BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AVİYONİK SİSTEMLERDE ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA VE HAVA ARAÇLARI İÇİN KARBON FİBER KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yücel ÇOŞKUN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

ARALIK 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AVİYONİK SİSTEMLERDE ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA VE HAVA ARAÇLARI İÇİN KARBON FİBER KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yücel ÇOŞKUN
(19278034093)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Barış TABAKCIOĞLU

ARALIK 2021

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 19278034093 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Yücel ÇOŞKUN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "AVİYONİK SİSTEMLERDE ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA VE HAVA ARAÇLARI İÇİN KARBON FİBER KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mehmet Barış TABAKCIOĞLU**.....
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Turgut ÖZTÜRK** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Selahattin KOŞUNALP …….....
Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 23 Aralık 2021

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 200Y013 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Yücel ÇOŞKUN

İmzası :

Aileme,

ÖNSÖZ

Bursa Teknik Üniversitesi'nde yapmış olduğum bu tez çalışmasında, aviyonik sistemlerde elektromanyetik kalkanlama ve hava araçları için karbon fiber kompozit malzeme geliştirilmesi konulu araştırmalarım neticesinde elde edilen bilgileri ilgilerinize sunuyorum. Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde yardımlarını esirgemeyen, akademik deneyimiyle beni yönlendiren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Barış TABAKCIOĞLU başta olmak üzere Bursa Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğindeki hocalarıma, manevi olarak desteklerini her an yanımda hissettiren kıymetli aileme en içten teşekkürlerimi borç bilirim.

Aralık 2021 Yücel ÇOŞKUN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **viii**
SEMBOLLER ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA **3**
2.1 Elektromanyetik Dalga ve Propagasyonu 3
2.2 Matematiksel Olarak Elektromanyetik Kalkanlamanın İfadesi 6
3. RADAR SİSTEMLERİ VE GİZLİLİK TEKNOLOJİSİ **11**
4. KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER **15**
4.1 Polimer Matris Kompozitler 16
4.2 Metal Matris Kompozitler 18
4.3 Seramik Matris Kompozitler 18
4.4 Karbon Matris Kompozitler 18
4.5 Kompozit Üretim Yöntemleri 18
4.5.1 Elle yatırma ve püskürtme yöntemi 19
4.5.2 Elyaf sarma yöntemi 19
4.5.3 Vakum infüzyon yöntemi 19
5. MATERYAL VE YÖNTEM **21**
5.1 Deneysel Çalışma 21
5.1.1 Kompozit plakaların üretimi 22
5.1.2 Ölçümler 24
5.1.3 Bulgular ve tartışma 26
5.2 Simülasyon Çalışması 37
6. SONUÇ **49**
KAYNAKLAR **51**
ÖZGEÇMİŞ **55**

KISALTMALAR

CFRP **:** Karbon Fiber Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
dB **:** Desibel
EKE **:** Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliği
EMI **:** Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference)
FEM **:** Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)
GHz **:** Giga Hertz
GPa **:** Giga Pascal
MHz **:** Mega Hertz
MPa **:** Mega Pascal
PAN **:** Poliakrilonitril (Polyacrylonitril)
RKA **:** Radar Kesit Alanı
SEM **:** Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)

SEMBOLLER

A_{dB} : Soğurma Kaybı
A_e : Etken Anten Yüzeyi
A_p : Öngörülen Hedef Kesit Alanı
B : Manyetik Akı Yoğunluğu
c : Işık Hızı
d : Yönlülük Oranı
D : Elektrik Akı Yoğunluğu
E : Elektrik Alan
f : Frekans
G : Anten Kazancı
H : Manyetik Alan
J : Akım Yoğunluğu
M_{dB} : Çoklu Yansıma Kaybı
P : Güç
P_D : Güç Yoğunluğu
r : Yansıtıcılık Oranı
R : Radar Vericisinden Uzaklık
R_{dB} : Yansıma Kaybı
SE_{dB} : Kalkanlama Etkinliği
t : Kalınlık
T : İletim Katsayısı
α : Sönümleme Katsayısı
β : Çoklu Yansıma Kaybı
β_0 : Gelen Işın ve Saçılan Işın Arasındaki Açı
γ : Yayılma Sabiti
δ : Deri Kalınlığı
ε : Dielektrik Sabiti
η : Ortam Empedansı
η_0 : Boşluğun Empedansı

λ : Dalga Boyu

μ : Manyetik Geçirgenlik

ρ : Yansıma Katsayısı

ρ_v : Elektrik Yük Yoğunluğu

σ : Radar Kesit Alanı

σ_c : İletkenlik

ω : Açısal Frekans

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Boşluk ve birinci set malzemeler için zayıflama……...**26**
Çizelge 5.2 : Boşluk ve ikinci set malzemeler için zayıflama……**31**
Çizelge 5.3 : Birinci set malzemelerin yansıtma ölçümü. **36**
Çizelge 5.4 : İkinci set malzemelerin yansıtma ölçümü **36**
Çizelge 5.5 : EKE seviyeleri……..**37**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Elektromanyetik dalga yayılımı **3**
Şekil 2.2 : Elektromanyetik spektrum ve bazı frekanslardaki uygulamalar..... **4**
Şekil 2.3 : Kaynaktan mesafeye göre ayırıcı alanlar. **5**
Şekil 2.4 : Tek katlı kalkan modeli **6**
Şekil 2.5 : Elektromanyetik kalkanlamanın mekanizması..... **9**
Şekil 3.1 : Monostatik ve bistatik radarlar..... **11**
Şekil 3.2 : Farklı yönlere saçılan ve absorbe edilen radar dalgaları..... **14**
Şekil 4.1 : Kompozit yapının şeması ve bileşenleri..... **15**
Şekil 4.2 : Kompozit yapının mikro boyuttaki görünümü..... **16**
Şekil 4.3 : PAN bazlı karbon fiberin SEM görünümü..... **17**
Şekil 4.4 : Püskürtme yönteminin şeması. **19**
Şekil 4.5 : Vakum infüzyon yönteminin şeması..... **20**
Şekil 5.1 : (a) Tek yönlü karbon fiber kumaş, (b) Çift yönlü 0°/90° karbon fiber kumaş, (c) Çift yönlü 0°/90° cam fiber kumaş **22**
Şekil 5.2 : Elle yatırma yöntemi..... ..... **23**
Şekil 5.3 : Kürlenme aşaması. **23**
Şekil 5.4 : EKE ölçüm düzeneği..... **24**
Şekil 5.5 : Verici kısmı..... **25**
Şekil 5.6 : Alıcı kısmı..... **25**
Şekil 5.7 : Deri kalınlığının frekansa bağlı değişimi..... **28**
Şekil 5.8 : [0°, 0°] ve [0°, 0°, 0°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama.. **29**
Şekil 5.9 : [0°, 0°] ve [0°, 90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama….. **29**
Şekil 5.10 : Boşluk ve [0°, 90°, 0°] oryantasyonlu kompozit plaka için zayıflama..... **30**
Şekil 5.11 : Birinci set malzemelerin EKE'leri **30**
Şekil 5.12 : [0°, 90°] ve [0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama..... **33**
Şekil 5.13 : [0°, 90°, 0°] ve [0°/90°, 0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama..... **33**
Şekil 5.14 : [0°/90°, 0°/90°] ve [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama..... **34**
Şekil 5.15 : Boşluk ve [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] oryantasyonlu kompozit plaka için zayıflama. **34**
Şekil 5.16 : İkinci set malzemelerin EKE'leri **35**
Şekil 5.17 : Antenlerin konumu ve yansıtma ölçümü..... **36**
Şekil 5.18 : Hava kesiti için elektrik alan simülasyonu..... **38**
Şekil 5.19 : Alüminyum için elektrik alan simülasyonu **39**
Şekil 5.20 : Demir için elektrik alan simülasyonu..... **39**
Şekil 5.21 : FR-4 için elektrik alan simülasyonu..... **40**

Şekil 5.22 : [0°, 90°, 0°] oryantasyonlu kompozit malzeme **41**
Şekil 5.23 : Karbon fiber kompozit malzemenin elektrik alan simülasyonu..... **41**
Şekil 5.24 : Alüminyum gövdeli F-16 uçağının simülasyonundan bir kesit **42**
Şekil 5.25 : Alüminyum gövdeli F-16 uçağının RKA örüntüsü..... **43**
Şekil 5.26 : Karbon fiber kompozit gövdeli F-16 uçağının simülasyonundan kesit . **43**
Şekil 5.27 : Karbon fiber kompozit gövdeli gövdeli F-16 uçağının RKA örüntüsü.. **44**
Şekil 5.28 : Alüminyum gövdeli F-22 uçağının simülasyonundan bir kesit **44**
Şekil 5.29 : Alüminyum gövdeli F-22 uçağının RKA örüntüsü..... **45**
Şekil 5.30 : Karbon fiber kompozit gövdeli F-22 uçağının simülasyonundan kesit . **45**
Şekil 5.31 : Karbon fiber kompozit gövdeli gövdeli F-22 uçağının RKA örüntüsü.. **46**
Şekil 5.32 : Alüminyum gövdeli F-117 uçağının simülasyonundan bir kesit **46**
Şekil 5.33 : Alüminyum gövdeli F-117 uçağının RKA örüntüsü..... **47**
Şekil 5.34 : Karbon fiber kompozit gövdeli F-117 uçağının simülasyonundan kesit **47**
Şekil 5.35 : Karbon fiber kompozit gövdeli F-117 uçağının RKA örüntüsü **48**

AVİYONİK SİSTEMLERDE ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA VE HAVA ARAÇLARI İÇİN KARBON FİBER KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Havacılık ve savunma sanayinde artan rekabet, hava araçlarında kullanılan malzemelerin hem elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama özelliğine hem de üstün mekanik özelliklere sahip olmasını gerektirmektedir. Ayrıca, uçakların hafif malzemeler ile tasarlanması performanslarını arttırmak için önemlidir. Dolayısıyla, karbon fiber gibi hafif ve üstün mekanik özelliklere sahip takviye malzemeleri kullanarak, elektromanyetik kalkanlama açısından verimli kompozit malzemelerin geliştirilmesi güncel bir konudur.

Bu tez çalışmasında elektromanyetik dalgaların aviyonikler üzerindeki olumsuz etkilerini azaltan bir karbon fiber kompozit malzemenin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, matris malzemesi olarak epoksi reçine ve takviye malzemesi olarak; tek yönlü ve çift yönlü karbon fiber kumaşlar kullanılmıştır. Ayrıca, üretilen bazı kompozitlerde daha yüksek kırılma noktası ve esneklik elde etmek için çift yönlü cam fiber kumaşlar takviye edilmiştir. Toplam sekiz kompozit plaka, elle yatırma yöntemi ile farklı oryantasyon ve katman sayılarında iki set olarak üretilmiştir. Birinci set ve ikinci set malzemelerin karbon fiber hacim oranı sırasıyla %45-%50 ve %35-%40 aralığındadır. Üretilen kompozit plakaların; oryantasyon açısı, katman sayısı ve fiber kumaş tipi gibi parametreleri için elektromanyetik dalga kalkanlama karakteristikleri incelenerek iyi kalkanlama değerleri veren kompozit malzemeler belirlenmiştir. Ölçüm için; Aaronia marka DFG 4060 model dalga jeneratörü, HF 60105 model spektrum analizör ve iki directional anten kullanılarak, 900 MHz ile 6000 MHz aralığında malzemelerin elektromanyetik kalkanlama etkinlikleri (EKE) ölçülmüştür. Çalışılan frekans aralığında 62.13 dB'e kadar EKE elde edilmiştir. Bu değer, literatürde iyi kalkanlama seviyesi olarak kabul edilmektedir. Dahası, ölçüm sonuçlarına göre; 0°'ye nazaran, karbon fiberin oryantasyon açısı 90° olduğunda EKE'nin çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. EKE'ye etki eden bir diğer parametre karbon fiber kumaşın tek yönlü veya çift yönlü olmasıdır çünkü çift yönlü kumaşın EKE'yi arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, katman sayısının EKE üzerinde oryantasyon açısından daha az etkiye sahip olduğu saptanmıştır.

Simülasyon kısmında, COMSOL Multiphysics yazılımıyla alüminyum, demir, FR-4 ve karbon fiber kompozit malzeme için elektrik alan büyüklükleri hesaplanarak EKE gözlemlenmiştir. Son olarak; F-16, F-22 ve F-117 uçak modelleri ile gerçekleştirilen simülasyonlarda, karbon fiberin gizlilik teknolojisi açısından hava araçlarında kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektromanyetik kalkanlama, karbon fiber, gizlilik teknolojisi, aviyonik.

ELECTROMAGNETIC SHIELDING IN AVIONIC SYSTEMS AND DEVELOPMENT OF A CARBON FIBER COMPOSITE MATERIAL FOR AIRCRAFTS

SUMMARY

Increasing competition in aeronautics and defence industry requires that materials used in aircrafts have both electromagnetic interference (EMI) shielding and excellent mechanical properties. In order to improve performances of airplanes, it is also important that they are designed with light materials. Therefore, in terms of electromagnetic shielding, it is a current topic that efficient composite materials are developed by using light reinforcement materials with excellent mechanical properties like carbon fiber.

In this thesis, it was aimed that a carbon fiber composite material, which decreases negative impacts in avionics of electromagnetic waves was developed. In the experimental study performed, epoxy resin as the matrix material and unidirectional and bidirectional carbon fiber fabrics were used as the reinforcement material. Bidirectional glass fibre fabrics were also reinforced to get a higher breaking point and more flexibility in some composites manufactured. A total of eight composite laminates were manufactured as two sets in different orientations and number of plies by hand lay-up method. Carbon fiber volume fractions of the first and second set materials are in the ranges of 0.45-0.50 and 0.35-0.40, respectively. Composite materials that provide good values of shielding were determined by analyzing electromagnetic wave shielding characteristics for parameters like orientation angle, number of plies and fiber fabric type of the composite laminates. Electromagnetic shielding effectiveness (EMSE) values of the materials were measured in the frequency range between 900 and 6000 MHz, using Aaronia DFG 4060 wave generator, HF 60105 spectrum analyzer and two directional antenna. In the proposed frequency range, EMSE up to 62.13 dB was achieved. This value is accepted in the literature as a good level of shielding. Moreover, according to measurement results, it was concluded that EMSE was very higher when the orientation angle of the carbon fiber was 90°, as compared to 0°. Another parameter that affects EMSE is whether the carbon fiber fabric used is unidirectional or bidirectional because it was observed that the bidirectional fabric increased EMSE. In addition, it has been determined that the number of plies has less effect on EMSE than the orientation angle.

In simulation part, EMSE was observed calculating electric field strengths for aluminium, iron, FR-4 and carbon fiber composite material by COMSOL Multiphysics software. Finally, in simulations carried out with F-16, F-22 and F-117 airplane models, it was shown that carbon fiber could utilized in aircrafts in terms of stealth technology.

Keywords: Electromagnetic shielding, carbon fiber, stealth technology, avionics.

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde sivil veya askeri havacılıkta kullanılan uçakların ileri seviye aviyonik sistemleri, performansı yüksek ve güvenilir elektronik sistemlere gereksinim duyar [1]. Elektromanyetik girişim (EMI) kaynaklarının neden olduğu yüksek yoğunluklu alanlar uçağın kumandası, haberleşmesi, navigasyonu ve hayati önem taşıyan diğer kontrol sistemlerini negatif etkilemektedir [2]. Örneğin, 1967'de ABD ordusu envanterindeki uçak gemisinde, gemiye ait yüksek güçlü radardan yayılan elektromanyetik dalgaların güverteden havalanan bir savaş uçağının silah sisteminde girişime neden olmasıyla ateşlenen mühimmat, güvertede bulunan başka uçaklara isabet etmiş ve meydana gelen yangın sonucunda maddi ve manevi hasarlar oluşmuştur. 1980'ler civarı Almanya'da yaşanan bir başka uçak kazasında, karadaki bir vericiden gönderilen sinyalin aviyoniklerde parazite neden olması kazaya yol açmıştır [3]. Aviyonik sistemlerin güvenilirliğini arttırmak maksadıyla elektromanyetik girişimin azaltılmasının yanı sıra uçağın radarda görünürlüğünü düşürmek de önemli bir araştırma konusudur. Çünkü modern muharip uçaklar açısından gizlilik esastır [4]. Gizlilik teknolojisinin önemi İkinci Dünya Savaşı sırasında radar sistemlerinin gelişmesine bağlı olarak hedeften saçılmaların malzeme özellikleri ile ilgisinin keşfedilmesiyle artmıştır. Daha sonra, araştırmacılar hedeften saçılan ve radar alıcısına geri dönen sinyalleri azaltmak için çalışmalar yapmıştır [5].

Elektromanyetik kalkanlama için literatürde kullanılan başlıca malzemeler; iletkenliği yüksek metaller, metal folyolar, ferromanyetik malzemeler ve kompozit malzemelerdir. Fakat metaller kalkanlama verimliliklerinin yüksek olmasına rağmen ağır, korozyona dayanıksız olma ve kolay şekillendirilebilir olmama gibi olumsuz özelliklerinden dolayı havacılık endüstrisinde pek tercih edilmez [6, 7]. Özellikle uçak ağırlığını inovatif malzemeler kullanarak azaltmak bir gereksinim haline gelmiştir [2]. Karbon fiber kompozitler hafif, yüksek mukavemetli, korozyona karşı dayanıklılık ve tasarım esnekliği sağlamalarıyla havacılık endüstrisinde popüler hale gelmiştir [8].

Dolayısıyla, karbon fiber kompozitlerin kalkanlama verimliliklerini arttırmak güncel bir araştırma konusudur. Karbon fiberlerin oryantasyon açısı, tek yönlü veya çift yönlü

oluşları, istifleme dizisi ve katman sayısı gibi parametreleri elektromanyetik kalkanlama etkinliği (EKE) başarısına etki etmektedir. Yüksek EKE değerleri herhangi bir verici kaynaktan gelen sinyalin kalkanlanacak bölgeye girişini büyük oranlarda engelleyebileceğinden, aviyonik sistemlerin güvenilirliği ve performansı artacak ve maddi ve manevi hasarların önüne geçilebilecektir.

Aynı zamanda uçak gövde paneli olarak kullanılacak karbon fiber kompozit malzemenin uçağın radar kesit alanı (RKA) değerini düşürmesi radar görünürlüğünü de azaltacaktır. Bir savaş uçağının RKA değerinin düşük olması düşman radarları tarafından tespitini zorlaştıracağından uçağa kritik görevler için hareket serbestliği kazandıracaktır.

Bu çalışmada, elektromanyetik kalkanlama verimliliği yüksek karbon fiber kompozit malzeme elde etmek için sekiz adet plaka üretilmiştir. Plakalar tek yönlü ve çift yönlü karbon fiber kumaşlar kullanılarak farklı istifleme dizileri ve katman sayıları için elle yatırma tekniği ile üretilmiştir. Yapılan ölçümlerde oryantasyon açısı, katman sayısı ve kumaş tipinin EKE üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, çalışmanın simülasyon kısımında EKE açısından karşılaştırma olması için çeşitli malzemeler ile karbon fiber malzemenin elektrik alan simülasyonu gerçekleştirildi. Dahası çeşitli savaş uçağı modelleri için alüminyum ve karbon fiber malzemeden elde edilen RKA örüntüleri karşılaştırılmıştır.

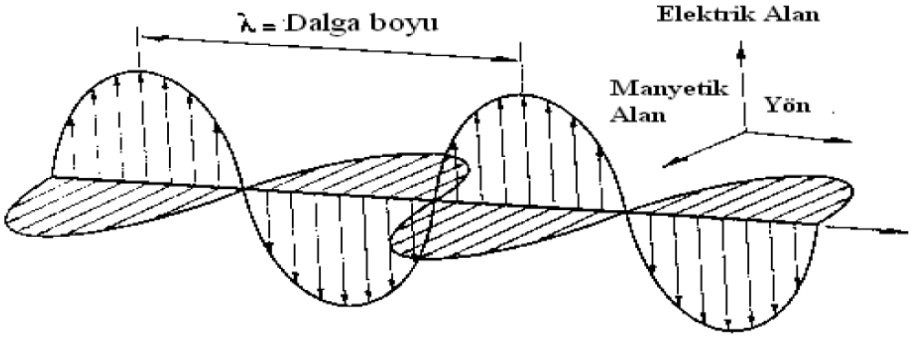
2. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA

Elektromanyetik kalkanlamanın iyi anlaşılabilmesi için elektromanyetik dalga kavramın açıklanması gerekmektedir. Elektromanyetik dalgalar, diferansiyel denklemler olan Maxwell denklemlerini kullanarak betimlenebilir.

2.1 Elektromanyetik Dalga ve Propagasyonu

Elektromanyetik dalga kaynakları, doğal ve yapay elektromanyetik alan kaynakları şeklinde iki grupta toplanmaktadır. Doğal kaynaklara örnek olarak güneş, yıldızlar ve yıldırım verilebilir. Yapay kaynaklar; radar vericileri, baz istasyonları, haberleşme sistem ve ekipmanları, mikrodalga fırın ve gündelik hayatta kullandığımız diğer elektronik cihazlar şeklinde sıralanabilir [9, 10].

Elektromanyetik dalgalar birbirine dik açıda salınım yapan elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) bileşenlerinden meydana gelmektedir. Ayrıca, bu alanlar dalga yayılım yönüne dik doğurultudadır. Şekil 2.1'de elektromanyetik dalganın gösterimi verilmiştir.

