yapı, düşük kayıplı dielektrik malzemeler, benzetim, parametrik analiz, yansıma katsayısı, kesik piramit soğurucu dizisi

ABSTRACT

DESIGN OF A NEW WIDEBAND RADAR ABSORBING STRUCTURE

Ali Ziya ÖZER

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

Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

May 2018, 100 pages

Radar absorbing structures are the most commonly used techniques for radar cross section minimization. The increase of the target band width to obtain the maximum absorbency brings about the necessity of increase of the total thickness of the absorber structure and using the materials used with high loss at the relevant frequency band.

Within thesis, simulation studies are performed aiming to design a thin wideband radar absorbing structure using low-loss dielectric materials such as Duroid, FR4 Epoxy, Arlon and Graphite material with low electrical conductivity.

Primarily, parametric analysis of principle radar absorbing structures such as Dallenbach layer, Salisbury layer, matching layer and tapered absorbers were performed to examine reflection coefficients with respect to frequency.

In consideration of obtained analysis results, the resultant radar absorbing structure has total thickness of 2.5 cm and reflection coefficient of maximum -10 dB, minimum -45 dB and -18 dB average over the frequency band 2 - 18 GHz.

Keywords: radar cross section, radar absorbing structure, low-loss dielectric materials, simulations, parametric analysis, tapered pyramidal absorber array

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, tez danışmanım Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam sürecinde gösterdiği sabır ve motivasyon ve her zaman istifadeye açık olan bilgi birikimi sayesinde sadece tezin başarıyla tamamlanmasında değil kişisel, akademik ve profesyonel gelişimimde de ciddi katkılarından dolayı kendisine ayrıca teşekkür ederim.

Tez danışmanımın yanı sıra tezimi değerlendiren değerli kurul üyeleri Prof. Dr. Özlem AYDIN ÇİVİ, Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN, Prof. Dr. Adnan KÖKSAL ve Doç. Dr. Cenk TOKER'e değerli katkıları, iç görülü yorumları ve zor soruları için ayrıca teşekkür ederim.

Lisans eğitimimi de aldığım Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik bölümü düşünmek, çalışmak ve öğrenmek için zorlu ve bir o kadar dostane bir ortam olmuştur. Adlarını ayrı ayrı saymadığım değerli hocalarıma ve eğitim sürecinde birlikte çalıştığım arkadaşlarıma da teşekkürü borç bilirim.

Çalışma hayatında, akademik çalışmalar gerçekleştirmek her zaman zor olmuştur, fakat akademik kariyere sadece önem vermekle kalmayıp teşvik de eden değerli FİGES mühendislik ailesine desteklerinden ve sundukların yazılım ve donanım imkânlarından dolayı teşekkür ederim.

Kişisel hayatımızdaki kontrol edemediğimiz faktörler, akademik çalışmalar sürecinde yaşadığımız zorlukların seviyesini yukarı çekelemiştir. Böyle süreçlerde sırtınızı yaslayabileceğiniz bir dostun varlığı çok değerlidir. Kişisel tutarsızlıklarına rağmen bu süreçte ve her zaman yanımda duran değerli kardeşim Özgen Öztürk'e ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, akademik ve profesyonel hayatın yorgunluklarını unutturan dayanağım eşim Şule, yaşam ışığım kızım Elif ve kadim dostum abim Ahmet'e teşekkürler sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|-----|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| İÇİNDEKİLER | iv |
| ÇİZELGELER..... | vi |
| ŞEKİLLER..... | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | xii |
| SÖZLÜK DİZİNİ | xiv |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. RADAR SOĞURUCU YAPILARA GENEL BAKIŞ | 7 |
| 2.1. Yansıtıcılığın Azaltımı ve Soğuruculuk | 7 |
| 2.2. Radar Soğurucu Yapı Tipleri | 13 |
| 2.2.1. Kademeli ve Sürekli Empedans Geçişleri | 13 |
| 2.2.2. Uyumlaştırma Katmanı | 14 |
| 2.2.3. Dallenbach Tabakası | 15 |
| 2.2.4. Salisbury Tabakası | 18 |
| 2.3. Özyinelemeli Yansıtıcılık Bağıntısı..... | 20 |
| 2.4. Yüksek Elektrik ve Manyetik Kayıplı Malzemeler | 21 |
| 3. TEMEL RADAR SOĞURUCU YAPILARIN BENZETİMİ | 23 |
| 3.1. Modelleme..... | 23 |
| 3.1.1. Geometri Oluşturma | 24 |
| 3.1.2. Malzeme Atama | 24 |
| 3.1.3. Benzetimlerde Kullanılan Sınır Koşulları | 24 |
| 3.1.4. Benzetimlerde Kullanılan Uyarımlar | 25 |
| 3.1.5. Analiz Modeli | 25 |
| 3.1.6. Eniyileme ve Parametrik Analiz | 27 |
| 3.2. Uyumlaştırma Katmanı Analizi..... | 27 |
| 3.3. Dallenbach Tabakası Analizleri | 30 |
| 3.3.1. Eniyileme Çalışmaları | 31 |
| 3.3.2. Dallenbach Tabakaları için Radar Kesit Alanı Analizleri..... | 38 |
| 3.4. Salisbury Tabakası Analizleri..... | 41 |

| | |
|--|----|
| 3.4.1. Hava ile Doldurulmuş Tek Katmanlı Salisbury Tabakası..... | 42 |
| 3.4.2. Dielektrik ile Doldurulmuş Tek Katmanlı Salisbury Tabakası | 44 |
| 3.4.3. Çok Katmanlı Salisbury Tabakası..... | 45 |
| 3.5. Taslak Tasarım: Soğurucu Dizisi Analizleri..... | 48 |
| 4. KESİK PİRAMİT RADAR SOĞURUCU DİZİSİ TASARIM VE ANALİZİ | 50 |
| 4.1. Tasarım ve Boyutlar | 51 |
| 4.2. Eniyileme Çalışmaları..... | 52 |
| 4.2.1. Farklı Kesik Piramit Üst Yüzey Kenar Boyutları (W_2) için Yansıma Katsayısı Analizi | 52 |
| 4.2.2. Düzlem Dalga Geliş Açısına göre Yansıma Katsayısı Analizi | 56 |
| 4.2.3. Farklı Kesik Piramitler Arası Aralıkları (d) için Yansıma Katsayısı Analizi .. | 58 |
| 4.2.4. Kesik Piramit Alt Yüzey Kenar Boyutuna (W_1) göre Yansıma Katsayısının Hesaplanması | 60 |
| 4.2.5. Dirençli Film Kalınlığının Parametrik Analizi | 60 |
| 4.2.6. Kesik Piramit Yüksekliğinin (H) Parametrik Analizi | 61 |
| 4.2.7. Farklı Kesik Piramit Boyutlarına göre Yansıma Katsayısı Analizi | 62 |
| 4.3. Nihai Tasarım..... | 65 |
| 4.4. Nihai Radar Soğurucu Tasarımının Üretilmesi..... | 66 |
| 4.4.1. İnce Film Kaplama Teknikleri..... | 66 |
| 4.4.2. İletken Kaplama Malzemeleri..... | 67 |
| 4.5. Dirençli Filmlerin Nihai Tasarımda Kullanımı | 68 |
| 4.6. Sonuç..... | 69 |
| 5. SONUÇLAR VE İRDELEME | 70 |
| KAYNAKLAR | 74 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 78 |

ÇİZELGELER

Sayfa

| | |
|---|----|
| Çizelge 3.1. Dallenbach tabakası analizleri için kullanılan dielektrik malzemelerin elektriksel özellikleri | 31 |
| Çizelge 3.2. Dallenbach tabakasının yansıma katsayısı ve RKA bastırma oranlarının kıyaslanması | 41 |
| Çizelge 4.1. Tasarımda kullanılan dielektrik malzemeler ve elektriksel özellikleri . | 50 |
| Çizelge 4.2. Radar soğurucu dizisinde kullanılan elemanların seçilen başlangıç boyutları | 52 |
| Çizelge 4.3. Nihai Kesik Piramit Soğurucu Dizisinin Özellikleri | 65 |
| Çizelge 4.4. Karbür kaplama malzemelerinin elektrik iletkenliği ve gerekli kaplama kalınlıkları..... | 68 |
| Çizelge 4.5. İletken polimer kaplama malzemelerinin elektrik iletkenliği ve gerekli kaplama kalınlıkları [41] | 69 |

ŞEKİLLER

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. Farklı manyetik kayıp tanjantları için elektrik geçirgenliğe göre sönüm sabiti | 11 |
| Şekil 2.2. Farklı manyetik kayıp tanjantları için dielektrik kayıp tanjantına göre sönüm sabiti..... | 12 |
| Şekil 2.3. $\mu_r = \epsilon_r$ olduğu durumda, elektrik ve manyetik geçirgenliğe göre sönüm sabiti | 12 |
| Şekil 2.4. $\mu_r = \epsilon_r$ olduğu durumda, dielektrik ve manyetik kayıp tanjantına göre geçirgenliğe göre sönüm sabiti..... | 13 |
| Şekil 2.5. Empedans geçişli yapıların öz empedans grafiği örneği; (a) piramit soğurucu, (b) kesik koni soğurucu, (c) kademeli piramit soğurucu..... | 14 |
| Şekil 2.6. Uyumlaştırma katmanı (λ_e : Uyumlaştırma katmanı içerisindeki dalga boyu)..... | 15 |
| Şekil 2.7. Dallenbach tabakası | 16 |
| Şekil 2.8. Salisbury tabakası | 18 |
| Şekil 2.9. Çok katmanlı soğurucu yapının yansıtıcılığı..... | 20 |
| Şekil 3.1. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış genel radar soğurucu yapı geometrisi | 23 |
| Şekil 3.2. Radar soğurucu yapılar için genel HFSS® Modeli | 26 |
| Şekil 3.3. Boş uzay-dielektrik ara yüzü | 28 |
| Şekil 3.4. Boş uzay-dielektrik ara yüzünün dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma ve iletim katsayısı | 28 |
| Şekil 3.5. Uyumlaştırma katmanı geometrisi (λ_e : Uyumlaştırma katmanı için kullanılan malzemede 1.42 GHz'teki dalga boyu)..... | 29 |
| Şekil 3.6. Boş uzay-dielektrik malzeme ara yüzünde uyumlaştırma katmanı kullanıldığı durumda dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma ve iletim katsayısı..... | 29 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.7. Boş uzay-dielektrik ara yüzünde uyumlaştırma katmanı kullanılmadığı (a) ve kullanıldığı (b) durumdaki dik gelen düzlem dalga için xz-düzlemindeki elektrik alan dağılımları | 30 |
| Şekil 3.8. Tek katmanlı Dallenbach tabakası geometrisi..... | 32 |
| Şekil 3.9. Tek katmanlı Dallenbach tabakasının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı | 32 |
| Şekil 3.10. Tek katmanlı Dallenbach tabakasının farklı katman kalınlıklarına göre (T_1) dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı grafiği | 33 |
| Şekil 3.11. Tek katmanlı Dallenbach tabakasının paralel-kutuplanmış düzlem dalganın farklı gelme açılarında frekansa göre yansıma katsayısı grafiği | 33 |
| Şekil 3.12. Tek katmanlı Dallenbach tabakasının dik-kutuplanmış düzlem dalganın farklı gelme açılarında frekansa göre yansıma katsayısı grafiği | 34 |
| Şekil 3.13. İki katmanlı Dallenbach tabakası geometrisi | 35 |
| Şekil 3.14. İki katmanlı Dallenbach tabakası başlangıç ve nihai katman kalınlıkları (T_1 ve T_2) için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı grafikleri | 35 |
| Şekil 3.15. İki katmanlı Dallenbach tabakasının paralel-kutuplanmış düzlem dalganın farklı gelme açılarında frekansa göre yansıma katsayısı | 36 |
| Şekil 3.16. İki katmanlı Dallenbach tabakasının dik-kutuplanmış düzlem dalganın farklı gelme açılarında frekansa göre yansıma katsayısı | 37 |
| Şekil 3.17. Üç katmanlı Dallenbach tabakası geometrisi | 37 |
| Şekil 3.18. Dik gelen düzlem dalga ile uyarılmış üç katmanlı Dallenbach tabakası başlangıç ve nihai katman kalınlıkları (T_1 , T_2 ve T_3) için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı grafikleri | 38 |
| Şekil 3.19. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış Dallenbach tabakası için radar kesit alanı HFSS Modeli..... | 39 |
| Şekil 3.20. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış bir (a), iki (b) ve üç (c) katmanlı Dallenbach tabakalarının uygulandığı küp geometrisinin geliş açısına göre radar kesit alanı grafikleri | 40 |
| Şekil 3.21. Tek katmanlı Salisbury tabakası geometrisi | 42 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.22. Tek katmanlı Salisbury tabakasının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı | 42 |
| Şekil 3.23. Salisbury tabakasının farklı katman kalınlıkları için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre katsayısı | 43 |
| Şekil 3.24. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış tek katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için frekansa göre yansıma katsayısı | 43 |
| Şekil 3.25. Dik-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış tek katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için frekansa göre yansıma katsayısı | 44 |
| Şekil 3.26. Dielektrik ile doldurulmuş Salisbury tabakası geometrisi | 44 |
| Şekil 3.27. Dielektrik ile doldurulmuş Salisbury tabakasının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı | 45 |
| Şekil 3.28. Kayıplı dielektrik ile yüklenmiş Salisbury tabakasının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı | 45 |
| Şekil 3.29. Bir (a), iki (b) ve üç (c) katmanlı Salisbury tabakalarının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı | 46 |
| Şekil 3.30. Bir, iki ve üç katmanlı Salisbury tabakalarının dik gelen düzlem dalga için yansıma katsayılarının kıyaslaması | 47 |
| Şekil 3.31. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış iki katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için frekansa göre yansıma katsayısı | 47 |
| Şekil 3.32. Dik-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış iki katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için frekansa göre yansıma katsayısı | 48 |
| Şekil 3.33. Taslak tasarım geometrileri: a) Dallenbach tabakası, b) Kare Prizma c) Kesik Piramit, d) Piramit | 49 |
| Şekil 3.34. Taslak tasarımda kullanılan soğurucu yapıların dik gelen düzlem dalga için yansıma katsayılarının kıyaslanması | 49 |
| Şekil 4.1. Radar soğurucu dizisinde kullanılan kesik piramit elemanın boyutları | 51 |
| Şekil 4.2. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı $W/2$ değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı | 53 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.3. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, $W2 = 14$ mm değeri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı | 53 |
| Şekil 4.4. Nelco N4000-13 EP malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı $W2$ değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı | 54 |
| Şekil 4.5. Nelco N4000-13 EP malzemesinin kullanıldığı durumda, $W2 = 7.6$ mm değeri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı | 54 |
| Şekil 4.6. Arlon TC600 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı $W2$ değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı | 54 |
| Şekil 4.7. Arlon TC600 malzemesinin kullanıldığı durumda, $W2 = 11.76$ mm değeri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı | 55 |
| Şekil 4.8. RT/Duroid 5880, Nelco N4000-13 EP ve Arlon TC600 malzemelerinin kullanıldığı en uygun $W2$ değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayıları kıyaslaması..... | 55 |
| Şekil 4.9. RT/Duroid 5880 malzemesi kullanıldığı durumda, (a) $W2 = 2.8$ mm, (b) $W2 = 5.6$ mm, (c) $W2 = 8.4$ mm, (d) $W2 = 11.2$ mm, (e) $W2 = 14$ mm için farklı geliş açıları için paralel-kutuplanmış düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı..... | 57 |
| Şekil 4.10. RT/Duroid 5880 malzemesi kullanıldığı durumda, farklı $W2$ değerleri için paralel-kutuplanmış düzlem dalganın geliş açısına göre ortalama yansımaya katsayısı | 58 |
| Şekil 4.11. Arlon TC600 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı kesik piramit aralıklarına göre (d) dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı | 59 |
| Şekil 4.12. Arlon TC600 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı $W1$ değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı | 60 |
| Şekil 4.13. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı dirençli film kalınlıkları için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı | 60 |
| Şekil 4.14. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı kesik piramit yükseklikleri (H) için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı | 61 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.15. Toplam dirençli film sayısı değiştirilmeden yeniden boyutlandırılmış kesik piramit eleman geometrileri | 62 |
| Şekil 4.16. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, (dirençli film sayısı sabit tutulduğunda) farklı kesik piramit eleman boyutlarına göre dik gelen düzlem dalga için yansıma katsayısı | 62 |
| Şekil 4.17. Dirençli filmler arası mesafe değiştirilmeden yeniden boyutlandırılmış kesik piramit eleman geometrileri | 63 |
| Şekil 4.18. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, (dirençli filmler arası mesafe sabit tutulduğunda) farklı kesik piramit eleman boyutlarına göre dik gelen düzlem dalga için yansıma katsayısı | 64 |
| Şekil 4.19. Nihai kesik piramit radar soğurucu dizisi tasarımı | 65 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|----------------|--|
| \vec{E} | Elektrik Alan Vektörü |
| \vec{H} | Manyetik Alan Vektörü |
| λ | Dalga Boyu |
| ω | Açısal Frekans |
| ϕ, θ | Dalganın Geliş Açısı |
| ϵ_0 | Boş Uzayın Elektrik Geçirgenliği |
| ϵ_m | Ortamın Elektrik Geçirgenliği |
| ϵ_r | Ortamın Bağıl Elektrik Geçirgenliği |
| ϵ_r' | Elektrik Geçirgenliğin Gerçek Bileşeni |
| ϵ_r'' | Elektrik Geçirgenliğin Sanal Bileşeni |
| δ_e | Ortamın Dielektrik Kayıp Açısı |
| μ_0 | Boş Uzayın Manyetik Geçirgenliği |
| μ_m | Ortamın Manyetik Geçirgenliği |
| μ_r | Ortamın Bağıl Manyetik Geçirgenliği |
| μ_r' | Manyetik Geçirgenliğin Gerçek Bileşeni |
| μ_r'' | Manyetik Geçirgenliğin Sanal Bileşeni |
| δ_m | Ortamın Manyetik Kayıp Açısı |
| σ | Ortamın Kitle İletkenliği |
| Z_0 | Boş Uzayın Öz Empedansı |
| Z_m | Ortamın Öz Empedansı |
| γ | Yayıma Sabiti |
| α | Sönüm Sabiti |
| β | Faz Sabiti |

k_n Düzlem Dalga Yayılım Vektörü

Γ Yansımaya Katsayısı

Kısaltmalar

f Frekans, Hz

f_0 Rezonans Frekansı veya Merkez Frekansı

RKA Radar Kesit Alanı

FEM Sonlu Elemanlar Metodu

MoM Moment Metodu

dB Desibel, $20\log(\cdot)$

dBm^2 Metre Kare Referanslı Desibel, $20\log(\cdot \text{ m}^2)$

FBB Fiziksel Buhar Biriktirme

KBB Kimyasal Buhar Biriktirme

SÖZLÜK DİZİNİ

Türkçe

Ana/Aday Sınır Koşulu
Ardışık Doğrusal-Olmayan Programlama
Ayarlama
Bağıl Elektrik Geçirgenliği
Bağıl Manyetik Geçirgenlik
Birleşik
Kristalleştirme
Dirençli Film
Dielektrik Kayıp Açısı
Dielektrik Kayıp Tanjantı
Empedans Geçiş Ara Yüzü
Eniyileme
Fiziksel Buhar Biriktirme
Floquet Uyarması
Genetik Algoritma
Hassasiyet
İzge
Kimyasal Banyo Yöntemi
Kimyasal Buhar Biriktirme
Kitle İletkenliği
Manyetik Geçirgenlik
Manyetik Kayıp Açısı
Manyetik Kayıp Tanjantı
Moment Metodu
Mükemmel İletken Sınır Koşulu
Newton Algoritması
Örüntü Tarama
Öz Empedans
Parametrik
Radar Kesit Alanı

İngilizce

Master/Slave Boundary Condition
Sequential Nonlinear Programming
Tuning
Relative Permittivity
Relative Permeability
Composite
Devitrification
Resistive Sheet
Dielectric Loss Angle
Dielectric Loss Tangent
Graded Impedance Interface
Optimization
Physical Vapor Deposition (PVD)
Floquet Port
Genetic Algorithm
Sensitivity
Spectrum
Chemical Bath Technique
Chemical Vapor Deposition (CVD)
Bulk Conductivity
Permeability
Magnetic Loss Angle
Magnetic Loss Tangent
Method of Moment
Perfect Electric Boundary Condition
Newton Algorithm
Pattern Search
Intrinsic Impedance
Parametric
Radar Cross Section

Sol-Jel

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Farklar Yöntemi

Yansıma Katsayısı

Yönbağımlı

Yönbağımsız

Yüzey Aşındırma Yöntemi

Sol-Gel

Finite Element Method

Finite Difference Method

Reflection Coefficient

Anisotropic

Isotropic

Surface Abrasion Technique

1. GİRİŞ

Bir cismin algılanabilmesi için, cismin kendisinin, cismi algılayan sistemin ve cisim ile algılayıcı arasındaki bağlaşım yolunun tanımlanabilmesi gerekmektedir. Benzer bir şekilde, bir cismin elektromanyetik olarak algılanabilmesi için ise, cisimden yayılan elektromanyetik dalganın, dalganın alıcıya ulaşana kadarki davranışının ve alıcının tanımlanması gerekmektedir. Yayıcının fiziksel yapısı, geometrisi ve kendisine uygulanan uyarmanın yapısı, yayıcıdan ışıyan elektromanyetik dalganın genliğini, frekansını, fazını ve kutuplanmasını belirleyecektir. Bağlaşım yolunu ise elektromanyetik dalganın ilerlediği ortamın elektriksel özellikleri belirleyecektir. Alıcının kendisine ulaşan elektromanyetik dalgayı algılayabilmesi, ancak ve ancak kendisine gelen dalganın izgel davranışını tanımlayabildiği takdirde mümkün olacaktır. Elektromanyetik izgenin taranması ve tespit edilmesine yönelik uygulamalar ultraviyoteden görünür ışık, kızılötesi, mikrodalga ve radyo frekanslarına kadar tüm izgel bölgeyi konu edinmektedir.

Savunma teknolojilerinin öneminin hızla artmasıyla beraber, dost veya düşman unsurlara yönelik geliştirilen teknolojilerin "hedef" olarak tanımlanması kaçınılmaz olmuştur. Hedefin tespit edilmesi veya tespit edilememesi gibi bir amaca yönelik bir çalışma, hedef yüzeyinden kaynaklanan yansımaların, hedef yüzeyinde ve etrafında gerçekleşen ışıma ve saçılmaların ve hedefin üretildiği malzemeden kaynaklı soğrulmaların ilgilenilen frekans bandında kontrolünü gerektirmektedir.

Bir hedefin tespit edilebilirliği radar kesit alanı (RKA) cinsinden ölçülebilmektedir. Radar kesit alanını elektriksel hedefin büyüklüğü, şekli ve yapıldığı malzeme belirler ve kısaca hedefe gönderilen ve hedeften yansıyan elektromanyetik dalganın bir tür oranı olarak tanımlanabilir [1].

Radar kesit alanının hesaplanması çeşitli ölçüm ve test yöntemleri ile mümkün olmakla birlikte, geometrisi matematiksel olarak tanımlanabilmiş bir yapının radar kesit alanı nümerik ve çözümlenmeli yöntemler vasıtasıyla hesaplanabilmektedir. Nümerik ve çözümlenmeli tüm yöntemler RKA hesaplamalarında saçılım, ışıma, yayılım ve kırınım gibi kavramları hesaba katmak durumundadır.

Geometrisi matematiksel olarak tanımlanabilen cisimlerin radar kesit alanı çözümlenmeli yöntemlerle hesaplanabilmektedir, fakat geometri karmaşıklaştıkça nümerik yöntemlere başvurmak kaçınılmaz olmaktadır. Nümerik hesaplamalarda

tam-dalga elektromanyetik yöntemler kullanılabilirdi gibi yarı-yaklaşık yöntemler de kullanılabilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi [2,3], Moment Metodu [4,5], Sonlu Farklar Yöntemi [6] gibi nümerik yöntemler tam-dalga elektromanyetik hesaplamalarda sıklıkla kullanılan nümerik yöntemlerdir.

Geometrinin elektriksel boyutu büyüdükçe, diğeri bir tabirle geometrinin maksimum boyutunun ilgili frekanstaki dalga boyuna oranı arttıkça, hesaplama yükü artmakta dolayısıyla çözüm süresi ve donanım ihtiyacı da artmaktadır. Elektriksel olarak çok büyük geometrilerin radar kesiti hesaplamalarında fiziksel ve geometrik optik ve kırınım teorilerini kullanan ışın izleme vb. yarı-yaklaşık yöntemler kullanılarak hesaplanabilmektedir. Modern yöntemler ile birlikte, sürünen dalga, köşe ve sivri köşe ışın/akım düzeltimi gibi ek düzeltme faktörlerinin uygulanabilmesiyle tam-dalga yöntemlere oldukça yakın hesaplamalar gerçekleştirilebilmektedir [7].

Radar kesit alanının hesaplanabilmesi, azaltılmasına yönelik çalışmalara olanak sağlayacaktır. RKA azaltımı ile hedef olarak tanımlanan sistemin karşı unsurun radarı tarafından algılanmasına engel olmak amaçlanmaktadır. Radar kesit alanının azaltımı için başlıca dört yöntem başvurulabilmektedir; şekillendirme, aktif ve pasif yükleme ve radar soğurucu yapıların uygulanması. Şekillendirme ile RKA azaltımı için önemli olmakla beraber, ışınların farklı yönlere saçılmasından kaçınabilmek mümkün olmadığı için özellikle bistatik radarlar tarafından tespit edilebilirliği yüzünden tek başına yeterli olmamaktadır. Aktif ve pasif yükleme, hedef üzerinde bulunan RKA'yı artırıcı yerel bölgelerdeki saçılmaları etkisiz hale getirmek için alınan önlemlerdir.

Tezin ana konusu da olan radar soğurucu yapıların uygulanması, RKA azaltımı söz konusu olduğunda üzerinde araştırma ve geliştirme yapılan konuların başında gelir. Radar soğurucu yapıların gelişiminin özetlendiği birçok makale [8,9] ve kitap [10] bulunmaktadır [1].

Radar soğurucu yapıların geliştirilmesi 1930'larda, radarın kullanılmaya başlanmasından hemen sonra başlamıştır. Tek ve çok katmanlı soğurucu kaplamalardan piramit, koni, kesik koni gibi birçok şekil ve yapı radar soğurucu yapı tasarımının konusu olmuştur.

Sadece askeri platformların radar izinin azaltımında değil, yansız odaların elektromanyetik izgenin ölçümü için kullanımı, gizlilik arz eden tesislerin bilgi güvenliği gibi birçok uygulamada radar soğurucu yapılar araştırma konusu olmuştur.

Radar soğurucu yapılara yönelik araştırmalar 1930'larda başlamış olup [9], radar soğurucu yapı ile ilgili ilk patent 1936'da Hollanda'da alınmıştır [11]. İkinci Dünya savaşı sırasında, Almanya 3 GHz rezonans frekansına sahip karbonil demir tozu ile katkılanmış kauçuk plastik malzemeyi üreterek deniz platformlarının radarlardan gizlenmesi amacıyla kullanmıştır. Almanya, ayrıca çok katmanlı Salisbury tabakaları ile (Jaumann tabakası) 2 - 15 GHz arasında -20 dB oranında yansızlık azaltımı gerçekleştirebilmiştir. Aynı süreçte Amerika, Halpern liderliğinde MIT Işıma Laboratuvarında (MIT Radiation Laboratory) 0.6 mm kalınlığa sahip HARP (Halpern Anti Radiation Paint) olarak adlandırılan soğurucu boya geliştirmiştir [1].

Savaş sonrası dönemde (1945-1950) sivri uçlu geometrilere sahip radar soğurucu yapıların geliştirmesine yönelik çalışmalara sıklıkla rastlamaktayız [12,13]. Bu tür yapılar yansız oda yüzeylerinin kaplamasında kendini göstermektedir.

1950'lerde "Spongex" olarak adlandırılan karbon kaplı hayvan kıllarından oluşan soğurucu malzeme Sponge Products Company tarafından üretilmiştir. Yaklaşık 5 cm kalınlığa sahip bu soğurucu yapı 2.4 - 10 GHz frekans aralığında -20 dB bastırma oranı sağlanabilmiştir. Radar soğurucu yapı elemanlarının devre teorisi kullanılarak modellenmesi esasına dayanan devre eşlenikli yapılara yönelik ilk araştırmaların Severin ve Mayer tarafından gerçekleştirilmesiyle birlikte, özellikle frekans seçici yüzey ve soğurucu dizilerinin geliştirilmesi konusuna ciddi bir adım atılmıştır [14].

1960 ve 1970'lerde devre eşlenikli yapılara yönelik çalışmalar yoğunluğunu devam ettirmiştir. Ferrit alt katmanların kullanılarak soğurucu kalınlığının azaltımında ciddi başarılar elde edilmiştir. Ayrıca çok katmanlı Salisbury tabakalarının (Jaumann tabakaları olarak da adlandırılır) üretiminin kontrolü için dirençli film baskı yöntemleri kendini göstermiştir.

1980'lerde çok katmanlı soğurucu yapıların eniyileme teknikleri kullanılarak tasarlanması konusunda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Jaumann soğurucularının bant genişliği eniyileme çalışmaları iletim hattı modelleriyle bilgisayarlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir [15]. Frekans seçici yüzeylerin ve devre

eşlenikli soğurucu yapıların tasarlanmasında Floquet teoreminden faydalanan araştırmalar yapılmıştır [16].

1990'lerden bugüne özellikle Genetik algoritma kullanılarak radar soğurucu malzeme tasarımına yönelik eniyileme çalışmaları sıklığını artırmıştır. İletken polimer malzemelerin radar soğurucu yapılarda farklı kullanımı soğurucu yapıdaki dirençli ve kapasitif elemanların çeşitlendirilebilmesiyle ilgilenilen frekans bandına göre ayarlanabilen soğurucu tasarımlarına olanak sağlamaktadır [17].

Radar soğurucu yapıların geniş bantlı ve düşük yansıtıcılığa sahip olma gereksinimi, kullanılan malzemelerin, uygulama ve amaç için özelleştirilmiş, ileri üretim teknolojileri gerektiren ve tedarik edilmesi zor ve yüksek maliyetli olmasına sebep olmaktadır [18]. Hatta bu tür malzemelerin üretici firmadan askeri amaçla tedariki bazen mümkün olmamaktadır.

Radar soğurucu yapıların tasarımının gerçekleştirilebilmesi için tasarımda kullanılacak malzemelerin elektriksel özelliklerinin ilgilenilen izgel bölgede biliniyor olması gerekmektedir. Çoğunlukla bu bilgilere erişmek de mümkün olmamaktadır.

Bu engellerin aşılabilmesi için iki yoldan birine başvurmadan başka çözüm kalmamaktadır. Birincisi, radar soğurucu yapı tasarımında kullanılacak kayıplı malzemelerin tasarım ve üretim süreçlerinin soğurucu yapı tasarımcı tarafından gerçekleştirilmesi, diğeri ise elektriksel davranışı bilinen düşük kayıplı malzemeler kullanılarak tasarlanmasıdır. Fakat minimum yansıtıcılığın hedeflendiği bant genişliği arttıkça, gerekli soğurucu yapı kalınlığı da artmaktadır. Toplam yapı kalınlığı arttırılmadan, yansıma katsayısını azaltmak ve bant genişliğini arttırmak ise ilgili frekans bandında yüksek kayıplı malzemeler kullanma gereksinimini de beraberinde getirmektedir.

Bu tez kapsamında, yaygın olarak kullanılan düşük kayıplı dielektrik malzemeler ve dirençli filmler kullanılarak en fazla 3 cm kalınlığa sahip ve sivil ve askeri platformlarda kullanıma uygun özgün bir radar soğurucu yapı tasarımı amaçlanmıştır. Dallenbach tabakası, Salisbury tabakası ve piramit soğurucu gibi temel radar soğurucu yapılar kullanılarak gerçekleştirilen tasarımlarda, Duroid, FR4 Epoksi ve Arlon gibi yaygın olarak kullanılan ve elektriksel özellikleri bilinen malzemeler kullanılmıştır. Öncelikle temel radar soğurucu yapıların yansıtıcılık davranışlarını gözlemek amacıyla bilgisayar destekli benzetimleri

gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimlerde alınan sonuçların ışığında, Dallenbach tabakası, Salisbury tabakası ve piramit soğurucu yapılarının minimum yansıtıcılık ve maksimum soğuruculuk yönünden fayda sağlayan özelliklerini tek bir radar soğurucu yapıda birleştirerek 2 - 18 GHz frekans bandında -10 dB'nin altında yansıma katsayısına sahip bir tasarım amaçlanmıştır. Bu teze konu olan tasarımlarda, Duroid, FR4 Epoksi ve Arlon malzemelerinden oluşan 1.6 - 2.5 mm kalınlığa sahip kesik piramitler kullanılmıştır. Bu kesik piramit elemanlarının üst ve alt yüzeyi arasına belirli aralıklarda yüksek elektriksel dirençli nanometre mertebelerinde kalınlığa sahip dirençli filmler yerleştirilmiştir. Farklı boyut ve malzemeler için benzetimler gerçekleştirilerek minimum yansıtıcılığa sahip radar soğurucu yapı belirlenmeye çalışılmıştır. Benzetimlerde ANSYS HFSS® yazılımı kullanılmıştır.

Çalışmalar sonucunda en uygun radar soğurucu yapıya ait sonuçların, toplam 25.2 mm kalınlığa sahip, Duroid malzemesi ve 0.38 nanometre kalınlığa sahip grafit filmlerin kullanıldığı kesik piramit dizisi tasarımında alındığı görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda tasarlanan radar soğurucu yapının yansıma katsayısının 2 - 18 GHz frekans bandı boyunca 0.32 (-10 dB) altında olduğu ve yansıma katsayısının bazı frekanslarda -45 dB'ye kadar düştüğü görülmüştür.

Tezin bundan sonraki bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir:

2. *Bölüm*'de, temel radar soğurucu yapıların esasları, türleri ve tasarım ölçütleri, soğurucu yapılarda kullanılan kayıplı malzemeler, konularına yer verilmiştir. Teorik bilgiler ve tasarım ölçütleri tez kapsamında kullanılan yapı/alt-yapıları kapsayacak şekilde anlatılmıştır.

3. *Bölüm* temel radar soğurucu yapıların tam-dalga elektromanyetik benzetimlerine yönelik çalışmaları içermektedir. Öncelikle benzetimlerde kullanılan yöntem konusunda bilgi verildikten sonra, uyumlaştırma katmanı, Dallenbach tabakası, Salisbury tabakası gibi temel soğurucu yapıların tek-katmanlı ve çok-katmanlı kullanımlarına yönelik gerçekleştirilen parametrik analizlere yer verilmiştir. Analizler sonrasında farklı gelme açıları için yansıma katsayıları hesaplanarak teze konu olan nihai radar soğurucu yapının tasarımında kullanılacak yapıların başarımlı ölçütleri anlatılmıştır.

