

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**KARBON FİBER KOMPOZİT KUMAŞLARIN 30 MHZ - 1500 MHZ FREKANS
ARALIĞINDA ELEKTROMANYETİK EKLANLAMA ETKİNLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

Halil İbrahim KESKİN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2020

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**KARBON FİBER KOMPOZİT KUMAŞLARIN 30 MHZ - 1500 MHZ FREKANS
ARALIĞINDA ELEKTROMANYETİK EKLANLAMA ETKİNLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

Halil İbrahim KESKİN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2020

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON FİBER KOMPOZİT KUMAŞLARIN 30 MHZ - 1500 MHZ FREKANS
ARALIĞINDA ELEKTROMANYETİK EKLANLAMA ETKİNLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

Halil İbrahim KESKİN

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bu tez Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından
1649B021808129 nolu proje ile desteklenmiştir**

HAZİRAN 2020

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON FİBER KOMPOZİT KUMAŞLARIN 30 MHZ - 1500 MHZ FREKANS
ARALIĞINDA ELEKTROMANYETİK EKSPANLAMA ETKİNLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

Halil İbrahim KESKİN

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 18/06/2020 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyeokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman)

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Doç. Dr. Mesud KAHRİMAN



ÖZET

KARBON FİBER KOMPOZİT KUMAŞLARIN 30 MHZ - 1500 MHZ FREKANS ARALIĞINDA ELEKTROMANYETİK EKLANLAMA ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

Halil İbrahim KESKİN

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Haziran 2020; 54 sayfa

Gelişen malzeme bilimiyle birlikte, sahip olduğu avantajlardan dolayı kompozit malzemeler birçok uygulamada klasik malzemelerin yerine tercih edilmektedir. Özellikle son yıllarda, popüler kompozitlerden biri olan karbon fiber kompozit kumaşlar mekanik ve elektriksel niteliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptir. Havacılık, uzay, savunma ve otomotiv sanayi karbon fiber kompozitlerin sıklıkla kullanıldığı sektörlerin başında gelmektedir.

Poliakrilonitril (PAN), zift ve suni ipek karbon fiberlerin sentezi için kullanılan öncüllerdir. Karbon fiber kompozit üretiminde, bu öncüller farklı sıcaklıkta stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitizasyon gibi bir dizi işlemden geçirilir. Öncül çeşidi ve işlem sıcaklığı karbon fiberlerde kaliteyi etkileyen önemli faktörlerdir.

Bu çalışmada, PAN esaslı karbon fiber kompozit kumaşların elektromanyetik ekranlama etkinliği ASTM D4935-18 standardınca üretilen koaksiyel ölçüm sistemiyle 30 MHz – 1500 MHz frekans aralığında incelenmiştir. Ölçüm sisteminin analizleri hem benzetim çalışmalarıyla hem de deneysel ölçümlerle yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre ölçüm sisteminin verimli bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra çalışmada beş farklı karbon fiber kompozit numunesinin ekranlama etkinliği örgü tipi, laminat kalınlığı ve lif yönelimi açısından değerlendirilmiştir. Sonuç olarak elde edilen bulgular, fiziksel özelliklerin ekranlama etkinliğini değiştirebildiğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: ASTM D4935-18, Elektromanyetik ekranlama etkinliği, Elektromanyetik uyumluluk, Karbon fiber kompozit kumaşlar, Koaksiyel İletim hatları, Kompozit malzemeler, Poliakrilonitril öncülleri

JÜRİ: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Doç. Dr. Mesud KAHRİMAN

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE ELECTROMAGNETIC SHIELDING EFFECTIVENESS OF CARBON FIBER COMPOSITE FABRICS IN THE FREQUENCY RANGE OF 30 MHZ - 1500 MHZ

Halil Ibrahim KESKIN

MSc Thesis in Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Şükrü Özen

June 2020; 54 pages

With the developing material science, composite materials have been preferred instead of classical materials in many applications due to their advantages. Especially, in recent years carbon fiber composite fabrics, which are one of the most popular composites have wide usage area due to their mechanical and electrical qualities. Aviation, aerospace, defense and automotive industries are the leading sectors where carbon fiber composites are frequently used.

Polyacrylonitrile (PAN), pitch and rayon are precursors that are used for synthesis of carbon fibers. In carbon fiber composite production, these precursors are performed a series of processing such as stabilization, carbonization and graphitization in different temperatures. Precursor type and processing temperature are important factors affecting the quality of carbon fibers.

In this study, electromagnetic shielding effectiveness of carbon fiber composite fabrics has been investigated in the frequency range of 30 MHz - 1500 MHz by the coaxial measurement system that produced according to ASTM D4935-18 standard. The analyses of the measurement system have been made with both simulation studies and experimental measurements. According to the results of the analysis, it has been observed that the measurement system performs efficiently. Besides, the shielding effectiveness of five different carbon fiber composite samples have been evaluated in terms of woven type, laminate thickness and fiber orientation. As a result, the obtained findings showed that physical properties are able to change the electromagnetic shielding effectiveness.

KEYWORDS: ASTM D4935-18, Carbon fiber composite fabrics, Coaxial transmission lines, Composite materials, Electromagnetic compatibility, Electromagnetic shielding effectiveness, Polyacrylonitrile precursors

COMMITTEE: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Assoc. Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

ÖNSÖZ

Düşük frekans bölgelerinde, malzemelere ait elektromanyetik ekranlama etkinliği ölçümlerinin kolaylıkla gerçekleştirilmesine olanak sağlayan ASTM D4935 standardının referans alındığı bu çalışmada üretilen koaksiyel ölçüm aparatları ile oluşturulan ölçüm sisteminin ülkemize katma değer sağlanması açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca havacılık, uzay, savunma ve otomotiv sanayinde sıklıkla tercih edilen karbon fiber kompozit kumaşlara ait ekranlama etkinliği incelemelerinin, hem sözü edilen sektörlerle hem de literatüre katkı sunulması bakımından faydalı olacağı görüşü yazarda hâkimdir.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren danışmanım Sn. Prof. Dr. Şükrü ÖZEN'e teşekkürlerimi sunarım. Bu tezin ilerlemesine sağladıkları katkılardan dolayı Sn. Prof. Dr. Selçuk HELHEL ve Sn. Dr. Öğr. Üyesi Bektaş ÇOLAK'a ise teşekkürü bir borç bilirim. Tezi hazırlama sürecinde desteklerini esirgemeyen değerli dostlarım Arş. Gör. Kayhan ATEŞ'e, Yüksek Elektrik-Elektronik Mühendisi Alparslan Bozkurt KARAMAN'a, Yüksek Elektrik-Elektronik Mühendisi Ergin KAYAR'a, Uğur OPAK'a ve Mehmet Ali CİRİT'e şükranlarımı sunarım.

1649B021808129 proje başvuru numarası ile "2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı" kapsamında bu tezi destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ayrıca teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca desteklerini esirgemeyen babam İbrahim KESKİN'e, annem Emine KESKİN'e ve kardeşim aynı zamanda meslektaşım olan Ahmet KESKİN'e sonsuz minnet duygularıyla teşekkür ederim. Son olarak, bu tez çalışmasını gelişimimde büyük katkı sahibi olan babaannem Nazife KESKİN'e ithaf ettiğimi ifade etmek istiyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	4
2.1. Yakın Alan ve Uzak Alan Kavramı.....	4
2.2. Elektromanyetik Uyumluluk.....	5
2.2.1. Işınım yayılım.....	5
2.2.2. İletimle yayılım.....	10
2.2.3. İletim ve ışınım bağışıklık.....	11
2.3. Saçılma Parametreleri.....	12
2.4. Elektromanyetik Ekranlama Etkinliği.....	13
2.5. Elektromanyetik Ekranlama Etkinliği Belirleme Metotları.....	15
2.5.1. Serbest uzay ölçüm metodu.....	16
2.5.2. MIL STD 285 ve IEEE STD 299 standardı.....	17
2.5.3. ASTM D4935 standardı.....	18
2.6. Literatür Özeti.....	18
3. MATERYAL VE METOT.....	23
3.1. Karbon Fiberler.....	23
3.1.1. Suni ipek esaslı karbon fiberler.....	23
3.1.2. Zift esaslı karbon fiberler.....	24
3.1.3. Poliakrilonitril esaslı karbon fiberler.....	25
3.2. Karbon Fiberlerin Fiziksel Özellikleri.....	26
3.3. Koaksiyel İletim Hatları.....	28
3.4. ASTM D4935-18 Standardınca Ölçüm Sistemi Tasarımı ve Üretimi.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	32
4.1. Ölçüm Sistemine İlişkin Benzetim Bulguları.....	32
4.2. Ölçüm Sistemine İlişkin Deneysel Bulgular.....	33

4.3. Numunelere İlişkin Ekranlama Etkinliği Bulguları.....	36
5. SONUÇLAR	44
6. KAYNAKLAR	46
7. EKLER.....	52
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Karbon Fiber Kompozit Kumaşların 30 MHz – 1500 MHz Frekans Aralığında Elektromanyetik Ekranlama Etkinliğinin İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

18/06/2020

Halil İbrahim KESKİN



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Zayıflama ifadesi
A	: Amper
C	: Şönt kapasitans
cm	: Santimetre
d	: Kalınlık
E_0	: Ekranı gelen elektrik alan vektörü
E_{DH}	: Yatay polarizasyondaki elektrik alan şiddetini
E_{DV}	: Dikey polarizasyondaki elektrik alan şiddetini
$E_{Maksimum}$: Maksimum elektrik alan seviyesi
E_t	: Ekrandan iletilen elektrik alan vektörü
f	: Frekans
G	: Kondüktans
gr	: Gram
h	: Yükseklik
H_0	: Ekranı gelen manyetik alan vektörü
H_t	: Ekrandan iletilen manyetik alan vektörü
I	: Akım
l	: Antenin en büyük ayrıtı
L	: Öz endüktans
l_A	: Anten boyu
l_{AA}	: Antenler arası mesafe
l_{diff}	: Antenler ile ekran kenarları arasındaki mesafe
m	: Metre
mm	: Milimetre
N	: Newton
n	: Herhangi bir tam sayı

P_0	: Ekrana gelen güç vektörü
P_t	: Ekrandan iletilen güç vektörü
r	: Yarıçap
R	: Mesafe
R	: Direnç
R_s	: Yüzey direnci
S_{11}	: Yansıyan dalgayı temsil eden saçılma parametresi
S_{21}	: İletilen dalgayı temsil eden saçılma parametresi
V	: Volt
Z_0	: İletim hattının karakteristik empedans
Z_L	: Yük empedansı
β	: Dalga sayısı
δ	: Deri mesafesi
ϵ'	: Dielektrik sabitinin gerçek kısmı
ϵ_r'	: Malzemenin bağıl dielektrik sabiti
ϵ''	: Dielektrik sabitinin sanal kısmı
η_0	: Serbest uzay ortamının karakteristik empedansı
η_s	: Ekranın karakteristik empedansı
η_ω	: Dalga empedansı
θ	: Esas argüment
λ	: Dalga boyu
μ	: Manyetik geçirgenlik sabiti
μ	: Mikro
π	: 3.1415...
σ	: İletkenlik sabiti
φ	: Faz kayması
ω	: Açısal frekansı
Ω	: Direnç birimi

Tezde, ondalık birim içeren ifadeler nokta (.) ile ayrılmıştır.

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
AC	: Alternatif akım
ACGIH	: Amerikan Devlet Endüstriyel Hijyen Uzmanları Komisyonu
Ag	: Gümüş
ANSI	: Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Kurumu
CB	: Siyah karbon
CDN	: Birleştirme ve ayrıştırma ağı
CENELEC	: Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi
CISPR	: Uluslararası Radyo Paraziti Özel Komitesi
CNC	: Bilgisayarlı nümerik kontrol
CNF	: Karbon nanofiber
ÇYM	: Çok yüksek modüllü
dB	: Desibel
DC	: Doğru akım
ETSI	: Telekomünikasyon Standartlar Komitesi
FCC	: Federal İletişim Komisyonu
FM	: Frekans modülasyonu
GHz	: Gigahertz
GPa	: Gigapascal
Hz	: Hertz
ICNIRP	: Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IEEE	: Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
ITC	: Uluslararası Elektroteknik Komitesi

kHz	: Kilohertz
LISN	: Hat empedansı dengeleme ağı
MHz	: Megahertz
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nano tüpleri
NIST	: Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
NSA	: Normalize alan zayıflaması
ODM	: Orta düzey modüllü
PAN	: Poliakrilonitril
PMMA	: polimetilmetakrilat
SE	: Toplam elektromanyetik ekranlama etkinliği
SE_A	: Soğrulma kaybı
SE_M	: Çoklu yansıma kaybı
SE_R	: Yansıma kaybı
SM	: Standart modüllü
SOLT	: Kısa devre - açık devre - uyumlu yük - direkt ölçüm kalibrasyonu
SWCNT	: Tek duvarlı karbon nano tüpleri
SWR	: Duran dalga oranı
TAC	: Test altındaki cihaz
TE	: Enine elektrik dalgalar
TEM	: Enine elektromanyetik dalgalar
TM	: Enine manyetik dalgalar
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
VNA	: Vektörel ađ analizörü
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
YM	: Yüksek modüllü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Açık saha test alanı ölçüm düzeneği.....	6
Şekil 2.2. Normalize alan zayıflaması ölçüm düzeneği.....	7
Şekil 2.3. Yarı yansız odada ışınımla yayılım testi	8
Şekil 2.4. Işınımla yayılımın 10 metre mesafe için belirlenen sınır değerleri	9
Şekil 2.5. Işınımla yayılımın 3 metre mesafe için belirlenen sınır değerleri	9
Şekil 2.6. Işınımla yayılımın 1 metre mesafe için belirlenen sınır değerleri	10
Şekil 2.7. İletimle yayılım için ölçüm düzeneği	10
Şekil 2.8. İletimle yayılım limitleri.....	11
Şekil 2.9. a) VNA ve test altındaki cihaz; b) Test düzeneğinin yapısı.....	12
Şekil 2.10. Elektromanyetik dalgaların ekran üzerindeki davranışı	14
Şekil 2.11. a) Dalgaların serbest uzay ölçüm ortamında yayılışı; b) Serbest uzay ölçüm düzeneği (Dvurechenskaya ve Zieliński 2011)	16
Şekil 2.12. MIL STD 285 standardına ait ölçüm şematığı	17
Şekil 2.13. IEEE STD 299 standardına ait ölçüm şematığı	17
Şekil 2.14. a) Referans ölçüm için kullanılan numuneye ait ebatlar; b) Yük ölçümü için kullanılan numuneye ait ebatlar	18
Şekil 3.1. Zift tabanlı izotropik ve anizotropik karbon fiberlerin üretimi	24
Şekil 3.2. PAN esaslı karbon fiberlerin üretim aşamaları.....	25
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan karbon fiber kompozit kumaşlar; a) Örgüsüz +45/-135; b) Örgüsüz 0/180; c) Düz 200; d) Dimi 200; e) Dimi 245	27
Şekil 3.4. İletim hattı içerisindeki elektrik alan ve manyetik alan dağılımı	28
Şekil 3.5. İletim hatlarına ait genel eşdeğer devre modeli.....	28
Şekil 3.6. Koaksiyel ölçüm sisteminin SolidWorks tasarımı.....	30
Şekil 3.7. Üretimi gerçekleştirilen ölçüm aparatlarına ait görseller; a) Sinyal hattı ve diğer elemanların aparat içindeki yerleşimi; b) Ölçüm aparatlarının genel görünümü.....	31

Şekil 4.1. a) Sistemin genel görünümü; b) Faz açısı 0° iken elektrik alan dağılımı; c) Faz açısı 45° iken elektrik alan dağılımı; d) Faz açısı 90° iken elektrik alan dağılımı.....	32
Şekil 4.2. a) Faz açısı 0° iken manyetik alan dağılımı; b) Faz açısı 45° iken manyetik alan dağılımı; c) Faz açısı 90° iken manyetik alan dağılımı; d) Faz açısı 120° iken manyetik alan dağılımı	32
Şekil 4.3. Ölçüm sisteminin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}	33
Şekil 4.4. Frekans düzlemindeki S_{11} bulguları.....	34
Şekil 4.5. Zaman düzlemindeki S_{11} bulguları	34
Şekil 4.6. Ölçüm sisteminin SWR bulguları; a) Frekans düzlemi; b) Zaman düzlemi.....	35
Şekil 4.7. Alüminyum ölçümündeki benzetim yapısı.....	36
Şekil 4.8. Alüminyuma ait S_{11} parametresinin simülasyon ve ölçüm bulguları.....	36
Şekil 4.9. Hazırlanan ölçüm düzeneği	37
Şekil 4.10. Düz 200 örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}	38
Şekil 4.11. Düz 200 örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği	38
Şekil 4.12. Dimi 200 örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}	39
Şekil 4.13. Dimi 200 örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği.....	39
Şekil 4.14. Dimi 245 örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}	40
Şekil 4.15. Dimi 245 örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği.....	40
Şekil 4.16. Örgüsüz +45/-135 örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}	41
Şekil 4.17. Örgüsüz +45/-135 örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği.....	41
Şekil 4.18. Örgüsüz 0/180 örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}	42
Şekil 4.19. Örgüsüz 0/180 örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. PAN ve zift esaslı karbon fiber kompozitlerin mukavemet ve modül değerleri (Lewin 2007)	26
Çizelge 3.2. Tezde incelenen karbon fiberlerin özellikleri	27
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan pirinç metaline ait özellikler	30
Çizelge 4.1. Bulguların literatür ile karşılaştırılması	43

1. GİRİŞ

Elektronik ürünler genel anlamda mevcut olanakları dâhilinde insan yaşamını kolaylaştırma amacıyla tasarlanan cihazlardır. Gelişen teknoloji ve artan ürün çeşitliliği ile birlikte elektronik ürünlere olan ilgi gitgide artmaktadır. Cep telefonu, televizyon ve bilgisayar gibi nice elektronik ürün sahip olduğu uygulama ve özelliklerle insan hayatında vazgeçilmez bir yer edinmiştir. Bunun yanında teknolojik ilerlemeler sayesinde akıllı ev sistemleri ile otonom sürüş özelliğine sahip elektrikli otomobiller de günden güne insan yaşamına girmeye başlamıştır.

Teknolojik ilerlemeler yalnızca insan merkezli kapsamlar içinde kalmayıp başta havacılık, uzay ve savunma sanayi olmak üzere birçok sektörde büyük yeniliklere olanak sağlamıştır. Günümüzdeki gelişmelere bakıldığında, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla karadelik görüntülerinin elde edilmesi, gezegenlere keşif amaçlı yolculukların yapılması, gözlem ve haberleşme amaçlı ileri teknolojiye sahip uyduların aktif olarak kullanılması ve insansız hava araçları, yeni nesil uçaklar ile yüksek menzilli savunma sistemlerinin ortaya çıkması tamamen bilimsel çalışmaların teknolojiyle bütünleşmesinin ürünüdür.

İnsan yaşamında yer alan FM radyolar, uydu yayınlı televizyon sistemleri, cep telefonları ile kablosuz internet ve bağlantı ağlarının tümü işlevlerini elektromanyetik dalgalar aracılığıyla yerine getirmektedir. Yine benzer şekilde havacılık, uzay ve savunma sanayinde büyük yer edinen radar sistemleri, yön-konum belirleme ekipmanları ile diğer gelişmiş haberleşme sistemleri de fonksiyonlarını elektromanyetik dalgalar sayesinde gerçekleştirmektedir. Bu hususta her sistem ve uygulamanın farklı frekans değerleriyle çalıştığı göz önüne alındığında, frekans spektrumunun geniş bir bölümünün aktif olarak kullanıldığı söylenebilir. Elektromanyetik dalgaların bu denli yoğun kullanımı, dalgaların hem canlılar üzerindeki etkisinin hem de elektronik sistemlerle olan etkileşiminin ilgiyle incelenen konulardan olmasını sağlamıştır. Elektromanyetik dalgaların canlılardaki etkisi araştırmacılar tarafından dokuda indüklenme ve dokudaki ısı değişimleri olmak üzere ele alınırken, elektromanyetik dalgaların elektronik sistemler ile olan ilişkisi elektromanyetik ışıma ve girişim yoluyla etkileşim üzerine ele alınmaktadır.

Elektromanyetik girişim temel anlamda cihazların işleyişlerinde aksaklıklara yol açma potansiyeline sahip gürültü sinyalinin kaynaklı oluşan bozucu etkidir. Meydana gelmiş bir bozucu etki, sistem içindeki yapıları etkileyebileceği gibi sistemler arası bir etkileşime de neden olabilir. Yani aynı ortamda bir arada bulunan elektronik ürünlerin girişim yoluyla birbirlerinin performansını etkilemesi olası bir durum iken, birlikte daha kompleks bir yapıyı oluşturan donanımların da kendi aralarında girişim yaparak birbirleri üzerinde olumsuz etki oluşturması yine olası bir durumdur. Ciddi problemlere neden olan bu etkileşimin azaltılması veya ortadan kaldırılması için ürünlerin emisyon ve alınganlık değerlerinin belli standartlarda yer alan sınır değerlerinin altında olması gerekmektedir. Elektromanyetik uyumluluk konu başlığı altında incelenen bu girişim sorunlarını çözüme kavuşturmak ve standartlarla belirlenen değerlerin altına indirmek için uygulanan etkili yöntemlerden biri elektromanyetik ekranlamadır. Elektromanyetik ekranlama metodunda ışımla yayılan girişim sinyalinin tanımlanmış bir alana girişini engellemek için genelde iletken yapıda olan ve ekran adıyla bilinen bir materyalle ilgili bölgenin dış çevreden izolasyonu amaçlanır. Bir girişim kaynağına ait ışımla yayılım değeri elektromanyetik ekranlama yöntemiyle azaltılabileceği gibi girişimden etkilenen bir yapının alınganlık değeri de ekranlama yöntemi sayesinde alt seviyelere indirilebilir. Ekran malzemesinin

elektromanyetik girişimi engelleme performansı ise ekranın elektromanyetik ekranlama etkinliği olarak bilinir ve birim olarak desibel (dB) şeklinde ifade edilir.

Ekran olarak kullanılan malzemelere örnek olarak alüminyum ve bakır verilebilir. Alüminyum ve bakırın elektriği iyi ileten metallere olması yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği göstermesini sağlar. Böylelikle elektromanyetik girişim sorunlarının giderilmesinde sıklıkla kullanılırlar. Alüminyum ve bakırın kolay erişilebilir olmasının yanında bu metalleri işleme maliyetlerinin oldukça düşük olması ticari uygulamalarda bu malzemelerin sıklıkla tercih edilmesini sağlamaktadır. Fakat havacılık ve uzay sanayi gibi kütleli önemli olduğu sektörlerde yeni nesil araçların gövde ve yüzeylerinde alüminyum ve bakır gibi klasik malzemelere son yıllarda daha az yer verilmektedir. Bu konuda yeni nesil araçlarda kullanılan kompozit malzemelerin mekanik etkilere karşı yüksek dayanım göstermesi, birim ağırlıklarının metal malzemelere kıyasla düşük olması ve korozyon dayanımlarının oldukça yüksek olması kompozitlerin sunduğu avantajlarındandır. Ayrıca alüminyum ve bakır gibi metal malzemelerin elektromanyetik dalgayı çoğunlukla geri yansıtarak ekranlama sağlaması ve buna bağlı olarak radar kesit alanı problemlerinin oluşmasına neden olması metal malzemeleri askeri uygulamalar bakımından sakıncalı kılmaktadır.

Ticari olarak 1960'lerden bu yana mevcut olan karbon fiber kompozit kumaşların germeye ve çekmeye gösterdiği yüksek dayanımın yanı sıra diğer mekanik etkilere karşı da mukavemetli olması bu kompozitlerin ilgi çekici olmasını sağlamıştır. Ayrıca karbon fiber kompozitlerin sahip olduğu yüksek korozyon direnci, yanma dayanımı, esneklik ve hafiflik gibi özellikler karbon fiberlerin kütleli önemli olduğu havacılık, uzay, savunma ve otomotiv sanayi gibi sektörler başta olmak üzere endüstrinin pek çok alanda tercih edilmesini sağlamıştır (Hong vd. 2015). Karbon fiberler üzerine yapılan çalışmalara göre, bu kompozitler aynı ebatlardaki 1020 çelik yapısı ile kıyaslandığında, karbon fiberlerin 1020 çelik yapısına göre 5 kat daha dayanıklı olduğu ve ağırlığının 1020 çelik yapısından 5 kat kadar daha az olduğu saptanmıştır. Benzer şekilde karbon fiber kompozitler aynı boyutlardaki 6061 alüminyum yapısı ile kıyaslandığında, 6061 alüminyumdan 7 kat daha dayanıklı olduğu ve ağırlık bakımından karbon fiberlerin 6061 alüminyum yapısına göre 1,5 kat daha hafif olduğu hesaplanmıştır (Yaman vd. 2007).

Karbon fiber kompozitler mekanik özelliklerinin yanı sıra elektriksel özellikleri ile de dikkat çekmeyi başarmıştır (Chung 2001). İletken yapıda olan karbon fiberlerin, elektromanyetik dalgaları büyük oranda soğurarak ekranlama sağlaması, bir başka deyişle karbon fiber kompozitlerin radar absorber materyallerden olması ve böylelikle radarda iz bırakma ihtimalini neredeyse oluşturmaması, son yıllarda askeri kara ve hava taşıtlarında klasik malzemeler yerine karbon fiberlerin tercih edilmesini sağlamıştır.

Gerçekleştirilen tezde, son yıllarda karbon tabanlı kompozit malzemelerin popüler bir türü olan poliakrilonitril esaslı karbon fiber kompozitlerin elektromanyetik ekranlama etkinliği ele alınmıştır. Çalışmada aynı karbon lifleriyle oluşturulmuş farklı yapıdaki beş karbon fiber kumaş numunesinin elektromanyetik ekranlama etkinliği lif yönelimi, örgü tipi ve laminat kalınlığı bakımından irdelenmiştir. Deneysel ölçümler ASTM D4935-18 standardına göre üretilen koaksiyel ölçüm aparatlarıyla 30 MHz – 1500 MHz frekans aralığında gerçekleştirilirken, koaksiyel ölçüm sisteminin analiz çalışmaları CST Studio Suite aracında benzetimler yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Tezin ilerleyen bölümlerinde, yakın ve uzak alan kavramları ile elektromanyetik uyumluluk konularına değinilirken, elektromanyetik dalgalar ile mikrodalga devreleri için önemli bir yere sahip olan saçılma parametreleri de bu tezde ele alınmıştır. Ayrıca elektromanyetik ekranlama etkinliği kavramının yanı sıra malzemelerin elektromanyetik ekranlama etkinliğini belirlenmesi için geliştirilen metotlar da yine bu tezde işlenmiştir. Karbon tabanlı kompozitler üzerine yapılan yayınlar ile ASTM D4935 standardını temel alan çalışmalara tezin literatür özeti bölümünde yer verilmiştir. Seçilen karbon fiber kumaş örneklerine ait bilgiler ile tezde referans alınan yöntemlere tezin materyal ve metot bölümünde değinilmiştir. Deneysel ölçüm ve benzetimlere ait bulgular tezin bulgular ve tartışma bölümünde kıyaslanırken, bu çalışmanın nihai değerlendirmesi tezin sonuçlar bölümünde yapılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Tezin bu bölümünde temel kavramların yanı sıra elektromanyetik uyumluluk konusuna odaklanılmış ve elektronik ürünlerin ışınım yollu yayılım ile iletim yollu yayılım ve ışınım yollu bağışıklık ile iletim yollu bağışıklık değerlerine limit getiren kuruluşlara ve bu kuruluşların oluşturduğu standartlara değinilmiştir. Ayrıca ürünlerin özellikle ışınım yayılım ve ışınım bağışıklık değerlerinin standartlarca belirlenen limitlerin altında tutulmasında sıklıkla tercih edilen bir yöntem olan elektromanyetik ekranlama metodu incelenmiştir. Araştırmacılar tarafından incelenen karbon tabanlı kompozitlerin elektriksel özellikleri ile elektromanyetik ekranlama etkinliğine ilişkin literatür özeti de yine tezin bu bölümünde verilmiştir.

