

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN
ELEKTROMANYETİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

NIHAL GÜL

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN
ELEKTROMANYETİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

NIHAL GÜL

Doç. Dr. Belgin GENÇ ÖZTOPRAK
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Mehlika ŞENGÜL KARAARSLAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üys. Cansu NOBERİ
Jüri Üyesi, İstanbul Gelişim Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince tez konusu belirlememde ve bu tezin hazırlanmasında ihtiyaç duyduğum her an bana desteğini ve bilgisini sunan çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Belgin GENÇ ÖZTOPRAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda ekipman ve laboratuvarları kullanmama imkân veren Kocaeli Üniversitesi Havacılık Malzemeleri Araştırma Geliştirme Laboratuvarı (HAMAG) yöneticileri ve Arş. Gör. Ali GÜNERHAN'a, malzeme temini test ve analizlerdeki desteklerinden dolayı THY Teknik A.Ş.'ye, elektromanyetik analizler için Mikrodalga ve Anten Laboratuvarı yöneticileri ve Arş. Gör. Hande BODUR'a, mikroskop ölçümleri için Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi yöneticileri ve Öğr. Gör. Levent CANDAN'a, FTIR-ATR cihazı kullanımı için Kimya Mühendisliği bölümüne teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmamdaki yüzey analizlerinin gerçekleştirilmesinde FYL-2021-2364 nolu yüksek lisans tez projesi desteğinden dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederim.

Beni her koşulda destekleyen ve ihtiyaç duyduğum her an yanımda olan değerli annem Hayriye GÜL'e, mesleki deneyimi ve tecrübesiyle her zaman destek olan değerli abim Recep GÜL'e ve tüm aileme çok teşekkür ederim.

Haziran – 2021

Nihal GÜL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. KOMPOZİT MALZEMELER	4
1.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı	4
1.2. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler (FRP)	6
1.3. Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Malzemenin Bileşenleri	7
1.3.1. Fiberler	7
1.3.2. Matris	10
1.4. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları	10
1.5. Fiber Takviyeli Polimer Malzeme Çeşitleri	10
1.5.1. Cam fiber takviyeli polimer (Glass fiber reinforced polymer-GFRP)	11
1.5.2. Karbon fiber takviyeli polimer (Carbon fiber reinforced polymer-CFRP)	11
1.5.3. Aramid fiber takviyeli polimer (Aramid fiber reinforced polymer-AFRP)	12
1.5.4. Kuartz fiber takviyeli polimer (Quartz fiber reinforced polymer-QFRP)	12
2. NANOPARÇACIK TAKVİYELER	14
2.1. Grafen ve Karbon Nano Tüpler	14
2.2. Nanoparçacık Uygulama Alanları ve Yapılan Çalışmalar	16
3. UÇAKLARDA KULLANILAN KOMPOZİT MALZEMELER	20
3.1. Uçak Kompozit Yüzeylerinde Elektriksel İletkenlik	23
3.2. Uçaklarda Meydana Gelen Elektriksel Etkiler	24
3.3. Radome	28
4. MALZEME VE YÖNTEM	32
4.1. Numune ve Nanoparçacık Katkılı Boyanın Hazırlanması	32
4.2. Elektriksel Yüzey Direnci Ölçüm Test Cihazı ve Prob	39
4.3. Vektör Network Analizör ve Horn Anten	39
4.4. Temas Açısı Ölçüm ve FTIR-ATR Cihazı	40
4.5. ANSYS Analiz Programı	42
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER	43
5.1. Elektriksel Yüzey Direnç Ölçümü	43
5.2. Numunelerin S Parametrelerinin Ölçümü	48
5.2.1. Numunelerin elektromanyetik özelliklerinin incelenmesi	48
5.3. Numunelerin Temas Açılarının İncelenmesi	64

5.4. Yüzeyin Kimyasal (FTIR-ATR) Durumunun İncelenmesi.....	66
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	73
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	78
ÖZGEÇMİŞ	79



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kompozit Malzeme	4
Şekil 1.2.	Kompozit Malzeme Yapısı	5
Şekil 1.3.	Fiber takviyeli polimer kompozit oluşumu	6
Şekil 1.4.	Karbon Fiber	8
Şekil 1.5.	Cam Fiber	8
Şekil 1.6.	Aramid Fiber	9
Şekil 1.7.	Kuartz Fiber	9
Şekil 1.8.	(a) Cam Fiber Kumaş, (b) GFRP Kompozit	11
Şekil 1.9.	(a) Karbon Fiber Kumaş, (b) CFRP Kompozit	12
Şekil 1.10.	(a) Aramid Fiber Kumaş, (b) AFRP Kompozit	12
Şekil 1.11.	(a) Kuartz Fiber Kumaş, (b) QFRP Güç Elemanı	13
Şekil 2.1.	Elektrik iletkenliğinin dolgu hacim oranına bağımlılığı	16
Şekil 3.1.	Uçak yapısal parçalarında ileri kompozit malzeme kullanımı	20
Şekil 3.2.	Airbus A380-800 uçak malzemelerine genel bakış	21
Şekil 3.3.	Boeing 737-800 uçağındaki kompozit kısımlar	22
Şekil 3.4.	Airbus A320 uçağındaki kompozit kısımlar	22
Şekil 3.5.	Kompozit Yüzeylerde İletkenliğin Sağlanması	24
Şekil 3.6.	Süpürme kanalı oluşumu	25
Şekil 3.7.	Tipik bir yolcu uçağının yıldırım bölgeleri	26
Şekil 3.8.	Radome yıldırım çarpmasıyla oluşan enerjiyi gövdeye ileten yapılar	27
Şekil 3.9.	Boeing 737-800 uçağında radome ve iç kısmındaki radar antenleri	28
Şekil 3.10.	Tek parça ve sandviç radome tasarımları	29
Şekil 4.1.	Airbus A320 Yapısında kullanılan FRP kompozitler	33
Şekil 4.2.	Radome parçasından elde edilen QFRP malzemeler	34
Şekil 4.3.	Anti-statik boya, aktivatör ve incelticinin 3:1:1 oranına uygun olarak elde edilen karışımı	34
Şekil 4.4.	(a) Grafen ve DWCNT nanoparçacıkların hassas terazi ile tartılıp hazırlanması (b) 37,5gr olarak ayrılmış boya karışımının Grafen ve DWCNT ile katkılanması	35
Şekil 4.5.	(a) Numunelerin boyanması, (b) Boyanmış numune örnekleri	36
Şekil 4.6.	Numunelerin fırınlama sonrası ışına tutularak kurutma işlemi	36
Şekil 4.7.	Katkısız boya ile boyanmış N9 numunesi ve %1, %2, %3, %4 Grafen katkılı boyalar ile boyanmış numuneler	37
Şekil 4.8.	Katkısız boya ile boyanmış N9 numunesi ve %1, %2, %3, %4 DWCNT katkılı boyalar ile boyanmış numuneler	38
Şekil 4.9.	Megaohmmetre ve Prob	39

Şekil 4.10.	(a) S_{11} ve S_{21} Parametreleri Ölçüm Düzeneği (b) Rohde&Schwarz ZVB20 Vektör Network Analizör, (c) Horn anten	40
Şekil 4.11.	Temas açısı ölçüm cihazı	41
Şekil 4.12.	Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR-ATR FTIR-ATR spektrofotometresi	42
Şekil 5.1.	Elektriksel Yüzey Direnç Ölçümü Test Düzeneği.....	44
Şekil 5.2.	N9 ile Grafen katkılı ve DWCNT katkılı boya ile boyanmış numunelerin yüzey iletkenliklerinin karşılaştırılması.....	44
Şekil 5.3.	ANSYS Programında oluşturulan geometri ve uygulanan gerilim	46
Şekil 5.4.	Numunelerin ANSYS akım yoğunluğu analiz sonuçlarından hesaplanan iletkenlik değerleri	47
Şekil 5.5.	Temassız Ölçüm Yöntemi Test Düzeneği [3].....	48
Şekil 5.6.	N1 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması.....	49
Şekil 5.7.	N2 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması.....	50
Şekil 5.8.	N3 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması.....	50
Şekil 5.9.	N4 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 5.10.	N1, N2, N3, N4 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması	52
Şekil 5.11.	N1 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması.....	52
Şekil 5.12.	N2 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 5.13.	N3 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması.....	54
Şekil 5.14.	N4 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması.....	54
Şekil 5.15.	N1, N2, N3, N4 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması	55
Şekil 5.16.	N5 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması.....	56
Şekil 5.17.	N6 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 5.18.	N7 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması.....	58
Şekil 5.19.	N8 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması.....	58
Şekil 5.20.	N5, N6, N7, N8 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması	59
Şekil 5.21.	N5 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması.....	60
Şekil 5.22.	N6 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması.....	61
Şekil 5.23.	N7 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması.....	61
Şekil 5.24.	N8 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması.....	62
Şekil 5.25.	N5, N6, N7, N8 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması	63
Şekil 5.26.	Numunelerin temas açısı ölçümleri	64
Şekil 5.27.	N9 numunesi ile N1, N2, N3 ve N4 numunelerin FTIR-ATR spektrumlarının karşılaştırılması.....	66
Şekil 5.28.	N9 numunesi ile N5, N6, N7 ve N8 numunelerin FTIR-ATR spektrumlarının karşılaştırılması.....	67
Şekil 5.29.	N9 numunesi ile N2, N3, ve N5 numunelerin FTIR-ATR spektrumlarının karşılaştırılması.....	68

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Karbon, Aramid ve E-glass'ın özellikleri	7
Tablo 3.1.	Uçak malzemelerinin elektrik direnç değerlerinin karşılaştırması	23
Tablo 3.2.	Yıldırım bölgeleri ve açıklamaları	26
Tablo 3.3.	Çeşitli plaka ve reçinelerin elektriksel özellikleri	30
Tablo 3.4.	Çeşitli plakaların reçinelerle birlikte kullanıldığında X bandındaki elektriksel özellikleri	31
Tablo 4.1.	Grafen nano toz malzeme özellikleri	33
Tablo 4.2.	Çift duvarlı karbon nanotüp malzeme özellikleri	33
Tablo 4.3.	Numunelerin katkı oranlarına göre adlandırılması	37
Tablo 5.1.	Referans numunenin (N9) elektriksel iletkenlik değerine göre, %1, %2, %3, %4 Grafen katkılı boya ile boyanmış numunelerdeki elektriksel iletkenlik artış oranı.....	45
Tablo 5.2.	Referans numunenin (N9) elektriksel iletkenlik değerine göre, %1, %2, %3, %4 DWCNT katkılı boya ile boyanmış numunelerdeki elektriksel iletkenlik artış oranı.....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Yüzey alanı (m ²)
A/m ²	: Amper/metrekare
BaFe ₁₂ O ₁₉	: Baryum ferrit
dB	: Desibel
DC	: Direct current
E	: Elektrik alan (V/m)
G	: Graphene
GHz	: Gigahertz
GnP	: Graphene platelet
GPa	: Gigapascal
J	: Akım yoğunluğu (A/m ²)
KBr	: Potasyum bromür
l	: Elektrotlar arası uzaklık (m)
R	: Direnç (Ω)
S ₁₁	: Yansıma katsayısı
S ₂₁	: İletim katsayısı
S/cm	: Siemens/santimetre
S/m	: Siemens/metre
TPa	: Terapascal
V/m	: Volt/metre
σ	: Elektriksel iletkenlik (S/m)
ρ	: Özdirenç (Ωm)
Ωm	: Ohmmetre

Kısaltmalar

AFRP	: Aramid Fiber Reinforced Polymer
CB	: Carbon Black
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer
CMC	: Ceramic Matrix Composites
CNT	: Carbone Nanotube
DWCNT	: Double-walled carbon nanotube
FRP	: Fiber Reinforced Polymer
FTIR-ATR	: Fourier Transform Infrared Spectroscopy – Attenuated Total Reflectance (Fourier Dönüşümlü Kızılaltı – Azaltılmış Toplam Yansıma Spektroskopisi)
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer
GO	: Grafen Oksit
MMC	: Metal Matrix Composites
OMC	: Organic Matrix Composites
PMC	: Polymer Matrix Composites
QFRP	: Quartz Fiber Reinforced Polymer
UTS	: Ultimate Tensile Strength

FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELERİN ELEKTROMANYETİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Uçak yapılarındaki kullanım oranı gün geçtikçe artan kompozit malzemeler, havacılık endüstrisi için büyük avantaj sağlayan hafiflik ve dayanıklılık gibi birçok özelliğe sahiptir. Kompozitler bu özelliklere sahip olmalarına rağmen elektriksel iletkenlikleri düşüktür. Bir kompozit çeşidi olan FRP kompozitler de sahip olduğu yüksek mukavemet, hafiflik ve korozyona dayanıklılık özellikleri nedeniyle uçak yapısında sıkça kullanılan kompozitlerdir. Bu çalışmada, uçakların farklı bölgelerinde kullanılan FRP kompozitlerin, üzerine uygulanan uçak boyasına nanoparçacık modifiye edilerek FRP kompozitlerin elektriksel iletkenliklerini arttırmak ve aynı zamanda bu kompozitlerin radome kısmında kullanıldığı da göz önünde bulundurularak elektromanyetik geçirgenliklerini stabil tutmak veya arttırmak amaçlanmıştır. İlk olarak FRP kompozitlerin yüzeyine uygulanan uçak boyasına farklı oranlarda Grafen ve Çift Duvarlı Karbon Nanotüp (Double Walled Carbon Nanotube - DWCNT)) gibi iletken nanoparçacıklar takviye edilerek FRP kompozit numunelerinin yüzeyleri boyanmıştır. Elektriksel direnç ölçümleri yapılarak iletkenlikleri hesaplanmıştır. Bir Network Analizör ile numunelerin S parametreleri ölçülerek elektromanyetik özellikleri incelenmiştir. Elektriksel iletkenlik ile ilgili ANSYS programında yapılan simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Farklı ve değişik oranda nanoparçacık katkılı boya ile boyanmış numunelerin yüzey morfolojisi ve iletkenlik değişimlerine bağlı olarak temas (kontak) açısı değişimlerini belirlemek amacıyla temas açısı ölçümleri alınmıştır. Son olarak numunelerin yüzey analizlerini yapmak için FTIR-ATR cihazı ile ölçümler alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektriksel İletkenlik, Elektromanyetik Özellik, Fiber Takviyeli Polimer Kompozit, Grafen, Karbon Nanotüp.

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC AND ELECTRICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITE MATERIALS

ABSTRACT

Composite materials, the usage rate of which is increasing day by day in aircraft structures, has many features such as lightness and durability, which provide great advantages for the aviation industry. Although composites have these properties, their electrical conductivity is low. FRP composites, which are a type of composite, are also frequently used in aircraft construction due to their high strength, lightness and corrosion resistance properties. In this study, it is aimed to increase the electrical conductivity of FRP composites used in different parts of the aircraft by modifying nanoparticles to the aircraft paint applied on them, and to stabilize or increase the electromagnetic permeability of these composites, considering that these composites are also used in the radome part. First, the surfaces of the FRP composite samples were painted by reinforcing conductive nanoparticles such as Graphene and Double Walled Carbon Nanotube (DWCNT) at different ratios to the aircraft paint applied to the surface of the FRP composites. Electrical resistance measurements were made and their conductivity was calculated. Electromagnetic properties were investigated by measuring the S parameters of the samples with a Network Analyzer. The simulation results in the ANSYS program on electrical conductivity were compared with the experimental results. Contact angle measurements were taken in order to determine the contact (contact) angle changes depending on the surface morphology and conductivity changes of the samples painted with different and varying amounts of nanoparticle doped paint. Finally, measurements were taken with the FTIR-ATR instrument to make surface analysis of the samples.

Keywords: Electrical Conductivity, Elektromagnetic Property, Fiber Reinforced Polymer Composite, Graphene, Carbon Nanotube.

GİRİŞ

Uçak yapılarındaki kullanım oranı gün geçtikçe artan kompozit malzemeler havacılık endüstrisi için büyük avantaj sağlayan hafiflik ve dayanıklılık gibi birçok özelliğe sahiptir. Kompozitler hafiflik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmalarına rağmen elektriksel iletkenlikleri düşüktür. Kompozitlerin elektriksel iletkenliğinin düşük olması, uçak üzerinde çeşitli nedenlerden dolayı oluşan statik elektriğin gelişen teknoloji ile uçaklarda daha da fazlaşan elektronik göstergelerin çalışmasını olumsuz yönde etkilemesine ve kazalara sebebiyet vermesine neden olduğundan, hala çözümü aranan önemli bir problemdir [2]. Bu tez çalışmasında, Grafen ve Çift Duvarlı Karbon Nanotüp (Double Walled Carbon Nanotube – DWCNT)) ile farklı oranlarda katkılanmış uçak boyasının FRP kompozit numunelerine uygulanması sonucu elektriksel iletkenliklerinde ve elektromanyetik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Farklı ve değişik oranda nanoparçacık katkılı boya ile boyanmış numunelerin yüzey morfolojisi ve iletkenlik değişimlerine bağlı olarak temas (kontakt) açısı değişimlerini belirlemek amacıyla ölçümler alınmıştır. Numunelerinin yüzey kimyasındaki değişimlerinin incelenmesi ve yüzeyde nanoparçacık varlığının belirlenmesi için FTIR-ATR (Fourier Dönüşümlü Kızılaltı-Azaltılmış Toplam Yansıma Spektroskopisi-Fourier Transform Infrared Spectroscopy - Attenuated Total Reflectance) analizi yapılmıştır.

Birinci bölümde, kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi, yapısı ve çeşitleri ile ilgili teorik bilgiler detaylandırılmıştır. Devamında FRP kompozit malzemeler tanımlanmış ve bir FRP çeşidi olan, çalışmamızda kullandığımız QFRP (Kuartz Fiber Katkılı Polimer) kompozit malzeme hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, nanoparçacık yapıları ve nanoparçacık çeşitleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Sonrasında, nanoparçacık katkılarının kompozitlerde kullanımı ve nanoparçacıklar üzerinden yapılmış literatür çalışmalarına değinilmiştir.

Üçüncü bölümde, uçak yapısında hafiflik ve dayanıklılık özelliklerinden dolayı kullanımı gittikçe artan kompozit malzeme çeşitlerine değinilmiş ve farklı uçak tiplerinin kompozit yapı görselleri verilmiştir. Ayrıca uçakların en ön kısmında bulunan wheather (hava durumu) radarı koruyan radome bölümünün kullanım amacına değinilmiş ve radome malzemesi ile ilgili bilgi verilerek araştırmamızdaki yerinden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, deneylerde kullanılan kompozit malzeme, numunelerin yüzeyindeki elektriksel iletkenlik değerlerini belirlemek amacıyla kullanılan elektriksel yüzey direnç ölçüm düzeneği ve numunelerin elektromanyetik özelliklerindeki değışimleri incelemek için kullanılan temassız ölçüm yöntemi test düzeneği ile ilgili bilgi verilmiştir. Sonrasında numunelerin elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik özelliklerinin belirlenmesi için test ve ölçüm düzeneklerinde kullanılan Megaohmmetre, Prob, Vektör Network Analizör cihazı, Horn anten ve numunelerin yüzey karakterizasyonunun incelenmesi için kullanılan Temas açısı ölçüm cihazı ve FTIR-ATR cihazı tanıtılmıştır. Elektriksel iletkenlik analizi için kullanılan ANSYS programı ile ilgili bilgi verilmiştir.

Beşinci bölüm, Grafen ve DWCNT katkılması sonucunda elde edilen uçak boyası ile boyanmış numunelerin ölçümler ve hesaplama sonucunda elde edilen elektriksel iletkenlik değerlerinin analizlerini ve yorumlarını içermektedir. Numunelerin elektromanyetik özellikleri ile ilgili verilerin karşılaştırılmasını, ayrıca numunelerin elektriksel iletkenlik değışimlerinin elektromanyetik özellikleri üzerindeki etkisi ile ilgili analiz ve yorumları içermektedir. Devamında numunelerin nanoparçacık katkılması ile yüzeylerindeki değışimin temas açısına etkisinin ve yüzey karakterizasyonu için alınan FTIR-ATR sonuçlarının analiz ve yorumlarını içermektedir.

Altıncı bölümde, uçak boyasına farklı oranlarda iletken nanoparçacık katkılması sonucunda elde edilen boya ile boyanmış FRP kompozit numunelerinin yüzey elektriksel iletkenliklerindeki değışim, bu nanoparçacık katkılamanın FRP kompozitlerin elektromanyetik özellikleri üzerindeki etkileri ve yüzey karakterizasyonu sonuçları yorumlanmıştır.

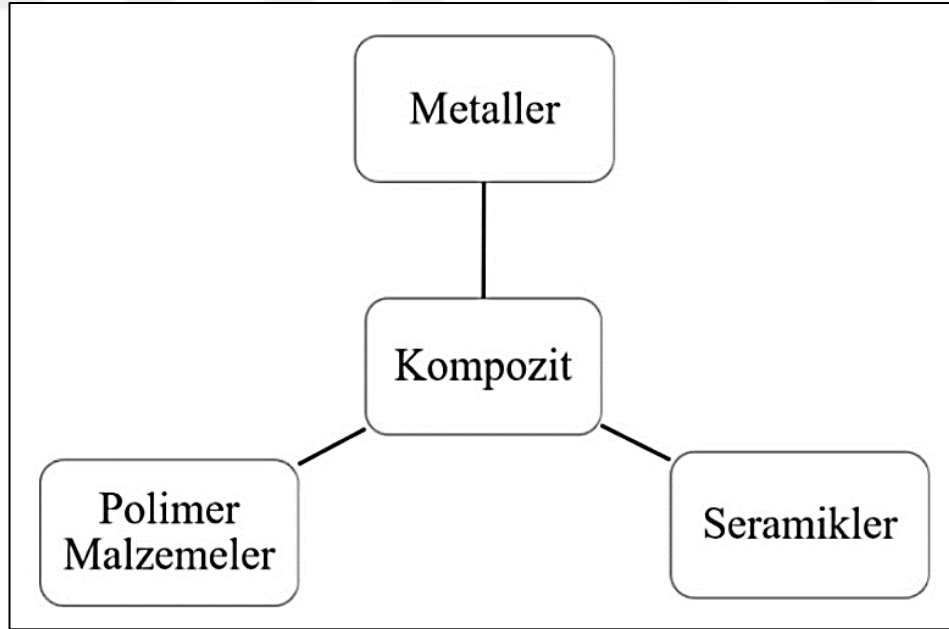
Bu çalışmanın amacı, uçakların farklı bölgelerinde kullanılan Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kompozitlerin, üzerine uygulanan uçak boyasına iletken nanoparçacık modifiye edilerek FRP kompozitlerin elektriksel iletkenliklerinde iyileşme sağlamaktır. Bu iyileşme sayesinde statik elektrik uçak gövdesindeki deşarj noktalarına daha hızlı ulaşım havaya bırakılabilecektir. Bu durum statik elektrikten kaynaklı arızaların azalmasına dolayısıyla bakım ve materyal maliyetinin de azalmasına ve malzemenin daha verimli kullanılmasına katkı sağlamaktadır. FRP kompozitler uçağın en ön kısmında bulunan wheather radarı koruyan radome'un yapımında da kullanıldığı için burada elektriksel iletkenliği artırırken aynı zamanda kompozitin X bandında (8-12 GHz) elektromanyetik geçirgenliğini stabil tutmak veya arttırmak amaçlanmaktadır. Elektromanyetik geçirgenliğin belirtilen hedeflerde gerçekleşmesi durumunda wheater radarı koruyan radome'un çalışmasını etkilememesi veya çalışmasına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

1. KOMPOZİT MALZEMELER

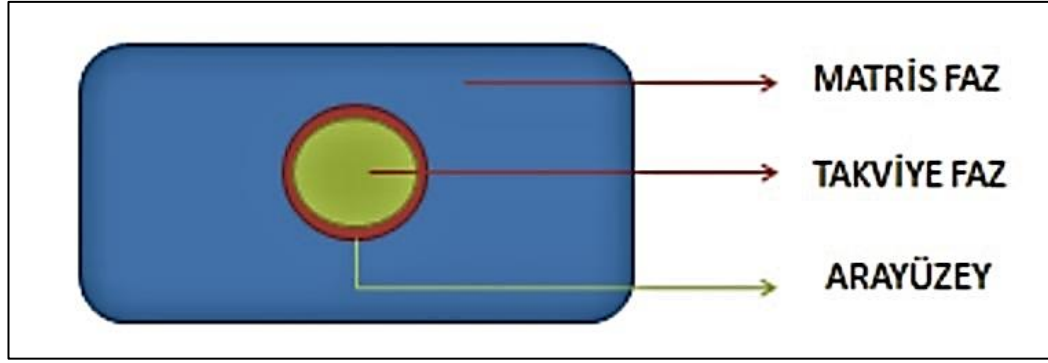
Kompozit malzeme; spesifik mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikler elde etmek için iki veya daha fazla materyalin bir kombinasyonu olarak kabul edilebilir. Bu nedenle, kompozit malzemeler, bileşenlerinin en iyi özelliklerinin bir kombinasyonunu ortaya çıkarabilir ve genellikle tek bileşenlerin göstermediği bazı özellikleri ortaya çıkarabilir [4].

1.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı

Malzemeler; metal, seramik ve polimer malzemeler olarak üç gruba ayrılır. Bu malzemelerin üstün özelliklerinin yanında zayıf yönleri de vardır. Daha iyi malzeme özelliklerine sahip tek bir malzeme elde etmek amacıyla iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşan yeni malzemelere kompozit malzeme denir [5].



Şekil 1.1. Kompozit Malzeme [7]



Şekil 1.2. Kompozit Malzeme Yapısı [5]

Bir kompozit malzeme yapısında, takviye elemanı ve bu takviye elemanını kapsayan matris malzemesi bulunmaktadır. Takviye elemanı olarak kısa ve uzun fiberler, whiskerler (kılcal kristaller), kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Takviye elemanları, gelen yükü taşıyan, matrisin rijitliğini ve dayanımını arttıran malzemelerdir. Matris malzemesi ise fiberlere yük ve gerilim transferini yapabilmek için fiber ve matrisi bir arada tutan ve bazı takviye elemanları çok kırılğan olduğu için onların yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı koruyan malzemelerdir [8].

Kompozitler genellikle iki farklı seviyede sınıflandırılır. Birinci seviye, matris bileşenine göre yapılır. Kompozit matris bileşenlerinin sınıfları arasında;

- Organik matris kompozitler (OMC),
- Metal matris kompozitler (MMC),
- Seramik matris kompozitler (CMC) ve
- Polimer matris kompozitler (PMC) bulunur.

İkinci seviye sınıflandırma takviye bileşenlerini içerir. Farklı takviye sınıfları arasında

- Parçacık takviyeleri,
- Kılı (whisker) takviyeler,
- Sürekli ve süreksiz fiber takviyeleri ve
- Dokuma fiber takviyeleri bulunmaktadır. [9]

Kompozit malzemelerin avantajları aşağıdaki gibidir;

- Yüksek dayanım,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Mükemmel aşınma direnci,

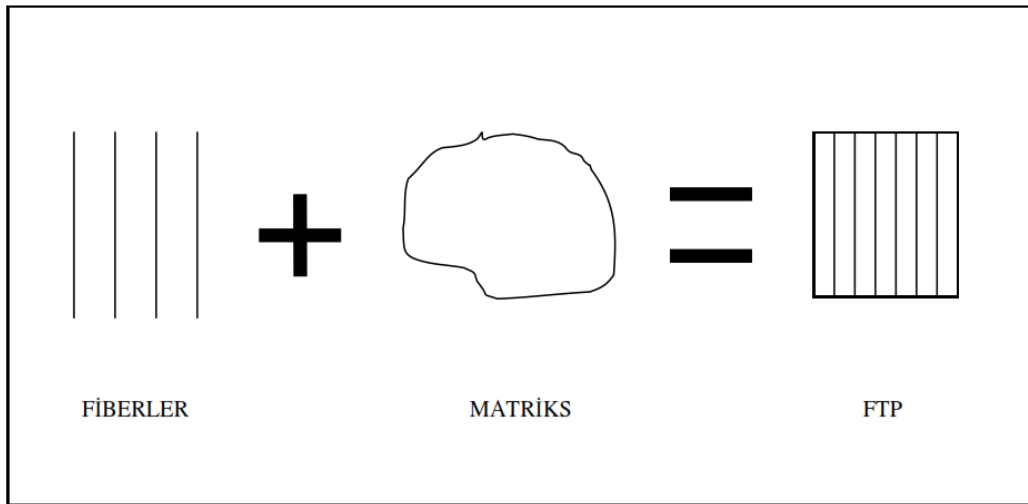
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi korozyon direnci,
- İyi termal ve ısı iletkenliği,
- Düşük ağırlık,
- Estetik görünüm

Kompozit malzemeler yukarıdaki avantajlara sahip olmasına rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar;

- Üretim güçlüđü,
- Pahalı olması,
- İşlenmesinin güç olması yanında maliyetin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi,
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışı,
- Kırılma uzamasının az oluşu gibi faktörler sayılabilir [8].

1.2. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler (FRP)

Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler bir polimer bileşen olan matrisinin içine gömülmüş fiberlerden oluşmaktadır. Fiber ve polimer bileşen matrisin birleşmesiyle oluşan kompozit malzeme orijinal bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahip olur. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin her biri bu yeni kompozit malzemede kendi karakteristik yapısı ve özelliklerini korur. FRP kompozitler anizotropik özelliğe sahiptir yani uygulanan yük yönünde farklı özellik ve davranış gösterirler [10].



Şekil 1.3. Fiber takviyeli polimer kompozit oluşumu [11]

1.3. Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Malzemenin Bileşenleri

Fiber takviyeli polimer kompozit malzemenin bileşenleri olarak fiberler ve matris malzemeleri bulunmaktadır

1.3.1 Fiberler

Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler bünyesinde fiberlerin ana görevleri, yükü taşımak ve FRP’de rijitlik, mukavemet, termal kararlılık ve diğer yapısal özellikleri sağlamaktır. FRP kompozitin performansı, fiberlerin tipi, hacim oranı, yönü ve kullanılan matrisin mekanik özellikleri ile değerlendirilebilir. Fiberlerin yönü, yapısal elemanın yükleme yönü ile aynı yönde olursa fiberlerin yüksek mukavemet ve rijitlik özelliklerinden yararlanılabilir. Kompozit malzemede, fiberler genel olarak matris hacminin %30–%70’ini oluşturmaktadır. Yapısal uygulamalarda kullanılan kompozitlerdeki en yaygın fiber çeşitleri cam, aramid ve karbondur [11].