4. *Bölüm*'de teze konu olan radar soğurucu yapı tasarımı ve eniyilemesine yönelik benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Belirli dikey aralıklarla ince grafit filmlerin yerleştirildiği kesik piramit dizilerinden meydana gelen tasarımda, kullanılan Duroid, Epoxy ve Arlon gibi malzemelerin ve kesik piramit elemanların fiziksel boyutlarının yansıma katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hesaplamalar sonrasında tasarım ölçütlerini sağlayan yapı elde edilmiştir.

5. *Bölüm* sonuçlar ve irdeleme bölümü olup, 3. ve 4. *Bölüm*'de alınan sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. RADAR SOĞURUCU YAPILARA GENEL BAKIŞ

Giriş bölümünde de bahsedildiği üzere radar kesit alanının azaltımı için kullanılan yöntemlerden biri de hedef platformun radar soğurucu yapıyla kaplanmasıdır. Radar soğurucu yapılar; uyumlaştırma katmanları, kayıplı dielektrik malzemeler, dirençli filmler, kademeli ve/veya devamlı empedans geçiş ara yüzleri, devre eşlenikli yapılardan ve bu yapıların ayrı ayrı veya beraber kullanılmasından oluşmaktadır.

Radar soğurucu yapı tasarımında göz önünde bulundurulması gereken değişkenler ve tasarım ölçütleri aşağıdaki gibidir:

- Rezonans frekansı, f_0
- Bant genişliği, Δf
- Yansıma katsayısı, Γ
- Katman kalınlığı, H
- Düzlem dalga geliş açısı, ϕ, θ

İdeal bir radar soğurucu yapı; istenilen frekans bandında, ilgili dalga geliş açıları için yansıtıcı özelliğe sahip olmayan ve/veya tam soğurucu özelliğe sahip, mümkün oldukça ince, üretilebilir ve ilgili platforma uygulanabilen yapıdır. İdeal bir soğurucu yapının üretilmesi pratikte mümkün olmadığından yukarıda ifade edilen değişkenlerin kullanılacak uygulamaya mümkün oldukça hitap edecek şekilde belirlenmesi ve radar soğurucu tasarımının bu değerler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde radar soğurucu yapıların türleri, tasarım ölçütleri ve soğurucu malzeme örnekleri hakkında bilgi verilecektir.

2.1. Yansıtıcılığın Azaltımı ve Soğuruculuk

Bir yapının radar soğurucu yapı olarak adlandırılması, o yapının yüzeyine gelen elektromanyetik dalganın yansımamasına ve/veya yüzey tarafından soğurulmasına bağlıdır. Boş uzaydan bir ortama gelen elektromanyetik dalganın dik gelme açısı için yansıma katsayısı;

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \quad 2.1$$

ile verilebilir.

Burada Γ yansıtma katsayısını, Z_0 boş uzayın öz empedansını, Z_m ortamın öz empedansını ifade etmektedir [19].

Düzlem dalga için boş uzayın öz empedansı;

$$Z_0 = \left| \frac{E_\theta}{H_\phi} \right| = \left| \frac{E_\phi}{H_\theta} \right| = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega \quad 2.2$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada E_θ , E_ϕ ve H_ϕ , H_θ elektrik ve manyetik alan vektörlerinin yanca ve yükseliş bileşenlerini, ϵ_0 ve μ_0 boş uzayın elektrik ve manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.

Minimum yansıtıcılığın sağlanabilmesi için gerçekleşmesi gereken üç durum vardır:

Birinci olarak, Eşitlik 2.1'e bakıldığında, bir ortamın öz empedansı 377Ω ise ($Z_m = Z_0$) boş uzaydan kendisine gelen elektromanyetik dalgayı yansıtmayacaktır. Bir diğer deyişle ortam ile boş uzay tam-uyumlaştırılmış olacaktır.

Bir ortamın öz empedansı

$$Z_m = \sqrt{\frac{\mu_m}{\epsilon_m}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad 2.3$$

olarak tanımlanır [19].

Yansıtıcılığın minimum olabilmesi için, diğer bir tabir ile $Z_m = Z_0$ olabilmesi için diğer bir koşul ise $\mu_r = \epsilon_r$ olmasıdır. Burada $\epsilon_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r''$ ortamın bağıl elektrik geçirgenliği, $\mu_r = \mu_r' - j \mu_r''$ bağıl manyetik geçirgenliği tanımlamaktadır.

Bu durum ancak ve ancak, bağıl elektrik geçirgenliğin ve bağıl manyetik geçirgenliğin hem gerçek hem de sanal bileşenlerinin eşit olması şartıyla mümkün olacaktır.

Yansıtıcılığın minimum olabilmesi için diğer koşul ise elektromanyetik dalganın kayıplı ortam içerisinde iken zayıflamasıdır.

Bir ortamdaki düzlem dalganın yayılma sabiti

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad 2.4$$

olarak tanımlanmaktadır.

Kayıplı bir ortamda γ karmaşık olduğundan

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad 2.5$$

olarak tanımlanabilir. Burada α yayılım sabitinin gerçekte bileşeni olan sönüm katsayısını, β ise yayılım sabitinin sanal bileşeni olan faz sabitini tanımlamaktadır.

Yayılma sabiti ortamın karmaşık elektriksel özellikleri cinsinden tanımlandığında

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\sqrt{(\mu'_r - j\mu''_r)(\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r)} \quad 2.6$$

olacaktır.

Eşitlik 2.6'da kök içerisindeki ifade kutupsal biçimde ifade edildiğinde

$$(\mu'_r - j\mu''_r)(\varepsilon'_r - j\varepsilon''_r) = r e^{j\theta} = r\cos(\theta) + jr\sin(\theta) \quad 2.7$$

şeklinde yazılabilir.

$$r\cos(\theta) = (\mu'_r \varepsilon'_r - \mu''_r \varepsilon''_r) = a \quad \text{ve} \quad r\sin(\theta) = -(\mu'_r \varepsilon''_r + \mu''_r \varepsilon'_r) = -b \quad 2.8$$

ifadeleri kullanılarak r^2 ve θ hesaplandığında

$$r = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{ve} \quad \theta = \tan^{-1}(-b/a), \quad \theta = \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \text{ (rad)} \quad 2.9$$

olacaktır.

Eşitlik 2.8.'de görüldüğü üzere b her zaman pozitif değer alırken, a hem pozitif hem de negatif değer alabilmektedir. \tan^{-1} fonksiyonu her zaman $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ aralığında

değer aldığından, Eşitlik 2.7'deki karmaşık ifadenin argümanı olan θ açısının tanımlı olduğu aralık incelendiğinde:

- $a \geq 0$ iken, $r \cos(\theta) \geq 0$, $r \sin(\theta) < 0$ ve $-\frac{b}{a} < 0$ olacağından 2.7'deki karmaşık ifadenin argümanı olan θ her zaman $[-\frac{\pi}{2}, 0]$ aralığında değerler alarak bu koşulları sağlayacaktır.
- $a < 0$ iken $r \cos(\theta) < 0$, $r \sin(\theta) < 0$, $-\frac{b}{a} > 0$ olacağından 2.7'deki karmaşık ifadenin argümanı olan θ $[0, \frac{\pi}{2}]$ aralığında bu koşulları sağlamayacaktır. Bu koşulları sağlayan argüman $-\pi + \tan^{-1}(-b/a)$ olacaktır.

Özetle;

$a \geq 0$ için,

$$\theta = \tan^{-1}(-b/a) \quad 2.10$$

$a < 0$ için,

$$\theta = -\pi + \tan^{-1}(-b/a) \quad 2.11$$

olacaktır.

Eşitlik 2.8, Eşitlik 2.9'daki ifadeler Eşitlik 2.6'da yerine konulduğunda:

$$\begin{aligned}
 \gamma &= j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\sqrt{r}e^{j\theta} \\
 &= j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\sqrt{r}e^{j\theta/2} \\
 &= j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}(\sqrt{r}\cos(\theta/2) + j\sqrt{r}\sin(\theta/2)) \\
 &= j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\left(\sqrt{\sqrt{a^2+b^2}}\cos(\theta/2) + j\sqrt{\sqrt{a^2+b^2}}\sin(\theta/2)\right) \\
 &= j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}\left((a^2+b^2)^{1/4}\cos(\theta/2) + j(a^2+b^2)^{1/4}\sin(\theta/2)\right) \\
 &= -\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}(a^2+b^2)^{1/4}\sin(\theta/2) + j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}(a^2+b^2)^{1/4}\cos(\theta/2)
 \end{aligned} \quad 2.12$$

Eşitlik 2.5'te tanımlanan sönüm ve faz sabitleri Eşitlik 2.10, Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.12 kullanılarak hesaplandığında:

Faz sabiti:

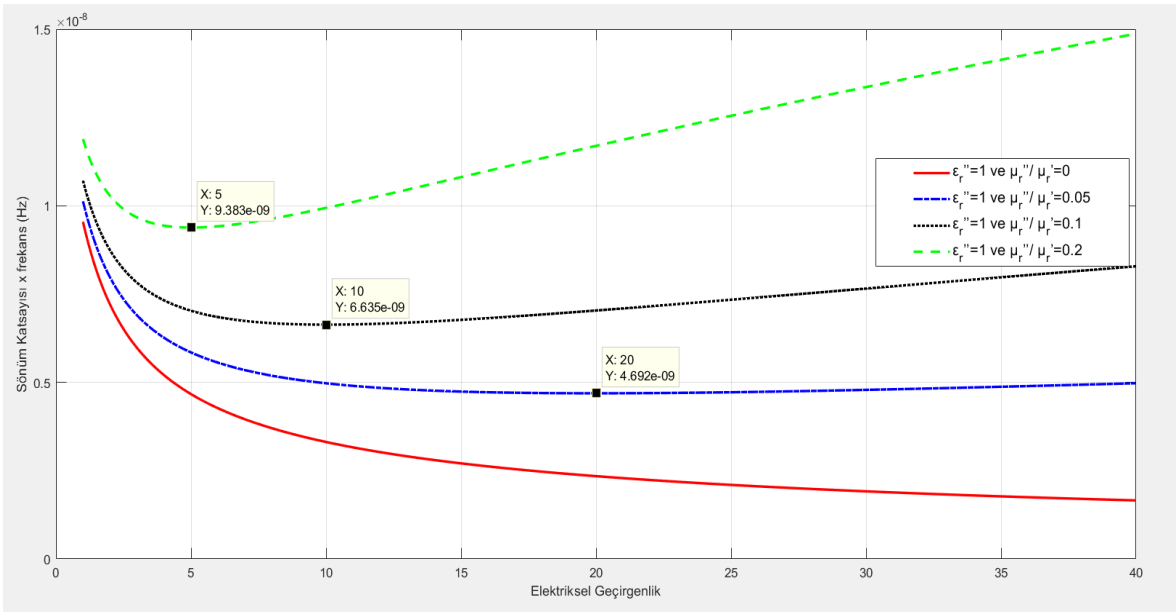
$$\beta = \begin{cases} \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} (a^2 + b^2)^{\frac{1}{4}} \cos\left(\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(-\frac{b}{a}\right)\right), & a \geq 0 \\ \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} (a^2 + b^2)^{\frac{1}{4}} \sin\left(\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(-\frac{b}{a}\right)\right), & a < 0 \end{cases} \quad 2.13$$

Sönüm sabiti:

$$\alpha = \begin{cases} -\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} (a^2 + b^2)^{\frac{1}{4}} \sin\left(\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(-\frac{b}{a}\right)\right), & a \geq 0 \\ \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} (a^2 + b^2)^{\frac{1}{4}} \cos\left(\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(-\frac{b}{a}\right)\right), & a < 0 \end{cases} \quad 2.14$$

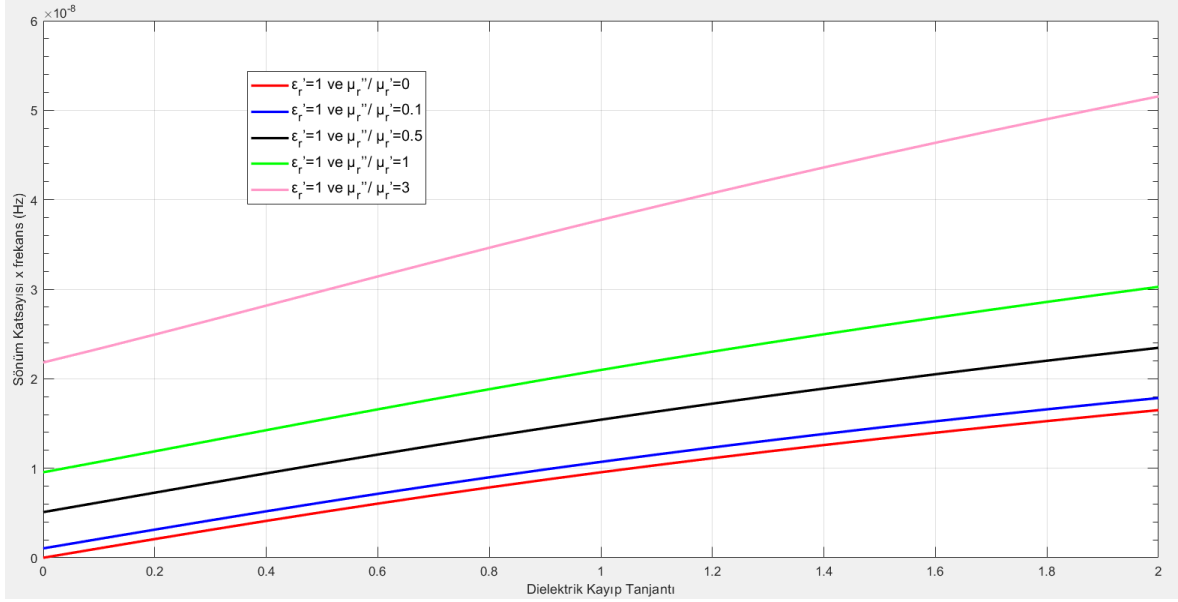
Burada $a = (\varepsilon_r' \mu_r' - \varepsilon_r'' \mu_r'')$ ve $b = (\varepsilon_r' \mu_r'' + \varepsilon_r'' \mu_r')$ olarak tanımlanmıştır.

Eşitlik 2.6 veya Eşitlik 2.14 kullanılarak sönüm sabitinin ε_r' , ε_r'' , μ_r' , μ_r'' değerlerine göre nasıl değiştiği incelenebilir. Farklı manyetik kayıp tanjantı değerleri için ε_r' değerine göre sönüm sabiti grafikleri incelendiğinde, manyetik kayıp tanjantının sıfır olduğu durumda ε_r' değeri arttıkça sönüm sabitinin azaldığı görülmektedir. Sıfırdan büyük manyetik kayıp tanjantı değerleri için ise, ε_r' değeri arttıkça dielektrik kayıp tanjantı ile manyetik kayıp tanjantı birbirine eşit olana kadar sönüm sabiti azalmakta, daha sonra artmaktadır (Şekil 2.1).



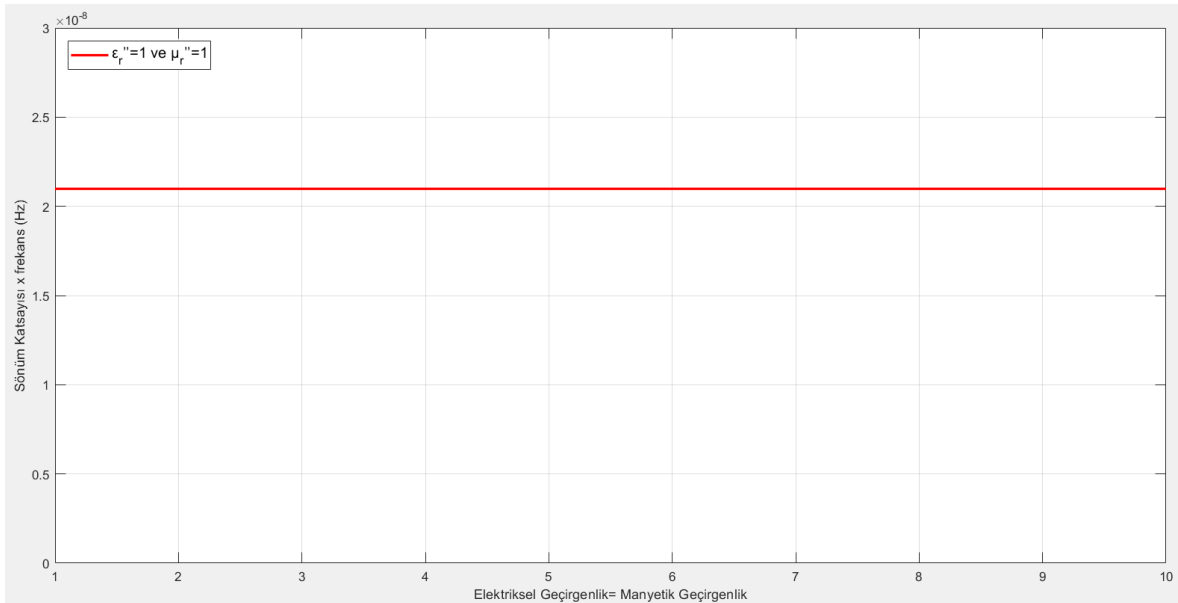
Şekil 2.1. Farklı manyetik kayıp tanjantları için elektrik geçirgenliğe göre sönüm sabiti

Farklı manyetik kayıp tanjantı değerleri için dielektrik kayıp tanjantına göre sönüm sabiti grafikleri incelendiğinde ($\epsilon_r' = 1$ için ϵ_r'' değerine göre), sönüm sabitinin dielektrik ve manyetik kayıp tanjantı arttıkça arttığı görülmektedir (Şekil 2.2).



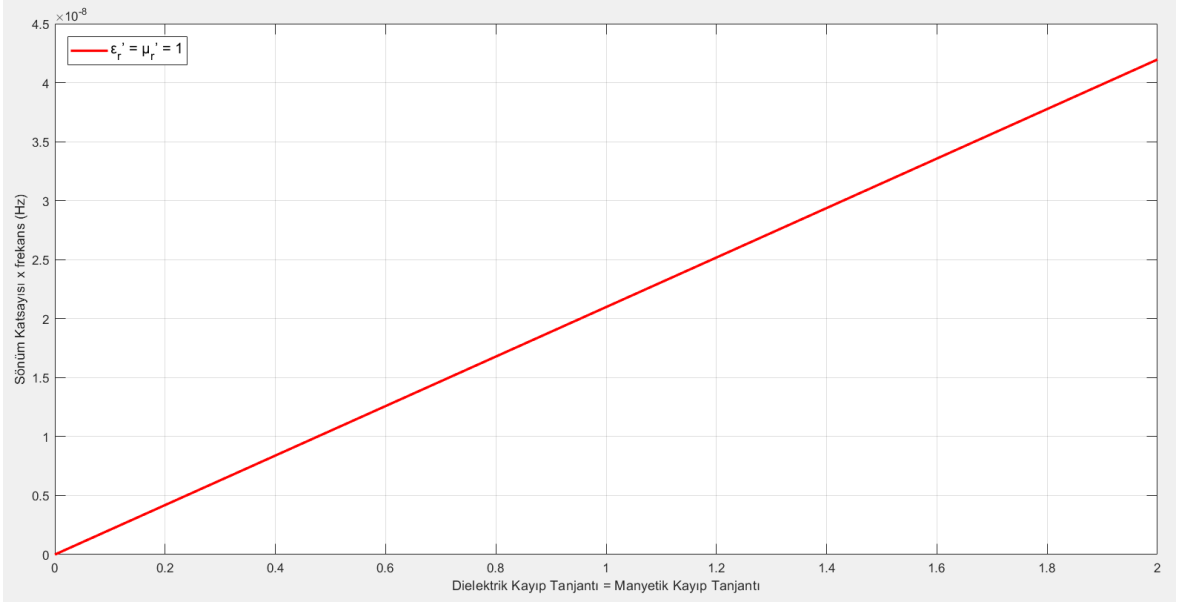
Şekil 2.2. Farklı manyetik kayıp tanjantları için dielektrik kayıp tanjantına göre sönüm sabiti

$\mu_r = \epsilon_r$ olduğu durumda, elektrik ve manyetik geçirgenlik eşit olacak şekilde birlikte artırıldığında sönüm sabitinin değişmediği görülmektedir. (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. $\mu_r = \epsilon_r$ olduğu durumda, elektrik ve manyetik geçirgenliğe göre sönüm sabiti

$\mu_r = \varepsilon_r$ olduğu durumda, dielektrik ve manyetik tanjantı eşit olacak şekilde birlikte arttırıldığında sönüm sabitinin doğrusal bir şekilde arttığı görülmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. $\mu_r = \varepsilon_r$ olduğu durumda, dielektrik ve manyetik kayıp tanjantına göre geçirgenliğe göre sönüm sabiti

Yukarıdaki bilgiler göz önünde bulundurulduğunda, yansıtıcılığın minimum ve soğuruculuğun maksimum olması için aşağıdaki koşulların sağlanması gerekmektedir:

- $Z_m = Z_0$
- $\varepsilon_r = \mu_r$
- yüksek dielektrik ve manyetik kayıp tanjantı
- dielektrik ve manyetik kayıp tanjantı değerleri sabit kalmak koşuluyla yüksek ε_r' ve μ_r'

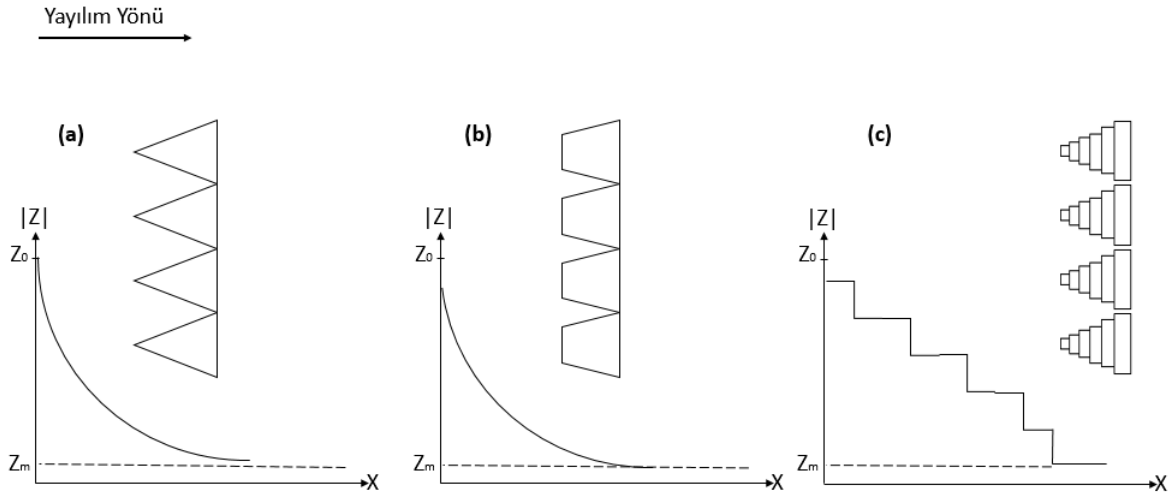
2.2. Radar Soğurucu Yapı Tipleri

Bu bölümde tez kapsamında da kullanılan radar soğurucu yapı tipleri ve minimum yansıtıcılık için gerekli tasarım ölçütleri açıklanacaktır.

2.2.1. Kademeli ve Sürekli Empedans Geçişleri

Yansıtıcılığın minimum olabilmesi için kullanılan yöntemlerden biri de empedans geçişlerinin kademeli veya sürekli olarak azaltılarak yansımının azaltılmasıdır. Sivri uçlu ve kesik konik yapılar bu tür soğurucu yapılara örnek olarak verilebilir.

Şekil 2.5'te empedans geçişli soğurucu yapı boyunca empedans değişiminin temsili grafiği görülmektedir.



Şekil 2.5. Empedans geçişli yapıların öz empedans grafiği örneği; (a) piramit soğurucu, (b) kesik koni soğurucu, (c) kademeli piramit soğurucu

2.2.2. Uyumlaştırma Katmanı

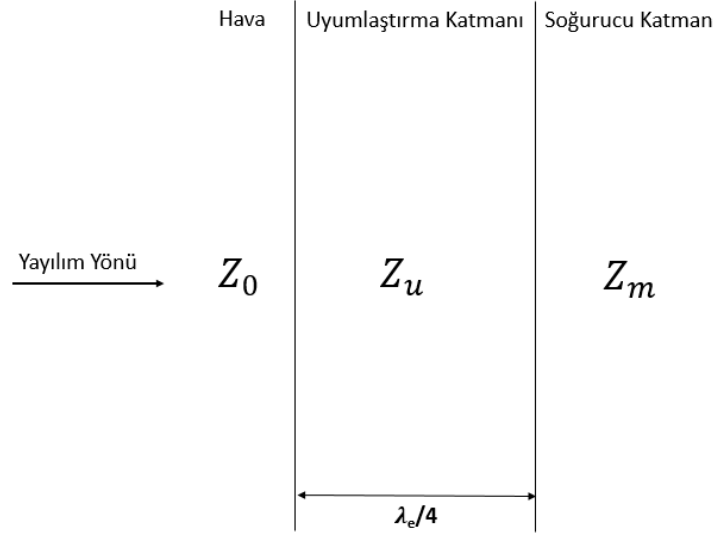
Soğurucu katmanlar için uyumlaştırma katmanı, kademeli empedans geçişinin kullanılmak istendiği durumlarda geçiş katmanının kalınlığını azaltmak amacıyla kullanılır. Uyumlaştırma katmanı kalınlığı ilgili frekanstaki çeyrek dalga boyu olduğu durumda uyumlaştırma sağlanır [19]. Bu yüzden çeyrek-dalga uyumlaştırıcılar dar bantlı soğurucular olarak kullanılabilirler.

Uyumlaştırma katmanı öz empedansı;

$$Z_u = \sqrt{Z_0 Z_m} \quad 2.15$$

olarak tanımlanır [19].

Burada Z_u , Z_0 , Z_m sırasıyla uyumlaştırma katmanı, hava ve soğurucu malzemenin öz empedansını tanımlamaktadır (Şekil 2.6).

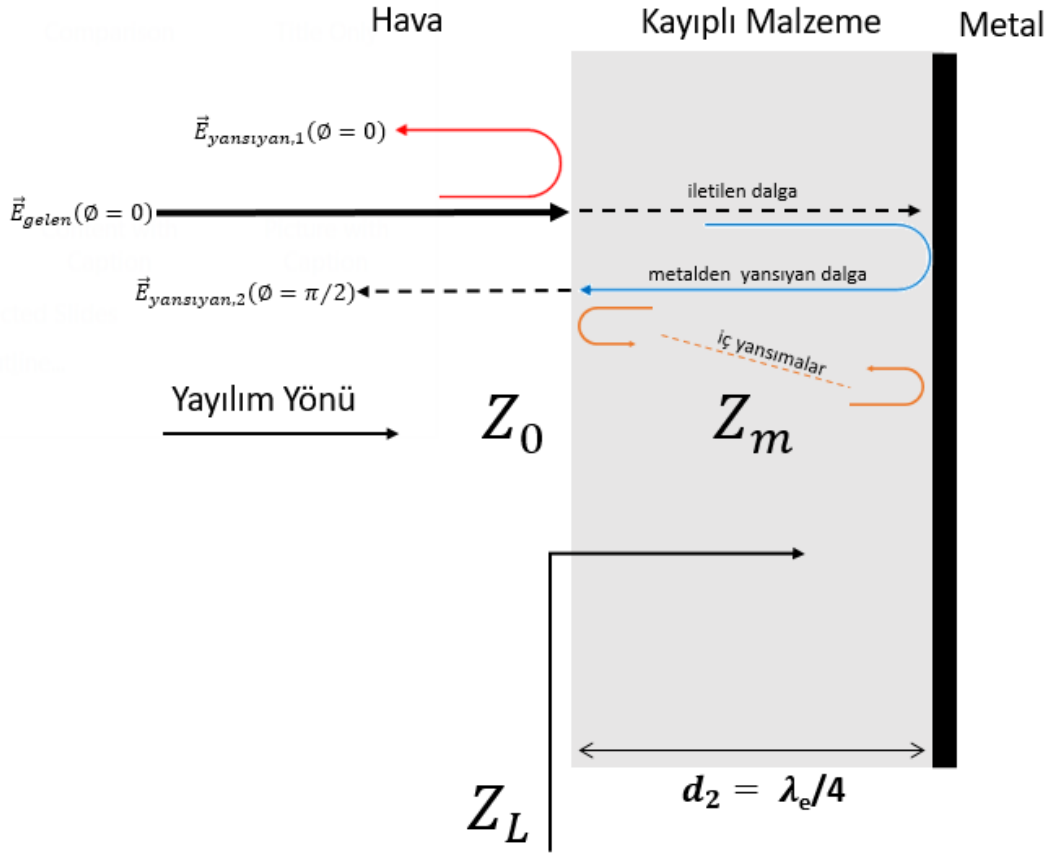


Şekil 2.6. Uyumlaştırma katmanı (λ_e : Uyumlaştırma katmanı içerisindeki dalga boyu)

2.2.3. Dallenbach Tabakası

Dallenbach tabakası [20] iletken bir plaka önüne yerleştirilmiş kayıplı homojen tabakadan oluşan soğurucu bir yapıdır. Elektrik ve manyetik geçirgenlik yansıtıcılık minimum olacak şekilde ayarlanır ve katman kalınlığı ilgili frekansta çeyrek dalga boyu olarak seçilir.

Kalınlık malzeme içerisinde ilgili frekanstaki dalga boyunun dörtte biri olacak şekilde ($\lambda_e/4$) seçilerek tabakadan yansıyan ve soğurucu katmandan geçip iletken plakandan geri yansıyan elektromanyetik dalgaların 180° faz farkına sahip olarak birbirini sönümlendirmesi prensibine dayanmaktadır (Şekil 2.7). Soğurucu katman olarak kayıplı bir malzeme kullanıldığından boş uzay-kayıplı malzeme, kayıplı malzeme-metal ara yüzlerinde tekrarlanan çoklu yansımalar sırasında katman içerisinde elektromanyetik dalga sönümlenerek yansıtıcılığın azaltılması sağlanacaktır.



Şekil 2.7. Dallenbach tabakası

Önceki bölümlerde yansıtıcılığın minimum olmasının $Z_L = Z_0$ koşuluna bağlı olduğuna değinilmişti. Metal önünde soğurucu katmanın olduğu durumda Dallenbach tabakasının öz empedansı

$$Z_L = Z_m \tanh(\gamma_2 d_2) \quad 2.16$$

olarak tanımlanabilir [21]. Burada γ_2 soğurucu malzemenin içerisindeki düzlem dalga yayılım sabitini, $Z_m = \sqrt{\mu_0 \mu_r / \epsilon_0 \epsilon_r}$ soğurucu malzemenin öz empedansını, d_2 ise malzeme kalınlığını tanımlamaktadır. Burada ϵ_0 boş uzayın elektrik geçirgenliğini, μ_0 boş uzayın manyetik geçirgenliğini, ϵ_r malzemenin bağıl elektrik geçirgenliğini ve μ_r malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğini tanımlamaktadır.

Z_0 gerçek bir değere sahip olmakla birlikte Z_m ve γ_2 karmaşık değerlere sahiptir. Dolayısıyla $Z_L = Z_0$ koşulu ancak ve ancak Z_m ve $\tanh(\gamma_2 d_2)$ değerlerinin faz açılarının toplamının sıfır olduğu durumda mümkün olacaktır [21].

Bir diğer ifadeyle;

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh(\gamma_2 d_2) = 1 \quad 2.17$$

olmalıdır.

Yayılm sabiti $\gamma_2 = \alpha + j\beta = j(2\pi/\lambda_0)\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$ olarak tanımlanabilmekte ve yayılma sabitinin gerçekte ve sanal bileşenleri malzemenin dielektrik ve manyetik kayıp açıları cinsinden de ifade edilebilmektedir [22]:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_r' \mu_r'} \frac{\sin\frac{1}{2}(\delta_m + \delta_e)}{\sqrt{\cos\delta_m \cos\delta_e}} \quad 2.18$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_r' \mu_r'} \frac{\cos\frac{1}{2}(\delta_m + \delta_e)}{\sqrt{\cos\delta_m \cos\delta_e}} \quad 2.19$$

Burada ε_r' ve μ_r' malzemenin bağıl elektrik ve manyetik geçirgenliğinin gerçekte bileşenlerini tanımlamaktadır. δ_e ve δ_m malzemenin dielektrik ve manyetik kayıp açılarını ifade etmektedir:

$$\delta_e = \tan^{-1}\left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}\right) \quad 2.20$$

$$\delta_m = \tan^{-1}\left(\frac{\mu_r''}{\mu_r'}\right) \quad 2.21$$

2.18 ve 2.19 2.17'de yerine konulduğunda, 2.17'deki eşitliği sağlayacak genel çözüm aşağıdaki iki gerçekte eşitliğe indirgenecektir [21]:

$$\frac{\mu_r}{\varepsilon_r} = \frac{\cos(\delta_m) \cosh(\theta s) + \cos(\theta s)}{\cos\delta_e \cosh(\theta s) - \cos(\theta s)} \quad 2.22$$

$$\sin\theta = r \sinh(\theta s) \quad 2.23$$

Burada $\theta = 2\beta d$, $s = \tan\left(\frac{1}{2}(\delta_m + \delta_e)\right)$ ve $r = \tan\left(\frac{1}{2}(\delta_m - \delta_e)\right)$ olarak tanımlanmaktadır.

Görüldüğü üzere minimum yansıtıcılık kayıplı bir malzemenin ε_r' , ε_r'' , μ_r' , μ_r'' ve d_2 değerlerinin hepsine bağlıdır ve bu değerler kullanılarak 2.22 ve 2.23 eşitliklerini

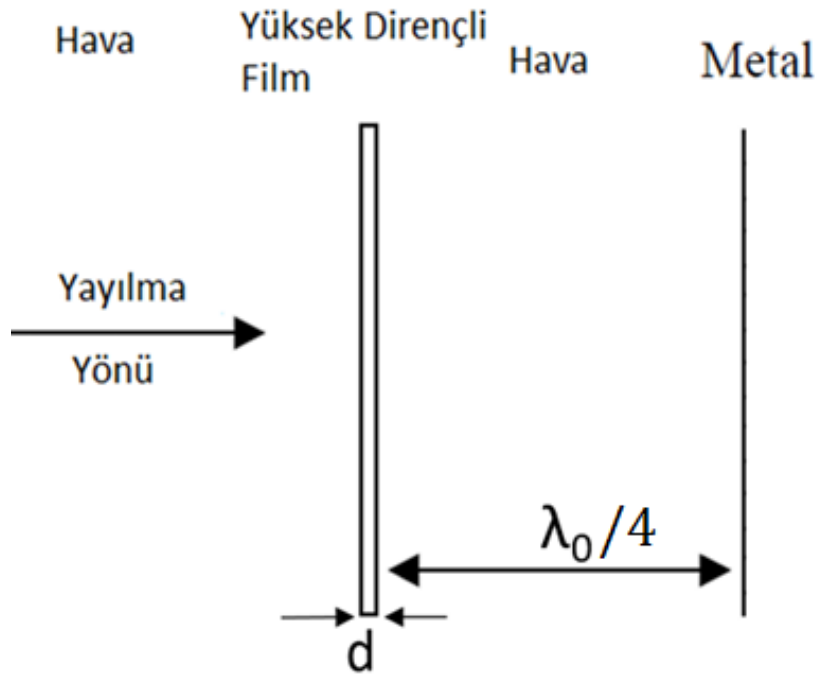
sağlayan minimum yansıtıcılığa sahip tek katmanlı Dallenbach tabakası çözümlenmeli olarak tasarlanabilmektedir [21].

