# MİKRODALGA FREKANSINDA ELEKTROMANYETİK SOĞURUCU TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

**Sueda KANKILIÇ**

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# MİKRODALGA FREKANSINDA ELEKTROMANYETİK SOĞURUCU TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Sueda KANKILIÇ
0000-0002-6052-2295

Dr. Öğr. Üyesi Esin KARPAT
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
**Her Hakkı Saklıdır**

# ÖZET


Yüksek Lisans Tezi

MİKRODALGA FREKANS BANDINDA ELEKTROMANYETİK SOĞURUCU TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

**Sueda KANKILIÇ**

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Esin KARPAT

EM soğurucular, günümüz askeri ve sivil endüstrilerinde çok sayıda uygulama alanı bulmaktadır. Belirli bir EM spektrum bandı içinde geniş bir frekans aralığında iyi yutuculuk özellikleri ve ince katman yapısına sahip mikrodalga soğuruculara duyulan ihtiyaç da bununla birlikte artmaktadır.

Bu çalışmada, Kel Kartal Arama Optimizasyonu Algoritması kullanılarak çok katmanlı yapılar için EM soğurucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Seçilen frekans aralıklarında farklı geliş açıları ve polarizasyonlar için literatürde yer alan İyileştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu, DE, CFO vb. ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Farklı malzeme veri setleri kullanılarak çeşitli tasarımlar ile en uygun tasarımın bulunması hedeflenmiştir. Kel Kartal Arama Optimizasyonu ile 19 -37 GHz frekans bandında, çok katmanlı mikrodalga soğurucu için en uygun tasarımların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu optimizasyonların kullanım amacı, önceden tanımlanmış olan bir veri tabanından uygun malzeme katmanlarını seçerek soğurucunun istenen frekans aralığında en düşük maksimum yansıma katsayısına sahip ve en ince kalınlıkta soğurucu tasarımını gerçekleştirmektir. Optimizasyon sonucunda alınan her bir varyasyon için sayısal en iyi sonuçlar sunulmuştur.

Bu tez çalışması gerçekleştirilirken MATLAB R2021b programından yararlanılmıştır.



**Anahtar Kelimeler:** Elektromanyetik soğurucu yapılar, mikrodalga, elektromanyetik girişim, optimizasyon.
**2022, xiii + 72 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

ELECTROMAGNETIC ABSORBER DESIGN AND OPTIMIZATION AT MICROWAVE FREQUENCY

**Sueda KANKILIÇ**

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Dr. Esin KARPAT

EM absorbers have several uses in today's military and civilian industries. Additionally, there is a growing demand for microwave absorbers with good absorption characteristics and thin layer structures over a broad frequency range within a specific EM spectrum band.

In this study, EM absorber design was carried out for multilayer structures using the Bald Eagle Search Optimization Algorithm. For various incidence angles and polarizations in chosen frequency ranges, comparisons were done with Improved Particle Swarm Optimization, DE, CFO, etc. in the literature. It is aimed to find the most suitable design with various designs using different material data sets.

The goal of Bald Eagle Search Optimization is to find the multi-layer microwave absorber designs that are most suited for the 19–37 GHz frequency range. These optimizations aim to construct the absorber with the lowest maximum reflection coefficient in the given frequency range and the thinnest thickness by selecting the suitable material layers from a predefined database. The numerical best results are presented for each variation obtained as a result of the optimization.

The MATLAB R2021b application was utilized to complete this thesis.



**Key words:** Electromagnetic interference, microwave, electromagnetic absorber structures, optimization
**2022, xiii + 72 pages.**

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim ve tezimi hazırlama sürecimde, çalışmalarım boyunca tecrübesi, bilgi ve birikimi ile yol gösteren ve her aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Esin KARPAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca tecrübeleri ve düşünceleri ile bana her zaman yol gösteren maddi ve manevi tüm zorluklarda desteklerini esirgemeyen annem Sema GÜZELBAKAN, babam Adil GÜZELBAKAN ve kardeşim Mustafa Barış GÜZELBAKAN'a sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu zorlu süreçte her daim desteğini hissettiğim sevgili eşim Ahmet Yaşar KANKILIÇ' a sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde emeği olan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Sueda KANKILIÇ
18/11/2022

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖZET....vi
ABSTRACT....vii
TEŞEKKÜR....viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....x
ŞEKİLLER DİZİNİ....xi
ÇİZELGELER DİZİNİ....xiii
1. GİRİŞ....1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....3
2.1. Elektromanyetik Soğurucular....3
2.2 Soğurucu Malzemeler için Elektromanyetik Teori....4
2.3. Malzeme Özellikleri....6
2.3.1. Malzeme veri tabanı....8
2.4. İletken Sınır Düzlemine Dik Gelen Dalga....9
2.5. İletken Sınır Düzlemine Eğik Açı İle Gelen Dalga....11
2.5.1. Dik kutuplanma....111
2.5.2. Paralel kutuplanma....14
2.6. Dielektrik Olan Sınır Düzlemine Dik Gelen Dalga....15
2.7. Dielektrik Sınır Düzlemine Eğik Gelen Dalga....19
2.7.1. Dik kutuplanma....19
2.7.2. Paralel kutuplanma....200
2.8. Çok Katmanlı Dielektrik Sınır Düzlemine Dik Gelen Dalga....22
2.9. Çok Katmanlı Yapılarda Tasarım ve Yansıma Yaklaşımı....23
2.10. Çok Katmanlı Yapılarda Chew Yaklaşımı....28
2.11. Kaynak Araştırması....30
3. MATERYAL ve YÖNTEM....34
3.1. Sezgisel Algoritmalar....34
3.2. Yeni Meta Sezgisel Kel Kartal Arama Optimizasyonu Algoritması....34
3.2.1. Kel kartalın avlanma sırasındaki davranışı....35
3.2.2. Seçim aşaması....38
3.2.3. Arama aşaması....38
3.2.4. Baskın – saldırı (swooping) aşaması....39
3.3. İyileştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu....42
3.4. Çok Katmanlı Malzeme Yapısının Optimizasyonu....44
4. BULGULAR....45
5. TARTIŞMA ve SONUÇ....68
KAYNAKLAR....69
ÖZGEÇMİŞ....72

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| **Simgeler** | **Açıklama** |
|---|---|
| $R_{i,i+1}$ | Katmanların toplam yansıma katsayısı |
| $r_{i,i+1}$ | Katmanlar arası yansıma katsayısı |
| $\varepsilon_i$ | i. katmanın elektriksel geçirgenliği |
| $\mu_i$ | i. katmanın manyetik geçirgenliği |
| $k_i$ | i. dalga sayısı |
| $\varepsilon_0$ | Boşluğun elektriksel geçirgenliği |
| $\mu_0$ | Boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı |
| $\theta$ | Dalganın geliş açısı |
| f | Frekans |
| c | Işık hızı |
| N | Katman sayısı |
| $\Gamma$ | Yansıma katsayısı |
| $\tau$ | İletim katsayısı |
| d | Kalınlık |
| $Z_{in,k}$ | k. Katman yüzeyindeki dalga empedansı |
| E | Elektrik alan |
| H | Manyetik alan |

| **Kısaltmalar** | **Açıklama** |
|---|---|
| PEC | Perfect Electric Conductor |
| EM | Elektromanyetik |
| TM | Enine Manyetik |
| TE | Enine Elektrik |
| MOPSO | Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu |
| PSO | Parçacık Sürü Optimizasyonu |
| DE | Diferansiyel Evrim Algoritması |
| CFO | Merkezi Kuvvet Optimizasyonu |
| GSA | Yerçekimi Arama Algoritması |
| GHz | Gigahertz |
| mm | Milimetre |
| KKAOA | Kel Kartal Arama Optimizasyonu Algoritması |
| LSA | Lighting Search Algorithm |
| dB | Desibel |
| MEİ | Mükemmel İletken |

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Sayfa**


| | | |
|---|---|---|
| Şekil 2.1. | Mevcut senaryo için elektromanyetik soğurucunun şematik gösterimi..... | 4 |
| Şekil 2.2. | MEİ ortama dik gelen ve yansıyan dalga..... | 10 |
| Şekil 2.3. | MEİ ortam sınırında eğik açı ile dik kutuplanmış gelen ve yansıyan dalga..... | 12 |
| Şekil 2.4. | Paralel kutuplanma elektrik ve manyetik alan gösterimi..... | 14 |
| Şekil 2.5. | Dielektrik sınıra dik açı ile gelen dalganın yansıma ve iletimi..... | 15 |
| Şekil 2.6. | Dielektrik sınıra eğik açı ile dik kutuplanmış dalganın yansıma ve iletimi..... | 19 |
| Şekil 2.7. | Dielektrik sınıra eğik açı ile paralel kutuplanmış dalganın yansıma ve iletimi..... | 21 |
| Şekil 2.8. | Çok katmanlı dielektrik ara yüze normal gelen dalganın yansıması ve iletimi..... | 22 |
| Şekil 2.9. | PEC tarafından desteklenen çok katmanlı mikrodalga soğurucu şeması..... | 25 |
| Şekil 2.10. | Eğik gelişi gösteren genelleştirilmiş soğurucu yapı modeli..... | 28 |
| Şekil 3.1. | Kel kartal arama optimizasyon algoritma şeması..... | 35 |
| Şekil 3.2. | Bir kel kartalın avlanma sırasındaki davranışı..... | 36 |
| Şekil 3.4. | KKAO algoritması akış diyagramı..... | 37 |
| Şekil 3.3. | Avlanmanın üç ana aşaması..... | 40 |
| Şekil 3.5. | İyileştirilmiş PSO algoritması için akış şeması..... | 43 |
| Şekil 4.1. | 2-8 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı | 47 |
| Şekil 4.2. | 2-8 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı | 47 |
| Şekil 4.3. | 2-8 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı | 48 |
| Şekil 4.4. | 2-8 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı | 49 |
| Şekil 4.5. | 2-18 GHz frekans bandında TM modu 30º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... | 49 |
| Şekil 4.6. | 2-18 GHz frekans bandında TE modu 30º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... | 51 |
| Şekil 4.7. | 2-18 GHz frekans bandında TM modu 45º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... | 51 |
| Şekil 4.8. | 2-18 GHz frekans bandında TE modu 45º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... | 53 |
| Şekil 4.9. | 2-18 GHz frekans bandında TM modu 60º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... | 54 |
| Şekil 4.10. | 2-18 GHz frekans bandında TE modu 60º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... | 55 |
| Şekil 4.11. | 2-18 GHz arasında TE modu 75º için yapının yansıma katsayısı..... | 56 |
| Şekil 4.12. | 2-18 GHz arasında TM modu 75º için yapının yansıma katsayısı..... | 57 |
| Şekil 4.13. | 2-18 GHz frekans bandında 30º ve 60º TE / TM modları için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... | 58 |

Şekil 4.14. 2-8 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... 60
Şekil 4.15. 2-8 GHz frekans bandında dört katmanlı yapının yansıma katsayısı..... 62
Şekil 4.16. 8-12 GHz frekans bandında dört katmanlı yapının yansıma katsayısı..... 63
Şekil 4.17. 12-18 GHz frekans bandında dört katmanlı yapının yansıma katsayısı..... 63
Şekil 4.18. 2-18 GHz frekans bandında dört katmanlı yapının yansıma katsayısı..... 64
Şekil 4.19. 1-18 GHz frekans bandında yedi katmanlı yapının yansıma katsayısı..... 65
Şekil 4.20. 19-37 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... 66
Şekil 4.21. 19-37 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı..... 67

## ÇİZELGELER DİZİNİ

**Sayfa**


Çizelge 2.1. Malzeme veri tabanı..... 8
Çizelge 2.1. Malzeme veri tabanı (devamı)..... 9
Çizelge 2.2. Malzeme veri tabanı (19-37GHz)(Chamaani et al., 2007)..... 9
Çizelge 4.1. Normal geliş için 2-8 GHz frekans bandında soğurucu tasarım parametreleri..... 46
Çizelge 4.2. Normal geliş için 2-8 GHz frekans bandında soğurucu tasarım parametreleri..... 47
Çizelge 4.3. Normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarım parametreleri..... 47
Çizelge 4.4. Normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarım parametreleri..... 48
Çizelge 4.5. 2-18 GHz frekans bandında 30º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri ..... 50
Çizelge 4.5. 2-18 GHz frekans bandında 30º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri (devamı)..... 50
Çizelge 4.6. 2-18 GHz frekans bandında 45º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri..... 52
Çizelge 4.7. 2-18 GHz frekans bandında 60º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri..... 53
Çizelge 4.7. 2-18 GHz frekans bandında 60º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri (devamı)..... 54
Çizelge 4.8. 2-18 GHz frekans bandında 75º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri..... 55
Çizelge 4.8. 2-18 GHz frekans bandında 75º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri (devamı)..... 56
Çizelge 4.9. 30º ve 60º için TE / TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri karşılaştırması..... 57
Çizelge 4.9. 30º ve 60º için TE / TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri karşılaştırması (devamı)..... 58
Çizelge 4.10. İnce tabakada 2-8 GHz normal geliş için soğurucu tasarımı parametreleri..... 59
Çizelge 4.11. Dört katmanlı normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarımı parametreleri..... 60
Çizelge 4.12. Dört katmanlı normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarımı parametreleri..... 61
Çizelge 4.12. Dört katmanlı normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarımı parametreleri (devamı)..... 62
Çizelge 4.13. Normal geliş geniş bant aralığı için yedi katmanlı soğurucu tasarımı parametreleri..... 64
Çizelge 4.14. 19-37 GHz frekans aralığında dik geliş için soğurucu tasarımı parametreleri..... 65
Çizelge 4.15. 19-37 GHz frekans aralığında dik geliş için soğurucu tasarımı parametreleri..... 67

# 1. GİRİŞ

Kablosuz iletişimde modern ve hızlı bir şekilde gerçekleşen evrim, ciddi bir şekilde EM girişimi tetiklemektedir. EMradyasyonun hava, su ve gürültü kirliliğinin yanı sıra çevrede dördüncü en önemli elektromanyetik kirlilik kaynağı olarak ortaya çıktığı görünmektedir. Bu nedenle, EM radyasyonunun sonuçlarını bastırmak için uygun malzeme ve tekniklerin geliştirilmesine yönelik artan bir talep ortaya çıkmaktadır.

EM girişim, EM uyumluluk, radar kesit alanı ölçümlerinin doğru ve güvenilir bir şekilde yapılabilmesi oldukça önem kazanmıştır. Herhangi bir bozucu EM dalga kaynağı veya kaynaktan gelen dalgaları yansıtan bir nesnenin bulunması, ölçümleri ve aynı zamanda elektronik ekipmanların çalışmasını etkilemektedir.(Tong, n.d.) Elektronik ekipmanların herhangi bir bozucu etkiye uğramadan performanslarını doğru ve güvenilir bir şekilde gerçekleyebilmesi oldukça önemli iken geniş bir frekans bölgesinde elektromanyetik uyumluluk içinde çalışması da istenmektedir (Çatalkaya, 2017; Mısır, 2019).

Günümüzde çoğu frekans bandının yoğun olarak kullanılmasından kaynaklı ölçüm yapılacak noktada bozucu EM dalga kaynağının bulunması ölçümlerde hataya neden olur. EM dalgalar, dalga türüne göre canlı organizmalara zarar vermelerinin yanı sıra çeşitli sistem ve cihazlara da zarar vermektedir (Sevgi, 2019). Bu gibi problemlerin önüne geçebilmek için EM soğurucu malzemeler kullanılmaktadır (Veselago, 1968). EM soğurucular sahip oldukları dielektrik veya manyetik kayıplar sayesinde elektromanyetik dalgaları soğurmaktadır. Farklı malzemelerin frekansa göre elektrik ve manyetik geçirgenliği değiştiği için, soğurucu malzemelerle tasarım yapılırken soğurucuların yapısında kullanılan malzemenin özellikleri soğurma performansı açısından oldukça önemlidir.

Meta materyalin kullanımı, EM girişim sorununa umut verici bir çözüm olmuştur. Meta materyaller genellikle, doğal dünyada geçerli olmayan olağandışı elektromanyetik özelliklerini ortaya çıkaran dalga boyunun altında metalik veya dielektrik elementlerin kullanımıyla uygulanan yapay olarak tasarlanmış homojen ortamlar olarak tanımlanmaktadır.

İdeal olarak, geniş bir geliş açısına sahip ince, geniş bantlı bir mikrodalga soğurucu en uygun tasarım olarak kabul görmektedir. Optimum geniş bant mikrodalga soğurucu tasarlanırken, çalışma frekansı, geliş açısı, dalga polarizasyonu, malzemelerin dielektrik sabitleri ve geçirgenlikleri, katmanların kalınlığı gibi çok sayıda faktör dikkate alınmaktadır (J da Silva Macedo et al., 2006). Literatürde çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılarak soğurucunun optimum özelliklerini elde etmek için birçok parametresi değiştirilmektedir (Asi & Dib, 2010; Chamaani et al., 2007; Lu & Zhou, 2017). Bu parametreler; katman sayısı, dielektrik sabiti, geçirgenlik, katman kalınlığı, frekans, geliş açısı ve dalga polarizasyonudur (Roy et al., 2015). Bir soğurucu tasarımındaki en büyük zorluk, bir dizi frekans ve geliş açısı için çok katmanlı bir yapı üzerinde gelen bir dalganın yansıma katsayısının en aza indirilmesidir (Balanis, 2012; Chew, 1995). Literatürde bu sorunu ele alan çeşitli çalışmalar mevcuttur (Dib et al., 2010; Sotirios K. Goudos, 2009; Mouna et al., 2018). Yansıma katsayısı, her katmanın kalınlığına, elektrik ve manyetik özelliklerine bağlıdır. Yapılan çalışmalarda herhangi bir geliş açısı için çok katmanlı yapıların yansıma katsayısının tahmininde Chew'in özyinelemeli formülü kullanılmaktadır (Asi & Dib, 2010; da Silva Macedo et al., 2006; Ranjan et al., 2018). Hem TE hem de TM polarizasyonları için yansıma katsayıları bu formül kullanılarak değerlendirilmektedir. Dik geliş için, formül her iki polarizasyon için aynı yansıma katsayısı büyüklüğünü vermektedir (Michielssen et al., 1993).

Bu tez çalışmasında, çeşitli frekans aralıklarında çok katmanlı soğurucu tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar, yeni bir meta sezgisel algoritma olan Kel Kartal Arama Optimizasyonu Algoritması tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Çok katmanlı soğurucuların performansları TE ve TM modları ve farklı geliş açıları için incelenmiştir.

Tez çalışması gerçekleştirilirken MATLAB R2021b programı kullanılmıştır (Mathworks, n.d.).

# 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

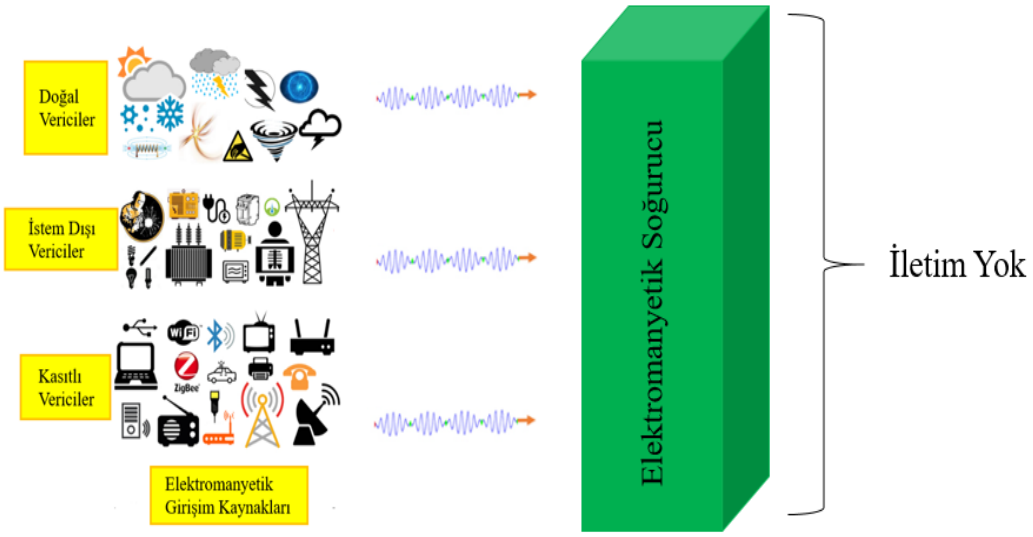
## 2.1. Elektromanyetik Soğurucular

Soğurucular ölçümler sırasında üzerlerine gelen elektromanyetik dalgaların yansımalarını engellemek, istenmeyen veya rastgele yayılan EM radyasyonu önlemek için kullanılmaktadır. Soğurucular, EM uyumluluk, EM girişim ve radar kesit alanları ölçümlerinin kapalı bir ortamda doğru ve güvenilir olarak gerçekleştirilmesinde oldukça önemli bir rol oynamaktadırlar. Birçok elektronik sistem soğurucular yardımıyla geliştirilmektedir.

Mikrodalga soğurucular, günümüzde askeri ve sivil endüstrilerinde çok sayıda uygulama alanında kullanılmaktadır. Dalga boylarının frekansa göre değişmesinden kaynaklı mikrodalga soğurucular öncelikle kablolu-kablosuz haberleşme olmak üzere tıp, fen bilimleri, savunma, havacılık gibi birçok kullanım alanına sahip olmaktadırlar. Teknolojinin her geçen gün daha da gelişmesi sonucunda artan sistemler ve bu sistemlerin bulundukları çevre ve diğer sistemlerle girişime girmesi sonucu soğurucu malzeme kullanımı oldukça gerekli hale gelmektedir.

Bir malzemenin soğurucu bir özellikte olması için gelen dalgayı zayıflatması ve zayıflattığı enerjiyi ısı enerjisine çevirmesi ya da gelen enerjiyi direk dağıtma mekanizmasıyla çalışması gerekmektedir. Soğurucu malzeme bunu yaparken ohmik kutuplanma ve manyetik kutuplaşma kayıplarından faydalanarak yapabilmektedir.

Bu tez çalışmasında ele alınan çok katmanlı mikrodalga soğurucu tasarımı, bir malzeme veri tabanından her katman için malzeme türü gibi optimum değişkenleri seçerek ve her katmanın kalınlığını belirleyerek toplam kalınlık ile birlikte toplam yansımayı en aza indirmeyi amaçlayan bir problemdir.