2.1. Yakın Alan ve Uzak Alan Kavramı

İncelenen elektromanyetik dalgaya ait dalga karakteristiği, kaynak ile gözlem noktaları arasındaki mesafeyle ilişkilidir. Bu duruma göre kaynak noktasından $\lambda/2\pi$ değerine kadar olan mesafe yakın alan, $\lambda/2\pi$ 'den daha uzak mesafeler uzak alan bölgesidir. Bu iki bölgenin kesişimi ise geçiş bölgesi olarak adlandırılır. Dalga kaynağı olarak anten ele alındığında yakın alan ve uzak alan bölgeleri anten ebatlarına bağlı olarak değerlendirilmektedir. Bir antene ait en uzun ayrıt veya anten türüne göre çap uzunluğu olan l değeri, dalga boyu ifadesi olan λ 'dan çok küçükse ($l < \lambda/50$) uzak alan başlama mesafesi $\lambda/2\pi$ ile belirlenir (Seybold 2005). Antene ait en uzun ayrıtın, λ ifadesine yakın veya λ 'dan daha büyük olduğu durumlarda ise uzak alan mesafesi $2l^2/\lambda$ ile bulunur (Balanis 2016). Bu durum bir başka ifadeyle anlatılmak istenirse, basit ve düşük kazançlı bir anten için uzak alan sınırı $\lambda/2\pi$ mesafesiyle başlarken, karmaşık ve güç kazancı yüksek bir antende uzak alan sınırının $2l^2/\lambda$ ile başladığı söylenebilir (Kazancı 2010). Yakın alan kavramı ise antenlerde reaktif yakın alan ve ışıyan yakın alan olmak üzere iki bölgede incelenir. Reaktif yakında reaktif enerji hâkimdir ve burada enerji yalnızca depolanır. Işıyan yakın alan ise Fresnel Bölgesi olarak bilinir ve reaktif yakın alan ile uzak alan arasındaki kısımdır. Reaktif enerjiden ışımaya geçiş bu bölgededir.

Yakın alan bölgesinde elektrik alan ve manyetik alan ayrı ayrı ele alınır ve dalga empedansı kaynağın özelliklerine göre değişiklik gösterir. Kaynak, yüksek akım düşük gerilim karakteristiğine sahip ise yakın alan bölgesinde manyetik alan baskındır ve dalga empedansı 377Ω 'dan küçüktür. Manyetik karakteristiği yüksek olan bu yakın alan bölgesinde, kaynaktan uzaklaşıldıkça manyetik alan $1/r^3$ ile orantılı azalırken, elektrik alan $1/r^2$ ile orantılı azalır. Eğer yakın alan bölgesinde kaynak yüksek gerilim, düşük akım özelliğinde ise bu bölgede elektrik alan baskındır ve dalga empedansı 377Ω değerinden büyüktür. Elektriksel karakteristiğin yüksek olduğu bu bölgede kaynaktan uzaklaşıldıkça elektrik alan $1/r^3$ ile orantılı bir şekilde azalırken, manyetik alan $1/r^2$ ile orantılı olarak azalır (Arı ve Özen 2008).

Uzak alan bölgesi, elektromanyetik dalgaların düzlemsel dalga olarak yayıldığı bölge olmakla birlikte, anten ışınımının gerçekleştiği bölgedir ve dalga empedansı bu bölgede 120π yani 377Ω değerine eşittir. Uzak alan mesafesinin teoride $\lambda/2\pi$ veya $2l^2/\lambda$ hesaplamalarıyla bulunan değerler olduğu belirtilse de pratik uygulamalar ve ölçümlerde uzak alan bölgesinin, teorik olarak hesaplanan değerlerin beş katı mesafesinde başladığı söylenebilir (Więcowski ve Janukiewicz 2006).

2.2. Elektromanyetik Uyumluluk

Elektromanyetik uyumluluk, bir sistem veya donanımın bulunduğu alan içerisinde çevreyi, diğer donanımları ve sistemleri etkileyecek seviyelerde elektromanyetik gürültü oluşturmadan ve ortamda bulunan doğal ve yapay girişim kaynaklarından etkilenmeden kendisinden beklenen performansı karşılayabilme yeteneğidir. Uyumluluk kavramı daha kapsamlı bir şekilde açıklanacak olunursa, ele alınan sistem kendi içinde girişime sebep olmamalı, diğer sistemler açısından girişim kaynağı olmamalı ve herhangi bir girişim kaynağının oluşturabileceği emisyonla karşı başışık olmalıdır (Arı ve Özen 2008).

Elektromanyetik uyumluluk terimi elektromanyetik girişim ifadesiyle ilişkili bir kavramdır. Elektromanyetik girişim, elektromanyetik çevre içerisinde bulunan bir cihaz veya sistemde performans bozukluklarına yol açan etkileşim olayı olarak tanımlanabilir. Burada etkileşimi oluşturan kaynaklar doğal veya yapaydır. Kozmik patlamalar, şimşek ve yıldırım gibi atmosferik olaylar elektromanyetik etkileşimde girişimi oluşturan doğal kaynaklar olarak bilinmekle birlikte, elektrik güç sistemleri ile elektronik ve haberleşme sistemlerinin tümü yapay girişim kaynaklarına örnek olarak verilebilir.

Son yıllarda ilerleyen teknolojiyle birlikte özellikle elektronik sistemler için elektromanyetik uyumluluk konusu çok önemli bir yer edinmiştir. Öyle ki geliştirilen bir elektronik ürünün satışa çıkarılabilmesi için iletim ve ışınım yollu etkileşim riski oluşmaması gerektiği gibi meydana gelmiş bir girişim riskinden de etkilenmemesi gerekir. Bu kapsamda elektromanyetik girişim riskinin en aza indirilebilmesi için girişimi oluşturan kaynağa ait emisyon değerleri ile girişimden etkilenen sistemin hassasiyet değerleri uluslararası kuruluşlarca belirlenen değerlere uygun olmalıdır. Bu değerlerin belirlenmesi amacıyla Avrupa'da Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) 1933 yılında Paris'te toplanarak Uluslararası Radyo Paraziti Özel Komitesi'nin (CISPR) kurulmasına ve bu komitenin elektromanyetik girişim konusu üzerine çalışmasına karar vermiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise bahsi geçen değerlerin belirlenmesi amacıyla Haziran 1934'te Federal İletişim Komisyonu (FCC) kurulmuştur. Ayrıca Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Komitesi (ETSI), Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC), Uluslararası Elektroteknik Komitesi (ITC), Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST), Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) ve Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) birbiriyle etkileşim halinde olan ve bu değerlerin belirlenmesinde önemli rol oynayan diğer kuruluşlardır. Ülkemizde ise bu değerleri Türk Standartları Enstitüsü (TSE) belirlemektedir.

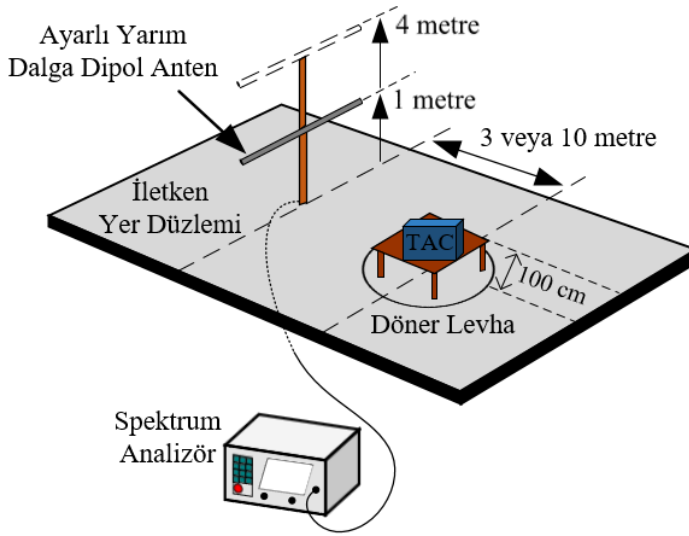
Elektromanyetik dalgaların canlılar ile etkileşim sınırlarının belirlenmesinde ise Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP), Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE), Amerikan Devlet Endüstriyel Hijyen Uzmanları Komisyonu (ACGIH) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) gibi kuruluşlar etkin olarak çalışmaktadır.

2.2.1. Işınımla yayılım

Işınımla yayılım, girişim kaynağından üretilen sinyalin elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla alıcı yapıya ulaşması ve yapıda performans kayıplarına yol açması sorunudur. Bu sorunun meydana gelmesindeki asıl neden girişim kaynağının yayılım yani emisyon değerlerinin standartlarda belirlenen sınır değerden yüksek olmasıdır. Bu amaçla girişim

kaynağının ışınımla yayılım değerlerinin belirlenmesi için açık saha test alanları, ekranlı odalar, tam yansımaz ve yarı yansımaz odalar gibi farklı test ortamları tanımlanmıştır. Bu test ortamları ışınımla yayılım ölçümleri haricinde anten kalibrasyon ölçümleri içinde kullanılmaya uygundur (Montrose ve Nakauchi 2004).

Test ortamları arasında ilk olarak açık saha test alanları ele alınacak olursa, bu alanlarda ölçümler 30 MHz – 1000 MHz frekans aralığında ayarlı dipol antenlerle veya doğrusal polarize geniş bant antenlerle, 1000 MHz'den daha yüksek frekanslarda ise doğrusal polarize horn antenlerle yapılır. Işınımla yayılım testi için açık saha test alanı ölçüm düzeneği Şekil 2.1 ile gösterilmiştir (Ott 2009).

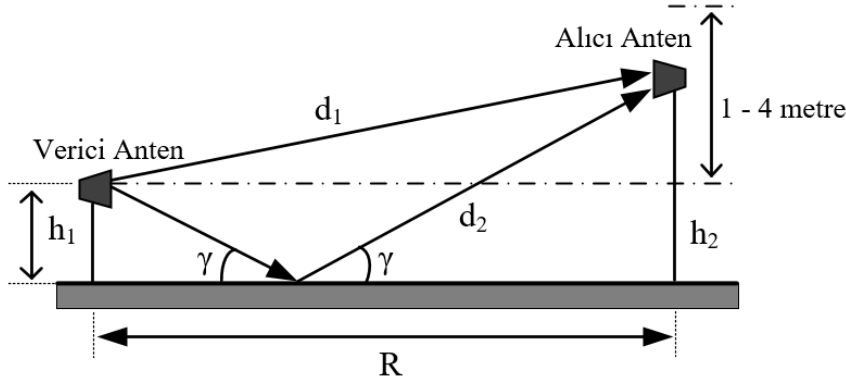


Şekil 2.1. Açık saha test alanı ölçüm düzeneği

Işınımla yayılım testlerinde, test altındaki cihaz (TAC) ile anten arasındaki mesafe 3 metre veya 10 metre olarak tanımlanmıştır. Bu mesafe test ürününün sınıfı ile ilgilidir. Eğer test edilen cihaz ticari, endüstriyel veya iş ortamında kullanılmak üzere pazarlanan (Sınıf A) bir ürün ise ürüne ait test mesafesi 10 metre, konut ortamında kullanılmak üzere pazarlanan (Sınıf B) bir ürün ise ürünün test mesafesi 3 metre olmalıdır. Işınımla yayılım testinde TAC ise yerden 1 metre yüksekliğe konumlandırılır. Test edilen ürünün onay alabilmesi için ölçüm sistemindeki levha dönerken yere göre 1 metre ile 4 metre yükseklik aralığında tarama yapan antenden okunan elektrik alan değerinin standartlarda belirtilen limitlerin altında olması gerekir (Sevgi vd. 2008; Eser ve Sevgi 2010).

Bir açık saha test alanında ışınımla yayılım testleri ile anten kalibrasyon işleminin doğrulukla gerçekleştirilebilmesi için ilgili test alanının elektromanyetik anlamda belirli bir yeterliliği sağlamış olması gerekir. Bu noktada normalize alan zayıflaması (NSA) kavramı ön plana çıkmaktadır. Normalize alan zayıflaması, ölçümün yapıldığı alandan kaynaklı hataların bir göstergesi olarak nitelendirilebilir. Test sahasının NSA değerinin belirlenmesinde antenlerin hem yatay hem de dikey polarizasyon durumu için Şekil 2.2 ile gösterilen ölçüm düzeneği hazırlanır ve her iki polarizasyonda alıcı antenden okunan sinyal seviyeleri kaydedilir. Teorik hesaplamalar ise ANSI C63.4 standardında yer alan ve Denklem 2.1, Denklem 2.2, Denklem 2.3, Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 ile belirtilen eşitlikler ile yapılır (ANSI C63.4a 2017). Deneysel ölçümlere ait sonuçların işlenmesiyle elde edilen normalize alan zayıflaması değerleri ile teorik hesaplamalar sonucu bulunan

değerler arasındaki fark eğer ± 4 dB değerinden daha az ise o sahanın açık saha testleri için uygun olduğu sonucu ortaya çıkar.



Şekil 2.2. Normalize alan zayıflaması ölçüm düzeneği

$$d_1 = \sqrt{R^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (2.1)$$

$$d_2 = \sqrt{R^2 + (h_1 + h_2)^2} \quad (2.2)$$

$$E_{DV} = \frac{R^2 \cdot \sqrt{49.2} \cdot \sqrt{d_1^6 + d_2^6 + 2 \cdot d_1^3 \cdot d_2^3 \cdot \cos[\beta \cdot (d_2 - d_1)]}}{d_1^3 \cdot d_2^3} \quad (2.3)$$

$$E_{DH} = \frac{\sqrt{49.2} \cdot \sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot \cos[\beta \cdot (d_2 - d_1)]}}{d_1 \cdot d_2} \quad (2.4)$$

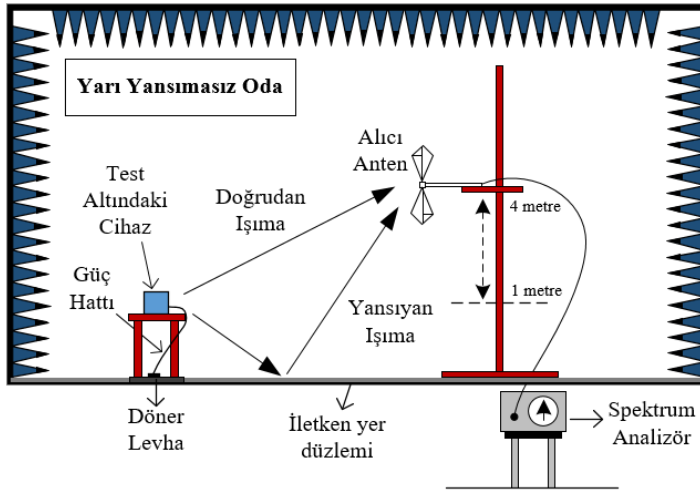
$$NSA_{Teorik} = 48.92 - 20 \log_{10}(f) - E_{Maksimum} \quad (2.5)$$

Burada d_1 verici antenden alıcı antene doğrudan ulaşan dalgaların katettiği optik mesafe iken, d_2 iletken yer düzlemine çarpıp buradan alıcı antene yansıyan ışınların aldığı yolun uzunluğudur. Antenler arası mesafe R ile temsil edilir ve birimi metredir. Dalganın sayısı ise β ile gösterilir ve $2\pi/\lambda$ eşitliğiyle bulunur. E_{DV} dikey polarize durum için elektrik alan şiddetini ifade ederken, E_{DH} yatay polarize durumdaki elektrik alan şiddetini temsil eder ve her ikisinin birimi $\mu V/m$ olarak tanımlanır. Frekans f ile megahertz cinsinden belirtilirken, $E_{Maksimum}$ antenlerin hem yatay hem de dikey polarizasyondaki durumu için $dB\mu V/m$ biriminden hesaplanan maksimum elektrik alan seviyesidir. NSA_{Teorik} ise ölçümün gerçekleştirildiği test sahasına ait teorik olarak hesaplanmış ideal normalize alan zayıflaması değeridir ve birimi desibeldir.

Işınımın yayılım testlerinin gerçekleştirildiği bir diğer ortam ekranlı odalardır. Ekranlı odalar, testin gerçekleştirildiği ortamın elektromanyetik anlamda dış çevreden tamamen izole edilmesiyle oluşturulur ve hem ışınımın yayılım ölçümleri hem de ışınımın bağımsızlık testleri bu odalarda gerçekleştirilebilir. Ekranlı odalarda testin yapıldığı ortama dışarıdan herhangi bir girişim sinyalinin girmesinin istenmediği gibi testin yapıldığı ortamdan da dışarıya herhangi bir elektromanyetik enerjinin çıkması istenmez. Bu sebeple oda oldukça kalın metal plakalardan yapılmalı ve minimum 80 dB ekranlama etkinliğine sahip malzemeler odanın tavan, taban ve duvarlarında kullanılmalıdır.

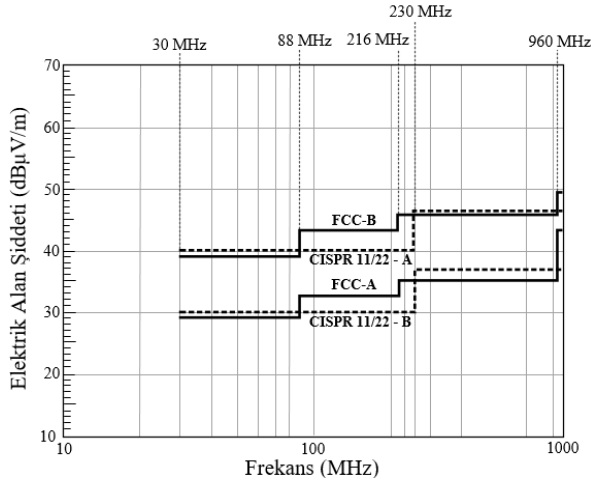
Ekranlı odalarda ölçüm doğruluğunu etkileyen en önemli husus rezonans etkisidir. Eğer rezonans etkisinden kaçınılmak istenilirse ekranlı odaya ait ebatlar iyi bilinmeli ve ekranlı odanın rezonansa girdiği frekanslar dışında ölçüm gerçekleştirilmelidir. Rezonans halinde odadaki elektromanyetik sinyal olduğundan 20 dB ile 40 dB arasında daha fazla ölçülebildiğinden dolayı bu etki, ekranlı odalarda gerçekleştirilen ölçümlerde hatalara neden olan önemli bir parametredir. Ekranlı odalara en basit örnek olarak Faraday Kafesi verilebilir (Sevgi 2017).

Tam yansısız ve yarı yansısız odalar ise yüksek hassasiyet gerektiren testler için uygun ölçüm ortamı sağlar. Yansısız odaların dışı kalın alüminyum plakalarla, içi elektromanyetik dalga soğurucu materyallerden biri olan karbon emdirilmiş poliüretan köpük ile kaplıdır (ANSI C63.4 2014). Bu test ortamlarında oda içerisinde içsel yansıma yapan dalgalar soğrulduğu için bu odalarda rezonans etkisi oluşmaz. Tam yansısız ve yarı yansısız odaların fiziksel tanımı ve bu odalarda gerçekleştirilecek ışınımla yayılım ve ışınımla bağımsızlık testlerine ait ölçüm prosedürleri CISPR 16-4-1 ve CISPR 16-2-3 standartlarıca tanımlanmıştır. Bir elektronik ürünün yarı yansısız odada ışınımla yayılım testi ise Şekil 2.3 ile gösterilmiştir.



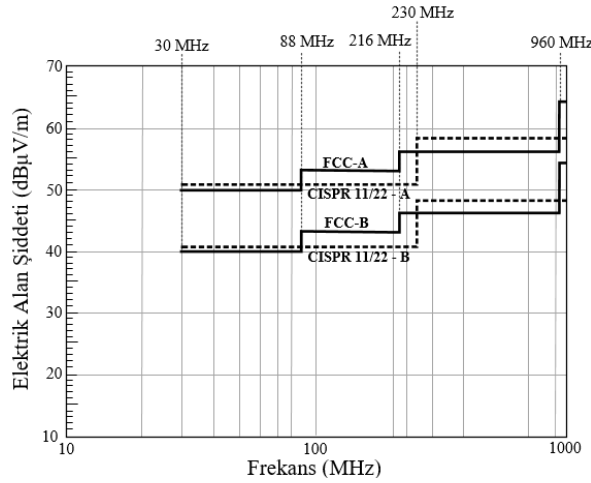
Şekil 2.3. Yarı yansısız odada ışınımla yayılım testi

Elektronik ürünlerin ışınımla yayılım değerlerine sınırlama getiren standartlar ele alındığında ABD’de Federal İletişim Komisyonu’nun yayınladığı FCC 15/B standardının 109. maddesi ışınımla yayılım değerlerini konu edinirken, Avrupa’da Uluslararası Radyo Paraziti Özel Komitesi’nin oluşturduğu CISPR 11 ve CISPR 22 standartlarında yer alan ilgili maddeler ışınımla yayılım limitlerini belirlemede ön plana çıkmaktadır. CISPR 11 medikal, endüstriyel ve bilimsel ekipmanlar için tanımlanan sınır değerlerini içerirken, CISPR 22 bilgi teknolojilerinde kullanılan ekipmanların ışınımla yayılım değerlerine sınırlama getirmektedir. Bunun yanında, CISPR 11 ve CISPR 22’de yer alan ışınımla yayılım limitlerinin birbirine benzer olduğunu ayrıca söylemek mümkündür. CISPR ve FCC’nin Sınıf A ve Sınıf B’ye yönelik 10 metre için belirlediği değerler Şekil 2.4 ile gösterilmiştir. Şekil 2.4’e göre Sınıf A bir ürünün 30 MHz – 88 MHz frekans aralığında FCC tarafından belirlenen sınır değeri 39 dB μ V/m iken, 960 MHz’den daha yüksek frekanslarda bu değer 49.5 dB μ V/m’dir. Benzer şekilde CISPR’ın 30 MHz – 230 MHz frekans aralığında Sınıf A ürünler için belirlediği limit değeri değer 40 dB μ V/m iken, 230 MHz – 1000 MHz frekans aralığındaki sınır değeri 47 dB μ V/m’dir (Paul 2006).



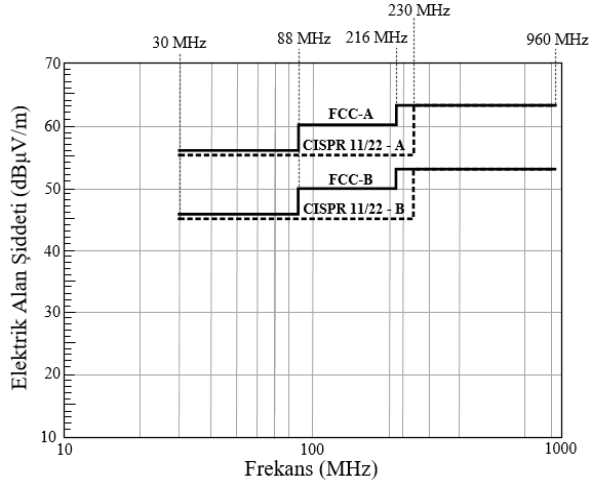
Şekil 2.4. Işınımla yayılımın 10 metre mesafe için belirlenen sınır değerleri

CISPR ve FCC'nin Sınıf A ve Sınıf B cihazlar için 3 metre mesafedeki ışınımla yayılım limitleri Şekil 2.5 ile gösterilmiştir. Şekil 2.5'e göre FCC'nin Sınıf B ürünler için 30 MHz – 88 MHz frekans aralığında belirlediği limit değeri 40 dBµV/m iken, bu değer 960 MHz'den daha yüksek frekanslarda 54 dBµV/m'dir. CISPR'ın 30 MHz – 230 MHz frekans aralığında Sınıf B ürünler için belirlediği ışınımla yayılım limiti 40.5 dBµV/m iken, 230 MHz – 1000 MHz frekans aralığındaki sınır değeri 47.5 dBµV/m'dir (Sengupta ve Liepa 2006; Hegarty 2018).



Şekil 2.5. Işınımla yayılımın 3 metre mesafe için belirlenen sınır değerleri

Test alanları her zaman hem Sınıf A hem de Sınıf B ürünlerin ışınımla yayılım testlerini gerçekleştirebilmek için yeterli mesafeye sahip olmayabilir. Bu gibi mesafe sorunları özellikle kapalı test ortamı olarak adlandırılan ekranlı odalar ile yansısız odalarda görülür. Ölçümlerde mesafenin önemli bir parametre haline gelmemesi adına Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te de görüleceği üzere Sınıf B bir ürünün 10 metre mesafedeki ışınımla yayılım limiti ile Sınıf A bir ürünün 3 metre mesafedeki ışınımla yayılım sınırı değeri ilgili standartlarda belirtilmiştir. Bunun yanında test edilen cihaz ile alıcı antenin birbirine göre uzak alanda konumlandırılması şartıyla bir metre mesafedeki ışınımla yayılım limitleri Şekil 2.6 ile verilmiştir (Wyatt ve Jost 2013).

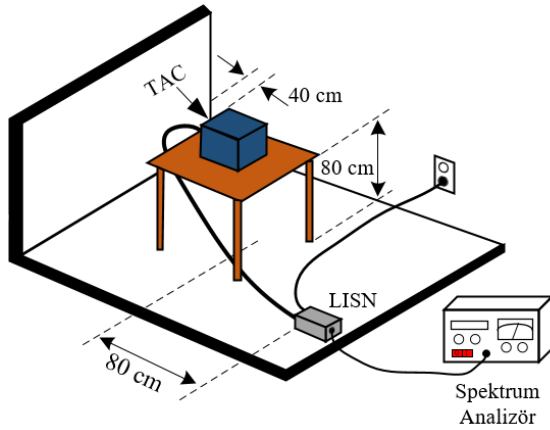


Şekil 2.6. Işınlama yayılımının 1 metre mesafe için belirlenen sınır değerleri

Askeri ürünlerin ışınlama yayılım limitleri ise MIL STD 461 standardında yer almaktadır. MIL STD 461 standardındaki RE101, RE102 ve RE103 maddeleri sırasıyla 30 Hz – 100 kHz, 10 kHz – 18 GHz ve 10 kHz – 40 GHz frekans aralığındaki ölçüm prosedürleri ve ışınlama yayılım sınırlamalarını içermektedir (Paul 2006).