Fakat Dallenbach tabakasına yönelik eniyileme çalışmaları [23] göstermiştir ki, tek katmanlı Dallenbach tabakası kullanılarak geniş bantlı soğurucu yapıların tasarlanması mümkün olmamaktadır.

Çok katmanlı Dallenbach tabakalarının tasarımlarına yönelik çeşitli eniyileme algoritmaları ve/veya tam-dalga elektromanyetik benzetim yazılımları kullanılabilir [18]. Tez kapsamındaki çalışmalarda ANSYS HFSS® yazılımında yer alan parametrik analiz ve eniyileme araçları kullanılmıştır.

2.2.4. Salisbury Tabakası

Salisbury Tabakası [24] soğurucu kayıplı malzemenin elektrik geçirgenliğinin ve manyetik geçirgenliğinin soğuruculukta kullanılması prensibine dayanmamaktadır. Salisbury katmanı metal yüzeyden çeyrek dalga boyunun tek katları mesafede yerleştirilen dirençli ince filmlerin kullanılmasından oluşur. Dirençli film ve metal yüzey arasını genellikle hava doldurmakta fakat bant genişliğinden feragat etmek koşuluyla hava katmanının yerini yüksek elektrik geçirgenliğine sahip bir dielektrik malzeme de kullanılarak katman kalınlığı azaltılabilmektedir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Salisbury tabakası

Salisbury tabakasının soğuruculuğu üç temel kaideye dayanmaktadır:

- Yüksek dirençli filmin yüzey direnci havanın öz empedansına ($\approx 377\Omega$) eşit olacak şekilde seçilerek Salisbury filminden yansımanın minimuma indirilmesi
- Yüksek dirençli film metal yüzeyde çeyrek dalga boyu (veya tek katları) mesafeye yerleştirilerek dirençli filmde yansıyan dalga ile metal yüzeyden yansıyan dalga arasında 180° faz farkı oluşturularak, dirençli filmde yansıyan ve metal yüzeyden yansıyan dalganın birbirini söndürmesi
- Salisbury filmi elektriksel olarak çok ince seçilerek iletken bir yüzey gibi yansıtıcılığa sahip olmaması ve yüksek dirençli seçilerek gelen dalganın film yüzeyinden söndürülmesi amaçlanmaktadır.

Dirençli filmin yüzey direncinin havanın öz empedansına eşit olabilmesi için film kalınlığı

$$d = \frac{1}{Z_0 \sigma} \quad 2.24$$

olacak şekilde seçilmelidir [1].

Salisbury katmanının bant genişliğinin artırılması amacıyla, minimum yansıtıcılık yerine kabul edilebilir en yüksek yansıma katsayısına göre en uygun film yüzey direnci,

$$R_{s,en\ uygun} = Z_0 \frac{1-\Gamma_{maks}}{1+\Gamma_{maks}} \quad 2.25$$

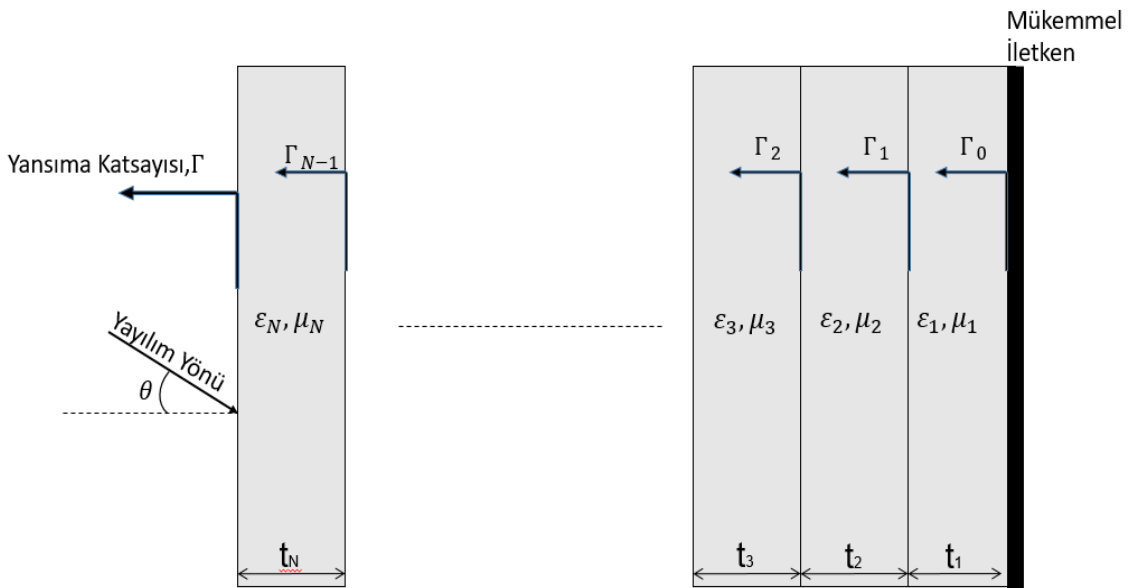
olacak şekilde kullanılabilir. Burada Γ_{maks} kabul edilebilir en yüksek yansıma katsayısını tanımlamaktadır.

Birden fazla Salisbury katmanının kullanıldığı soğurucu yapılar Jaumann tabakası [8] olarak da adlandırılmaktadır. Çok katmanlı Dallenbach tabakasında olduğu gibi, Jaumann tabakalarının tasarımında çeşitli eniyileme algoritmaları veya tam-dalga elektromanyetik benzetim yazılımları kullanılabilir [25,26]. Tez kapsamındaki

çalışmalarda ANSYS HFSS® yazılımında yer alan parametrik analiz ve eniyileme araçları kullanılmıştır.

2.3. Özyinelemeli Yansıtıcılık Bağıntısı

Çok katmanlı soğurucu yapıların yansıma katsayısının hesaplanabilmesi için öncelikle matematiksel modelinin oluşturulması gerekmektedir. Matematiksel modelin oluşturulurken göz önünde bulundurulması gereken nokta, iki katmanın ara yüzündeki yansıma katsayısının dalganın geldiği yöne göre bir önceki ara yüzde yansımadan yoluna devam eden dalgaya bağlı olmasıdır. Bu da matematiksel modelde kullanılacak bağıntının özyinelemeli olmasını gerektirmektedir.



Şekil 2.9. Çok katmanlı soğurucu yapının yansıtıcılığı

Hava-soğurucu katman ara yüzündeki (Şekil 2.9) yansıma katsayısının hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılabilir [27]:

$$\Gamma_n = \frac{\tilde{\Gamma}_n + \Gamma_{n-1} e^{-2j k_{n-1} t_{n-1}}}{1 + \tilde{\Gamma}_n \Gamma_{n-1} e^{-2j k_{n-1} t_{n-1}}} \quad n > 0 \text{ için} \quad 2.26$$

Burada:

Γ_n : n'inci ara yüzdeki toplam yansıma katsayısı

n : katman dizini

k_n : n'inci katmanın yayılım vektörünün ara yüze dik bileşeni,

$$k_n = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_n \mu_n - \sin^2 \theta_n} \quad 2.27$$

θ_n : n'inci ara yüzdeki dalga geliş açısı,

ε_n, μ_n : n'inci katmanın elektrik ve manyetik geçirgenliğidir.

$\tilde{\Gamma}_n$ n'inci ara yüzden kaynaklanan yansıma katsayısını ifade etmektedir ve kendinden önceki ara yüzlerden yansıyan dalganın hesaba katılmadığı durumu temsil etmektedir. $\tilde{\Gamma}_n$ dalganın kutuplanmasına bağlıdır ve TE ve TM-kutuplanmış düzlem dalga için

$$\tilde{\Gamma}_n^{TE} = \frac{\mu_{n-1} k_n - \mu_n k_{n-1}}{\mu_{n-1} k_n + \mu_n k_{n-1}} \quad 2.28$$

$$\tilde{\Gamma}_n^{TM} = \frac{\varepsilon_{n-1} k_n - \varepsilon_n k_{n-1}}{\varepsilon_{n-1} k_n + \varepsilon_n k_{n-1}} \quad 2.29$$

olarak tanımlanmıştır.

Yukarıda bahsi geçen bağıntı eniyileme yöntemleri ile çok katmanlı soğurucu yapı tasarım çalışmalarında en çok başvurulan bağıntıların başında gelmektedir [27]. Çok katmanlı soğurucu yapıların tasarımı gerçekleştirilirken, yapılar sonsuz kabul edilerek bağıntı yardımı ile yansıtıcılık hesaplamaları gerçekleştirilebilmektedir. Yansıtıcılığın hesaplanabilmesi, bu veya benzeri bir özyinelemeli bağıntı tanımlanmaya ihtiyaç duyulmadan, soğurucu yapı etrafında, yüzeyinde ve içerisinde Maxwell denklemleri ve dalga denklemlerinin çözümüyle birlikte analiz sonrası işlemlerle hesaplanabilmektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), Moment Metodu (MOM), Sonlu Farklar Yöntemleri gibi yöntemleri kullanan bilgisayar tabanlı özelleşmiş yazılımlar ile eniyileme araçlarıyla birlikte kullanılarak da radar soğurucu yapıların tasarım ve eniyilemesi yapılabilmektedir. Bu bağlamda tez kapsamında ANSYS HFSS® yazılımının FEM çözücüsünün kullanımı tercih edilmiştir.

2.4. Yüksek Elektrik ve Manyetik Kayıplı Malzemeler

Malzeme bilimine yönelik çalışmaların artması ve malzeme teknolojilerin gelişmesiyle birlikte yukarıda bahsi geçen temel radar soğurucu yapıların

tasarımında kullanılan malzemelerin üretilmesi ve platformlara uygulanabilmesi mümkün olmaktadır. Temel olarak malzemelerin elektrik ve manyetik kayıp tanjantlarını arttırmak amaçlanmaktadır.

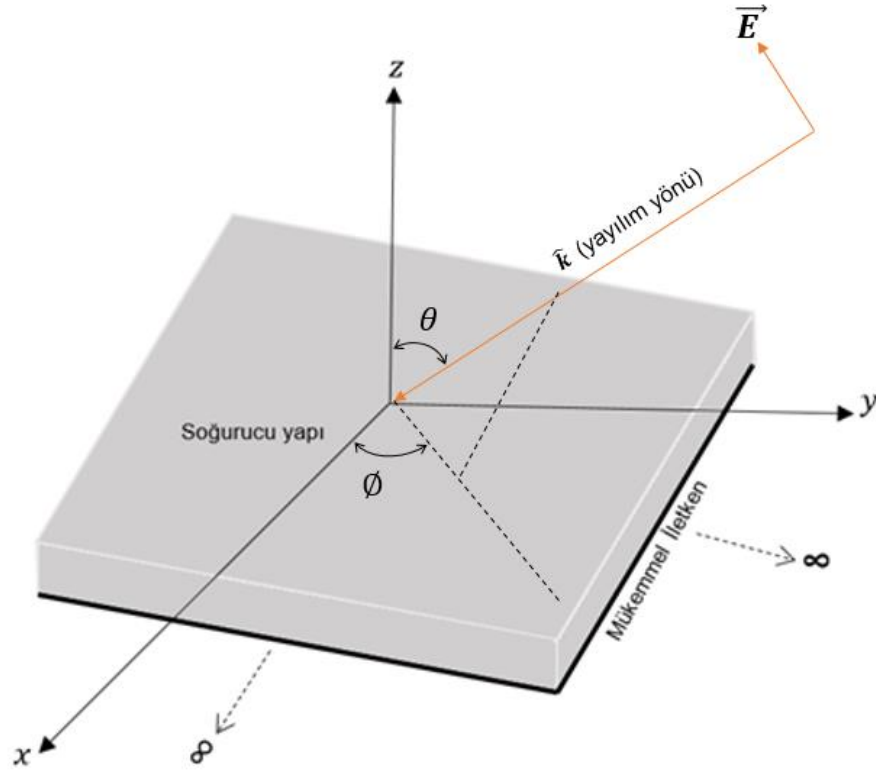
Karbon [28,29], metal ve metal parçacıkları içeren birleşik malzemeler [30,31], iletken polimerler [32,33], polipirol ve birleşikleri [34], polianilin ve birleşikleri [35], ferritler [36,37] radar soğurucu yapıların tasarımında sıklıkla kullanılan malzemelerin başında gelmektedir.

3. TEMEL RADAR SOĞURUCU YAPILARIN BENZETİMİ

Bu bölümde radar soğurucu yapıların tasarımında kullanılan, uyumlaştırma katmanı, Dallenbach tabakası, Salisbury katmanı gibi yapıların bilgisayar destekli benzetim sonuçlarına yer verilmiştir. Benzetimlerde ANSYS HFSS® (High Frequency Simulation Structure) yazılımının sonlu elemanlar yöntemi (FEM) çözücüsü kullanılmıştır. Bu benzetimlerle temel radar soğurucu yapı analizlerinde kullanılan yöntemin teori ile tutarlılığının gözlemlenmesi ve alınan sonuçlardan radar soğurucu tasarımında yararlanılması amaçlanmıştır.

3.1. Modelleme

Temel radar soğurucu yapıların yansıtıcılık davranışlarının incelenmesi amacıyla farklı geliş açlarına sahip paralel ve dik-kutuplanmış düzlem dalganın soğurucu yapıdan geri yansıma oranı hesaplanmıştır. Soğurucu yapının yatay eksenlerde sonsuza uzandığı ve periyodik ve homojen bir yapıya sahip olduğu varsayılmıştır (Şekil 3.1). Periyodik yapıya sahip soğurucu dizisi analizleri ise kendini tekrarlayan en küçük biriminin analizi periyodik sınır koşulları ve düzlem dalga uyarımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış genel radar soğurucu yapı geometrisi

3.1.1. Geometri Oluşturma

ANSYS HFSS® içerisinde katı CAD geometrilerinin modele aktarımına olanak sağlayan yazılımlar bulunmakla beraber, ara yzünde bulunan modelleme araçları kullanılarak geometri oluşturulabilmektedir. Geometrinin boyutları, konum, koordinat sistemine göre dönme açısı, malzeme özellikleri gibi matematiksel olarak ifade edilebilen değerler değişken olarak tanımlanabilmektedir. Karmaşık geometriye sahip geometrilerin oluşturulmasında denklem tabanlı eğri, yzey ve hacim geometrileri oluşturulabilmektedir. Tez kapsamındaki oluşturulan geometriler ANSYS HFSS® içerisinde bulunan modelleme araçları kullanılarak oluşturulmuştur.

3.1.2. Malzeme Atama

HFSS® kütüphanesinde hazır bulunan malzemeler yapılaraya atanabilmekle beraber, özelliklerini kullanıcının tanımladığı malzemelerin kütüphaneye eklenmesi mümkündür.

Tam-dalga elektromanyetik analizlerde tanımlanabilen elektriksel özellikler aşağıdadır:

- Bağıl elektrik geçirgenliği - gerçek bileşeni ϵ_r' ve dielektrik kayıp tanjantı ϵ_r''/ϵ_r' , burada ϵ_r'' bağıl elektrik geçirgenliğinin sanal bileşenini temsil etmektedir.
- Bağıl manyetik geçirgenlik - gerçek bileşeni μ_r' ve manyetik kayıp tanjantı μ_r''/μ_r' , burada μ_r'' manyetik geçirgenliğinin sanal bileşenini temsil etmektedir.
- Kitle iletkenliği - σ (Siemens/metre)

Yukarıdaki elektriksel özellikler, frekans-bağımlı, ynbağımsız ve yönbağımlı olarak tanımlanabilmektedir.

3.1.3. Benzetimlerde Kullanılan Sınır Koşulları

ANSYS HFSS® içerisinde farklı elektriksel koşulları temsil etmek üzere birçok sınırı koşulu tanımlamak mümkündür. Tez kapsamında gerçekleştirilen benzetimlerde kullanılan sınır koşulları aşağıdadır:

- Mkemmell iletken Sınır Koşulu - Elektrik alanın teğet bileşeninin sıfır olduğu, diğer bir ifadeyle elektrik alanın yzeye dik olarak geldiği durumu temsil

etmektedir. Genellikle mükemmel iletken yüzeylerin tanımlanmasında kullanılır.

- Katmanlı Empedans Sınır Koşulu - Bir veya birden çok ardışık çok ince katmanın modellenmesinin gerektiği durumlarda her katmanın inceliği, yüzey pürüzlülüğü ve elektriksel özellikleri tek bir sınır koşulu ile tanımlanabilmektedir. Katman inceliklerinin geometrinin boyutlarına kıyasla çok küçük olduğu durumlarda kullanılır.
- Soğurucu Işıma Sınır Koşulu – Yapıdan kaynaklanmayan ve/veya fiziksel olmayan elektromanyetik dalga yansımalarının benzetime dâhil edilmemesi için kullanılır. Böylelikle modelin boş uzaydaymış gibi analiz edilebilmesi sağlanabilmektedir.
- Ana/Aday Sınır Koşulu – Sonsuz periyodik yapıların modellenmesinde, alan denklemlerinin sadece kendini tekrarlayan en küçük birim hücresi için çözülmesi ve bu çözümün kullanılarak ardışık birim hücrelerindeki alan çözümünün çözümlenmeli olarak hesaplanması yöntemini kullanır. Bu sınır koşulu “Aday” sınır yüzeyindeki elektrik alanının “Ana” sınır yüzeyindeki elektrik alan ile belli bir faz farkıyla özdeş olması sağlanması ilkesine dayanır.

3.1.4. Benzetimlerde Kullanılan Uyarmalar

ANSYS HFSS® içerisinde farklı elektriksel şartları temsil etmek üzere birçok uyarma tanımlamak mümkündür. Tez kapsamında gerçekleştirilen benzetimlerde kullanılan uyarmalar aşağıdadır:

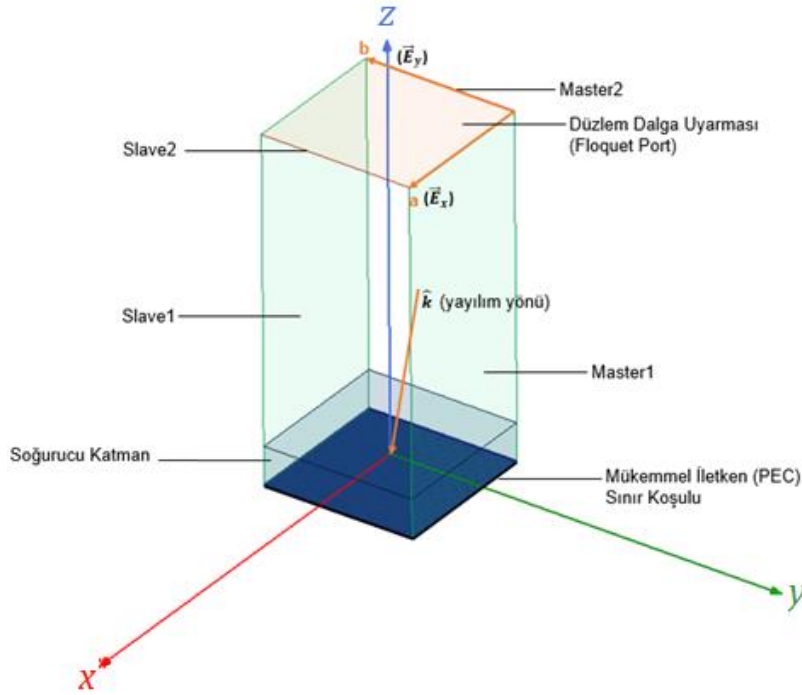
- Floquet Uyarması - Periyodik yapıların düzlem dalga ile uyarılması gerektiği durumlarda kullanılır. Tek birim hücre için alan denklemleri çözülürken tüm yapı düzlem dalga ile uyarılıyormuş gibi modellenir.
- Düzlem Dalga Uyarması - Özellikle radar kesit alanı gibi saçılma problemlerinin çözülmesinde, farklı açı, genlik ve kutuplanmaya sahip düzlem elektromanyetik dalga uyarmasıdır.

3.1.5. Analiz Modeli

Soğurucu katmanın yatay ekseninde sonsuz büyüklüğe sahip olduğu varsayıldığından, tez kapsamında analizi gerçekleştirilen soğurucu katman(lar)

İlgilenilen frekanstaki dalga boyunun yarısı kadar ($\lambda_0/2$) en ve genişliğe sahip bir kısmı birim hücre olarak ele alınmıştır. Periyodik yapıların analizinde ise kendini tekrarlayan en küçük eleman birim hücre olarak seçilmiştir. Birim hücreyi çevreleyen çözüm alanının yan yüzeylerine periyodik sınır koşulları uygulanarak soğurucu katmanın sonsuz bir plaka gibi modellenmesi sağlanmıştır (Şekil 3.2).

Birim hücreye uygulanan Floquet uyarması periyodik sınır koşullarıyla birlikte kullanılarak tüm soğurucu yapı ve yapıya farklı açılarla gelen düzlem dalga olarak modellenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Radar soğurucu yapılar için genel HFSS® Modeli

Floquet uyarmasında, sadece \vec{E}_x bileşeni bulunduğu paralel-kutuplanmış düzlem dalga uyarmasını, sadece \vec{E}_y bileşeni bulunduğu dik-kutuplanmış düzlem dalga uyarmasını temsil etmektedir. Böylelikle periyodik sınır koşulları tanımlarken gelen dalganın kutuplanması, geliş açısı ve genliği tanımlanabilmektedir. Tez kapsamında analizi gerçekleştirilen yapılar x ve y eksenlerinde simetrik yapıya sahip olduğundan, dik gelen düzlem dalga uyarmalarında sadece \vec{E}_x bileşeni kullanılmıştır. Eğik gelen dalga analizlerinde her iki bileşen için de yansıma katsayısı hesaplanabilmektedir.

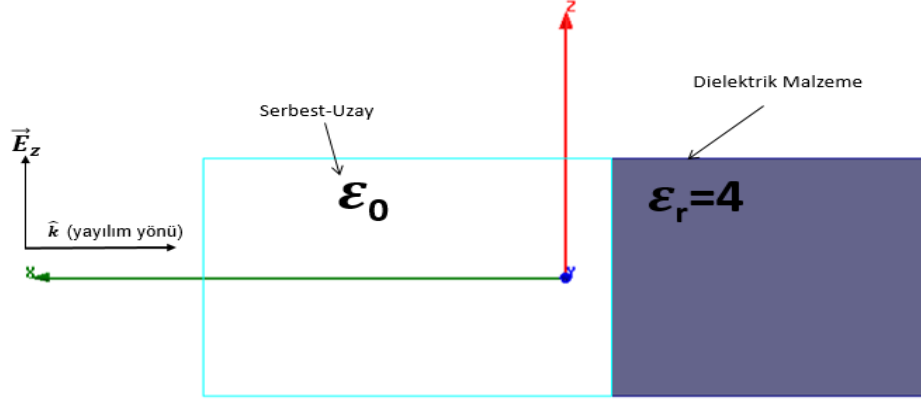
3.1.6. Eniyileme ve Parametrik Analiz

ANSYS HFSS® yazılımı içerisinde eniyileme analizlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiş araçları içeren “Optimetrics” yazılımı bulunmaktadır. Optimetrics yazılımında yere alan analiz araçları aşağıdadır:

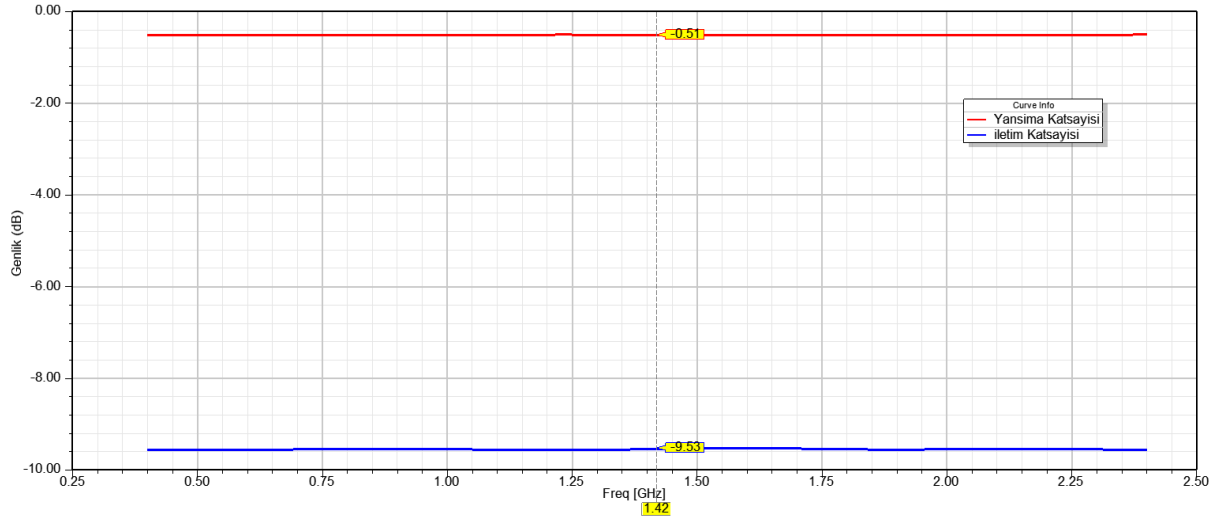
- Parametrik: Modelde tanımlanan değişkenlerin belirlenen aralıkta analizi için kullanılır.
- Eniyileme: Modelde tanımlanan bir değişkenin belirlenen ölçüte göre en uygun değerinin hesaplanmasında kullanılır. ANSYS HFSS® yazılımda yer alan eniyileme yöntemleri aşağıda listelenmiştir:
 - Ardışık Doğrusal-Olmayan Programlama
 - Ardışık Doğrusal-Olmayan Karma-Tamsayı Programlama
 - Newton Algoritması
 - Örüntü Tarama
 - Genetik Algoritma
- Hassasiyet: Belirlenen ölçütün tanımlanan değişkene göre hassasiyetinin hesaplanmasında kullanılır.
- Ayarlama: Modelin belirlenen değişkenler ve/veya türevleri cinsinden analizinde kullanılır. Böylelikle analiz sonrasında değişkenlerin analiz sonucuna etkisi ek analizler gerektirmeden incelenebilmektedir.

3.2. Uyumlaştırma Katmanı Analizi

Boş uzay-dielektrik ara yüzünün dik gelme açısı için yansıma ve iletim katsayısı HFSS® kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 3.3). Merkez frekansı 1.42 GHz olarak seçilmiştir. Dielektrik malzeme olarak bağıl elektrik geçirgenliği $\epsilon_r = 4$ olan ve manyetik özelliğe sahip olmayan ($\mu_r = 1$) jenerik bir malzeme kullanılmıştır. Boş uzay-dielektrik ara yüzündeki öz empedans farklılığından kaynaklanan yansıma ve iletim katsayıları Şekil 3.4’te görülmektedir.



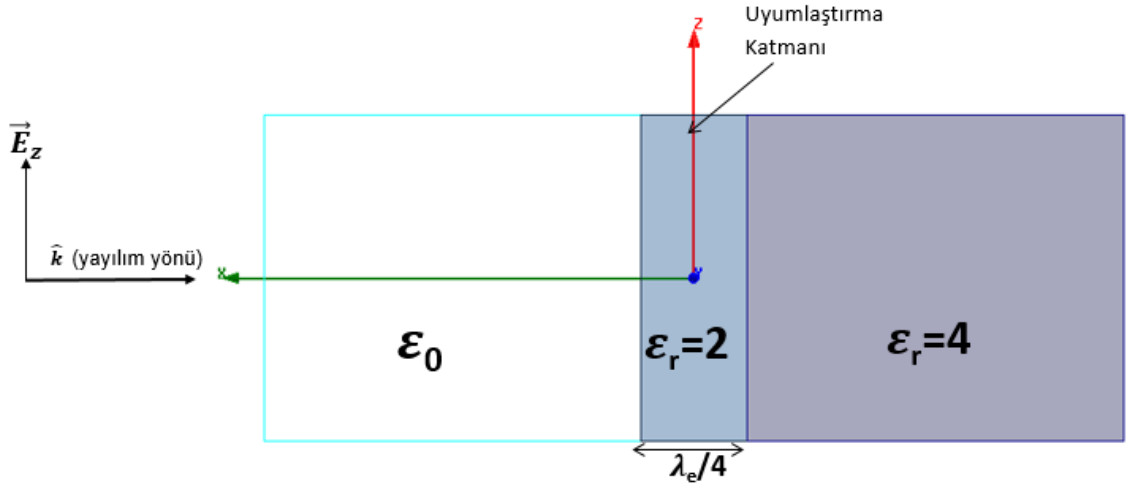
Şekil 3.3. Boş uzay-dielektrik ara yüzü



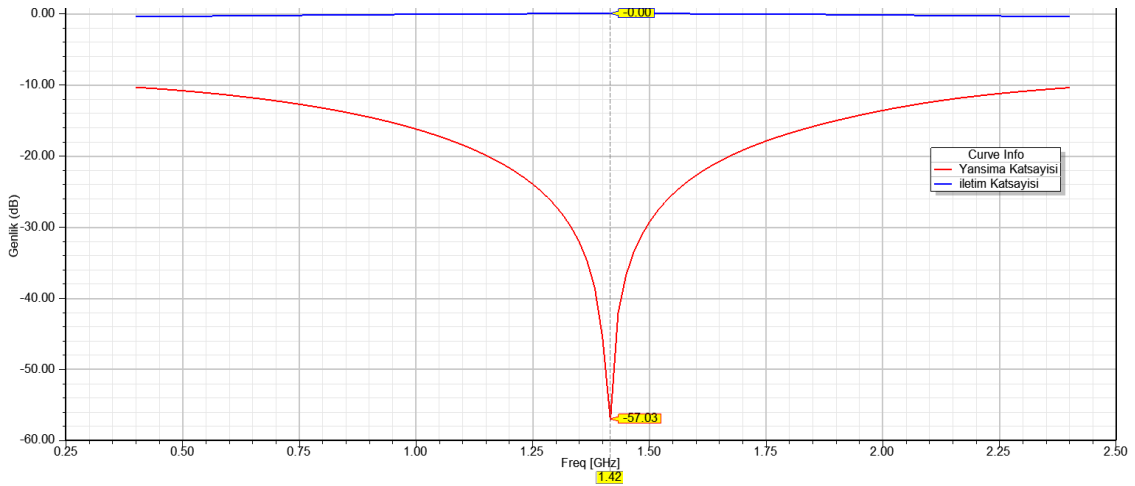
Şekil 3.4. Boş uzay-dielektrik ara yüzünün dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansima ve iletim katsayısı

Boş uzay ve dielektrik arasında uyumlaştırma katmanı olarak bağıl elektrik geçirgenliği $\epsilon_r = 2$ olan ve manyetik özelliğe sahip olmayan ($\mu_r = 1$) jenerik bir dielektrik malzeme kullanılmıştır (Şekil 3.5). Uyumlaştırma katmanının kalınlığı ise 1.42 GHz'teki dalga boyunun dörtte biri ($\lambda_e/4 = 3.75$ cm) olarak seçilmiştir.

Uyumlaştırma katmanının kullanıldığı durumda, 1.42 GHz'teki yansima katsayısının -60 dB'ye kadar düştüğü ve iletim katsayısının 0 dB'ye yaklaştığı görülmüştür (Şekil 3.6).

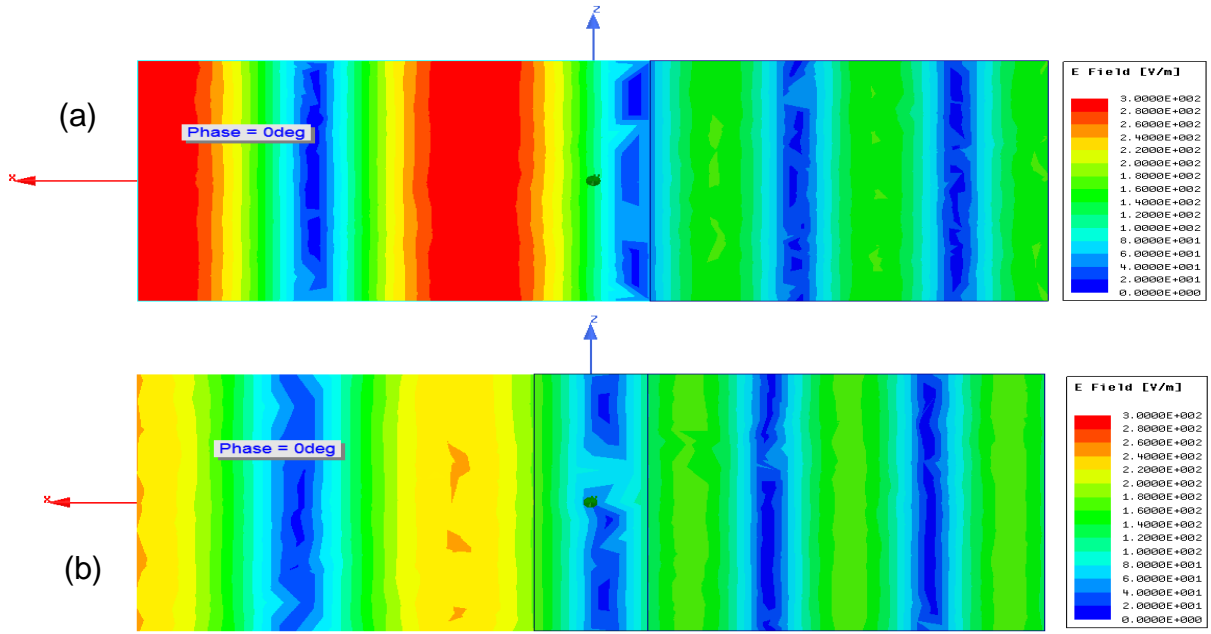


Şekil 3.5. Uyumlaştırma katmanı geometrisi (λ_e : Uyumlaştırma katmanı için kullanılan malzemede 1.42 GHz'teki dalga boyu)



Şekil 3.6. Boş uzay-dielektrik malzeme ara yüzünde uyumlaştırma katmanı kullanıldığı durumda dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya ve iletim katsayısı

Uyumlaştırma katmanının kullanılmadığı ve kullanıldığı durumda elektrik alan dağılımları (Şekil 3.7) kıyaslandığında, aynı faz açısı için dielektrik katmanın önündeki elektrik alan şiddetinin uyumlaştırma katmanının kullanılmadığı durumda daha yüksek olduğu ve uyumlaştırma katmanının yansımaları eleyerek dalganın yoluna dielektrik katman içerisinden devam etmesini sağladığı görülmüştür.



Şekil 3.7. Boş uzay-dielektrik ara yüzünde uyumlaştırma katmanı kullanılmadığı (a) ve kullanıldığı (b) durumdaki dik gelen düzlem dalga için xz-düzlemindeki elektrik alan dağılımları

3.3. Dallenbach Tabakası Analizleri

Bu bölümde Çizelge 3.1’de elektriksel özellikleri bulunan 3 farklı dielektrik malzeme kullanılarak 1, 2 ve 3 katmanlı Dallenbach tabakasının eniyileme analizleri gerçekleştirilmiştir. 1 GHz’teki yansımaya katsayısının minimum olması hedeflenmiştir.

