

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURMA ÖZELLİĞİNE SAHİP
KATMANLI KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

ZAFER YÜCEL

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURMA ÖZELLİĞİNE
SAHİP KATMANLI KOMPOZİT MALZEME
GELİŞTİRİLMESİ

ZAFER YÜCEL

Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. A. Arif ERGİN
Jüri Üyesi, Yeditepe Üniversitesi

Prof. Dr. Armağan ARICI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Fatih ERDEN
Jüri Üyesi, Milli Savunma Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Yasemin Yıldırım AVCU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler TÜBİTAK MAM tarafından 20180028 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Zafer YÜCEL

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

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

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Zafer YÜCEL

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Teknolojinin ilerlemesi ve radar soğurma teknolojisine olan ilginin artması, elektromanyetik soğurucu malzemelerin tasarım çalışmalarına hız kazandırmıştır. Bu sebeple, RSM olarak adlandırılan radar soğurucu malzemelerin tasarlanması için farklı özelliklere sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalar, daha etkili ve verimli RSM'lerin üretimini sağlamayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, RSM'lerin tasarımı ve yapısının hassasiyetle incelenmesi, daha iyi özelliklere sahip kompozitlerin geliştirilmesine de olanak sağlamaktadır.

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK MAM) 20180028 no'lu "Hava Platformları İçin Elektromanyetik Tasarım Destekli Çok Geniş Bantlı Radar Soğurucu Malzemenin Geliştirilmesi" projesi tarafından desteklenmiştir. Elde edilen veriler bazı proje sonuçlarını içermekte olup, desteklerinden dolayı TÜBİTAK MAM Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Doktora tez danışmanlığımı üstlenen, her zaman kendime örnek aldığım, bana sabırla yol gösteren, emeğini esirgemeyen, saygıdeğer hocam Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e kariyerime yaptığı paha biçilemez katkılardan dolayı minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitesinde yer alan ve her daim desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. A. Arif ERGİN ve Prof. Dr. A. Armağan ARICI'ya ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Kurumsal danışmanım olan ve tezimdaki deneysel çalışmalarına tecrübeleri ile katkıda bulunan Dr. Engin AÇIKALIN'a, deneysel çalışmalardaki yardımlarından dolayı başta Dr. İlhami ÜNAL ve Aysun SAYINTI olmak üzere tüm TÜBİTAK MAM MİLTAL personeline, doktora tez çalışmaları ve tez yazımı aşamasındaki motivasyon ve desteğinden dolayı Mustafa TEKBAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, desteklerini hiç esirgemeyen sevgili eşim Binnur YÜCEL ve kızım Alin İpek YÜCEL'e, dualarını eksik etmeyen annem Güzide YÜCEL'e ve varlığını her zaman yanımda hissettiğim rahmetli babam Rıdvan YÜCEL'e en güçlü destekçilerim oldukları, bana ve işime duydukları güven, sabır, saygı ve takdirleri için sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Mayıs-2023

Zafer YÜCEL

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	9
2.1. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	12
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	15
2.2.1. Takviye Malzemeleri.....	15
2.2.2. Matris Malzemeleri.....	18
3. ELEKTROMANYETİK DALGALAR.....	21
3.1. Elektromanyetik Kaybın Mekanizmaları	27
3.2. Elektromanyetik Dalga – Malzeme Etkileşimi	28
3.3. Elektromanyetik Dalga Soğurucu Malzemeler	30
3.4. Elektromanyetik Dalga Soğurucu Yapılar	33
3.5. Çok Katmanlı Elektromanyetik Soğurma	36
3.6. Ölçüm Teknikleri	39
3.6.1. İletim Hattı Tekniği	39
3.6.2. Serbest Alan Yansıma Tekniği.....	40
3.6.3. Açık-Uçlu Koaksiyel Prob Tekniği.....	41
3.6.4. Rezonans Kavite Tekniği.....	42
3.7. Elektromanyetik Soğurucu Yapıların Optimizasyonu	42
4. MALZEME VE YÖNTEM	46
4.1. Malzemeler.....	47
4.2. Kompozit Malzeme Üretimi.....	48
4.3. Malzemelerin Elektromanyetik Karakteristiğinin Belirlenmesi.....	54
4.4. Genetik Algoritma Optimizasyonu	55
4.5. Elektromanyetik Soğurucu Özelliğe Sahip Katmalı Yapı.....	59
4.6. Yapının Yansıma Kaybının Ölçülmesi.....	61
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	64
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR.....	80
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Kompozitlerin havacılık, yenilenebilir enerji, ulaşım sistemleri ve altyapı alanlarında uygulanması	11
Şekil 2.2.	Kompozitlerin takviye malzemelerine göre sınıflandırılması	16
Şekil 2.3.	Uzun elyaf, kısa elyaf ve partikül takviyesinin gösterimi	16
Şekil 2.4.	Takviye malzemelerinin şematik gösterimi	18
Şekil 2.5.	Kompozitlerin matris malzemelerine göre sınıflandırılması.....	19
Şekil 3.1.	Elektromanyetik dalganın şematik gösterimi	21
Şekil 3.2.	Elektromanyetik spektrumun şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.3.	Dalga boyu ve frekansa göre IEEE ve NATO kodları ve radar frekans bantları	24
Şekil 3.4.	Elektromanyetik alanların etkileşimi	28
Şekil 3.5.	Elektromanyetik dalga soğurma mekanizmasının şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.6.	Dallenbach katmanı kesitinin gösterimi	34
Şekil 3.7.	Sallisbury ekranı kesitinin gösterimi.....	35
Şekil 3.8.	Jaumann soğurucusu kesitinin gösterimi.....	36
Şekil 3.9.	Elektromanyetik dalganın çift katmanlı bir mikrodalga soğurucu içerisindeki davranışı.....	37
Şekil 3.10.	Çok katmanlı mikrodalga soğurucu malzemenin şematik gösterimi	38
Şekil 3.11.	İletim hattı tekniği: dalga kılavuzu ve koaksiyel havayolunun gösterimi.....	40
Şekil 3.12.	(a) Dalga kılavuzu, (b) koaksiyel havayolu ve numuneleri	40
Şekil 3.13.	Serbest alan ölçüm tekniklerinin gösterimi.....	41
Şekil 3.14.	Açık-uçlu koaksiyel prob tekniğinin şematik gösterimi	42
Şekil 3.15.	Genetik algoritma akış şeması.....	44
Şekil 4.1.	Hazırlanan bileşenler: sırasıyla reçine, sertleştirici ve katkı malzemesi.....	49
Şekil 4.2.	(a) Katkı malzemesinin reçineye eklenmesi ve (b) karıştırılması	49
Şekil 4.3.	Ultrasonik karıştırıcı ve sirkülasyon banyosu	50
Şekil 4.4.	Kestamid kalıbın kalıp ayırıcı ile hazırlanması.....	50
Şekil 4.5.	Karışımların döküldüğü kalıpların ölçüleri	51
Şekil 4.6.	(a) Karışıma sertleştiricinin eklenmesi ve (b) karıştırılması	51
Şekil 4.7.	(a) Karışımın kalıba dökülmesi, (b) döküm işlemi sonrasında oda sıcaklığında bekletilen numune	52
Şekil 4.8.	Kestamid kalıplara dökülmüş numuneler	52
Şekil 4.9.	Elmas diskli hassas kesme cihazı	53
Şekil 4.10.	(a) Kalıptan çıkan numune, (b) dilimlenmiş ölçüm numunesi.....	53
Şekil 4.11.	X-Band dalga kılavuzu numune tutucusu boyutlarında hazırlanmış numuneler.....	54
Şekil 4.12.	Agilent E8362B PNA Network Analizör ve dalga kılavuzu.....	55
Şekil 4.13.	MATLAB programı ile oluşturulan Fitness Fonksiyonu kodu	56
Şekil 4.14.	Genetik algoritma çalışma mantığının şematik gösterimi.....	57
Şekil 4.15.	MATLAB programı örnek ekran görüntüsü	58
Şekil 4.16.	Genetik algoritmanın önerdiği numuneler	60
Şekil 4.17.	Numunelerin kalınlık kontrolü	60

Şekil 4.18.	(a) Katmanlı kompoziti oluşturacak numuneler ve dalga kılavuzu aparatları, (b) katmanlı kompozit numunesi	61
Şekil 4.19.	Numunelerin yerleşiminin şematik gösterimi	62
Şekil 4.20.	Numunelerin yerleştirildiği örnek tutucu ve kısa devre plakası.....	62
Şekil 4.21.	Katmanlı numunenin yerleştirildiği örnek tutucunun dalga kılavuzuna yerleştirilmesi	63
Şekil 5.1.	%5 Karbon + %3 Turmalin + %5 Karbon katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma kaybı-frekans grafiği	64
Şekil 5.2.	%3 Karbon + %3 Karbon + %5 MWCNT katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği	64
Şekil 5.3.	%3 Karbon + %5 MWCNT + %1 Turmalin katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği	65
Şekil 5.4.	%4 MWCNT + %3 Karbon + %4 Karbon katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği	65
Şekil 5.5.	%5 Karbon + %5 MWCNT + %1 Turmalin katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği	66
Şekil 5.6.	%5 MWCNT + %1 Çinko Borat + %5 Karbon katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği	66
Şekil 5.7.	%2 Turmalin + %4 Polianilin + %4 MWCNT katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği	67
Şekil 5.8.	%5 Karbon + %4 MWCNT + %20 Grafit katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği	67
Şekil 5.9.	%2 Çinko Borat + %0,5 Karbon + %4 MWCNT katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği.....	68
Şekil 5.10.	%4 MWCNT + %20 Grafit + %4 Grafit katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği	68
Şekil 5.11.	%4 MWCNT Karbon + %0,5 Çinko Borat + %20 Grafit katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği.....	69
Şekil 5.12.	%2 Çinko Borat + %4 MWCNT + %20 Grafit katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği	69
Şekil 5.13.	Genetik algoritma ile elde edilen sonuçlardan seçilen numunenin X-Band yansıma kaybı-frekans grafiği	70
Şekil 5.14.	CST Suite programında hazırlanan simülasyon görseli	71
Şekil 5.15.	Genetik algoritma ve simülasyon programından elde edilen X-Band yansıma kaybı-frekans grafiklerinin karşılaştırılması	71
Şekil 5.16.	İlk üretim ve ikinci üretim %5 Karbon numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (gerçek kısım) karşılaştırması	72
Şekil 5.17.	İlk üretim ve ikinci üretim %5 Karbon numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (sanal kısım) karşılaştırması.....	72
Şekil 5.18.	İlk üretim ve ikinci üretim %5 MWCNT numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (gerçek kısım) karşılaştırması	73
Şekil 5.19.	İlk üretim ve ikinci üretim %5 MWCNT numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (sanal kısım) karşılaştırması.....	73
Şekil 5.20.	İlk üretim ve ikinci üretim %1 Turmalin numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (gerçek kısım) karşılaştırması	74
Şekil 5.21.	İlk üretim ve ikinci üretim %1 Turmalin numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (sanal kısım) karşılaştırması.....	74

Şekil 5.22.	Tekrar üretilen numunelerin yazılım ile hesaplatılan yansıma kaybı-frekans grafiği	75
Şekil 5.23.	Katmanlı numunenin dalga kılavuzu yansıma kaybı-frekans grafiği	75
Şekil 5.24.	Katmanlı RSM tasarımının Genetik Algoritma (GA) sonucunun, matematiksel hesaplama ve ölçüm sonucu ile karşılaştırmalı yansıma kaybı-frekans grafikleri.....	76



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 4.1.	MGS L285 reçinenin teknik özellikleri.....	47
Tablo 4.2.	Katkı malzemeleri ve oranları	48
Tablo 4.3.	Frekans bandları ve standart dalga kılavuzlarına ait bilgiler.....	53
Tablo 4.4.	Kullanılan takviye malzemelerin teknik özellikleri	59



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

d, t	: Numune kalınlığı, (mm)
ϵ	: Dielektrik sabiti, elektriksel geçirgenlik
ϵ'	: Dielektrik sabitinin gerçek kısmı
ϵ''	: Dielektrik sabitinin sanal kısmı
ϵ_r	: Bağlı dielektrik sabiti
ϵ_0	: Serbest uzay dielektrik sabiti
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ'	: Manyetik geçirgenlik gerçek kısmı
μ''	: Manyetik geçirgenlik sanal kısmı
μ_r	: Bağlı manyetik geçirgenlik
μ_0	: Serbest uzay manyetik geçirgenlik sabiti
σ	: Malzemenin iletkenlik değeri
γ	: Yayılım sabiti
$\tan \delta$	: Kayıp tanjant
Γ	: Yansıma katsayısı
c	: Serbest uzayda ışığın iletim hızı
f	: Elektromanyetik dalga'nın frekansı
λ	: Elektromanyetik dalga'nın dalgaboyu
Z	: Empedans
$\vec{E}$	: Elektrik alan şiddeti
$\vec{H}$	: Manyetik alan şiddeti
$\vec{D}$	: Elektrik akı yoğunluğu
$\vec{B}$	: Manyetik akı yoğunluğu
$\vec{J}$	: Elektrik akım yoğunluğu
ρ	: Elektrik yük yoğunluğu

Kısaltmalar

ABC	: Artificial Bee Colony (Yapay Arı Kolonisi)
CB	: Carbon Black (Karbon Siyahı)
CNF	: Carbon Nano Fiber (Karbon Nanolif)
CNT	: Carbon Nanotube (Karbon Nanotüp)
dB	: Desibel
EM	: Elektromanyetik
G	: Grafit
GA	: Genetik Algoritma
GHz	: Gigahertz
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
MWCNT	: Multiwall Carbon NanoTube (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp)
NATO	: North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)
PU	: Poliüretan
RAM	: Radar Absorbing Material (Radar Soğurucu Malzeme)
RCS	: Radar Cross Section (Radar Kesit Alanı)

RL	: Reflection Loss (Yansıma Kaybı)
RSM	: Radar Soğurucu Malzeme
RSY	: Radar Soğurucu Yapı
TPU	: Termoplastik Poliüretan
UV	: Ultraviyole



ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURMA ÖZELLİĞİNE SAHİP KATMANLI KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Elektromanyetik dalgaları soğuran malzemelerin tasarım çalışmaları, teknolojinin ilerlemesi ve radar soğurma teknolojisine olan artan ilgi nedeniyle hızlanmıştır. Bu durum, RSM olarak adlandırılan radar soğurucu malzemelerin tasarımında farklı özelliklere sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesine odaklanılmasına sebep olmuştur. Radar soğurucu malzemeler (RSM) farklı çeşitlere sahiptir ve en çok kullanılan malzemeler geniş bantlı ve çok katmanlı pasif radar soğurucu malzemelerdir. RSM tasarımı ve bu malzemelerin geliştirilmesi için kullanılan en yaygın ve kullanışlı yöntemlerden biri olan genetik algoritma, parametrelerin kodları ile işlem yapmaktadır ve optimizasyon problemlerinin çözümünde evrimin temel basamaklarından biri olan doğal seleksiyonu baz almaktadır. Bu çalışmanın amacı; literatürde çalışılan çeşitli katkı malzemelerini kullanarak bir veri tabanı oluşturulması ve genetik algoritma yardımı ile en uygun katmanlı kompozit yapıyı belirleyerek bu yapıyı üreterek sonuçların karşılaştırılmasıdır. Bu doktora tezi çerçevesinde 8-18 GHz frekans aralığında elektromanyetik dalga soğurma özelliğine sahip 3 katmanlı kompozit malzemelerin genetik algoritma ile belirlenmesi ve seçilen kompozit malzemelerin üretimi üzerinde çalışılmıştır. Bu kapsamda 10 farklı katkı malzemesi ile 55 numunelik kompleks bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanında bulunan her bir numunenin dalga kılavuzunda X-Band (8,2-12,4 GHz) ve Ku-Band (12,4-18 GHz) frekans aralıklarında elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) katsayıları ölçülmüştür. Yansıma kaybı formülasyonu genetik algoritmaya yerleştirilerek hangi malzemelerin, hangi sırada ve hangi kalınlıkta kullanılması gerektiği genetik algoritma ile belirlenmiştir. Elde edilen verilerden seçilen bir katmanlı kompozit numune laboratuvar koşullarında üretilmiş ve dalga kılavuzunda yansıma kaybı ölçülmüştür. Genetik algoritma ile elde edilen sonuç ile laboratuvarında üretilen numunenin yansıma grafiği karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda genetik algoritmanın yönlendirmesi ile seçilen numunenin üretim sonrası istenilen yansıma kaybı değerinde olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Soğurma, Genetik Algoritma, Katmanlı Kompozit Malzeme, Radar Soğurucu Malzeme.

DEVELOPMENT OF MULTILAYER COMPOSITE MATERIAL FOR ELECTROMAGNETIC WAVE ABSORPTION

ABSTRACT

The design studies of materials that absorb electromagnetic waves have been accelerated due to the advancement of technology and the increasing interest in radar absorption technology. This has led to the focus on the development of composite materials with different properties in the design of radar absorbing materials called RAM. Radar absorbing materials (RAM) have different types and the most used materials are broadband and multilayer passive radar absorbing materials. Genetic algorithm, which is one of the most common and useful methods used for RAM design and development of these materials, operates with the codes of parameters and is based on natural selection, which is one of the basic steps of evolution in solving optimization problems. The aim of this study is to create a database using various additives studied in the literature and to determine the most suitable multilayer composite structure with the help of genetic algorithm and to compare the results by producing this structure. Within the framework of this thesis, the determination of 3-layer composite materials with electromagnetic wave absorption in the 8-18 GHz frequency range by genetic algorithm and the production of selected composite materials have been studied. In this context, a complex database of 55 samples was created with 10 different additives. Permittivity (ϵ) and permeability (μ) coefficients were measured in the waveguide of each sample in this database in the frequency ranges of X-Band (8.2-12.4 GHz) and Ku-Band (12.4-18 GHz). The reflection loss formulation was placed in the genetic algorithm and it was determined by the genetic algorithm which materials, in which order and in which thickness should be used. A multilayer composite sample selected from the data obtained was produced under laboratory conditions and the reflection loss in the waveguide was measured. The results were evaluated by comparing the result obtained with the genetic algorithm and the reflection graph of the sample produced in the laboratory. As a result of this study, it has been shown that the sample selected with the guidance of the genetic algorithm has the desired reflection loss value after production.

Keywords: Electromagnetic Absorption, Genetic Algorithm, Multilayer Composite Material, Radar Absorber Materials.

1. GİRİŞ

Radar sistemleri ile cisimlerden yansıyan elektromanyetik (EM) dalgalar kullanılarak bu cisimlerin konumu, hareket hızı ve büyüklüğü tespit edilebilmektedir. EM dalgalar metallerden tam yansırken, dielektrik ve/veya manyetik özelliklere sahip malzemelerden bir kısmı yansıyabilir, geçebilir veya malzemenin içinde soğurulabilir. Radar sistemlerinin bir cismi (uçak, gemi, füze, vb.) tespit edememesi, o cisimden hiç geri yansıma sinyali almamasından veya sistemin algılama hassasiyetinin altında bir yansıma sinyali almasından kaynaklanmaktadır. Radar sistemlerinin gönderdiği sinyalin cisim tarafından soğurulmasına ve/veya geri yansıtılmamasını sağlayan malzemelere radar absorblayan malzemeler (RAM) veya radar soğurucu malzemeler (RSM) denilmektedir (Ünal ve diğ., 2018).

Radar soğurucu malzemelere olan ilgi radarın keşfedilmesinden itibaren ortaya çıkmıştır. İlk etapta askeri olarak uygulanan radar teknolojisi, aynı zamanda bu teknolojinin atlatılması ihtiyacını da doğurmuştur. Savaş sırasında bir cismin tanımlanması, hızının ve yönünün tespit edilmesi taraflar için büyük önem arz etmektedir. Bu teknolojiyi atlabilecek ilk denemelerden biri, Jaumann tarafından tasarlanan karbon bazlı malzemelerden oluşan denizaltı periskoplarıdır, fakat deniz suyunun malzeme üzerindeki etkisinden dolayı verim alınamamıştır (Ünal ve diğ., 2018).

RSM geliştirme çalışmaları 1930 yıllarında başlamış olup, Hollandalı Naamlooze Vennotschap Machinerreen firması tarafından 1936'da ilk RSM'nin patenti alınmıştır. Üretilen bu malzemede dolgu maddesi olarak enerji soğurucu özelliğiyle siyah karbon ve yüksek dielektrik sabite sahip olan TiO_2 karışımı kullanılmıştır. RSM'lerin yaygın olarak kullanılmaya başlaması ise 2. Dünya Savaşı ile birlikte Salisbury perdesi ve Dallenbach tabakaları ile gerçekleşmiştir. Bu yıllarda Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) bu alandaki çalışmalarına hız vermiş ve iki farklı yaklaşımla çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Almanya'da radarlardan gizlenme için uygulanabilir soğurucu malzeme geliştirme çalışmaları yapılırken, ABD'de ise radar performansını arttırıcı malzemelerin araştırılması üzerinde durulmuştur (Akman, 2012).

Uçak, roket, helikopter, gemi ve tank gibi hava, deniz ve kara platformlarının radar sistemleri tarafından tespit edilebilme etkinliği; hedefin büyüklüğüne, geometrik şekline,

elektromanyetik dalganın hedefe geliş açısına, elektromanyetik dalganın hedeften yansıma açısına, gelen ve yansıyan elektromanyetik dalganın hedefe göre polarizasyonlarına ve en önemlisi de platformun kaplandığı çok geniş bir frekans bandı ve geliş açısı aralığında soğurma yapabilen ince kalınlıklı ve yansıma katsayısını minimum yapan radar soğurucu malzemeye bağlıdır. Elektronik harp teknolojisinin oldukça fazla ilerlediği günümüzde, yeni üretilen harp silah ve araçlarının radarda görünmezlik özelliğine sahip olmaması düşünülemez. Elektronik harbin bir kolu olan radar soğurucu malzemeler özellikle polimerlerin bulunması ile baş döndürücü bir şekilde gelişme kaydetmiştir. Bu malzemeler arasında çok katmanlı ve geniş bantlı pasif radar soğurucu malzemeler ayrı bir öneme sahiptir. Sadece geniş bantlı olmalarının yanında, hafif ve ince olmaları da gerekmektedir (Ünal ve diğ., 2018).

Tez kapsamında aralarında MWCNT, Grafen Oksit, Tourmaline, Polianilin, Karbon, Grafit, Çinko Borat, Ferrit, Nikel, Nano-Grafen gibi proje gereği temin edilmiş olan malzemeler üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Yapılan literatür araştırmalarında birçok metal ve/veya metal dışı malzemenin çalışıldığı ve bu malzemelerin alaşımları üzerinde bir çok çalışma olduğu görülmüştür (X. Chen ve diğ., 2021; Elmahaishi ve diğ., 2022; Kasgoz ve diğ., 2019; R. Kumar ve diğ., 2021; Neelakanta, 1995; Rouhi ve diğ., 2022; Ünal ve diğ., 2018). Bu çalışmaların bir kısmına aşağıda yer verilmiştir.

Micheli ve arkadaşlarının 2014 yılında çok katmanlı radar soğurucu malzemelerin sentezi için yeni bir yöntem olarak sundukları çalışmada her katman için farklı türde karbon bazlı nano/mikro tozlar ile güçlendirilmiş epoksi reçine kullanılmıştır. Çeşitli karbon nano/mikro parçacıklar (grafen nanoplateletler, karbon nanolifler, çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve polianilin) ticari bir polimerik matris içerisinde farklı ağırlık yüzdelerinde karıştırılmış ve dielektrik geçirgenlik değerlendirmesi 2-18 GHz aralığında yapılmıştır. Çalışmalar sırasında MWCNT'ler ve karbon nanolifler, grafen nanoplateletler ve polianilin ile ilgili olarak EM soğurma kapasitesi açısından daha iyi performanslar gösterdiği bildirilmiştir. Genetik algoritma çözümlerinin sağladığı sonuçlara göre üç adet çok katmanlı kompozit karo üretilmiş ve mikrodalga yansıtımları NRL yay yöntemi ile ölçülerek sayısal simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. (Micheli ve diğ., 2014).

Choi ve Junk'ın 2015 yılında yaptıkları çalışmada geniş bant mikrodalga soğurma için dielektrik soğurucu bir katman, dirençli bir katman ve başka bir dielektrik soğurucu katmandan oluşan üç katmanlı bir bileşik geliştirmişlerdir. 2. Katman olan kağıt benzeri dirençli tabaka, pamuklu bir kumaş üzerinde epoksi içinde dağılmış MWNT'lerden oluşmaktadır. Bu katmanın, iç ve dış soğurucu katmanların empedansını eşleştirmek için önemli olduğu belirtilmiştir. Katmanların levha direncini, elektriksel geçirgenliğin gerçek kısmını (ϵ'), kayıp tanjant ($\tan\delta$) ve kalınlığını (d) optimize etmek için yinelemeli simülasyonlar ve deneysel değerlendirme kullanılmıştır. Ortaya çıkan üç katmanlı kompozitin, 4,7 - 13,7 GHz arasında %90'dan fazla soğurma ve 2,8 - 18 GHz arasında %50'den fazla soğurma sergilediği, maksimum yansıma kaybının ise 11,8 GHz'de yaklaşık 22,3 dB olarak elde edildiği bildirilmiştir (J. Choi ve Jung, 2015).

Kasgoz ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptıkları çalışmada farklı tip ve miktarlarda karbon dolgu maddeleri ile doldurulmuş termoplastik poliüretan (TPU) esaslı kompozitlerin morfolojik ve dielektrik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Karbon siyahı (CB), grafit (G), karbon nanolif (CNF) ve karbon nanotüp (CNT) kullanılarak çözelti karıştırma yöntemiyle çeşitli tek katmanlı kompozit levha serileri hazırlanmıştır. Kompozitlerin mikrodalga soğurma performansları 2–14 GHz frekans aralığında dielektrik parametreleri ölçülerek belirlenmiştir. X-Band aralığında daha geniş efektif soğurma alanı ve daha düşük yansıma kaybı (RL) değerleri elde etmek için genetik algoritma optimizasyon yöntemi kullanılarak çeşitli çok katmanlı kompozit yapılar tasarlanmıştır. Modelleme çalışmaları, toplam kalınlığı 4,7 mm olan dört katmanlı bir yapının 6,98–13,415 GHz frekans aralığında $RL < -10$ dB sağlayabildiğini ve X-Bandda radardan gizleme uygulamaları için başarıyla kullanılabileceğini ortaya koyulmuştur (Kasgoz ve diğ., 2019).

Oh ve arkadaşları 2004 yılında, iletken karbon siyahı ile cam/epoksi kompozit bağlayıcı matrisini harmanlayarak, yük taşıyabilen ve elektromanyetik dalgayı soğuran bir radar soğurucu yapı (RSY) tasarlamışlardır. Üzerinde çalışılan RSY, 10 GHz merkezli X-Band (8,2–12 GHz) frekans aralığı için optimum soğurma özelliğini sergileyecek şekilde özel olarak tasarlanmış ve soğurma özellikleri araştırılmıştır. Karbon siyahı ve cam/epoksiden oluşan elektromanyetik soğurucu katmanlı kompozitler için farklı karbon siyahı ağırlık yüzdelere sahip numunelerin dielektrik özellikleri ölçülmüştür. Mekanik özellikleri

dikkate alınarak birinci tabaka %7 karbon siyahını 0,6 mm kalınlığında ve ikinci tabaka %5 karbon siyahını 1,9 mm kalınlığında olacak şekilde düzenlenmiş ve tabakaların maksimum RCS ölçüm tekniği kullanılarak yansıma kaybı ölçülmüştür. Tasarlanan optimum yapı, X-Band frekans aralığında 10 dB soğurucu bant genişliğinde 2,4 GHz ve 20 dB soğurucu bant genişliğinde 0,64 GHz göstermiştir (Oh ve diğ., 2004).

Lee ve arkadaşlarının 2006 yılında yaptıkları çalışmanın amacı X-Bandda yük taşıma kabiliyetine sahip radar soğurucu yapılar (RSY) tasarlamaktır. Bu kapsamda MWNT dolgulu cam/epoksi düz dokuma kompozitlerden oluşan optimal bir RSY üzerinde çalışılmıştır. Çok katmanlı bir RSY'da elektromanyetik dalgaların yansıması/iletimine ilişkin bir genetik algoritma (GA) kullanılmış ve sonuç olarak, tüm X-Band için EM enerjinin %90'ını soğuran iki katmanlı bir RSY tasarlanmıştır (Lee ve diğ., 2006).

2015 yılında Choi ve arkadaşları, nanokompozitlerin dielektrik özelliklerine bağlı olarak EM dalga soğurma karakteristikleri için teorik bir yöntem ve bu teorik araştırmaya dayanarak, RSY için optimum bir tasarım yöntemi geliştirmişlerdir. Bu kapsamda nano-kompozitler, düz dokuma E-cam kumaşına, ağırlıkça %0'dan %3'e kadar %0,5'lik bir artışla değişen çeşitli ağırlık yüzdelerinde nano boyutlu karbon siyahı içeren bir epoksi reçine ile imal edilmiştir. Üretilen nano-kompozitlerin dielektrik özellikleri, serbest alan ölçüm yöntemi kullanılarak ölçülmüş ve sonuç olarak ağırlıkça %3 karbon siyahı ile üretilen nano-kompozit seçilmiştir. Optimum tasarım yöntemi kullanılarak 2,78 mm kalınlığında bir nano-kompozit RSY tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlardan, nano-kompozit RSY'nın, maksimum soğurmanın %95'inden fazlası ve ortalama soğurmanın %90'ından fazlası ile ve 10 GHz'e yakın bir maksimum soğurma frekansı ile yüksek EM dalga soğurma performansları sergilediği bildirilmiştir (I. Choi ve diğ., 2015a).

Jelmy 2019 yılında gerçekleştirdiği çalışmada vakum torbalama yöntemiyle MWCNT/PANI modifiye epoksi matrisli cam elyaf takviyeli polimer laminatlar hazırlanmıştır. Epoksi matristeki dolgu maddesinin (MWCNT/PANI) miktarı, epoksi-sertleştirici sistemine göre ağırlıkça %0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3 arasında değişmiş, ve elyaf miktarı tüm laminatlarda sabit tutulmuştur. Hibrit laminatlar daha sonra karakterize edilerek S-Bandda mikrodalga soğurma analizleri yapılmıştır. Yansıma kaybı ağırlıkça %0,5 MWCNT/PANI içeren laminat için -16 dB'den ağırlıkça %2 MWCNT/PANI içeren laminat için -30,1 dB'ye yükselmiş bu nedenle MWCNT/PANI modifiye epoksi/cam

elyaf laminatların yapısal olarak güçlü radar soğurucu malzeme olarak kullanılabileceği bildirilmiştir (Jelmy ve diğ., 2019).

Chen ve arkadaşlarının 2020’de yayınladıkları çalışmada kompozit, sıvı kalıplama (reçine transfer kalıplama - RTM) işlemi ile MWCNT ve Fe₃O₄ NP içeren cam elyaf epoksi kompozitler üretilmiştir. Tek katmanlı ve çift katmanlı cam elyaf/MWCNT/epoksi ve cam elyaf/Fe₃O₄ NP/epoksi kompozitlerin mikrodalga soğurma özellikleri değerlendirilirken yansıma kaybı (RL) dalga kılavuzu yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Sonuçlar değerlendirildiğinde soğurucular ile çift katmanlı yapı tasarımının birleşik kullanımı büyük tasarım esnekliği ve çeşitliliği gösterdiği ve yüksek performanslı mikrodalga soğurucu malzemelerin tasarımı için umut verici bir aday olabileceği bildirilmiştir (W. Chen ve diğ., 2020).