2.2.2. İletimle yayılım

İletimle yayılım, girişim sinyalinin iletken yol üzerinden alıcı yapıya ulaşması ve alıcı yapının olağan çalışma durumunu etkilemesidir. İletimle yayılım sorunlarında alıcı yapıdaki etkilenişi engellemek için girişim kaynağına odaklanılmalı ve girişim oluşturan kaynağın iletimle yayılım değerleri tespit edilmelidir. Bu kapsamda bir ürünün iletimle yayılım değerlerinin belirlenmesi için Şekil 2.7 ile verilen ölçüm sistemi tanımlanmıştır (Ott 2009; Van Helvoort ve Melenhorst 2018).

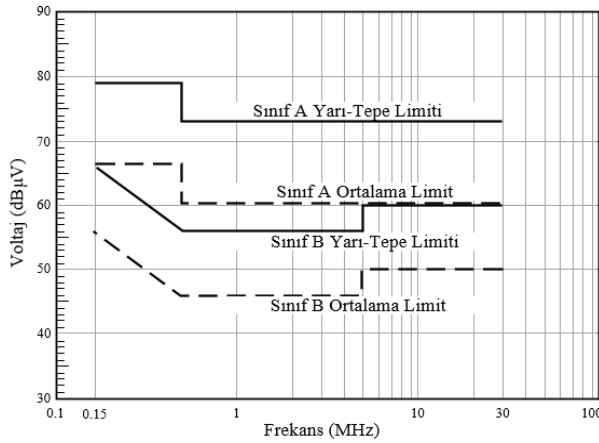


Şekil 2.7. İletimle yayılım için ölçüm düzeneği

Şekil 2.7 ile verilen düzeneğe göre iletimle yayılım testleri için hat empedansı dengeleme ağı (LISN) adı verilen bir cihaz kullanılmaktadır. LISN cihazı iletimle yayılım ölçümlerinde üç temel görevi üstlenir. Bunlardan ilki elektrik şebekesini filtreleyerek TAC'a gürültüsüz enerji sağlamak, ikincisi şebeke empedansı ile TAC empedansını

uyumlandırarak oluşabilecek yansımaların önüne geçmek, üçüncüsü ise TAC tarafından oluşturulan emisyonu spektrum analizöre iletmektir.

Elektronik ürün ve sistemlerin iletimle yayılım değerlerine sınırlama getiren standartlara bakıldığında, Avrupa’da CISPR 11 ve CISPR 22 standartlarında yer alan iletimle yayılım değerleri limit olarak kabul edilirken, ABD’de FCC 15/B standardının 107. Maddesi iletimle yayılım değerlerini sınırlandırmaktadır. CISPR 11 ve CISPR 22 standartlarına göre iletimle yayılım testleri 150 kHz – 30 MHz frekans aralığında gerçekleştirilir. FCC’nin ise 2002 yılı öncesi standartlarında iletimle yayılım testleri için tanımlanan ölçüm aralığı 450 kHz – 30 MHz olarak belirlenmiştir. Temmuz 2002 ile birlikte FCC, CISPR’ın yayınladığı limit ve ölçütleri olduğu gibi kabul etmiş ve iletimle yayılım kısıtlamalarını CISPR’a uygun olacak şekilde yeniden düzenlemiştir. CISPR ve FCC’nin yayınladığı standartlarda yer alan ürünlere ait iletimle yayılım limitleri Şekil 2.8 ile verilmiştir (Ott 2009; Karabulut 2011).



Şekil 2.8. İletimle yayılım limitleri

2.2.3. İletim ve ışınlama bağışıklık

Elektromanyetik hassasiyet veya bir başka deyişle elektromanyetik alınganlık, doğal veya yapay girişim kaynağı nedeniyle meydana gelmiş bozucu etkiden bir ürünün etkilenme derecesini tanımlayan bir terimdir. Elektromanyetik bağışıklık ise bir sistemin bozucu etki altında bile fonksiyonunu eksiksiz olarak yerine getirebilme yeteneğidir. Hassasiyet ve bağışıklık birbirini tamamlayan ifadelerdir. Ürünlerin bağışıklık değerleri yüksek seviyelerde ise girişimlerden daha az etkilendiği yani hassasiyetinin düşük olduğu söylenebilir.

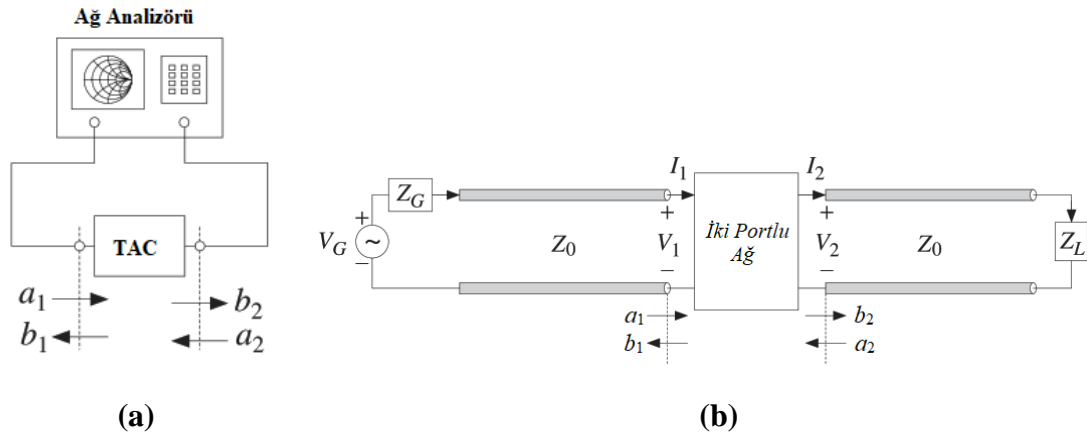
İşınımla bağışıklık testleri bir elektronik ürünün radyo dalgalarına maruz kaldığı durumda çalışma performansının etkilenip etkilenmediğini tespit etmek için yapılır. Ticari ürünler için bu testler 80 MHz – 1 GHz frekans aralığında gerçekleştirilir. Fakat özel amaçlara hizmet eden ürünler için bu frekans aralığının kapsamı daha da artırılabilir. Askeri ürünlerde ise 30 Hz’den 100 kHz’e kadar manyetik alan bağışıklığı, 2 MHz’den 40 GHz’e kadar elektrik alan bağışıklığı ölçümleri yapılır (MIL STD 461G 2015). Ticari ürünlerin işınımla bağışıklık seviyesinin belirlenmesinde uygulanması gereken yöntemler IEC 61000-4-3 standardında tanımlı iken, askeri ürünler MIL STD 461 standardına göre test edilir.

İletimle bağışlılık testleri ise bir elektronik ürünün çalışması esnasında, ürünün kablolarına etki eden bir elektromanyetik girişim kuplajının cihazda neden olabileceği performans kayıplarını belirlemek için yapılır. Ticari ürünlerin iletimle bağışlılık testleri IEC 61000-4-6 standardına göre 150 kHz – 80 MHz frekans aralığında gerçekleştirilir (Kazancı 2010). Askeri ürünlere ait testler ise MIL STD 461 standardına göre yapılır. İletimle bağışlılık testlerinde birleştirme ve ayırıştırma ağı (CDN) olarak bilinen cihazlar kullanılır. CDN'ler test altındaki cihazla elektrik şebekesi arasında ortak giriş empedansı oluşturmasının yanında test altındaki cihaza girişim sinyalinin uygulanmasını sağlar.

Bağışlılık testleri temelde ışıınım ve iletimle bağışlılık olarak ikiye ayrılmasına rağmen elektrostatik deşarj bağışlılığı testi (IEC 61000-4-2), elektriksel ani darbeye karşı bağışlılık testi (IEC 61000-4-4), ani yükselmelere karşı bağışlılık testi (IEC 61000-4-5), şebeke frekanslı manyetik alan bağışlılığı testi (IEC 61000-4-8) gibi pek çok test tipi vardır (Doğan 2007). Ürünlerin piyasaya arz edilebilmesi için bu testlerde uygulanan etkilere karşı bağışık olması ve bu testler sonunda elde edilen sonuçların standartlarla belirlenen değerlere uygun olması gerekmektedir.

2.3. Saçılma Parametreleri

Devre analizleri gerçekleştirilirken devrelere ait eşitlikler empedans matrisi, transfer fonksiyonu, H parametreleri gibi bir dizi bağıntı ile tanımlanabilir. Bu bağıntılar sayesinde devrelerin akım ile gerilim ilişkisi, adım cevabı ve sistemin kararlılık durumu gibi pek çok veri elde edilir. Mikrodalga ve optik ile ilgili uygulamalarda ise analizler genellikle saçılma parametreleri cinsinden yapılır. Saçılma parametreleri, iletim hattında ilerleyen bir dalganın empedans uyumsuzluğuna uğramasından veya farklı dielektrik ortamlar arası geçiş yapmasından kaynaklı karşılaştığı süreksizlik sonucu görülen etkiyi tanımlar. Bu süreksizlik nedeniyle, ilerleyen dalganın genliğinde azalma ve faz kayması oluşabileceği gibi geri yansımalar da görülebilir. Saçılma parametreleri sayesinde ilgili devreye ait geriye dönüş kaybı, duran dalga oranı, yansıma katsayısı gibi veriler elde edilebileceği gibi elektromanyetik dalganın iletildiği ortamın dielektrik özellikleri ile elektriksel parametreleri de belirlenebilir. Saçılma parametreleri, vektörel ağ analizörü (VNA) adı verilen cihazlarla ölçülür. Vektörel ağ analizörleri iki portlu olabileceği gibi ikiden daha fazla port sayısına da sahip olabilir. İki portlu VNA ve test altındaki cihaz Şekil 2.9.a ile gösterilirken, bu test düzeneğinin elektriksel yapısı Şekil 2.9.b ile gösterilen biçimde modellenebilir (Orfanidis 2002).



Şekil 2.9. a) VNA ve test altındaki cihaz; b) Test düzeneğinin yapısı

Şekil 2.9.b'ye göre kaynak gerilimi ve kaynağın öz direnci sırasıyla V_G ve Z_G iken yük empedansı Z_L olarak belirtilmiştir. Port 1'e gelen dalga a_1 ile gösterilirken, b_1 ifadesi port 1'den geri yansıyan dalgayı temsil etmektedir. Benzer şekilde port 2'den geri yansıyan dalga a_2 iken, b_2 yüke doğru iletilen dalgadır. V_1 , I_1 ve V_2 ile I_2 sırasıyla port 1 ve port 2'de okunan gerilim ve akım değerleridir. Karakteristik empedans ise Z_0 ile temsil edilir. Tüm bu koşullarda temel devre teorisi yöntemleri kullanılarak yansıyan ve iletilen dalga için Denklem 2.6, Denklem 2.7, Denklem 2.8 ve Denklem 2.9 ile belirtilen eşitlikleri yazmak mümkündür.

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 \cdot I_1}{2 \cdot \sqrt{Z_0}} \quad (2.6)$$

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_0 \cdot I_1}{2 \cdot \sqrt{Z_0}} \quad (2.7)$$

$$a_2 = \frac{V_2 - Z_0 \cdot I_2}{2 \cdot \sqrt{Z_0}} \quad (2.8)$$

$$b_2 = \frac{V_2 + Z_0 \cdot I_2}{2 \cdot \sqrt{Z_0}} \quad (2.9)$$

Karakteristik empedans ile yük empedansı birbirine eşit olduğu durumda yükten geri yansımalar olmayacak yani a_2 değeri sifıra eşit olacaktır. Bu durumda geri yansımaya açıklayan saçılma parametresi S_{11} ve iletilen dalgayı temsil eden saçılma parametresi S_{21} Denklem 2.10 ve Denklem 2.11'de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (2.10)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (2.11)$$

İletilen dalgaya ait zayıflama ifadesi A , faz kayması φ , esas argüment θ ve bir tam sayı olarak n olmak üzere Denklem 2.12 ve Denklem 2.13 ile verilen eşitlikler yardımıyla iletilen dalgadaki zayıflama ve faz kayması bulunabilir (Nelson 2015).

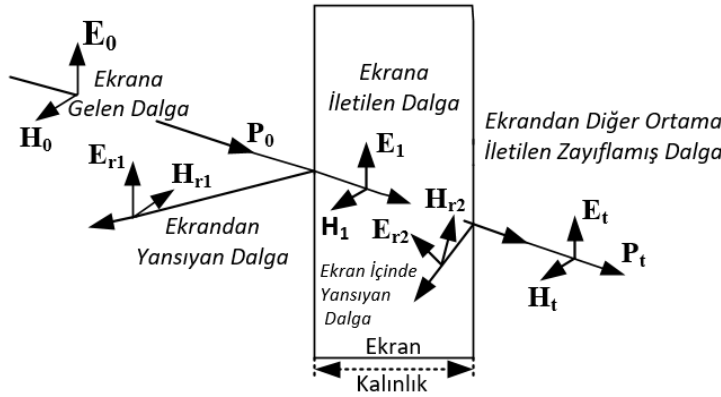
$$A = 20 \cdot \log|S_{21}| \quad (2.12)$$

$$\varphi = \theta - 2 \cdot \pi \cdot n \quad (2.13)$$

2.4. Elektromanyetik Ekranlama Etkinliği

Elektronik ürünlerin yayılım ve bağışıklık değerlerinin standartlarca belirlenen düzeylere indirilebilmesi için alınabilecek önlemler ilgili sistemin tasarımı aşamasında başlamaktadır. Elektronik cihaza ait alt sistemlerin birbiri arasında ya da kendi içinde oluşabilecek kuplaj durumunun ortadan kaldırılması için devrelerin mümkünse simetrik düzende tasarlanması, devrelere ait toprak hatların uygun bir şekilde dizayn edilmesi ve gerekli durumlarda tasarlanan devreye filtreleme işleminin uygulanması elektromanyetik

uyumluluğunun sağlanması adına alınabilecek önlemlerdendir. Bunun yanında özellikle ışınım yollu etkileşimin azaltılmasında uygulanabilecek en etkili yöntem elektromanyetik ekranlamadır. Elektromanyetik ekranlama, ışınım yollu girişime neden olan bir kaynağın veya girişimden etkilenen bir yapının, ekran veya kalkan adı verilen iletken bir malzeme ile elektromanyetik bakımdan izolasyonunun sağlanması işlemidir. Elektromanyetik ekranlama etkinliği ise ekran malzemesinin bu izolasyonu sağlama performansı olarak bilinir. Ekranı gelen elektromanyetik dalgaların ekran üzerindeki davranışı Şekil 2.10 ile gösterilirken, elektromanyetik alanlar ve güç ifadeleri cinsinden ekranlama etkinliği hesabı Denklem 2.14 ve Denklem 2.15 ile belirtilen şekilde yapılır (Hemming 1992).



Şekil 2.10. Elektromanyetik dalgaların ekran üzerindeki davranışı

$$SE = 20 \cdot \log \left(\frac{E_0}{E_t} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{H_0}{H_t} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.14)$$

$$SE = 10 \cdot \log \left(\frac{P_0}{P_t} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.15)$$

Burada sırasıyla E_0 , H_0 ve P_0 ekrana gelen dalgaya ait elektrik alan, manyetik alan ve güç ifadesi iken E_t , H_t ve P_t ekrandan alıcı ortama iletilen dalgaya ait elektrik alan, manyetik alan ve güç ifadesidir. Bunun yanında Denklem 2.14 ve Denklem 2.15'te yer alan SE terimi ekrana ait toplam elektromanyetik ekranlama etkinliğini göstermektedir.

Elektromanyetik ekranlama etkinliğini ekran bakımından yorumlamak gerekirse ekran, üzerine gelen elektromanyetik dalgayı Schelkunoff Ayrımı olarak da bilinen üç aşamada zayıflatabilir (McDowell ve Hubing 2014). Bunlar; elektromanyetik dalgaların hava-ekran sınırında geri yansımalarıyla oluşan zayıflama, diğer bir deyişle yansımaya kaybı (SE_R), elektromanyetik dalgaların ekran tarafından absorbe edilmesiyle oluşan zayıflama, bir başka ifadeyle soğrulma kaybı (SE_A) ve elektromanyetik dalgaların ekran içinde tekrarlı yansımalarıyla oluşan zayıflama yani çoklu yansımaya kaybı (SE_M) olarak bilinir. Bu durumda ortam parametreleri cinsinden ekrana ait toplam elektromanyetik ekranlama etkinliği Denklem 2.16 ile verilmiştir (Ott 1988).

$$SE = \underbrace{20 \cdot \log \left(\frac{|\eta_\omega|}{4 \cdot |\eta_s|} \right)}_{SE_R} + \underbrace{20 \cdot \log \left(e^{d/\delta} \right)}_{SE_A} + \underbrace{20 \cdot \log \left(1 - e^{-2 \cdot d/\delta} \right)}_{SE_M} \quad (\text{dB}) \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'ya göre dalga empedansı η_ω ile gösterilirken ekranın karakteristik empedansı η_s ile belirtilir. Ekran materyalinin kalınlığı d ile ifade edilirken, δ deri mesafesini temsil eder.

Deri mesafesi, ekrana nüfuz eden elektromanyetik dalgaya ait genliğin ekran içinde %36.8'ine kadar zayıfladığı mesafedir. Ekran kalınlığının deri mesafesinden büyük olduğu durumlarda, elektromanyetik dalgaların ekrandaki zayıflama kaybı yüksek olacağı için çoklu yansıma kayıpları ihmal edilebilir (Arı ve Özen 2008). Deri mesafesi iletken yüzeyler için Denklem 2.17 ile belirtilen şekliyle tanımlanabildiği gibi dielektrik ortamlar için Denklem 2.18 ile gösterilen şekliyle tanımlanabilir (Ozen vd. 2008).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad (2.17)$$

$$\delta = \left(\frac{67.52}{f} \right) \cdot \left[\sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2} - \epsilon' \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

Burada, frekans f ile belirtilirken, iletkenlik sabiti σ ile gösterilmiştir. Manyetik geçirgenlik sabitini μ ifadesi temsil eder. Dielektrik sabitine ait gerçek ve sanal kısımlar ise sırasıyla ϵ' ve ϵ'' olarak ifade edilmiştir.

VNA, malzemelere ait elektromanyetik ekranlama etkinliğinin belirlenmesi için kullanılan ve saçılma parametreleri cinsinden sonuç üreten cihazlardan biridir. VNA ile gerçekleştirilen ölçümler neticesinde elde edilen saçılma parametreleri Denklem 2.19, Denklem 2.20, Denklem 2.21 ve Denklem 2.22'deki eşitliklere yazılarak malzemelerin ekranlama etkinliği bulunur (Dřínovský ve Kejik 2009; Gomes 2012; Valente vd. 2017).

$$SE_R = 10 \cdot \log(1 - |S_{11}|^2) \quad (\text{dB}) \quad (2.19)$$

$$SE_A = 10 \cdot \log \left(\frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.20)$$

$$SE_M = 20 \cdot \log \left| 1 - 10^{-\frac{SE_A}{10}} \right| \quad (\text{dB}) \quad (2.21)$$

$$SE = SE_R + SE_A + SE_M \quad (\text{dB}) \quad (2.22)$$

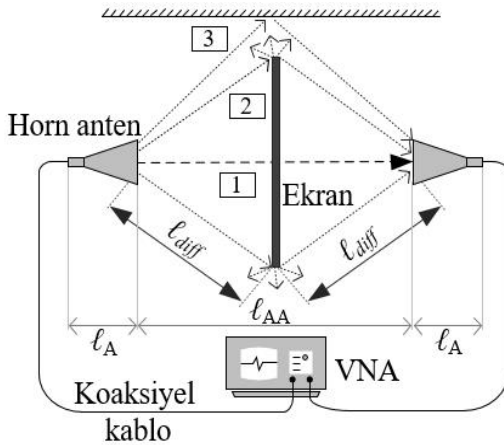
Soğrulma kaybını temsil eden SE_A ifadesi 15 dB'den daha yüksek ise ekrana ait çoklu yansıma kayıpları ihmal edilebileceğinden dolayı çoklu yansıma kaybını gösteren SE_M değeri Denklem 2.22 ile belirtilen toplam elektromanyetik ekranlama etkinliği hesabına dâhil edilmez (Chen vd. 2013).

2.5. Elektromanyetik Ekranlama Etkinliği Belirleme Metotları

Materyallerin elektromanyetik ekranlama etkinliğinin belirlenmesinde geçmişten günümüze kadar pek çok ölçüm metodu tanımlanmıştır (Morari ve Balan 2015). Bu metotlardan bazıları içerdiği kapsamların yeterli olmamasından dolayı önemini zamanla yitirmiştir. Tezin bu bölümünde malzemelerin ekranlama etkinliği belirlenmesi için etkin bir şekilde tercih edilen yöntemlerin birkaçına değinilmiştir.

2.5.1. Serbest uzay ölçüm metodu

Ekranla ait elektromanyetik ekranlama etkinliğinin belirlenmesinde serbest uzay yönteminin uygulanabilmesi için VNA cihazına, koaksiyel kablolarla, ekran materyalini tutması için gerekli yalıtkan ekipmanlara ve antenlere ihtiyaç duyulur. Elektromanyetik dalgaların belirli bir doğrultuda en iyi şekilde yayılmasını sağlayan horn antenler 1 GHz ve daha üst frekanslarda gerçekleştirilen serbest uzay ölçümlerinde tercih edilir. Ölçüm aşamasında verici antenden yayılan elektromanyetik dalgalar, ölçümü yapılan ekranın üzerinden geçerek alıcı antene ulaşabildiği gibi ekran materyalinin kenarlarında kırınım yaparak veya çevresel yansımalarla uğrayarak da alıcı antene ulaşabilir. Ölçüme ilişkin hataların azaltılabilmesi için yalnızca ekran materyali üzerinden geçen elektromanyetik dalgaların alıcı antene ulaşması istenir. Bu istek doğrultusunda ekranın kenarlarına elektromanyetik dalga soğurucuları yerleştirilerek kırınım kaynaklı etkilerin azaltılması sağlanır. Bunun yanında, çevresel yansımaların en aza indirilebilmesi için ölçümlerde huzme verimliliği yüksek antenlerin kullanılmasında ve ölçümlerin yansısız odalarda gerçekleştirilmesinde fayda vardır. Serbest uzay ölçüm metoduna göre elektromanyetik dalgaların ölçüm ortamında yayılış modeli Şekil 2.11.a ile gösterilirken ölçüm düzeneği Şekil 2.11.b ile gösterilmiştir (Dvurechenskaya vd. 2013).



(a)



(b)

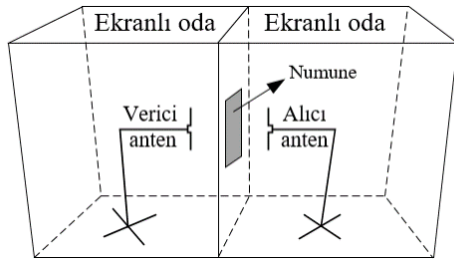
Şekil 2.11. a) Dalgaların serbest uzay ölçüm ortamında yayılışı; **b)** Serbest uzay ölçüm düzeneği (Dvurechenskaya ve Zieliński 2011)

Şekil 2.11.a'ya göre l_A anten boyunu gösterirken l_{AA} antenler arası mesafeyi temsil eder. Ekran materyaline ait kenarların antenlere olan uzaklığı ise l_{diff} ile ifade edilmiştir. Yine Şekil 2.11.a'ya göre 1 numara ile ifade edilen yol, yalnızca ekrandan geçerek alıcı antene ulaşan elektromanyetik dalgaları gösterirken, 2 ile belirtilen yol kenar kırınımına uğrayarak alıcı antene ulaşan elektromanyetik dalgaları temsil etmektedir. Çevresel yansımalar ile alıcı antene ulaşan dalgalar ise 3 numaralı rotayla belirtilmiştir.

Serbest uzay ölçümlerinde ekran malzemesi her iki antenin uzak alan bölgesinde olacak şekilde konumlandırılmalıdır. Ayrıca bu yöntemde ölçüm doğruluğunun daha da artırılabilmesi için ekran materyalinin en ve boy uzunluğu, ölçümdeki en büyük dalga boyunun en az beş katı kadar olmalıdır (Kumar vd. 2000).

2.5.2. MIL STD 285 ve IEEE STD 299 standardı

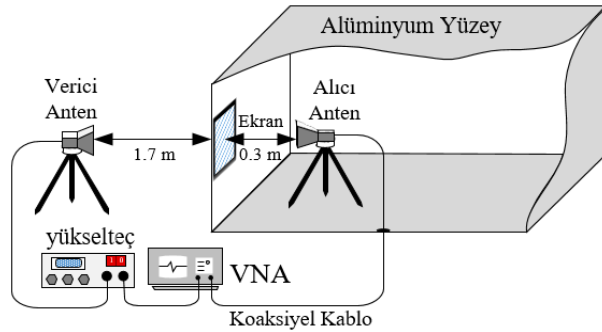
Amerikan Savunma Bakanlığı 1956 yılında askeri uygulamalarda kullanılan ürünlerin elektromanyetik ekranlama etkinliğinin belirlenmesi amacıyla ölçüm frekansı 100 kHz ile başlayan ve 10 GHz'e kadar uzanan MIL STD 285 standardını yayınladı. Bu standarda göre elektromanyetik ekranlama ölçümlerinde, düşük frekans bölgelerinden yüksek frekans bölgelerine gidildikçe sırasıyla loop antenlerin, monopol çubuk antenlerin ve dipol antenlerin kullanılması önerilmekteydi (Celozzi vd. 2008). Ekranlama etkinliği ölçümlerinin yapılabilmesi için ise Şekil 2.12 ile gösterilen birbiriyle bitişmiş ekranlı odalara ihtiyaç vardı (Svetanoff 1999; Tong 2009).



Şekil 2.12. MIL STD 285 standardına ait ölçüm şematığı

MIL STD 285 standardı 1997'de yürürlükten resmen kaldırılıncaya kadar hiç revizyona uğramadı. 1997 yılı ile birlikte MIL STD 285 standardının yerine, 1997 yılında yeniden düzenlemeye uğrayan IEEE STD 299 standardı malzemelerin elektromanyetik ekranlama etkinliği ölçümleri için kabul görmeye başladı. Temel olarak bakıldığında her iki standarda ait ölçüm sistemi oldukça benzer olmasına rağmen IEEE STD 299 standardı MIL STD 285 standardına kıyasla daha kapsamlı bir içerik barındırmaktaydı.

IEEE STD 299 standardına göre ekranlama etkinliği ölçümleri 9 kHz – 18 GHz frekans aralığında tanımlanmaktadır. Buna ek olarak IEEE STD 299 standardı içinde belirtilen ekstra prosedürler ile tanımlanan frekans aralığının dışında ölçümler yapmak da mümkündür. IEEE STD 299'a göre, kesin bir şart olmamakla birlikte; 9 kHz – 20 MHz frekans aralığındaki ölçümlerin loop antenlerle, 20 MHz – 100 MHz aralığındaki ölçümlerin bikonik antenlerle, 100 MHz – 1 GHz frekans aralığındaki ölçümlerin dipol antenlerle ve 1 GHz – 18 GHz aralığındaki ölçümlerin horn antenlerle gerçekleştirilmesi önerilir. Bu ölçüm sisteminde alıcı anten ekranlı oda içerisine yerleştirilirken verici anten ekranlı odanın dışında bulunur. IEEE STD 299 standardında yer alan bu ölçüme ait şematik Şekil 2.13 ile gösterilmiştir (IEEE STD 299 2007; Vas ve Thomas 2017).