Eniyileme çalışmaları sonucunda elde edilen 1, 2 ve 3 katmanlı Dallenbach tabakaları $4\lambda \times 4\lambda \times 4\lambda$ boyutlarında mükemmel iletken bir küp geometrisinin bir yüzeyine uygulanarak radar kesit alanı (RKA) analizi gerçekleştirilmiştir. Soğurucu katman ile kaplı ve kaplı olmayan yüzeylere tekabül eden RKA değerleri arasındaki fark ile Dallenbach tabakalarının yansıtıcılık katsayıları kıyaslanmıştır.

Çizelge 3.1. Dallenbach tabakası analizleri için kullanılan dielektrik malzemelerin elektriksel özellikleri

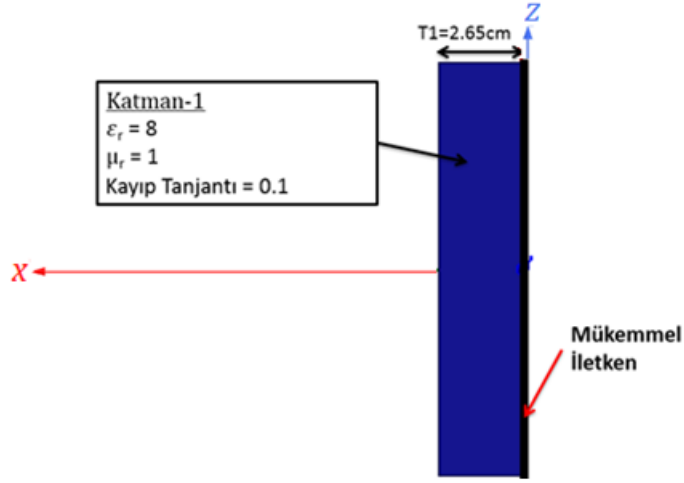
| | Bağıl Elektrik Geçirgenliği (ϵ_r') | Bağıl Manyetik Geçirgenlik (μ_r') | Dielektrik Kayıp Tanjantı (ϵ_r''/ϵ_r') | Manyetik Kayıp Tanjantı (μ_r''/μ_r') |
|----------|--|--|---|---|
| Katman 1 | 8 | 1 | 0.1 | 0 |
| Katman 2 | 4 | 1 | 0.1 | 0 |
| Katman 3 | 2 | 1 | 0.1 | 0 |

3.3.1. Eniyileme Çalışmaları

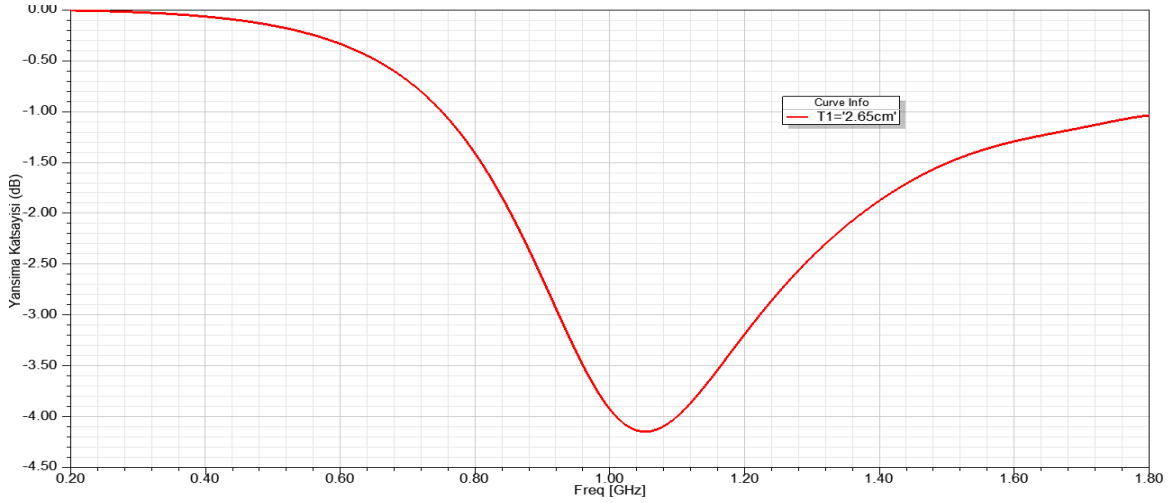
Katman kalınlıklarının yansıma katsayısına etkisini incelemek amacıyla parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrik analiz sonuçları değerlendirilerek 1 GHz'teki yansıma katsayısının minimum olduğu katman kalınlıkları belirlenmiştir. Dik gelen düzlem dalga ile uyarılan Dallenbach tabakası için minimum yansıma katsayısının belirlendiği katman kalınlığı için, 0-60° gelme açısının dik ve paralel-kutuplanmış düzlem dalganın yansıma katsayısına etkisi incelenmiştir. Katman 1, Katman 2 ve Katman 3 malzemelerinin başlangıç kalınlıkları dielektrik içerisinde 1 GHz'teki dalga boylarının dörtte biri ($\lambda_0/4$) (sırasıyla 2.65 cm, 3.75 cm ve 5.3 cm) olarak seçilmiştir.

3.3.1.1. Tek Katmanlı Dallenbach Tabakası

Tek katmanlı Dallenbach tabakasının (Şekil 3.8) parametrik analizi gerçekleştirildiğinde dik gelme açısı için minimum yansıtıcılığın 1 GHz'in hemen üstünde bir frekansta olduğu görülmüştür (Şekil 3.9).

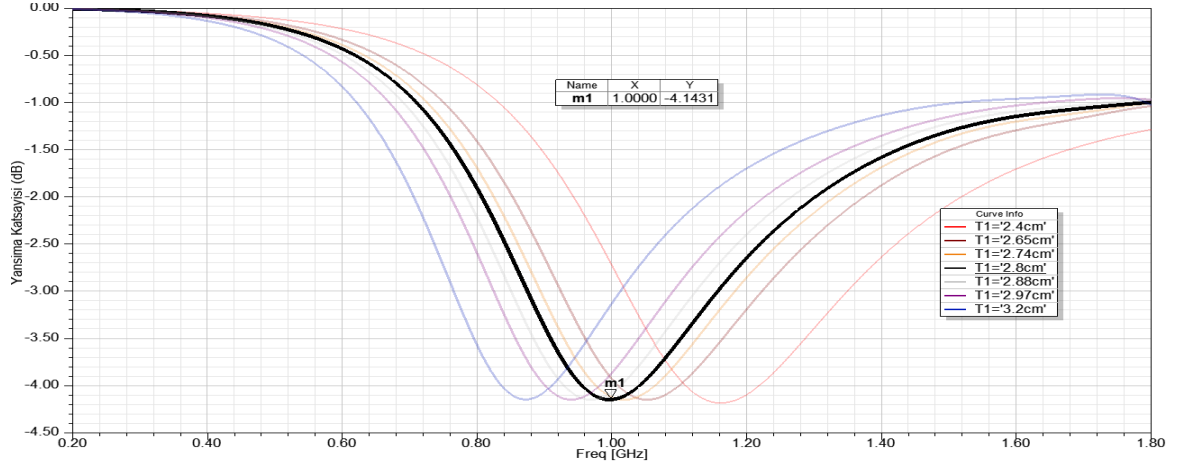


Şekil 3.8. Tek katmanlı Dallenbach tabakası geometrisi



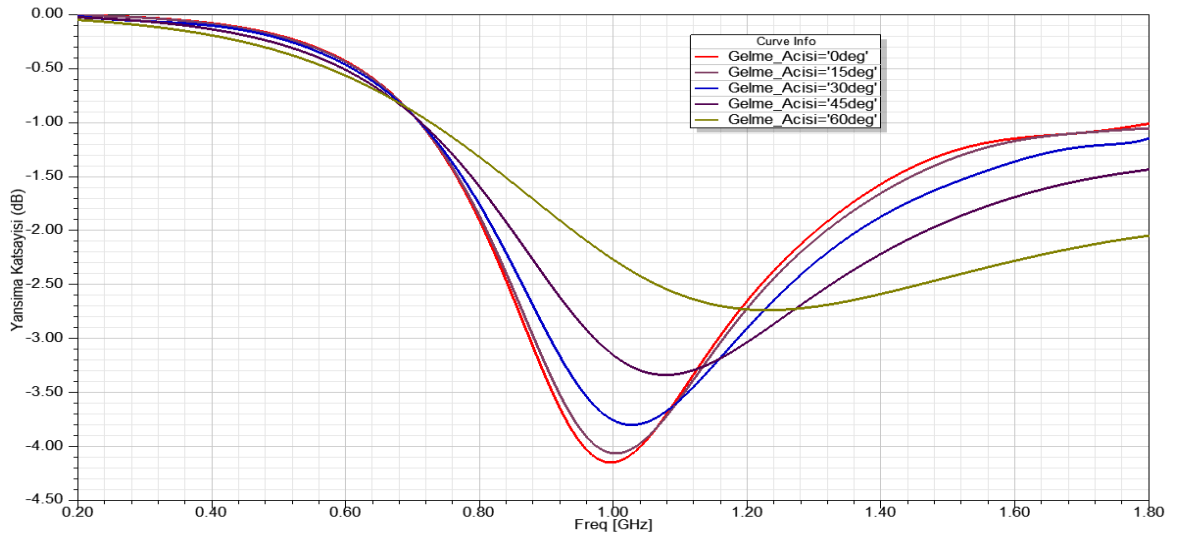
Şekil 3.9. Tek katmanlı Dallenbach tabakasının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı

1 GHz'teki yansımaya katsayısının minimuma indirilebilmesi için gerekli katman kalınlığının tespit edilebilmesi için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrik analiz sonucunda, dik gelme açısı için en iyi katman kalınlığının 2.8 cm olduğu ve yansımaya katsayısının -4.1 dB olduğu görülmüştür (Şekil 3.10). Bu katman kalınlığı iki katmanlı Dallenbach katmanı analizleri için başlangıç malzeme kalınlığı olarak seçilmiştir.

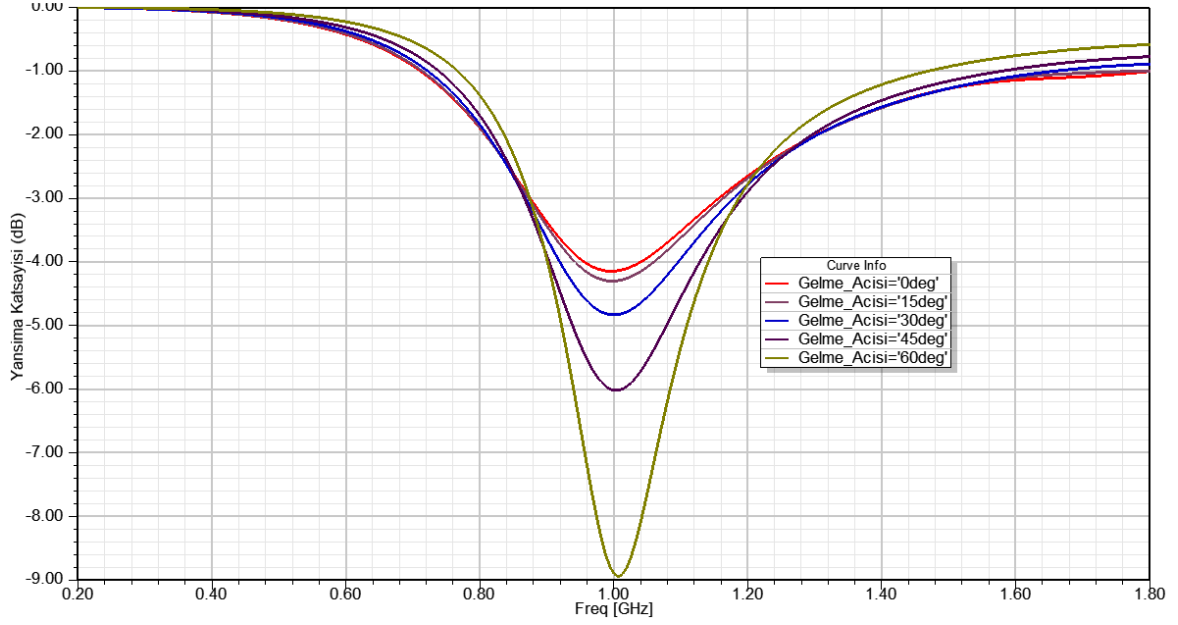


Şekil 3.10. Tek katmanlı Dallenbach tabakasının farklı katman kalınlıklarına göre (T_1) dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansima katsayısı grafiği

Dik ve paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış tek katmanlı Dallenbach tabakasının farklı gelme açıları için yansima katsayısı analiz edilmiştir. Parametrik analiz sonuçları değerlendirildiğinde, paralel kutuplanmış düzlem dalganın geliş açısı arttıkça, rezonans frekansının ve bu frekanstaki bant genişliğinin artması ile beraber rezonans frekansındaki yansima katsayısının da arttığı görülmüştür (Şekil 3.11). Dik-kutuplanmış düzlem dalganın geliş açısı arttıkça, rezonans frekansının değişmediği, bununla beraber rezonans frekansındaki yansima katsayısının düştüğü görülmüştür (Şekil 3.12).



Şekil 3.11. Tek katmanlı Dallenbach tabakasının paralel-kutuplanmış düzlem dalganın farklı gelme açılarında frekansa göre yansima katsayısı grafiği

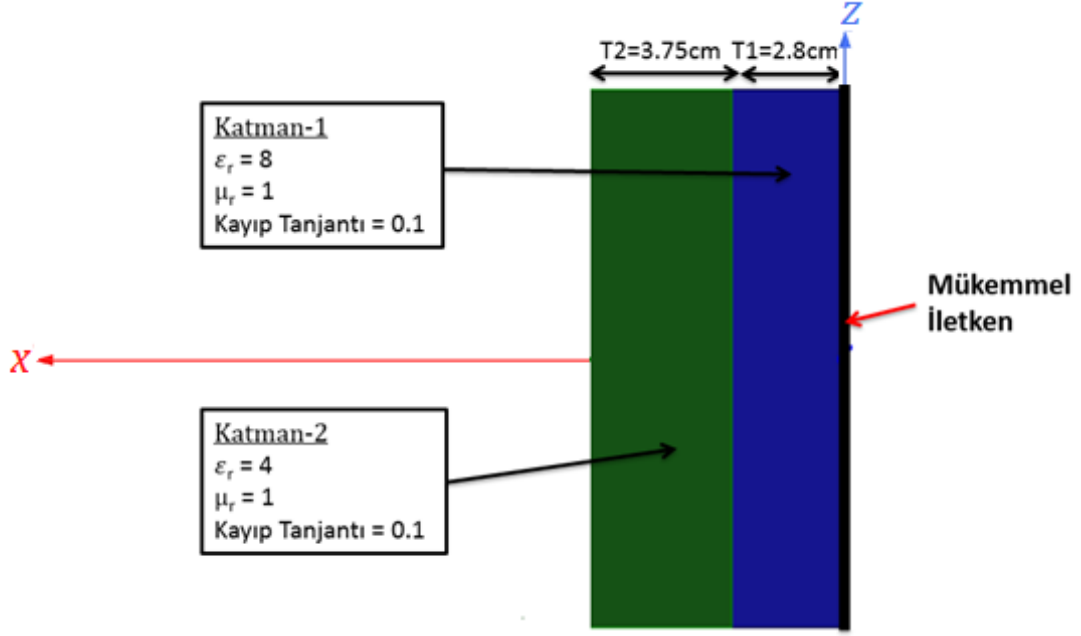


Şekil 3.12. Tek katmanlı Dallenbach tabakasının dik-kutuplanmış düzlem dalganın farklı gelme açılarında frekansa göre yansımaya katsayısı grafiği

3.3.1.2. İki Katmanlı Dallenbach Tabakası

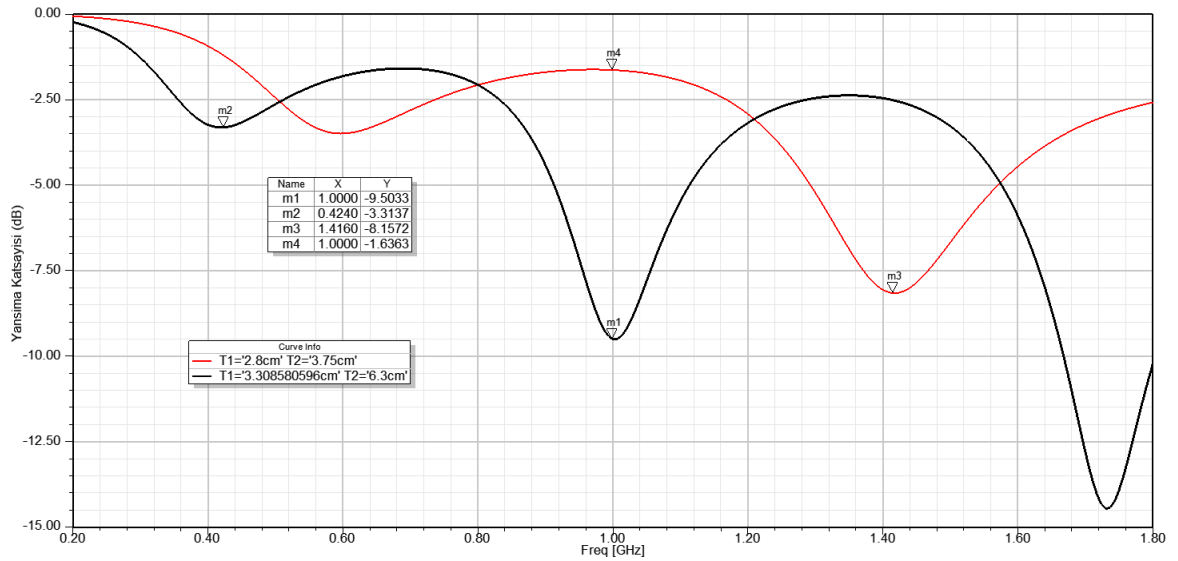
3.3.1.1.de elde edilen nihai katman kalınlığı (2.8 cm) Katman 1 için başlangıç kalınlığı olarak seçilmiştir. “Katman 2” başlangıç kalınlığı ise 3.75 cm olarak seçildiğinde (Şekil 3.13) başlangıç kalınlıkları için 1 GHz’te -1.64 dB yansımaya katsayısı gözlemlenmiştir. Yerel minimum yansımaya katsayısının görüldüğü frekanslar 0.42 GHz ve 1.43 GHz olup, bu frekanslardaki yansımaya katsayılarının sırasıyla -3.13 dB ve -8.16 dB olduğu görülmüştür (Şekil 3.14).

1 GHz’teki yansımaya katsayısının minimuma indirilebilmesi için gerekli katman kalınlığının tespit edilebilmesi amacıyla parametrik analizler yerine ANSYS® HFSS’in eniyileme aracı olan “Optimetrics” yazılımı kullanılmıştır. Eniyileme metodu olarak Newton Algoritması seçilmiştir.



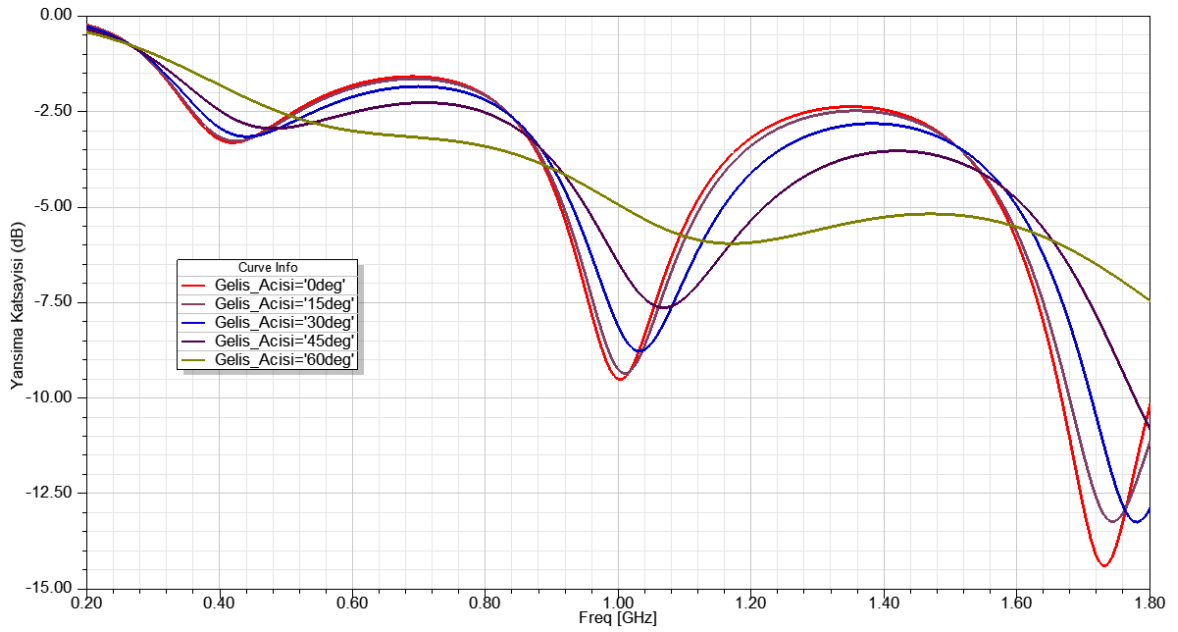
Şekil 3.13. İki katmanlı Dallenbach tabakası geometrisi

Eniyileme analizi sonucunda dik gelme açısı için “Katman 1” ve “Katman 2”nin en uygun katman kalınlıklarının sırasıyla 3.3 cm ve 6.3 cm olduğu ve 1 GHz’teki yansıma katsayısının -9.50 dB olduğu görülmüştür (Şekil 3.14). Bu katman kalınlıkları 3 katmanlı Dallenbach katmanı analizleri için başlangıç katman kalınlıkları olarak seçilmiştir.

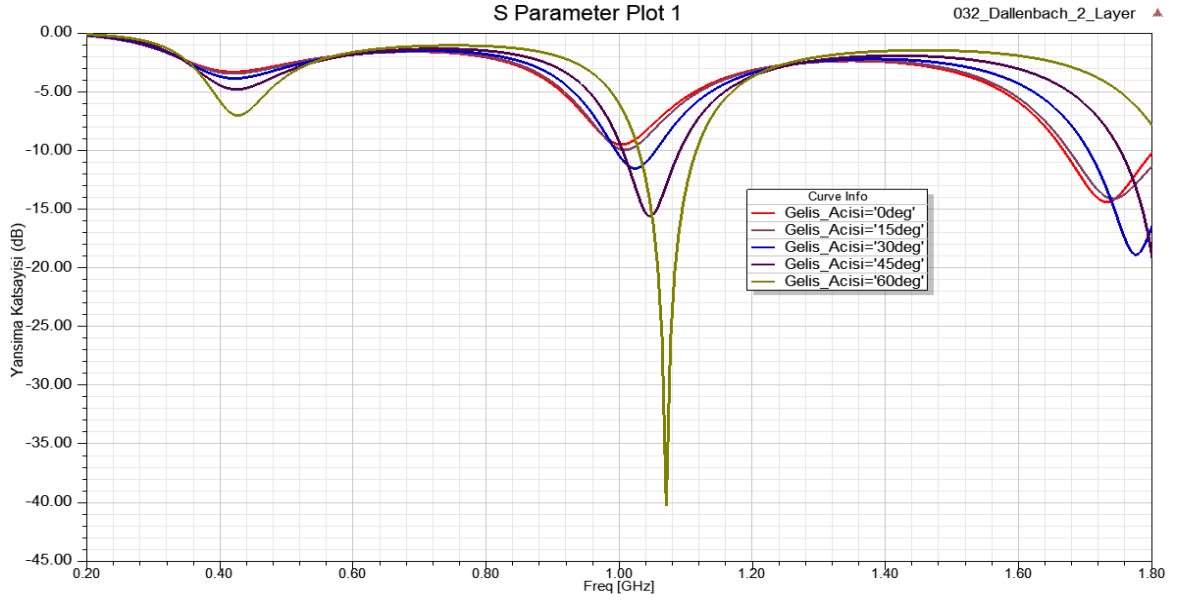


Şekil 3.14. İki katmanlı Dallenbach tabakası başlangıç ve nihai katman kalınlıkları (T_1 ve T_2) için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı grafikleri

Dik ve paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış iki katmanlı Dallenbach tabakasının farklı gelme açıları için yansımaya katsayısı analiz edilmiştir. Parametrik analiz sonuçları değerlendirildiğinde, tek katmanlı Dallenbach tabakası ile benzer şekilde, paralel kutuplanmış düzlem dalganın geliş açısı arttıkça, rezonans frekanslarının ve bu frekanslardaki bant genişliklerinin artması ile beraber rezonans frekanslarındaki yansımaya katsayılarının da arttığı görülmüştür (Şekil 3.15). Dik-kutuplanmış düzlem dalganın geliş açısı arttıkça, tek katmanlı Dallenbach tabakasından farklı olarak rezonans frekanslarının yine arttığı, fakat bununla beraber rezonans frekanslarındaki yansımaya katsayılarının düştüğü görülmüştür (Şekil 3.16).



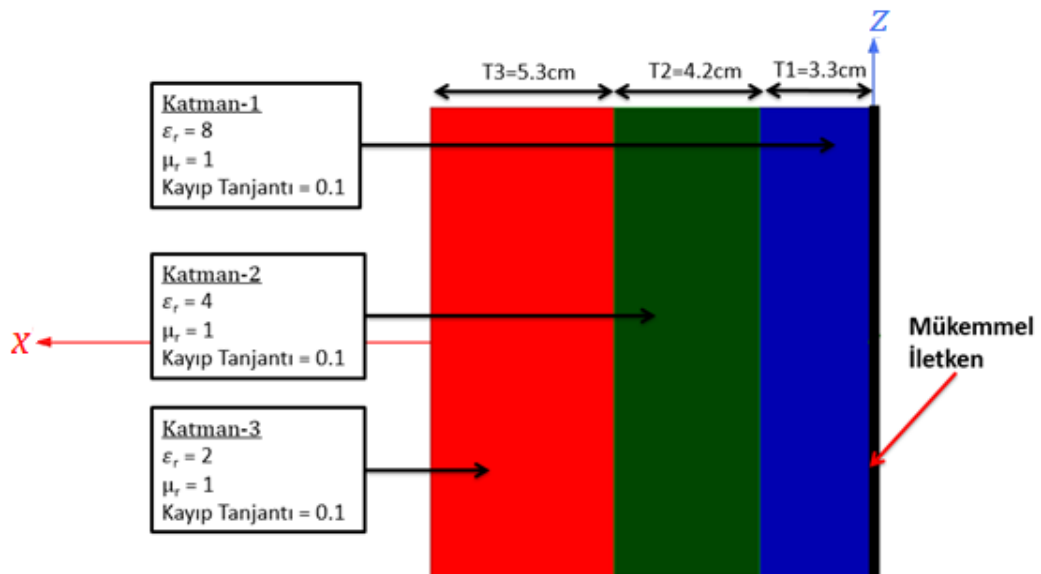
Şekil 3.15. İki katmanlı Dallenbach tabakasının paralel-kutuplanmış düzlem dalganın farklı gelme açılarında frekansa göre yansımaya katsayısı



Şekil 3.16. İki katmanlı Dallenbach tabakasının dik-kutuplanmış düzlem dalganın farklı gelme açılarında frekansa göre yansımaya katsayısı

3.3.1.3. Üç Katmanlı Dallenbach Tabakası

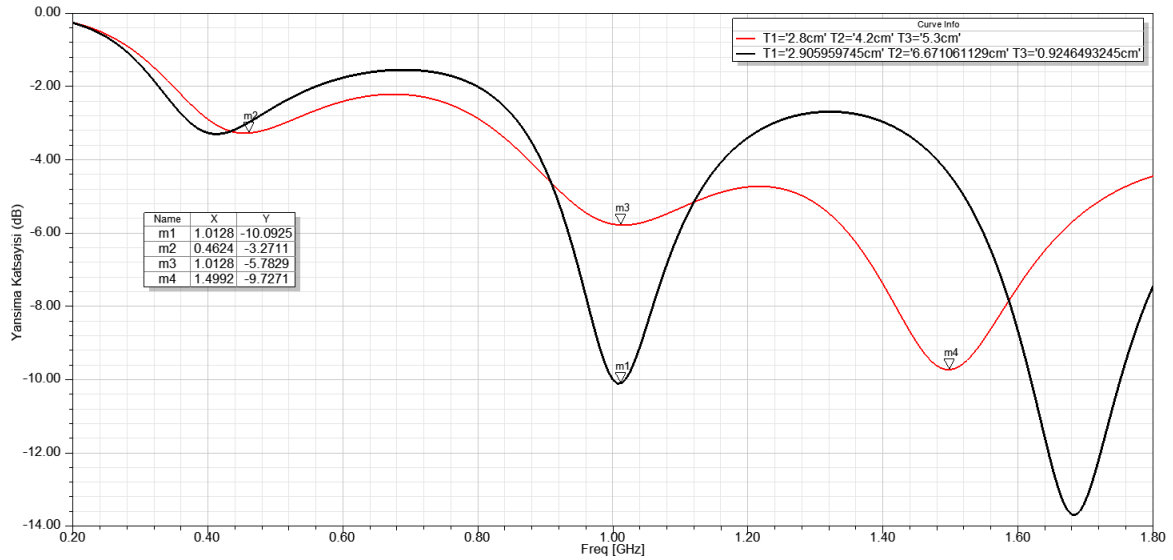
3.3.1.2.'de elde edilen nihai katman kalınlıkları ("Katman 1" ve "Katman 2" için sırasıyla 3.3 cm ve 6.3 cm) üç katmanlı Dallenbach tabakası için başlangıç kalınlıkları olarak seçilmiştir. "Katman 3" başlangıç kalınlığı ise 5.3 cm olarak seçilmiştir (Şekil 3.17). Başlangıç kalınlıkları için 1 GHz'te -5.78 dB yansımaya katsayısı görülmüştür. Yerel minimum yansımaya katsayısının görüldüğü frekanslar 0.56 GHz, 1.01 GHz ve 1.50 GHz olup, bu frekanslardaki yansımaya katsayılarının sırasıyla -3.27 dB, -5.78 dB ve -9.72 dB olduğu görülmüştür (Şekil 3.18).



Şekil 3.17. Üç katmanlı Dallenbach tabakası geometrisi

1 GHz'teki yansımaya katsayısının minimuma indirilebilmesi için gerekli katman kalınlığının tespit edilebilmesi için parametrik analizler yerine ANSYS® HFSS'in eniyileme aracı olan "Optimetrics" yazılımı kullanılmıştır. Eniyileme metodu olarak Newton Algoritması seçilmiştir.

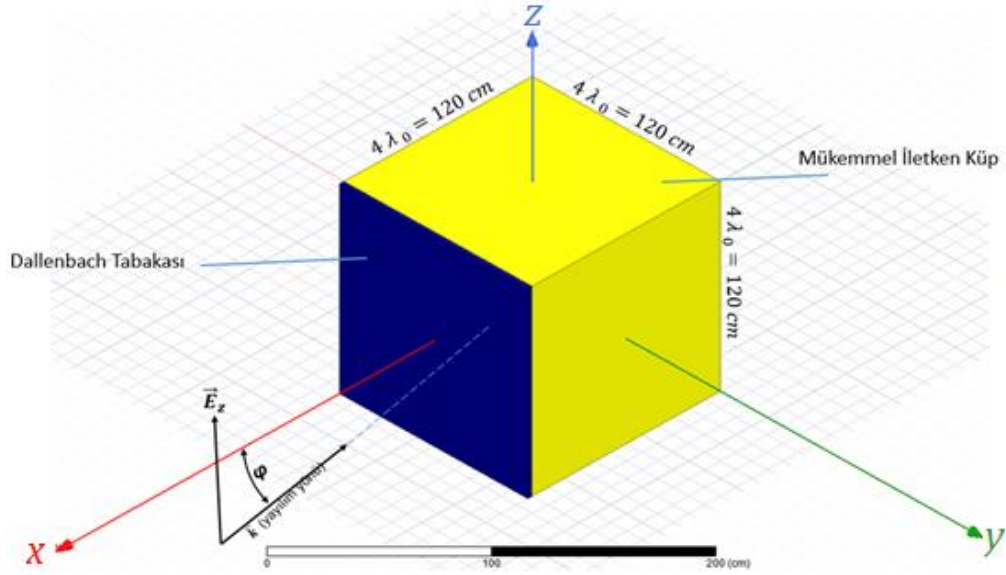
Eniyileme analizi sonucunda "Katman 1", "Katman 2" ve "Katman 3" için en iyi katman kalınlıklarının sırasıyla 2.9 cm, 6.7 cm ve 0.9 cm olduğu ve 1 GHz'teki yansımaya katsayısının -10.9 dB olduğu görülmüştür (Şekil 3.18).