**Şekil 2.1.** Mevcut senaryo için elektromanyetik soğurucunun şematik gösterimi

## 2.2 Soğurucu Malzemeler için Elektromanyetik Teori

Çok katmanlılık olgusuna dayanan metamalzeme yapıların temel elektromanyetik özelliklerini anlamak, yeni metamalzeme yapıları tasarlamak ve geliştirmek için en temel gereksinim olarak görülmektedir. Elektromanyetik dalgaların bu tür malzemelerle davranışı, elektrik alan ve manyetik alanın etkisi, uzaydaki atomik momentlerin yönelimindeki değişiklikler, sınırlı elektronların yanı sıra serbest elektronların hareketi ve yayılmasıyla ilgilidir. Tüm bu etkileşimler, aşağıdaki dört Maxwell Denklemi tarafından yönetilmekte ve kontrol edilmektedir: (Balanis, 2012)

1. **Faraday'ın EM İndüksiyon Yasası:** Kapalı bir yol etrafındaki elektromotor kuvvetinin (emk), yolun sınırladığı herhangi bir yüzey boyunca manyetik yer değiştirmenin zamana göre türevine eşit olduğunu belirtir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \tag{2.1}$$

Fazör formda yazılışı:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \tag{2.2}$$

1. **Amper Yasası:** Kapalı bir yol etrafındaki manyeto-motor kuvvetinin (mmf), iletim akımı artı yol tarafından sınırlanan herhangi bir yüzey boyunca elektrik yer değiştirmesinin zamana göre türevine eşit olduğunu belirtir:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \tag{2.3}$$

Fazör formda yazılışı:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D} \tag{2.4}$$

2. **Elektrik Alanı İçin Gauss Yasası:** Bir hacmi çevreleyen yüzeyden geçen toplam elektrik yer değiştirmesinin, hacim içindeki toplam yüke eşit olduğunu belirtmektedir:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \tag{2.5}$$

3. **Manyetik Alan İçin Gauss Yasası:** Herhangi bir kapalı yüzeyden ortaya çıkan net manyetik akı sıfırdır:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2.6}$$

Ayrıca, diğer bazı önemli ilişkiler şunlardır (H. Hayt & Buck, 2006):

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} = (\varepsilon' - j\varepsilon'')\vec{E} \tag{2.7}$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} = (\mu' - j\mu'')\vec{H} \tag{2.8}$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \tag{2.9}$$

Burada $\vec{E}$ elektrik alan şiddeti vektörü, $\vec{H}$ manyetik alan gücü vektörü, $\vec{D}$ elektrik yer değiştirme vektörü, $\vec{B}$ manyetik akı yoğunluk vektörü, $\vec{J}$akım yoğunluğu vektörü, $\rho_v$ yük yoğunluğu, $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ elektrik geçirgenliği ve $\mu = \mu_0\mu_r$ manyetik geçirgenliktir. Burada $\varepsilon_0$, boş alanın elektrik geçirgenliği $= 8.86 \times 10^{-12} F/m$'dir ve $\mu_0$, değeri $4\pi \times 10^{-7} H$ olan boş alanın manyetik geçirgenliğidir.
Denklem 2.4 şu şekilde de yazılabilir:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'')\vec{E} \tag{2.10}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\varepsilon'(1 - j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'})\vec{E} \tag{2.11}$$

Burada $\tan\delta_E = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ terimi elektrik kaybı tanjantını tanımlar.

$$\Delta^2\vec{E} - \gamma^2\vec{E} = 0 \tag{2.12}$$

$$\Delta^2\vec{H} - \gamma^2\vec{H} = 0 \tag{2.13}$$

$$\gamma = \sqrt{-\omega^2\varepsilon\mu} = \frac{j2\pi f}{c}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} = \alpha + j\beta \tag{2.14}$$

Burada $\gamma$ yayılma sabitidir, $\alpha$ dalga yayılırken elektromanyetik dalga alanlarının zayıflama hızını tanımlayan zayıflama sabitidir ve $\beta$ dalga yayılırken fazın değiştiği hızı tanımlayan faz sabitidir.

### 2.3. Malzeme Özellikleri

Malzemelerin soğurma özelliklerine sahip olan en önemli parametreleri elektrik geçirgenliği ve manyetik geçirgenliktir. Elektriksel geçirgenlik, malzemenin elektromanyetik dalgadaki elektrik alan üzerindeki etkisinin bir ölçüsüdür ve manyetik geçirgenlik, malzemenin dalganın manyetik bileşeni üzerindeki etkisinin bir ölçüsüdür. (Balanis, 2012) Elektriksel geçirgenlik 2.15'te verilmektedir.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{2.15}$$

Bu, malzemenin dielektrik polarizasyonundan kaynaklanır. Burada $\varepsilon'$ malzemenin Dielektrik Sabiti olarak adlandırılır ve $\varepsilon''$ malzemenin zayıflamasını ölçer.

Ayrıca, malzemenin elektrik kayıp tanjantı ne kadar büyükse, dalganın çok katmanlı malzeme yapısındaki çoklu katmanlarında aşağı doğru ilerlerken zayıflaması da o kadar fazla olmaktadır.

Benzer bir şekilde, malzemenin manyetik geçirgenliğine şu şekilde yazılır:

$$\mu = \mu' - j\mu'' \tag{2.16}$$

Manyetik kayıp tanjantı da 2.17' deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \tag{2.17}$$

Burada, geçirgenliğin gerçek kısmı, malzemenin bir manyetik alan uygulamasıyla ne ölçüde manyetize edileceğini tanımlamaktadır. Sanal kısım, uygulanan alandaki manyetik dipollerin hizalanmasının yeniden düzenlenmesinde ortaya çıkan enerji kayıplarının bir ölçüsüdür. Çok katmanlı malzeme yapısının absorbsiyon kapasitesinin malzemenin dielektrik parametrelerinden nasıl etkilendiğini değerlendirmek için 2.18' deki temel denklem kullanılmaktadır. (Arthur von Hippel, 2012)

$$\vec{A} = \frac{1}{2}\sigma\vec{E}^2 + \frac{1}{2}\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}^2 + \frac{1}{2}\omega\mu_0\mu_r\vec{H}^2 \tag{2.18}$$

- $\vec{A}$ $(W/m^3)$ birim hacim başına emilen elektromanyetik enerjidir.
- $\vec{E}$ $(V/m)$ gelen elektromanyetik radyasyonun elektrik alan şiddetidir.
- $\vec{H}$ $(A/m)$ gelen elektromanyetik radyasyonun manyetik alan gücüdür.
- $\sigma$ $(S/m)$ malzemenin iletkenliğidir.
- $\omega$ $(sec^{-1})$ elektromanyetik dalganın açısal hızıdır ve parametrelerin geri kalanı daha önce açıklanmıştır.

Denklem 2.18, çok katmanlı malzeme yapılarında mikrodalga enerjisinin zayıflamasının ve absorpsiyonunun, soğurucu malzemenin iletkenliğine, dielektrik kaybına ve manyetik kaybına bağlı olduğunu açıkça göstermektedir.

### 2.3.1. Malzeme veri tabanı

Herhangi bir optimizasyon algoritmasının en temel gereksinimi, uygulamanın gereksinimine göre gerekli sayıda ve türde malzemenin seçileceği malzeme veri tabanıdır. Bu durumda, veri tabanından mikrodalga soğurma yapısı için elektromanyetik özelliklerine göre en uygun kompozit malzemeler seçilmektedir. Bu araştırma çalışması için seçilen veri tabanı Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'deki gibi tanımlanmaktadır.

Çizelge 2.1.'deki malzemelerin geçirgenliği, 19-37 GHz frekans aralığında çok fazla değişmediğinden, sabit olarak yaklaşık olarak kabul edilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Malzeme veri tabanı

| Kayıpsız Dielektrik Malzemeler ($\mu' = 1,\ \mu'' = 0$) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| No: | | | | $\varepsilon'$ |
| 1 | | | | 10 |
| 2 | | | | 50 |
| Kayıplı Manyetik Malzemeler ($\varepsilon' = 15,\ \varepsilon'' = 0$) | | | | |
| $\mu = \mu' - j\mu''$ | $\mu'(f) = \frac{\mu'(1GHz)}{f^a}$ | | $\mu''(f) = \frac{\mu''(1GHz)}{f^b}$ | |
| No: | $\mu'(1GHz)$ | $a$ | $\mu''(1GHz)$ | $b$ |
| 3 | 5 | 0,974 | 10 | 0,961 |
| 4 | 3 | 1,00 | 15 | 0,957 |
| 5 | 7 | 1,00 | 12 | 1,00 |
| Kayıplı Dielektrik Malzemeler ($\mu' = 1,\ \mu'' = 0$) | | | | |
| $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ | $\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon'(1GHz)}{f^a}$ | | $\varepsilon''(f) = \frac{\varepsilon''(1GHz)}{f^b}$ | |

**Çizelge 2.1.** Malzeme veri tabanı (devamı)

| No: | $\varepsilon'(1GHz)$ | $a$ | $\varepsilon''(1GHz)$ | $b$ |
|---|---|---|---|---|
| 6 | 5 | 0,861 | 8 | 0,569 |
| 7 | 8 | 0,778 | 10 | 0,682 |
| 8 | 10 | 0,778 | 6 | 0,861 |
| Gevşeme Tipi Manyetik Malzemeler ($\varepsilon' = 15,\ \varepsilon'' = 0$) | | | | |
| $\mu = \mu' - j\mu''$ | $\mu'(f) = \frac{\mu_m f_m^2}{f^2+f_m^2}$ | | $\mu''(f) = \frac{\mu_m f_m f}{f^2+f_m^2}$ | |
| $f\ ve\ f_m\ GHz$ | | | | |
| No: | $\mu_m$ | | $f_m$ | |
| 9 | 35 | | 0,8 | |
| 10 | 35 | | 0,5 | |
| 11 | 30 | | 1,0 | |
| 12 | 18 | | 0,5 | |
| 13 | 20 | | 1,5 | |
| 14 | 30 | | 2,5 | |
| 15 | 30 | | 2,0 | |
| 16 | 25 | | 3,5 | |

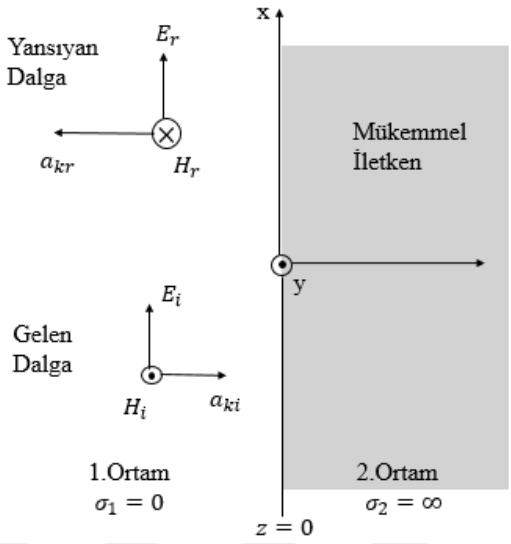
**Çizelge 2.2.** Malzeme veri tabanı (19-37GHz)(Chamaani et al., 2007)

| Kayıplı Dielektrik Malzemeler ($\mu' = 1,\ \mu'' = 0$) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme No: | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| $\varepsilon'$ | 4,48 | 5,84 | 5,21 | 7,08 | 9,84 | 11,87 | 12,73 | 17,97 |
| $\varepsilon''$ | 1,87 | 1,66 | 1,18 | 2,32 | 4,95 | 9,72 | 8,13 | 14,57 |

## 2.4. İletken Sınır Düzlemine Dik Gelen Dalga

Elektromanyetik dalgalar, genel olarak sınırlı bölgelerde yayılırlar. Ortamların empedansı birbirinden farklı olduğundan EM dalgalar iki ortamın oluşturduğu arayüzde yansımaya uğramaktadır. Uzak alanda EM dalgaların yayılım yönü, elektrik alan ve

manyetik alan bileşenleri birbirine diktir. Mükemmel elektrik iletken (MEİ) ortama dik gelen düzlem dalga Şekil 2.2 ‘de gösterilmektedir.




**Şekil 2.2.** MEİ ortama dik gelen ve yansıyan dalga

Kayıpsız ortamda (1. Ortam) +z yönünde yayılan ve $E_i, H_i$ ile belirtilen elektrik ve manyetik alan bileşenlerine sahip düzlemsel dalga, iletken sınıra dik açıyla geldiğinde yansımaya uğramaktadır.

$$\vec{E}_i(z) = \vec{a}_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \tag{2.19}$$

$$\vec{H}_i(z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \tag{2.20}$$

Gelen dalganın elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin fazör bizimlerinin gösterildiği Denklem 2.19 ve 2.20’ de, $E_{i0}$ gelen dalganın elektrik alanının genliği, $\beta_1$e 1. Ortam için dalga sayısı, $H_i$ gelen dalganın manyetik alan vektörü ve $\eta_1$ 1. ortamın empedansıdır . İkinci ortam MEİ olduğu için (z > 0) elektrik ve manyetik alan vektörü Sınırda yansımaya uğrayan dalga Şekil 2.2’ de gösterildiği gibi yayılıma devam oluşmayacak ($E_2, H_2 = 0$ ) , gelen dalga tam yansımaya uğrayacaktır. Yansıyan dalganın elektrik alan şiddeti denklem 2.21’ de verilmektedir.

$$\vec{E}_r(z) = -\vec{a}_x E_{r0} e^{j\beta_1 z} \tag{2.21}$$

Denklem 2.21' de, $E_{r0}$, yansıyan dalganın genliğini ifade etmektedir. Denklem 2.22'de görüldüğü gibi, yansıyan dalganın manyetik alan şiddeti de elektrik alan şiddetinin ortamın öz empedansına oranlayarak elde edilmektedir.

$$\vec{H}_r(z) = \vec{a}_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{j\beta_1 z} \tag{2.22}$$

1. ortamdaki dalganın toplam elektrik alan ve manyetik alan şiddeti sırasıyla denklem 2.23 ve 2.24' te verilmektedir.

$$\vec{E}_1(z) = -\vec{a}_x 2jE_{i0} sin\beta_1 z \tag{2.23}$$

$$\vec{H}_1(z) = \vec{a}_y 2\frac{E_{i0}}{\eta_1} cos\beta_1 z \tag{2.24}$$

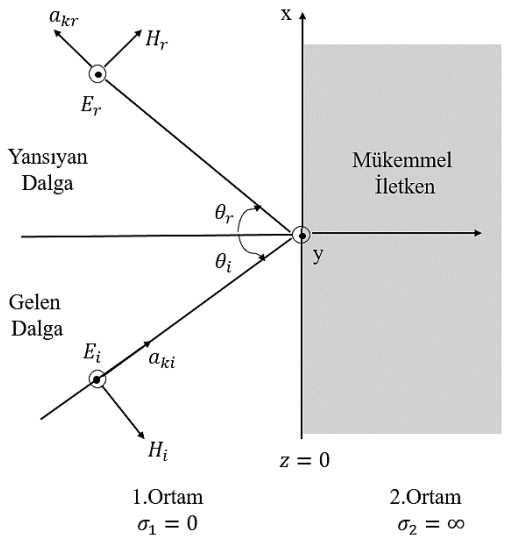
Gelen dalganın tam yansımaya uğradığından gelen ve yansıyan dalgaların süper pozisyonundan duran dalgalar oluşmaktadır (Cheng, n.d.).

## 2.5. İletken Sınır Düzlemine Eğik Açı İle Gelen Dalga

İletken sınırına gelen düzlem dalganın yansımasının bir ölçütü de gelen dalganın yüzeyin normaline göre belli bir açıyla kutuplanmasına bağlıdır. $E_i$, sınıra gelen elektrik alan vektörünü vermektedir. Sınıra belli bir açı ile gelen elektrik alanda hareket düzlemine göre iki farklı şekilde kutuplanma meydana gelmektedir.

### 2.5.1. Dik kutuplanma

Elektrik alanın geliş düzlemine dik olduğu duruma dik kutuplanma denilmektedir. Düzlem dalganın MEİ olan ortam sınırına elektrik alanın dik olarak gelişi Şekil 2.3' te görülmektedir.




**Şekil 2.3.** MEİ ortam sınırında eğik açı ile dik kutuplanmış gelen ve yansıyan dalga

İlerleme vektörü başka bir deyişle dalganın yönü iki adet bileşenden oluşmaktadır. Gelen ve yansıyan dalganın ilerleme vektörlerinin x ve z eksenleri olmak üzere iki adet birleşenleri vardır. Denklem 2.25' de sınıra eğik açı ile gelen dalga için bu durum formüle edilmektedir.

$$\vec{a}_{ki} = \vec{a}_x \sin(\theta_i) + \vec{a}_z \cos(\theta_i) \tag{2.25}$$

Şekil 2.3'te $\theta_i = \theta_r$ olduğu için denklem 2.25' de $\theta_i$ açısı gelen ve yansıyan dalganın sınırın normali ile yaptığı açıyı temsil etmektedir. Gelen dalganın, elektrik ve manyetik alan şiddetleri sırasıyla denklem 2.26 ve 2.27' de gösterilmektedir.

$$\vec{E}_i(x,z) = \vec{a}_y E_{i0} e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_i)+z\cos(\theta_i))} \tag{2.26}$$

$$\vec{H}_i(x,z) = \frac{E_{i0}}{\eta_i}(-\vec{a}_x \cos(\theta_i) + \vec{a}_z \sin(\theta_i)) e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_i)+z\cos(\theta_i))} \tag{2.27}$$

Denklem 2.26' da $E_{i0}$ , $E_i$ sırasıyla elektrik alan genliğini, elektrik alan şiddetini temsil etmektedir. Denklem 2.27' de ise $H_i$,$\eta_i$ sırasıyla manyetik alan şiddetini ve ortamın empedansını temsil etmektedir. 2. ortamda elektrik ve manyetik alan oluşmamasının sebebi sınırın MEİ olmasıdır. Yansıyan dalganın sınır koşulları, elektrik alan ve manyetik alan şiddetleri ise sırasıyla denklem 2.28, 2.29 ve 2.30'da gösterilmektedir.

$$\vec{E}_1(x,0) = \vec{E}_i(x,0) + \vec{E}_r(x,0) \tag{2.28a}$$

$$\vec{E}_1(x,0) = \vec{a}_y\left(E_{i0}e^{-j\beta_1 x sin(\theta_1)} + E_{ro}e^{-j\beta_1 x sin(\theta_r)}\right) = 0 \tag{2.28b}$$

Yüzey normali ile yapılan açı $\theta_i = \theta_r$ olduğu için $E_{io} = -E_{ro}$ olmaktadır. Yansıyan dalganın elektrik alan şiddetinin gelen dalga cinsinden ifadesi denklem 2.29'da gösterilmektedir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_r(x,z) = \vec{a}_y E_{r0} e^{-j\beta_1(xsin(\theta_r) - zcos(\theta_r))} \tag{2.29}$$

Yansıyan dalganın manyetik alan şiddeti denklem 2.30' da gösterilmektedir.

$$\vec{H}_r(x,z) = \frac{E_{r0}}{\eta_1}(\vec{a}_x \cos\theta_r + \vec{a}_z sin\theta_r) e^{-j\beta_1(xsin(\theta_r) - zcos(\theta_r))} \tag{2.30}$$

Denklem 2.30'da $H_r$ yansıyan dalganın manyetik alan şiddetini göstermektedir. 1.ortam için gelen ve yansıyan dalgaların toplamı sonucunda elektrik alan ve manyetik alan şiddeti elde edilmektedir. Denklem 2.31 ve 2.32 sırasıyla toplam elektrik alan ve manyetik alan şiddetini ifade etmektedir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_1(x,z) = \vec{E}_i(x,z) + \vec{E}_r(x,z) \tag{2.31a}$$

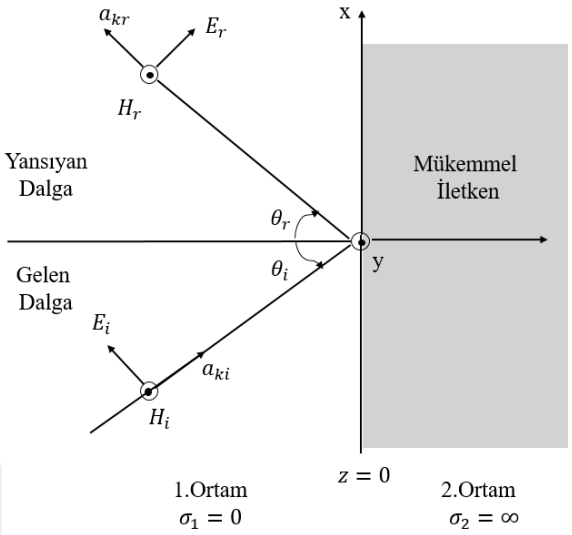
$$\vec{E}_1(x,z) = -\vec{a}_y 2jE_{i0}\sin\left(\beta_1 zcos(\theta_i)\right) e^{-j\beta_1 xsin(\theta_i)} \tag{2.31b}$$

$$\begin{aligned}\vec{H}_1(x,z) = -2\frac{E_{i0}}{\eta_1}\big[&(\vec{a}_x \cos\theta_i \cos\left(\beta_1 zcos(\theta_i)\right) e^{-j\beta_1 xsin(\theta_i)} \\ &+ \vec{a}_z jsin(\theta_i)\sin(\beta_1 zcos\theta_i)\, e^{-j\beta_1(xsin(\theta_i)}\big]\end{aligned} \tag{2.32}$$

Denklemlerdeki $E_1$, $H_1$ sırasıyla 1.ortamın elektrik alan ve manyetik alan şiddetini vermektedir. $E_{i0}$, $\beta_1$ ve $\eta_1$ sırasıyla gelen dalganın elektrik alan genliğini, 1.ortamın dalga sayısını ve $\eta_1$ ise ortamın empedansını göstermektedir.

### 2.5.2. Paralel kutuplanma

Paralel kutuplanma gelen elektrik alanının yayılım düzlemine paralel olmasıdır. Şekil 2.4'te paralel kutuplanma gösterilmektedir.




**Şekil 2.4.** Paralel kutuplanma elektrik ve manyetik alan gösterimi

Gelen dalganın elektrik ve manyetik alan şiddetini sırasıyla denklem 2.33 ve 2.34'te gösterilmiştir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_i(x,z) = E_{i0}\big(\vec{a}_x cos(\theta_i) - \vec{a}_z sin(\theta_i)\big)e^{-j\beta_1(xsin(\theta_i)+zcos(\theta_i))} \tag{2.33}$$

$$\vec{H}_i(x,z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(xsin(\theta_i)+zcos(\theta_i))} \tag{2.34}$$

Yansıyan dalga için elektrik alan ve manyetik alan fazörleri sırasıyla denklem 2.35 ve 2.36' da gösterilmiştir.

$$\vec{E}_r(x,z) = E_{r0}\big(\vec{a}_x cos(\theta_r) + \vec{a}_z sin(\theta_r)\big)e^{-j\beta_1(xsin(\theta_r)-zcos(\theta_r))} \tag{2.35}$$

$$\vec{H}_r(x,z) = -\vec{a}_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(xsin(\theta_r)-zcos(\theta_r))} \tag{2.36}$$

Sınırda MEİ olduğu için $\vec{E}_{ix}(x,0) + \vec{E}_{rx}(x,0) = 0$ 'dır. 1. ortam için toplam elektrik ve manyetik alanı denklem 2.37 ve 2.38'de sırasıyla ifade edilmiştir (Cheng, n.d.).

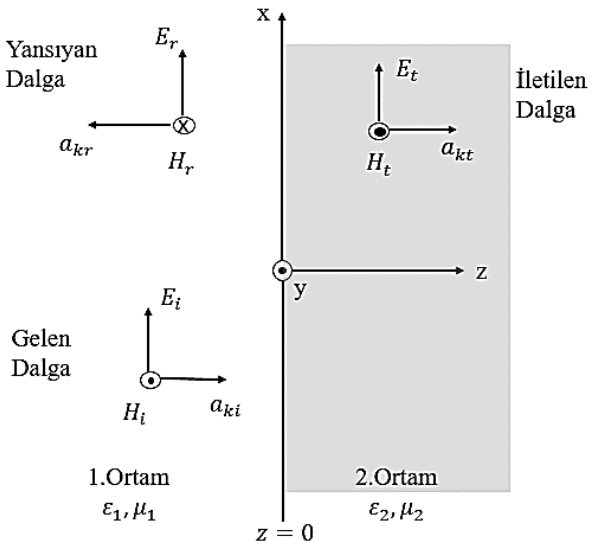
$$\vec{E}_1(x,z) = 2E_{i0}\big[\vec{a}_x j cos(\theta_i)\sin(\beta_1 z cos(\theta_i) + \vec{a}_z sin(\theta_i)\cos(\beta_1 z cos(\theta_i))e^{-j\beta_1 sin(\theta_i)}\big] \tag{2.37}$$

$$\vec{H}_1(x,z) = \vec{a}_y 2\frac{E_{i0}}{\eta_1}\cos\big(\beta_1 z cos(\theta_i)\big)\, e^{-j\beta_1 x sin(\theta_i)} \tag{2.38}$$

Denklem 2.37 ve 2.38'deki parametreler $E_1$, $H_1$ sırasıyla 1. Ortamdaki toplam elektrik ve manyetik alanı, $E_{i0}$, $\eta_1$, $\beta_1$ ve $\theta_i$ sırasıyla gelen dalganın elektrik alan genliğini, 1.ortamın empedansı, 1. Ortamın dalga sayısı ve gelen dalganın sınırın normali ile yaptığı açıdır.

### 2.6. Dielektrik Olan Sınır Düzlemine Dik Gelen Dalga

2.ortamı dielektrik ortam olan ve elektriksel geçirgenliği ile manyetik geçirgenliği farklı olan başka bir dielektrik ortam sınırından dik gelen EM dalgada empedans uyumsuzluğu oluşmaktadır. Bunun sonucunda, bir dielektrik ortamdan gelen dalga, iletime ve yansımaya uğrayarak farklı iki dalgaya ayrılmaktadır. 2.ortama iletilen dalga ile bir EM enerji transferi yapılmaktadır. Şekil 2.5'te +z yönünde ilerleyen bir düzlem dalganın iletim ve yansıması ifade edilmektedir.




**Şekil 2.5.** Dielektrik sınıra dik açı ile gelen dalganın yansıma ve iletimi

$$\vec{E}_i(z) = \vec{a}_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \tag{2.39}$$

$$\vec{H}_i(z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \tag{2.40}$$

Yansıyan dalga için elektrik ve manyetik alan fazörlerini denklem 2.41 ve 2.42'te sırasıyla ifade edilmiştir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_r(z) = \vec{a}_x E_{r0} e^{j\beta_1 z} \tag{2.41}$$

$$\vec{H}_r(z) = -\vec{a}_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{j\beta_1 z} \tag{2.42}$$

İletilen dalganın elektrik ve manyetik alan fazörü denklem 2.43 ve 2.44' te ifade edilmiştir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_t(z) = \vec{a}_x E_{t0} e^{-j\beta_2 z} \tag{2.43}$$

$$\vec{H}_t(z) = \vec{a}_y \frac{E_{t0}}{\eta_2} e^{-j\beta_2 z} \tag{2.44}$$

Denklem 2.41, 2.42, 2.43 ve 2.44' teki parametreler, $E_{r0}$ ve $E_{t0}$ yansıyan dalganın elektrik alan genliğini ve iletilen dalganın elektrik alan genliğini ifade etmektedir. Denklem 2.44'teki $\eta_2$ 2. ortamın empedansını ifade etmektedir. Elektrik ve manyetik alan sınır koşulları kullanılarak $E_r$ ve $E_t$ katsayıları için $z = 0$' da denklem 2.45 ve 2.46' da sırasıyla elektrik ve manyetik alan sınır denklemleri ifade edilmektedir.

$$\vec{E}_i(0) + \vec{E}_r(0) = \vec{E}_t(0) \tag{2.45}$$

$$\vec{H}_i(0) + \vec{H}_r(0) = \vec{H}_t(0) \quad veya \quad \frac{1}{\eta_1}(E_{i0} - E_{r0}) = \frac{E_{t0}}{\eta_2} \tag{2.46}$$

Denklem 2.45'i $\eta_1$, $\eta_2$ortamların empedans değerlerinden yararlanarak sırasıyla yansıma $E_{r0}$ ve iletilen $E_{t0}$ elektrik alanları denklem 2.47 ve 2.48 ifade edilmektedir.

$$E_{r0} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \tag{2.47}$$

$$E_{t0} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \tag{2.48}$$

Yansıma ve iletim katsayısını sırasıyla denklem 2.49 ve 2.50'de ifade edilmektedir (Cheng, n.d.).

$$\Gamma = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \tag{2.49}$$

$$\tau = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \tag{2.50}$$

Denklem 2.49'da yansıma katsayısı eğer $\eta_2 < \eta_1$ koşulunda ise yansıma katsayısı negatif çıkmaktadır, iletim katsayısı ise her daim pozitif elde edilmektedir. Yansıma ve iletim katsayısı arasındaki bağıntı denklem 2.51'de ifade edilmektedir.

$$1 + \Gamma = \tau \tag{2.51}$$

Şekil 2.5' teki ikinci ortam MEİ ise $\eta_2 = 0$ ise denklem 2.49'daki $\Gamma = -1$ ve denklem 2.50'deki $\tau = 0$ olduğundan gelen dalganın hepsi yansımaya uğrayacak olup, duran dalga 1 numaralı ortamda olacaktır. Eğer ikinci ortamda MEİ yok ise kısmi yansımalar meydana gelecektir. Bu olaya bağlı olarak 1. ortamdaki toplam elektrik alanı denklem 2.52'te ifade edilmiştir.

$$\vec{E}_1(z) = \vec{E}_i(z) + \vec{E}_r(z) = \vec{a}_x E_{i0}(e^{-j\beta_1 z} + \Gamma e^{j\beta_1 z}) \tag{2.52a}$$

$$= \vec{a}_x E_{i0}[(1+\Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma(e^{j\beta_1 z} - e^{-j\beta_1 z})] \tag{2.52b}$$

$$= \vec{a}_x E_{i0}[(1+\Gamma)e^{-j\beta_1 z} + \Gamma\big(2jsin(\beta_1 z)\big) \tag{2.52c}$$

Denklem 2.52, denklem 2.51 kullanılarak düzenlendiğinde 1. ortamdaki elektrik alan denklem 2.53' teki gibi ifade edilmektedir.

$$\vec{E}_1(z) = \vec{a}_x E_{i0} \left[\tau e^{-j\beta_1 z} + \Gamma\left(2jsin\left(\beta_1 z\right)\right)\right] \tag{2.53}$$

Denklem 2.53'te birinci ortamdaki elektrik alan iki bileşenden oluşmaktadır. İletilen dalganı genliği $\tau e^{-j\beta_1 z}$ olarak ve duran dalganın genliği $2\Gamma E_{i0}$ gösterilmektedir. Elektrik alan şiddetinin maksimumu ile minimumu arasındaki oran duran dalga oranını (DDO) vermektedir. Denklem 2.54'te duran dalga oranı ifade edilmektedir (Cheng, n.d.).

$$S = \frac{|E|_{max}}{|E|_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \tag{2.54}$$

Yansıma, DDO kullanılarak denklem 2.55'te ifade edilmektedir.

$$|\Gamma| = \frac{S - 1}{S + 1} \tag{2.55}$$

Denklem 2.55'te Γ 'nın değeri (-1) ile (+1) arasında değerler alırken, duran dalga oranı (+1)'den ∞' a kadar değer almaktadır. 1. ortamın manyetik alan şiddetini gelen ve yansıyan olarak denklem 2.40 ve 2.42'yi birleştirerek denklem 2.56'da ifade edilmektedir (Cheng, n.d.).

$$\vec{H}_1(z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1}\left(e^{-j\beta_1 z} - \Gamma e^{j\beta_1 z}\right) \tag{2.56a}$$

$$= \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z}\left(1 - \Gamma e^{j\beta_1 z}\right) \tag{2.56b}$$

2.ortam için elektrik alan şiddeti +z yönünde ilerleyen dalga için denklem 2.57'de ifade edilmektedir.

$$\vec{E}_t(z) = \vec{a}_x \tau E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \tag{2.57}$$

İletilen dalganın manyetik alanı denklem 2.58'de ifade edilmiştir.

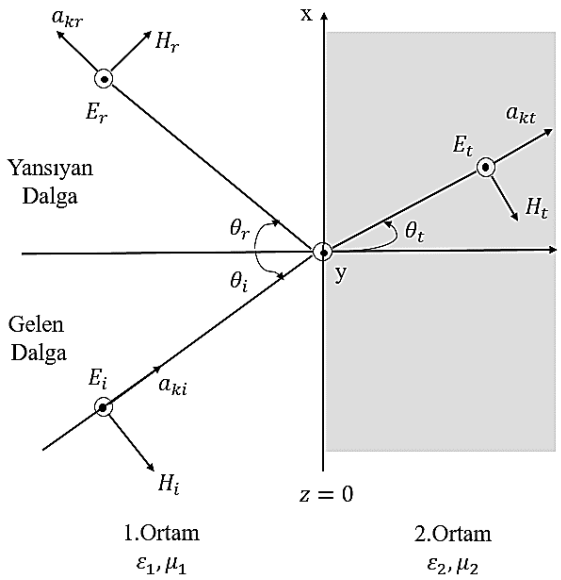
$$\vec{H}_t(z) = \vec{a}_y \frac{\tau}{\eta_2} E_{i0} e^{-j\beta_1 z} \tag{2.58}$$

## 2.7. Dielektrik Sınır Düzlemine Eğik Gelen Dalga

Dik kutuplanmış dalga için dielektrik sınırda dalganın bir kısmı yansırken, bir kısmı ise 2. ortama iletilmektedir. 1.ortamda ise gelen ve yansıyan dalga bulunmaktadır. 1. ortamdaki gelen dalganın elektrik alan şiddeti denklem 2.59'da, manyetik alan şiddeti ise denklem 2.60'da ifade edilmektedir (Cheng, n.d.).

### 2.7.1. Dik kutuplanma

Dielektrik sınıra dik kutuplanmış dalga için dalganın bir kısmı yansırken, bir kısmı ise 2. ortama iletilmektedir. 1.ortamda gelen ve yansıyan dalga bulunmaktadır. 1. ortamdaki gelen dalganın elektrik alan şiddetini denklem 2.59'da ve manyetik alan şiddetini denklem 2.60'da ifade edilmektedir (Cheng, n.d.).




**Şekil 2.6.** Dielektrik sınıra eğik açı ile dik kutuplanmış dalganın yansıma ve iletimi

$$\vec{E}_i(x,z) = \vec{a}_y E_{i0} e^{-j\beta_1(x\sin(\theta_i)+z\cos(\theta_i))} \tag{2.59}$$

$$\vec{H}_i(x,z) = \frac{E_{i0}}{\eta_1}\left(-\vec{a}_x cos(\theta_i) + \vec{a}_z sin(\theta_i)\right)e^{-j\beta_1\left(xsin(\theta_i)+zcos(\theta_i)\right)} \quad (2.60)$$

Yansıyan dalganın elektrik alan şiddetini denklem 2.61'de, manyetik alan şiddetini ise denklem 2.62'de ifade edilmektedir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_r(x,z) = \vec{a}_y E_{r0} e^{-j\beta_1\left(xsin(\theta_r)-zcos(\theta_r)\right)} \quad (2.61)$$

$$\vec{H}_r(x,z) = \frac{E_{r0}}{\eta_1}\left(\vec{a}_x cos(\theta_r) + \vec{a}_z sin(\theta_r)\right)e^{-j\beta_1\left(xsin(\theta_r)-zcos(\theta_r)\right)} \quad (2.62)$$

Aynı şekilde 2.ortama iletilen dalga için elektrik alan şiddeti denklem 2.63'te, manyetik alan şiddeti denklem 2.64'te ifade edilmektedir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_t(x,z) = \vec{a}_y E_{t0} e^{-j\beta_2\left(xsin(\theta_t)+zcos(\theta_t)\right)} \quad (2.63)$$

$$\vec{H}_t(x,z) = \frac{E_{t0}}{\eta_2}\left(-\vec{a}_x cos(\theta_t) + \vec{a}_z sin(\theta_t)\right)e^{-j\beta_2\left(xsin(\theta_t)+zcos(\theta_t)\right)} \quad (2.64)$$

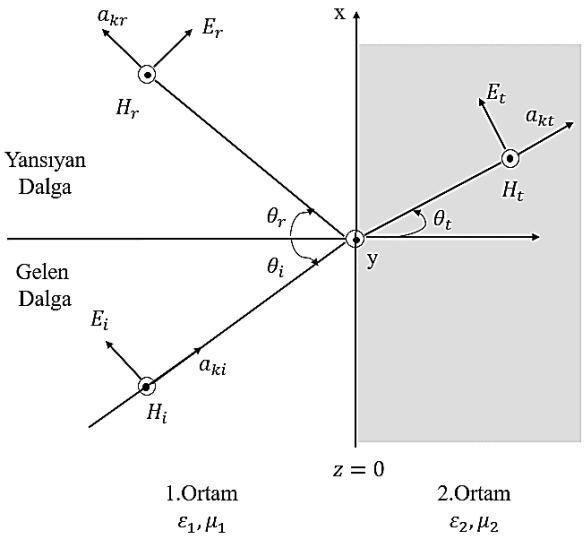
Dik kutuplanma için pratik olarak yanıma katsayısı denklem 2.65'te, iletim katsayısı denklem 2.66'da verilmektedir (Cheng, n.d.).

$$\Gamma_\perp = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{(\eta_2 cos\theta_i) - (\eta_1 cos\theta_t)}{(\eta_2 cos\theta_i) + (\eta_1 cos\theta_t)} \quad (2.65)$$

$$\tau_\perp = \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2(\eta_2 cos\theta_i)}{(\eta_2 cos\theta_i) + (\eta_1 cos\theta_t)} \quad (2.66)$$

### 2.7.2. Paralel kutuplanma

İki dielektrik malzeme arasındaki sınıra paralel kutuplanmış dalgada da yansıyan ve iletilen dalga olacaktır. 1.ortam için gelen dalganın elektrik alan şiddeti denklem 2.67'de, manyetik alan şiddeti denklem 2.68'de verilmektedir (Cheng, n.d.).




**Şekil 2.7.** Dielektrik sınıra eğik açı ile paralel kutuplanmış dalganın yansıma ve iletimi

$$\vec{E}_i(x,z) = E_{i0}\big(\vec{a}_x cos(\theta_i) - \vec{a}_z sin(\theta_i)\big)e^{-j\beta_1\left(xsin(\theta_i)+zcos(\theta_i)\right)} \tag{2.67}$$

$$\vec{H}_i(x,z) = \vec{a}_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(xsin(\theta_i)+zcos\theta_i)} \tag{2.68}$$

1.ortamdaki yansıyan dalganın elektrik alan şiddeti denklem 2.69'de, manyetik alan şiddeti ise denklem 2.70'de verilmektedir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_r(x,z) = E_{r0}\big(\vec{a}_x cos(\theta_r) + \vec{a}_z sin(\theta_r)\big)e^{-j\beta_1\left(xsin(\theta_r)-zcos(\theta_r)\right)} \tag{2.69}$$

$$\vec{H}_r(x,z) = -\vec{a}_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(xsin(\theta_r)-zcos\theta_r)} \tag{2.70}$$

2.ortama iletilen dalga için elektrik alan şiddeti denklem 2.71'de, manyetik alan şiddeti denklem 2.72'de verilmektedir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_t(x,z) = E_{t0}\big(\vec{a}_x cos(\theta_t) - \vec{a}_z sin(\theta_t)\big)e^{-j\beta_2\left(xsin(\theta_t)+zcos(\theta_t)\right)} \tag{2.71}$$

$$\vec{H}_t(x,z) = \vec{a}_y \frac{E_{t0}}{\eta_2} e^{-j\beta_2(xsin(\theta_t)+zcos\theta_t)} \tag{2.72}$$

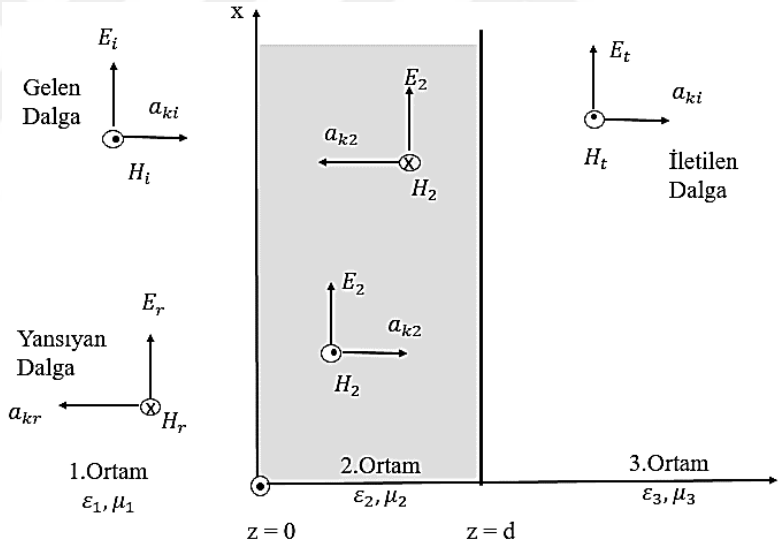
Pratik olarak yansıma katsayısı denklem 2.73'te, iletim katsayısını ise denklem 2.74'te verilmektedir (Cheng, n.d.).

$$\Gamma = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\eta_2 cos\theta_t - \eta_1 cos\theta_i}{\eta_2 cos\theta_t + \eta_1 cos\theta_i} \tag{2.73}$$

$$\tau = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2 cos\theta_i}{\eta_2 cos\theta_t + \eta_1 cos\theta_i} \tag{2.74}$$

## 2.8. Çok Katmanlı Dielektrik Sınır Düzlemine Dik Gelen Dalga

Dalga çok katmanlı dielektrik ortama farklı temel parametreler ile gelmektedir. Şekil 2.5'te 1. Ortamda bulunan +z yönünde ilerleyen düzgün düzlem dalganın çok katmanlı dielektrik sınır düzlemine normal gelişi gösterilmektedir.




**Şekil 2.8.** Çok katmanlı dielektrik ara yüze normal gelen dalganın yansıması ve iletimi

z=0 noktasında 3 katmanlı dielektrik malzeme yapısına 1. ortamda +z yönünde paralel (TM modunda) kutuplanmış düzgün düzlem dalga Şekil 2.5'te gösterildiği gibi 2. ortamın sınıra dik olarak gelmektedir. 2. ortamın, kalınlığı ve 3.ortam ile z=d'de yaptığı sınır sonsuz kabul edilerek yansıma z=0 ve z=d noktasında olmuştur. 1. ortamın toplam elektrik alan şiddeti, gelen elektrik alan ile yansıyan elektrik alan şiddetinin toplamına eşittir. Denklem 2.75'te 1. ortamın toplam elektrik alanını gösterilmiştir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_1 = \vec{a}_x(E_{i0}e^{-j\beta_1 z} + E_{r0}e^{j\beta_1 z}) \quad (2.75)$$

1. ortam için denklem 2.75' te bulunan elektrik alan şiddetini kullanarak, manyetik alan şiddeti denklem 2.76'daki ifade edilmektedir.

$$\vec{H}_1 = \vec{a}_y \frac{1}{\eta_1}\left(E_{i0}e^{-j\beta_1 z} - E_{r0}e^{j\beta_1 z}\right) \quad (2.76)$$

İleri geri dalga türlerinin meydana gelmesinin sebebi 2. ortamda z=0 ve z=d'de iki kere yansıma meydana gelmesidir. Denklem 2.77'te elektrik alan şiddetini, denklem 2.78'de ise 2. ortamın manyetik alan şiddeti verilmektedir.

$$\vec{E}_2 = \vec{a}_x(E_2^+ e^{-j\beta_2 z} + E_2^- e^{j\beta_2 z}) \quad (2.77)$$

$$\vec{H}_2 = \vec{a}_y \frac{1}{\eta_2}\left(E_2^+ e^{-j\beta_2 z} - E_2^- e^{j\beta_2 z}\right) \quad (2.78)$$

3. ortamda ise sadece iletilen dalga olduğu için elektrik alan şiddeti denklem 2.79'da manyetik alan şiddeti ise denklem 2.80'de gösterilmiştir (Cheng, n.d.).

$$\vec{E}_3 = \vec{a}_x E_3^+ e^{-j\beta_3 z} \quad (2.79)$$

$$\vec{H}_3 = \vec{a}_y \frac{E_3^+}{\eta_3} e^{-j\beta_3 z} \quad (2.80)$$

### 2.9. Çok Katmanlı Yapılarda Tasarım ve Yansıma Yaklaşımı

Çok katmanlı malzeme yapısının yüzeyinde elektromanyetik dalga olayının minimum yansımasının gerçekleşmesini sağlamak için yerine getirilebilecek en önemli üç koşul vardır. Yansıma katsayısı denklem 2.81'deki gibi yazılmaktadır (Chatterton & Houlden, 1992).

$$\Gamma = \frac{\eta_M - \eta_0}{\eta_M + \eta_0} \quad (2.81)$$

Bu koşullar kısaca şu şekilde açıklanmaktadır.

- Empedans Eşleştirme: Yansıma Kaybını hesaplamak için kullanılan Yansıma Katsayısı, $\eta_0 = \eta_M$ olarak sıfıra düşer, yani çok katmanlı yapının empedansı boş alan empedansına eşit olur. Boş alan empedansı 377 ohm'a eşittir, bu nedenle empedansı 377 ohm olan bir malzeme, boş olan bir ortama gelmekte ise, gelen dalgayı yansıtmaz.

- Elektrik Geçirgenliği = Manyetik Geçirgenlik: Denklem 2.81 yeniden yazılacak olursa denklem 2.82'ye ulaşılmaktadır. Denklem 2.83 ise normalleştirilmiş giriş empedansını vermektedir.

$$\Gamma = \frac{\frac{\eta_M}{\eta_0} - 1}{\frac{\eta_M}{\eta_0} + 1} \tag{2.82}$$

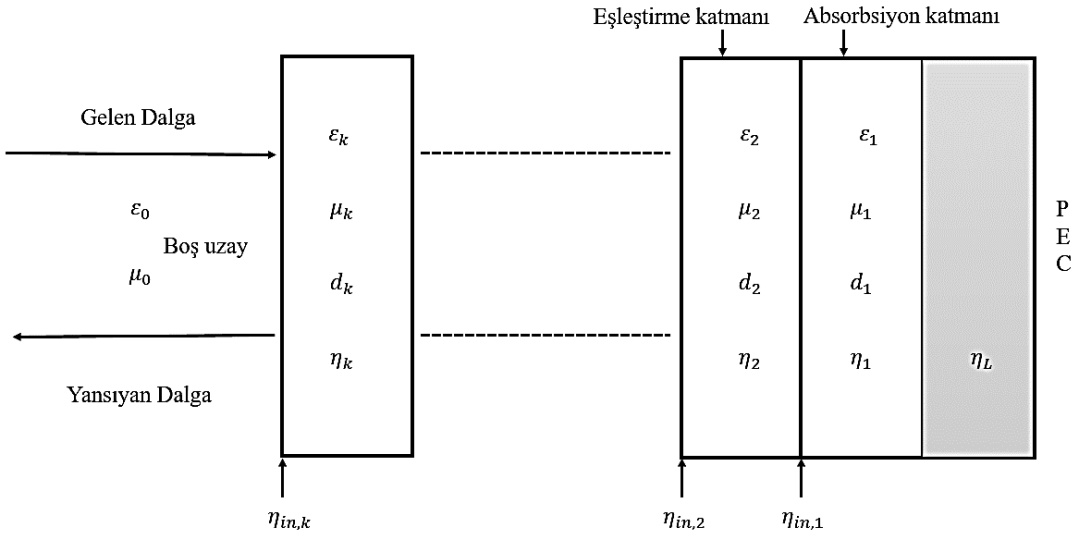
$$\frac{\eta_M}{\eta_0} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tag{2.83}$$

Manyetik geçirgenlik ve elektriksel geçirgenliğin hem gerçek hem de sanal kısımları eşitse, yansıtma katsayısı sıfırdır anlamına gelmektedir.

- Dalga Zayıflaması: Büyük zayıflama değerleri için, büyük manyetik geçirgenlik ve elektriksel geçirgenlik değerleri de gerekli olmaktadır ve bu da daha büyük bir yansıma katsayısı değeri ile sonuçlandıracaktır. Bu nedenle, Yansıma Katsayısı ile dalganın zayıflaması arasında bir değiş tokuş yapılması gerekmektedir.

Çok katmanlı malzeme yapılarının yüzeyindeki elektromanyetik dalganın normal gelişi burada ele alınmaktadır. Burada, gelen elektromanyetik dalga normal olarak ilk hava ve sonra çok katmanlı malzeme yapılarının ara yüzüne çarpar ve daha sonra iletim hattı teorisine göre, EM dalgasının iletimi, yansıması ve soğurumu gerçekleşmektedir (Balanis, 2012).

Çok katmanlı malzeme yapıları yüzeyinde dalganın normal gelişini matematiksel olarak incelemek için, k-tabakalı çok katmanlı malzeme yapısının şematik yapısının gösterildiği, her bir i'nci katmanın kalınlığının $d_k$ olduğu, dielektrik geçirgenliğin $\varepsilon_r$ ve manyetik geçirgenliğin $\mu_r$ değere sahip olduğu Şekil 2.8'de ele alınmaktadır.




**Şekil 2.9.** PEC tarafından desteklenen çok katmanlı mikrodalga soğurucu şeması

Elektrik alanı ile z ekseni boyunca yayılan düzgün düzlem dalgasının x eksenine paralel olduğu ve manyetik alanın y eksenine paralel olduğu geliş durumunda, normal olarak çok katmanlı malzeme yapısının hava ara yüzünde meydana gelmektedir. Bu durumda elektromanyetik dalga ve çok katmanlı malzeme yapısı etkileşimi, +z yönünde iletilen ve aynı zamanda -z yönünde geri yansıyan dalgalar serisine yol açmaktadır. Dalganın bu yansıması, çok katmanlı malzeme yapılarının tüm emici katmanlarında meydana gelmektedir.

Ayrıca Şekil 2.7, soğurucu katmanının, PEC ile eşleşen tüm çok katmanlı malzeme yapılarının katmanları (k-1) arasında yer aldığını göstermektedir. $\varepsilon_0$ ve $\mu_0$ sırasıyla boş alanın elektriksel ve manyetik geçirgenliğini göstermektedir.
Normal geliş için, bir PEC tarafından desteklenen bu çok katmanlı soğurucunun yansıma katsayısı (Γ) denklem 2.84'teki gibi yazılmaktadır.

$$\Gamma = \frac{\eta_{in,k} - \eta_0}{\eta_{in,k} + \eta_0} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_k}{\varepsilon_k}}\tanh(\gamma_k d_k) - 1}{\sqrt{\frac{\mu_k}{\varepsilon_k}}\tanh(\gamma_k d_k) + 1} \tag{2.84}$$

k 'ıncı katmanın yüzeyindeki dalga empedansı $\eta_{in,k}$ denklem 2.85 ile verilmektedir (Balanis, 2012).

$$\eta_{in,k} = \frac{\eta_{in,k-1} + \eta_k \tanh(\gamma_k d_k)}{\frac{\eta_{in,k-1}}{\eta_k} + \tanh(\gamma_k d_k)} + 1 \tag{2.85}$$

Soğurucu malzeme ara yüzündeki empedans tek katman için denklem 2.86'daki gibi yazılmaktadır.

$$\eta_{in,1} = \eta \tanh(\gamma_1 d_1) = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \tanh(\gamma_1 d_1) \tag{2.86}$$

Böylece, tek katmanlı soğurucu için serbest uzayda heterojen bir kompozit ara yüzde meydana gelen yansıma katsayısı (Γ) denklem 2.87'deki gibi verilmektedir.

$$\Gamma = \frac{\eta_{in,1} - \eta_0}{\eta_{in,1} + \eta_0} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) - 1}{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) + 1} \tag{2.87}$$

Benzer şekilde, 1. katmanın MEİ ile desteklendiği ve ikinci katmanın boş alan ile temas halinde olduğu iki katmanlı soğurucu (yani k=2) için yansıma katsayısı (Γ) denklem 2.88'deki gibi verilmektedir.

$$\Gamma = \frac{\eta_{in,2} - \eta_0}{\eta_{in,2} + \eta_0} = \frac{\frac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}{1 + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1)\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)} - 1}{\frac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}{1 + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1)\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)} + 1} \tag{2.88}$$

Denklem 2.89 ve 2.90'daki $\eta_2$, iki katmanlı emici için ikinci katmanın empedansını vermektedir.

$$\eta_{in,2} = \frac{\eta_{in,1} + \eta_2 \tanh(\gamma_2 d_2)}{\frac{\eta_{in,1}}{\eta_2} + \tanh(\gamma_2 d_2)} + 1 \tag{2.89}$$

$$\eta_2 = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} \tag{2.90}$$

Birinci katmanın PEC ile desteklendiği, ikinci katmanın birinci katmanla desteklendiği ve üçüncü katmanın boş alan ile temas halinde olduğu üç katmanlı soğurucunun (yani, k=3) yansıma katsayısı benzer şekilde denklem 2.94'te bulunmaktadır. Aynı benzetme çok katmanlı malzeme yapısının N katmanına genişletilebilmektedir.

$$\eta_{in,3} = \frac{\eta_{in,2} + \eta_3 \tanh(\gamma_3 d_3)}{\frac{\eta_{in,2}}{\eta_3} + \tanh(\gamma_3 d_3)} \tag{2.91}$$

$$\eta_3 = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_3}{\varepsilon_3}} \tag{2.92}$$

$$\gamma_k = \pm\sqrt{j\omega\mu_k(\sigma_k + j\omega\varepsilon_k)} \tag{2.93}$$

$$\Gamma = \frac{\eta_{in,3} - \eta_0}{\eta_{in,3} + \eta_0}$$

$$= \frac{\dfrac{\dfrac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}{1 + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1)\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)} + \eta_3 \tanh(\gamma_3 d_3)}{\dfrac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}{1 + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1)\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}\tanh(\gamma_3 d_3)} - \eta_0}{1 + \dfrac{\dfrac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}{1 + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1)\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}}{\eta_3}\tanh(\gamma_3 d_3)}$$

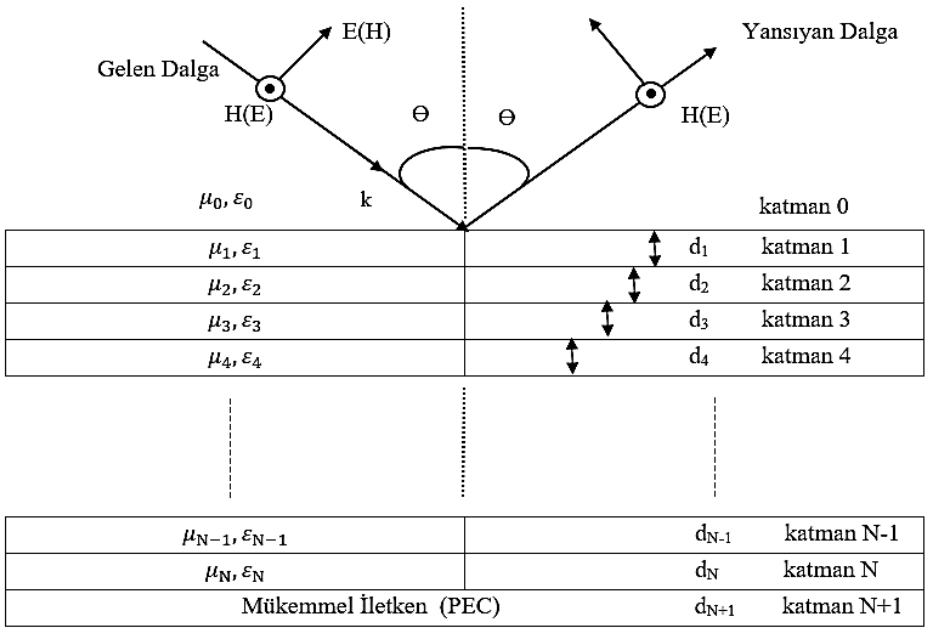
$$\frac{\dfrac{\dfrac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}{1 + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1)\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)} + \eta_3 \tanh(\gamma_3 d_3)}{\dfrac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}{1 + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1)\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}\tanh(\gamma_3 d_3)} + \eta_0}{1 + \dfrac{\dfrac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}{1 + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\tanh(\gamma_1 d_1)\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\tanh(\gamma_2 d_2)}}{\eta_3}\tanh(\gamma_3 d_3)} \tag{2.94}$$

Çok katmanlı soğurucular için $RL$, denklem 2.95'teki gibi ifade edilmektedir. (Kaur, 2017)

$$RL(dB) = -20\log_{10}|\Gamma| \tag{2.95}$$

## 2.10. Çok Katmanlı Yapılarda Chew Yaklaşımı

Eğik gelişi anlamak için, bir MEİ yüzey üzerinde N katmanlı bir düzlemsel çok katmanlı metamalzeme yapısını ele alalım. Çok katmanlı malzeme yapısında belirli bir frekans aralığında gelen EM dalgası, bu geliş noktasında normale göre θ kadar eğik bir açıyla havadan ara yüzdeki birinci katmana çarpmaktadır. Sonrasında, dalga çok katmanlı malzeme yapısının ardışık katmanları boyunca ilerleyip hareket ettikçe, dalganın enerjisinin bir kısmı yapının her katmanında emilmektedir. Son olarak dalga, ideal olarak mükemmel bir yansıma sağlayan MEİ (katman N+1) tarafından yansıtılmaktadır. Şekil 2.8'daki gibi gösterilmektedir.




**Şekil 2.10.** Eğik gelişi gösteren genelleştirilmiş soğurucu yapı modeli

Çok katmanlı malzeme yapısının iki katmanı arasındaki genelleştirilmiş yansıma katsayısı İletim Hattı Teorisi (Weng Cho, 1999) tarafından verilen denklem 2.91'deki özyinelemeli formül ile verilmektedir. (Asi & Dib, 2010; Dib et al., 2010)

$$R_{i,i+1} = \frac{r_{i,i+1} + R_{i+1,i+2} e^{-2jk_{i+1}d_{i+1}}}{1 + r_{i,i+1} + R_{i+1,i+2} e^{-2jk_{i+1}d_{i+1}}} \tag{2.96}$$

Şimdi, manyetik alanın dalganın yayılma yönüne çapraz olduğu, elektrik alanının bu yayılma yönüne normal olduğu **TM** veya Paralel polarizasyon modunda

$$r_{i,i+1} = \frac{\varepsilon_{i+1}k_i - \varepsilon_i k_{i+1}}{\varepsilon_{i+1}k_i + \varepsilon_i k_{i+1}} \quad , \qquad i < N \tag{2.97}$$

Elektrik alanının dalganın yayılma yönüne çapraz olduğu **TE** veya Dikey polarizasyon modundayken, manyetik alan bu yayılma yönüne normaldir:

$$r_{i,i+1} = \frac{\mu_{i+1}k_i - \mu_i k_{i+1}}{\mu_{i+1}k_i + \mu_i k_{i+1}} \quad , \qquad i < N \tag{2.98}$$

Burada $\varepsilon_i$, çok katmanlı malzeme yapısının i'nci katmanının frekansa bağlı elektriksel geçirgenliğidir, $\mu_i$ çok katmanlı malzeme yapısının i'nci katmanının frekansa bağlı manyetik geçirgenliğidir ve $k_i$, formülasyonu Snell Yasası ile denklem 2.92'deki gibi verilen i'nci katmanın dalga numarasıdır.

$$k_i = \omega\sqrt{\varepsilon_i\mu_i - \varepsilon_0\mu_0 \sin^2\theta} \tag{2.99}$$

Denklem 2.98'de $\omega$, çok katmanlı yapıya gelen dalganın frekansı ve $\mu_0$ ve $\varepsilon_0$ serbest alan geçirgenlik ve geçirgenlik değerleridir. Çok katmanlı malzeme yapısının son katmanı ile PEC ($R_{N,N+1}$) arasındaki son arayüzün yansıma katsayısının, TE polarizasyonu için -1 olarak alınması TM polarizasyonu için ise +1'e ayarlanması gerekmektedir. Çok katmanlı malzeme yapısının toplam yansıma kaybını hesaplamak için ilk ara yüzün yansıma katsayısının hesaplanması gerekmektedir. Bu işlemler, denklem 2.95'ten 2.98''e kadar belirtilen denklemler kullanılarak özyinelemeli olarak yapılmaktadır.

## 2.11. Kaynak Araştırması

Literatürde çok katmanlı mikrodalga soğurucuların optimal tasarımının yapılabilmesi için farklı optimizasyon yaklaşımları ile oluşturulan çeşitli çok katmanlı malzeme yapıları mevcuttur. Araştırmacıların literatüre kazandırmış oldukları bazı örnek çalışmalar şunlardır;

Michielssen ve diğerleri frekansa bağlı elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlikleri önceden tanımlanmış malzeme seti verildiğinde, çok katmanlı radar soğurucu yapıları için 0.2-2 GHz ve 2-8 GHz frekans aralıklarında yapı modelleri sunmuşlardır. Genetik Algoritmayı kullanarak yansıma katsayısını ve soğurucu yapının kalınlığını en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Önerilen teknik ile aynı anda her katman için optimal malzeme seçimini ve kalınlığını belirlemişlerdir (Michielssen et al., 1993).

S.K. Goudos ve Sahalos, istenilen frekans ve açı aralığı için yüksek soğuruculuğa sahip düzlemsel çok katmanlı yapıların tasarımını sunmuştur. Tasarım tekniği, çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonuna (MOPSO) dayanmaktadır. MOPSO'nun ana avantajı, diğer optimizasyon yöntemlerine kıyasla daha az hesaplama yükü gerektirmesi olmuştur (S.K. Goudos & Sahalos, 2006).

Chamaani ve diğerleri, düzlemsel çok katmanlı elektromanyetik soğurucuların tasarımını çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonunu (MOPSO) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Daha iyi çeşitlilik elde etmek için MOPSO'ya bazı değişiklikler uygulamışlardır. Modifiye edilmiş MOPSO'da, MOPSO'nun ulaşamadığı bazı uç noktaları bulmak için hızlı ve verimli tek amaçlı bir PSO kullanılmıştır. Daha sonra diğer iterasyonlarda bu algoritmada kullanılan kuşaklama nedeniyle yüksek bir çözüm dağılımına ulaşmışlardır. Sonuçlarında, Modifiye MOPSO'nun çeşitliliğinin her zaman daha iyi olduğunu ve daha geniş bir çözüm kümesi önerdiğini göstermişlerdir (Chamaani et al., 2007).

Fang ve Xu yaptıkları çalışmalarda, çift katmanlı elektromanyetik soğurucuları sunmuşlardır. 7GHz-13GHz frekans aralığında -20dB'nin altındaki yansıma kaybının elde edilebileceği belirtmişlerdir. -50dB dar frekans bantlı elektromanyetik soğuruculara

ulaşan güç zayıflaması, sağ taraflı malzemenin geçirgenliğini modüle ederek de elde edilebileceği belirtilmiş. Ayrıca bazı pratik uygulamalarda yararlı olacağı düşünüldüğü için tüm yapının kalınlığı 2 mm olan uygulamalar ele alınmış ve makalede verilen sonuçlar, yeni geniş bant ve dar bant dalga soğurucuların doğru tasarımı ve gizli teknoloji için pratik beklentilerde referans öneme sahip olduğu savunulmuştur (Fang & Xu, 2008).

Goudos, istenilen frekans ve açı aralığında mikrodalga geniş bant soğurucu tasarımı sunmuştur. Tasarım tekniği, kendi kendine uyarlanan Diferansiyel Evrim (DE) algoritmasına dayanmaktadır. Sayısal örnekler literatürde var olanlarla ve diğer evrimsel algoritmalar kullanılarak tasarlananlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda, yeni DE algoritma sürümünün Parçacık sürüsü optimizasyonu varyantları ve klasik DE algoritması gibi diğer küresel optimize edicilerden daha iyi performans gösterdiğini sunmuştur (Sotirios K. Goudos, 2009).

Dib ve diğerleri, çalışmalarında rekabetçi kontrol parametresi ayarlama tekniği ile diferansiyel evrim algoritmasını kullanan çok katmanlı mikrodalga soğurucuların optimal tasarımını sunmuştur. Chew'in yansıma katsayısı için özyinelemeli formülünün TE durumu için elektrik alana karşılık geldiği, TM durumu için ise manyetik alana karşılık geldiğini özellikle vurgulamışlardır. Normal ve eğik geliş için her iki polarizasyonu da dikkate alarak beş farklı soğurucu tasarımı sunulmuştur. Geniş bantlı (0.1–20 GHz) ve toplam kalınlığı 6.8 mm olan yedi katmanlı bir soğurucu, hem TE hem de TM polarizasyonları için 50º'ye kadar geliş açıları için -10 dB' den daha iyi bir yansıma katsayısı ile tasarlanmıştır (Dib et al., 2010).

Asi ve Dib yaptıkları çalışmada, belirli bir frekans aralığında çok katmanlı mikrodalga soğurucuların normal geliş için optimal tasarımına değiştirilmiş bir Merkezi Kuvvet Optimizasyonu (CFO), algoritması uygulamıştır. CFO sonuçlarının, kendinden uyarlamalı diferansiyel evrim (SADE) algoritması, parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve yerçekimi arama algoritması (GSA) tarafından bulunanlarla karşılaştırılmış ve daha iyi olduğu gösterilmiştir (Asi & Dib, 2010).

Roy ve diğerleri bu çalışmada, farklı frekans aralıkları, geliş açıları ve polarizasyonlar üzerinde çok katmanlı mikrodalga soğurucu için en uygun tasarımları elde etmek için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasının farklı varyasyonlarının performanslarını karşılaştırmışlardır. PSO' nun her bir varyasyonu için sayısal optimal sonuçlar sunulmuş ve en iyi sonuçlar literatürde mevcut olanlarla karşılaştırılmıştır. Hem normal hem de eğik geliş ve hem TM hem de TE için geniş bant frekans aralığında çeşitli soğurucu tasarımları elde edilmiştir. Ortaya çıkan mikrodalga soğurucu modellerinin genellikle ince olduğu ve literatürde yayınlananlardan daha iyi bir frekans tepkisine sahip olduğu bulunmuştur (Roy et al., 2015).

Ranjan ve diğerleri yaptıkları çalışmada TE ve TM polarizasyonlarında hem normal hem de eğik geliş için 0°- 60° geliş açısı aralığında çok katmanlı soğurucu yapı modeli önermişlerdir. Wind Driven Optimization (WDO) tekniğini kullanarak literatürdeki mevcut veri tabanından uygun malzeme katmanlarını seçip soğurucunun maksimum yansıma katsayısını azaltmayı ve toplam kalınlığını minimum seviyeye indirmeyi hedeflemişlerdir. Farklı frekans aralıkları için (2-8GHz, 8-12GHz, 12-18GHz, 2-12GHz, 2-18GHz) WDO algoritmasını kullanarak dört katmandan oluşan çok katmanlı soğurucu yapılarına beş model önerisinde bulunmuşlardır. Yaptıkları analizler sonucunda daha önceden bildirilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında kalınlık ve dalganın eğik gelişi açısından iyileştirilmiş sonuçlar elde etmişlerdir (Ranjan et al., 2018).

Mouna ve diğerleri sabit sayıda katman ve polarizasyon için bir frekans ve geliş açısı aralığında en aza indirilmiş maksimum yansıma katsayısını bulmayı ve analiz etmeyi hedeflemişlerdir. Optimum çözümü arayan bir hız kısıtlama faktörü kullanarak doğaçlama bir PSO algoritması önermişlerdir. Algoritma, mikrodalga soğurucu yapıları için karşılaştırmalı olarak daha iyi yansıma katsayısı değerleri bulmayı amaçlamaktadır. Pareto ilkesine dayanarak, daha iyi yakınsama için bir tür mutasyon tekniği de kullanılmıştır. Mikrodalga soğurucu yapısının çeşitli kombinasyonları için sonuçlar karşılaştırılmış ve her katmanın kalınlığı da önceden tanımlanmış bir veri tabanı için optimize edilmiştir (Mouna et al., 2018).

Yiğit ve diğerleri, bu çalışmada mikrodalga frekans bandında elektromanyetik soğurucu tasarlamak için Hibrit Taguchi Genetik yaklaşımı kullanmışlardır. Yaklaşımın amacı, soğurucu girişinde minimum yansıma sağlayan minimum soğurucu kalınlığını bulmaktır. Hibrit Taguchi Genetik Algoritması (HTGA), TE ve TM polarizasyonlarında geniş açı aralığında eğik geliş ve normal geliş dikkate alınarak geniş bantta minimum yansıma katsayısına sahip ince bir soğurucu elde etmek için Taguchi Algoritmasını (TA) ve Genetik Algoritmasını (GA) kullanmaktadır. HTGA'nın farklı elektromanyetik soğurucu tipleri için optimizasyon sonuçları literatürde verilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. HTGA diğerlerinden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür (Yiğit et al., 2019).

Toktaş ve diğerleri, 0,2–2GHz, 2–8GHz, 8–12GHz, 12–18GHz ve 2–18 GHz'lik radar bantlarındaki beş katmanlı geniş bant ve geniş geliş açılı çok katmanlı soğurucuları TE ve TM polarizasyonları için Pareto ön tekniği ile entegre vekil tabanlı optimizasyon (SBO) tekniğini kullanarak optimum şekilde tasarlamayı amaçlamışlardır. Optimizasyon yöntemlerini yansıma katsayısını ve toplam kalınlığı en aza indirgemek için kullanmışlar ve literatürdeki diğer çalışmalar ile sonuçları karşılaştırmışlardır. (Toktas et al., 2019)
Yiğit ve Duysak, bu çalışmada çok katmanlı radar soğurucunun optimum tasarımı için çift aşamalı bir yapay arı kolonisi (DS-ABC) algoritmasını önermiştir. Bu optimizasyon yönteminde katmanların sayısını ve sırasını kalınlıklardan ayrı olarak değerlendiren bir sistem önerilmiştir. Çok katmanlı radar soğurucunun dizilimi ve kalınlığı, istenen frekans aralıkları (2-18 GHz), geliş açıları ($0^{o}$ - $40^{o}$) ve polarizasyonlar (TE/TM) için yansıma katsayısını ve toplam kalınlığı en aza indirecek şekilde optimize edilmesi hedeflenmiştir. Çok katmanlı radar soğurucu tasarımları için önceden tanımlanmış 16 materyal ve yakın zamanda yayınlanmış 21 güncel materyal kullanılmıştır. Tasarlanan çok katmanlı radar soğurucular literatürde mevcut olan diğer algoritmalar tarafından optimize edilenler ile karşılaştırılmış ve DS-ABC algoritmasının, en uygun katman dizisini ve karşılık gelen kalınlıkları bulmak için diğer geleneksel meta sezgisel arama algoritmalarından daha etkili olduğunu göstermiştir (Yigit & Duysak, 2019).

# 3. MATERYAL ve YÖNTEM

## 3.1. Sezgisel Algoritmalar

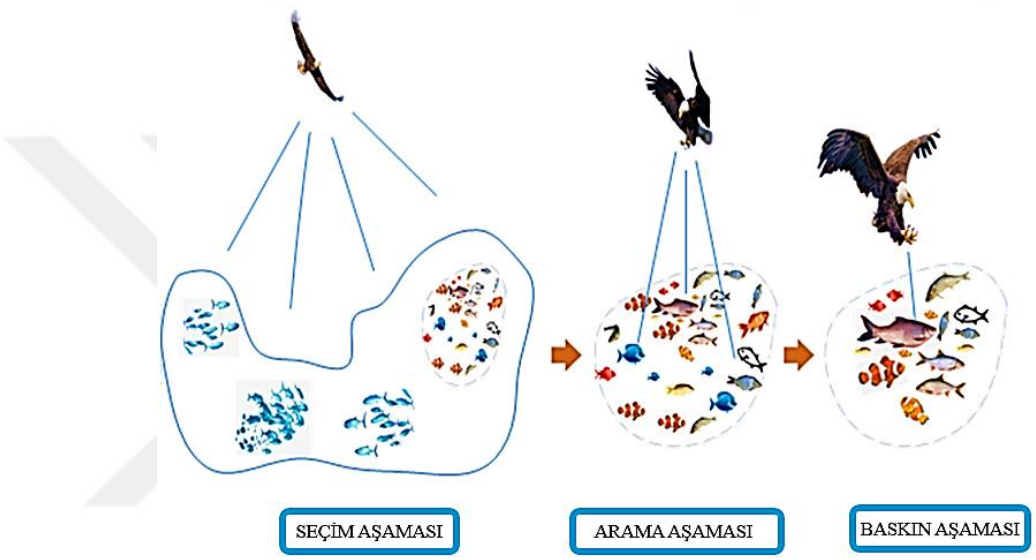
Kombinatoryal ve sayısal optimizasyon problemlerini çözmek için çeşitli sezgisel algoritmalar geliştirilmiştir . Ayrıca, dikkate alınan kriterlere bağlı olarak bu algoritmalar, popülasyon tabanlı, stokastik tabanlı, iteratif, rastgele vb. gibi ayrı gruplara ayrılmaktadır. Popülasyon tabanlı bir çözüm kümesi üzerinde çalışılması ve tek bir çözüme ulaşmak için birden fazla yineleme kullanılmasına yinelemeli algoritma denmektedir. Benzer şekilde, bir çözümü geliştirmek için olasılıksal bir çözüm kullanan bir algoritmaya stokastik veya olasılıksal algoritma denmektedir. Bir diğer önemli ayrım ise algoritmanın gösterdiği fenomen temelinde yapılır, bu nedenle temelde iki tür olarak evrimsel ve sürü zekası vardır.

Sezgisel algoritmalar mühendislikte, tasarımda veya endüstriyel bir tesis işletimindeki herhangi bir amacı gerçekleştirmek veya hedefe varmak için doğal fenomenlerden esinlenen algoritmalardır. Bu algoritmaların, çözüm uzayında en uygun çözüme olan yakınsaması ispat edilememektedir. Sezgisel algoritmalar yakınsama özelliğine sahip olmakla birlikte kesin çözümü garanti edemez fakat bu kesin çözüme yakın bir çözümü garanti edebilmektedir.

## 3.2. Yeni Meta Sezgisel Kel Kartal Arama Optimizasyonu Algoritması

Bu çalışma, bir meta sezgisel optimizasyon algoritması olarak kel kartalların balık ararken avlanma stratejisini ve akıllı sosyal davranışlarını taklit eden yeni ve doğadan ilham alan kel kartal arama optimizasyon algoritması (KKAOA) önermektedir. KKAOA' da avcılık üç aşamaya ayrılmıştır. İlk aşama olan seçim aşamasında, kartal en fazla avın bulunduğu yeri seçmektedir. İkinci aşama olan arama aşamasında, kartal av aramak için seçilen alanın içinde hareket etmektedir. Üçüncü aşama ise swooping olarak adlandırılan saldırı aşamasıdır. Bu aşamada kartal ikinci aşamada belirlenen en iyi konumdan sallanır ve avlanmak için en iyi noktayı belirler. Saldırı(swooping) en iyi noktadan başlar ve diğer tüm hareketler bu noktaya yönlendirilir. KKAOA için denklem 3.1, algoritma

performansını değerlendirmek için optimizasyon probleminin kıyaslamasını tanımlamaktadır. Denklem 3.2'de algoritma performansını diğer akıllı hesaplama teknikleri ve parametre ayarlarıyla karşılaştırılır ve denklem 3.3'te üç parçalı bir değerlendirme metodolojisi benimseyerek test edilmektedir. Optimizasyon sonuçları ve tartışma, KKAO algoritmasının gelişmiş meta-sezgisel algoritmalar ve geleneksel yöntemlerle iyi rekabet ettiğini doğrulamaktadır. Şekil 3.1'de kel kartal arama optimizasyon algoritma şeması verilmektedir.

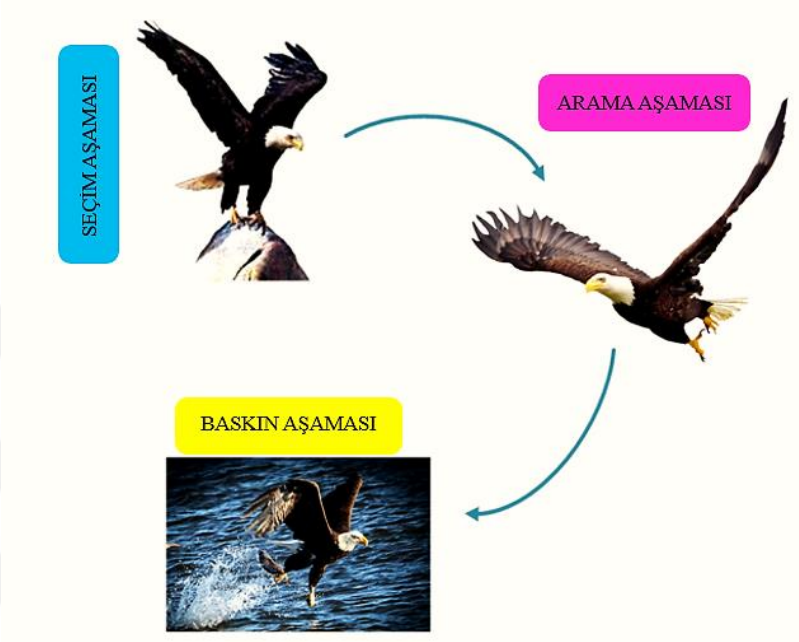



**Şekil 3.1.** Kel kartal arama optimizasyon algoritma şeması

### 3.2.1. Kel kartalın avlanma sırasındaki davranışı

Kel kartallar kel değildir, avcılardır ve yalnızca büyüklükleri nedeniyle besin zincirinin en üstünde yer almaktadırlar. Ayrıca kel kartallar, kolay ve protein açısından zengin yiyeceklerle ziyafet çeken çöpçüler olarak kabul edilmektedir. Kel kartallar, başlıca besin olarak balıkları (canlı veya ölü), özellikle somon balığını seçen fırsatçı bir toplayıcı olarak görülmektedir. En uygun av kararları veren kuşlar, av girişiminin enerji maliyetini, avın enerji içeriğini ve çeşitli habitatlardaki başarı olasılığını çoklu saldırı yöntemlerini kullanarak değerlendirebilmektedir (Todd et al., 1982). Kel kartallar sıklıkla tüneklerden avlanırlar, ancak uçuş sırasında da avlanabilmektedirler. Sudan balık elde etmek zor olduğu için çok uzak mesafelerdeki balıkları tespit edebilmektedirler. Kel kartallar

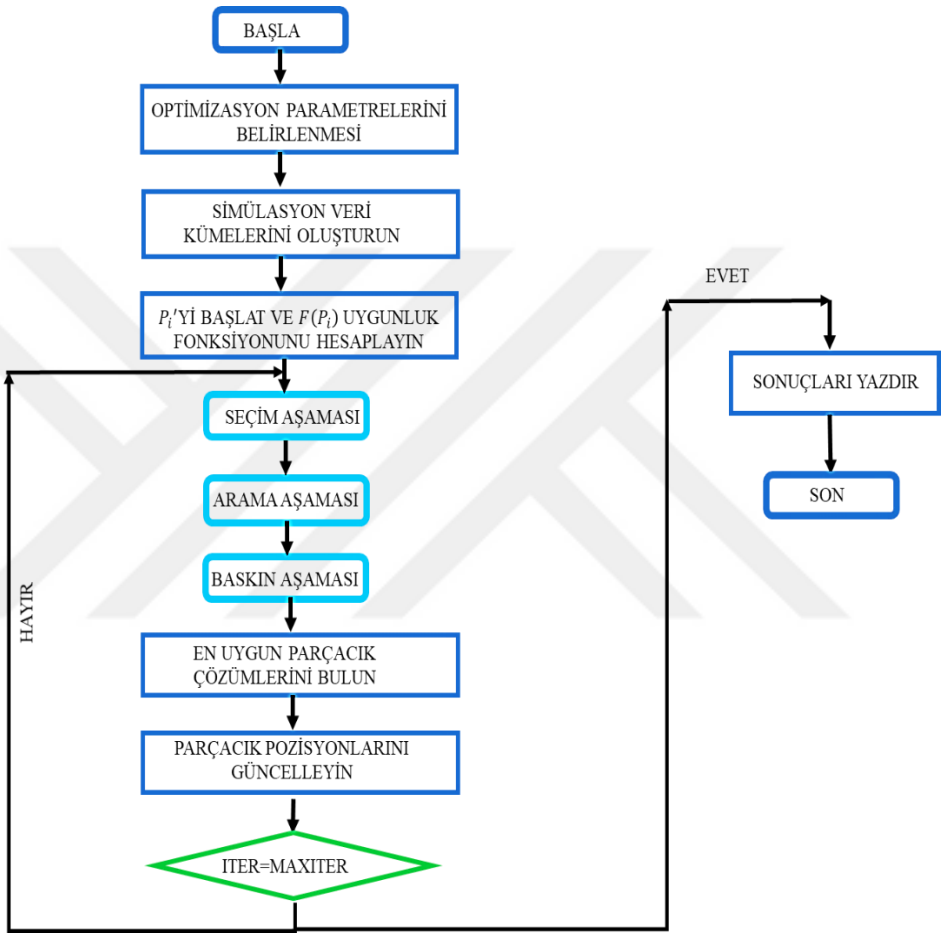
avlanma sırasında önemli miktarda enerji tükettikleri için belli zamanlarda dinlenmektedirler. Avlanma başarısı olasılığını en üst düzeye çıkarırken en az enerji tüketimlerine yardımcı olabilecek belirli bir avlanma stratejileri bulunmaktadır. Şekil 3.2, kel kartalların avlanma sırasındaki davranışlarını göstermektedir.




**Şekil 3.2.** Bir kel kartalın avlanma sırasındaki davranışı

Bu kartallar bir su birikintisi üzerinde yiyecek aramaya başladıklarında, belirli bir yöne doğru yola çıkarlar ve aramaya başlamak için belirli bir alanı seçerler. Arama uzayını bulma, kendi kendine arama veya diğer kuşları ölü veya diri balık konsantrasyonlarına kadar takip ederek gerçekleştirebilmektedirler (Stalmaster, 1987). Sonraki aşamada ise, kel kartallar doğrudan belirli bölgeye gidecektir. Suyun derinliklerine kıyasla kıyıdan 5 m mesafede yiyecek arama başarısı yüksektir. Yani, yiyecek arama habitatı için önemli bir husus, kel kartalların kara yüzeyi ile sığ sudan uzaktaki derin su arasındaki orta boşluğu seçmesidir (Stalmaster & Gessaman, 1982). Spesifik olarak, bir çift kartal günde 250 hektardan fazla açık merada avlanmaktadır. Kartallar bölgeye ulaştıklarında aramaya başlamaktadırlar. Enerji, arama aşamasında kritik bir faktör olduğu için seçilen alan yuvalarından 700 m'den daha uzak değildir (Lasserre, 2004). Bir kartalın gözü insan gözü kadar büyüktür ve ayrıca insanlarınkinin dört katı olan mükemmel bir görüşe sahiptir. Bu

sayede sudaki balıkları veya ölü balıkları yüzlerce metre yükseklikten gözlemlemektedirler. Avlanma davranışının ikinci aşaması avı görmektir. Kartallar avını gördükten sonra, avına yüksek bir hızda ulaşmayı amaçlamaktadır. Son aşamada ise balığı sudan kapmak için kademeli bir hareket akışıyla alçalan av davranışını gerçekleştirmektedirler.




**Şekil 3.4.** KKAO algoritması akış diyagramı

Önerilen algoritma, avcılığın her aşamasının ortak dizilerini doğrulamak için avcılık sırasında kel kartalların davranışını taklit etmektedir. Buna göre bu algoritma arama uzayını seçme, seçilen arama uzayı içinde arama ve baskın yapma (swooping) olmak üzere üç aşamaya ayrılmaktadır (Alsattar et al., 2020).

### 3.2.2. Seçim aşaması

Seçim aşamasında, kel kartallar, seçilen arama alanı içinde av için avlanabilecekleri yiyecek miktarı açısından en iyi alanı belirler ve seçer. Denklem 3.1 bu davranışı matematiksel olarak sunmaktadır.

$$P_{yeni,i} = P_{en\ iyi} + \alpha \times r(P_{ortalama} - P_i) \tag{3.1}$$

α, 1,5 ile 2 arasında bir değer alan konumdaki değişiklikleri kontrol etmeye yönelik parametredir ve r, 0 ile 1 arasında rastgele değer alan bir sayıdır. Seçim aşamasında, kel kartallar bir önceki aşamadaki mevcut bilgilere dayanarak bir alan seçtikleri için önceki arama alanından farklı olan ancak yakınında bulunan başka bir arama alanını rastgele seçmektedirler. $P_{en\ iyi}$, kel kartallar tarafından önceki aramaları sırasında belirlenen en iyi konuma dayalı olarak seçilen arama alanını belirtmektedir. Kartallar, önceden seçilen arama alanının yakınındaki tüm noktaları rastgele arar ve bu arada $P_{ortalama}$, bu kartalların önceki noktalardan gelen tüm bilgileri kullandığını belirtmektedir. Kel kartalların mevcut hareketi, rastgele aranan ön bilgilerin α ile çarpılmasıyla belirlenmektedir. Bu işlem tüm arama noktalarını rastgele değiştirmektedir (Hatamlou, 2011).

### 3.2.3. Arama aşaması

Arama aşamasında, kel kartallar seçilen arama alanı içinde av ararlar ve aramalarını hızlandırmak için spiral bir boşluk içinde farklı yönlerde hareket ederler. Baskın için en iyi konum denklem 3.2'de matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$P_{i,yeni} = P_i + y(i) \times (P_i - P_{i+1}) + x(i) \times (P_i - P_{ortalama}) \tag{3.2}$$

$$x(i) = \frac{xr(i)}{\max(|xr|)} \quad , \quad y(i) = \frac{yr(i)}{\max(|yr|)} \tag{3.2a}$$

$$xr(i) = r(i) \times \sin(\theta(i)) \ , \ yr(i) = r(i) \times \cos\big(\theta(i)\big) \tag{3.2b}$$

$$\theta(i) = a \times \pi \times rand \ldots \tag{3.2c}$$

$$r(i) = \theta(i) + R \times rand \ldots \tag{3.2d}$$

Burada $a$, merkezi noktada nokta arama arasındaki köşeyi belirlemek için 5 ile 10 arasında değer alan bir parametredir ve $R$, arama çevrimi sayısını belirlemek için 0,5 ile 2 arasında bir değer almaktadır.

### 3.2.4. Baskın – saldırı (swooping) aşaması

Saldırı aşamasında, kel kartallar arama alanındaki en iyi konumdan hedef avlarına doğru sallanır. Tüm noktalar aynı zamanda en iyi noktaya doğru hareket eder. Denklem 3.3 bu davranışı matematiksel olarak göstermektedir.

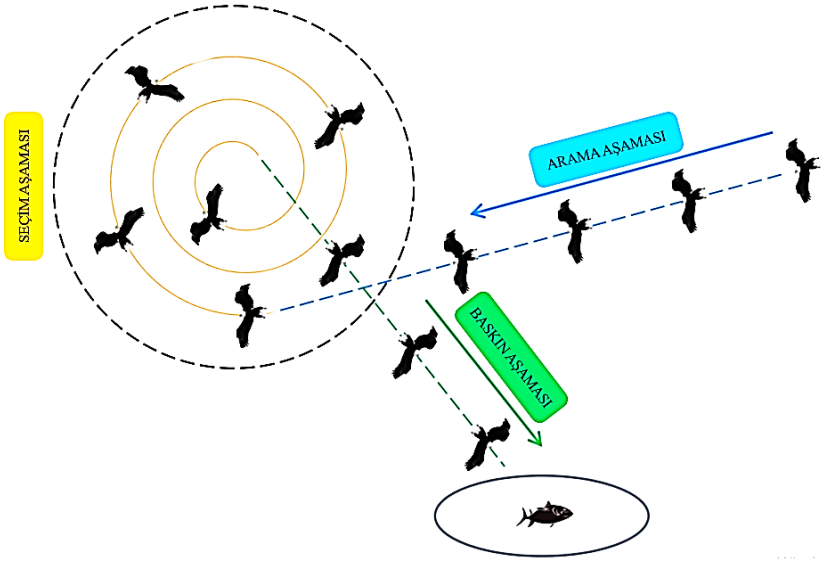
$$\begin{aligned} P_{i,yeni} = rand \times P_{en\ iyi} + x_1(i) \times (P_i - c_1 \times P_{ortalama}) + y_1(i) \\ \times \left(P_i - c_2 \times P_{en\ iyi}\right) \quad ve \quad c_1 , c_2 \in [1,2] \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$x_1(i) = \frac{xr(i)}{\max(|xr|)} \ , y_1(i) = \frac{yr(i)}{\max(|yr|)} \tag{3.3a}$$

$$r(i) = r(i) \times \sinh[(\theta(i))] \ , \ yr(i) = r(i) \times \cosh[\big(\theta(i)\big)] \tag{3.3b}$$

$$\theta(i) = a \times \pi \times rand \quad ve \quad r(i) = \theta(i) \tag{3.3c}$$

Şekil3.3'te seçim, arama ve baskın aşamalarını içeren KKAO algoritmasının ana bileşenleri tanıtılmıştır. Kalan işlemleri tanımlamak ve KKAO algoritmasının uygulamasını kolaylaştırmak için algoritmanın sözde kodunun incelenmesi gerekmektedir. KKAO algoritmasının sözde kodu aşağıda verilmektedir.




**Şekil 3.3.** Avlanmanın üç ana aşaması

Kel Kartal Arama Optimizasyonu Algoritması Sözde kodu

1: N. nokta için $P_i$ noktasını rastgele başlat;

2: Başlangıç noktasının uygunluk değerlerini hesaplayınız: f ($P_i$);

3: WHILE

**Seçim Aşaması**

4: Popülasyondaki her i noktası için

5: $P_{yeni} = P_{en\ iyi} + \alpha \times rand(P_{ortalama} - P_i)$

6: If f($P_{yeni}$) < f($P_i$)

7: $P_i = P_{yeni}$

8: If f($P_{yeni}$) < f($P_{en\ iyi}$)

9: $P_{en\ iyi} = P_{yeni}$

10: End If

11: End If

12: End For

**Arama Aşaması**

13: Popülasyondaki her i noktası için

14: $P_{yeni} = P_i + y(i) \times (P_i - P_{i+1}) + x(i) \times (P_i - P_{ortalama})$

15: : If f($P_{yeni}$) < f ($P_i$)

16: $P_i = P_{yeni}$

17: If f ($X_{yeni}$) < f($P_{en\ iyi}$)

18: $P_{en\ iyi} = P_{yeni}$

19: End If

20: End If

21: End For

**Baskın-Saldırı Aşaması**

22: Popülasyondaki her i noktası için

23: $P_{i,yeni} = rand \times P_{en\ iyi} + x_1(i) \times (P_i - c_1 \times P_{ortalama}) + y_1(i) \times (P_i - c_2 \times P_{best})$

24: If f ($P_{yeni}$) < f ($P_i$)

25: $P_i = P_{yeni}$

26: If f($P_{yeni}$) < f($P_{en\ iyi}$)

27: $P_{en\ iyi} = P_{yeni}$

28: End If

29: End If

30: End For

31: k: = k+1

32: END WHILE

Başlatma prosedürü ile ilk olarak algoritmanın bir ve ikinci satırları etkinleştirilmektedir. Popülasyon $P_i$ problemler alanında oluşturulmak üzere başlatılır ve yineleme sayısı olan t sıfıra ayarlanmaktadır. $P_i$ 'deki her çözüm için konum bilgisi rastgele oluşturulmakta olup daha sonra her bir parçacığın amaçları değerlendirilmektedir. 4 -12 satırları arasını kullanarak en iyi çözüm çevresinde arama yapmak için seçim alanı, iki eksende ve iki harekette rastgele sayının üretildiği spiral hareketi kullanarak ise yeni alanı, arama ve seçim alanlarını değerlendirmektedir. Çözüm, bir sonraki noktaya ve merkez noktaya doğru hareket etmektedir.

13-21 satırları arasını kullanarak av için yeni konum değerlendirilmektedir. Sonrasında, arama alanındaki yeni konumu kullanarak ava doğru süzülmek için baskın aşaması başlamaktadır. Yeni çözüm 22-30 satırları kullanılarak değerlendirilmektedir. Üç adım

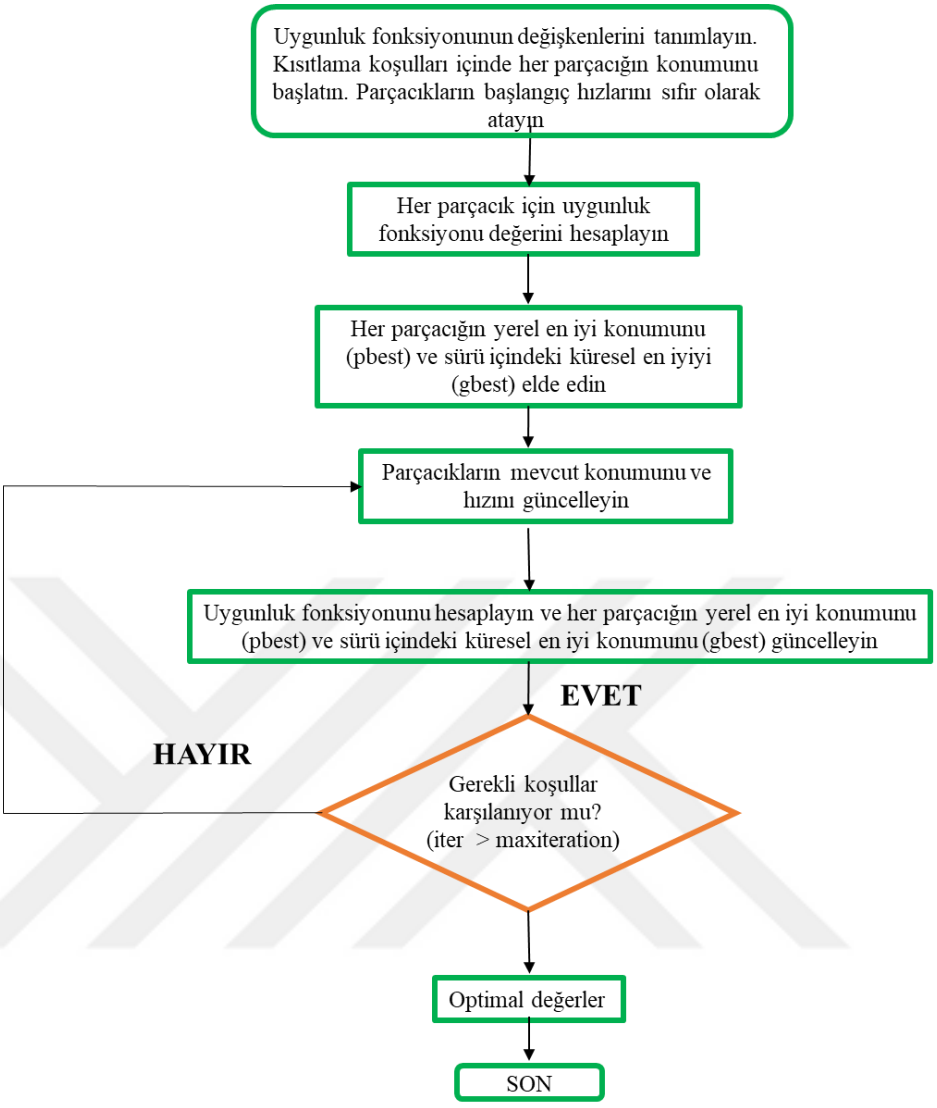
yürütülürken, yineleme sayacı k, satır 31'de 2 artırılır. Önceki evrimsel aşama, önceden belirlenmiş maksimum yineleme sayısı elde edilene kadar tekrarlanmaktadır. Son olarak, P'deki nihai çözümler, nihai popülasyon ve problemin çözümü için popülasyonda elde edilen en iyi çözüm olarak rapor edilmektedir.

### 3.3. İyileştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ilk olarak Kennedy ve Eberhart tarafından tanıtılmıştır (Eberhart, 1995). PSO algoritması, parçacıklarını belirli bir arama uzayında hareket ettirerek en uygun çözümlerin bulunmasını amaçlamaktadır. Sürüdeki parçacıkların konumu, o anki konumuna, hafızasına ve sürünün sosyal davranışına göre değişmektedir.

Bu parçacıkların hareketleri en iyi bilinen koordinatlarıyla yönlendirilir. PSO, optimum çözümü bulmak için en iyi iki çözüm sunar. Birincisi, çözüme doğru hareket ederken parçacığın ulaştığı en yakın konumu gösteren yerel en iyi konum olan (pbest)'dir. İkincisi, sürüdeki hangi parçacığın çözüme yönelik en iyi küresel konuma sahip olduğunu gösteren global best (gbest)'tir. En iyi değerlere dayalı olarak hız ve konum, en iyi çözüme ulaşılana kadar güncellenir.

Kısıtlı optimizasyon problemlerini ele almak ve biri geri dönüş olan PSO ile uygulanabilir bir popülasyonu sürdürmek için çeşitli teknikler önerilmiştir. Bu çalışmada He ve diğerleri tarafından önerilen mekanizma kullanılmaktadır (He et al., 2004). Bu mekanizmaya göre, her parçacığın konumu, önceden tanımlanmış kısıtlama koşulları dikkate alınarak uygun arama alanı içinde başlatılır. Parçacıklar uygulanabilir alanda hareket eder ve uygun olmayan bir alana hareket ederse, uygulanabilir bir çözümü garanti eden önceki uygun konuma geri dönerler. Parçacığın sınıra yakın olma olasılığı en yüksek olduğundan, geri dönüş mekanizması PSO algoritmasına uygulandığında küresel minimum daha hızlı elde edilir. PSO'nun ana adımları aşağıda verilmektedir.




**Şekil 3.5.** İyileştirilmiş PSO algoritması için akış şeması

**Aşama 1:** Uygunluk fonksiyonunun değişkenlerini tanımlanır. Kısıtlama koşulları içinde her parçacığın konumunu başlatılır. Parçacıkların başlangıç hızları sıfır olarak atanmalıdır.

**Aşama 2:** Her parçacık için uygunluk fonksiyonu değeri hesaplanır ve her parçacığın yerel en iyi konumu ve sürü içindeki küresel en iyi konumu elde edilir.

**Aşama 3:** Denklem (5) ve (6)'yı kullanarak parçacıkların mevcut konumu ve hızı güncellenir, burada i ve j endeksleri sürünün boyutunu (i = 1,2,…....M) ve değişkenleri ( j = 1, 2,..N ) belirtir.

$$V_{i,j}^{k+1} = wV_{i,j}^{k} + c_1 r_1\left((X_b)_{i,j}^{k} - X_{i,j}^{k}\right) + c_2 r_2\left(\left(X_g\right)_{i,j}^{k} - X_{i,j}^{k}\right) \quad (3.4)$$

$$X_{i,j}^{k+1} = X_{i,j}^{k} + V_{i,j}^{k+1} \tag{3.5}$$

- $V$ , parçacıkların hızıdır. $k$ yineleme sayısıdır ($k$ = 1,2,…. $K$ ).
- X, parçacık konumlarını belirtir.
- $X_{best}$ ve $X_{global}$ parametreleri sırasıyla parçacıkların en iyi konumu ve sürünün küresel en iyisidir.
- Eylemsizlik ağırlığı faktörü $w$, önceki hızın hesaplanan hız üzerindeki etkisini tanımlar. Değeri her iterasyonda maksimum değeri 0.9 minimum değeri 0.2 olacak şekilde değiştirilmektedir.
- $r_1$ ve $r_2$değerleri (0,1) arasındaki rastgele değişkenlerdir.
- $c_1$ ve $c_2$öğrenme faktörleri, her iterasyonda $c_1$ artarken $c_2$ azalacak şekilde hesaplanmaktadır. Maksimum değerleri 2.5 olarak seçilmiştir.

**Aşama 4:** Her parçacığın uygunluk fonksiyonunun değerleri karşılaştırılır ve $X_b$ ve $X_g$ güncellenir.
**Aşama 5:** Gerekli koşullar karşılanırsa program tamamlanır, aksi takdirde **Aşama 3**'e dönülür.

### 3.4. Çok Katmanlı Malzeme Yapısının Optimizasyonu

$$F = \varphi_1 \times 20\log_{10}\left(\max(|R_{0,1}|)\right) + \varphi_2 \times \sum_{i=1}^{N} d_i \tag{3.6}$$

Uygunluk fonksiyonu denklem 3.6'da verildiği gibi formüle edilmektedir. Verilen bir geliş açısı, bir frekans aralığı, TE ve TM polarizasyonları için soğurucunun toplam maksimum yansıma katsayısının ağırlıklı toplamını hesaplamak için yukarıdaki uygunluk fonksiyonunun minimize edilmesi gerekmektedir. Uygunluk fonksiyonu, minimum yansıma katsayısını elde etmeye odaklanarak tasarlanmıştır ve kalınlık, bu minimum yansıma katsayısını verecek şekilde optimize edilmiştir. Burada $\varphi 1$ ve $\varphi 2$ toplam uygunluk değerini hesaplamak için ağırlıklı katsayılardır. (Roy et al., 2015)

# 4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında, kel kartal arama optimizasyonu algoritması ve iyileştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu tekniği kullanılarak çok katmanlı elektromanyetik soğurucuların mikrodalga frekans bandında en uygun tasarımları sunulmaktadır. Chew'in yansıma katsayısı için özyinelemeli formülünün TE durumu için elektrik alana karşılık geldiği, TM durumu için ise manyetik alana karşılık geldiği vurgulanmaktadır. Normal geliş ve eğik geliş için her iki polarizasyon da dikkate alınarak farklı tasarımlar sunulmuştur. Elde edilen tasarımların genellikle literatürde yayınlananlardan daha iyi olduğu gösterilmektedir.

**Çizelge 4.1.** Normal geliş için 2-8 GHz frekans bandında soğurucu tasarım parametreleri

| | **2 – 8 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **KKAO** | | **DE** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 1** | | (Dib et al., 2010) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,41701 | 16 | 0,384 |
| 2 | 6 | 1,10903 | 6 | 0,433 |
| 3 | 6 | 1,78825 | 6 | 1,143 |
| 4 | 3 | 0,21456 | 6 | 1,446 |
| 5 | 15 | 1,27113 | 15 | 1,454 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 25,765 | | - 25,485 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 4,79 | | 4,860 | |

Tasarım 1’de frekans aralığı 2-8 GHz arasında seçilmiştir ve frekans artış miktarı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’ de tasarım 1’ in ve aynı zamanda literatürde karşılaştırıldıkları diğer çalışmalara ait frekans yansıma grafiği gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de tasarım 1 için bulunan sonuçlar, (Dib et al., 2010) ve Çizelge 4.2’de ise bulunan

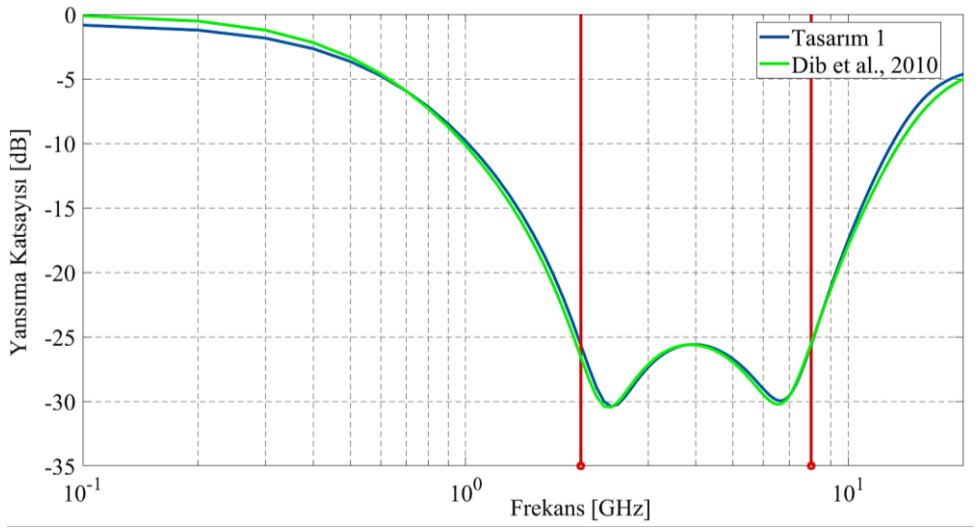
sonuçlar, (Asi & Dib, 2010)'da bulunan 5 katmanlı yapı için alınan sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır.

**Çizelge 4.2.** Normal geliş için 2-8 GHz frekans bandında soğurucu tasarım parametreleri

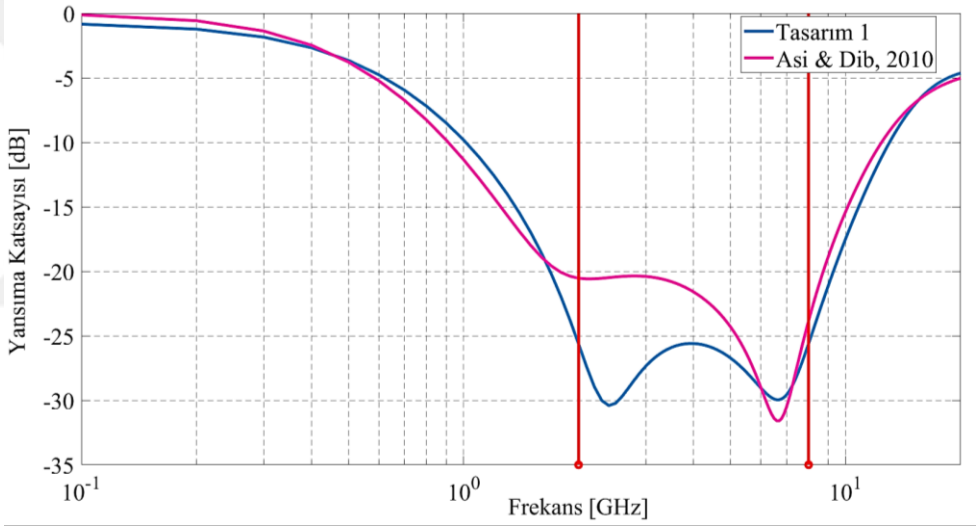
| | **2 – 8 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **KKAO** | | **CFO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 1** | | (Asi & Dib, 2010) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,41701 | 16 | 0,377 |
| 2 | 6 | 1,10903 | 6 | 1,572 |
| 3 | 6 | 1,78825 | 6 | 1,991 |
| 4 | 3 | 0,21456 | 6 | 0,377 |
| 5 | 15 | 1,27113 | 15 | 1,425 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 25,765 | | - 25,698 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 4,79 | | 4,744 | |

**Çizelge 4.3.** Normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarım parametreleri

| | **2 – 8 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **KKAO** | | **LSA** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 1** | | (Lu & Zhou, 2017) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,41701 | 14 | 0,4626 |
| 2 | 6 | 1,10903 | 6 | 1,7694 |
| 3 | 6 | 1,78825 | 6 | 0,6101 |
| 4 | 3 | 0,21456 | 3 | 0,7620 |
| 5 | 15 | 1,27113 | 11 | 1,3709 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 25,765 | | - 23,7907 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 4,79 | | 4,9751 | |

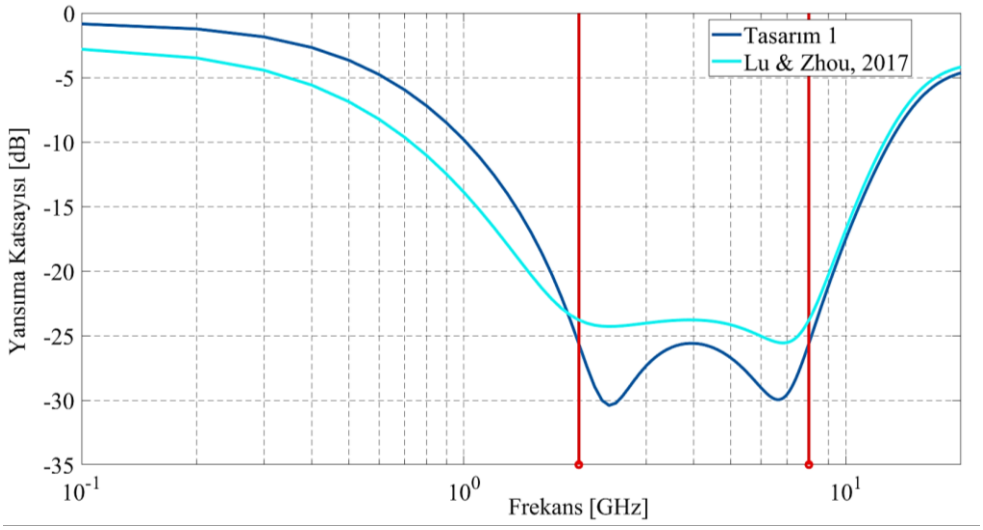



**Şekil 4.1.** 2-8GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı




**Şekil 4.2.** 2-8GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

Tasarım 1' de frekans aralığı 2-8 GHz arasında seçilmiştir. Frekans artış miktarı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.3'te tasarım 1' in literatürde karşılaştırıldığı diğer çalışmalara ait frekans yansıma grafiği gösterilmiştir. Çizelge 4.3'te ise tasarım 1 için bulunan sonuçların, (Lu & Zhou, 2017)'de 5 katmanlı yapı için alınan sonuçlar ile karşılaştırması yapılmıştır. Literatür çalışmaları ile kıyaslandığında daha ince bir yapı ve yansıma katsayısında iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

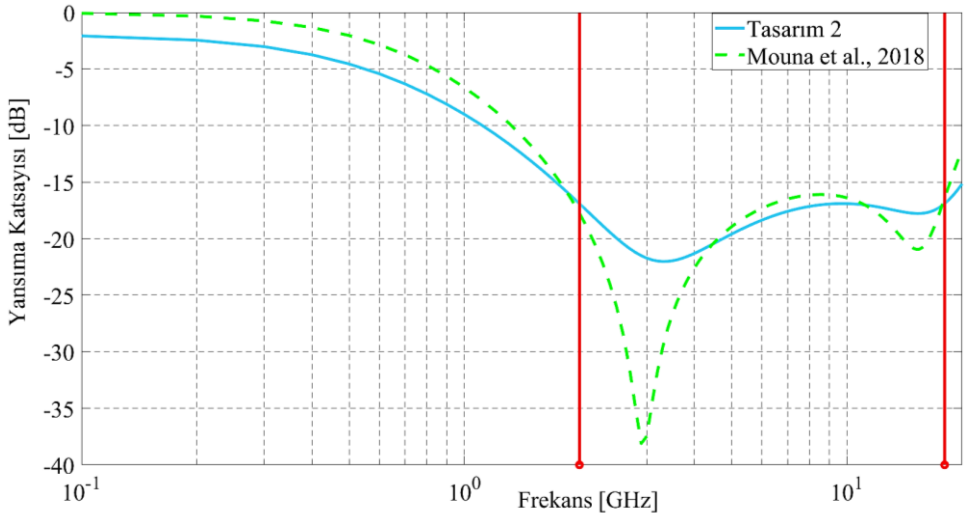



**Şekil 4.3.** 2-8GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

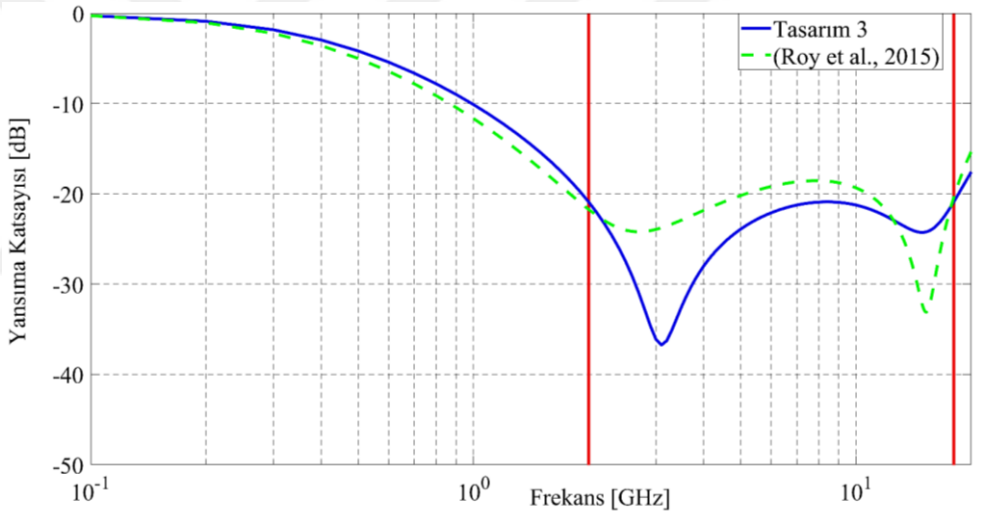
**Çizelge 4.4.** Normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarım parametreleri

| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **KKAO** | | **PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 2** | | (Mouna et al., 2018) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,23961 | 16 | 0,24332 |
| 2 | 6 | 1,19691 | 8 | 0,33948 |
| 3 | 16 | 0,15684 | 7 | 0,81477 |
| 4 | 5 | 0,44143 | 6 | 0,76302 |
| 5 | 11 | 0,99422 | 15 | 1,05037 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 16,9023 | | - 16,102 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,029 | | 3,2109 | |

Tasarım 2'de frekans aralığı 2-18 GHz arasında seçilmiştir. Frekans artış miktarı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.4'te tasarım 2'nin literatürde karşılaştırıldığı diğer çalışmalara ait frekans yansıma grafiği gösterilmiştir. Çizelge 4.4'te tasarım 2 için bulunan sonuçlar, (Mouna et al., 2018) 'deki 5 katmanlı yapı için alınan sonuçlar ile karşılaştırması yapılmıştır. Literatür çalışmaları ile kıyaslandığında daha ince bir yapı ve yansıma katsayısında iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.




**Şekil 4.4.** 2-8 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı




**Şekil 4.5.** 2-18 GHz frekans bandında TM modu 30º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

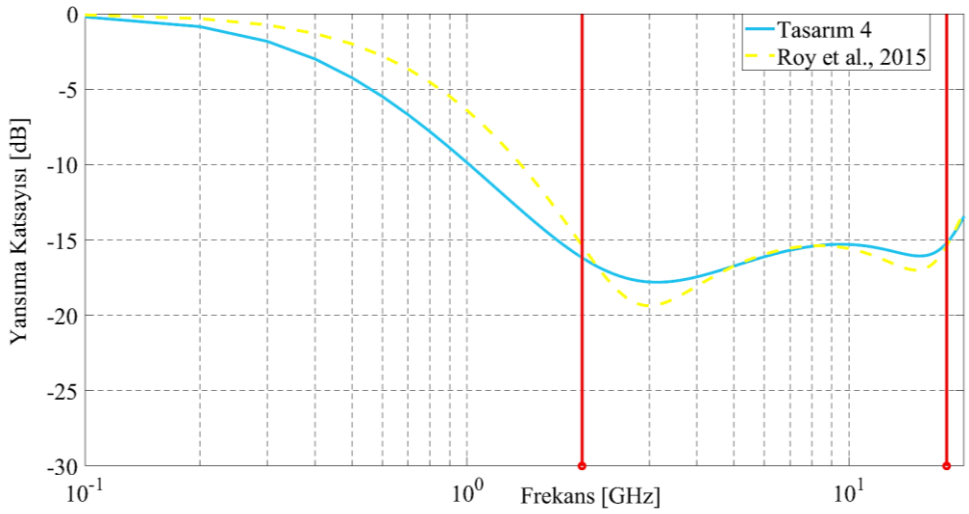
Tasarım 3 ve tasarım 4'te frekans aralığı 2-18 GHz arasında seçilmiştir ve frekans artış miktarı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6' da tasarım 3 ile tasarım 4'e ve aynı zamanda literatürde karşılaştırıldıkları diğer çalışmalara ait frekans yansıma grafiği gösterilmiştir. Çizelge 4.5'te tasarım 3 ve tasarım 4 için bulunan sonuçların, (Roy et al., 2015)' teki 5 katmanlı yapı için alınan sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Kullanılan yeni optimizasyon yöntemi ile hem TM hem de TE modunda 30º için toplam kalınlık ve yansıma katsayısında iyileşme olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.5.** 2-18 GHz frekans bandında 30º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri

| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **TM 30º / KKAO** | | **TM 30º / PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 3** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,18967 | 16 | 0,2229 |
| 2 | 6 | 1,57262 | 6 | 1,2227 |
| 3 | 16 | 0,23265 | 8 | 0,5835 |
| 4 | 11 | 1,39604 | 11 | 0,6624 |
| 5 | 4 | 0,01003 | 9 | 0,8230 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -20,8919 | | - 19,3096 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,401 | | 3,4144 | |

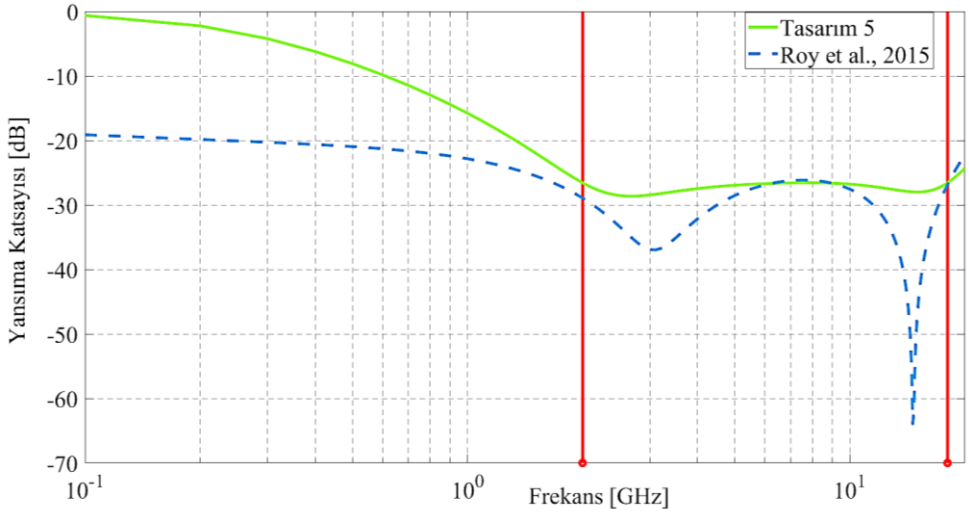
**Çizelge 4.5.** 2-18 GHz frekans bandında 30º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri (devamı)

| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **TE 30º / KKAO** | | **TE 30º / PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 4** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,23627 | 16 | 0,2390 |
| 2 | 6 | 1,74771 | 6 | 0,9506 |
| 3 | 16 | 0,04180 | 6 | 0,8465 |
| 4 | 16 | 0,33785 | 16 | 0,2989 |
| 5 | 9 | 1,28636 | 13 | 1,3344 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 15,5029 | | - 15,3938 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,65 | | 3,6694 | |




**Şekil 4.6.** 2-18 GHz frekans bandında TE modu 30º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

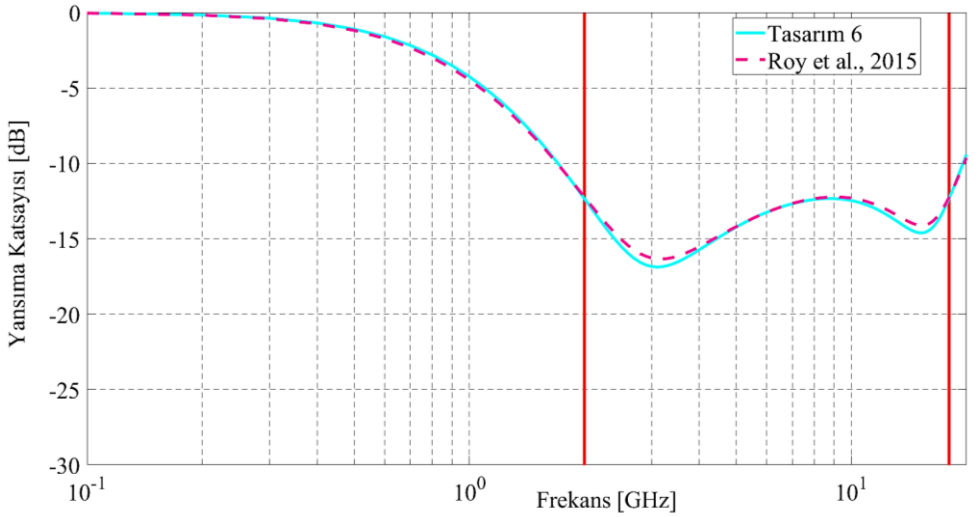
Tasarım 5 ve tasarım 6'da frekans aralığı 2-18 GHz arasında seçilmiştir ve frekans artış miktarı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' de tasarım 5 ile tasarım 6'ya ve aynı zamanda literatürde karşılaştırıldıkları diğer çalışmalara ait frekans yansıma grafiği gösterilmiştir. Çizelge 4.6'da tasarım 5 ve tasarım 6 için bulunan sonuçların, (Roy et al., 2015)' teki 5 katmanlı yapı için alınan sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Kullanılan yeni optimizasyon yöntemi ile hem TM hem de TE modunda 45º için toplam kalınlık ve yansıma katsayısında iyileşme olduğu görülmektedir.




**Şekil 4.7.** 2-18 GHz frekans bandında TM modu 45º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

**Çizelge 4.6.** 2-18 GHz frekans bandında 45º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri

| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **TM 45º / KKAO** | | **TM 45º / PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 5** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,11355 | 16 | 0,1281 |
| 2 | 7 | 1,46401 | 6 | 1,3913 |
| 3 | 14 | 0,45781 | 14 | 0,2776 |
| 4 | 2 | 0,30846 | 4 | 0,8273 |
| 5 | 10 | 1,49616 | 4 | 1,3177 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -26,5667 | | - 26,5192 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,840 | | 3,8420 | |
| | **2 – 18 GHz** | | | |
| | **TE 45º / KKAO** | | **TE 45º / PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 6** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,25321 | 16 | 0,2658 |
| 2 | 8 | 0,44670 | 6 | 0,6955 |
| 3 | 6 | 1,80193 | 6 | 0,1495 |
| 4 | 16 | 0,16842 | 6 | 1,3844 |
| 5 | 14 | 0,74974 | 14 | 0,9434 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 12,3418 | | - 12,2444 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,420 | | 3,4387 | |



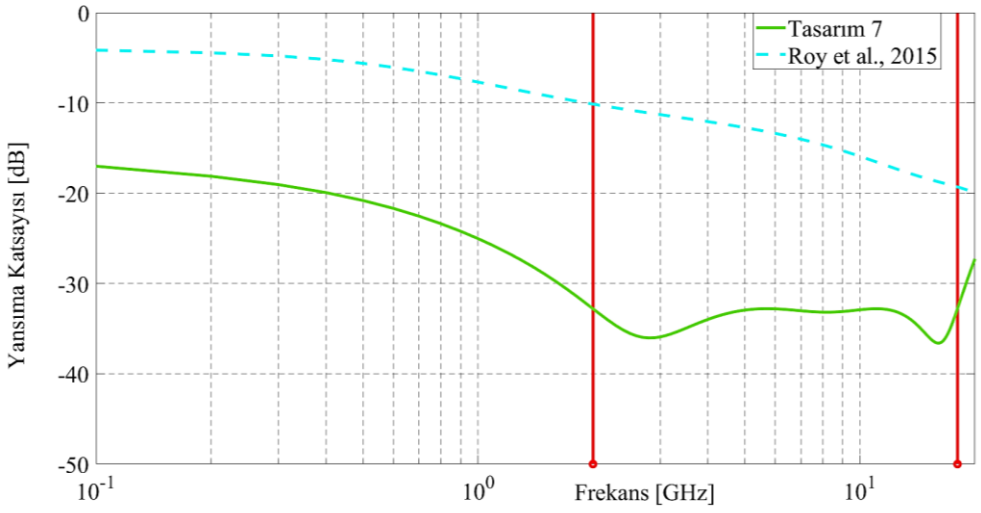

**Şekil 4.8.** 2-18 GHz frekans bandında TE modu 45º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

**Çizelge 4.7.** 2-18 GHz frekans bandında 60º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri

| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **TM 60º / KKAO** | | **TM 60º / PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 7** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 8 | 1,14129 | 7 | 0,8905 |
| 2 | 16 | 0,09877 | 11 | 0,2908 |
| 3 | 8 | 1,22881 | 6 | 0,9019 |
| 4 | 9 | 0,09967 | 7 | 0,5407 |
| 5 | 4 | 1,39751 | 4 | 0,4115 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -32,7952 | | - 29,1497 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,966 | | 4,0354 | |

**Çizelge 4.7.** 2-18 GHz frekans bandında 60º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri (devamı)

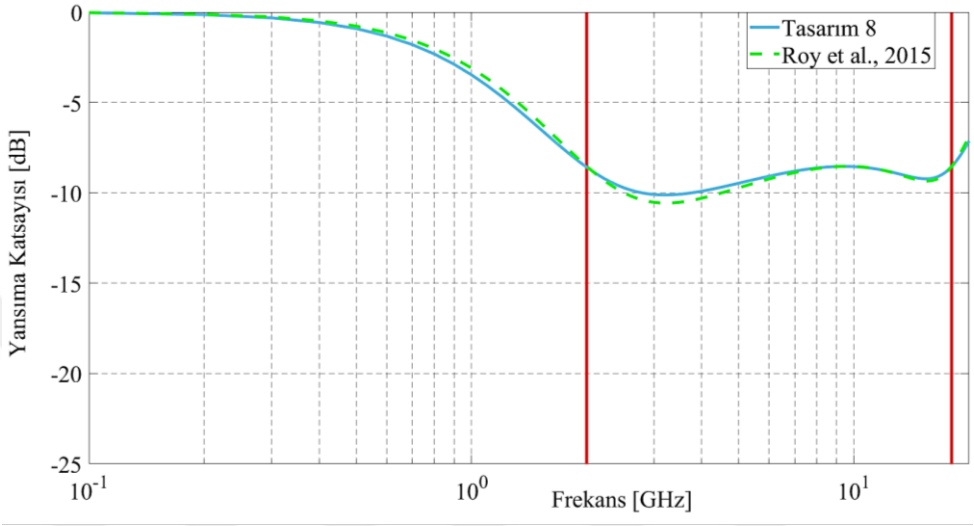
| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **TE 60º / KKAO** | | **TE 60º / PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 8** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,26827 | 16 | 0,2702 |
| 2 | 8 | 0,45034 | 8 | 0,6144 |
| 3 | 6 | 1,64922 | 6 | 0,2580 |
| 4 | 16 | 0,20622 | 6 | 1,3561 |
| 5 | 15 | 0,74954 | 14 | 0,8383 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -8,54521 | | - 8,5332 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,32 | | 3,3370 | |




**Şekil 4.9.** 2-18 GHz frekans bandında TM modu 60º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

Tasarım 7 ve tasarım 8'de frekans aralığı 2-18 GHz arasında seçilmiştir ve frekans artış miktarı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10' da tasarım 7 ile tasarım 8'e

ve aynı zamanda literatürde karşılaştırıldıkları diğer çalışmalara ait frekans yansıma grafiği gösterilmiştir. Çizelge 4.7'de tasarım 7 ve tasarım 8 için bulunan sonuçların, (Roy et al., 2015)' teki 5 katmanlı yapı için alınan sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Kullanılan yeni optimizasyon yöntemi ile hem TM hem de TE modunda 60º için toplam kalınlık ve yansıma katsayısında iyileşme olduğu görülmektedir.




**Şekil 4.10.** 2-18 GHz frekans bandında TE modu 60º için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

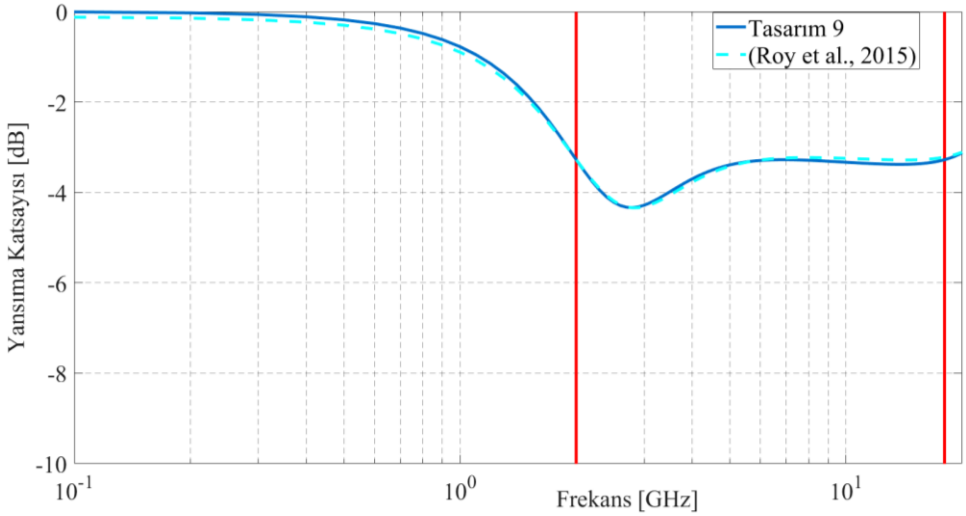
**Çizelge 4.8.** 2-18 GHz frekans bandında 75º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri

| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **TE 75º / KKAO** | | **TE 75º / PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 9** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,41164 | 16 | 0,4026 |
| 2 | 6 | 0,41673 | 6 | 0,4069 |
| 3 | 2 | 0,47630 | 2 | 0,4164 |
| 4 | 14 | 0,33757 | 5 | 0,1018 |
| 5 | 14 | 0,03276 | 14 | 0,3559 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 3,2771 | | - 3,2196 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 1,675 | | 1,6837 | |

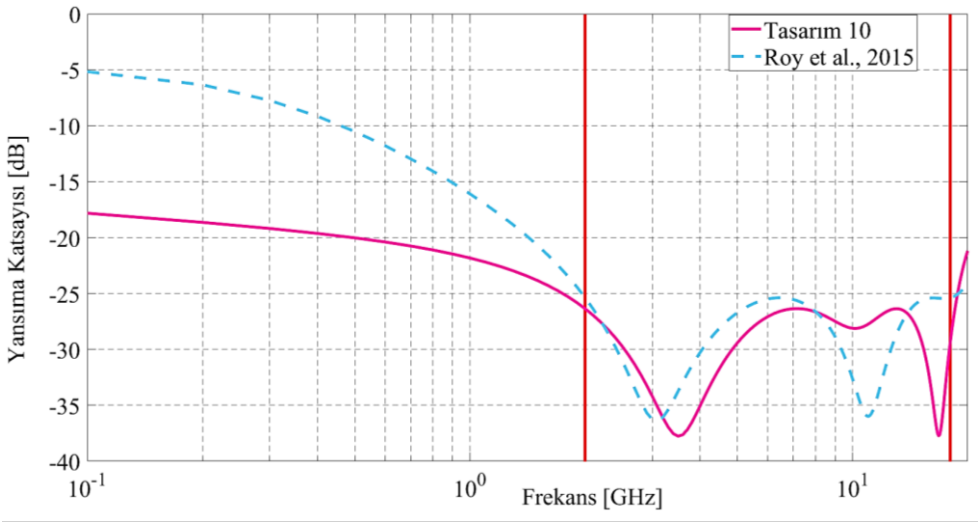
**Çizelge 4.8.** 2-18 GHz frekans bandında 75º için TE ve TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri (devamı)

| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **TM 75º** | | **TM 75º** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 10** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 1 | 0,26282 | 7 | 0,4359 |
| 2 | 4 | 0,32928 | 12 | 0,6174 |
| 3 | 6 | 0,09134 | 2 | 1,4350 |
| 4 | 2 | 2,00000 | 12 | 0,4009 |
| 5 | 4 | 0,44156 | 4 | 0,2459 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -26,3625 | | - 25,3794 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,125 | | 3,1351 | |

Tasarım 9 ve tasarım 10'da frekans aralığı 2-18 GHz arasında seçilmiştir ve frekans artış miktarı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12' de tasarım 9 ile tasarım 10'a ve aynı zamanda literatürde karşılaştırıldıkları diğer çalışmalara ait frekans yansıma grafiği gösterilmiştir. Çizelge 4.8'de tasarım 9 ve tasarım 10 için bulunan sonuçların, (Roy et al., 2015)' teki 5 katmanlı yapı için alınan sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Kullanılan yeni optimizasyon yöntemi ile hem TM hem de TE modunda 75º için toplam kalınlık ve yansıma katsayısında iyileşme olduğu görülmektedir.




**Şekil 4.11.** 2-18 GHz arasında TE modu 75º için yapının yansıma katsayısı




**Şekil 4.12.** 2-18 GHz arasında TM modu 75º için yapının yansıma katsayısı

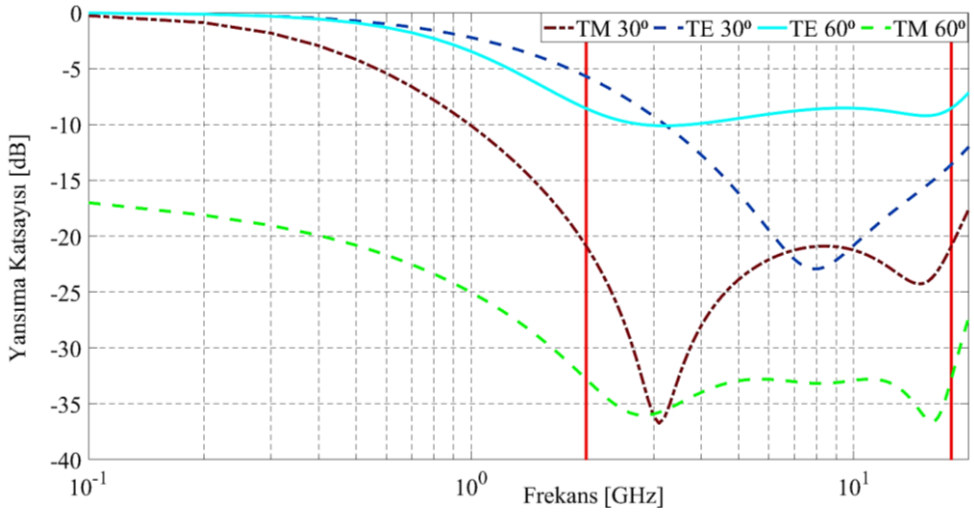
Tasarım 3, tasarım 4, tasarım 7 ve tasarım 8 2-18 GHz arasında seçilmiştir ve frekans artış miktarı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Çizelge 4.9'da Elektromanyetik soğurucunun TE ve TM modlarında 30º ve 60º için alınan sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 4.13'te bu tasarımların karşılaştırılmasına ait frekans yansıma grafiği gösterilmiştir.

**Çizelge 4.9.** 30º ve 60º için TE / TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri karşılaştırması

| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **TM 30º / KKAO** | | **TE 30º / KKAO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 3** | | **Tasarım 4** | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,18967 | 16 | 0,23627 |
| 2 | 6 | 1,57262 | 6 | 1,74771 |
| 3 | 16 | 0,23265 | 16 | 0,04180 |
| 4 | 11 | 1,39604 | 16 | 0,33785 |
| 5 | 4 | 0,01003 | 9 | 1,28636 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -20,8919 | | - 15,5029 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,401 | | 3,65 | |

**Çizelge 4.9.** 30º ve 60º için TE / TM modlarında soğurucu tasarım parametreleri karşılaştırması (devamı)

| | **2 – 18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **TE 60º / KKAO** | | **TM 60º / KKAO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 8** | | **Tasarım 7** | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,26827 | 8 | 1,14129 |
| 2 | 8 | 0,45034 | 16 | 0,09877 |
| 3 | 6 | 1,64922 | 8 | 1,22881 |
| 4 | 16 | 0,20622 | 9 | 0,09967 |
| 5 | 15 | 0,74954 | 4 | 1,39751 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -8,54521 | | -32,7952 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,32 | | 3,966 | |



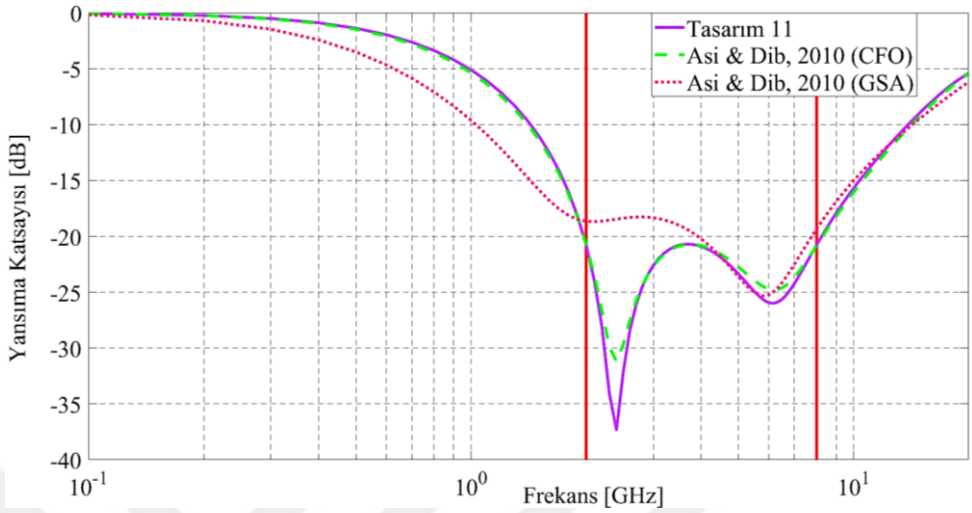

**Şekil 4.13.** 2-18 GHz frekans bandında 30º ve 60º TE / TM modları için beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

**Çizelge 4.10.** İnce tabakada 2-8 GHz normal geliş için soğurucu tasarımı parametreleri

| | **2 – 8 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **KKAO** | | **CFO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 11** | | (Asi & Dib, 2010) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,57236 | 16 | 0,561 |
| 2 | 6 | 0,83337 | 7 | 0,850 |
| 3 | 2 | 0,44296 | 2 | 0,393 |
| 4 | 15 | 0,16748 | 13 | 0,158 |
| 5 | 15 | 0,53383 | 15 | 0,605 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -20,7199 | | -20,825 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 2,55 | | 2,569 | |
| | **2 – 8 GHz** | | | |
| | **KKAO** | | **GSA** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 11** | | (Asi & Dib, 2010) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,57236 | 16 | 0,575 |
| 2 | 6 | 0,83337 | 1 | 0,574 |
| 3 | 2 | 0,44296 | 2 | 0,345 |
| 4 | 15 | 0,16748 | 9 | 0,355 |
| 5 | 15 | 0,53383 | 9 | 0,699 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -20,7199 | | -18,292 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 2,55 | | 2,550 | |

Tasarım 11'de frekans aralığı 2-8 GHz arasında seçilmiştir ve frekans artış miktarı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.14' te tasarım 11'in ve aynı zamanda literatürde karşılaştırıldığı diğer çalışmalara ait frekans yansıma grafiği gösterilmiştir. Çizelge

4.10'da tasarım 11 için bulunan sonuçların (Asi & Dib, 2010)'da 5 katmanlı yapı için alınan sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır.




**Şekil 4.14.** 2-8 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

**Çizelge 4.11.** Dört katmanlı normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarımı parametreleri

| | **2 – 8 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **KKAO** | | **PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 12** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,51513 | 16 | 0,4254 |
| 2 | 6 | 2,0000 | 8 | 1,4662 |
| 3 | 2 | 0,22774 | 5 | 1,2021 |
| 4 | 15 | 0,98596 | 11 | 0,8465 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 23,5955 | | - 21,6397 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,72883 | | 3,8403 | |

Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de pratik uygulamalardaki çeşitli gereksinimler göz önünde bulundurularak dört katmanlı mikrodalga soğurucu, (Roy et al., 2015) tarafından PSO

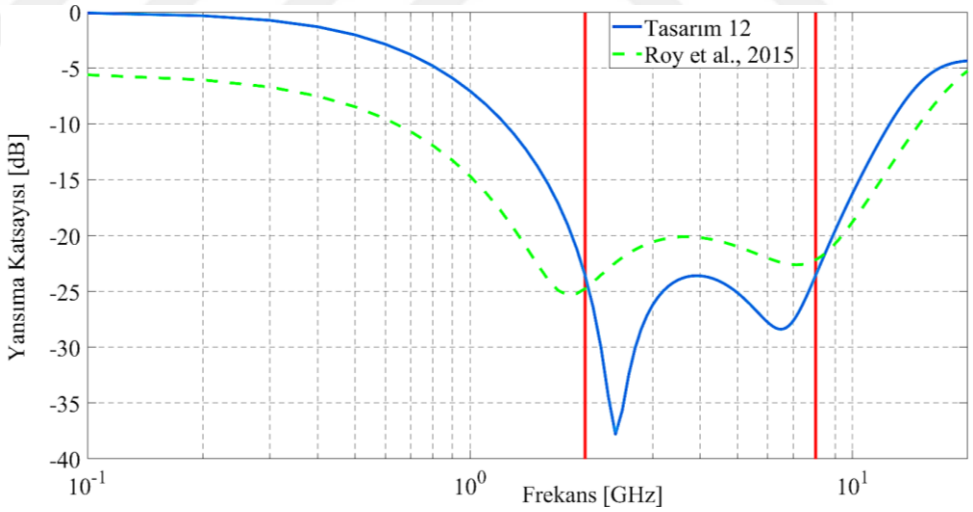
kullanılarak normal geliş için optimize edilmiştir. 2–8GHz (S ve C bantları), 8–12 GHz (X bandı) ve 12–18 GHz (Ku bandı), frekans bandları için genel yansıma katsayısı en aza indirilmeye çalışılmıştır; ayrıca dört katmanlı bir soğurucu, 2-18 GHz aralığında normal insidans için optimize edilmiştir. Tasarım 14, Tasarım 15, Tasarım 16 ve Tasarım 17 olarak adlandırılan her adımda frekans artışı 0,1 GHz olarak ayarlanmıştır. Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da 4 katmanlı yapı için alınan sonuçlar, KKAO kullanılarak alınan sonuçlar ile karşılaştırılarak Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir.

**Çizelge 4.12.** Dört katmanlı normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarımı parametreleri

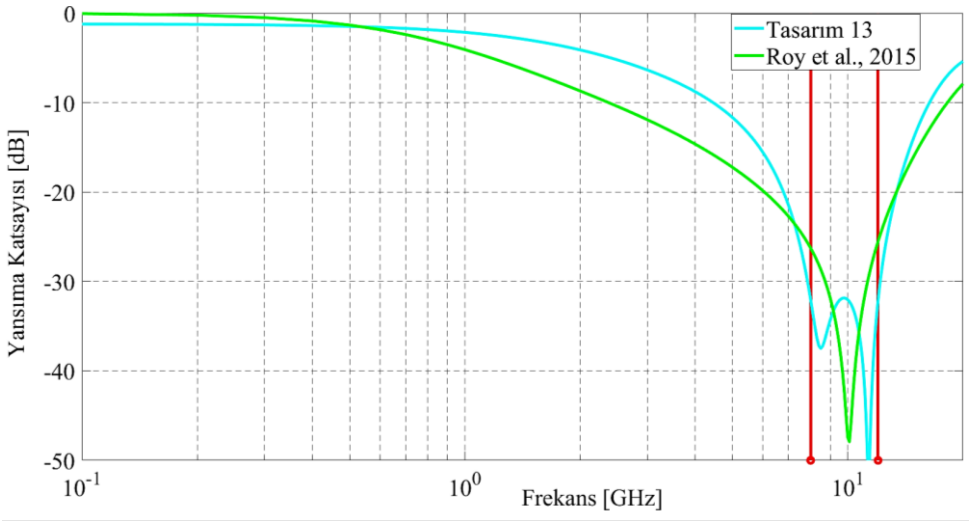
| | **8 – 12 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **KKAO** | | **PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 13** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,34922 | 16 | 0,2769 |
| 2 | 6 | 1,47043 | 6 | 1,4678 |
| 3 | 2 | 1,07769 | 6 | 0,8269 |
| 4 | 5 | 0,27394 | 13 | 0,8937 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | -31,8711 | | - 26,1052 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,17129 | | 3,3653 | |
| | **12 – 18 GHz** | | | |
| | **KKAO** | | **PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 14** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,17023 | 16 | 0,2140 |
| 2 | 1 | 0,01000 | 7 | 0,3456 |
| 3 | 6 | 2,00000 | 6 | 1,1166 |
| 4 | 16 | 0,40045 | 5 | 1,2286 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 25.4419 | | - 23,9903 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 2,58068 | | 2,9048 | |

**Çizelge 4.12.** Dört katmanlı normal geliş geniş bant aralığı için soğurucu tasarımı parametreleri (devamı)

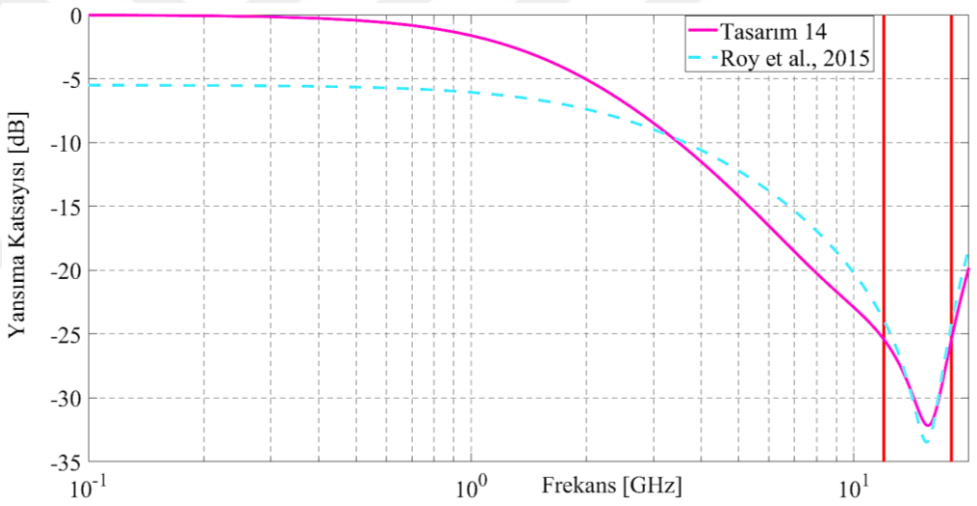
| | **2 –18 GHz** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **KKAO** | | **PSO** | |
| **KATMAN** | **Tasarım 15** | | (Roy et al., 2015) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,28472 | 16 | 0,3038 |
| 2 | 6 | 1,40771 | 6 | 1,0370 |
| 3 | 9 | 1,24387 | 5 | 0,8976 |
| 4 | 15 | 0,09370 | 9 | 0,8011 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 16,524 | | - 16,4254 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,03 | | 3,0395 | |



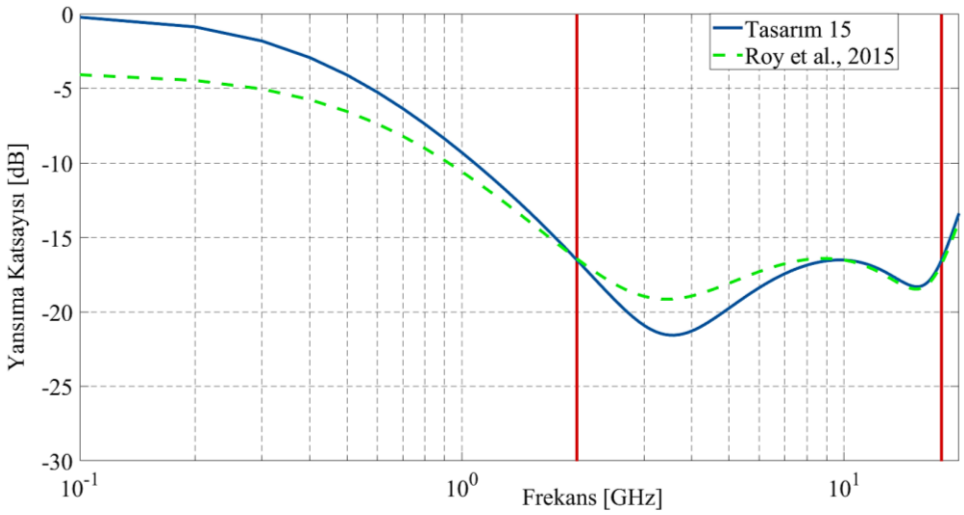

**Şekil 4.15**. 2-8 GHz frekans bandında dört katmanlı yapının yansıma katsayısı




**Şekil 4.16**. 8-12 GHz frekans bandında dört katmanlı yapının yansıma katsayısı




**Şekil 4.17**. 12-18 GHz frekans bandında dört katmanlı yapının yansıma katsayısı



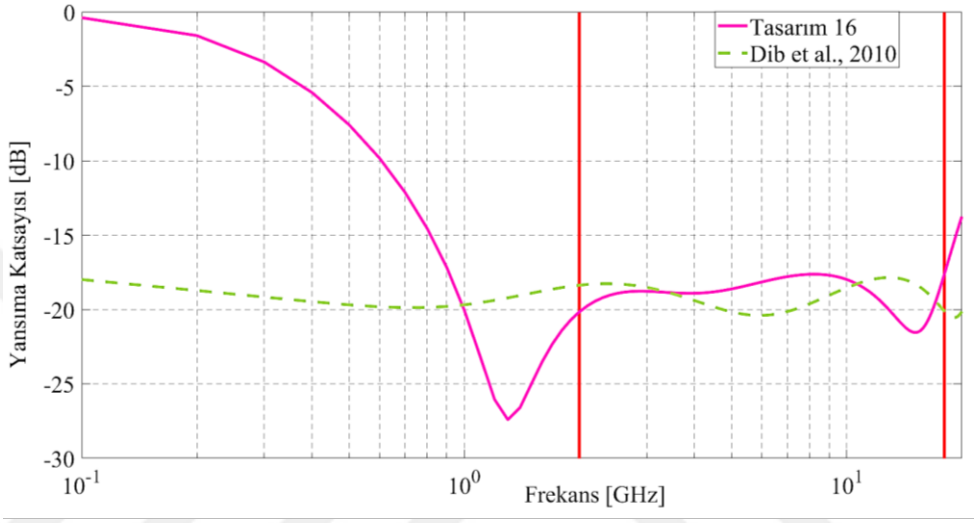

**Şekil 4.18.** 2-18 GHz frekans bandında dört katmanlı yapının yansıma katsayısı

**Çizelge 4.13.** Normal geliş geniş bant aralığı için yedi katmanlı soğurucu tasarımı parametreleri

| | **KKAO** | | **DE** | |
|---|---|---|---|---|
| **KATMAN** | **TASARIM 16** | | (Dib et al., 2010) | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 16 | 0,23252 | 16 | 0,2064 |
| 2 | 6 | 1,00000 | 6 | 1,8762 |
| 3 | 6 | 1,00000 | 14 | 0,5391 |
| 4 | 16 | 1,00000 | 6 | 0,9499 |
| 5 | 9 | 1,00000 | 5 | 1,9596 |
| 6 | 6 | 1,00000 | 4 | 0,7817 |
| 7 | 11 | 1,00000 | 5 | 0,4864 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 17,6362 | | - 17,9 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 6,23252 | | 6,8 | |

Çizelge 4.13'te, 1-18 GHz geniş frekans aralığında normal geliş için yansıma katsayısını en aza indirmek için yedi katmanlı bir soğurucu (N = 7) optimize edilmiştir. Tasarım 16,

20 denemeden elde edilen en iyi sonuçları göstermektedir. Ayrıca aynı tasarım için (Dib et al., 2010)'dan gelen veriler de aynı tabloya dahil edilmiştir. İstenen frekans bandında elde edilen maksimum yansıma katsayısı, -17,9 dB' ye kıyasla -17,49 dB' dir. Ancak, tasarım 18' da sunulan daha incedir ve bu da onu pratik olarak daha çekici kılmaktadır. (Dib et al., 2010)' da sunulan toplam kalınlık 6,8 mm iken tasarım 16'da 6,23252 mm'dir. Şekil 4.19'da, 7 katmanlı yapı için alınan sonuçlar ile (Dib et al., 2010) karşılaştırılması yapılmıştır.

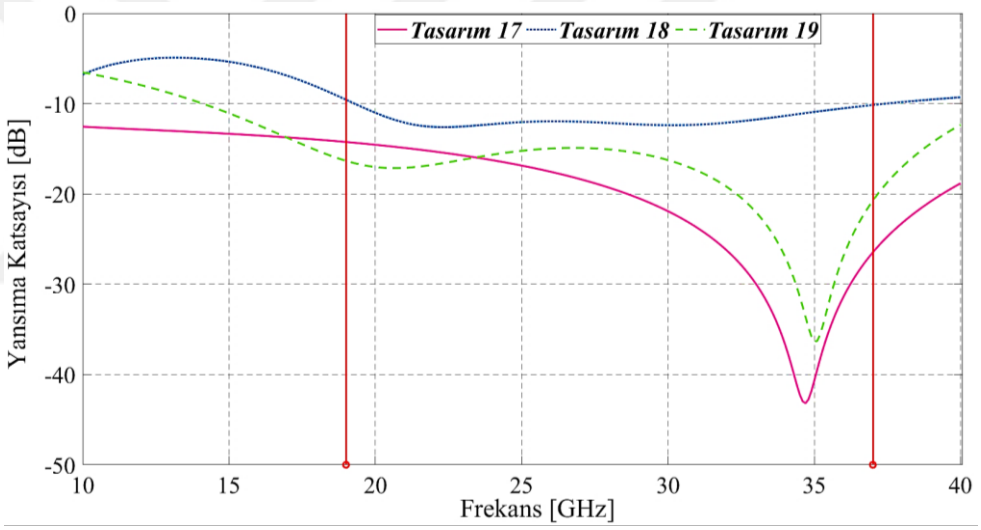



**Şekil 4.19.** 1-18 GHz frekans bandında yedi katmanlı yapının yansıma katsayısı

**Çizelge 4.14.** 19-37 GHz frekans aralığında dik geliş için soğurucu tasarımı parametreleri

| | **PSO** | | **PSO** | | **PSO** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **KATMAN** | **TASARIM 17** | | **TASARIM 18** | | **TASARIM 19** | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 8 | 0,577 | 19 | 0,994 | 5 | 0,120 |
| 2 | 16 | 0,107 | 23 | 0,216 | 7 | 0,819 |
| 3 | 6 | 0,380 | 23 | 0,258 | 20 | 1,423 |
| 4 | 7 | 0,743 | 24 | 0,462 | 18 | 0,024 |
| 5 | 14 | 0,305 | 24 | 1,157 | 10 | 0,569 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 14,000 | | - 10,1706 | | - 14,9172 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 2,114 | | 3,090 | | 2,955 | |

Çizelge 4.14'te İyileştirilmiş PSO algoritması ile elde edilen sonuçlar, her bir tasarım için iterasyon sayısı 1000 alınarak, 20 tekrar için elde edilmiştir. Her katmanın kalınlığı 0.01-1.5 mm arasında olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Katman sayısı N=5 olarak alınmıştır. Tasarım parametreleri beş katman malzemesi ve beş katman kalınlığı olmak üzere 10 adettir. Dik geliş için TE ya da TM modu değişmemektedir. Dik geliş için minimum katman kalınlığı için en iyi yansıma katsayısı elde edilen çözüm belirlenerek yutucu yapının performansı incelenmiştir. Şekil 4.20'da sırası ile yalnızca Çizelge 2.1, yalnız Çizelge 2.2 ve hem Çizelge 2.1 hem de Çizelge 2.2' de yer alan malzemeler kullanılarak elde edilen en iyi sonuçlar yer almaktadır. Tüm malzemeler kullanılarak tasarlanan yutucunun diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Yutuculara ait özellikler Çizelge 4.14'te verilmiştir.

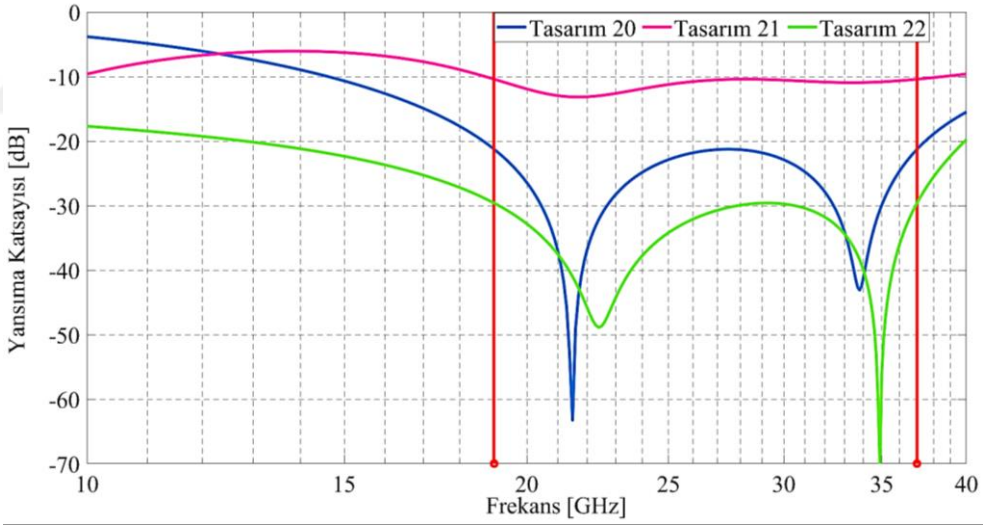



**Şekil 4.20.** 19 - 37 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

Tasarım 20'de hem Çizelge 2.1 hem de Çizelge 2.2' de yer alan malzemeler kullanılarak elde edilen en iyi sonuçlar yer alırken Tasarım 21'de ise yalnızca Çizelge 2.2'de yer alan malzemeler Tasarım 22' de ise yalnızca Çizelge 2.1'deki malzeme verileri kullanılarak yutucu tasarımı yapılmıştır. Sunulan üç tasarımın da toplam kalınlık değerlerinin çok yakın olmasına karşın yansıma katsayıları oldukça farklıdır. Sonuçlar incelendiğinde KKAO algoritması kullanıldığında en iyi sonucun Tasarım 22'ye ait olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.15.** 19-37 GHz frekans aralığında dik geliş için soğurucu tasarımı parametreleri

| | KKAO | | KKAO | | KKAO | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| KATMAN | TASARIM 20 | | TASARIM 21 | | TASARIM 22 | |
| | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık | Malzeme No | Kalınlık |
| 1 | 18 | 0,21962 | 19 | 1,05038 | 14 | 0,04841 |
| 2 | 7 | 1,73222 | 22 | 0,36633 | 8 | 1,65993 |
| 3 | 22 | 0,04906 | 17 | 0,24293 | 16 | 0,14669 |
| 4 | 22 | 0,06296 | 24 | 1,30192 | 6 | 0,90952 |
| 5 | 17 | 0,95486 | 24 | 0,10900 | 14 | 0,23556 |
| Maximum Yansıma Katsayısı[dB] | - 21,2816 | | - 10,4193 | | - 29,6265 | |
| Toplam Kalınlık [mm] | 3,01872 | | 3,07056 | | 3,0001 | |




**Şekil 4.21.** 19 -37 GHz frekans bandında beş katmanlı yapının yansıma katsayısı

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Günümüzde kullanılan cihaz ve sistemler dikkate alındığında elektromanyetik girişim kaynaklı oluşan sorunlar mikrodalga soğurucu malzemelerin kullanımını ve katmanlı yapının oluşumunu artırmıştır. Sivil ve askeri uygulamalar için çalışma kapsamında belirlenen frekans aralıklarında çok katmanlı soğurucuların kullanımı oldukça önem arz etmektedir. Yapılan tez çalışması kapsamında kel kartal arama optimizasyonu algoritması (KKAOA) tekniği kullanılarak farklı geliş açıları ve polarizasyonlar için mikrodalga soğurucu tasarımı yapılmıştır. Daha önceden tanımlanmış 16 adet malzemeden oluşan veri seti ve ayrıca 19 - 37 GHz frekans bandı için iyi sonuç verdiği gözlemlenmiş olan 8 adet malzemenden oluşan başka bir veri seti daha kullanılmıştır. Tasarlanan elektromanyetik soğurucuların tümünde en alt katmana MEİ yerleştirilmiştir. Optimizasyon tekniği olarak kullandığımız KKA algoritması belirlenen frekans aralığında gelen dalganın yansıma açısı da dikkate alınarak yapılan açı değişimleri ile popülasyondaki her bir katmanın kalınlık değerlerini seçmektedir. Öncelikle katmanlar arasındaki yansıma katsayısının sonrasında ise yapı ile boşluk arasındaki yansıma katsayısının hesaplanması Chew formülü dikkate alınarak yapılmıştır. Toplam yansıma katsayısı dB cinsinden elde edilmiştir. Elde edilen toplam yansıma katsayıları ve katmanların toplam kalınlığı maliyet fonksiyonunda hesaplanmıştır. Tasarımların açı ve frekans değerleri için minimum maliyeti sağlayan yansıma ve kalınlık değerlerinin KKAOA ile bulunması amaçlanmıştır. İterasyon sayısı 200 olarak girilmiş ve programın 20 tekrar yapması sağlanmıştır. Sonuç olarak en ince katman kalınlığına ve minimum yansıma katsayına sahip en iyi çözüm elde edilmiştir. Her katmanın kalınlık değeri optimizasyon işlemi ile bulunmuştur. Geniş bant frekans aralığı için hem normal hem de eğik geliş ve her iki polarizasyon ile çeşitli soğurucu tasarımları elde edilmiştir. Ortaya çıkan elektromanyetik soğurucu modellerinin genellikle ince olduğu ve literatürde yayınlananlardan daha iyi bir frekans tepkisine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yeni meta sezgisel algoritmalardan olan Kel Kartal Arama Optimizasyonu Algoritmasının literatürde denenmiş diğer optimizasyon yöntemlerine göre tasarımlarda daha verimli sonuçlar oluşturduğu ve kullanılabilirliği gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR


Alsattar, H. A., Zaidan, A. A., & Zaidan, B. B. (2020). Novel meta-heuristic bald eagle search optimisation algorithm. *Artificial Intelligence Review*, *53*(3), 2237–2264. https://doi.org/10.1007/s10462-019-09732-5

Arthur von Hippel. (2012). Theory and Applications of RF/Microwave Absorbers. *Emerson & Cuming Microwave Products, Inc 28*, 1–19. papers2://publication/uuid/E085A757-A5A1-4E1F-BB55-5E616D2EB6B6

Asi, M. J., & Dib, N. I. (2010). Design Of Multilayer Microwave Broadband Absorbers Using Central Force Optimization. *Progress In Electromagnetics Research B*, *26*(26), 101–113. https://doi.org/10.2528/PIERB10090103

Balanis, C. A. (2012). *Advanced Engineering Electromagnetics*.

Çatalkaya, İ. (2017). *Mikrodalga Soğurucu Tasarımı* (Vol. 110265). İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi.

Chamaani, S., Mirtaheri, S. A., Teshnehlab, M., & Shooredeli, M. A. (2007). Modified Multi-Objective Particle Swarm Optimization For Electromagnetic Absorber Design. *2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics Proceedings, APACE2007*. https://doi.org/10.1109/APACE.2007.4603923

Chatterton, P. A., & Houlden, M. A. (1992). *EMC: Electromagnetic Theory to Practical Design* (View all f). J. Wiley, Chichester, ©1992.

Cheng, D. K. (n.d.). *Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri*.

Chew, W. C. (1995). *Waves and Fields in Inhomogenous Media*.

da Silva Macedo, J. A., de Sousa, M. J., & Dmitriev, V. (2006). *Optimization Of Wide-Band Multilayer Microwave Absorbers For Any Angle Of İncidence And Arbitrary Polarization*. 558–561. https://doi.org/10.1109/imoc.2005.1580124

Dib, N., Asi, M., & Sabbah, A. (2010). On The Optimal Design Of Multilayer Microwave Absorbers. *Progress In Electromagnetics Research C*, *13*, 171–185. https://doi.org/10.2528/PIERC10041310

Eberhart, R. C. (1995). *Particle Swarm Optimization*. https://ci.nii.ac.jp/naid/40021910174/

Fang, W., & Xu, S. (2008). New Electromagnetic Absorbers Composed of Left-handed and Right-handed Materials. *Int J Infrared Milli Waves*, *29*, 799–807. https://doi.org/10.1007/s10762-008-9372-7

Goudos, S.K., & Sahalos, J. N. (2006). Mıcrowave Absorber Optımal Desıgn Usıng Multı-Objectıve Partıcle Swarm Optımızatıon. *Microwave and Optical Technology Letters*, *55*(11), 2562–2568. https://doi.org/10.1002/mop

Goudos, Sotirios K. (2009). Design Of Microwave Broadband Absorbers Using A Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, *19*(3), 364–372. https://doi.org/10.1002/mmce.20357

H. Hayt, W., & Buck, J. A. (2006). *Engineering Electromagnetics*.

Hatamlou, A. (2011). Black hole: A New Heuristic Optimization Approach for Data Clustering. *Information Sciences*, *222*, 175–184. https://doi.org/10.1016/j.ins.2012.08.023

He, S., Prempain, E., & Wu, Q. H. (2004). An İmproved Particle Swarm Optimizer For Mechanical Design Optimization Problems. *Engineering Optimization*, *36*(5), 585–605. https://doi.org/10.1080/03052150410001704854

Kaur, P. (2017). *Development of Optimization Techniques for Multilayered Metamaterial Structures*.

Lasserre, J. B. (2004). Global Optimization with Polynomials and The Problem of Moments. *SIAM Journal on Optimization*, *11*(3), 796–817. https://doi.org/10.1137/S1052623400366802

Lu, Y., & Zhou, Y. (2017). Design Of Multilayer Microwave Absorbers Using Hybrid Binary Lightning Search Algorithm And Simulated Annealing. *Progress In Electromagnetics Research B*, *78*(August), 75–90. https://doi.org/10.2528/PIERB17060302

Mathworks. (n.d.). *No Title*. https://www.mathworks.com/

Michielssen, E., Sajer, J., Ranjithan, S., & Mittra, R. (1993). Design of Lightweight , Broad-Band Microwave Absorbers Using Genetic Algorithms. *IEEE Transactıons On Mıcrowave Theory And Technıques Vol. 41, No. 617, June/July*, *41*(617), 1024–1031.

Mısır, K. O. (2019). *Mikrodalga Frekanslarında İnce ve Geniş Bantlı Elektromgnetik Soğurucu Tasarımı için Optimizasyon Yaklaşımı*. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Mouna, H., Mekaladevi, V., & Nirmala Devi, M. (2018). Design Of Microwave Absorbers Using İmprovised Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, *17*(2), 188–200. https://doi.org/10.1590/2179-10742018v17i2836

Ranjan, P., Choubey, A., & Mahto, S. K. (2018). A Novel Approach For Optimal Design Of Multilayer Wideband Microwave Absorber Using Wind Driven Optimization Technique. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, *83*, 81–87. https://doi.org/10.1016/J.AEUE.2017.08.039

Roy, S., Roy, S. D., Tewary, J., Mahanti, A., & Mahanti, G. K. (2015). Particle Swarm Optimization For Optimal Design Of Broadband Multilayer Microwave Absorber For Wide Angle Of İncidence. *Progress In Electromagnetics Research B*, *62*(1), 121–135. https://doi.org/10.2528/PIERB14122602

Sevgi, L. (2019). *Tasarımdan Piyasaya Elektromanyetik Uyumluluk*.

Stalmaster, M. V. (1987). *The Bald Eagle*.

Stalmaster, M. V., & Gessaman, J. A. (1982). Food Consumption and Energy Requirements of Captive Bald Eagles. *The Journal of Wildlife Management*, *46*(3), 646–654.

Todd, C. S., Young, L. S., Owen, R. B., Gramlich, J., & Gramlich, F. J. (1982). Food Habits of Bald Eagles in Maine. *The Journal of Wildlife Management*, *46*(3), 636–645.

Toktas, A., Ustun, D., & Tekbas, M. (2019). Multi-Objective Design of Multi-Layer Radar Absorber Using Surrogate-Based Optimization. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *67*(8), 3318–3329. https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2922600

Tong, X. C. (n.d.). *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*.

Veselago, V. G. (1968). The Electrodynamıcs of Substances With Simultaneously Negative Values of ε and μ. *Soviet Physics Uspekhi*, *10*(4), 509–514. https://doi.org/10.1070/pu1968v010n04abeh003699

Weng Cho, C. (1999). Waves and Fields in Inhomogenous Media. In *Waves and Fields in Inhomogenous Media*. Wiley-IEEE Press. https://doi.org/10.1109/9780470547052

Yigit, E., & Duysak, H. (2019). Determination of Optimal Layer Sequence and Thickness for Broadband Multilayer Absorber Design Using Double-Stage Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *67*(8), 3306–3317. https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2919574

Yiğit, M. E., Günel, T., & Mısır, K. O. (2019). Hybrid Taguchi-Genetic Aproach to Design of Thin and Broadband Electromagnetic Absorber for Microwave Frequencies. *2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 632–636. https://doi.org/10.23919/ELECO47770.2019.8990525