Tablo 1.1. Karbon, Aramid ve E-glass’ın özellikleri [11]

Özellik	Karbon	Aramid	E-Glass
Çekme Dayanımı	Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi
Basınç Dayanımı	Çok İyi	Yetersiz	Yeterli
Elastisite Modülü	Çok İyi	İyi	Yeterli
Uzun Süreli Davranış	Çok İyi	İyi	Yeterli
Yorulma Davranışı	Mükemmel	İyi	Yeterli
Birim Hacim Ağırlık	İyi	Mükemmel	Yeterli
Alkali Direnci	Çok İyi	İyi	Yetersiz

Karbon fiberlerin yüksek sertlik, yüksek çekme mukavemeti, düşük ağırlık, yüksek kimyasal direnç, yüksek sıcaklık toleransı ve düşük termal genleşme gibi özelliklere sahip olması nedeniyle havacılık ve askeri uygulamalarda çok kullanılmaktadır. Bununla birlikte, cam fiberler veya plastik fiberler gibi benzer fiberlerle karşılaştırıldığında nispeten pahalıdır [37].



Şekil 1.4. Karbon Fiber [10]

Cam fiberlerin ana avantajlarına bakıldığında yüksek gerilme mukavemetine, düşük üretim maliyetine ve üstün kimyasal direncine sahip olduğu görülmektedir. Cam fiberlerin dezavantajları ise düşük çekme modülü, taşınırken aşınmaya karşı direncinin düşük olması, nispeten düşük yorulma direncine sahip olmaları ve kırılkan olmalarıdır [10, 35].



Şekil 1.5. E-Cam Fiber [36]

Aramid fiberler bugün kullanılan takviye fiberleri arasında en düşük özgül ağırlığa ve en yüksek çekme-mukavemet-ağırlık oranına sahiptir. Cam fiberden % 43 ve çoğu karbon fiberden yaklaşık % 20 daha hafiftirler. Aramid fiberler ayrıca kimyasal ve termal bozulmanın yanında aşınmaya ve darbeye karşı da iyi bir direnç gösterirler [10].



Şekil 1.6. Aramid Fiber [10]

Kuartz fiber, yüksek saflıkta doğal kuartz kristallerinden oluşturulan bir fiberdir. İlk olarak kuartz çubukların (oksihidrojen alevinde) yumuşatılması ve ardından çubuklardan filamentlerin oluşturulması yoluyla elde edilir. Yüksek saflıkta doğal kuartz kristalleri nadir olduğundan, kuartz fiber alternatiflerinden (cam fiber ve yüksek silika fiber) daha pahalıdır ve temel olarak kompozit malzemelerin üretimi, termal direnç ve dielektrik özelliklerin önemli olduğu elektrik uygulamaları gibi sınırlı uygulama alanlarına sahiptir. [15].



Şekil 1.7. Kuartz Fiber [14]

1.3.2. Matris

Matris, FRP kompozitte fiberleri birbirine bağlayan polimer bileşenini ifade eder. Yapısal kompozit malzemelerde matris, yaygın olarak termoset tipte veya termoplastik tipte olabilir. Polyester, vinilester ve epoksi, yüksek performanslı takviye fiberleri ile yaygın olarak kullanılan polimerik matris malzemeleridir. Epoksiler polyester ve vinilesterlerden daha pahalıdır, fakat genel olarak daha iyi mekanik özelliklere ve olağanüstü dayanıklılığa sahiptirler.

Yüklerin çoğu, fiberler tarafından paylaşıldığı için matrisler FRP kompozitin dayanımına önemli bir katkıda bulunmazlar. Matris reçinesinin ana fonksiyonları, takviye fiberler arasındaki gerilmeyi transfer etmek, fiberleri bir arada tutmak için bir tutkal görevi görmek ve fiberleri mekanik ve çevresel hasara karşı korumaktır. Matrisler düşük büzülme ve termal genişleme katsayısı, yükü fiberlere transfer etmek için elastikiyet, yüksek sıcaklıkta dayanım, mükemmel kimyasal direnç ve boyutsal stabilite gibi özelliklere sahiptir [11].

1.4. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları

Fiber ve matris malzemeleri tek olarak kullanıldığında elde edilemeyen özellikler bu malzemelerin birleştirilmesiyle oluşan FRP kompozitler ile elde edilebilir. Böylece tüm özellikler bir FRP kompozit malzeme toplandı olur. Böylelikle FRP kompozit malzemeler, boyutsal olarak kararlı, düşük ısı iletkenliği, iletken olmayan, elektromanyetik olarak şeffaf (geçirgen) ve darbeye dayanıklılık gibi avantajlara sahip olur.

FRP kompozitler yukarıdaki avantajlara sahip olmaları yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Bu dezavantajlar mekanik hasara duyarlılık, yangına duyarlılık (yalıtım olmadan), çalışma alanında bükülememe, daha uzun yük transferi uzunlukları, zayıf kesme dayanımı olarak sıralanabilir.

1.5. Fiber Takviyeli Polimer Malzeme Çeşitleri

FRP kompoziti, fiberler, reçineler, arayüz, dolgu maddeleri ve katkı maddelerinden tasarlanmıştır. Fiber, FRP'nin mekanik özelliklerine katkıda bulunan yüksek elastik modüle sahiptir. Reçineler, mekanik ve çevresel hasarlardan korumak için stresleri bir

elyaftan diğere aktarmaya veya dağıtmaya yardımcı olur. Fiberler ve matris arasındaki arayüzün, FRP kompozitlerinin davranışını güvenli bir şekilde etkilediği kabul edilmektedir [16]. Yapısında kullanılan fiber türüne bağlı olarak FRP kompozitlerin CFRP, GFRP, AFRP ve QFRP gibi çeşitleri bulunmaktadır.

1.5.1. Cam fiber takviyeli polimer (Glass fiber reinforced polymer-GFRP)

Cam fiber kullanan FRP'ler, tüm FRP'lerde baskın takviye edici fiberlerdir. Cam fiberlerden E-cam en çok kullanılan fiberdir. Bu fiberler yüksek elektriksel yalıtım özelliklerine, iyi ısı direncine ve en düşük maliyete sahiptir. S-Cam fiberler, E-camdan daha yüksek ısı direncine ve yaklaşık üçte bir daha yüksek gerilme mukavemetine sahiptirler [12].



Şekil 1.8. (a) Cam Fiber Kumaş, (b) GFRP Kompozit [8]

1.5.2. Karbon fiber takviyeli polimer (Carbon fiber reinforced polymer-CFRP)

Karbon fiberler, çok yüksek gerilme mukavemetine ve elastik modülüne sahiptirler. “Yüksek modüllü” karbon fiberin elastik modülü çeliğe benzerdir. CFRP kompozitleri, diğer tüm fiber takviyeli kompozit malzemelerden daha yüksek modülleri ve mukavemetleri nedeniyle, diğer fiber takviyeli kompozitlere göre çeşitli ana yapısal bileşen ve sistem imalatı için seçilmiştir. CFRP kompozitleri ayrıca yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme modülünü ve yüksek mukavemeti korur. Bu özellikler, CFRP kompozitlerini, istenen mekanik özellikleri korurken yapısal ağırlığın azaltılmasının bileşen tasarımında önemli bir parametre olduğu havacılık ve uzay yapısal parçaları ve bileşenleri için iyi bir seçim haline getirir [12, 38].



(a)



(b)

Şekil 1.9. (a) Karbon Fiber Kumaş, (b) CFRP Kompozit [8]

1.5.3. Aramid fiber takviyeli polimer (Aramid fiber reinforced polymer-AFRP)

Aramid fiberler, cam fiberlere göre yüksek mukavemete, yüksek elastikiyet modülüne ve % 40 daha düşük yoğunluğa sahiptirler. AFRP yapısal elemanların korozyon direncini artırır ve burkulmayı geciktirir. Aramid fiberlerin maliyeti cam ve bazalt fiberlerden daha yüksektir. [12, 39].



(a)



(b)

Şekil 1.10 (a) Aramid Fiber Kumaş, (b) AFRP Kompozit [8]

1.5.4. Kuartz fiber takviyeli polimer (Quartz fiber reinforced polymer-QFRP)

Kuvars elyaf, yüksek mukavemet, dielektrik sabiti ve dielektrik kaybı, yüksek sıcaklık direnci, küçük genleşme katsayısı, korozyon direnci ve iyi tasarım performansı özellikleri nedeniyle mükemmel bir elyaf takviyeli malzeme türüdür [30]. Kuvars elyaf takviyeli polimid kompozitler (QFRP) iyi mekanik özelliklere sahiptir. Havacılık, ulusal savunma, mikro elektronik ve diğer bilim ve teknoloji alanlarında yaygın olarak kullanılırlar [31].



(a)



(b)

Şekil 111. (a) Kuartz Fiber Kumaş [32], (b) QFRP Güç Elemanı [18]



2. NANOPARÇACIK TAKVİYELER

Gelişen teknoloji ile nanobilimdeki ilerlemeler, nanoparçacıkların otomobil, inşaat, elektronik ve havacılık sektörlerine yönelik uygulama alanlarını genişletmiştir. Oldukça küçük boyutlara, özel şekillere ve çok iyi yüzey alanı gibi yapısal özelliklere sahip olan nanoparçacıklar, mükemmel fizyokimyasal özelliklere sahiptir ve iyi elektrik, termal ve mekanik özelliklere sahiptir. Angre Geim ve Konstantin Novoselov tarafından Manchester Üniversitesi'nde grafitten mekanik eksfoliyasyon yoluyla deneysel olarak keşfedilen Graphene'nin (G), 1060 GPa'ın üstünde bir elastik modül değeri vardır. G'nin türevi olan, grafen oksit (GO) ise, grafitin oksidasyonu ile elde edilen katmanlı bir nanodolgu maddesidir. GO oksidasyon derecesi kompozitlerin yapısı ve özellikleri üzerinde etkilidir. Eklendiği malzemenin elektrik iletkenliğini, mekanik ve termal özelliklerini alev geciktirici özelliklerini büyük oranda geliştiren G, polimer nanokompozitlerin üretiminde önemli bir yere sahiptir. [8].

Nanotüpler ilk defa 1991 yılında ortaya çıkmıştır. Grafen düzlemi denilen örülü yapının bir silindir şekline sarılmasıyla ve uçlarının küresel bir silindir kapağı şeklinde kapatılmasıyla elde edilirler. Koltuk tipi nanotüp, zikzak yapan nanotüp ve her iki tür nanotüpten farklı yapıya sahip chiral tip nanotüp olmak üzere üç şekilde olmaktadır. Ek olarak mukavemet artışı amacıyla birden fazla sarım üst üste yapılarak çok duvarlı nanotüp yapılar da oluşturulabilir.

2.1. Grafen ve Karbon Nano Tüpler

Karbon Nano Tüplerin (Carbon Nanotube-CNT)) en önemli özellikleri, çok hafif olması, yüksek elastiklik modülüne sahip olması ve bilinen en dayanıklı fiber olmasıdır. Deneysel bazı çalışmalar sonucu çok duvarlı CNT'lerin 1-1.8 TPa arasında elastiklik modülüne ve TEM-esaslı çekme ve eğme testleriyle de 0.8-150 GPa arasında çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Çok duvarlı CNT'lerin çekme dayanımlarının tek duvarlılardan daha düşük olduğu bilinmektedir. Bunun temel sebebi, her bir nanotüp katmanının CNT'lerin sürtünmesine yakın kinetik

özelliklere sahip olmasından dolayı birbiri üzerinden kayarak sıyrıлма (pull-out) olarak bilinen özelliğın görölmesindedir.

Grafenin simetrisi ve kendine has elektriksel yapısından ötürü, karbon nanotübün yapısı elektriksel özelliklerini önemli bir şekilde etkilemektedir. Nanotüplerin çeşitlerine yani atomların diziliş şekline göre elektriksel özellikleri de değişmektedir. Örneğın tüm koltuk tipi nanotüpler, metalik özelliğe sahiptir; yani iletkenlerdir. Teoride metalik nanotüplerin elektrik gerilim yoğunlukları gümüş ya da bakır gibi metallere kıyasla 1000 kat daha fazladır. Grafenler esnek ve saydam olmasının yanı sıra, bilinen en ince ve hafif malzemedir. Grafen'nin bazı uygulama alanları, daha sağlam ve hafif uçaklar ve koruma ekipmanları, bataryaların yerini alabilecek süper-kapasitörler ve küçük verimli biyo-sensör cihazlar gibi alanlardır[19, 40].

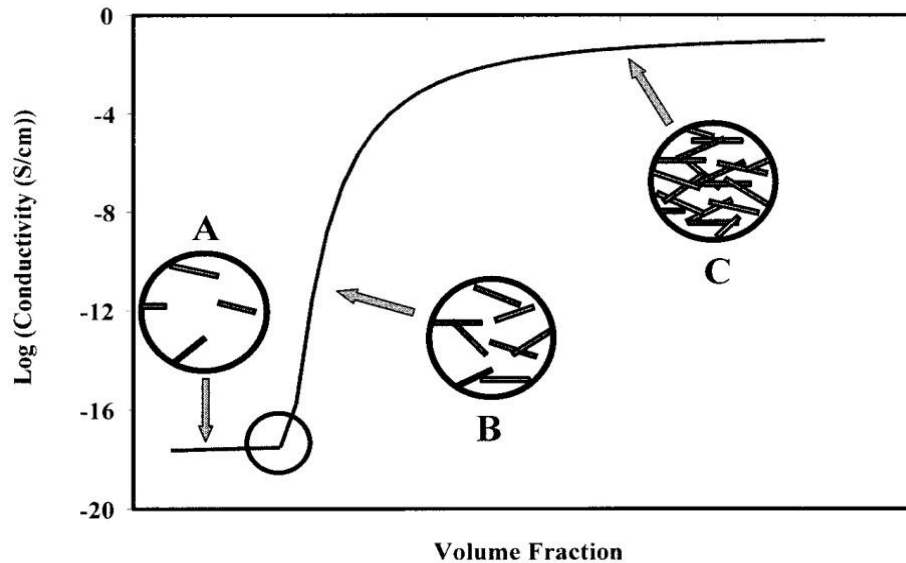
Karbon elementi yapısında olan Karbon Nanotüpler muhteşem elektrik ve optik özelliklere sahip maddelerdir. İnce ve içi boş silindir şeklinedirler. En sert malzeme olarak bilinen elmasın elastik modulus değeri 1,2 TPa iken bu değeri Karbon Nanotüpler de yaklaşık olarak 1 TPa'dır. Aynı kütledeki çelikten de daha kuvvetli bir malzemedir. Bir diğeri önemli özelliğisi ise, bakır ve gümüşten 1000 kat daha fazla elektrik taşıyabilmeleridir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda bile özelliklerini koruyabilmektedirler. Bu avantajlarından dolayı da endüstrideki birçok malzemenin yerine geçmişlerdir [33].

DWCNT'ler tek boyutlu malzeme grubuna aittir. Bu özel karbon nanotüp sınıfı, biri diğeri içine yerleştirilmiş iki nanotüpten oluşur. Mükemmel mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı DWCNT'lerin uygulanabileceğisi çeşitli bölgeler vardır. DWCNT'lerin baskın termal ve mekanik özelliklerinin faydaları, DWCNT'leri kompozit malzemeler için olağüstü bir malzeme haline getirebilir. DWCNT'ler, farklı alanlarda çeşitli potansiyel uygulamalara sahiptir. Bu uygulamalar tıp, mekanik, elektrik-elektroniğisi, kimyasallar, enerji ve diğeri içerir. Bu uygulamalardan bazıları; ilaç teslimi, biyosensör, CNT kompozit, kataliz, nanoproblar, hidrojen depolama, lityum piller, gaz deşarj tüpleri, düz panel ekranlar, süper kapasitörler, transistörler, güneş pilleridir [34].

2.2. Nanoparçacık Uygulama Alanları ve Yapılan Çalışmalar

Polimerik malzemelerin elektriksel iletkenliği, karbon fiberleri, karbon siyahı ve sentetik grafit gibi karbon dolguların eklenmesiyle artırılabilir. Elde edilen kompozitler, metallerin tipik olarak tercih edilen malzemeler olduğu uygulamalarda kullanılabilir. Olası uygulamalar arasında elektronik cihazlar için elektromanyetik ve radyo frekansı parazit koruması ve elektrostatik yayılım yer alır. Elektriksel iletkenlik modelleri genellikle bu kompozitlerin iletkenlik davranışını açıklamak ve tahmin etmek için önerilmektedir. Daha doğru modellerin geliştirilmesi, daha verimli malzeme tasarımına izin verecek ve maliyetli deneysel çalışmaları azaltabilecektir.

Bir kompozitin elektriksel iletkenliği, genellikle onun dolgu hacim oranına bağlılığı ile karakterize edilir. Düşük dolgu yüklemelerinde, kompozitin iletkenliği, saf, elektriksel olarak yalıtkan polimer matrisin iletkenliğine hala çok yakındır. Sızma eşiği (percolation threshold) adı verilen bazı kritik yüklemelerde, dolgu miktarında çok az artışla, iletkenlik oldukça artar. Bu şiddetli artış bölgesinden sonra iletkenlik seviyesi düşer ve dolgu malzemesininkine yaklaşır. Dolayısıyla dolgu malzemesinin yoğunluğuna bağlı olarak kompozitlerin elektriksel iletkenliklerinde değişim olmaktadır. Kompozit boyunca sürekli bir iletken ağ oluşturmaya başlaması için yeterli dolgu maddesinin eklendiği nokta süzülme eşiğindedir. Bu eğilim, tipik bir kompozit elektriksel iletkenlik eğrisinin üç ana bölgesini gösteren Şekil 2.1'de görülmektedir [17].



Şekil 2.1. Elektrik iletkenliğinin dolgu hacim oranına bağlılığı [17].

Gojny ve diğeri 2005, karbon nanotüplerin nano ölçekli takviye olarak potansiyelini değerlendirmek için, sonuçları benzer şekilde yüksek iletkenlikte karbon karası (CB), içeren nanokompozitler ile karşılaştırmışlar ve nano-parçacık modifiyeli epoksileri, cam elyaf takviyeli kompozit (Glass Fiber Reinforced Polimer-GFRP) için matris malzemesi olarak kullanmışlardır. CNT / epoksi-nanokompozitler, saf epoksiye kıyasla gelişmiş bir Young modülü ve kırılma tokluğu göstermiştir. Zaten küçük miktarlarda karbon nanotüpleri, nihai gerilme mukavemeti (UTS), kırılma tokluğu ve Young modülünde bir artışa yol açarken, karbon siyahının benzer içerikleri mukavemet ve sertliği neredeyse hiç etkilemediği sonucunu elde ettiler. Kompozitlerin iletkenliğinin fiber oryantasyonuna olası bir bağımlılığını tespit etmek için ağırlıkça % 0.3 DWCNT-NH₂ (kür sonrası ve kürlenmemiş) içeren 0, ± 45, 90 ° C'de ve z yönünde FRP'ler üzerinde iletkenlik ölçümleri yaptılar. Epoksi matrisinin bir nano modifikasyonunun, geliştirilmiş matris baskın mekanik özelliklere ve anizotropik bir elektrik iletkenliğine sahip yeni FRP'lere yol açtığını göstermiştir [20].

Berkay, 2015, kompozit uçak yapılarında elektrik iletkenliğinin nanoteknolojik olarak iyileştirilmesi amacıyla yaptığı çalışmada, termoset bir reçine olan epoksiye, farklı miktarlarda grafen nanoparçacıklar ve karbon nanotüpler eklemiştir. Üretilen bu nanoparçacık katkılı karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber doğrultusunda, fiber doğrultusuna dik ve kalınlık doğrultusunda malzemenin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, AC iletkenlik değerleri ölçümünü, masa tipi LCR Meter (Gw INSTRON LCR-821 340, ile yapmış ve elektriksel iletkenliklerini hesaplamıştır. Elde ettiği sonuçlarda, nanoparçacık katkılanmamış karbon fiber/ epoksi kompozitlere göre en düşük değere göre fiber yönünde %38, fibere dik doğrultuda %94, kalınlık doğrultusunda %75, en yüksek değere göre fiber yönünde %82, fibere yönüne dik doğrultuda %98, kalınlık doğrultusunda %97 artış sağladığını belirtmiştir. CNT ve GO nanoparçacık katkısı ile, karbon fiber/epoksi tabakalı kompozitlerde elektriksel iletkenliğin artırılması yönünde yaptığı çalışmada, kompozitlerde nanoparçacık katkısının iyileştirici sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Düşük miktarlardaki nanoparçacık katkısının, kompozitlerin elektriksel direncini düşürüp iletkenliğini arttırdığını gözlemlemiştir. Böylece kompozit uçak yapılarında CNT ve GO katkısının, elektriksel iletkenlik değerlerinde artış sağladığını göstermiştir. Nanoparçacık yüzdesinin artması sonucu (matris miktarına bağlı olarak ağırlıkça %0.5, %1, %2, %4,

%7, %10 ve %15), hem elektriksel hem de mukavemet değerlerinde doyma noktasına ulaşıldığı için azalma görüldüğünü, düşük miktarlardaki nanoparçacık katkısının etkisinin daha fazla olduğunu belirtmiştir. Nanoparçacık dağılımına göre iletkenlik değerleri karşılaştırıldığında, CNT etkisinin GO'ya göre daha üstün geldiğini gözlemlemiştir [11].

Suherman ve diğerleri 2011, CNT'lerin ilavesinin elektriksel iletkenlik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlarda, nanokompozitlerin elektriksel iletkenliği, CNT içeriği ağırlıkça %7.5'e yükseltilerek hızla arttığını, ancak daha sonra ağırlıkça %10 CNT ilave edildiğinde elektriksel iletkenlik keskin bir şekilde azaldığını belirtmiştir. Yaptıkları çalışmaya göre ağırlıkça %7.5 CNT içeren nano kompozitlerin, en yüksek elektrik iletkenliğine 104.7 S/cm sahip olduğunu belirttiler. Grafit / CNT'ler / epoksi nanokompozitlerinin az miktarda CNT ilavesiyle yüksek iletkenliği, çok küçük çaplı CNT'ler üzerinde yüksek en boy oranından kaynaklandığını ve bunun, CNT'lerin grafit parçacıkları arasında iletken kanallar oluşturmasına ve takviye malzemesi olarak hareket etmesine olanak tanıdığını ve böylece nanokompozitlerin elektriksel iletkenliğinin arttığını belirttiler [21].

Han ve diğerleri 2019, yaptıkları çalışmada, yüksek mekanik performans ve elektriksel olarak iletken yapıştırıcılar geliştirmek için grafit tanecikleri ve karbon nanotüpler seçtiler ve epoksi yapıştırıcılarda dolgu malzemesi olarak kullandılar. Hacimce < 0.25 olan fraksiyonlarda, GnP'lerin (graphene platelet) Young modülünde, bindirme kesme mukavemetinde (lap shear strength) ve enerji salma hızında CNT'lere kıyasla daha iyi performans gösterdiğini, CNT bazlı epoksi yapıştırıcıların ise hacimce > %0,25'lik fraksiyonlarda yüksek artışlar sergilediğini belirtmişlerdir. Epoksi nanokompozit yapıştırıcıların elektriksel iletkenlik ölçümleri, epoksi/CNT nanokompozit yapıştırıcı için GnP'ler kullanıldığında hacimce %0.63'e kıyasla daha düşük sızma eşiği (%0.54 hacim) gösterdiğini belirttiler. GnP (plaka benzeri yapı) ve CNT (tüp benzeri yapı) arasındaki geometrik yapıdaki kontrast, epoksi nanokompozit yapıştırıcıların özelliklerinden çok önemlidir. Her iki sistemi de (epoksi/GnP ve epoksi/CNT) yapı-özellik ilişkilerini deneysel ve sayısal olarak karşılaştırmış ve incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, GnP'lerin ve CNT nanodolgu maddesinin epoksi yapıştırıcının performansını iyileştirebileceğini belirttiler [22].

Atay 2016, yaptığı çalışmada daha ince baryum hekzaferrit tozlar elde edilmiş ve mikro ve nano-boyutlu tozlar ile takviye edilmiş kompozit kaplamaların radar emici özellikleri ile ilgili karşılaştırma yapmıştır. Baryum hekzaferrit tozları Sol-Gel yöntemi ile nano-boyutta ve altıgen bir moleküler yapıya sahip şekilde sentezlemiş ve elde ettiği tozları radar emici özelliği elde etmek için farklı oranlarda bir poliüretan reçinesine katkılanmıştır. Sonrasında, metal altlıkları bu polimerik kompozitler ile kaplamıştır. Barium hekzaferrit ile güçlendirilmiş kompozitlerin elektromanyetik özelliğini belirlemek için bir Netwok-Analiz cihazı ile ölçüm yapmıştır. Sonuçlara göre, baryum ferrit tozları ile güçlendirilmiş kaplamalardan daha yüksek manyetik doygunluk değerlerinin elde edildiğini belirtti. %0 katkı içerikli kaplamada herhangi bir emici (absorpsiyon) aktivite görülmediğini belirtti. Bununla birlikte, $BaFe_{12}O_{19}$ tozları ile güçlendirilmiş kaplamalarda önemli emme aktivitesi olduğunu belirtti. Katkı içeriği artırılarak absorpsiyon değerleri artırıldı. Parçacık boyutu nano ölçeğe düşürüldüğünde, daha az katkı maddesi ile aynı absorpsiyon değerleri elde edildiğini belirtti. Parçacık boyutu nano ölçeğe düşürüldüğünde, daha az katkı maddesi ile aynı absorpsiyon değerleri elde edildi. Sonuç olarak kompozitlerde baryum hekzaferrit toz miktarının artmasıyla radar emici performansın da arttığını belirtmiştir. Ek olarak, $BaFe_{12}O_{19}$ partiküllerin boyutunun nano seviyelerine indirilmesiyle daha iyi radar absorblayıcı özellik elde edildiğini belirtmiştir [23].

3. UÇAKLARDA KULLANILAN KOMPOZİT MALZEMELER

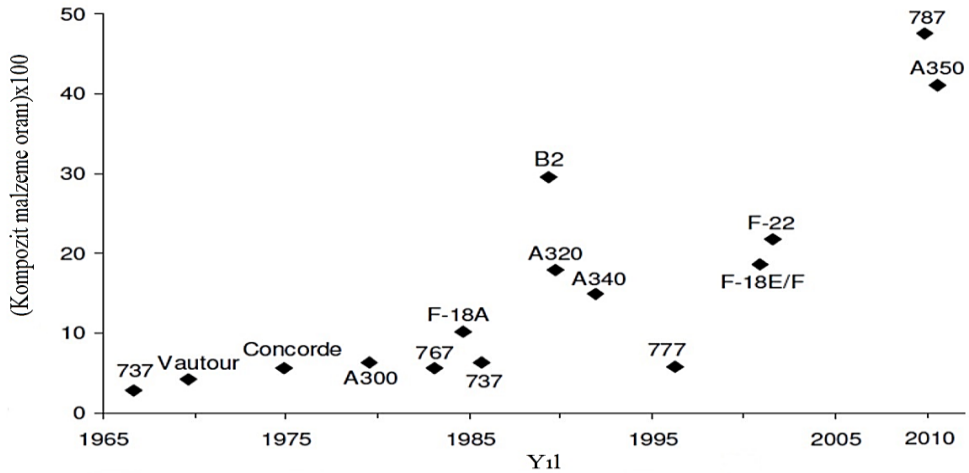
Kompozit malzemeler, sahip oldukları pek çok avantaj nedeniyle havacılık, uzay, savunma, otomotiv ve denizcilik gibi birçok uygulama alanına sahiptir.

Uçaklardaki kullanım alanları ise şunları içerir:

- Kaplama
- Uçuş kontrol yüzeyleri
- İniş takımı kapıları
- Kanatta ön ve arka kenar panelleri ve stabilizatörler
- İç bileşenler
- Uçağın kuyruk kısmı ve döşeme kirişleri (Boeing 777)
- Kanat, gövde ve uçağın kuyruk kısmı (Boeing 787) [6].

Fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler, 1940'lı yıllarda küçük uçaklarda kullanılmaya başlanmış ve kullanım oranı sürekli artış göstererek günümüzde geniş gövdeli uçaklarda yapısal olarak ağırlığı %50 oranına ulaşmıştır [24].

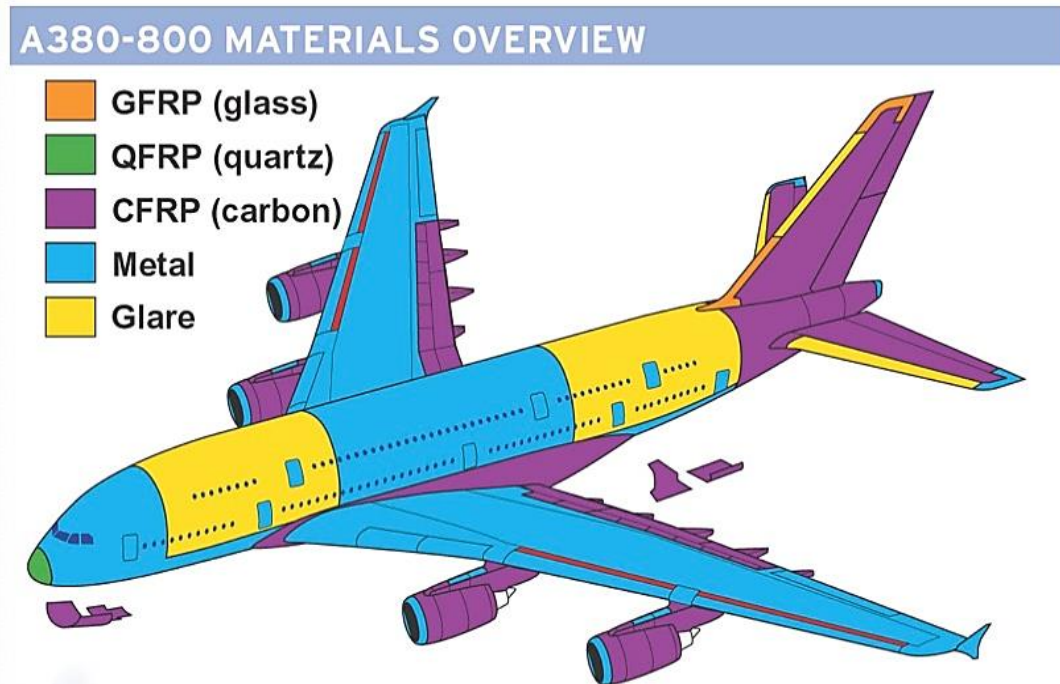
Fiber takviyeli kompozit malzemelerde, gelen yükleri taşıyan malzeme fiberlerdir. Matrisin görevi ise yükü fiberlere iletmek ve dağıtmaktır. FRP kompozitlerin kullanılmasıyla havacılık alanında önemli ölçüde ağırlık tasarrufu ve performans artışı sağlanmıştır [25].