Kim ve Lee’nin 2008’de ürettikleri RAS’da, EM dalgalarını soğurmak için E-cam kumaş, epoksi reçine ve CNT’den (karbon nanotüp) oluşan nanokompozit, sandviç yapının dışına yapıştırılmıştır. Karbon kumaş/epoksi kompozit, gelen EM dalgalarının yansıma tabakasını oluşturmak ve sandviç yapıların yük taşıyan yüzey malzemesi olmak gibi iki role sahiptir. X-Band frekans aralığında maksimum EM soğurma performansı için CNT’nin optimum ağırlık fraksiyonunu bulmak amacıyla ticari yazılım yardımıyla EM dalganın davranışı simüle edilmiştir. Serbest alan ölçüm sonuçlarına göre nanokompozitlerdeki CNT’nin kalınlığı 2,52 mm ve ağırlık oranı %3 olduğunda, 10 dB’lik soğurma bant genişliği 3,3 GHz (8,2–11,5 GHz) ve maksimum ve minimum EM soğurma oranı sırasıyla %97 ve %84 olarak elde edilmiştir. X-band frekans aralığında gelen EM dalgalarının %90’ından fazlasını soğuran optimum bir kompozit sandviç yapı önerilmiştir (Kim ve diğ., 2008).

2006 yılında Park ve arkadaşları X-Band frekans aralığında sandviç yapılara sahip radar soğurucu yapılar (RSY) tasarlamış ve üretmişlerdir. RSY’nin soğurma kapasitesini verimli bir şekilde artırmak için kompozit prepreglere ve poliüretan köpüklere karbon siyahı ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWNT) gibi iletken dolgu maddeleri eklenmiştir. RSY’nin mekanik sertliğini iyileştirmek için kompozit yüzey levhalarından ve köpük çekirdeklerden yapılan sandviç yapıları kullanılmıştır. Yüzey levhaları için iletken karbon siyahı içeren cam kumaş/epoksi kompozitler ve karbon kumaş/epoksi kompozitler kullanılmıştır. Çekirdek malzemesi olarak ise MWNT içeren poliüretan köpükler

kullanılmıştır. X-Banddaki geçirgenlikleri, iletim hattı tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Üç farklı numune üretilerek bunların X-Banddaki yansıma kayıpları, serbest alan tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Deneysel sonuçlara göre üretilen numunelerin 10 dB soğurma bant genişliğinde simüle edilmiş sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu bildirilmiştir (Park ve diğ., 2006).

Choi ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada seçilen çeşitli nanokompozitler ile optimum tasarım yöntemi kullanılarak nanokompozit RSY'ler tasarlanmışlardır. Ağırlıkça %3 CB, %2,5 CNT, % 3 CNT veya %0,3 CNT oranında dağılmış E-cam/epoksiden oluşan nano-kompozit RSY'ler optimum tasarım yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan nano-kompozit RSY 'nin X-Band frekans aralığındaki EM dalga soğurma performansı ticari bir yazılımla simüle edilmiş ve ölçülen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve ölçüm sonuçları, E-cam/epoksi nano-kompozitlerden oluşan tüm nano-kompozit RSY'lerin maksimum EM dalga soğurma değeri %95'in üzerinde ve ortalama EM dalga soğurma değeri %90'ın üzerinde olduğunu göstermiştir. Ek olarak çalışmada karbonlu nano-iletken parçacıkların nano-kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri ölçülmüş ve hem elektromanyetik hem de mekanik performanslar dikkate alınarak optimum nano-kompozit RSY önerilmiştir (I. Choi ve diğ., 2015b).

Chin ve Lee 2007 yılında yaptıkları çalışmada, iletken karbon siyahı ile E-cam/polyester kompozitinin bağlayıcı matrisini harmanlayarak üstün yük taşıma kapasitesine ve EM soğurma özelliklerine sahip kompozit RSY geliştirilmiştir. RSY, 10 GHz merkezli X-Band için optimum performansa sahip olacak şekilde tasarlanmış ve EM soğurma özellikleri, serbest alan yöntemi kullanılarak X-Band frekans aralığında ölçülmüştür. Araştırmanın sonucu olarak iletken karbon siyahı ile 2,93 mm kalınlığındaki kompozit RSY'nin, tüm X-Band frekans aralığı boyunca gelen EM dalganın %90'ından fazlasını emdiği bildirilmiştir (Chin ve Lee, 2007).

2022 yılında Lui nin yaptığı çalışmada giderek daha fazla araştırmacının odak noktası haline gelen Sürü Zekası Algoritması ve evrimsel hesaplama dayalı olarak karbon nanotüplerin yapı optimizasyonunu incelenmiştir. Sürü zekası algoritmaları arasında bulunan genetik algoritma, parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması ve karınca kolonisi

algoritması yardımıyla karbon nanotüp malzemelerinin yapısının optimize edilerek daha fazla alanda kullanılabileceği bildirilmiştir (Liu, 2022).

Toktaş ve arkadaşları çalışmalarında, doğaldan ilham alan en son algoritmalarından biri olan yapay arı kolonisini (ABC) kullanılarak çeşitli katman sayılarına sahip çok katmanlı RSM tasarımındaki değişkenleri belirlemişlerdir. Optimizasyonda, adil bir karşılaştırma yapmak için literatürde mevcut elektriksel değişkenleri içeren önceden tanımlanmış bir malzeme seti kullanılmıştır. Her katmanın elektriksel değişkenleri ve kalınlığı, sınırlı bir toplam kalınlık için yansıtmayı en aza indirme hedefi için optimize edilmiştir. Çalışmalarda 0,2-2, 2-8, 8-12, 12-18 ve 2-18 GHz'lik önemli radar bantlarındaki geniş bant ve geniş açılı katmanlı çok katmanlı RSM'ler optimal olarak tasarlanmıştır (Toktaş ve diğ., 2018, 2019, 2020).

Ling ve arkadaşlarının 2019 yılındaki çalışmasında katkı malzemesi olarak MWCNT kullanılan çok katmanlı bir yapıya sahip geniş bant mikrodalga soğurucu malzemeler tasarlanmıştır. Sabit frekanslarda normalleştirilmiş güç akışı ve güç kaybı dağılım haritaları CST simülatörü ile analiz edilmiştir. Her katmanın kalınlığı değiştirilerek yansıma kaybı ve $CI/MWCNT/Ce_2Fe_{17}N_{3-8}$ 'dan oluşan üç katmanlı bir soğurucu mekanizması incelenmiştir. Sonuçlar, üstün soğurma performansının $t_1=1,3$ mm, $t_2=0,4$ mm ve $t_3=0,6$ mm koşullarında gerçekleştirildiğini ve maksimum yansıma kaybına 12,6 GHz'de ulaştığını göstermiştir. Bu kapsamda MWCNT/PU kompozitin, çok katmanlı soğurma kabiliyetini geliştirmek için etkili bir filtreleme malzemesi olduğu bildirilmiştir (Ling ve diğ., 2019).

Çeşitli yıllarda yayınlanan yayın ve patentlerde Turmalinin doğal bir minarel olarak önemi ele alınmaktadır. Turmalin bir tür siklosilikat mineralidir ve piezoelektrik, termoelektrik, uzak kızılötesi radyasyon ve negatif iyon salımı gibi birçok mükemmel özelliğe sahiptir. Turmalinin diğer malzemelerle fiziksel veya kimyasal yöntemlerle birleştirilmesiyle üstün özelliklere sahip birçok türde fonksiyonel kompozit elde edilebilmektedir. (Chang ve City, 2010; Y. Hu ve diğ., 2014). Litaratürde, Turmalinin porazif yapısının elektromanyetik soğurmaya olan katkısı ve mikron boyutlu partiküllerinin hafif malzemelerin üretiminde kullanımı öne çıkarılmaktadır. Ayrıca, anti-elektromanyetik girişim, elektromanyetik kalkanlama ve çeşitli elektromanyetik koruyucu kompozit malzemelerin üretimi için de Turmalin kullanımının önemi

vurgulanmaktadır. Bu alışmalar, Turmalinin elektromanyetik koruyucu özelliklerinin kullanımına dikkat çekerek, endüstriyel uygulamalarda önemli bir yer kazanmasını sağlamaktadır (Kondo ve diğ., 2006; Sakurai, 2005; Xue ve diğ., 2010).



2. KOMPOZİT MALZEMELER

Tasarımcılar, geleneksel malzemelerin sınırlı performans özelliklerinin farkındadır. Bu nedenle yüksek performanslı ve güvenilir yeni malzemelerin kullanımına önem verirler. Bu yeni malzemeler birden fazla özelliği bir arada göstermeli, hafif olmalı ve aşırı ortamlarda da (yüksek/düşük sıcaklık, korozyon ortamları ve basınç altındaki ortamlar gibi) kullanılabilir. Geçmişte tek bir malzeme türü bu özellikleri karşılamakta yetersiz kalıyor ve malzemelerin kombinasyonunun kullanılması gerekiyordu. Bu sayede mühendisler kompozit malzemeleri geliştirdiler. Kompozit malzemeler, bileşenlerin en iyi özelliklerini bir araya getirerek yüksek performanslı bir malzeme elde etmek için kullanılır. Bundan dolayı, kompozit malzemelere olan talebin sürekli artacağı öngörülmektedir (Balasubramanian, 2013).

Kompozit malzemeler, farklı malzemelerden istenen özellikleri sağlamak üzere iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik olarak bileşimi ile elde edilen yenilikçi bir malzeme türüdür. Bu malzemeler genellikle özel kullanım alanlarına uygun şekil, miktar ve üretim teknolojileri kullanılarak oluşturulur ve klasik malzemelerin sağlayamayacağı mekanik, kimyasal, elektriksel, biyo-uyumluluk ve ısı direnç özellikleri gibi özellikleri taşırlar. Kompozit malzemeler, farklı kimyasal bileşimlere sahip, birbirine çözünmeyen, en az iki adet makro bileşenin birleşimiyle oluşturulurlar. Genellikle yapıları makro ölçüde heterojen karakterli olup birden fazla sayıda faz yer alır. Bileşenler birbiri içerisinde çözünmez ve kimyasal olarak asal davranırlar. Metal alaşımlarının aksine kompozit malzemenin bileşenleri kendi özelliklerini korurlar (Balasubramanian, 2013; Buragohain, 2018; Callister ve Rethwish, 2014; Camilleri, 2010).

Farklı sektörlerde kullanılan kompozit malzemeler, özellikle savunma sanayisi, havacılık, denizcilik ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Taşıdıkları özellikler nedeniyle kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu malzemeler özellikle hafif ve dayanıklı malzemeler arayan sektörlerde sıkça kullanılmaktadır.

Günümüzde, birçok geleneksel malzeme yerini kompozit malzemelere bırakmaktadır. Yeni malzemelerin geliştirilmesi, imalat süreçlerindeki gelişmeler ve yeni analitik araçların bulunabilirliği sayesinde kompozit malzemelerin kullanımı kolaylaşmaktadır.

Bu nedenle, kompozit malzemeler gelecekte de önemli bir role sahip olmaya devam edecektir (Balasubramanian, 2013).

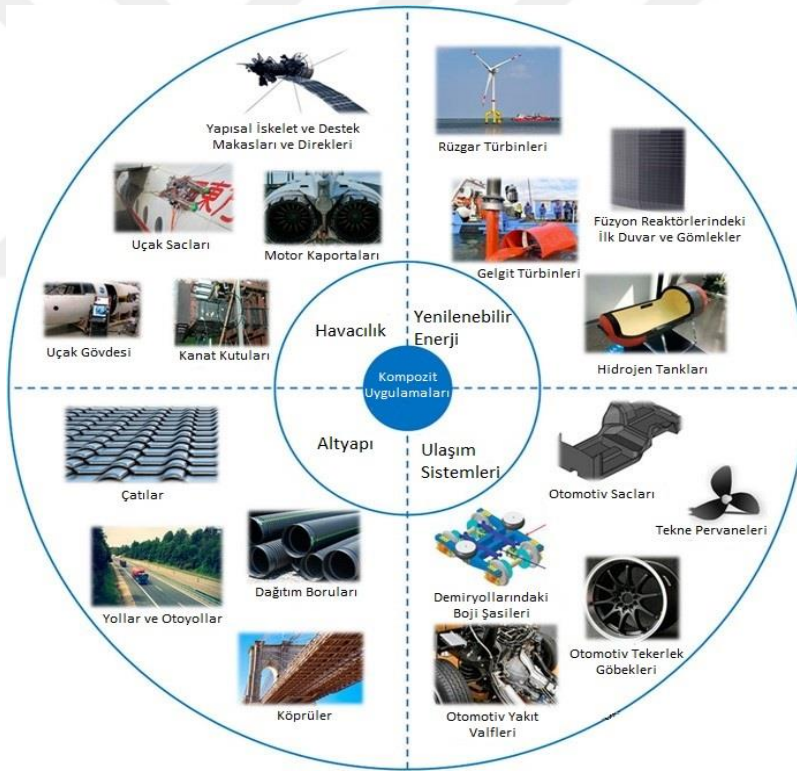
Kompozit malzemeler, insanlık tarihi boyunca ilk uygarlıklardan gelecekteki yeniliklerin mümkün olmasına kadar önemli bir rol oynamıştır. Aralarındaki anahtar faktörler olan korozyon direnci, tasarım esnekliği, dayanıklılık, hafiflik ve sağlamlık gibi birçok fayda sunarlar. Kompozitler, günlük hayatımızda inşaat, tıbbi uygulamalar, petrol ve gaz, ulaşım, spor, havacılık gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin kompozit malzemeler olmasaydı muhtemelen roketler yerden kalkamazdı (J. Chen ve diğ., 2022; Ngo, 2012).

Kompozitte kullanılan farklı malzemeler, kompozite benzersiz özellikler vermek için birlikte çalışır. İnsanlar kompozit malzemeleri binlerce yıldır farklı alanlarda kullanmaktadır. İlk kullanımları M.Ö. 1500'lere dayanan kompozit malzemeler, erken Mısırlılar ve Mezopotamyalı yerleşimciler tarafından güçlü ve dayanıklı binalar yapmak için kullanılmıştır. Saman, antik dönemde çanak çömlek, binalar ve tekneler de dahil olmak üzere çeşitli ürünlerde takviye olarak kullanılmaktaydı. MS 1200'de Moğollar ilk kompozit yayı icat etti. Bu yaylar, kemik ve ahşap kombinasyonu ve huş kabuğu ile sarılarak preslenmişti. Bu sayede güçlü ve isabetli yaylar elde edilmiştir ve Cengiz Han'ın askeri egemenliğine yardımcı olmuştur. Hafif ve güçlü olmaları gibi avantajları nedeniyle, kompozit malzemelerin ilerlemesi büyük ölçüde savaş zamanlarının bir sonucudur. 2. Dünya Savaşı sırasında birçok kompozit malzeme geliştirilmiş ve laboratuvarlardan nihai üretime taşınmıştır (Camilleri, 2010; Ngo, 2012).

Kompozit malzemelerin esas özelliklerinden biri, özelliklerinin uyarlanabilir olmasıdır. Yani, tasarım aşamasında gerekli olan özellikler, kompozit malzemenin formülasyonu ile belirlenebilir. Kompozit malzeme için uygun bileşenleri seçerken, potansiyel bileşenlerin sergilediği özellikler önemlidir. Kompozit malzemenin özellikleri ise, takviye elemanı ve matrisin özelliklerine bağlıdır. Bunun yanı sıra, üretim tekniği ve matrisin sertleşme kriterleri de kompozit malzemenin özelliklerini etkileyebilir. Üretilen kompozit parçasına göre, üretim şekli değişiklik gösterir. Parçanın boyutu ve şekli, kullanılan reçine ve takviye elemanının özellikleri, üretimden beklenen özellikler ve maliyet durumu gibi faktörler üretim şeklini belirleyebilir (Şanlı, 2021; Sharma, 2021).

Pek çok sektörde kompozit malzemeler, düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemeti nedeniyle bilinen diğer malzemelere göre daha çok tercih edilmektedir. Bununla birlikte, kullanım oranlarının artmasıyla birlikte, üretim yöntemleri üzerinde yapılan çalışmalar da artmaktadır. Ancak, hammaddelerinin pahalılığından dolayı, üretim maliyetleri hala yüksektir (Şanlı, 2021).

Bununla birlikte kompozit malzemelerin ekonomik önemi artık iyi bilinmektedir ve bu önemin gelecekte artacağına dair güçlü işaretler vardır. Kompozit malzemeler şu anda havacılık endüstrisinde yerleşik bir konuma sahiptir. Ayrıca otomotiv endüstrisinde birçok bileşen için kullanılmakta ve inşaat altyapıları artık kompozit malzemelerden yapılan takviyelere sahiptir (Gay ve diğ., 1994). Kompozitlerin bazı önemli uygulama alanları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kompozitlerin havacılık, yenilenebilir enerji, ulaşım sistemleri ve altyapı alanlarında uygulanması (J. Chen ve diğ., 2022)

2.1. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Bir kompozitin genel uygulanabilirliği, yalnızca göreceli avantaj ve dezavantaj sayısı ile değerlendirilemez. Tasarım, bir projenin başarısının veya başarısızlığının anahtarıdır. (Pellicer, 2021).

Yüksek performans ve hafifliğin temel gereklilikler olduğu birçok uygulamada, kompozit malzemeleri diğer geleneksel malzemelerden daha çekici kılan çeşitli avantajlar vardır.

Kompozitler, düşük yoğunlukları ve yüksek dayanımları nedeniyle çok yüksek özgül dayanımlara ve özgül modüllere sahiptirler. Kompozitlerin düşük yoğunlukları, onları geleneksel malzemelerden daha hafif hale getirir, bu da onları yakıt verimliliği ve taşımacılıkta avantaj sağlar. Kompozitlerin yüksek dayanımları ise onları geleneksel malzemelerden daha güçlü hale getirir, bu da onları yapısal uygulamalarda avantaj sağlar. Kompozit malzemeler kullanılarak yapılan yapısal parçalar tipik olarak metallerden yapılanlardan daha hafiftir. Havacılıkta hafiflik, daha uzun menzil, daha yüksek taşıma kapasitesi ve yakıt tasarrufu anlamına gelmektedir (Balasubramanian, 2013; Buragohain, 2018).

Mukavemet ve sertlik özellikleri cam veya karbon gibi uygun takviyelerle büyük ölçüde geliştirilebilir. Bu nedenle, polimer matrisli kompozitler, takviye yönünden geleneksel metaller ve seramiklere kıyasla daha iyi gerilme mukavemeti ve sertlik sergiler. Bununla birlikte belirli yapılarda, mekanik özelliklerin gereksinimi yalnızca belirli bir yönde yüksektir ve diğer yönlerde bu özellikler kritik olmayabilir. Kompozit malzemeler bu tür uygulamalar için daha uygundur. Üretim sırasında kullanılacak elyafları bir belirli yönde hizalamak mümkündür. Böylece nihai kompozit yönlü özelliklere sahip olacak ve mekanik özellikler elyaf yönü boyunca yüksek olacaktır (Balasubramanian, 2013; Buragohain, 2018).

Tekrarlı yükler altında, çoğu malzeme statik yüklere göre daha düşük stres seviyelerinde bozulur. Kompozitler, çelik ve alüminyum gibi geleneksel metallerden daha yüksek yorulma mukavemeti sergiler. Ayrıca kompozit malzemeler genel olarak metalik malzemelerden daha iyi korozyon direnci sunar. Böylece kompozit yapılar daha uzun depolama ömrüne sahiptirler (Buragohain, 2018).

Kompozit malzemeler, elyaf-matris arayüzünün varlığı nedeniyle, geleneksel metallerden daha iyi sönümleme özellikleri sergiler. Bir darbe yükünün etkisi altındaki bir kompozit parça, çok sayıda mikro çatlak geliştirir. Mikro çatlakların oluşumu sürecinde, çarpma enerjisi emilir ve felaketle sonuçlanacak arızalar önlenir (Buragohain, 2018).

Tasarım esnekliği, kompozit malzemelerin önemli bir avantajıdır. Kompozit parçalar, malzeme sisteminin tasarımıyla birlikte tasarlanır. Karmaşık şekillere ve büyük boyutlara sahip parçalar tasarlanabilir ve bunun sonucunda genel montajdaki parça sayısı önemli ölçüde azalır. Bu özellik aynı zamanda mühendisin üretim operasyonlarını azaltmasına ve üretim döngü süresini azaltmasına olanak tanır (Buragohain, 2018; Camilleri, 2010).

İstenilen özelliklerde kompozitler yapmak mümkündür. Uygun bir takviye, matris ve üretim yöntemi, bir çok seçenek arasından seçilebilir. Yazılım programlarının yardımıyla, her tür takviye ve farklı oryantasyona sahip matris için kompozit özelliklerinin teorik bir tahmini artık çok kolaydır. Bununla beraber istenilen özelliklerin kombinasyonu ile kompozitler üretmek mümkündür (Balasubramanian, 2013).

Kompozitler, düşük maliyetleri nedeniyle de tercih edilmektedir. Azalan üretim maliyeti, daha düşük montaj maliyeti (düşük parça sayısı) ve daha uzun depolama ömrü (daha az korozyon) nedeniyle toplam maliyet de azalır (Buragohain, 2018).

Kompozitlerle ilgili uzun bir avantaj listesi olsa da, bazı dezavantajlar da vardır. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için özel dikkat gösterilmelidir.

Geleneksel malzemelere göre kompozit malzemelerin yüksek hammadde maliyetleri ve genellikle yüksek üretim ve montaj maliyetleri vardır. Kullanılan bazı hammaddeler ucuzken, karbon elyafları, yüksek performanslı epoksi reçinesi, vb. bazı hammaddeler çok pahalıdır. Benzer şekilde, otoklav kalıplama, filaman sarma vb. bazı kompozit imalat işlemleri oldukça pahalıdır ve bu işlemler, maliyetin birincil kriter olmadığı üst düzey uygulamalar için uygundur (Balasubramanian, 2013; Buragohain, 2018).

Genellikle kompozitlerin üretim hızı düşüktür. Bu nedenle kompozitler, yüksek hacimli üretim endüstrileri (örneğin otomobil endüstrisi) için uygun olmayabilir. Uygun metalik malzemenin seçimi, özelliklerle ilgili bir veri tabanının mevcudiyeti nedeniyle kolaydır.

Ancak, farklı kompozitlerin özelliklerine ilişkin benzer bir veri tabanı henüz mevcut değildir (Balasubramanian, 2013).

Kompozit malzemeler çoğunlukla anizotropiktir, bu nedenle kompozit malzeme kullanılarak bir parçanın tasarımında ve analizinde dikkate alınması gereken parametre sayısı fazladır. Aynı zamanda parametre sayısının fazla olması tasarım ve analiz prosedürünün karmaşıklığını da artırır (Buragohain, 2018).

Polimer matrisli yapısal kompozitler, ortam sıcaklığı arttıkça mukavemet ve sertlik özelliklerini kaybetme eğilimindedir ve düşük servis sıcaklığına sahiptir. Bununla birlikte birçok polimer, UV radyasyonu vb. radyasyonlara maruz kaldığında bozulur. Nem emilimi de birçok polimer matrisli kompozit için bir problemdir (Buragohain, 2018).

Laminat yapımını, kupon hazırlamayı ve test etmeyi içeren mekanik karakterizasyon prosedürü, fazla sayıda elastik sabitin ve mukavemet özelliklerinin varlığı nedeniyle karmaşık ve zaman alıcıdır. Ayrıca tasarım ve üretim öncesi bireysel ham maddeler, yani reçine, kütleme maddeleri ve elyaf da mekanik ve fiziksel özellikler açısından değerlendirilmeye alınmalıdır (Buragohain, 2018).

Kompozit malzemeler matrisin birincil yükü taşıdığı, düzlem dışı yönde mukavemetin zayıf olduğu ve yük yollarının karmaşık olduğu yerlerde kullanılmamaları gerekir. Aksi takdirde malzemede hasar riski artar. Kompozitler ayrıca darbe hasarına ve delaminasyonlara karşı duyarlıdır ve metalik yapılara kıyasla tamirleri daha zordur (Camilleri, 2010).

Kompozitler, tamamen farklı malzemelerin birleşiminden oluştuğu için arayüzde kusur oluşma riski yüksektir. Bu nedenle, üretim sırasında özen gösterilmediği takdirde kusurlar kaçınılmazdır (Balasubramanian, 2013).

Kompozit parçalardaki birleştirmeler önemli bir ilgi alanıdır. Somun ve cıvata, perçin, dişli delikler vb. kullanılan geleneksel birleştirme yöntemleri, kompozitlerde doğrudan uygulanamaz. (Buragohain, 2018).

Geri dönüşüm, kompozitlerin yaygın olarak kullanılmasının önündeki bir diğer engeldir (Balasubramanian, 2013).

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

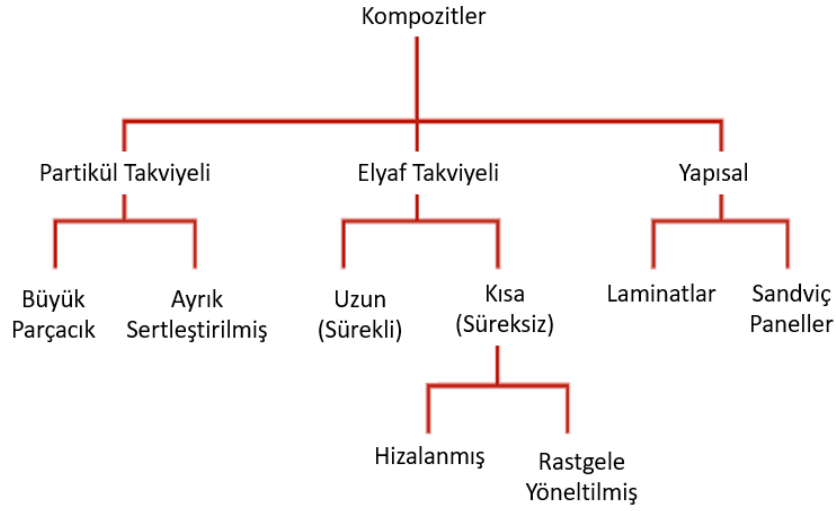
Kompozit malzemelerin mekanik, kimyasal ve diğer özelliklerine etki eden iki temel bileşen vardır. Bu bileşenler takviye malzemesi ve matris malzemesidir. Takviye malzemesi, malzemenin dayanıklılığını ve sertliğini artırmaya yardımcı olurken, matris malzemesi, takviye malzemesinin bir arada tutulmasına ve malzemeye şekil verilmesine yardımcı olur. Takviye ve matris malzemeleri ile ilgili temel bilgiler aşağıda açıklanmıştır.

2.2.1. Takviye Malzemeleri

Takviye malzemeleri, matris malzemelerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Bu malzemeler, yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve düşük yoğunluk gibi özellikleriyle öne çıkar. Takviye edici bileşenlerin geometrileri, takviye nedeni göz önünde bulundurularak seçilir. Başka bir deyişle kompozitlerin mekanik özellikleri, takviye malzemelerinin şekil ve boyutlarına bağlı olarak belirlenir (Korkusuz, 2021).

Takviye elemanlarının seçimi çok önemlidir çünkü kompozit sistemde; sağlamlık/rijitlik/aşınma direnci gibi yapısal özelliklerin yaklaşık %90'nın üzeri takviye elemanı tarafından sağlanmaktadır. Takviye elemanı olarak; öncelikle sürekli elyaflar, kısa elyaflar, kırılmış elyaflar, parçacıklar ve kılcal kristaller kullanılabilir. Bunların her birinin kompozitlere katkıda bulunabilecek kendi özellikleri vardır ve bu nedenle her birinin kendi uygulama alanı vardır. Bu formlar arasında elyaflar, kompozit uygulamalarda en çok kullanılan ve kompozit malzemelerin özellikleri üzerinde en fazla etkiye sahip olanlardır (Ngo, 2012). Kompozitlerin takviye malzemelerine göre sınıflandırılması Şekil 2.2'de görülmektedir.

Dağınık faza bağlı olarak, kompozitler elyaf takviyeli kompozitler, partikül takviyeli kompozitler ve yapısal kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Elyaf takviyeli kompozitler tek katmanlı veya çok katmanlı kompozitler olarak üretilebilir.



Şekil 2.2. Kompozitlerin takviye malzemelerine göre sınıflandırılması (Callister ve Rethwish, 2014)

Tek katmanlı kompozitlerde takviye malzemesi olarak uzun (sürekli) veya kısa (süreksiz) elyaflar ve partiküller kullanılır (Şekil 2.3). Elyaflar, uygulamaya ve üretim sürecine bağlı olarak seçilir. Elyaflar mukavemet ve sertlik avantajları nedeniyle, gelişmiş kompozitler için en önemli takviye malzemesidir (Camilleri, 2010). Elyaf takviyesi ile daha iyi yük transferi mümkün olur ve bu sayede yüksek mekanik özellikler elde edilir. Bu mekanik özellikler tüm yönlerde aynı olmayıp genellikle elyaf yönü boyunca yüksektir. Bununla beraber kısa elyaflar ile izotropik kompozitler kolaylıkla üretilebilmektedir. Takviye olarak kısa elyafların kullanıldığı çoğu durumda kompozitler izotropiktir. Ancak üretim sırasında elyaflar bazı üretim yöntemleri ile belirli bir yönde hizalanabilir ve hazırlanan kompozitler anizotropik hale gelebilir (Balasubramanian, 2013).



Şekil 2.3. Uzun elyaf, kısa elyaf ve partikül takviyesinin gösterimi (URL-1)

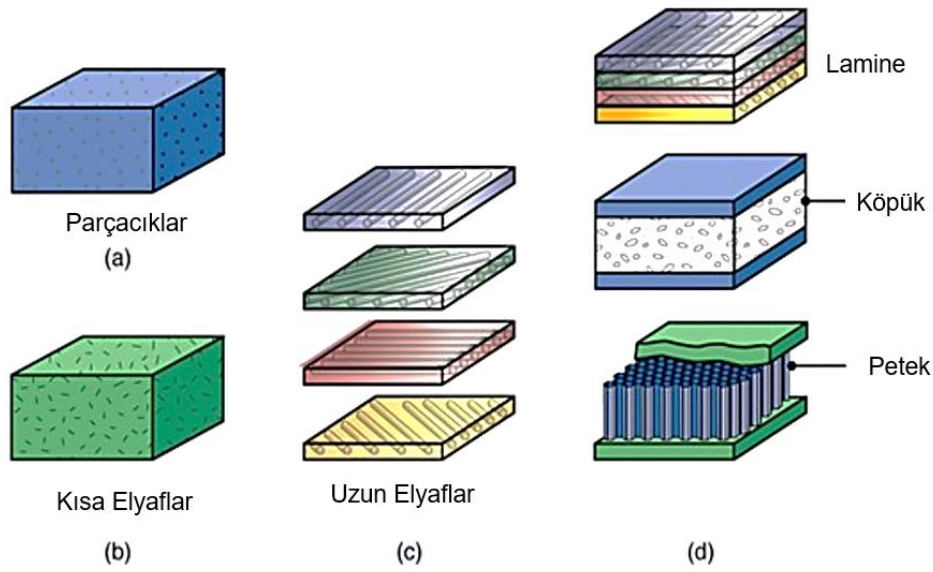
Elyaf takviyelerin aksine, partiküller bire yakın en-boy oranına sahiptir, neredeyse eş boyutlu malzemelerdir; yani partiküller her yönde hemen hemen aynı boyutlara sahiptir (Şekil 2.3). Bu nedenle partiküllere yük transferi elyaflara kıyasla etkili değildir. Partikül takviyeli kompozitlerin çoğunda partiküller matrisin gücünü iyileştirmez. Partiküller, esas olarak, fonksiyonel veya termal özellikler gibi matrisin belirli fiziksel özelliklerini değiştirmek için eklenir (Balasubramanian, 2013). Partiküllerin tercih edilen bir yönelimi yoktur ve mekanik özelliklerde minimum iyileştirmeler sağlar. Kompozit malzemenin maliyetini düşürmek için sıklıkla dolgu maddesi olarak da kullanılırlar (Camilleri, 2010).