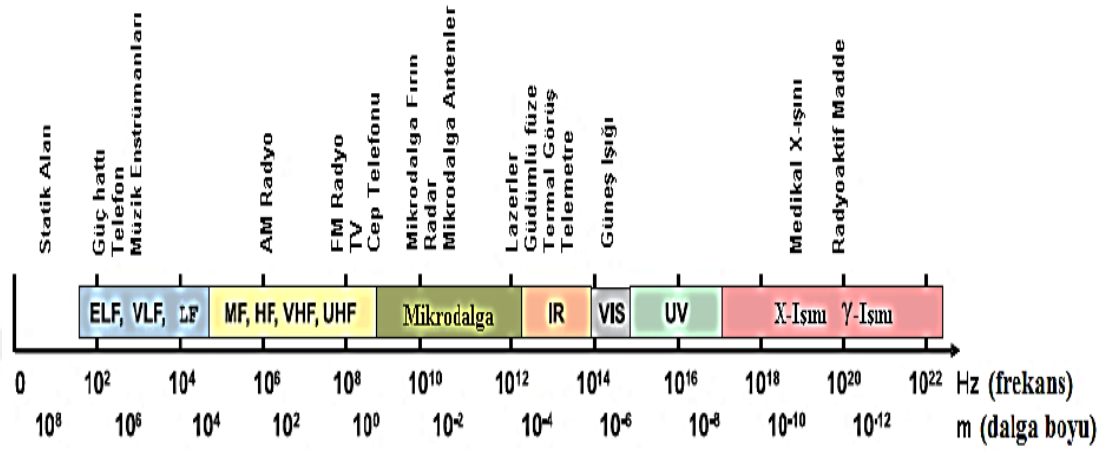


Şekil 2.1 : Elektromanyetik dalga yayılımı [11].

Elektromanyetik dalganın dalga boyu ile frekansı arasındaki bağıntı Denklem 2.1'deki gibidir.

$$c = \lambda \times f \tag{2.1}$$

Denklem 2.1'de c dalganın boşluktaki yayılma hızı olan ışık hızıdır. λ ise dalga boyudur. Dalga boyu ve frekans ters orantılıdır. Yüksek dalga boyundan düşük dalga boyuna veya düşük frekanstan yüksek frekansa elektromanyetik dalgaların yer aldığı spektrum Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Elektromanyetik spektrum ve bazı frekanslardaki uygulamalar [12].

Herhangi bir ortamdaki elektromanyetik dalganın davranışı söz konusu ortamın karakteristiğine bağlı olarak Maxwell denklemleri ile açıklanabilir. Elektromanyetik teorinin özeti niteliğinde olan Maxwell denklemleri ilk kez James Clerk Maxwell tarafından formülüze edilmiştir. Diferansiyel formda genelleştirilmiş Maxwell denklemlerinin ifadeleri Denklem 2.2 - 2.5'de verilmektedir.

$$\nabla.\mathbf{D} = \rho_v \tag{2.2}$$

$$\nabla.\mathbf{B} = 0 \tag{2.3}$$

$$\nabla\times\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{2.4}$$

$$\nabla\times\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \tag{2.5}$$

Denklem 2.2'de **D** elektrik akı yoğunluğunu, ρ_v ise elektrik yük yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu denklem Gauss yasası olarak bilinmekle birlikte, kapalı bir yüzey için geçerli olup yüzey ile çevrelenmiş elektrik yük miktarını incelemeye olanak tanır.

Denklem 2.3'te **B** manyetik akı yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu denklem kapalı bir yüzey boyunca toplam manyetik akının sıfır olması gerektiğini açıklar.

Denklem 2.4'te **E** elektrik alan şiddetini göstermektedir. Bu denklem zamanla değişen manyetik akının elektrik alan oluşturacağını tanımlamaktadır.

Denklem 2.5'te **H** manyetik alan şiddetini, **J** ise akım yoğunluğunu ifade etmektedir. Ampere devre kanunu olarak bilinen bu denklem, zamanla değişen elektrik alanın nasıl manyetik alan oluşturacağını açıklamaktadır. Manyetik tek kutup olmadığından manyetik alanlar bu şekilde üretilmektedir.

Yukarıdaki denklemlerde tanımlanan **E**, **H**, **D**, **B** ve **J** ortamın karakteristik özellikleriyle ilintilidir. Söz konusu özellikler çalışılan ortamı meydana getiren malzemeye bağlıdır ve dalganın propagasyonunda etkilidir. İlgili bağıntılar Denklem 2.6 - 2.8'de verilmiştir.

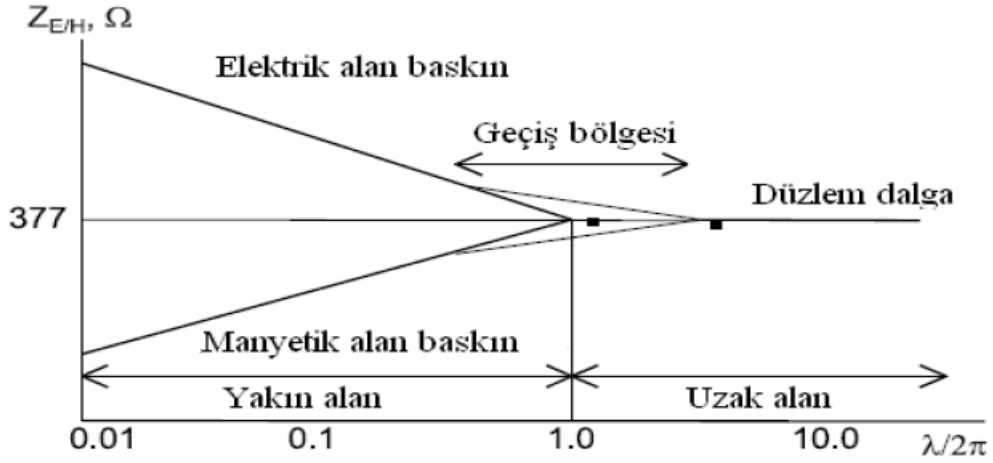
$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} \tag{2.6}$$

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \tag{2.7}$$

$$\mathbf{J} = \sigma_c\mathbf{E} \tag{2.8}$$

Denklem 2.6'da ε dielektrik sabiti olup $\varepsilon = \varepsilon_0.\varepsilon_r$ ile verilmektedir. Burada $\varepsilon_0 = 8.854\times10^{-12}$ F/m, ε_r ise ortamın bağıl dielektrik sabitidir. Denklem 2.7'de μ manyetik geçirgenlik sabiti olup $\mu = \mu_0.\mu_r$ ile verilmektedir. Burada $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ H/m, μ_r ise bağıl manyetik geçirgenliktir. Denklem 2.8'de σ_c ortamın elektriksel iletkenlik değerini ifade etmektedir.

Girişim kaynağı ve ortamı ile kaynak-gözlem noktası mesafesine göre elektromanyetik dalganın komponentleri değişebilmektedir. Şekil 2.3 alan bileşenleri ve dalga empedansının kaynaktan mesafeye göre değişimini vermektedir.



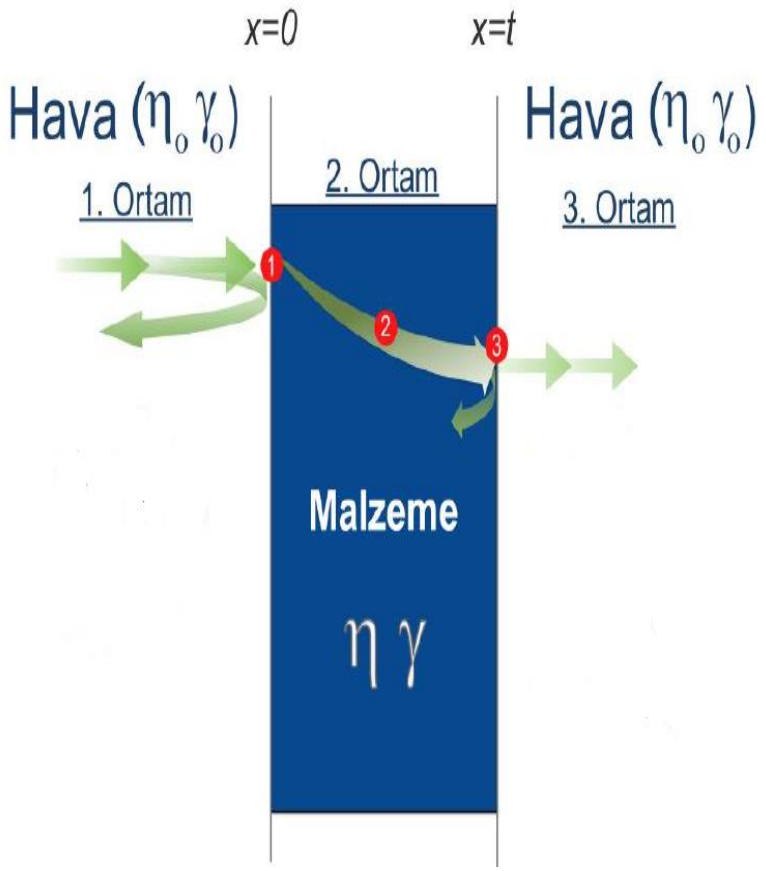
Şekil 2.3 : Kaynaktan mesafeye göre ayırıcı alanlar [13].

Girişim kaynağının çevresindeki alan yakın alan bölgesi, uzak alan bölgesi ve geçiş alanı olmak üzere üçe ayrılabilir [14]. Yakın alan bölgesinde gözlem noktasının

kaynaktan uzaklığı, λ/2π ifadesinden küçüktür. Elektromanyetik dalganın empedansı kaynak özelliklerine bağlıdır. Ayrıca Şekil 2.3'ten görüleceği üzere elektrik alan ve manyetik alan arasındaki oran sabit olmadığından alanlar ayrı olarak ele alınmalıdır [15]. Uzak alan bölgesinde gözlem noktasının kaynaktan uzaklığı, λ/2π ifadesinden büyük olup dalganın yayıldığı ortama göre alan özellikleri değişmektedir [16]. Bu bölgede elektromanyetik dalga, düzlem dalga haline gelir ve hava için dalga empedansı $\eta_0 = \frac{E}{H} = 377\ \Omega$ değerine eşittir.

2.2 Matematiksel Olarak Elektromanyetik Kalkanlamanın İfadesi

Elektromanyetik kalkanlama tanım olarak; istenmeyen elektromayetik sinyallerin önceden belirlenmiş bir alana girişim yapmasını, kalkan ismi verilen özel bir malzeme kullanarak gelen dalgayı yansıtma, soğurma ve çoklu yansımalara uğratarak engelleme işlemidir. Şekil 2.4'te elektromanyetik dalganın hava, malzeme ve tekrar hava ortamında yayılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Tek katlı kalkan modeli [17].

Hava ortamından gelen bir elektromanyetik dalga, x=0'da malzeme yüzeyi ile karşılaştığında dalganın bir kısmı ikinci ortama yani malzeme içerisine geçerken, bir kısmı da iki ortam arasındaki empedans farklılığından ötürü birinci ortama geri yansıyacaktır.

Birinci ve ikinci ortamdaki toplam alanlar için x=0'da teğet bileşenleri kullanılarak sınır koşulunun yazılmasıyla yansıma katsayısı ve iletim katsayısına ulaşılmaktadır [18]. Dalganın ilerleyişini şematik olarak gösteren Şekil 2.4'te düzlem dalganın geliş açısı 90° olarak düşünüldüğünde, yansıma katsayısı ve iletim katsayısına açıdan bağımsız olarak ulaşılmaktadır. Denklem 2.9 ve Denklem 2.10 sırasıyla x=0'daki, yansıma katsayısı ve iletim katsayısını vermektedir.

$$\rho_{12}= \frac{\eta-\eta_0}{\eta_0+\eta} \tag{2.9}$$

$$T_{12}= \frac{2\eta}{\eta_0+\eta} \tag{2.10}$$

Denklem 2.9 ve 2.10'da, η_0 havanın η ise ikinci ortamı oluşturan malzemenin empedansıdır. Ortam parametrelerinin etkili olduğu empedansın formülü Denklem 2.11'de verilmiştir.

$$\eta= \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma_c+j\omega\epsilon}} \tag{2.11}$$

Denklem 2.11'deki ω açısal frekans olup $\omega= 2\pi f$ ile verilir. Burada f, Hz biriminde frekans değeridir.

İkinci ortama geçen elektromanyetik dalga malzeme içerisinde x=0 ve x=t'de empedans farklılıklarından dolayı çoklu yansımalara uğrar. Yine sınır koşullarından elde edilen ilgili yansıma katsayıları Denklem 2.12'de paylaşılmaktadır. Ayrıca, x=t'de elde edilen iletim katsayısı ifadesi Denklem 2.13'te verilmiştir.

$$\rho_{21}= \rho_{23}= \frac{\eta_0-\eta}{\eta_0+\eta} \tag{2.12}$$

$$T_{23}= \frac{2\eta_0}{\eta_0+\eta} \tag{2.13}$$

Şekil 2.4'te kalkan malzemesine gelen elektrik alan E_i olarak tanımlanırsa, ikinci ortama iletilen elektrik alan; $T_{12}E_i$ ifadesine eşit olur. Kalınlığı t olan malzeme içerisinde elektromanyetik dalga yol kaybına uğrar. Bu kayıp $e^{-\gamma t}$ şeklinde üsseldir. Burada γ yayılma sabitini ifade etmektedir ve Denklem 2.14'te formülü verilmiştir.

$$\gamma = \alpha + j\beta \tag{2.14}$$

Denklem 2.14'deki α sönümleme katsayısının formülü Denklem 2.15'teki gibidir.

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\sigma_c}{\omega\varepsilon}\right)^2}-1\right]} \tag{2.15}$$

Denklem 2.16'da, yayılma sabiti ifadesindeki β faz sabiti verilmiştir.

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\sigma_c}{\omega\varepsilon}\right)^2}+1\right]} \tag{2.16}$$

Işını takip ederek, x=0 ve x=t'de gerçekleşen çoklu yansımaların dâhil edilmesi ile birlikte x=0'da elde edilen toplam elektrik alan Denklem 2.17'de verilmiştir.

$$E_{toplam} = T_{12}E_i\left[1+\rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma t}+\left(\rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma t}\right)^2+\ldots\right] \tag{2.17}$$

Denklem 2.17'de $\rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma t} < 1$ olacağından, E_{toplam} Denklem 2.18'deki gibi düzenlenebilir.

$$E_{toplam} = \frac{T_{12}E_i}{1-\rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma t}} \tag{2.18}$$

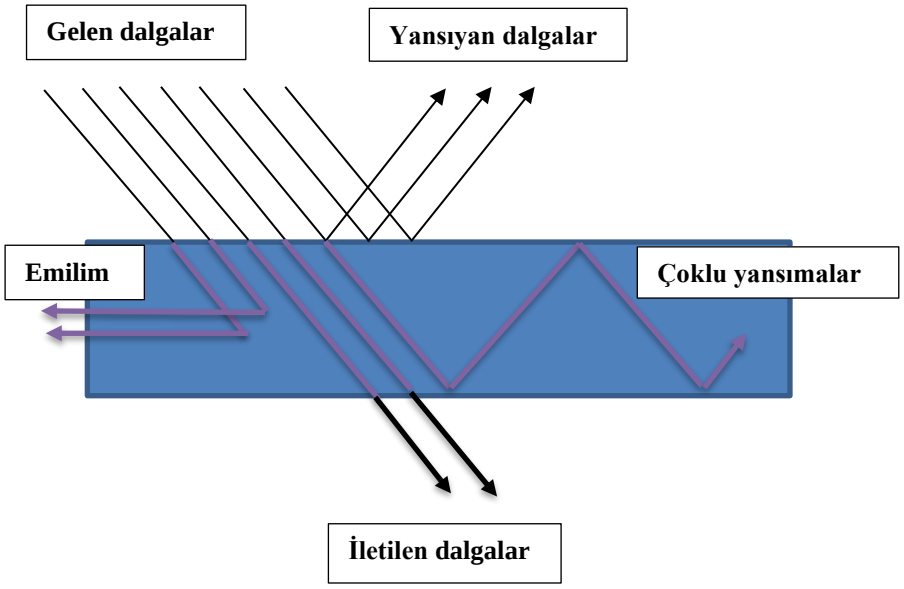
Dolayısıyla x=t'de çıkışa iletilen elektrik alan E_t , Denklem 2.19'daki gibi bulunur.

$$E_t = T_{23}E_{toplam}e^{-\gamma t} = \frac{T_{23}T_{12}E_ie^{-\gamma t}}{1-\rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma t}} \tag{2.19}$$

Literatürde kullanılan elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin (EKE) kapsamlı formülü Denklem 2.20'den türetilmektedir. $\frac{E_i}{E_t}$ eşitliği Denklem 2.20'de verilmiştir.

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{1}{T_{23}T_{12}}\left(1-\rho_{21}\rho_{23}e^{-2\gamma t}\right)e^{\gamma t} \tag{2.20}$$

Elektromanyetik kalkanlama etkinliği (EKE), bir kalkan malzemesinin veya yapısının kalkanlama yeteneğinin bir ölçüsüdür ve birimi desibel (dB) olarak ifade edilir. Daha önce elektromanyetik kalkanlamanın tanımında verildiği üzere kalkanlama olayı yansıma kaybı (R_{dB}), soğurma kaybı (A_{dB}) ve çoklu yansıma kayıpları (M_{dB}) ile gerçekleşmektedir. Şekil 2.5 kalkanlamanın aşamalarını göstermektedir [19].



Şekil 2.5 : Elektromanyetik kalkanlamanın mekanizması.

Kalkanlama amaçlı kullanılan bir malzemenin toplam kalkanlama etkinliği (SE_{dB}) farklı yollardan hesaplanabilir. Girişim kaynağından malzemeye gelen elektromanyetik dalga gücünün (P_i), malzemeyi geçerek çıkışa iletilen dalga gücüne (P_t) oranlanarak logaritmasının alınması ve 10 ile çarpılmasıyla bulunabileceği gibi elektrik alan veya manyetik alan şiddeti ile işlem yapılması durumunda 20 ile çarpım yapılmaktadır. Bir başka yöntem; gözlem noktası ile kaynak arasında kalkan malzemesi olmadan elde edilen elektromanyetik dalga gücünün (P_1), kalkan malzemesi varken elde edilen elektromanyetik dalga gücüne (P_2) desibel (dB) olarak oranlanmasıdır. Literatürde kullanılan ve daha kapsamlı bir analiz sunan bir diğer yöntemse yansıma kaybı (R_{dB}), soğurma kaybı (A_{dB}) ve çoklu yansıma kayıplarının (M_{dB}) toplanmasıdır. İlgili eşitlikler Denklem 2.21 - 2.24'de verilmiştir.

$$SE_{dB}=10\log\left(\frac{P_i}{P_t}\right) \tag{2.21}$$

$$SE_{dB}=20\log\left(\frac{E_i}{E_t}\right)=20\log\left(\frac{H_i}{H_t}\right) \tag{2.22}$$

$$SE_{dB}=10\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \tag{2.23}$$

$$SE_{dB}=R_{dB}+A_{dB}+M_{dB} \tag{2.24}$$

Denklem 2.24'teki R_{dB}, A_{dB} ve M_{dB} bileşenleri, Denklem 2.20'nin logaritmasının alınıp 20 ile çarpılmasıyla ifadenin toplamlar şeklinde parçalanması sonucu elde

edilmektedir [20]. Denklem 2.25 - 2.27'de sırasıyla R_{dB}, A_{dB} ve M_{dB} bağıntıları yer almaktadır.

$$R_{dB} = 20 \log \left| \frac{1}{T_{23} T_{12}} \right| \tag{2.25}$$

$$A_{dB} = 20 \log |e^{\gamma t}| \tag{2.26}$$

$$M_{dB} = 20 \log \left| 1 - \rho_{21} \rho_{23} e^{-2\gamma t} \right| \tag{2.27}$$

γ yayılım sabitindeki α sönümleme katsayısı, elektromanyetik dalganın genliğindeki değişime karşılık geldiğinden ve β ise soğurulmaya etki etmediğinden $\gamma = \alpha$ alınırsa ve Denklem 2.28 ile verilen deri kalınğı (δ) ile α arasındaki bağıntıya göre denklemler yeniden düzenlenirse SE_{dB}, δ değişkenine bağlı olarak hesaplanabilir. Denklem 2.29'da δ deri kalınlığı formülü gösterilmiştir.

$$\alpha = \frac{1}{\delta} \tag{2.28}$$

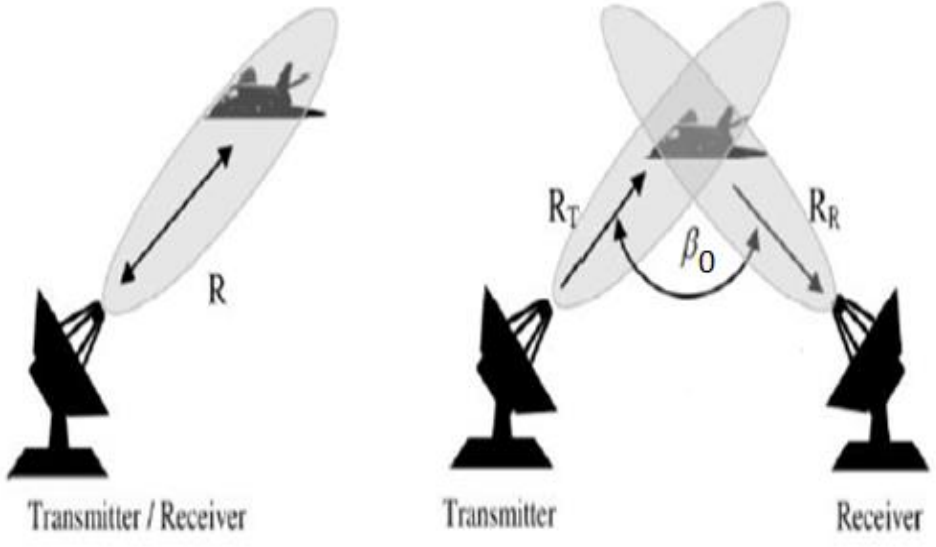
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_c}} \tag{2.29}$$

Ayrıca, Denklem 2.25'te verilen yansıma kaybının ifadesi açıldığında yansıma kaybının (R_{dB}) ortam empedansı ve frekans ile ters orantılı, iletkenlik ile doğru orantılı ve kalınlıktan etkilenmediği görülmektedir. Soğurma kaybının (A_{dB}) ise, deri kalınlığı ile ters dolayısıyla frekans, permeabilite ve iletkenlik değerleriyle doğru orantılı olduğu ayrıca artan malzeme kalınlığı ile artacağı görülmektedir. Çoklu yansıma kayıpları (M_{dB}) genellikle ihmal edilebilir düzeylerdedir [21].

3. RADAR SİSTEMLERİ VE GİZLİLİK TEKNOLOJİSİ

Radarlar, bir hedef veya nesnenin belirlenmesini ve takibini sağlayan, bunu yaparken verici anteninden gönderdiği elektromanyetik dalgaları kullanan sistemlerdir. Radarların alıcı anteni ise tespit edilecek yapıdan geri saçılan dalgaları toplama işlemini yapmaktadır. Radar geri dönen dalgaları anlamlandırarak yapıya ait konum, hız ve boyut gibi parametreleri belirleyebilmektedir. Radar kelimesinin açılımı, radyo algılama ve menzil tayini anlamına gelen radio detection and ranging ifadesidir [22].

Radar sistemleri alıcı ve verici antenlerin konumlarına göre ikiye ayrılmaktadır. Eğer bu birimler arasındaki mesafe fazla ise yani konumlar farklıysa bistatik radar, alıcı ve verici hemen hemen aynı konumdaysa veya gönderme ve alma işlemi için tek bir anten kullanılıyorsa monostatik radar denir [23]. Şekil 3.1'de iki durumda gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Monostatik ve bistatik radarlar [24].

Şekil 3.1'de β_0, vericiden gelen ışın ile hedeften alıcı yönünde saçılan ışın arasındaki açıyı göstermektedir.

Radar denkleminden sistem parametreleri, hedefe ait parametreler, yansıma, kırılma ve kırınım gibi yayılım etkileri ve yayılma ortamının özellikleri çıkarılabilir [22]. Radar vericisinden R mesafe uzaklıktaki güç yoğunluğu Denklem 3.1'de verilmiştir.

$$P_D = \frac{P_s}{4\pi R^2} \tag{3.1}$$

Bu denklemde P_s gönderilen güç, $4\pi R^2$ ise kürenin alanıdır. Bu denklem dairesel yayılımlı bir anten ve kayıpsız ortam içindir. İzotropik yön bağımsız bir anten yerine yönlü anten kullanıldığında güç yoğunluğu Denklem 3.2'deki gibi düzenlenir.

$$P_D = \frac{P_s G}{4\pi R^2} \tag{3.2}$$

Bu denklemde G anten kazancını ifade etmektedir. Anten kazancının formülü Denklem 3.3'te verilmiştir.

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \tag{3.3}$$

Bu denklemde A_e etken anten yüzeyi ve λ dalga boyudur.

Radar dalgalarının hedef yüzeyine çarpması sonucu yüzeyde indüklenen akım elektromanyetik alanı değişik yönlere yayar. Elektromanyetik alanın yayılımından yola çıkarak ilgili hedef algılanır. Radar algılamada, hedefe özgü fiziksel yapı, malzeme özellikleri gibi bilgileri barındıran radar kesit alanı (RKA) parametresi kullanılır. Radar tarafında kullanılabilir yankı gücünü hesaplamak için RKA bilinmelidir. Denklem 3.4'te RKA'nın formülü verilmiştir.

$$\sigma = \frac{P_r}{P_D} \tag{3.4}$$

Bu denklemde σ radar kesit alanını, P_r hedeften yansıyan gücü ve P_D hedefe gelen güç yoğunluğunu göstermektedir. Dolayısıyla hedeften yansıyan gücün radar alıcısındaki güç yoğunluğu Denklem 3.5'e eşit olmaktadır.

$$P_{D_r} = \frac{P_s G \sigma}{(4\pi R^2)^2} \tag{3.5}$$

Ayrıca, A_e radarın alım gücünü etkilediğinden ve P_R radar alıcısındaki güç olmak üzere Denklem 3.6 elde edilir.

$$P_R = P_{D_r} A_e = \frac{P_s G \sigma}{(4\pi R^2)^2} A_e \tag{3.6}$$

Denklem 3.3'te A_e yalnız bırakılıp Denklem 3.6'da yerine yazılırsa Denklem 3.7'ye ulaşılır.

$$P_R = \frac{P_s G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \tag{3.7}$$

Denklem 3.7, R mesafesi için düzenlenirse radar denklemi elde edilir. Denklem 3.8'de radar denklemi gösterilmektedir.

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{R_{min}}}} \tag{3.8}$$

Burada $P_{R_{min}}$ minimum gücü için maksimum radar menzili hesaplanır. Radar kesit alanı (RKA), hedef veya nesnelerin radardaki görünürlükleri ile yakından ilişkilidir. Ayrıca radar dalgalarını yansıtma seviyesinin ölçüsü şeklinde tanımlanabilir. RKA, hedefi oluşturan fiziksel yapının yani geometrinin ve malzeme özelliklerinin fonksiyonudur.

RKA formülasyonu için değişik tanımlar bulunmaktadır. Radardan yayılan enerjinin hepsinin hedefe düşmeyeceği düşüncesiyle RKA formülasyonu Denklem 3.9'da verilmiştir [25].

$$\sigma = A_p r d \tag{3.9}$$

Bu denklemde A_p öngörülen hedef kesit alanını, r yansıtıcılık oranını ve d yönlülük oranını temsil etmektedir. r, hedeften saçılan gücün alınan güç içindeki yüzdesidir. d ise hedeften saçılmanın bütün yönlerde izotropik olduğu durumda, hedefin radar yönünde yansıttığı gücün radarda alınması beklenen güce oranıdır [26].

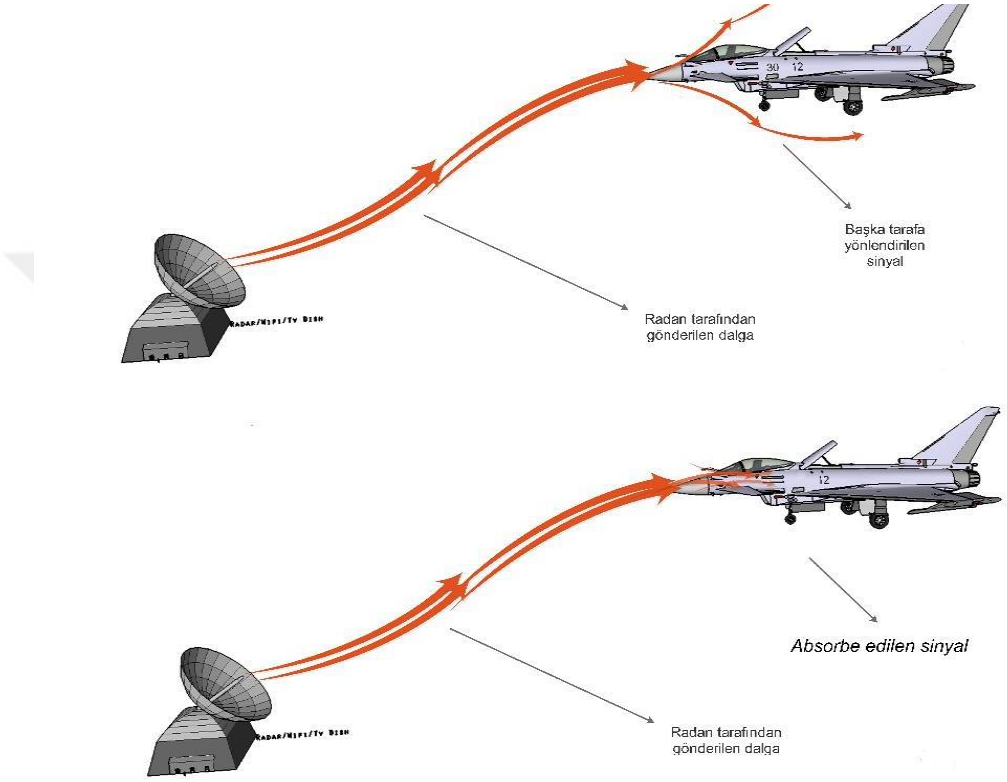
RKA'nın bilinen bir başka formülasyonu, alıcı yönünde saçılan ve hedefe gelen elektrik alanlar E_s ve E_i cinsinden Denklem 3.10'da verilmiştir.

$$\sigma = \lim_{R \to \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \tag{3.10}$$

Bu denklemde R radar ile hedef arasındaki mesafedir. RKA'nın formülasyon ve tanımlarına bakıldığında RKA'nın radarın frekansı ve hedefe göre konumuna ve hedefin açısal pozisyonu ile malzeme ve fiziksel yapısına bağlı olduğu sonucuna varılmaktadır [25, 27].

Daha önce bahsedildiği gibi radar hedef tespitinde, radar alıcısı yönünde saçılan dalgaların kullanıldığı bilinmektedir. Hedeften saçılan bu dalgaların radar alıcısına geri yansımasını engellemek, radarın hedef tespitini zorlaştıracak ve hedefin radar görünürlüğünü azaltacaktır. Hava araçları ve diğer elektronik harp platformlarının radar görünmezliği; özel boyalar, çeşitli kaplamalar ve kompozit malzemelerle gerçekleştirilmektedir. Bu malzemelerin saçıcılıklarının az olması veya düşük elektriksel iletkenliğe sahip radar soğurucu özellikte olması beklenmektedir [28].

Ayrıca, kritik görevler üstlenen bu harp platformlarının gövde yapıları gelen elektromanyetik dalgayı değişik yönlerde yansıtacak biçimde tasarlanmalıdır [29]. Gizlilik teknolojisinin amacı hedefin radar izini olabildiğince düşük tutmaktır. Şekil 3.2'de gizlilik teknolojisi prensipleri göz önünde bulundurularak tasarlanmış uçağın burun kısmından farklı yönlere saçılan ve absorbe edilen radar dalgaları gösterilmektedir [17].

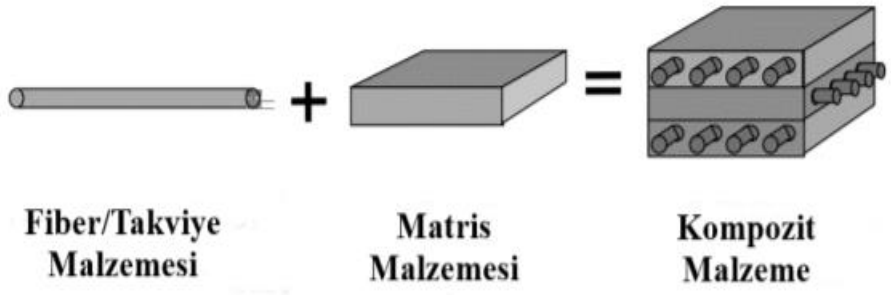


Şekil 3.2 : Farklı yönlere saçılan ve absorbe edilen radar dalgaları.

4. KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

Kompozit, en az iki malzemenin makro seviyede bir araya getirilmesiyle elde edilen yeni bir malzemedir. Kompozit malzemeyi üretmekteki amaç; rijitlik, daha yüksek kırılma noktası, esneklik, hafiflik, iletkenlik, korozyona dayanıklılık gibi bazı özelliklerin iyileştirilmesi veya yalnızca bir malzemeye toplanmasıdır. Kompozit malzemeler; özellikle havacılık ve uzay teknolojilerinde olmak üzere denizcilik ve otomotiv gibi daha birçok alanda kullanılmaktadır ve gün geçtikçe daha popüler hale gelmektedir.

Kompozit yapıda, ara yüzey bağı ile birbirine bağlanan matris fazı ve takviye elemanı olarak isimlendirilen iki bileşen bulunur. Matris eleman, takviye elemanını dizayn edilen malzeme şeklini sağlayacak şekilde bir arada tutar. Malzemeye dışarıdan kuvvet uygulandığında bunu takviye elemanlarına dağıtır. Malzemenin dayanıklılığını ve mukavemetini arttıran ve birçok özelliğini belirleyen ve yapıdaki yükün çoğunu taşıyan ise takviye elemanıdır. Şekil 4.1'de bu iki bileşen gösterilmektedir [30].

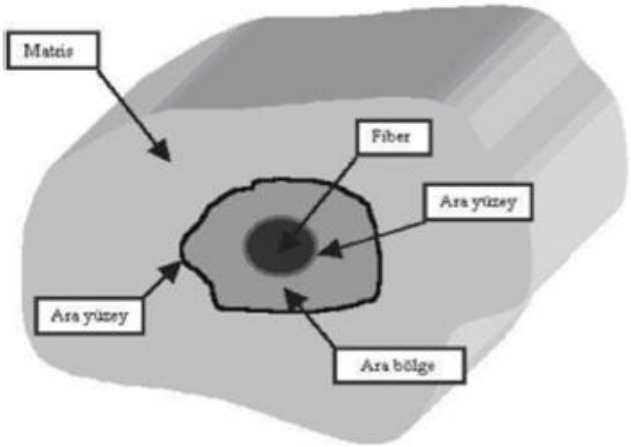


Şekil 4.1 : Kompozit yapının şeması ve bileşenleri.

Luo ve Chung takviye elemanı olarak sürekli ve kesintili karbon fiberleri, matris yapı olarakta polimer matris ve karbon matris kullandıkları bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, sürekli karbon fiberlerin kesintili fiberlere göre daha yüksek seviye kalkanlama verimi sağladığı yine ölçümler sonucunda, karbon matris yapının polimer olarak epoksi reçinesi içeren yapıya nazaran daha fazla kalkanlama gösterdiği görülmüştür [31]. Bununla birlikte karbon matrisli kompozitlerin yüksek maliyetlerinden dolayı polimer matrisli kompozitlerin uygulamaları daha yaygındır

[32]. Karbon fiber, çeliğin 3 katı dayanıklılığa sahip olup 4.5 kat daha hafiftir. Ayrıca, karbon fiberlerin yorulma özelliği neredeyse bütün metallerden üstündür. Katran bazlı karbon fiberlerin elektrik iletkenliği bakırdan 3 kat daha iyidir [33].

Karbon fiberler; polimer, metal, seramik ve karbon matrislere katkılanarak kompozit malzemeyi meydana getirir. Takviye işleminin başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi için karbon lifleri ve matrisin ara yüzey bağı vasıtasıyla kuvvetli bağlar kurması beklenmektedir. Şekil 4.2'de karbon fiber kompozit yapının mikro boyuttaki şeması verilmiştir.



Şekil 4.2 : Kompozit yapının mikro boyuttaki görünümü [34].

4.1 Polimer Matris Kompozitler

Polimer matrise sahip kompozitler, polimerlerin ucuz ve yoğunluklarının düşük olması sebebiyle ağırlığın minimize edilmesi gerektiği çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozit malzemelerde matris, genelde düşük elektriksel iletkenliğe sahip olduğundan kalkanlama sağlamaz, fakat karbon fiberler malzemeye iletkenlik kazandırarak elektromanyetik kalkanlamayı arttırır ve mekanik özellikleri iyileştirir [35]. Literatürde, CFRP yani karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin takviye elemanlarının metalik kaplanması suretiyle iletkenliğin kuvvetlendirildiği, böylelikle çok daha yüksek kalkanlama değerlerine ulaşılan çalışmalar bulunmaktadır.

Matris elemana karbon fiber takviyesi yapılırken; kullanılan fiberin karakteristiği, oranı ve oryantasyonu önemlidir. Fiber uzanış yönü malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen bir parametredir. Örneğin, fiberler paralel olarak katkılanırsa; fiberlerin uzanış yönünde mukavemet fazlayken, diğer yönlerde mukavemet azdır. Bunun yanı

sıra malzemenin elektromanyetik dalga soğurma ve yansıtma gibi özellikleri de etkilenmektedir. Dolayısıyla kompozit malzemelerin birtakım özellikleri uygun oryantasyon açısı ve istifleme dizisi belirlenerek geliştirilebilir.

Kompozit üretiminde fiber takviyesi olarak karbon fiber dışında cam fiberler de tercih edilmektedir. Maliyeti ucuz ve malzemeye esneklik kazandırmasına rağmen genel olarak elektriksel açıdan yalıtkan olduklarından elektromanyetik kalkanlamaya karbon fiberler kadar katkı sağlamazlar. Bu nedenle elektromanyetik kalkanlamada karbon fiberler yaygın kullanılmaktadır. Karbon fiberlerin üretiminde en çok kullanılan hammaddeler poliakrilonitril (PAN) ve zifttir. Üretim prosesi; oksidasyon ve karbonizasyon gibi ısıl işlemleri içermektedir. Şekil 4.3'te PAN bazlı karbon fiberin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görünümü paylaşılmıştır.



Şekil 4.3 : PAN bazlı karbon fiberin SEM görünümü [36].

Karbon fiberler, termoset veya termoplastik polimer matrislere takviye edilebilir. Ancak matris eleman çoğunlukla termoset seçilir. Polimerler, monomerlerin kimyasal bağlarla bağlanarak uzun zincir yapısı meydana getirmesiyle oluşur. Termoplastikler oda sıcaklığında katı, termosetlerse sıvıdır [37].

Termoset grubundan epoksinin karbon fiber ile takviyesi yapıldığında; malzeme mükemmel dayanıklılık ve sertlik gibi özellikler gösterdiğinden epoksi, fiber kompozitlerde en çok kullanılan matris malzemesidir. Epoksi reçinesi sertleştirici yardımı ile kürlenir [38, 39].

4.2 Metal Matris Kompozitler

Metallerin erime sıcaklıklarının yüksek oluşu metal matris kompozitlerin üretimini zorlaştırmaktadır. Bunun yanı sıra, yoğunluğun fazla ve korozyon direncinin düşük olması dezavantajlarıdır. Genel olarak kullanılan metal matris malzemeleri; alüminyum, magnezyum, bakır, titanyum ve nikel bazlı alaşımlardır [37]. Karbon fiberler metallerden daha katodiktir. Bu yüzden metal matriste, metalin anot olduğu bir galvanik çift oluştururlar. Bu durum, metalin korozyona uğramasına neden olur. Bu sorunu çözmek için karbon fiber takviyeli metal matris kompozitlere kaplama işlemi uygulanır [8].

4.3 Seramik Matris Kompozitler

Seramik matris malzemelerine örnek olarak; Al2O3, SiC, Si3N4 ve B4C verilebilir. Seramik matrislerin en önemli dezavantajları gevrek ve kırılgan oluşlarıdır. Bu durum, kullanımları için potansiyel güvensizlik teşkil eder. Yoğunlukları düşüktür ancak yüksek ergime sıcaklıkları ve sertliklerinden dolayı işlenmesi ve şekil verilmesi zordur [37].

4.4 Karbon Matris Kompozitler

Karbon fiber takviyeli karbon kompozitler, karbon bazlı matris malzeme içerisine karbon fiberlerin takviye edilmesiyle üretilmektedir [40]. Yüksek elektriksel iletkenlik değerine bağlı olarak EMI kalkanlama verimleri yüksektir. Karbon matris kompozitlerin kullanımındaki en büyük engel, hammaddenin pahalı oluşudur [31, 32].

4.5 Kompozit Üretim Yöntemleri

Kompozit malzeme, matris ve takviye elemanının birleşmesinden meydana gelir. Takviye elemanını oluşturan fiber yapılar ve katmanları arasında hava kalmayacak şekilde boşluksuz yapışmanın sağlanması iyi bir laminasyon için şarttır. Kompozit malzemenin üretimi için seçilecek yöntem; kullanılan matris ve takviye elemanına, malzemenin fiziksel yapısına ve maliyet faktörüne bağlı olarak değişir [38]. Burada verilen yöntemler matris malzemesi olarak reçinenin kullanılabileceği yöntemlerdir.

4.5.1 Elle yatırma ve püskürtme yöntemi

Elle yatırma yönteminde, fiber kumaşlar düz bir zemine veya kalıba yatırılır. Bu aşamada, kalıp ayırıcılar malzemenin zemine yapışmasını önlemek için kullanılır. Daha sonra, kumaşlara bir rulo veya fırça yardımıyla reçine emdirilir. Reçine emdirilmiş kumaşlar oda sıcaklığında kurumaya bırakılır. Bu yöntem; epoksi, poliester gibi termoset reçineler ve karbon fiber, cam fiber gibi yapılar için uygundur.

Püskürtme yöntemi, elle yatırma yönteminin makinalaşmış hali gibi düşünülebilir farkı kullanılan püskürtme aletidir. Tabanca şeklinde olan bu alet ile kırpılan fiberler kalıp üzerine, sertleştiricili reçine ile birlikte püskürtülür. Daha sonra elle yatırma yöntemindeki gibi rulo yardımıyla laminasyon işlemi gerçekleştirilir. Şekil 4.4'te püskürtme yönteminin şeması gösterilmektedir [41].



Şekil 4.4 : Püskürtme yönteminin şeması.

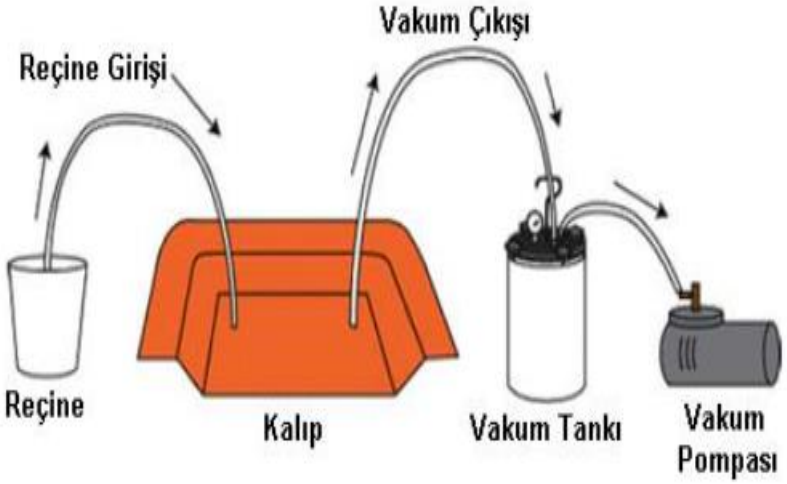
4.5.2 Elyaf sarma yöntemi

Bu yöntemde; takviye malzemesi olan fiber elyafın reçine banyosundan geçirilerek, makara ile dönen bir kalıp yüzeyine sardırılması suretiyle üretim sağlanır. Kimyasal depolama tankları, basınçlı tanklar ve gaz silindirleri bu yöntem ile üretilmektedir [38].

4.5.3 Vakum infüzyon yöntemi

İnfüzyon yönteminde malzemenin el değmeden üretimi amaçlanır. Bu yöntemde, reçine vakumlanmış bir ortamda ilerletilerek takviye elemanına nüfuz ettirilir. Vakum infüzyon prosesinde kullanılan temel araçlar; vakum pompası, vakum tankı (reçine kaçış kabı), reçine kabı ve kalıp şeklindedir [42]. Üretim için; takviye malzemeleri (karbon fiber, cam fiber kumaş) istenilen kalınlık ve katman sayısına ulaşılacak şekilde üst üste istiflenir. Üst üste istiflenen fiber kumaşların üzerine peel ply olarak adlandırılan soyma kumaşı ve laminasyon boyunca reçinenin akışına yardımcı olacak

akış filesi serilir. İnfüzyon işleminde hava geçirimsizliğinin sağlanması açısından çift taraflı vakum sızdırmazlık bantları kullanılır. Daha sonra, matris malzemesi olan reçine; spiral hortumla kurulan reçine hattından, vakum hattındaki basınç kullanılarak fiber kumaşlara aktarılır. Şekil 4.5'te vakum infüzyon yönteminin şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Vakum infüzyon yönteminin şeması [43].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 Deneysel Çalışma

Bu çalışmada, elektromanyetik girişim kalkanlama sağlamak amaçlı karbon fiberler takviye elemanı olarak kullanıldı. Karbon fiber, yüksek mukavemet ve tasarım esnekliği sağlayan hafif bir malzeme olduğundan havacılık endüstrisinde tercih edilmektedir. Ayrıca, tez kapsamında üretilen bazı kompozitlerde cam elyaflar da kullanılmıştır. Kompozit yapıda matris eleman, fiber yapıların birbirine bağlanmasını sağlayan, düşük ve yüksek sıcaklıkta sertleşebilen epoksi reçine seçilmiştir.

Plaka şeklinde üretilen kompozit numuneler için elle yatırma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem bir diğer kompozit malzeme üretim tekniği olan vakum infüzyon metoduna göre uygulama kolaylığı sağlamakla birlikte ekipman ihtiyaçlarını da minimize etmektedir. Ancak yoğun bir iş yükü gerektirmektedir. Çünkü kompozit yapıyı oluşturan katmanların oryantasyonları yani fiber uzanış yönleri, malzemenin mekanik, elektromanyetik dalga soğurma ve yansıtma gibi özelliklerini etkilemektedir. Dolayısıyla, üretim prosesinde gerçekleşebilecek olası fiber kaymalarına karşı azami ölçüde dikkat edilmelidir.

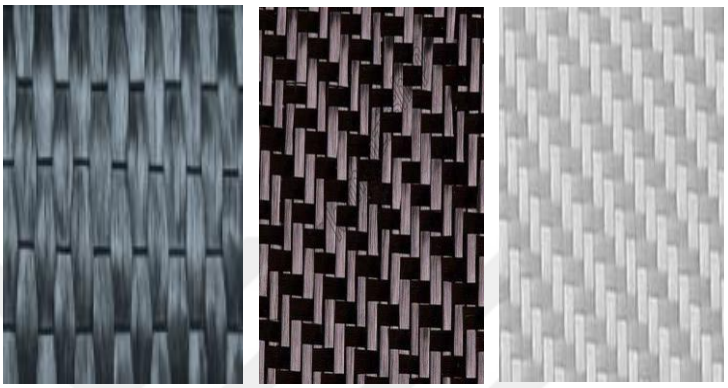
Üretilen kompozit numunelerin oryantasyon açısı, katman sayısı ve fiber kumaş tipi gibi parametreler için elektromanyetik dalga kalkanlama karakteristikleri araştırılmıştır.

Bu kapsamda dayanıklı, hafif ve yeterli seviyede elektromanyetik kalkanlama sağlayacak malzemelerin geliştirilmesi amaçlandı. Üretilen sekiz farklı numune arasından iyi kalkanlama değerlerine ulaşılan kompozitler belirlenmiştir.

Bu bölüm üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci ve ikinci kısımda sırasıyla kompozit plakaların hazırlanma sürecinden ve ölçüm yönteminden bahsedildi. Üçüncü kısımda ise araştırma bulguları ve değerlendirme paylaşıldı.

5.1.1 Kompozit plakaların üretimi

Deneyde, 300 g/m2 gramaja sahip tek yönlü karbon fiber kumaş ile 200 g/m2 gramaja sahip çift yönlü karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Kumaşların çekme dayanımı 3950 MPa, elastisite modülü 238 GPa'dır. Ayrıca daha yüksek kırılma noktası ve esneklik sağlaması açısından çift yönlü cam fiberler de kullanılmıştır. Şekil 5.1'de fiber kumaşlar gösterilmektedir.



(a) (b) (c)

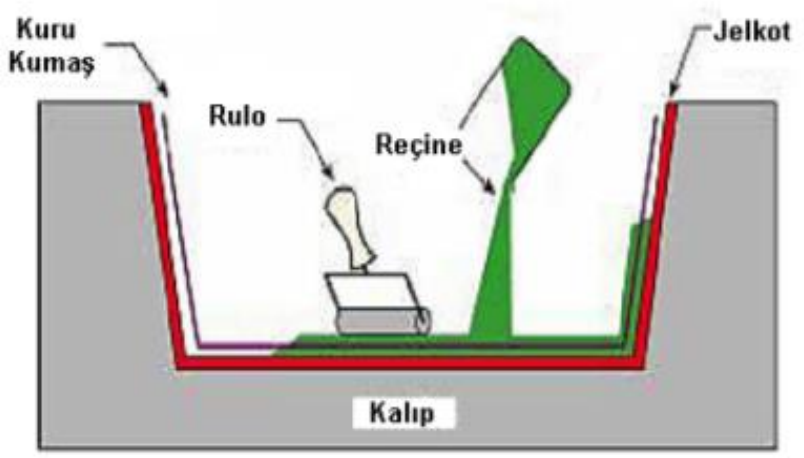
Şekil 5.1 : (a) Tek yönlü karbon fiber kumaş, (b) Çift yönlü 0°/90° karbon fiber kumaş, (c) Çift yönlü 0°/90° cam fiber kumaş.

Epoksi reçinenin kürlenmesi için belirli bir oranda sertleştiricinin reaksiyona girmesi sağlanmıştır. Bu karışım oranının doğru tespiti kürlenme sonrasında elde edilecek yapıda bozulmaların olmaması açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle epoksi reçine ile birlikte yeterli miktarda sertleştirici kullanıldı.

Bu çalışmada, iki set halinde toplam sekiz kompozit plaka üretilmiştir. İlk olarak tek yönlü karbon fiber kumaşlar ile dört adet numune hazırlandıktan sonra, çift yönlü karbon ve cam fiber kumaşlarla hazırlanan diğer dört numune üretildi.

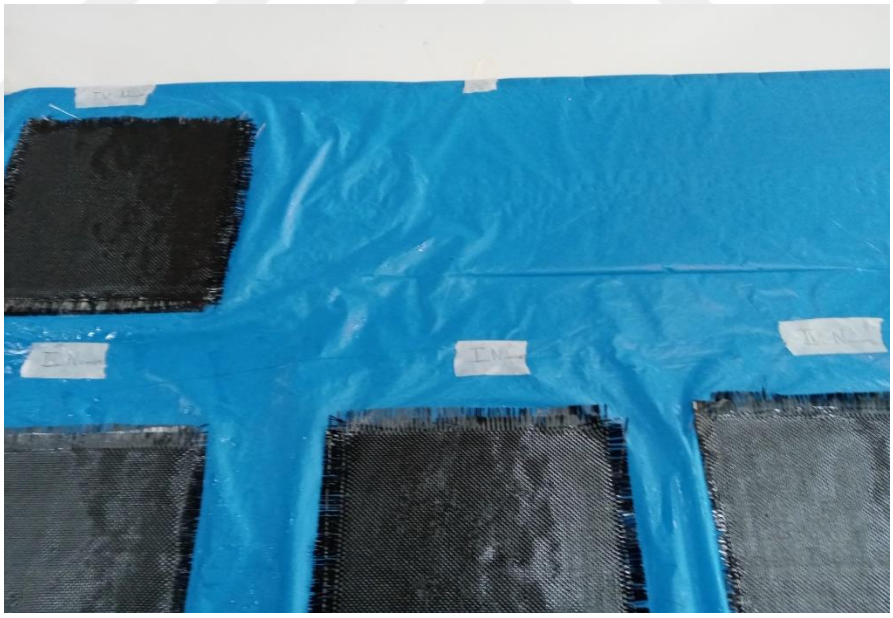
Birinci set malzemelerin üretimi için kumaşlar 25x25 cm boyutlarında kesilmiştir. Karbon fiberin hacim oranı %45-%50 aralığında olacak şekilde epoksi reçinenin toplam ağırlığı, özgül ağırlıklar belirlenerek bulundu. Epoksi reçine ve sertleştirici 5:3 oranında karıştırıldı. Tüm ölçümlerde hassas terazi kullanıldı. Daha sonra farklı istifleme dizileri ile tasarlanan plakaları üretmek için tek yönlü kumaşlar 90° farklı yönlerde döndürülerek 2 katlı ve 3 katlı plakaların oryantasyonları (istifleme dizileri) [0°, 0°], [0°, 90°], [0°, 0°, 0°] ve [0°, 90°, 0°] olacak şekilde ayarlandı. Bu aşamadan sonra her bir plaka için en alttaki kumaş düzgün bir zemine yatırılmış ve üst yüzeyine epoksi reçine sürülmüştür. Bu işlem sonraki her bir kat için uygulanarak epoksi

reçinenin homojen dağılımı amaçlanmıştır. Hazırlanan yapılar kompozit plaka haline gelmek üzere kürlenmeye bırakılmıştır. Şekil 5.2'de üretim aşamaları anlatılan elle yatırma yönteminin şeması gösterilmektedir.



Şekil 5.2 : Elle yatırma yöntemi [44].

Şekil 5.3'te kürlenmeye bırakılan yapıların görününmünden bir kesit paylaşılmıştır.



Şekil 5.3 : Kürlenme aşaması.

Beş gün süren kürlenmenin akabinde elde edilen kompozit plakaların epoksi nedeniyle zemine yapışmasını önlemek için kalıp ayrıcı vaks kullanılmıştır.

İkinci set malzemelerin üretiminde de aynı proses uygulanmıştır. Plaka boyutları sabit tutularak karbon fiberin hacim oranı %35-%40 aralığında hedeflendi. Plakalar; 2, 3 ve 5 katlı olarak [0°/90°, 0°/90°], [0°/90°, 0°/90°, 0°/90°], [0°/90°, $(0°/90°)_G$, 0°/90°] ve

[0°/90°, $(0°/90°)_G$, 0°/90°, $(0°/90°)_G$, 0°/90°] oryantasyonlarında üretildi. Burada G alt indisi cam fiber kumaşı temsil etmektedir.

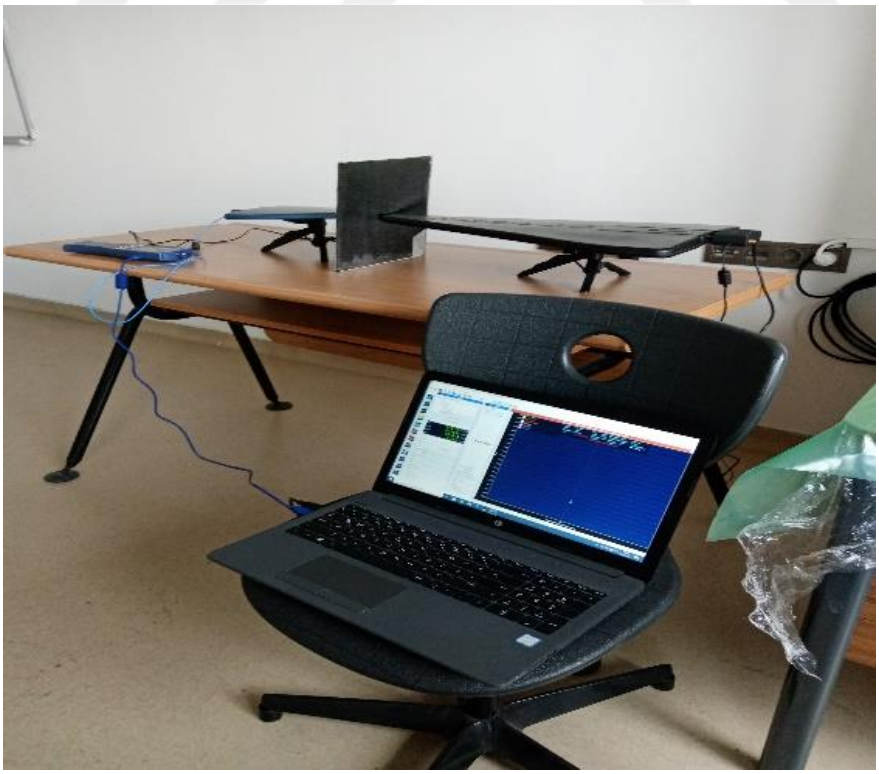
5.1.2 Ölçümler

Ölçüm yöntemi alıcı ve verici antenler arasındaki plakaların sinyal kaybına dayanmaktadır. Öncelikle antenlerin konumları belirlenerek antenler arasındaki boşluk için sinyal kaybı ölçüldü. Daha sonra antenler arasına plakalar yerleştirilerek bunların sinyal kayıpları ölçülmüştür. Plakaların EKE'leri dB cinsinden Denklem 5.1'deki gibi tanımlanmıştır.

$$EKE = 10 \log \left(\frac{P_0}{P}\right) \tag{5.1}$$

Denklem 5.1'de P_0; kalkanlama malzemesi olmaksızın girişim kaynağından alınan güç, P ise kalkanlama malzemesinden geçen güçtür.

Ölçümler için verici tarafında dalga jeneratörü vasıtasıyla 900 MHz ile 6000 MHz arası frekanslara sahip elektromanyetik dalga üretildi. Alıcı tarafında ise spektrum analizörle iletilen dalganın gücü tespit edildi. EKE ölçüm düzeneği Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



Şekil 5.4 : EKE ölçüm düzeneği.

Ölçüm düzeneğindeki verici; Aaronia marka, 400 MHz ile 6 GHz frekans aralığında doğrusal ışıma yapan DFG 4060 model dalga jeneratörü ve antenden oluşmaktadır. Alıcı ise 9.4 GHz'e kadar ölçüm yapan HF 60105 model spektrum analizör ve antenden oluşmaktadır. Verici ve alıcı kısmındaki antenlerin her ikisi de directional antenlerdir. Şekil 5.5'te kullanılan verici kısmı ve Şekil 5.6'da alıcı kısmı gösterilmektedir [45].



Şekil 5.5 : Verici kısmı

Şekil 5.5'te anten ile bağlantısı yapılan dalga jeneratörü portatif olup USB vasıtasıyla bilgisayara bağlantısı yapılmış ve üretici firmanın HF Generator sinyal jeneratörü yazılımı çalıştırılmıştır.



Şekil 5.6 : Alıcı kısmı

Şekil 5.6'da antene sabitlenen spektrum analizör, kablosu yardımıyla taşınabilir olarakta kullanılmaktadır. Spektrum analizörün bilgisayar bağlantısı USB kablo ile yapılmış ve MCS Spectrum Analyzer yazılımı vasıtasıyla ölçüm değerleri gözlemlenmiştir.

Ölçüm düzeneği yalıtkan bir zemin üzerine kurulmuştur. Ayrıca Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'dan antenlerin dışının plastik malzeme ile kaplandığı görülmektedir. Dolayısıyla kompozit plakaların antenler ile teması sakıncalı değildir [46].

Ölçümler alınmadan önce dalga jeneratörünün ve analizörün doğru çalışıp çalışmadığı HF Generator sinyal jeneratörü ve MCS Spectrum Analyzer yazılımları ile test edilmiş ve doğru çalıştıkları görülmüştür.

5.1.3 Bulgular ve tartışma

Çizelge 5.1'de antenler arasındaki boşluğun ve birinci set malzemelerin sinyal zayıflatma değerleri verilmektedir [47].

Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere birinci sütun çalışma frekansını vermektedir. İkinci sütun boşluğun sinyal kaybını ve geri kalan dört sütun ise sırasıyla [0°, 0°], [0°, 90°], [0°, 0°, 0°] ve [0°, 90°, 0°] oryantasyona sahip kompozit plakalardan geçen, alıcıya ulaşan sinyalin gücünü göstermektedir.

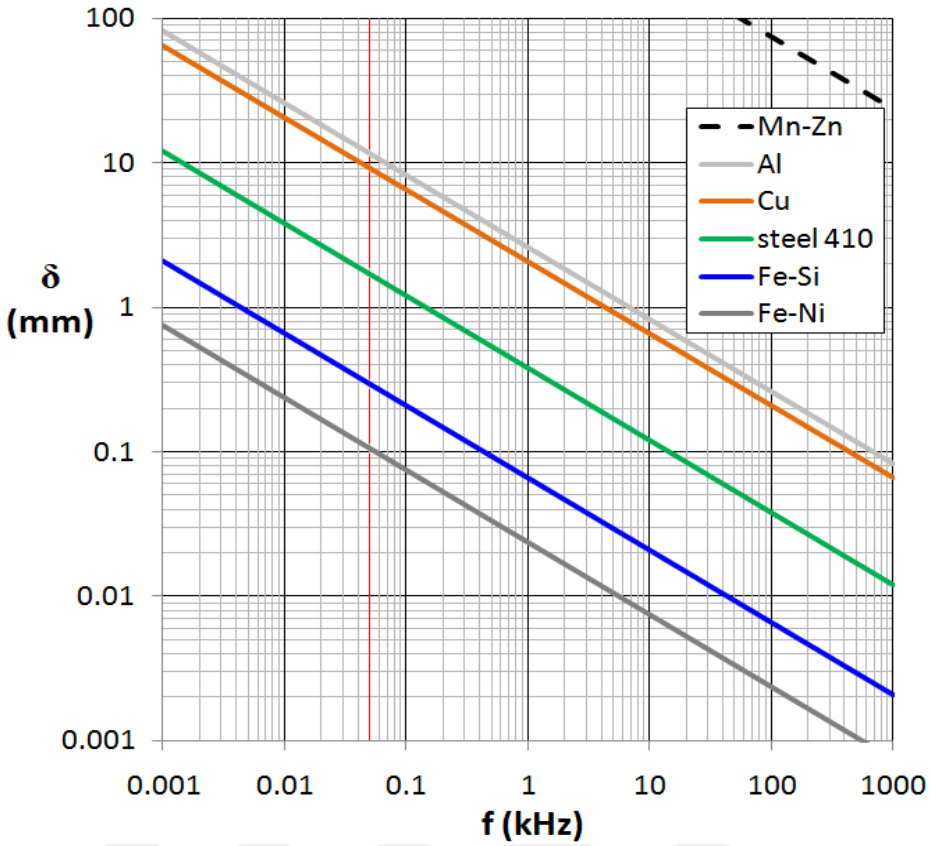
Çizelge 5.1 : Boşluk ve birinci set malzemeler için zayıflama.

Frekans	Boşluk	[0°, 0°]	[0°, 90°]	[0°, 0°, 0°]	[0°, 90°, 0°]
900	-18.82	-22.57	-28.14	-23.38	-27.87
1000	-26.77	-30.81	-34.74	-31.63	-33.51
1100	-18.16	-23.10	-28.74	-25.83	-27.74
1200	-24.55	-28.64	-36.41	-29.98	-34.14
1300	-11.25	-20.22	-31.57	-21.14	-33.11
1400	-10.23	-19.47	-33.03	-20.31	-34.80
1500	-11.20	-18.91	-40.52	-20.59	-33.47
1600	-10.01	-18.08	-36.55	-19.88	-33.95
1700	-11.11	-19.29	-33.88	-20.37	-35.82
1800	-10.44	-18.35	-34.14	-19.64	-35.14
1900	-10.48	-18.59	-34.79	-20.45	-36.29
2000	-8.07	-16.52	-35.01	-18.01	-36.01
2100	-11.01	-20.44	-38.61	-21.52	-40.69
2200	-10.69	-22.13	-41.06	-22.41	-40.97
2300	-9.98	-21.68	-47.78	-22.04	-43.61
2400	-11.46	-21.54	-48.46	-21.87	-45.24
2500	-4.89	-14.16	-48.03	-14.42	-41.70
2600	-16.75	-21.39	-50.77	-21.20	-49.84
2700	-16.28	-21.81	-47.86	-21.81	-61.93
2800	-16.52	-21.70	-50.26	-21.58	-49.90
2900	-15.67	-20.99	-54.34	-20.86	-47.15
3000	-17.27	-23.70	-57.96	-23.16	-51.72
3100	-16.58	-21.77	-50.01	-21.52	-50.42
3200	-16.97	-22.75	-50.30	-22.02	-47.84
3300	-17.29	-22.67	-62.32	-22.30	-61.66

Çizelge 5.1 (devam) : Boşluk ve birinci set malzemeler için zayıflama.

Frekans	Boşluk	[0°, 0°]	[0°, 90°]	[0°, 0°, 0°]	[0°, 90°, 0°]
3400	-17.10	-22.97	-55.79	-22.31	-60.07
3500	-17.51	-23.00	-61.06	-22.51	-52.43
3600	-25.64	-31.44	-64.77	-30.87	-66.24
3700	-15.80	-21.40	-61.55	-20.92	-59.91
3800	-15.90	-21.73	-55.55	-21.13	-60.38
3900	-15.51	-20.82	-65.59	-20.41	-61.75
4000	-14.93	-21.06	-56.47	-20.53	-54.60
4100	-14.31	-20.18	-59.35	-19.74	-61.80
4200	-15.53	-21.64	-59.76	-20.74	-57.93
4300	-15.48	-21.17	-69.29	-20.76	-60.89
4400	-15.08	-21.76	-60.27	-20.61	-56.74
4500	-14.89	-20.83	-59.74	-19.95	-62.90
4600	-15.77	-22.14	-60.80	-21.35	-69.98
4700	-16.89	-23.80	-59.60	-22.70	-58.53
4800	-15.47	-21.37	-60.46	-20.64	-63.96
4900	-15.12	-21.56	-66.66	-20.78	-75.46
5000	-16.03	-21.95	-64.93	-21.16	-59.01
5100	-15.80	-21.70	-67.32	-21.40	-75.05
5200	-15.37	-21.84	-60.37	-20.57	-64.73
5300	-15.45	-21.32	-64.54	-20.53	-57.23
5400	-15.28	-21.62	-69.26	-20.89	-69.98
5500	-16.06	-21.75	-66.33	-20.84	-71.26
5600	-14.27	-19.72	-65.53	-19.11	-56.91
5700	-15.73	-21.81	-65.22	-21.01	-66.48
5800	-17.14	-21.99	-67.04	-21.19	-60.19
5900	-15.38	-21.76	-63.90	-20.44	-58.04
6000	-14.38	-20.14	-61.16	-19.57	-67.62

Çizelge 5.1'den oryantasyonun EKE'ye önemli derecede etki ettiği görülmektedir. Çalışma frekansı 1100 MHz seçildiğinde [0°, 0°] oryantasyon için (karbon fiber katları aynı yönde) kayıp -23.10 dB iken [0°, 90°] oryantasyonda (karbon fiber katları birbirine dik) kayıp -28.74 dB'dir. Başka bir örnek olarak çalışma frekansı 5800 MHz seçilirse [0°, 0°] oryantasyonda kayıp -21.99 dB iken [0°, 90°] oryantasyonda kayıp -67.04 dB'dir. Dolayısıyla, kompozit plakaların oryantasyonları değiştirildiğinde kaybın da değişeceği sonucuna varılabilmektedir. Özellikle, oryantasyon açısı 90° yani elektromanyetik dalga yayılım yönüne dik olduğunda artan soğurma kaybına bağlı olarak EKE'nin ciddi bir şekilde artış gösterdiği görülmektedir. Dahası, çalışma frekansının arttırılması kaybı da önemli oranda arttıracaktır. Şekil 5.7'de bazı iletkenlerin deri kalınlıklarının frekansa göre değişimi verilmektedir.

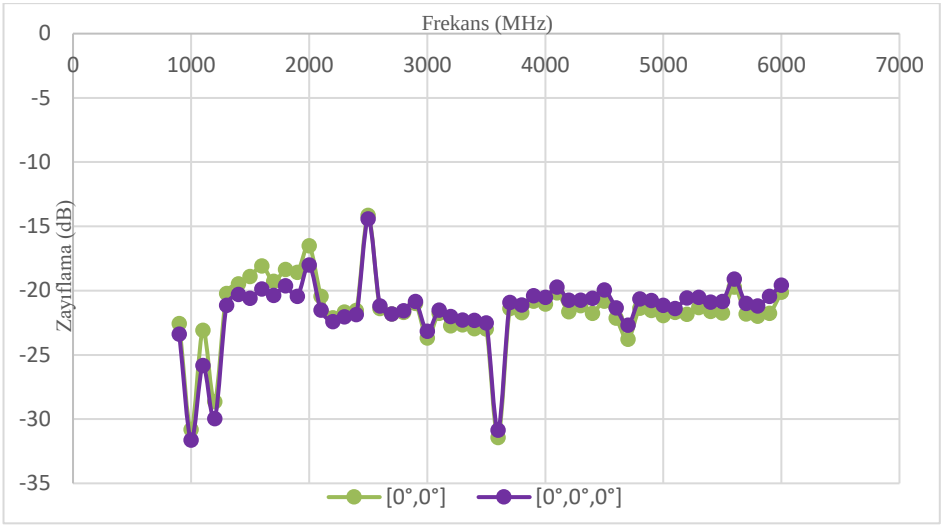


Şekil 5.7 : Deri kalınlığının frekansa bağlı değişimi [48].

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi iletkenlerin deri kalınlığı frekans artışı ile azalmaktadır. Soğurma kaybının matematiksel ifadesine göre deri kalınlığının azalması kaybı arttırmakta ve çok yüksek EKE değerlerine ulaşılmaktadır. Bu durum üretilen kompozit plakalar ile gerçekleştirilen deneylerde de genel trendde görülmüştür. Bazı frekans artışlarında kaybın artmamasının sebebi ise kullanılan karbon fiberlerin karakteristikleri ile ilgilidir.

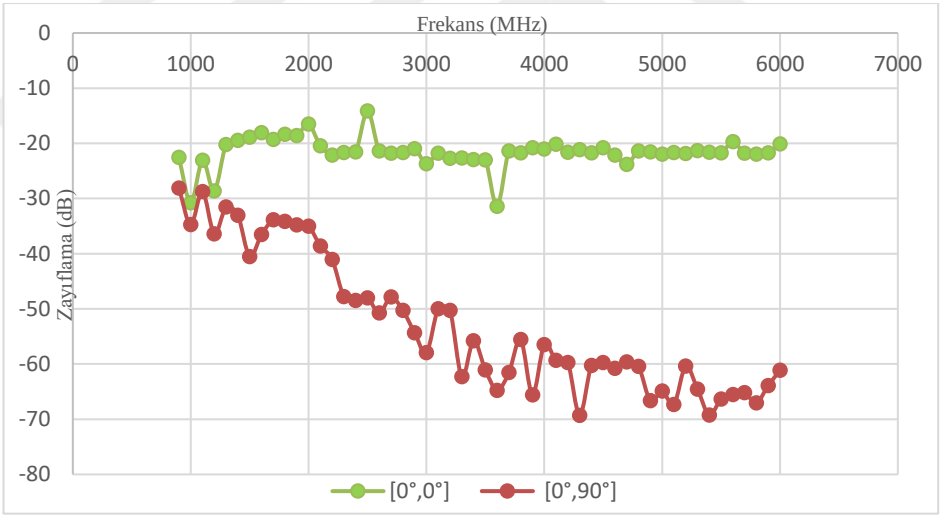
Ayrıca, Çizelge 5.1'den katman sayısının EKE'yi etkilediği görülebilir. Çalışma frekansı 2200 MHz seçildiğinde [0°, 0°] oryantasyon için (karbon fiber katları aynı yönde) kayıp -22.13 dB iken [0°, 0°, 0°] oryantasyonda (üç karbon fiber katı aynı yönde) kayıp -22.41 dB'dir. Farklı bir örnek olarak frekans 5600 MHz seçilirse [0°, 0°] oryantasyonda kayıp -19.72 dB iken [0°, 0°, 0°] oryantasyonda kayıp -19.11 dB'dir. Bu nedenle, katman sayısı arttırıldığında kaybın az değişeceği sonucu çıkarılabilir.

900 ile 6000 MHz frekans aralığında gerçekleştirilen ölçümlere göre [0°, 0°] ve [0°, 0°, 0°] oryantasyonları için elektromanyetik dalganın zayıflama grafiği Şekil 5.8'de verilmektedir.



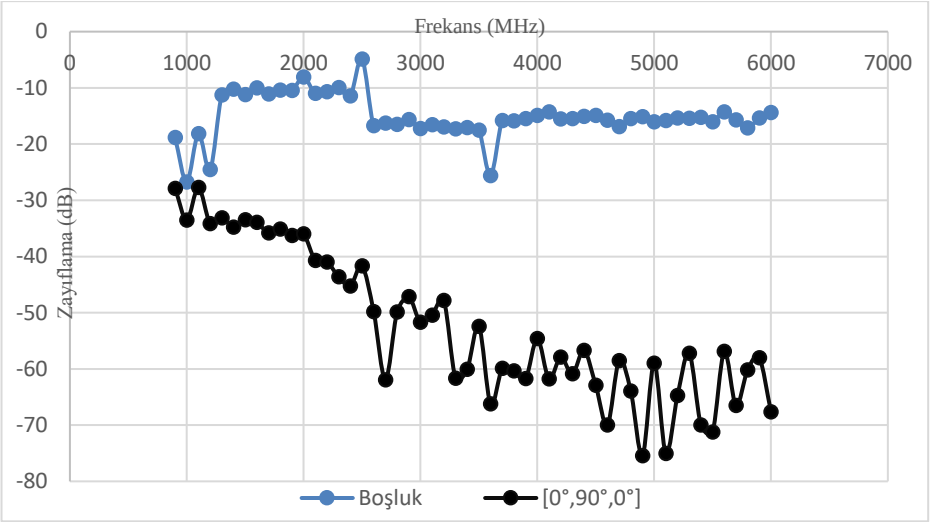
Şekil 5.8 : [0°, 0°] ve [0°, 0°, 0°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama.

Şekil 5.8'de aynı oryantasyona sahip 2 katmanlı ve 3 katmanlı kompozit plakaların neredeyse aynı örüntüleri oluşturdukları görülmektedir. 900 ile 6000 MHz frekans aralığında gerçekleştirilen ölçümlere göre [0°, 0°] ve [0°, 90°] oryantasyonları için elektromanyetik dalganın zayıflama grafiği Şekil 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5.9 : [0°, 0°] ve [0°, 90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama.

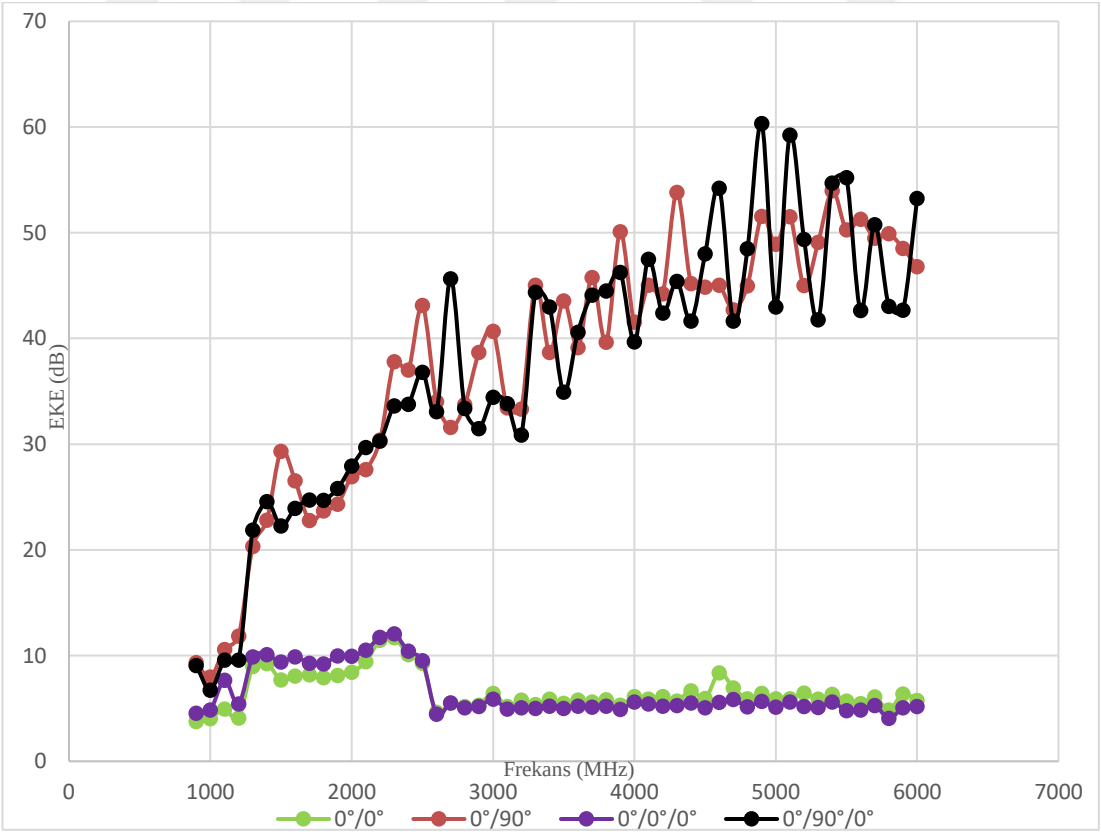
Şekil 5.9'dan kompozit plakaların zayıflatma örüntülerinin birbirinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek frekanslarda yaklaşık olarak 40 dB fark bulunmaktadır. 900 ile 6000 MHz frekans aralığında gerçekleştirilen ölçümlere göre boşluk ve [0°, 90°, 0°] oryantasyon için elektromanyetik dalganın zayıflama grafiği Şekil 5.10'da verilmektedir.



Şekil 5.10 : Boşluk ve [0°, 90°, 0°] oryantasyonlu kompozit plaka için zayıflama.

Şekil 5.10'da görüldüğü üzere boşluk ve [0°, 90°, 0°] oryantasyonlu kompozit plaka çok farklı elektromanyetik dalga zayıflatma örüntüleri oluşturmuştur. Yüksek frekanslarda yaklaşık 60 dB'lik fark meydana gelmiştir.

Şekil 5.11'de birinci set malzemelerin ölçüm yapılan frekans aralığı için Denklem 5.1 kullanılarak elde edilen EKE'leri verilmektedir.



Şekil 5.11 : Birinci set malzemelerin EKE'leri.

Şekil 5.11 incelendiğinde en yüksek kalkanlama etkisine 4900 MHz'de [0°, 90°, 0°] oryantasyonlu malzeme ile ulaşıldığı görülmektedir. Bu frekansta malzeme 60.34 dB kalkanlama etkisi sağlamıştır. Ayrıca, 5400 MHz'de [0°, 90°] oryantasyonlu malzeme ile 53.98 dB kalkanlama elde edildi. [0°, 0°] ve [0°, 0°, 0°] oryantasyonlu malzemeler 2300 MHz'de sırasıyla 11.70 dB ve 12.06 dB kalkanlama göstermiştir.

Tek yönlü karbon fiber kumaşlar kullanılarak üretilen birinci set malzemelerin ölçümleri gerçekleştirildikten sonra, kalkanlama açısından iki farklı kumaş tipini kıyaslamak için çift yönlü karbon fiber kumaşlarla üretilen ikinci set malzemelerin ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 5.2'de boşluk ve ikinci set malzemeler için ölçüm değerleri verilmektedir [49].

Çizelge 5.2 : Boşluk ve ikinci set malzemeler için zayıflama.

Frekans	Boşluk	Plaka 1	Plaka 2	Plaka 3	Plaka 4
900	-18.82	-25.07	-24.84	-25.37	-24.93
1000	-26.77	-30.93	-30.83	-30.85	-30.71
1100	-18.16	-26.94	-26.18	-26.72	-26.68
1200	-24.55	-33.04	-32.93	-32.35	-32.74
1300	-11.25	-30.39	-31.03	-30.51	-30.75
1400	-10.23	-33.20	-35.82	-34.30	-34.67
1500	-11.20	-33.46	-33.73	-34.39	-35.14
1600	-10.01	-33.39	-33.06	-33.68	-33.43
1700	-11.11	-32.99	-32.99	-32.76	-33.75
1800	-10.44	-33.70	-33.29	-33.45	-33.80
1900	-10.48	-35.00	-35.30	-34.80	-36.21
2000	-8.07	-36.08	-36.78	-35.88	-37.28
2100	-11.01	-41.1	-41.27	-40.88	-41.46
2200	-10.69	-39.62	-40.73	-40.21	-40.65
2300	-9.98	-41.83	-42.48	-42.44	-43.67
2400	-11.46	-43.27	-44.14	-43.98	-43.51
2500	-4.89	-39.82	-40.47	-41.81	-40.05
2600	-16.75	-47.20	-49.48	-49.31	-47.86
2700	-16.28	-53.04	-53.39	-53.26	-51.96
2800	-16.52	-54.14	-53.47	-54.35	-58.33
2900	-15.67	-48.53	-48.07	-48.26	-49.97
3000	-17.27	-51.20	-51.48	-51.99	-51.80
3100	-16.58	-47.18	-47.66	-48.09	-47.26
3200	-16.97	-46.62	-46.64	-47.13	-46.56
3300	-17.29	-53.15	-55.48	-55.55	-51.19
3400	-17.10	-53.83	-54.50	-55.37	-53.81
3500	-17.51	-57.20	-59.06	-57.53	-56.62
3600	-25.64	-67.30	-65.67	-67.53	-65.74
3700	-15.80	-65.19	-62.99	-63.15	-63.24
3800	-15.90	-59.35	-60.67	-60.04	-62.02
3900	-15.51	-61.41	-59.47	-61.18	-62.49

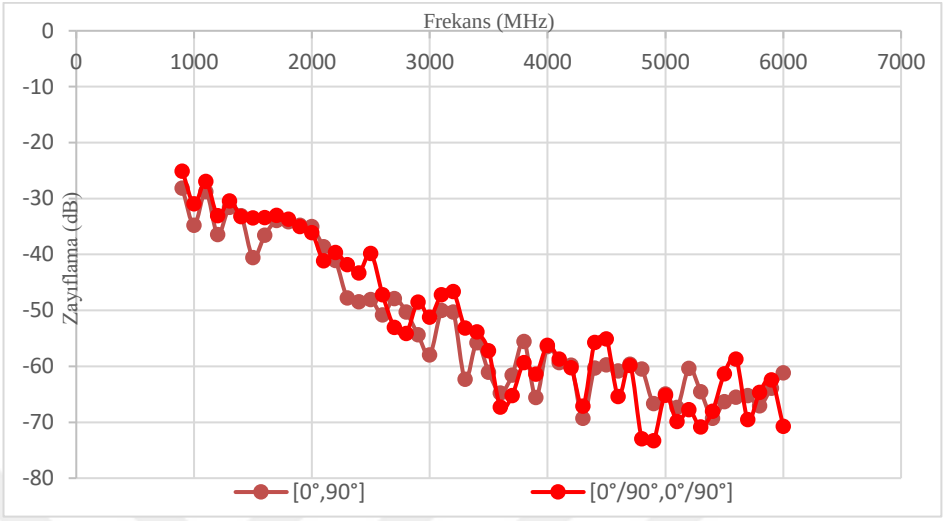
Çizelge 5.2 (devam) : Boşluk ve ikinci set malzemeler için zayıflama.

Frekans	Boşluk	Plaka 1	Plaka 2	Plaka 3	Plaka 4
4000	-14.93	-56.22	-53.94	-55.48	-56.21
4100	-14.31	-58.72	-59.58	-60.33	-57.54
4200	-15.53	-60.21	-58.37	-60.15	-60.13
4300	-15.48	-67.11	-73.46	-72.87	-67.15
4400	-15.08	-55.72	-55.03	-55.12	-55.71
4500	-14.89	-55.08	-53.93	-56.30	-54.84
4600	-15.77	-65.41	-63.67	-67.06	-59.85
4700	-16.89	-59.83	-61.98	-61.19	-59.78
4800	-15.47	-72.95	-76.95	-74.36	-77.60
4900	-15.12	-73.31	-69.15	-67.44	-68.75
5000	-16.03	-65.14	-61.63	-60.72	-64.04
5100	-15.80	-69.88	-69.50	-72.66	-65.33
5200	-15.37	-67.74	-68.00	-67.93	-64.78
5300	-15.45	-70.82	-62.06	-62.39	-65.32
5400	-15.28	-68.02	-67.43	-69.45	-63.90
5500	-16.06	-61.30	-60.64	-60.80	-61.03
5600	-14.27	-58.69	-57.06	-56.97	-57.64
5700	-15.73	-69.51	-69.72	-67.59	-67.75
5800	-17.14	-64.62	-61.82	-61.73	-61.45
5900	-15.38	-62.41	-65.53	-61.55	-62.09
6000	-14.38	-70.69	-70.93	-70.71	-71.66

Çizelge 5.2'de birinci sütun ile çalışma frekansı verilmektedir. İkinci sütun boşluk için sinyal kaybını ve Plaka 1, Plaka 2, Plaka 3 ve Plaka 4 olarak adlandırılan dört sütun ise sırasıyla [0°/90°, 0°/90°], [0°/90°,0°/90°,0°/90°], [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] ve [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] oryantasyona sahip kompozit plakalardan geçmek suretiyle alıcıya gelen sinyalin gücünü ifade etmektedir.

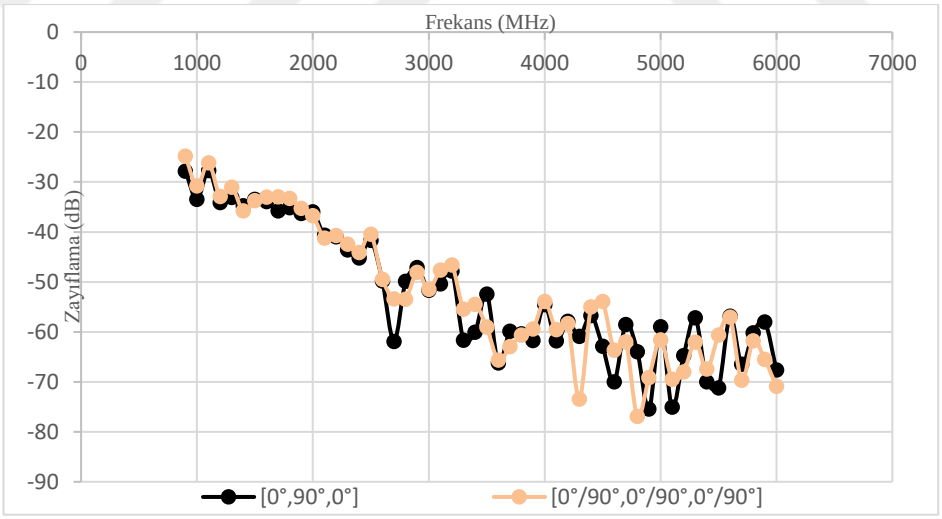
Çift yönlü karbon fiber kumaşlarla üretilen [0°/90°, 0°/90°] ve [0°/90°, 0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalarda karbon fiber hacim oranı azaltılmasına rağmen, 900-6000 MHz frekans aralığındaki sinyal kayıplarının, tek yönlü fiber kumaşlarla üretilen [0°, 90°] ve [0°, 90°, 0°] oryantasyonlu plakalara nazaran önemli derecede değişmediği Çizelge 5.2'de görülmektedir. Bununla birlikte Denklem 5.1'e göre, [0°, 90°] oryantasyonlu kompozit plaka maksimum 53.98 dB kalkanlama verimliliği gösterirken, [0°/90°, 0°/90°] oryantsayonlu plaka ile 58.19 dB'lik maksimum kalkanlama elde edildi. Benzer şekilde, [0°, 90°, 0°] oryantasyonlu kompozit plaka maksimum 60.34 dB kalkanlama verimliliği gösterirken, [0°/90°, 0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu plaka ile 61.48 dB'ye kadar kalkanlama elde edilmiştir. Bu nedenle çift yönlü karbon fiber kumaş kullanımının EKE'yi arttırdığı düşünülebilir.

Çalışılan frekans aralığında yapılan ölçümlere göre [0°, 90°] ve [0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için elektromanyetik dalganın zayıflama grafiği Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12 : [0°, 90°] ve [0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama.

[0°, 90°, 0°] ve [0°/90°, 0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için elektromanyetik dalganın zayıflama grafiği Şekil 5.13'te verilmiştir.

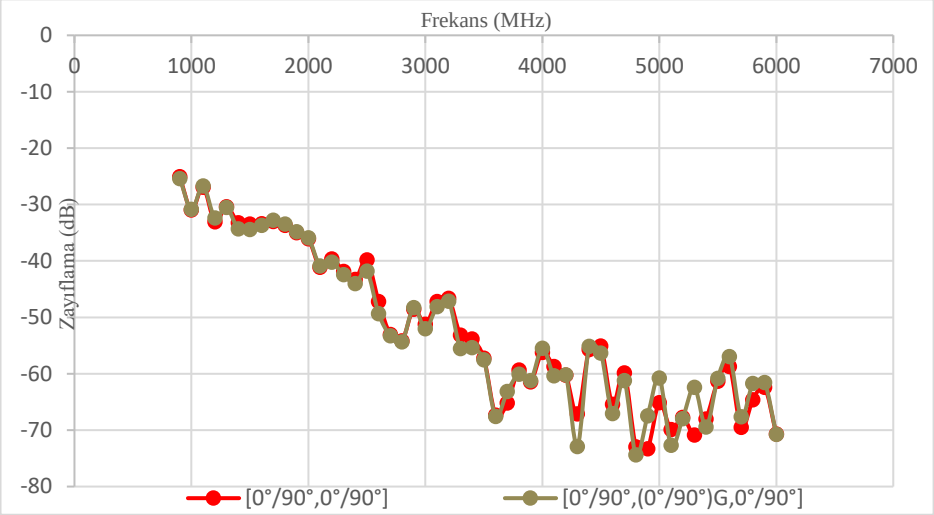


Şekil 5.13 : [0°, 90°, 0°] ve [0°/90°, 0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama.

Ayrıca, Çizelge 5.2'de cam fiber kullanımının EKE'ye önemli bir katkıda bulunmadığı görülmektedir. Çalışma frekansı 1900 MHz seçildiğinde [0°/90°, 0°/90°] oryantasyon için kayıp -35 dB iken [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] oryantasyonda kayıp -34.80 dB'dir. Farklı bir örnek olarak çalışma frekansı 5200 MHz seçilirse [0°/90°, 0°/90°]

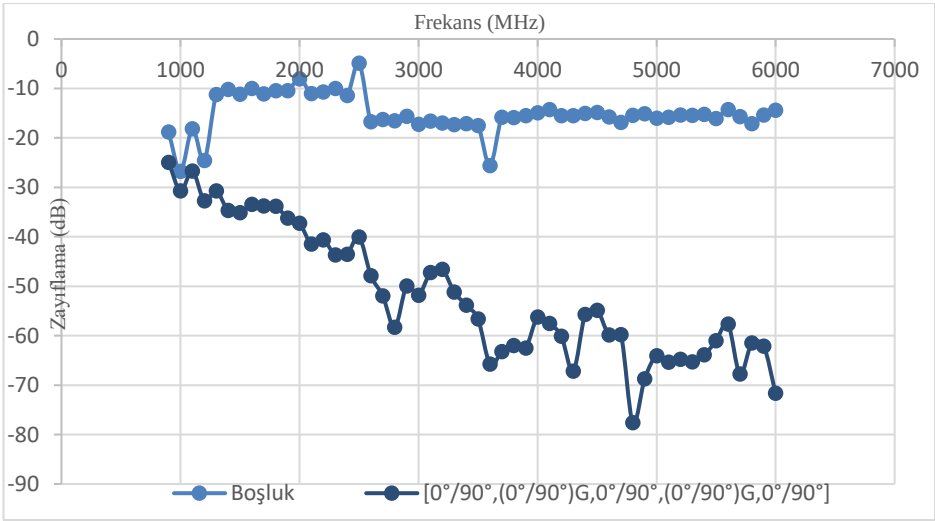
oryantasyonda kayıp -67.74 dB iken [0°/90°,(0°/90°)$_G$,0°/90°] oryantasyonda kayıp -67.93 dB'dir.

[0°/90°, 0°/90°] ve [0°/90°,(0°/90°)$_G$,0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için elektromanyetik dalganın zayıflama grafiği Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14 : [0°/90°, 0°/90°] ve [0°/90°,(0°/90°)$_G$,0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakalar için zayıflama.

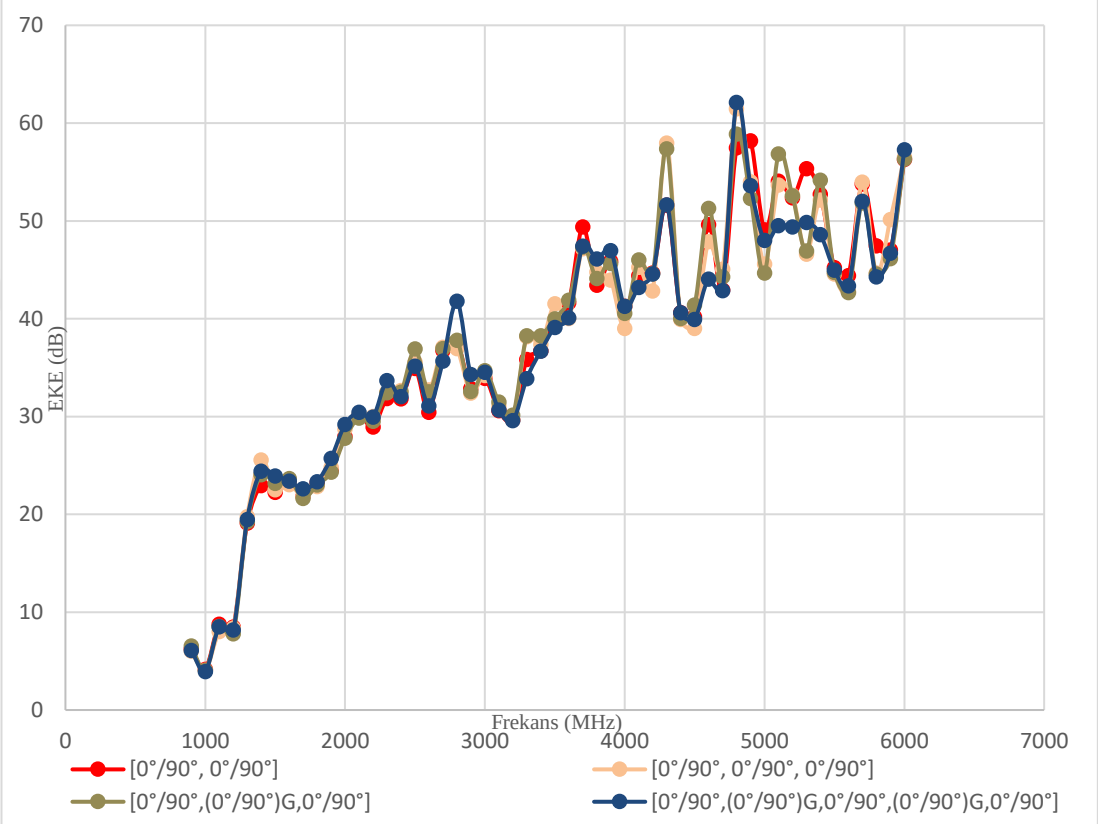
Şekil 5.14'te kompozit plakaların neredeyse aynı örüntülere sahip oldukları görülmektedir. Boşluk ve [0°/90°,(0°/90°)$_G$,0°/90°,(0°/90°)$_G$,0°/90°] oryantasyonlu kompozit plaka için elektromanyetik dalganın zayıflama grafiği Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15 : Boşluk ve [0°/90°,(0°/90°)$_G$,0°/90°,(0°/90°)$_G$,0°/90°] oryantasyonlu kompozit plaka için zayıflama.

Boşluk ve [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] oryantasyonlu kompozit plakanın çok farklı elektromanyetik dalga zayıflatma örüntüleri oluşturdukları Şekil 5.15'te görülmektedir. Yüksek frekanslarda 60 dB'den fazla fark meydana gelmiştir.

Şekil 5.16'da ikinci set malzemeler için çalışılan frekans aralığında Denklem 5.1 kullanılarak elde edilen EKE'leri verilmektedir.



Şekil 5.16 : İkinci set malzemelerin EKE'leri.

Şekil 5.16 incelendiğinde en yüksek kalkanlama etkisine 4800 MHz'de [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] oryantasyonlu malzeme ile ulaşıldığı görülmektedir. Bu frekansta malzeme 62.13 dB kalkanlama etkisi sağlamıştır. 4800 MHz'de [0°/90°, 0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu malzeme ile 61.48 dB kalkanlama elde edildi. [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] oryantasyonlu malzeme yine 4800 MHz'de 58.89 dB kalkanlama gösterdi. Son olarak [0°/90°, 0°/90°] oryantasyonlu malzeme ile 4900 MHz'de 58.19 dB kalkanlamaya ulaşıldı.

Birinci ve ikinci set malzemelerin girişim kaynağından gelen elektromanyetik dalgayı yansıtma kabiliyetleri de deney kapsamında araştırılmıştır. Öncelikle doğrusal olan verici ve alıcı antenler ölçüm yapılacak hedef ile 45'er derece açı yapacak şekilde konuşlandırılmış olup ilgili görsel Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17 : Antenlerin konumu ve yansıtma ölçümü.

Malzemelerin yansıtma becerilerini gözlemlemek için dielektrik ortam ile kıyaslaması yapıldı. Burada duvar dielektrik ortam kabul edilmiştir. Ölçümler 1200, 3000 ve 6000 MHz frekanslarında gerçekleştirildi. Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te sırasıyla birinci ve ikinci set malzemeler için ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Birinci set malzemelerin yansıtma ölçümü.

Frekans	Duvar	[0°, 0°]	[0°, 90°]	[0°, 0°, 0°]	[0°, 90°, 0°]
1200	-41.29	-39.32	-30.83	-39.44	-30.24
3000	-40.80	-29.21	-20.64	-29.01	-20.07
6000	-35.66	-24.07	-18.69	-24.90	-18.14

Çizelge 5.4'te Plaka 1, Plaka 2, Plaka 3 ve Plaka 4 daha önce belirtildiği gibi sırasıyla [0°/90°,0°/90°], [0°/90°,0°/90°,0°/90°], [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] ve [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] oryantasyonlu kompozit malzemeleri temsil etmektedir.

Çizelge 5.4 : İkinci set malzemelerin yansıtma ölçümü.

Frekans	Duvar	Plaka 1	Plaka 2	Plaka 3	Plaka 4
1200	-41.29	-30.50	-30.11	-30.85	-30.53
3000	-40.80	-20.19	-20.27	-20.13	-20.16
6000	-35.66	-18.50	-18.24	-18.45	-18.61

Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'ten kompozit malzemelerin gelen elektromanyetik dalgayı yansıtmaya uğratarak alıcı antene gönderdiği ve alıcıya ulaşan sinyalin gücünü arttırdığı sonucuna varılmaktadır. Duvar ise dielektrik olduğundan gelen dalganın

çoğunu yansıtmak yerine geçirmiştir. Bu nedenle alıcıya ulaşan sinyalin gücü daha zayıf ölçülmüştür.

Üretilen sekiz kompozit malzemenin genel değerlendirmesi yapıldığında, fiber takviyeli kompozit yapıların EKE kabiliyetine en çok etki eden parametrenin oryantasyon olduğu görülmüştür. Katman sayısını arttırmak EKE'ye ciddi bir katkı sağlamayacağı gibi eklenen her bir kat için fazladan fiber kumaş ve epoksi reçine kullanımı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla fiberlerin karakteristikleri göz önünde bulundurularak, yansıma ve soğurma kayıplarından maksimum derecede faydalanacak şekilde uygun oryantasyonların belirlenmesi önemlidir. Bu kapsamda [0°, 90°], [0°, 90°, 0°], [0°/90°, 0°/90°], [0°/90°,0°/90°,0°/90°] ve ayrıca cam fiber takviyeli [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°], [0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°,$(0°/90°)_G$,0°/90°] oryantasyonlu malzemeler kalkanlama amaçlı kullanılabilir. Çizelge 5.5 bunu doğrulamaktadır.

Çizelge 5.5 : EKE seviyeleri [50].

EKE	Derece
10 dB	Kötü
20 dB	Yetersiz
30 dB	Orta
60 dB	İyi
90 dB	Çok iyi
120 dB	Mükemmel

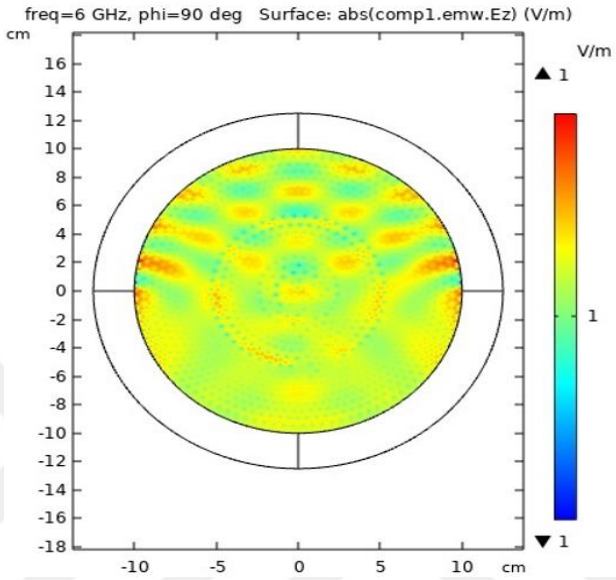
Dahası, görece daha yüksek frekanslarda malzemelerin daha iyi EKE değerlerine ulaşacağı öngörülmektedir. Ayrıca plaka olarak tasarlanan bu malzemeler, hava aracı gövde paneli gibi daha kompleks yapılar için kalıp model kullanmak suretiyle üretilebilir ve istenilen şekil verilebilir.

5.2 Simülasyon Çalışması

Elektromanyetik dalga saçılımı gibi sınır değer problemleri içeren sistemlerin analizi FEM yani sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında hedeften yeterince uzakta olduğu varsayılan bir kaynaktan elektromanyetik dalgalar üretilmiştir. Bu dalgalar düzlem dalga davranışı göstereceğinden simülasyon ortamında oluşturulacak geometride girişim kaynağı dışarıda tutulabilir. Simülasyon çalışmaları vasıtasıyla modellenen hedefler ile bunların çevresinde meydana gelen elektrik alan büyüklüklerinin hesaplanarak EKE'lerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca gelen elektromanyetik dalgalar 0-2π aralığında 1'er derece

aralıklarla üretilerek çeşitli cisimler ile hava araçlarına ait RKA'lar hesaplanmıştır. Simülasyonlar FEM tabanlı çalışan COMSOL ortamında ve iki boyutta gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.18'de model geometrisi yalnızca hava ortamından oluşmuş olup hedef geometrisi ve malzeme tanımı yapılmamıştır.

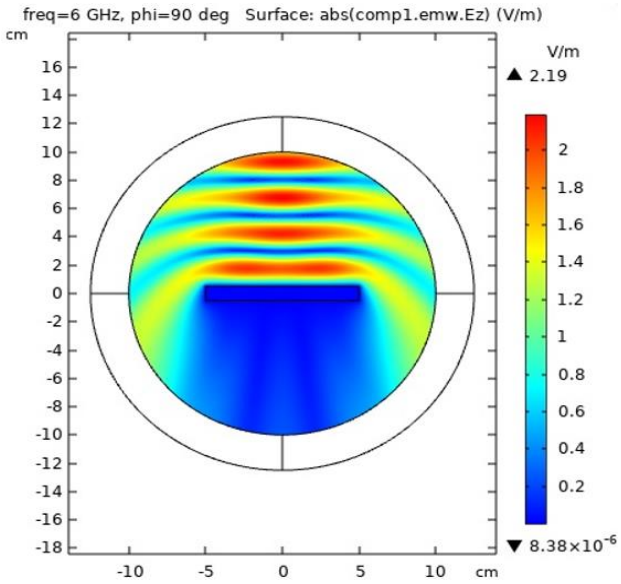


Şekil 5.18 : Hava kesiti için elektrik alan simülasyonu.

Şekil 5.18'de içteki daire ile hava kütlesi temsil edilmektedir. Dıştaki daire elektromanyetik dalganın model ortamını terk ederken empedans farklılığından dolayı geri yansımasını önlemek için mükemmel eşlenmiş katman olarak tanımlanmıştır. Ayrıca içteki dairenin çapı elektromanyetik dalganın dalga boyuna göre belirlenmiştir. Modelde dalgaların geliş açısı phi saat yönünün tersinde artmaktadır.

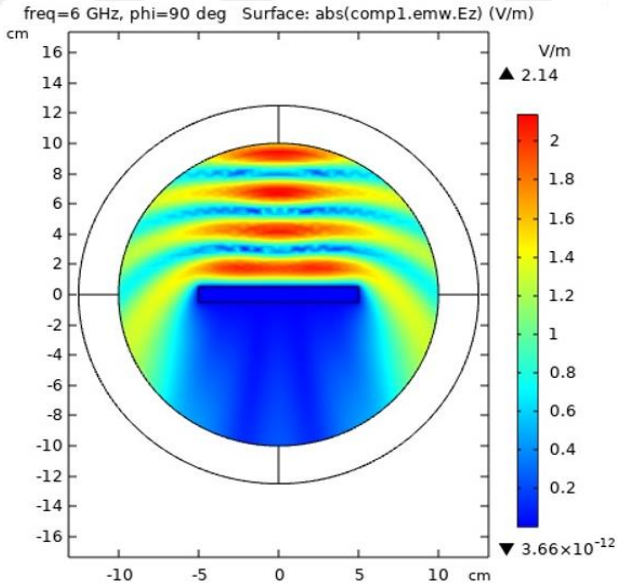
Şekil 5.18 incelendiğinde 6 GHz frekansta girişim kaynağından gelen elektrik alanın hava kesiti boyunca neredeyse hiç değişime uğramadığı görülmektedir. Dolayısıyla kayda değer bir kalkanlama etkisi de bulunmamaktadır.

Şekil 5.19'da kalkanlama elde etmek için hedef olarak 1x10 cm boyutlarında alüminyum malzeme kullanılmıştır. Alüminyum yüksek iletkenlik değerine sahip ve saçıcı özellikte bir malzeme olup, özellikle yüksek frekanslarda deri etkisi faktörü ile çok yüksek kalkanlama verimliliği sunmaktadır. Bu nedenle elektrik alanın hava kesiti boyunca önemli oranda azalacağı bölgeler beklenmektedir.



Şekil 5.19 : Alüminyum için elektrik alan simülasyonu.

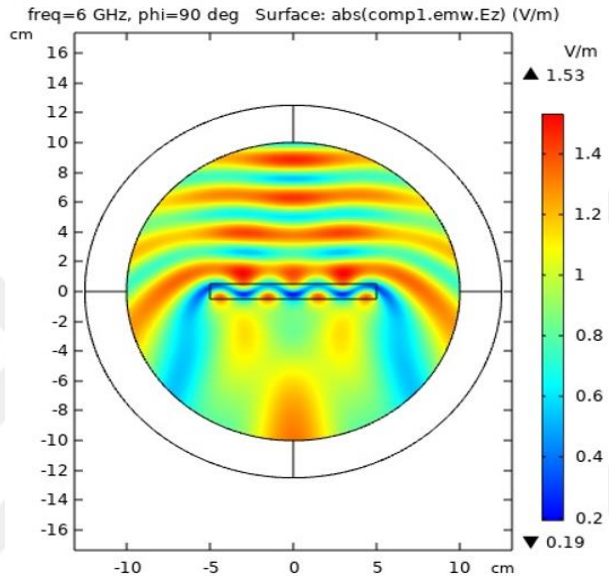
Şekil 5.19'dan elektrik alan büyüklüğünün hedef ve hedefin arka tarafında oldukça azaldığı ve buna bağlı olarak karanlık bölgenin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca elektromanyetik dalganın gönderildiği 90° doğrultusunda, hedeften yansımalara bağlı olarak elektrik alanın şiddeti artmıştır. Şekil 5.20'de 1x10 cm boyutlarında demir malzeme kullanılmıştır.



Şekil 5.20 : Demir için elektrik alan simülasyonu.

Şekil 5.20'den demir ile yapılan ölçümlerde karanlık bölgedeki elektrik alan şiddetinin daha da azaldığı görülmektedir. Demir iyi bir iletken olmasının yanı sıra çok yüksek manyetik geçirgenlik değerine sahip ferromanyetik bir malzeme olduğundan, deri kalınlığı ve soğurma kaybı bağıntılarına göre yüksek soğurma kaybı sunmaktadır.

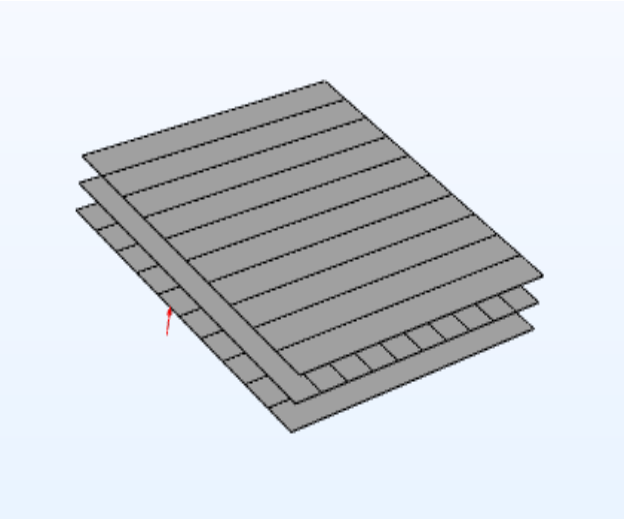
Özellikle yüksek frekanslarda metaller için kalkanlamanın temel mekanizmasının soğurma olduğu düşünüldüğünde bunun beklendik bir sonuç olduğu söylenebilir. Alüminyum ve demir teorik olarak yüksek seviye EKE sağlasa da havacılık endüstrisi gibi ağırlık faktörünün önemli olduğu pratik uygulamalarda tercih edilmez. Diğer taraftan iletkenliği düşük malzemelerin kullanıımı da kalkanlama açısından verimli olmamaktadır. Şekil 5.21'de cam takviyeli epoksi kompozit malzeme olan FR-4 için elektrik alan simülasyonu verilmektedir.



Şekil 5.21 : FR-4 için elektrik alan simülasyonu.

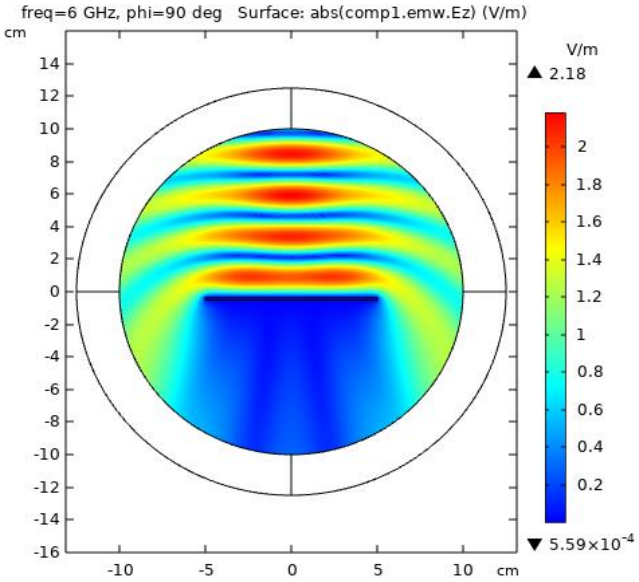
Şekil 5.21'de elektromanyetik dalganın malzeme içerisinden geçerken düşük iletkenliğe bağlı olarak az soğurulduğu görülmektedir. Elektrik alan şiddeti dalganın 270° çıkış doğrultusunda kuvvetli olmakla beraber malzeme içerisinde ve yakın çevresinde en zayıf değerlerini vermiştir. Bu durum hedefin geometrisi ile gözlem yapılan konumun EKE ölçümünde önemli parametreler olduğunu göstermektedir. Ayrıca, tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda cam fiberin EKE'ye ciddi bir katkı sağlamadığı belirtildiği gibi simülasyon çalışmasında da bu durum açıkça görülmektedir.

Sonuç olarak hava araçları için yeterli seviye EKE'nin yanı sıra uygun mekanik özellikler ve hafiflik sağlayacak bir malzemenin gerekliliği ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle tez kapsamında deneysel olarak karbon fiberler ile çalışılmış ve ayrıca simülasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 5.22'de simülasyon için tasarlanan karbon fiber epoksi kompozitin görünümü verilmiştir.



Şekil 5.22 : [0°, 90°, 0°] oryantasyonlu kompozit malzeme.

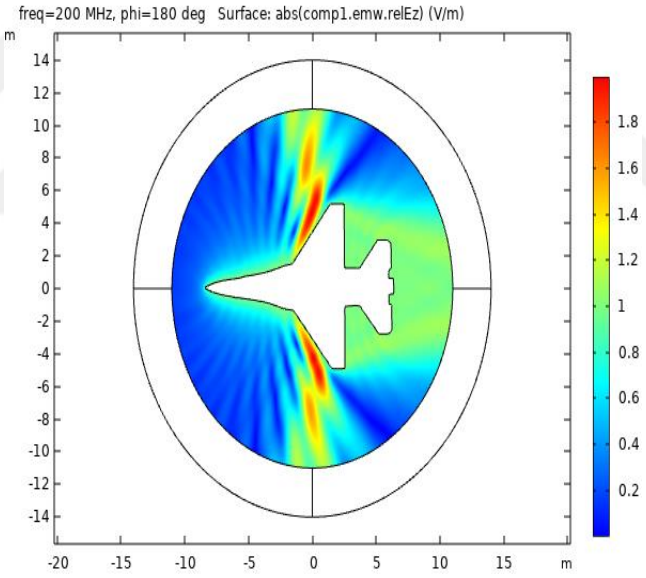
COMSOL programında katmanlı malzemeler modellenebilmektedir. Şekil 5.22'de üç katmanlı karbon fiber kompozitin her bir katmanı için malzeme kütüphanesini kullanarak karbon fiber epoksi malzeme seçimi yapılmış, oryantasyon açıları girilmiş ve katman kalınlığı 0.5 mm belirlenmiştir. Daha sonra seçilen karbon fiber epoksi için parametreler $\mu_r = 0.60$ ve $\sigma_c = 1.6\times10^3$ S/m olarak eklenmiştir [52, 53]. Şekil 5.23'te [0°, 90°, 0°] oryantasyonlu karbon fiber kompozit malzeme için elektrik alan simülasyonu gösterilmektedir.



Şekil 5.23 : Karbon fiber kompozit malzemenin elektrik alan simülasyonu.

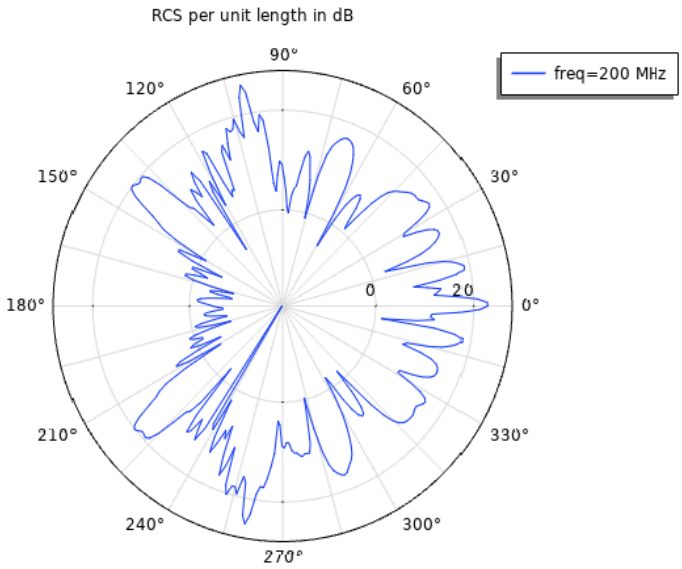
Şekil 5.23'ten karbon fiber yapının alüminyum ve demire nazaran elektrik alan şiddetini daha az zayıflattığı ancak FR-4'e göre daha fazla kalkanlama verimliliği gösterdiği görülmektedir.

Elektromanyetik kalkanlamanın uygulamalarından biri de hayalet uçak gibi düşük radar görünürlüğüne sahip harp teknolojileridir. Bir cismin veya hedefin radar kesit alanı fazla olduğunda o cisme veya hedefe ait radar görünürlüğü de fazla olacağından hedefin radar kesit alanı örüntüsünün hesaplanarak hedef geometrisindeki saçıcı merkezlerin tespit edilmesi oldukça önemlidir. Diğer taraftan hedefin malzeme yapısı da radar kesit alanına etki etmektedir. Bu nedenle hedefin dış tasarımının ve malzeme yapısının radar kesit alanını nasıl etkilediği incelenmiştir. Problemin çözümüne odaklanmak ve işlem süresini minimuma indirmek için simülasyonlar iki boyutta ve 200 MHz radar frekansında hazırlanmıştır. Kullanılan malzemelerin kalınlığı deri kalınlıklarından daha büyük olduğu varsayılarak empedans sınır koşulu kullanıldığı için hedeflerin iç bölgesi hesaplamaya dahil edilmemiştir. Uçak modellerinde gerçek ölçüler baz alınmıştır. Şekil 5.24'te alüminyum gövdeli F-16 uçağının phi=180° için elektrik alan simülasyonu verilmektedir.



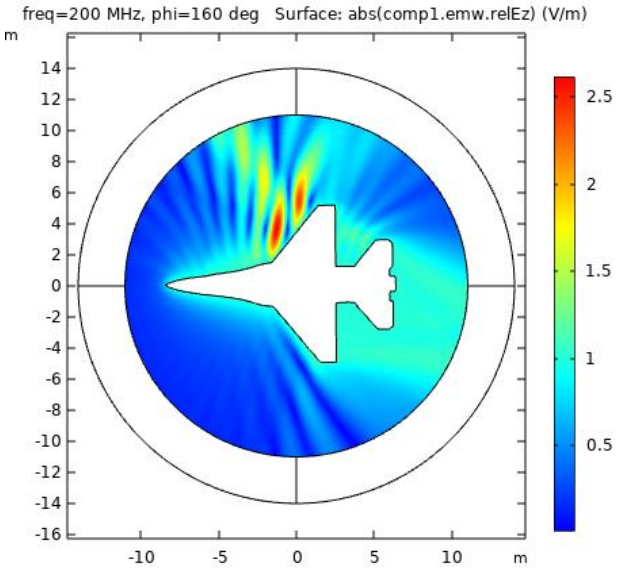
Şekil 5.24 : Alüminyum gövdeli F-16 uçağının simülasyonundan bir kesit.

Şekil 5.24'ten, 180 derecede gelen radar dalgalarının uçağın burun kısmında keskin, sivri bir geometri olduğundan geri yansımadığı fakat kanat kısımlarında düz ve uzun bir geometri bulunduğundan 90° ve 270° doğrultularına yansıdığı ve uçağın arka tarafının karanlık kalmadığı görülmektedir. Radar dalgalarının 0-2π aralığında 1'er derece aralıklı bütün geliş açıları için elektrik alan simülasyonu gerçekleştirildikten sonra RKA örüntüsü hesaplanmıştır. Şekil 5.25'te alüminyum gövdeli F-16 uçağına ait RKA örüntüsü verilmektedir.



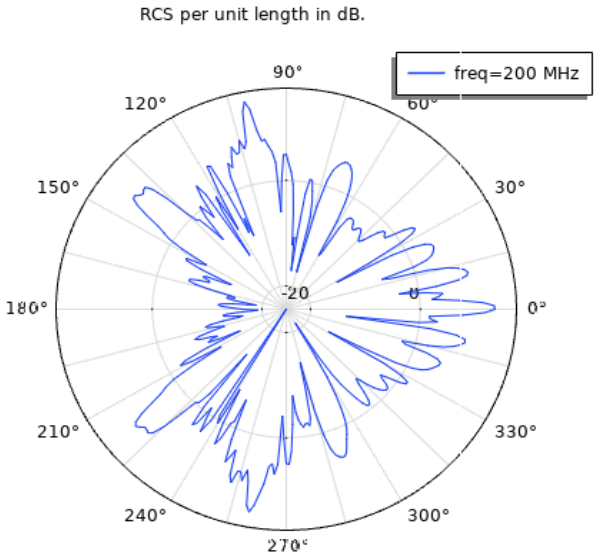
Şekil 5.25 : Alüminyum gövdeli F-16 uçağının RKA örüntüsü.

Şekil 5.25'te hesaplanan en büyük RKA değeri 28 dB civarı olup yaklaşık olarak 100 ve 260 derecede görülmüştür. Uçağın arka tarafında genel olarak RKA yüksek çıkarken burun kısmında RKA 0 dB'nin altına düşmüştür. Dolayısıyla, burun kısmında uçağın radar görünürlüğü oldukça azdır denebilir. Şekil 5.26'da karbon fiber kompozit gövdeli F-16 uçağının phi=160° için elektrik alan simülasyonu verilmektedir.



Şekil 5.26 : Karbon fiber kompozit gövdeli F-16 uçağının simülasyonundan kesit.

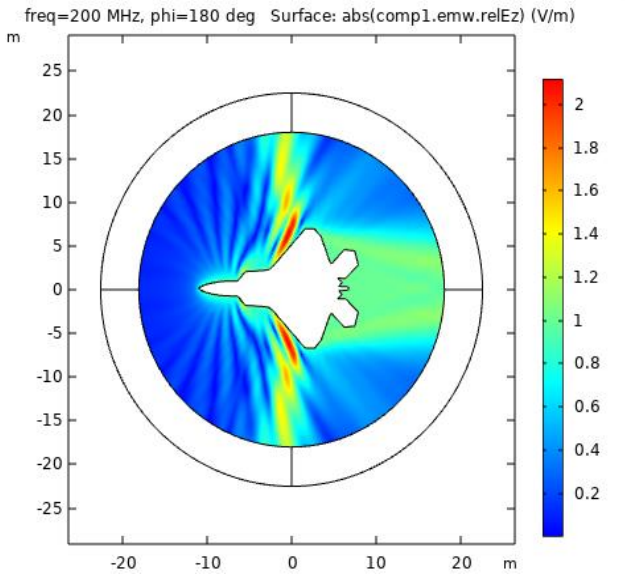
Şekil 5.26'da 160 dereceden gönderilen dalgaların uçağın üstteki kanadından yansıdığı görülmektedir. Şekil 5.27'de karbon fiber kompozit gövdeli F-16 uçağına ait RKA örüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.27 : Karbon fiber kompozit gövdeli gövdeli F-16 uçağının RKA örüntüsü.

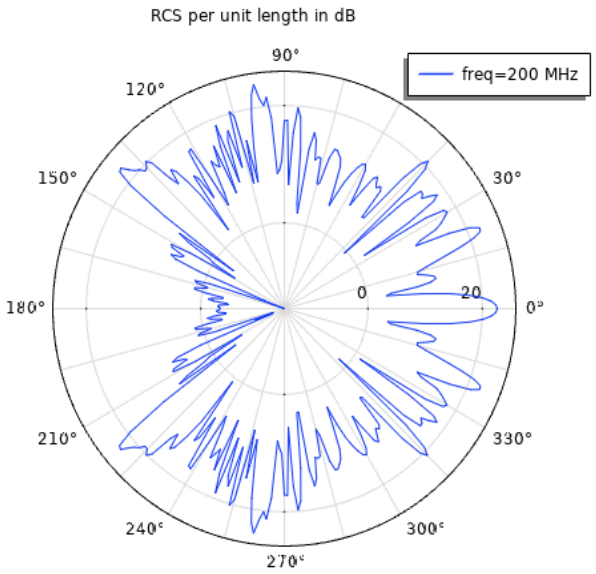
Şekil 5.27'de gövde malzemesi alüminyum yerine daha az saçıcı özellikteki karbon fiber kompozit malzeme seçildiğinde uçağın radar görünürlüğünün azaldığı görülmektedir. Yaklaşık olarak maksimum RKA 17.5 dB hesaplanmıştır. Dolayısıyla, 10.5 dB'lere varan RKA düşüşü görülmüştür.

F-16 uçağından sonra F-22 uçak modeli ile simülasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 5.28'de alüminyum gövdeli F-22 uçağının phi=180° için elektrik alan simülasyonu gösterilmektedir.



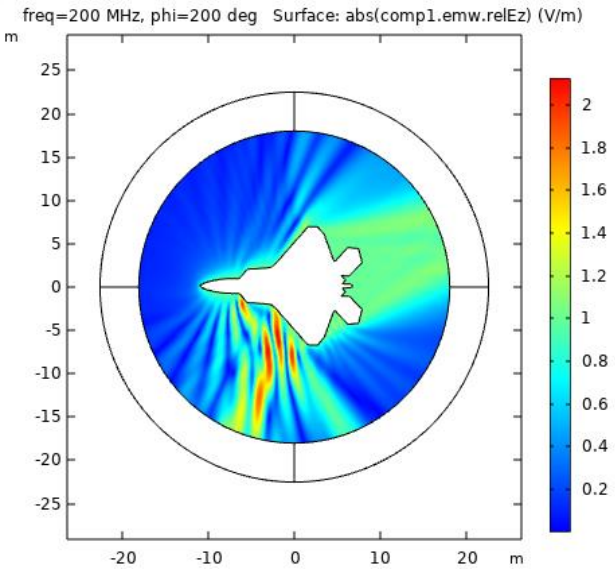
Şekil 5.28 : Alüminyum gövdeli F-22 uçağının simülasyonundan bir kesit.

Şekil 5.29'da alüminyum gövdeli F-22 uçağına ait RKA örüntüsü gösterilmektedir.



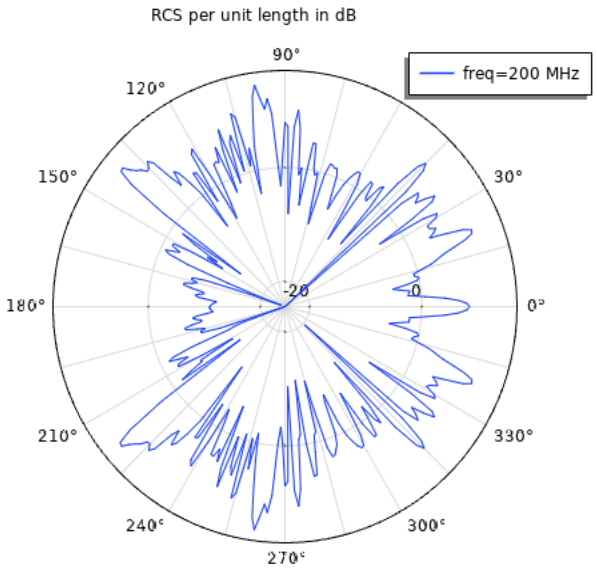
Şekil 5.29 : Alüminyum gövdeli F-22 uçağının RKA örüntüsü.

Şekil 5.29'da hesaplanan en büyük RKA değeri 26 dB civarı olup RKA örüntüsü hemen hemen F-16 uçağınınkine benzer çıkmıştır. Geometrideki farklılıklar bazı bölgelerde RKA değerinin değişmesine neden olmuştur. Şekil 5.30'da karbon fiber kompozit gövdeli F-22 uçağının phi=200° için elektrik alan simülasyonu gösterilmektedir.



Şekil 5.30 : Karbon fiber kompozit gövdeli F-22 uçağının simülasyonundan kesit.

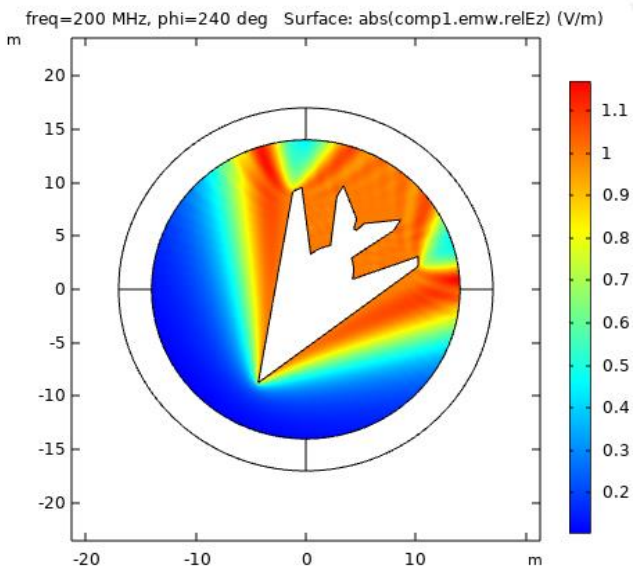
Şekil 5.30'da 200 dereceden gönderilen dalgaların uçağın alttaki kanadından yansıdığı görülmektedir. Şekil 5.31'de karbon fiber kompozit gövdeli F-22 uçağına ait RKA örüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 5.31 : Karbon fiber kompozit gövdeli gövdeli F-22 uçağının RKA örüntüsü.

Şekil 5.31'de gövde malzemesi olarak daha az yansıtıcılı karbon fiber kompozit malzeme kullanıldığında uçağın yine daha az radar görünürlüğüne sahip olduğu sonucuna varılmaktadır. Yaklaşık olarak maksimum RKA 17 dB hesaplanmıştır. Dolayısıyla, 9 dB'lere varan RKA düşüşü görülmüştür.

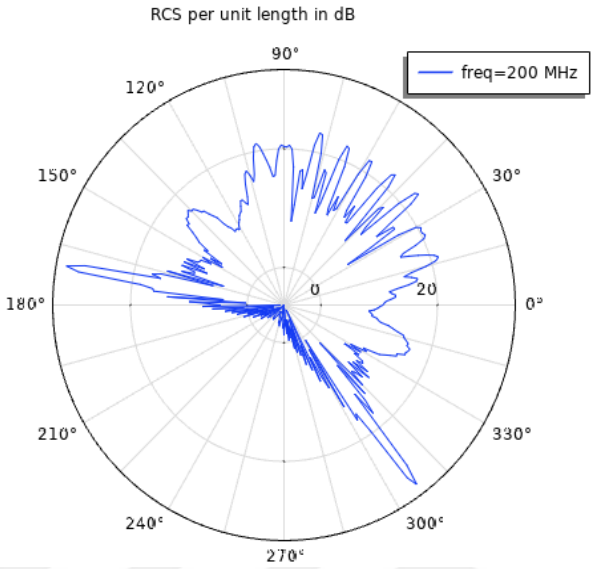
F-22 uçağından sonra saat yönünün tersinde 60° döndürülmüş F-117 uçak modeli ile simülasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 5.32'de alüminyum gövdeli F-117 uçağının phi=240° için elektrik alan simülasyonu gösterilmektedir.



Şekil 5.32 : Alüminyum gövdeli F-117 uçağının simülasyonundan bir kesit.

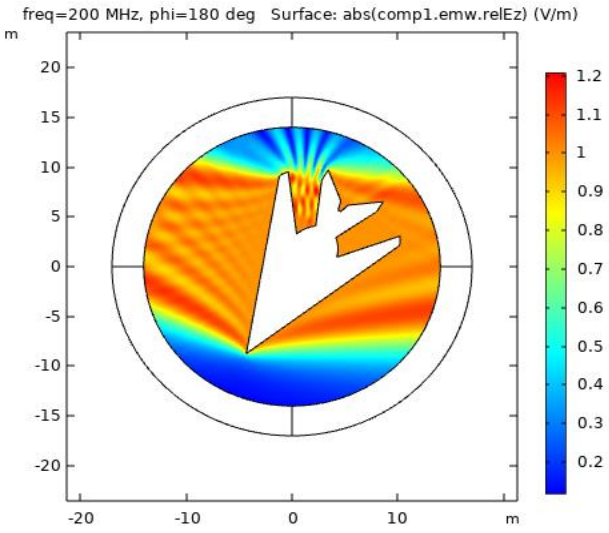
Şekil 5.32'den hedef geometrisindeki özellikle kanatlardaki belirgin değişikliklerin hedeften saçılan dalganın yayılım yönünü etkilediği görülmektedir. Dolayısıyla radar

alıcısına ulaşan dalganın şiddeti de değişecektir. Bu noktada radar alıcısının konumuda önem arz etmektedir. Şekil 5.33'te alüminyum gövdeli F-117 uçağına ait RKA örüntüsü gösterilmektedir.



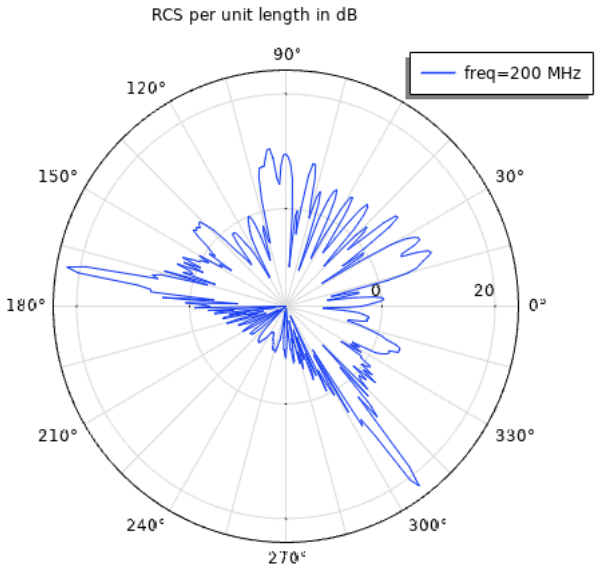
Şekil 5.33 : Alüminyum gövdeli F-117 uçağının RKA örüntüsü.

Şekil 5.33'de uçağın kanatlarının geometrisine bağlı olarak RKA yaklaşık 170 ve 310 derecede 33 dB tepe değeri vermiştir. RKA değeri F-16 ve F-22 uçaklarına nazaran daha fazla çıkmış olmakla birlikte üçüncü boyutun eklenmesiyle F-117 uçağının radar görünürlüğü daha da azalmaktadır çünkü F-117 uçağının yüzeyinde çok fazla keskin, sivri yapıda girinti ve çıkıntılar bulunmaktadır. Şekil 5.34'te karbon fiber kompozit gövdeli F-117 uçağının phi=180° için elektrik alan simülasyonu gösterilmektedir.



Şekil 5.34 : Karbon fiber kompozit gövdeli F-117 uçağının simülasyonundan kesit.

Şekil 5.35’te karbon fiber kompozit gövdeli F-117 uçağına ait RKA örüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.35 : Karbon fiber kompozit gövdeli F-117 uçağının RKA örüntüsü.

Şekil 5.35’de karbon fiber kompozit malzeme 9 dB civarı RKA azaltımı sağlamıştır. Maksimum RKA yaklaşık 24 dB hesaplanmıştır.

Simülasyon çalışmaları incelendiğinde; karbon fiberin elektromanyetik girişimi sınırlandırmanın yanı sıra görünmezlik teknolojisi kapsamında düşük radar izi gerektiren uygulamalarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

6. SONUÇ

Yüksek yoğunluklu yayılan alanların kokpit üzerinde kritik görevler üstlenen aviyonikleri olumsuz etkilemesi ciddi bir sorundur. Özellikle yakın zamanda, hava araçlarındaki aviyoniklerin performans ve güvenilirliğinin arttırılması maksadıyla korunmasına yönelik kaygılar daha da artmıştır. Bu duruma neden olarak; artan elektronik ekipman hassasiyeti ve gerek uçak içerisindeki EMI kaynaklarının gerekse dışarısındaki yüksek güçlü radar ve vericilerin artması verilebilir. Dolayısıyla, hava araçlarında elektromanyetik kalkanlama amacıyla kullanılabilecek ve iyi mekanik özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi son derece önemlidir. Yapılan deneysel çalışmada plaka şeklinde üretilen karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin elektromanyetik kalkanlama karakteristikleri araştırılmıştır. Ölçümler neticesinde fiber oryantasyonunun karbon fiber kompozit malzemelerin kalkanlama verimliliklerine etki eden önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Özellikle fiberin oryantasyon açısı elektromanyetik dalga yayılım yönüne dik yani 90° olduğunda elektromanyetik dalga daha fazla soğurma kaybına uğramakta ve dolayısıyla elektromanyetik kalkanlama etkinliği (EKE) artmaktadır. Bununla birlikte karbon fiber kompozit yapıdaki katman sayısının oryantasyon açısına göre EKE'yi çok daha az etkilediği görülmüştür. Bu nedenle, karbon fiberleri içeren kompozit malzemelerin tasarımında daha iyi kalkanlama elde etmek için öncelikle en uygun oryantasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Böylece fazladan kullanılacak takviye malzemesi ve matris malzemesinden tasarruf edilerek maliyet azaltılabilir. Ayrıca, takviye malzemesi olarak kullanılan karbon fiber kumaşın tek yönlü yerine çift yönlü olmasının EKE'yi arttıracağı sonucuna varılmıştır. 900-6000 MHz frekans aralığında 60 dB civarı EKE sağlayan ve plaka şeklinde hazırlanan kompozit malzemeler, hava araçlarında gövde paneli olarak kullanılmak üzere kalıp model kullanarak üretilebilir.

Simülasyon ortamında karbon fiber kompozit malzeme, alüminyum, demir ve FR-4 için elektrik alan simülasyonları yapılarak EKE'leri araştırılmıştır. Yüksek iletkenlikli metallerin karbon fiber kompozitlerden daha fazla EKE sağlayacağı gösterilmiştir fakat pratikte bunların kullanımı yüksek özgül ağırlıklarından dolayı uygun

olmamaktadır. Düşük radar görünürlüğüne sahip hava araçlarının tasarımı da elektromanyetik kalkanlamanın çalışma alanına girmektedir. Bu kapsamda F-16, F-22 ve F-117 uçak modelleriyle gerçekleştirilen radar kesit alanı (RKA) simülasyonlarında gövde malzemesi olarak alüminyum ve karbon fiber kompozit malzeme kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları uçakların dış tasarımının ve malzeme yapısının RKA'yı etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, karbon fiberin radar görünürlüğünü düşürmek maksadıyla hava araçlarında kullanılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] **Rao, M. S.** (2008). EMI/EMC effects on EW receiver systems of military aircraft. *10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility*, (pp. 63-67). Bangalore, India: November 26-27.

[2] **Rea, S., Linton, D., Orr, E., & McConnell, J.** (2005). Electromagnetic shielding properties of carbon fibre composites in avionic systems, *Mikrotalasna revija*, *11*(1), 29-32.

[3] **Morgan, D.** (1994). *A Handbook for EMC Testing and Measurement*. Stevenage, England: Institution of Engineering and Technology.

[4] **XIAO, Z., GAO, C., BAI, Y., & YUAN, X.** (2015). Aircraft radar stealth test and evaluation technology and progress, *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, *41*(10), 1873-1879.

[5] **Gaylor, K.** (1989). Radar absorbing materials-mechanisms and materials (No. MRL-TR-89-1). Australia: Materials Research Labs Ascot Vale.

[6] **Ding, S. J., Zhao, Y. Z., & Ge, D. B.** (2008). Research progress in electromagnetic shielding materials, *Materials Review*, *22*(4).

[7] **Williams, N., Varadan, V. K., Ghodgaonkar, D., & Varadan, V. V.** (1990). Measurement of transmission and reflection of conductive lossy polymers at millimeter-wave frequencies, *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, *32*(3), 236-240.

[8] **Chung, D. D.** (1994). *Carbon Fiber Composites*. USA: Butter-Heinemann.

[9] **Üstüner, F., Çoşar C.** (2008). MİLGEM Elektromanyetik girişimin azaltılması ve elektromanyetik uyumluluk çalışmaları. *URSI Türkiye Kongresi*, Antalya, Türkiye: Ekim 20-22.

[10] **Uygunol, O., Durduran, S. S.** (2008). Elektromanyetik kirlilik haritalarının coğrafi bilgi sistemi (CBS) yardımıyla oluşturulması. *I. CBS Günleri Sempozyumu*, (s.306-314). Ankara, Türkiye: Kasım 19-21.

[11] **Url-1** <http://www.geo.mtu.edu/rs/back/spectrum/>, erişim tarihi 18.10.2011.

[12] **Roh, J. S., Chi, Y. S., Kang, T. J., & Nam, S. W.** (2008). Electromagnetic shielding effectiveness of multifunctional metal composite fabrics, *Textile Research Journal*, *78*(9), 825-835.

[13] **Więckowski, T. W., & Janukiewicz, J. M.** (2006). Methods for evaluating the shielding effectiveness of textiles, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, *5*(59), 18-22.

[14] **Ott, H. W.** (1988). *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. USA: John Wiley & Sons.

[15] **Saini, P., & Arora, M.** (2012). Microwave absorption and EMI shielding behavior of nanocomposites based on intrinsically conducting polymers, graphene and carbon nanotubes. In *New polymers for special applications* (Vol. 3, pp. 71-112). Croatia: InTech.

[16] **Tong, X.C.** (2009). *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*. Florida, USA: CRC Press.

[17] **Kaşgöz, A.** (2017). *Elektromanyetik dalga kalkanlama özelliğine sahip polimer kompozitlerin geliştirilmesi ve yapı-performans ilişkilerinin incelenmesi* (Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[18] **Koşan, Ö.** (2015). *Katmanlı yapıların ekranlama etkinlik analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[19] **Cheng, L., Zhang, T., Guo, M., Li, J., Wang, S., & Tang, H.** (2015). Electromagnetic shielding effectiveness and mathematical model of stainless steel composite fabric, *The Journal of The Textile Institute*, *106*(6), 577-586.

[20] **Schelkunoff, S. A.** (1938). The impedance concept and its application to problems of reflection, refraction, shielding and power absorption, *Bell System Technical Journal*, *17*(1), 17-48.

[21] **Jaroszewski, M., Thomas, S., & Rane, A. V.** (Eds.). (2018). *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications*. USA: John Wiley & Sons.

[22] **Knott, E. F., Schaeffer, J. F., & Tulley, M. T.** (2004). *Radar Cross Section*. USA: SciTech Publishing.

[23] **Levanon, N., & Mozeson, E.** (2004). *Radar signals*. USA: John Wiley & Sons.

[24] **Hafizah, A. N., Hazwan, M. H., Emileen, A. N., Azmir, R. R. S., Azura, O. K., & Asem, S.** (2015). RCS analysis on different targets and bistatic angles using LTE frequency. *16th International Radar Symposium (IRS)* (pp. 658-663). June 24-26.

[25] **Skolnik, M. I.** (1990). *Radar Handbook (2nd ed.)*. USA: McGraw-Hill.

[26] **Faros, N. I.** (1994). *Radar cross section synthesis for planar resistive surfaces* (Master's thesis). Naval Postgraduate School, California, USA.

[27] **Mahafza, B. R., & Elsherbeni, A. Z.** (2004). *Simulations for Radar Systems Design.*USA: Chapman&Hall/CRC.

[28] **Gac, F. D., Young Jr, A. T., & Migliori, A.** (1996). Technical evaluation of Russian aircraft stealth coating and structural materials (No. LA-UR-96-3227). New Mexico, United States: Los Alamos National Lab.

[29] **Liangliang, C., Kuizhi, Y., Weigang, G., & Dazhao, Y.** (2016). Integration analysis of conceptual design and stealth-aerodynamic characteristics of combat aircraft, *Journal of aerospace technology and management*, *8*(1), 40-48.

[30] **Strong, A. B.** (2007). *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications* (2nd ed.). USA: Society of manufacturing engineers.

[31] **Luo, X., & Chung, D. D. L.** (1999). Electromagnetic interference shielding using continuous carbon-fiber carbon-matrix and polymer-matrix composites, *Composites Part B: Engineering*, *30*(3), 227-231.

[32] **Akçay, N.** (2017). *Akımsız Ni-P ve Ni-B kaplı karbon fiberlerin elektromanyetik kalkanlama özellikleri ve W katkılamanın etkileri* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[33] **Walsh, P. J.** (2001). Carbon fibers. In *ASM Handbook* (Vol. 21, pp. 35-40). USA: ASM International.

[34] **Kim, J. K., & Mai, Y. W. (Eds.).** (1998). *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites* (First ed.). Elsevier.

[35] **Chung, D. D. L**. (2001). Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials, *Carbon*, *39*(2), 279-285.

[36] **Matsumoto, T.** (1985). Mesophase pitch and its carbon fibers, *Pure and applied chemistry*, *57*(11), 1553-1562.

[37] **Yaşa, Y.** (2000). *Kompozit Malzemelere Giriş*. Ankara: Gazi Kitabevi.

[38] **Örs, S.** (2014). *Farklı karbon tekstilleriyle ve reçinelerle oluşturulan karbon kompozitlerin karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[39] **Chung, D. D. L.** (2010). *Composite materials: science and applications* (2nd ed.). London, UK: Springer Science & Business Media.

[40] **Savage, G., Savage, G. M., & Savage, E.** (1993). *Carbon-carbon composites* (First ed.). London, UK: Chapman & Hall.

[41] **Özdemir, B.** (2020). *Polimer matrisli kompozit malzeme imalatı için vakum destekli mekanizmaların geliştirilmesi ve performanslarının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[42] **Stephens, G., & Wilke, D. N.** (2012). Simulation of the vacuum infusion process. *Eighth South African Conference on Computational and Applied Mechanics,* (pp. 133-142). Johannesburg, South Africa: September 3-5.

[43] **Genç, Ç., & Arıcı, A. A.** (2008). Yat İmalatında Kullanılan CTP Malzeme ve İmalat Yöntemleri Bölüm III: İnfüzyon Yöntemi, *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, *178*, 28-31.

[44] **Durgun, İ.** (2014). El yatırma yöntemi ile kompozit parça üretimi, 7. *Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu,* (s. 283-287). Çankaya Üniversitesi, Ankara, Türkiye: Mayıs 15-16.

[45] **Url-1** <https://aaronia.com/>, erişim tarihi 15.06.2021.

[46] **Dursun, B.** (2020). *Çeşitli malzemelerin yüksek frekans soğurma, geçirgenlik ve yansıtma özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[47] **Çoşkun, Y., & Tabakcıoğlu, M.B.** (2021). Electromagnetic Shielding Characteristics of Oriented Carbon Fiber Epoxy Composites. *EMC Türkiye 2021,* (Gönderildi). Istanbul, Turkey: Bahcesehir University.

[48] **Zurek, S.** (2016). Qualitative FEM study of proximity loss reduction by various winding configurations–Part I, *Transformers Magazine*, *3*(1), 70-76.

[49] **Çoşkun, Y., & Tabakcıoğlu, M.B.** (2021). Electromagnetic Shielding Characteristics of Carbon and Glass Fiber Composites, *Journal of Innovative Science and Engineering*,(Hakem İnceleme).

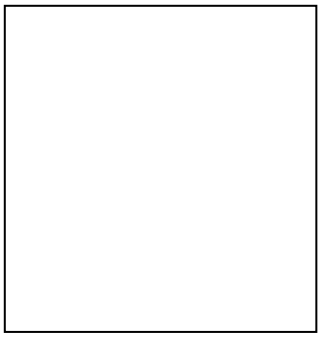
[50] **Palamutcu, S., & Dağ, N.** (2009). Elektromanyetik kalkanlama amaçlı tekstil yüzeyleri, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, *Cilt 3*, 87-101.

[51] **Multiphysics,** C.O.M.S.O.L. (1998). Introduction to COMSOL multiphysics®. *COMSOL Multiphysics, Burlington, MA, accessed July, 20*, 2020.

[52] **Galehdar, A., Nicholson, K. J., Callus, P. J., Rowe, W. S. T., John, S., Wang, C. H., & Ghorbani, K.** (2012). The strong diamagnetic behaviour of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates, *Journal of Applied Physics*, *112*(11), 113921.

[53] **Alemour, B., Hassan, M. R., & Badran, O.** (2018). Improving the electrical conductivity of carbon fiber reinforced epoxy composite for aviation applications. *The Ninth Jordanian International Mechanical Engineering Conference*, (pp. 1-8). Amman, Jordan: October 16-17.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Yücel ÇOŞKUN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2017, Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** **:** 2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Deniz Kuvvetleri Komutanlığı – Malzeme Kontrol Subayı (2018 – 2019)
- Beykent Üniversitesi – Araştırma Görevlisi (2020 – devam ediyor)

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Çoşkun, Y., & Tabakcıoğlu, M.B.** (2021). Analysis of Radar Cross-Section Areas of Objects. *International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies*, (pp.37-41). Balikesir, Turkey: Bandirma Onyedi Eylul University, February 22-25.
- **Çoşkun, Y., & Tabakcıoğlu, M.B.** (2021). Electromagnetic Shielding Characteristics of Oriented Carbon Fiber Epoxy Composites. *EMC Türkiye 2021*, (Gönderildi). Istanbul, Turkey: Bahcesehir University.
- **Çoşkun, Y., & Tabakcıoğlu, M.B.** (2021). Electromagnetic Shielding Characteristics of Carbon and Glass Fiber Composites, *Journal of Innovative Science and Engineering*, (Hakem İnceleme).