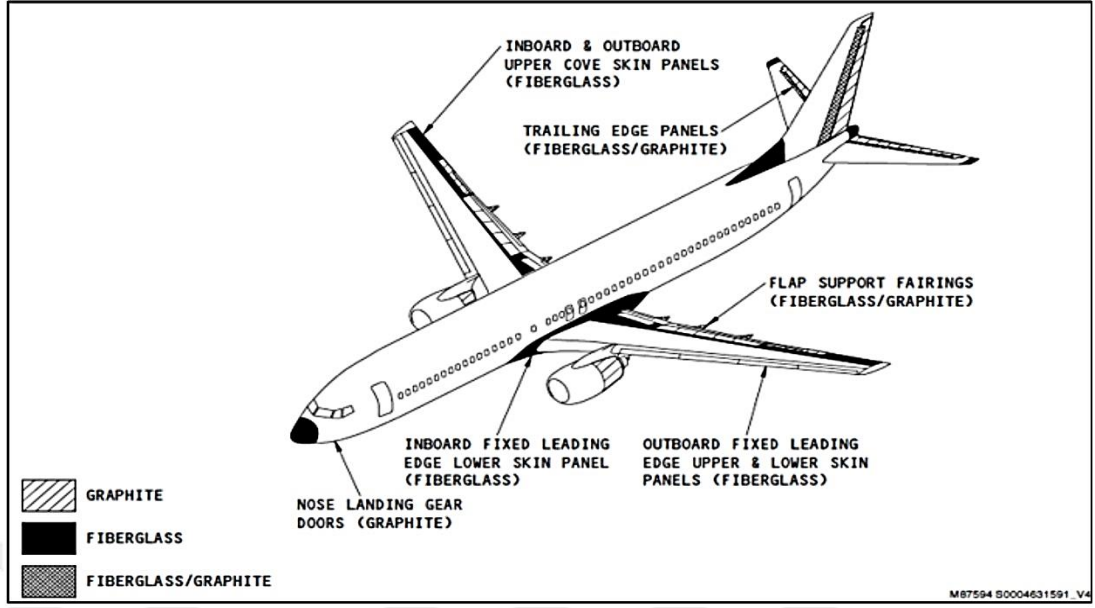
Şekil 3.1. Uçak yapısal parçalarında ileri kompozit malzeme kullanımı [24]

Son yıllarda reçine ve fiber teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde geliştirilen kompozit malzemelerde, konvensiyonel malzemelerin elastiklik modülüne ulaşılmıştır. Bu nedenle kompozit malzemeler; uçaklarda kaplamalar, takviye parçaların kontrol yüzeyleri ve flaplarda kullanılmışlardır. Uçaklar genel olarak gövde ağırlık kontrolü, uzun hizmet ömrü, sistem tasarımının ana hatları ve maliyetin yanı sıra seyir sürati, irtifa gibi performans gereksinimlerini yerine getirecek şekilde tasarlanırlar. Diğer tüm koşulların eşit olduğu durumda ağırlığı en aza indiren tasarım en uygun tasarım olur. Bu durumda uygun özellikleri olan hafif malzemeler en iyi özellikleri sağlayabilecektir. Kompozit malzeme tasarımında iki önemli unsur bulunmaktadır. Birincisi matriste bulunan fiberin yönlenme doğrultusudur. İkincisi ise malzeme tasarımında aerodinamik koşullarının da göz önünde bulundurulması gerekliliğidir. Bu koşullar sağlandığında, kompozit malzemelerin üretime uygunluğu, bakım maliyetinin düşük olması ve mekanik özelliklerinin iyi olması uçak tasarımında büyük avantaj sağlamaktadır [25].

Uçak yapıları için kullanılan kompozit malzemeler genellikle fiber kompozitler sınıfına aittir. Uçak endüstrisinde kullanılmakta olan kompozit malzemelerde yaygın olarak cam, karbon, bor ve polimerik fiberler kullanılmaktadır [25]. Ayrıca uçak radome bölümünde kuartz fiber takviyeli polimer kompozitler de kullanılmaktadır.

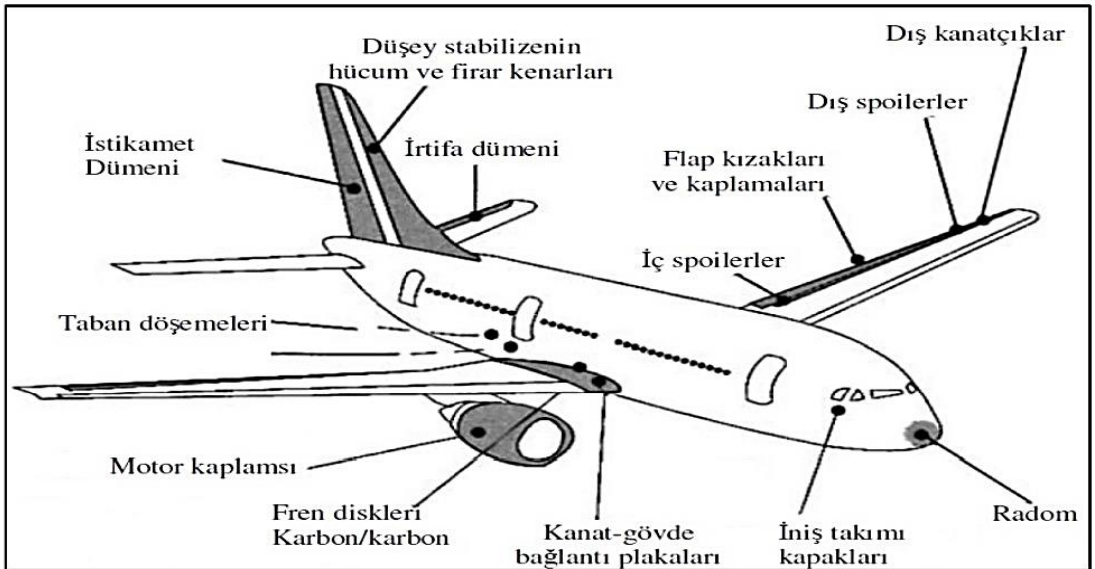


Şekil 3.2. Airbus A380-800 uçak malzemelerine genel bakış [26]



Şekil 3.3. Boeing 737-800 uçağındaki kompozit kısımlar [24]

Şekil 3.3'te Boeing 737-800 uçağında kullanılan kompozit bölümler görülmektedir. Bu bölümlerde alüminyum alaşımdan kompozite geçilmesiyle yaklaşık 1100 kg kadar hafiflik sağlanmıştır. Böylelikle uçaklarda yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Şekil 3.4'te Airbus A320 uçağında, uçak gövdesinde kompozit malzemeden yapılan bölümler görülmektedir. Airbus A320 uçağında yapısal ağırlığın %13'ünün kompozitten yapılmasıyla 1400 kg ağırlık kazancı sağlanmıştır. Airbus A320 uçağında kompozitten yapılan bölümlerden olan düşey stabilize kompozit kullanılması, komponentte metal malzeme kullanımına göre birleştirme elemanı sayısını 20 kat azaltmıştır [24].



Şekil 3.4. Airbus A320 uçağındaki kompozit kısımlar [24]

3.1. Uçak Kompozit Yüzeylerinde Elektriksel İletkenlik

Uçak yüzeyinde herhangi bir nedenle oluşan statik elektriğin veya uçuş esnasında yıldırım düşmesiyle oluşan elektriğin uçağa zarar vermeden uçak gövdesinden atılması önemli bir konudur [11].

Uçak üzerinde elektrik farklı şekillerde oluşabilir. Bunu genelleştirirsek;

- Uçuş esnasında yıldırım düşmesi sonucu oluşan elektrik,
- Uçak kar, buz, sulu kar, dolu veya toz bulutu içinden geçerken sürtünme etkisi ile oluşan statik elektrik
- Elektronik cihazların oluşturduğu statik elektrik

Uçak malzemesi olarak alüminyum kullanıldığında alüminyumun iyi bir iletken olması sebebiyle elektriksel iletkenliğin sağlanması açısından sorun yaşanmamaktaydı. Ancak son yıllarda metallere göre daha hafif buna karşılık daha dayanıklı olduğu için iletkenliği düşük kompozit malzemelerin kullanımı artmaktadır.

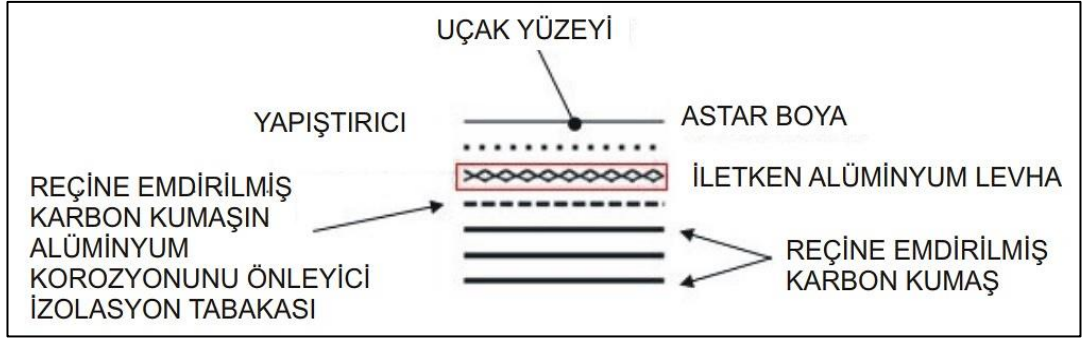
Tablo 3.1. Uçak Malzemelerinin Elektrik Direnç Değerlerinin Karşılaştırması [2]

Temas Eden Malzeme Yüzeyleri	Maksimum Direnç Değeri (Ohms)
Alüminyum	0.0005
Çelik	0.0007
Titanyum	0.001
Kompozit	1

Kompozit gövdeyi iletken bir yapıya dönüştürmek için Şekil 3.5'teki gibi astar boya öncesinde uçak yüzeyine aşağıdakilerden birinin uygulanması gerekmektedir:

- 1) iletken alüminyum folyo yapıştırmak
- 2) alüminyum ya da bakır tel örgü (mesh) yerleştirmek
- 3) kompozit yüzeyi anti-statik iletken bir malzeme ile kaplamak.

Kompozit parçaların iletkenliğini sağlayacak kaplamalar yıldırım çarpması sonucunda oluşan akımın iletilmesini sağlayanlar (1 ve 2 nolu maddeler) ve statik elektrik akışını sağlayanlar (3 nolu madde) olarak iki grupta incelenebilir. Bu iki grup arasındaki temel fark elektrik akışına karşı gösterdikleri direnç farkından kaynaklanmaktadır [2].



Şekil 3.5. Kompozit Yüzeylerde İletkenliğin Sağlanması [2]

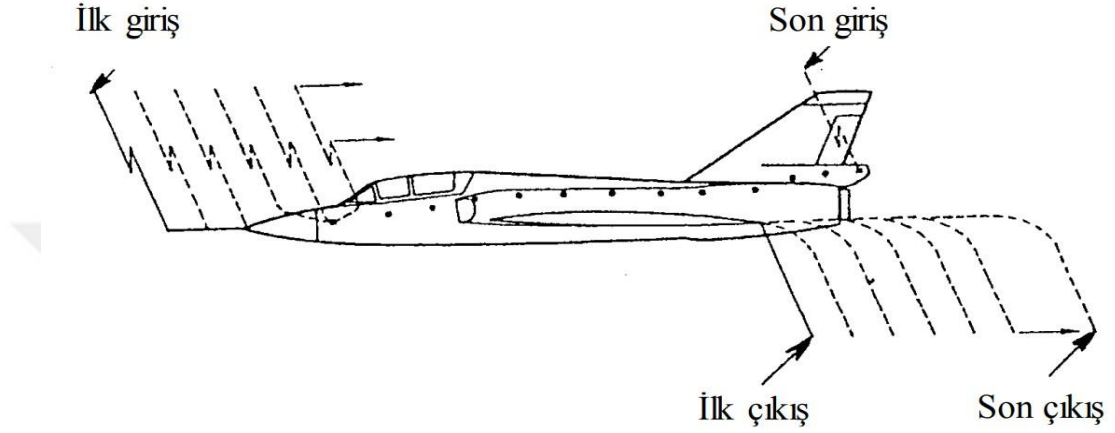
3.2. Uçaklarda Meydana Gelen Elektriksel Etkiler

Uçağa yıldırım çarpması, ya çok güçlü bir elektrik alan içine giren uçağın deşarjın başlaması için tetikleme yapması sonucu ya da doğal bir yıldırım çarpmasının uçağa isabet etmesiyle ortaya çıkabilir. Gelişen teknoloji ile uçaklarda daha da fazlalaşan uçakların elektronik kontrol sistemlerinin atmosferik koşullardan etkilenmesi ve hasar görmesi nedeniyle bu konuyla ilgili çalışmalar artmaktadır. En çok statik elektriklenme ve yıldırımın neden olduğu etkiden endişelenilmektedir. Bunun en önemli nedenleri olarak,

- 1) Uçak elektronik kumanda ve kontrol sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanan duyarlı elektronik ekipman ve göstergeler ve
- 2) Yıldırımın etkisi nedeniyle uçuş kumanda sistemlerinin uçuş sırasında yapısal olarak hasar görmesi sıralanabilir [27].

Yıldırım olasılığının bulunduğu atmosferik ortamlardan mümkün olduğunca kaçınılmaya çalışılmaktadır. Uçak sistemlerinin gelişen teknolojiyle daha karmaşık elektronik kontrol donanımları ile donatılması nedeniyle tüm hava taşıtlarında daha gelişmiş koruma yöntemlerinin geliştirilmesi ve bu koruma yöntemlerinin uygulanabilirliği önemli bir konudur. Uçağa yıldırım çarpma olasılığı, uçağın tipi, uçuş rotası, uçuş irtifası ve uçuş sırasındaki hava koşulları gibi birçok etkene bağlı bulunmaktadır. Yapılan istatistik çalışmalarına göre tarifeli sefer yapan hava yolu şirketlerinde uçaklara yıldırım isabet etme olasılığı her 10000 uçuş saatinde bir defa olarak belirlenmiştir. Ayrıca yıldırım olayları için uygun olan iklim koşullarında uçuş yapan uçaklarda bu olasılık her 1000 uçuş saatinde bir defa olarak gerçekleşebilmektedir. Bu yüzden uçaklara yıldırım çarpma durumu, 1000 ile 20000 uçuş saati arasındaki bir sürede içinde, adet olarak değişim göstermektedir [27, 41].

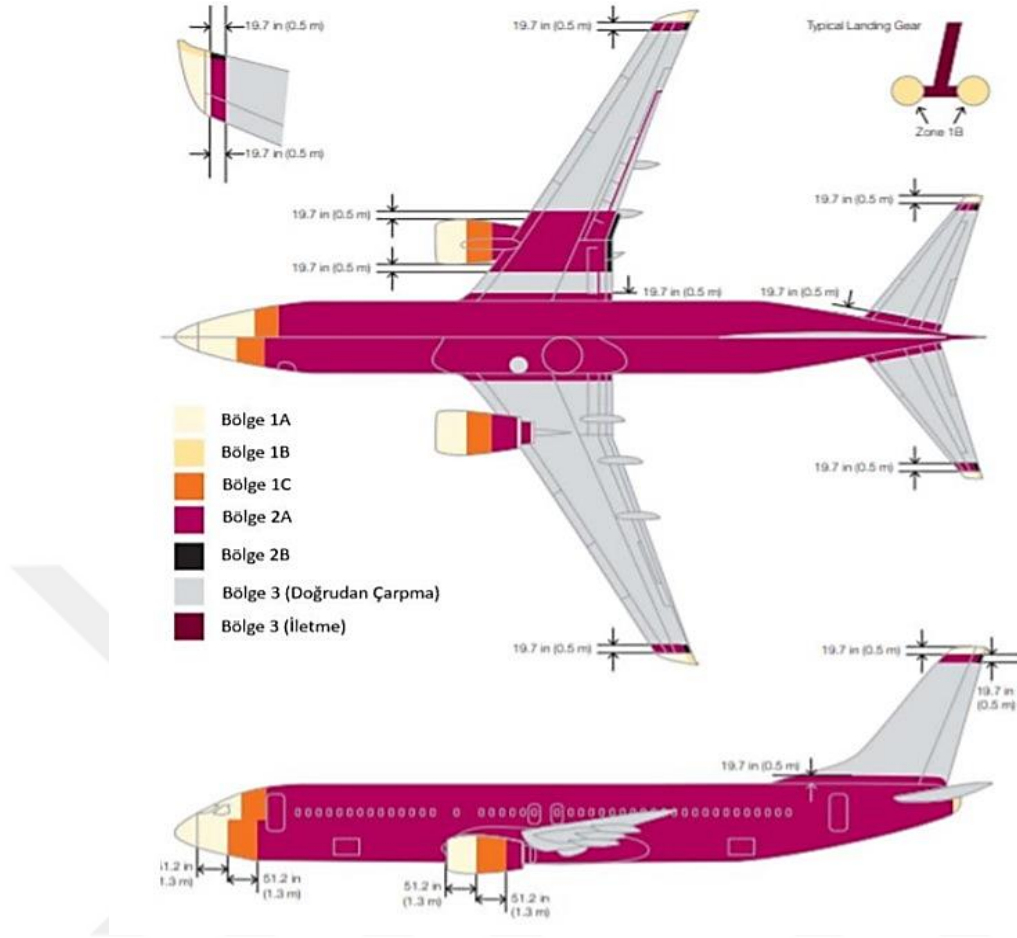
Uçak uçuşta iken yıldırım çarptığında, çarpma bölgesi uçağın hızı nedeniyle sabit kalmaz ve sürekli kayabilir. Bu kayma durumuna süpürülme kanalı denir. Yüksek hızla hareket eden bir uçak, doğrudan yıldırım çarpmasına maruz kalırsa, yıldırımın uçağa isabet ettiği ark noktası, yıldırım deşarj kanalının durgun ortamda bulunması nedeniyle uçağın arkasına doğru süpürülecektir [27, 41].



Şekil 3.6. Süpürme kanalı oluşumu [27]

Oluşan yıldırımın yoğunluğu ve oluşum sıklığı uçak gövde yüzeyinde çarptığı yere bağlıdır. Bu nedenle, tasarımcılar ilk çarpma ve ikinci çarpma arasındaki yoğunluk, olası yerler, süpürülmüş çarpma etkileri gibi durumların farkında olmalıdır. Voltaj değişimi üzerinde yapılan araştırmalar ile hava araçlarının hangi bölgelerine yıldırım çarpabileceği tahmin edilebilmektedir. Şekil 3.7'da örnek bir uçak için yıldırım bölgeleri gösterilmiştir. Tablo 3.2'de yıldırım bölgelerinin açıklamaları görülmektedir.

- Yüksek çarpılma olasılığı olan burun, dikey dengeleyici gibi uçak uç bölgeleri Bölge 1 olarak adlandırılır ve bu bölgelerde şiddeti en fazla olan A yıldırım dalgası dikkate alınır.
- Daha az riskli bölgeler, Bölge 2 olarak adlandırılır ve şiddeti daha az olan D yıldırım dalgaları bu bölgelerin değerlendirilmesi amacıyla tercih edilir.
- Bölge 1 ve Bölge 2 gibi yıldırım çarpmasının olası olduğu bölgeler arasında kalan kısımlar Bölge 3 olarak adlandırılır ve çarpma yaşanmasa bile yıldırım kaynaklı yüksek akımların taşınma olasılığı olan bölgelerdir [28].

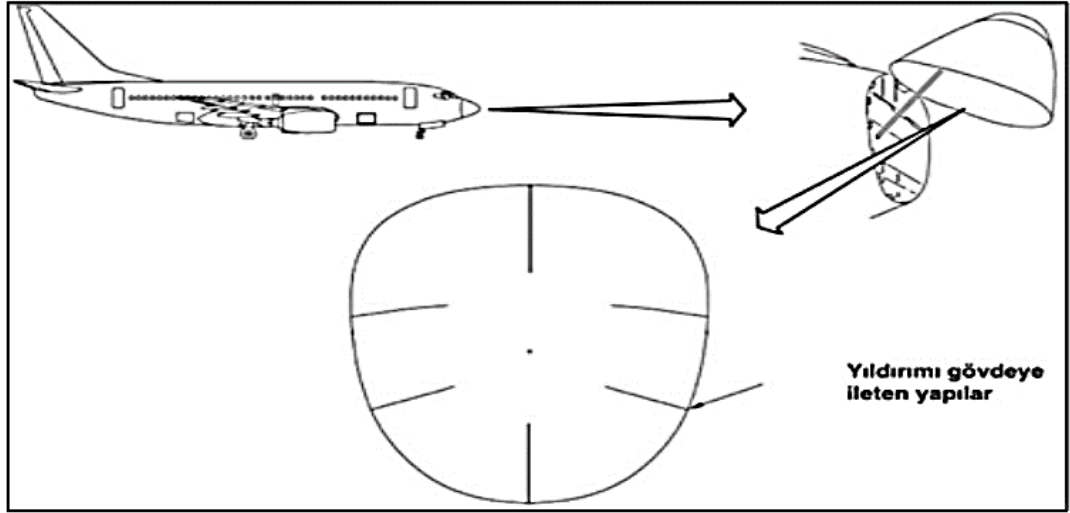


Şekil 3.7. Tipik bir yolcu uçağının yıldırım bölgeleri [28]

Tablo 3.2. Yıldırım bölgeleri ve açıklamaları [28]

Yıldırım Bölgesi	Tanım
1A	İlk geri dönüş çarpması bölgesi
1B	Uzun tutunmalı ilk geri dönüş çarpması bölgesi
1C	İlk geri dönüş çarpması için geçiş bölgesi
2A	Süpürülmüş çarpma bölgesi
2B	Uzun flaş tutunmalı süpürülmüş çarpma bölgesi
3	1A, 1B, 1C, 2A veya 2B bölgesine dahil olmayan ve yıldırım kanalı ile buluşması olası olmayan bölgeler

Uçak yapısı yarı-monokok yapıda olup, Faraday kafesi yapısındadır. Yani üzerine gelen enerjiyi dışarı atmaktadır. Radome bölgesinde de bu işlemleri lighting diverter (yıldırım saptırıcı) denilen yapı elemanları sağlamaktadır. Bu elemanlar Şekil 3.8’de gösterilmiştir [24].



Şekil 3.8. Radome yıldırım çarpmasıyla oluşan enerjiyi gövdeye ileten yapılar [24]

Atmosferik koşullardan dolayı meydana gelen elektriksel olayların uçaklara olan doğrudan etkileri genellikle uçakların gövde yapısı ve uçuş kontrol sistemleri üzerinde fiziksel etkiler olarak görülmektedir. Yıldırım çarpması esnasında deşarj kanalından akan yüksek akımın (200 kA), çarpma noktasında oluşturduğu sıcaklık yaklaşık olarak 20000°C'ye ulaşır. Bu temas sonucunda temel olarak iki tip hasar meydana gelmektedir. Bunlar metal yanması veya yırtılması olarak karşımıza çıkar. Metal yanması ve yırtılması hasarlarına uçağın gövdesinde rastlanabileceği gibi yıldırım darbesinin oluşturacağı gerilim artışı nedeniyle kablo veya donanımların yanması şeklinde uçak aviyonik sistem ve donanımlarında da rastlanabilir. Doğrudan etkiler uçağın genel olarak radome, pitot tüpü, harici antenler ve kanat ucu lambaları gibi hücum ve firar kenarları olarak adlandırılan bölgelerinde meydana gelir. Nadir de olsa, yıldırımdan ve uçuş esnasında uçak gövdesinde biriken statik elektrikten dolayı oluşan akımlar, uçağın kablo donanımına veya gövdede meydana gelen yanma olayları sonucu uçağın içerisine sızarak sistemlere zarar verebilir. Bu durumlar aviyonik sistemleri fonksiyonel olarak çalışamaz hale getirebileceği gibi yakıt tanklarında da patlamaya neden olabilir [27, 2].

Dolaylı etkiler daha çok, bağlantı kabloları üzerinde yıldırımın yarattığı elektromanyetik gerilimin etkisiyle, uçağın uçuş kontrol ve haberleşme sistemlerini yöneten elemanların hasar görmesi olarak ortaya çıkar [27].

3.3. Radome

Hava durumu radar antenini yağmur, kar, ısı, rüzgar, kum, yıldırım gibi çevresel etkilerden koruyan yapılar radome olarak adlandırılır. Radome'un bu korumayı sağlarken idealde elektromanyetik dalga geçirgenliğine hiç etki etmemesi dolayısıyla anten performansını kötüleştirmemesi gerekir [29].

Uçak radome'u radar antenini korumayan ve hava geçirmez şekilde olması gereken uçak yapısal elemanıdır. Radome'ların birçoğu cam fiber yapıda olmaktadır. İdeal radome malzemesi, radyo dalgaları radome kompozit gövdesinden geçerken herhangi bir güç kaybına uğramaması için yüksek elektromanyetik geçirgenliğine sahip olması gerekir [27].

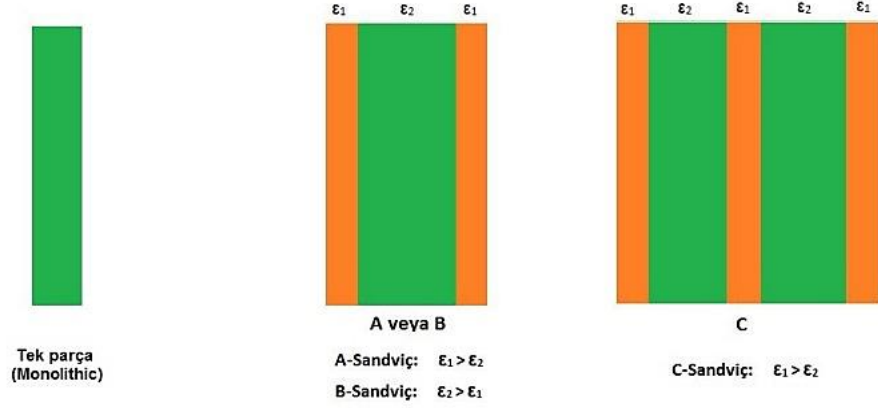


Şekil 3. 9. Boeing 737-800 uçağında radome ve iç kısmındaki radar antenleri [24]

Bu tez çalışmasında, anti statik uçak boyasına farklı oranlarda Grafen ve DWCNT katkılama sonrasında Airbus boya uygulama prosedüründeki boya uygulama sıralamasına göre tek kat boya uygulanacak şekilde QFRP kompozitinden yapılan bir A320 radome'un yüzeyini boyayarak QFRP kompozitin yüzey iletkenliğini artırırken referans numuneye göre (katkısız boya ile boyanmış) elektromanyetik geçirgenliğini sabit tutmak veya arttırmaktır.

Radome'un yapısı performansını etkileyen faktörlerden birisidir. Radome'lar tasarımsal açıdan iki farklı yapıda tasarlanabilir.

- Tek katman (Monolithic) radome
- Sandviç radome [29]



Şekil 3. 10. Tek parça ve sandviç radome tasarımları [29]

Radome'ların çoğu elektriksel olarak oldukça ince şekilde tek katman olarak tasarlanır. Bu tip radome'lar doğrudan tek katmanlı radome malzemelerinden ya da reçineye batırılmış plastik malzemeden üretilerek kullanıma sunulur. Tek katmanlı radome yapısının sağladığı en büyük avantaj kolay üretilmesinden dolayı düşük maliyetli olmasıdır. Reçineye batırılarak oluşturulan bir radome yapısında kullanılan reçinenin de radome'un dielektrik katsayısını etkilemesinden dolayı radome performansına doğrudan bir etkisi olur.

Sandviç radome'lar, yüksek ve göreceli olarak düşük dielektrik katsayılarına sahip birden fazla malzemeden oluşan radome yapısıdır. Sandviç yapılar, yüksek mukavemet-ağırlık oranlarının yanı sıra iyi iletim performansları nedeniyle radome duvarları olarak yaygın bir şekilde uygulanır. Bunlar arasında, havacılık ve uzay endüstrisinde geniş uygulamalar bulan A-sandviç yapısı, çift bantlı ve çok bantlı radomelerin tasarımı için gelecek vadede bir adaydır. Şekil 3.10'da üç farklı radome yapısı görülmektedir. A-Sandviç yapısı dış katmanların dielektrik katsayısının yüksek ve ara malzemenin dielektrik katsayısının ise daha düşük olduğu tasarım yapısına sahiptir. A-Sandviç yapısı için ara malzeme olarak genellikle balpeteği (honeycomb) veya çok düşük dielektrik katsayısına sahip cam elyaf (fiberglass) seçilir. Bal peteği oldukça düşük dielektrik katsayısına sahip olması ve yüksek mekaniksel dirence sahip olması nedeniyle bu tip radome'larda uygun bir ara malzeme olarak kullanılır [29, 42].

- A-Sandviç radome'lar düşük dalga geliş açısının kullanıldığı uygulamalarda iyi performans gösterirken geliş açısının yüksek olduğu uygulamalar için iyi bir tercih olmamaktadır.
- B-Sandviç radome'lar A-Sandviç yapısıyla aynı tasarıma sahiptir ve ara malzeme olarak yüksek dielektrik, dış katmanlar için ise düşük dielektrik katsayısına sahip malzemeler kullanılmaktadır.
- C-Sandviç radome'lar ise beş veya daha fazla katmanı olan radome'lardır. Katman sayısı tek sayılar olarak artar ve geniş bant uygulamalarında bu sayının artışı performansı olumlu etkiler.

Radome'ların dış katmanlarında kullanılan malzemeler yüzey plakalarının reçineye batırılmasıyla üretilen malzemelerdir. Radome'un performansını etkileyeceğinden hem kullanılan plakanın hem de reçinenin elektrik ve mekanik özelliklerine dikkat edilmesi gerekir. Radome tasarımında sıklıkla kullanılan bazı yüzey plakaları ile reçinelere ait elektriksel özellikler Tablo 3.3'te, bu plakaların X bandında reçinelerle birlikte kullanılmasıyla ortaya çıkan elektriksel özellikler ise Tablo 3.4'te verilmiştir [29].