Çok katmanlı bir kompozitteki katmanlar aynı tip elyaf takviyesiyle yapıldığında, buna “laminat” denir ve yapısal bir kompozit türüdür (Balasubramanian, 2013). Lamine bir kompozit, sürekli ve hizalanmış elyaf takviyeli kompozitlerde olduğu gibi tercih edilen bir yüksek mukavemet yönüne sahip iki boyutlu levhalardan veya panellerden oluşur. Katmanlar üstüste dizilir ve yüksek mukavemet istenen yönün oryantasyonu birbirini izleyen her katmanda değişecek şekilde birbirine yapıştırılır. Bu nedenle, bir lamine kompozit, iki boyutlu düzlemde birkaç yönde istenen yüksek mukavemete sahiptir (Callister ve Rethwish, 2014). Farklı katmanlarda iki veya daha fazla elyaf takviyesi kullanılıyorsa, bu bir hibrit kompozittir. Hibrit kompozitler iki veya daha fazla tipte takviye ile yapılır; cam/karbon, cam/aramid ve aramid/karbon elyaf gibi (Balasubramanian, 2013).

Diğer bir yapısal kompozit türü olarak kabul edilen sandviç paneller, hafif ve daha çok yüksek rijitlik ve dayanımlara sahip paneller olarak tasarlanır. Bir sandviç panel iki dış levhadan ve bu levhaları ayıran ve levhalara yapıştırılarak bağlanan daha kalın bir çekirdekten oluşur. Dış levhalar yapıya yüksek sertlik ve dayanıklılık verirler ve yüklemekten kaynaklanan çekme ve sıkıştırma baskılarına dayanacak kadar kalın olmalıdırlar. Bu nedenle dış levhalar tipik olarak elyaf takviyeli plastikler, alüminyum alaşımları, titanyum, çelik veya kontrplak gibi nispeten sert ve güçlü bir malzemeden yapılırlar. Bununla beraber çekirdek malzeme hafiftir ve normalde düşük bir esneklik modülüne sahiptir. Çekirdek malzemeler tipik olarak üç kategoriye ayrılır: sert polimerik köpükler (yani fenolikler, epoksi, poliüretanlar), ahşap (yani balsa ağacı) ve petekler. Yapısal olarak, çekirdek levhalara sürekli destek sağlar. Enine kayma gerilmelerine dayanacak kadar yeterli kayma direncine sahiptir ve panelin burkulmasına direnmek için

yüksek kayma mukavemetini sağlayacak kadar kalın olmalıdır. Sandviç paneller, binaların çatıları, zeminleri, duvarları ve özellikle havacılık ve hava taşıtlarında (kanatlar, gövde ve kuyruk düzlemi kaplamaları vb.) dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Callister ve Rethwish, 2014).

Yukarıda anlatılan takviye malzemelerine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması şematik olarak Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



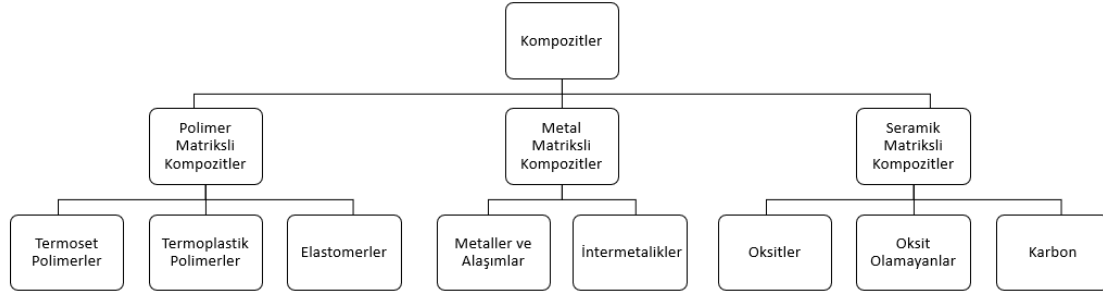
Şekil 2.4. Takviye malzemelerinin şematik gösterimi (Kalpakjian ve Schmid, 2014)

2.2.2. Matris Malzemeleri

Matris malzemelerinin özellikleri, içerlerine karıştırılan takviye elemanları yardımıyla iyileştirilir. Matrisler takviye malzemelerini birleştirerek uygun şekilde tutar, gelen yükü üzerlerine dağıtırlar ve onları çevreleyerek dış ortamdan korurlar.

Şekil 2.5’de de görülebileceği gibi kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Malzeme özellikleri açısından polimerler düşük dayanımlıdır ve düşük elastisite modülü değerlerine sahiptirler. Seramikler yüksek

mukavemetli, rijit ve kırılmandır. Metaller ise yüksek dayanım ve modül değerlerine sahiptirler ve sünekler (Balasubramanian, 2013).



Şekil 2.5. Kompozitlerin matris malzemelerine göre sınıflandırılması (Balasubramanian, 2013)

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak metaller veya metalik alaşımlar kullanılır. Ağırlıklı olarak hafif metaller ve alüminyum, titanyum gibi metaller ve bunların alaşımları kullanılır. Bazı özel uygulamalarda bakır ve kobalt gibi ağır metaller de kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitler, servis sıcaklığının 1200°C'ye kadar olduğu uygulamalar için uygun olabilir (Balasubramanian, 2013). Metal matrisli kompozitlerin avantajları arasında yüksek enine mukavemet ve modül, yüksek kayma mukavemeti ve modülü, yüksek servis sıcaklığı, düşük termal genleşme, çok düşük nem emme, boyutsal kararlılık, yüksek elektriksel ve termal iletkenlikler, daha iyi yorulma ve hasar direnci, birleştirme kolaylığı ve ultraviyole (UV) radyasyon dahil olmak üzere çoğu radyasyona direnç yer alır. Bu faydalardan yararlanan metal matrisli kompozitler çeşitli sektörlerde birçok uygulama alanı bulmuştur. (Buragohain, 2018)

Seramik matrisli kompozitlerde matris malzemeleri olarak birçok oksit ve oksit olmayan seramik malzeme kullanılır. Seramikler, karakteristik olarak çok yüksek sıcaklık direncine ve düşük kırılma tokluğuna sahiptir. Düşük kırılma tokluğu, seramik malzemeleri çekme veya darbe yükleri altında bozulmaya duyarlı hale getirir. Seramik matrisli kompozitlerde bu gibi kırılma özellikleri iyileştirilir. Seramik matrisli kompozitler çok pahalıdır çünkü bu malzemelerin çoğu yüksek sıcaklıkta işlenir. Bazı durumlarda ise kaliteli bir ürün elde etmek için yüksek sıcaklıkta yüksek basınç uygulamak gerekir. Seramik matrisli kompozitler, servis sıcaklıklarının 1200°C'nin

üzerinde olduğu yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanışlıdır. (Balasubramanian, 2013) Seramik matrisli kompozitlerin avantajları arasında düşük yoğunluk, kimyasal inertlik, sertlik ve yüksek mukavemet yer alır. Bu nedenle, bu malzemeler, yüksek servis sıcaklıklarında yüksek mekanik özelliklerin istendiği uygulamalar için uygundur (Buragohain, 2018).

Kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan matris malzemesi polimerlerdir. Polimerler ucuz ve üretimi kolay malzemeler olmalarına karşın mekanik özellikleri çoğu yerde kullanıma elverişli değildir. Dayanım ve modül değerleri, rijitlikleri seramiklere ve metallere kıyasla oldukça düşüktür. Aynı zamanda düşük kullanım sıcaklıkları bir diğer dezavantajlarıdır. Takviye edilmeleri halinde ise spesifik mukavemet ve spesifik modül değerleri oldukça yüksek malzemeler haline gelirler (Balasubramanian, 2013).

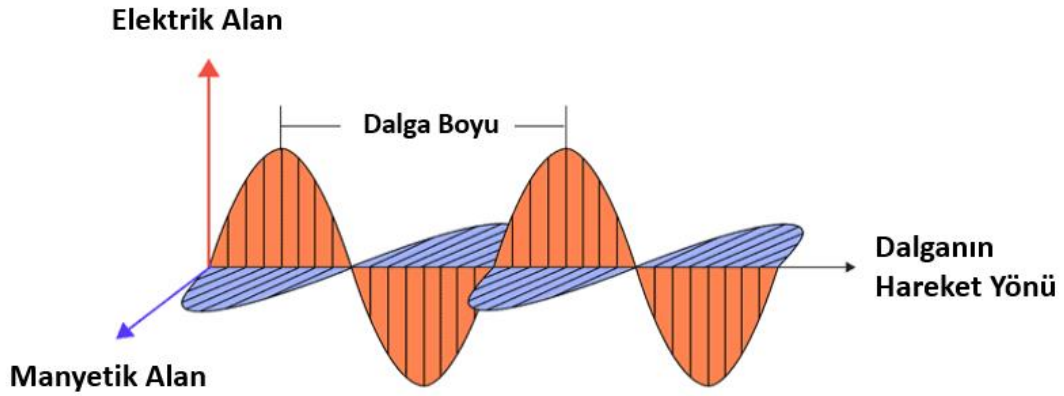
Polimerler termosetler, termoplastikler ve elastomerler olmak üzere üç ana sınıfa ayrılırlar. Polimer malzemelerin mekanik, kimyasal, elektriksel gibi her türlü özellikleri mikro yapıları ile yakından ilişkilidir. Üretim parametreleri, ısıl işlemler ve yapı bileşenleri aynı malzemenin özelliklerini çok farklı şekilde etkileyebilmektedir. Çok farklı malzemelerle takviye edilebilme imkanı çok geniş bir yelpazede malzeme üretimi ve seçimini mümkün kılmaktadır. Polimerler üstün karakteristik özelliklere sahiptirler. Kuvvetli asitlere ve bazlara karşı direnç, yüksek ısıl direnç, oldukça iyi elektriksellik, atomik oksijen radyasyonuna direnç, korozyona direnç, biyo uyumluluk gibi son derece üstün ve tercih edilebilir özellikleri bulunur. En büyük dezavantajları ise düşük çalışma sıcaklığı, radyasyon ve neme duyarlılık, yüksel termal genleşme ve düşük boyutsal stabiliteLERİDİR (Balasubramanian, 2013).

Polimer matrisli kompozitlerin mukavemet ve sertlik gibi mekanik özellikleri doğrudan takviye malzemesinin özelliklerine bağlıdır. Matris ise takviye malzemelerini birbirine bağlar ve yük aktarımına yardımcı olur (Buragohain, 2018).

Polimer matrisli kompozitler, ortam sıcaklığında kullanılan ürünleri yapmak için daha uygundur. Polimer matrisli kompozitler, servis sıcaklığının 350°C'den fazla olduğu uygulamalar için uygun değildir (Balasubramanian, 2013). Fakat uygun takviyeler sonucu polimer kompozitleri bu dezavantaj yaratacak olumsuz özellikleri iyileştirilmiş nitelikli malzemeler haline almaktadır (Korkusuz, 2021).

3. ELEKTROMANYETİK DALGALAR

Elektromanyetik (EM) dalgalar, elektronların ya da fotonların yüksek hızlarla hareket etmeleri sonucunda oluşur. Elektrik ve manyetik alanlar birbirine diktir ve bunların oluşturduğu elektromanyetik dalga, bu alanlara dik bir koordinat düzleminde yayılır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Elektromanyetik dalganın şematik gösterimi (URL-2)

Elektromanyetik dalgalar doğal olaylar veya elektronik cihazlar tarafından üretilebilir ve uzayda bir noktadan diğerine aktarılabilirler. Elektromanyetik dalgalarının iletimini tamamlama olasılığı, elektromanyetik dalgalarının enerjisi ve dalga boyuna bağlıdır. Serbest alanda elektromanyetik dalgalarının herhangi bir noktaya iletimi mümkündür; ancak atmosfer koşulları elektromanyetik dalgalarının bu davranışını engeller (Hamat, 2014).

Elektromanyetik dalgalar, hem zaman hem de uzay açısından harmoniktir. Elektriksel ve manyetik alanlar birbirleriyle bağlantılıdır. Serbest uzayda bu iki alan birbirine diktir ve elektromanyetik dalgalar her iki alana dik bir doğrultuda yayılır (Şekil 3.1). Hareketli yüklerin etkisiyle oluşan elektrik alan, zaman içinde değişerek manyetik alana dönüşür. Benzer şekilde, manyetik alan değişimi de elektrik alanının oluşmasına neden olur. Başka bir deyişle herhangi bir radyasyon ve yansımanın uzak olduğu bir noktada, elektriksel ve manyetik alanlar birbirine ve yayılma yönüne dik olarak kalır. Elektrik ve manyetik

alanlar, aynı zamanda ve aynı yerde en yüksek değerlerine ulaşırlarken harmonik varyasyonları da aynı zamanda ve aynı yerde sıfıra giderler (Knott ve diğ., 2004).

EM dalgalar, elektrik ve manyetik alanların birbirleriyle etkileşiminin sonucudur ve doğal olarak ortaya çıkarlar. Elektromanyetik dalgaların bu özellikleri, modern teknolojinin temelini oluşturur ve bugün hayatımızın pek çok alanında kullanılırlar.

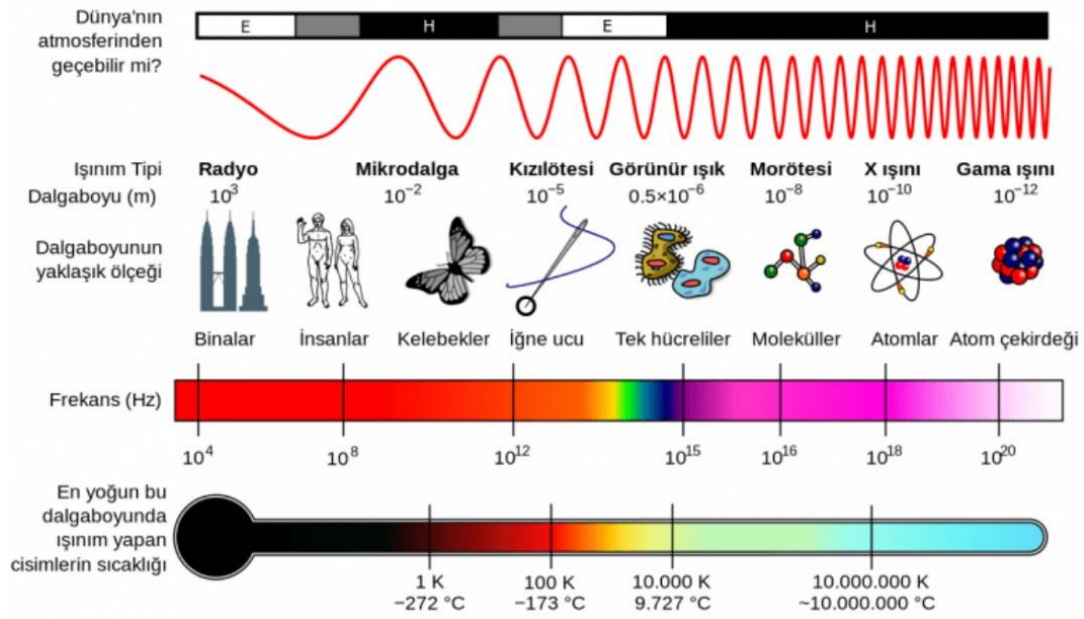
Elektromanyetik spektrum terimi, tüm frekanslar için elektromanyetik radyasyona karşılık gelir; elektromanyetik radyasyon, enerji taşıyan hareketli fotonlar tarafından oluşturulur ve hem dalga hem de parçacık olarak hareket ederler. Elektromanyetik radyasyonun keşfi William Herschel tarafından yapılmış ve Elektromanyetik dalgalarının davranışını yöneten yasalar, Hertz, Faraday, Ampere, Coulomb ve Maxwell gibi araştırmacıların öncü çabaları sayesinde 1900 yılına kadar belirlenmiştir. Her biri bu yasalara kendi katkısını yapmıştır ancak modern elektromanyetik teorisin temeli olan sonuçları bir araya getiren James Clerk Maxwell olmuştur. Onun ünlü dört denklemi, diğer birkaç denklemle birlikte, elektromanyetik teorisin temeli olarak kabul edilir. Maxwell Denklemleri, Gauss yasasının, Faraday yasasının ve Amper yasasının matematiksel ifadeleridir. Maxwell denklemlerine göre, değişen elektrik alanlarının serbest uzayda manyetik alanlarda değişikliklere neden olduğu veya manyetik alanlardaki değişikliklerin elektrik alanlardaki değişimleri oluşturduğu ve bu elektrik ve manyetik alan değişimlerinin birbirine dik olduğu söylenebilir. Bunların yanı sıra, Maxwell'in elektrik ve manyetik alan değişimlerinin hızı üzerine yaptığı analizler, elektromanyetik dalgaların serbest uzayda bilinen ışık hızında seyahat etmesi gerektiği konusunda Maxwell'i düşündürmüştür. Bu düşünce, Heinrich Hertz'in çalışmaları tarafından deneylerle desteklenerek kanıtlanmıştır (Gurer, 2010; Knott ve diğ., 2004; Pozar, 2011; Ruiz-Perez ve diğ., 2022).

Elektromanyetik dalgalar, ışığın ölçülen hızı (c) olan $3,00 \times 10^8$ m/s hızla boş uzayda seyahat eder. Elektromanyetik dalganın frekansı (f) ve dalga boyu (λ), aşağıdaki denklemle ifade edilir;

$$c = \lambda f \quad (3.1)$$

Dolayısıyla, herhangi bir elektromanyetik dalga spektrumu için, frekans ve dalga boyu ters orantılıdır (Gurer, 2010; Pozar, 2011; Ruiz-Perez ve diğ., 2022).

Bu formülün tüm frekanslara uygulanması ile Şekil 3.2'de görülen elektromanyetik spektrum elde edilir.

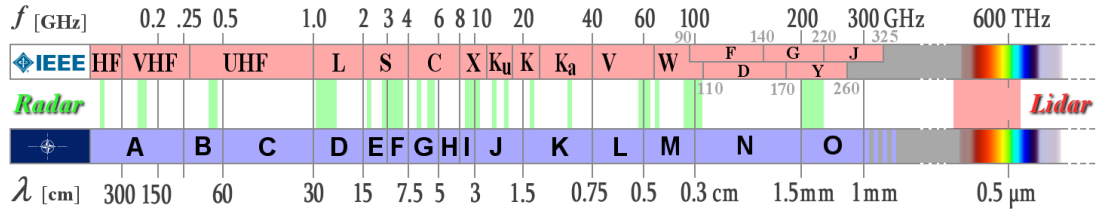


Şekil 3.2. Elektromanyetik spektrumun şematik gösterimi (Gupta ve Eugene, 2011)

Elektromanyetik dalgalar frekanslarına (f) ve dalga boylarına (λ) göre sınıflandırılır. Şekil 3.3'de IEEE ve NATO standartlarında belirtilen elektromanyetik dalga frekans aralıklarına göre tanımlama kodları görülmektedir. Bununla birlikte şekilde radar frekansları yeşil çizgiler şeklinde belirtilmiştir. Özellikle radarların çalıştığı bu frekanslar için radar soğurucu malzemeler geliştirilmektedir. Bu tez kapsamında X-Band (8,2-12,4 GHz) ve Ku-Band (12,4-18 GHz) frekans bandında elektromanyetik soğurma özelliğine sahip katmanlı kompozit malzeme geliştirmeye çalışılmıştır.

Mikrodalga frekansı, 300 MHz ile 300 GHz arasındaki frekans aralığına denk gelir. Bu frekanslar, 1 mm ile 1 m arasındaki dalga boylarına eşittir. Günümüzde, çoğunlukla elektronik cihazlar mikrodalga frekansı kullanarak çalışmaktadır. Günümüz dünyasında, iletişim cihazları, uydular, havacılık uygulamaları, radyolar, kablosuz cihazlar, cep telefonları, askeri uygulamalar, tıbbi uygulamalar vb. mikrodalga frekansında

çalıştırılmaktadır. Tüm bu cihazlar, mikrodalga frekansının farklı frekans bantlarında çalışır. Bu sınıflandırma Şekil 3.3'te görülebilir (Hamat, 2014; Pozar, 2011).



Şekil 3.3. Dalga boyu ve frekansa göre IEEE ve NATO kodları ve radar frekans bantları (URL-3)

Elektromanyetik bir dalganın bir iletken nesneye çarpması durumunda, elektronlar uyarılır ve yüzey akımı oluşur. Yüzey akımları elektromanyetik enerjiyi ilettiğinden, enerji geçici olarak nesnenin yüzeyinde hapsolür. Enerji, nesne tarafından soğurulur veya yeniden yayınlanır (Jalali, 2013).

Elektromanyetik dalgalar, dört denkleme tabi olan Maxwell denklemlerini çözerek analiz edilebilir. Bu denklemler, enerji soğurumundan sorumlu olan malzeme özelliklerini güncelleyerek elektrik ve manyetik alanın zamana göre değişimini sağlamaktadır.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.2)$$

Gauss Yasası, Elektrik Yükleri için Kuvvet Denklemi'ne eşdeğerdir: benzer yükler birbirini iter ve zıt yükler (yani pozitif ve negatif yük) birbirini çeker. Gauss Yasası ayrıca Elektrik Alan çizgilerinin Elektrik Yüklerinden uzaklaştığını söylemektedir. Bu, pozitif yükün bir Elektrik Alanı kaynağı gibi davrandığı ve Elektrik Alan çizgilerinin Elektrik Yükü ile başladığı ve durduğu anlamına gelmektedir (URL-4). Bir yüzeydeki elektrik akı yoğunluğu elektrik yükü oluşturur (Denklem 3.2).

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

Maxwell'in İkinci Denklemi, manyetik tek kutupların var olmadığını söylemektedir. Elektrik Yükleri (Elektrik Tek Kutupları) varken, manyetik eşdeğeri - manyetik yük veya manyetik tek kutupları bulamazsınız. Bu denklem, manyetik alanın nesnelerin etrafını sarma eğiliminde olduğunu belirtir - sapma sıfır olduğundan, alanlar kapalı döngüler

oluşturma eğilimindedir (URL-4). Bir yüzeydeki toplam manyetik akı yoğunluğu sıfırdır (Denklem 3.3).

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (3.4)$$

Amper Yasası, akan bir elektrik akımının teli çevreleyen bir manyetik alana yol açtığını söylemektedir. Buna ek olarak, zamanla değişen bir Elektrik Alanının, E alanını çevreleyen bir manyetik alana yol açtığını da söylemektedir. Bu, Maxwell'in kendisinin ortaya koyduğu Yer Değiştirme Akımı terimidir.

Bu, solenoidal (dolaşan) bir H alanı oluşturmanın iki yolu olduğu anlamına gelir - akan bir elektrik akımı veya değişen bir Elektrik Alanı. Her ikisi de aynı olguyu doğurur (URL-4). Değişken manyetik alan elektrik alanı ve yüzey alanı oluşturur (Denklem 3.4).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

Faraday Yasası, zamanla değişen bir manyetik alanın, dolaşımdaki bir E alanına yol açacağını söylemektedir. Bu, Elektrik alanları oluşturmak için iki yolumuz olduğu anlamına gelir - Elektrik Yüklerinden (veya akan elektrik yükünden, akımdan) veya değişen bir manyetik alandan (URL-4). Değişen elektrik alan manyetik lan oluşturur (Denklem 3.5).

Bu denklemlerde;

$\vec{E}$ elektrik alan şiddeti (V/m),

$\vec{H}$ manyetik alan şiddeti (A/m),

$\vec{D}$ elektrik akı yoğunluğu (C/m²),

$\vec{B}$ manyetik akı yoğunluğu (T veya Wb/m²),

$\vec{J}$ elektrik akım yoğunluğu (A/m²),

ρ elektrik yük yoğunluğudur (C/m³)

Tüm elektromanyetik problemlerin çözümleri, aşağıdaki malzeme özellikleri ile ilgili denklemleri içerir:

$$\vec{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E} \quad (3.6)$$

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (3.7)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.8)$$

Burada:

ε_0 = Serbest uzay dielektrik sabiti (permittivity)

μ_0 = Serbest uzay manyetik geçirgenlik sabiti (permeability)

ε_r = Bağlı dielektrik sabiti

μ_r = Bağlı manyetik geçirgenlik sabiti

σ = malzemenin iletkenlik değeridir (S/m).

ε_0 ve μ_0 değerleri aşağıdaki şekilde ifade edilir (Tretyakov ve Erden, 2021);

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c_0^2 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7}} \text{ F/m} \quad (3.9)$$

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad (3.10)$$

c_0 , sayısal değeri $2,99792458 \times 10^8$ olan boyuttan bağımsız bir sabittir ve ışık hızının kaç "metre/saniye" (m/s) olduğunu belirtir.

Buna bağlı olarak;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \text{ (m/s)} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11) ise ışığın boşluktaki hızını belirtir (Tretyakov ve Erden, 2021).

Denklem (3.6) ile Denklem (3.8) arasındaki ilişki, bir elektromanyetik malzemenin elektromanyetik alanlara verdiği yanıtların temel olarak ε , μ ve σ 'nin üç anayasal parametre tarafından belirlendiğini göstermektedir. Bu parametreler aynı zamanda verilen bir frekansta elektromanyetik alanın malzemeye ne kadar derinlemesine nüfuz edebileceğini de belirler (L. F. Chen ve diğ., 2017; Gupta ve Eugene, 2011; Jalali, 2013; Pozar, 2011).

3.1. Elektromanyetik Kaybın Mekanizmaları

Elektromanyetik dalga soğurmanın temel prensibi, soğurucu malzemelerde EM dalgayı kısıtlamaktır. EM dalga enerjisi, enerji dönüşümü ile soğurucu malzemeler tarafından soğurulabilir. Enerjinin korunumu ilkelerine göre, yansımayan ve iletilmeyen elektromanyetik enerjinin diğer enerji formlarına dönüştürülmesi gerekir. Elektromanyetik enerji, elektrik ve manyetik enerjinin bileşkesi olduğu için, elektromanyetik dalga soğurucu malzemelerde elektromanyetik enerji kolaylıkla elektrik ve manyetik enerji formlarına dönüştürülebilir. Bu, soğurucu malzemelerin elektriksel ve manyetik özelliklerinin uygun frekans aralığına göre ayarlanmasıyla mümkündür. Öyleyse; soğurucu özellikleri, dielektrik kaybı ve manyetik kaybın kullanılmasıyla elde edilebilir (Hamat, 2014).

Dielektrik sabiti (permittivity, ϵ) elektrik alan ve bir materyal arasındaki etkileşim olarak tanımlanır. Dielektrik sabitinin gerçek kısmı (ϵ'), harici elektrik alan altındaki bir materyalin ne kadar enerji depoladığını belirtir. Dielektrik sabitinin sanal kısmı (ϵ'') kayıp faktörü olarak bilinir. Bağlı dielektrik sabiti (ϵ_r) gerçek ve sanal dielektrik sabitinden oluşur. Dielektrik mekanizmasına göre permittivity olarak adlandırılan ϵ şu şekilde tanımlanır;

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (\epsilon' \text{ reel kısım, } \epsilon'' \text{ sanal kısım}) \quad (3.12)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m, } \epsilon_r \text{ bağıl dielektrik katsayısı}) \quad (3.13)$$

Manyetik geçirgenlik (permeabilite, μ) bir materyal ile manyetik alan arasındaki etkileşim olarak tanımlanır. Bağlı manyetik geçirgenlik (μ_r), gerçek manyetik geçirgenlik (μ') ve sanal manyetik geçirgenlik kısımlarından oluşur. Gerçek kısım enerji depolamayı, sanal kısım ise enerji kaybını tanımlar. Manyetik geçirgenlik penetrasyon derinliğini kontrol eder: permeability ne kadar yüksek olursa, malzemeye o kadar az elektromanyetik dalga nüfuz eder. Manyetik sisteme göre manyetik geçirgenlik;

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (\mu' \text{ reel kısım, } \mu'' \text{ sanal kısım}) \quad (3.14)$$

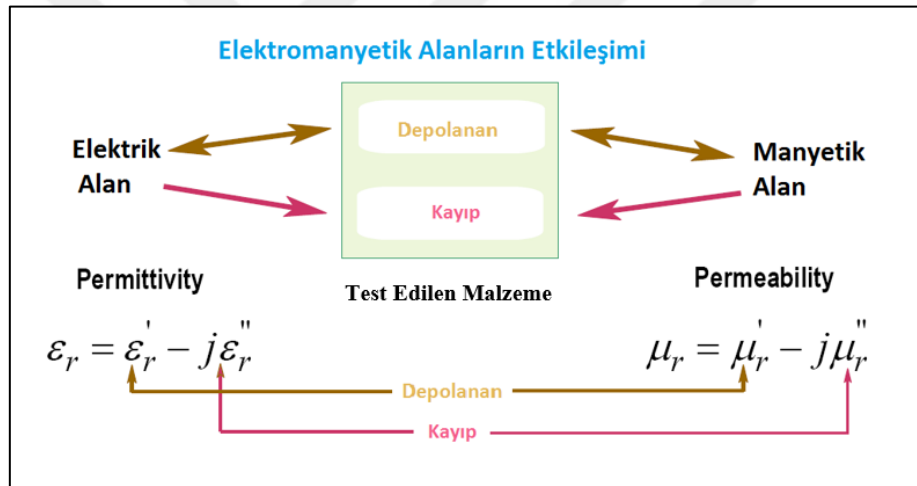
$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (\mu_0 \approx 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m, } \mu_r \text{ bağıl manyetik geçirgenlik}) \quad (3.15)$$

Kayıp tanjant (lost tangent) ise, kompleks kısmın reel kısma oranıdır ve malzemenin soğurulan enerjiyi ısıya dönüştürme etkinliğini temsil eder. Aynı zamanda yaygın olarak dielektrik tepkiyi tanımlamak için mühendislik hesaplamalarında kullanılır ve malzemenin göreceli kaybını veren bir tanımdır (Gupta ve Eugene, 2011; Knott ve diğ., 2004; Neelakanta, 1995; Zhang ve diğ., 2022).

$$(\tan\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon') \quad (3.16)$$

$$(\tan\delta_\mu = \mu''/\mu') \quad (3.17)$$

Yukardaki bilgileri özetlemek için Dielektrik ve manyetik geçirgenlik ifadeleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Elektromanyetik alanların etkileşimi (Jialu, 2011)

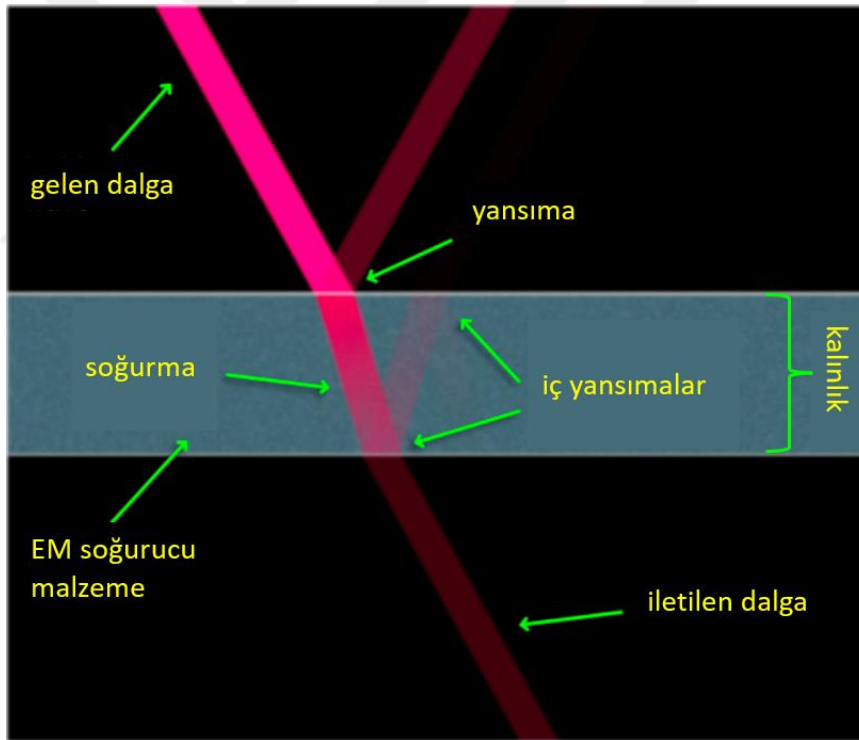
3.2. Elektromanyetik Dalga – Malzeme Etkileşimi

Elektrik kaynaklarından yayılan elektromanyetik dalgalar atmosferik havada farklı ortamlarda yayılır. Ancak, dalga gücü uzaklaştıkça azalmaktadır. Bunun nedeni, dalga ve ortam arasındaki etkileşimlerdir. Elektromanyetik dalga tarafından taşınan enerji, ortamdaki bileşenlere aktarılır ve bu da elektriksel ve manyetik özellikleri etkiler. Bu enerji kaybı, ortamdaki malzeme özelliklerine göre değişir. Elektromanyetik dalgaların fiziksel engellerle etkileşimi, malzeme ile çevre arasındaki elektriksel ve manyetik

farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Hedeflenen yapılar, elektromanyetik dalgaları soğurur, yansıtır veya iletir. Enerji korunumu ilkesine göre, yansıma, iletim ve soğurma oranlarının toplamı, dalga gücüne eşit olmalıdır. Diğer bir deyişle yansıyan gücün (PR), iletilen gücün (PT) ve soğurulan gücün (PA) toplamı, gelen dalga gücüne (P0) eşit olmalıdır (Elmahaishi ve diğ., 2022; Gurer, 2010; Jalali, 2013).

$$P_0 = P_T + P_R + P_A \quad (3.18)$$

Yansıma, soğurma ve çoklu yansıma elektromanyetik kalkanlamanın üç mekanizmasıdır. Bu mekanizmalar arasındaki ilişki Şekil 3.5’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi gelen dalgalar birincil ve ikincil olarak geri yansır. Birincil yansımalar malzeme yüzeyinde, ikincil yansımalar (iç yansımalar) malzeme kalınlığının bittiği arka çeperde oluşan yansımalar (Elmahaishi ve diğ., 2022; Jalali, 2013).



Şekil 3.5. Elektromanyetik dalga soğurma mekanizmasının şematik gösterimi (R. Kumar ve diğ., 2021)

Malzeme açısından bakıldığında, bir malzeme mikrodalgalara maruz kaldığında, eğer iletken ise (metal, grafit vb.) gelen dalga numune yüzeyinden yansıyabilir, eğer iyi

dielektrik özelliklere sahip yalıtkan bir malzeme ise (cam, porselen, seramik vb.) herhangi bir soğrulma gerçekleşmeden diğer çeperinden çıkabilir veya dielektrik kayıp oluşturacak mekanizmaya sahip bir malzeme ise (partikül takviyeli kompozitler vb.) malzeme kalınlığı boyunca gelen dalga soğurulabilir (Bogdal ve Prociak, 2007).

Etkili EM dalga soğurucu malzeme tasarlanırken, gelen enerjinin soğurulan bileşeni maksimize edilirken yansıyan ve iletilen bileşenler en aza indirilmelidir. Bu nedenle, incelenmekte olan malzemelerin kayıplı karakteri, çeşitli olası kayıp mekanizmalarına dayalı olarak geliştirilmelidir (Gurer, 2010).

Mikrodalga soğurucu malzemeler dielektrik ve manyetik soğurucu olmak üzere iki geniş kategoride sınıflandırılabilir. Dielektrik soğurucular, karbon, grafit, iletken polimerler veya metal parçacıklar/toz gibi kayıplı dolgu maddelerinin polimerik bir matrise yüklenmesiyle elde edilebilecek omik enerji kaybına bağlıdır. Manyetik emiciler, ferritler gibi partiküller polimerik bir matrise doldurulduğunda elde edilen manyetik histerezis etkisine bağlıdır (Lakshmi, 2007).

3.3. Elektromanyetik Dalga Soğurucu Malzemeler

RSM'ler ilk olarak 20. yüzyılın başlarında askeri amaçla önerilmiş, ikinci dünya savaşı döneminde ticari kullanım için uygulanmış ve bu yüzyılın orta-geç sayfalarında hızla evrilmiştir. Malzemeler, kendilerine çarpan elektromanyetik dalgalarla yansıma, soğurma, iletme, ayrıca ikincil yansıma ve optik kurallara dayalı olarak iletme şeklinde etkileşime girmektedirler. RSM'ler, dalga yansımasını ve iletimini azaltmak için elektromanyetik enerjiyi ısıya veya diğer enerji formlarına dönüştürerek EM dalgalarını zayıflatılabilir ve soğurabilir. Günümüzde RSM'ler, insan sağlığını korumak, elektromanyetik paraziti önlemek ve radar algılamasını önlemek için anti-radyasyon cihazları, binalar, giysiler ve savaş uçakları, savaş gemileri vb. araçların üzerindeki gizli kaplamalar dahil olmak üzere insan yaşamının her yerinde uygulanmaktadır. RSM'lere yönelik artan gereksinimi karşılamak için çeşitli gelişmiş malzemeler araştırılmaktadır. Elbette, RSM'lerin geliştirilmesi, nanoteknoloji, malzeme kimyası, polimer bilimi, katı hal fiziği, optik ve elektromanyetizma vb. dahil olmak üzere diğer bilim ve teknoloji alanlarının kapsamlı desteği olmadan gerçekleşemez (Pang ve diğ., 2021).

İdeal RSM'nin ince, hafif, dayanıklı, kolay uygulanabilen, ucuz ve geniş bant frekans kapsamına sahip olması istenir. Bunlara ek olarak, mekanik olarak sağlam ve standart yapısal malzemelere göre boyut, ağırlık veya maliyet dezavantajı olmayan bir yapısal RSM'e istenir. Beklenebileceği gibi, bu ideal RSM türlerinin hiçbirisi henüz formüle edilmemiştir. Genel olarak, radar soğurucu malzemeler, soğurma yoluyla radara yansıyan enerjiyi azaltır. Burada radar dalga enerjisi, malzemenin dielektrik veya manyetik özelliklerinin katkısını içeren bir veya daha fazla kayıp mekanizması yoluyla emilir. Tüm kayıp mekanizmalarının malzemenin elektriksel geçirgenliği (ϵ) ve manyetik geçirgenliği (μ) üzerindeki etkilerini kabul etmek yaygındır (D. Hu, 2010; Micheli ve diğ., 2011).

İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana radar sistemlerinin kullanılmaya başlanmasıyla gözetleme senaryosu tamamen değişmiştir. 1930'dan beri araçların ve/veya yapıların radarlar tarafından tespit edilememesini sağlamak amacıyla malzeme geliştirmeye yönelik araştırmalar bilim camiasının büyük ilgisini çekmektedir. Yeni malzemelerin temel görevi, yansıyan dalgayı azaltmak veya dalgayı kaynaktan farklı yönde yansıtmaktır. Bu nedenle, RSM'ler yansıyan dalgaları azaltmak veya ortadan kaldırmak için aşağıdaki iki mekanizmayı kullanır:

1. Soğurma: Malzemeler elektromanyetik dalga yoğunluğunu emer ve azaltır, onu başka bir enerji türüne, özellikle de ısıya dönüştürür. Bu azalma, omik kayıp, dielektrik kayıp veya manyetik kayıpla ilişkilendirilir.
2. Çoklu yansımalar: Malzemeye giren dalgaların malzemenin arka yüzü tarafından yansıtılması ve ardından malzeme içinde birden çok iç yansıma oluşturmalarını sağlar (Ruiz-Perez ve diğ., 2022).

Kusursuz iletkenliği nedeniyle ilk soğurucuların imalatında kullanılan temel malzeme karbon günümüzde de önemini korumaktadır. Aslında, şu anda pazarlanmakta olan birçok ticari karbon bazlı malzeme, 20 yılı aşkın bir süredir önemli ölçüde değişmeyen tasarımlara sahiptir. Çoğu tasarım mikrodalga yankısız odaların inşası da dahil olmak üzere deneysel çalışmalar için tasarlanmıştır, ancak bu malzemeler operasyonel ortamlarda genellikle çok hantal ve kırılğan olduklarından bu operasyonel platformlarda kolayca uygulanamazlar (Knott ve diğ., 2004).

Bunun yerine, operasyonel sistemler için temel bileşenleri demir olan manyetik soğurucular daha yaygın olarak kullanılır. Karbonil demir ve demir oksitleri (ferritler) yaygın olarak kullanılmaktadır. Manyetik malzemeler, tipik olarak dielektrik soğurucuların kalınlığının bir kısmı oldukları için kompaktlık avantajı sunar. Bununla birlikte, manyetik soğurucular, demir içerikleri nedeniyle ağırdır ve dielektrik muadillerine göre doğası gereği daha dar bantlıdır. Temel kayıplı malzemeler genellikle, kompozit yapının belirli bir frekans aralığına uygun elektromanyetik özelliklere sahip olacağı şekilde bir matris veya bağlayıcı içine gömülür (Knott ve diğ., 2004).

İlgilenilen frekans aralığında düşük yansımali radar soğuran malzeme iki temel koşulu sağlamalıdır. Bunlardan ilki, elektromanyetik dalganın maksimum oranda soğurucu malzeme içerisine girebilmesi için yüzeyinden görülen empedansının havanın 377 Ohm'luk empedans değerine yakın olması; bir diğer özelliği ise malzeme içerisine giren elektromanyetik dalganın hepsi veya çok büyük bir kısmının RSM içerisinde sönümlenebilmesidir. Bu iki koşulun da olabildiğince ince kalınlıkta sağlanması tercih edilir. Geniş bir frekans bandında tasarlanan RSM'lar çok katmanlı tabakalardan oluşarak elektromanyetik dalgaların tabakalara girip farklı tabakalardan yansıyan farklı fazdaki dalgaların çıkışta birbirini yok etmesi prensibine dayanmaktadır (Ünal ve diğ., 2018).

Elektromanyetik koruyucu sistemlerdeki ilerleme, metreden milimetreye uzanan geniş alandaki elektromanyetik dalgaları soğuran malzemelerin geliştirilmesine bağlıdır. Bu tür malzemelerin yüksek soğurumları aynı frekans aralığındaki düşük yansıma ile birleştirilmelidir. Bunun yanı sıra EM dalga soğuran sistemlerde, belli frekanslarda yüksek soğurum başarımının yanı sıra, belli frekans aralıklarında belirli bir soğurumun da yapılması önemlidir. Örneğin 2-12 GHz frekans aralığında -10 dB ve daha altı soğurum başarısı yapabilmesi genelde tek bir frekansta -50 dB gibi çok düşük bir soğurum yapmasından daha çok istenen bir durumdur (Ünal ve diğ., 2018).

Elektromanyetik dalga soğurucuların genel gereksinimleri ve özellikleri aşağıdaki hususlara göre belirlenir:

- Çalışma frekansı - soğurucunun rezonans emilimi (tekli veya çoklu, ayrı frekanslarda) veya geniş bant uygulamaları için tasarlanıp tasarlanmadığı,

- Monolitik veya kompozit ortam - soğurucunun tek bir (monolitik) malzemeden mi yoksa bir dizi ayrı ortamdan mı oluştuğu,
- Soğurma kapsamı - soğuruculardan geçen iletim kaybı şekli,
- Güç işleme yetenekleri - dağılım derecelerine göre yönetilir (termal dayanıklılık)
- Geometrik hususlar - belirli bir soğurma seviyesine ulaşmak için kalınlık ve yüzey alanı/hacim oranı,
- Yaşlanma ile mekanik kararlılık - elektromanyetik radyasyona sürekli maruz kalma nedeniyle fiziksel ve/veya kimyasal dejenerasyon durumu,
- Üretim kolaylığı - gerekli şekil ve boyutlarda kalıplama veya biçimlendirmenin fizibilite yönleri,
- Havadan/uzaydan taşınan uygulamalarda hafiflik gibi ağırlık hususları (Neelakanta, 1995).

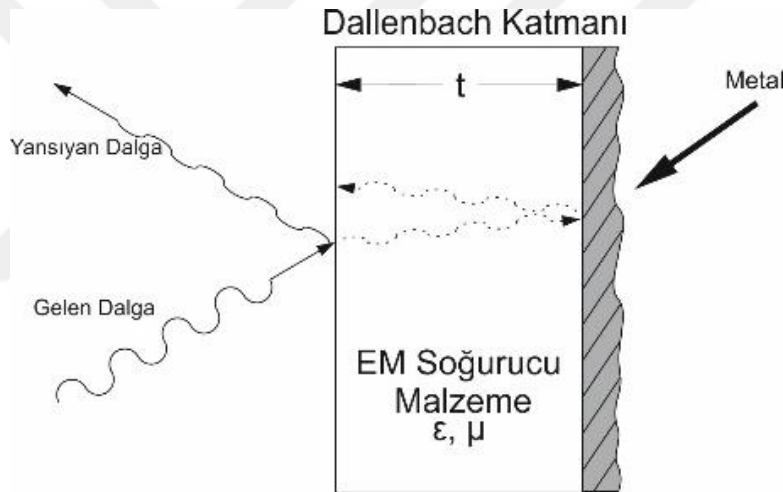
3.4. Elektromanyetik Dalga Soğurucu Yapılar

Geleneksel elektromanyetik kalkanlama yöntemlerinden kaynaklanan performans kaybını en aza indirmek için yeni elektromanyetik dalgayı soğuran yapısal malzemelerin geliştirilmesi esastır. Elektromanyetik dalga soğurma uygulamalarında, elektrik ve manyetik alanların eşzamanlı soğurmasının daha yüksek zayıflama sağlaması ve dolayısıyla elektromanyetik soğurma nedeniyle daha yüksek güç kaybı sağlaması beklenir. Alternatif olarak, elektromanyetik enerji, yansıtıcı yüzeylerden belirli frekansa sahip yansıyan elektromanyetik dalgalarının yıkıcı girişimi ile dağıtılabilir. Salisbury ekranları gibi düzenlemeler geçmişte kullanılmıştır. Ancak, çok frekanslı cihazların geliştirilmesi, elektromanyetik dalga soğuran malzemeler için geniş bir frekans aralığını kapsama zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Böylece geniş bant etkinliğini sağlamak için Jaumann soğurucuları ve Dallenbach katmanları gibi çok katmanlı yöntemler geliştirilmiştir (Hamat, 2014).

Rezonant soğurucularda, malzeme incedir ve empedans, gelen ve soğuran ortam arasında eşleşmez ve böylece elektromanyetik girişim enerjisinin tamamı soğurulmaz. Sonuç olarak, elektromanyetik girişim dalgasının hem yansıması hem de iletimi ilk arayüzde gerçekleşir (Jalali, 2013).

Dallenbach katmanı en basit radar soğurucu yapıdır ve metal bir plaka ile desteklenen homojen, kayıplı bir tabakadan oluşur (Şekil 3.6). Tek bir katman soğurucu malzemeden oluşan bu yapı, genelde boya tipi RSM’lerin modellenmesinde kullanılır. Bir malzemenin yüzeyindeki yansıma, iki ortam arasındaki arayüzde dalga tarafından görülen empedans değişikliğinden kaynaklanır (D. Hu, 2010; Knott ve diğ., 2004; Ünal ve diğ., 2018).

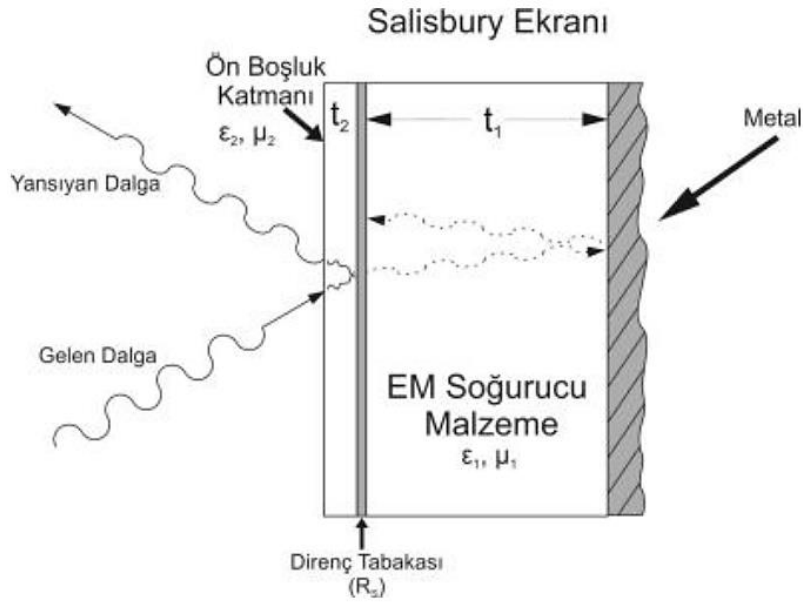
Minimum yansıtmayı elde etmek için (belirli bir dalga boyu için), Z_M katmanının empedansı Z_0 karakteristik empedansına eşit olmalıdır. Bu yöntemle tek katmanla geniş banda ulaşmak mümkün değildir. Bu soğurucu, silikon kauçuk, silisyum karbür, titanyum oksit ve karbon karası gibi ferrit malzemelerle üretilir, bu nedenle ağırdır ve havacılık uygulamaları için uygun değildir. Ayrıca Dallenbach, uçaklar için gereken geniş bantlı elektromanyetik korumayı sağlayamamaktadır (Jalali, 2013; Poh, 2010).



Şekil 3.6. Dallenbach katmanı kesitinin gösterimi (Ünal ve diğ., 2018)

Dallenbach katmanları homojen tek bir katmandan oluşurken Salisbury ekranları bu homojen katmana ek olarak direç tabakası içermektedir ve bir metal plakanın önündeki düşük dielektrik sabitli bir ayırıcı üzerine dirençli bir levha yerleştirilerek oluşturulan bir rezonant soğuruculardır (Şekil 3.7). Böylece yapının tabanından geri seken elektromanyetik dalgalar tekrar yapının içine geri sektirilerek yapı içine hapsedilmeleri sağlanır. Bunun sonucunda bant genişliği Dallenbach katmanlarına göre artmış olur (D. Hu, 2010; Knott ve diğ., 2004; Ünal ve diğ., 2018; Vinoy ve Jha, 1996).

Katmanın kırılma indisinin 1'den çok daha büyük olduğu durum için, Dallenbach katmanı açısıl performansa, Salisbury ekranından çok daha iyi bir yaklaşım sağlar (Knott ve diğ., 2004).

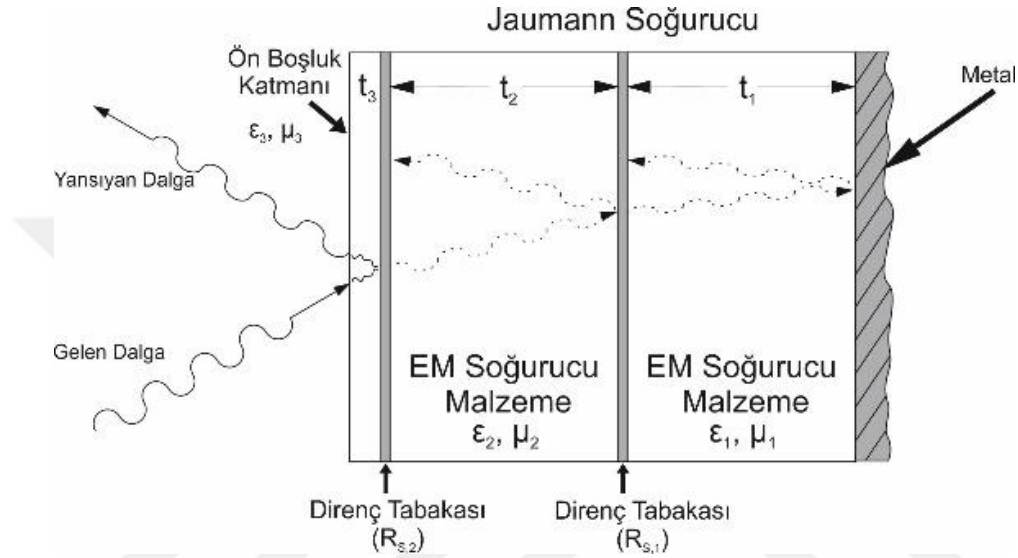


Şekil 3.7. Sallisbury ekranı kesitinin gösterimi (Ünal ve diğ., 2018)

Tek bir ince katmanlı soğurucu kullanarak genellikle radar soğuruculardan istenen geniş bant genişliklerini elde etmek zordur. Bu nedenle, soğurucuların bant genişliğini çoklu katmanların kullanımı yoluyla genişletmek için birçok çalışma yapılmıştır. Kullanılan yaklaşım, yansımaları en aza indirmek için efektif empedansı, malzemeye olan mesafeyle yavaşça değiştirir. İki önemli çok katmanlı soğurucu türü üzerinde durulur, Jaumann soğurucuları ve kademeli dielektrik soğurucuları (D. Hu, 2010; Knott ve diğ., 2004; Vinoy ve Jha, 1996).

Salisbury ekranlarının çok katmanlı hali olan Jaumann soğurucular da Salisbury ekranındaki direnç tabakası sayısı arttırılarak bant genişliği azami seviyeye çıkartılır. Jaumann katmanları, aslında Salisbury ekranlarının artırılmış bant genişliğine ve metal desteğin üstünde aralayıcılarla ayrılmış çok sayıda ince, dirençli katmana sahip değiştirilmiş versiyonlarıdır (Şekil 3.8). Maksimum performans sağlamak için, levhaların öz direnci ön levhadan arkaya yüksek bir değerden düşük bir değere kadar değişmelidir. Bant genişliği, kullanılan katman sayısına bağlıdır. Daha fazla tabakaya sahip Jaumann

soğurucuları için daha iyi performans sağlayacaktır. Daha geniş bant genişliğinin dezavantajı ise kalınlıktır. Sonuç olarak, burada soğurucu daha da kalındır ayrıca ağırlık ve kapladığı alan gibi ortak bir soruna sahiptir. Son derece önemli bir nokta da, pratikte yüksek düzeyde soğurma elde edilmek isteniyorsa homojen ve izotropik kayıplı katmanlar gerekmektedir (D. Hu, 2010; Jalali, 2013; Knott ve diğ., 2004; Ünal ve diğ., 2018; Vinoy ve Jha, 1996).



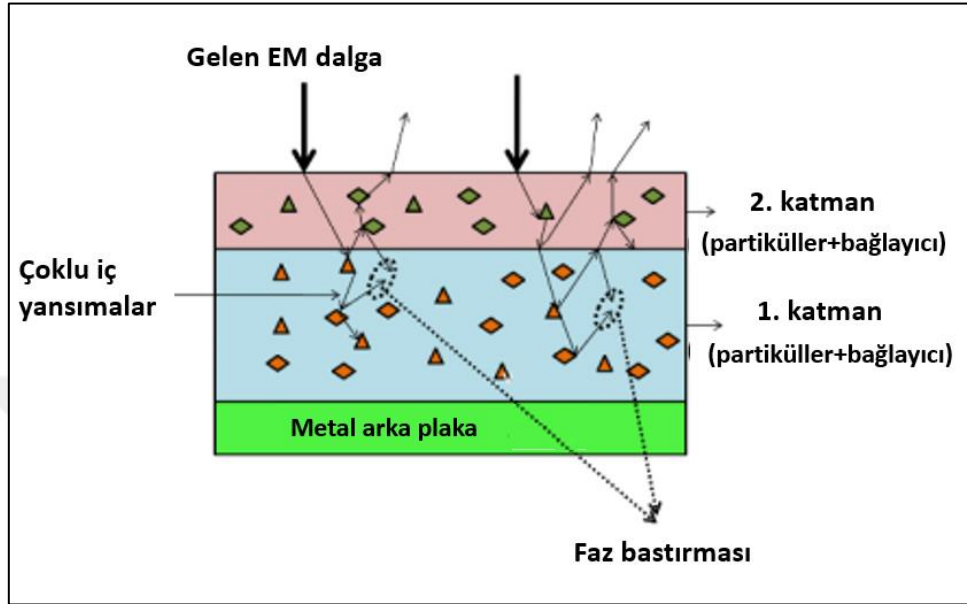
Şekil 3.8. Jaumann soğurucusu kesitinin gösterimi (Ünal ve diğ., 2018)

Yansımayı azaltmak için levha direnç değerlerinin inceltildiği Jaumann soğurucularda olduğu gibi, boş alan ile mükemmel bir iletken arasındaki empedansı eşleştirmeye yardımcı olmak için kademeli bir dielektrik kullanılabilir. Böyle bir soğurucunun tasarımı için en uygun yöntem, geliş açısı ve kalınlık kısıtlamalarına tabi olarak belirli bir frekans aralığında yansıma katsayısını (Γ) sınırlamak için malzemeye olan mesafenin bir fonksiyonu olarak gerekli ϵ ve μ 'yü analitik olarak belirlemek olacaktır (Knott ve diğ., 2004). Genellikle, pratiğe yönelik kademeli dielektrik RSM'lar, katmana özgü değişen özelliklere sahip farklı katmanlardan oluşurlar (Knott ve diğ., 2004).

3.5. Çok Katmanlı Elektromanyetik Soğurma

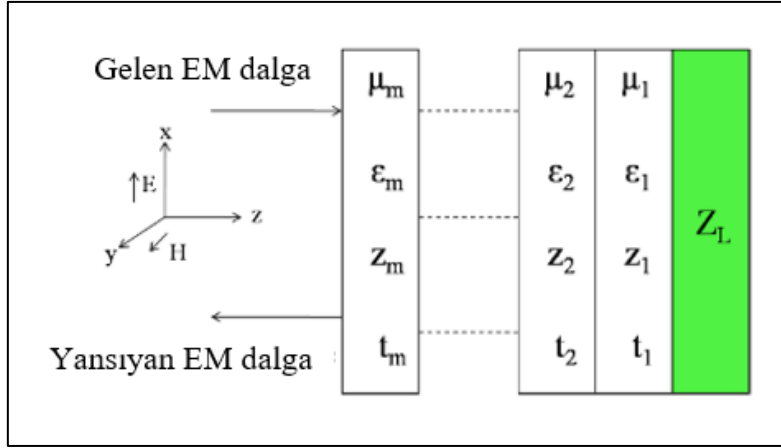
Çok katmanlı yaklaşım, mikrodalga soğurucuların geniş bant özelliklerini geliştirmede çok önemlidir. Aynı zamanda soğurucuların genel kaplama kalınlığını azaltmak için de önemli bir araçtır. Çok katmanlı teknik, sınır ve arayüz sayısını artırır. Bu sınırlar ve ara

yüzler, çoklu dahili yansımalar için alan görevi görerek faz bastırması olasılığını artırır ve dolayısıyla mikrodalga soğurma özelliklerini geliştirir. Çok katmanlı olgu, Şekil 3.9'da açıkça tasvir edilmiştir.



Şekil 3.9. Elektromanyetik dalganın çift katmanlı bir mikrodalga soğurucu içerisindeki davranışı (A. Kumar ve diğ., 2017)

Şekil 3.10'da farklı bağıl elektriksel geçirgenlik ve bağıl manyetik geçirgenlik değerlerine sahip, farklı kaplama kalınlıklarında katmanları bulunan çok katmanlı mikrodalga soğurucu ile kaplanmış sonsuz iletken bir plaka Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Bir elektromanyetik dalganın çok katmanlı soğurucuya dik olarak geldiği ve malzemede yayıldığı kabul edilsin. Kaplama parametreleri t_i , ϵ_i , μ_i ve z_i , çok katmanlı soğurucu için sırasıyla i 'inci katmanın kalınlığını, bağıl elektriksel geçirgenliğini, bağıl manyetik geçirgenliğini ve empedansını temsil eder. Birinci katman, mükemmel iletken metal bir plaka ile temas halindedir ve m 'inci katman boş alan ile sonlandırılır. ϵ_0 , μ_0 ve z_0 sırasıyla boş alanın elektriksel geçirgenliği, manyetik geçirgenliği ve empedansdır (Şekil 3.10) (A. Kumar ve diğ., 2017).



Şekil 3.10. Çok katmanlı mikrodalga soğurucu malzemenin şematik gösterimi (A. Kumar ve diğ., 2017)

Çok katmanlı malzemeler için yansıma kaybı (Γ), iletim hattı teorisi kullanılarak hesaplanır ve matematiksel olarak aşağıdaki şekilde formüle edilir:

$$\Gamma = \frac{Z_{in,m} - Z_0}{Z_{in,m} + Z_0} \quad (3.19)$$

Katman 1'in mükemmel iletkenle desteklendiği ve katman 2'nin boş alanla temas halinde olduğu iki katmanlı soğurucu için yansıma katsayısı şu şekilde yazılır:

$$\Gamma = \frac{Z_{in,2} - Z_0}{Z_{in,2} + Z_0} = \frac{\frac{\sqrt{\mu_1/\epsilon_1} \tan h(\gamma_1 t_1) + \sqrt{\mu_2/\epsilon_2} \tan h(\gamma_2 t_2)}{1 + \sqrt{\mu_1 \epsilon_2 / \mu_2 \epsilon_1} \tan h(\gamma_1 t_1) \tan h(\gamma_2 t_2)} - 1}{\frac{\sqrt{\mu_1/\epsilon_1} \tan h(\gamma_1 t_1) + \sqrt{\mu_2/\epsilon_2} \tan h(\gamma_2 t_2)}{1 + \sqrt{\mu_1 \epsilon_2 / \mu_2 \epsilon_1} \tan h(\gamma_1 t_1) \tan h(\gamma_2 t_2)} + 1} \quad (3.20)$$

$$\gamma = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\mu \epsilon} \quad (3.21)$$

Burada, hava/soğurucu arayüzünde iki katmanlı soğurucu için $Z_{in,2}$ giriş empedansı ve iki katmanlı soğurucu için ikinci katmanın Z_2 empedansı;

$$Z_{in,2} = (Z_{in,1} + Z_2 \tan h(\gamma_2 t_2)) / ((Z_{in,1}/Z_2) \tan h(\gamma_2 t_2) + 1) \quad (3.22)$$

$$Z_2 = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \quad (3.23)$$

Çok katmanlı soğurucuya dik gelen EM dalganın dB cinsinden yansıma kaybı (RL) şu şekilde ifade edilir (Elmahaishi ve diğ., 2022; A. Kumar ve diğ., 2017; Vinoy ve Jha, 1996; Wang ve diğ. 2017);

$$RL (dB) = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (3.24)$$

3.6. Ölçüm Teknikleri

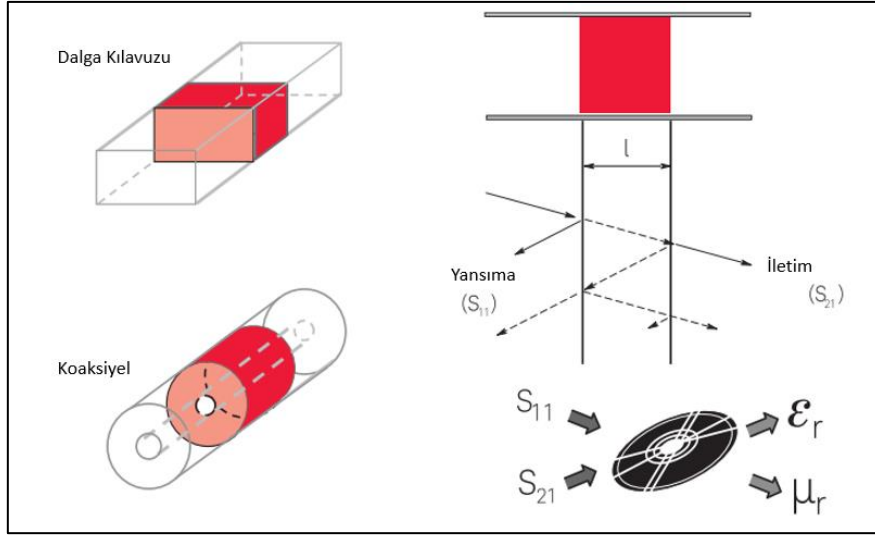
Çok çeşitli endüstriler, tasarım döngülerini kısaltmak, süreç izlemeyi ve kalite güvencesini iyileştirmek için çalıştıkları malzemeleri daha iyi anlamaya ihtiyaç duyar. Her malzeme, dielektrik özelliklerine bağlı olan benzersiz elektriksel özelliklere sahiptir. Bu özelliklerin doğru ölçümleri bilim adamlarına ve mühendislere daha sağlam tasarımlar için malzemeyi istenilen uygulamaya uygun şekilde tasarımlara dahil etmek veya gelişmiş kalite kontrolü için üretim sürecini izlemek amacıyla değerli bilgiler sağlayabilir. Bir dielektrik malzeme ölçümü, birçok elektronik uygulama için kritik tasarım parametresi bilgisi sağlayabilir (Keysight Technologies, 2017).

Malzemelerin elektromanyetik dalga ile etkileşimini karakterize eden bağıl dielektrik (ϵ) ve manyetik (μ) geçirgenlik gibi fiziksel parametreleri aşağıdaki metotlar ile belirlenebilir.

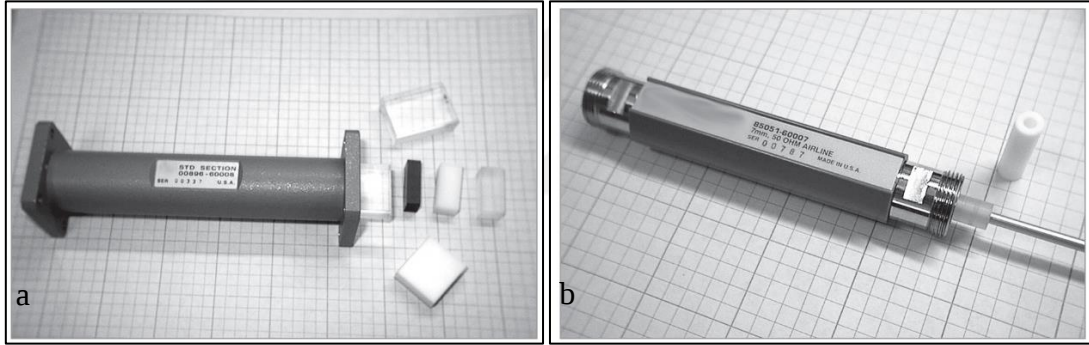
3.6.1. İletim Hattı Tekniği

İletim hattı yöntemleri, malzemenin kapalı bir iletim hattının bir kısmının içine yerleştirilmesini içerir. Hat genellikle dikdörtgen dalga kılavuzu (waveguide) veya koaksiyel hava yolunun (coaxial air line) bir bölümüdür (Şekil 3.11). ϵ_r ve μ_r , yansıyan sinyalin (S11) ve iletilen sinyalin (S21) ölçümünden hesaplanır (Keysight Technologies, 2017; Kotsuka, 2019; Lakshmi, 2007).

Yöntemin katı malzemelerde iyi bir çözüm olması, geniş frekans aralığı (0,1 - 110 GHz) ve manyetik malzemelerin ölçülebilmesi gibi avantajlarının yanı sıra, numunenin homojen olması, fiktür kesitini dolduracak hassas malzeme şekilleri gereği ve düşük frekanslar için büyük, yüksek frekanslar için küçük numunelere ihtiyaç olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Keysight Technologies, 2017). Dalga kılavuzu ve koaksiyel havayolunun numuneleri Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3.11. İletim hattı tekniği: dalga kılavuzu ve koaksiyel havayolunun gösterimi (Keysight Technologies, 2017)

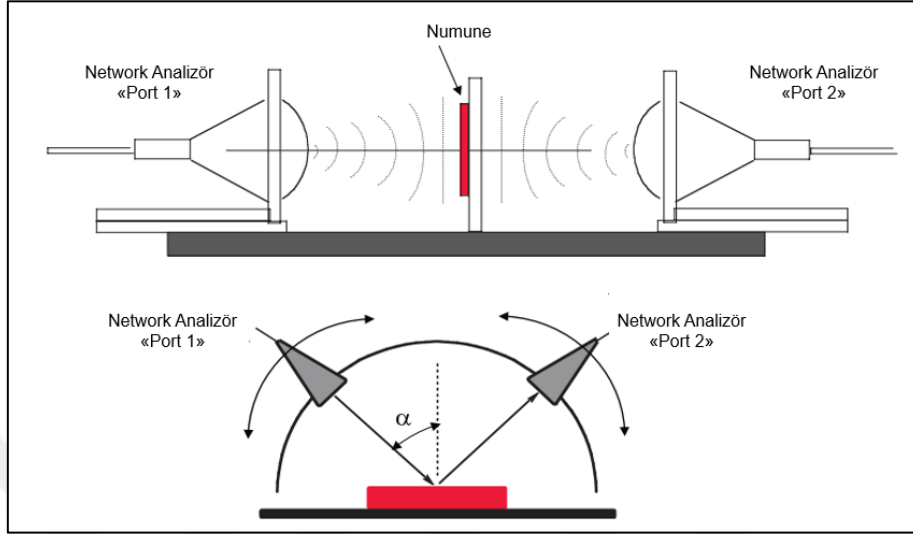


Şekil 3.12. (a) Dalga kılavuzu, (b) koaksiyel havayolu ve numuneleri (Keysight Technologies, 2017)

3.6.2. Serbest Alan Yansıma Tekniği

Serbest alan (free-space) yönteminde mikrodalga enerjisini bir levhaya veya malzeme tabakasına odaklamak için antenler kullanır. Bu yöntem temassızdır ve yüksek sıcaklıklar ve zorlu ortamlarda test edilecek malzemelere uygulanabilir. Yöntemde diğer yöntemlere göre büyük, düz, paralel yüzlü homojen numuneler kullanılmalıdır. Ayrıca manyetik malzemeler de ölçülebilmektedir (Keysight Technologies, 2017; Lakshmi, 2007).

Şekil 3.13’da iki tipik serbest alan kurulumu göstermektedir: S-parametresi serbest alan iletim konfigürasyonu (üstte) ve NRL yay yansıtma konfigürasyonu (altta).

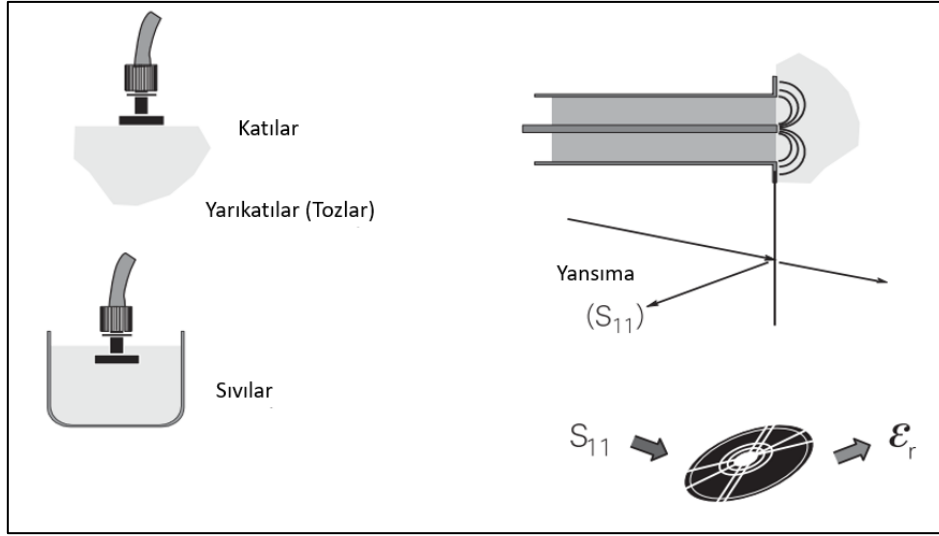


Şekil 3.13. Serbest alan ölçüm tekniklerinin gösterimi (Keysight Technologies, 2017)

3.6.3. Açık-Uçlu Koaksiyel Prob Tekniği

Açık uçlu koaksiyel prob, iletim hattının kesilmiş bir bölümüdür. Malzemenin özellikleri, probu bir sıvıya daldırarak veya katı (veya toz) bir malzemenin düz yüzüne dokundurarak ölçülür. Prob ucundaki alanlar malzemeye "saçak" olarak döner ve malzeme ile temasa geçtiklerinde değişirler. Yalnızca yansıtılan sinyal (S11) parametresi ölçüldüğünden, sadece dielektrik özellikler hesaplanabilir (Keysight Technologies, 2017; Lakshmi, 2007).

Bu teknik, sıvı ve yarı katı malzemeler için en iyi ölçüm metodudur (Şekil 3.14). Frekans aralığı 0,2-50 GHz’dir. Ancak katı malzemeler için düzgün bir yüzey istenmektedir ve malzeme homojen, izotropik (yönden bağımsız) ve kalınlığı 1 cm’den büyük olmalıdır. Test numunesi ve prob arasında oluşacak hava boşlukları önlenmelidir. Ayrıca test numunesi manyetik olmamalıdır. Bu metottaki doğruluk diğer metotlara göre düşüktür (Keysight Technologies, 2017).



Şekil 3.14. Açık-uçlu koaksiyel prob tekniğinin şematik gösterimi (Keysight Technologies, 2017)

3.6.4. Rezonans Kavite Tekniği

Rezonant boşluklar, belirli frekanslarda rezonansa giren yüksek Q yapılarıdır. Boşluğa yerleştirilen bir numune malzemesi parçası, boşluğun rezonans frekansını (f) ve kalite faktörünü (Q) etkiler. Bu parametrelerden, malzemenin karmaşık geçirgenliği tek bir frekansta hesaplanabilir (Keysight Technologies, 2017; Kotsuka, 2019; Lakshmi, 2007).

Rezonans teknikleri, düşük kayıplı malzemeler için çok uygundur. Yüksek empedans ortamında küçük numunelerle makul ölçümler mümkündür. Ancak yalnızca bir veya birkaç frekansta ölçümler gerçekleştirilebilir. Geniş bant tekniklerinde ise düşük empedans ortamında makul ölçümler elde etmek için daha büyük numuneler gerektirir ve herhangi bir frekansta ölçüm gerçekleştirilebilir (Keysight Technologies, 2017).

3.7. Elektromanyetik Soğurucu Yapıların Optimizasyonu

Yapıların karmaşıklığı nedeniyle, tasarım değişkenleri Dallenbach katmanından Jaumann soğurucularına doğru artar. Jaumann soğurucularındaki tasarım değişkenleri ise malzeme katmanı dirençli levha çiftleri arttıkça artar. Her katman için ϵ , μ , kalınlık ve dirençli levha direnci gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Özellikle çok katmanlı yapıların optimize

edilmesi için optimizasyon algoritmalarına ihtiyaç vardır. Bu sayede yapıların optimum tasarımı sağlanabilir.

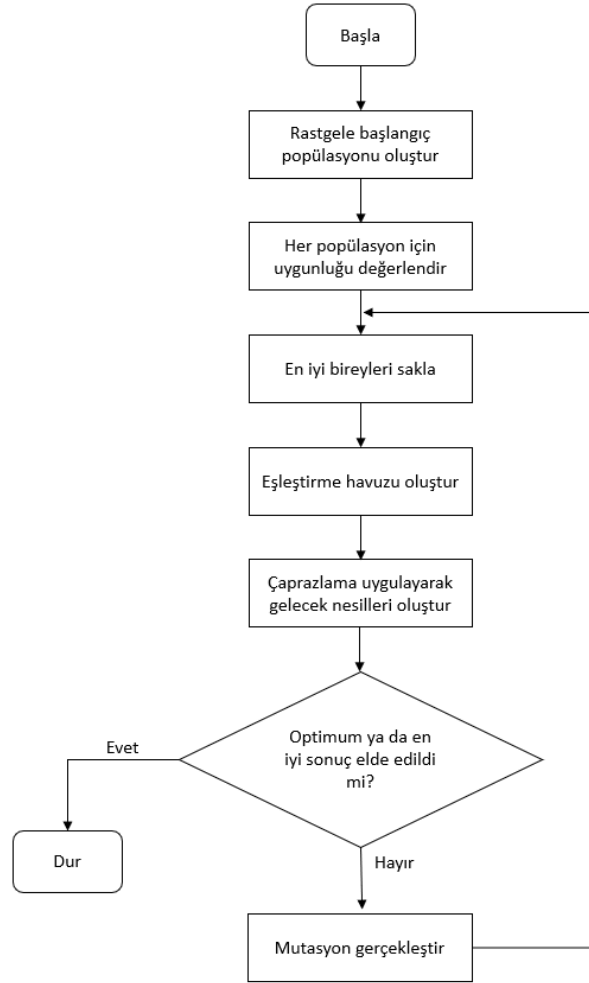
Optimizasyon, mevcut bir şeyi daha iyi hale getirmek için yapılan bir süreçtir. Bu süreç, başlangıçta belirlenen bir konsept üzerinde çeşitli varyasyonları deneyerek, elde edilen sonuçları değerlendirip fikri geliştirmeyi içerir. Yani, optimizasyon, bir şeyi daha iyi hale getirmek için sürekli olarak deneme yanılma yoluyla bilgi toplama ve kullanma sürecidir. Optimizasyon, bir sistemin, işlemin veya deneyin girdilerinin veya özelliklerinin ayarlanması yoluyla minimum veya maksimum çıktıyı veya sonucu elde etmek için yapılan bir işlemdir. Bu işlem, matematiksel yöntemler, algoritmalar veya deneyler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu sayede, sistemin verimliliği artırılabilir ve istenen sonuçlara daha hızlı ve doğru bir şekilde ulaşılabilir. Son dönemde geliştirilen doğal optimizasyon yöntemleri arasında genetik algoritma, benzetilmiş tavlama, parçacık sürüsü optimizasyonu, karınca kolonisi optimizasyonu ve evrimsel algoritmalar yer almaktadır. Bu teknikler var olan noktalara operatörler uygulayarak ve istatistiksel olarak arama uzayında daha uygun yerlere doğru ilerleyerek yeni noktalar üretirler. Bu süreçler, doğadaki doğal fenomenleri optimize etmede son derece başarılı olan süreçleri temsil ederler (Haupt ve Haupt, 2004; Micheli, 2011).

Genetik algoritma (GA), genetik ve doğal seçim ilkelerine dayalı bir optimizasyon ve arama tekniğidir. Bir GA, birçok bireyden oluşan bir popülasyonun, belirli seçim kuralları altında "uygunluğu"nu en üst düzeye çıkaran (yani, maliyet işlevini en aza indiren) bir duruma evrimleşmesine izin verir. Bu yöntem, 1960'lar ve 1970'ler boyunca John Holland (1975) tarafından geliştirilmiştir (Haupt ve Haupt, 2004).

GA, Darwin'in evrim ve genetik teorisine dayanan stokastik bir küresel optimizasyon rutinidir. Evrimsel bir süreç, yalnızca en iyi (en uygun) çözümleri seçerek ve bunların hayatta kalmasına ve sonraki çözüm turunu hesaplamak için temel oluşturmasına izin vererek, birkaç yinleme (nesil) üzerinden optimize edilmiş çözüme ulaşır. Bu şekilde optimizasyon rutini, ilk çözümleri optimum hale getirir (Kangal, 2013).

Genetik Algoritma, çevreye en iyi uyum sağlayan organizmaların evrimi ile sonuçlanan doğal bir seleksiyon sürecine dayanır. Genetik algoritma, araştırmasına rastgele bireylerden oluşan bir popülasyonla başlar. Popülasyonun her üyesi, bireyin belirli

özelliklerini kodlayan bir kromozoma sahiptir. Algoritma, tasarım popülasyonundaki her bir bireyi belirlenmiş özelliklere göre metodik olarak analiz eder ve ona tasarımcının amaçlarını temsil eden bir uygunluk derecesi atar. Bu uygunluk derecesi daha sonra diğerlerinden daha iyi performans gösteren yapısal tasarımları belirlemek için kullanılır. Böylece genetik algoritmanın, zayıf olan ve yeniden üretim operatörü kullanılarak elenmesi gereken tasarımları belirlemesini sağlar. Bu adımdan sonra, kalan, daha arzu edilen genetik materyal, yeni bir birey popülasyonu oluşturmak için kullanılır. Bu kısım, gen çaprazlaması ve gen mutasyonu olarak adlandırılan doğal genetik süreçlere benzer iki operatör daha uygulanarak gerçekleştirilir. Süreç, optimal tasarımları elde etmek için birçok nesil boyunca tekrarlanır (Kangal, 2013; M. Kumar ve diğ., 2020). Genetik algoritma sürecini özetleyen bir akış şeması Şekil 3.15'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Genetik algoritma akış şeması

Genetik algoritma ve türevleri, bilim insanları tarafından çok çeşitli alanlarda problem çözmede verimli bir şekilde kullanılmaktadır. GA, evrimsel algoritmalar havuzundan araştırmacılar tarafından seçilmiş ve yararlı ve etkili bir optimize edici olarak popüler olmuştur (Garai, 2016).

Bilimsel problemlerin tasarlanması sürecinde, araştırmacıların birincil amacı, verimli ve düşük maliyetli bir çözüm sağlayacak bir sistem geliştirmektir. Bu çabada, hedeflerine ulaşmak için iyi bir optimize ediciye ihtiyaçları var. Çeşitli problem türleri için verimli bir şekilde çalışan birkaç optimize edici mevcuttur. Bunlardan genetik algoritma iyi ve kullanışlı bir optimize edici ve işlevsel bir araç olarak seçilmektedir. Algoritmanın mühendislik, ekonomi, üretim, yapay zeka, yöneylem araştırması, uzay bilimi, tarım, fizik, kimya, biyoinformatik, tıp bilimi ve daha birçok alandaki birçok uygulama için etkili optimizasyon tekniği olduğu ve pek çok soruna çözümler sunabildiği kanıtlanmıştır (Garai, 2016).

Bununla birlikte, genetik algoritmaları diğer optimizasyon araçları gibi bir optimize edici olarak kullanmanın avantajları ve dezavantajları vardır. Genetik algoritmaları kullanmak için gereken ön bilgi miktarı minimumdur. Tüm fonksiyon girdilerini ikili diziler gibi önceden belirlenmiş bir gösterime eşleyerek hazır bir genetik algoritma bir optimizasyon problemine uygulanabilir. Ancak, üstün performans elde etmek için ek buluşsal yöntemler, özel temsiller ve/veya operatörler kullanılarak gerekli ön bilgileri oluşturan bir genetik algoritma genellikle belirli bir problem alanına özelleştirilir. Bilim adamları, araştırma problemlerinin gereksinimlerine ve özelliklerine göre geleneksel GA'ya bu özelleştirmeyi dahil etmişlerdir (Garai, 2016).

Genetik algoritma (GA) optimizasyonu, parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), Taguchi yöntemleri ve sonlu elemanlar yöntemiyle optimizasyon gibi çeşitli optimizasyon teknikleri mevcuttur. Radar soğuran malzeme ve yapılar söz konusu olduğunda, genetik algoritma popüler optimizasyon yöntemlerinden biridir ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Micheli, 2011; Micheli ve diğ., 2011).

4. MALZEME VE YÖNTEM

Malzemeye gelen elektromanyetik dalgaın azaltılması için birçok teknik bulunmaktadır. Bu teknikler içinde literatürde en fazla çalışılan yöntemlerden biri düşük yansıma katsayısına sahip radar soğurucu malzemelerin kullanılmasıdır. Bu malzemeler arasında özellikle baş döndürücü bir şekilde gelişme kaydeden polimer içerikli çok katmanlı ve geniş bantlı pasif radar soğurucu malzemeler ayrı bir öneme sahiptir. Ancak bu malzemeler tasarlanırken her katman için ϵ , μ , kalınlık ve sıralama gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Bu nedenle çok katmanlı yapıların optimize edilmesi için optimizasyon algoritmalarına ihtiyaç vardır. Bu sayede yapıların optimum tasarımı sağlanabilir.

Global optimizasyon yöntemleri arasında bulunan genetik algoritma çok çeşitli alanlarda kullanılabilmektedir ve esnek bir yapıya sahiptir. Bu algoritma doğada olan en iyinin yaşaması, kötünün ise yaşam mücadelesinde elenmesi kuralı temel alınarak yapılandırılmış bir optimizasyon yöntemidir.

Bu tez çalışmasında çok katmanlı radar soğurucu malzemeler tasarlanmıştır. Tasarımda dalga empedansları yaklaşımı ile elde edilen formülasyonlar kullanılmış ve sürekli parametrelili genetik algoritma yardımıyla en düşük yansıma katsayısını veren malzemeler malzeme sırası ve malzeme kalınlıkları ile belirlenmiştir. Tasarlanan üç katmanlı radar soğurucu malzemenin yansıma katsayıları ile laboratuvar ortamında üretilen numunenin yansıma katsayıları karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması TÜBİTAK MAM'ın 20180028 no'lu "Hava Platformları İçin Elektromanyetik Tasarım Destekli Çok Geniş Bantlı Radar Soğurucu Malzemenin Geliştirilmesi" Projesi tarafından desteklenmiş olup, bilimsel amaçlı bir AR-GE proje çalışmasıdır. Tez kapsamında yapılan numune üretim çalışmaları TÜBİTAK MAM BYMT RAM Laboratuvarı imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin elektromanyetik ölçümleri ise TÜBİTAK MAM BYMT MİLTAL (Milimetre Dalga ve Terahertz Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı)'nda bulunan cihazlar ile gerçekleştirilmiştir.

4.1. Malzemeler

Tez kapsamında elektromanyetik soğurma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla partikül takviyeli kompozit malzemeler hazırlanmıştır.

Hazırlanan kompozitlerde matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Kullanılan “MGS Laminasyon Epoksi Seti - L285/H285” ileri kompozit parça imalatlarında dünyada çok yaygın olarak kullanılan havacılık, otomotiv, marin, uzay, rüzgâr pervaneleri ve savunma sektörlerinde tercih edilen bir üründür. Bu sette L285 epoksi reçine ve H285 bu reçine için kullanılan sertleştiricidir. Havacılık sertifikasına sahip olan MGS L285 reçine sisteminin oda sıcaklığında kürlenebilmesi çok rahat bir kullanım imkânı vermektedir. Üretici tarafından reçinenin teknik veri sayfasında sertleştirici oranı ağırlıkça %40 olarak bildirilmektedir. Reçineye ait teknik özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. MGS L285 reçinenin teknik özellikleri

Yoğunluk	[g/cm ³]	1,18 – 1,20
Bükülme mukavemeti	[N/mm ²]	110 - 120
Elastisite modülü	[kN/mm ²]	3,0 – 3,3
Gerilme direnci	[N/mm ²]	70 - 80
Basınç dayanımı	[N/mm ²]	120 - 140
Kopma uzaması	[%]	5,0 – 6,5
Darbe dayanımı	[KJ/m ²]	45 - 55
Su emilimi (23°C’de)	24 saat [%]	0,20 – 0,30
	7 gün [%]	0,60 – 0,80

Katkı malzemesi olarak literatürde elektromanyetik soğurma çalışmalarında en çok tercih edilen 10 farklı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemelere ek olarak katkısız bir numune hazırlanarak kullanılan reçinenin etkisi de gözlenmiştir. Kullanılan katkı malzemeleri ve karışımlardaki oranları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Katkı malzemeleri ve oranları

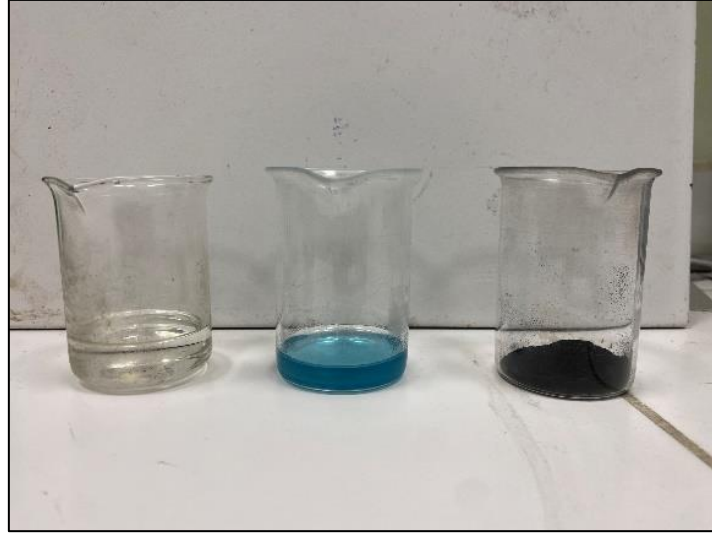
MALZEME	ORAN								
	0,5%	1%	2%	3%	4%	5%	20%	40%	60%
MWCNT	x	x	x	x	x	x	-	-	-
Grafen Oksit	x	x	x	x	-	-	-	-	-
Turmalin	x	x	x	x	x	x	-	x	x
Polianilin	x	x	x	x	x	x	-	-	-
Karbon	x	x	x	x	x	x	-	-	-
Grafit	x	x	x	x	x	x	x	-	-
Çinko Borat	x	x	x	x	x	x	-	x	-
Ferrit	-	-	-	-	-	-	-	x	x
Nikel	-	-	-	-	-	-	x	-	-
Nano-Grafen	x	-	x	-	-	-	-	-	-
Reçine					x				

Farklı katkı oranları ile hazırlanan kompozisyonlar ile bir veri tabanı oluşturulması amaçlanmıştır. Bu şekilde 11 farklı malzeme ile 50 farklı numune üretilmiştir.

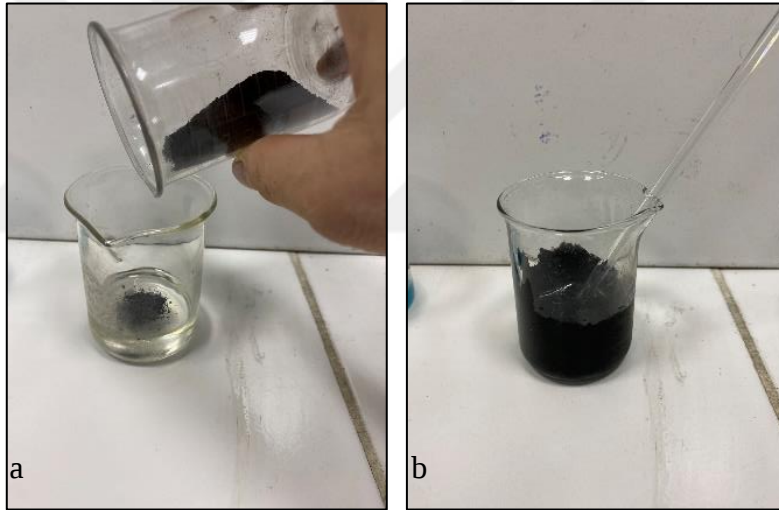
4.2. Kompozit Malzeme Üretimi

Partikül takviyeli kompozit malzemelerin üretimi için aşağıdaki yol izlenmiştir:

Her numune için 12 g L285 epoksi reçine beher içerisine koyulmuştur (Şekil 4.1). Daha sonra belirlenen oranda katkı malzemesi tartılarak beher içerisindeki reçineye eklenmiştir. Karıştırma esnasında oluşan köpüklerin sürüklenmesi ve daha fazla köpük oluşumunu engellemesi için pastör pipeti ile 3 damla BYK011 köpük kesici eklendikten sonra karışım cam baget ile karıştırılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Hazırlanan bileşenler: sırasıyla reçine, sertleştirici ve katkı malzemesi



Şekil 4.2. (a) Katkı malzemesinin reçineye eklenmesi ve (b) karıştırılması

Nanopartiküllerin epoksi içerisinde homojen dağılmasını sağlamak ve topaklanma oluşmasını engellemek için hazırlanan karışım Bandelin HD2200 Ultrasonik Homojenizatör’de 30 dakika karıştırılmıştır. Bu karıştırma işlemi sırasında hazırlanan karışımın ısınmaması için beherin ısısı Lauda Ecoline RE 104 / E100 Sirkülasyon Banyosundan gelen soğutma suyu ile sabit tutulmuştur (Şekil 4.3).

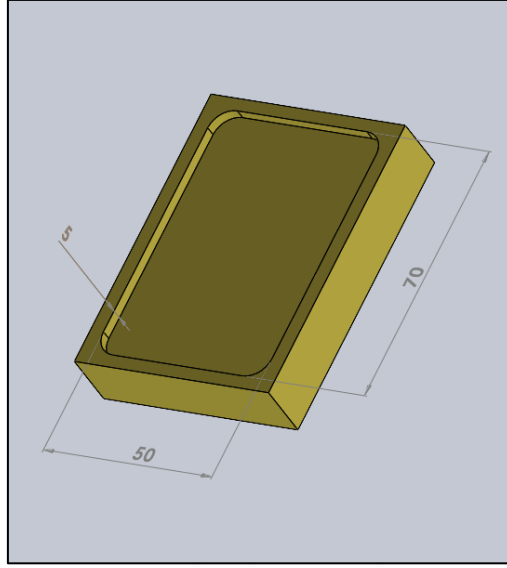


Şekil 4.3. Ultrasonik karıştırıcı ve sirkülasyon banyosu

Ultrasonik homojenizatörde 30 dakikalık karıştırma işlemi sonrası karışım bir süre dinlendirilmiştir. Karışım dinlendirilirken karışımın döküleceği kestamid kalıba kalıp ayırıcı sürülerek kalıp hazırlanmıştır (Şekil 4.4). Kalıp ölçüleri Şekil 4.5’ de gösterilmektedir.

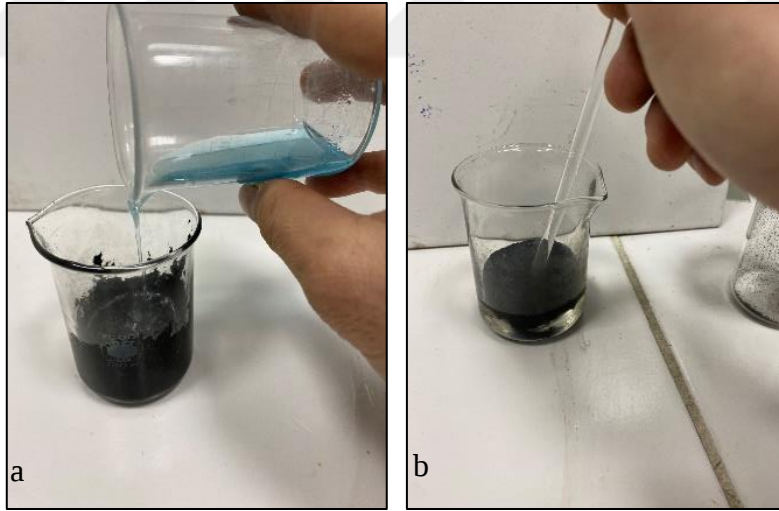


Şekil 4.4. Kestamid kalıbın kalıp ayırıcı ile hazırlanması



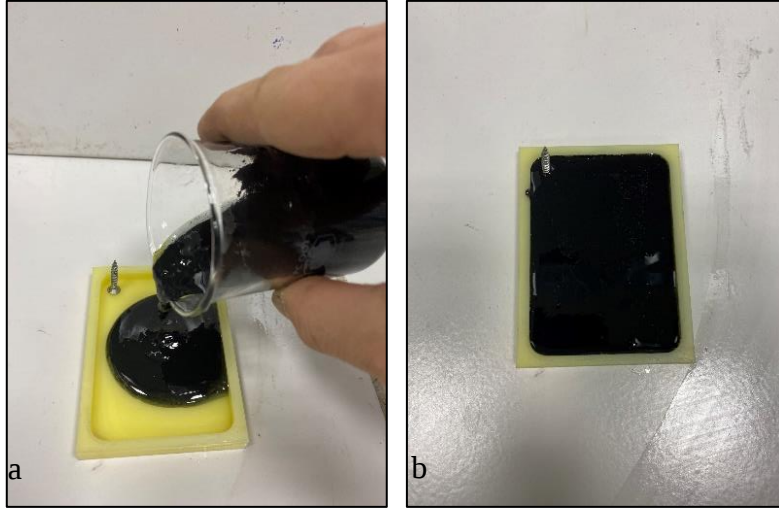
Şekil 4.5. Karışımların döküldüğü kalıpların ölçüleri

Kalıp hazırlığı tamamlandıktan sonra dinlendirilen karışıma 8 g H285 sertleştirici eklenmiş ve karışım cam baget ile tekrar karıştırılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. (a) Karışıma sertleştiricinin eklenmesi ve (b) karıştırılması

Karışım kalıba döküldükten sonra kalıp düz bir zemine yerleştirilerek kürleşmesi için en az 24 saat oda sıcaklığında (yaklaşık 20 -23°C) bekletilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. (a) Karışımın kalıba dökülmesi, (b) döküm işlemi sonrasında oda sıcaklığında bekletilen numune

Bu aşamaya kadar yapılan tüm işlemler her bir katkı malzemesi için belirlenen oranlarda yapılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Kestamid kalıplara dökülmüş numuneler

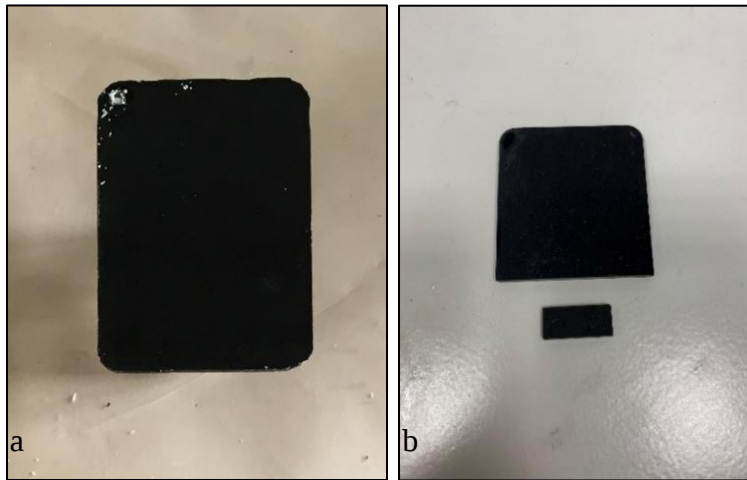
Kürlenme tamamlandığında numuneler kalıplardan çıkarılmış ve X-Band ve Ku-band numune boyutlarında hazırlanmıştır (Tablo 4.3). Bunun için elmas diskli hassas kesme cihazı ile numuneler ölçüm için gerekli boyutlarda dilimlenmiştir (Şekil 4.9, Şekil 4.10).

Tablo 4.3. Frekans bandları ve standart dalga kılavuzlarına ait bilgiler

	X-Band	Ku-Band
Frekans	8.2 - 12.4 GHz	12.4 - 18 GHz
Standart dalgakılavuzu iç boyutları	22,86 - 10,16 mm	15,80 - 7,90 mm



Şekil 4.9. Elmas diskli hassas kesme cihazı



Şekil 4.10. (a) Kalıptan çıkan numune, (b) dilimlenmiş ölçüm numunesi

4.3. Malzemelerin Elektromanyetik Karakteristiğinin Belirlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında X-Band ve Ku-Band olmak üzere iki ayrı frekans bandında çalışılmıştır. X-Band kısa menzilli tespitler, havadan önleme, füze savunma sistemleri, haritalama, deniz radar sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte Ku-Band ise yüksek çözünürlüklü haritalama ve uydu yükseklik ölçümü gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Üretilen tüm numuneler Tablo 4.3’de belirtilen ilgili frekanstaki dalga kılavuzu iç boyutlarına göre hazırlanmıştır (Şekil 4.11). Ölçüm için numunelerin dalga kılavuzunun içine boşluksuz yerleştirilmeleri çok önemlidir. Bu nedenle kesilen numunelerin ölçülerinin Tablo 4.3’de verilen ölçülerde olmasına ayrıca herbir numunenin yüzeyinin düz olmasına ve kalınlık farkı olmamasına dikkat edilmiştir.

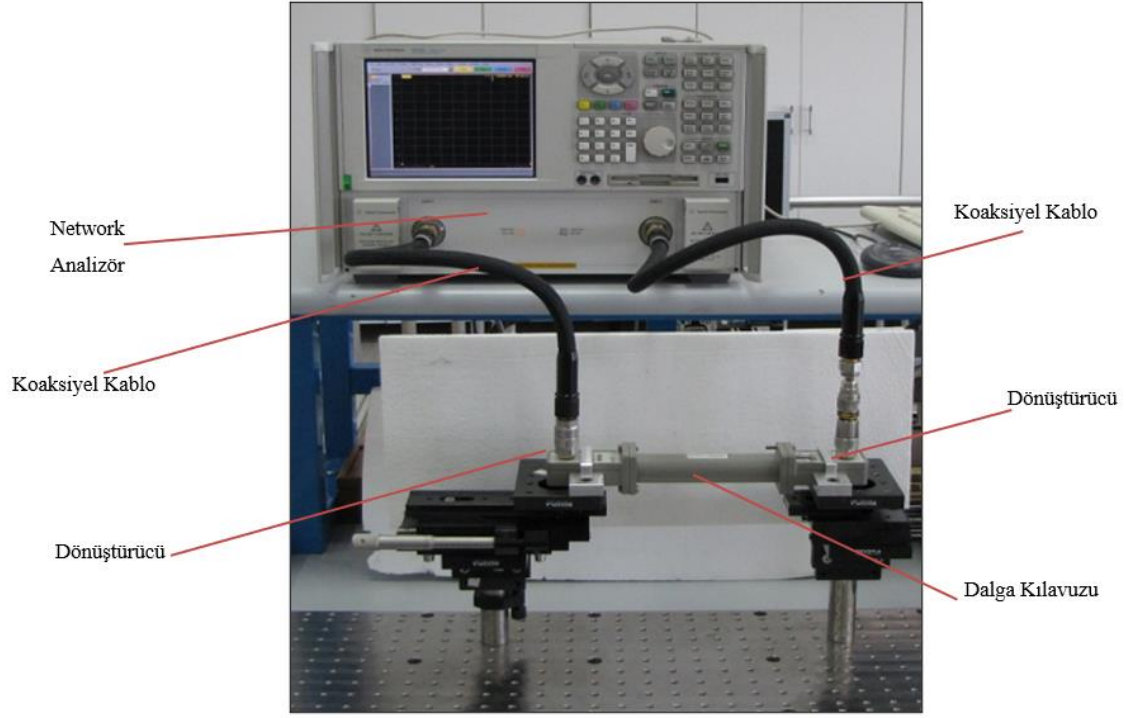


Şekil 4.11. X-Band dalga kılavuzu numune tutucusu boyutlarında hazırlanmış numuneler

Ölçüm için uygun boyutlarda hazırlanan tüm numunelerin X-Band ve Ku-Band’da elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) katsayıları Agilent N5230A PNA

Network Analizör cihazına bağı dalga kılavuzunda ölçülmüştür. Böylece geniş bir veri tabanı oluşturulmuştur.

Şekil 4.12’de TÜBİTAM MAM BYMT MİLTAL’da bulunan Network Analizör ve dalga kılavuzu görülmektedir.



Şekil 4.12. Agilent N5230A PNA Network Analizör ve dalga kılavuzu

4.4. Genetik Algoritma Optimizasyonu

Katmanlı yapının soğurma özelliklerinin hesaplanması için empedans yöntemi kullanılmıştır. Katmanların empedansı kullanılarak oluşturulan yapıdan yansıma hesaplanabilmektedir. Yansıma ne kadar küçük olursa soğurma o kadar fazla olacaktır. Başka bir ifade ile soğurma ile yansımanın toplamı gelen dalgaya eşittir.

MATLAB programında aşağıda verilen empedansa göre elektromanyetik dalganın dB cinsinden yansıma kaybı formülü yazılmıştır (Denklem 4.1 – Denklem 4.8). MATLAB programının genetik algoritma modülü kullanılarak yapılacak çalışma için optimizasyon kodu oluşturulmuştur.

$$\gamma_n = j \cdot \omega \cdot \sqrt{\mu_n \epsilon_n} \quad (4.1)$$

$$\eta_n = \frac{\mu_n}{\epsilon_n} \quad (4.2)$$

$$Z_{i_1} = \eta_1 \frac{Z_{PEC} \cos(\gamma_1 t_1) + j \eta_1 \sin(\gamma_1 t_1)}{\eta_1 \cos(\gamma_1 t_1) + j Z_{PEC} \sin(\gamma_1 t_1)} \quad (4.3)$$

$$Z_{i_2} = \eta_2 \frac{Z_{i_1} \cos(\gamma_2 t_2) + j \eta_2 \sin(\gamma_2 t_2)}{\eta_2 \cos(\gamma_2 t_2) + j Z_{i_1} \sin(\gamma_2 t_2)} \quad (4.4)$$

$$Z_{i_3} = \eta_3 \frac{Z_{i_2} \cos(\gamma_3 t_3) + j \eta_3 \sin(\gamma_3 t_3)}{\eta_3 \cos(\gamma_3 t_3) + j Z_{i_2} \sin(\gamma_3 t_3)} \quad (4.5)$$

$$Z_{i_4} = \eta_4 \frac{Z_{i_3} \cos(\gamma_4 t_4) + j \eta_4 \sin(\gamma_4 t_4)}{\eta_4 \cos(\gamma_4 t_4) + j Z_{i_3} \sin(\gamma_4 t_4)} \quad (4.6)$$

$$\Gamma_m = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = \frac{Z_1 - 1}{Z_1 + 1} \quad (4.7)$$

$$RL = 20 \log_{10} \left| \frac{(Z_{i_4} - Z_0)}{(Z_{i_4} + Z_0)} \right| \quad (4.8)$$

MATLAB programı ile oluşturulan Fitness Fonksiyonu kodu Şekil 4.13'de verilmiştir. Bu kod MATLAB optimizasyon modülünde Genetik Algoritma seçilerek kullanılmıştır.

```
%Fitness Function
% Soğurucu Malzeme Hesaplama
%
clear all
clc
%% Sabitler
e0=8.854*10^-12; %free space permittivity (F/m)
u0=4*pi*10^-7; %free space permeability (H/m)
z0=sqrt(u0/e0); %Free space characteristic impedance, 120pi,~377ohm;
c0=1/sqrt(u0*e0); %Speed of light in free space, ~3*10^8 m/s
%% Katman kalınlığı
n=3; %katman sayısı
%% Hesaplama
malzeme=xlsread('malzeme.xlsx');
freq=malzeme(:,1);
[sat sut]=size(malzeme); %Boyutu bulmak için
Z=zeros(sat,n+1); %Empedans matrisi
for k=1:sat
    for s=1:n
```

Şekil 4.13. MATLAB programı ile oluşturulan Fitness Fonksiyonu kodu

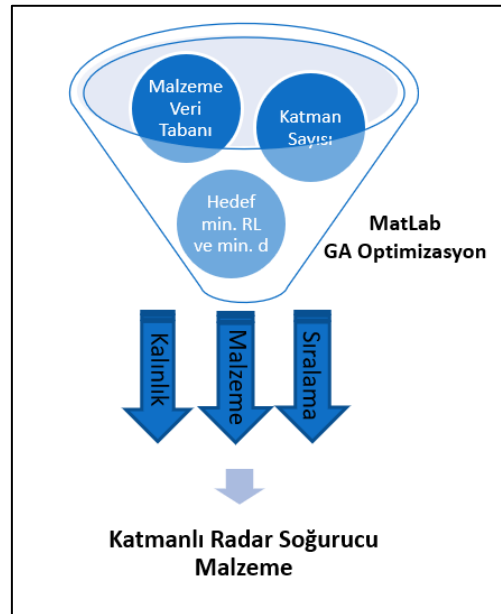
```

ep(k,s)=malzeme(k,(d(1,s+n)-1)*4+2)-malzeme(k,(d(1,s+n)-1)*4+3)*1i; %ep=e'-je"
mu(k,s)=malzeme(k,(d(1,s+n)-1)*4+4)-malzeme(k,(d(1,s+n)-1)*4+5)*1i; %mu=mu'-jmu"
K(k,s)=sqrt((u0*mu(k,s))/(e0*ep(k,s))); %K değerleri
G(k,s)=1i*2*pi*freq(k,1)*sqrt(u0*e0*mu(k,s)*ep(k,s)); %G
değeri
end
for s=n:-1:1
    Z(k,s)=K(k,s)*((Z(k,s+1)+K(k,s)*tanh(G(k,s)*10^-3*d(1,s)))/(K(k,s)+Z(k,s+1)*tanh(G(k,s)*10^-3*d(1,s)))); %Katman
Empedansı
end
gamma(k,1)=(Z(k,1)-z0)/(Z(k,1)+z0); %gamma complex
Gamma(k,1)=abs(gamma(k,1)); %Gamma Magnitude
RL(k,1)=20*log10(Gamma(k,1)); %Return Loss (dB)
end
%% Sonuç
plot(freq,RL)
%hold on
%plot(freq,cst3layer(:,2))
minRL=(sum(Gamma.^2)/sat)+((d(1)+d(2)+d(3))/sat)
d
end

```

Şekil 4.13. (Devam) MATLAB programı ile oluşturulan Fitness Fonksiyonu kodu

Hazırlanan kod ile veri tabanındaki malzemelerden hangilerini, hangi sırada ve hangi kalınlıkta kullanılması gerektiği Genetik Algoritma ile belirlenmiştir (Şekil 4.14).



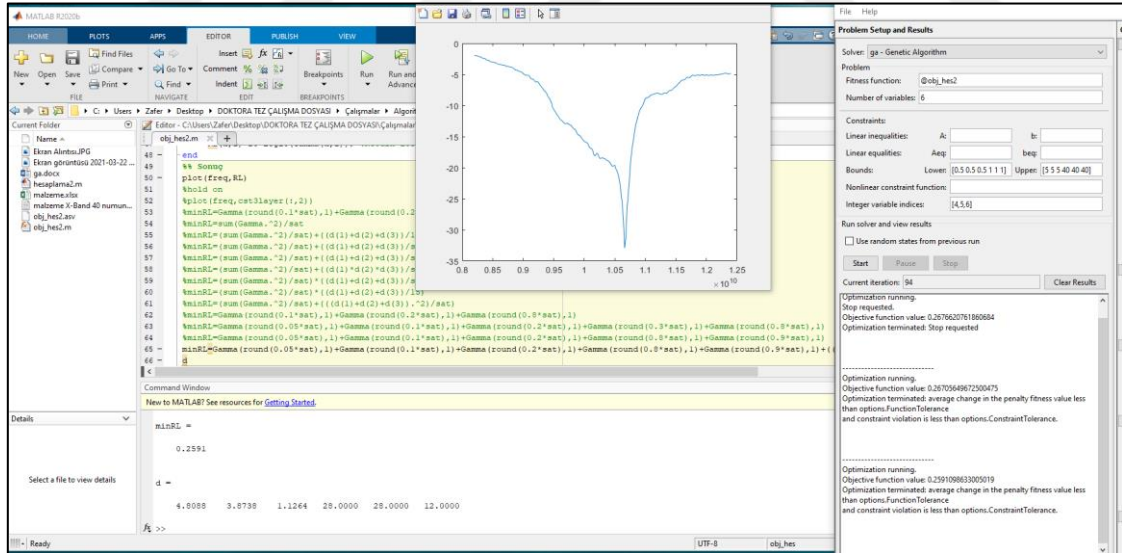
Şekil 4.14. Genetik algoritma çalışma mantığının şematik gösterimi

Yazılımın limitleri malzemeyi 3 katmanlı hesaplayacak ve her bir katmanın kalınlıklarının 0,5 ile 5 mm arasında olacak şekilde düzenlenmiştir. 50 farklı numunenin ε ve μ değerlerinin bulunduğu bir malzeme veri tabanı yazılıma yüklenmiştir. Çalışmalar sırasında en düşük yansıma kaybı ve en düşük kalınlığı elde edilebilecek 10 farklı maliyet fonksiyonu denenmiş ve en uygun sonucu veren maliyet fonksiyonu ile çalışmalara devam edilmiştir. Kullanılan maliyet fonksiyonu Denklem (4.9)'da verilmiştir. Bu denklemde “sat” frekans nokta sayısı, “n” katman sayısı ve “d” katman kalınlığı olarak gösterilmiştir.

$$\min RL = \frac{1}{sat} [\sum_{i=1}^{sat} \Gamma^2(i) + \sum_{j=1}^n d(j)] \quad (4.9)$$

Burada kullanılan maliyet fonksiyonu bir “minimum bulma” fonksiyonudur. Aranılan minimumlar tüm frekans bandındaki yansıma kaybı (RL) ve toplam kalınlığın (d) en az olmasıdır. Böylece üretim girdimiz olan üç katmanı oluşturan malzemeler, sıraları ve kalınlıkları belirlenir.

Şekil 4.15’de yazılımın örnek ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.15. MATLAB programı örnek ekran görüntüsü

Genetik algoritma optimizasyonu çalışırken hesaplamayı hızlandırmak için sonuçları etkilemeyecek birkaç parametre hızlı ileme süresi için değiştirilmiştir. Başlangıç

popülasyon büyüklüğü 120, çapraz fraksiyon 0,8 olarak seçilmiş ve durdurma kriterleri olarak iterasyon sayısı 100 girilmiştir.

GA sonuçları her çalıştırmada değişebileceğinden çözümlerin doğrulanmasında her yapı için en az 10 adet GA optimizasyon çalışması yapılmış ve en geniş soğurma bant genişliğine sahip en iyi sonuçlar alınmıştır.

Genetik algoritma çalışması ile hem X-Band hem de Ku-Bandda olmak üzere yaklaşık 30 sonuç değerlendirilmiştir. Elde edilen optimizasyon sonuçlarına göre belirlenen numuneler üretilmiş ve hem simülasyon sonuçları hem de ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.5. Elektromanyetik Soğurucu Özelliğe Sahip Katmanlı Yapı

Genetik algoritmanın sunduğu grafik sonuçları değerlendirilirken aynı zamanda katmanlı yapıyı oluşturacak numunelerin kalınlık açısından laboratuvar ortamında üretilebilirliği de değerlendirilmiştir.

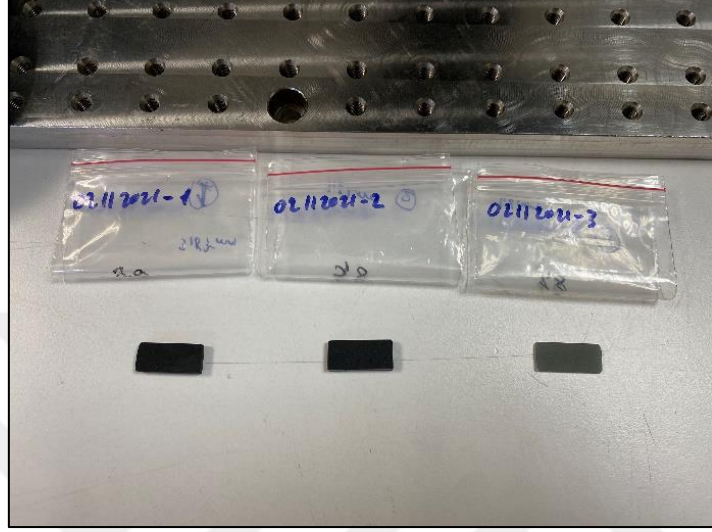
Bu kapsamda en uygun Katmanlı Kompozit Malzemenin ağırlıkça %5 Karbon + %5 MWCNT + %1 Turmalin ile oluşturulan yapı olduğuna karar verilmiştir. Genetik algoritmanın X-Bandda verdiği sonuçlara göre bu kompozit malzemenin katmalarının kalınlıkları sırasıyla 3,90, 3,83 ve 1,81 mm olmalıdır.

Genetik algoritmanın belirlediği katkı malzemelerin teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.4. Kullanılan takviye malzemelerin teknik özellikleri

Takviye Adı	Karbon	MWCNT	Turmalin
Üretici firma	Imerys	Nanografi	Linjiang Meston Powdery Material Co., Ltd.
Ticari ismi	Carbon-A99	Multi Walled Carbon Nanotubes 8nm	Tourmaline Powder Black
Yoğunluğu (g/cm ³)	2,2	2,4	2,8
Yüzey alanı (m ² /g)	1000	510	1,9
Tanecik boyutu	< 44 mic	< 8 nm	< 50 mic

Seçilen yapıyı oluşturabilmek için katmanlar başlık 4.2’de anlatıldığı şekilde numune bazında tekrar üretilmiş ve dalga kılavuzu i boyutlarına göre hassas olarak kesilmiştir (şekil 4.16). Numune kalınlıkları ise genetik algoritma optimizasyonu sonucunda belirlenen değerlere göre hazırlanmıştır (şekil 4.17).



şekil 4.16. Genetik algoritmanın önerdiği numuneler

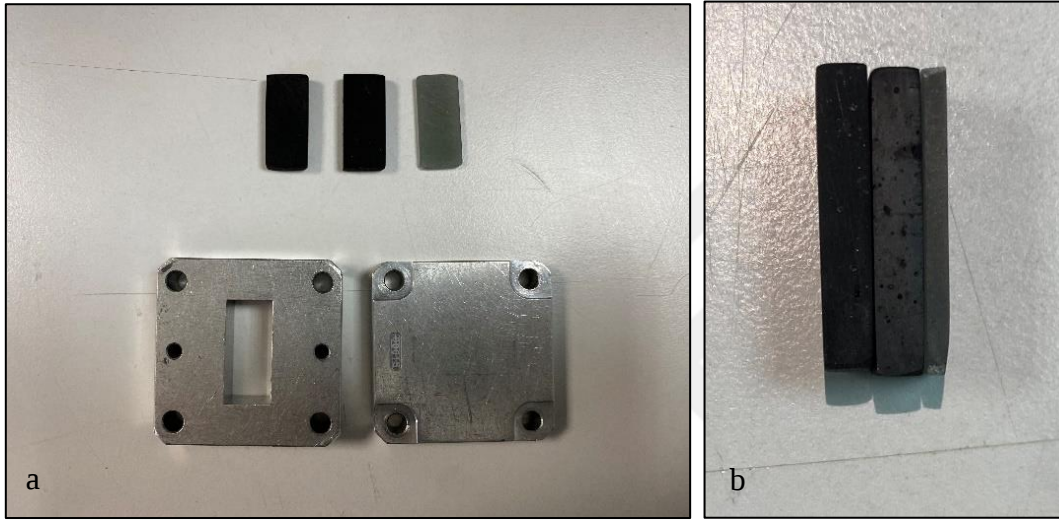


şekil 4.17. Numunelerin kalınlık kontrolü

Hazırlanan numunelerin daha önce üretilen numuneler ile karşılaştırılması amacıyla elektriksel geçirgenlik (ϵ) katsayıları X-Band dalga kılavuzunda tekrar ölçülmüştür.

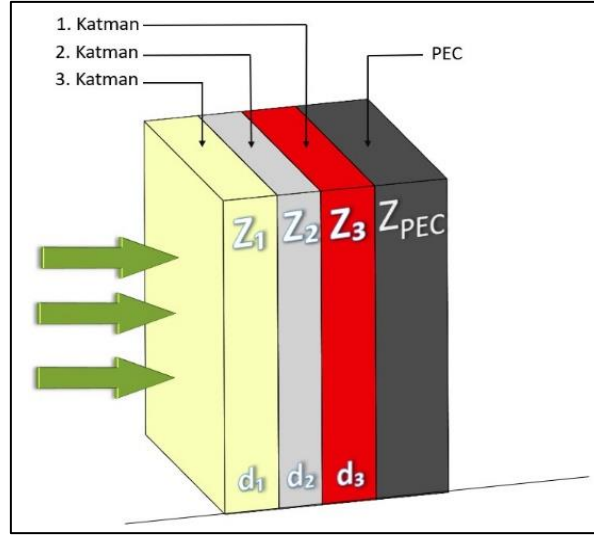
4.6. Yapının Yansıma Kaybının Ölçülmesi

Genetik algoritma optimizasyonu tarafından katkısı, katkı oranı ve kalınlığı belirlenen numuneler ölçüm için hazırlandıktan sonra yine genetik algoritma optimizasyonu tarafından belirlenen sırada dizilerek örnek tutucu içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 4.18).

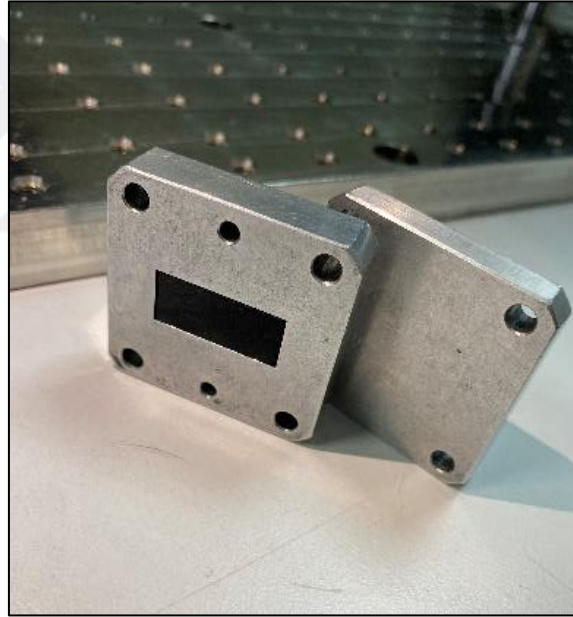


Şekil 4.18.(a) Katmanlı kompoziti oluşturacak numuneler ve dalga kılavuzu aparatları, (b) katmanlı kompozit numunesi

Dalga kılavuzunda gönderilen dalganın yansıması ne kadar küçük olursa malzeme içerisinde o dalganın soğurması o kadar fazla olacaktır. Bu nedenle katmanlı yapıyı oluşturacak numunelerin arkasında yansıma yüzeyi oluşturması amacıyla en son katmanın arkasına kısa devre plakası eklenerek numuneler dalga kılavuzuna belirlenen sırayla yerleştirilmiştir (Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21).



Şekil 4.19. Numunelerin yerleşiminin şematik gösterimi



Şekil 4.20. Numunelerin yerleştirildiği örnek tutucu ve kısa devre plakası



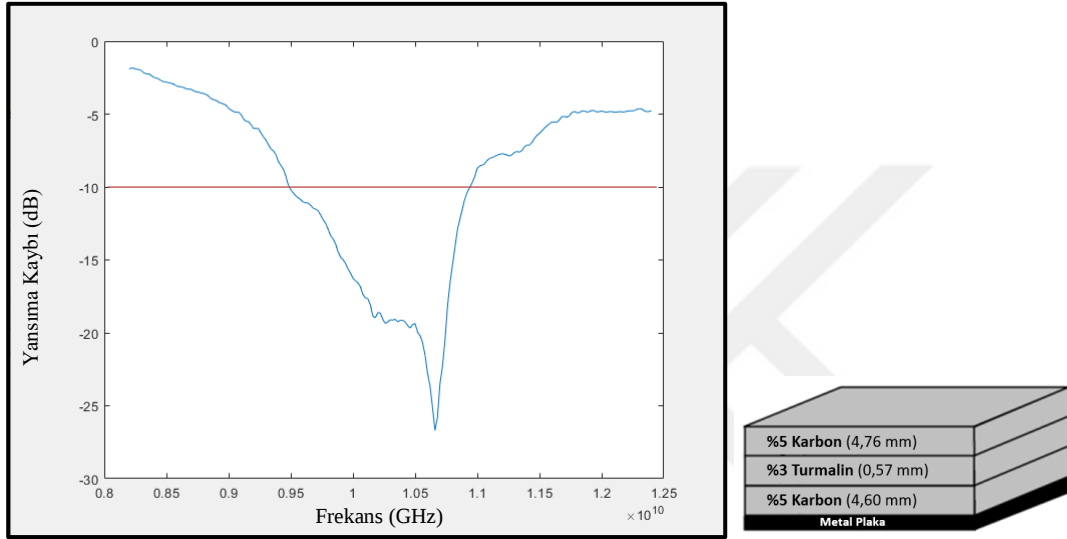
Şekil 4.21. Katmanlı numunenin yerleştirildiği örnek tutucunun dalga kılavuzuna yerleştirilmesi

X- Band dalga kılavuzuna yerleştirilen katmanlı kompozit malzemenin dB cinsinden yansıma kaybı değerleri 8,2-12,4 GHz frekansları arasında ölçülmüştür.

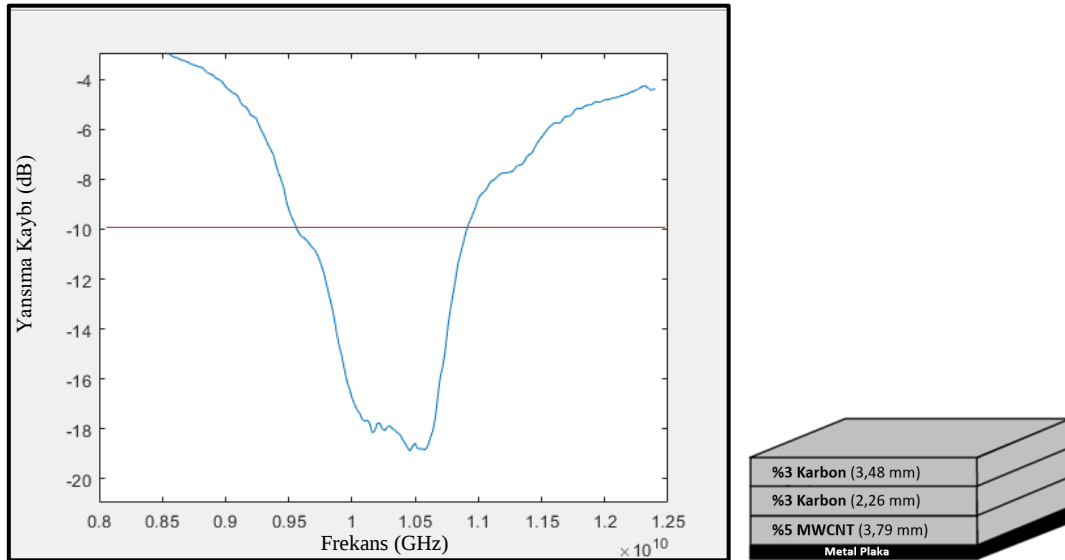
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yazılım, 50 farklı numunenin ϵ ve μ değerlerinin bulunduğu veri tabanı ile koşturulmuş ve genetik algoritma optimizasyonu hem X-Band hem de Ku-Band frekans aralıklarında ayrı ayrı çalıştırılarak 30'dan fazla sonuç elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Değerlendirilen sonuçlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

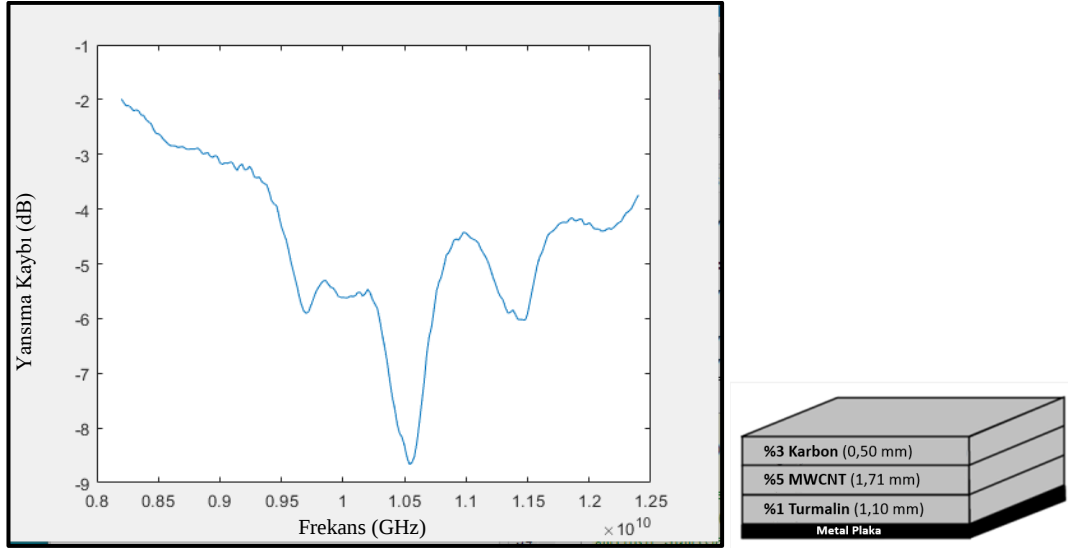
X-Bandda elde edilen grafikler;



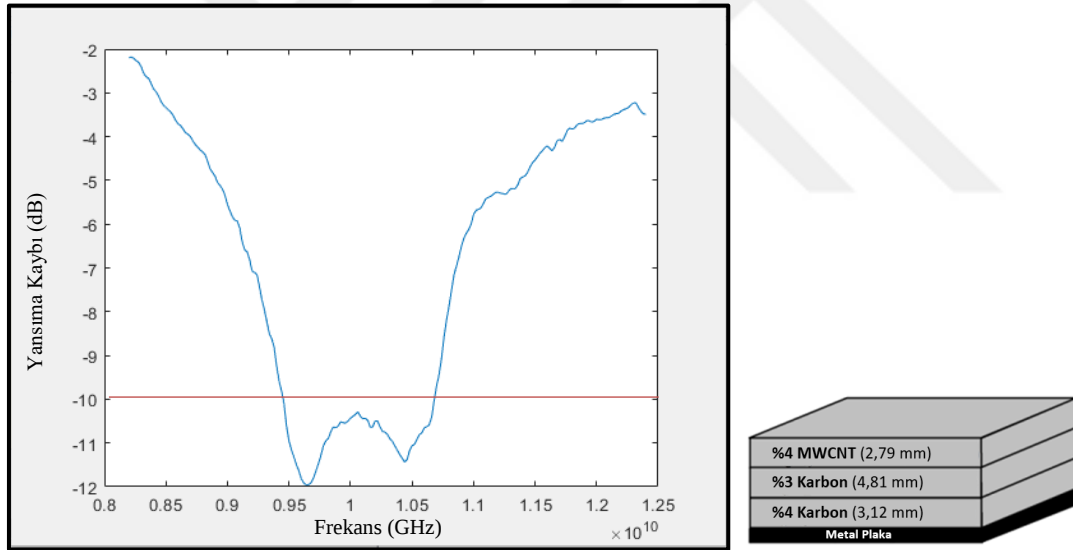
Şekil 5.1. %5 Karbon + %3 Turmalin + %5 Karbon katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma kaybı-frekans grafiği



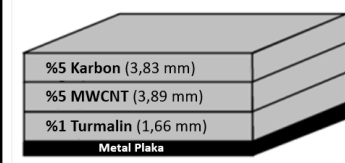
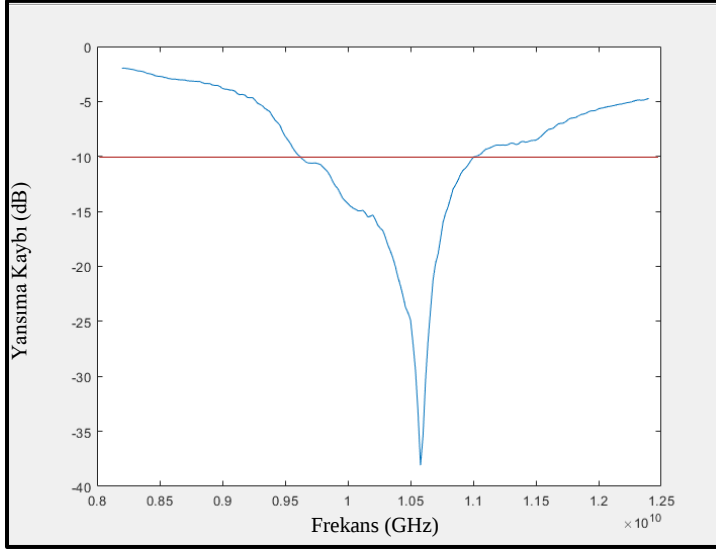
Şekil 5.2. %3 Karbon + %3 Karbon + %5 MWCNT katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği



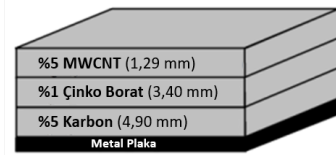
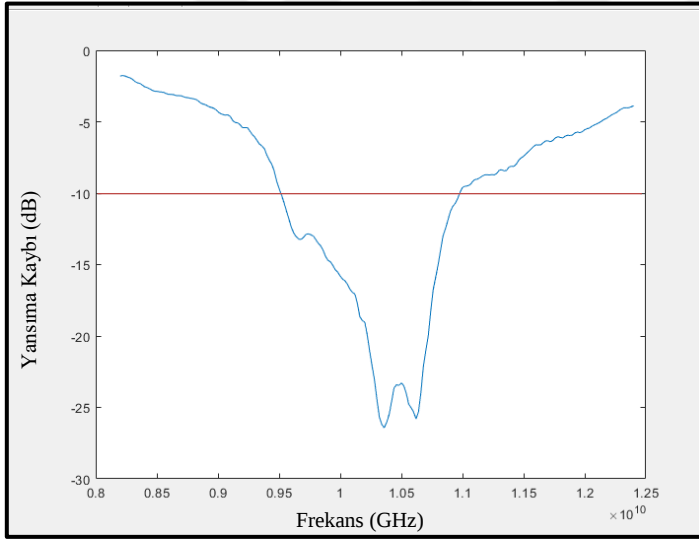
Şekil 5.3. %3 Karbon + %5 MWCNT + %1 Turmalin katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği



Şekil 5.4. %4 MWCNT + %3 Karbon + %4 Karbon katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği

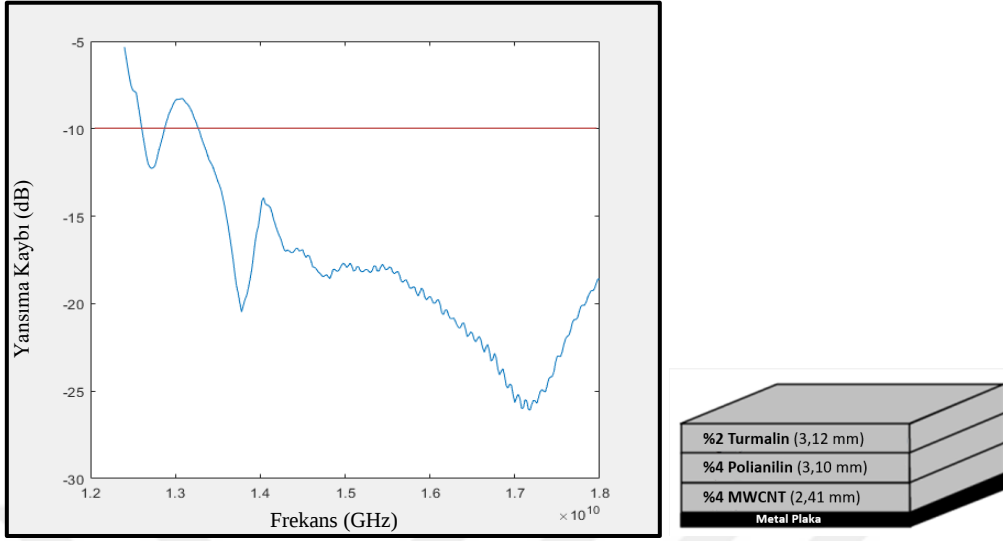


Şekil 5.5. %5 Karbon + %5 MWCNT + %1 Turmalin katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği

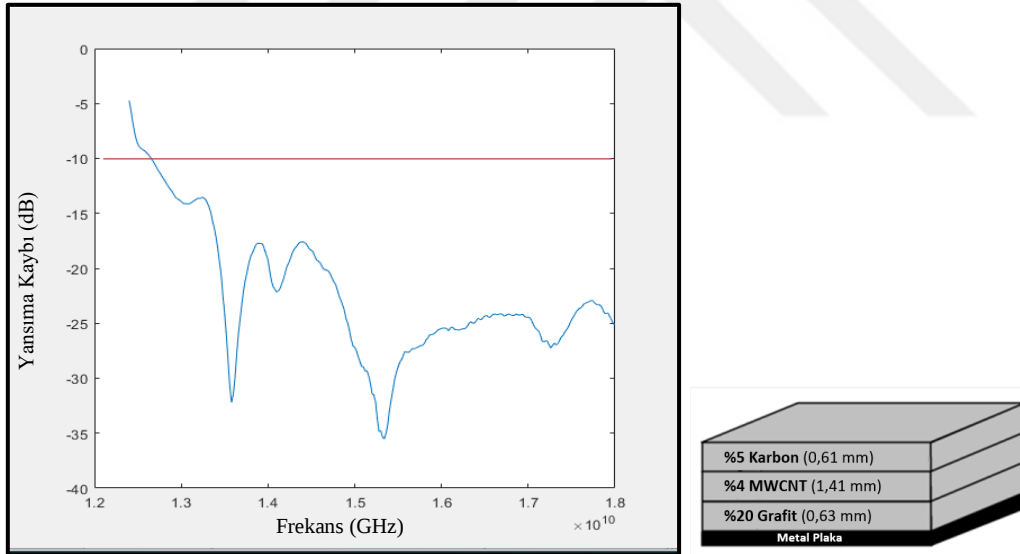


Şekil 5.6. %5 MWCNT + %1 Çinko Borat + %5 Karbon katmanlarına sahip numunenin X-Band yansıma-frekans grafiği

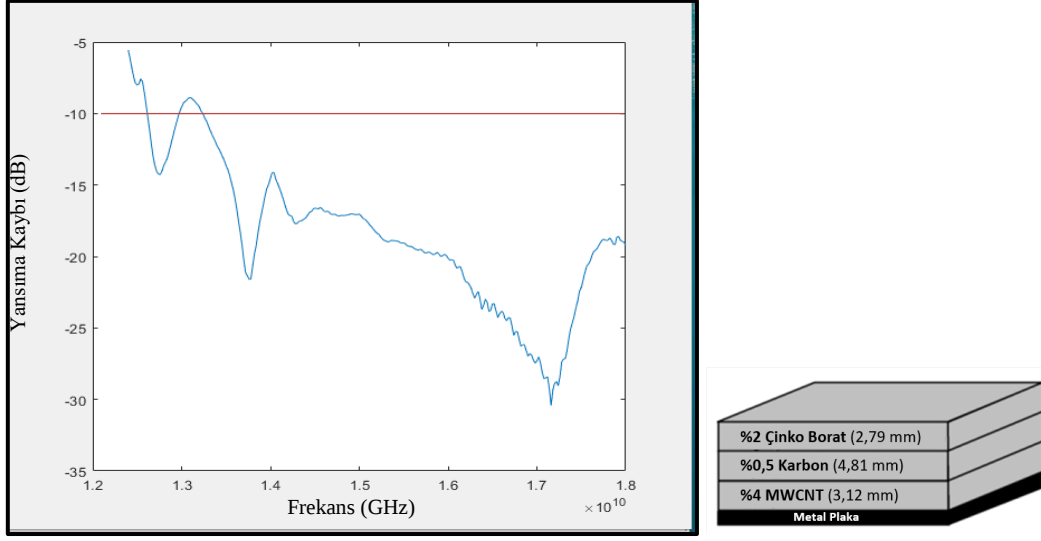
Ku-Bandda elde edilen grafikler;



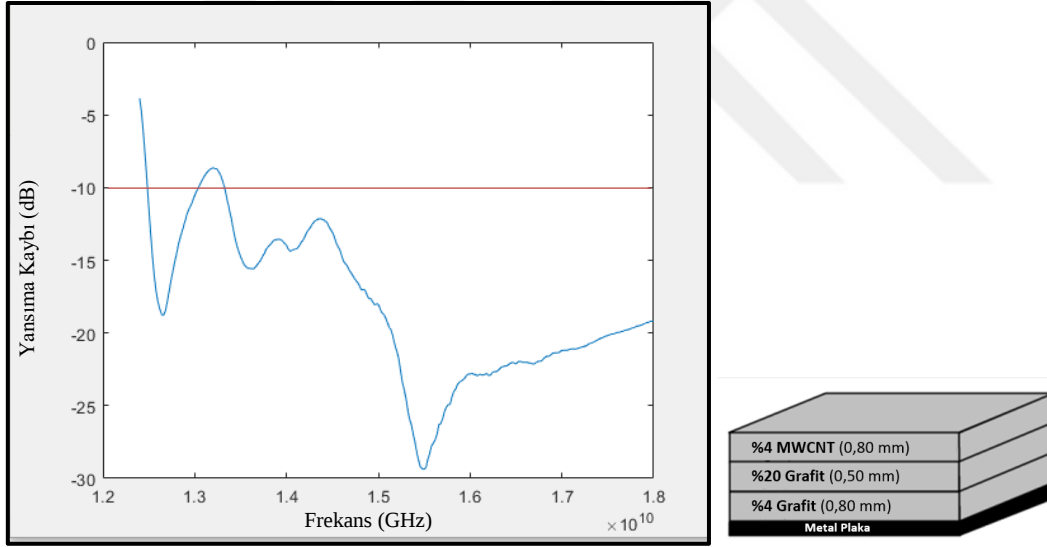
Şekil 5.7. %2 Turmalin + %4 Polianilin + %4 MWCNT katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği



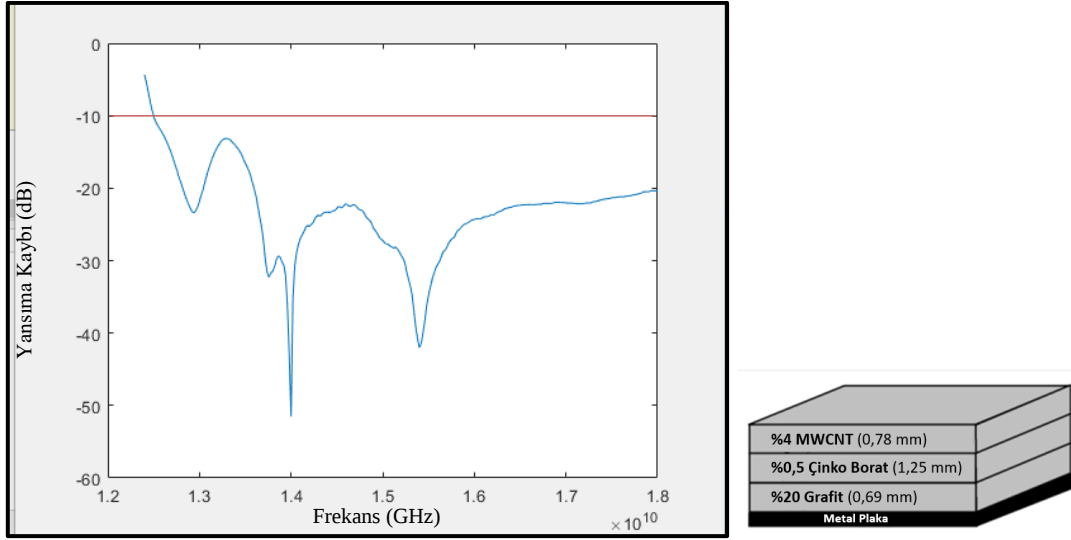
Şekil 5.8. %5 Karbon + %4 MWCNT + %20 Grafit katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği



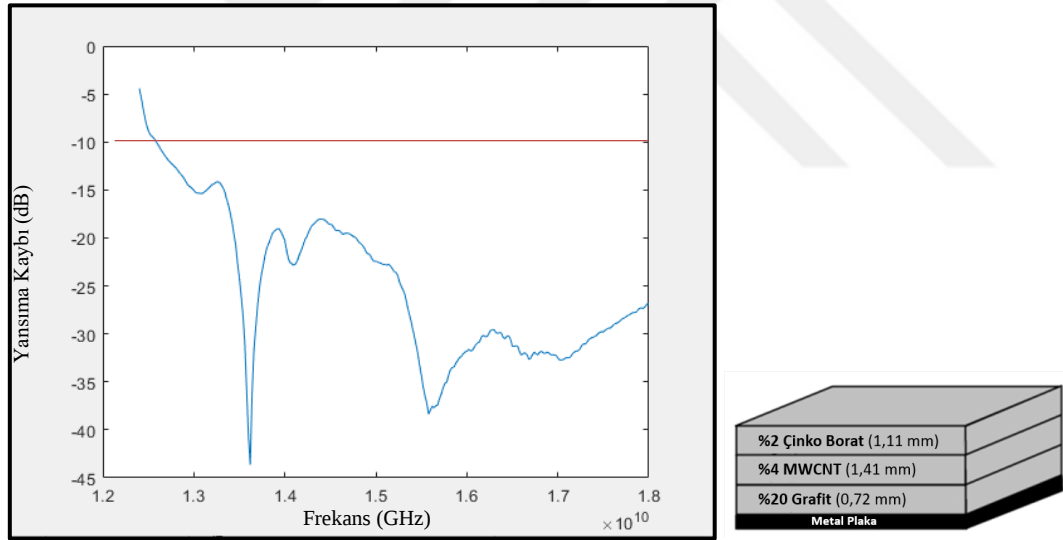
Şekil 5.9. %2 Çinko Borat + %0,5 Karbon + %4 MWCNT katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansımaya-frekans grafiği



Şekil 5.10. %4 MWCNT + %20 Grafit + %4 Grafit katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansımaya-frekans grafiği



Şekil 5.11. %4 MWCNT Karbon + %0,5 Çinko Borat + %20 Grafit katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği



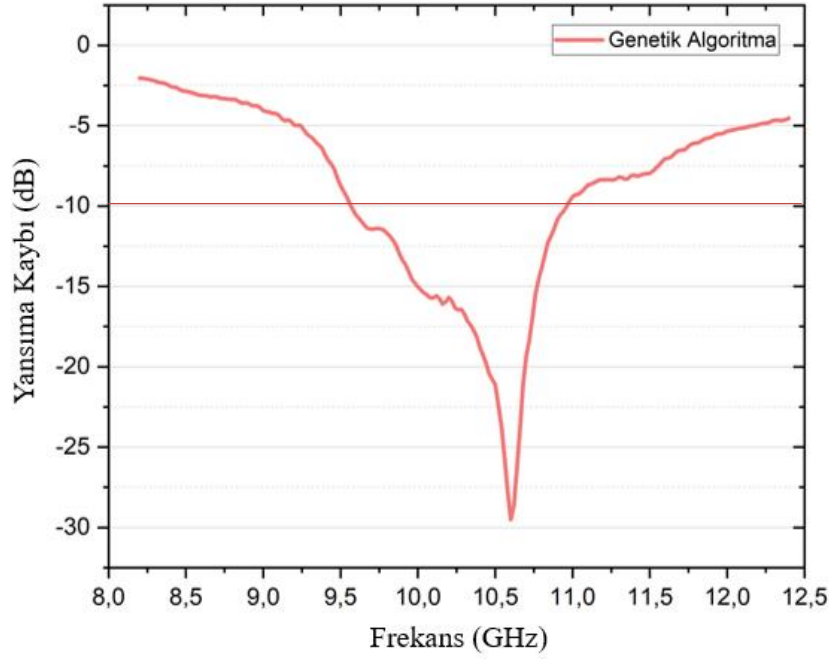
Şekil 5.12. %2 Çinko Borat + %4 MWCNT + %20 Grafit katmanlarına sahip numunenin Ku-Band yansıma-frekans grafiği

Sonuçlar incelenirken üç kriter göz önünde bulundurulmuştur.

- Katman kalınlıklarının laboratuvar ortamında üretilebilecek boyutta olması
- Toplam numune kalınlığının 10 mm'yi geçmemesi
- Katmanların farklı katkı malzemelerinden oluşması

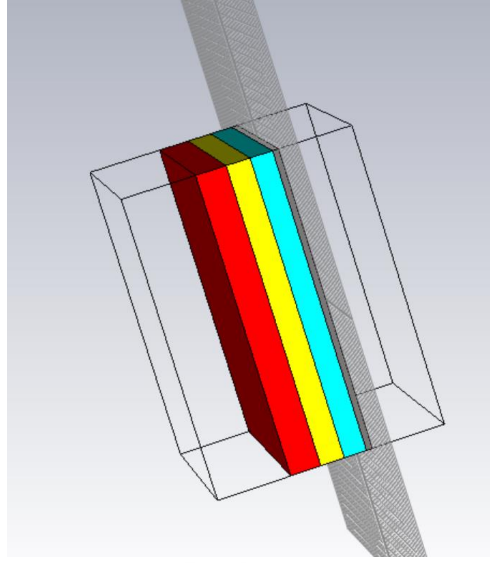
Yapılan değerlendirmeler kapsamında yansımaya kaybı değeri ve laboratuvar ortamında üretilirliği açısından en uygun Katmanlı Kompozit Malzemenin ağırlıkça %5 Karbon, %5 MWCNT ve %1 Turmalin ile oluşturulan ve kalınlıkları sırasıyla 3,90, 3,83 ve 1,81 mm olan yapı olduğuna karar verilmiştir.

Genetik algoritma ile elde edilen sonuçlardan seçilen bu malzemenin X-Band yansımaya kaybı-frekans grafiği şekil 5.13’de görülmektedir.

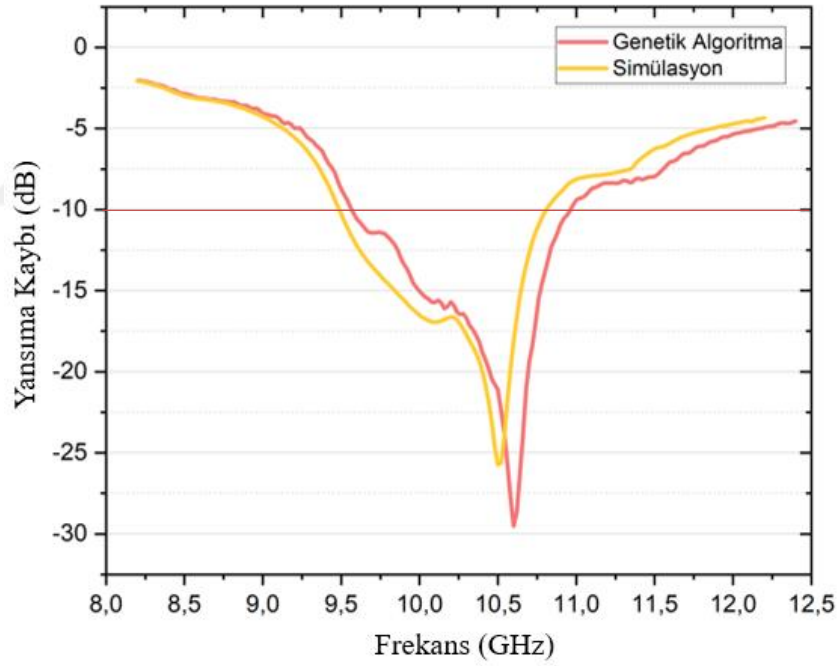


şekil 5.13. Genetik algoritma ile elde edilen sonuçlardan seçilen numunenin X-Band yansımaya kaybı-frekans grafiği

Seçilen numuneye ait ϵ ve μ değerleri aynı zamanda CST Suite programında oluşturulan simülasyona da yüklenmiştir (şekil 5.14). Bu programdan elde edilen sonuç ile Genetik Algoritma sonuçları karşılaştırıldığında büyük oranda benzer olduğu görülmektedir (şekil 5.15). Bu durum MATLAB programı ile hazırlamış olduğumuz kodun doğru olduğunu göstermektedir.



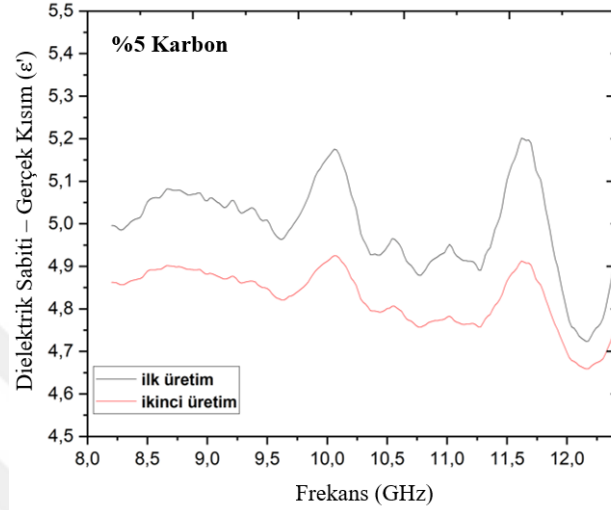
Şekil 5.14. CST Suite programında hazırlanan simülasyon görseli



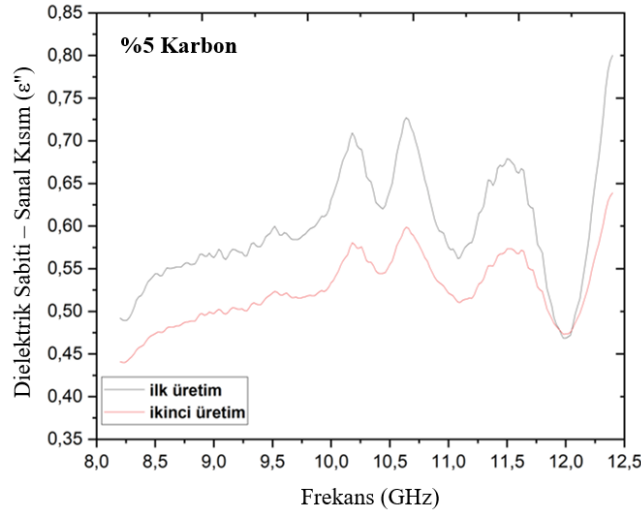
Şekil 5.15. Genetik algoritma ve simülasyon programından elde edilen X-Band yansıma kaybı-frekans grafiklerinin karşılaştırılması

Hazırlanan numunelerin tekrar X-Bandda elektriksel geçirgenlik (ϵ) katsayıları dalga kılavuzunda ölçülmüş ve önceki değerleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.16-Şekil 5.21). Grafiklerde görülen ilk üretim, numunenin ϵ ve μ değerlerinin belirlenmesi ve bu

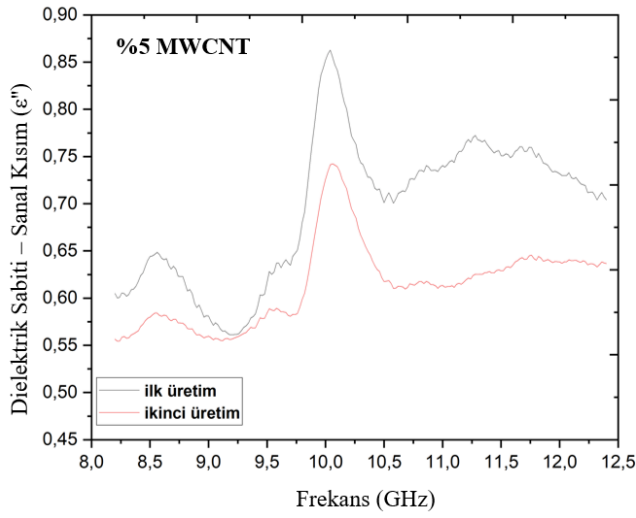
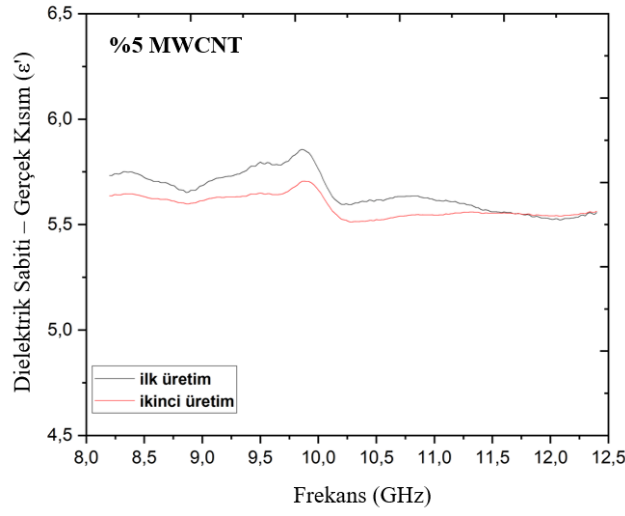
değerleri ile veri tabanının oluşturulması için yapılan ölçümdür. İkinci üretim ise seçilen malzemelerin belirlenen kalınlıklarda üretimi sonrası kontrolü için yapılan ölçümdür. İlk üretim ile ikinci üretim grafikleri çok büyük oranda birbirlerine benzemekle birlikte gözlenen farkın üretim ve ölçüm kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.

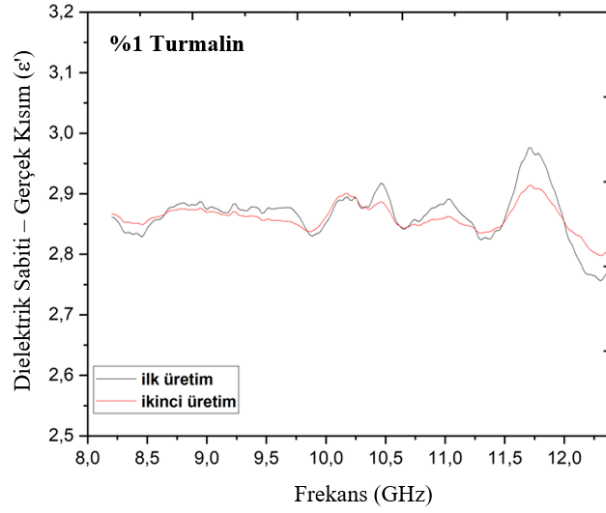


Şekil 5.16. İlk üretim ve ikinci üretim %5 Karbon numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (gerçek kısım) karşılaştırması

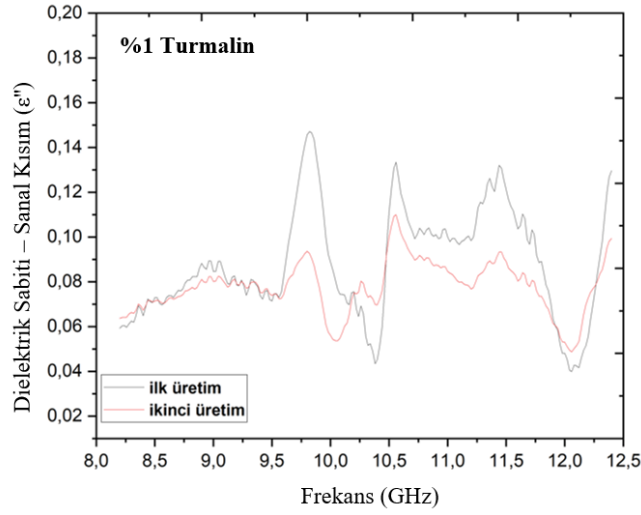


Şekil 5.17. İlk üretim ve ikinci üretim %5 Karbon numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (sanal kısım) karşılaştırması



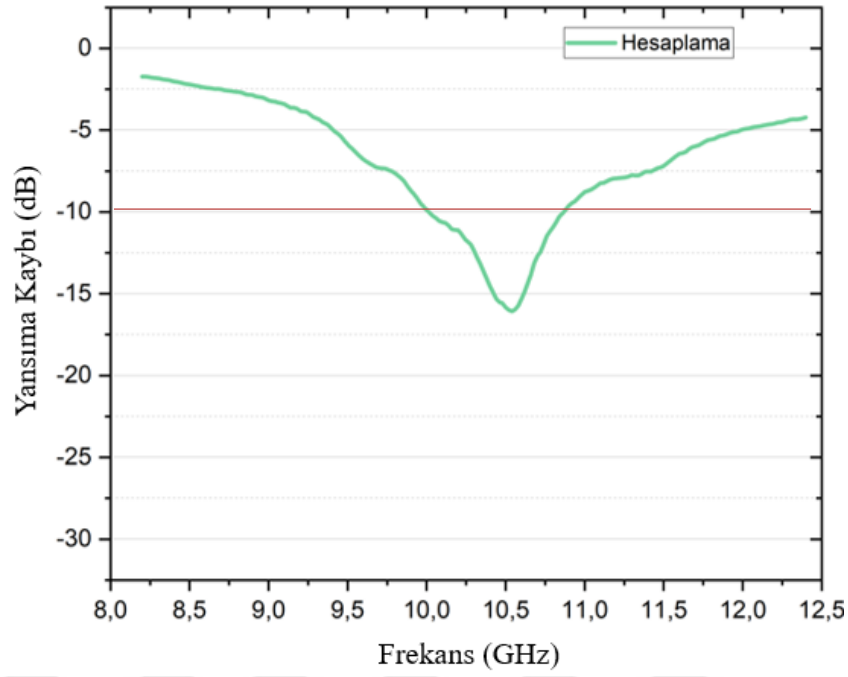


Şekil 5.20. İlk üretim ve ikinci üretim %1 Turmalin numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (gerçek kısım) karşılaştırması



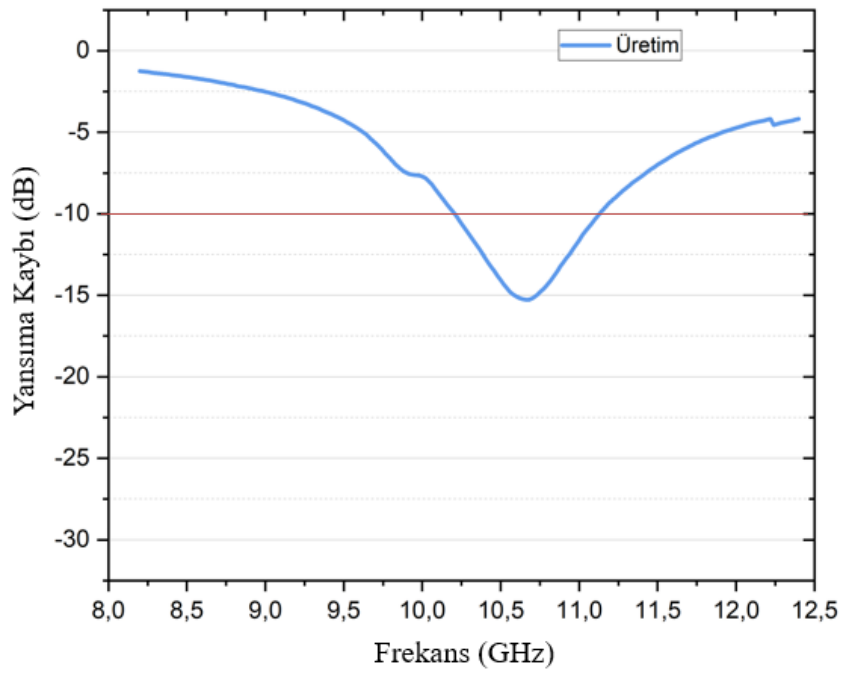
Şekil 5.21. İlk üretim ve ikinci üretim %1 Turmalin numunesinin frekansa göre dielektrik sabiti (sanal kısım) karşılaştırması

Bununla birlikte tekrar üretilen numunelerin dalga kılavuzunda X-Bandda ölçülen elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) katsayıları yazılıma yüklenerek hesaplatılmıştır. Bu şekilde katmanlı malzemenin dalga kılavuzu ölçümü sonrası yaklaşık nasıl bir sonuç vereceği görülmüştür (Şekil 5.22).



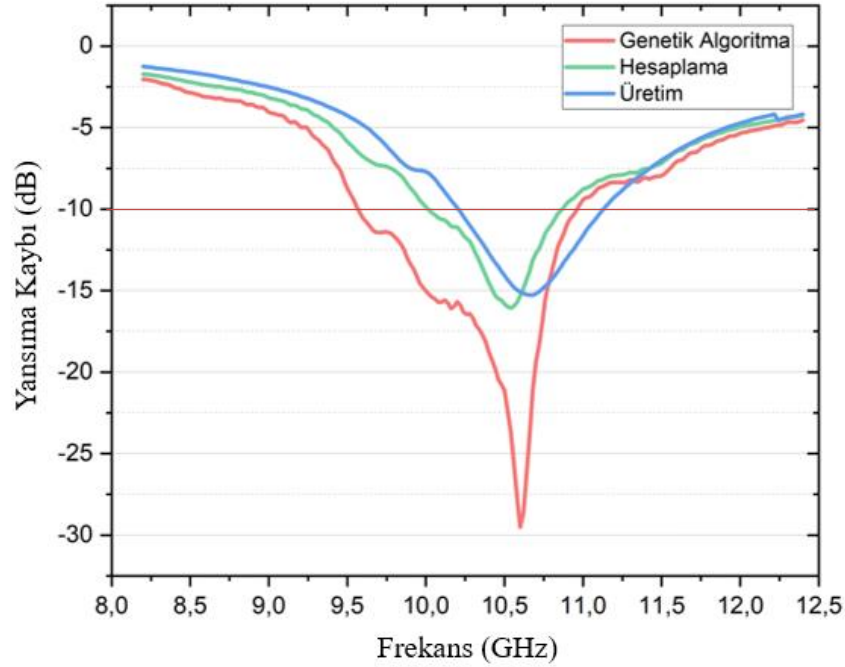
Şekil 5.22. Tekrar üretilen numunelerin yazılım ile hesaplatılan yansıma kaybı-frekans grafiği

X- Band dalga kılavuzuna yerleştirilen katmanlı kompozit malzemenin dB cinsinden yansıma değerleri 8,2-12,4 GHz frekansları arasında ölçülmüştür (Şekil 5.23).



Şekil 5.23. Katmanlı numunenin dalga kılavuzu yansıma kaybı-frekans grafiği

Çalışmalardan elde edilen tüm sonuçlara ait grafikler Şekil 5.24’de verilmiştir. Şekilde katmanlı RSM tasarımının Genetik Algoritma sonucunun, matematiksel hesaplama ve ölçüm sonucu ile karşılaştırmalı yansıma kaybı-frekans değerleri görülmektedir.



Şekil 5.24. Katmanlı RSM tasarımının Genetik Algoritma (GA) sonucunun, matematiksel hesaplama ve ölçüm sonucu ile karşılaştırmalı yansıma kaybı-frekans grafikleri

Şekil 5.24’deki grafikte görülen kırmızı eğri genetik algoritma ile elde edilen eğridir, yeşil eğri üretilen 3 numunenin ϵ ve μ değerlerinin yazılım kodu ile tekrar hesaplatılması ile elde edilen eğridir, mavi eğri ise üretilen 3 numunenin algoritma tarafından belirlenen sırada koyularak dalga kılavuzunda yansıma kaybının ölçülmesi ile elde edilen eğridir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın ilk aşamasında matris malzemesi epoksi reçine olan ve farklı takviye malzemeleri ile hazırlanan partikül takviyeli kompozit malzemelerin dielektrik özelliklerine bağlı olarak X-Band (8,2-12,4 GHz) ve Ku-Band (12,4-18 GHz) frekans aralıklarında elektromanyetik dalga soğurma özellikleri incelenmiştir. Literatür araştırması sonrası belirlenen 10 farklı katkı malzemesi ve katkısız reçine ile birlikte katkı oranları %0,5 ile % 60 arasında değişen 50 farklı numune hazırlanmıştır. Bu numunelerin herbirinin dielektrik ölçümleri dalga kılavuzu ile X-Band ve Ku-Band frekans bandlarında yapılarak çalışma için geniş bir veri tabanı oluşturulmuştur.

Çalışmanın ikinci aşamasında elektromanyetik yansıma kaybı (RL) formülü MATLAB programında yazılmış ve genetik algoritma modülü kullanılarak bir optimizasyon kodu oluşturulmuştur. Oluşturulan genetik algoritmaya ölçüm sonuçlarından elde edilen veri tabanı yüklenerek kalınlığı 10 mm'den küçük ve farklı malzemelerden oluşan 3 katmanlı bir radar soğurucu kompozit tasarımı belirlenmiştir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında genetik algoritmanın önerdiği sonuçlardan yansıma kaybı değeri en düşük olan ve laboratuvar üretimine uygun bir katmanlı kompozit malzeme önerisi seçilmiştir. Seçilen bu kompozit malzemenin katmanları genetik algoritmanın önerdiği kalınlıklarda tekrar üretilmiş ve dalga kılavuzunda dielektrik ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra katmanları oluşturacak numuneler genetik algoritma ile belirlenen sırada dalga kılavuzuna yerleştirilerek kompozit malzemenin yansıma kaybı ölçülmüştür. Ölçülen değerlere bağlı olarak yansıma kaybı-frekans grafiği elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Katman kalınlığının minimum olması istenen bir özelliktir. Bunun matematiksel hesaplama ve algoritmalar ile çalışıldığı literatürde çokça görülmektedir. Ancak bu tip çalışmalarda elde edilen kalınlıkların katmanlı bir malzeme olarak üretimi zordur. Bu nedenle çalışmalar ya teoriktir ya da boya uygulamaları üzerinedir.
- Literatürdeki bazı çalışmalarda elektriksel ve manyetik özellikleri tanımlı malzeme setleri kullanılarak teorik çalışmalar yürütüldüğü görülmüştür.

- Literatürde birçok çalışmada MWCNT ve Karbon elektromanyetik soğurma uygulamalarında kullanılmaktadır. Hazırlanan genetik algoritmanın bu malzemeleri seçmesi literatür ile uyumludur.
- Bununla beraber literatürde Turmalinin porazif yapısının elektromanyetik soğurmaya olan katkısı ve mikron boyutlu partiküllerinin hafif malzemelerin üretiminde kullanımı öne çıkarılmaktadır. Ancak turmalin ile radar soğurucu kompozit malzeme üretimini içeren çalışmaya literatür araştırmasında rastlanmamıştır. Buna dayanarak turmalin katkılı çok katmanlı radar soğurucu kompozit malzeme üretimini hakkındaki ilk çalışmaya bu tez kapsamında yapılmıştır.
- Şekil 5.24’de görülebileceği gibi Genetik algoritma ile elde edilen maksimum yansıma kaybı değeri, matematiksel olarak hesaplanan sonuçlar ve üretilen katmanlı kompozitin yansıma kaybı değerinden farklı olmasının nedeni üretilen numunelerin homojinitesi, numune kalınlığı ve numune yüzey özelliklerindeki farklılıklar ile ölçümler esnasındaki sıcaklık ve nem faktörlerinden kaynaklanmış olabileceği değerlendirilir. Ayrıca hesaplamalar logaritmik olduğundan ϵ ve μ değerlerindeki küçük farklar sonuçlarda büyük değişikliğe neden olmaktadır. Bu durum literatür ile uyusmaktadır.
- Şekil 5.24’de Genetik algoritma ile elde edilen sonuçlar ile matematiksel olarak hesaplanan sonuçların 10,54 GHz ve 10,6 GHz frekanslarında pik yaptığı görülmektedir. Üretilen katmanlı kompozit ise 10,66 GHz’de pik yapmış ve diğer sonuçlara göre yaklaşık 0,12 GHz kayma göstermiştir. Yansıma kayıplarındaki bu şekilde görülen küçük kaymalar üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır. Katmanlı kompozit malzemelerin elektromanyetik soğurma performansını daha da artırmak için, optimum tasarımdan daha hassas imalat teknikleriyle yararlanılmalıdır.
- Bu tez çalışmasının sonucunda sırasıyla 3,90 mm kalınlığında %5 Karbon, 3,83 mm kalınlığında %5 MWCNT ve 1,81 mm kalınlığında %1 Turmalin ile oluşturulan, toplam kalınlığı 9,54 mm olan yapının 10,2-11,12 GHz frekansları arasında -10 dB altında soğurma ve 10,6 merkez frekansında -15 dB maksimum soğurma sağladığı belirlenmiştir.

- Bu ürün gerçek hayatta metal yüzeyli bir radar hedefinde kullanıldığında, kullanılmadığı duruma göre gelen sinyali %90 (< -5 dB) ila %99 (< -10 dB) arasında zayıflatma yeteneğine sahip olduğu öngörülmektedir.
- Bu tez çalışmasında, çalışma kapsamında oluşturulan veri tabanındaki malzemeler ile genetik algoritma kullanılarak belirlenen 3 katmanlı bir RSM tasarlanabildiği ve bu RSM'nin üretilebilir olduğu gösterilmiştir.
- Bu çalışma ile elde edilen veriler “Hava Platformları İçin Elektromanyetik Tasarım Destekli Çok Geniş Bantlı Radar Soğurucu Malzemenin Geliştirilmesi” Projesi kapsamında uygulanan çalışmalarda kullanılmıştır. Bununla birlikte geliştirilen malzeme, proje çıktısı olarak hava platformlarına kullanıma yönelik gelecek çalışmalarda kullanılacaktır. Ayrıca elde edilen veri tabanının genişletilmesi amacıyla literatürde çalışılan yeni malzemeler eklenecek ve daha geniş bantda daha ince katmanlı kompozit malzeme geliştirilmesine yönelik çalışmalara devam edilecektir. Geliştirilen kompozit malzemelerin çevre koşullarına dayanımı ve mukavemeti üzerine ön çalışmalara başlanması da planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akman, Ö. (2012). Mikrodalga Soğurucu Nanoparçacıkların Araştırılması. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 318353.
- Balasubramanian, M. (2013). *Composite Materials and Processing*. Florida: CRC Press.
- Bogdal, D., Prociak, A. (2007). *Microwave-Enhanced Polymer Chemistry and Technology*. Iowa: Blackwell Publishing.
- Buragohain, M. K. (2018). *Composite Structures Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*. Florida: CRC Press.
- Callister, W. D., Rethwish, D. G. (2017). *Materials Science and Engineering An Introduction* (10th ed.). New York: Wiley.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural Composite Materials*. Ohio: ASM International .
- Chang, J., City, H. Y. (2010). Anti-Electromagnetic Interference Material Arrangement. U.S. Patent No. 0059243., *United States Patent and Trademark Office*.
- Chen, J., Yu, Z., Jin, H. (2022). Nondestructive Testing and Evaluation Techniques of Defects in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review. *Frontiers in Materials*, 9(October), 1–29. DOI:10.3389/fmats.2022.986645.
- Chen, L. F., Ong, C. K., Neo, C. P., Varadan, V. V., Varadan, V. K. (2004). *Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Chen, W., Zheng, X., He, X., Su, Y., Wang, J., Yang, J., Chen, S., Zheng, Z. (2020). Achieving Full Effective Microwave Absorption in X Band by Double-layered Design of Glass Fiber Epoxy Composites Containing MWCNTs and Fe₃O₄ NPs. *Polymer Testing*, 86(February), 106448. DOI:10.1016/j.polymertesting.2020.106448.
- Chen, X., Liu, H., Hu, D., Liu, H., Ma, W. (2021). Recent Advances in Carbon Nanotubes-Based Microwave Absorbing Composites. *Ceramics International*, 47(17), 23749–23761. DOI:10.1016/j.ceramint.2021.05.219.
- Chin, W. S., Lee, D. G. (2007). Development of the Composite RAS (Radar Absorbing Structure) for the X-Band Frequency Range. *Composite Structures*, 77(4), 457–465. DOI:10.1016/j.compstruct.2005.07.021.
- Choi, I., Lee, D., Lee, D. G. (2015a). Optimum Design Method of a Nano-composite Radar Absorbing Structure Considering Dielectric Properties in the X-Band Frequency Range. *Composite Structures*, 119, 218–226. DOI:10.1016/j.compstruct.2014.08.032.

- Choi, I., Lee, D., ve Lee, D. G. (2015b). Radar Absorbing Composite Structures Dispersed With Nano-Conductive Particles. *Composite Structures*, 122, 23–30. DOI:10.1016/j.compstruct.2014.11.040.
- Choi, J., ve Jung, H. T. (2015). A New Triple-Layered Composite for High-Performance Broadband Microwave Absorption. *Composite Structures*, 122, 166–171. DOI:10.1016/j.compstruct.2014.11.020.
- Elmahaishi, M. F., Azis, R. S., Ismail, I., Muhammad, F. D. (2022). A Review on Electromagnetic Microwave Absorption Properties: Their Materials and Performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2188–2220. DOI:10.1016/j.jmrt.2022.07.140.
- Garai, G. (2022). Application of Genetic Algorithm in Numerous Scientific Fields. Ventura, S., (Ed), *Genetic Algorithms* (225–240). London: IntechOpen.
- Gay, D., Hoa, S. V., Tsai, S. W. (2003) *Composite Materials Design and Applications* (4th ed.) Florida: CRC Press.
- Gupta, M., Eugene, W. W. L. (2011). *Microwaves and Metals*. Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- Gurer, G. (2010). Design and Characterization of Electromagnetic Wave Absorbing Structural Composites. Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara, 269556.
- Hamat, Ö. (2014). Design and Development Of Electromagnetic Wave Absorbing Composites Effective at Microwave Frequencies. Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara, 381006.
- Haupt, R. L., Haupt, S. E. (2004). *Practical Genetic Algorithms*. (2nd ed.) New Jersey: John Wiley & Sons.
- Hu, D. (2010). Development of the Epoxy Composite Complex Permittivity and Its Application in Wind Turbine Blades. Doktora Tezi, Queen Mary, University of London, İngiltere.
- Hu, Y., Chen, X., Tang, M. (2014). Research development and prospects of functional tourmaline composites. *Earth Science Frontiers*, 21(5), 331–337. DOI:10.13745/j.esf.2014.05.028.
- Jalali, M. (2013). Improving Electromagnetic Shielding with Metallic Nanoparticles. Doktora Tezi, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Jelmy, E. J., Lakshmanan, M., Kothurkar, N. K. (2019). Microwave Absorbing Behavior of Glass Fiber Reinforced MWCNT-PANi/Epoxy Composite Laminates. *Materials Today: Proceedings*, 26, 36–43. DOI:10.1016/j.matpr.2019.04.203.

- Jialu, C. (2011). Broadband Dielectric Properties of Impregnated Transformer Paper Insulation at Various Moisture Contents. Yüksek Lisans Tezi, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, İsveç.
- Kalpakistan, S., Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (5th ed.). New Delhi: Pearson.
- Kangal, S. (2013). Development of Radar-Absorbing Composite Structures. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir, 342939 .
- Kasgoz, A., Korkmaz, M., Durmus, A. (2019). Compositional and Structural Design of Thermoplastic Polyurethane/Carbon Based Single and Multi-layer Composite Sheets for High-performance X-Band Microwave Absorbing Applications. *Polymer*, 180(February), 121672. DOI:10.1016/j.polymer.2019.121672.
- Keysight Technologies. (2017). Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials.
- Kim, P. C., Lee, D. G., (2009). Composite Sandwich Constructions for Absorbing the Electromagnetic Waves. *Composite Structures*, 87(2009), 161–167. DOI:10.1016/j.compstruct.2008.05.015.
- Knott, E. F., Shaeffer, J. F., Tuley, M. T. (2004). *Radar Cross Section* (2nd ed.). Kuzey Karolina: SciTech Publishing.
- Kondo, K., Miyagawa, M., Sakai, Y. (2006). Electromagnetic Wave Absorbing Sheet, Japonya Patent No. JP2006080502A, *Monolith Co Ltd*, .
- Korkusuz, O. B. (2021). Polimer Matrisli Kompozitlerin Lazer ile İşlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 667752.
- Kotsuka, Y. (2019). *Electromagnetic Wave Absorbers: Detailed Theories and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Kumar, A., Singh, S., Singh, D. (2017). Development of Double Layer Microwave Absorber Using Genetic Algorithm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 234(1). DOI:10.1088/1757-899X/234/1/012009.
- Kumar, M., Husain, M., Upreti, N., Gupta, D. (2010). Genetic Algorithm: Review and Application. *SSRN Electronic Journal*, 2(2), 451–454. DOI:10.2139/ssrn.3529843.
- Kumar, R., Sahoo, S., Joanni, E., Singh, R. K., Tan, W. K., Kar, K. K., Matsuda, A. (2021). Recent Progress on Carbon-Based Composite Materials for Microwave Electromagnetic Interference Shielding. *Carbon*, 177, 304–331. DOI:10.1016/j.carbon.2021.02.091.

- Lakshmi, K. (2007). Development of Thermoplastic Conducting Polymer Composites Based On Polyaniline and Polythiophenes for Microwave and Electrical Applications. Doktora Tezi, Cochin University of Science and Technology, Kochi, Hindistan.
- Lee, S. E., Kang, J. H., Kim, C. G. (2006). Fabrication and Design of Multi-layered Radar Absorbing Structures of MWNT-Filled Glass/Epoxy Plain-Weave Composites. *Composite Structures*, 76(4), 397–405. DOI:10.1016/j.compstruct.2005.11.036.
- Ling, A., Tan, G., Man, Q., Lou, Y., Chen, S., Gu, X., Li, R. W., Pan, J., Liu, X. (2019). Broadband Microwave Absorbing Materials Based on MWCNTs' Electromagnetic Wave Filtering Effect. *Composites Part B: Engineering*, 171(January), 214–221. DOI:10.1016/j.compositesb.2019.04.034.
- Liu, D. (2022). Structure Optimization of Carbon Nanotubes Based on Swarm Intelligence Algorithm and Evolutionary Computation. *Journal of Nanomaterials*, 2022. DOI:10.1155/2022/2202936.
- Micheli, D. (2011). *Radar Absorbing Materials and Microwave Shielding Structures Design: By using Multilayer Composite Materials, Nanomaterials and Evolutionary Computation*. Saarbrücken:LAP Lambert Academic Publishing.
- Micheli, D., Apollo, C., Pastore, R., Morles, R. B., Laurenzi, S., Marchetti, M. (2011). Nanostructured Composite Materials for Electromagnetic Interference Shielding Applications. *Acta Astronautica*, 69(9–10), 747–757. DOI:10.1016/j.actaastro.2011.06.004.
- Micheli, D., Vricella, A., Pastore, R., Marchetti, M. (2014). Synthesis and Electromagnetic Characterization of Frequency Selective Radar Absorbing Materials Using Carbon Nanopowders. *Carbon*, 77, 756–774. DOI:10.1016/j.carbon.2014.05.080.
- Neelakanta, P. S. (1995). *Handbook of Electromagnetic Materials: Monolithic and Composite Versions and Their Applications*. Florida: CRC Press.
- Ngo, T.,(2012). Introduction to Composite Materials. Ngo, T.,(Ed.), *Composite and Nanocomposite Materials - From Knowledge to Industrial Applications* (1-27). London: IntechOpen.
- Nijssen, R.P.L. (2015). *Composite Materials: An Introduction*. VKCN Publication.
- Oh, J. H., Oh, K. S., Kim, C. G., Hong, C. S. (2004). Design of Radar Absorbing Structures Using Glass/Epoxy Composite Containing Carbon Black in X-Band Frequency Ranges. *Composites Part B: Engineering*, 35(1), 49–56. DOI:10.1016/j.compositesb.2003.08.011.

- Pang, H., Duan, Y., Huang, L., Song, L., Liu, J., Zhang, T., Yang, X., Liu, J., Ma, X., Di, J., Liu, X. (2021). Research Advances in Composition, Structure and Mechanisms of Microwave Absorbing Materials. *Composites Part B: Engineering*, 224(May), 109173. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.109173.
- Park, K. Y., Lee, S. E., Kim, C. G., ve Han, J. H. (2006). Fabrication and Electromagnetic Characteristics of Electromagnetic Wave Absorbing Sandwich Structures. *Composites Science and Technology*, 66(3–4), 576–584. DOI:10.1016/j.compscitech.2005.05.034.
- Poh, N. (2010). Calculations of Microwave Permeability, Permittivity and Absorption Properties of Magnetic Particle Composites. Doktora Tezi, National University of Singapore, Singapore.
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave Engineering* (4th ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Rouhi, M., Hajizadeh, Z., Taheri-Ledari, R., Maleki, A., Babamoradi, M. (2022). A Review of Mechanistic Principles of Microwave Absorption by Pure and Composite Nanomaterials. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 286(September), 116021. DOI:10.1016/j.mseb.2022.116021.
- Ruiz-Perez, F., López-Estrada, S. M., Tolentino-Hernández, R. V., Caballero-Briones, F. (2022). Carbon-Based Radar Absorbing Materials: A Critical Review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 7(3). DOI:10.1016/j.jsamd.2022.100454.
- Sakurai, M. (2005). Electromagnetic Shield Cover for Portable Telephone. Japonya Patent No. JP2005277586A.
- Sharma, S. (2021). *Composite Materials Mechanics, Manufacturing and Modeling*. Florida: CRC Press.
- Şanlı, F. (2021). Nanopartikül Katkılı Elyaf Takviyeli Tabakalı Kompozitlerin Mekanik ve Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 680000.
- Toktas, A., Ustun, D., Yigit, E., Sabanci, K., Tekbas, M. (2018). Optimally Synthesizing Multilayer Radar Absorbing Material (RAM) Using Artificial Bee Colony Algorithm. *2018 XXIIIrd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*, Tbilisi, Georgia, 24-27 Eylül 2018.
- 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. DOI:10.1109/TMTT.2019.2922600.

- Toktas, A., Ustun, D., Tekbas, M. (2020). Global Optimisation Scheme Based on Triple-Objective ABC Algorithm for Designing Fully Optimised Multi-layer Radar Absorbing Material. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 14(8), 800–811. DOI:10.1049/iet-map.2019.0868 .
- Tretyakov, O. A., Erden, F. (2021). A Novel Simple Format of Maxwell's Equations in SI Units. *IEEE Access*, 9, 88272–88278. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3089673.
- Ünal, İ., Açıklan, E., Yücel, Z. (2018). Hava Platformları İçin Elektromanyetik Tasarım Destekli Çok Geniş Bantlı Radar Soğurucu Kompozit Malzeme Geliştirilmesi Projesi Gelişme Raporu, TÜBİTAK MAM.
- URL-1:<https://www.comsol.com/blogs/introducing-the-composite-materials-module> (Ziyaret tarihi: 22 Nisan 2023).
- URL-2:<https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-a-uniform-plane-wave-and-its-properties> (Ziyaret tarihi: 06 Mayıs 2023).
- URL-3:[https://www.radartutorial.eu/07.waves/Frekans- ve Dalga Boyu Bölgeleri.tr.html](https://www.radartutorial.eu/07.waves/Frekans-veDalgaBoy/Bolgeleri.tr.html) (Ziyaret tarihi: 06 Mayıs 2023).
- URL-4: <https://www.maxwells-equations.com/summary.php> (Ziyaret tarihi: 09 Mayıs 2023).
- Vinoy, K. J., Jha, R. M. (1996). *Radar Absorbing Materials From Theory to Design and Characterization*. New York: Springer.
- Wang, C., Mingji, C., Hongshuai, L., Kai, Y., Huimin, L., Weibin, W., Daining, F., (2017). Radar Stealth and Mechanical Properties of a Broadband Radar Absorbing Structure. *Composites Part B*, 123, 19-27. DOI:10.1016/j.compositesb.2017.05.005.
- Xue, G., Wang, Y., Zhang, L., Zhang, X. (2010). Preparation of Tourmaline Composite Materials and Its Property of Far Infrared Radiance. *Advanced Materials Research*, 96, 165–170. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.96.165.
- Zhang, J., Ma, M., Bi, Y., Liao, Z., Ma, Y., Huang, W., Lyu, P., Feng, C. (2022). A Review of Epoxy-Based Composite Materials: Synthesis, Structure and Application for Electromagnetic Wave Absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 922, 166096. DOI:10.1016/j.jallcom.2022.166096.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Bora, M. Ö., Fidan, S., Çoban, O., **Yücel, Z.** (2014). Scratch behavior of glass fiber reinforced polyester matrix composite after solid particle erosion. *Polymer Composites*, 36(11), 1958–1966. DOI:10.1002/pc.23105



ÖZGEÇMİŞ

Zafer YÜCEL ilk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2001 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde başladığı Makine Mühendisliği eğitimini 2005 yılında tamamladı. Aynı yıl içinde Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. Ayrıca 2005 yılında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü'nde bursiyer araştırmacı olarak, 2007 yılına ise araştırmacı olarak göreve başlayan YÜCEL, halen görevine devam etmektedir. 2008 yılında Yüksek Mühendis unvanı aldı ve aynı yıl Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı.