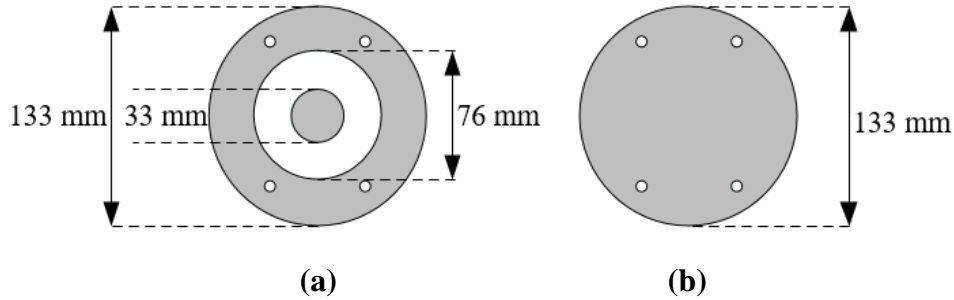


Şekil 2.13. IEEE STD 299 standardına ait ölçüm şematığı

2.5.3. ASTM D4935 standardı

Amerikan Test ve Malzemeler Kurumu (ASTM), 1989 yılında malzemelerin elektromanyetik koruma etkinliğini belirlenmesi için yeni bir test yöntemini tanımlayan ASTM D4935-89 standardını geliştirdi ve yayınladı. Bu standart temelde 1986 yılında Ulusal Standartlar Bürosu'nun yayınladığı raporlara dayanmaktaydı. ASTM D4935-89 standardı ilk kez 1999 yılında revizyona uğradı ve 2005 yılına kadar bu standart ASTM D4935-99 ismiyle araştırmacılar tarafından referans alındı (Dřinovský ve Kejik 2009). 2005 yılında, ASTM D4935 standardı yürürlükten tamamen kaldırıldı ve 2010 yılındaki revizyona kadar bu standart malzemelerin ekranlama etkinliği ölçümleri için geçerliliğini yitirdi. 2010 yılında, ASTM D4935-10 standardı yayımlandı. ASTM D4935-10 standardı, ASTM D4935-99 standardına kıyasla bünyesinde belirli farklılıkları barındırıyordu. 2018 yılına gelindiğinde ise ASTM D4935-10 standardına yapılan düzenlemelerin ardından günümüzde halen daha geçerliliğini koruyan ASTM D4935-18 standardı yayımlandı.

ASTM D4935-18 standardı 30 MHz – 1500 MHz frekans aralığındaki ölçümleri kapsasa da bu frekans aralığı dinamik bir aralık olup ölçüm aparatının ebatlarına göre değişkenlik gösterebilir. ASTM D4935 standardında ölçümler referans ölçüm ve yük ölçümü olmak üzere iki aşamalıdır. Her iki ölçüm için aynı tür veya kalınlıkta malzemeler kullanılmalıdır ve malzemenin kalınlığı ölçümdeki en büyük dalga boyunun 1/100'ünü geçmemelidir. ASTM D4935-18 standardındaki referans ve yük ölçümüne ait numune ebatları Şekil 2.14 ile gösterilmiştir (Jou vd. 2001; Kayık 2018).



Şekil 2.14. a) Referans ölçüm için kullanılan numuneye ait ebatlar; b) Yük ölçümü için kullanılan numuneye ait ebatlar

2.6. Literatür Özeti

Jou (2004) düz dokumalı, dimi dokumalı ve dokumasız tek yönlü karbon fiber kompozitlerin elektromanyetik ekranlama etkinliğini ASTM D4935 standardınca tek ve çok katmanlı halde hem teorik hem de deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada dokuma tipi, katman sayısı ve katman yapılarını oluşturan karbon fiberlerin açılı bir şekilde konumlandırılmış halleri dikkate alınmıştır. Çalışma sonunda elde edilen bulgulara göre düz ve dimi dokuma karbon fiberlerin tek katlı, iki katmanlı ve üç katmanlı halleri sırasıyla 50 dB, 60 dB ve 70 dB'den daha fazla elektromanyetik kalkanlama etkinliği göstermiştir. Katmanlardaki karbon fiber kompozitlerin açılı şekilde konumlandırılması elektromanyetik ekranlama etkinliğini değiştirmemiştir. Tek yönlü yapıların açılı haldeki ölçümlerinde ise 0° yönelimli numunenin elektromanyetik ekranlama etkinliği ile 90° yönelimli numunenin elektromanyetik ekranlama etkinliği arasında büyük farklar olduğu ortaya konulmuştur. Elektromanyetik ekranlama etkinliğinin azami değerleri beklenildiği

gibi üç katmanlı yapılarda ölçülmüştür. Buna göre, bulgular arasında üç katmanlı düz ve dimi dokumalı numuneler 0.9 GHz frekansında 100 dB'den daha yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği sergilemiştir. Ek olarak, çalışmada ölçülen değerler ile hesaplanan değerler birbirine yakın sonuç vermiştir.

Kim vd. (2004), hem ham hem de saflaştırılmış çok duvarlı karbon nano tüplerini (MWCNT), polimetilmetakrilat (PMMA) ile farklı oranlarda karıştırarak girişim önleyici kompozitler sentezlemişlerdir. Sentezlenen kompozitlerin doğru akım (DC) iletkenliği ile PMMA polimer matrisindeki MWCNT yoğunluğu arasındaki bağlantı ilişkilendirilirken, aynı zamanda farklı karışım oranlarına sahip numunelerin elektromanyetik ekranlama etkinliği ASTM D4935-99 standardı uyarınca 10 MHz – 1.5 GHz frekans aralığında ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ham MWCNT ile oluşturulmuş kompozitlerin DC iletkenliği saflaştırılmış MWCNT ile oluşturulmuş örneklerden daha yüksek iken, bu duruma paralel olarak %40 ham MWCNT içeren numune en yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği değerine sahip olmuştur.

Yang vd. (2005), MWCNT ve karbon nanofiber (CNF) moleküllerini polistiren polimeriyle ile farklı oranda karıştırarak kompozitler sentezlemişlerdir. Sentezlenen numunelerin DC iletkenliği ile elektromanyetik ekranlama etkinliğinin ele alındığı bu çalışmada, elektromanyetik ekranlama etkinliği ölçümleri 8.2 GHz – 12.4 GHz frekans aralığında yapılmıştır. Çalışma sonunda ortaya çıkan sonuçlara göre MWCNT ile oluşturulmuş numuneler, CNF ile tabanlı numunelere kıyasla daha iletken çıkmıştır. Ayrıca ağırlıkça %20 CNF içeren numune yaklaşık 20 dB elektromanyetik ekranlama etkinliği ile CNF içeren diğer numuneler arasında en yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği gösteren numune olmuştur. Bununla birlikte %5 MWCNT içeren karışım ölçüm frekansı boyunca yaklaşık olarak 25 dB ekranlama etkinliğiyle, çalışmada ele alınan tüm kompozit numunelerinin elektromanyetik ekranlama etkinliğinden daha fazla ekranlama göstermiştir.

Li vd. (2006), tek duvarlı karbon nano tüplerini (SWCNT) epoksi reçine ile farklı ağırlıklarda karıştırarak yeni polimerler üretmişler ve üretilen bu polimerlerin ekranlama etkinliğini 10 MHz - 1.5 GHz frekans aralığında incelemişlerdir. Oluşturulan karışımlarda yüzdesel olarak %3, %7, %10 ve %15 SWCNT yoğunluğuna sahip olan numunelerin elektromanyetik ekranlama etkinliği SWCNT yoğunluğuna göre incelenmiştir. Ayrıca kısa, normal uzunlukta ve uzun SWCNT parçacıkları epoksi reçineyle %10 oranında karıştırılıp molekül uzunluğunun elektromanyetik ekranlamaya etkisi de çalışmada ele alınmıştır. Elde edilen bulgulara göre %15 SWCNT içeren polimerin elektromanyetik ekranlama etkinliği diğerlerinden daha yüksek iken, uzun SWCNT yapılarıyla oluşturulan %10'luk karışımın ekranlama etkinliği %10 SWCNT içeren diğer numunelere göre daha yüksek olarak bulunmuştur.

Balzano vd. (2007), X-bandında Maxwell-Garnett yaklaşımı ile seyreltilmiş karbon fiber takviyeli kompozitlerin efektif elektrik geçirgenliğinin elektromanyetik modellemesi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalar hem teorik hem de deneysel olarak yapılmıştır. Deneysel ölçümlerde kullanılan numuneler, dökme ve daldırma yöntemi olmak üzere iki farklı üretim tekniğine göre üretilmiştir. Uzunluğu sırasıyla 2 mm, 3 mm ve 4 mm olan karbon fiberler karışımdaki lif yoğunluğu sırasıyla 6.5×10^{-4} , 3.0×10^{-4} ve 2.7×10^{-4} olacak şekilde epoksi reçine ile dökme yöntemine göre karıştırılmıştır. Daldırma yöntemine göre ise, lif uzunluğu sırasıyla 1 mm ve 3 mm olan

karbon fiberler karışımdaki lif yoğunluğu sırasıyla 3.3×10^{-4} ve 6.6×10^{-4} olacak şekilde epoksi reçine ile karıştırılmıştır. Ölçümlerin ANSI/ASTM D5568-01 standardı uyarınca yapıldığı çalışmada, elde edilen bulgulara göre her bir örneğin hesaplanan değerleri ile ölçülen değerlerin birbirine yakın olduğu ve dökme yöntemine göre üretilen örnekler için dielektrik sabitinin daldırma yöntemine göre üretilen numunelerin dielektrik sabitinden daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte dielektrik sabiti en yüksek olan karışım, 2 mm uzunluğundaki liflerle dökme yöntemine göre oluşturulmuş 6.5×10^{-4} karbon fiber yoğunluğuna sahip örnek olmuştur.

Huang vd. (2007), kısa, normal uzunlukta ve uzun olmak üzere üç tipte SWCNT yapısını epoksi reçine ile %0.01 - %15 yoğunluk aralığında homojen karıştırarak polimer elde etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada ise elde edilen bu polimerlerin elektriksel özellikleri ile ekranlama etkinliğini X-bandında belirlemeye çalışmışlardır. Elde edilen bulgular karışımda %15 yoğunlukta bulunan ve uzun SWCNT molekülünü içeren numunenin kıyaslanan diğer numunelere göre hem elektriksel geçirgenlik katsayısının hem de elektromanyetik ekranlama etkinliğinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Das vd. (2009), pıhtılaştırma metoduna göre ürettikleri farklı yoğunluklardaki PMMA dolgululu SWCNT kompozitlerin elektriksel iletkenliği ile ekranlama etkinliğini incelemişlerdir. Çalışmada elektriksel iletkenlik karışımdaki SWCNT yoğunluğuna göre değerlendirilirken, ekranlama ölçümleri 200 MHz – 2 GHz ve 8 GHz – 12 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Skaler ağ analizörü ile verilerin elde edildiği çalışmada bulgulara göre yoğunluk olarak %20 oranında SWCNT içeren karışım 200 MHz – 2 GHz aralığında 30 dB'den daha yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği sergilemiştir. Ayrıca 8 GHz – 12 GHz frekans aralığındaki ölçümlerde %20 oranında SWCNT içeren karışım yaklaşık 40 dB ekranlama etkinliği ile diğer numuneler arasında en yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliğine sahipken, %2 ile en düşük SWCNT yoğunluğuna sahip karışım yalnızca birkaç desibellik elektromanyetik koruma sağlamıştır.

Chang vd. (2010), gerçekleştirdikleri çalışmada su bazlı poliüretan içine farklı oranlarda MWCNT partikülleri, nikel nano partikülleri ve poliakrilonitril bazlı karbon fiber parçacıkları karıştırarak karışımlar oluşturmuşlardır. Çalışmada oluşturulan bu karışımların elektromanyetik ekranlama etkinliği ASTM D4935-99 standardı uyarınca 50 MHz – 1500 MHz frekans aralığında incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre yalnız karbon fiber içeren karışımlar arasında %33.3 oranında karbon fiber içeren karışım ölçüm frekansı boyunca 20 dB'den daha fazla elektromanyetik ekranlama göstermiştir. Ayrıca yine çalışmaya göre karbon fiber-nikel içeren karışımlar, karbon fiber-MWCNT içeren karışımlara kıyasla ölçüm frekansı boyunca yaklaşık 5 dB daha fazla elektromanyetik ekranlama sağlamıştır.

Elimat vd. (2010), poliakrilonitril tabanlı 3 μ m uzunluğundaki karbon fiberler kalıntılarını epoksi reçine ile karıştırarak %5, %10 ve %15 karbon fiber yoğunluğuna sahip 2 cm ve 4 cm kalınlığında örnekler elde etmişlerdir. Oluşturulan yapıların alternatif akım (AC) elektrik özelliklerinin belirlendiği çalışmada ölçüm aracı olarak HP 4284a model empedans analizörü kullanılmıştır. Ölçüm frekansının 20 Hz – 1 MHz olduğu çalışmada 4 cm kalınlığındaki yapının kompleks empedansı 2 cm kalınlığındaki yapının kompleks empedansından daha büyük olsa da her iki numunenin kompleks empedansı artan frekansa karşı azalan bir grafik çizmiştir.

Greco vd. (2012), hava araçlarında kullanılan farklı tipteki güçlendirilmiş karbon fiber kompozitlerin ekranlama etkinliğinin belirlenmesine yönelik yaptıkları çalışmada 100 kHz – 18 GHz frekans aralığında ASTM D4935 standardını temel almışlardır. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, belirlenen frekans aralığının sağlanması için farklı ebatta üç ayrı ölçüm aparatı kullanılmıştır. Güçlendirilmiş karbon fiber numuneleri dokuma durumuna göre dokunmuş ve dokunmamış olarak ele alınmasının yanında, katmanlı hal ve numune yönelimine göre de ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar dokunmuş numunelerin elektromanyetik ekranlama etkinliğinin birbirine yakın olduğunu göstermiş ve yönelimin dokunmuş yapılar için ayırt edici bir özellik olmadığı yorumunun yapılmasına olanak sağlamıştır. Bununla birlikte tek yönlü yani dokunmamış yapı için yönelimin ayırt edici bir durum olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak ise iki katmanlı olarak ölçülen dokunmuş yapılara ait ekranlama etkinliğinin diğer örnek ve varyasyonlarındaki ekranlama etkinliği değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Al-Saleh vd. (2013), farklı elektrik parametrelerine sahip olan MWCNT, CNF ve yüksek yapılı siyah karbon (CB) partiküllerinin AC elektrik iletkenliği ile DC elektrik iletkenliği arasındaki ilişkilerini incelemiştir. Bu materyallerin akrilonitril bütadien stiren (ABS) ile farklı oranlarda karıştırılması sonucunda farklı yoğunlukta numuneler elde edilmiş ve çalışma bu numuneler üzerinden ilerlemiştir. Frekans spektrumunun X-band bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada bahsedilen materyallerin dielektrik özellikleri ile elektromanyetik ekranlama etkinliği de ele alınmıştır. Elde edilen bulgular karışım oranlarının, dielektrik ve iletkenlik değerleri üzerinde değişime yol açtığını gösterirken elektromanyetik ekranlama etkinliği en yüksek numune yaklaşık 50 dB ile %15 MWCNT partikül yoğunluğuna sahip karışım olmuştur.

Tamburrano vd. (2014), metal filmlerin elektromanyetik ekranlama etkinliğinin belirlenmesi için gerçekleştirdikleri çalışmada ASTM D4935 ve ASTM E57 standartları uyarınca üç farklı koaksiyel ölçüm aparatı imal etmişlerdir. Birkaç kHz'den 18 GHz'e kadar uzanan ölçüm frekansı boyunca, üretilen ölçüm aparatlarına ilişkin avantaj ve dezavantajlarının tartışıldığı çalışmada metal olarak farklı kalınlıklarda bakır filmler kullanılmıştır. Elde edilen bulgulara göre bakır numunelerin en kalın olanı 65 dB'den daha yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği sergilerken en ince numune 50 dB'den daha yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği göstermiştir.

Kwon vd. (2014), esnek malzemeler üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada gümüş (Ag) ve MWCNT partikülleri içeren yapıların elektromanyetik ekranlama etkinliğini ASTM D4935-10 standardı uyarınca incelemiştir. Elde edilen bulgular Ag-MWCNT oranı en yüksek örneğin 70 dB'den daha yüksek elektromanyetik ekranlama sağladığını göstermiştir. Ayrıca karışımda iletken konsantrasyonunun elektromanyetik ekranlama üzerindeki etkisi tartışılmış ve iletken parçacık oranı arttıkça elektromanyetik ekranlama etkinliğinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Hong vd. (2015), poliakrilonitril tabanlı 1 mm, 2 mm ve 3 mm uzunluğunda karbon fiberler parçacıklarını dökme yöntemine göre epoksi reçine içerisinde farklı oranlarda karıştırarak numuneler elde etmiş ve bu numunelerin dielektrik özelliklerini 8.2 GHz – 12.4 GHz frekans aralığında hem teorik hem de deneysel olarak belirlemeye çalışmışlardır. Yapılan çalışmada oluşturulan yapının efektif geçirgenliğini elde etmek için Reynolds-Hugh teoremine dayanan bir formül amaçlanmış ve çözümler bu formüle göre yapılmıştır. Deneysel ölçümler iletim hat modeli esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bulgularına göre ölçüm sonuçları ile teorik sonuçların birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Ölçülen ve hesaplanan değerler arasında 3 mm lif uzunluğuna sahip %0.012 karbon fiber yoğunluğu bulunan numunenin diğerlerinden daha yüksek dielektrik sabitine sahip olduğu bulunmuştur.

Ozen vd. (2018), gerçekleştirdikleri çalışmada polyester, paslanmaz çelik ve poliakrilonitril esaslı karbon fiberleri farklı oranlarda birleştirerek oluşturdukları örgüsüz yapıdaki kumaş numunelerinin elektromanyetik ekranlama etkinliğini ASTM D4935 standardı uyarınca 15 MHz – 3 GHz frekans aralığında incelemiştir. Elde edilen bulgulara göre kumaş yapıları arasında %60 oranıyla en fazla iletken materyali bünyesinde barındıran numune en çok 44.7 dB kalkanlama etkinliği gösterebilirken, %52.5 oranıyla yapısında en az iletkeni barındıran numune 22.3 dB kalkanlama etkinliğiyle en düşük elektromanyetik koruma performansını sergilemiştir.

Umashankar vd. (2019), tek yönlü karbon fiber kompozitleri, katmanlardaki kompozitlerin açısı 0°, 45°, 90° ve -45° olacak şekilde sıralayarak katmanlı hale getirmiştir. Katmanlı haldeki bu yapıların katmanları arasına nylon-66 materyalini farklı oranlarda yerleştirerek nylon-66'lı üç ve nylon-66'sız bir adet olmak üzere numuneler elde edilmiştir. Yapılan çalışmada numunelere ait ekranlama etkinliği 8 GHz – 18 GHz frekans aralığında ölçülmüş, ardından bu numuneler gama ışımaya maruz bırakılmıştır. Yeterli bir süre gama ışımaya maruz kalan numunelerin ekranlama etkinliği bahsedilen frekans aralığında tekrar ölçülmüş ve gama ışımaya maruz kalan numunelerin elektromanyetik ekranlamaya etkisi tartışılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, gama ışımaya maruz kalan numunelerin elektromanyetik ekranlama etkinliğini olumlu etkilerken her iki durumda da numunelerin elektromanyetik ekranlama etkinliği değeri frekansla azalan bir eğri çizmiştir.

Keskin vd. (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada poliakrilonitril esaslı liflerle oluşturulmuş karbon fiber kompozit kumaşların elektromanyetik ekranlama etkinliğini 3.3 GHz – 4.9 GHz frekans aralığında incelemiştir. Çalışmada karbon fiberler tek katlı, iki katlı ve üç katlı kombinasyonlar oluşturacak şekilde sıralanmış ve Anritsu-MS4624B model vektörel ağ analizörü aracılığıyla saçılma parametreleri ölçülmüştür. Bulgulara göre tek katlı, iki katlı ve üç katlı karbon fiber kompozit kumaşlar sırasıyla 50 dB, 80 dB ve 90 dB'den daha yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği göstermiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Tezin bu bölümünde, karbon fiber kompozit kumaşların türetilmesinde kullanılan hammaddelere, karbon fiberlerin üretim aşamalarına ve karbon fiberlerin lif özelliklerine değinilmiştir. Bunun yanında koaksiyel iletim hattı modeline ve ölçüm aparatlarına ilişkin bilgilere de yine tezin bu bölümünde yer verilmiştir.

3.1. Karbon Fiberler

Karbon fiberlerin ilk örnekleri, akkor telli lambalarda kullanılmak üzere, 1879 yılında Thomas Alva Edison'un pamuk ve bambu liflerini karbonizasyon işlemine uğratması sonucu elde edildi. Pamuk ve bambunun, sıklıkla birbirini tekrar eden glikoz zincirlerinden, yani doğal ve lineer bir polimer türü olan selülozdan oluşması pamuk ve bambuyu akkor lambalar için ideal kılmaktaydı (Park 2015). 1906 yılında ise selüloz tabanlı karbonlaştırılmış bu polimerlerin yerine tungstenden oluşturulan teller, akkor telli lambalarda tercih edilmeye başladı. Tungstenden yapılan tellerin, pamuk ve bambudan elde edilen tellerden daha uzun ömürlü olması tungstenin tercihinde en geçerli sebebi.

Selüloz üzerine yapılan çalışmalar yıllarca devam ederken, çok zincirli polimerler üzerine çalışmalar da gitgide artırmaya başladı (Kraemer 1938; Schaeffgen ve Flory 1948; Houtz 1950). 1959 yılında suni ipek, 1962 yılında poliakrilonitril (PAN) ve 1963 yılında zift öncüllerinden karbon fiberler üretildi. Bu öncüller ile oluşturulmuş karbon fiberler öncülere kıyasla daha mukavemetliydi ve daha yüksek modüle sahipti.

3.1.1. Suni ipek esaslı karbon fiberler

Selüloz polimerine; demleme, sıkıştırma, parçalama, yaşlandırma, olgunlaşma, filtreleme, gaz giderme, döndürme, çizme, yıkama ve kesme işlemlerinin uygulanması sonucu suni ipek lifleri elde edilir (Park 2015). Elde edilen bu liflere ise sırasıyla stabilizasyon ve karbonizasyon işlemi uygulanmasıyla ise suni ipek esaslı karbon fiberler elde edilir.

Suni ipekten karbon fiber elde edilirken uygulanan ilk adım olan stabilizasyon aslında tüm karbon fiber öncülleri için ortak aşamadır. Stabilizasyon işlemi temelde karbonizasyon işlemi daha verimli kılmak için uygulanır. Bu işlemde inert atmosfer ortamında piroliz edilmiş suni ipek lifleri, sıcaklığı saatte 10°C artırılan fırınlarda 30 saat boyunca 100°C'den 400°C'ye kadar yavaşça ısıtır ve kurutulur. Malzeme yapısı ve ortam şartlarına göre 240°C ile 320°C arasında suni ipektaki ağırlık kaybı maksimum düzeye ulaşır ve liflerde yapısal değişimler görülür (Peebles 2018).

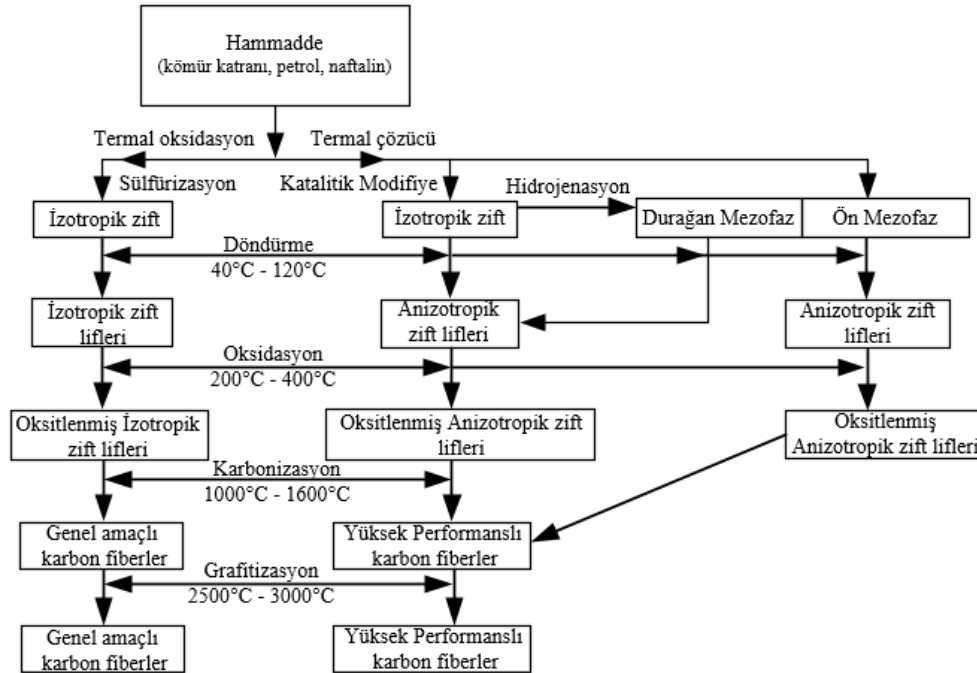
Karbonizasyon adımı suni ipek; temizleme, üç aşamalı ısıtma ve son kontrol olmak üzere beş basamaklı işleme tabi tutulur. Temizleme işleminde suni ipek üzerindeki yağlardan temizlenir. Üç aşamalı ısıtma işleminin ilkinde lifler yaklaşık 900°C'ye kadar birkaç gün boyunca ısıtılır. Bu ısıtma adımı oksijen ve hidrojen gibi karbon olmayan atomlar ana yapıdan uzaklaştırılır ve kalan yapıda daha düzenli karbon bağları elde edilir. İkinci ısıtma adımı elde kalan ana yapı 1000°C ile 2000°C arasında ısıtılır. Bu ısıtma işleminin adı tam karbonlaştırmadır ve ilki kadar uzun sürmez. Nihai termal işlem ise 2500°C'nin üstündedir ve bu işlem grafitizasyon adıyla bilinir. Bu aşamada tamamen karbonlaşmış yapıda olan liflere çekme işlemi uygulanarak liflerin modül ve mukavemeti artırılır.

Çekme işleminin önemi Spry'ın 1970'deki çalışmasına bakılarak anlaşılabilir. Bu çalışmaya göre 1200°C'de karbonize edilmiş suni ipek liflerine 2800°C'de çekme işlemi uygulandığında mukavemette 3,5 katlık bir artıştan söz edilirken, modülde 6 katlık artış gözlemlendiği vurgulanmıştır (Spry 1970).

3.1.2. Zift esaslı karbon fiberler

Zift poliaromatik moleküllerden oluşan ve karbon kompozitlerinde öncül olarak kullanılabilen organik bir madde türüdür. Kömür ve arıtılmış petrol, zift elde ediminde sıklıkla kullanılan kaynaklardan olmakla birlikte polivinil klorür, antrasen ve naftalin gibi bileşiklerden de zift elde edilebilir. Burada seçilen hammadde veya bileşiğin türü ziftin yapısında farklılıklar meydana getirebileceği için seçilen hammaddenin türü önemlidir. Naftalinden üretilen zift oldukça düşük molekül yoğunluğuna sahipken, molekül dizilişi aromatikdir. Yapısındaki karbon atomları ise doygun haldedir. Petrolden elde edilen zift, diğer hammaddelerden elde edilenlere kıyasla en ağır moleküler yapıya sahiptir ve termal olarak aralarındaki en kararlısıdır. Bu sebeple karbon fiber üretiminde petrol önemli bir yere sahiptir.

Hammaddeye uygulanan işlemin cinsi ve ortam koşulları, işlem sıcaklığı ve ısı işlem süresi ziftin yapısını belirlediği gibi karbon fiberin izotropik veya anizotropik yapıda olma durumunu etkiler. İzotropik ziftle oluşturulmuş fiberler genel amaçlar için üretilirken bu yapıdakiler grafit özelliği göstermez. Bu sebeple anizotropik yapıdakilere kıyasla özellikleri daha zayıftır. Metafaz zift gibi anizotropik öncüller ise grafit özelliği gösterdiği için yüksek performans gerektiren işlerde tercih edilir. Anizotropik yapının oluşabilmesi için hammaddeye maliyeti yüksek özel işlemlerin uygulanması gerekse de genelde uzun işlem süreleri ve yüksek sıcaklıklar da karbon fiberlerin anizotropik yapıya kaymasını sağlar. Zift tabanlı izotropik ve anizotropik karbon fiberlerin üretimi Şekil 3.1 ile gösterilmiştir (Morgan 2005).



Şekil 3.1. Zift tabanlı izotropik ve anizotropik karbon fiberlerin üretimi

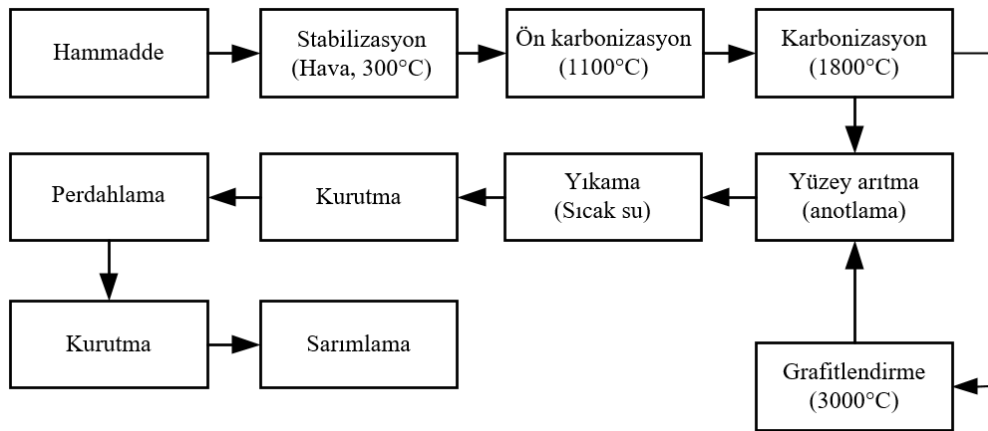
3.1.3. Poliakrilonitril esaslı karbon fiberler

Akrilik, modern endüstrinin pek çok alanında değişik birçok amaç için tercih edilen bir polimer olmakla birlikte sahip olduğu belli özellikler ve avantajlar nedeniyle karbon fiberlerin üretiminde de kullanılan bir hammaddedir. Poliakrilonitril (PAN) esaslı karbon fiberler gibi özellikle akrilik öncüllerden elde edilen fiberler otomobil, havacılık, uzay ve savunma sanayi haricinde diğer çeşitli sektörlerde de takviye malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Karbon fiber üretmek için kullanılan PAN esaslı polimer öncülleri öncelikle, saf homopolimerler ve komonomerler olarak iki sınıfa ayrılabilir (Park 2015). PAN esaslı karbon fiberlerin üretiminde homopolimerlerin kolay işlenememesi nedeniyle genelde komonomerler tercih edilir. Öte yandan komonomerlerin stabilizasyon işlemi esnasında gösterdiği davranış üretilen karbon fibere ait mekanik özelliklerin daha yüksek olmasına da katkı sağlamaktadır. Akrilik asit, itakonik asit, metil akrilat, vinil klorür ve akrilamid PAN üretmek için kullanılan komonomerlere örnek olarak verilebilir.

PAN öncüllü fiberlerin elde edilmesinde PAN moleküllerinin çok kutuplu yapısı nedeniyle lifler, yüksek oranda polar çözücüler kullanılarak ıslak veya kuru döndürme işlemleriyle üretilmelidir. Burada her ne kadar kuru döndürme yöntemi karbon liflerinin üretimi için uygun olsa da, ticari amaçlarda kullanılmak üzere üretilen PAN bazlı karbon fiberlerde genelde ıslak döndürme işlemi tercih edilir (Delhaes 2003).

Suni ipek ve zift esaslı karbon fiberlere uygulanan stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitizasyon işlemi PAN esaslı karbon fiberlere de uygulanır. Stabilizasyon adımı genelde 200°C ile 400°C aralığındaki bir sıcaklıkta gerçekleşir. Burada öncül hava veya başka oksitleyici kimyasal maddelerle oksitlenmezse bu işlem birkaç saat sürebilir. Öte yandan, bu adımda akrilik polimerin hızla ısıtılması molekül zincirinde oligomer ayrımı olmasına ve bol miktarda hidrojen siyanür ve amonyağın meydana gelmesine yol açan ekzotermik bir reaksiyonun gerçekleşmesine neden olur (Peebles 2018). PAN esaslı karbon fiberlerde karbonizasyon adımı yaklaşık 1000°C ile 1800°C sıcaklık aralığında gerçekleşir. Bununla birlikte, karbon fiber kompozitin gerilmeye karşı dayanımının yüksek olabilmesi için grafitizasyon adımı sıcaklık 2700°C ile 3000°C arasında olmalıdır. PAN esaslı karbon fiberlerin üretim aşamaları Şekil 3.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2. PAN esaslı karbon fiberlerin üretim aşamaları

3.2. Karbon Fiberlerin Fiziksel Özellikleri

Karbon fiberlerin hem farklı öncüllerden türetilmesi hem de karbon fiberi oluşturan öncüllerin farklı hammaddelerden oluşabilmesi nedeniyle üretilen her karbon fiberin aynı özelliği göstermesi beklemek doğru bir yaklaşım olmaz. Bu sebepten dolayı, öncül açısından bakıldığında PAN esaslı karbon fiberler sahip olduğu bazı özelliklerden dolayı avantajlı olabilirken, zift tabanlı karbon fiberler PAN esaslılardan farklı olarak bir başka özellikleriyle avantajlı konumda olabilir. Öte yandan, hammaddeler açısından bir değerlendirme yapılabilmesi için PAN esaslı fiberleri oluşturan komonomerler üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, verimlilik açısından sırasıyla itakonik asit, metakrilik asit, akrilik asit ve akrilamidin ön planda yer aldığı görülmektedir (Grassie ve McGuchan 1972). Bu sonuca göre, öncülleri oluşturan hammaddelerin de karbon fiberler üzerinde önemli bir rol oynadığı açıkça söylenebilir. Bununla birlikte, fiberlerin üretim sürecinde hammaddelere uygulanan işlemin cinsi ve ortam koşulları, işlem sıcaklığı ve ısı işlem süresi de lif kalitesini değiştiren diğer unsurlardır.

Karbon fiberlerin üretim süreci yüksek maliyet gerektiren aşamalardan oluşur. Bu sebepten dolayı karbon fiberlerin kullanım alanlarını genişletebilmek için mekanik anlamda fiziksel etkilere daha dayanıklı ve ısı etkilere karşı daha yüksek toleransa sahip liflerin elde edilmesi istenir. Geçmişten günümüze kadar karbon fiberler üzerine yapılan çalışmaların artarak süregelmesinin ve öncül niteliğinde yeni polimerlerin, karbon fiber yapımında denenmesinin en temel nedeni budur (Bengisu ve Yılmaz 2002; Dumanlı ve Windle 2012). Fakat günümüzde her ne kadar farklı öncüllerden üretilen karbon fiberler mevcut olsa da zift ve PAN esaslı karbon fiberler sahip olduğu özelliklerden dolayı halen daha ticari açıdan çok önemli bir yere sahiptir.

Üretilen karbon fiberler izotropik yapıda olabileceği gibi anizotropik yapıda da olabilir. Bu durum karbon fibre ait elektriksel özellikleri etkilediği gibi karbon fiberin dayanımsal davranışını da değiştirir. Bir başka ifadeyle zift veya PAN esaslı öncülden türetilen izotropik yapıdaki bir karbon fiber, anizotropik yapıya göre daha dayanıksızdır. Bu sebeple izotropik yapıdaki fiberler daha çok genel amaçlar için tercih edilirken, yüksek performans ve dayanım gerektiren işlerde anizotropik yapıdaki karbon fiberler tercih edilir. Karbon fiberlerin dayanıklılık açısından kıyaslanması ise ASTM D695 ve ASTM D3410 standartları uyarınca test edilen gerilme modülüne göre yapılır ve karbon fiberler; standart modüllü (SM), orta düzey modüllü (ODM), yüksek modüllü (YM) ve çok yüksek modüllü (ÇYM) olmak üzere sınıflara ayrılır (Morgan 2005). Günümüzde diğer karbon fiberlere kıyasla daha geniş kullanım alanına sahip olan PAN ve zift esaslı karbon fiberlerin mukavemet ve modül değerleri Çizelge 3.1 ile gösterilmiştir. Çizelgeye göre karbon fiberlerin yüksek dayanıma sahip olduğu söylenebilir.

Çizelge 3.1. PAN ve zift esaslı karbon fiber kompozitlerin mukavemet ve modül değerleri (Lewin 2007)

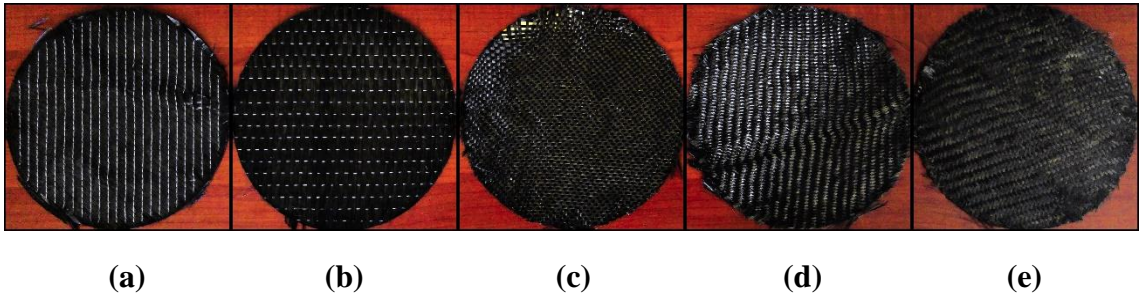
Özellik	PAN (SM)	PAN (ODM)	PAN (YM)	PAN (ÇYM)	Zift (YM)	Zift (ÇYM)
Mukavemet (GPa)	3.5 – 4.8	4.1 – 7.0	1.7 – 4.7	1.7 – 3.9	2.4 – 3.0	2.2 – 3.3
Gerilme Modülü (GPa)	230 – 240	280 – 300	350 – 480	500 – 600	380 – 520	550 – 827

Bu tez çalışmasında PAN esaslı anizotropik karbon lifleriyle oluşturulmuş örgülü ve örgüsüz kumaş numuneleri ele alınmıştır. İncelenen karbon fiber kompozit kumaşların özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Tezde incelenen karbon fiberlerin özellikleri

Fiziksel Özellikler	Karbon Fiber Kompozit Kumaş Numuneleri				
	Düz 200	Dimi 200	Dimi 245	Örgüsüz 0/180	Örgüsüz +45/-135
Lif Yönelimi	–	–	–	0°/180°	45°/(-135°)
Örgü Tipi	Bezayağı Örgü	Dimi 2/2 Örgü	Dimi 2/2 Örgü	Tek Yönlü	Tek Yönlü
Ağırlık	200 gr/m ²	200 gr/m ²	245 gr/m ²	300 gr/m ²	300 gr/m ²
Laminat Kalınlığı (mm)	0.327	0.327	0.393	0.48	0.48
Lifteki Karbon Yüzdesi	% 95	% 95	% 95	% 95	% 95
Gerilme Modülü (GPa)	240	240	240	240	240
Mukavemet (GPa)	3.8	3.8	3.8	4.9	4.9
Yoğunluk (gr/m ³)	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79
Elektriksel Direnç (ohm/cm)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55

Çalışmada örgü tipi, laminat kalınlığı ve lif yöneliminin ekranlama etkinliğindeki etkisinin araştırılması için Çizelge 3.2 ile fiziksel özellikleri belirtilen ve Şekil 3.3 ile gösterilen 133 mm çapındaki beş farklı karbon fiber kumaş örneğinin ekranlama etkinliği ASTM D4935-18 standardınca üretilen aparatlar yardımıyla yapılan ölçümler neticesinde belirlenmiştir. Ayrıca, 133 mm çapında ve 1 mm kalınlığında dairesel kesitli alüminyum metalinin saçılma parametreleri, geliştirilen ölçüm sistemiyle elde edilmiş ve deneysel bulgular ile benzetim sonuçları kıyaslanmıştır.

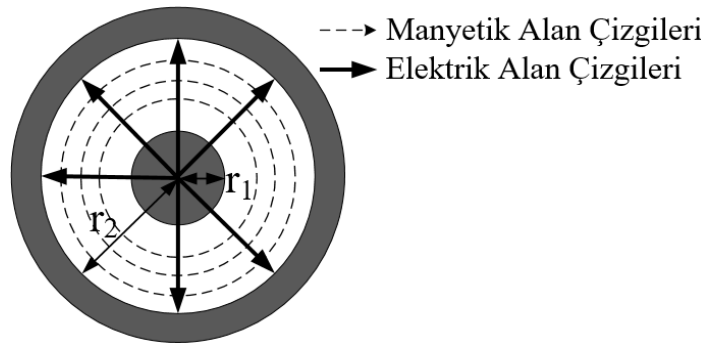


Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan karbon fiber kompozit kumaşlar; a) Örgüsüz +45/-135; b) Örgüsüz 0/180; c) Düz 200; d) Dimi 200; e) Dimi 245

3.3. Koaksiyel İletim Hatları

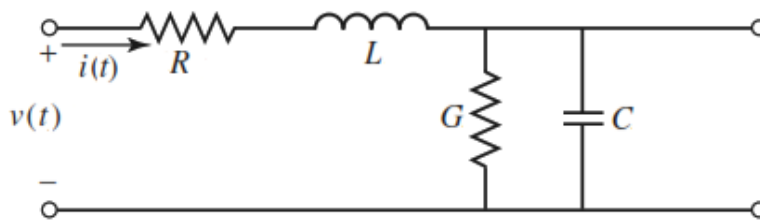
Bir kaynak tarafından üretilen elektrik akımı veya yüksek frekanslı bir sinyal, ancak bir iletim hattını izleyerek yüke ya da alıcıya ulaşabilir. Bu iletim hattı genellikle iletkenlerden oluşan bir yapı olsa da her sinyali herhangi bir iletkenle taşımak doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Bu konuda 50 Hz – 60 Hz frekans ile frekans spektrumunun son derece düşük frekans bölgesinde yer alan elektrik akımının iletimi için klasik iletkenler yeterli olabilirken, yüksek frekanslardaki sinyalin taşınabilmesi için özel bir kablo türü olan koaksiyel kablolarla ihtiyaç duyulur. Elektromanyetik dalgaların iletiminde ise içi boş metal bir boru olan dalga kılavuzları kullanılır. Dalga kılavuzları, dikdörtgen ve daire şeklinde olabileceği gibi koaksiyel dalga kılavuzları da mevcuttur. ASTM D4935 standardı da elektromanyetik ekranlama etkinliği ölçümleri için aslında bir koaksiyel dalga kılavuzu modelini önermektedir. Standartta önerilen bu model koaksiyel iletim hattı yaklaşımını temel alan ve her noktada 50 Ω karakteristik empedans değerinin sağlanması amacıyla belli büyüklükteki silindirik iletkenler ile özel konik yapılardan meydana gelmiş ölçüm aparatlarıdır (ASTM D4945-18 2018).

Koaksiyel iletim hattı modelinde dalga iletimi, enine elektromanyetik (TEM) dalgalar şeklinde gerçekleşir. TEM dalgaların yayılım yönünde herhangi bir elektrik alan veya manyetik alan bileşeni bulunmadığı gibi TEM dalgalarda, dalganın faz hızı ve dalga empedansı enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) dalgalarakinin aksine frekandan bağımsızdır (Cheng 1993). Bir koaksiyel iletim hattında ilerleyen TEM dalgasına ait hat içerisindeki elektrik alan ve manyetik alan dağılımı Şekil 3.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.4. İletim hattı içerisindeki elektrik alan ve manyetik alan dağılımı

İletim hatlarında ilgili hatta ait eşdeğer devre modelinin çıkarılabilmesi nümerik analizler ile benzetim yöntemlerinin o iletim hattı üzerinde uygulanabilmesine olanak sağlar. Hatta ait eşdeğer devre modeli ise ancak hat parametrelerinin bilinmesiyle elde edilebilir. Bu sebeple hat parametreleri, gerekli analizlerin yapılabilmesi için çok önemli bir yere sahiptir. İletim hatlarının genel eşdeğer devre modeli Şekil 3.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.5. İletim hatlarına ait genel eşdeğer devre modeli

Şekil 3.5'e göre R iletkenlerin iç direncini temsil ederken, L değeri koaksiyel hat modelindeki her iki iletkenin öz endüktansını belirtir. Bu iletim hattı metodunda R ve L değeri Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'de verilen eşitliklere göre hesaplanır (Pozar 2012).

$$R = \frac{R_s}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (\Omega/\text{m}) \quad (3.1)$$

$$L = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (\text{H}/\text{m}) \quad (3.2)$$

Burada r_1 ve r_2 ifadesi, Şekil 3.4 ile gösterilen koaksiyel iletim hattı modelindeki iç ve dış iletkenlere ait yarıçap değerini belirtirken, R_s iletkenlere ait yüzey direncidir. Denklem 3.2'de bulunan μ ifadesi ise iki iletken arasındaki dielektrik malzemenin manyetik geçirgenlik sabitidir. Hattın diğer parametreleri ise C ve G ifadeleridir. Devre modelinde C ifadesi şönt kapasitans iken, G değeri iletkenler arasındaki malzemenin dielektrik kaybından kaynaklanan iletkenliği yani dielektrik malzemenin kondüktansını temsil eder. Koaksiyel hat modelinde C ve G değerleri Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 ile verilen eşitlikler sayesinde hesaplanır.

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon'}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (\text{F}/\text{m}) \quad (3.3)$$

$$G = \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \varepsilon''}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (\text{S}/\text{m}) \quad (3.4)$$

Burada ε' ifadesi dielektrik sabitine ait gerçek kısmı temsil ederken, ε'' değeri dielektrik sabitine ait imajiner kısımdır. Denklem 3.4'te bulunan ω ifadesi ise açılal frekansı belirtmektedir. Koaksiyel iletim hatlarında hatta ait karakteristik empedans Z_0 olmak üzere bu değer Denklem 3.5'te verilen eşitliğe göre hesaplanır.

$$Z_0 = \left(\frac{\eta_0}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon_r'}} \right) \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (\Omega) \quad (3.5)$$

Burada ε_r' iletkenler arasındaki dielektrik malzemenin bağıl dielektrik sabiti iken, η_0 ifadesi serbest uzay ortamının karakteristik empedansıdır. Bunun yanında koaksiyel iletim hattı modelinde dalgalar TEM modunda yayıldığı için bu iletim metodunda ölçüm sisteminin kesim frekansı bulunmamaktadır (Hong vd. 2003).

3.4. ASTM D4935-18 Standardınca Ölçüm Sistemi Tasarımı ve Üretimi

ASTM D4935-18 standardı ölçüm doğruluğunu sağlamak ve karşılaşılabilecek belirsizlikleri önlemek adına ölçüm aparatının tasarım aşamasından ölçüm işlemindeki prosedürlere kadar kapsamlı bir bilgiyi araştırmacılara sunmaktadır. Bu standarda göre üretilen ölçüm aparatının $50 \pm 0.5 \Omega$ karakteristik empedans göstermesi beklenirken bu empedans değerinin zaman düzleminde ölçüm yapan reflektometre ve benzeri araçlarla kontrol edilmesi önerilmektedir. Bunun yanında empedans uyumluluğunun sağlanıp güç transferinin maksimum şekilde gerçekleşebilmesi için ölçüm sisteminde tercih edilen sinyal üretici, alıcı yapı ve iki kat ekranlanmış koaksiyel kabloların da 50Ω empedans

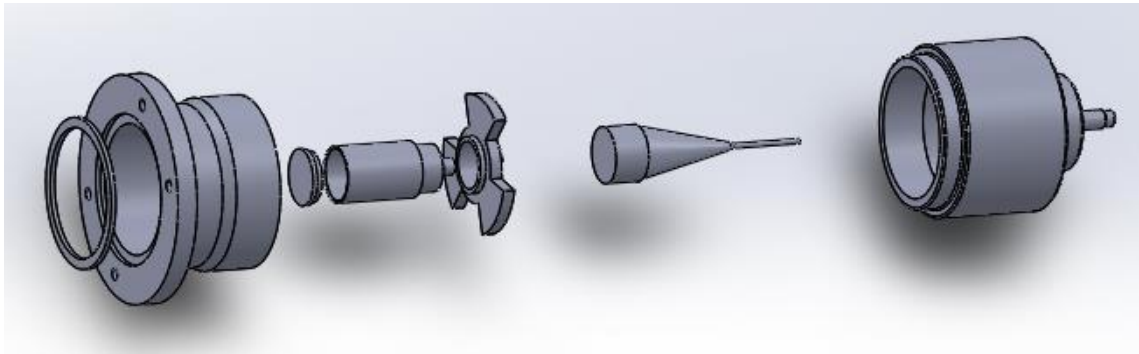
değerine sahip olması gerekir. Test altındaki materyalden yansıyan dalgaların, ölçüm ekipmanlarında ve ölçüm sisteminde hasar bırakmasını önlemek adına 50 Ω karakteristik empedansa sahip 10 dB'lik iki adet zayıflatıcının ölçüm sisteminde kullanılması gerekir (ASTM D4945-18 2018). Ayrıca D4935 standardı uyarınca gerçekleştirilen ekranlama etkinliği ölçümlerinde test altındaki materyale ait yüzey akımlarının kısa devreye neden olmaması adına ölçümü yapılan materyalin ölçüm aparatından izole edilmesinde fayda vardır (Sarto ve Tamburrano 2006).

Düzlemsel malzemelere ait elektromanyetik ekranlama etkinliğinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan ASTM D4935 standardı, ölçüm aparatı olarak kullanılan iletkene dair malzeme bilgilerine bünyesinde yer vermese de yapılan çalışmalara bakıldığında çeşitli metaller kullanılarak üretilmiş koaksiyel ölçüm aparatlarının ölçüm ve analizleri literatürde mevcuttur (Tamburrano vd. 2014; Chen ve Sang 2015). Gerçekleştirilen tez çalışmasında koaksiyel ölçüm aparatları CuZn39Pb3 kimyasal formülüne sahip pirinç metalinden üretilmiştir. Bu pirinç malzemenin sahip olduğu özellikler ise Çizelge 3.3 ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan pirinç metaline ait özellikler

Malzeme Standardı	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Uzatma (%)	Sertlik (HB)	Elektriksel İletkenlik (MS/m)
EN12164	446	351	24	126	14.56

ASTM D4935-18 standardı uyarınca pirinç metalinden üretilen ölçüm aparatının üç boyutlu çizimleri, birçok mühendislik dalının sıklıkla kullandığı bilgisayar destekli tasarım araçlarından biri olan SolidWorks ile yapılmıştır. SolidWorks aracında tasarlanan bu ölçüm sistemine ait parçalar Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

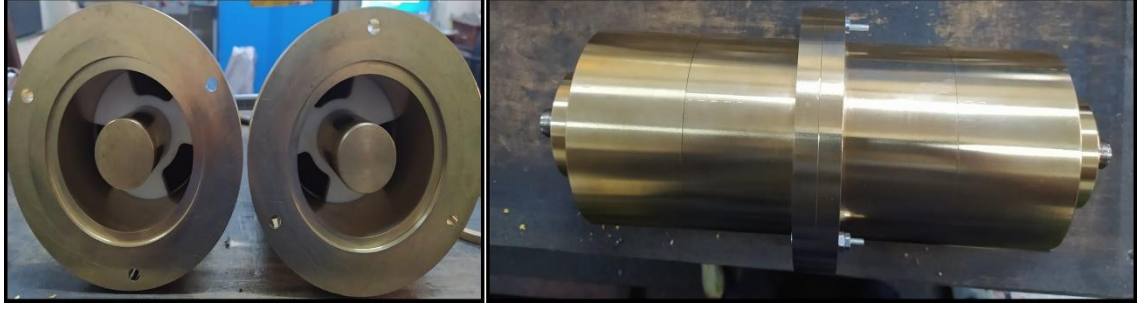


Şekil 3.6. Koaksiyel ölçüm sisteminin SolidWorks tasarımı

Şekil 3.6'ya göre pervaneye benzeyen yapının iç kısmında birbirine kenetlenen pirinç parçalar ölçüm sisteminin sinyal hattını oluşturur. Koaksiyel ölçüm sisteminde, sinyal hattı dışında kalan diğer bütün pirinç parçalar sisteme ait toprak hattıdır. Görünümü pervaneyi anımsatan yapı ise ölçüm aparatındaki tek yalıtkan yapıdır. Bu yapı sistemin sinyal hattı ile toprak hattı arasındaki izolasyonu sağlamakla kalmayıp sinyal hattının sistem içinde sabitlenmesi görevini üstlenmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada pervaneyi

anımsatan bu yalıtkan yapı, frekans spektrumu boyunca oldukça stabil dielektrik özelliğe sahip bir malzeme olan teflondan üretilmiştir.

SolidWorks tasarımlarına ilişkin çalışmaların tamamlanmasının ardından üretim adımında, her bir parçayı oluşturan pirinç metali ile teflon malzemesi tek tek bilgisayarlı nümerik kontrol (CNC) makinelerinde işlenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Bu çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen koaksiyel ölçüm aparatlarına ait görseller Şekil 3.7’de verilmiştir.