Tablo 3.3. Çeşitli plaka ve reçinelerin elektriksel özellikleri [29]

Malzeme Adı	Dielektrik Katsayısı	Kayıp Tanjantı
Plaka		
E-glass	6.06	0.004
S-glass	5.2	0.007
D-glass	4	0.005
Polyethylene (Spectra)	2.25	0.0004
Kevlar	4.1	0.02
Quartz	3.8	0.0001
Reçine		
Polyester	2.95	0.007
Bismaleimide	3.32	0.004
Polybutadiene	3.83	0.015
Epoxy	3.6	0.04
Polyimide	3.1	0.0055
Polycyanate	2.86	0.005

Tablo 3.4. Çeşitli plakaların reçinelerle birlikte kullanıldığında X bandındaki elektriksel özellikleri [29]

Plaka	Reçine	Dielektrik Katsayısı	Kayıp Tanjantı
E-glass	Epoxy	4.4	0.016
	Polyester	4.15	0.015
	Polyimide	4.7	0.014
D-glass	Polycyanate	3.45	0.009
Polyethylene (Spectra)	Epoxy	2.8	0.004
	Polyester	2.52	0.007
	Polycyanate	2.65	0.003
Kevlar	Polyester	3.5	0.05
Quartz	Epoxy	3.12	0.011
	Polyester	3.6	0.012
	Polyimide	3.34	0.005
	Polycyanate	3.23	0.006
	Polybutadiene	3.1	0.003
	Bismaleimide	3.35	0.009

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde çalışmada kullanılacak numune ve nanoparçacık katkılı boyaların hazırlanması, katkılı boyaların numunelere uygulanması, numunelerin elektriksel yüzey direnci ve S parametreleri (S_{11} : yansıma katsayısı, S_{21} : iletim katsayısı) ölçüm düzeneği ve ANSYS programında yapılan akım yoğunluğu analiz sonuçlarından hesaplanan elektriksel iletkenlik değerlerinin şekilleri yer almaktadır. Ayrıca, tez de kullanılan cihazların özellikleri de bu bölümde verilmiştir.

4.1. Numune ve Nanoparçacık Katkılı Boyanın Hazırlanması

Kompozit malzemeler, sahip oldukları pek çok avantaj nedeniyle havacılık, uzay, savunma, otomotiv ve denizcilik gibi birçok uygulama alanına sahiptir. Kompozitler uçak yapısı için önemli olan hafiflik ve dayanıklılık gibi özelliklere sahip olmasına rağmen elektriksel iletkenlikleri metallerle göre düşüktür. Uçak gövdesinde, uçak uçuşta iken sürtünmeden ve yıldırım çarpmasından dolayı oluşan statik elektriğin uçak gövdesinden olabildiğince hızlı bir şekilde atılması gerekmektedir. Çünkü oluşan bu statik elektrik, gelişen teknoloji ile uçaklarda daha da fazlaşan elektronik göstergelerin çalışmasını olumsuz yönde etkileyebilmekte ya da statik elektriğin yakıt tankına yakın bir yerde ark oluşturması sonucu yakıt tankını infilak ettirebilmektedir [2]. Fakat kompozit malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesiyle elektriksel iletkenliğindeki iyileşme sayesinde statik elektrik uçak gövdesindeki deşarj noktalarından daha hızlı bir şekilde atılır. Böylece statik elektrikten kaynaklı arızaların azalmasına dolayısıyla bakım ve materyal maliyetinin de azalmasına ve malzemenin daha verimli kullanılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, uçak yapısı üzerinde kullanılan bir kompozit çeşidi olan FRP kompozitlerden QFRP kompozit kullanılmıştır. QFRP kompozit malzemesi bir Airbus 320 uçağının kullanım dışı olmuş radome bölümünden elde edilmiştir.

A320 Composite applications

- CFRP
- AFRP
- GFRP
- QFRP



Şekil 4. 1. Airbus A320 Yapısında kullanılan FRP kompozitler [1]

Bu çalışmada katkı malzemesi olarak kullanılan Grafen ve Çift Duvarlı Karbon Nanotüp (Double Walled Carbon Nanotube - DWCNT) malzemelerinin özellikleri aşağıdaki Tablo 4.1 ve Tablo 4.2 de verilmiştir.

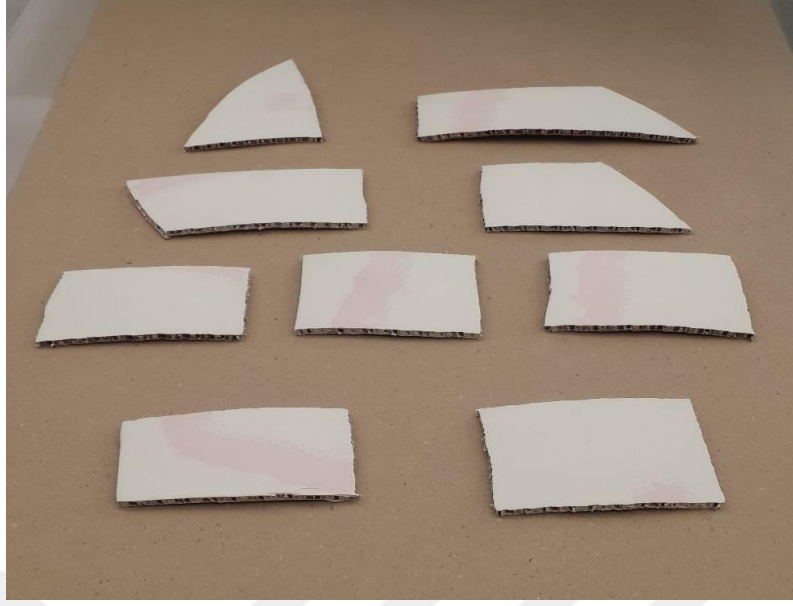
Tablo 4. 1. Grafen Nano Toz Malzeme Özellikleri

Malzeme	Safılık (%)	Kalınlık (nm)	Çap (μm)	Belirli Yüzey Alanı (m^2/g)	İletkenlik (S/m)
Grafen Nanotoz	99.9	3	1.5	800	1500/1980

Tablo 4.2. Çift Duvarlı Karbon Nanotüp Malzeme Özellikleri

Malzeme	Safılık (%)	Dış Çap (nm)	İç Çap (nm)	Uzunluk (μm)	İletkenlik (S/m)
Çift Duvarlı Karbon Nanotüp	> 65	2-4	1-3	48	9800

Yüzeyi boyanacak olan FRP kompozit bir A320 uçağının artık kullanılmayan radome parçasından alınmıştır. Airbus A320 uçaklarının radome bölgesinde kullanılan FRP malzeme çeşidi QFRP kompozit malzemedir. Radome parçasından, elektriksel direnç ölçümleri için kullanılacak, kontak çapı 4mm ve iki kontak arası 50 mm olan prob ile üç farklı noktadan ölçüm alabilecek büyüklükte 9 adet numune elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Radome parçasından elde edilen QFRP malzemeler

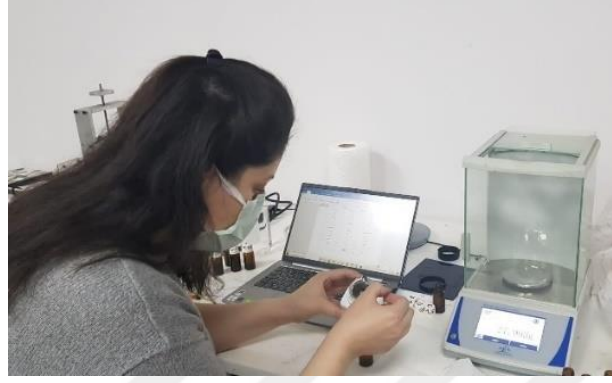
Kompozit üzerine uçak boyama prosedürüne göre uygulanacak boya katmanları sırasıyla astar boya olarak kullanılan 5014 PU Surfacer ve anti-statik boya olarak kullanılan 0986/2620 Anti-statik boyadır. Ayrıca Antistatik boyayı uygulamak için hazırlarken 0709/9000-aktivatör ve 0491/9000-inceltici kullanılmıştır.

Katkılı boya hazırlarken ilk olarak 0986/2620 Anti-Static Type II Kit prosedüründe verilen 3:1:1 oranına uygun olarak sırasıyla 0986/2620 Anti-statik boya, 0709/9000 aktivatör ve 0491/9000 – inceltici karıştırılmıştır.



Şekil 4.3. Anti-statik boya, aktivatör ve incelticinin 3:1:1 oranına uygun olarak elde edilen karışımı

Sonrasında her bir numuneye uygulamak için 37,5 gr olarak ayrılan bu karışımlara malzeme özellikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilen Grafen ve DWCNT malzemelerinden %1, %2, %3, %4 oranında eklenmiş ve yeni karışımlar elde edilmiştir.



(a)



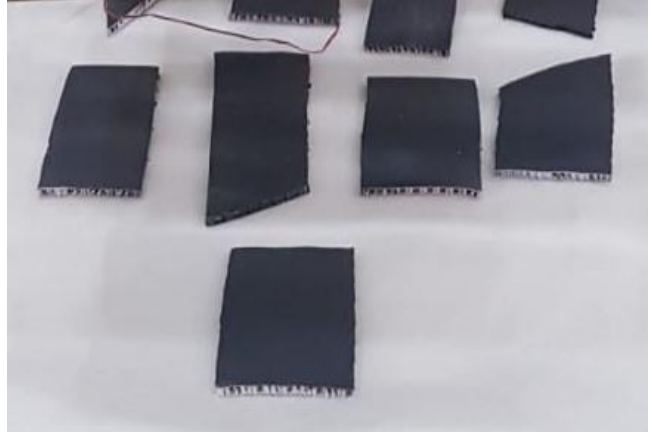
(b)

Şekil 4.4. (a) Grafen ve DWCNT nanoparçacıkların hassas terazi ile tartılıp hazırlanması (b) 37,5gr olarak ayrılmış boya karışımının Grafen ve DWCNT ile katkılanması

Oluşturulan yeni karışımların QFRP kompozit numune yüzeylerine uygulanabilmesi için Airbus boyama prosedürüne uygun olarak ilk önce numunelerin yüzeyindeki boya zımparalanarak çıkarıldı. Eski boyasından temizlenen QFRP kompozit numunelerinin yüzeyine ilk olarak astar boya uygulandı. Astar boya kurduktan sonra Grafen ve DWCNT katkılı boyalar numunelerin yüzeyine tek kat olarak uygulandı. Sonraki aşamada numuneler yaklaşık 1 saat 40 dk. fırında bekletildikten sonra yaklaşık 2 saat ışına tutularak kuruması sağlandı. Hem fırınlama hem de ışına tutma aşamasında prosedüre göre 60 °C’ye yakın bir sıcaklık uygulandı.



(a)



(b)

Şekil 4.5. (a) Numunelerin boyanması, (b) Boyanmış numune örnekleri

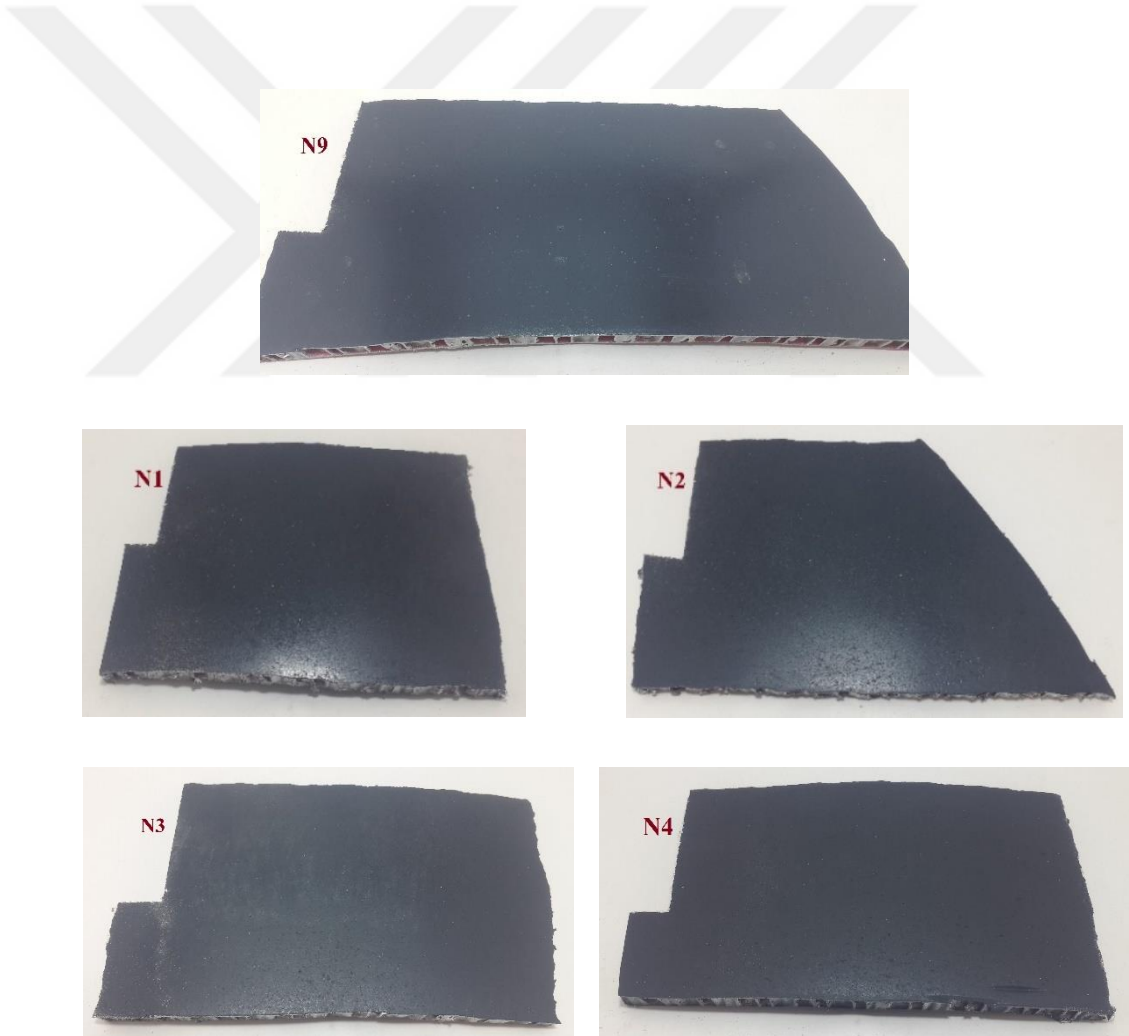


Şekil 4.6. Numunelerin fırınlama sonrası ışına tutularak kurutma işlemi

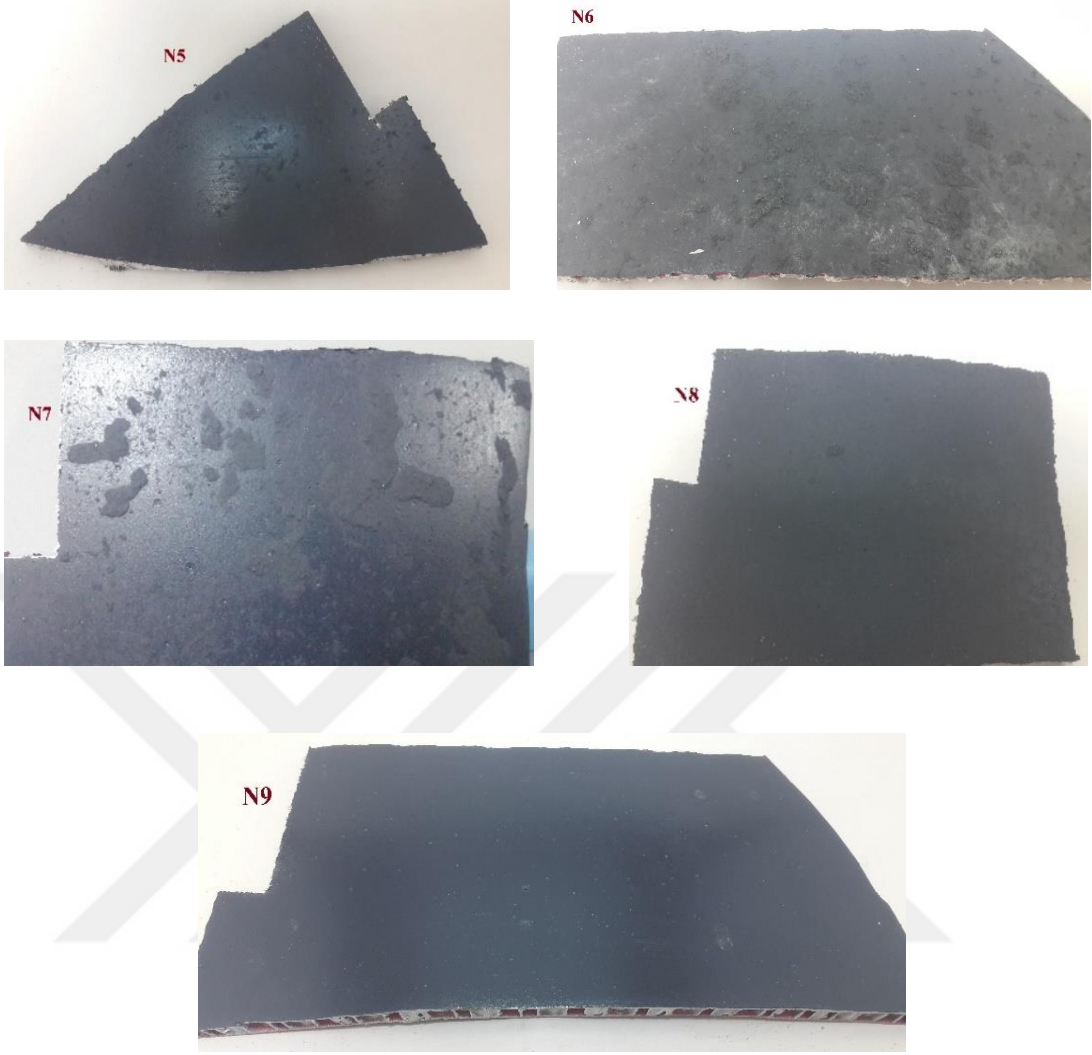
Garafen ve DWCNT malzemelerinden %1, %2, %3, %4 oranında katkılanmış boya ile yüzeyi boyanan QFRP kompozit numuneler Tablo 4.3'teki gibi adlandırılmıştır.

Tablo 4.3. Numunelerin katkı oranlarına göre adlandırılması

Numune No	Katkı Malzemesi	Katkı Oranı
N1	Grafen	1%
N2	Grafen	2%
N3	Grafen	3%
N4	Grafen	4%
N5	DWCNT	1%
N6	DWCNT	2%
N7	DWCNT	3%
N8	DWCNT	4%
N9	KATKISIZ	0%



Şekil 4.7. Katkısız boya ile boyanmış N9 numunesi ve %1, %2, %3, %4 Grafen katkıli boyalar ile boyanmış numuneler



Şekil 4.8. Katkısız boya ile boyanmış N9 numunesi ve %1, %2, %3, %4 DWCNT katkıli boyalar ile boyanmış numuneler

Katkısız boya ile boyanan N9 referans numunesi ile %1, %2, %3, %4 Grafen katkıli boyalar ile boyanmış sırasıyla N1, N2, N3 ve N4 numuneleri Şekil 4.7’de ve %1, %2, %3, %4 DWCNT katkıli boyalar ile boyanmış sırasıyla N5, N6, N7 ve N8 numuneleri Şekil 4.8’de görülmektedir. Numuneler incelendiğinde N6 ve N7 numunesinde topaklanmanın fazla olduğu görülmektedir. Nanoparçacık katkılama yapılan uygulamalarda [11, 20, 21, 22] topaklanmanın olmaması için SDS (Sodyum Dodesil Sülfat) vb. topaklanma önleyici sıvılar kullanılabilir. Bu çalışmada boyama prosedürünü ve boya özelliğini değiştirmemek için topaklanma önleyici sıvılar kullanılmamıştır.

4.2. Elektriksel Yüzey Direnci Ölçüm Test Cihazı ve Prob

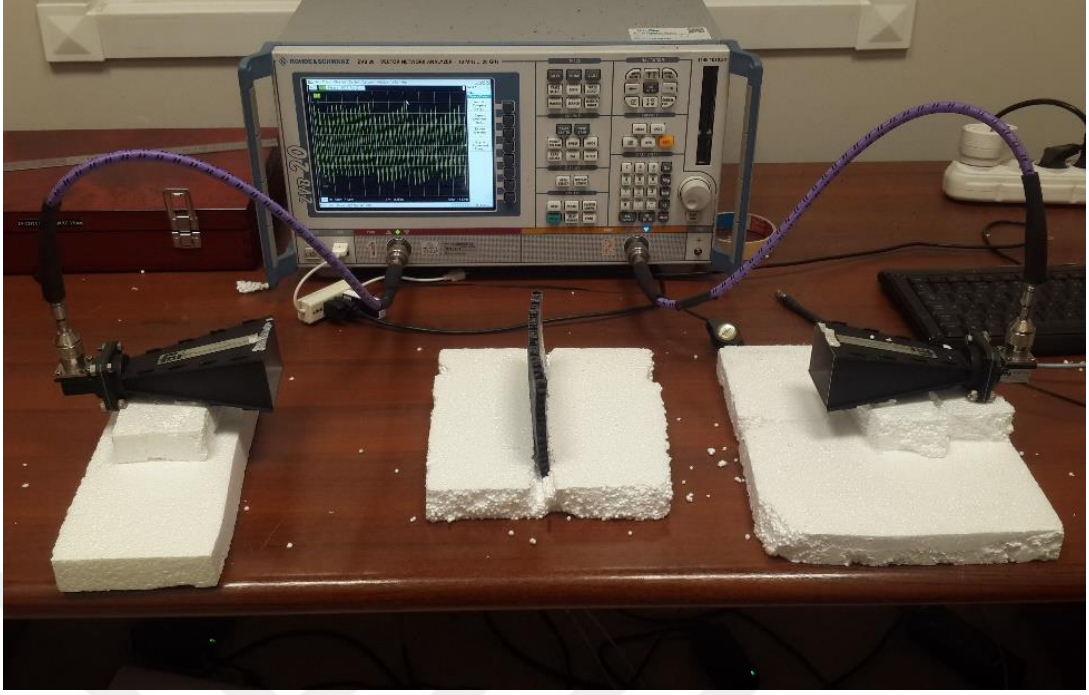
QFRP kompozit malzemelerin yüzeyleri nanoparçacık katkılı boyalar ile boyandıktan sonra elektriksel dirençlerindeki değişimleri dolayısıyla elektriksel iletkenliklerindeki değişimleri belirlemek amacıyla C.A. 6525 Megaohmmetre kullanılarak elektriksel yüzey dirençleri ölçülmüştür. Ayrıca ölçümler için kontak çapı 4 mm ve iki kontak arası 50 mm olan prob kullanılmıştır.



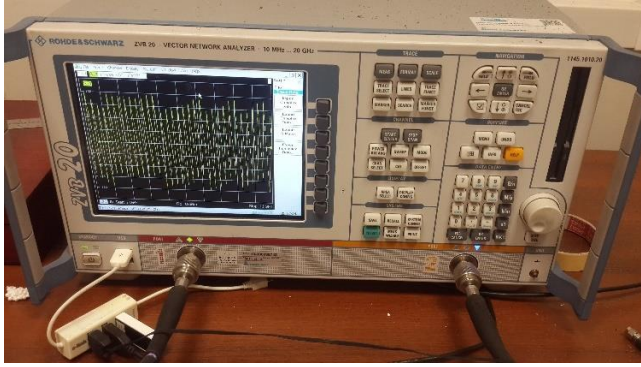
Şekil 4.9. Megaohmmetre ve Prob

4.3. Vektör Network Analizör ve Horn Anten

Numunelerin elektromanyetik geçirgenlikleri ile ilgili bilgi edinmek için her numunenin S_{11} (yansımaya katsayısı) ve S_{21} (iletim katsayısı) parametre değerlerini elde etmek amacıyla kurulan temassız ölçüm yöntemi test düzeneğinde Şekil 4.10'da görülen Rohde&Schwarz ZVB20 Vektör Network Analizör ve 2 adet horn anten kullanılmıştır.



(a)



(b)

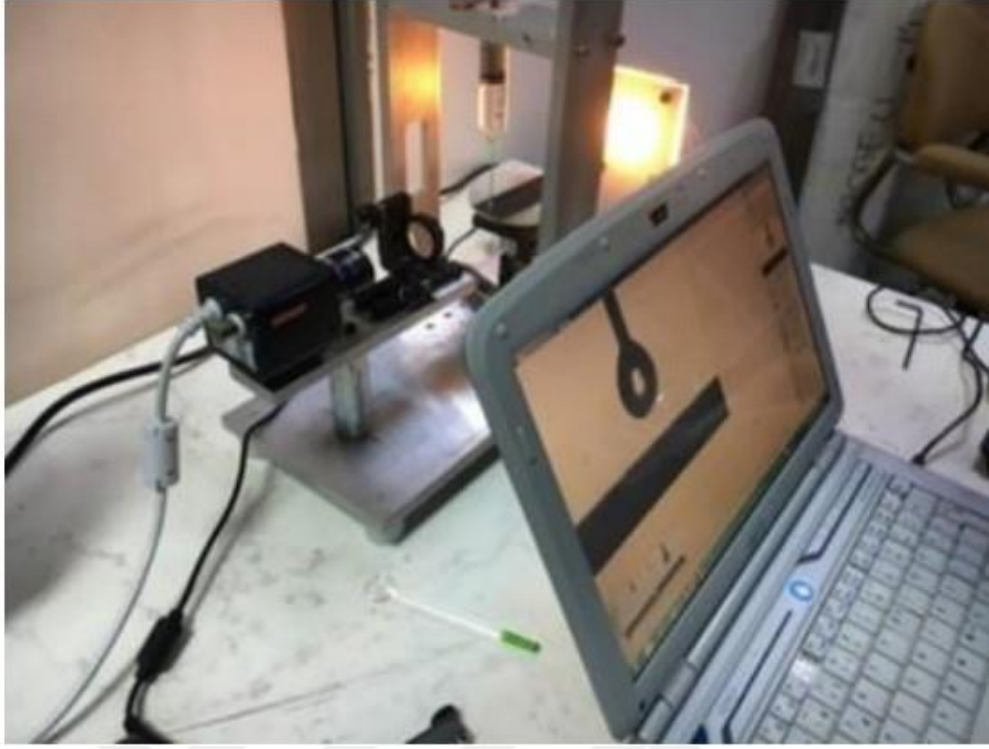


(c)

Şekil 4.10. (a) S_{11} ve S_{21} Parametreleri Ölçüm Düzenegi (b) Rohde&Schwarz ZVB20 Vektör Network Analizör, (c) Horn anten

4.4. Temas Açısı Ölçüm ve FTIR-ATR Cihazı

Farklı ve değişik oranda nanoparçacık katkılı boya boyanmış numunelerin yüzey morfolojisi ve iletkenlik değişimlerine bağlı olarak temas (kontak) açısı değişimlerini belirlemek için Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme (HAMAG) laboratuvarında tasarlanıp montajlanan $\pm 2^\circ$ sapma ile çalışan temas açısı ölçüm cihazı (Şekil 4.11) ile yüzey temas (kontak) açısı ölçümleri alınmıştır [13].



Şekil 4.11. Temas açısı ölçüm cihazı [13]

FTIR spektroskopisi genel olarak katı, sıvı ve gaz numunelerin kızılötesi (infrared) spektrumlarını ölçerek element analizi yapmak için kullanılır. Bu yöntem ile malzemedeki molekül ya da bileşiklerin yapmış olduğu kimyasal bağlar tespit edilerek malzemelerin kimyasal durumları hakkında bilgiler elde edilir. ATR kristali FTIR cihazında kullanılabilen özel bir aksesuardır. Normalde FTIR cihazı ile analiz yapılmak istenilen katı malzemeler önce toz haline getirilir, sonrasında Potasyum Bromür (KBr) ile karıştırılıp basınç uygulanarak tablet haline getirilir. ATR kristali ile bu süreç ortadan kaldırılarak, özellikle yüzeyde farklılaşma oluşturan numunelerin malzeme bütünlüğü bozulmadan analiz imkanı sağlamaktadır. Bu sayede yüzey analizi yapılmak istenilen malzemenin yüzeyi elmas, germanyum vb. (farklı malzemelere göre yansıtma katsayıları farklı kristaller kullanılır) bir ATR kristaline bastırılarak malzemenin yüzeyindeki kimyasal analizi rahatlıkla yapılabilir. FTIR-ATR ölçümlerinin yapıldığı cihaz Şekil 4.12’de gösterilmektedir [13].



Şekil 4.12. Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR-ATR spektrofotometresi [13]

4.5. ANSYS Analiz Programı

ANSYS programı, mühendislik çalışmaları ve araştırmaları için gerekli olan analiz ve simülasyonların yapıldığı bilgisayar destekli olan bir mühendislik programıdır. ANSYS programı sunduğu olanaklar sayesinde yapısal analiz, mekanik analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve ısı transferi gibi farklı alanlardaki çalışmalarda kullanılabilir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı ile tek parça halinde iken analizi zor olan karışık geometriye sahip cisimlerin analizleri küçük ve çok sayıda parçalara ayrılarak yapılabilir. Analiz sonucu ise sonlu sayıdaki elemanların analiz sonuçlarının birleştirilmesi ile elde edilir.

Grafen ve DWCNT ile katkılanmış boyalar ile boyanan QFRP kompozit numunelerinin yüzey iletkenliklerinin analizi için, elde edilen bu katkılı boyaların iletkenlikleri ile ilgili analizler ANSYS 2021 R1 analiz programında yapılmıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER

Bu tez çalışmasında, FRP kompozit yüzeyinin elektriksel iletkenliğini arttırmak amacıyla %1, %2, %3, %4 oranında ayrı ayrı Garafen ve DWCNT nanoparçacıkları anti statik boya içine karıştırılarak kullanılmış ve birisi katkısız orijinal boya ile boyanmış olmak üzere 9 farklı numune (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) elde edilmiştir. Bu bölüm altındaki deneylerde kullanılan elektriksel yüzey direnci test düzeneği, temassız ölçüm yöntemi test düzeneği, elde edilen elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik özellikler ile ilgili analizler ayrıntılı bir biçimde açıklanmaktadır. Deneysel sonuçlar ile ANSYS programından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1. Elektriksel Yüzey Direnç Ölçümü

Elde edilen katkılı boyalar ile QFRP kompozit numunelerin boyanması sonrasında ilk olarak Airbus elektriksel yüzey direnç ölçme prosedürüne göre C.A. 6525 Megohmmeter kullanılarak direnç ölçümleri Şekil 5.1'deki gibi yapılmıştır. Ölçüm için prob bağlantıları yapılarak numunelerin yüzeyine dokundurulan prob uçlarına Megaohmmetre'den 500 V DC verildi ve yüzey direnç değerleri Megaohmmetre ekranından okundu. Her bir numuneden üç kere ölçüm alınarak ortalaması alınmıştır. Böylece homojen olmayan ve her ölçümde farklı direnç değeri alınan numunelerde oluşabilecek ölçüm hataları en aza indirilmeye çalışılmıştır. Numunelerin yüzey direnç değerleri ile iletkenliklerinin hesaplanması için Denklem (5.1)'deki formül kullanılmıştır.

$$\sigma = \frac{l}{R \times A} \quad (5.1)$$

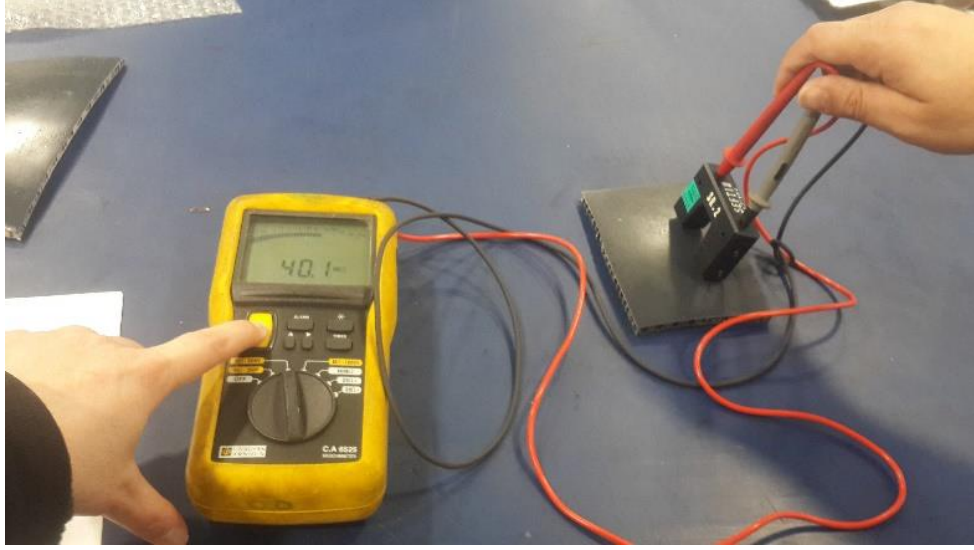
burada ;

σ = Elektriksel iletkenlik (S/m)

R = Direnç (Ω)

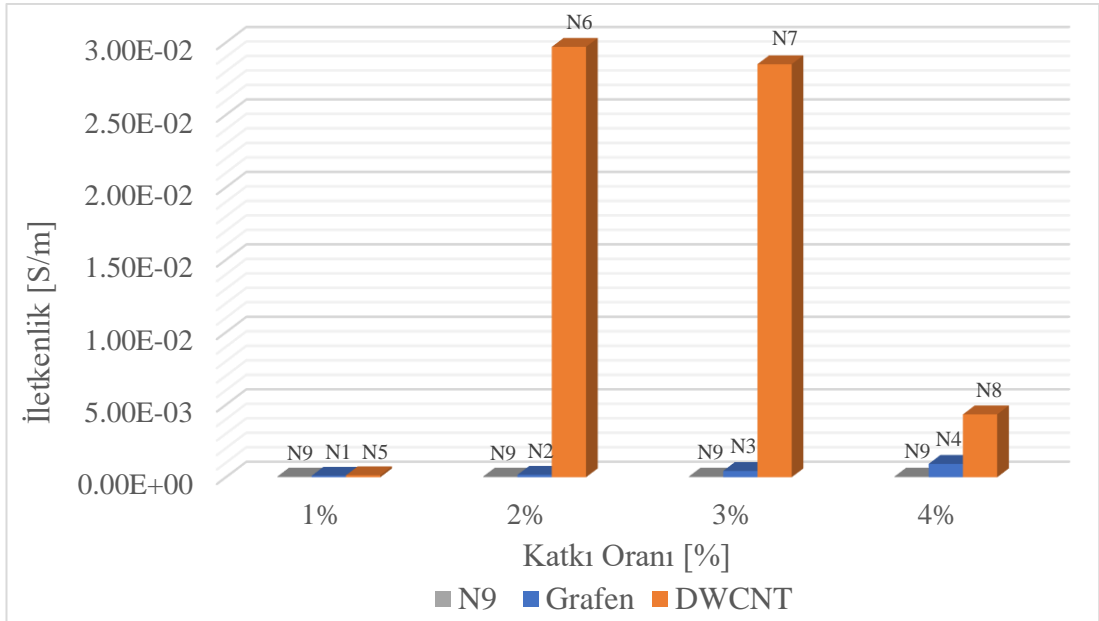
A = Yüzey alanı (m^2)

l = Elektrotlar arası uzunluk (m)



Şekil 5. 1. Elektriksel Yüzey Direnç Ölçümü Test Düzenliği

Uçak boyasına farklı oranlarda iletken nanoparçacıkların eklenmesi sonucu elde edilen yeni katkılı boyalar prosedürdeki uygulama adımları takip edilerek tek kat olarak QFRP kompozit numuneleri üzerine uygulanmıştır. Katkısız boya ile boyanmış referans numune ile iletkenlik sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.2’te görüldüğü gibi işlenmiş numunelerde referans alınan N9 (işlem görmemiş) QFRP kompozit numunesine göre, elektriksel iletkenliğin arttığı görülmektedir. Bu durum işlenmiş numunelerde herhangi bir nedenle oluşabilecek statik elektriğin daha hızlı bir şekilde uçak gövdesindeki deşarj noktalarından havaya bırakılacağını göstermektedir.



Şekil 5.2. N9 ile Grafen katkılı ve DWCNT katkılı boya ile boyanmış numunelerin yüzey iletkenliklerinin karşılaştırılması

Şekil 5.2 incelendiğinde Grafen ve DWCNT'nin her katkı oranında iletkenliğin de referans numuneye göre arttığı görülmektedir. Grafen katkılı boyalar ile boyanmış numunelerde katkı oranı arttıkça elektriksel iletkenlikte doğrusal bir artış görülmüştür. Fakat DWCNT %1 ve %2 katkı oranında iletkenlikte doğrusal bir artış görülürken katkı oranı %3 olduğunda iletkenlik değeri %2'ye göre düşmeye başlamış ve %4 katkı oranında bu düşüşün oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak DWCNT nanoparçacık katkı oranının artması sonucu elektriksel iletkenlik değerinin doyma noktasına ulaştığı belirlenmiştir. Nanoparçacık katkısı olmayan boya ile boyanmış N9 numunesi referans alınarak, nanoparçacık katkı oranına göre numunelerdeki iletkenlik artış oranları karşılaştırıldığında (Tablo 5.1 ve Tablo 5.2) DWCNT etkisinin Grafen'e göre en az %31.29, en fazla %17617.59 daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu durumun hem DWCNT'nin iletkenliğinin Grafen'den daha yüksek olduğu hem de nanoparçacık boyutlarının Grafen'den daha uzun olduğu için gerçekleştiği düşünülmektedir.

Tablo 5.1. Referans numunenin (N9) elektriksel iletkenlik değerine göre, % 1, %2, %3, %4 Grafen katkılı boya ile boyanmış numunelerdeki elektriksel iletkenlik artış oranı

Grafen			
Numune Numarası	Katkı Oranı	İletkenlik Değeri [S/m]	İletkenlik Artış Oranı [%]
N1	1%	1.01E-04	109.71%
N2	2%	1.68E-04	247.06%
N3	3%	4.37E-04	804.24%
N4	4%	9.26E-04	1817.02%
N9 (Katkısız)	0%	4.83E-05	

Tablo 5.2. Referans numunenin (N9) elektriksel iletkenlik değerine göre, % 1, %2, %3, %4 DWCNT katkılı boya ile boyanmış numunelerdeki elektriksel iletkenlik artış oranı

DWCNT			
Numune Numarası	Katkı Oranı	İletkenlik Değeri [S/m]	İletkenlik Artış Oranı [%]
N5	1%	1.33E-04	175.32%
N6	2%	2.97E-02	61390.68%
N7	3%	2.85E-02	58906.21%
N8	4%	4.34E-03	8885.92%
N9 (NP-Katkısız)	0%	4.83E-05	

Katkı oranı %1, %2, %3 ve %4 olan Grafen ve DWCNT nanoparçacıklar ile elde edilen 8 adet yeni boya ve katkısız boya öz direnç değerleri ile ANSYS programında tanımlanmış ve ölçüm için kullanılan geometri ANSYS programında oluşturularak (Şekil 5.3) FRP malzemenin yüzeyine uygulanan boyalar geometriye uygulanmıştır. Airbus elektriksel yüzey direnç ölçümü prosedürü dikkate alınarak numune yüzeylerine 500 V DC uygulanarak her boya için toplam akım yoğunluğu hesaplatılmıştır. Farklı ve değişik oranlarda katkılanmış her bir boyanın ANSYS akım yoğunluğu analizi sonucunda elde edilen değerleri ile aşağıdaki formüller kullanılarak elektriksel iletkenlikleri hesaplanmıştır. Şekil 5.4'te hesaplama sonucu elde edilen değerlere göre oluşturulan grafik görülmektedir.

$$E = \rho \cdot J \quad (5.2)$$

$$J = \sigma \cdot E \quad (5.3)$$

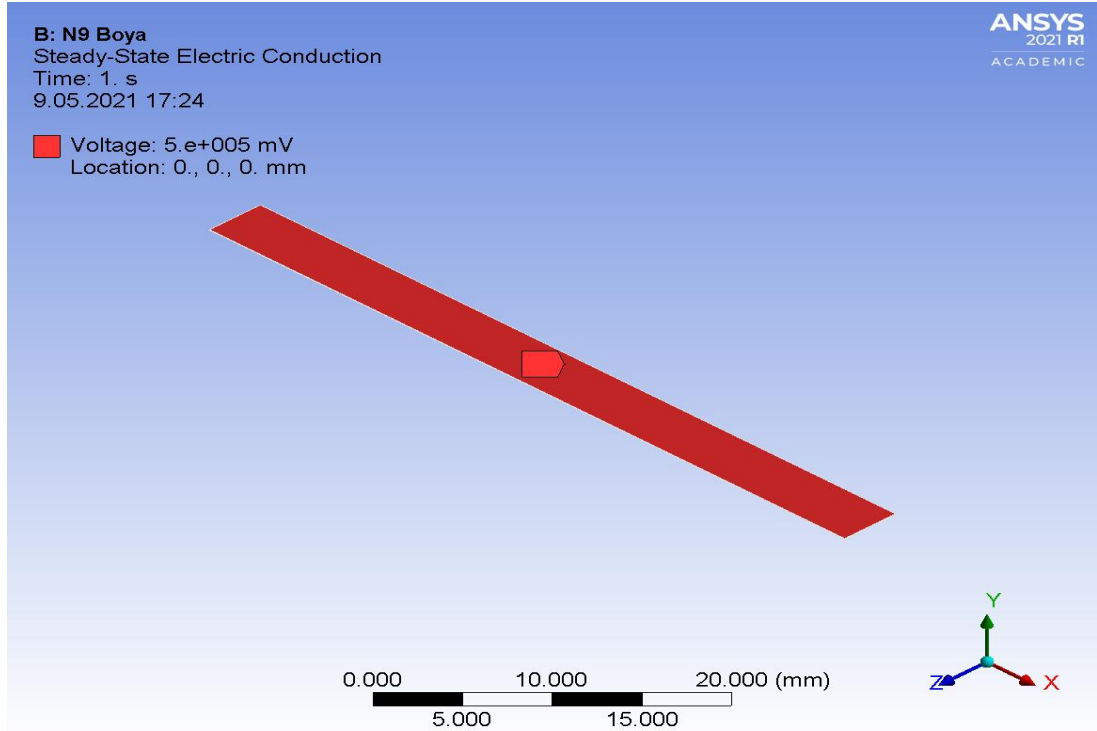
burada ;

E = Elektrik alan (V/m)

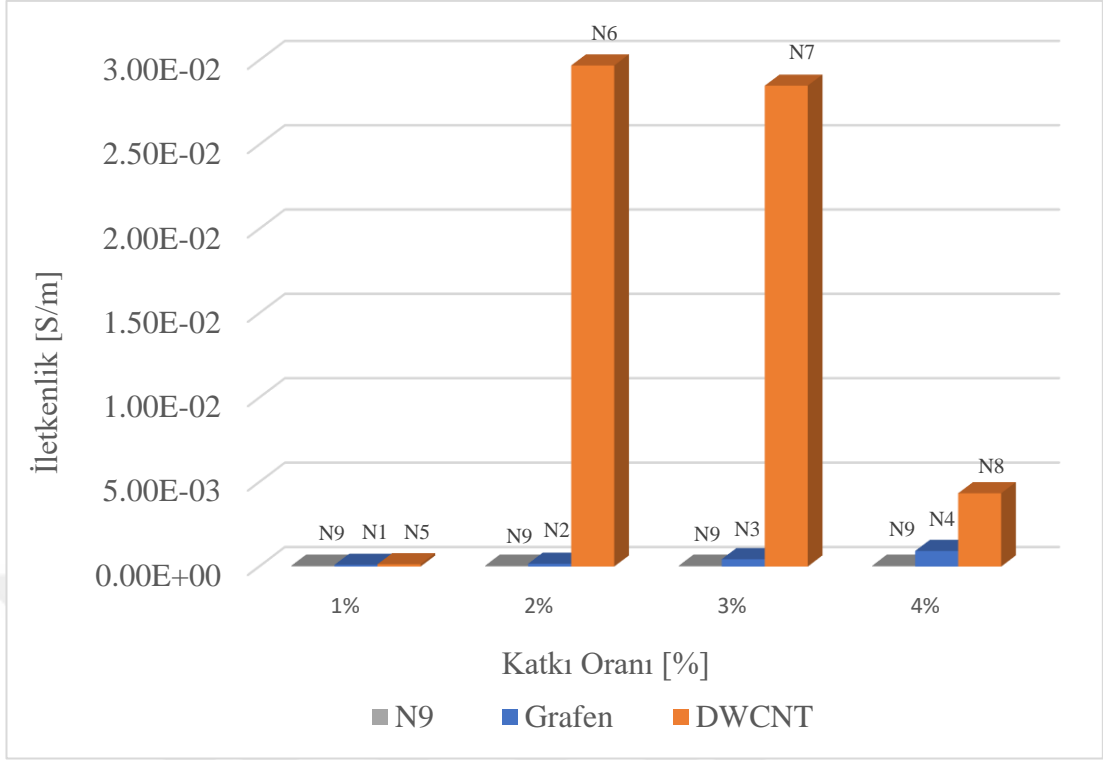
ρ = Öz direnç (Ωm)

J = Akım yoğunluğu (A/m^2)

σ = Elektriksel iletkenlik (S/m)



Şekil 5.3. ANSYS Programında oluşturulan geometri ve uygulanan gerilim

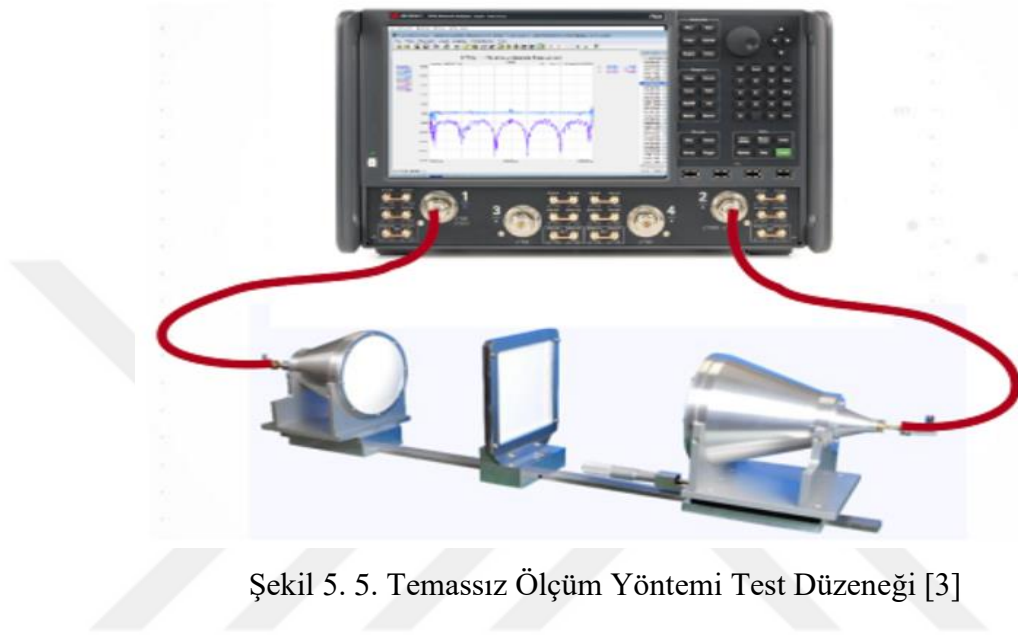


Şekil 5.4. Numunelerin ANSYS akım yoğunluğu analiz sonuçlarından hesaplanan iletkenlik değerleri

Akım yoğunluğu, milimetre kare başına düşen akım miktarını verir. Şekil 5.4 incelendiğinde Grafen katkı oranı arttıkça akım yoğunluğunun dolayısıyla elektriksel iletkenliğin de referans numuneye göre arttığı görülmektedir. Fakat DWCNT %1 ve %2 katkı oranında akım yoğunluğunda buna bağlı olarak elektriksel iletkenlikte doğrusal bir artış görülürken katkı oranı %3 olduğunda akım yoğunluğu buna bağlı olarak elektriksel iletkenlik değeri %2'ye göre düşmeye başlamış ve %4 katkı oranında bu düşüşün oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak DWCNT nanoparçacık katkı oranının artması sonucu doyma noktasına ulaştığı belirlenmiştir. Akım yoğunluğundan hesaplanan elektriksel iletkenlik değerlerine bakıldığında her katkı oranında referans numuneye göre artış olduğu görülmektedir. Nanoparçacık katkı oranına göre ANSYS akım yoğunluğu analiz sonuçlarından hesaplanan elektriksel iletkenlik değerleri karşılaştırıldığında DWCNT etkisinin Grafen'e göre en az %31.29, en fazla %17617.61 daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. İletkenlik ile ilgili yapılan deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları incelendiğinde birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

5.2. Numunelerin S Parametrelerinin Ölçümü

Numunelerin elektromanyetik özellikleri ile ilgili bilgi edinmek için S_{11} (yansımaya katsayısı) ve S_{21} (iletim katsayısı) parametrelerinin ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler için Şekil 5.5’de görüldüğü gibi temassız ölçüm yöntemi test düzeneği kullanılmıştır.



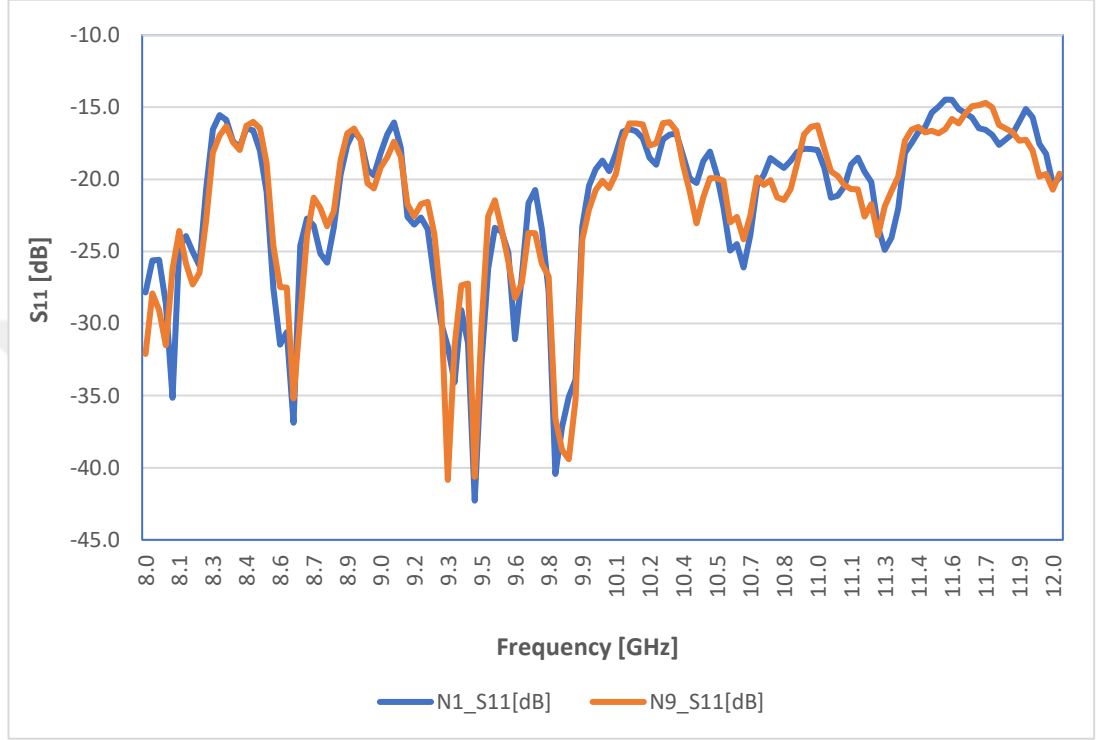
Şekil 5. 5. Temassız Ölçüm Yöntemi Test Düzeneği [3]

Şekil 5.5’teki test düzeneği referans alınarak ROHDE & SCHWARZ ZVB 20 Vektör Network Analizör ve iki adet Horn anten ile Şekil 4.10 (a)’daki ölçüm düzeneği oluşturulmuştur. Bu ölçüm düzeneği ile numunelerin S_{11} ve S_{21} parametreleri ölçülmüştür.

5.2.1. Numunelerin elektromanyetik özelliklerinin incelenmesi

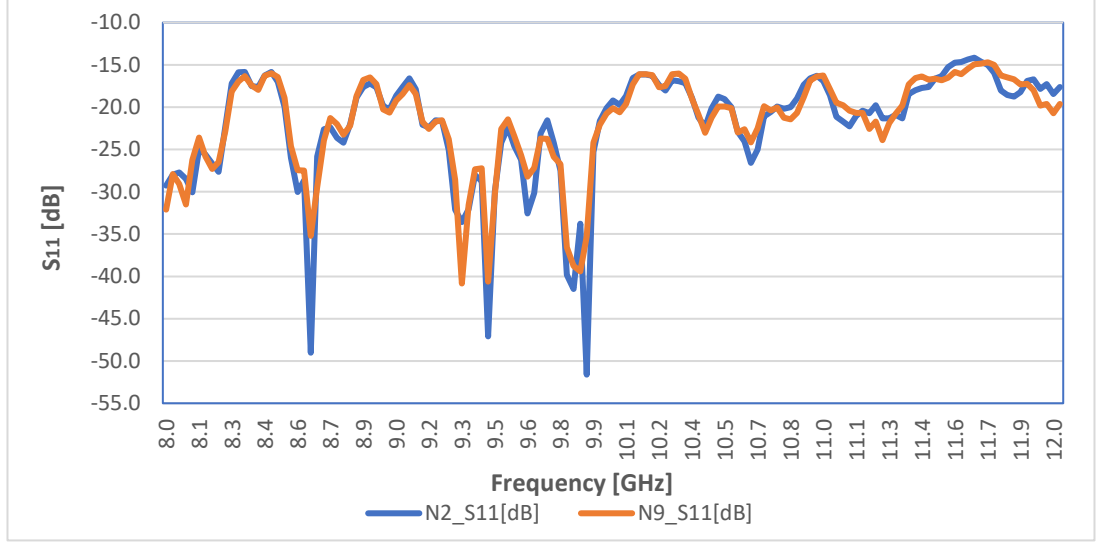
Grafen nanoparçacıkları ile %1, %2, %3 ve %4 oranında katkıladığımız sırası ile N1, N2, N3 ve N4 olarak isimlendirilen anti statik uçak boyası ile boyanan numunelerin ve nanoparçacık katkısız uçak boyası ile boyanmış N9 numunesinin elektromanyetik özelliklerinin incelenmesi için temassız ölçüm yöntemi test düzeneği kullanılmıştır. Bu çalışmadaki numuneler bir Airbus 320 uçağının kullanım dışı olmuş ve hava durumu radar antenini çevresel etkilerden koruyan radome yapısından elde edilmiştir. Radome’un koruduğu hava durumu radar anteninin çalışma frekansı 8 GHz ve 12GHz (X band) arasında olduğu için tüm numunelerin 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığındaki S_{11} (yansımaya katsayısı) ve S_{21} (iletim katsayısı) parametreleri ölçülmüştür.

Grafen' nanoparçacık ile katkılanmış boyalar ile boyanan N1, N2, N3 ve N4 numunelerinin her birinin ölçüm sonuçları nanoparçacık katkısı yapılmayan N9 numunesi referans kabul edilerek farklı oranlardaki nanoparçacık katkılı numuneler ile karşılaştırılmıştır.



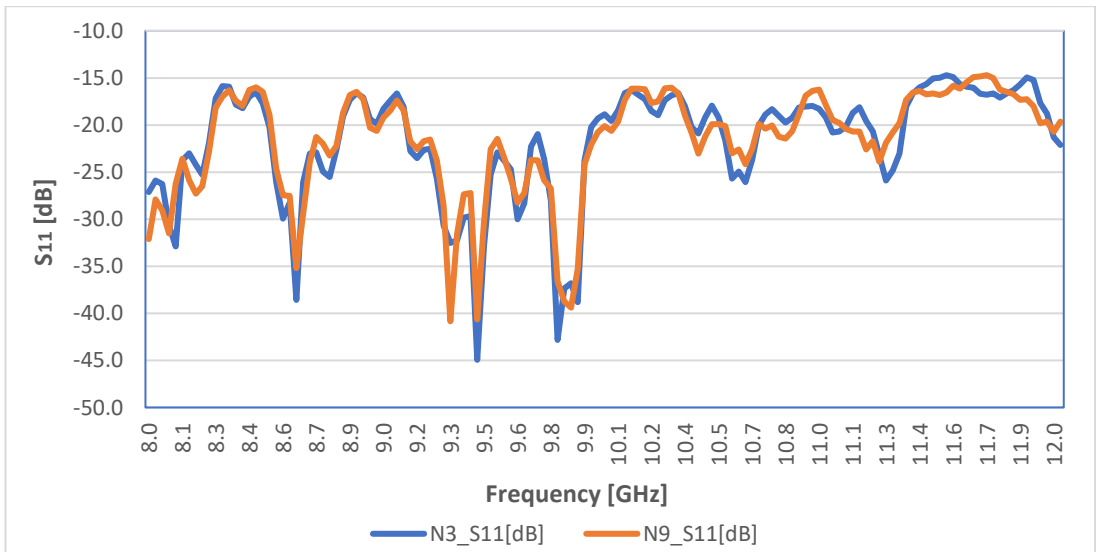
Şekil 5.6. N1 ve N9 numunelerinin S₁₁ parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.6’da görüldüğü gibi, N1 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S₁₁ parametreleri karşılaştırıldığında 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca 8.11 GHz frekansında N1 numunesinin S₁₁ parametre değerlerinde N9 numunesine göre önemli bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum bu frekanstaki, N1 yansımaya katsayısının, N9 numunesine göre az olduğunu göstermektedir. Ayrıca 9.37 GHz frekansında N1’in S₁₁ parametre değerinin N9 numunesine göre önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu frekansta, N1 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu frekansın dışındaki frekanslarda N1 ve N9’a ait S₁₁ parametre değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.



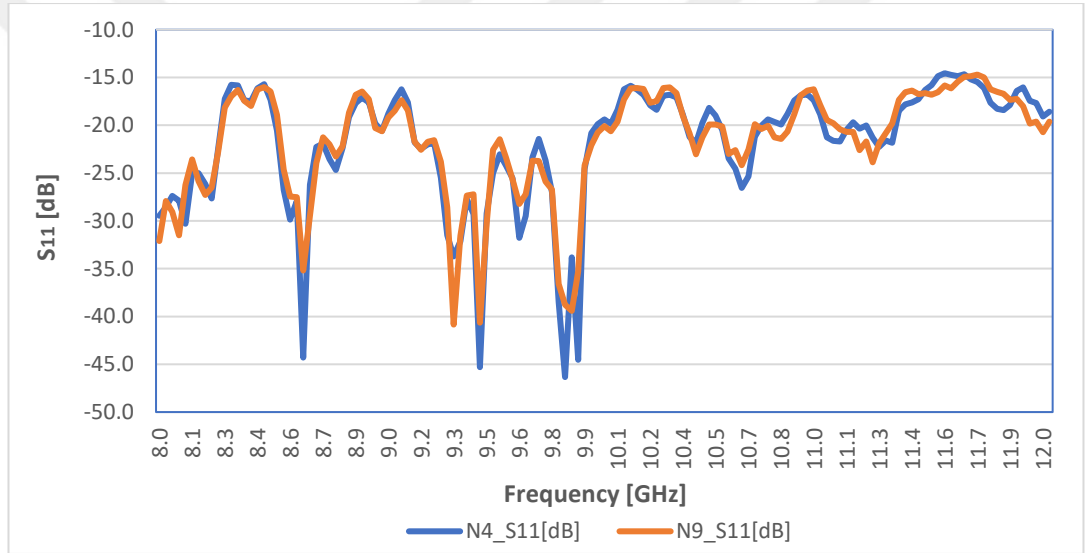
Şekil 5.7. N2 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi, N2 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{11} parametreleri karşılaştırıldığında 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca 8.65 GHz, 9.46 GHz ve 9.91 GHz frekanslarında N2 numunesinin S_{11} parametre değerlerinde N9 numunesine göre önemli bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum bu frekanslardaki, N2 yansıma katsayısının N9 numunesine göre daha az olduğunu göstermektedir. Ayrıca 9.34 GHz ve 9.88 GHz frekanslarında N2’nin S_{11} parametre değerlerinin N9 numunesine göre önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu frekanslarda, N2 numunesinin yansıma katsayısının N9 numunesine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu frekanslar dışındaki frekanslarda N2 ve N9’a ait S_{11} parametre değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir.



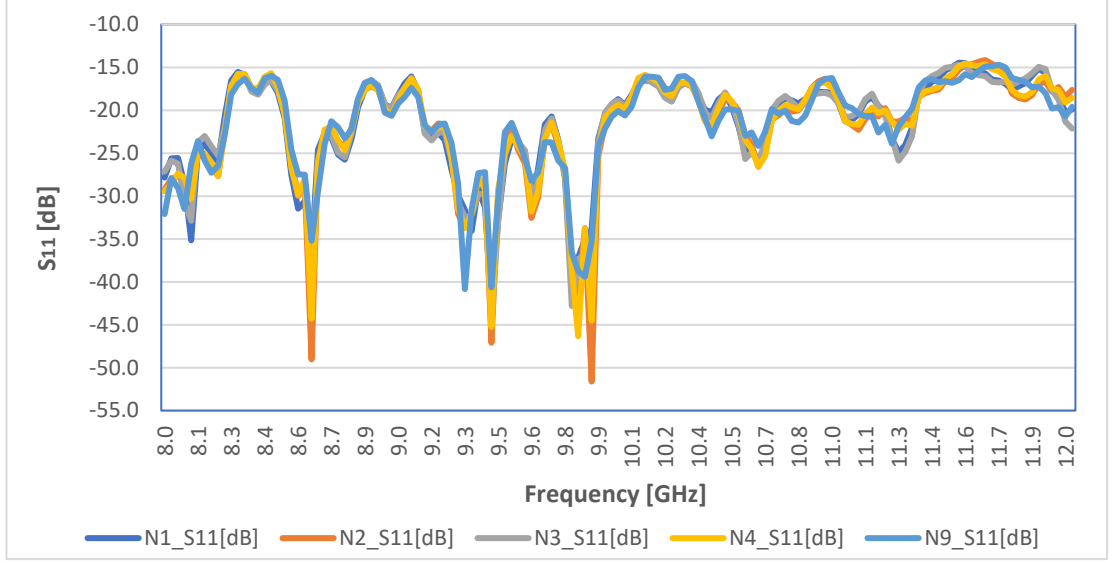
Şekil 5.8. N3 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi, N3 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{11} parametreleri karşılaştırıldığında 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca 8.65 GHz, 9.46 GHz ve 9.82 GHz frekanslarında N3 numunesinin S_{11} parametre değerlerinde N9 numunesine göre önemli bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum bu frekanslarda N3 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha az olduğunu göstermektedir. Ayrıca 9.34 GHz ve frekansında N3’ün S_{11} parametre değerinin N9 numunesine göre önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu frekansta N3 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu frekanslar dışındaki frekanslarda N3 ve N9’un S_{11} parametre değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir.



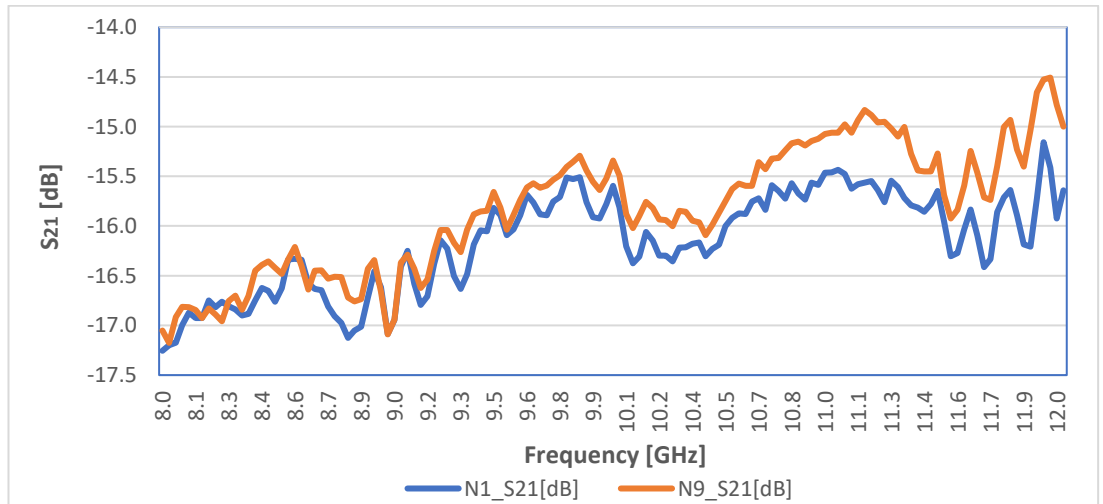
Şekil 5.9. N4 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi, N4 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{11} parametreleri karşılaştırıldığında 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca 8.65 GHz, 9.46 GHz, 9.85 GHz ve 9.91 GHz frekanslarında N4 numunesinin S_{11} parametre değerlerinde N9 numunesine göre önemli bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum bu frekanslarda, N4 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha az olduğunu göstermektedir. Ayrıca 9.34 GHz ve 9.88 GHz frekanslarında N4’ün S_{11} parametre değerlerinin N9 numunesine göre önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu frekansta N4 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu frekanslar dışındaki frekanslarda N4 ve N9’un S_{11} parametre değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.10. N1, N2, N3, N4 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması

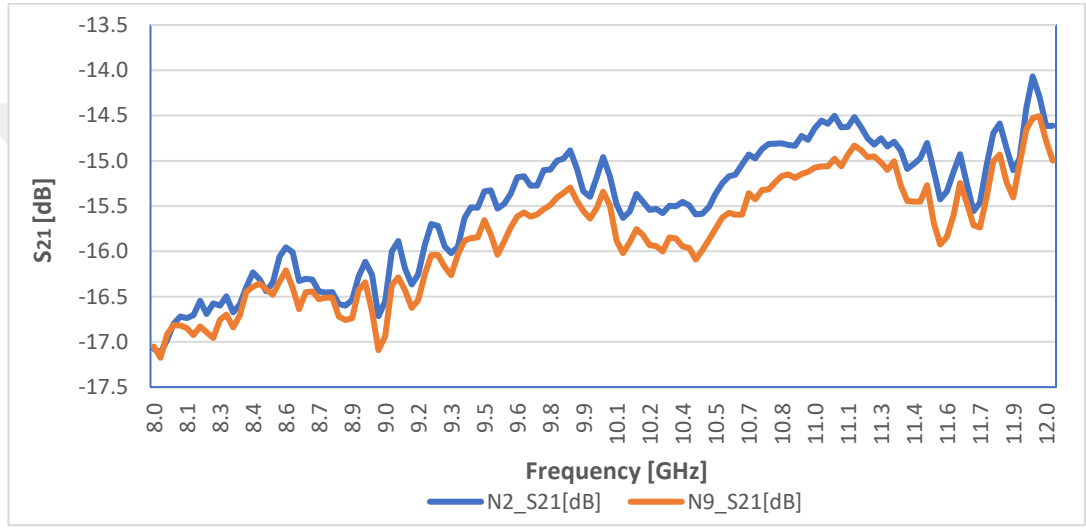
Şekil 5.10'da Grafen ile %1, %2, %3 ve %4 oranında katkılanmış uçak boyası ile boyanan sırasıyla N1, N2, N3 ve N4 numunelerinin S_{11} parametreleri ile katkısız uçak boyası ile boyanmış N9 numunesinin S_{11} parametresi karşılaştırılarak Grafen katkısının yansıma katsayısı S_{11} 'i nasıl etkilediği görülmektedir. Grafik incelendiğinde N9 numunesine göre en önemli artışın olduğu S_{11} değeri N3 numunesinde 9.34 GHz frekansında -32.52 dB olarak görülmektedir. N9 numunesine göre en önemli düşüşün olduğu S_{11} değeri ise N2 numunesinde 9.91 GHz frekansında -51.61 dB olarak görülmektedir.



Şekil 5.11. N1 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

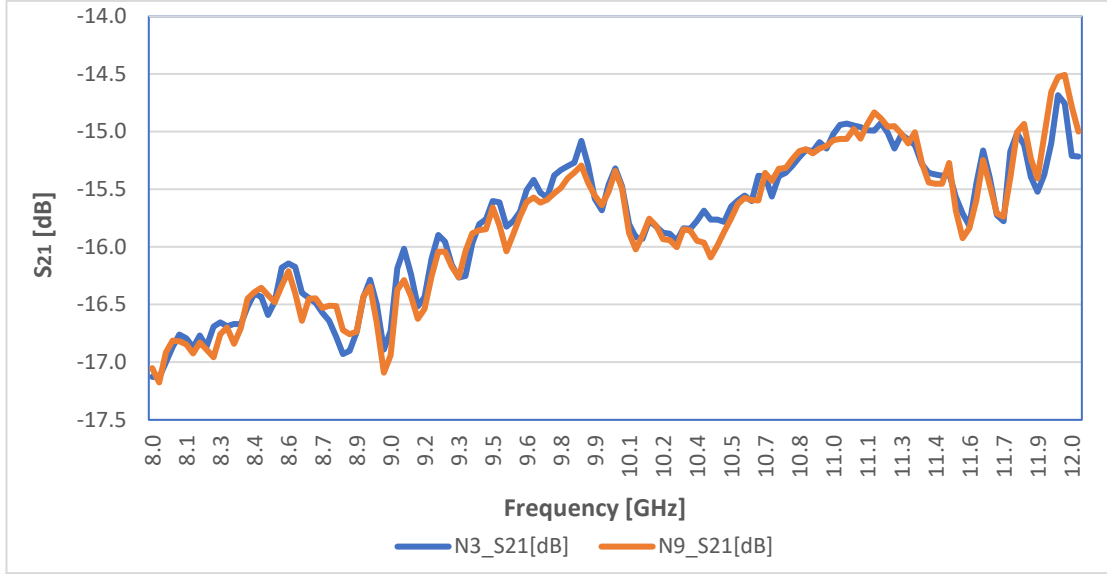
Şekil 5.11'de görüldüğü gibi, N1 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{21} parametreleri 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.11'deki grafik incelendiğinde 8 GHz ile 10 GHz arasında N1 ve N9 numunelerinin S_{21} değerlerinin birbirine yakın olduğu fakat 10 GHz ile 12 GHz arasında N1 numunesinin S_{21} değerlerindeki azalma fazlalaştığı için N9 ile N1 arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Bu durum %1 Grafen ile katkılanmış boya ile boyanan N1 numunesinin iletim katsayısının yani elektromanyetik geçirgenliğinin N9 numunesine göre düşüş (10 GHz ile 12 GHz bölgesindeki frekansta soğurma oluşturduğunu) gösterdiğini buna karşılık olarak N1 numunesinin N9 numunesine göre elektromanyetik soğurma (kalkanlama) özelliğinin arttığını göstermektedir.



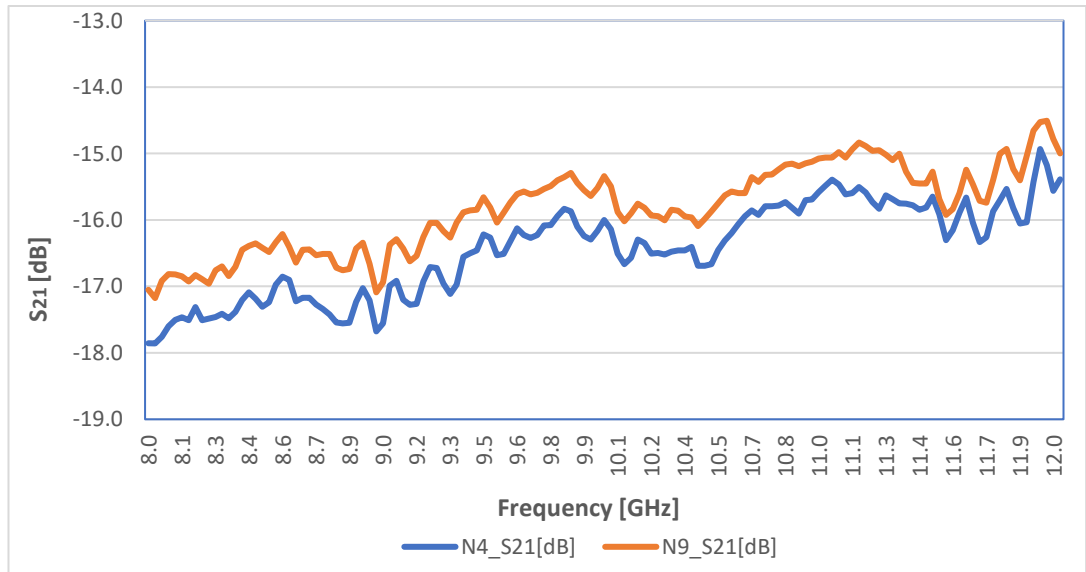
Şekil 5.12. N2 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.12'de görüldüğü gibi, N2 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{21} parametreleri 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca karşılaştırılmıştır. Şekil 5.12'deki grafik incelendiğinde N2 numunesinin S_{21} değerinin N9 numunesinin S_{21} değerine göre genel olarak bir artış gösterdiğini ve bu artışın 9.34 GHz ile 11.59 GHz arasında fazlalaştığı görülmektedir. Şekil 5.13'teki grafikte N9 numunesinin S_{21} değerlerinin ortalaması -15.83 dB, N2 numunesinin S_{21} değerlerinin ortalaması ise -15.52 dB olarak bulunmaktadır. Bu durumda %2 Grafen ile katkılanmış boya ile boyanan N2 numunesinin iletim katsayısının yani elektromanyetik geçirgenliğinin N9 numunesine göre genel olarak artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum yapılan bu tez çalışmasında %2 oranında Grafen nanoparçacık katkısının hem elektriksel iletkenlikte %247.06 iyileşme gösterirken hem de elektromanyetik geçirgenlikle ilgili amaçlanan kriterlerini gerçekleştirdiğini göstermektedir.



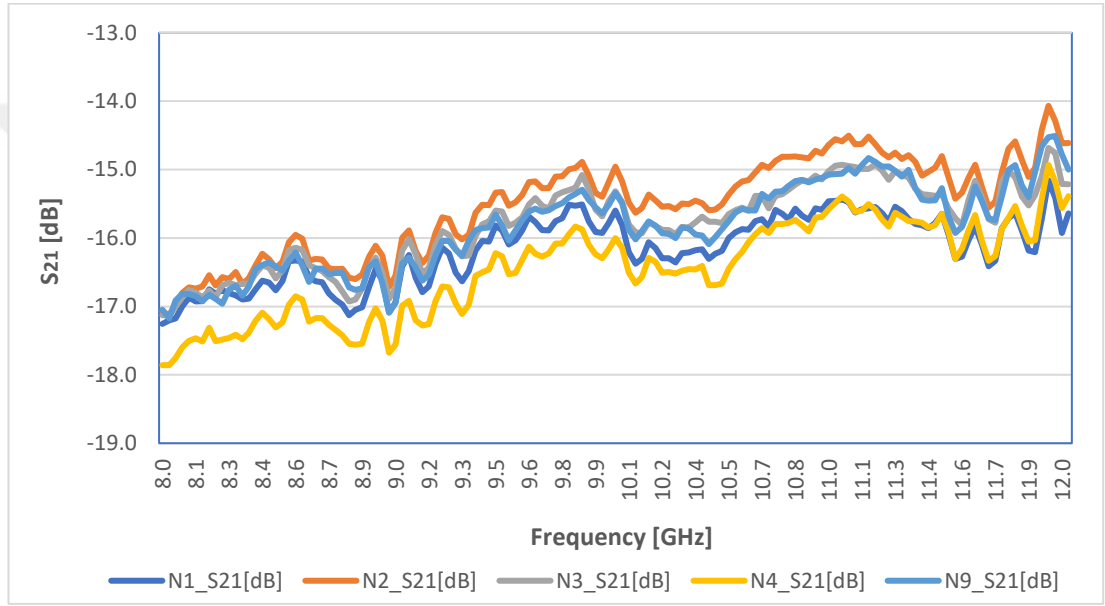
Şekil 5.13. N3 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.13’de görüldüğü gibi, N3 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{21} parametreleri 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca karşılaştırılmıştır. Şekil 5.13’teki grafikte N9 numunesinin S_{21} değerlerinin ortalaması -15.83 dB, N3 numunesinin S_{21} değerlerinin ortalaması ise -15.81 dB olarak bulunmaktadır. Bu durum %3 Grafen ile katkılanmış boya ile boyanan N3 numunesinin elektromanyetik geçirgenliğinin N9 numunesinin elektromanyetik geçirgenliğine çok yakın olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuç, %3 oranında Grafen nanoparçacık katkısının hem elektriksel iletkenlikte %804.24 iyileşme gösterirken hem de elektromanyetik geçirgenlikle ilgili amaçlanan kriterlerini gerçekleştirdiğini göstermektedir.



Şekil 5.14. N4 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.14'te görüldüğü gibi, N4 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{21} parametreleri 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca karşılaştırılmıştır. Şekil 5.14'teki grafik incelendiğinde 8 GHz ile 12 GHz frekans aralığı boyunca N4 numunesinin S_{21} değerinin N9 numunesinin S_{21} değerine göre azalma gösterdiği görülmektedir. Bu durum %4 Grafen ile katkılanmış boya ile boyanan N4 numunesinin iletim katsayısının yani elektromanyetik geçirgenliğinin N9 numunesine göre düşüş gösterdiğini buna karşılık olarak N4 numunesinin N9 numunesine göre elektromanyetik soğurma (kalkanlama) özelliğinin arttığını göstermektedir.

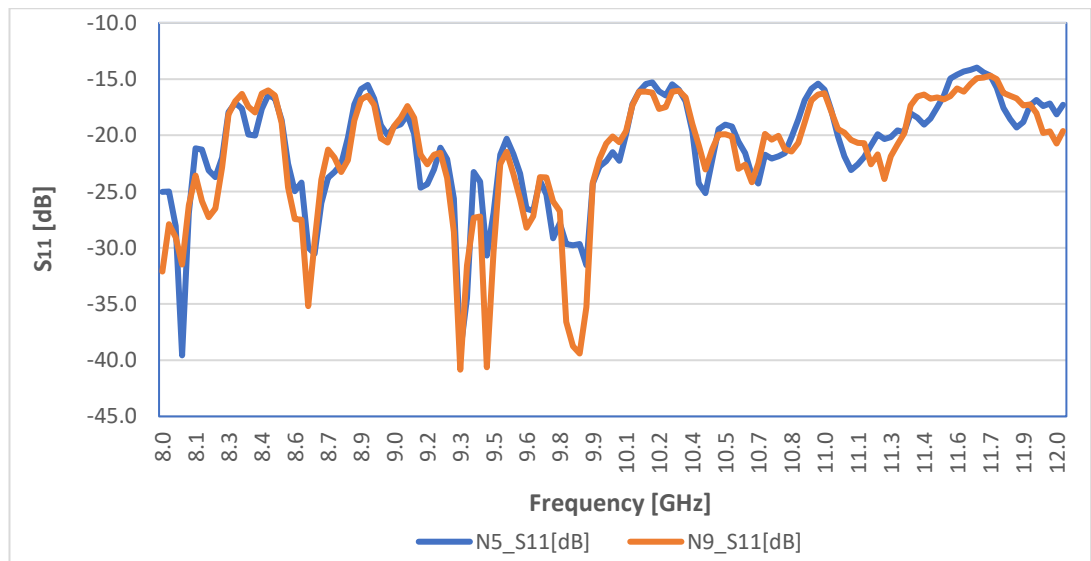


Şekil 5.15. N1, N2, N3, N4 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.15'te Grafen ile %1, %2, %3 ve %4 oranında katkılanmış uçak boyası ile boyanan sırasıyla N1, N2, N3 ve N4 numunelerinin S_{21} parametreleri ile katkısız uçak boyası ile boyanmış N9 numunesinin S_{21} parametresi karşılaştırılarak Grafen katkısının iletim katsayısı S_{21} 'i yani elektromanyetik geçirgenliği nasıl etkilediği görülmektedir. Şekil 5.15 incelendiğinde, %4 Grafen ile katkılanan uçak boyası ile boyanmış N4 numunesinin N9 numunesine göre elektriksel iletkenliğinin artmasının yanında iletim katsayısı S_{21} değerinin N9 numunesine göre en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. N3 ve N9 numunelerinin S_{21} değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum %3 Grafen ile katkılanmış boya ile boyanan N3 numunesinin N9 numunesiyle elektromanyetik geçirgenlik değeri olarak birbirine yakın olduğunu göstermektedir. %2 Grafen ile katkılanan uçak boyası ile boyanmış

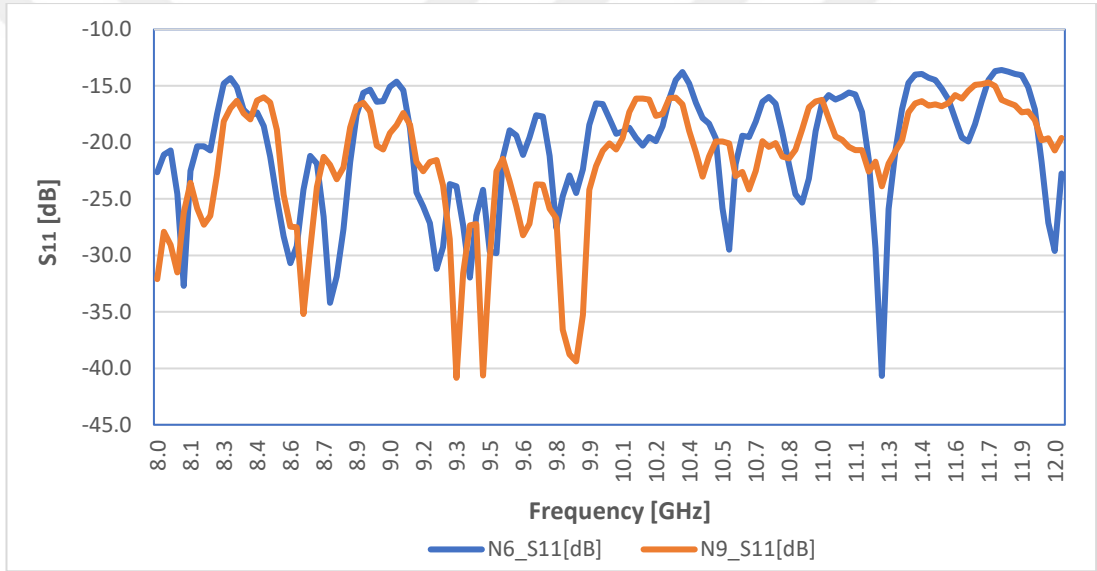
N2 ($\sigma=1.68 \times 10^{-4}$ S/m, $S_{21} = -15.52$ dB) numunesinin N9 ($\sigma=4.83 \times 10^{-5}$ S/m, $S_{21} = -15.83$ dB) numunesine göre elektriksel iletkenliğinin artmasının yanı sıra iletim katsayısı S_{21} 'de de en çok artışın olduğu yani elektromanyetik geçirgenlik olarak en iyi artışın görüldüğü numunedir. N2 ve N3 numunelerinde elde edilen bu sonuçlar, yapılan bu tez çalışmasındaki elektromanyetik geçirgenlikle ilgili amaçlanan hedeflere ulaşıldığını göstermektedir. Ayrıca elektriksel iletkenliğini yanı sıra elektromanyetik soğurmanın (kalkanlamanın) da önemli olduğu uygulamalar için en iyi sonuç veren numunenin, hem en iyi elektriksel iletkenliğe hem de en iyi elektromanyetik kalkanlama özelliğine sahip N4 numunesi olduğu görülmektedir.

DWCNT nanoparçacıkları ile %1, %2, %3 ve %4 oranında katkıladığımız sırası ile N5, N6, N7 ve N8 olarak isimlendirilen anti statik uçak boyası ile boyanan numunelerin ve nanoparçacık katkısız uçak boyası ile boyanmış N9 numunesinin elektromanyetik özelliklerinin incelenmesi için temassız ölçüm yöntemi test düzeneği ile numunelerin, hava durumu radarının çalışma aralığı olan 8 GHz ve 12 GHz, X bandında iyi elektromanyetik özellik göstermesi beklendiği için ölçümler bu frekans aralığında gerçekleştirilerek S_{11} (yansıma katsayısı) ve S_{21} (iletim katsayısı) parametreleri ölçülmüştür. DWCNT nanoparçacık ile katkılanmış boyalar ile boyanan N5, N6, N7 ve N8 numunelerinin her birinin ölçüm sonuçları nanoparçacık katkısı yapılmayan N9 referans kabul edilerek farklı oranlardaki nanoparçacık katkılı numuneler ile karşılaştırılmıştır.



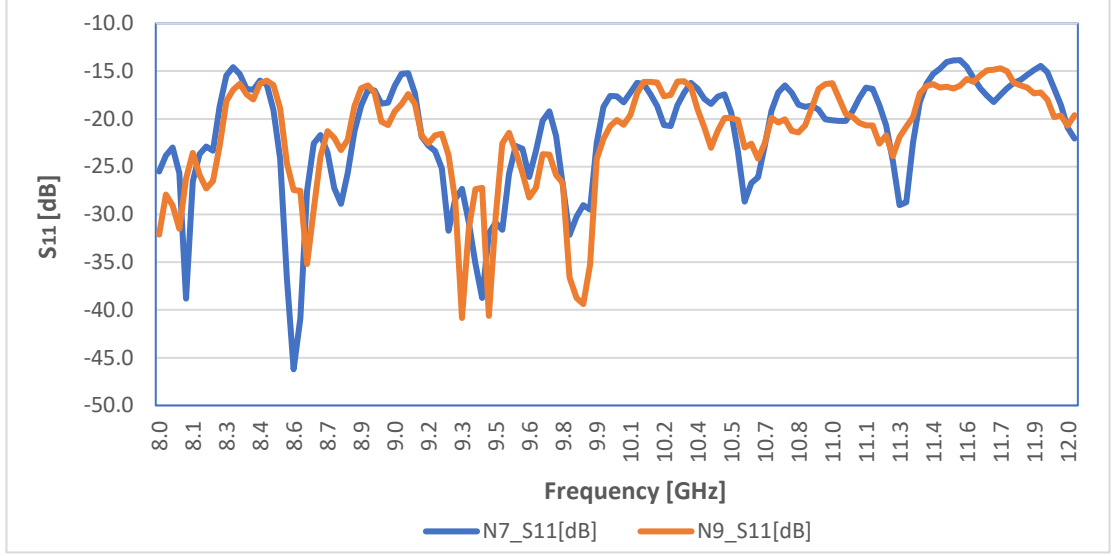
Şekil 5.16. N5 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.16’da görüldüğü gibi, N5 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{11} parametreleri karşılaştırıldığında 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca 8.08 GHz frekansında N5 numunesinin S_{11} parametre değerlerinde N9 numunesine göre önemli bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum bu frekanslarda, N5 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha az olduğunu göstermektedir. Ayrıca 8.65 GHz, 9.49 GHz ve 9.88 GHz frekanslarında N5’in S_{11} parametre değerlerinin N9 numunesine göre önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu frekansta N5 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu frekanslar dışındaki frekanslarda N5 ve N9’un S_{11} parametre değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir.



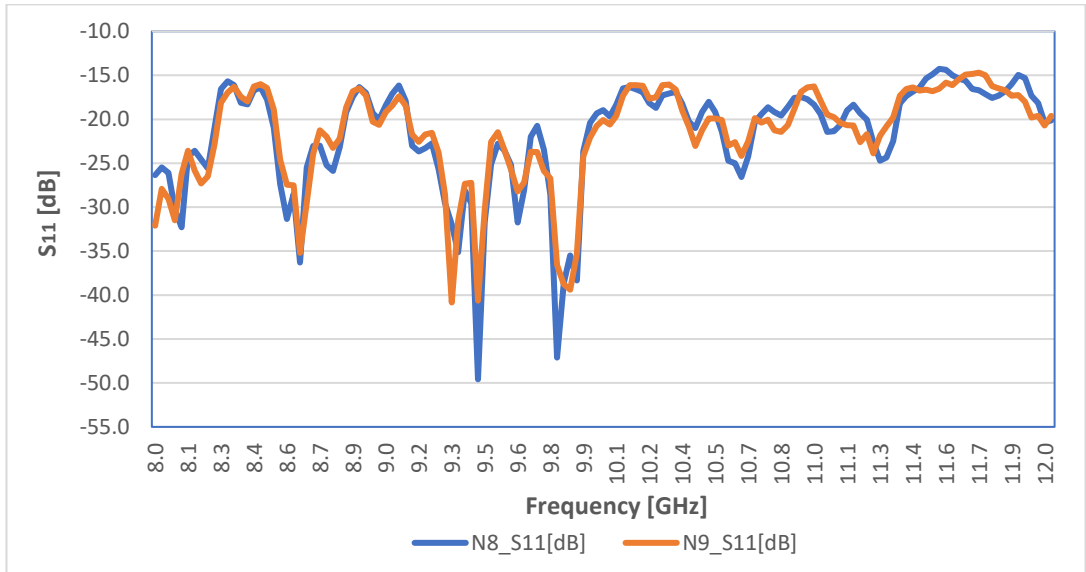
Şekil 5.17. N6 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.17’de görüldüğü gibi, N6 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{11} parametreleri karşılaştırıldığında 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca 11.26 GHz frekansında N6 numunesinin S_{11} parametre değerinin N9 numunesine göre en düşük değerde olduğu görülmektedir. Bu durum bu frekanslarda, N6 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha az olduğunu göstermektedir. Ayrıca 9.88 GHz frekansında N6’nın S_{11} parametre değerinin N9 numunesine göre en yüksek artışı gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu frekansta N6 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha iyi olduğunu göstermektedir.



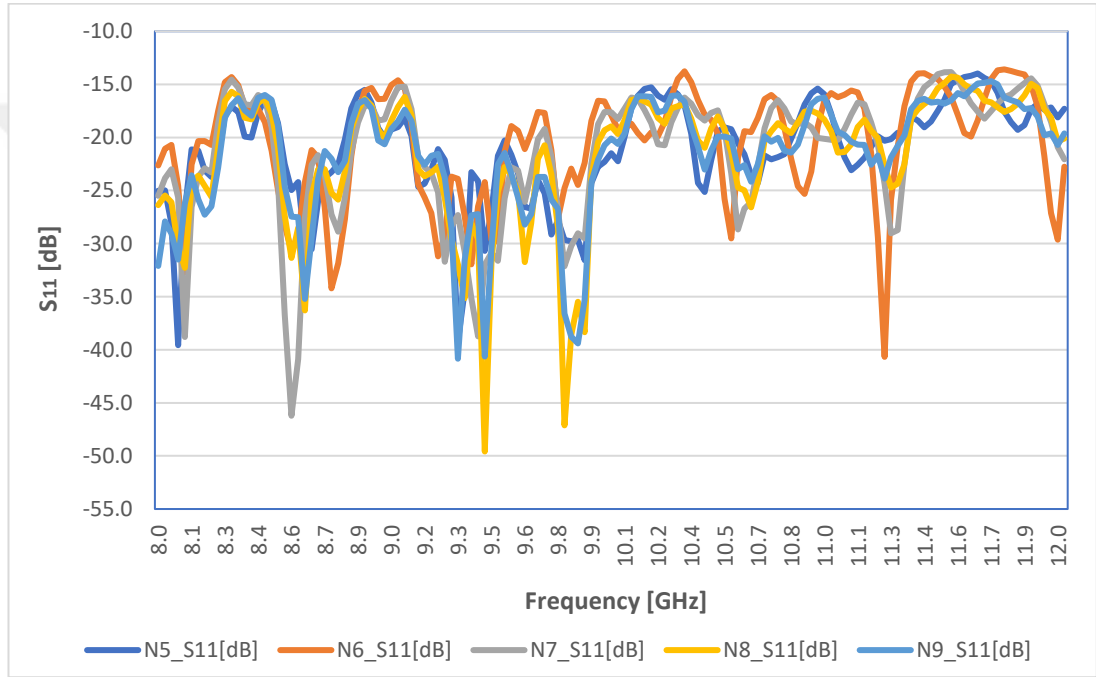
Şekil 5.18. N7 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.18’de görüldüğü gibi, N7 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{11} parametreleri karşılaştırıldığında 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca 8.59 GHz frekansında N7 numunesinin S_{11} parametre değerlerinde N9 numunesine maksimum düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum bu frekanslarda, N7 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha az olduğunu göstermektedir. Ayrıca 9.34 GHz frekansında N7’nin S_{11} parametre değerinin N9 numunesine göre en yüksek artışı gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu frekansta N7 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha iyi olduğunu göstermektedir.



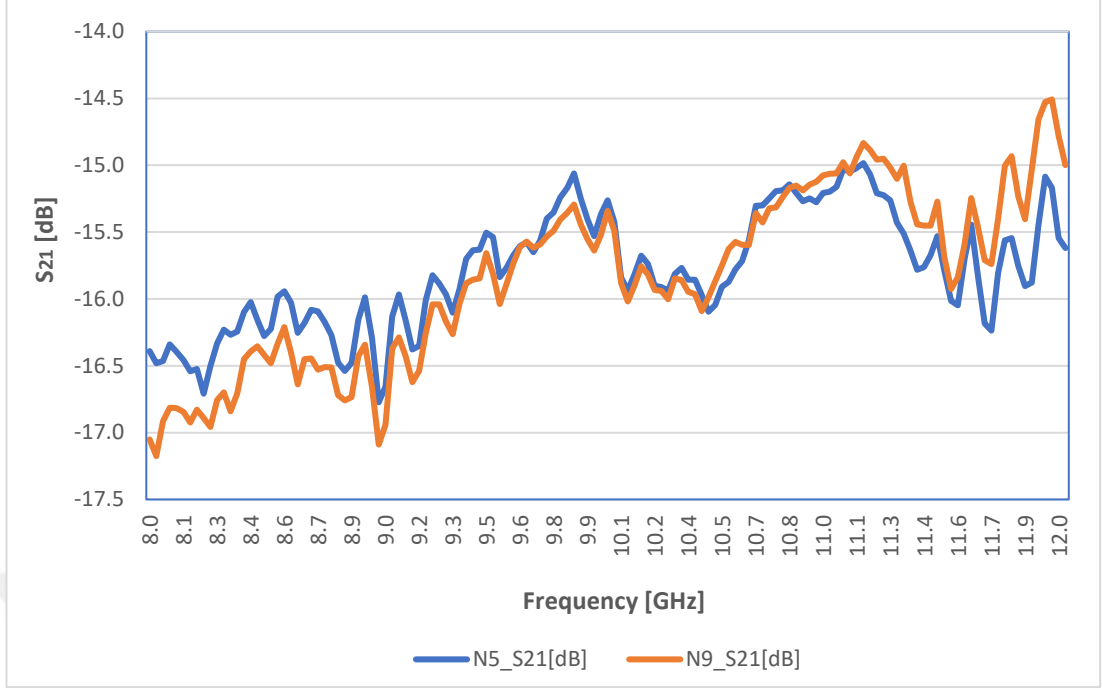
Şekil 5.19. N8 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.19’da görüldüğü gibi, N8 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{11} parametreleri karşılaştırıldığında 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca 9.82 GHz frekansında N8 numunesinin S_{11} parametre değerlerinde N9 numunesine maksimum düşüş olduğu görülmektedir. Bu durum bu frekanslarda, N8 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha az olduğunu göstermektedir. Ayrıca 9.34 GHz frekansında N8’in S_{11} parametre değerinin N9 numunesine göre en yüksek artışı gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu frekansta N8 numunesinin yansımaya katsayısının N9 numunesine göre daha iyi olduğunu göstermektedir.



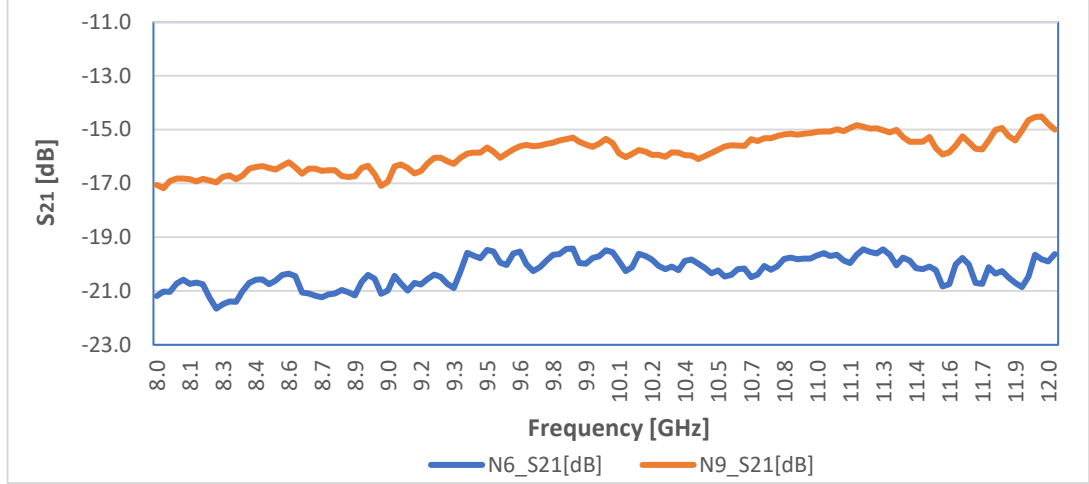
Şekil 5.20. N5, N6, N7, N8 ve N9 numunelerinin S_{11} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.20’de DWCNT ile %1, %2, %3 ve %4 oranında katkılanmış uçak boyası ile boyanan sırasıyla N5, N6, N7 ve N8 numunelerinin S_{11} parametreleri ile katkısız uçak boyası ile boyanmış N9 numunesinin S_{11} parametresi karşılaştırılarak DWCNT katkısının yansımaya katsayısı S_{11} ’i nasıl etkilediği görülmektedir. Grafik incelendiğinde N9 numunesine göre en önemli artışın olduğu S_{11} değeri N6 numunesinde 9.34 GHz frekansında -23.9 dB olarak görülmektedir. N9 numunesine göre en önemli düşüşün olduğu S_{11} değeri ise N7 numunesinde 8.59 GHz frekansında -46.22 dB olarak görülmektedir.



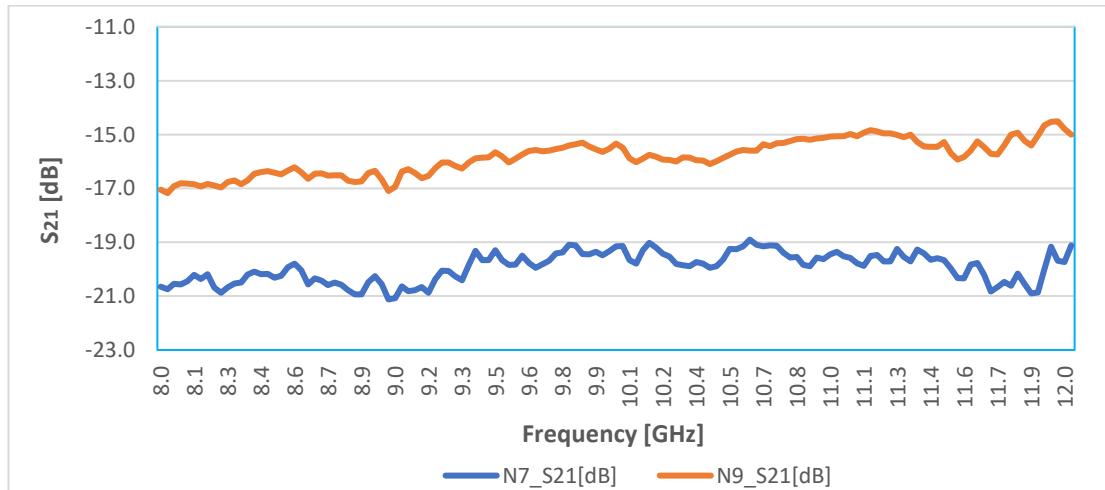
Şekil 5.21. N5 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.21’de görüldüğü gibi, N5 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{21} parametreleri 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca karşılaştırılmıştır. Şekil 5.21’deki grafik incelendiğinde 8 GHz ile 9.91 GHz arasında N5 numunesinin S_{21} değerinin N9 numunesinin S_{21} değerine göre genel olarak artış gösterdiği yani elektromanyetik geçirgenliğinde artış olduğu, 9.91 GHz ile 12 GHz arasında ise N5 numunesinin S_{21} değerinin N9 numunesinin S_{21} değeri ile bazı frekanslarda yakın olduğu görülürken bazı frekanslarda düşük olduğu görülmektedir. Şekil 5.22’deki grafikte N9 numunesinin S_{21} değerininin ortalaması -15.83 dB ve N5 numunesinin ortalaması ise -15.79 dB olarak bulunmaktadır. Bu durum %1 DWCNT ile katkılanmış boya ile boyanan N5 numunesinin N9 numunesine göre elektromanyetik geçirgenliğinde önemli bir azalma olmadığını göstermektedir. Elde edilen bu sonuç, yapılan bu tez çalışmasında elektromanyetik geçirgenlikle ilgili amaçlanan kriterlerden bir tanesinin gerçekleştiğini göstermektedir.



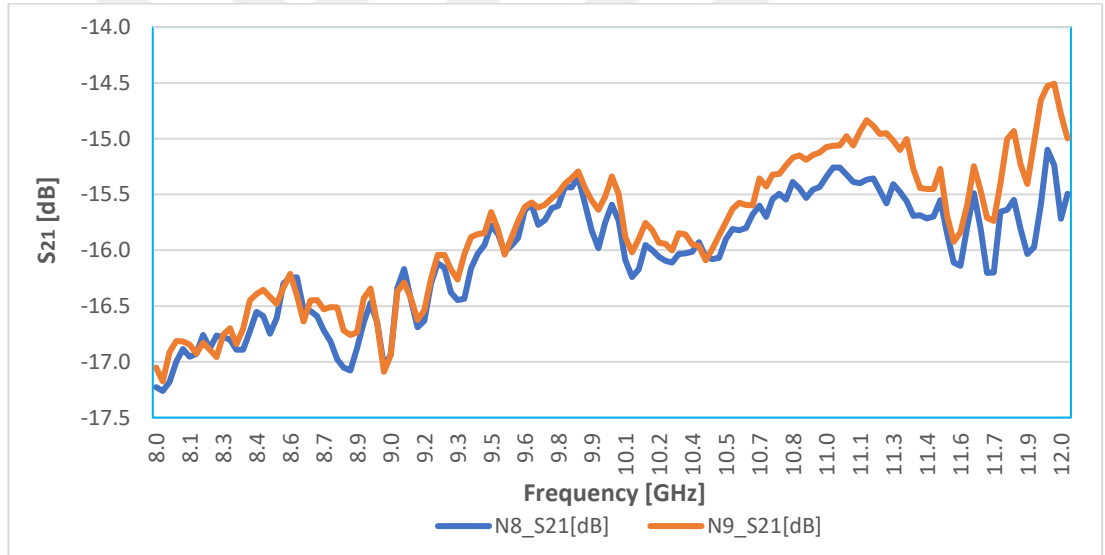
Şekil 5.22. N6 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.22’de görüldüğü gibi, N6 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{21} parametreleri 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca karşılaştırılmıştır. Şekil 5.22’deki grafik incelendiğinde 8 GHz ile 12 GHz frekans aralığı boyunca N6 numunesinin S_{21} değerinin N9 numunesinin S_{21} değerine göre önemli bir azalma gösterdiği görülmektedir. Bu durum %2 DWCNT ile katkılanmış boya ile boyanan N6 numunesinin iletim katsayısında yani elektromanyetik geçirgenliğinde N9 numunesine göre önemli bir azalma olduğunu buna karşılık olarak N6 numunesinin N9 numunesine göre çok daha iyi elektromanyetik soğurma (kalkanlama) özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durumun sebebi olarak Şekil 4.8’de görüldüğü üzere N6 numunesinin yüzeyindeki iletken nanoparçacık topaklanmasından dolayı bu noktalarda elektriksel iletkenliğin artmasına bağlı olarak soğurmanın (kalkanlamanın) da arttığı düşünülmektedir [43].



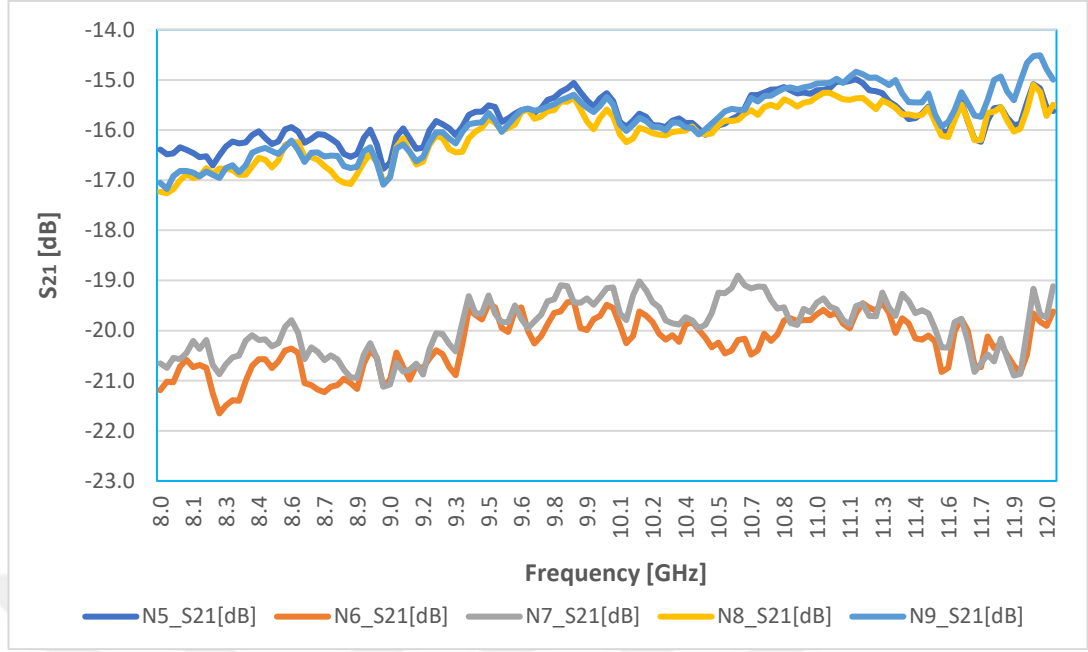
Şekil 5.23. N7 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.23'te görüldüğü gibi, N7 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{21} parametreleri 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca karşılaştırılmıştır. Şekil 5.23'teki grafik incelendiğinde 8 GHz ile 12 GHz frekans aralığı boyunca N7 numunesinin S_{21} değerinin N9 numunesinin S_{21} değerine göre önemli bir azalma gösterdiği görülmektedir. Bu durum %3 DWCNT ile katkılanmış boya ile boyanan N7 numunesinin iletim katsayısında yani elektromanyetik geçirgenliğinde N9 numunesine göre önemli bir azalma olduğunu buna karşılık olarak N7 numunesinin N9 numunesine göre çok daha iyi elektromanyetik soğurma (kalkanlama) özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durumun sebebi olarak Şekil 4.8'de görüldüğü üzere N7 numunesinin yüzeyindeki iletken nanoparçacık topaklanmasından dolayı bu noktalarda elektriksel iletkenliğin artmasına bağlı olarak soğurmanın (kalkanlamanın) da arttığı düşünülmektedir [43].



Şekil 5.24. N8 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.24'te görüldüğü gibi, N8 ve N9 numunelerinin dB cinsinden elde edilen S_{21} parametreleri 8 GHz ve 12 GHz (X band) frekans aralığı boyunca karşılaştırılmıştır. Şekil 5.24'teki grafik incelendiğinde 8 GHz ile 10.45 GHz frekans aralığı boyunca N8 numunesinin S_{21} değerinin N9 numunesinin S_{21} değerine göre bazı frekanslarda azalma gösterirken, 10.45 GHz ile 12 GHz frekans aralığında azalma fazlalaşmıştır. Bu durum %4 DWCNT ile katkılanmış boya ile boyanan N8 numunesinin iletim katsayısında yani elektromanyetik geçirgenliğinde N9 numunesine göre önemli bir azalma olduğunu buna karşılık olarak N8 numunesinin N9 numunesine göre çok daha iyi elektromanyetik soğurma (kalkanlama) özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.



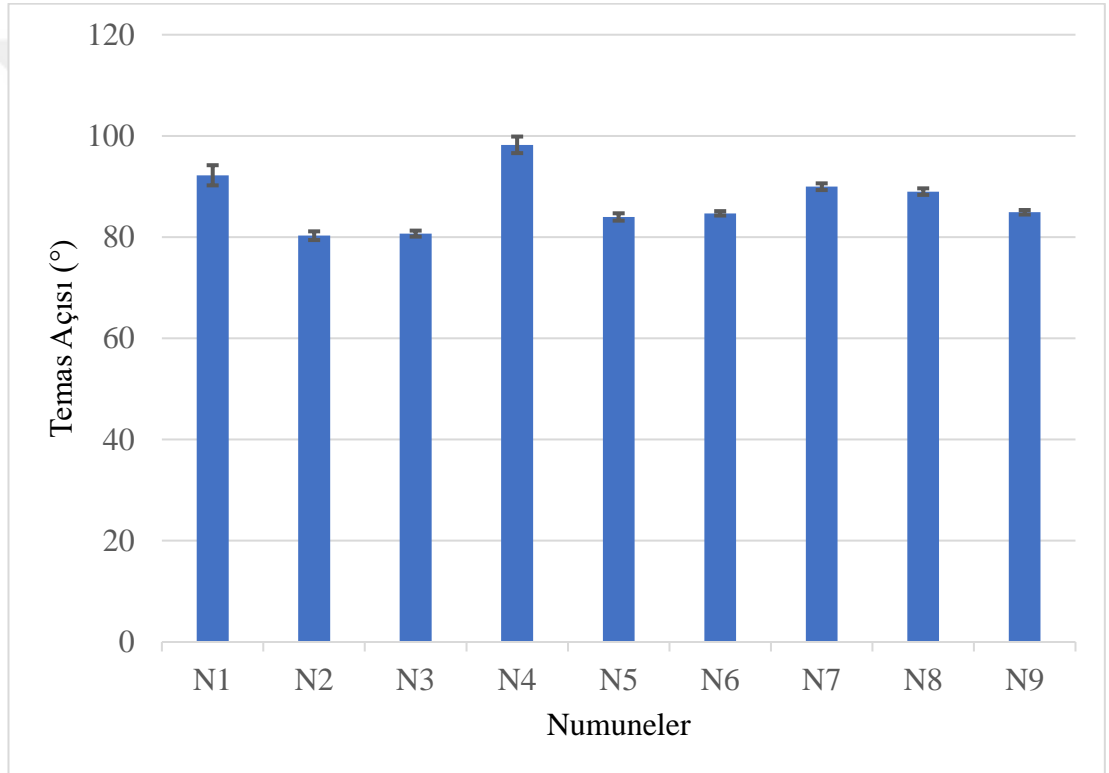
Şekil 5.25. N5, N6, N7, N8 ve N9 numunelerinin S_{21} parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 5.25'te DWCNT ile %1, %2, %3 ve %4 oranında katkılanmış uçak boyası ile boyanan sırasıyla N5, N6, N7 ve N8 numunelerinin S_{21} parametreleri ile katkısız uçak boyası ile boyanmış N9 numunesinin S_{21} parametresi karşılaştırılarak DWCNT katkısının iletim katsayısı S_{21} 'i yani elektromanyetik geçirgenliği nasıl etkilediği görülmektedir. Şekil 5.25 incelendiğinde, %2 DWCNT ile katkılanan uçak boyası ile boyanmış N6 numunesinin N9 numunesine göre elektriksel iletkenliğinin artmasının yanında iletim katsayısı S_{21} değerinin N9 numunesine göre en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. %1 DWCNT ile katkılanan uçak boyası ile boyanmış N5 numunesinin N9 numunesine göre elektriksel iletkenliğinin artmasının yanısıra iletim katsayısı S_{21} değerinde yani elektromanyetik geçirgenliğinde 9.91 GHz'e kadar genel olarak artış olduğu bu frekans değerinden sonra N5 numunesinin S_{21} değerinin N9 numunesinin S_{21} değeri ile bazı frekanslarda yakın olduğu görülürken bazı frekanslarda düşük olduğu görülmektedir. N5 numunesinde elde edilen bu sonuçlar, yapılan bu tez çalışmasındaki elektromanyetik geçirgenlikle ilgili amaçlanan hedeflere en yakın sonuç veren numunedir. Ayrıca elektriksel iletkenliğin yanı sıra elektromanyetik kalkanlama beklenen uygulamalar için en iyi sonuç veren numunenin, hem en iyi elektriksel iletkenliğe hem de en iyi elektromanyetik kalkanlama özelliğine sahip N6 numunesi olduğu görülmektedir. Böylece DWCNT ile çalıştığımız numuneler arasında uygulama açısından kalkanlama özelliği beklenen uygulamalarda;

en iyi elektromanyetik kalkanlamayı sağlayacak oranın %2 'lik DWCNT katkı oranı olduğu belirlenmiştir. Bu oranın belirlenmesi daha fazla DWCNT kullanılmasını önleyeceği için maliyet açısından da önemlidir.

5.3. Numunelerin Temas Açılarının İncelenmesi

Farklı ve değişik oranda nanoparçacık katkılı boya ile boyanmış numunelerin yüzey morfolojisi ve iletkenlik değişimlerine bağlı olarak temas (kontak) açısı değişimlerini belirlemek için temas açısı ölçümleri 3 farklı ölçümün ortalaması ile hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarına ait grafik şekil 5.26'de görülmektedir.



Şekil 5.26. Numunelerin temas açısı ölçümleri

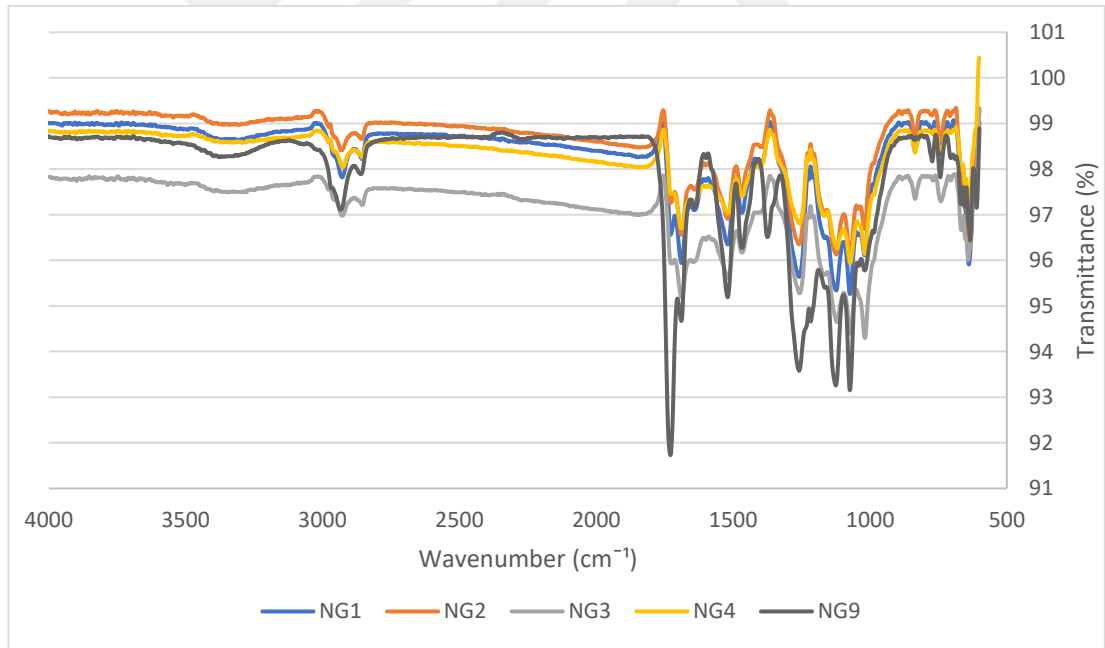
Şekil 5.26'daki verilere göre farklı oranlarda Grafen ve DWCNT ile katılanmış uçak boyasının numunelerin Temas Açısı (TA) üzerindeki etkisi incelendiğinde N9 referans numunesine göre su temas açısının en fazla artış gösterdiği %4 Grafen katkılı uçak boyası ile boyanmış N4 numunesidir. Mpukuta, (2018), farklı oranlarda Grafen katkılama ile oluşturduğu kompozit nano fiberlere 15 kV gerilim uygulayarak elektriksel iletkenliklerini incelediğinde en iyi iletkenliğin 8.85×10^{-3} S/cm değeri ile %1 Grafen katkılı kompozit nano fiberde olduğunu görmüşler ve bu numunenin temas

açısı ölçümünü yaptığında hidrofobik bir yapıya sahip olduğunu belirtmiştir [45]. Bu tez çalışmasında %1, %2, %3 ve %4 Grafen katkı oranı ile oluşturduğumuz uçak boyaları ile boyanan sırasıyla N1, N2, N3 ve N4 numuneleri içerisinde en yüksek iletkenliğe sahip olan numune 1.01×10^{-4} S/m değeri ile N4 numunesidir ve aynı zamanda hidrofobik bir yapıya sahip olduğu Şekil 5.26'da görülmektedir. %1, %2, %3 ve %4 DWCNT katkılama sonucu elde edilen uçak boyaları ile boyanmış sırasıyla N5, N6, N7, N8 numuneleri incelendiğinde N9 referans numunesine göre su temas açısının en fazla artış gösterdiği %3 DWCNT katkılı uçak boyası ile boyanmış N7 numunesinin en iyi hidrofobikliğe sahip olduğu görülmektedir. Yani N7 numunesi farklı oranlarda DWCNT katkılama sonucu elde edilen uçak boyaları ile boyanmış numunelerin içinde en iyi iletkenlik değerine sahip ikinci numune olurken aynı zamanda üzerine gelen suyun yayılmasını en iyi önleyen numune olduğu görülmektedir. Hameed N. ve diğerleri (2007), yaptıkları çalışmada topaklanma arttığında yapının daha hidrofobik olacağını belirtilmiştir [46]. DWCNT katkılı uçak boyası ile boyanmış numuneler içinde yüzeyinde topaklanma olan N6 ve N7 numuneleri incelendiğinde topaklanmanın artmasıyla numunelerin daha hidrofobik bir yapıya sahip olduğu ve aynı zamanda elektromanyetik soğurmalarının (kalkanlama) daha iyi olduğu görülmektedir. Tüm numuneler karşılaştırıldığında en iyi hidrofobik yapıya sahip olan numunenin N4 numunesi olduğu görülmektedir.

Açıkbaş ve diğerleri (2021), yaptıkları çalışmada kaba partikül boyutunun hidrofobik bir yüzey elde etmede uygun morfolojiyi sağlamadığı belirtilmiştir. Çalışmada mikro boyutta çinko oksit tozunun hidrofobikliği iyileştirmediği fakat nano çinko oksit katkısının hidrofobikliğe olumlu yönde etki sağladığı belirtilmiştir [44]. Bu bilgi doğrultusunda Grafen ve DWCNT nanoparçacık katkılı uçak boyası ile boyanan numunelerin hidrofobikliği referans numunesi N9'a (katkısız boya ile boyanan) göre incelendiğinde %1 ve %4 Grafen nanoparçacık katkı oranıyla oluşturulan boyalar ile boyanmış N1 ve N4 numunelerinde ve %3 ve %4 DWCNT nanoparçacık katkı oranıyla oluşturulan boyalar ile boyanmış N7 ve N8 numunelerinde nanoparçacık katkısının hidrofobikliğe olumlu yönde etki ettiği görülmüştür.

5.4. Yüzeyin Kimyasal (FTIR-ATR) Durumunun İncelenmesi

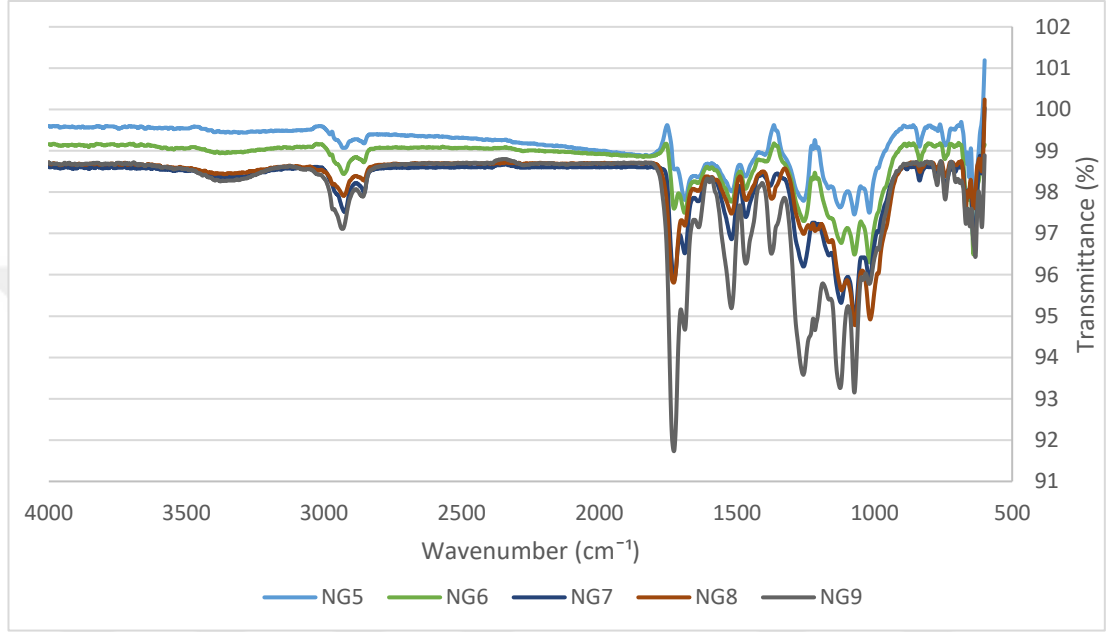
QFRP kompozit numunelerinin Grafen ve DWCNT nanoparçacıklar ile katkılanmış boyalarla yüzeylerinin boyanması sonucu yüzey iletkenliklerinde görülen artışın, yüzeyin kimyasal özelliğini nasıl etkilediğini açıklamak için numunelerin yüzey moleküler analizleri gerçekleştirildi. Numunelerin katkılı boyalar ile boyanması sonucu hem yüzey morfolojisinde hem de yüzey kimyasında farklılaşmalar oluşmuş, dolayısı ile yüzey enerjileri değişerek temas açılarında değişimler meydana gelmiştir. Yüzeyde yeni bantların oluşumunu gösteren bu durum, numunelerin yüzeyinde kimyasal bir değişimin olduğunu ve nanoparçacık katkısının yüzey kimyasında bir değişim gösterdiğini kanıtlamaktadır. Yüzeyde yeni bant oluşumuna ve katkısız numunedeki bazı bant şiddetlerinin azalması gibi etkilere sebep olan kimyasal değişimin anlaşılması ve oluşan fonksiyonel grupların incelenmesi için tüm numunelerin FTIR-ATR analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.27. N9 numunesi ile N1, N2, N3 ve N4 numunelerin FTIR-ATR spektrumlarının karşılaştırılması

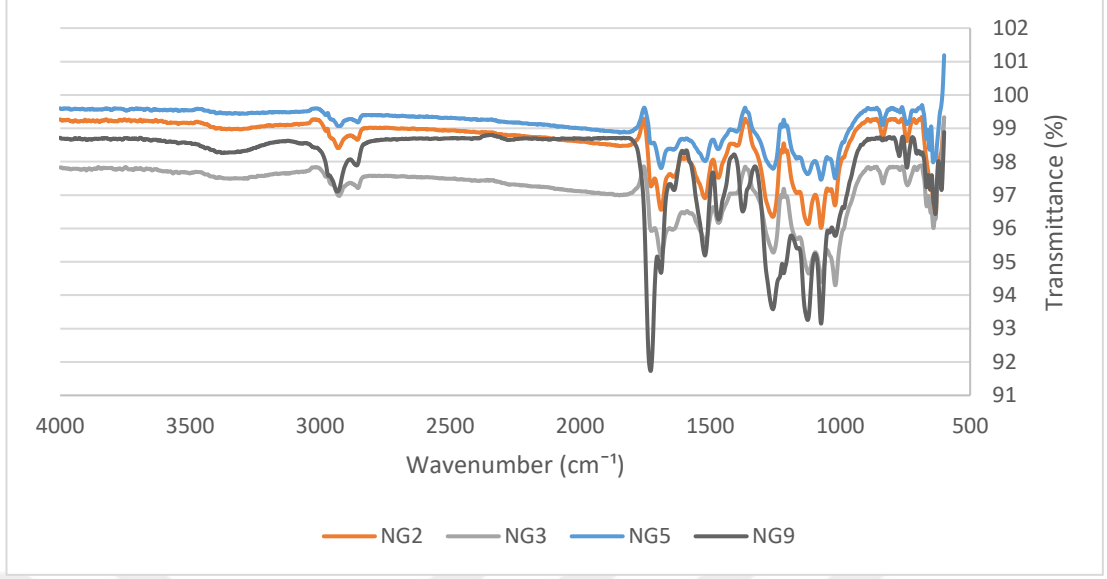
Şekil 5.27'deki FTIR-ATR grafiğinden gerilme ve eğilme titreşimlerine ait bantlar incelenmiştir. İnceleme sonucunda gözlemlenen yeni pikler, N9'a göre N1, N2, N3 ve N4'te 839 cm^{-1} 'deki pik; grafitin IR aktif pikinden gelmektedir [49] ve 1364 cm^{-1} ve 1750 cm^{-1} 'deki pikler; C=O gerilme titreşimlerine 1413 cm^{-1} 'deki pik; C=C gerilmesine ve 3000 cm^{-1} 'deki pik; C-H gerilmesine aittir. Azalan bantlarda ise

775 cm^{-1} , 1076 cm^{-1} , 1123 cm^{-1} , 1215 cm^{-1} 'deki pikler; C-O gerilme bölgesine, 1409 cm^{-1} 'deki pik; O-H düzlem içi eğilmesine, 1469 cm^{-1} 'deki pik; C-H eğilmesine, 1730 cm^{-1} 'daki pik; C=O gerilme titreşimlerine ve 2850-2970 cm^{-1} ' deki pikler; C-H gerilmesine aittir. N9'a göre N1, N2, N3 ve N4'te 3300 cm^{-1} ' deki pikte, O-H gerilme bölgesinde bant genişliği artmıştır [48,49,51,52,53,54,57,58].



Şekil 5.28. N9 numunesi ile N5, N6, N7 ve N8 numunelerin FTIR-ATR spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 5.28'deki FTIR-ATR grafiğinden gerilme ve eğilme titreşimlerine ait bantlar incelenmiştir. İnceleme sonucunda gözlemlenen yeni pikler, N9'a göre N5, N6, N7 ve N8'de 839 cm^{-1} 'deki pik; grafitin aktif pikinden gelmektedir [49]. N9'a göre sadece N5 ve N6'da 1751 cm^{-1} 'deki pik; C=O gerilme titreşimlerine ve N9'a göre sadece N5, N6 ve N7'de 1360 cm^{-1} 'deki pik; C=O gerilme titreşimlerine aittir. Azalan bantlarda ise 776 cm^{-1} 'deki pik; C=O gerilme titreşimlerine 1075 cm^{-1} , 1128 cm^{-1} , 1219 cm^{-1} ve 1263 cm^{-1} 'deki pikler; C-O gerilme bölgesine, 1370 cm^{-1} 'deki pik; C-H düzlem içi eğilmeye, 1464 cm^{-1} 'deki pik; C-H eğilmesine, 1517 cm^{-1} 'deki pik; C=C titreşimlerine, 1729 cm^{-1} 'daki pik; C=O gerilme titreşimlerine ve 2852 cm^{-1} ve 2960 cm^{-1} 'deki pikler; C-H gerilmesine aittir [47-57].



Şekil 5.29. N9 numunesi ile N2, N3 ve N5 numunelerin FTIR-ATR spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 5.29'daki FTIR-ATR grafiğinden gerilme ve eğilme titreşimlerine ait bantlar incelenmiştir. İnceleme sonucunda gözlemlenen yeni pikler, N9'a göre N2, N3 ve N5'te 839 cm^{-1} 'deki pik; grafitin aktif pikinden gelmektedir [49] ve 1360 cm^{-1} , 1741 cm^{-1} - 1768 cm^{-1} arası; C=O gerilme titreşimlerine aittir. Azalan bantlarda ise 775 cm^{-1} , 1074 cm^{-1} , 1122 cm^{-1} , 1215 cm^{-1} ve 1263 cm^{-1} 'deki pikler; C-O gerilme bölgesine, 1521 cm^{-1} 'deki pik; C=C titreşimlerine, 1730 cm^{-1} 'deki pik; C=O gerilme titreşimlerine ve 2839 cm^{-1} - 3071 cm^{-1} arası, C-H gerilmelerine aittir. N9'a göre N2, N3 ve N5'te 3300 cm^{-1} 'deki pikte, O-H gerilme bölgesinde bant genişliği artmıştır [48, 49, 51, 52, 57, 58].

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yapılan Grafen ve DWCNT katkı oranları ile (%1, %2, %3, %4) oluşturulan boyalar ile boyanmış tüm numuneler içerisinde belirlenen “Airbus Elektriksel Yüzey Direnç Ölçümü prosedüründe belirtilen $5M\Omega - 100 M\Omega$ arasında bir yüzey direnci almak” ve “Alınan yüzey direnç değerlerinin referans numunenin (N9) yüzey direnci değerinden daha düşük olması” hedeflerine N1, N2, N3 ve N5 numunelerinde ulaşılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre DWCNT'nin iletkenlik artışında Grafen'den daha etkili olduğu görülmüştür (Tablo 5.1 ve Tablo 5.2). Bu durumun hem DWCNT'nin iletkenliğinin Grafen'den daha yüksek olduğu hem de nanoparçacık boyutlarının Grafen'den daha uzun olduğu için gerçekleştiği düşünülmektedir. Elde edilen yüksek iletkenlik değerleri sayesinde uçak gövdesinde, uçak uçuşta iken sürtünmeden ve yıldırım çarpmasından dolayı oluşan statik elektrik amaçlandığı gibi uçak gövdesinden daha hızlı bir şekilde atılabilecektir. Ayrıca katkı oranı %1, %2, %3, %4 olan Grafen ve DWCNT ile katkılanarak elde edilen 8 adet yeni boya ve katkısız boya öz direnç değerleri ile ANSYS programında tanımlanmış ve ölçüm için kullanılan geometri ANSYS programında oluşturularak (Şekil 5.3) FRP malzemenin yüzeyine uygulanan boyalar geometriye uygulanmıştır. Airbus elektriksel yüzey direnç ölçümü prosedürü dikkate alınarak numune yüzeylerine 500 V DC uygulanarak her boya için toplam akım yoğunluğu analizi yapılmış, bu analiz sonucunda elde edilen değerler ile elektriksel iletkenlikler hesaplanmış ve her bir boyanın elektriksel iletkenliğinin referans numuneye göre artış gösterdiği görülmüştür. Nanoparçacık katkı oranına göre akım yoğunluğu değerlerinden hesaplanan elektriksel iletkenlik değerleri karşılaştırıldığında DWCNT etkisinin Grafen'e göre en az %31.29, en fazla %17617.61 daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. İletkenlik ile ilgili yapılan deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları incelendiğinde birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Numunelerin elektromanyetik geçirgenlikleri ile ilgili bilgi elde edebilmek için S_{11} (yansımaya katsayısı) ve S_{21} parametreleri (iletim katsayısı) ölçülmüştür. DWCNT

katkılı uçak boyası ile boyanan tüm numuneler N9 numunesi ile karşılaştırıldığında %1 DWCNT ile katkılanan uçak boyası ile boyanmış N5 numunesinin N9 numunesine göre elektriksel iletkenliğinin artmasının yanı sıra iletim katsayısı S_{21} değerinde yani elektromanyetik geçirgenliğinde 9.91 GHz'e kadar artış olduğu bu frekans değerinden sonra N5 numunesinin S_{21} değerinin N9 numunesinin S_{21} değeri ile bazı frekanslarda yakın olduğu görülürken bazı frekanslarda düşük olduğu görülmektedir. N9 numunesinin S_{21} değerininin ortalaması -15.83 dB ve N5 numunesinin ortalaması ise -15.79 dB olarak bulunmaktadır. Bu sonuçlar %1 DWCNT ile katkılanmış boya ile boyanan N5 numunesinin DWCNT ile katkılanan uçak boyası ile boyanmış numuneler arasında katkısız numune (N9) değer aralığında kalan numune olduğunu göstermektedir.

Grafen katkılu uçak boyası ile boyanan tüm numuneler N9 numunesi ile karşılaştırıldığında, N9 numunesinin S_{21} değerlerinin ortalaması -15.83 dB iken, N3 numunesinin S_{21} değerlerinin ortalaması -15.81 dB olarak bulunmaktadır. Bu durum %3 Grafen ile katkılanmış boya ile boyanan N3 numunesinin elektromanyetik geçirgenliğinin N9 numunesinin elektromanyetik geçirgenliğine çok yakın olduğunu göstermektedir. N9 numunesinin S_{21} değerlerinin ortalaması -15.83 dB iken, N2 numunesinin S_{21} değerlerinin ortalaması -15.52 dB olarak bulunmaktadır. Bu durumda %2 Grafen ile katkılanmış boya ile boyanan N2 numunesinin iletim katsayısının yani elektromanyetik geçirgenliğinin N9 numunesine göre genel olarak artış gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak Grafen ile katkılanan uçak boyası ile boyanmış numuneler arasında, bu tez çalışmasındaki elektromanyetik geçirgenlikle ilgili amaçlanan hedeflere en yakın sonucu veren numuneler N2 ve N3 numuneleridir.

Tüm numuneler karşılaştırıldığında elektriksel iletkenlik açısından referans numuneye (N9) göre en iyi sonuç veren numune %61390.68 artış oranıyla N6 numunesidir. Tüm numuneler içinde referans numunenin (N9) -15.83 dB'lik S_{21} değerine (iletim katsayısı) göre en iyi sonuç veren numune -15.52 dB'lik S_{21} değeri ile N2 numunesidir. Bu tez çalışmasında hedeflenen amaçlar doğrultusunda tüm numuneler değerlendirildiğinde yani referans numuneye göre (N9) hem elektriksel iletkenliğin (N9, $\sigma = 4.83 \times 10^{-5}$ S/m) artması hem de elektromanyetik geçirgenlikte (N9, $S_{21} = -15.83$ dB) bir değişim olmaması ya da arttırılması hedefleri doğrultusunda tüm numuneler incelendiğinde en iyi sonuçları veren numuneler sırasıyla

N2 ($\sigma = 1.68 \times 10^{-4}$ S/m, $S_{21} = -15.52$ dB), N5 ($\sigma = 1.33 \times 10^{-4}$ S/m, $S_{21} = -15.79$ dB) ve N3 ($\sigma = 4.37 \times 10^{-4}$ S/m, $S_{21} = -15.81$) numuneleridir. Maliyet açısından bu üç numuneyi değerlendirdiğimizde ise %2'lik Grafen katkısı ile oluşturulan boya ile boyanan N2 numunesinin kullanımını daha uygun olacağı görülmektedir.

Bu tez çalışmasında %1, %2, %3 ve %4 Grafen katkı oranı ile oluşturduğumuz uçak boya ile boyanan sırasıyla N1, N2, N3 ve N4 numuneleri içerisinde en yüksek iletkenliğe sahip olan numune 1.01×10^{-4} S/m değeri ile N4 numunesidir ve aynı zamanda hidrofobik bir yapıya sahip olduğu Şekil 5.26'da görülmektedir. %1, %2, %3 ve %4 DWCNT katkılama sonucu elde edilen uçak boya ile boyanmış sırasıyla N5, N6, N7, N8 numuneleri incelendiğinde N9 referans numunesine göre su temas açısının en fazla artış gösterdiği %3 DWCNT katkılı uçak boyası ile boyanmış N7 numunesinin en iyi hidrofobikliğe sahip olduğu görülmektedir. Yani N7 numunesi farklı oranlarda DWCNT katkılama sonucu elde edilen uçak boya ile boyanmış numunelerin içinde en iyi iletkenlik değerine sahip ikinci numune olurken aynı zamanda üzerine gelen suyun yayılmasını en iyi önleyen numune olduğu görülmektedir. Grafen ve DWCNT nanoparçacık katkılı uçak boyası ile boyanan numunelerin hidrofobikliği referans numunesi N9'a (katkısız boya ile boyanan) göre incelendiğinde %1 ve %4 Grafen nanoparçacık katkı oranıyla oluşturulan boyalar ile boyanmış N1 ve N4 numunelerinde ve %3 ve %4 DWCNT nanoparçacık katkı oranıyla oluşturulan boyalar ile boyanmış N7 ve N8 numunelerinde nanoparçacık katkısının hidrofobikliğe olumlu yönde etki ettiği görülmüştür.

QFRP kompozit numunelerinin Grafen ve DWCNT nanoparçacıklar ile katkılanmış boya ile boyanması sonucu yüzey iletkenliklerinde görülen artışın, yüzeyin kimyasal özelliğini nasıl etkilediğini açıklamak için numunelerin yüzey moleküler analizleri gerçekleştirildi. Numunelerin katkılı boya ile boyanması sonucu hem yüzey morfolojisinde hem de yüzey kimyasında farklılaşmalar oluşmuş, dolayısı ile yüzey enerjileri değişerek temas açılarındaki değişimler meydana gelmiştir. Yüzeyde yeni bantların oluşumunu gösteren bu durum, numunelerin yüzeyinde kimyasal bir değişimin olduğunu ve nanoparçacık katkısının yüzey kimyasında bir değişim gösterdiğini kanıtlamaktadır. Bu doğrultuda tüm numunelerin FTIR-ATR analizleri yapıldı ve bu analizler incelendiğinde katkısız boya ile boyanan numune (N9)'a göre Grafen ve DWCNT ile katkılanmış uçak boyası ile boyanan numunelerin

yüzeyinde yeni bantların oluştuğu ve bazı bant şiddetlerinin azaldığı ve bir bantta bant genişliğinin arttığı görülmüştür.

Literatürdeki katkılama işlemlerine baktığımızda bu katkılamanın kompozit üretimi esnasında kompozitin içine yapıldığını ve böylelikle iletkenliğin arttığını görmekteyiz. Bu uygulama üretim metodolojisinin değiştirilmesini gerektirir. Fakat bu çalışmada boyaya nanoparçacık katkısı ile elde edilen yeni karışımların hem daha önce üretilmiş kompozitlere uygulanabilmesi hem de elektriksel iletkenliğin artırılması konusunda Grafen ve DWCNT'nin tüm katkı oranlarında referans numuneye (katkısız boya ile boyanan – N9) göre artış göstermesi sebebiyle uygulanabilirliği daha elverişli ve kolay bir yöntemdir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre ilerleyen çalışmalarda Grafen ve DWCNT katkı oranları ile (%1, %2, %3, %4) oluşturulan boyalar ile boyanmış numunelerde katkılama oranlarının elektromanyetik soğurmaya (kalkanlamaya) etkisi incelenebilir. Katkılama sonucu elde edilen numunelerde katkı oranlarının malzeme dayanıklılığına etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] McCarthy C.T., McCarthy M.A., Composite Performance in Aerospace Structure Design, Editörler: Irving P.E., Soutis C., *Polymer Composites in The Aerospace Industry*, 1. Basım, Woodhead Publishing, 295 – 334, 2014.
- [2] Özel, D. ve Töre, C., 2007, Kompozit Uçak Yüzeyinde Elektrik İletkenliği, *Mühendis ve Makina*, **48**(566).
- [3] <https://www.sparkmeasure.com/b-104-malzeme-karakterizasyonu-yonte.html>, (Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2021).
- [4] Gloria A., Ronca D., Russo T., D'Amora U., Chierchia M., De Santis R., Nicolais N., Ambrosio L., Technical features and criteria in designing fiber-reinforced composite materials: from the aerospace and aeronautical field to biomedical applications, *J Appl Biomater Biomech*, 2011, **9** (2), 151-163.
- [5] Kaya A.İ., Kompozit Malzemeler ve Özellikleri, *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 2016, **29**, 38-45.
- [6] Structures Training Student Notebook, Composite Repair for Technicians – Block 1, BOEING.
- [7] <https://insapedia.com/kompozit-nedir-kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri/>, (Ziyaret Tarihi: 27 Mayıs 2021).
- [8] Bağatır T., Grafen Nanopartikül Takviyesinin Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 2018, 541543.
- [9] Miller, J.L., 2014, Investigation of Machinability and Dust Emissions in Edge Trimming of Laminated Carbon Fiber Composites, A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, University of Washington.
- [10] <https://insapedia.com/frp-malzeme-lif-takviyeli-polimer-kompozit-malzeme/>, (Ziyaret Tarihi: 02 Mayıs 2020).
- [11] Berkay G., Kompozit Uçak Yapılarında Elektriksel İletkenliğinin Nano Teknolojik Olarak İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015, 420534.
- [12] <https://www.build-on-prince.com/frp-reinforcement.html> , (Ziyaret Tarihi: 03 Mayıs 2020).

- [13] Günerhan A., Genç Öztoprak B., Havacılıkta Kullanılan Aa2024-T3 Alüminyum Alaşımının Lazer ile Yüzey Özelliklerinin Değiştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021, 667966.
- [14] <http://www.hitexinsulation.com/products/Quartz-Fiber-Chopped-Strands.htm>, (Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2021).
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Quartz_fiber, (Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2021).
- [16] Abbood I.S., Odaa S.A., Hasan K.F., Jasim A.M, Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – A review, *Materials Today: Proceedings*, 2021, 1003-1008.
- [17] Clingerman M.L., Weber E.H., King J.A., Schulz K.H., Development of an Additive Equation for Predicting the Electrical Conductivity of Carbon-Filled Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, **88**, 2280 –2299.
- [18] <http://www.jarrey.com/en/?product/16>, (Ziyaret Tarihi: 18 Haziran 2021).
- [19] Küçükyıldırım, B. O., Akdoğan, Eker, A. 2012. “Karbon Nanotüpler, Sentezleme Yöntemleri ve Kullanım Alanları,” *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, **53** (630), 34-44.
- [20] F.H. Gojny, M.H.G. Wichmann, B. Fiedler, W. Bauhofer, K. Schulte, Influence of nano-modification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites, *Compos A*, 2005, **36**,1525-1535.
- [21] Suherman H., Sahari J., Sulong A.B., Electrical Properties of Carbon Nanotubes-Based Epoxy Nanocomposites for High Electrical Conductive Plate, *Advanced Materials Research*,2011, Vols. **264-265**, 559-564, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.559.
- [22] Han S., Meng Q., Araby S., Liu T., Demiral M., Mechanical and electrical properties of graphene and carbon nanotube reinforced epoxy adhesives: Experimental and numerical analysis, *Composites Part A*, 2019, **120**, 116-126.
- [23] Atay H. Y., A Comparison On Radar Absorbing Properties Of Nano And Micro Scale Barium Hexaferrite Powders Reinforced Polymeric Composites, *Mugla Journal of Science and Technology*, 2016, **2**, 88-92.
- [24] Yurduseven K.M., Quartz Fiber Takviyeli Kompozit Uçak Radom Malzemesinin Katı Partikül Erozyon Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2017, 494776.
- [25] <https://www.muhendisbeyinler.net/ucak-yapiminda-kullanilan-malzemeler/> , (Ziyaret Tarihi: 01 Haziran 2021).
- [26] <https://www.flightglobal.com/creating-a-titan/60787.article>, (Ziyaret Tarihi: 07 Mayıs 2020).

- [27] İnce S., Yıldırımın Uçaklara Etkileri Ve Korunma Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003, 142921.
- [28] Kışeci E. C., Salamcı E., Uçak-Yıldırım Etkileşimi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2020, **Özel Sayı**, 177-187.
- [29] Çor İ., Çok Geniş Bantlı Doğrudan Beslenmiş Radomlu Çift Konik Anten Analiz ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018, 493901.
- [30] Yu H., Jiang Y., Lu Y., Li X., Zhao., Ji Y., Wang M., Quartz fiber reinforced Al₂O₃-SiO₂ aerogel composite with highly thermal stability by ambient pressure drying, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, **505**, 79-86.
- [31] Wang F., Wang Y., Influence of cryogenic cooling on milling hole exit of QFRP based on thermal-mechanical coupling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, **110**, 1113-1124.
- [32] <https://www.quartz.saint-gobain.com/products/quartzel> (Ziyaret Tarihi: 4 Haziran 2021).
- [33] <https://shop.nanografi.com.tr/karbon-nanotup/>(Ziyaret Tarihi: 4 Haziran 2021)
- [34] <https://shop.nanografi.com.tr/cift-duvarli-karbon-nanotup-safl-k-65/> (Ziyaret Tarihi: 4 Haziran 2021).
- [35] Derradji M., Jun W., Wenbin L., Fiber-Reinforced Phthalonitrile Composites, *Phthalonitrile Resins and Composites*, 1st ed., William Andrew, 241-294, 2018.
- [36] Mubarak E.M.M., Al-Kalali R.R.M., Husein E.A., Mahdi B.S., Mechanical Properties of Chopped E-Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin, *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2020, **43**(2), 247-256.
- [37] Muley P., Varpe S., Ralwani., Chopped Carbon Fibers Innovative Material for Enhancement of Concrete Performances, *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*, 2015, **1**(4), 164-169.
- [38] Eneyew E.D., Experimental Study of Damage and Defect Detection during Drilling of CFRP Composites, Doctor of Philosophy, University of Washington, 2014.
- [39] Nayak C.B., Experimental and numerical investigation on compressive and flexural behavior of structural steel tubular beams strengthened with AFRP composites, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2021, **33**, 88-94.
- [40] <https://shop.nanografi.com.tr/grafen/> (Ziyaret Tarihi: 01 Temmuz 2021).

- [41] Kişeci E. C., Salamcı E., Uçak-Yıldırım Etkileşimi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2020, (Özel Sayı), 177-187.
- [42] Zhou L., Wang P., Pei Y., Zeng A., Tang L., Liu Z., Liu Y., J Zhenyu., Fang D., Design and characterization for dual-band and multi-band A-sandwich composite radome walls, *Composites Science and Technology*, 2017, **149**, 28-33.
- [43] Alpay O., Görünür Bölgede Geçirgen, Rf Kalkanlama Yapabilen Çok Katmanlı İnce Film Kaplamalarının Tasarlanması Ve Sayısal Hesaplamalı Çözümlemes, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019, 595390.
- [44] Açıkbaş G., Kayalı M.B., Açıkbaş N.Ç., Porselen Karo Yüzey Modifikasyonu, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2021, **9**(1), 240 – 254.
- [45] Mpukuta M.O., Investigation Of Electrical Conductivity Of Nanofibers (Pan) Containing Nanoparticles (Graphene, Copper, Silica) Produced By Electrospinning Method, Master of Science Thesis, Selcuk University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Konya, 2018, 499506.
- [46] Hameed N., Thomas S.P., Abraham R., Thomas S., Morphology and contact angle studies of poly(styrene-co-acrylonitrile) modified epoxy resin blends and their glass fibre reinforced composites, *eXPRESS Polymer Letters*, 2007, **1**(6), 345–355.
- [47] Ahmed A.S., Umran A.F., Ahmed D.S., Functionalization of single and multi-walled carbon nanotubes by chemical treatment, *Iraqi Journal of Physics*, 2018, **16**(39), 55-63.
- [48] Sudesh B., Kumar N., Das S., Bernhard C., Effect of Graphene Oxide Doping On Superconducting Properties of Bulk MgB₂, *Superconductor Science And Technology*, 2013, **26**, DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/26/9/095008>
- [49] Sbai K., Rahmani A., Chadli H., Bantignies J.L., Hermet P., Sauvajol J.L., Infrared Spectroscopy of Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. B*, 2006, **110**, 12388-12393.
- [50] Menezes B.R.C., Ferreira F.V., Silva B.C., Simonetti E.A.N., Bastos T.M., Cividanes L.S., Thim G.P., Effects of octadecylamine functionalization of carbon nanotubes on dispersion, polarity, and mechanical properties of CNT/HDPE nanocomposites, *Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature* 2018, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2627-3>.
- [51] Salam M.A., Burk R., Synthesis and characterization of multi-walled carbon nanotubes modified with octadecylamine and polyethylene glycol, *Arabian Journal of Chemistry*, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.12.028>.

- [52] Cividanes L.S., Brunelli D.D., Antunes E.F., Corat E.J., Sakane K.K., Thim G.P., Cure Study of Epoxy Resin Reinforced with Multiwalled Carbon Nanotubes by Raman and Luminescence Spectroscopy, *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, DOI: 10.1002/APP.37815.
- [53] Ali S.H.R., Etman M.A., Azzam B.S., Rashad R.M., Bedewy M.K., Advanced Nanometrology Techniques Of Carbon Nanotubes Characterization, *Metrology And Measurement Systems*, 2018, **15**(4), 551-561.
- [54] Alam A.K.M.M., Beg M.D.H., Yunus R.M., Micro Structure and Fractography of Multiwalled Carbon Nanotube Reinforced Unsaturated Polyester Nanocomposite, *Polymer Composites*, 2016, DOI 10.1002/pc.23911.
- [55] Moraes M.B., Cividanes L., Thim G., Synthesis of Graphene Oxide and Functionalized CNT Nanocomposites Based on Epoxy Resin, *J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos*, 2018, DOI: 10.5028/jatm.v10.944.
- [56] Liao L., Pan C., Enhanced Electrochemical Capacitance of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes Synthesized from Amine Flames, *Soft Nanoscience Letters*, 2011, **1**, 16-23.
- [57] Prof. Dr. Bilsen Beşergil: IR Spektrumlar; Organik Fonksiyonel Grupların Tanımlanması (definition of functional groups) (bilsenbesergil.blogspot.com), (Ziyaret Tarihi: 09 Temmuz 2021).
- [58] Yakymchuk O.M., Perepelytsina O.M., Dobrydnev A.V., Sydorenko M.V., Effect of single-walled carbon nanotubes on tumor cells viability and formation of multicellular tumor spheroids, *Nanoscale Research Letters a SpringerOpen Journal*, 2015, 10:150, DOI 10.1186/s11671-015-0858-7.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Gül N.**, Genç Öztoprak B., Fiber Takviyeli Polimer (FTP) Kompozit Malzemelerin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, *5. Uluslararası 19 Mayıs Yenilikçi Bilimsel Yaklaşımlar Kongresi*, Samsun, Türkiye, 19 Mayıs, 2021



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2002 yılında girdiği Anadolu Üniversitesi, Bilecik Meslek Yüksekokulu Elektronik Haberleşme programından 2004 yılında mezun oldu. 2006 yılında girdiği Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden 2010 yılında mezun oldu. 2010 – 2013 yıllarında meslek liselerinde teknik öğretmen olarak görev aldı. 2013 yılında Almanya, Münih'te bulunan bir havacılık eğitim firmasında Modul 3 (Elektrik Temelleri) ve Modul 4 (Elektronik Temelleri) eğitimleri alarak EASA (European Aviation Safety Agency) onaylı sertifika aldı ve Türkiye'de Modul 3 ve Modul 4 eğitimleri vermeye devam etmektedir. 2014 – 2017 yılları arasında özel bir havacılık lisesinin Uçak Bakım bölümünde öğretmen olarak görev aldı. 2018 yılı Eylül ayından itibaren İstanbul Gelişim Üniversitesi'nin Uçak Teknolojisi programında öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. 2019 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Havacılık Bilimi ve Teknolojileri tezli yüksek lisans programından 2021 yılında mezun oldu.