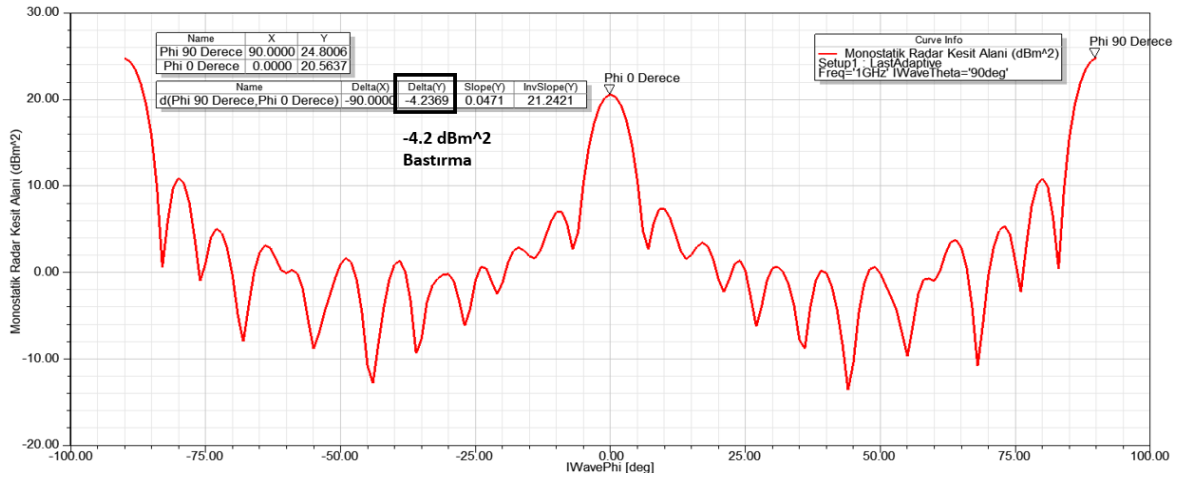
Şekil 3.18. Dik gelen düzlem dalga ile uyarılmış üç katmanlı Dallenbach tabakası başlangıç ve nihai katman kalınlıkları (T_1 , T_2 ve T_3) için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı grafikleri

3.3.2. Dallenbach Tabakaları için Radar Kesit Alanı Analizleri

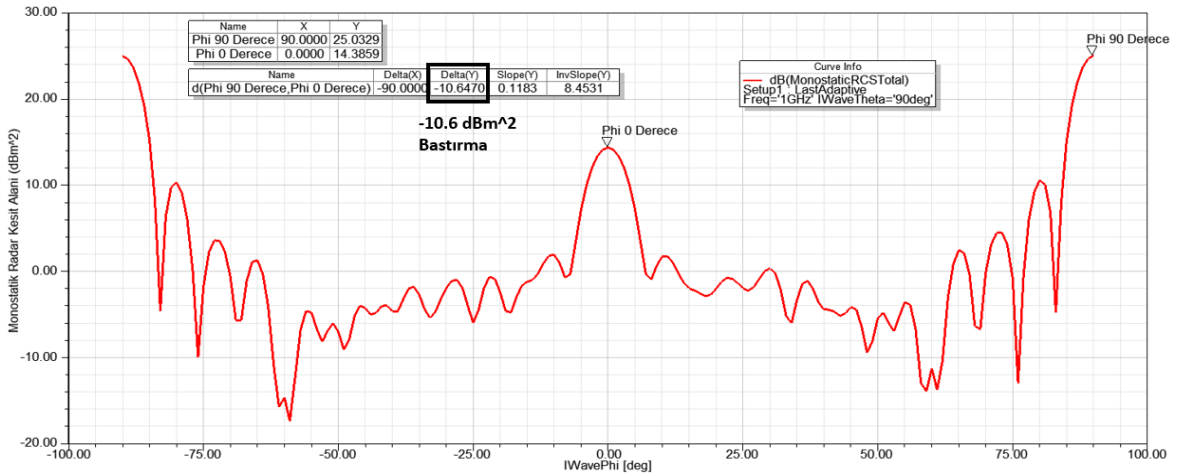
Bölüm 3.3.1.1, 3.3.1.2 ve 3.3.1.3' de gerçekleştirilen eniyileme çalışmaları sonucunda elde edilen nihai Dallenbach tabakalarının radar kesit alanı (RKA) üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla RKA analizleri gerçekleştirilmiştir. Radar soğurucu katmanlar $4\lambda \times 4\lambda \times 4\lambda$ boyutlarında mükemmel iletken bir küp geometrisinin bir yüzeyine uygulanarak (Şekil 3.19) soğurucu katman ile kaplı ve kaplı olmayan yüzeylere tekabül eden paralel-kutuplanmış düzlem dalga geliş açısı için (ϕ) RKA değerleri arasındaki fark ile Dallenbach tabakalarının yansıtıcılık katsayıları kıyaslanmıştır.



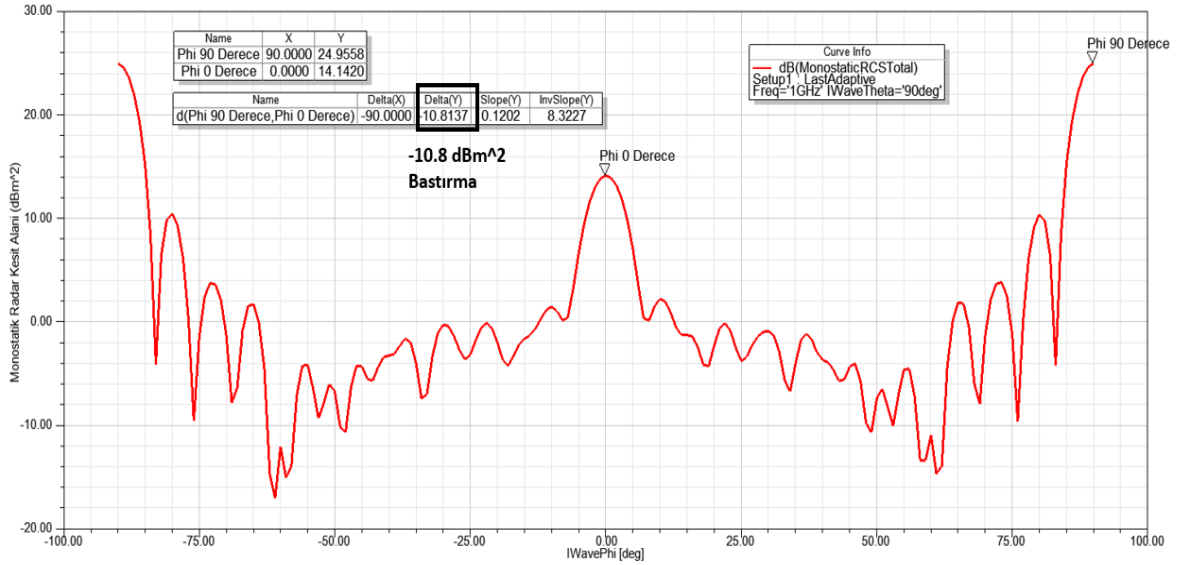
Şekil 3.19. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış Dallenbach tabakası için radar kesit alanı HFSS Modeli



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.20. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış bir (a), iki (b) ve üç (c) katmanlı Dallenbach tabakalarının uygulandığı küp geometrisinin geliş açısına göre radar kesit alanı grafikleri

Dallenbach tabakasının kaplı olduğu yüzeye ($\phi = 0^0$) tekabül eden radar kesit alanı ile yan yüzeylere ($\phi = 90^0, 180^0, 270^0$) tekabül eden radar kesit alanı arasındaki fark soğurucu katmanın radar kesit alanı bastırma oranı olarak tanımlanmıştır. 1 katmanlı, 2 katmanlı ve 3 katmanlı Dallenbach tabakalarının RKA bastırma oranları sırasıyla 4.2 dBm^2 , 10.6 dBm^2 ve 10.8 dBm^2 olduğu görülmektedir (Şekil 3.20).

Bu bastırma oranları ile ilgili Dallenbach tabakalarının yansımaya katsayıları arasında benzerlik olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Dallenbach tabakasının yansımaya katsayısı ve RKA bastırma oranlarının kıyaslanması

| Dallenbach Tabakası | 1 GHz'teki Yansımaya Katsayısı (dB) | 1 GHz'teki RKA Bastırma Oranı (dB) |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1 Katmanlı (Bölüm 3.3.1.1) | -4.1 | 4.2 |
| 2 Katmanlı (Bölüm 3.3.1.2) | -9.5 | 10.6 |
| 3 Katmanlı (Bölüm 3.3.1.3) | -10.9 | 10.8 |

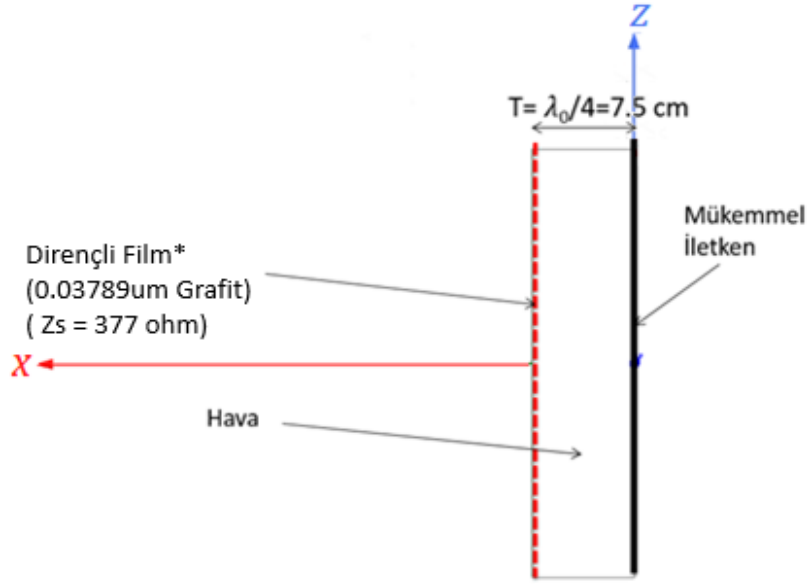
3.4. Salisbury Tabakası Analizleri

Bu bölümde farklı katman sayıları ve aralıklarına sahip Salisbury tabakalarının 0.2 - 5.8 GHz frekans aralığındaki yansımaya katsayısı analiz edilmiştir. Katman sayısının ve kullanılan dielektrik malzemenin yansımaya katsayısına ve yansımaya katsayısının -10 dB olduğu bant genişliğine etkisi gözlemlenmiştir. Hedef frekansı olarak 1 GHz seçilmiştir.

Dirençli film olarak 70000 S/m kitle iletkenliğine ve 0.03789 µm kalınlığa sahip Grafit malzemesi kullanılmıştır.

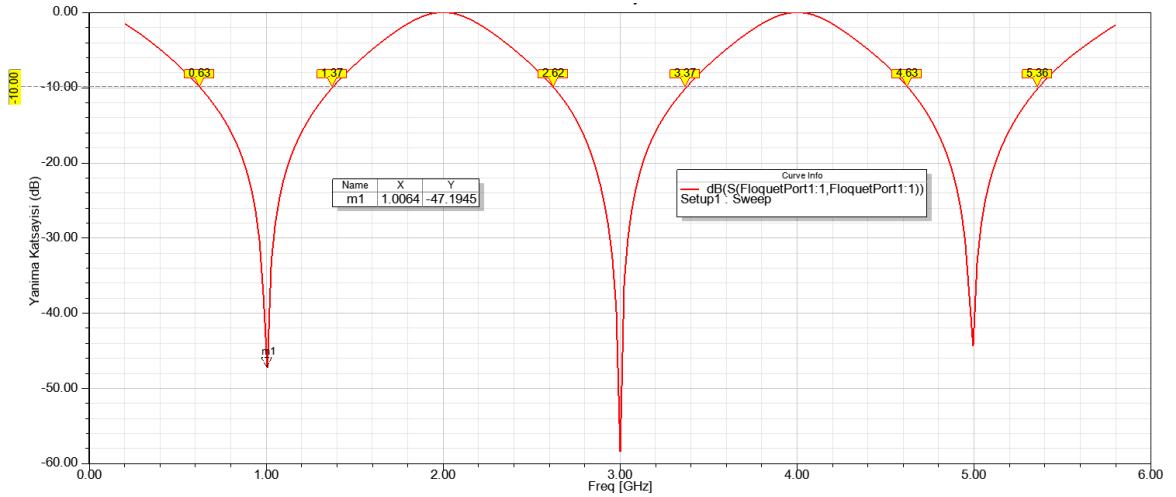
Gelen düzlem dalganın kutuplanmasının ve geliş açısının yansımaya katsayısına etkisini incelemek amacıyla, bir ve iki katmanlı Salisbury tabakasının dik ve paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarıldığı durumda yansımaya katsayısının analizi gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Hava ile Doldurulmuş Tek Katmanlı Salisbury Tabakası



Şekil 3.21. Tek katmanlı Salisbury tabakası geometrisi

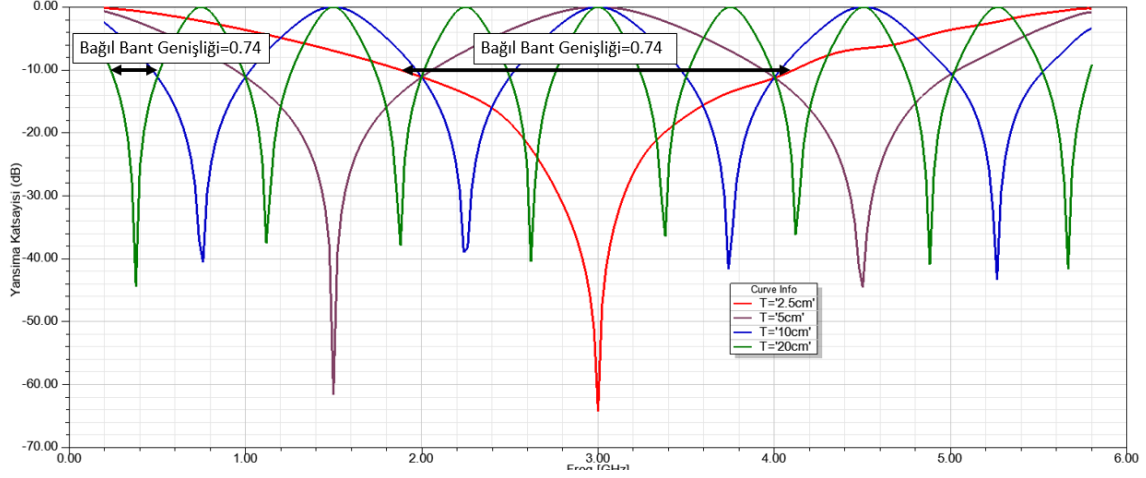
Katman kalınlığının 7.5 cm ($\lambda_0/4$) alındığı durumda, dik gelen düzlem dalga için yansıma katsayısı grafiğinin 1 GHz, 3 GHz ve 5 GHz frekanslarında yerel minimumlara sahip olduğu görülmüştür. Üç rezonans frekansı etrafındaki -10 dB bant genişliği 0.74 GHz ve 1 GHz'teki yansıma katsayısı -47.2 dB olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Tek katmanlı Salisbury tabakasının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı

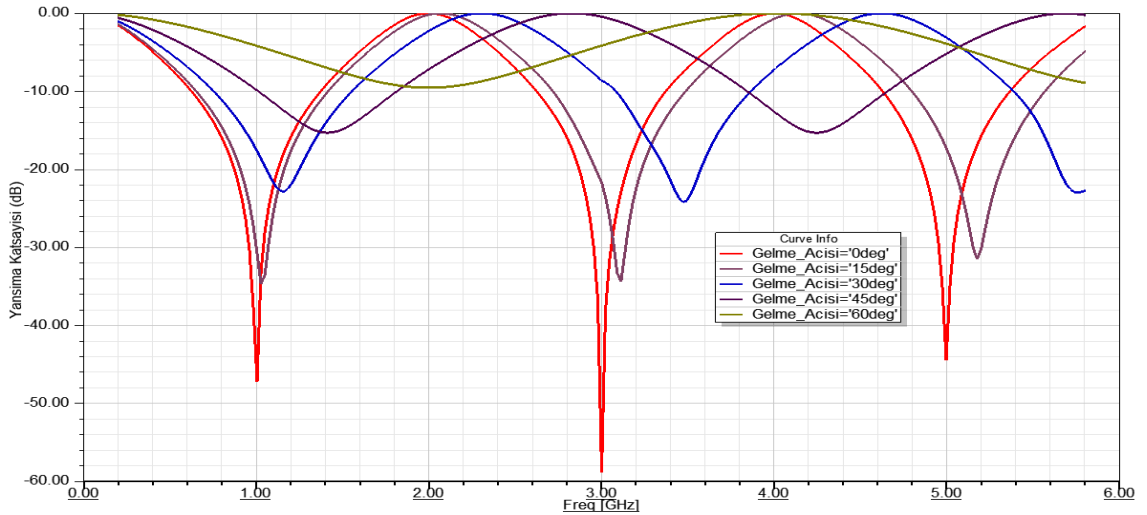
Katman kalınlığının yansıma katsayısına etkisini gözlemlemek amacıyla farklı katman kalınlıklarına göre parametrik analiz gerçekleştirildiğinde, rezonans

frekanslarının katman kalınlığının dalga boyunun dörtte birine ($\lambda/4$) tekabül ettiği frekansın tek katlarında yerel minimumlara sahip olduğu görülmüştür. Rezonans frekansları etrafındaki -10 dB bağıl bant genişliğinin değişmediği ve 0.74 olduğu görülmüştür (Şekil 3.23).

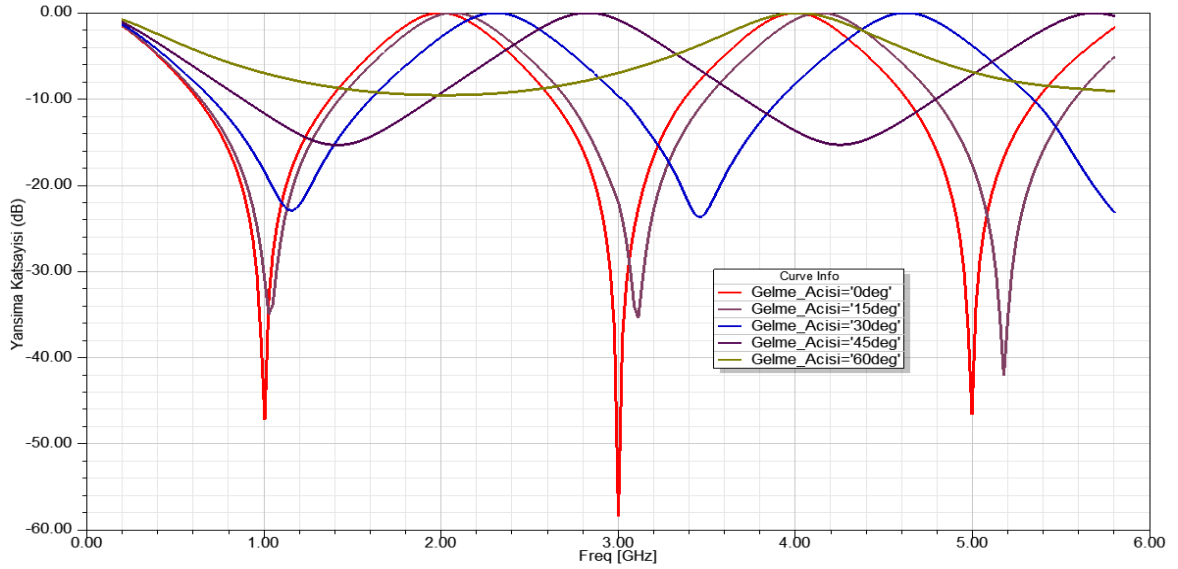


Şekil 3.23. Salisbury tabakasının farklı katman kalınlıkları için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre katsayısı

Dik ve paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış tek katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için yansıma katsayısı analiz edilmiştir. Parametrik analiz sonuçları değerlendirildiğinde hem dik ve paralel-kutuplanmış düzlem dalganın geliş açısına göre yansıma katsayısı grafiklerinin birbiriyle benzerlik teşkil ettiği ve geliş açısı arttıkça, rezonans frekansının artması ile beraber rezonans frekansındaki yansıma katsayısının da arttığı görülmüştür (Şekil 3.24 ve Şekil 3.25).



Şekil 3.24. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış tek katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için frekansa göre yansıma katsayısı

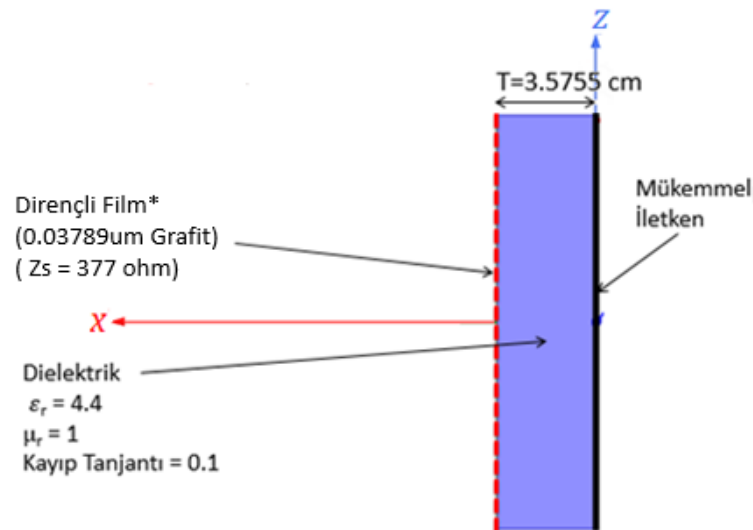


Şekil 3.25. Dik-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış tek katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için frekansa göre yansıma katsayısı

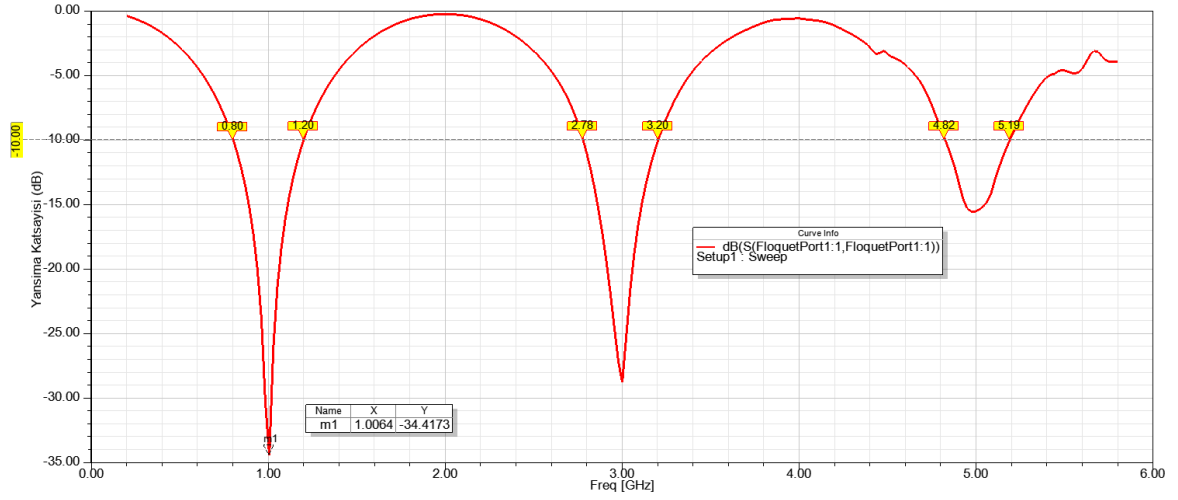
3.4.2. Dielektrik ile Doldurulmuş Tek Katmanlı Salisbury Tabakası

Dirençli film ile iletken yüzey arasında bağıl yalıtkanlık katsayısı 4.4 olan bir dielektrik malzeme kullanıldığında katman kalınlığı 3.6 cm'ye düşmüştür (Şekil 3.26). Fakat buna karşılık dik gelen düzlem dalga için rezonans frekanslarındaki yansıma katsayısı ve bant genişliğinin azaldığı görülmüştür.

1 GHz'teki yansıma katsayısı -34.4 dB ve bant genişliği 0.4 GHz olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.27).

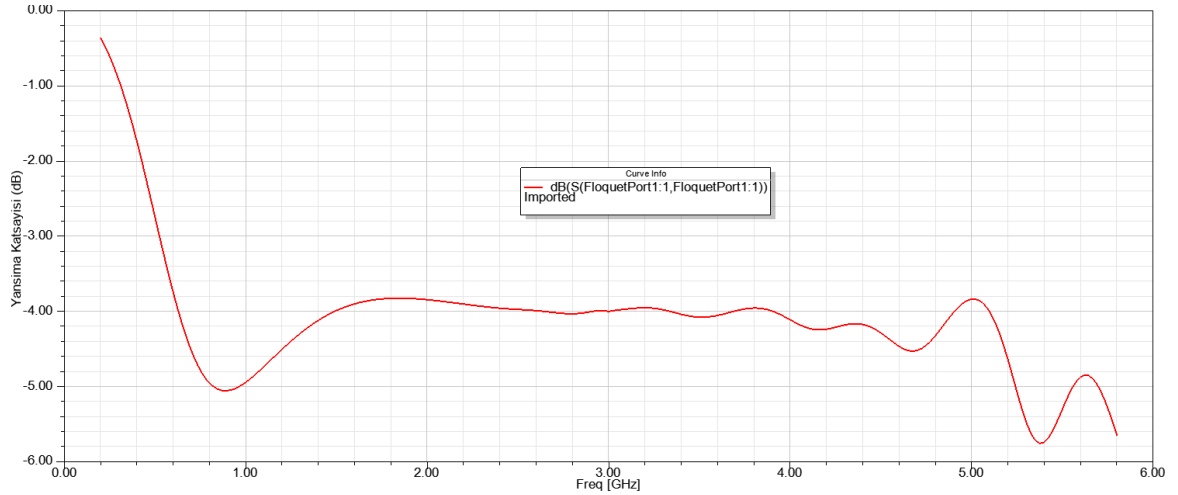


Şekil 3.26. Dielektrik ile doldurulmuş Salisbury tabakası geometrisi



Şekil 3.27. Dielektrik ile doldurulmuş Salisbury tabakasının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı

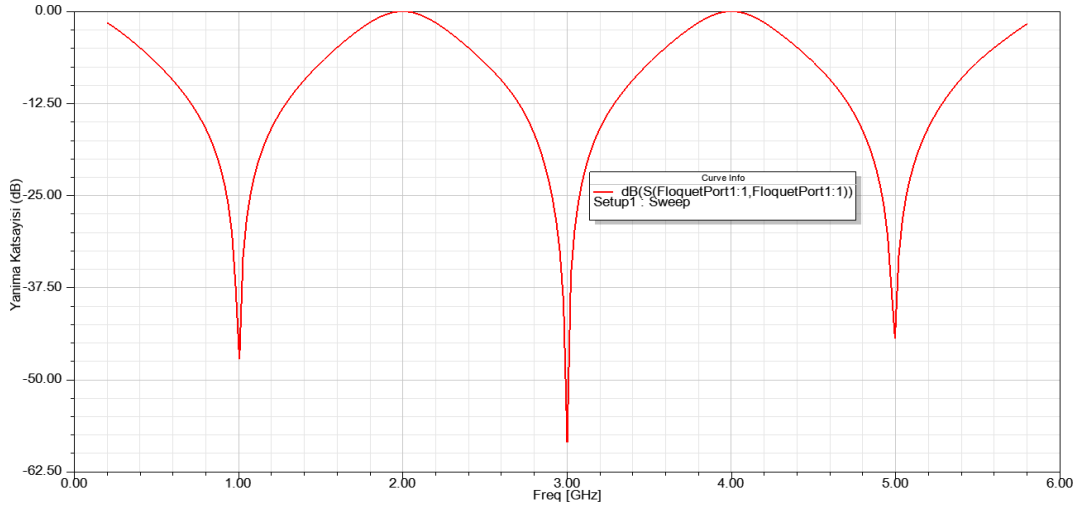
Dielektrik malzeme yerine aynı bağıl elektrik geçirgenliğine ($\epsilon_r' = 4.4$) sahip kayıplı bir dielektrik kullanıldığında ($\epsilon_r''/\epsilon_r' = 2$) minimum yansımaya katsayısı değerinin azaldığı ve 2 - 5.8 GHz frekans aralığı boyunca bağıl bant genişliğinin arttığı görülmüştür (Şekil 3.28).



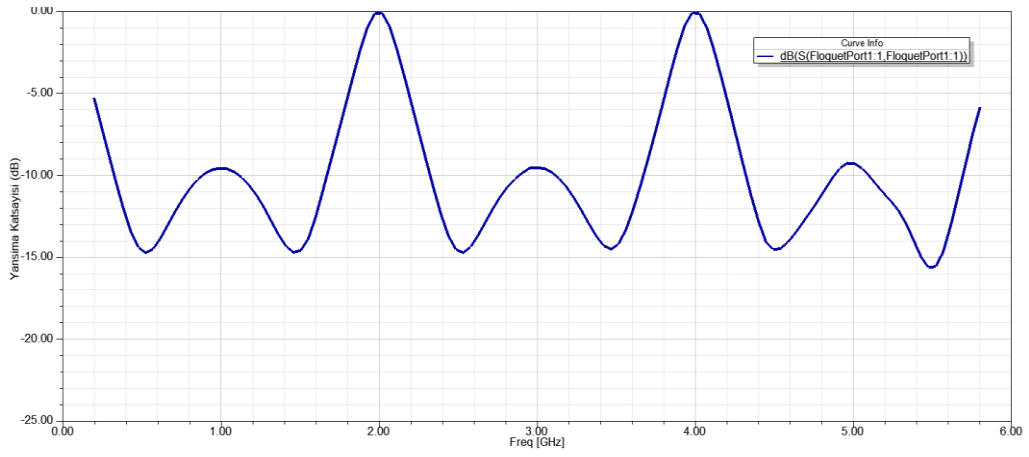
Şekil 3.28. Kayıplı dielektrik ile yüklenmiş Salisbury tabakasının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı

3.4.3. Çok Katmanlı Salisbury Tabakası

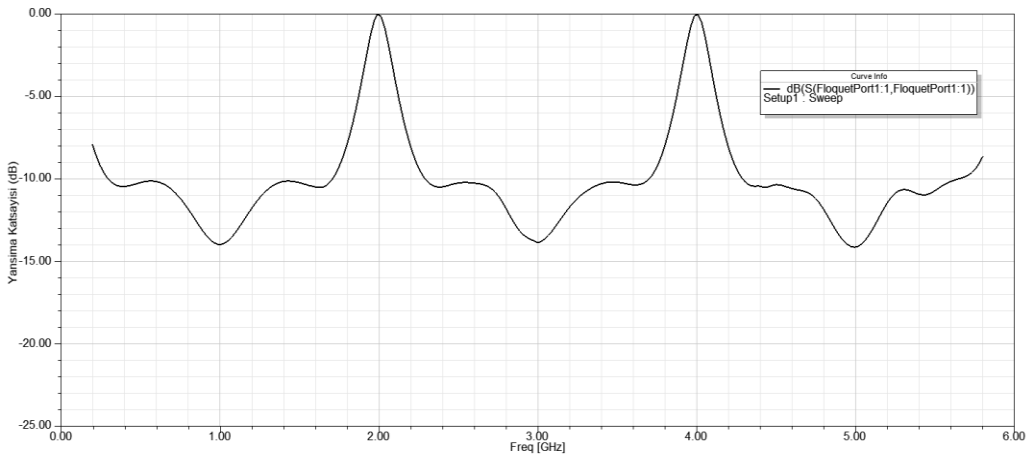
Katmanlar arası mesafe ($\lambda_d/4 = 7.5$ cm) değişmemek koşuluyla 1, 2, 3 katmanlı Salisbury katmanlarının yansımaya katsayılarının analizi gerçekleştirildiğinde minimum yansımaya katsayısının arttığı, fakat rezonans frekansları etrafındaki bağıl bant genişliğinin arttığı görülmüştür (Şekil 3.29 ve Şekil 3.30).



(a)

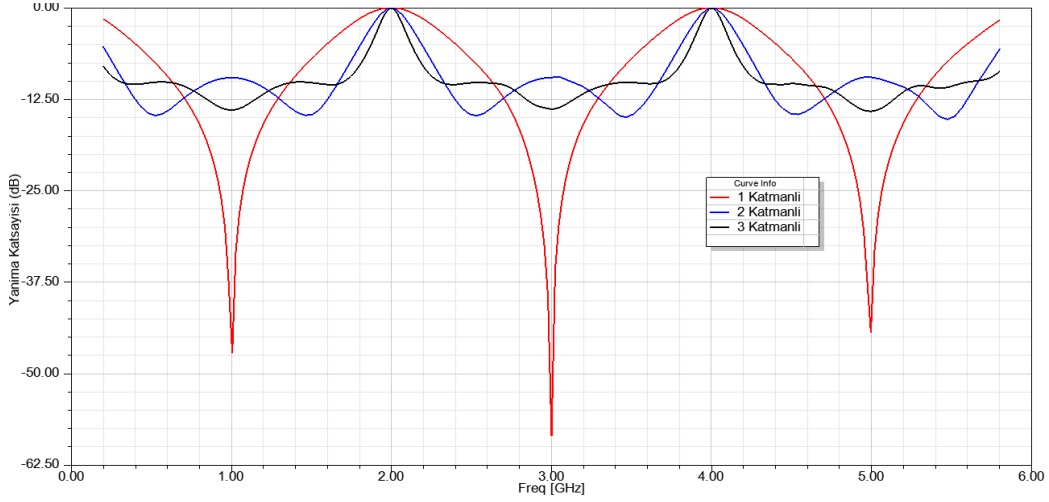


(b)



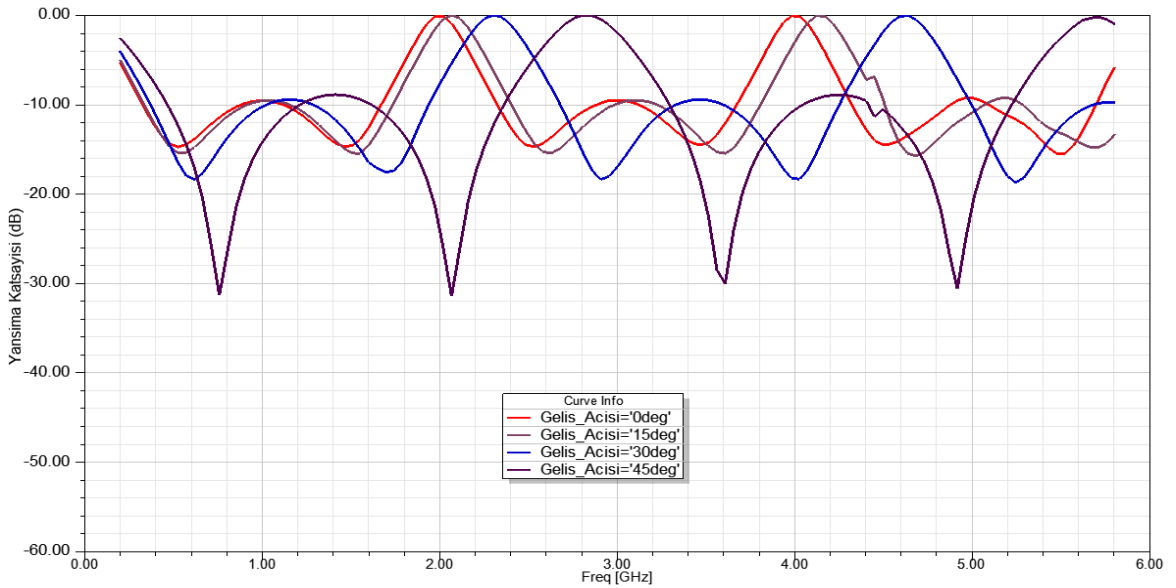
(c)

Şekil 3.29. Bir (a), iki (b) ve üç (c) katmanlı Salisbury tabakalarının dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansıma katsayısı

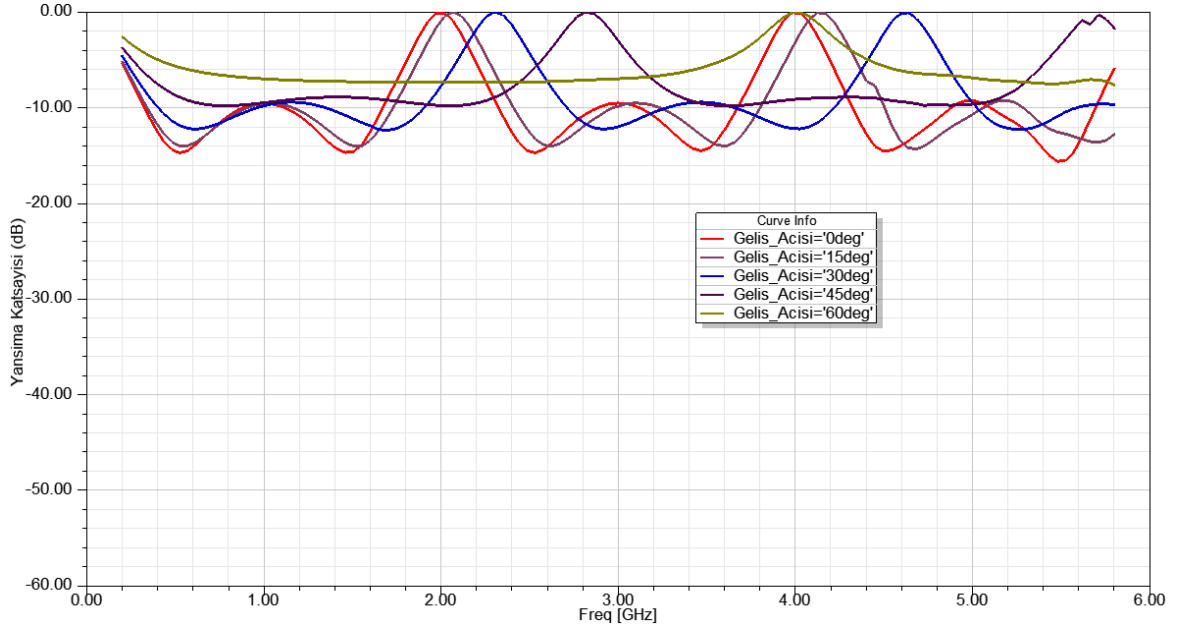


Şekil 3.30. Bir, iki ve üç katmanlı Salisbury tabakalarının dik gelen düzlem dalga için yansımaya katsayılarının kıyaslaması

Ayrıca dik ve paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış iki katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için yansımaya katsayısı analiz edilmiştir. Parametrik analiz sonuçları değerlendirildiğinde, paralel-kutuplanmış düzlem dalganın geliş açısı arttıkça, rezonans frekanslarının arttığı ve bu frekanslardaki yansımaya katsayısının ise azaldığı görülmüştür (Şekil 3.31). Dik-kutuplanmış düzlem dalganın geliş açısı arttıkça, rezonans frekanslarının artması ile beraber frekanslardaki yansımaya katsayısının ise arttığı görülmüştür (Şekil 3.32).