(a)

(b)

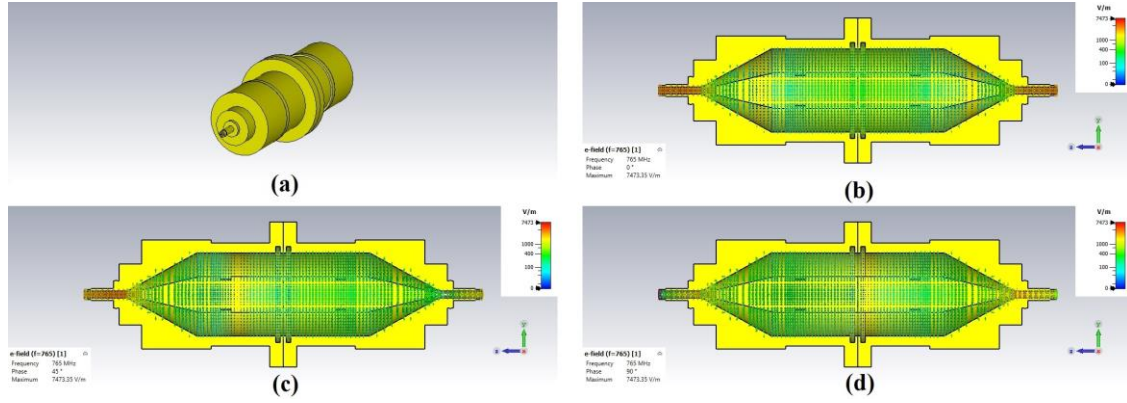
Şekil 3.7. Üretimi gerçekleştirilen ölçüm aparatlarına ait görseller; **a)** Sinyal hattı ve diğer elemanların aparat içindeki yerleşimi; **b)** Ölçüm aparatlarının genel görünümü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

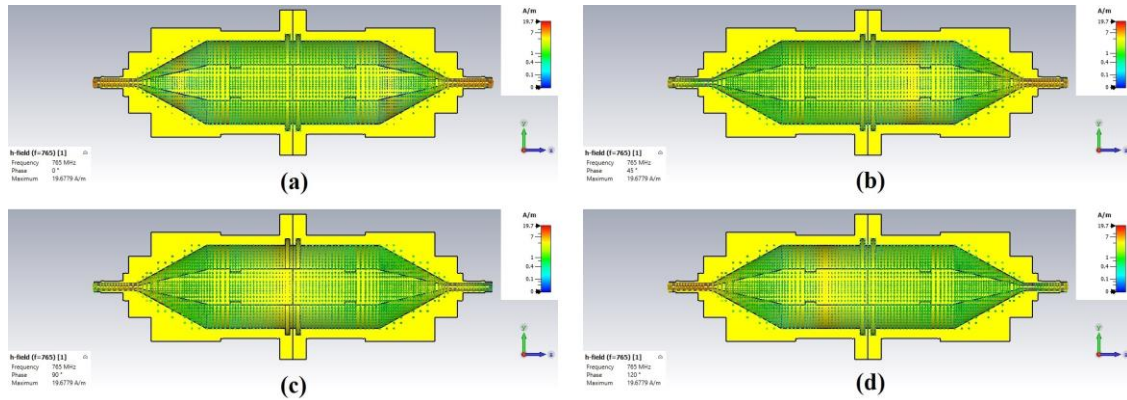
Çalışmanın bu bölümünde tasarımı yapılan ölçüm aparatlarına ait CST Studio Suite benzetimlerine, ölçüm sisteminin deneysel analizlerine ve karbon fiber kompozit kumaşların elektromanyetik ekranlama etkinliği değerlerine ilişkin deneysel ölçümler sonucu elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Ayrıca analiz ve bulgulara ait sonuçlar yine bu bölümde kıyaslanarak tezde izlenen yol ve yöntemlerin doğruluğu tartışılmıştır.

4.1. Ölçüm Sistemine İlişkin Benzetim Bulguları

Gerçekleştirilen tezde simülasyon çalışmaları CST Studio Suite ile yapılmıştır. CST Studio Suite aracında pirinç metali seçilerek 124.800 ağ yapısıyla tasarlanan ölçüm aparatları, CST'nin zaman düzleminde sonlu farklar yöntemini baz alan zaman düzlemi çözümleyicisinde analiz edilmiştir. Ölçüm sisteminin CST tasarımına ait genel görünüm ile ölçümün merkez frekansı olan 765 MHz'de elektrik alanın ölçüm aparatları içindeki dağılımına ilişkin simülasyonlar Şekil 4.1 ile gösterilmiştir. Şekil 4.1'e göre, tasarlanan sistemdeki maksimum elektrik alan değeri 7473.35 V/m olarak bulunmuştur. Ayrıca, yine 765 MHz frekansında ölçüm sistemindeki manyetik alan dağılımı Şekil 4.2 ile verilirken, burada okunan maksimum manyetik alan değeri 19.67 A/m'dir.

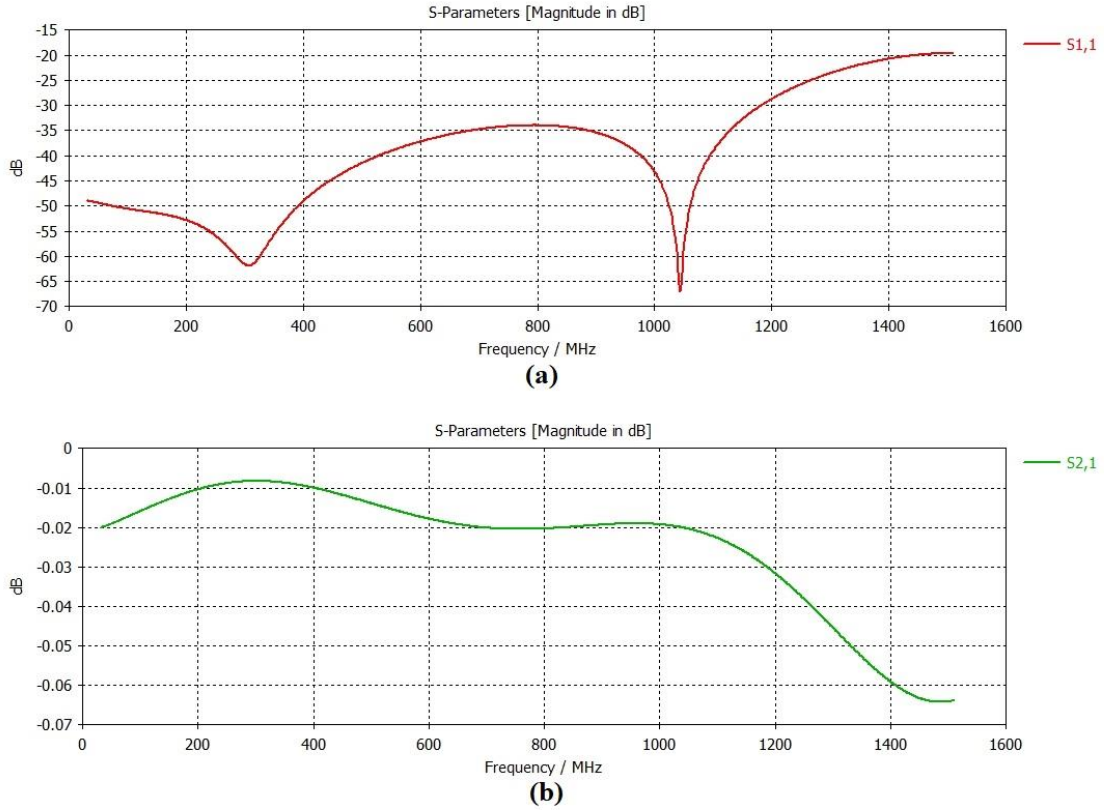


Şekil 4.1. a) Sistemin genel görünümü; b) Faz açısı 0° iken elektrik alan dağılımı; c) Faz açısı 45° iken elektrik alan dağılımı; d) Faz açısı 90° iken elektrik alan dağılımı



Şekil 4.2. a) Faz açısı 0° iken manyetik alan dağılımı; b) Faz açısı 45° iken manyetik alan dağılımı; c) Faz açısı 90° iken manyetik alan dağılımı; d) Faz açısı 120° iken manyetik alan dağılımı

Ölçüm sistemine ait bir diğer benzetim bulgusu Şekil 4.3 ile gösterilen saçılma parametreleridir. Şekil 4.3.a'da verilen grafiğe göre saçılma parametrelerinden yansıyan dalgayı temsil eden S_{11} parametresi 30 MHz frekansında -48.97 dB değerine sahipken, bu değer 1500 MHz frekansında -19.62 dB'dir. S_{11} parametresinin minimum olduğu nokta -67.075 dB değeriyle 1044 MHz frekansındır. Şekil 4.3.b'de ise iletilen dalgayı gösteren S_{21} parametresine ait grafik verilmiştir. Bu grafiğe göre 30 MHz frekansında S_{21} değeri -0.02 dB iken bu değer 1500 MHz frekansında -0.064 dB'dir.



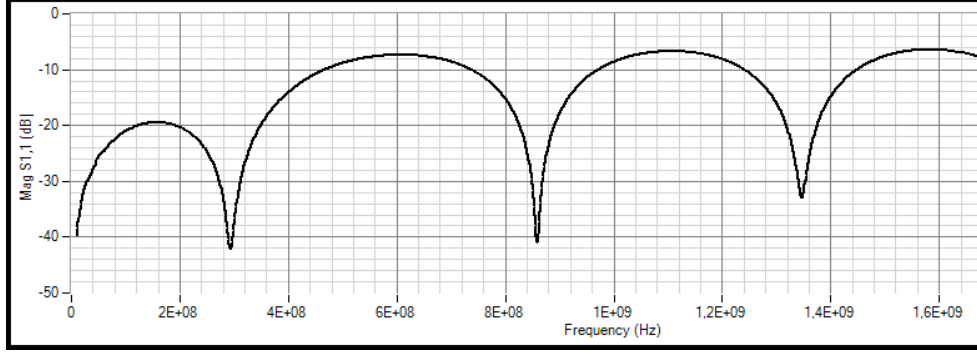
Şekil 4.3. Ölçüm sisteminin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}

4.2. Ölçüm Sistemine İlişkin Deneysel Bulgular

Elektromanyetik devre analizlerinde, saçılma parametrelerinden S_{11} parametresi önemli bir yere sahiptir. Geri dönüş kaybı, uyumsuzluk kaybı ve duran dalga oranı gibi birçok ifade S_{11} parametresi sayesinde hesaplanır. Benzer şekilde anten ışımaları için de ışımanın gerçekleştiği frekans noktaları belirlenirken antenin S_{11} parametresine bakılır. Burada S_{11} değeri yaklaşık -10 dB iken yeterli bir anten ışımasından söz edilebilirken bu değer $-\infty$ dB'ye ilerledikçe ışımanın daha verimli bir şekilde gerçekleştiği söylenebilir (Karaman 2019). Ayrıca S_{11} ifadesinin desibel biriminden değeri $-\infty$ dB'ye yaklaştıkça sistemdeki güç transferinin maksimuma ulaştığı ve devrelerde kaynak ile yük arasındaki uyumsuzluğu tanımlayan bir indeks olan duran dalga oranının azaldığı söylenebilir.

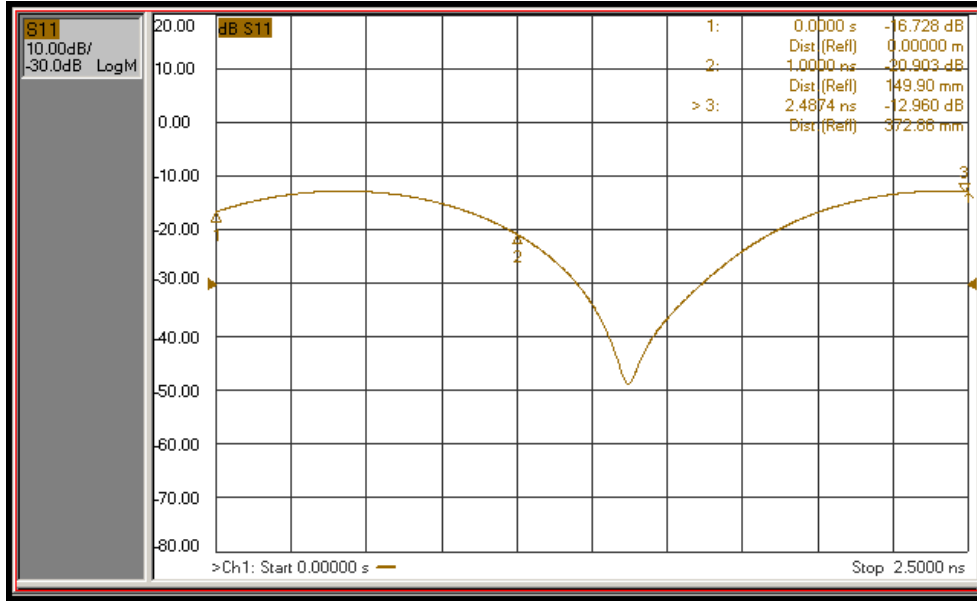
Şekil 4.3.a ile gösterilen benzetim sonuçlarına göre ASTM D4935-18 standardı uyarınca tasarımı yapılan ölçüm aparatlarının 30 MHz – 1500 MHz frekans aralığının her noktasında ışıma yaptığı net bir şekilde görülmektedir. Fakat elektromanyetik ışıma konusunda yalnızca benzetim bulguları, koaksiyel ölçüm sisteminin somut sonuçlarını

tamamen karşılama konusunda yeterli olmayacaktır. Bu sebeple ölçüm sistemine ait S_{11} parametresi deneysel olarak da belirlenmelidir. Bu kapsamda Agilent E8363B model VNA ile koaksiyel sistemin S_{11} değeri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel ölçümler neticesinde frekans düzlemindeki S_{11} bulguları Şekil 4.4 ile gösterilmiştir. Şekil 4.4'e göre 30 MHz frekansında S_{11} değeri -40 dB iken, 1500 MHz frekansında S_{11} değeri -7.8 dB'dir.



Şekil 4.4. Frekans düzlemindeki S_{11} bulguları

ASTM D4935 standardı, koaksiyel ölçüm sistemine ait deneysel çözümlerinin zaman düzleminde yapılmasını önermektedir (ASTM D4945-18 2018). Bu düzlemdeki analizler ölçüm aparatları içinde ilerleyen dalganın anlık davranışının anlaşılmasında kritik bir yere sahiptir. Bu sebeple, gerçekleştirilen tezde zaman düzlemindeki bulgulara da yer verilmiştir. Buna göre S_{11} parametresinin zaman düzlemindeki değerleri Şekil 4.5 ile gösterilmiştir.

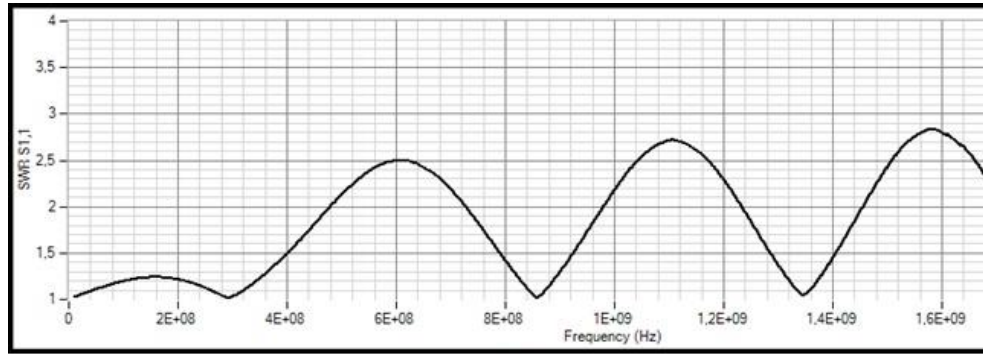


Şekil 4.5. Zaman düzlemindeki S_{11} bulguları

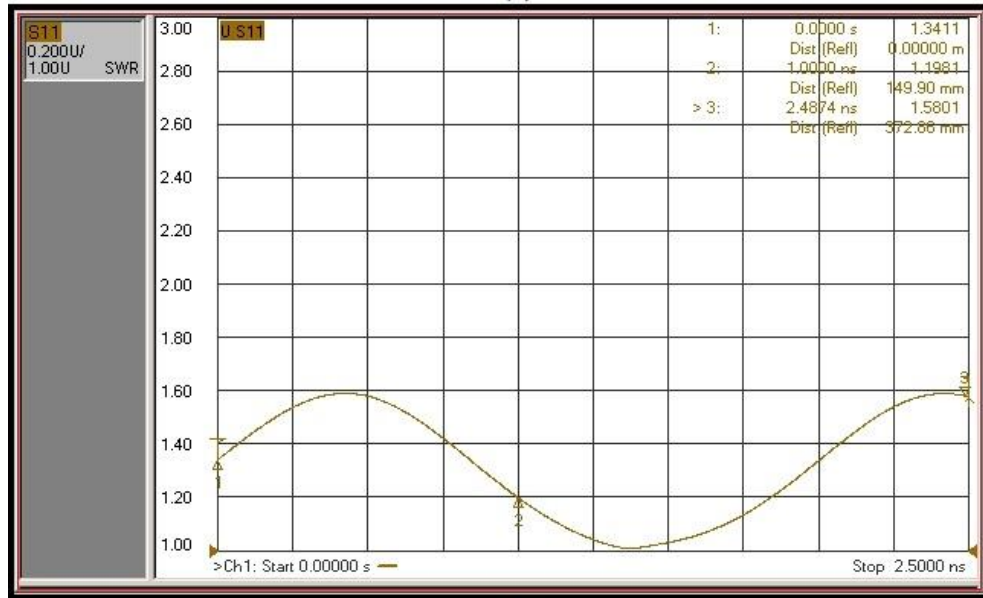
Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ile gösterilen bulgular incelendiğinde frekans düzleminin pek çok noktasında ışımının verimli bir şekilde gerçekleştiği görülmekle birlikte bazı frekans değerlerinde ışıma nispeten daha azdır. Zaman düzlemindeki sonuçlara göre ise tüm ölçüm sistemi boyunca iyi bir ışımının varlığından söz edilebilir.

Elektromanyetik devre analizlerinde incelenmesi gereken bir diğer kavram duran dalga oranıdır. Duran dalga oranı devredeki empedans uyumsuzluğunu temsil eden bir ifadedir. Bu ifade teorik olarak $[1, \infty)$ aralığında değer alabilirken, pratikte 1 ve sonsuz değerlerine ulaşmak mümkün değildir. Duran dalga oranının 1 değerinde olması devrede herhangi bir empedans uyumsuzluğunun olmadığı ve gücün maksimum şekilde transfer edildiği anlamına gelirken, bu değer sonsuza doğru yaklaşması sistemde güç iletiminin katiyen gerçekleşmediği anlamına gelir. Yüksek hassasiyetli devrelerde duran dalga oranının genelde 1'e yakın olması istenirken, anten uygulamalarında duran dalga oranının 2'den düşük olması etkin bir anten ışması için yeterlidir (Mak vd. 2018).

Gerçekleştirilen tezde ölçüm sistemine ait duran dalga oranı (SWR) değerleri hem frekans hem de zaman düzleminde deneysel olarak incelenmiştir. Frekans düzlemindeki bulgular Şekil 4.6.a ile verilirken, zaman düzlemi bulguları Şekil 4.6.b'de gösterilmiştir. Şekil 4.6'ya göre bazı frekans noktalarındaki SWR değeri beklenenden biraz fazla iken, zaman düzlemi sonuçları ideal SWR değerleri sunmaktadır.



(a)

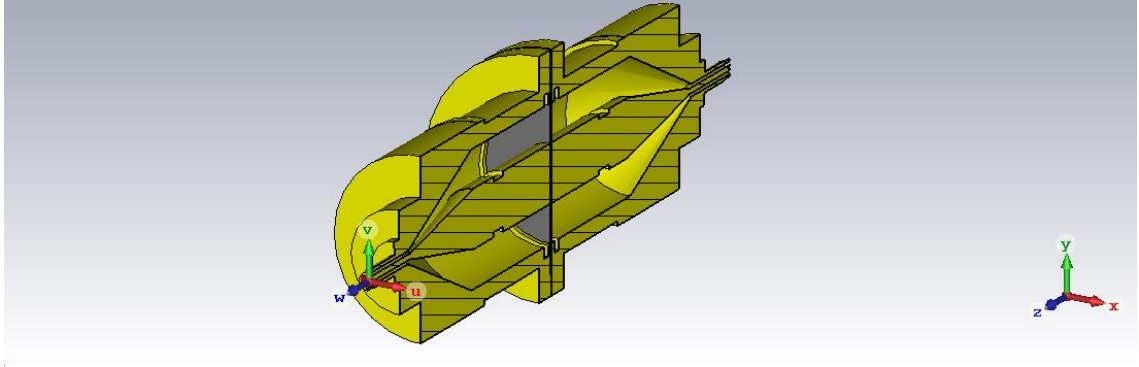


(b)

Şekil 4.6. Ölçüm sisteminin SWR bulguları; a) Frekans düzlemi; b) Zaman düzlemi

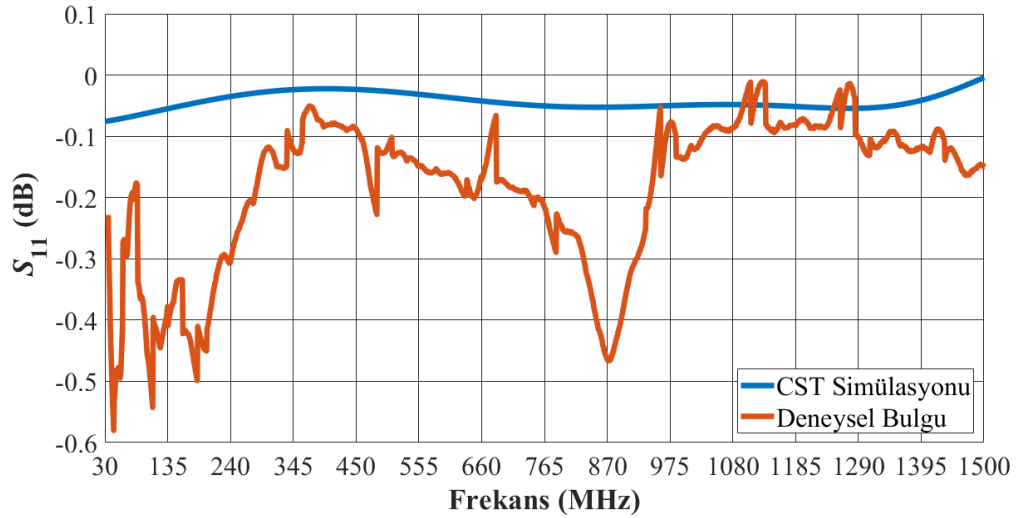
Gerçekleştirilen tez kapsamında koaksiyel ölçüm sisteminin saçılma parametreleri Şekil 4.3.a ve Şekil 4.4'te görüldüğü üzere hem benzetim çalışmalarıyla hem de deneysel ölçümlerle elde edilmiştir. Bunun haricinde simülasyon çalışmaları ile deneysel ölçümler

arasında yeni bir ilişki kurulabilmesi amacıyla 1 mm kalınlığındaki alüminyum metaline ait S_{11} parametresi, hem benzetim çalışmalarıyla hem de deneysel olarak elde edilmiştir. Benzetim çalışmalarında, ölçüm aparatları arasına alüminyum yerleştirilerek Şekil 4.7 ile gösterilen yapı oluşturulmuştur. Şekil 4.7’deki yapı koaksiyel ölçüm sisteminin yarım halini gösterse de analizler şekil bütün haldeyken yapılmıştır.



Şekil 4.7. Alüminyum ölçümündeki benzetim yapısı

Şekil 4.7’de CST Studio Suite aracıyla oluşturulan yapının aynısı üretilen ölçüm aparatlarıyla da oluşturulup pratik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Hem benzetim hem de ölçümler sonucu elde edilen bulgular Şekil 4.8 ile gösterilmiştir. Şekil 4.8’e göre deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları arasındaki en fazla fark 44.7 MHz frekansında 0.5 dB olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, benzetim ile ölçümlerin iyi bir uyum gösterdiğini açıkça ortaya çıkarmaktadır.



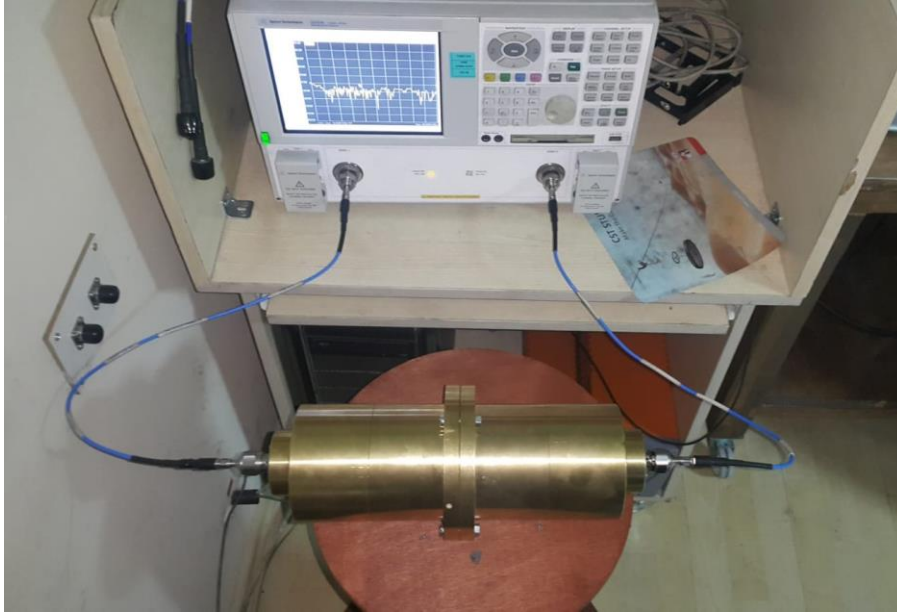
Şekil 4.8. Alüminyuma ait S_{11} parametresinin simülasyon ve ölçüm bulguları

4.3. Numunelere İlişkin Ekranlama Etkinliği Bulguları

Malzemelerin ekranlama etkinliğinin belirlenmesinde farklı türden ekipmanlarla oluşturulmuş ölçüm düzenekleriyle deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesi mümkündür. Bunlar arasından sinyal jeneratörü-spektrum analizör ikilisinin giriş ve çıkış portlarına uygun ölçüm aparatları bağlanarak ölçüm işlemi gerçekleştirilebileceği gibi VNA’nın ilgili portlarına da anten veya dalga kılavuzu gibi ölçüm aparatları yerleştirilerek ölçümler

gerçekleştirilebilir. Ölçüm ekipmanları ile ölçüm sistemlerindeki bu çeşitlilik ekranlama etkinliği hesaplamalarının farklı şekillerde yapılmasında sebebiyet vermektedir. Ölçüm sistemindeki alıcı ekipman eğer alan ve güç ifadeleri cinsinden çıktı üretiyorsa ekranlama etkinliğine ait hesaplamalar tezin kaynak taraması bölümünde verilen Denklem 2.14 ve Denklem 2.15'e göre yapılır. Alıcı cihaz eğer saçılma parametreleri türünden netice üretiyorsa Denklem 2.19, Denklem 2.20, Denklem 2.21 ve Denklem 2.22 ile verilen eşitlikler kullanılarak malzemelerin ekranlama etkinliği hesaplanır.

ASTM D4935 standardına göre malzemelerin ekranlama etkinliğinin, referans ve yük ölçümleri olmak üzere iki aşamalı ölçüm adımı izlenerek, elektromanyetik alanlar ve güç ifadeleri cinsinden hesaplanması önerilir (ASTM D4945-18 2018). Bu öneriye göre yük ölçümünde okunan sinyal seviyesi ile referans ölçümünde okunan sinyal seviyesi oransal olarak yazılarak malzemelerin ekranlama etkinliği elde edilir. Bunun dışında malzemenin yalnızca yük ölçümüyle elde edilen saçılma parametrelerinden malzemeye ait ekranlama etkinliğinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar da mevcuttur (Ozen vd. 2013; Kwon vd. 2014). Gerçekleştirin bu tez çalışmasında Agilent E8363B model VNA ile elde edilen saçılma parametreleri Denklem 2.19, Denklem 2.20, Denklem 2.21 ve Denklem 2.22 eşitliklerine literatür uyarınca yerleştirilerek karbon fiber kompozitlerin elektromanyetik ekranlama etkinliği hesaplanmıştır. Ölçümler için Şekil 4.9 ile gösterilen düzenek hazırlanmış ve karbon fiber kompozit kumaşlara ait saçılma parametreleri bu ölçüm düzeneği doğrultusunda elde edilmiştir.

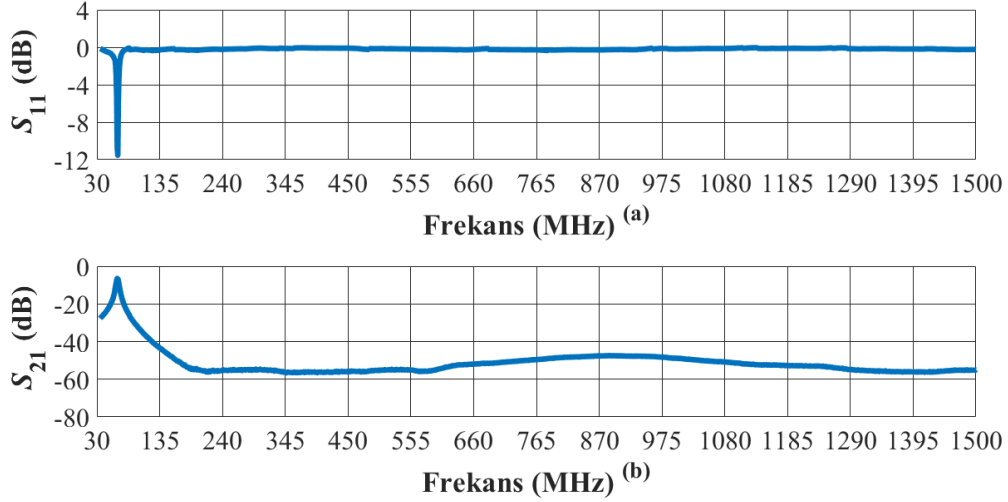


Şekil 4.9. Hazırlanan ölçüm düzeneği

Malzemelere ait ekranlama etkinliği ölçümleri yapılmadan önce ölçüm kaynaklı hataların önlenmesi adına VNA kalibrasyon işlemine tabi tutulmalıdır. Ölçüm kaynaklı hataları düzeltme ve kalibrasyon konusu araştırmacıların farklı kalibrasyon modelleri öne sürerek üzerinde çalıştığı geniş kapsamlı bir konudur (Stenarson ve Yhland 2007). Bu nedenle sunulan kalibrasyon modellerinin birbirine göre avantaj veya dezavantajlarının bulunması oldukça normaldir. Gerçekleştirilen tezde modern VNA cihazları için başarılı kalibrasyon tekniklerinden biri olan kısa devre - açık devre - uyumlu yük - direkt ölçüm (SOLT) kalibrasyon tekniği ile Agilent E8363B model VNA kalibre edilmiştir.

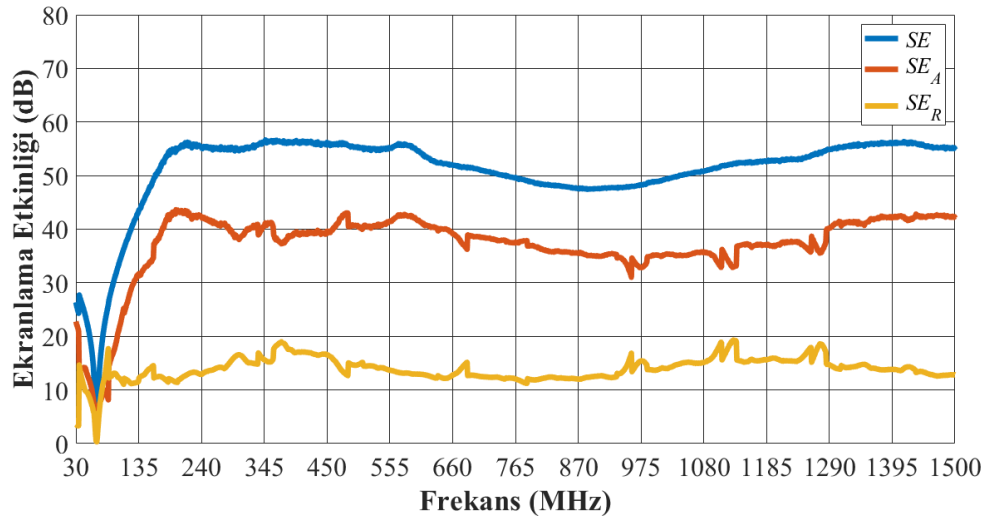
Karbon fiber kompozitler günlük hayatta bir yapıştırıcı türü olan epoksi reçine ile birlikte kullanılır. Fakat epoksi reçineye ait ekranlama etkinliği değerinin yaklaşık sıfır desibel olmasından dolayı epoksi reçine bu çalışmaya dâhil edilmemiştir.

Malzemeler arasında incelenen ilk örnek Düz 200 numunesidir. Bu örneğin pratik ölçümler ile elde edilen saçılma parametreleri Şekil 4.10 ile gösterilmiştir. Şekil 4.10.a'ya göre S_{11} parametresi 30 MHz frekansında -0.15 dB iken, 1500 MHz frekansında -0.23 dB değerine sahiptir. Şekil 4.10.b'ye göre ise S_{21} parametresi 30 MHz frekansında -27.73 dB değerinde iken, 1500 MHz frekansında -54.89 dB değerindedir.



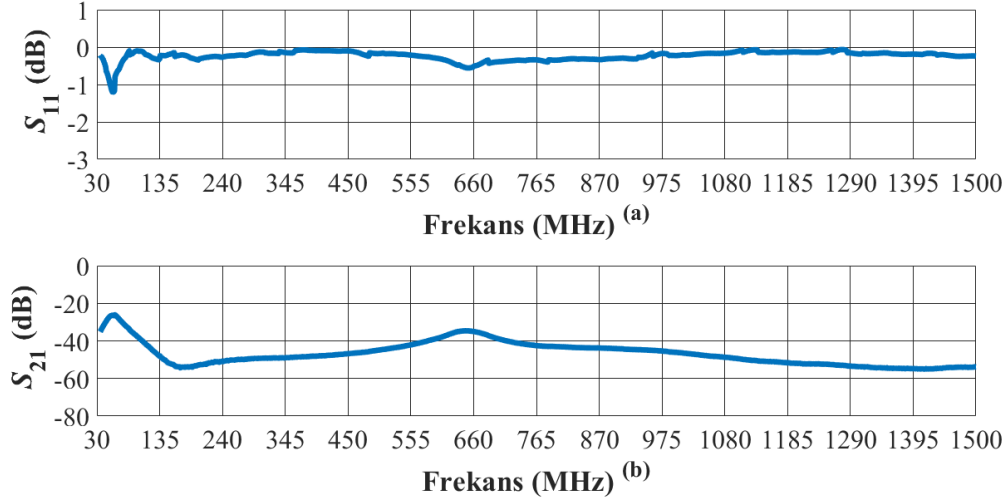
Şekil 4.10. Düz 200 örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}

Düz 200 numunesinin ekranlama etkinliği bulguları ise Şekil 4.11'de verilmiştir. Buna göre yansıma kaybı olan SE_R , 30 MHz frekansında 3.6 dB değerine sahipken, bu değer 1500 MHz frekansında 12.85 dB'dir. Soğrulma kaybını temsil eden SE_A , 30 MHz frekansında 22.8 dB değerinde iken, 1500 MHz frekansında 42.35 dB değerine sahiptir. Toplam elektromanyetik ekranlama etkinliğini gösteren SE , 30 MHz frekansında 26.4 dB değerinde iken, 1500 MHz frekansında 55.2 dB değerindedir.



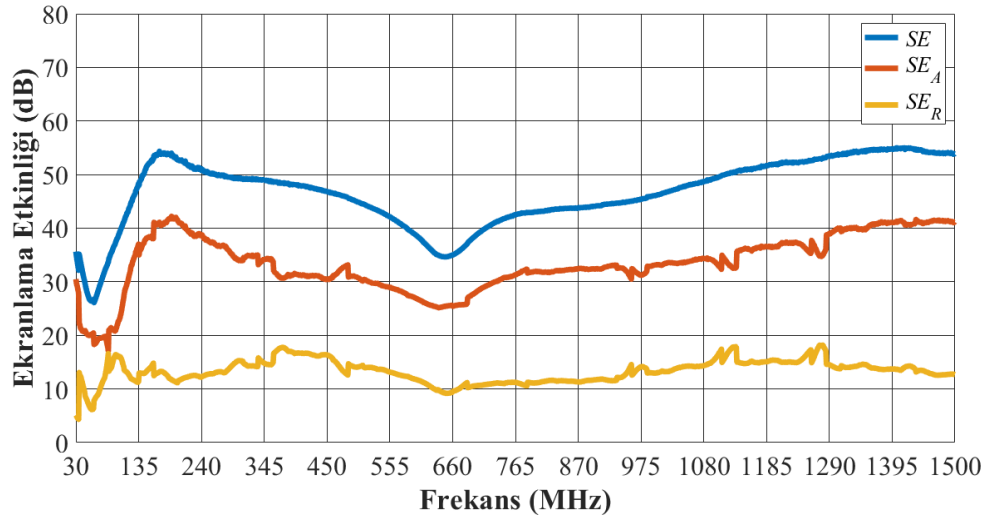
Şekil 4.11. Düz 200 örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği

Dimi 200 kodlu örneğin pratik ölçümler sonucu bulunan saçılma parametrelerine Şekil 4.12’de yer verilmiştir. Şekil 4.12.a’ya göre Dimi 200 kodlu numunenin 30 MHz frekansındaki S_{11} değeri -0.22 dB iken, bu değer 1500 MHz frekansında -0.24 dB’dir. Bu numuneye ait S_{11} parametresinin en düşük değeri 57.56 MHz frekansında -1.2 dB olarak kaydedilmiştir. Şekil 4.12.b ise 30 MHz – 1500 MHz frekansı boyunca Dimi 200 örneğine ait S_{21} parametresini göstermektedir. Buna göre 30 MHz frekansında S_{21} değeri -35.16 dB iken, 1500 MHz frekansındaki S_{21} değeri -53.86 dB’dir. İlgilenilen frekans boyunca S_{21} ifadesinin en yüksek olduğu değer 57.56 MHz frekansında -26.45 dB olarak bulunmuştur.



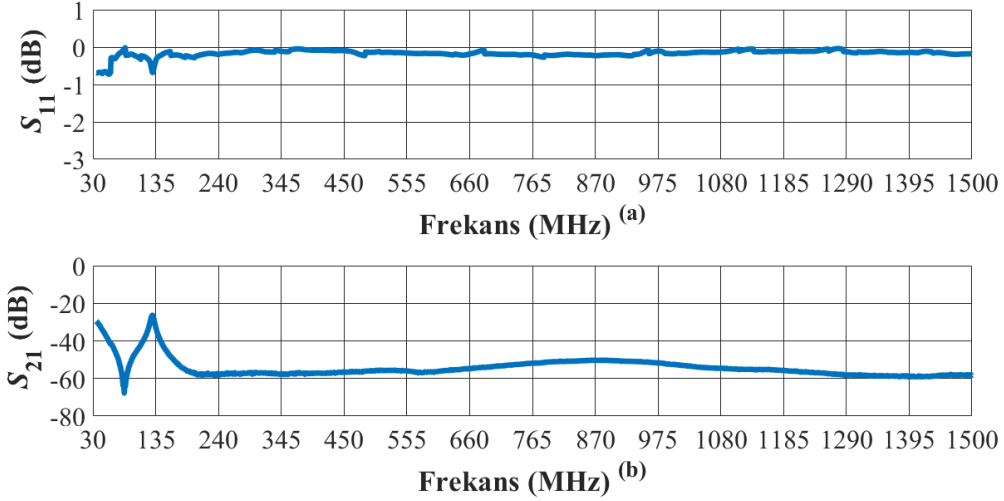
Şekil 4.12. Dimi 200 örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}

Dimi 200 numunesinin elektromanyetik ekranlama etkinliği sonuçları Şekil 4.13 ile gösterilmiştir. Şekil 4.13’e göre yansıma kaybını temsil eden SE_R , 30 MHz frekansında 5.15 dB değerine sahipken, 1500 MHz frekansında SE_R ifadesinin değeri 12.67 dB’dir. Soğrulma kaybı olan SE_A ifadesinin 30 MHz frekansındaki değeri 30.5 dB iken, bu değer 1500 MHz frekansında 41.2 dB’dir. Malzemelere ait toplam elektromanyetik ekranlama etkinliğini gösteren SE ifadesi, 30 MHz frekansında 35.65 dB değerinde iken, 1500 MHz frekansında bu ifadenin değeri 53.87 dB’dir.



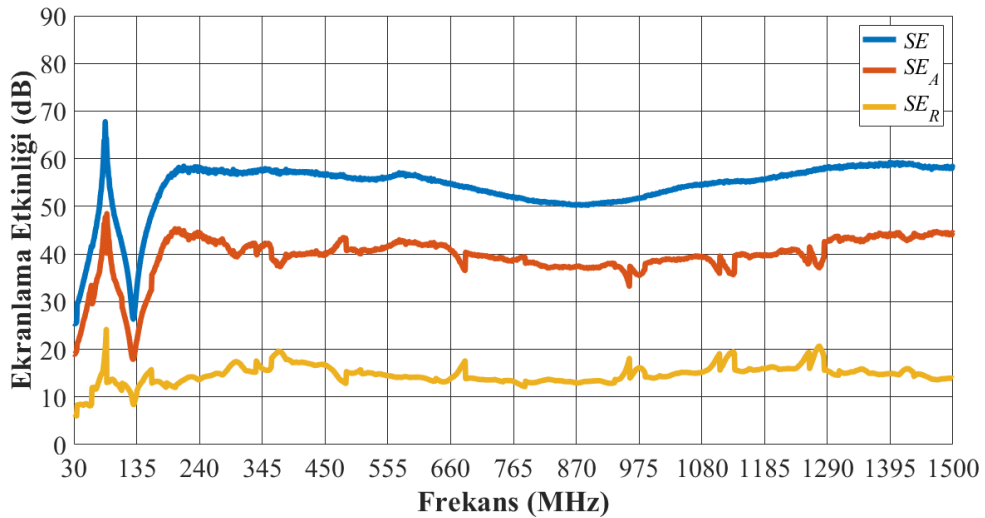
Şekil 4.13. Dimi 200 örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği

Dimi 245 kodlu örneğin pratik ölçümler sonucu bulunan saçılma parametrelerine Şekil 4.14'te yer verilmiştir. Şekil 4.14.a'ya göre Dimi 245 kodlu numunenin 30 MHz frekansındaki S_{11} değeri -0.69 dB iken, bu değer 1500 MHz frekansında -0.18 dB'dir. Bu numuneye ait S_{11} parametresinin en düşük değeri 56.64 MHz frekansında -0.72 dB olarak kaydedilmiştir. Şekil 4.14.b ise 30 MHz – 1500 MHz frekansı boyunca Dimi 245 örneğine ait S_{21} parametresini göstermektedir. Buna göre 30 MHz frekansında S_{21} değeri -29.49 dB iken, 1500 MHz frekansındaki S_{21} değeri -58.19 dB'dir. İlgilenilen frekans boyunca S_{21} ifadesinin en yüksek olduğu değer 130.1 MHz frekansında -26.48 dB olarak bulunmuştur.



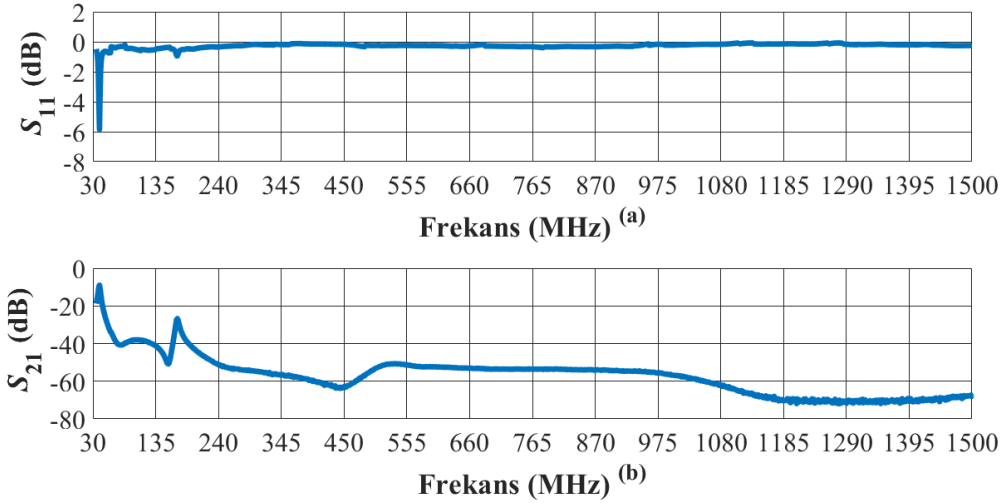
Şekil 4.14. Dimi 245 örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}

Dimi 245 numunesinin elektromanyetik ekranlama etkinliği sonuçları Şekil 4.15 ile gösterilmiştir. Şekil 4.15'e göre yansıma kaybını temsil eden SE_R , 30 MHz frekansında 6.45 dB değerine sahipken, 1500 MHz frekansında SE_R ifadesinin değeri 13.83 dB'dir. Soğrulma kaybı olan SE_A ifadesinin 30 MHz frekansındaki değeri 19.05 dB iken, bu değer 1500 MHz frekansında 44.36 dB'dir. Malzemelere ait toplam elektromanyetik ekranlama etkinliğini gösteren SE ifadesi, 30 MHz frekansında 25.5 dB değerinde iken, 1500 MHz frekansında bu ifadenin değeri 58.19 dB'dir.



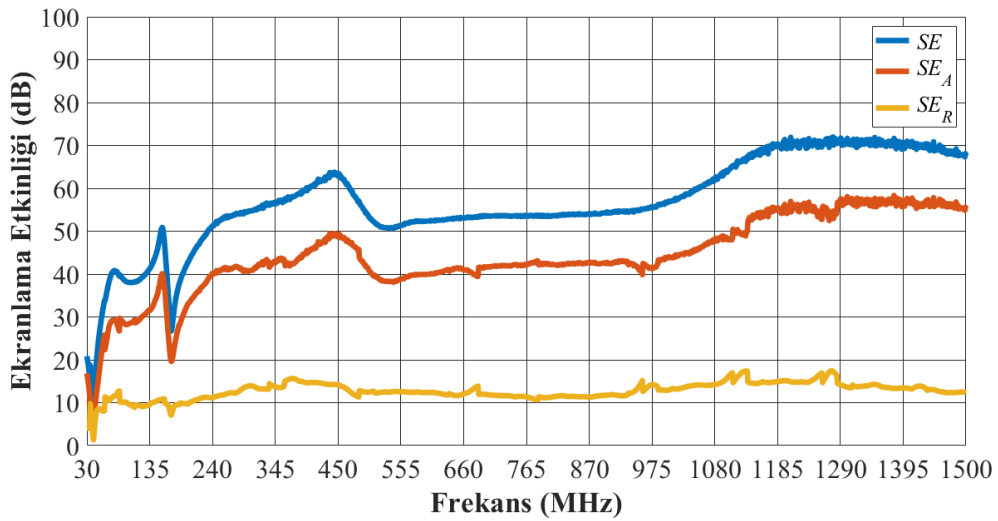
Şekil 4.15. Dimi 245 örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği

Örgüsüz karbon fiber kompozit kumaş yapılarından lif yönelimi $+45^\circ$ ile -135° doğrultusunda uzanan Örgüsüz $+45/-135$ numunesine ait saçılma parametreleri Şekil 4.16 ile gösterilmiştir. Burada Şekil 4.16.a'ya göre ilgili numuneye ait S_{11} parametresi 30 MHz frekansında -0.48 dB değerinde iken, 1500 MHz frekansındaki S_{11} değeri -0.25 dB'dir. S_{11} parametresinin minimum olduğu nokta -5.85 dB değeriyle 41.02 MHz frekansındır. Bu numuneye ait S_{21} parametresinin Şekil 4.16.b ile verilen sonuçlarına göre ise 30 MHz frekansında S_{21} değeri -18.79 dB iken, bu değer 1500 MHz frekansında -67.6 dB'dir.



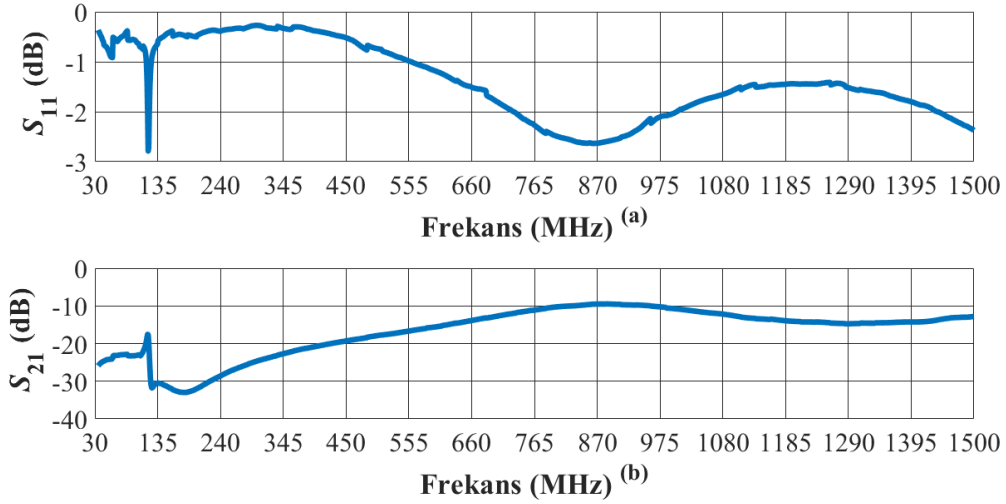
Şekil 4.16. Örgüsüz $+45/-135$ örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}

Örgüsüz $+45/-135$ numunesine ait elektromanyetik ekranlama etkinliği bulguları Şekil 4.17'de verilmiştir. Buna göre 30 MHz frekansında SE_R ifadesi 4 dB değerinde iken, 1500 MHz frekansında bu değer 12.42 dB'dir. SE_A ifadesi 30 MHz frekansında 16.85 dB değerine sahipken, 1500 MHz frekansında SE_A ifadesinin değeri 55.18 dB'dir. Toplam ekranlama etkinliği olan SE , 30 MHz'de 20.85 dB değerinde, 1500 MHz frekansında bu ifadenin değeri 67.6 dB'dir. İlgili numuneye ait en yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği değeri ise 1278 MHz frekansında 72 dB olarak bulunmuştur.



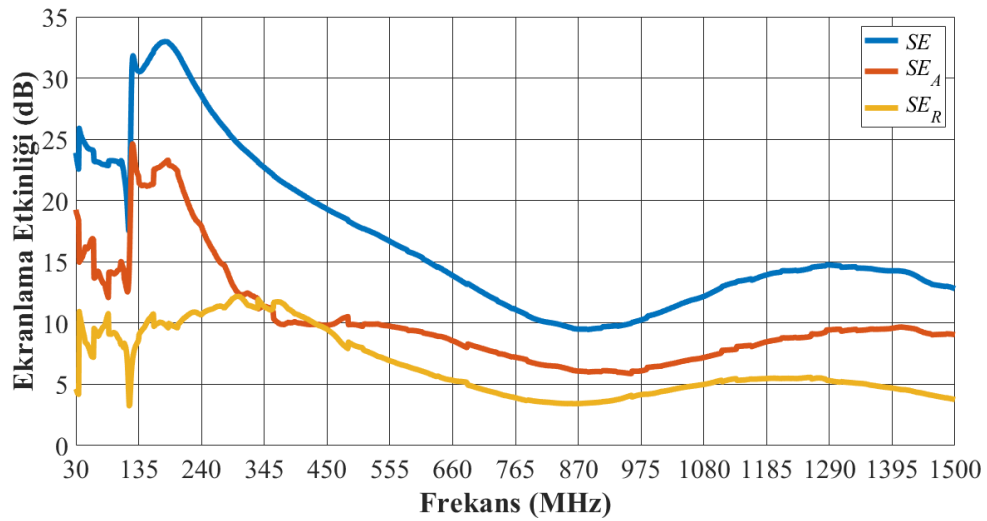
Şekil 4.17. Örgüsüz $+45/-135$ örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği

Çalışma kapsamında incelenen son numune, lif yönelimi $0^\circ/180^\circ$ doğrultusunda olan örgüsüz karbon fiber kompozit kumaştır. Örgüsüz 0/180 kodlu bu örneğe ait saçılma parametreleri Şekil 4.18 ile gösterilmiştir. Şekil 4.18.a'ya göre saçılma parametrelerinden S_{11} , 30 MHz frekansında -0.36 dB iken, bu ifade 1500 MHz frekansında -2.37 dB'dir. Bu numuneye ait S_{21} parametresinin değerleri ise Şekil 4.18.b ile verilmiştir. Şekil 4.18.b'ye göre 30 MHz frekansında S_{21} ifadesinin değeri -25.9 dB iken, 1500 MHz frekansında bu ifade -12.81 dB değerine sahiptir.



Şekil 4.18. Örgüsüz 0/180 örneğinin saçılma parametreleri; a) S_{11} ; b) S_{21}

Örgüsüz 0/180 kodlu numuneye ait elektromanyetik ekranlama etkinliği sonuçları Şekil 4.19'da verilmiştir. Buna göre 30 MHz frekansında SE_R ifadesi 4.64 dB değerinde iken, 1500 MHz frekansında bu değer 3.75 dB'dir. SE_A ifadesi ise 30 MHz frekansında 19.26 dB değerinde iken, 1500 MHz frekansında SE_A ifadesinin değeri 9.05 dB'dir. Toplam ekranlama etkinliği olan SE , 30 MHz'de 23.9 dB değerine sahipken, 1500 MHz frekansında bu ifadenin değeri 12.8 dB'dir. İlgili numunenin en yüksek elektromanyetik ekranlama etkinliği değeri ise 180 MHz frekansında 33 dB olarak bulunmuştur.



Şekil 4.19. Örgüsüz 0/180 örneğinin elektromanyetik ekranlama etkinliği

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında elde edilen numune bulgularının literatür ile uyumlu olması geliştirilen ölçüm sistemini doğrulayan bir diğer unsurdur. Bu konuda tezde yer alan Düz 200 ve Dimi 200 kodlu numunelere ait bulgular ile Jou'nun 2004 yılında yayınlanan çalışması Çizelge 4.1'de karşılaştırılmıştır. Jou bu çalışmada düz ve dimi örgülü karbon fiber kompozitlerin 0.3 GHz ve 1.5 GHz frekansındaki ekranlama etkinliğini sırasıyla 51 dB ve 50 dB olarak elde etmiştir (Jou 2004). Gerçekleştirilen tezde ise Düz 200 kodlu örneğin 0.3 GHz frekansındaki ekranlama etkinliği 54.86 dB olarak ölçülürken, bu örneğin 1.5 GHz frekansındaki ekranlama etkinliği 55.2 dB olarak elde edilmiştir. Yine bu tezde, Dimi 200 numunesinin 0.3 GHz frekansındaki elektromanyetik ekranlama etkinliği 49.39 dB olarak bulunurken, aynı numunenin 1.5 GHz frekansındaki ekranlama etkinliği değeri 53.87 dB olarak ölçülmüştür. Tezde elde edilen sonuçların önceki çalışmalarla uyum içinde olması tasarlanan ölçüm sisteminin etkili bir performans gösterildiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.1. Bulguların literatür ile karşılaştırılması

Frekans	Numune Adı		Numune Adı	
	Düz 200	Dimi 200	Düz Örgü	Dimi Örgü
0.3 GHz	54.86 dB	49.39 dB	51 dB	50 dB
1.5 GHz	55.2 dB	53.87 dB	51 dB	50 dB

5. SONUÇLAR

Elektronik ürünlerin hem meydana gelen herhangi bir girişimden etkilenmemesi hem de ışınım veya iletim yollu bir girişim kaynağı olmaması adına ürünlere ait yayılım ve alınganlık değerlerinin uluslararası kuruluşlarca belirlenen limitlerin altında tutulması gerekir. Bu hususta ışınım yollu etkileşimin azaltılarak standartlarda yer alan düzeylere indirilebilmesi için sıklıkla başvurulan yöntemlerden biri elektromanyetik ekranlamadır. Elektromanyetik ekranlama yönteminde temel olarak girişim kaynağının veya girişimden etkilenen yapının iletken bir malzemeyle elektromanyetik anlamda izolasyonu amaçlanır. İzolasyon için kullanılan bu iletken malzemeye ise ekran veya kalkan adı verilir. Ekranın elektromanyetik etkileşimi önleme performansı yani elektromanyetik ekranlama etkinliği girişim riskinin ortadan kaldırılması için önemli bir yere sahiptir. Bu sebeple ekran olarak kullanılan malzemelerin elektromanyetik ekranlama etkinliği ölçümlerinin yapılabilmesi için birçok ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu ölçüm yöntemlerinin çoğu yüksek frekans bölgelerinde kolaylıkla uygulanabilirken azalan frekans nedeniyle artan dalga boyu bu yöntemlerin düşük frekanslarda uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Gerçekleştirilen tez kapsamında incelenen ASTM D4935-18 standardı da aslında düzlemsel malzemelere ait elektromanyetik ekranlama etkinliğinin belirlenebilmesi için Amerikan Test ve Malzeme Kurumu'nun yayınladığı bir ölçüm yöntemidir. Bu yöntem özellikle 30 MHz – 1500 MHz gibi düşük frekans aralığında elektromanyetik ekranlama etkinliği ölçümlerine olanak sağlaması yönüyle önemli bir yere sahiptir.

Çalışma kapsamında ASTM D4935-18 standardı uyarınca tasarımı ve üretimi yapılan koaksiyel ölçüm sisteminin frekans düzlemindeki analiz sonuçları ele alındığında, 30 MHz – 1500 MHz frekans aralığının birçok noktasında ışınımın verimli bir şekilde gerçekleştiği görülürken, empedans uyumsuzluğunu temsil eden SWR ifadesinin ölçüm frekansı boyunca kabul edilebilir düzeylerde olduğu söylenebilir. Zaman düzlemindeki analiz sonuçlarına göre ise tüm iletim hattı boyunca etkin bir ışınım bahsedebilirken, bu düzlemdeki SWR sonuçlarının ideal seviyelerde olduğu söylenebilir. Bunun yanında dairesel kesitli alüminyuma ait simülasyon sonuçları ile deneysel bulguların birbirine yakın değerlerde olması ölçüm sisteminin doğruluğunu ayrıca teyit etmektedir.

Yeni nesil malzemeler arasında önemli bir yere sahip olan karbon fiber kompozit kumaşlar fiziksel özelliklerinin yanında elektriksel özellikleriyle de ön plana çıkmaktadır. Çalışmada incelenen PAN esaslı karbon fiberler ise sahip olduğu avantajlar nedeniyle son yıllarda pek çok uygulamada sıklıkla tercih edilen kompozitlerdendir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında karbon fiberlerdeki örgü tipi, laminat kalınlığı ve lif yöneliminin ekranlama etkinliği üzerindeki etkisinin araştırılması için PAN esaslı beş farklı örneğin ekranlama etkinliği değerleri ASTM D4935-18 standardınca üretilen ölçüm aparatları ile deneysel olarak belirlenmiştir. Buna göre örgü tipinin ekranlama etkinliği üzerindeki etkisi için Düz 200 ile Dimi 200 kodlu numunelerin sonuçları incelenmiş ve değişen örgü tipinin ekranlama etkinliğini az da olsa değiştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Laminat kalınlığının neden olduğu etki için Dimi 200 ile Dimi 245 kodlu örneklere ait sonuçlar incelenmiş ve laminat kalınlığının artması ile ekranlama etkinliğinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Lif yöneliminin neden olduğu etki için ise Örgüsüz +45/-135 kodlu numunenin bulguları ile Örgüsüz 0/180 kodlu numuneye ait bulgular karşılaştırılmış ve lif yöneliminin değişmesi ile ekranlama etkinliğinin değiştiği görülmüştür. Bunun yanında, elde edilen bulguların literatürle uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir.

ASTM D4935 standardı ile tanımlı koaksiyel ölçüm sisteminde, düşük frekansları kapsayan diğer ölçüm yöntemlerinin aksine, ölçüm için çok büyük ebatlarda test örneğine ihtiyaç duyulmaması ve ekranlama etkinliği ölçümlerinin yansız oda gibi yüksek maliyetli test ortamlarında gerçekleştirilme şartının olmaması koaksiyel ölçüm sisteminin sunduğu avantajlardandır. Ayrıca bu ölçüm sistemiyle ekranlama etkinliği ölçümlerinin yanı sıra yardımcı ekipmanlar kullanılarak dielektrik ölçümlerinin de yapılabilmesi bu ölçüm sisteminin sahip olduğu bir diğer kullanışlı özelliktir (Soto-Cabán 2012).

Yapılan tez çalışması ile araştırmacıların daha düşük maliyetlerle ve pratik olarak standart ölçümlerini kolaylıkla yapabilmelerine olanak sağlanmıştır. Üretilen aparatlar benzer çalışmalara kolaylıkla adapte edilebilecek yapıda olup, dielektrik ölçümlerinin de yapılabilmesine imkân sunabilecek biçimdedir. Düşük frekanslardaki ölçüm kısıtlarının ortadan kaldırılması bakımından bu ölçüm sistemi geliştirilebilecek özelliklere sahiptir. Yapılan tez ile elde edilen kazanım ve bilgi birikiminin farklı frekans bölgeleri kapsayan yenilikçi çalışmaların önünü açabileceği değerlendirilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Al-Saleh, M.H., Saadeh, W.H. and Sundararaj, U. 2013. EMI shielding effectiveness of carbon based nanostructured polymeric materials: a comparative study. *Carbon*, 60 146-156.
- ANSI C63.4. 2014. American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz. IEEE. Published Online. 1-170 p.
- ANSI C63.4a. 2017. American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz Amendment 1: Test Site Validation. IEEE. Published Online. 1-64 p.
- Arı, N. ve Özen, Ş. 2008. Elektromanyetik Uyumluluk. Palme Yayıncılık, Ankara, 224 s.
- ASTM D4945-18. 2018. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania. 1-11 p.
- Balanis, C.A. 2016. Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley & Sons, New Jersey, 1072 p.
- Balzano, A., De Rosa, I., Sarasini, F. and Sarto, M. 2007. Effective Properties of Carbon Fiber composites: EM Modeling Versus Experimental Testing. 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 1-6, 9-13 July Honolulu, USA.
- Bengisu, M. and Yilmaz, E. 2002. Oxidation and pyrolysis of chitosan as a route for carbon fiber derivation. *Carbohydrate polymers*, 50 (2): 165-175.
- Celozzi, S., Araneo, R. and Lovat, G. 2008. Electromagnetic Shielding. John Wiley & Sons, New Jersey, 358 p.
- Chang, H., Yeh, Y.-M. and Huang, K.-D. 2010. Electromagnetic shielding by composite films prepared with carbon fiber, Ni nanoparticles, and multi-walled carbon nanotubes in polyurethane. *Materials transactions*, 51 (6): 1145-1149.
- Chen, C. and Sang, Y. 2015. The Development of Novel Coaxial Tester on Electromagnetic Shielding Effectiveness Measurement. IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE), pp. 506-510, 28-30 October, Shanghai, China.
- Chen, Z., Xu, C., Ma, C., Ren, W. and Cheng, H.M. 2013. Lightweight and flexible graphene foam composites for high-performance electromagnetic interference shielding. *Advanced materials*, 25 (9): 1296-1300.
- Cheng, D.K. 1993. Fundamentals of Engineering Electromagnetics. Addison Wesley Publishing Company, Boston, 488 p.

- Chung, D. 2001. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, 39 (2): 279-285.
- Das, N.C., Liu, Y., Yang, K., Peng, W., Maiti, S. and Wang, H. 2009. Single-walled carbon nanotube/poly (methyl methacrylate) composites for electromagnetic interference shielding. *Polymer Engineering & Science*, 49 (8): 1627-1634.
- Delhaes, P. 2003. *Fibers and Composites*. Taylor & Francis, London, 246 p.
- Doğan, K. 2007. Elektromanyetik uyumluluk ve alçak gerilim test laboratuvarı kurulumu ve akreditasyonu için altyapı çalışmaları. Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 209 s.
- Dřínovský, J. and Kejlik, Z. 2009. Electromagnetic shielding efficiency measurement of composite materials. *Measurement science review*, 9 (4): 109-112.
- Dumanlı, A.G. and Windle, A.H. 2012. Carbon fibres from cellulosic precursors: a review. *Journal of Materials Science*, 47 (10): 4236-4250.
- Dvurechenskaya, N., Bajurko, P.R., Zieliński, R.J. and Yashchyshyn, Y. 2013. Measurements of shielding effectiveness of textile materials containing metal by the free-space transmission technique with data processing in the time domain. *Metrology and Measurement Systems*, 20 (2): 217-228.
- Dvurechenskaya, N. and Zieliński, R. 2011. Measurement of special shielding materials at S and C band using improved free-space transmission technique. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 57 (3): 329-334.
- Elimat, Z., Hamideen, M., Schulte, K., Wittich, H., De la Vega, A., Wichmann, M. and Buschhorn, S. 2010. Dielectric properties of epoxy/short carbon fiber composites. *Journal of Materials Science*, 45 (19): 5196-5203.
- Eser, S. and Sevgi, L. 2010. Open-area test site (OATS) calibration. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 52 (3): 204-212.
- Gomes, A.D.S. 2012. *New Polymers for Special Applications*. BoD–Books on Demand, Published Online, 356 p.
- Grassie, N. and McGuchan, R. 1972. Pyrolysis of polyacrylonitrile and related polymers—VI. Acrylonitrile copolymers containing carboxylic acid and amide structures. *European Polymer Journal*, 8 (2): 257-269.
- Greco, S., Tamburrano, A., D'Aloia, A., Mufatti, R. and Sarto, M. 2012. Shielding Effectiveness Properties of Carbon-Fiber Reinforced Composite for HIRF Applications. International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE, pp. 1-6, 17-21 September, Rome, Italy.
- Hegarty, T. 2018. An overview of radiated EMI specifications for power supplies. *Technical report*. Texas Instruments, Phoenix, 10 p.
- Hemming, L.H. 1992. *Architectural Electromagnetic Shielding Handbook: A Design and Specification Guide*. John Wiley & Sons, New York, 222 p.

- Hong, W., Xiao, P., Luo, H. and Li, Z. 2015. Microwave axial dielectric properties of carbon fiber. *Scientific Reports*, 5 (1): 1-8.
- Hong, Y., Lee, C., Jeong, C., Lee, D., Kim, K. and Joo, J. 2003. Method and apparatus to measure electromagnetic interference shielding efficiency and its shielding characteristics in broadband frequency ranges. *Review of scientific instruments*, 74 (2): 1098-1102.
- Houtz, R.C. 1950. "Orlon" Acrylic Fiber: Chemistry and Properties. *Textile Research Journal*, 20 (11): 786-801.
- Huang, Y., Li, N., Ma, Y., Du, F., Li, F., He, X., Lin, X., Gao, H. and Chen, Y. 2007. The influence of single-walled carbon nanotube structure on the electromagnetic interference shielding efficiency of its epoxy composites. *Carbon*, 45 (8): 1614-1621.
- IEEE STD 299. 2007. IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures. IEEE. Published Online. 1-52 p.
- Jou, W. S., Wu, T., Chiu, S. and Cheng, W. 2001. Electromagnetic shielding of nylon-66 composites applied to laser modules. *Journal of electronic materials*, 30 (10): 1287-1293.
- Jou, W.S. 2004. A novel structure of woven continuous-carbon fiber composites with high electromagnetic shielding. *Journal of electronic materials*, 33 (3): 162-170.
- Karabulut, T. 2011. Elektromanyetik uyumluluk (EMC) deneylerinin fiziksel analizi ve 900/1800 MHz GSM bandında iletim ve ışıma deneylerinin değerlendirilmesi. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 126 s.
- Karaman, A.B. 2019. Elektronik soğutucuların uzak alan elektromanyetik ışıma davranışlarının incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 70 s.
- Kayık, S. 2018. Düzlem malzemelerin ekranlama özelliklerinin ölçümü için TEM hücre tasarımı. Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 81 s.
- Kazancı, M. 2010. Elektromanyetik uyumluluk testleri ve örnek bir uygulama. Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 97 s.
- Keskin, H.I., Ozen, S., Ates, K. and Polat, L.N. 2019. Analysis and Measurement of the Electromagnetic Shielding Efficiency of the Multi-Layered Carbon Fiber Composite Fabrics. 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Spring), pp. 4354-4360, 17-20 June, Rome, Italy.
- Kim, H., Kim, K., Lee, C., Joo, J., Cho, S., Yoon, H., Pejaković, D., Yoo, J.-W. and Epstein, A. 2004. Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding of multiwalled carbon nanotube composites containing Fe catalyst. *Applied Physics Letters*, 84 (4): 589-591.
- Kraemer, E.O. 1938. Molecular weights of celluloses and cellulose derivatives. *Industrial & Engineering Chemistry*, 30 (10): 1200-1203.

- Kumar, S.B., Raveendranath, U., Mohanan, P., Mathew, K., Hajian, M. and Ligthart, L. 2000. A simple free-space method for measuring the complex permittivity of single and compound dielectric materials. *Microwave and optical technology letters*, 26 (2): 117-119.
- Kwon, S., Ma, R., Kim, U., Choi, H.R. and Baik, S. 2014. Flexible electromagnetic interference shields made of silver flakes, carbon nanotubes and nitrile butadiene rubber. *Carbon*, 68 118-124.
- Lewin, M. 2007. Handbook of Fiber Chemistry. CRC Press, Florida, 1044 p.
- Li, N., et al. 2006. Electromagnetic interference (EMI) shielding of single-walled carbon nanotube epoxy composites. *Nano letters*, 6 (6): 1141-1145.
- Mak, K.M., Lai, H.W. and Luk, K.M. 2018. A 5G wideband patch antenna with antisymmetric L-shaped probe Feeds. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (2): 957-961.
- McDowell, A.J. and Hubing, T.H. 2014. Analysis and comparison of plane wave shielding effectiveness decompositions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56 (6): 1711-1714.
- MIL STD 461G. 2015. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. USA Department of Defense. Washington. 1-266 p.
- Montrose, M.I. and Nakauchi, E.M. 2004. Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques. John Wiley & Sons, New Jersey, 460 p.
- Morari, C. and Balan, I. 2015. Methods for determining shielding effectiveness of materials. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 63 (2): 126-136.
- Morgan, P. 2005. Carbon Fibers and Their Composites. CRC Press, Florida, 1131 p.
- Nelson, S. 2015. Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications. Academic Press, Massachusetts, 271 p.
- Orfanidis, S.J. 2002. Electromagnetic Waves and Antennas. Published Online, New Jersey, 798 p.
- Ott, H.W. 1988. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. John Wiley & Sons, New York, 426 p.
- Ott, H.W. 2009. Electromagnetic Compatibility Engineering. John Wiley & Sons, New Jersey, 843 p.
- Ozen, M.S., Sancak, E., Beyit, A., Usta, I. and Akalin, M. 2013. Investigation of electromagnetic shielding properties of needle-punched nonwoven fabrics with stainless steel and polyester fiber. *Textile Research Journal*, 83 (8): 849-858.
- Ozen, M.S., Usta, I., Yuksek, M., Sancak, E. and Soin, N. 2018. Investigation of the electromagnetic shielding effectiveness of needle punched nonwoven fabrics

- produced from stainless steel and carbon fibres. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 127 (1): 94-100.
- Ozen, S., Helhel, S. and Cerezci, O. 2008. Heat analysis of biological tissue exposed to microwave by using thermal wave model of bio-heat transfer (TWMBT). *Burns: journal of the International Society for Burn Injuries*, 34 (1): 45-49.
- Park, S.-J. 2015. Carbon Fibers. Springer, Published Online, 358 p.
- Paul, C.R. 2006. Introduction to Electromagnetic Compatibility. John Wiley & Sons, New Jersey, 983 p.
- Peebles, L.H. 2018. Carbon Fibers: Formation, Structure and Properties. CRC Press, Florida, 203 p.
- Pozar, D.M. 2012. Microwave Engineering. John Wiley & Sons, New York, 732 p.
- Sarto, M.S. and Tamburrano, A. 2006. Innovative test method for the shielding effectiveness measurement of conductive thin films in a wide frequency range. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48 (2): 331-341.
- Schaefgen, J.R. and Flory, P.J. 1948. Synthesis of multichain polymers and investigation of their viscosities1. *Journal of the American Chemical Society*, 70 (8): 2709-2718.
- Sengupta, D.L. and Liepa, V.V. 2006. Applied Electromagnetics and Electromagnetic Compatibility. John Wiley & Sons, New Jersey, 486 p.
- Sevgi, L. 2017. A Practical Guide to EMC Engineering. Artech House, Massachusetts, 304 p.
- Sevgi, L., Cakir, S. and Cakir, G. 2008. Antenna calibration for EMC tests and measurements. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 50 (3): 215-224.
- Seybold, J.S. 2005. Introduction to RF Propagation. John Wiley & Sons, New Jersey, 330 p.
- Soto-Cabán, S. 2012. A simple coaxial waveguide fixture designed for the measurement of dielectric properties of contaminated soil. *International Journal of Engineering Research and Development*, 4 (3): 40-45.
- Spry, W.J. 1970. Graphite Yarn. 3503708. United States Patent Office, USA. 1-6 p.
- Stenarson, J. and Yhland, K. 2007. Residual Error Models for the SOLT and SOLR VNA Calibration Algorithms. 2007 69th ARFTG Conference, pp. 1-7, 8 June Honolulu, USA.
- Svetanoff, D.G. 1999. on the benefits of using IEEE STD 299-1997 for shielding effectiveness testing. 1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 1016-1021, 2-6 August, Seattle, USA.

- Tamburrano, A., Desideri, D., Maschio, A. and Sarto, M.S. 2014. Coaxial waveguide methods for shielding effectiveness measurement of planar materials up to 18 GHz. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56 (6): 1386-1395.
- Tong, X.C. 2009. *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*. CRC press, Florida, 324 p.
- Umashankar, M., Renukappa, N., Shivakumar, K. and Rajan, J.S. 2019. Electromagnetic shielding effectiveness of nylon-66 nanofiber interleaved carbon epoxy composites. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 61 (4): 1025-1032.
- Valente, R., De Ruijter, C., Vlasveld, D., Van Der Zwaag, S. and Groen, P. 2017. Setup for EMI shielding effectiveness tests of electrically conductive polymer composites at frequencies up to 3.0 GHz. *IEEE Access*, 5 16665-16675.
- Van Helvoort, M. and Melenhorst, M. 2018. *EMC for Installers: Electromagnetic Compatibility of Systems and Installations*. CRC Press, Florida, 248 p.
- Vas, J.V. and Thomas, M.J. 2017. Electromagnetic shielding effectiveness of layered polymer nanocomposites. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60 (2): 376-384.
- Więckowski, T.W. and Janukiewicz, J.M. 2006. Methods for evaluating the shielding effectiveness of textiles. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 5 (59): 18-22.
- Wyatt, K. and Jost, R. 2013. *EMC Pocket Guide: Key EMC Facts, Equations and Data*. IET SciTech Publishing, New Jersey, 63 p.
- Yaman, N., Öktem, T. and Seventekin, N. 2007. Karbon liflerinin özellikleri ve kullanım olanakları. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 90-95.
- Yang, Y., Gupta, M.C., Dudley, K.L. and Lawrence, R.W. 2005. A comparative study of EMI shielding properties of carbon nanofiber and multi-walled carbon nanotube filled polymer composites. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 5 (6): 927-931.

7. EKLER

EK-1: Elektromanyetik Ekranlama Etkinliği Hesaplama için MATLAB Kodu

```
% ELEKTROMANYETİK EKLANLAMA ETKİNLİĞİ HESAPLAMA MATLAB KODU  
% HALİL İBRAHİM KESKİN
```

```
clear all  
clc
```

```
% DOSYA OKUMA BOLUMU
```

```
isim=fopen('DOSYA UZANTISI VE DOSYA ADI');  
data=textscan(isim,'%s','delimiter','\n','whitespace',  
'');  
Okuma=strcat(data);  
ad=strcat(Okuma,'');  
Tam_isim=strcat(ad,'HalilKeskın');  
[n,f,xx,yy,zz,tt]=isimokumafonksiyonu(Tam_isim,'','');  
data1=data
```

```
% ON AYARLAR
```

```
n=1601; %n:örnekleme sayısı  
fghz=f/1e9; % f:Hz biriminden frekans / fghz:GHz biriminden  
frekans  
fmhz=f/1e6; % fmhz:MHz biriminden frekans
```

```
% S11 PARAMETRELERİ
```

```
x=xx;  
S11=complex(x(:,1),x(:,2));  
s11mag=abs(S11);  
s11ang=angle(S11);  
s11dB=20*log10(s11mag);
```

```
% S21 PARAMETRELERİ
```

```
y=yy;  
S21=complex(y(:,1),y(:,2));  
s21mag=abs(S21);  
s21ang=angle(S21);  
s21dB=20*log10(s21mag);
```

```
% S12 PARAMETRELERİ
```

```
z=zz;  
S12=complex(z(:,1),z(:,2));  
s12mag=abs(S12);
```

```

s12ang=angle(S12);
s12dB=20*log10(s12mag);

% S22 PARAMETRELERI

t=tt;
S22=complex(t(:,1),t(:,2));
s22mag=abs(S22);
s22ang=angle(S22);
s22dB=20*log10(s22mag);

% SE HESAPLAMALARI

T=s21mag.^2;
R=s11mag.^2;
SEr=10.*log10(1-R);
SEa=10.*log10(T./(1-R));
SEm=20.*log(abs(1-(10)^(-SEa/10)));
SE=SEr+SEa+SEm;

%% GRAFIK CIZDIRME

% S11 ve S21 GRAFIKLERI

% (a)S11 GRAFIGI

hold on
grid on
subplot(2,1,1)
plot(fmhz,s11dB,'LineWidth', 5.0)
xlabel('Frekans (MHz) {\bf}^{\(a)}','FontName','Times New Roman',...
'FontWeight','bold','FontSize',28);
ylabel('{\it S}_{11} (dB)','FontName','Times New Roman',...
'FontWeight','bold','FontSize',28);
set(gca,'XTick',[30 135 240 345 450 555 660 765 870 975 1080
1185 1290 1395 1500] , 'FontName','Times New Roman',...
'FontSize',24);
set(gca, 'GridAlpha', 1);

% (b)S21 GRAFIGI

subplot(2,1,2)
plot(fmhz,s21dB,'LineWidth', 5.0)
xlabel('Frekans (MHz) {\bf}^{\(b)}','FontName','Times New Roman',...
'FontWeight','bold','FontSize',28);
ylabel('{\it S}_{21} (dB)','FontName','Times New Roman',...
'FontWeight','bold','FontSize',28);

```

```
set(gca, 'XTick', [30 135 240 345 450 555 660 765 870 975 1080
1185 1290 1395 1500] , 'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontSize', 24)
set(gca, 'GridAlpha', 1);

% ELEKTROMANYETİK EKLANLAMA ETKİNLİĞİ GRAFIGİ

hold on
grid on
plot(fmhz, SE, 'LineWidth', 5.0)
plot(fmhz, SEa, 'LineWidth', 5.0)
plot(fmhz, SEr, 'LineWidth', 5.0)
xlabel('Frekans (MHz)', 'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 28);
ylabel('Ekranlama Etkinliği (dB)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 28);
legend('                                \it{SE}', '
\it{SE_A}', '\it{SE_R}', 'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontSize', 20);
set(gca, 'XTick', [30 135 240 345 450 555 660 765 870 975 1080
1185 1290 1395 1500] , 'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontSize', 24);
ylim([0 100]);
set(gca, 'YTick', [0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100]
, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 24);
set(gca, 'GridAlpha', 1);
```

ÖZGEÇMİŞ

HALİL İBRAHİM KESKİN

eem.halilkeskin@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2017-2020	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya / Türkiye
Lisans 2013-2017	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya / Türkiye

ESERLER

Ulusal ve Uluslararası Hakemli Kongre / Sempozyumların Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar

- 1- Güneş B., Ateş K., Keskin H. İ., Özen Ş. 2019. Elektrikli Araçlarda Elektromanyetik Alan Seviyelerinin Elektromanyetik Girişim ve Uyumluluk Açısından İncelenmesi. VI. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi ve Sergisi, ss. 1-6, 16-19 Ekim, İzmir, Türkiye.
- 2- Ozdinc Polat L. N., Ozen S., Ates K., Keskin H. I. 2019. Investigation of the Exposure to Electromagnetic Fields in the Body with Metallic Orthopedic Implants. 2019 Medical Technologies Congress (TIPTEKNO), pp. 1-4, 3-5 October, Kusadasi, Turkey.
- 3- Keskin H. I., Ozen S., Ates K., Ozdinc Polat L.N. 2019. Analysis and Measurement of the Electromagnetic Shielding Efficiency of the Multi-layered Carbon Fiber Composite Fabrics. 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Spring), pp. 4354-4360, 17-20 June, Rome, Italy.

4- Ates K., Ozen S., Keskin H. I., Ozdinc Polat L.N. 2019. Design and Modeling of a Microstrip Patch Antenna by Using Finite Difference Time Domain (FDTD) Method and Computer Aided Simulations. 2019 PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Spring), pp. 2291-2297, 17-20 June, Rome, Italy.

5- Keskin H. İ., Ateş K., Helhel S., Özen Ş. 2018. Karbon Fiber Kompozit Kumaşların Elektromanyetik Ekranlama Etkinliğinin İncelenmesi. IX. URSI-Türkiye 2018 Bilimsel Kongresi Ulusal Genel Kurul Toplantısı, ss. 1-3, 6-8 Eylül, Konya, Türkiye.

6- Keskin H. İ., Karaman A. B., Kayar E., Ateş K., Özen Ş. 2018. Yüksek Gerilim Hatlarının Çevresindeki Elektrik Alanın Yük Benzetim Yöntemi ile Simülasyonu. IX. URSI-Türkiye 2018 Bilimsel Kongresi Ulusal Genel Kurul Toplantısı, ss. 1-3, 6-8 Eylül, Konya, Türkiye.