Şekil 3.31. Paralel-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış iki katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için frekansa göre yansımaya katsayısı



Şekil 3.32. Dik-kutuplanmış düzlem dalga ile uyarılmış iki katmanlı Salisbury tabakasının farklı gelme açıları için frekansa göre yansımaya katsayısı

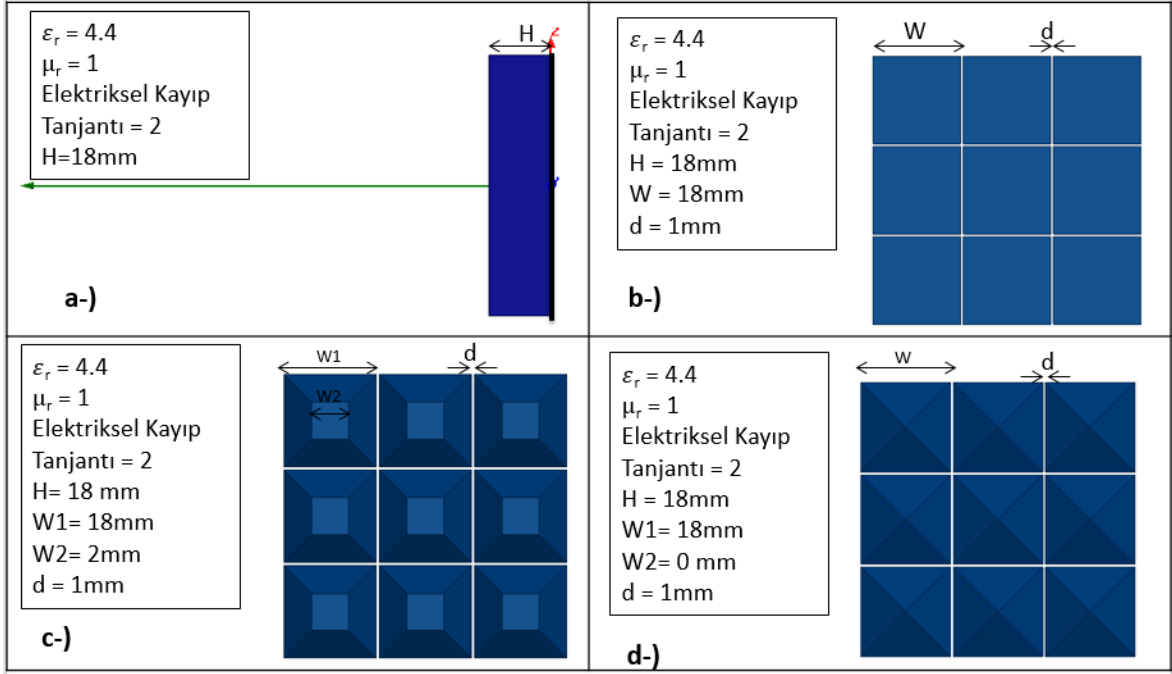
3.5. Taslak Tasarım: Soğurucu Dizisi Analizleri

Bu bölüm bağıl yalıtkanlık katsayısı 4.4 ve kayıp tanjantı 2 olan farazi bir malzeme kullanılarak üç farklı soğurucu dizisi (kare prizma, kesik piramit, piramit) ve yine bu dielektriğin kullanıldığı Dallenbach katmanının yansımaya katsayıları hesaplanmıştır. 2 - 18 GHz frekans bandında yansımaya katsayısı grafiğinin -10 dB bant genişliği en yüksek olan tasarımın belirlenmesi amaçlanmıştır.

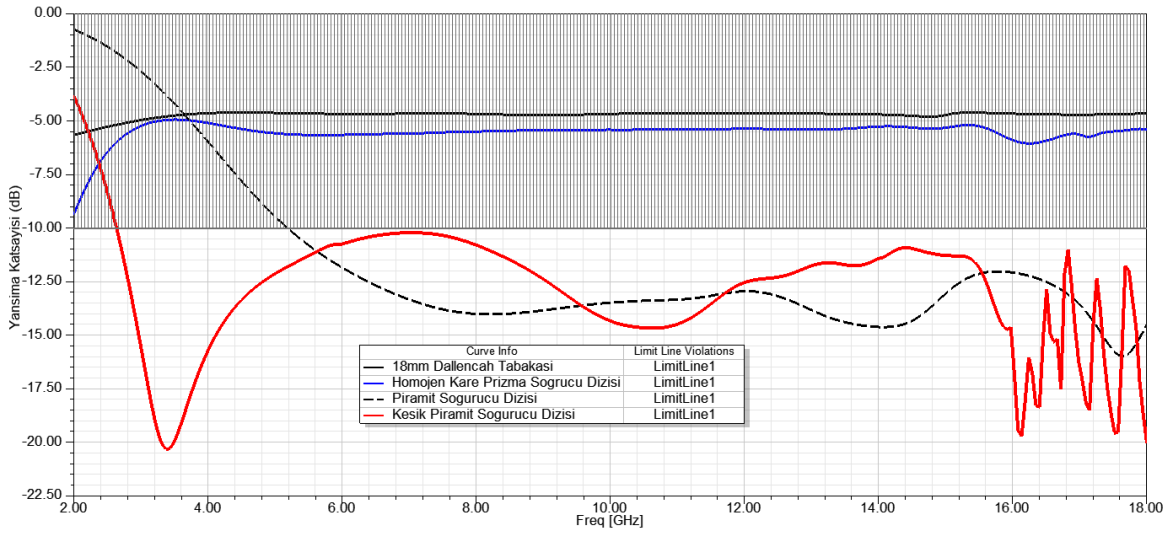
Dielektrik kalınlığı (H) ilgili frekans bandının en düşük frekansına (2 GHz) tekabül eden dalga boyunun dörtte biri ($\lambda_e/4 = 18$ mm) seçilerek maksimum bant genişliğini elde etmek amaçlanmıştır (Şekil 3.33). Soğurucu dizi elemanları arası mesafe $d = 1$ mm olarak seçilmiştir.

Ayrıca soğurucu dizi elemanlarının taban kenar uzunlukları ($W1$) da $\lambda_e/4 = 18$ mm seçilmiştir. Kesik piramit dizi elemanının üst yüzey kenar uzunluğu ($W2$) ise ilgili frekans bandının en yüksek frekansına (18 GHz) tekabül eden dalga boyunun dörtte biri ($\lambda_e/4 = 2$ mm) olarak seçilmiştir (Şekil 3.33).

Taslak soğurucu tasarımlarının yansımaya katsayıları kıyaslandığında, -10 dB altında en geniş frekans bandına sahip tasarımın kesik piramit dizisinin kullanıldığı tasarım olduğu görülmüştür (Şekil 3.34).



Şekil 3.33. Taslak tasarım geometrileri: a) Dallenbach tabakası, b) Kare Prizma c) Kesik Piramit, d) Piramit



Şekil 3.34. Taslak tasarımda kullanılan soğurucu yapıların dik gelen düzlem dalga için yansımaya katsayılarının kıyaslanması

4. KESİK PİRAMİT RADAR SOĞURUCU DİZİSİ TASARIM VE ANALİZİ

Bu bölümde, Bölüm 3'te analizi gerçekleştirilen Dallenbach tabakası, Salisbury tabakası ve kesik piramit soğurucu yapılarının yansıtıcılık ve soğuruculuk özelliklerinden faydalanılarak 2 - 18 GHz frekans aralığında -10 dB altında yansımaya katsayısına sahip radar soğurucu yapıların tasarımı amaçlanmıştır.

Bölüm 3.5.'te elde edilen sonuçlarda, dielektrik kayıp tanjantı 2 olan bir malzemeden oluşan kesik piramit soğurucu dizisinin 3 - 18 GHz frekans aralığında -10 dB altında yansımaya katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek kayıp tanjantına sahip olan malzemeler genel olarak iletken polimerlerden veya birleşik malzemelerden oluşmaktadır.

Bu bölümde dirençli filmler yardımıyla yüksek kayıplı birleşik bir malzeme tasarlanması hedeflenmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen radar soğurucu yapılar; aralarında çok ince dirençli film bulunan dielektrik katmanlardan oluşan kare tabanlı kesik piramit dizisinden oluşmaktadır. Her bir kesik piramitin taban ve tavan yüzeyleri kare olacak şekilde seçilmiştir.

Tezin temel amaçlarından biri de geniş bantlı ve düşük kalınlığa sahip radar soğurucu yapıların, yaygın olarak kullanılan düşük kayıplı dielektrik malzemeler kullanılarak tasarlanması olduğundan; alttaş olarak kolay tedarik edilebilen, elektriksel özellikleri frekansa göre doğrusal olarak değişen veya değişmeyen, düşük kayıplı dielektrik malzemelerin kullanımı tercih edilmiştir.

Tez kapsamında elektriksel özellikleri Çizelge 4.1'de özetlenen RT/Duroid 5880, Nelco N4000-13 EP ve Arlon TC 600 dielektrik malzemeler kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Tasarımda kullanılan dielektrik malzemeler ve elektriksel özellikleri

| Dielektrik Malzeme | Bağıl Elektrik Geçirgenliği (ϵ_r') | Bağıl Manyetik Geçirgenlik (μ_r') | Dielektrik Kayıp Tanjantı (ϵ_r''/ϵ_r') | Manyetik Kayıp Tanjantı (μ_r''/μ_r') |
|--------------------|---|---|--|--|
| RT/Duroid 5880 | 2.20 @1 MHz 2.20 @10 GHz | 1 | 0.0004 @1 MHz 0.0009 @10 GHz | 0 |
| Nelco N4000-13 EP | 3.70 @1 GHz 3.70 @2.5 GHz 3.60 @10 GHz | 1 | 0.0009 @2.5 GHz 0.0009 @10 GHz | 0 |
| Arlon TC600 | 6.15 @1.8 MHz 6.15 @10 GHz | 1 | 0.0017 @1.8 MHz 0.0020 @10 GHz | 0 |

Malzemelerin veri föylerinde 10 -18 GHz frekans aralığındaki elektriksel özelliklerine yer verilmediğinden bu frekans aralığındaki elektriksel özellikleri için Çizelge 4.1'deki değerler kabul edilmiştir.

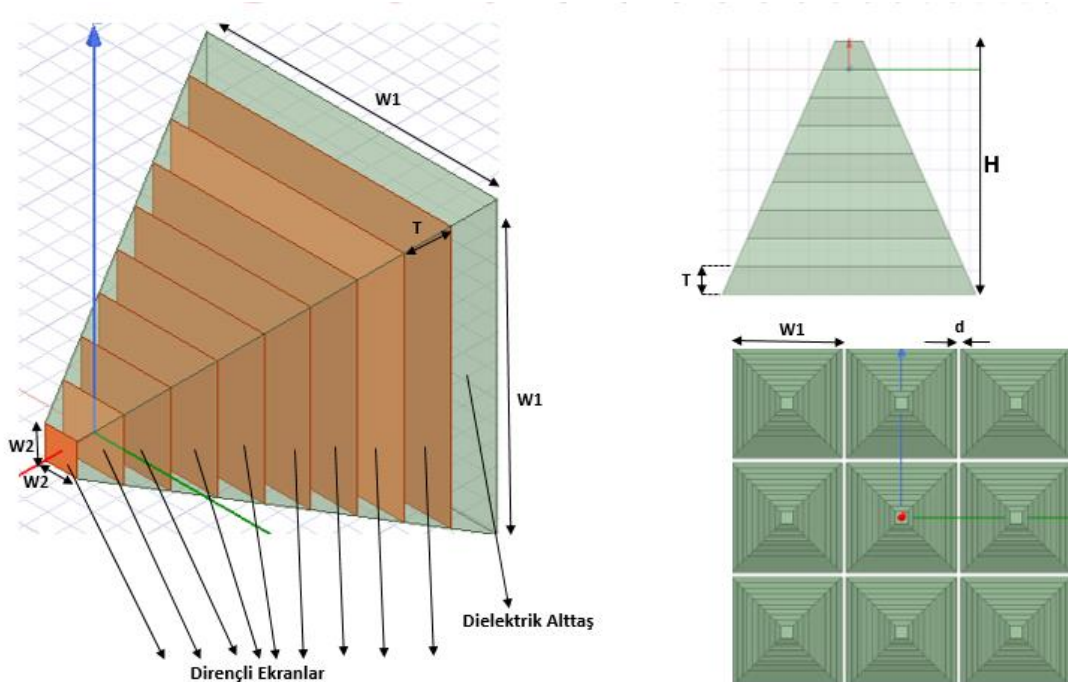
Dielektrik katmanlar arasında dirençli film olarak 70000 S/m kitle iletkenliğine ve 0.03789 μm kalınlığa sahip Grafit malzemesi kullanılmıştır. Film kalınlığı Eşitlik 2.24'deki bağıntıyı sağlamak koşuluyla farklı dirençli film malzemeleri de kullanılabilir. Tez kapsamında ince film uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilen Grafit malzemesi tercih edilmiştir.

Böylelikle malzemenin yüksek elektrik geçirgenliği seçilen dielektrik malzemeler ile; elektriksel kayıplı olma özelliği ise kullanılan dirençli filmler ile sağlanmıştır.

4.1. Tasarım ve Boyutlar

Radar soğurucu dizi elemanlarının başlangıç boyutları (Şekil 4.1) aşağıdaki gibi seçilmiştir:

- $W1 = \lambda_e(2 \text{ GHz})/4$: 2 GHz'te dielektrik içerisindeki dalga boyunun dörtte biri
- $W2 = \lambda_e(18 \text{ GHz})/4$: 18 GHz'te dielektrik içerisindeki dalga boyunun dörtte biri
- $H = \lambda_e(2 \text{ GHz})/4$: 2 GHz'te dielektrik içerisindeki dalga boyunun dörtte biri
- $T = \lambda_e(18 \text{ GHz})/4$: 18 GHz'te dielektrik içerisindeki dalga boyunun dörtte biri
- $d = 1 \text{ mm}$



Şekil 4.1. Radar soğurucu dizisinde kullanılan kesik piramit elemanının boyutları

RT/Duroid 5880, Nelco N4000-13 EP ve Arlon TC 600 dielektrik malzemelerinin kullanıldığı durumda seçilen başlangıç eleman boyutları Çizelge 4.2’de yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Radar soğurucu dizisinde kullanılan elemanların seçilen başlangıç boyutları

| Kullanılan Dielektrik | $W1$ (mm) | $W2$ (mm) | H (mm) | T (mm) | d (mm) |
|-----------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| RT/Duroid 5880 | 25.2 | 2.8 | 25.2 | 2.8 | 1 |
| Nelco N4000-13 EP | 19.53 | 2.17 | 19.53 | 2.17 | 1 |
| Arlon TC 600 | 15.12 | 1.68 | 15.12 | 1.68 | 1 |

4.2. Eniyileme Çalışmaları

Çizelge 4.2’de yer alan değişkenlerin yansıtıcılık üzerindeki etkisini gözlemlemek ve minimum yansıma katsayısına sahip yapının belirlenebilmesi amacıyla parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

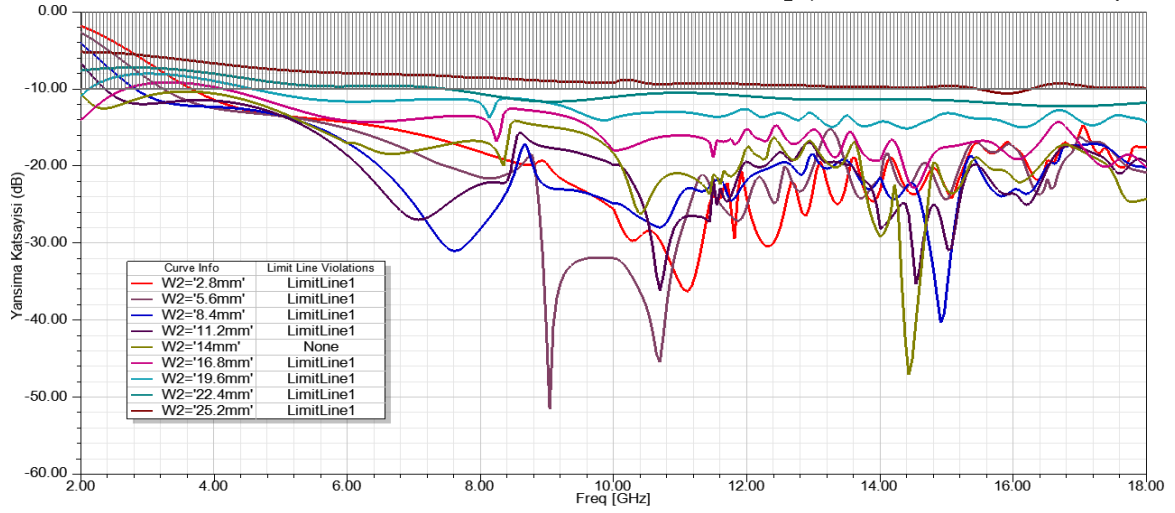
4.2.1. Farklı Kesik Piramit Üst Yüzey Kenar Boyutları ($W2$) için Yansıma Katsayısı Analizi

Soğurucu dizisinin kesik piramit elemanlarının her birinin ve her bir eleman içerisinde yer alan katmanların Dallenbach ve Salisbury tabakaları gibi davranacağı öngörülmüştür. Bu amaçla alt yüzey kenarı ($W1$), katman yüksekliği (H) ve katmanlar arası mesafe (T) sabit tutularak üst yüzey kenarının ($W2$) 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 ve 18 GHz frekanslarındaki dalga boyunun dörtte birine tekabül eden değerleri için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrik analizler her bir alltaş için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Parametrik analiz sonuçlarına bakıldığında;

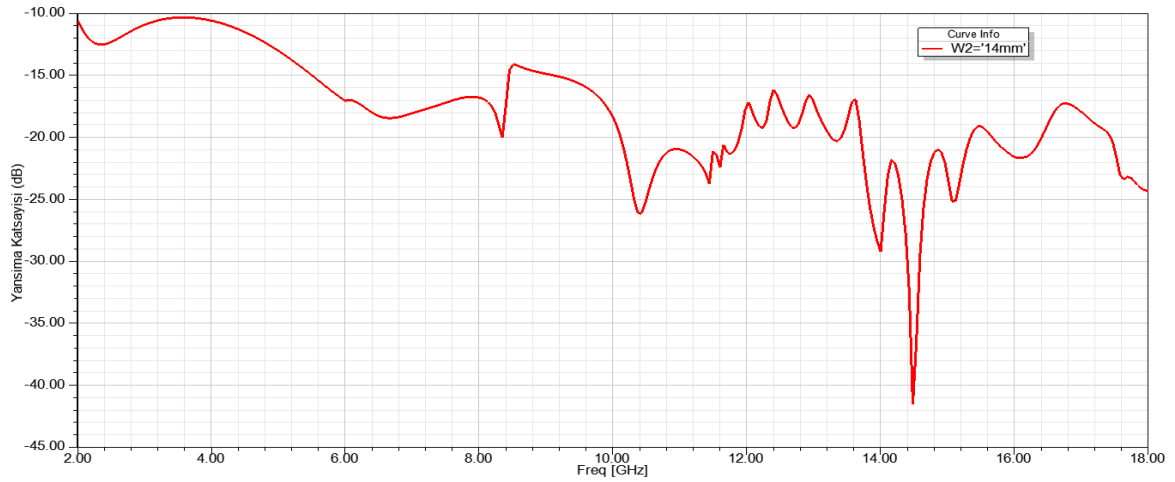
- RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda; $W2 = 14$ mm için 2 - 18 GHz frekans aralığında yansıma katsayısının -10 dB altında olduğu görülmüştür. Ayrıca yansıma katsayısının 10.4 GHz etrafında -25 dB’ye kadar, 14.4 GHz etrafında ise -40 dB’ye kadar düştüğü görülmüştür (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3).
- Nelco N4000-13 EP malzemesinin kullanıldığı durumda, en uygun yansıma katsayısı $W2 = 7.6$ mm olduğu durumda elde edilmiştir. Yansıma katsayısının

8 GHz etrafında -50 dB'ye kadar düştüğü ve 16 - 18 GHz etrafında -20 dB'nin altında olduğu görülmüştür. (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).

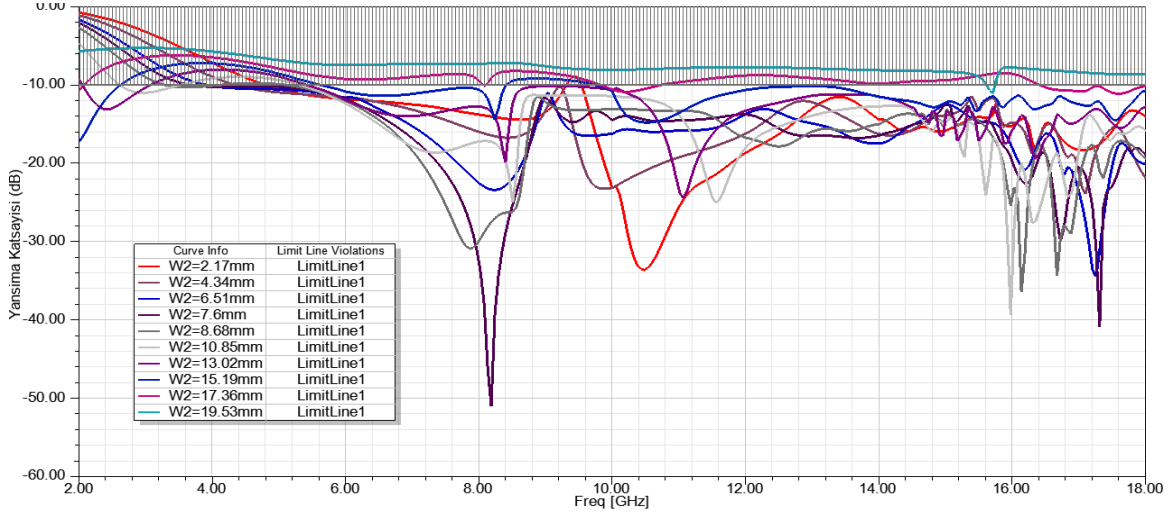
- Arlon TC 600 malzemesinin kullanıldığı durumda, en uygun yansımaya katsayısı $W2 = 11.76$ mm olduğu durumda elde edilmiştir. Yansımaya katsayısı genel olarak -10 dB üzerinde değerlere sahip olmakla beraber 11.8 GHz etrafında -40 dB'ye kadar düşmüştür (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).



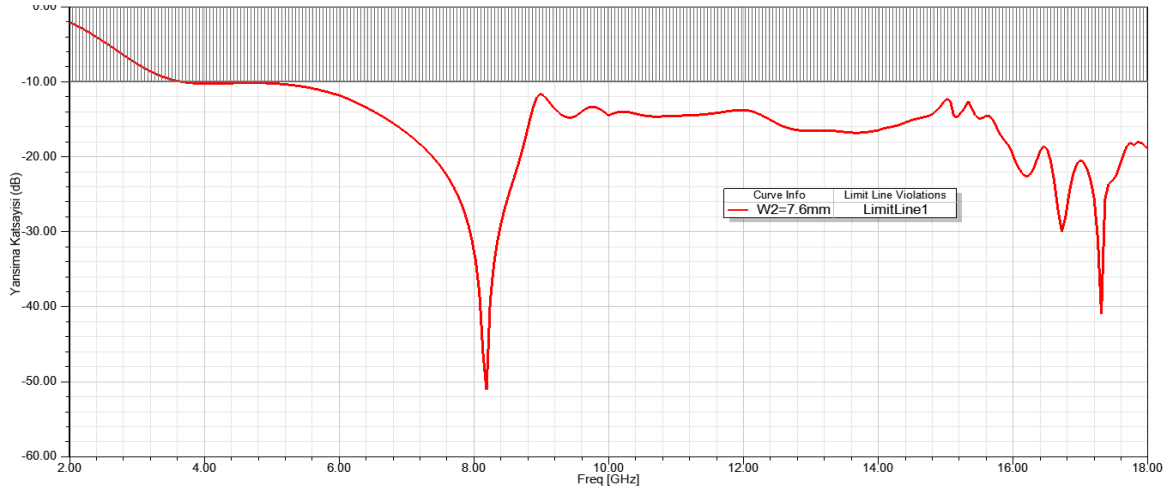
Şekil 4.2. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı $W2$ değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı



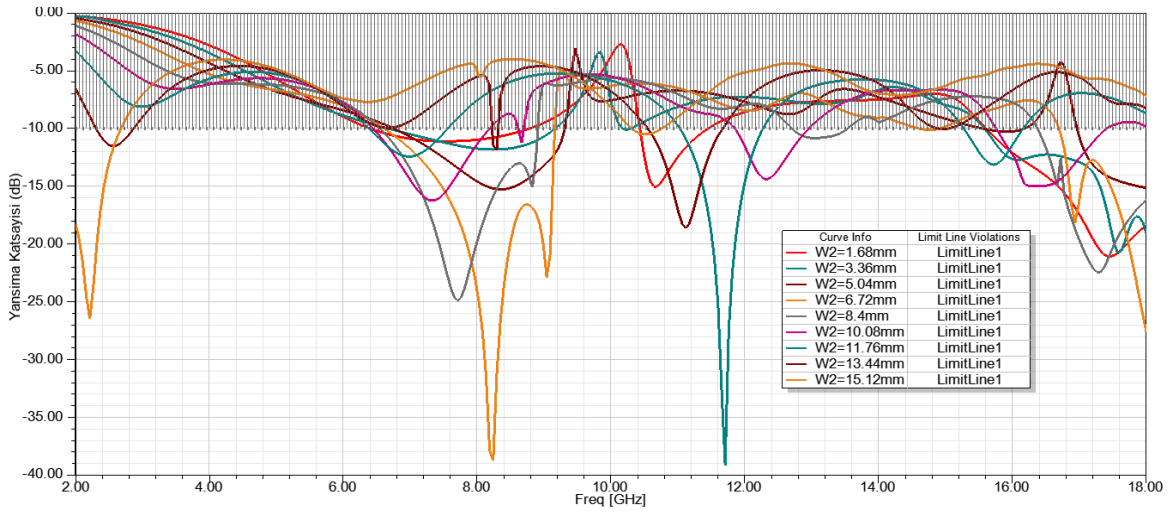
Şekil 4.3. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, $W2 = 14$ mm değeri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı



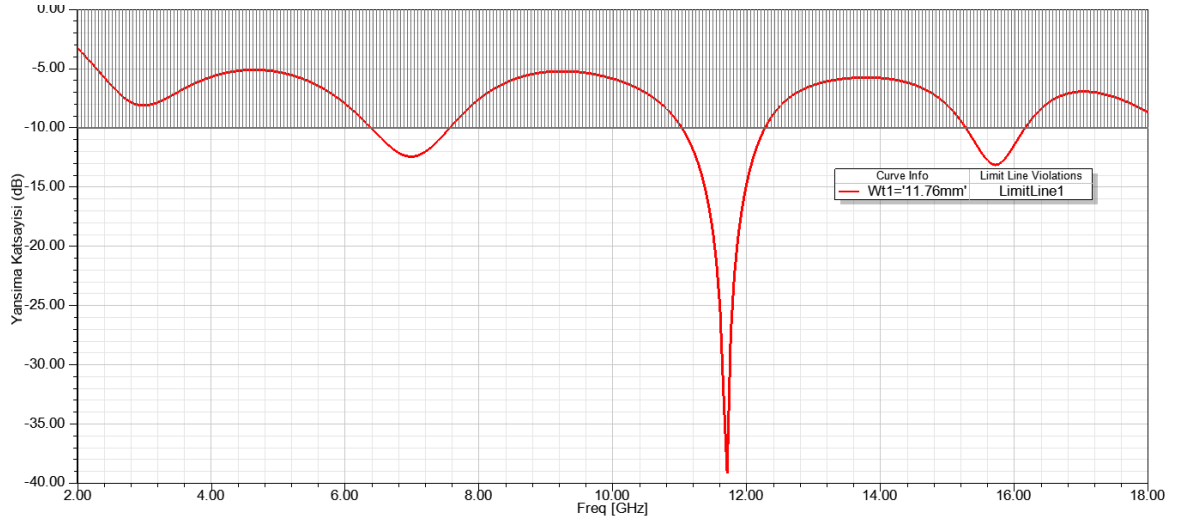
Şekil 4.4. Nelco N4000-13 EP malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı W_2 değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansima katsayısı



Şekil 4.5. Nelco N4000-13 EP malzemesinin kullanıldığı durumda, $W_2 = 7.6$ mm değeri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansima katsayısı

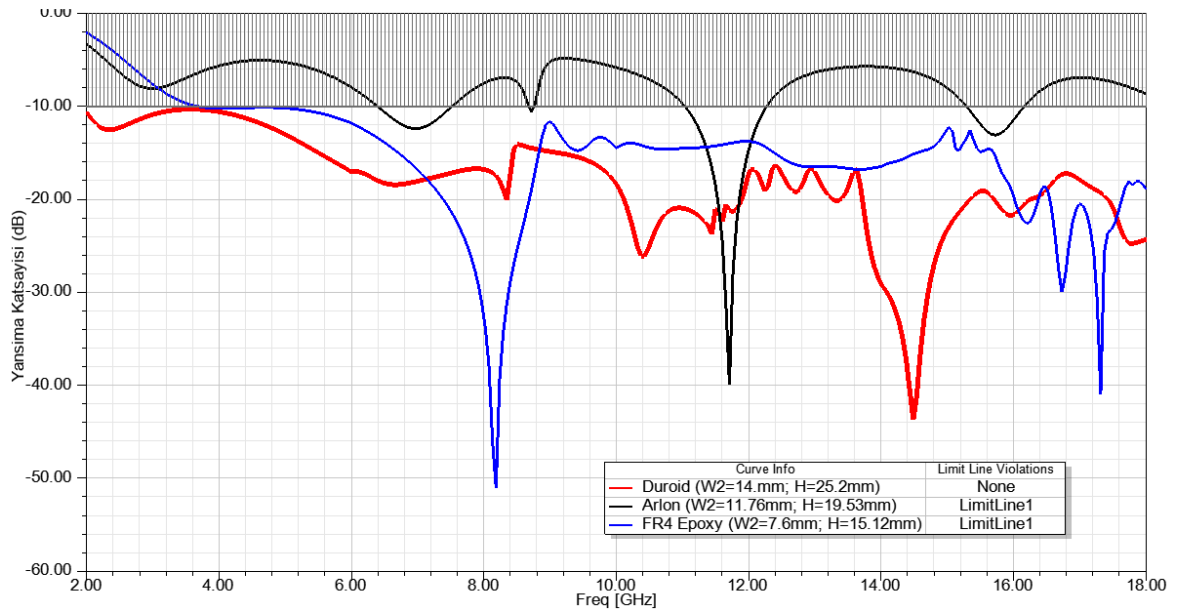


Şekil 4.6. Arlon TC600 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı W_2 değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansima katsayısı



Şekil 4.7. Arlon TC600 malzemesinin kullanıldığı durumda, $W2 = 11.76$ mm değeri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı

Elde edilen grafiklerde 2 - 18 GHz arasında yansımaya katsayısı için -10 dB limit doğrusu kullanılmıştır. Limit doğrusunun üzerine çıkan eğriler grafik göstergesinde "Limit Line1" olarak gösterilmektedir. Limit doğrusunun üzerine çıkmayan eğriler ise "None" olarak gösterilmektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, limit doğrusunun üzerine çıkmayan tek yansımaya katsayısı grafiği, RT/Duroid malzemesi kullanıldığı ve $W2 = 14$ mm olduğu durumda yakalanmıştır (Şekil 4.8).



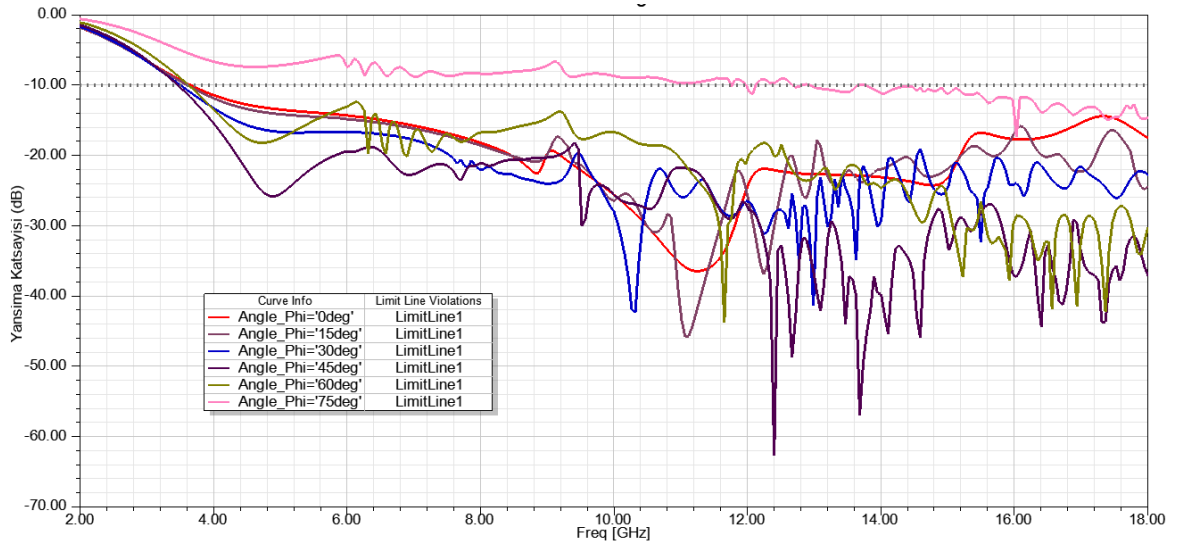
Şekil 4.8. RT/Duroid 5880, Nelco N4000-13 EP ve Arlon TC600 malzemelerinin kullanıldığı en uygun $W2$ değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayıları kıyaslaması

Toplam katman kalınlığının en yüksek olduğu durum ($H = 25.2$ mm) RT/Duroid malzemesinin kullanıldığı durum olmasına rağmen, eniyileme çalışmasının birincil çıktısı olarak RT/Duroid malzemesinin kullanılması değerlendirilmiştir.

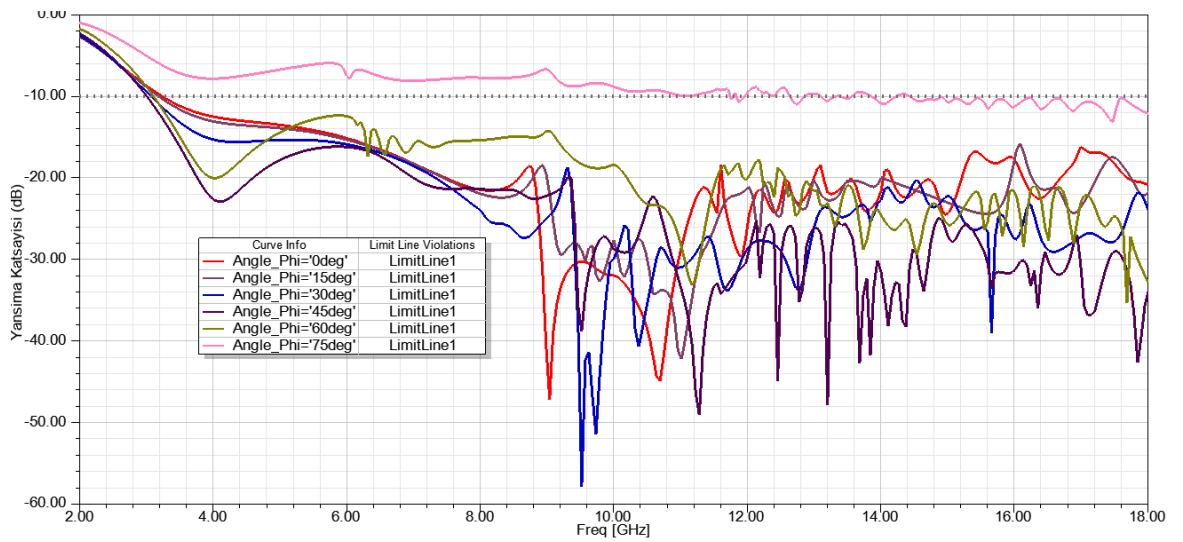
Nihai tasarıma yönelik, takip eden parametrik ve eniyileme çalışmaları RT/Duroid malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.2.2. Düzlem Dalga Geliş Açısına göre Yansıma Katsayısı Analizi

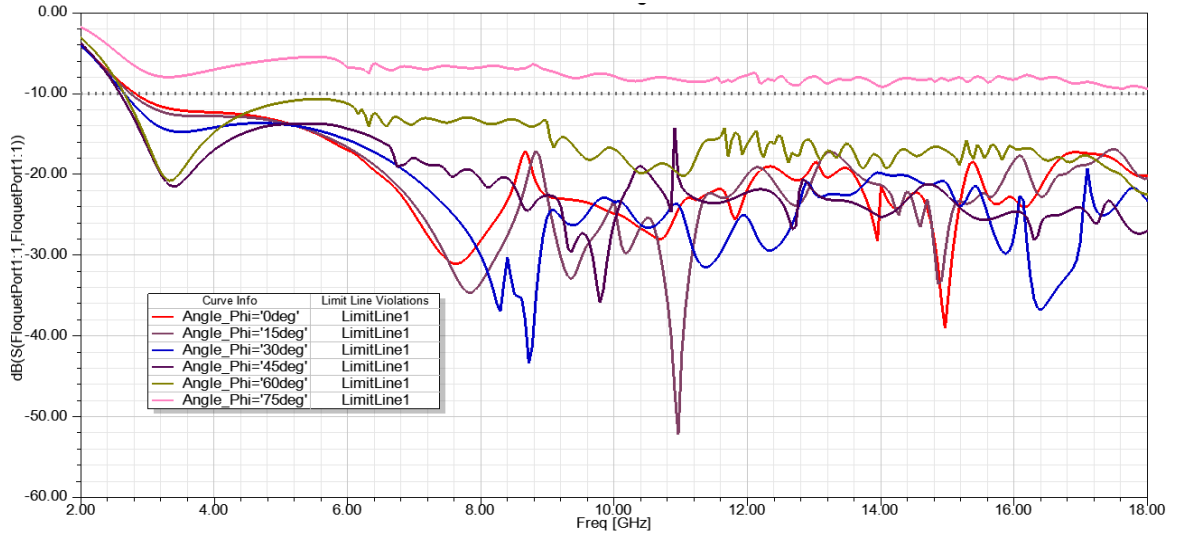
Farklı $W2$ değerleri piramit yan yüzey normalinin açısını etkileyeceğinden, RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, $W2 = 2.8$ mm, 5.6 mm, 8.4 mm, 11.2 mm ve 14 mm değerleri için 0° - 75° geliş açısı aralığına göre paralel kutuplanmış dalga için yansıma katsayıları hesaplanmıştır (Şekil 4.9).



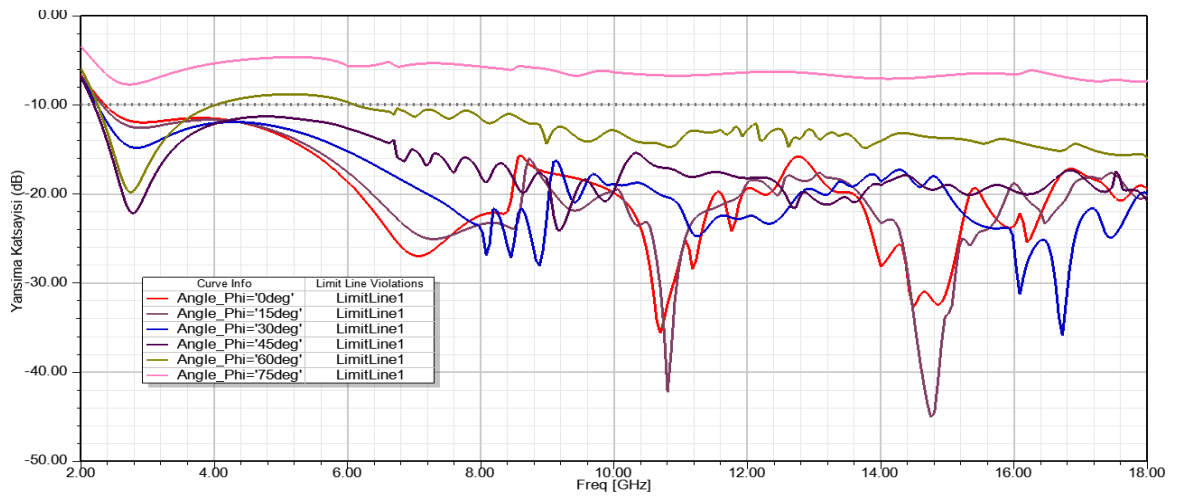
(a)



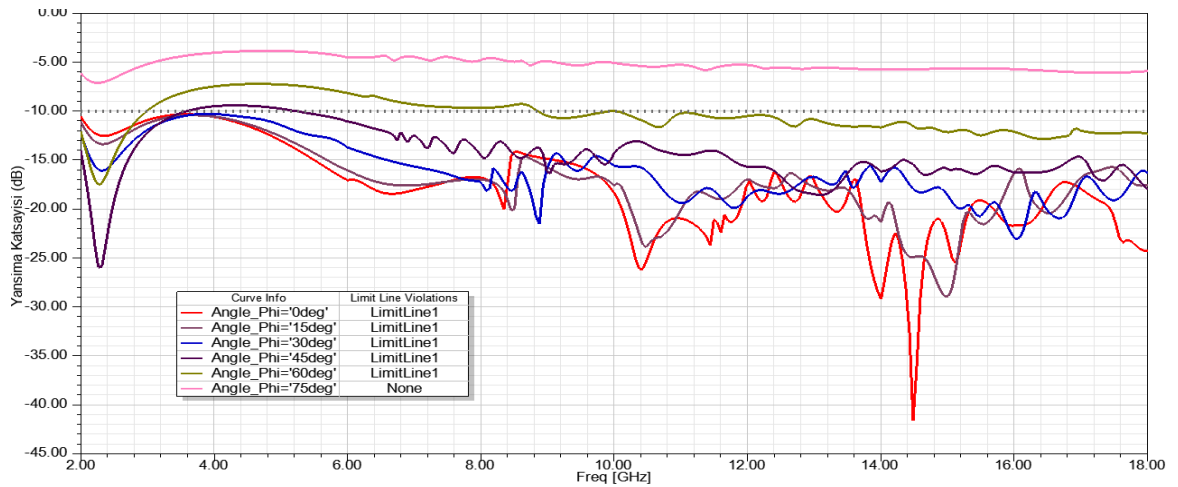
(b)



(c)



(d)

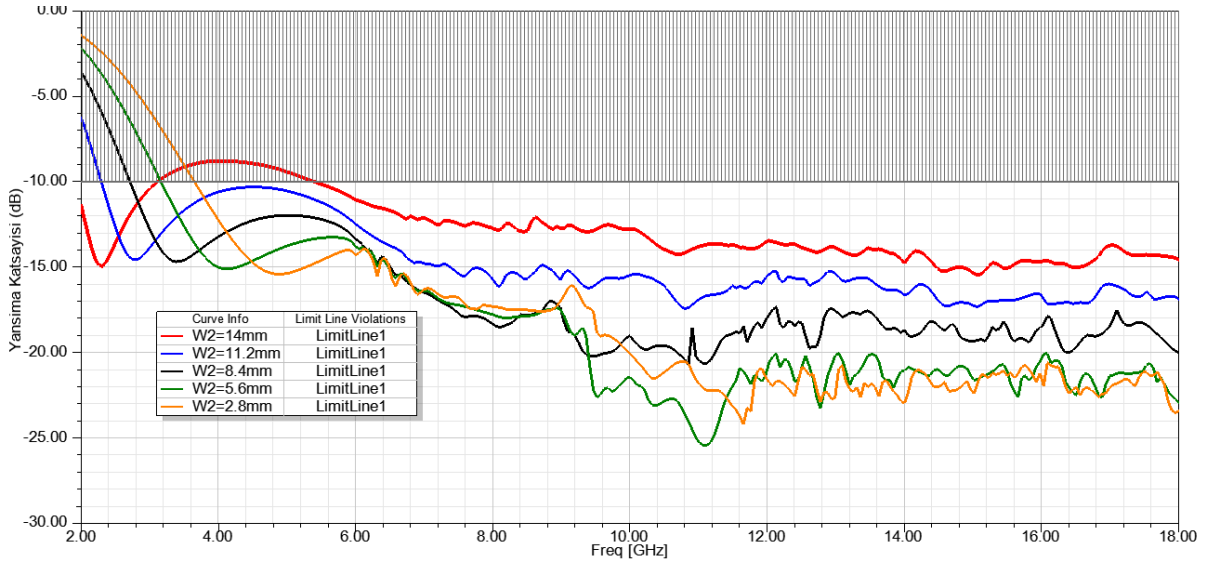


(e)

Şekil 4.9. RT/Duroid 5880 malzemesi kullanıldığı durumda, (a) $W2 = 2.8$ mm, (b) $W2 = 5.6$ mm, (c) $W2 = 8.4$ mm, (d) $W2 = 11.2$ mm, (e) $W2 = 14$ mm için farklı geliş açıları için paralel-kutuplanmış düzlem dalga için frekansa göre yansima katsayısı

Farklı geliş açılarına göre en uygun $W2$ değerinin belirlenebilmesi amacıyla, her bir $W2$ değeri için geliş açısına göre ortalama yansımaya katsayısı hesaplanmıştır (Şekil 4.10).

Düzlem dalga geliş açısında göre ortalama yansımaya katsayısının -10 dB limit doğrusunun üzerindeki alanın en az olduğu durumun $W2 = 11.2$ mm olduğu görülmüştür. Yansımaya katsayısının -10 dB limit doğrusunun üzerindeki maksimum değerinin en az olduğu durumun ise $W2 = 14$ mm olduğu görülmüştür. $W2 = 5.6$ mm için ortalama yansımaya katsayısı 3 - 9 GHz arasında -10 dB'nin altında, 9 - 18 GHz arasında ise -20 dB'nin altında değerler almıştır. $W2 = 11.2$ mm için ise, yansımaya katsayısının 2.4 - 18 GHz arasında -10 dB altında değerler aldığı görülmüştür. Soğurucu yapının kullanılacağı uygulamaya göre ilgilenilen frekans bandı ve önlem alınması gereken düzlem dalga geliş açıları farklı olacağından seçilmesi gereken en uygun kesik piramit eleman geometrisi farklılık gösterecektir. Tez kapsamında en kötü durumu temsil eden dik gelen düzlem dalga için en iyi sonucu (Şekil 4.3) veren durum ($W2 = 14$ mm) seçilmiştir.

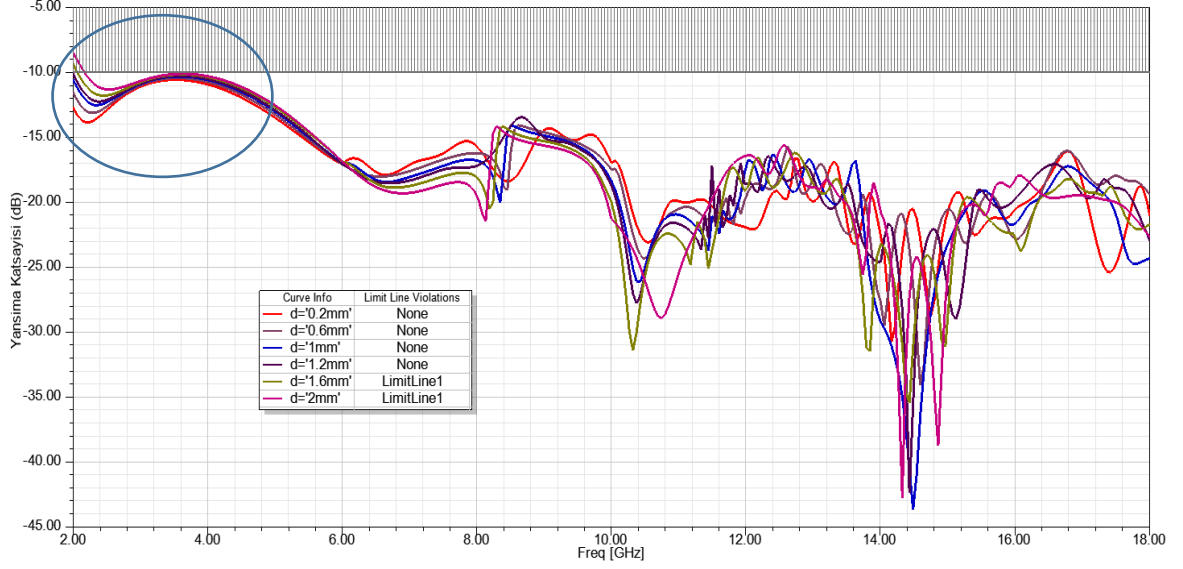


Şekil 4.10. RT/Duroid 5880 malzemesi kullanıldığı durumda, farklı $W2$ değerleri için paralel-kutuplanmış düzlem dalganın geliş açısına göre ortalama yansımaya katsayısı

4.2.3. Farklı Kesik Piramitler Arası Aralıkları (d) için Yansımaya Katsayısı Analizi

Bölüm 4.2.1 ve 4.2.2'de gerçekleştirilen eniyileme analizleri sonucunda RT/Duroid malzemesinin kullanıldığı ve $W2 = 14$ mm olduğu durum tasarlanacak kesik piramit için seçilmiştir.

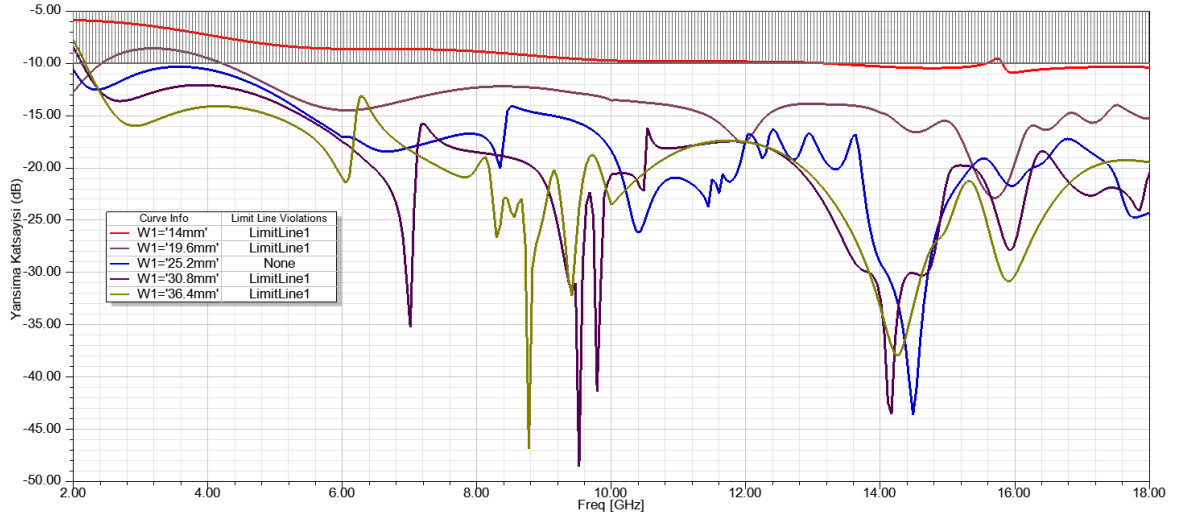
$W2 = 14$ mm için, kesik piramit elemanlar arası aralığın (d) (Şekil 4.1) yansımaya etkisini gözlemlemek amacıyla parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrik analizler sonucunda aralığın $d = 0 - 1.2$ mm arasında değerler aldığı durumda yansımaya katsayısının 2 - 18 GHz frekansları arasında -10 dB'nin altında seyrettiği görülmüştür. Bu bağlamda takip eden parametrik analizlerde aralığın başlangıç değeri olan $d = 1$ mm seçilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Arlon TC600 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı kesik piramit aralıklarına göre (d) dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı

4.2.4. Kesik Piramit Alt Yüzey Kenar Boyutuna ($W1$) göre Yansım Katsayısının Hesaplanması

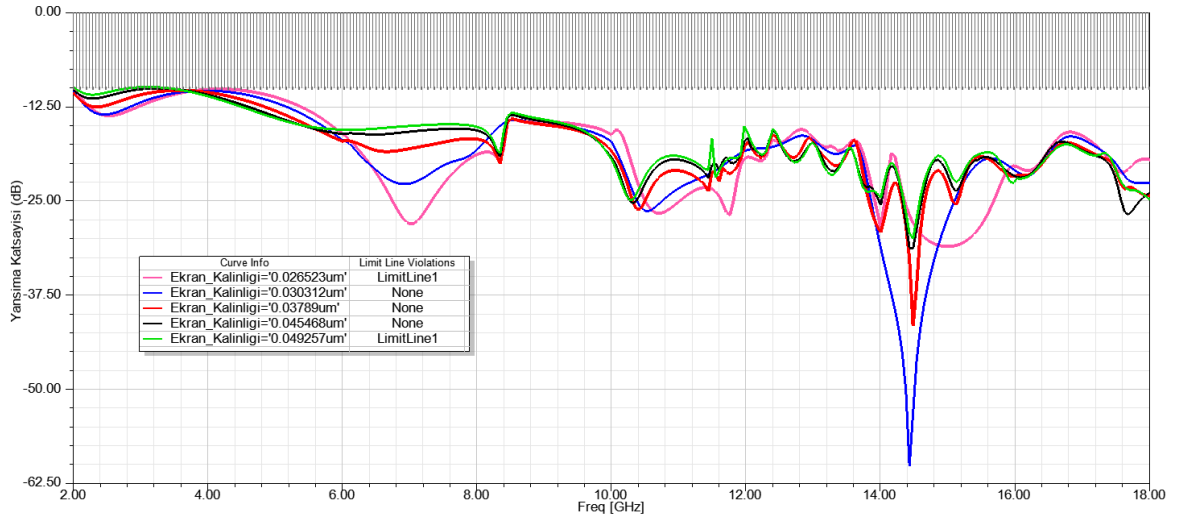
Kesik piramit üst yüzey kenar boyutunu ($W1$) sabit tutmak koşuluyla, alt yüzey kenar boyutunun parametrik analizi gerçekleştirilmiştir. Parametrik analiz sonuçlarına bakıldığında, limit doğrusunun üzerine çıkmayan tek grafiğin başlangıç değeri olan $W1 = 25.2$ mm olduğu görülmüştür (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Arlon TC600 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı $W1$ değerleri için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansım katsayısı

4.2.5. Dirençli Film Kalınlığının Parametrik Analizi

Dirençli film kalınlığı nanometre mertebelerindedir ve yansım katsayısının kalınlık değişimlerinden ne kadar etkilendiğini gözlemlemek amacıyla dirençli film kalınlığının parametrik analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı dirençli film kalınlıkları için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansım katsayısı

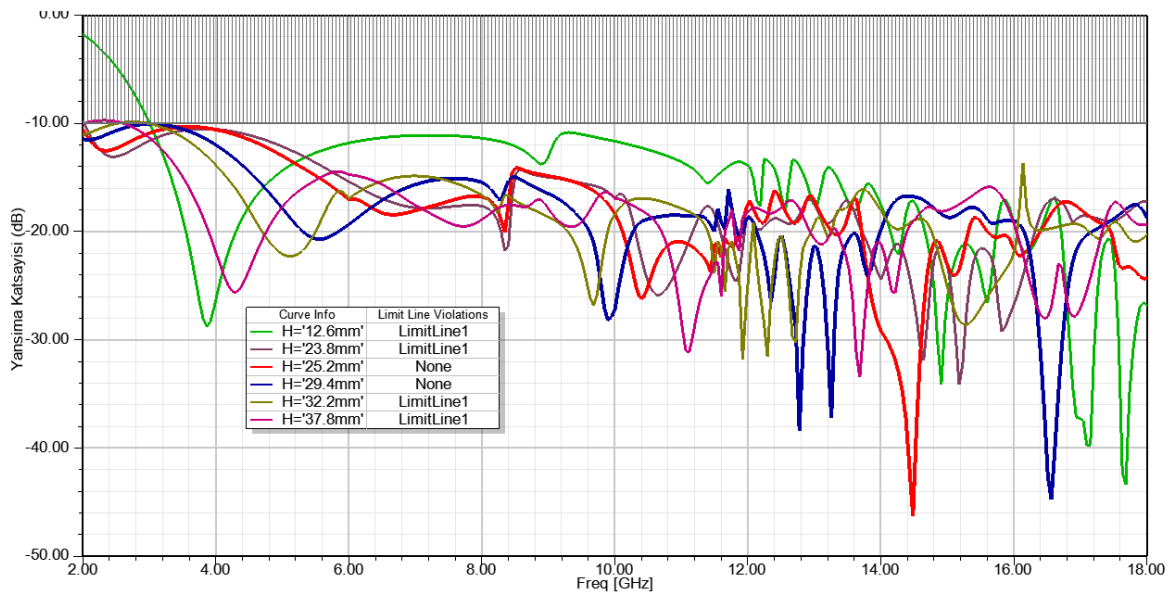
Analiz sonuçları değerlendirildiğinde dirençli film kalınlığındaki $\pm\%50$ değişiklik, yansımaya katsayısının bazı frekans aralıklarında -10 dB'nin biraz üzerine çıktığı görülmektedir. Fakat dirençli film kalınlığındaki değişimin $\pm\%20$ olduğu durumda yansımaya katsayısının -10 dB'nin altında kalmaya devam ettiği görülmektedir (Şekil 4.13).

4.2.6. Kesik Piramit Yüksekliğinin (H) Parametrik Analizi

Radar soğurucu malzemelerinin yansımaya katsayısının düşük olması kadar yapının uygulanabilir inceliğe sahip olması da önemlidir. Toplam soğurucu yapı kalınlığının yansımaya katsayısına etkisini gözlemlemek amacıyla diğer değişkenler sabit tutulmak koşuluyla kesik piramit geometrisinin yüksekliğinin (H) parametrik analizi gerçekleştirilmiştir. Dirençli filmler arası mesafe $T=H/9$ olacak şekilde parametrik analize dâhil edilmiştir.

Parametrik analiz sonuçları değerlendirildiğinde 25.2 mm'den daha küçük yükseklikler için 2 GHz etrafında yansımaya katsayısının arttığı görülmektedir (Şekil 4.14).

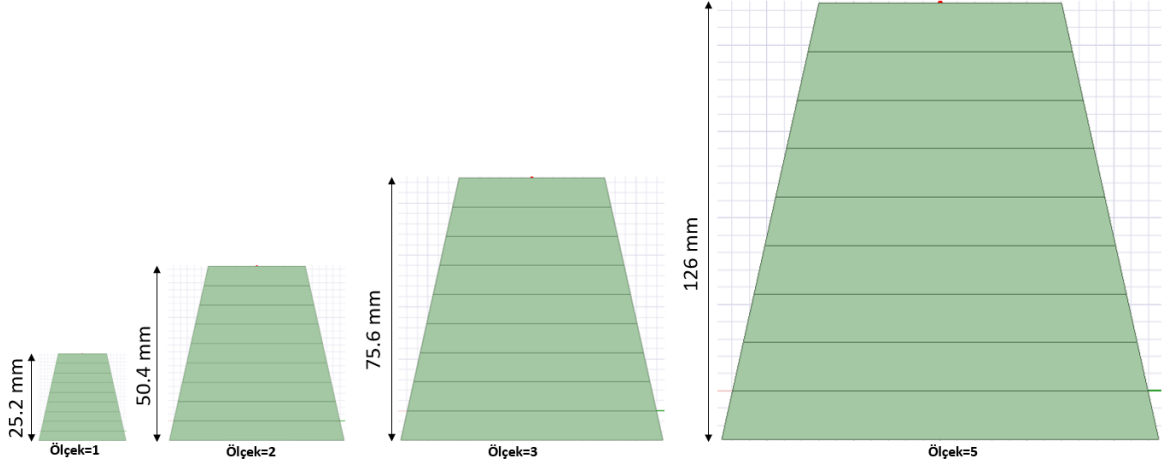
Daha büyük kesik piramit yükseklikleri için yansımaya katsayısının düştüğü frekans bölgeleri olsa da soğurucunun tasarımın -10 dB altında yansımaya katsayısına sahip mümkün olan en ince katman kalınlığına sahip yapı hedeflendiğinden; kesik piramit yüksekliği 25.2 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 4.14. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, farklı kesik piramit yükseklikleri (H) için dik gelen düzlem dalga için frekansa göre yansımaya katsayısı

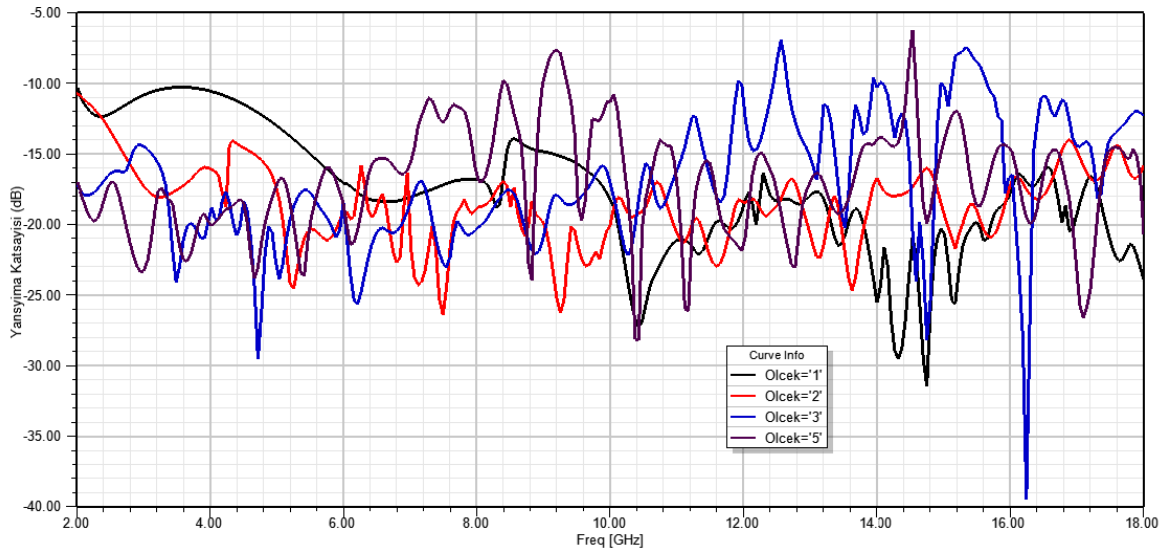
4.2.7. Farklı Kesik Piramit Boyutlarına göre Yansıma Katsayısı Analizi

İlk olarak kesik piramit elemanları, toplam dirençli film sayısı değiştirilmeden 2, 3 ve 5 kat büyütülerek yeniden boyutlandırılmıştır (Şekil 4.15).



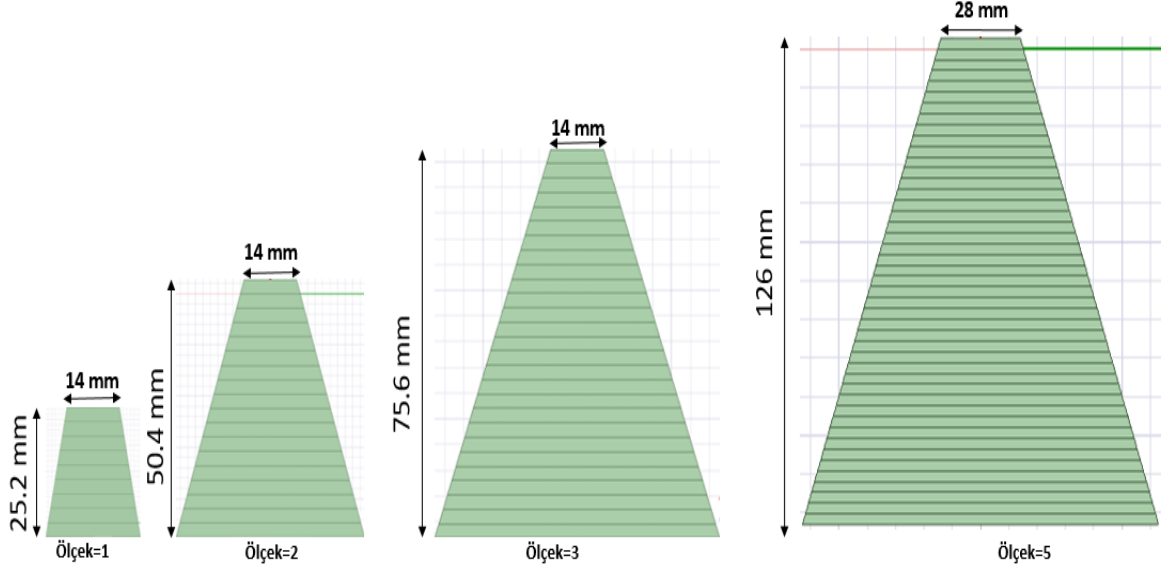
Şekil 4.15. Toplam dirençli film sayısı değiştirilmeden yeniden boyutlandırılmış kesik piramit eleman geometrileri

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde kesik piramit elemanı 2 kat büyütüldüğünde 2 - 18 GHz frekansları arasındaki yansıma katsayısının genel olarak azaldığı ve 3 ve 5 kat büyütüldüğünde ise yansıma katsayısının bazı frekanslarda arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.16).



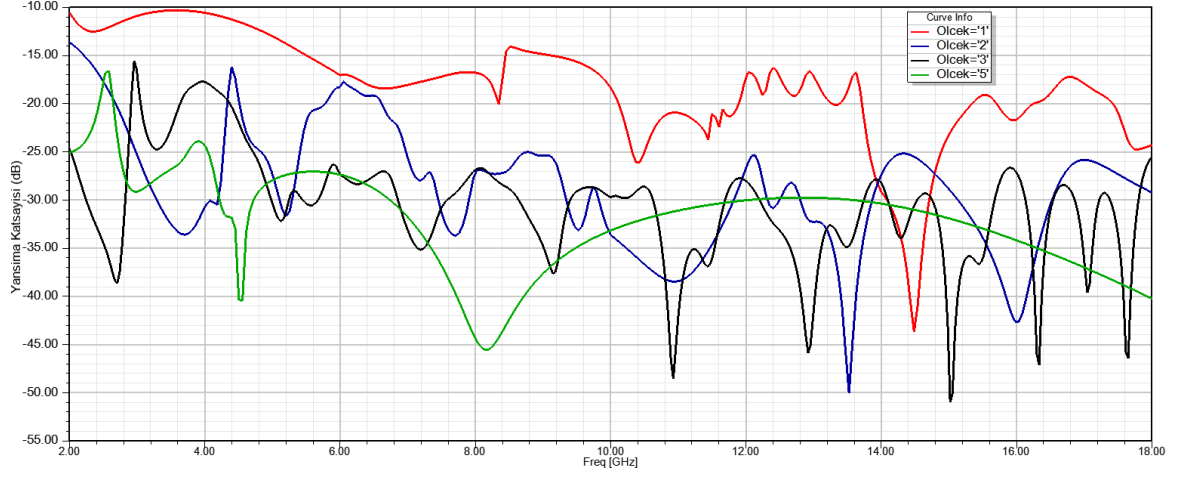
Şekil 4.16. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, (dirençli film sayısı sabit tutulduğunda) farklı kesik piramit eleman boyutlarına göre dik gelen düzlem dalga için yansıma katsayısı

Daha sonra kesik piramit elemanları, dirençli filmler arası mesafe değiştirilmeden (dirençli film sayısı da büyütme oranı ile aynı oranda artırılarak) 2, 3 ve 5 kat büyütülerek yeniden boyutlandırılmıştır ve her bir eleman boyutu için ayrı ayrı parametrik analizler gerçekleştirilerek en uygun W2 değerleri tespit edilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Dirençli filmler arası mesafe değiştirilmeden yeniden boyutlandırılmış kesik piramit eleman geometrileri

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, dirençli film sayısının büyütme oranıyla aynı oranda artırıldığı durumda, kesik piramit eleman boyutu arttıkça 2 - 18 GHz frekans bandındaki yansımaya katsayısı azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.18). Kesik piramit eleman boyutları 5 kat büyütüldüğünde yansımaya katsayısının 3 - 18 GHz arasında -25 dB'nin altında olduğu ve maksimum yansımaya katsayısının -16 dB olduğu görülmüştür.



Şekil 4.18. RT/Duroid 5880 malzemesinin kullanıldığı durumda, (dirençli filmler arası mesafe sabit tutulduğunda) farklı kesik piramit eleman boyutlarına göre dik gelen düzlem dalga için yansımaya katsayısı

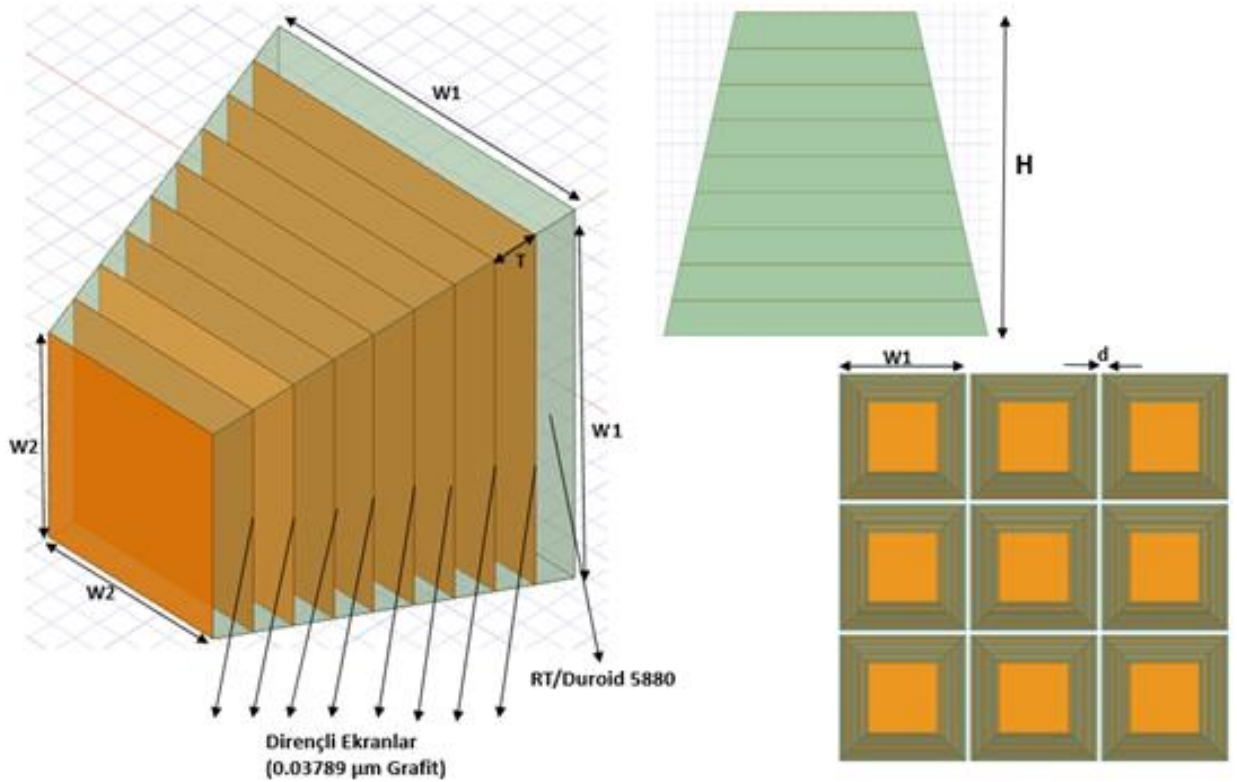
Soğurucu yapının kullanılacağı uygulamanın gereksinimleri karşılandığı müddetçe, daha yüksek bastırma oranları için daha büyük kesik piramit elemanları dolayısıyla daha kalın soğurucu katmanlar seçilebilmektedir. Örneğin elektromanyetik girişim ölçümleri için kullanılan yansımaz odalarda kullanılan kesik piramit soğurucular 15-45 cm yüksekliğe sahip olabilmektedir. Radar soğurucu yapı askeri ve sivil platformlarda kullanıldığı durumlarda radar soğurucu yapının bastırma oranı kadar inceliği de önemlidir. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ile 2 -18 GHz frekans bandında -10 dB'nin altında yansımaya katsayısına ve mümkün olan en ince katman kalınlığına sahip soğurucu tasarımı amaçladığından nihai tasarım olarak Bölüm 4.3'te özellikleri verilen radar soğurucu yapı seçilmiştir.

4.3. Nihai Tasarım

Bölüm 3 ve Bölüm 4'te elde edilen analiz sonuçları değerlendirildiğinde, 2 -18 GHz frekans bandında -10 dB'nin altında yansıma katsayısına ve mümkün olan en ince katman kalınlığına sahip nihai kesik piramit soğurucu dizisinin özellikleri belirlenmiştir (Çizelge 4.3 ve Şekil 4.19).

Çizelge 4.3. Nihai Kesik Piramit Soğurucu Dizisinin Özellikleri

| Kullanılan Dielektrik | $W1$ (mm) | $W2$ (mm) | H (mm) | T (mm) | d (mm) |
|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------------|-------------------------|----------|
| RT/Duroid 5880 | 25.2 | 14 | 25.2 | 2.8 | 1 |
| Kullanılan Dirençli Film | Kullanılan Katman Sayısı | | Kalınlığı (μm) | Kitle İletkenliği (S/m) | |
| Grafit | 9 | | 0.03789 | 70,000 | |



Şekil 4.19. Nihai kesik piramit radar soğurucu dizisi tasarımı

4.4. Nihai Radar Soğurucu Tasarımının Üretilmesi

Radar soğurucu yapıların soğuruculuk özelliğini kullanılan malzemelerin elektriksel özellikleri; tasarlanan soğurucu yapının üretilebilirliği ve üretim teknolojisini ise tasarımda kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlemektedir. Tezde gerçekleştirilen nihai tasarımın üretimi ve platforma uygulanması sürecinde göz önünde bulundurulması gereken üç husus bulunmaktadır:

- Dielektrik malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri
- Soğurucu dizi elemanlarının ve soğurucu dizinin 3-boyutlu üretimi
- Dirençli filmin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kalınlığı ve kaplanacağı alttaş malzemeye uygulanabilirliği

Kullanılan dielektrik malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri 3-boyutlu şekillendirme için kullanılacak teknoloji için önemlidir. Dielektrik malzemenin termoplastik özelliğe sahip olması şekillendirmede 3-boyutlu yazıcıların veya kalıba-döküm teknolojilerinin kullanımına olanak sağlayacaktır. Dielektrik malzeme termoset özelliğe sahip ise baskı makinelerinin, talaşlı imalat ve lazer-kesim teknolojilerinin kullanımını gerektirecektir [38]. Dolayısıyla soğurucu dizi elemanlarının ve soğurucu dizinin 3-boyutlu üretimi ve platforma uygulanması kullanılan dielektrik malzemenin fiziksel özelliğine göre değişiklik gösterecektir.

4.4.1. İnce Film Kaplama Teknikleri

Tezde gerçekleştirilen tasarımda, üretilebilirliği ve kullanılacak üretim teknolojisini belirleyecek en kritik husus dirençli filmin üretimi ve dielektrik alttaş üst yüzeyinin bu film ile kaplanmasıdır. İnce film kaplama ve üretim teknolojileri kaplanacak dielektrik malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliğine ve kaplama malzemesinin kalınlık gereksinimi ve kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre farklılık göstermektedir. İnce film kaplama teknikleri temel olarak; Buhar Fazda Büyütme, Sıvı Fazda Büyütme ve Katı Fazda Büyütme olarak üçe ayrılmaktadır [39].

Buhar Fazda Büyütme tekniği Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB) ve Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) olacak şekilde ikiye ayrılır. FBB tekniği, vakum veya asal gaz ortamında buharlaştırma ve sıçratma yöntemleri ile kaplama malzemesinin buharlaştırılarak, buharlaştırma kaynağından daha uzak ve soğuk bir ortamda bulunan alttaş malzemenin üzerinde yoğunlaşarak kaplanması prensibine

dayanmaktadır [39]. Kaplama fiziksel olarak gerçekleştiğinden kaplanacak malzemenin kimyasal özelliklerinden bağımsız olarak kaplama yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Kaplama sürecini en çok etkileyecek etmen kaplama malzemesinin buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklıklarıdır. KBB ise ısıtılmış alttaş malzeme yüzeyindeki atom/moleküllerin ortamda bulunan iyon taşıyıcı gaz ile tepkimeye girerek katı bir kaplama yüzeyi elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Sıvı Fazda Büyütme teknikleri ise sol-jel, kimyasal banyo ve elektrokimyasal yöntem olacak şekilde e ayrılır. Sol-jel tekniği ısıtılmış yüzeyin üzerine uygulanan sıvı kaplama malzemesinin kısa süre içerisinde jelleşmesi prensibine dayanmaktadır. Sıvı kaplama malzemesi daldırma ve püskürtme gibi yöntemle uygulanır. Katman kalınlığını kullanılan kaplama malzemesinin akışkanlığı, sıcaklığı ve jelleşme süresi belirler. Kimyasal banyo tekniği kaplama sıvısına daldırılan malzemenin st yüzeyindeki moleküllerin sıvı ile kimyasal tepkimeye girmesiyle katı kaplama oluşması prensibine dayanmaktadır. Elektrokimyasal yöntem ise elektroliz vb. yöntemleri kapsamaktadır. Katı Fazda Büyütme daha az tercih edilen bir yöntem olmakla birlikte, yüzey aşındırma ve devitrifikasyon olarak ikiye ayrılır [39].

4.4.2. İletken Kaplama Malzemeleri

Kaplama malzemeleri çok geniş bir aileye sahiptir. Bu bölümde elektriksel olarak iletken özelliğe sahip kaplama malzemelerinden bahsedilecektir: düşük erime sıcaklığına sahip yumuşak metaller, karbürler, metal oksitler, elmas ve elmas benzeri karbon ve iletken polimerler [40].

Ag, Pb, Au, In, Sn, Ni, Cu gibi erime sıcaklığı düşük metallerin kaplama olarak kullanımında elektrokimyasal yöntem ve FBB gibi yöntemler kullanılabilir. Yüksek elektrik iletkenliğinin gerektiği uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

HfC, TaC, NbC, ZrC, TiC gibi karbürler düşük elektrik iletkenliğe ve yüksek sertlik değerine sahip seramik bileşiklerdir. Sol-gel ve KBB gibi kaplama yöntemleri ile kaplama gerçekleştirilebilmektedir.

NiO, CuO, CuO₂ gibi metal oksitler elektrik iletkenliğe sahiptirler ve yarı iletken teknolojileri ve ince film uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Kimyasal banyo, FBB, KBB gibi kaplama yöntemleri ile kaplama gerçekleştirilebilmektedir.

Polipirol ve polianilin gibi iletken polimerler elektriksel olarak iletken yapıya sahip, kolay uygulanabilmesi ve FBB kaplama yöntemi ile üretilmesi sebebiyle tercih edilen kaplama malzemeleridir.

Elmas doğada bilinen en sert malzeme olarak bilindiğinden kaplama malzemesi olarak doğrudan kullanıma uygun değildir. Belirli sıklıklarla ve grafit ile beraber kullanıldığında FBB kaplama yöntemleri ile kaplama gerçekleştirilebilmektedir.

4.5. Dirençli Filmlerin Nihai Tasarımda Kullanımı

Bölüm 2.2.4'te anlatıldığı üzere tez ince film yapıların dirençli film olarak kullanabilmesi için gerekli olan kalınlık ile kaplama malzemesini elektrik iletkenliği arasında ters orantı bulunmaktadır (Eşitlik 2.24). Diğer bir ifadeyle, kullanılan kaplama malzemesinin elektrik iletkenliği arttıkça gerekli film kalınlığı azalacak ve kaplama süreci zorlaşacaktır. Elektrik iletkenliği azaldıkça gerekli film kalınlığı artacak, bu durum sürecinin kolaylaşmasına neden olurken kesik piramit soğurucu elemanlarının geometrik yapısında ise bozulmaya sebep olacaktır. Tez kapsamında gerçekleştirilen analizlerde dirençli filmler 2-boyutlu sınır koşullarıyla tanımlandığından kalınlığın etkisi incelenmemiştir.

Çizelge 4.4'te bahsedilen karbür kaplama malzemelerinin elektrik iletkenliği göz önünde bulundurulduğunda, gerekli kaplama kalınlıklarının mikrometre mertebelerinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.4. Karbür kaplama malzemelerinin elektrik iletkenliği ve gerekli kaplama kalınlıkları

| Malzeme | C | HfC | TaC | NbC | ZrC | TiC |
|---|---|-----------|-----|-----|---------|------|
| Kitle İletkenliği (S/m) | - | 220-270 | 400 | 270 | 180-220 | 95 |
| Gerekli Kaplama Kalınlığı (μm) ($Z_s=377 \Omega$ için) | - | 9.8 -11.9 | 6.6 | 4.7 | 8.0-9.8 | 27.9 |

*: "http://www.ultramet.com/images/refrac_carbides1.png" deki değerlerden faydalanılmıştır.

İletken polimer malzemelerin elektrik iletkenliği göz önünde bulundurulduğunda ise gerekli katman kalınlıklarının nanometreden mikrometre mertebelerine kadar değişiklik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. İletken polimer kaplama malzemelerinin elektrik iletkenliği ve gerekli kaplama kalınlıkları [41]

| Malzeme | Kitle İletkenliği (S/m) | Gerekli Kaplama Kalınlığı (μm) ($Z_s=377 \Omega$ için) |
|------------------------------|-------------------------|---|
| Poliasetilen (PA) | 20000-100000 | 0.13-0.027 |
| Poliparafenilen (PPP) | 50000 | 0.054 |
| Poliparafenilen sülfid (PPS) | 300-30000 | 8.84-0.088 |
| Poliparavinilen (PPv) | 100-100000 | 26.5-0.027 |
| Polipirol (PPy) | 4000-20000 | 0.66-0.13 |
| Politiyofen (PT) | 1000-10000 | 2.65-0.27 |
| Poliizotiyonaften (PITN) | 100-5000 | 26.5-0.54 |
| Polianilin (PANI) | 500 | 5.4 |

Grafit malzemesini elektrik iletkenliği sentezleme tekniğine ve kristal yapısına göre 25,000 S/m 'den 125,000 S/m'ye değişmektedir [42,43]. Bu da gerekli film kalınlığının 20 nanometre ile 0.1 mikrometre arasında olabileceğini göstermektedir (Eşitlik 2.24).

Bakır oksit (CuO ve CuO_2) ve Nikel oksit'in (NO) elektrik iletkenliği sıcaklığa, kullanılan alttaşa ve üretiliş yöntemine göre değişiklik göstermektedir [44,45,46].

4.6. Sonuç

Bölüm 4.4.1 ve 4.4.2'de açıklandığı üzere, grafit malzemesi, kayıplı elektrik iletken özelliğe sahip olduğundan ve PVD yöntemleri kullanarak kaplanabildiğinden dirençli film olarak kullanılmaya müsaittir.

Dirençli filmlerin soğurucu dizi elemanlarında kullanımı, soğurucu dizinin üretimi ve platforma uygulanması ayrı bir araştırma konusu olarak ele alınmış olup tez kapsamında incelenmemiştir. Kullanılacak üretim teknolojisi tasarımda kullanılacak malzeme seçimini etkileyecek, bu da nihai tasarımın boyutlarını etkileyecektir. Bu durumda Bölüm 4'te yer alan yöntemler kullanılarak üretime hazır tasarımlar gerçekleştirilebilecektir.

5. SONUÇLAR VE İRDELEME

Bu tez iki temel amaç üzerine bina edilmiştir. Birincisi Dallenbach tabakası, Salisbury tabakası ve piramit soğurucu gibi temel radar yapıların soğurma özelliklerinin tek bir soğurucu yapıda birleştirilmesi iken, ikincisi düşük kayıplı dielektrik malzemeler kullanılarak ince radar soğurucu yapının tasarlanmasıdır.

Bu iki amacın gerçekleştirilebilmesi için, öncelikle Bölüm 2’de yer verilen bilgiler ışığında, temel radar soğurucu yapıların farklı katman sayıları ve fiziksel boyutları için parametrik olarak analiz edilmesi gerekmektedir.

Bölüm 3’te ANSYS HFSS® yazılımı kullanılarak temel radar soğurucu yapıların Bölüm 3.1’de açıklanan modelleme yöntemi kullanılarak parametrik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3.2’de, boşluk-dielektrik ara yüzünün yansımaya katsayısı, boşluk ve dielektrik arasında uyumlaştırma katmanı kullanıldığı durumdaki yansımaya katsayısı ile kıyaslandığında, uyumlaştırma katmanının amacına uygun olacak şekilde yansımayı -60 dB ’ye kadar düşürdüğü ve iletim (geçirgenlik) katsayısının ise 0 dB olduğu gözlemlenmiştir.

Bölüm 3.3’te 1, 2 ve 3 katmanlı Dallenbach tabakasının her katmanının başlangıç kalınlıkları dielektrik içerisindeki dalga boyunun dörtte biri seçildiğinde, tek katmanlı Dallenbach tabakası için minimum yansımaya katsayısının hedeflendiği 1 GHz frekansının biraz üzerinde bir frekansta rezonans görülmüştür. Parametrik analizler sonucunda 1 GHz’te minimum yansımaya katsayısı sonucunu veren kalınlık değeri hesaplanabilmiştir. 2 ve 3 katmanlı Dallenbach tabakalarının her bir katmanının başlangıç kalınlık değerlerine göre analiz gerçekleştirildiğinde, yansımaya katsayısı grafiğini 1 GHz etrafında bir minimuma sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Çok katmanlı Dallenbach tabakalarının katman kalınlıklarının tek katmanlı Dallenbach tabakasında olduğu gibi dalga boyunun dörtte biri olmaması gerektiği sonucu çıkartılarak, her bir katman kalınlığı için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Fakat çok katmanlı Dallenbach tabakasının seçilen bu başlangıç kalınlıkları için beklenen sonucu vermediği gözlemlenmiştir. Parametrik analizler sonucunda her bir Dallenbach tabakası için gerekli katman kalınlıkları hesaplanmış ve 1 GHz’te rezonans görülmüştür. Bölüm 3.3.2’de önceki bölümlerde elde edilen 1,2 ve 3 katmanlı Dallenbach tabakalarının radar kesit alanı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir

ve yansıma katsayısı ile radar kesit alanı bastırma oranları arasında ciddi bir benzerlik görülmüştür.

Bölüm 3.4'te gerçekleştirilen Salisbury tabakası analizleri sonucunda, merkez frekansı ve tek katlarında rezonans frekansları görülmüştür. Katman kalınlığının rezonans frekansını kaydırıldığı, fakat yansıma katsayısının genliğine ve merkez frekanstaki bağıl bant genişliğine etkisinin olmadığı görülmüştür. Dirençli film ve iletken yüzey arasında hava yerine dielektrik bir malzeme kullanıldığında katman kalınlığının azalmasına karşılık yansıma katsayısının ve bant genişliğinin düştüğü gözlemlenmiştir. Kullanılan dielektrik malzeme kayıplı bir malzemedен seçildiği takdir de ise dirençli film ile kayıplı iletken arasında elektriksel iletimin varlığı yansıma katsayısının düşmesine fakat bant genişliğinin artmasına sebep olmuştur. Çok katmanlı Salisbury katmanlarının birinci rezonans frekansının tek katları etrafında minimum yansıma katsayısına sahip olduğu ve rezonans frekanslarındaki yansıma katsayısının düşmesine karşılık bant genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

Bölüm 3.5'te teze konu alan tasarımın öncesinde kayıplı farazi bir malzemedен oluşan Dallenbach tabakası, kare prizma, piramit ve kesik piramit dizisinin analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, bağıl elektrik geçirgenliği 4.4 ve dielektrik kayıp tanjantı 2 olan bir malzeme kullanılarak tasarlanan kesik piramit dizisinin 3 - 18 GHz frekans aralığında -10 dB'nin altında yansıma katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Tezin ana amaçlarından birinin de düşük kayıplı dielektrik malzemeler kullanılarak radar soğurucu yapı tasarımı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, kayıp tanjantı 2 olan bir malzeme yerine aynı elektriksel özellikte olan birleşik bir yapıya gitme gerektiği sonucunu varılmıştır.

Bölüm 4'te Bölüm 3.3, 3.4 ve 3.5'te elde edilen sonuçlar ışığında, üç yapıyı da barındıran radar soğurucu tasarımı hedeflenmiştir. Bölüm 3.5'ten yola çıkılarak soğurucu dizisinin elemanları kesik piramit olarak seçilmiştir. Katman kalınlığı ilgili frekans bandının en düşük frekansındaki dalga boyunun dörtte biri olarak seçilmiştir. Bölüm 3.4'ten yola çıkılarak, rezonans frekansındaki çok düşük yansıma katsayısına sahip olması sebebiyle, piramit elemanların yatay kesitlerine belirli aralıkla grafit malzemedен oluşan dirençli filmler yerleştirilmiştir. Bant genişliğini artırmak amacıyla katman sayısı 9 olarak seçilmiştir. Filmler arası mesafe ilgili frekans bandının en yüksek frekansındaki dalga boyunun dörtte biri olarak seçilmiştir. Bölüm 3.3'ten yola çıkılarak, piramit elemanlarda düşük kayıplı dielektrik

malzemeler kullanılmıştır. Her bir elemanın kendi içinde bir Dallenbach tabakası olduğu ve her bir dirençli filmin altındaki dielektrik katmanla beraber kendi içinde birer Salisbury tabakası olduğu düşünülmüştür. Bu bölümde Duroid, FR4 Epoksi ve Arlon malzemeleri için ayrı ayrı parametrik analizler gerçekleştirmiş ve her bir malzeme için en uygun yansıma katsayısına sahip grafikler kıyaslandığında, 2 - 18 GHz frekans aralığında minimum yansıtıcılığa sahip tasarımın Duroid malzemesinin kullanıldığı tasarım olduğu gözlemlenmiştir. Duroid malzemesinin kullanıldığı tasarımın, katman kalınlığı, alt ve üst yüzey kenar boyutları, elemanlar arası uzaklık gibi boyutlarının yansıma katsayısına etkisini gözlemlemek amacıyla parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda 25.2 mm kalınlığa sahip Duroid kesik piramit soğurucu dizisinin 2 - 18 GHz bandında -10 dB'nin altında yansıma katsayısına sahip olduğu ve tasarım ölçütünün yakalandığı görülmüştür.

Radar soğurucu yapıların askeri platformlarda kullanımı söz konusu olduğunda, soğurucu yapının geniş bantlı, düşük yansıtıcılığa sahip ve mümkün oldukça ince olması gerekmektedir. Soğurucu yapının kalınlığı azaldıkça düşük frekanslardaki yansıma katsayısı artacak, dolayısıyla bant genişliği de azalacaktır. Bant genişliğinin artırılabilmesi ve yansıma katsayısının düşürülmesi ise yüksek kayıplı malzemelerin kullanılması veya soğurucu yapının toplam kalınlığının artırılmasıyla mümkün olabilmektedir. Yaklaşık 3 cm kalınlığa sahip yüksek kayıplı ferrit birleşik malzemelerden oluşan yapılar kullanılarak 2 - 18 GHz frekans bandında -20 dB altında yansıma katsayısına sahip radar soğurucu yapılar tasarlanabilmektedir [47]. Tez kapsamında elde edilen 2.5 cm kalınlığa sahip nihai tasarımda kullanılan dielektrik malzemeler düşük kayıplı özelliğe sahip olmakla beraber 2 - 18 GHz frekans bandında -10 dB ve -45 dB arasında yansıma katsayısına sahiptir. Elektromanyetik uyumluluk laboratuvarlarında sıklıkla kullanılan piramit soğurucular 15 cm ile 45 cm arasında yüksekliğe sahip olabilmektedir. Ticari olarak kullanılan TDK IP-045C radar soğurucu yapının yüksekliği 45 cm olup 2 - 18 GHz frekans bandında -30 dB altında yansıma katsayısına sahiptir [48]. Karbon ile doldurulmuş köpük malzeme kullanılarak tasarlanan yaklaşık 45 cm yüksekliğe sahip tek katlı ve üst üste dizili piramit soğurucular kullanıldığında bile ortalama yansıma katsayısı 8-12 GHz frekans bandında sırasıyla -21 dB ve -26 dB seviyelerinde olabilmektedir [48]. Bu tezde tasarlanan nihai kesik piramit radar soğurucu dizisinin kalınlığı 2.5 cm olup, 2 - 18 GHz frekans bandında -18 dB ortalama yansıma katsayısına sahiptir.

Her bir kesik piramit eleman boyutu 5 kat artırıldığında toplam yapı kalınlığı 12.5 cm olup, 3 – 18 GHz arasındaki yansımaya katsayısının -25 dB'nin altında olduğu ve 2 - 18 GHz aralığında ortalama yansımaya katsayısının -32 dB olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ve mevcut radar soğurucu tasarımları ile kıyaslandığında, daha düşük kalınlığa ve yansımaya katsayısına sahip geniş bantlı radar soğurucu yapı tasarımlarında bu tezde gerçekleştirilen çalışmalardan faydalanılabileceği düşünülmektedir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan malzemelerin mekanik gerilim ve ısı özellikleri göz önünde bulundurulmamıştır. Nihai soğurucu dizisinin endüstriyel tasarımlarda malzemelerin bu ve diğer elektriksel olmayan özellikleri ve kullanılması gereken üretim teknolojileri de göz önünde bulundurulduğunda, yaygın kullanımlı malzemeler kullanılarak radar soğurucu yapıların geliştirilmesinde, tez içeriğinden faydalanılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca tasarlanan radar soğurucu yapının üretilebilirliği ve üretim teknolojisine uygun malzeme seçimi yapılan tasarımı etkileyecektir. Fakat tez kapsamında kullanılan yöntemler kullanılarak uygun radar soğurucu tasarımının gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir.

Gelecekte gerçekleştirilmesi planlanan akademik çalışmalarda nihai tasarımda elde edilen soğurucu dizisinin üretimi, platforma uygulanması, yansımaya katsayısının test ortamında ölçülmesi ve tez kapsamında gerçekleştirilen analiz sonuçlarının doğrulanması amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] P. Saville, *Review of Radar Absorbing Materials*. Atlantic: Defence Research & Development Canada, **2005**.
- [2] M. Faccioni, A. Raizer, and P. Kuo-Peng, "Wave Propagation Analysis using a New Three-dimensional TLM Cell," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 4, pp. 925–930, Jul. **2000**.
- [3] W. Wang and M. N. Vouvakis, "Fast Far-field Computations for Finite Element Domain Decomposition Method," in *2015 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, **2015**, pp. 78–78.
- [4] O. Borries, E. Jorgensen, and P. Meincke, "Monostatic RCS of Electrically Large Structures using Higher-order MLFMM," in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, **2017**, pp. 872–876.
- [5] B. Kolundzija, M. Tasic, and T. Sarkar, "Evaluation of Radar Cross Section of Large Platforms by the Method of Moment at PC Computers," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (IEEE Cat. No.02CH37313)*, **2002**, pp. 94–97.
- [6] O. P. Furse, C. M., Mathur, S. P. and Gandhi, "Improvements to the Finite-Difference Time-Domain Method for Calculating the Radar Cross Section of a Perfectly Conducting Target," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 7, pp. 919–927, Jul. **1990**.
- [7] Z. Yonghu, G. Lei, W. Liandong, and L. Jinliang, "Comparison Analysis of Calculation Results for Target Scattering Cross Section based on Feature Selective Validation," in *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, **2016**, pp. 1142–1145.
- [8] H. Severin, "Nonreflecting Absorbers for Microwave Radiation," *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 4, no. 3, pp. 385–392, Jul. **1956**.
- [9] W. H. Emerson, "Electromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers Through the Years," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 21, no. 4, pp. 484–490, Jul. **1973**.
- [10] K. J. Vinoy, *Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization*. Springer, **2012**.
- [11] N. V. Machinerieen, "FR Patent 802728," **1936**.
- [12] J. W. Tiley, "US Patent 2464006," **1944**.
- [13] O. M. Salati, "CA Patent 507981," **1954**.
- [14] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., **2000**.

- [15] L. J. du Toit and J. H. Cloete, "A design Process for Jaumann Absorbers," in *Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium*, **1989**, pp. 1558–1561.
- [16] E. Schweicher, "A Spectral Iteration Technique for Analyzing Scattering from Circuit Analog Absorbers," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 37, no. 10, pp. 1327–1332, **1989**.
- [17] E. Michielssen, J. Sajer, S. Ranjithan, and R. Mittra, "Design of Lightweight, Broad-Band Microwave," vol. 41, no. 617, pp. 1024–1031, **1993**.
- [18] P. Saville, *Optimisation of Dallenbach Layers using Real Materials*. Defence Research & Development Canada, **2007**.
- [19] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*. Addison-Wesley, **1989**.
- [20] W. Dallenbach, L; Kleinsteuber, "Reflection and Absorption of Decimeter-waves by Plane Dielectric Layers.," *Hochfreq. u Elektroak*, vol. 51, pp. 152–156, **1938**.
- [21] A. Fernandez and A. Valenzuela, "General Solution for Single-layer Electromagnetic-wave Absorber," *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 1, p. 20, **1985**.
- [22] C. G. Montgomery, R. H. Dicke, and E. M. Purcell, *Principles of Microwave Circuits*, 1st ed. New York: McGraw-Hill Book Co., **1948**.
- [23] J. L. Wallace, "Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 6, pp. 4209–4214, **1993**.
- [24] W. W. Salisbury, "US Patent 599944," **1952**.
- [25] J. Sajer, E. Michielssen, and R. Mittra, "Electromagnetic Scattering from Periodic Arrays on a Multilayered Cylindrical Surface," in *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, **1993**, pp. 1940–1943.
- [26] A. Charles, M. S. Towers, and C. Mccowen, "The Modelling of Jaumann Layers on General Scatterers in Two Dimensions," in *1996 Third International Conference on Computation in Electromagnetics (Conf. Publ. No. 420)*, **1996**, pp. 117–120.
- [27] C. Weng Cho, *Waves and Fields in Inhomogenous Media*. IEEE Press, **1999**.
- [28] A. J. Stoyanov, E. C. Fischer, and H. Überall, "Effective Medium Theory for Large Particulate Size Composites," *J. Appl. Phys.*, vol. 89, no. 8, pp. 4486–4490, Apr. **2001**.
- [29] Yohandri, D. Rianto, and A. Putra, "Study of Single layer Radar Absorber Material (RAM) Based on Coconut Shell Activated Carbon," in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, **2017**, pp. 1536–1539.

- [30] R. Kronberger and V. Wienstroer, "3D-printed FSS using printing filaments with enclosed metal particles," in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, **2017**, pp. 808–811.
- [31] M. Matsumoto and Y. Miyata, "Thin Electromagnetic Wave Absorber for Quasi-microwave Band Containing Aligned Thin Magnetic Metal Particles," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 6, pp. 4459–4464, **1997**.
- [32] S. Capaccioli, M. Lucchesi, P. A. Rolla, and G. Ruggeri, "Dielectric Response Analysis of a Conducting Polymer Dominated by the Hopping Charge Transport," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 10, no. 25, pp. 5595–5617, Jun. **1998**.
- [33] T. C. P. Wong, "Microwave Characterisation of Smart Saterials based on Conducting Polymer Composite Material," in *Tenth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP)*, **1997**, vol. 1, pp. 478–482.
- [34] T. C. P. Wong, "Characterisation of Conducting Polymer-loaded Composite Materials at Oblique Incidence and Their Application in Radar Absorbers," in *Ninth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP)*, **1995**, vol. 1, pp. 441–444.
- [35] T. C. Shami *et al.*, "Synthesis, Characterization and Performance Evaluation of Polyaniline based Composites for Electromagnetic Absorption," in *2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, **2016**, pp. 291–294.
- [36] Z. Feng, A. Huang, and H. He, "Wide-band Electromagnetic Wave Absorber of Rubber-ferrite," in *2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, **2002**, pp. 420–423.
- [37] Y. Yu, T. Deng, and Z. Shen, "Wideband 3D Frequency Selective Asorber based on Ferrite Absorber," in *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, **2017**, pp. 681–682.
- [38] J. T. Black, R. A. Kohser, and E. P. DeGarmo, *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*, 11th ed. John Wiley & Sons, **2012**.
- [39] S. Sönmezoğlu, M. Koç, and S. Akin, "İnce Film Üretim Teknikleri," *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 28, no. 5, pp. 389–401, **2012**.
- [40] F. Bülbül, "Sert ve Yumuşak Kaplamalar," *Ordu Univ. Bilim ve Teknol. Derg.*, vol. 4, no. 2, pp. 32–41, **2014**.
- [41] J. H. Collier, J. P. Camp, T. W. Hudson, and C. E. Schmidt, "Synthesis and Characterization of Polypyrrole-hyaluronic Acid Composite Biomaterials for Tissue Engineering Applications," *J. Biomed. Mater. Res.*, vol. 50, no. 4, pp. 574–584, Jun. **2000**.
- [42] J. D. Cutnell and K. W. Johnson, *American Institute of Physics Handbook*. Wiley, **1972**.

- [43] "Resistivity of Carbon, Graphite - The Physics Factbook." [Online]. Available: <https://hypertextbook.com/facts/2004/AfricaBelgrave.shtml>. [Accessed: 02-May-2018].
- [44] F. M. Li *et al.*, "Low Temperature (< 100 °c) Deposited P-type Cuprous Oxide Thin Films: Importance of Controlled Oxygen and Deposition Energy," *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 4, pp. 1278–1284, **2011**.
- [45] C. Park, J. Kim, K. Lee, S. K. Oh, H. J. Kang, and N. S. Park, "Electronic, Optical and Electrical Properties of Nickel Oxide Thin Films Grown by RF Magnetron Sputtering," *Appl. Sci. Conver. Technol.*, vol. 24, no. 3, pp. 72–76, **2015**.
- [46] V. Figueiredo *et al.*, "Effect of Post-annealing on the Properties of Copper Oxide Thin Films Obtained from the Oxidation of Evaporated Metallic Copper," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 254, no. 13, pp. 3949–3954, **2008**.
- [47] M. Park, Y. Ryu, T. Liu, and S. Kim, "Design of Wide Bandwidth Pyramidal Microwave Absorbers with Ferrite Composites of Broad Magnetic Loss Spectrum," *Intermag 2015*, p. 2008, **2015**.
- [48] H. Abdullah *et al.*, "Improvement Study of the Reflectivity for Hollow Pyramidal Shape Absorbers," *2014 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*, pp. 81–85, **2017**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Ali Ziya Özer
Doğum Yeri : Erzurum
Medeni Hali : Evli
E-posta : aliziyaazer@yahoo.com
Adresi : Alsancak M. 2066. S. 24/4 06790 Etimesgut/ANKARA

Eğitim

Lise : 2000-2003 Ankara Fen Lisesi
Lisans : 2004-2010 Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Yüksek Lisans : 2011-2018 Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Yabancı Dil

İngilizce (İleri)

İş Deneyimi

2011- : FİGES Mühendislik

Deneyim Alanları

Bilgisayar Destekli Elektromanyetik Analizler
Elektromanyetik Uyumluluk
Radar Soğurucu Yapılar

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



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

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

Tarih: 07/06/2018

Tez Başlığı / Konusu: Geniş Bantlı Yeni Bir Radar Soğurucu Yapı Tasarımı

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 97 sayfalık kısmına ilişkin, 07/06/2018 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9'dur.

Uygulanan filtrelemeler:

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

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
07.06.2018

Adı Soyadı: Ali Ziya ÖZER

Öğrenci No: N10228380

Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği - Tezli Yüksek Lisans

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.



Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR