



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**KARBON, DEMİR VE MANGANOKSİT
KATKILI POLİMER
KOMPOZİTLERİN RADAR SOĞURMA
KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI**

İpek ALIŞKIN

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OCAK 2023



**KARBON, DEMİR VE MANGANOKSİT KATKILI POLİMER
KOMPOZİTLERİN RADAR SOĞURMA KABİLİYETİNİN
ARAŞTIRILMASI**

İpek ALIŞKIN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

Ocak 2023

İpek ALIŞKIN tarafından hazırlanan “KARBON, DEMİR VE MANGANOKSİT KATKILI POLİMER KOMPOZİTLERİN RADAR SOĞURMA KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Hakan ATEŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 25/01/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

İpek ALIŞKIN

25/01/2023

**KARBON, DEMİR VE MANGANOKSİT KATKILI POLİMER KOMPOZİTLERİN
RADAR SOĞURMA KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

İpek ALIŞKIN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Radar gözlemine karşı kamufle uygulaması için askeri alanda kullanılmak üzere üretilen hafif, ince ve elektromanyetik dalga soğurma etkinliği yüksek olan Radar Absorpsiyon Malzemelerine (RAM) son zamanlarda ilgi artmaktadır. Bu malzemelerin aynı zamanda kaplama olarak kullanılmaları çok yaygın olmaktadır. Hava araçları, yer savaş araçları gibi gizlenme özelliği istenen araçlarda bu tür malzemelerin geliştirilmesinde yeni teknolojiler ve yeni malzemelerin bir araya getirilmesi gerekmektedir.

Yapılan çalışmada poliüretan boya ve farklı takviye (demir, manganoksit ve karbon) elemanlarının kombine edilmesiyle elde edilen kompozit kaplamaların, Radar dalgası soğurma özelliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Hali hazırda konu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır ancak bu çalışmada ise kullanılan yöntem ile uygulanabilirliğin kolay olması ve aynı zamanda, hafif ve ince kompozit kaplamanın üretilmesi üzerinde durulmuştur. Deneysel numuneler, poliüretan boyaya eklenen, farklı oranlardaki mikron altı boyuttaki tozların homojen karıştırılması sonucu, sprey kaplama yöntemi kullanılarak, metal (Alüminyum) altlık yüzeyinin kaplanması ile elde edilmiştir. Kat kat kaplama(boya) uygulaması ile farklı geçirgenlik değerleri aranmıştır. Poliüretan boyanın termal analizi HITACHI/ NEXT STA300 marka, TGA/DSC ile ölçülmüştür. Numunelerin X bandı (3-18 GHz) elektromanyetik özellikleri, KEYSIGHT marka Agilent 2-Port PNA-L Network Analizörü ile ölçülmüştür. SEM analizi sonucunda, Fe tozlarının morfolojisinin ligoman türü iğnemsî yapıda ve keskin uçlu, C tozlarının ise grift şeklinde keskin köşeli, MnO₂' in morfolojisinin küresel formda olup olduğu gözlemlendi. Network analizi sonucu, tek kat boya uygulamasında C için yapılan analizde en yüksek absorpsiyon değerleri belirli frekans bantlarında 1C10 numunesi kullanılarak elde edilmiştir. Düşük absorpsiyon değerlerine sahip numunelerde ise boya istenilen yapışma şartını sağladığından dolayı radom boyası olarak kullanılabilmesi öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Radar absorpsiyon malzemeler (RAM), poliüretan, nano tozlar, sprey kaplama yöntemi, manganoksit, demir, karbon

Sayfa Adedi : 65

Danışman : Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

INVESTIGATION OF THE RADAR ABSORPTION CAPABILITY OF CARBON,
IRON AND MANGANOXIDE DOPED POLYMER COMPOSITES
(Master's Thesis)

İpek ALIŞKIN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

January 2023

ABSTRACT

Recently, there has been an increasing interest in Radar Absorption Materials (RAM), which are light, thin and have high electromagnetic wave absorption efficiency, which are produced for use in the military field for camouflage application against radar observation. It is very common for these materials to be used as coatings at the same time. New technologies and new materials need to be brought together in the development of such materials for vehicles that require concealment, such as aircraft and ground combat vehicles. In this study, it was aimed to examine the radar wave absorption properties of composite coatings obtained by combining polyurethane paint and different reinforcement (iron, manganese oxide and carbon) elements. Many studies have already been carried out on the subject, but in this study, it is emphasized that the method used is easy to apply and at the same time, the production of light and thin composite coating. Experimental samples were obtained by coating the metal (Aluminum) substrate surface by using the spray coating method as a result of homogeneously mixing submicron powders in different proportions added to the polyurethane paint. Different permeability values were sought with layer by layer coating (paint) application. Thermal analysis of polyurethane paint was measured with TGA/DSC, brand HITACHI/NEXT STA300. The X band (3-18 GHz) electromagnetic properties of the samples were measured with KEYSIGHT brand Agilent 2-Port PNA-L Network Analyzer. As a result of SEM analysis, it was observed that the morphology of Fe powders was in the form of ligamentous needle-like and sharp-edged, while the morphology of MnO₂ was spherical, while C powders were in the form of intricate sharp edges. As a result of the Network analyzer, the highest absorption values in the analysis for C in one coat paint application were obtained by using the 1C10 sample in certain frequency bands. It is predicted that it can be used as a radome paint in samples with low absorption values, since the paint provides the desired adhesion condition.

Key Words : Radar absorption materials (RAM), polyurethane, nano powders,
spray coating method, manganoxide, iron, carbon.
Page Number : 65
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ersin BAHCECİ

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında fikirler verip beni yönlendiren, zorluklar karşısında telkinleriyle beni cesaretlendirip büyük destek veren, değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ' ye, maddi, manevi desteği ve sabrı için çok teşekkür ederim.

Birlikte çalışma fırsatı bulduğum, bilgi ve tecrübesiyle çalışmaya sağladığı katkılar ile desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL' e desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

En büyük destekçilerim ailem, babam Nazım ALIŞKIN, annem Cemile ALIŞKIN, kardeşlerim İlknur ALIŞKIN ve İrem ALIŞKIN, yardımları ve sabırları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. MALZEMELERDE DÜŞÜK GÖRÜNEBİLİRLİK ve GÖRÜNMEMEZLİK (RADAR GİZLİLİĞİ)	3
3. RADAR SOĞURUCU MALZEMELER	5
4. RAM'lerin SINIFLANDIRILMASI.....	10
4.1. Manyetik Soğurucular	10
4.1.1. Fe esaslı manyetik soğurucular	10
4.2. Dielektrik Soğurucular	11
4.2.1. MnO ₂	12
4.2.2. Karbon ve allotropları	15
5. POLİMERLER ve POLİMER TÜRLERİ	28
5.1. Polimerlerin Yapıları	28
5.2. Polimer Sentezi ve Prosesleri	28
5.2.1. Kondenzasyon polimerleri	29
5.2.2. Katılma polimerizasyonu	29
5.3. Termoplastik ve Termoset Polimerler	29
5.3.1. Termoplastik polimerler.....	30
5.3.2. Termoset polimerler.....	30
5.4. Poliüretan (PU)	31
5.4.1. Poliüretanın temel kimyası.....	34
5.5. Polimer Kaplama Yöntemleri.....	39

5.5.1. Sprey kaplama	40
5.5.2. Daldırarak kaplama.....	40
5.5.3. Spin (Döndürmeli) kaplama.....	41
5.5.4. Eriyik döküm.....	42
6. HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN BOYALAR	43
6.1. Boya Formülasyonları.....	43
6.1.1. Bağlayıcılar	43
6.1.2. Pigmentler	43
6.1.3. Solventler	44
6.1.4. Katkı maddeleri	44
6.2. Boya Uygulamaları.....	44
6.2.1. Epoksi astarlar	44
6.2.2. Asitleme/yıkama astarları	45
6.2.3. Son katlar.....	45
7. MATERYAL YÖNTEM.....	47
7.1. Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar.....	47
7.2. Yöntem.....	47
8. DENEYSEL BULGULAR.....	51
8.1. TGA/DSC Analiz Sonuçları.....	51
8.2. SEM Analiz Sonuçları	53
8.3. Network Analiz Sonuçları.....	54
9. SONUÇ.....	58
10. KAYNAKLAR	60

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. a) Elektromanyetik spektrum aralıklarına karşılık gelen frekans bantlarının ortak tanımı. b) Modern toplumda yaygın olarak uygulanan çeşitli mikrodalga ve terahertz cihazları	3
Şekil 3.1. Hedefin tespit edilmesini içeren faktörlerin şematik gösterimi	5
Şekil 3.2. Elektromanyetik dalgaların soğurma ve yansımalarının şematik gösterimi ...	7
Şekil 3.3. a) Dalga kılavuzu ve koaksiyel hat yöntemleri analizi için cihazın şematik gösterimi. b) Elektromanyetik dalgaların, yüksek iletkenliğe sahip alüminyum levha ile desteklenen çok katmanlı soğurucu üzerinde yayılmasının şematik diyagramı. c,d) Yansıma ve iletim ölçümü için boş alan yönteminin şematik gösterimi.....	8
Şekil 3.4. Etkili ortam modeli (a) karşılıklı yapı, (b) karşılıklı olmayan yapı	8
Şekil 4.1. sp^3 , sp^2 ve sp^1 bağ hibridizasyonlarının şematik görünümü. Gölgelemeyen loblar güçlü bağları ve gölgeli loblar zayıf bağları gösterir	16
Şekil 4.2. Karbon atomlarının farklı dizilimlerdeki yapıları	16
Şekil 4.3. Grafenin farklı dizilim şekilleri.....	17
Şekil 4.4. Bir karbon atomunun atomik yörünge diyagramı. Çift dolu küresel 2s orbitalinde dört elektron ve yarı dolu 2p orbitalleri, karbonun kimyasal bağlanmasına katılır. (a) Temel durum, (b) elmasta olduğu gibi hibritlenmiş sp^3 ve (c) grafit ve grafende olduğu gibi sp^2 hibritlenmiş	17
Şekil 4.5. Grafenin yapısının şematik gösterimi	18
Şekil 4.6. (a) tek duvarlı karbon nanotüp, (b) çift duvarlı karbon nanotüp ve (c) çok duvarlı karbon nanotüp şematik gösterimi.....	19
Şekil 4.7. Bir karbon nanotüp oluşturmak için bir grafen tabakasının nasıl "yuvarlandığını" gösteren şematik diyagram. Yarı iletken karbon nanotüpler boş dairelerle ve iletkenler yıldızlarla temsil edilir. (a) bir koltuk, (b) zikzak ve (c) kirali nanotüplerin şematik modeli	20
Şekil 4.8. a) Grafen katmanları arasındaki mesafe, b) C-C bağı arası uzaklık	23
Şekil 4.9. a) Dirac noktalarında buluşan iletkenlik, b) değerlik bantlarını gösteren grafenin bant yapısı	23
Şekil 4.10. Grafitten grafenin mekanik soyulma yöntemiyle elde etme aşamaları	24
Şekil 4.11. Kimyasal eksfoliasyon sürecinin şematik gösterimi. Grafit, potasyum metali ile karıştırıldıktan sonra bir karbon levha dispersiyonu oluşturmak için etanol (EtOH) ile eksfoliasyonu gerçekleştir	25

Şekil 4.12. Grafitten indirgenmiş grafen oksit elde etme aşamaları.....	26
Şekil 4.13. Grafen tabakalarının CVD yöntemi ile elde edilmesinin şematik gösterimi	27
Şekil 4.14. Grafenin SiC üzerinde epitaksiyel büyümesi şematik gösterimi	27
Şekil 5.1. Üretan bağı oluşumu.	31
Şekil 5.2. Aromatik izosiyanatların rezonans hali	36
Şekil 5.3. Alifatik izosiyanatların rezonans hali	36
Şekil 5.4. Polieter polioliol oluşum reaksiyonu	37
Şekil 5.5. Poliester polioliol oluşum reaksiyonu	37
Şekil 5.6. Polimer Kaplama Teknikleri	39
Şekil 5.7. Substrat üzerine sprey kaplama tekniği	40
Şekil 5.8. Katı cisim üzerine daldırma kaplama tekniği	41
Şekil 5.9. Substrat üzerinde spin kaplama	41
Şekil 5.10. Eriyik döküm tekniği	42
Şekil 7.1. Farklı oranlarda hazırlanan boya ve kod karşılığının şematik gösterimi	48
Şekil 7.2. Al plaka yüzeyine uygulanan ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarına sahip plakaların görselleri.....	49
Şekil 7.3. a) Toz numunelerin dalga kılavuzu yöntemiyle (8-12 GHz) test edilmesi. b) Plakaların, iletilen ve yansıyan sinyallerinin (3-18 GHz) analiz edilmesi.....	49
Şekil 7.4. Karbon katmanına ikinci kat uygulanan boyanın oranları.....	50
Şekil 8.1. Komponent A'nın TGA-DSC analiz sonuçları	51
Şekil 8.2. Komponent A ve komponent B karışımının TG-DSC analizi sonuçları.....	52
Şekil 8.3. a) Fe, b) Karbon, c) MnO ₂ tozlarına ait SEM görüntüleri	53
Şekil 8.4. Saf boyanın (Bileşen A+B ile tiner karışımı) a)10 000x b)20 000x büyütmedeki SEM görüntüleri	54
Şekil 8.5. a) C, b) MnO ₂ c) C+MnO ₂ takviye tozları ile hazırlanmış poliüretan boyanın alüminyum plaka yüzeyine tek katman uygulanması sonucu elde edilen X bandına ait absorpsiyon sonuçları	55

- Şekil 8.6.** a) İlk kat MnO_2 ikinci kat C, b) İlk kat C ikinci kat MnO_2 , c) İlk kat MnO_2+C ikinci kat C ile kombine edilmiş plakalara ait X bandı absorpsiyon sonuçları 56
- Şekil 8.7.** Birinci kata %10 derişimindeki C, MnO_2 , C+ MnO_2 tozları eklenerek boyanmış Al plakalara, ikinci kat olarak %10 Fe tozu kullanılarak hazırlanan poliüretan boya uygulaması sonucunda elde edilen X bandı absorpsiyon sonuçları 57



TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Radar frekansı harf bandı terminolojisinin ITU terminolojisi ile karşılaştırılması.....	4
Tablo 7.2. Al yüzeyine tek kat uygulanan boya içerisine farklı oranlarda kullanılan tozların karışım oranları ve plaka kodları.....	47
Tablo 7.3. Al yüzeyine ikinci kat uygulanan boya içerisine farklı oranlarda kullanılan tozların karışım oranları ve plaka kodları.....	50



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
\AA	Angström
$A(\omega)$	Absorpsiyon
A_e	Alıcı antenin açıklığı
c	Işık hızı
cm^2	Santimetrekare
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
dB	Desibel
GHz	Gigahertz
g	gram
GPa	Gigapaskal
G_t	Verici anten yükselteci
kN	Kilonewton
L	Litre
mg	Miligram
MHz	Megahertz
min	Dakika
mJ	Mili joule
mm	Mili metre
μm	Mikro metre
MPa	Megapaskal
N	Newton
nm	Nano metre
P_r	Geri dönen güç
P_t	Verici gücü
R	Hedef ve radar arasındaki mesafe
$R(\omega)$	Yansıyan Dalga
$T(\omega)$	İletilen Dalga
t	Süre
σ	Hedefin Radar kesiti

Kısaltmalar**Açıklamalar**

Al	Alüminyum
C	Karbon
CNT	Karbon nanotüp
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DWCNT	Çift duvarlı karbon nanotüp
EtOH	Etanol
Fe	Demir
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği
MnO ₂	Mangan oksit
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
PS	Polistiren
PU	Poliüretan
RADAR	Radyo ile Tespit ve Menzil Tayini
RAM	Radar Absorpsiyon Malzemeleri
RCS	Radar Kesiti
RGO	Redüklenmiş Grafen Oksit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
SiC	Silisyum karbür
SWCNT	Tek duvarlı karbon nanotüp
TGA	Termogravimetrik Analiz
XRD	X-Işını Kırınım yöntemi
VAA	Vektör Ağ Analizörü

1. GİRİŞ

Gizli teknoloji, günümüz savaş alanında, düşmanlara yakalanmadan hareket edebilmek, askeri taktiklerde görünmez olmak için her zaman gereklilik olmuştur (Kumar & Vadera, 2017). Silahlı kuvvetlerin, özellikle uçak kaynaklarının, elektromanyetik spektrumda çalışan düşman sensörlerinin, gözetlemeden kaynaklanan tehditlerine karşı koyması, özellikle radarlardan gizlenmesi hayati önem taşımaktadır. Bu durum görev başarısını etkilerken, aynı zamanda savaş alanında beka kabiliyetini ve operasyonel etkinliğini büyük ölçüde arttırmaktadır.

Askeri alanda uçağın görünmezlik performansı, rakibin tespit sensörleri tarafından algılanmadan, yüksek irtifalarda, sürekli uçuşlar için yüksek manevra kabiliyetine sahiptir. Askeri uçaklara emici malzemelerin uygulanması, radar, kızılötesi, görünür sensörler gibi farklı tespit sensörleri tarafından yayılan elektromanyetik dalgaların daha az algılanmasını sağlamaktadır.

Radarlar, mikrodalgaların ve radyo dalgalarının, küçük varyanttan yüksek varyantlara kadar geniş frekans bantlarında çalıştıkları için en önemli tehditlerden birisidir. (Jayalakshmi ve diğerleri, 2019). Bu rejimlerdeki algılama ve yakalama teknolojilerindeki hızlı gelişmeler aynı teknolojiye karşı önlemler olarak elektromanyetik dalgaların çok bantlı olması gerekliliğini artırmıştır. Bu nedenle, kaplama yöntemiyle uygulanan emici malzemeler, bir hedefin optik, termal, kızılötesi ve radar imzalarını minimize ederek görünmezlik performansını arttırmaktadır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ilgili alanlarda, son zamanlarda elektromanyetik girişim sorunlarının artması ve askeri platformların gizli savunmadaki önlemleri nedeniyle, radar soğurucu malzemelere ilgi artmıştır. Literatürde konu ile ilgili birçok çalışma belirtilmiştir. Malzemede, radar soğurma özellikleri genel olarak, dielektrik özellik, manyetik özellik, düşük yoğunluk, kalınlık ve frekans aralığı gibi özellikleri üzerine çalışmalar mevcuttur. Genel olarak yapılan çalışmalar sonucu, radar absorpsiyonu için kullanılan ürünlerin, düşük yoğunluk, termal kararlılık, elektrik iletkenliği gibi özelliklerin kombine edilmesiyle

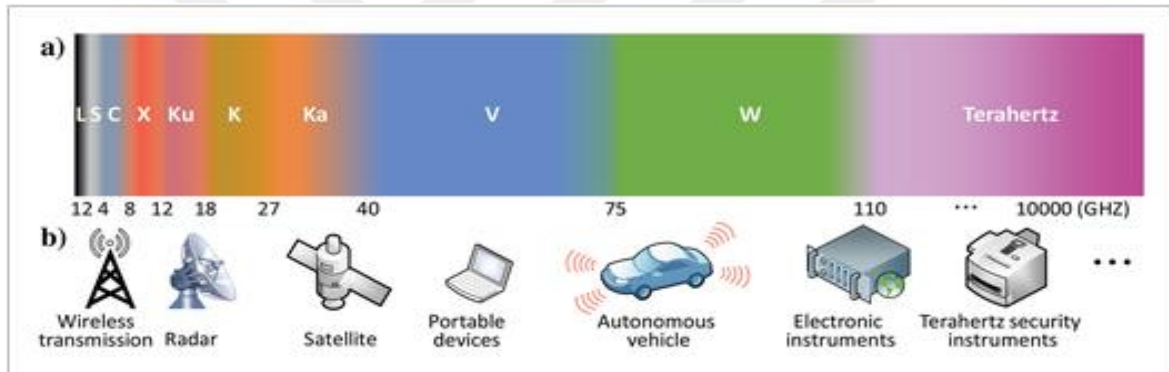
yüksek performanslı radar dalgalarını soğurucu malzemelerin güçlendirilmesinde, önemli rolleri olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, kullanılacak takviye elemanları ile birlikte kaplama katmanlarının optimize edilmesi ve buna bağlı olarak radar dalgalarını soğurma yeteneğinde meydana gelebilecek değişikliklerin incelenmesi amaçlanmaktadır. Farklı derişimlerdeki çeşitli takviye elemanlarının boyutuna bağlı olarak, sprej kaplama yöntemi ile yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilecektir. Kaplamanın radar absorpsiyon özelliği Network analizi (3-18 GHz) ile incelenecektir.



2. MALZEMELERDE DÜŞÜK GÖRÜNEBİLİRLİK ve GÖRÜNMEMEZLİK (RADAR GİZLİLİĞİ)

Metaller, askeri araç, silah ve teçhizatın ana yapı malzemeleri olduğundan dolayı Radyo Tespit ve Menzil (RADAR) sistemleri ile hedef kolayca belirlenir ve tespit edilebilir. Radarlar, nesnelerin tespit edilip, yönü, yüksekliği, hızlarının belirlenmesi ve konumlandırılması için radar sinyallerinden yararlanan sistemler oluştururken, farklı çalışma koşullarında yüksek bir frekans aralığında çalışabilmektedir (Kolanowska ve diğerleri, 2018). Şekil 2.1’de elektromanyetik frekans aralıkları ve bu aralıklarda kullanılan cihazlar verilmiştir (Chen ve diğerleri, 2019). Tablo 2.1’de ise Radar frekansı harf bandı terminolojisi verilmektedir (IEEE Standard Letter Designations, 2019).



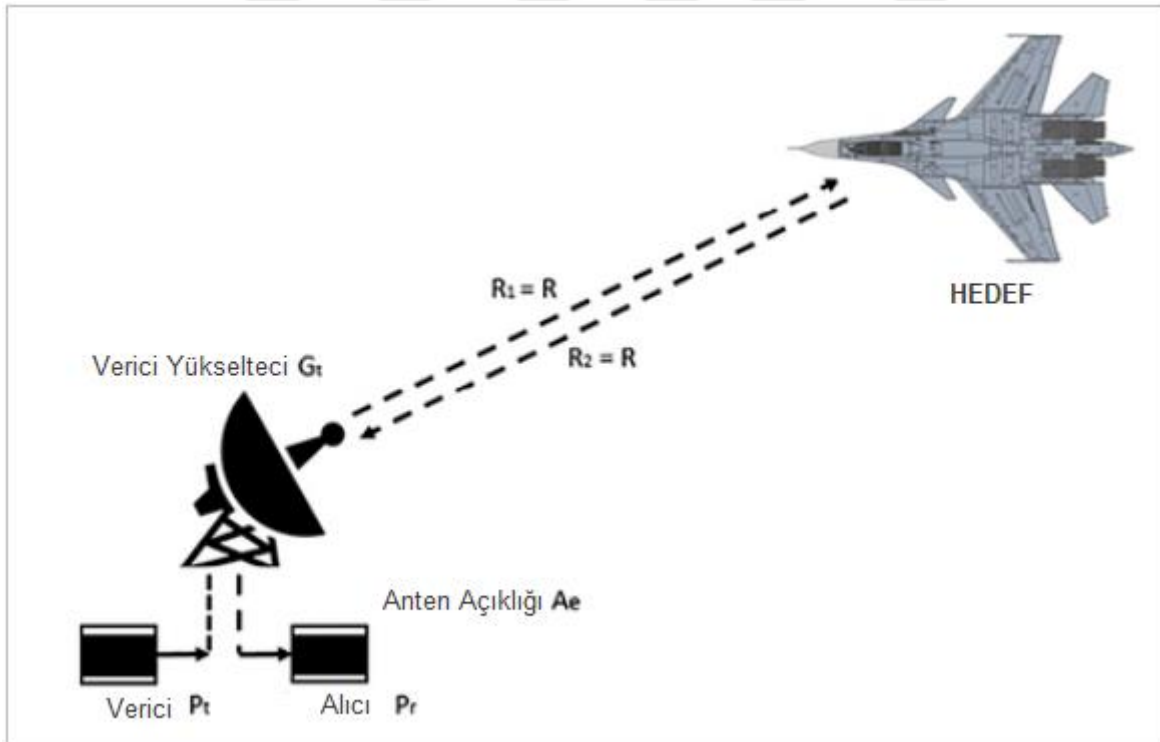
Şekil 2.1. a) Elektromanyetik spektrum aralıklarına karşılık gelen frekans bantlarının ortak tanımı. b) Modern toplumda yaygın olarak uygulanan çeşitli mikrodalga ve terahertz cihazları

Tablo 2.1. Radar frekansı harf bandı terminolojisinin ITU terminolojisi ile karşılaştırılması

Radar frekansları			ITU frekansları			
Radar Harf Tanımı	Frekans Aralığı	Kullanım Alanları	Frekans Aralığı	Bant No.	Bant Niteliği	Karşılık Gelen Metrik Adı
HF	3 MHz ile 30 MHz		3 MHz ile 30 MHz	7	Yüksek Frekans	Dekametrik Dalgalar
VHF	30 MHz ile 300 MHz	Çok uzun menzilli gözetimler	30 MHz ile 300 MHz	8	Çok Yüksek Frekans	Metrik Dalgalar
UHF	300 MHz ile 1000 MHz	Balistik füze erken uyarı	0.3 GHz ile 3 GHz	9	Ultra Yüksek Frekans	Desimetrik Dalgalar
L	1 GHz ile 2 GHz	Hava trafik kontrolü				
S	2 GHz ile 4 GHz	Hava durumu radarı				
C	4 GHz ile 8 GHz	Aktarıcı	3 GHz ile 30 GHz	10	Süper Yüksek Frekans	Santimetrik Dalgalar
X	8 GHz ile 12 GHz	Deniz ve hava alanı radarı				
K_u	12 GHz ile 18 GHz	Uydu alıcıları				
K	18 GHz ile 27 GHz	Hava durumu ve fotoğraf radarı	30 GHz ile 300 GHz	11	Son Derece Yüksek Frekans	Milimetrik Dalgalar
K_a	27 GHz ile 40 GHz	Fotoğraf radarı				

3. RADAR SOĞURUCU MALZEMELER

RAM'ler geniş radyo dalgaları frekanslarında güçlü absorpsiyon katsayısı, hafiflik, basit üretim yöntemi ve amaca uygun nihai montaj istenen diğer kritik özelliklerdendir. Fakat bu özelliklerin tümünü bir malzemede birleştirmek zor olmaktadır. İletken katkı maddeleri içeren polimer bileşiklerin, metallere göre birçok avantajı vardır. Metaller, en yaygın koruyucu malzemelerdir fakat yoğunluklarının ve maliyetlerinin yüksek olması, kolay oksitlenebilirliği ve kimyasal reaksiyonlar sonucu zamanla iletkenliğin düşmesine sebep olabilmektedir. Polimerler ise daha düşük ağırlıkları, yalıtkanlıkları, esnekliği, düşük maliyet ve tasarım özgürlüğü gibi avantajlarından dolayı matrisler, işlenebilir polimerlerden oluşturabilir. İletken polimer kompozitler, daha hafif ağırlık, yüksek korozyon direnci ve daha düşük maliyet gibi iyi bilinen avantajlara sahiptir (Al-Ghamdi & El-Tantawy, 2010;Kolanowska ve diğerleri, 2018).



Şekil 3.1. Hedefin tespit edilmesini içeren faktörlerin şematik gösterimi

Şekil 3.1' de bir hedefin tespitinde yer alan faktörlerin şematik gösterimini açıklar (Ahmad ve diğerleri, 2019). Bir radarın çalışma prensibi elektromanyetik enerji sinyallerini, bir cisim ile karşılaşınca kadar, hareket halindeki hedef yönünde göndererek, nesnelerin tespit edilmesini sağlar (Ahmad ve diğerleri, 2019). Bunun sonucunda belirli bir enerji darbesiyle, hedefi tespit edip ve radara geri dönmesi için geçen süreyi ölçer. Aşağıdaki denklem 3.1 ve denklem 3.2, hedef ve radar arasındaki mesafeyi belirlemek için kullanılır (Ahmad ve diğerleri, 2019):

$$R = \frac{ct}{2} \quad \text{Denklem 3.1}$$

Burada R = hedef ve radar arasındaki mesafe; c = ışık hızı ve; t = hedefe çarptıktan sonra enerji darbesinin radara geri dönmesi için geçen süredir.

Radarın temel denklemi şu şekilde tanımlanır:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times A_e \quad \text{Denklem 3.2}$$

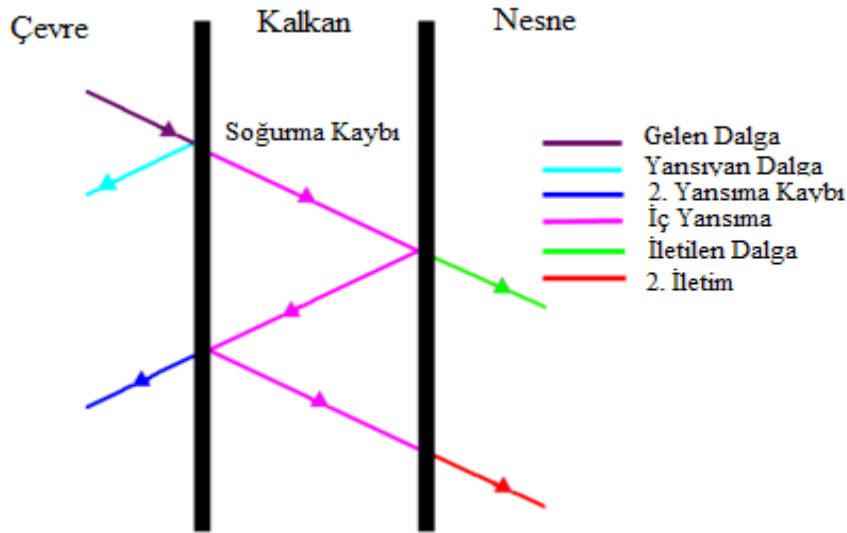
Burada P_r = geri dönen güç; P_t = verici gücü; G_t = verici anten yükselteci; R = hedef ve radar arasındaki mesafe; σ = hedefin RCS' si; ve A_e = alıcı antenin açıklığı.

Bu enerji sinyalleri bir cisim ile karşılaştığında, enerjinin bir kısmı cisim tarafından soğurulur, bir kısmı cisim aracılığıyla iletilir ve kalanı cisim tarafından yansıtılır. Gelen ve yansıyan enerji miktarı, radar sinyalinin dalga boyuna ve frekansına bağlı iken diğer yandan uçağın yapımında kullanılan şekil, boyut ve malzeme gibi parametrelere bağlıdır. Potansiyel olarak, yansıyan enerji yönü farklı yönlerde hareket edebilir, bu nedenle çok az miktarda enerji radar sistemine geri yansıtılır (Ahmad ve diğerleri, 2019).

Radar ışınları konik bir şekle sahiptir. Hedefin kaynağa olan mesafesi ne kadar uzak ise radar tarafından daha fazla sinyaller yollanarak alan aydınlatılacak ve hedef tarafından yansıtılan elektromanyetik enerjinin küçük bir kısmı radar tarafından algılanır. Yüksek menzillerde radarın gücü artırılabilir fakat boş alanda boşa harcanan enerji miktarı artacağından dolayı yüksek güç ayarında sistemde daha fazla gürültüye sebep olacaktır. Ancak daha dar ve yoğun giden enerji üreterek daha fazla yansıyan enerji kesme kabiliyetine sahip olduğu için geniş açıklığa sahip bir antenin kullanılması bu problemi giderebilir (Ahmad ve diğerleri, 2019).

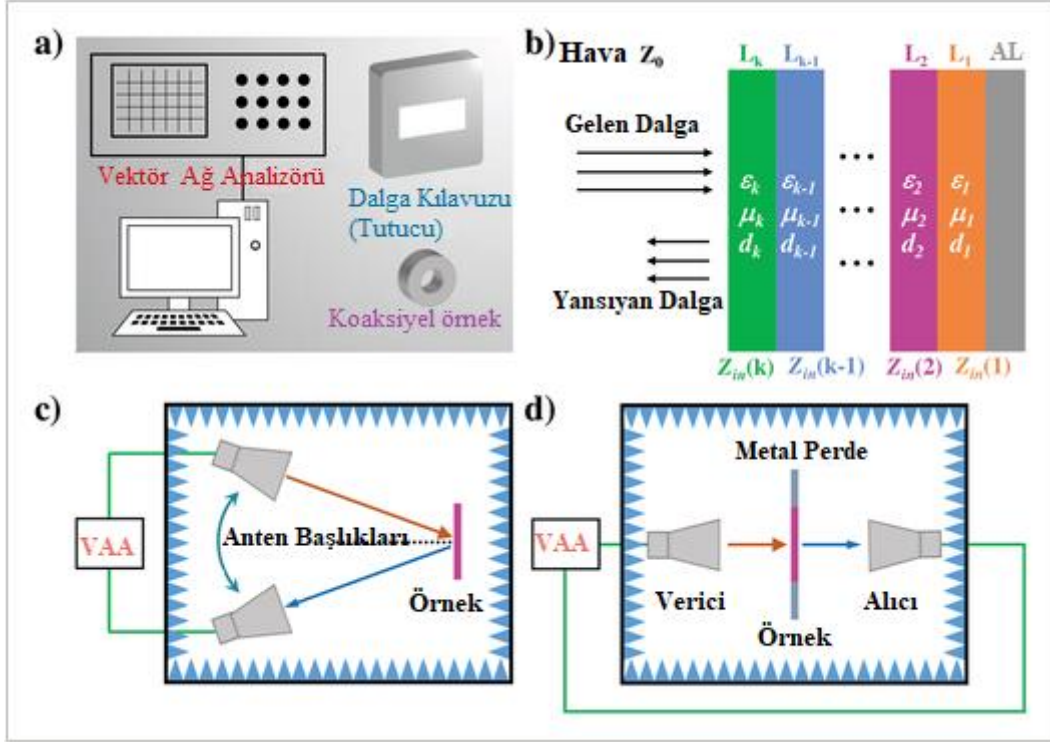
Radarda bir nesnenin algılanması, ancak nesneden yeterli miktarda enerjinin, radar anteninde geri alındığında gerçekleşir. Bu enerji, radar sistemi tarafından algılanan sinyal-gürültü oranının veya elektronik gürültü eşiğinin üzerinde olmalıdır. İletim-saçılma-yansımaya sisteminde, maksimum algılama aralığını belirleyen birçok değişken mevcuttur. Bu değişkenler, verici etkili giden enerji, nesnenin radar kesiti (RCS), ışın genişliği, nesneye çarptıktan sonra geri dönen toplam enerji, anten açıklığının boyutu ve alıcının işleme kapasitesini içerir. Bu değişkenler bir nesnenin tespiti için kullanılır (Ahmad ve diğerleri, 2019).

Radar vericileri tarafından yayılan sinyallerin absorpsiyonu, RAM'ler tarafından geri saçılımı en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi radyo dalgaları absorpsiyonu sonucu ısı üretimi gerçekleştirdiğinden, termal imza ile tespit edilmesini önlemek için yayılan termal enerji gizli sistemlerin içerisinde dağıtılmalıdır (Kolanowska ve diğerleri, 2018).

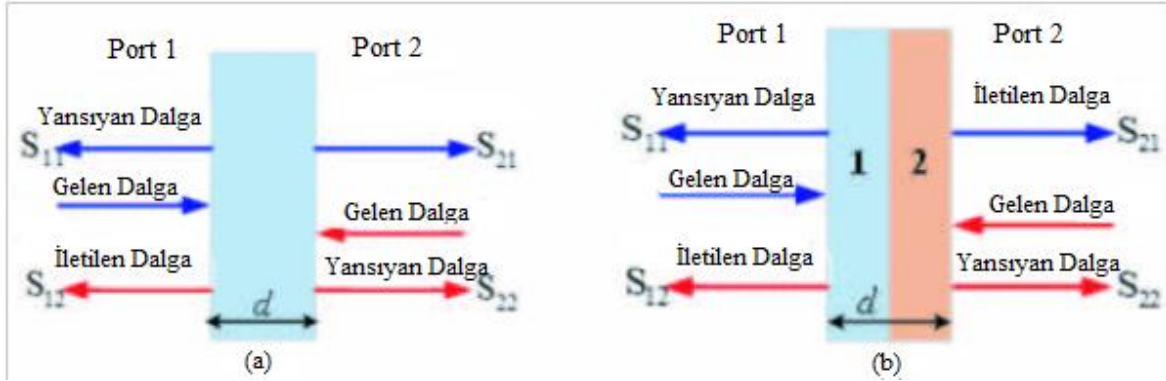


Şekil 3.2. Elektromanyetik dalgaların soğurma ve yansımalarının şematik gösterimi

Gizli teknoloji 'savaş alanında', giderek gelişen daha özel radarların yapımına, karşı savunmada, RAM'lerin sürekli gelişmesi eşlik etmiştir. Radar Absorpsiyon Malzemeleri (RAM'ler) günümüzde, elektromanyetik dalga enerjisini ısı enerjisine dönüştürmek ve sonra o enerjiyi dağıtmak için kullanılır (Kolanowska ve diğerleri, 2018). Şekil 3.3'te dalga kılavuzuna ve elektromanyetik dalgaların substrat üzerindeki dağılımına ait şematik gösterimler verilmiştir (Chen ve diğerleri, 2019).



Şekil 3.3. a) Dalga kılavuzu ve koaksiyel hat yöntemleri analizi için cihazın şematik gösterimi b) Elektromanyetik dalgaların, yüksek iletkenliğe sahip alüminyum levha ile desteklenen çok katmanlı soğurucu üzerinde yayılmasının şematik diyagramı c,d) Yansıma ve iletim ölçümü için boş alan yönteminin şematik gösterimi



Şekil 3.4. Etkili ortam modeli (a) karşılıklı yapı, (b) karşılıklı olmayan yapı

Elektromanyetik dalgaların ortam modeli Şekil 3.4'te verilmiştir (Wu ve diğerleri, 2019). Elektromanyetik parametreler, ortamın yansıma katsayısı ve iletim katsayısı (S) kullanılarak hesaplanmaktadır.

Kaplamanın, frekans cinsinden absorpsiyon değeri $A(\omega)$, aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir (Bağmancı ve diğerleri, 2018);

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad \text{Denklem 3.1}$$

$$R(\omega) = |S_{11}|^2 \quad \text{Denklem 3.2}$$

$$T(\omega) = |S_{21}|^2 \quad \text{Denklem 3.3}$$

Yansıyan $R(\omega)$ ve iletilen $T(\omega)$ 'nin eşdeğeri denklem 3.2 ve denklem 3.3'te verilmiş, frekansın bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Absorpsiyonu $A(\omega)$ daha yüksek bir seviyeye çıkarmak için hem yansıma hem de iletimin en aza indirilmesi gerekir. Bu denklemler doğrultusunda dielektrik tabakanın dağılma parametreleri gelen ve iletilen dalgaları doğrudan etkilemektedir. Arka tabaka tamamen alüminyum olduğu için iletilen dalga o kadar küçük olacaktır ki sıfır olarak kabul edilebilecek ve ihmal edilebilecek kadar az olacaktır. Bu nedenle, $A(\omega)$ 'nin denklemi aşağıda belirtildiği gibi varsayılabilir (Bağmancı ve diğerleri, 2018);

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 \quad \text{Denklem 3.4}$$

4. RAM'lerin SINIFLANDIRILMASI

4.1. Manyetik Soğurucular

Manyetik soğurucularda, karbonil demir, heksaferritler ve spinel ferritler kullanılmaktadır. Bu tür malzemeler MHz ve GHz aralıklarında soğurma özelliği göstermektedir. Rezonans frekansı parçacık boyutuna bağlı olup partikül boyutuna ve sinterleme sıcaklığındaki değişimler ile soğurma daha yüksek frekanslarda (5-20 GHz) ayarlanabilir (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

Bu malzemeler esnek bir matris içinde, poliizopren, nitril kauçuk, silikon ve üreanlar gibi elastomerik polimerlere dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Malzemelerin kalınlıkları ve manyetik özellikleri, gerekli geçirgenlik özelliklerini elde etmek için ayarlanabilir ve sayede manyetizasyon dönüşünün hizalanması ve dönüşündeki değişiklikler nedeniyle kayıplar oluşturur. Gizli uygulama potansiyelindeki askeri hedeflerdeki manyetik malzemelere spinal ferrit bazlı boyalar, heksaferrit bazlı boyalar, poliüretan veya epoksi reçinelere eklenmiş karbonil demir bazlı boyalar örnek olarak gösterilebilir (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

Sol-jel yöntemiyle sentezlenen $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ nanoparçacıklarının bir alüminyum substrat üzerinde ultra ince tabaka (90 μm) ferrit-polimer nanokompozitlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Nanokompozit kaplama, 4-15 GHz frekans aralığında %85'in üzerinde absorpsiyon ile mükemmel geniş bant absorpsiyon özellikleri gösterdiğini belirtmişlerdir. Ferrit-nanokompozitin optimum film kalınlığını elde etmek için simülasyonlar yapılarak değişen ferrit tabakası kalınlıkları için geri dönüş kaybının 5 μm kalınlık için minimum olduğunu savunmuşlardır (Bhattacharyya ve diğerleri, 2017).

4.1.1. Fe esaslı manyetik soğurucular

Askeri ve ticari amaçlar için uygun maliyetli, hafif ve geniş bantlı radar dalga soğurucuları hızla gelişmesiyle birlikte odak noktası olmuştur (Afzali ve diğerleri, 2017). Radar dalga absorpsiyonuna çözüm sağlamak için, yüksek doyumluk manyetizasyonu nedeniyle geçirgenlikleri gigahertz aralığında yüksek kaldığı için metalik manyetik malzemelere

özellikle odaklanılır (Zhou ve diğerleri, 2018). Karmaşık geçirgenlik gibi elektromanyetik özelliklerin kontrolü, dielektrik ve manyetik kayıp bileşenlerinin uygun kombinasyonu ile elde edilebilmektedir (Afzali ve diğerleri, 2017).

Radar dalga soğurucu malzemeler, bir veya daha fazla türde kayıplı dolgu maddesi, ana polimer matrisi içinde dağıtılmasıyla hazırlanır. Dielektrik ve manyetik kayıplı malzemelerin kombinasyonu, empedans uyumu ve yüksek radar dalga absorpsiyonu elde etmek için etkili olmaktadır (Jafarian ve diğerleri, 2018).

Radar dalga soğurucular, elektromanyetik enerjiyi dönüştürebilir, elektromanyetik dalgaları emebilir veya dağıtabilmektedir. Birçok malzeme türü, örneğin manyetik metallere, ferritler, karbon, iletken polimerler, kompozitler gelen elektromanyetik dalgaların önemli ölçüde zayıflaması için RAM'ler olarak kullanılabilir. Bu malzemeler arasında manyetik metallere, geniş doyumluk manyetizasyonu, güçlü anizotropi alanı, gigahertz aralığında yüksek Snoek limiti ve uyumlu dielektrik kayıp kabiliyeti nedeniyle RAM'lerin performans ve işlevsellik zorluklarının üstesinden gelmek için kullanılmaktadır (Duan ve diğerleri, 2018).

4.2. Dielektrik Soğurucular

Dielektrik malzemeler, atomların ve moleküllerin üzerinde atomik ve moleküler kuvvetler ile aynı konumda tutulmakta olan ve yer değiştirebilmesi mümkün olmayan, kalıcı pozitif ve negatif yüklerin olduğu malzemelerdir. Bu tür malzemelere bir elektrik alanı uygulandığında elektrik dipoller oluşur ve uygulanan elektrik alanının yönüne göre kendilerini hizalarlar (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

Mikrodalga soğurma mekanizmalardan olan dielektrik RAM'ler, gelen enerjinin absorpsiyonu ve radyasyonun çoklu yansımalarıdır. Bu etkilerin sebebi, omik kayıplar ve radyasyonun çeşitli geometrik şekiller kullanılarak farklı yönlerde geri saçılması gibi olaylardan kaynaklanmaktadır (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

Dielektrik soğurucular: epoksi, fenolik, poliüretan, poliimid ve silikon reçineleri gibi sert veya polimerik matrisler ve aynı zamanda inorganik (karbon, grafit, titanatlar, karbürler, nitrürler, vb.) ve organik (iletken polimer) malzemelerin kombinasyonlarından elde edilir (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

4.2.1. MnO₂

Manganez dioksit (MnO₂), geçiş metali elementlerinden biri olan, mükemmel iyon değişimi, moleküler absorpsiyon, iyi termal kararlılık, kolay sentezlenebilme gibi farklı katalitik ve elektrokimyasal performansları olan ve aynı zamanda düşük maliyetli, yarı iletken oksitlerdendir. Manganez dioksit, çeşitli fazları ve farklı polimorfları, morfolojileri nedeniyle farklı elektromanyetik dalga soğurma özelliği sergileyebilme yeteneğine sahiptir. Radar absorpsiyon malzemelerinden biri olan manganez dioksinin, yüksek dielektrik sabiti ve geniş frekans bant genişliği özellikler göstermesi sayesinde, elektromanyetik kayıp mekanizması, dipolar polarizasyon ile dielektrik kaybı olarak belirtilmiştir. (Pang ve diğerleri, 2021).

Yang ve ark. izosiyanat uç grupları ile kaplanmış optik olarak aktif prepolimer sentezlemişlerdir. Çok katmanlı optik olarak aktif poliüretan/titanya/mangandioksit nanoçubuklarının karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 15 nm kalınlıkta TiO₂ ile kaplanan MnO₂ nanoçubukları, titanya/mangandioksit üzerine optik olarak aktif poliüretan aşılanmış ve çekirdek-kabuk yapısı elde edilmiştir. Saf MnO₂ ile karşılaştırılan yapı, kaplama işleminden sonra kızılötesi emisyon değerlerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bunun sonucunda nanokompozitlerin kızılötesi radyasyon özelliğini önemli ölçüde etkilediğini bildirmişlerdir (Yang ve diğerleri, 2014).

Wang ve ark. hidrotermal yöntemini kullanarak grafen/Fe₃O₄, nanoküme/karbon/MnO₂ nano levha dizilimindeki kompozitlerin üretimini ilk kez gerçekleştirmişlerdir. Üretim süreci, Fe₃O₄ nanokümelerinin, grafen yüzeyinde biriktirilmesi, ardından hidrotermal reaksiyon ve ısıl işlem sürecini birlikte grafen-Fe₃O₄ nanokümelerinin yüzeyine karbonun eklenmesiyle, hiyerarşik kompozitlerin oluşturulmasını içerir. 2-18 GHz mikrodalga frekans bantları arasında, önemli ölçüde geliştirilmiş mikrodalga absorpsiyon özellikleri sergilediğini bildirmişlerdir (Wang ve diğerleri, 2015).

Bora ve ark., MnO₂ nanoçubukları ve MnO₂ nanokürelerinin düşük sıcaklıkta kimyasal çöktürme yöntemi ile sentezlenen polivinilbütiral-MnO₂ nanokompozitlerinin, mikrodalga absorpsiyon özelliklerini bildirmişlerdir. Sonuç olarak, polivinilbütiral-MnO₂ nanoçubuk kompozitleri, 2 mm kalınlığında geniş bir bant aralığı ile -37 dB olarak bulunurken, PVB-MnO₂ nano küre kompozitleri ise, minimum -10 dB değerinde düşüş gözlemlemişlerdir.

PVB-MnO₂ nanoçubuk kompozitinin, elektromanyetik zayıflama sabitinin arttırılması ve dielektrik kaybı, mükemmel mikrodalga absorpsiyon özelliği gösterdiğini ve mikrodalga absorpsiyonuna dayalı uygulamalar için yeni bir kaplama polimer nanokompoziti olarak ele alınabileceğini belirtmişlerdir. (Bora ve diğerleri, 2018).

Bu çalışmada ise, kestane benzeri MnO₂ /indirgenmiş grafen oksit (RGO) kompoziti iki aşamalı bir yöntemle üretmişlerdir. FT-IR, XRD, Raman spektroskopisi ve SEM analizleriyle karakterize edilen ürününün ayrıca elektromanyetik parametreleri, bir vektör ağ analizörü ile ölçülmüştür. SEM görüntüleri, indirgenmiş grafen oksidin, kestane benzeri MnO₂'nin yüzeyine 3–5 µm aralığında sıkıca bağlandığını gözlemlemişlerdir. Elektromanyetik parametre analizinde ise indirgenmiş grafen oksit ve kestane benzeri MnO₂ kombinasyonunda maksimum yansıma kaybı, 17,2 GHz'de 1,5 mm kalınlığında –32,4 dB olduğu ve yansıma kaybı tepe noktaları, kompozit levhanın kalınlığının artmasıyla düşük frekanslara yönlendiğini bildirmişlerdir (Hu ve diğerleri, 2019).

Benzer bir çalışma, Hu. ve ark. tarafından gerçekleştirilen çiçek benzeri MnO₂/indirgenmiş grafen oksit (RGO) nanokompoziti hidrotermal yöntemle üretmişlerdir. MnO₂/RGO nanokompozitinin kalınlığı 2,0 mm olduğu belirtilen yapının mikrodalga absorpsiyon kapasitesinin, saf MnO₂ ile karşılaştırıldığında, maksimum yansıma kaybının 10,8 GHz'de –37,1 dB'ye ulaştığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak MnO₂'nin çiçek benzeri yapısı mikrodalga absorpsiyonunda önemli bir rol oynadığını ifade etmişlerdir (Hu ve diğerleri, 2020).

Ge ve ark. yaptığı çalışmada ise, hidrotermal ve hidroliz işlemleri yöntemiyle üretilen üçlü Fe₃O₄@SiO₂@MnO₂ hibritleri, tipik çekirdek-kabuk yapısı özellikleri ve heterojen özelliklerle birleştirilmiş, geniş bant aralığında, düşük kalınlıkta, yüksek yoğunluklu soğurucular tasarlamışlardır. 13,9 GHz'de -50,2 dB'lik optimal yansıma kaybı ile emilim performansı sergilediği belirtilmiştir. Geniş yüzeyler, yüksek gözeneklilik ve manyetik Fe₃O₄ çekirdeklerinden ve dielektrik SiO₂/MnO₂ katmanlarıyla elde edilmiş sinerjik etki nedeniyle, yüksek verimli soğurucuların tasarlanması için yüksek potansiyele sahip olabileceği bildirilmiştir (Ge ve diğerleri, 2020).

Polimer kaplama ve aşılama yaklaşımları kullanılan bu çalışmada, α -MnO₂ nanoçubukları polianilin nanokompozitleri sentezlemişlerdir. Elektromanyetik özellikleri ise 8-18 GHz (X ve Ku-Bandı) aralığında vektör ağ analizörü kullanılarak ölçülmüştür. Sentezlenen α -MnO₂-PANI nanokompozitinin, yapılan analizleri sonucu daha iyi elektriksel iletkenlik, üstün mikrodalga absorpsiyon yeteneği ile mükemmel dielektrik kaybı gösterdiğini belirtmişlerdir. Saf MnO₂-PANI nanokompozit ile karşılaştırılan yapıda, -10 dB altında 10,8 GHz ve 14,5 GHz'de etkili bir absorpsiyon gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, mikrodalga absorpsiyon uygulamaları için organik/inorganik nanokompozit malzemelerin farklı kombinasyonlarının mikrodalga absorpsiyon çalışmalarında olumlu etkilerinin olacağını vurgulamışlardır (Kulkarni ve diğerleri, 2021).

MnO₂ / dielektrik kompozitler

Çoklu kayıp mekanizmasını indükleyebilen hibrit kompozitler oluşturmak için dielektrik malzemeleri manganez dioksit ile birleştirmek için önemli çabalar harcanmıştır. Tasarlanan karmaşık yapı, çoklu yansıma ve saçılma, iyi empedans uyumu ve çoklu arayüz polarizasyonu getirmektedir. Uygun dielektrik malzemenin eklenmesi, elektriksel iletkenliği iyileştirdiği için dielektrik kaybını daha da artırabilir. Bu yönlenmelerdeki sinerjiden dolayı elektromanyetik dalga enerjisinin zayıflaması büyük ölçüde iyileştirilir. Makul tasarlanmış morfoloji, çoklu yansıma ve saçılma, iyi empedans uyumu ve çoklu arayüz polarizasyonu getirecektir. MnO₂'nin diğer dielektrik malzeme ile kombinasyonu, dielektrik kaybını daha da artırabilir (Pang ve diğerleri, 2021).

MnO₂ /manyetik malzeme kompozitleri

Yüksek iletkenlik, mükemmel manyetizma ve yüksek doygunluk manyetizasyonu nedeniyle, manyetik nanoparçacıklar/alaşım/manyetik oksit, elektromanyetik dalga enerjisinin zayıflama alanında araştırma konuları ilgi görmüştür. Bu nedenle, manyetik malzemelerin manganez dioksit ile bir hibrit kompozit olarak kombine edilmesi, empedans uyumu özelliklerini geliştirmek için çalışmalara odaklanılmıştır (Pang ve diğerleri, 2021).

MnO₂ /manyetik-dielektrik malzeme kompozitleri

Birden fazla manyetik-dielektrik kuplaj malzemesinin mükemmel özelliklerinden yararlanarak, bunların hibrit kompozitleri olağanüstü bir performans sergilediği bildirilmiştir. Karbon malzemelere, manyetik malzemeyi eşzamanlı olarak MnO₂'ye entegre etmek, mükemmel elektromanyetik performansını elde etmek için umut verici bir yöntemdir (Pang ve diğerleri, 2021).

4.2.2. Karbon ve allotropları

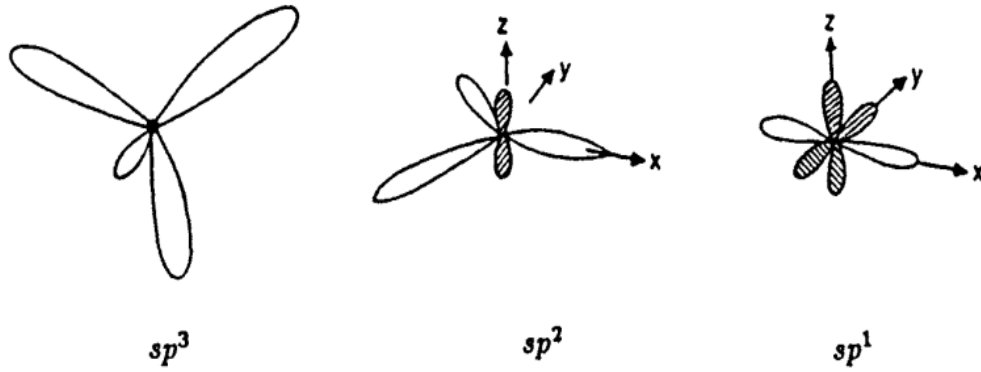
Günümüzde nanoteknolojinin gelişimi, gizli teknolojiyi daha da güçlü hale getirmiştir ve birçok nanomalzeme arasında, karbon bazlı malzemeler, RAM'lerin en umut verici bileşenlerden biri olarak ortaya çıkmıştır (Kolanowska ve diğerleri, 2018).

Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte, Radar Soğurucu Malzemeler (RAM), yapıların kütlelerini ve hacmini azaltırken, ekranlama ve radyo dalgalarını soğurma etkinliğini önemli derecede artırması nedeniyle büyük öneme sahiptir (Micheli ve diğerleri, 2010).

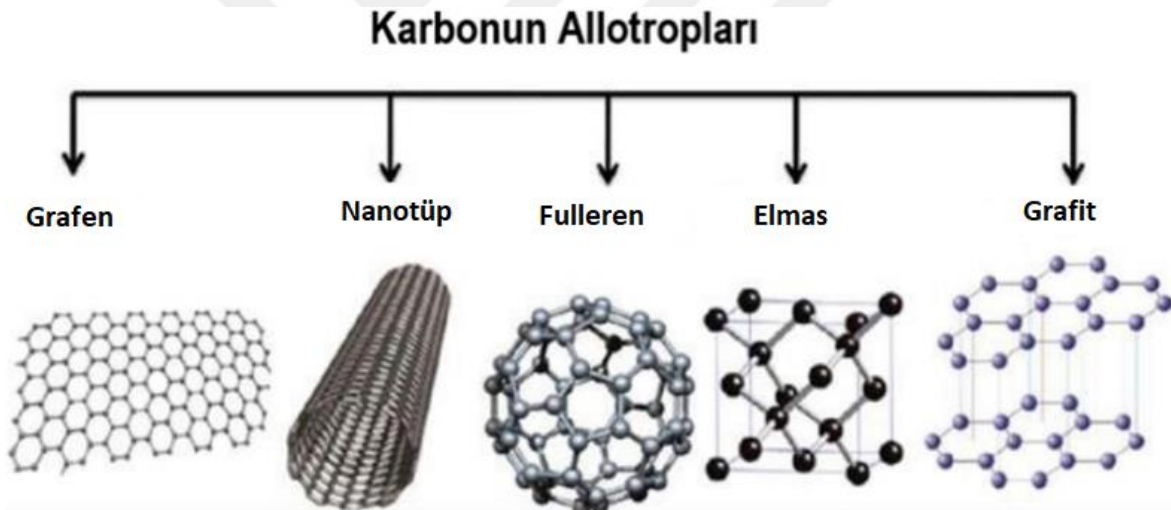
Karbon bazlı malzemeler, korozyon direnci, daha az malzeme gereksinimi, ana polimerlere işlenme kolaylığı, vb. gibi nedenlerle metal dolgu maddelerine göre daha çok tercih edilmektedir (Al-Ghamdi & El-Tantawy, 2010).

Karbon, doğada birkaç farklı allotropik formları içeren, periyodik cetvelde 6A grubunda bulunan özel bir elementtir. Karbon atomları arasındaki çeşitli hibridizasyon durumları (sp, sp², sp³), diğer karbon atomlarıyla güçlü kovalent bağ oluşturma özellikleriyle çeşitli yapıları (sıfır boyutlu, bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu) oluşturan, kararlı izomerlere sahip, mükemmel özellikleri barındıran tek element olduğunu göstermektedir (Burchfield ve diğerleri, 2017;Georgakilas ve diğerleri, 2015). Karbon atomu, zengin bağlanma topolojileri ve elektriksel özellikler yelpazesine sahip olduğundan farklı ve karşılıklı olarak uyumlu bağlanma geometrileri oluşturarak elektronik durumları hibritleyebilmektedir. Şematik olarak, karbon sp zincirlerinde ve sp² düzlemsel yapılarında (grafen ve grafit) bir iletken olarak veya sp³ tetrahedral koordinasyonunda (elmas ve alkanlar) geniş aralıklı bir yalıtkan olarak işlev görebilir. Şekil 4.1'de gösterilen bu özellikler, doğrudan hibridizasyon

tipine (sp , sp^2 veya sp^3) bağlıdır. sp ve sp^2 , elektriksel olarak iletken olan bağlar oluşturma potansiyeline sahipken, sp^3 yalıtım özelliklerine sahiptir (Burchfield ve diğerleri, 2017).

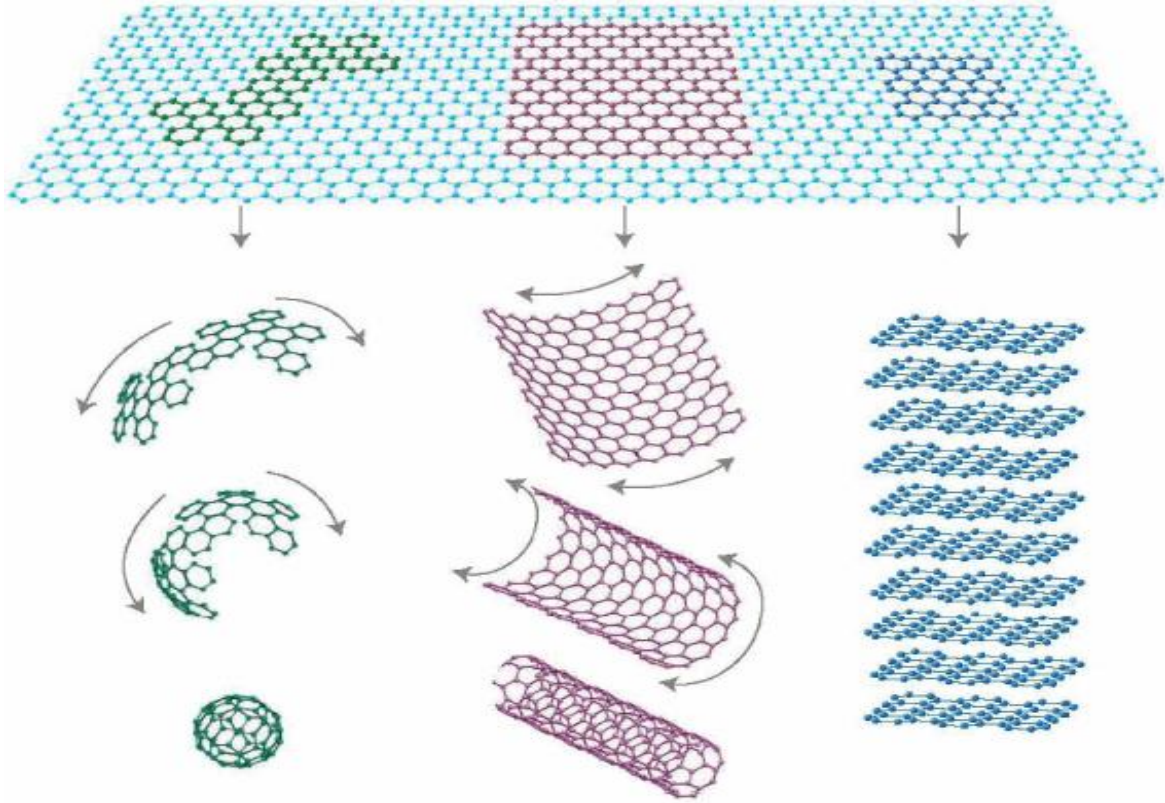


Şekil 4.1. sp^3 , sp^2 ve sp^1 bağ hibridizasyonlarının şematik görünümü. Gölgeli olmayan loblar güçlü bağları ve gölgeli loblar zayıf bağları gösterir

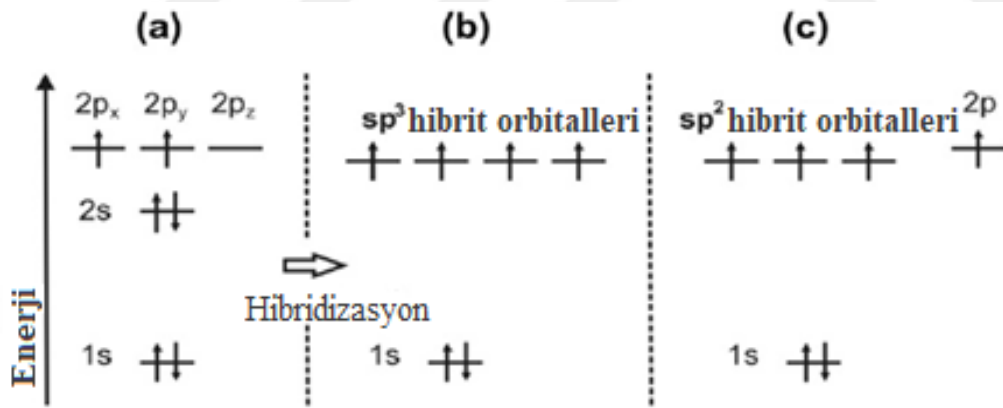


Şekil 4.2. Karbon atomlarının farklı dizilimlerdeki yapıları

Grafen, iki boyutlu petek kafes yapısı içine sıkıca paketlenmiş karbon atomlarının tek katmanına denir ve diğer farklı boyutlara sahip, grafit malzemeler için ana yapı taşıdır ve sıfır boyutlu fullerenler küresel olarak sarılabilir, bir boyutlu nanotüplere yuvarlanabilir veya üç boyutlu grafitte katmanlı olarak dizilebilir (Şekil 4.3) (Geim & Novoselov, 2009).



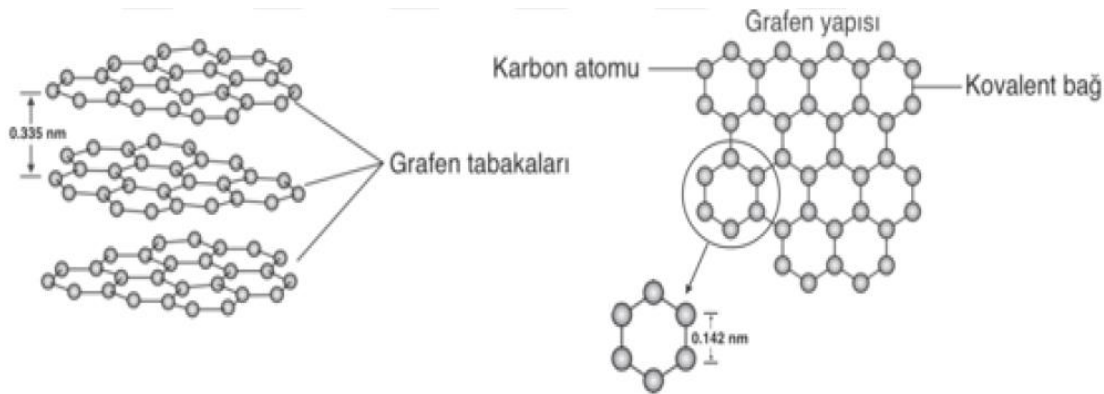
Şekil 4.3. Grafenin farklı dizilim şekilleri



Şekil 4.4. Bir karbon atomunun atomik yörünge diyagramı. Çift dolu küresel 2s orbitalinde dört elektron ve yarı dolu 2p orbitalleri, karbonun kimyasal bağlanmasına katılır. (a) Temel durum, (b) elmasta olduğu gibi hibritlenmiş sp^3 ve (c) grafit ve grafende olduğu gibi sp^2 hibritlenmiş

Şekil 4.4'te karbon atomuna ait atomik yörünge diyagramı verilmiştir (Schäffel, 2013). Grafit yapısında, üç 2p orbitalinden sadece iki tanesi hibritleşerek üç sp^2 orbitali oluşturur (Şekil 4.4.c). sp^2 orbitalleri, kalan 2p orbitaline dik olarak yönlendirilirken X-Y düzleminde 120° açıyla simetrik olarak düzenlenir. Böylece sp^2 karbon atomları arasında düzlemsel kovalent bağlar, grafitin düzlemsel altıgen “petek” yapısının oluşmasını sağlar.

Grafen katmanlarındaki düzlem içi s bağları, sp^3 hibritleşmiş elmastaki C–C bağlarından bile daha güçlü bağa sahipken, kalan 2p orbitalleri tarafından oluşturulan düzlemler arası p bağları, çok düşük bağlanma enerjisi sebebiyle, grafitin katman düzlemi boyunca kolay ayrılmasına neden olur. Şekil 4.5'te tek bir grafit katmanının en yakın komşu atomlar arası mesafesi, 1,42 Å ve iki bitişik grafit tabakası arasındaki düzlemler arası mesafe yaklaşık 3,35 Å'dır (Schäffel, 2013).



Şekil 4.5. Grafenin yapısının şematik gösterimi

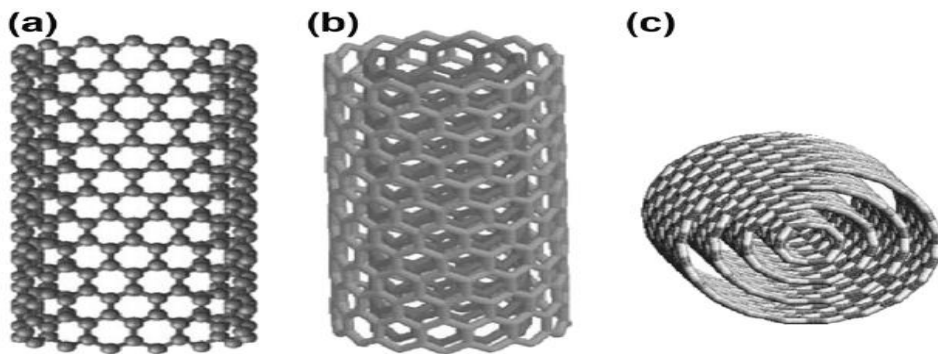
Fullerenler

Yapay yolla sentezlenen karbon allotroplarının keşfi fullerenler ile başladı. Fullerenler, bal peteği şeklinde, yapısında 12 beşgen ve karbon atomu sayısının toplamına bağlı olarak hesaplanabilir sayıda altıgen şeklinde düzenlenmiş, karbon atomlarının sp^2 hibritleşmesiyle sonucu ile oluşan yuvarlanmış, kapalı ve içi boş kafes formundaki yapılardır. "20 + 2n" karbon atomlu bir fullerende "n" tane altıgen mevcut olur. Fullerenlerin beşgen sayısı kapalı şekilleri tarafından önceden belirlenirken kararlı yapılarından dolayı mükemmel sistemlerde her zaman 12 beşgen bulduklarını belirlenmiştir. C_{60} , 0,71 nm dış çapında en küçük karbon nanoyapısına sahip olan küresel bir moleküldür ve bu nedenle temsili olarak 0D karbon nanoallotropu olarak kabul edilmektedir. Deneysel olarak üretilmiş fullerenler, daha çok veya daha az sayıda C atomunun (örneğin, C_{70} , C_{76} , C_{82} ve C_{84}) bir araya gelmesiyle birkaç benzer yapı oluşturulmuştur. 12 beşgen ve 20 altıgen içeren kesik bir ikosaedron şeklini alır. Tüm karbon atomları arasında sp^2 hibritlenmesi söz konusudur fakat sp^2 karbonlarında bir "sözde" sp^3 bağ bileşeni mevcut olmalıdır çünkü atomlar düzlemsel değil, piramidalize bir düzene sahiptir. Beşgenler yapıda eğriliği ortaya çıkarır

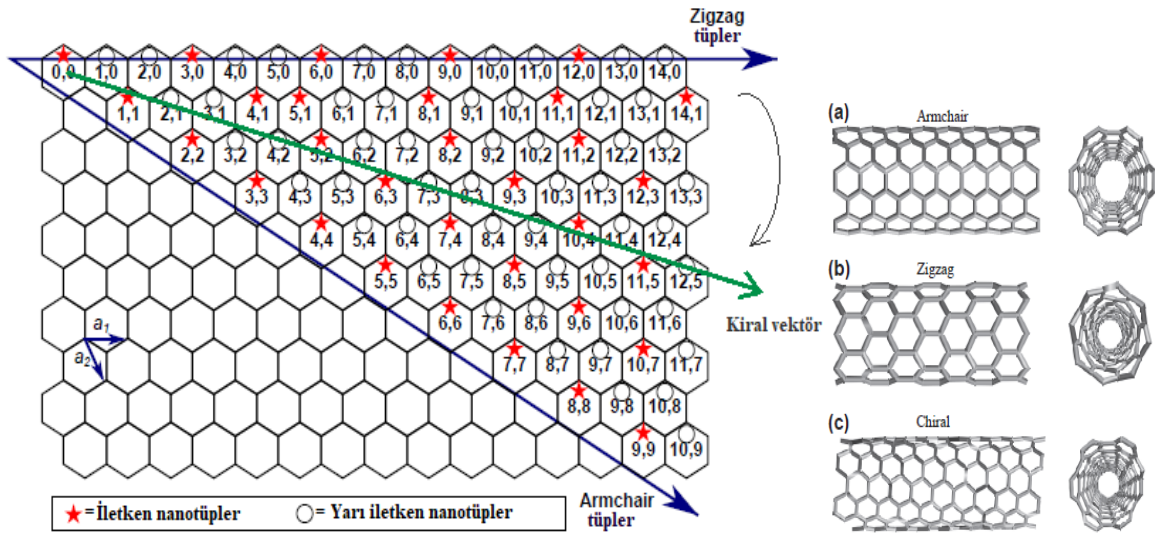
ve bunun sonucunda kafesin yuvarlanıp kapanmasını sağlamaktadır (Georgakilas ve diğerleri, 2015).

Karbon nanotüpler

Karbon nanotüplerin keşfi grafen bulunmadan birkaç yıl önce gerçekleşmiştir ve yapılarını oluşturan sp^2 karbon atomları altıgen bir kafese sahiptir. Nanotüpler grafen katmanının iki ucunun birleştirilmesiyle, yüksek en boy oranına sahip silindirik tüpler oluşturulur (Georgakilas ve diğerleri, 2015). Tek duvarlı CNT'ler (SWCNT'ler) tek silindirden, çift duvarlı CNT'ler (DWCNT'ler) iki eş merkezli silindirden ve grafen katmanlarının sayısına bağlı olarak çok duvarlı CNT'ler (MWCNT'ler) belirli bir mesafeyle ayrılmış çoklu CNT'lerin eşmerkezli düzenlenerek oluşturulan çeşitli CNT türleri vardır (Georgakilas ve diğerleri, 2015;Loos, 2015). MWCNT'lerin tüm katmanları, yalnızca zayıf van der Waals etkileşimleri tarafından bir arada tutulur ve bu etkileşimin gücü, grafen düzlemindeki C-C bağlarından çok daha küçüktür (Loos, 2015). Karbon nanotüplerin en boy oranı (yani uzunluk-çap oranı) nedeniyle, üretilen en anizotropik malzemeler olarak kabul edilmektedir (Georgakilas ve diğerleri, 2015). Ayrıca diğer önemli parametrelerden bir tanesi de kiralitedir (altıgenler ve nanotüp eksenindeki açı). Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de kiraliteye bağlı olarak, karbon atomları nanotüp çevresine çeşitli şekillerde; koltuk, zikzak ve kiral desenler olarak düzenlenebilir (Georgakilas ve diğerleri, 2015;Loos, 2015).



Şekil 4.6. (a) tek duvarlı karbon nanotüp, (b) çift duvarlı karbon nanotüp ve (c) çok duvarlı karbon nanotüp şematik gösterimi



Şekil 4.7. Bir karbon nanotüp oluşturmak için bir grafen tabakasının nasıl "yuvarlandığını" gösteren şematik diyagram. Yarı iletken karbon nanotüpler boş dairelerle ve iletkenler yıldızlarla temsil edilir. (a) bir koltuk, (b) zikzak ve (c) kiral nanotüplerin şematik modeli

Mekanik özellik

Yapılan araştırmaların deneysel ve teorik sonuçları, CNT'lerin mükemmel yapısı ve özelliklerinin, en güçlü malzemelerden biri olduğunu göstermektedir. Nanotüpler, karbon atomlarının birbiriyle güçlü bağlar yapması sonucu oluşur. Bu yüzden C-C atomları arasındaki güçlü bağları kırmak için gereken enerji çok büyük olması gerekmektedir. Karbon atomlarını bir arada tutan kovalent bağ, yapının yüksek mekanik mukavemetinin olduğunu gösterir. Bu nedenle nanotüp kullanımı, uçaklar, uzay mekikleri, rüzgar türbinleri, vb. gibi düşük ağırlık ve yüksek mukavemet gerektiren geniş uygulama alanlarına sahip en çekici malzemelerden biridir (Loos, 2015).

Elektrik iletkenlik

CNT'lerin elektriksel özellikleri, büyük ölçüde tek boyutlu yapının ve grafit formuna ait elektronik yapının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Grafit yarı metal olarak bilinir, fakat tam sayılarla (n, m) ilgili kiral vektöre bağlı olarak, CNT'ler metalik (iletken) veya yarı iletkenler olabilir. Bir nanotüp, ya $n=m$ olduğunda veya $m-n$ veya $n-m$, 3'ün katları olduğunda veya m ve n , $|m-n|=3i$ (i 'nin bir tam sayısı olduğu) ilişkisini sağlayan $(3, 0)$, $(7, 1)$, $(8, 5)$, vb. değerleri aldığı anda metaliktir. Bu nedenle, $n-m=0$ eşitliğini sağladığından tüm

koltuk nanotüpleri metaliktir. Eşitsizlik durumunda ($|m-n| \neq 3i$) nanotüpler, yaklaşık 0,5 eV bant boşluk enerjisine sahiptir ve yarı iletkenlerdir. Metalik nanotüpleri, yarı iletken nanotüplerden ayırmak için kimyasal işlemler uygulanabilir. MWCNT'ler yüksek elektriksel iletkenliğe sahip tek boyutlu iletkenlerdir ve bu metalik özellikleri, farklı elektriksel özelliklere sahip tüplerden oluşan ve katmanlar arasında elektronik bağlantının meydana geldiği çok katmanlı yapıdan gelir. Bir boyutlu iletkenlerde elektronların yalnızca bir yönde hareket etmesi serbest yolu arttırarak elektron saçılımını azaltır ve bunun sonucu CNT'lerin elektrik direncinin düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca nanotüpün direnci sabit olduğundan, CNT'ler yüksek akımlardaki uygulamalar için ideal bir malzeme olarak kullanılmaktadır (Loos, 2015).

Termal iletkenlik

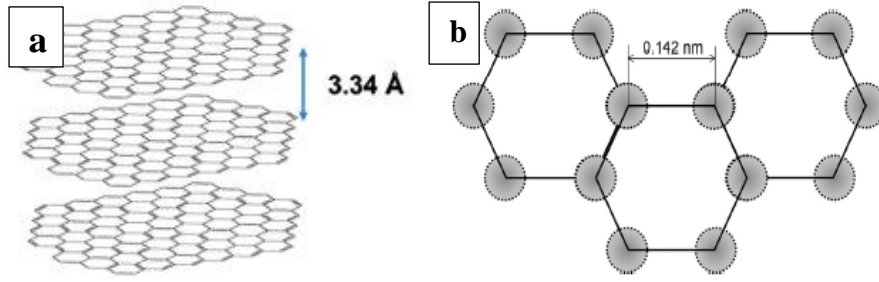
Termal iletkenlik, malzemenin ısı dağılımını belirleyen önemli bir faktördür. En iyi termal iletkenliği, CNT'lerin keşfinden önce elmas yapısı kabul ediliyordu. CNT'lerin keşfiyle beraber termal iletkenlik özelliklerinin, elmasın iletkenliğinin iki katı olduğu ortaya çıkmıştır. Katılarda ısı iletimi fononlar ile sağlanırken, CNT'lerde özgül ısı ve termal iletkenlik fononlar tarafından belirlenmektedir. Teorik çalışmalar sonucu, SWCNT'lerin termal iletkenliğinin aksel yönde 6000 W/m K'ye ulaşabildiğini, fakat radyal yönde çok düşük olduğunu göstermektedir. Bu değerler MWCNT'ler için 3000 W/m K'ye kadar değerler elde edilmiştir (Loos, 2015).

Safadi ve ark., çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli polimer kompozitlerin işleme koşulları ile mekanik ve elektriksel özellikleri arasındaki temel ilişkileri ortaya koymak amacıyla çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Burada, ultrasonik enerji, çok duvarlı nanotüpleri (MWCNT'ler) çözeltiler içinde homojen bir şekilde dağıtmak ve kimyasal ön işlem olmadan kompozitlere dahil etmek için kullanmışlardır. MWCNT'leri içeren polistiren (PS) çözeltileri, ince film MWCNT kompozitleri verecek şekilde döndürmeli döküm işlemi uygulanarak elde edilmiştir. Kompozit filmler, düzgün PS filmlerinden daha düşük akma gerilimi gösterdiği ve hacimce %2,5 oranında MWCNT'lerin varlığı, gerilme modülünü yaklaşık olarak iki katına çıkardığı ve filmi yalıtıktan iletkene dönüştüğünü belirtmişlerdir (Safadi ve diğerleri, 2002).

Zeng ve ark. çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)/su bazlı poliüretan kompozit filmler üretmişlerdir. Farklı MWCNT konsantrasyonlarına sahip kompozit filmlerin, ekranlama mekanizmaları, konsantrasyon, kalınlık ve iletkenliğe dayalı olarak tartışılmaktadır. Düşük kalınlıklarda MWCNT/su bazlı poliüretan kompozitlerinin yüksek konsantrasyonu, nispeten düşük MWCNT kütle oranlarına sahip kompozitlere karşı olan yansıma ile karşılaştırıldığında absorpsiyon ile daha yüksek ekranlama kapasitesi gösterdiğini belirtmişlerdir (Zeng ve diğerleri, 2016).

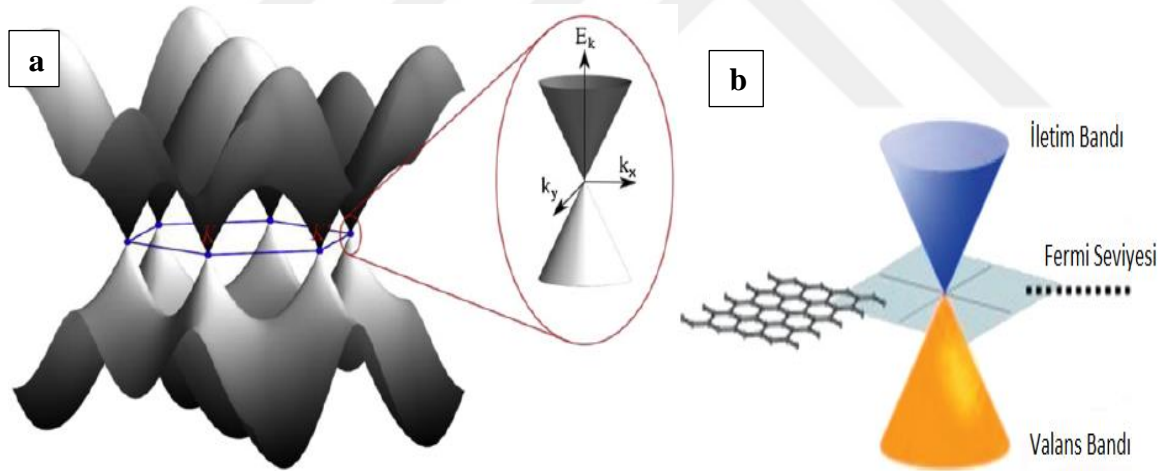
Grafen

"Grafen" terimi, grafenin üç boyutlu, doğal olarak oluşan grafitin ara bileşiklerini incelerken ortaya çıkmıştır. 2004 yılında Andre Geim ve Konstantin Novoselov tarafından sentezlenmiş ve karakterize edilmiştir (Kumar & Pattammattel, 2017). Şekil 4.8.a'da görüldüğü gibi grafit katmanlar arası $3,34 \text{ \AA}$ ara katman mesafesi ile istiflenirken Şekil 4.8.b'de görülen karbon-karbon bağı uzunluğu ise yaklaşık $0,142 \text{ nm}$ 'lik mesafede düzenlenmiştir (Kumar & Pattammattel, 2017; Zhen & Zhu, 2018). Bir atomun sp^2 hibritleşmesi ile, ince katmanlar oluşturmak için iki boyutlu, atomik ölçekli, altıgen kafes yapısı içinde yönlendirildiği, kararlı karbon allotropudur (Kumar & Pattammattel, 2017). Her kafeste, kararlı bir altıgen yapı oluşturan güçlü bağlara sahip üç σ bağı vardır. Bu kararlılık, sıkıca paketlenmiş karbon atomlarından ve bir sp^2 orbital hibridizasyonundan, σ bağını oluşturan s, p_x ve p_y orbitallerinin bir kombinasyonundan kaynaklanmaktadır (Zhen & Zhu, 2018). Son p_z elektronu π -bağını oluşturur. π -bağları, π -bandı ve π^* -bantlarını oluşturmak için birlikte hibritleşir, π bağına fazladan bir elektron verirken, elektronlar, oda sıcaklığında hareket etmekte tamamen serbesttir ve yüksek bir iletkenlik özelliği sağlar. Şekil 4.9.a'da Dirac noktalarında bulunan iletkenlik (Allen & Warner, 2013), Şekil 4.9.b'de değerlik bantlarını gösteren grafenin bant yapısı verilmiştir (Zhen & Zhu, 2018). Aynı zamanda, iletim bandı ile değerlik bandı arasında küçük bir örtüşme olan tipik bir yarı metal özelliği de gösterir. Bu nedenle, değerlik bandının üstündeki elektronlar, herhangi bir enerji uyarımı olmadan daha düşük enerji ile iletim bandının altına geçebilir (Zhen & Zhu, 2018). Bu bantlar, serbest olarak hareket eden elektronların yarı dolu bant aracılığıyla geçişine izin veren, grafenin dikkate değer elektronik özelliklerinin çoğundan sorumludur (Zhen & Zhu, 2018; Kumar & Pattammattel, 2017).



Şekil 4.8. a) Grafen katmanları arasındaki mesafe, b) C-C bağı arası uzaklık

Karbon atomları arasındaki bağlar, atomların yeniden düzenlenmesini önlemek için bükülen bir kafes düzlemi tarafından dış kuvvete dayanacak kadar sağlamdır (Zhen & Zhu, 2018). Bir atom kalınlığında olan tek katmanlı grafen yapısı, optik olarak şeffaf, elektriksel olarak iletken ve esnektir. Grafen içindeki elektronlar, saçılmadan hareket eden kütleless parçacıkların yüksek taşıyıcı hareketliliğinden sorumlu olduğu öne sürülmüştür. Aynı zamanda, yapısal kusurlar, kenarlar ve alt tabaka etkileri, elektron saçılmasından dolayı taşıyıcı hareketliliğinin serbest yolunu kısıtlar (Kumar & Pattammattel, 2017).



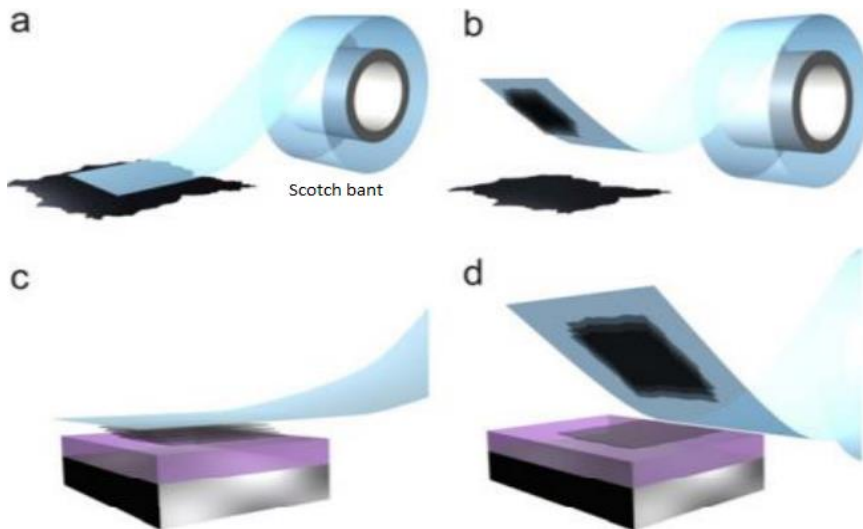
Şekil 4.9. a) Dirac noktalarında bulunan iletkenlik, b) değerlik bantlarını gösteren grafenin bant yapısı

Grafen, çelikten (0,4 GPa) çok daha büyük olan ~ 130 GPa'lık bir çekme mukavemetine sahip en güçlü malzeme olarak bilinmektedir. Grafen 500 GPa'lık Young modülü ile elastik özellikler gösterirken, kauçuğunki sadece 0,01-0,1 GPa'dır. Grafenin yüksek mukavemeti, yüksek elektrik iletkenliği, düşük yoğunluğu ve elastik yapısı, esnek elektronikten kaplama malzemesine kadar birçok kullanım alanlarında ilgi çekici benzersiz özellikler olarak önem taşır. Bu geniş uygulama alanlarındaki gelişmeler, nihai malzemenin üretimine, maliyetine, karakterizasyonuna, imalatına ve güvenliğine bağlıdır (Kumar & Pattammattel, 2017).

Grafen elde etme yöntemleri

Mekanik eksfoliasyon

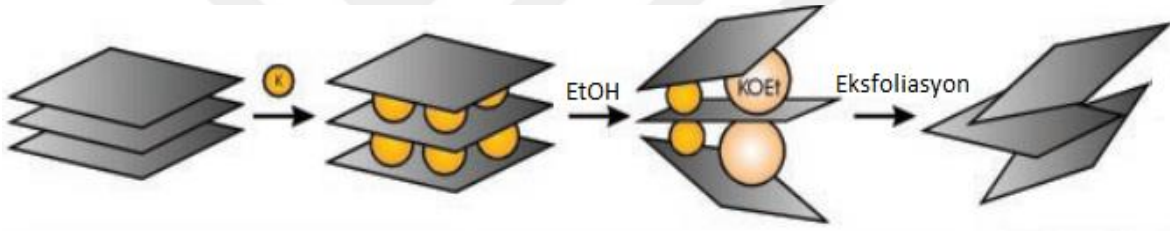
Grafit yapısı, grafen levhalarının katmanlı dizilimi sonucu oluşmaktadır. Katmanlar arası zayıf Van der Waals bağlarıyla birbirine bağlanmıştır. Mekanik eksfoliasyon yönteminde, grafen levhalarını katmanlı grafit yapısından ayırmak için mekanik kuvvetin kullanıldığı süreci ifade etmektedir (İbrahim & Rømmeli, 2013). Şekil 4.10'da gösterildiği üzere genellikle grafit yüzeyine yapıştırılmış bir yapışkan bant kullanılarak bant yardımıyla grafen katmanlarını ayırmak için veya grafen tabakalarını katmandan ayırmak için grafit yüzeyini başka bir malzemeye sürterek elde edilir (Doğru, 2019). Kurşun kalemle yazma prensibinde, kurşunun altında grafit olduğu ve kağıda mekanik kuvvet uygulaması sonucu siyah bir iz bırakarak ince grafen levhaların ayrıldığı işleme dayanır. Üretimde kolaylık ve düşük maliyet nedeniyle, grafen hazırlamak için grafitin eksfoliasyonu popüler kullanım sağlar. Yapışkan bant yöntemi kolay ve hızlıdır aynı zamanda yüksek oranda çeşitli deneysel çalışmalara faydalı olan yüksek kalitede grafen levhalar sağlar (İbrahim & Rømmeli, 2013).



Şekil 4.10. Grafitten grafenin mekanik soyulma yöntemiyle elde etme aşamaları

Kimyasal ekfoliasyon

Şekil 4.11’de gösterilen Grafit yapısındaki grafen katmanları, kimyasal çözeltiler kullanılarak yığından ayrılabilir (Viculis ve diğerleri, 2003). Katmanlar arasındaki ayrılmayı sağlayabilmek için, grafen levhaları birbirine bağlayan van der Waals kuvvetlerinden daha üstün bir enerji gerekir. Polar çözücüler, grafen katmanlarını grafitten ayırmak ve kolloidal bir çözelti oluşturmak için izolasyonlarını sürdürmede çok etkilidir. Yöntem, grafitin bir şişeye yerleştirilmesiyle uygun bir çözücünün eklenmesi ve daha sonra bir banyo sonikatörü kullanılarak sonikasyon uygulaması yapılmaktadır. Bu işlem çözelti içindeki grafen, substratlar üzerine spreyci kaplama, mürekkep püskürtmeli baskı, kompozitler için polimerlerle karıştırma ve fonksiyonel elektronik cihazlarda elektroforez biriktirme için ideal bir kullanıma sahiptir (J.H., 2013).

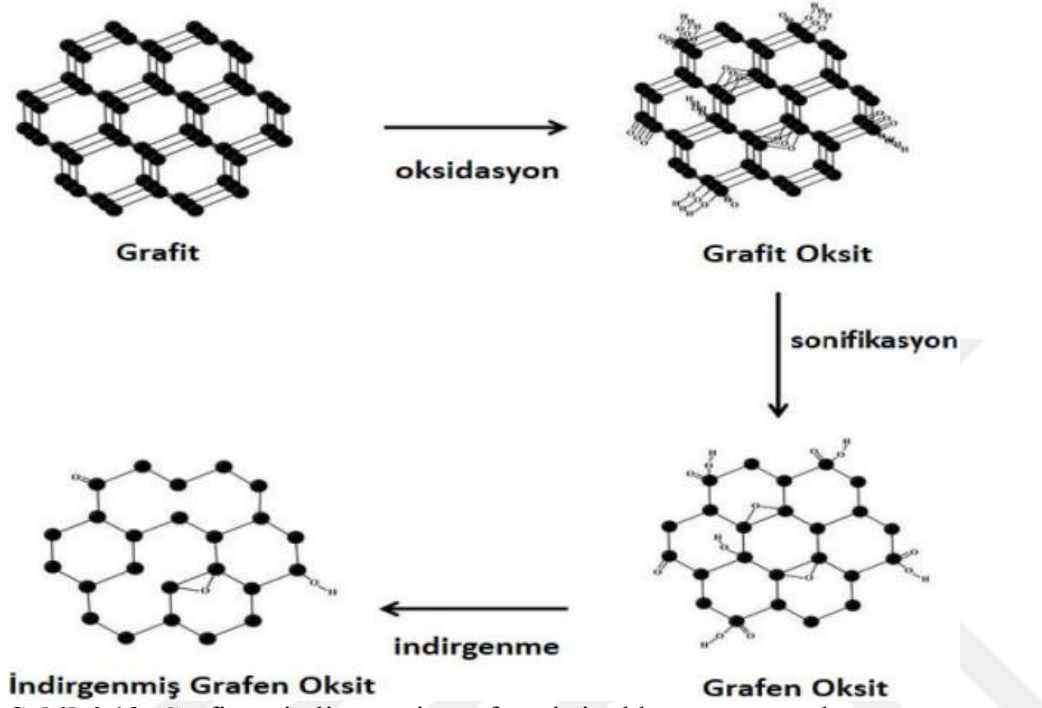


Şekil 4.11. Kimyasal ekfoliasyon sürecinin şematik gösterimi. Grafit, potasyum metali ile karıştırıldıktan sonra bir karbon levha dispersiyonu oluşturmak için etanol (EtOH) ile ekfoliasyonu gerçekleşir

İndirgenmiş grafen oksit

Grafen oksit, grafen kafesinin oksitlenmiş ve bu nedenle yapısının değiştiği grafene verilen addır. Grafitin oksitlenmesi, 19. yüzyılın ortalarından bu yana araştırma konusu olmuştur. İlk olarak, grafitin potasyum klorat (KClO₃) ve dumanlı nitrik asit (HNO₃) ile işlendiği Brodie (1860) tarafından sunulmuştur. Staudenmaier (1898) daha sonra, potasyum kloratı bir hafta boyunca konsantre sülfürik asit, konsantre nitrik asit (%63) ve grafit içerikli bir çözeltiye yavaş yavaş eklemesi sonucu grafiti oksitlemek için bu çalışmayı geliştirdi. Aynı zamanda, potasyum kloratın grafitte 10:1 kütle oranında kullanılması, patlama olasılığı ve zaman alıcı olması nedeniyle tehlike arz ettiğinden dolayı bu yöntemi benimsememişlerdir. En son çalışmalar ise Hummers ve Offeman (1958), Hummers yöntemi olarak bilinen ve su içermeyen konsantre sülfürik asit, sodyum nitrat ve potasyum permanganat karışımını içeren alternatif bir yöntem bildirdiler. Sadece 45°C'lik sıcaklıkta reaksiyonun

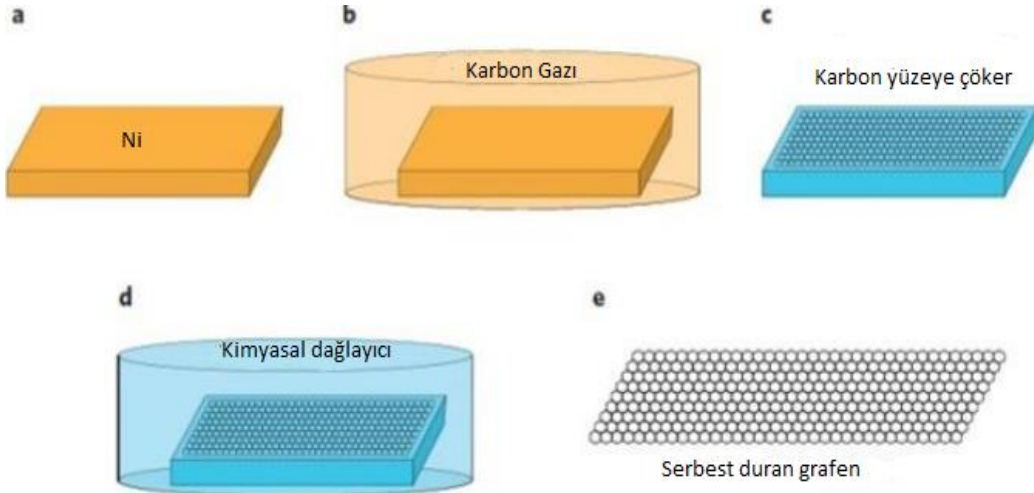
tamamlanması sadece 2 saat sürmektedir. Hummers yöntemi, günümüzde grafen oksit üretimi içeriklerinin çoğunda temeli oluşturmaktadır (J.H., 2013). Şekil 4.12’de grafitten indirgenmiş grafen oksit elde etme aşamaları verilmiştir (Doğru, 2019).



Şekil 4.12. Grafitten indirgenmiş grafen oksit elde etme aşamaları

Kimyasal buhar biriktirme

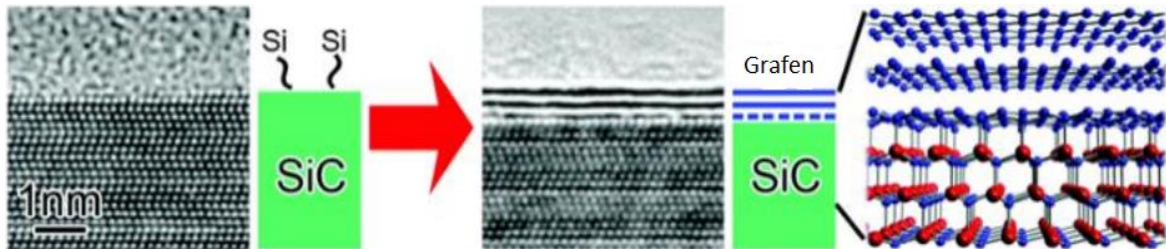
CVD yöntemi oldukça yüksek kaliteli grafen elde etmek, geçiş metali substratları üzerine biriktirilmesi sonucu elde edilmektedir. Şekil 4.13’te gösterildiği gibi işlem, kapalı bir ortamda vakum altında, çok yüksek sıcaklıkta ve bir hidrokarbon gazına maruz kaldığında, geçiş metalinin karbon doygunluğu sonucu oluşur (Bedeloğlu & Taş, 2016). Substratın soğumasıyla birlikte geçiş metalindeki karbon çözünürlüğün azalma meydana gelir ve yüzeyden ince bir karbon filmi çöker. CVD işlemi ile elde edilen grafen, alttaki geçiş metalini aşındırıp diğer alt tabakalara aktarılabilir. Grafen ametal yüzeylerde oluşturduğu büyüme mekanizması genellikle yüzey adsorpsiyonu, çekirdeklenme ve birleşmeyi içerir. Yüksek kalitede grafen elde ederken genellikle yalıtkan yüzeylerde, metal yüzeylere göre daha yüksek bir bozunma sıcaklığı gerekir (Paszkievicz & Szymczyk, 2019).



Şekil 4.13. Grafen tabakalarının CVD yöntemi ile elde edilmesinin şematik gösterimi

SiC üzerinde grafenin epitaksiyel büyümesi

Grafen filmlerinin oluşumu için silisyum karbür (SiC) substratları üzerinde epitaksiyel olarak büyütülmesi yöntemiyle gerçekleştirilir (Şekil 4.14) (Bedeloğlu & Taş, 2016). Büyütülen grafen, nanolitografi yöntemi kullanılarak modellenebilmesi tekniği, mevcut yarı iletken teknolojisiyle uyumlu hale getirir. Epitaksiyel olarak eşleşen desteğin kendisi karbonu sağladığından, hiçbir metal veya hidrokarbon dahil değildir ve bu nedenle yöntem çok temizdir. Bu yöntem, Si' nin tek kristalli SiC yüzeylerinde kontrollü süblimleşmesi ile gerçekleşir. Süblimleşme işlemi, ikili bileşikler için stokiyometriyi korumaz. Bunun sebebi ise, atomlar arasındaki bağlanma enerjisiyle ilgili olarak katıdaki daha az sıkı bağlı atomlar önce süblimleşir. SiC' de, Si, önce birkaç kat serbest karbon türü bırakarak süblimleşir. Bu katmanlar, grafen oluşturan enerjiyi en aza indirmek için yüzeyde yeniden düzenlenir (Bachmatiuk & Rummeli, 2013).



Şekil 4.14. Grafenin SiC üzerinde epitaksiyel büyümesi şematik gösterimi

5. POLİMERLER ve POLİMER TÜRLERİ

Polimerler, kovalent olarak bağı atomlardan oluşan uzun moleküler zincirlerdir. Bir polimer genellikle, monomer adı verilen küçük molekülü birimlerin birleşerek, yüksek molekül kütlesine sahip çok sayıda tekrar eden aynı yapısal birimlerden sentezlenir. Sınırlı sayıda tekrar eden birimler tarafından oluşturulan düşük moleküler kütleli moleküller oligomerleri oluşturur. Moleküller arası bağlanma, çapraz bağı olmayan polimerlerde, Van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağları gibi ikincil etkileşimler ve ayrıca zincirler arasındaki dallanmalarla oluşur. Van der Waals kuvveti, birbirini karşılıklı olarak etkileyen çeşitli moleküllerdeki yük dağılımındaki değişikliklerin neden olduğu çekimdir (With, 2018).

5.1. Polimerlerin Yapıları

Bir zincir boyunca temel birimler aynı tipte tekrarlandığında, ortaya çıkan polimere homopolimer denir. Zincirler, en az iki veya daha fazla farklı tekrar temel birimlerden oluşuyor ise kopolimerler olarak adlandırılır. Monomerler, iki boyutlu bir moleküler zincir yapısı oluşturabilen ve diğer monomerlerle iki kovalent bağı oluşturmak üzere reaksiyona girebilen aktif bir bağı sahiptir (Callister, 2007).

Makromoleküller yapı ise en az bin atomun bir araya gelmesiyle kovalent bağı bileşikler oluşturan dev moleküllerdir. Doğrusal, dallanmış zincirler veya üç boyutlu ağı yapılarına sahip olabilirler. Makromolekülün bileşimi aynı tip tekrardan rastgele dağılıma kadar değişebilen yapıya sahiptir.

5.2. Polimer Sentezi ve Prosesleri

Monomerlerin tekrar eden birimlerinden oluşmuş zincirlerin bir araya gelerek daha büyük makromoleküllü polimerlerin sentezine polimerizasyon denir. Polimer özellikleri, katkı malzemelerinin eklenmesiyle değiştirilebilir ve geliştirilebilir. Polimerizasyonun meydana geldiği reaksiyonlar, reaksiyon mekanizmasına göre, kondenzasyon ve katılma polimerleri olarak ikiye ayrılırlar (Callister, 2007).

5.2.1. Kondenzasyon polimerleri

Kondenzasyon (aşamalı reaksiyon) polimerizasyonu, birden çok monomer türünü içerebilen, moleküler arasındaki kimyasal reaksiyonlarla adım adım polimerlerin oluşturulması işlemidir. Reaktan türlerinin hiçbiri, tekrar biriminin kimyasal formülüne sahip değildir çünkü moleküller arası reaksiyon, her tekrar birimi oluşturulduğunda gerçekleşmektedir. Aşamalı reaksiyonda, art arda tekrarlanan lineer bir molekül üretilir. Yoğunlaştırma için reaksiyon süreleri, katılma polimerizasyonuna göre daha uzun sürmektedir. Ayrıca, kondenzasyon reaksiyonları, çapraz bağlı ve ağ polimerleri oluşturabilen üç işlevli veya daha yüksek işlevsel monomerleri içerebilir (Callister, 2007).

5.2.2. Katılma polimerizasyonu

Zincir reaksiyon polimerizasyonu olarak da adlandırılmaktadır. Monomer birimlerin zincir yapısına benzer bir şekilde birer birer eklendiği doğrusal bir makromolekül oluşturma işlemidir. Elde edilen ürün molekülünün bileşimi, orijinal reaktant monomerinin tam katıdır.

Katılma polimerizasyonunda üç farklı aşama (başlangıç, yayılma ve sonlandırma) yer alır. Başlatma aşamasında, bir başlatıcı (katalizör) türü ile monomer birimi arasında bir reaksiyon sonucu yayılma yeteneğine sahip bir aktif merkez oluşturulur. Yayılma aşamasında, aktif büyüyen zincir molekülüne monomer birimlerinin sıralı eklenmesi ile polimer zincirinde doğrusal büyüme meydana gelir (Callister, 2007).

Sonlandırma aşaması yayılmada sona erebilir veya farklı şekillerde sonlandırılabilir. Bunlar ya iki yayılan zincirin aktif uçları, bir molekül oluşturmak üzere birbirine bağlanabilir ya da iki "ölü zincir" oluşturmak üzere tepkimeye girerek büyüyen iki molekülü içerir. Böylece her zincirin büyümesi sonlandırılır (Callister, 2007).

5.3. Termoplastik ve Termoset Polimerler

Bir polimerin yükselen sıcaklık ile mekanik kuvvetlere karşı davranışı, onun moleküler yapısı ile ilgilidir (Callister, 2007). Kompozitlerin özellikleri özelleştirilebilir olduğundan

polimer matrisi, termoset, termoplastik veya her ikisinin kombini ile olabilir. Ayrıca, görünmezlik için gerekli olan elektromanyetik özellikleri, kompozitlere kolaylıkla dahil edilebilir. Yaygın olarak kullanılan termoset reçineler; epoksiler, siyanat esterler, bismaleimid reçineleri ve benzerleridir. Termoplastik reçineler; poli(eter keton), Poli(fenilen sülfür), poli(eter imidler) ve reaktif monomer bazlı reçineler ve benzerlerini içerir (Jayalakshmi ve diğerleri, 2019).

Bu malzemelerdeki sınıflandırma şeması termoplastikler ve termosetler olarak iki alt bölümden oluşur (Callister, 2007).

5.3.1. Termoplastik polimerler

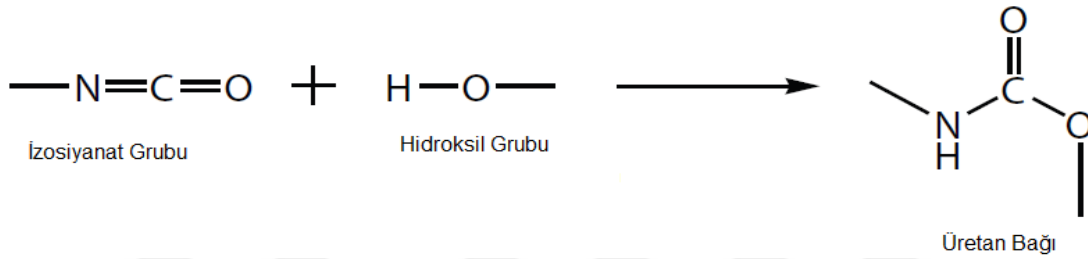
Termoplastikler, ısıtıldıklarında artan sıcaklık ile birlikte yumuşayarak sıvılaşır ve aynı zamanda tamamen tersine işlemlerle soğutulduğunda sertleşirler. Moleküler düzeyde, sıcaklık arttıkça, artan moleküler hareketle ikincil bağlanma kuvvetleri azalır, böylece bir stres uygulandığında bitişik zincirlerin hareketi kolaylaşır. Sıvı bir termoplastik polimerde çok yüksek sıcaklıklara çıkıldığında geri dönüşü olmayan bozulma ile sonuçlanır. Lineer polimerin çoğu termoplastik özelliğe sahipken esnek zincirli bazı dallı yapılara sahip olanlar da termoplastiktir. Termoplastik polimerler termoset plastiklerden daha yumuşak ve esnek yapıya sahiptirler (Callister, 2007).

5.3.2. Termoset polimerler

Termoset polimerler, ağ polimerleri olarak da adlandırılmaktadır. Oluşumları sırasında kalıcı olarak sertleşirken bu malzemeler ısıtıldıklarında yumuşamazlar. Ağ polimerleri, bitişik molekül zincirleri arasında kovalent çapraz bağ yapılarına sahiptir. Isıl işlemler sırasında bu çapraz bağlar, yüksek sıcaklıklardaki titreşim ve dönme zincir hareketlerine direnmek için zincirler birbirine tutunur ve bu nedenle malzemeler ısıtıldığında yumuşamaz. Çok yüksek sıcaklıklara ısıtma, çapraz bağların kopmasına ve polimerin bozulmasına sebep olur. Termoset polimerler genellikle termoplastiklerden daha sert ve daha güçlüdür (Callister, 2007).

5.4. Poliüretan (PU)

Poliüretan, çok çeşitli uygulama alanlarına sahip olan, polimer kategorisine ait bir yapıdır. Önemli miktarda üretan (etil karbamat) grupları içeren polimerler için kullanılır. Makrodiol/poliolün hidroksil grubu ile izosiyanat grubu arasındaki reaksiyonda, Şekil 5.1'de gösterilen üretan bağı oluşur (Akram ve diğerleri, 2020).



Şekil 5.1. Üretan bağı oluşumu.

Geleneksel bir polimer gibi, isim, tekrarlanan üretan bağlantılarından dolayı türetilmiştir. Poliüretan polimerleri genel olarak üretan bağlarından oluşan polimerler sınıfına ait değildir, reaktan üretanın monomerik polimerizasyonu ile sentezlenmezler. En çok tekrar eden birim üretan grubu olmakla birlikte ana bağlantı gruplarındaki moleküler zincir, üre, eter, ester veya aromatik bileşikler gibi birçok başka grup vardır. Poliüretanın polimerik malzemesi, özel kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip sistemlerdir. Aynı zamanda özellikleri yapısal ve kimyasal değişikliklerle değiştirilmektedir. Yumuşak, esnek malzemeden sert ve sert malzeme gibi geniş spektrumda özellikler kazandırmaktadır. İstenen özelliklerde kaplama, elastomerler, sert, su bazlı, esnek termoplastik, yapıştırıcı ve sızdırmazlık malzemeleri gibi çeşitli gruplara ayrılabilir (Akram ve diğerleri, 2020).

Mükemmel bir kaplama özelliğine sahip olan poliüretanlar, yüzeyi aşınma, yıpranma, korozyon ve hava koşulları gibi olumsuz şartlara karşı koruma sağlar. Poliüretanın önemi, karmaşık kimyasındaki benzersiz formülasyonları hem homojen hem de heterojen emülsiyonların geliştirilmesi bu pazarda yerini almasındaki ana etkenler arasındadır. Birkaç yüzey dışında, yüzeylerin çoğu için kullanım kolaylığı sağlarken, ek kütle maddeleri olmadan kolay küreleşebilmesi, çeşitli uygulama yöntemleri kullanılarak kolay kullanımı çevre dostu bir özelliğe sahip olması nedeniyle mükemmel bir tercih haline getirmektedir. Metallerin kaplanması amacıyla, uçaklarda kullanılan yüksek parlaklıktaki dokular, poliüretan kaplama kimyasal olarak dirençli davranır. Kaplamada poliüretanların, düşük

sıcaklıkta esneklik, korozyon direnci, tokluk, iyi mekanik mukavemet, mükemmel aşınma direnci gibi nitelikleri nedeniyle geniş bir uygulama alanı vardır (Akram ve diğerleri, 2020).

Esnek bir poliüretan (PU) köpüğe dayalı nanokompozitler, vulkanize silikon kauçuğun n-heksan çözeltisi içinde emdirilerek, doping solüsyonu adı verilen grafit nano tabakalar ile hibridize edilerek radyo frekansı dalga soğurucu özellikte bir malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. PU köpük, elektriksel iletkenlik, geçirgenlik ve yansıma kaybı gibi yapısal parametrelerdeki özelliklerin etkilerinin değerlendirilmesi için, farklı yapılara sahip çeşitli köpüklere, çapraz bağlanabilir doping çözeltisinde emdirme işlemi uygulamışlardır. Elektriksel iletkenlik, 4-6 GHz frekans aralığında dalga kılavuzu yöntemiyle ölçülmüştür. İri kalın duvarlı PU köpük numunesi, benzer miktarlarda iletken SR/ grafit nano tabakalar katkılı ince ağ yapılı numuneden daha yüksek iletkenlik ve geçirgenlik sergilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, iri köpük numunelerine dayanan nanokompozitler, ince ağ yapılı PU köpüğünden daha düşük emici kalınlıkta dalga absorpsiyonu için daha yüksek potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir (Shafieizadegan-Esfahani ve diğerleri, 2012).

Bu çalışmada toroidal şekilli numunede karbon karası tozu / poliüretan nanokompozitler hazırlanmış ve metal destekli, tek katmanlı soğurucu için farklı kalınlıklarda elektromanyetik ve mikrodalga soğurma özellikleri incelenmiştir. Karbon karası tozunun, PU içinde farklı konsantrasyonlarda dağılması, 2,0 mm numune kalınlığı için, 10,64 GHz ile eşleşen frekansta, %95'ten (17,07 dB) fazla mikrodalga absorpsiyonu elde edilebileceği ve %99'dan (24,60 dB) fazla absorpsiyon sağlanacağını belirtmişlerdir. 1,0 ml PU içinde optimum ağırlıkça %23,07 (300 mg) karbon siyahı dolgu maddesi için 5,1 GHz ile eşleşen frekansta 4,0 mm numune kalınlığı için elde edildiği gözlemlenmiştir. Böylece, hazırlanan karbon karası tozu/PU nanokompozit, gizli teknolojide ve belirli mikrodalga frekansları bandı için EMI korumada kullanılabilir olabileceğini savunmuşlardır (Tripath ve diğerleri, 2015).

Poliüretan reçineye katkılanmış farklı miktarlarda karbon fiberden oluşan, karbon fiber radar emici kaplamalar, su bazlı teknolojileri kullanarak hazırlamışlardır. Kaplamaların mikro yapıları ve özellikleri, SEM, DSC, FT-IR, XRD ve vektör ağ analizi kullanılarak karakterize edilmiştir. Sonuç olarak, karbon fiber içeriğindeki ve kaplama kalınlığındaki bir artışla, karbon fiber radar emici kaplamaların tepe yansımasının düşük frekans yönünde hareket ettiğini gözlemlemişlerdir. Karbon fiber içeriği ağırlıkça %0,8 ve kaplamanın

kalınlığı 1,2 mm olduğunda, kaplamaların maksimum yansıma kayıpları 8–18 GHz frekans aralığında –11,01 dB iken, yaklaşık 4,2 GHz bant genişliği ve 1,02 kg m⁻² kaplama yoğunluğu ile -10 dB'den az bant genişliğinde olduğu bildirilmiştir. Sonuç olarak, karbon fiber radar emici kaplamaların 8-18 GHz frekans aralığında kullanılan potansiyel bir mikrodalga emici malzeme olabileceğini bildirmişlerdir (Ban ve diğerleri, 2017).

Bu çalışmada radar soğurucu kaplama üretimi için, dolgu olarak karbon fiber ve matris olarak poliüretan ile karbon fiber poliüretan radar soğurucu kaplama ve daha sonra poliüretan kaplama ile çok katmanlı karbon fiber poliüretan radar soğurucu kaplama hazırlanmıştır. Çift katmanlı karbon fiber poliüretan radar soğurucu kaplama ve Dört katmanlı karbon fiber poliüretan radar soğurucu kaplama olarak dizayn edilen kaplamanın kalınlığı ve sıralaması optimize edilmiştir. Dolgu ve kaplamanın karakterizasyonu, SEM ve metalografi mikroskobu ile araştırılmıştır. Kaplamanın radar dalgası yansıtıcılığını test etmek için vektör ağ analizör kullanılmıştır. Soğurma özelliğinin, kaplamadaki karbon fiber uzunluğu, içeriği ve çeşitli soğurucu katmanları düzenindeki uyum ve katman kalınlığı gibi parametrelerden büyük ölçüde etkilendiği sonucuna ulaşmışlardır (Liu ve diğerleri, 2017).

Benzer bir çalışma 4-15 GHz geniş bant frekans aralığında mikrodalga absorpsiyon özellikleri üzerine olan bu çalışmada Mg_{0,5}Zn_{0,5}Fe₂O₄ nanoparçacıkları jel yakma tekniği ile sentezlenerek, alüminyum substrat üzerinde ince tabakalı (~100 µm) ferrit polimer nanokompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Ferrit tozunun partikül boyutu, farklı adyabatik eşıcaklık gösteren öncüllerin, sitrat ile nitrat molar oranları değiştirilerek incelenmiştir. Nanokompozit kaplama, %88'den fazla absorpsiyon ile mükemmel geniş bant absorpsiyon özellikleri gösterdiği gözlemlenmiştir. En küçük ortalama parçacık boyutuna sahip stokiyometrik yakıt bazlı Mg_{0,5}Zn_{0,5}Fe₂O₄'nin en iyi mikrodalga absorpsiyon özelliklerini gösterdiğini belirtmişlerdir (Bhattacharyya ve diğerleri, 2019).

Bi ve ark. petek yapılı kompozitler, aramid kağıt çerçeveye modifiye edilmiş, karbon nanotüpler ve poliüretan reçinenin emprenye edilmesiyle üretimini gerçekleştirmişlerdir. Petek kompozitlerin yansıma kaybını ölçmek için vektör ağ analizi kullanılmıştır. Çift katmanlı petek kompozitler için, konsantrasyon gradyan tasarımı yöntemi, mikrodalga absorpsiyon bant aralığını genişleten çift absorpsiyon tepe rezonans noktası sağlayabileceğini vurgulamışlardır. Bu nedenle yansıma kaybını, çift katmanlı petek kompozitler için 4-18 GHz absorpsiyon bant aralığında, 14 GHz'e (< -10 dB) ulaştığı

belirtmiştir. Kompozitlerin absorpsiyon özelliği, çoklu saçılma, harmonik tepeler, CNT'lerin ortalama içeriğinin artmasıyla düşük frekanslı bir aşamaya geçtiği gözlemlenmiştir. Bozulmamış çift katmanlı petek çekirdek ile karşılaştırıldığında, sıkıştırma mukavemeti ve elastik modül sırasıyla %64 ve %123 oranında artırıldığı ve mükemmel mekanik ve absorpsiyon performansından yararlanan kompozitlerin, gizli teknoloji alanlarında önemli potansiyele sahip olabileceğini savunmuşlardır (Bi ve diğerleri, 2022).

5.4.1. Poliüretanın temel kimyası

Hidroksil gruplarından oluşan bileşikler çoğunlukla bağlantı grubundaki karbamik asit ve üretanların esterlerini üretir. Bu prosedür kısmında son kullanım izosiyanatların yerleştirildiği yer (Akram ve diğerleri, 2020).

Poliüretanlar, ultraviyole ışık aktivasyonu, katalizör, zincir uzatıcı, köpürtücü gibi herhangi bir katkı maddesinin varlığında, bir di/polü izosiyanat ile bir diol veya poliölün kimyasal reaksiyonuyla sentezlenirken tekrar eden üretan grupları oluşturur. Poliüretan, bağlantı gruplarındaki molekül zincirinde üre, ester, aromatik halka ve eter üretan bağlarıyla bulunur. Bu polimer sınıfı, çoğunlukla özellik ilişkisi içinde reaksiyon polimerleri olarak adlandırılan başka bileşiklerle birleşirler. Bu tür karışımları epoksiler, doymamış polyesterler ve fenolikler oluşturur (Akram ve diğerleri, 2020).

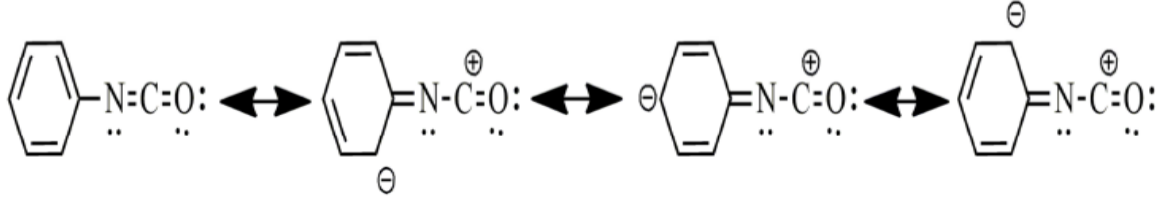
Reaktif izosiyanatlar, oda sıcaklığında izosiyanat hidroksil ile reaksiyonu kısmen yavaş gerçekleşir. İzosiyanat reaksiyonunun yavaş hızı, bir dereceye kadar, nispeten polar olmayan izosiyanat fazının ve nispeten polar veya daha az yoğun poliöl fazının faz uyumsuzluğunun bir göstergesidir. Bir yüzey aktif madde ile faz uyumlu olsa bile, reaksiyon oda sıcaklığında yavaş gerçekleşir. Poliöl molekülleri kesinlikle en az iki izosiyanat grubu ($R-(N)C(O)N_2$) ve buna uygun hidroksil gruplarından ($R_0-(OH)N_2$) oluşmalıdır. Poliüretanların gösterdiği nitelikler genellikle hazırlandıkları poliöl ve izosiyanat bileşenlerine bağlıdır. Genellikle, sert polimerler daha büyük bir çapraz bağlama içinde daha kısa zincirler ile sentezlenirken, yumuşak esnek polimerler ise düşük çapraz bağlanma ile polioller esnek ve uzun zincirler yardımıyla elde edilebilir (Akram ve diğerleri, 2020).

Üretan oluşumu aslında bir denge reaksiyonu göstergesidir. Bu yüzden bir katalizörün varlığı, çok yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça ters reaksiyonun hızını artırır. Poliüretan oluşumunda temel reaksiyon, zincir uzatıcı (diol veya diamin) ile izosiyanat arasında gerçekleşen zincir uzatma reaksiyon diğer önemli faktördür. Diol zincir uzatıcı olarak kullanıldığında üretan üretir, poliüretan sentezinin son aşamasında diamin reaksiyonu ise üre bağlarını üretir (Akram ve diğerleri, 2020).

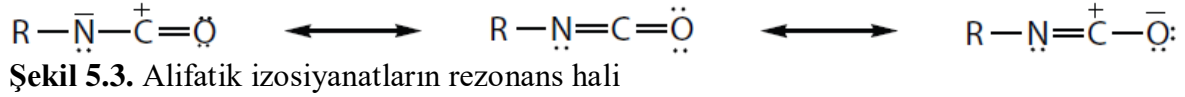
İzosiyanatlar

Poliüretanların en önemli yapı taşları monomerik diizosiyanattır. Monomerik diizosiyanatın kimyasal yapısı aromatik diizosiyanat (Şekil 5.2) ve alifatik izosiyanat (Şekil 5.3) olarak ikiye ayrılır (Çalıköğlü Y. , 2017; Akram ve diğerleri, 2020). Her iki monomer farklılıklar içermektedir. Alifatik diizosinat, aromatik diizosinat ile kıyaslandığında daha az reaktif özellik sergilemektedir. Alifatik diizosiyanat ile hazırlanan PU'lar UV ışığına maruz kaldığında daha az oksitlenmekte, ısı ve yaşlanma ile renk değişimine direnç göstermektedir. Aromatik diizosiyanatlar ise daha fazla oksidasyon göstermektedirler. Rezonans yapısı içeren izosiyanat grubunun yüksek reaktivitesi gösterilebilir. En düşük elektron yoğunluğu karbon atomlarından kaynaklanırken, daha yüksek elektron yoğunluğu oksijen atomu ile ilişkilendirilmektedir. Ani bir sonuç olarak, karbon atomunun pozitif bir yükü vardır, oksijen atomunun negatif bir yükü vardır ve nitrojen atomunun bir ara negatif yükü vardır (Akram ve diğerleri, 2020). Poliüretan mühendisliğinde kullanılan en önemli monomerler toluen diizosiyanattır. Bunlar (Akram ve diğerleri, 2020):

1. Toluen diizosiyanat, kaplama endüstrisinde katkı maddeleri ve prepolimerlerin sentezinde ham madde şeklinde kullanılmaktadır.
2. Geniş endüstriyel kullanımlar elde etmek için, difenilmetan 4,4'-diizosiyanat ilk diizosiyanat monomerleriydi.
3. Heksametilen diizosiyanat, çok çeşitli poliizosiyanat eklentilerinin sentezi için kullanılır. Heksametilen diizosiyanat, dış kaplamada kullanılan diizosiyanat monomeridir.



Şekil 5.2. Aromatik izosiyanatların rezonans hali



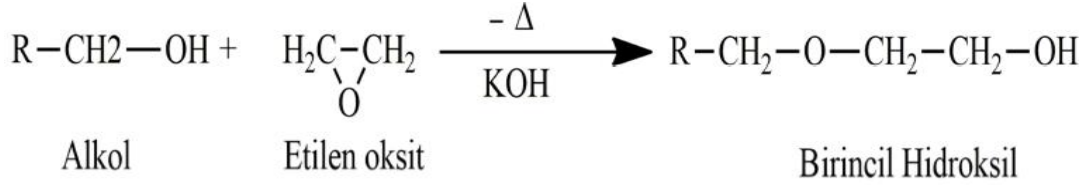
Şekil 5.3. Alifatik izosiyanatların rezonans hali

Polioller

Birden fazla fonksiyonel hidroksil grubu taşıyan maddelere polioller denir. Ayrıca ester, eter, amid, akrilik, metal ve diğer fonksiyonel grupları da içerebilirler. Polioller polieter polioller ve polyester polioller olarak sınıflandırılır (Das & Mahanwar, 2020).

Polieter polioller

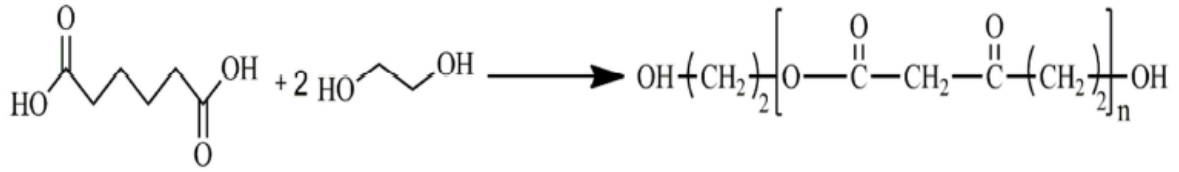
Bir epoksit ile aktif hidrojen içeren bir bileşik arasında katalizörlerin mevcudiyetinde bir polihidroksi molekülüne etilen oksit veya propilen oksit ilavesiyle üretilirler. Hidroksil sonlu bileşikler veya izosiyanat olan ana kısımların işlevsellikleri reaksiyon veya uygulamanın ihtiyacına göre değiştirilebilir, dallı ve çapraz bağlı polimerler hazırlanabilir. Teknik olarak düşük moleküler ağırlıklı polioller, daha yüksek konsantrasyondaki üretan bağlantısı nedeniyle sert ve sert poliüretan oluşumuyla sonuçlanır. Daha kısa zincir, daha yüksek moleküler ağırlıklı bir polimer, ön polimer üretmek için -NCO ile daha kuvvetli reaksiyona girer. Bununla birlikte, daha az üretan grubu veya daha düşük üretan bağları konsantrasyonuna sahip zincirler içerdiklerinden, ana reaktanlar olarak daha yüksek moleküler ağırlıklı polioller kullanıldığında ve daha esnek alkil zincirleri ile sonuçlanır. Yumuşak elastomerik PU, daha düşük işlevselliğe sahip uzun zincirli poliollerden oluşurken, yüksek işlevselliğe sahip kısa zincirli polioller daha sert, çapraz bağlı ürün ile sonuçlanır (Das & Mahanwar, 2020). Şekil 5.4'te polieter polioller oluşum reaksiyonu gösterilmektedir (Çalıköğlü Y. , 2017)



Şekil 5.4. Polieter polioliol oluşum reaksiyonu

Poliester polioller

İşlenmemiş ham maddelerden elde edilir ve genellikle çok diasitlerin ve glikollerin poliesterifikasyonu yoluyla üretilir. Poliester poliollerin oluşum reaksiyonları Şekil 5.5'te verilmiştir (Çalikoğlu Y. , 2017). Genellikle polyester polioller polieter poliollere göre daha viskozdur. Polyester, güçlü bağlar oluşturan hidrojen bağına sahiptir ve daha yüksek gerilme mukavemeti ve sertlik gibi özellikler sağlar (Das & Mahanwar, 2020).



Şekil 5.5. Poliester polioliol oluşum reaksiyonu

Aromatik izosiyanatlar, radikaller reaktiviteyi belirler, yani orto veya para pozisyonundaki elektron çeken radikal reaktiviteyi artırır ve elektron veren radikal ise izosiyanat grubunun reaktivitesini düşürür (Das & Mahanwar, 2020).

Zincir uzatıcı ajanlar

Zincir uzatıcılar senteze dahil edildiklerinde, sert segmentlerin boyutunu artırırken, hidrojen bağı yoğunluğu ve poliüretanın moleküler ağırlığını artırarak düşük moleküler ağırlıklı bileşiklerin elde edilmesine yardımcı olur. Poliüretanların özellikleri polioliol ve izosiyanatların yanı sıra, zincir uzatıcılar kullanılarak da önemli etki yaratır, ancak ağırlık oranları polimerin sadece küçük bir parçasını oluşturur. Reaksiyon kısa sürede gerçekleşirken, izosiyanatla reaksiyona giren sistemde viskozitede ani artış, polimer zincirlerinin hızlı bir şekilde uzamasını sağlar. İzosiyanat ve zincir uzatıcı arasındaki farklı

oranlar, poliüretanın formunda sert ve gevrek bir yapı veya yumuşak bir elastomer haline dönüştürülebilir. Zincir uzatıcılar üç ana grup içerir (Haponiuk & Formela, 2017):

- Dioller ve türevleri
- Diaminler ve bunların türevleri
- Aktif hidrojenli gruplar içeren diğer genişleticiler.

Amin ilavesiyle elde edilen poliüreler, diollerle sentezlenen poliüretanlara göre daha yüksek sertlik ve mukavemete sahiptir. Katı bölümlerin simetrik ve büyük hacimli olduğu bölümlere ayrılmış poliüretanlar en iyi fiziksel özellikleri gösterir. Daha yüksek sert segment içeriği, bir poliüretan elastomerin kırılma anında sertliğini ve modülünü artırırken uzamayı azaltır (Haponiuk & Formela, 2017).

Köpürtücü ajanlar

Köpürtücü/yüzey aktif maddeler poliüretan köpüklerin sentezinde kullanılır, ayrıca sentez sırasında köpüğün kabarcık oluşumunu ve hücre yapısını kontrol etmek için kullanılır (Akram ve diğerleri, 2020). Polimerik maddelerde köpüklerde kabarcık oluşumu fiziksel, kimyasal ve mekanik yöntemlerle elde edilmektedir. Genellikle sıvı faza gaz verilerek köpük elde edilmesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiziksel köpürtücü sistemler endotermik bir reaksiyon sonucu buharlaşma yoluyla poliüretanda genişleme sağlamaktadır. Kimyasal köpürtücüler ise izosiyanatlarla tepkimeye girmesiyle endotermik bir reaksiyon sonucu açığa çıkan karbondioksit gazı nedeniyle poliüretanda genişleme oluşur.

Katalizörler

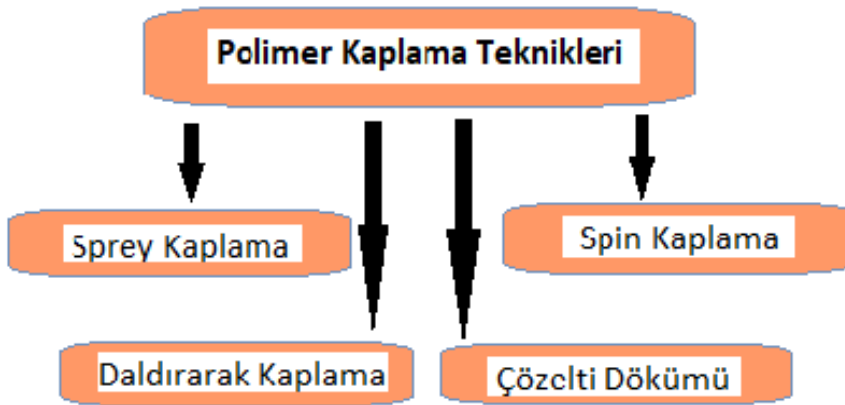
Poliüretan sentezinde kullanılan katalizörler, polimerde oluşum hızını etkilemektedir. Katalizörler kimyasal ve fiziksel yapısında değişiklik gösterirken bitmiş ürünün özelliklerini de etkilemeyi sağlar. Uygun katalizörler, istenen reaksiyonları seçici olarak hedefleyebilir, zincir büyüme hızını kontrol edebilir ve polimerin çapraz bağlanmasını sağlayabilmektedir. Ayrıca poliüretanların uygulamaları sırasında, özellikle poliester poliüretanların hidrolizi sırasında zincir bozulmasını da hızlandırır. Katalizörün aktivitesi, aktif hidrojen atomları içeren bir bileşik ile reaksiyona giren izosiyanatın geçiş kompleksinin oluşumuna dayanır. İzosiyanat grupları ile aktif hidrojen atom grupları arasındaki reaksiyonu hızlandırmak için üçüncül aminler ve organometalik bileşikler olmak

üzere iki tip bileşik türü vardır. Üçüncül aminlerin aktivitesi, baziklikleri arttıkça artar ve uzaysal engellenmenin bir sonucu olarak azalır. Amin katalizörler izosiyanat-su reaksiyonlarını izosiyanat-poliol reaksiyonlarına göre daha iyi katalizler. Organometalik katalizörler jel katalizörleri olarak görülse de şişme reaksiyonlarını da katalizler (Haponiuk & Formela, 2017).

5.5. Polimer Kaplama Yöntemleri

Bir malzemede kaplama, substratın yüzeyi üzerine yayılan kaplama olarak adlandırılır. Kaplama, uygulanacak yüzeyin tamamını veya altlık yüzeyi kısmen kaplayabilir. Malzemenin, aşınma direnci, yapışma, ıslanabilirlik ve korozyon direnci, vb. gibi morfolojik özellikleri kaplama yapılarak geliştirilebilir. Ayrıca kaplama, elektriksel iletkenlik, manyetik tepki gibi malzemelere yeni özellikler katmak için kullanılmaktadır (Sabir ve diğerleri, 2020).

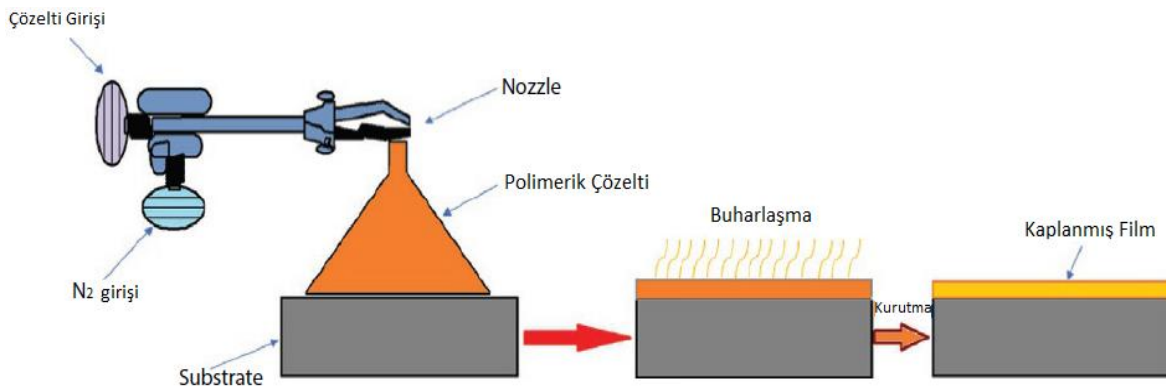
Kaplama malzemesi olarak çok sayıda polimer kullanılmıştır. Polietilen, polipropilen, polietilen tereftalat ve naylon vb. kaplama malzemesi olarak kullanılan yaygın soğurucu polimerlerdir. Kaplamada polimer tercihi düşük fiyat, düşük ıslanabilirlik ve mükemmel mekanik özelliklere bağlıdır. Bazı kaplama teknikleri Şekil 5.6' da gösterilmiştir (Sabir ve diğerleri, 2020).



Şekil 5.6. Polimer Kaplama Teknikleri

5.5.1. Sprey kaplama

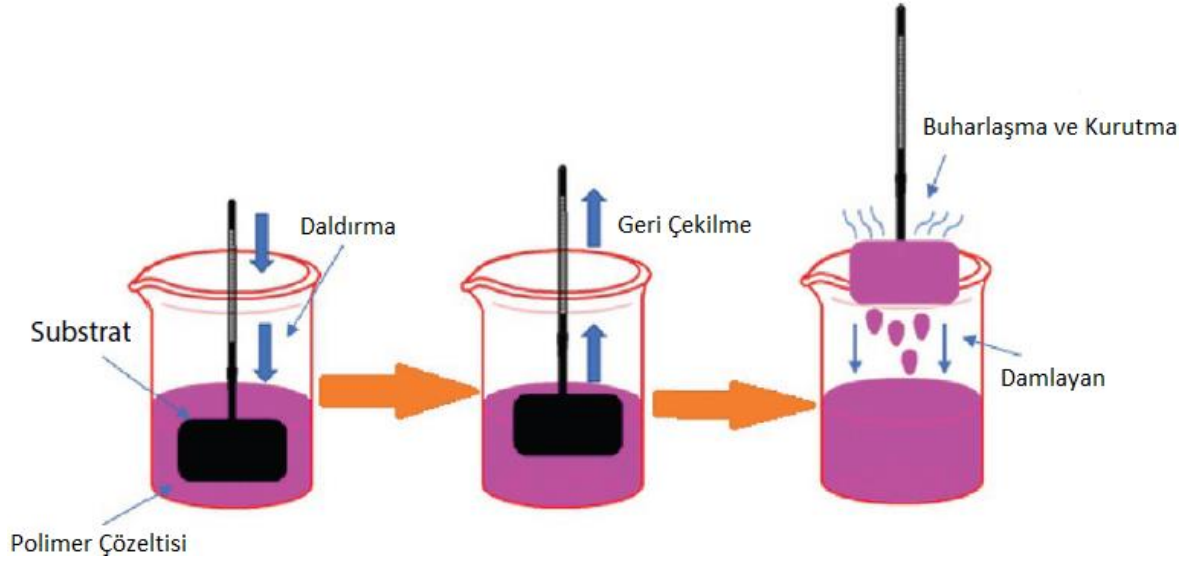
Sprey kaplama, bir substrat üzerine kaplama uygulamak için kolay bir tekniktir. Bu işlemde, önce uygun adsorban polimer içinde çözülür ve daha sonra hazırlanan polimerik çözelti, Şekil 5.7' de gösterildiği gibi bir substrat yüzeyine püskürtülür (Sabir ve diğerleri, 2020). Sürekli damlacık akışı oluşturmak için, püskürtme kafasındaki nozzle, istenen malzemeyi atomize etmektedir. Atomizasyon işlemi için yüzey gerilimi, viskozite, nozzle tasarımı ve gaz akışı gibi önemli işlem parametrelerine sahiptir (Sabir ve diğerleri, 2020).



Şekil 5.7. Substrat üzerine sprey kaplama tekniği

5.5.2. Daldırarak kaplama

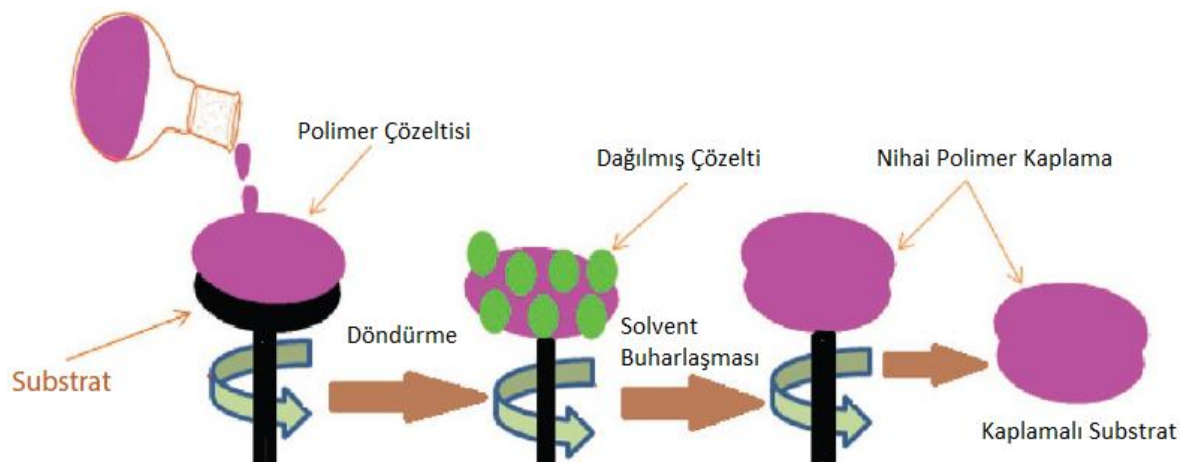
Üç boyutlu cisimleri kaplama için daldırma kaplama tekniği uygulanmaktadır. Bu teknikte, malzeme, Şekil 5.8' de gösterildiği gibi çözünmüş adsorban içeren polimer çözeltisine batırılır. Batırılan malzeme geri çekilir, çözücü buharlaştırılarak uzaklaştırılır ve malzeme uygun sıcaklıkta kurutulurken homojen bir film elde edilmiş olur. Bu teknikteki en önemli avantajlar, homojen ve kaliteli filmler elde edilmektedir. Daldırma süresi, daldırma döngüsü, geri çekme hızı, çözelti bileşimi ve konsantrasyon ayarı gibi kontrol parametreleri, benzersiz daldırma film kalınlığı ve gerekli özellikleri elde etmek için en önemli unsurlardır (Sabir ve diğerleri, 2020).



Şekil 5.8. Katı cisim üzerine daldırma kaplama tekniği

5.5.3. Spin (Döndürmeli) kaplama

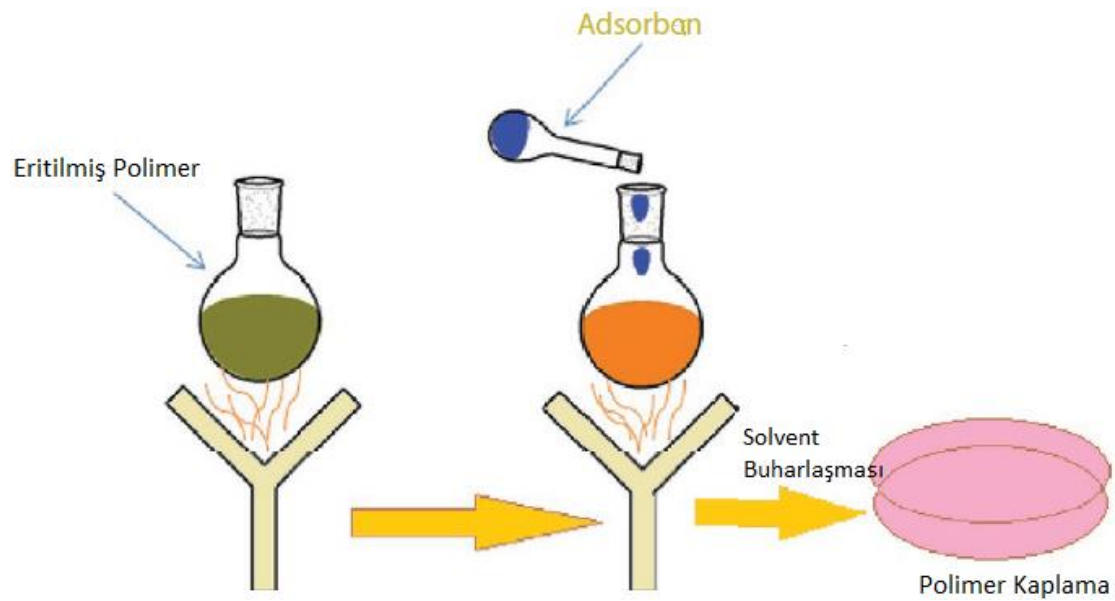
Spin kaplama tekniği kaliteli ve ince filmler elde etmek için uygulanmaktadır. Bu teknikte Şekil 5.9’da görüldüğü gibi merkezkaç kuvveti yardımıyla substratın ortasına eklenen kaplama malzemesi döndürme yöntemi uygulanarak santrifüj etkisi altında substrat yüzeyinde yayılır. Alt tabaka gerekli eğirme hızını kazandıkça, kaplama malzemesi alt tabaka üzerine yayılır. Bu yöntem, en gelişmiş polimer film oluşturma tekniğidir ve kaplama aleti ise spin kaplayıcı olarak adlandırılır (Sabir ve diğerleri, 2020).



Şekil 5.9. Substrat üzerinde spin kaplama

5.5.4. Eriyik döküm

Eriyik döküm yöntemi, polimer çözeltisini bir substrat üzerine kaplamak için geliştirilmiş basit bir kaplama yöntemidir. Bu teknikte, polimer çözeltisindeki eritilmiş adsorban katı cisim üzerine basitçe dökülür ve Şekil 5.10'da gösterildiği gibi istenen sıcaklıkta buharlaşmasına izin verilir. Alt tabaka üzerinde elde edilen film, bir kaplama görevi görür ve dış ortamdaki olumsuz şartlara karşı koruma sağlar (Sabir ve diğerleri, 2020).



Şekil 5.10. Eriyik döküm tekniği

6. HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN BOYALAR

Boyalar, havacılık uygulamalarında görünüm, yüzey koruma ve gizli kaplamalar olarak önemli kullanım alanına sahiptir. Genellikle nihai korumayı sağlamak için astar ve son kat olarak uygulanmaktadır. Boyalar yüzey özelliklerine yönelik gereksinimlerde farklılık gösterse de askeri uçaklar için son kat boyalar ve kaplamalar, termal flaş direnci, radar sinyali emici ve kamuflajı içeren gelişmiş askeri ihtiyaçları karşılamaya yönelik olmuştur (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

6.1. Boya Formülasyonları

Bir boya sistemi, bağlayıcı, pigment, solvent ve katkı maddeleri olarak ayrılmaktadır ve boyanın özellikleri daha çok bileşenlerine bağlıdır (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

6.1.1. Bağlayıcılar

Film oluşturma mekanizmasını, hava şartlarına dayanıklılık ve çevresel direnç belirler. Havacılık uygulamaları için epoksi reçineler, poliüretan (PU) reçineler, akrilikler yaygın olarak kullanılan bağlayıcılardır. PU reçineleri, iyi bir parlaklık koruma ve dayanıklılığa sahiptir (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

6.1.2. Pigmentler

Pigmentler, korozyon önleyici ve renklendirici olarak sınıflandırılmaktadır. Boyaya korozyon önleyici özellikleri, rengini ve akış kontrol özelliklerini belirlerler. Boyanın viskozitesi, pigment partikül boyutu ve şekline, bağlayıcı tarafından ıslanabilirlik kolaylığına ve özgül ağırlığa bağlıdır. Viskozite, ıslak kaplamanın uygulama özelliklerini ve kuru koruyucu kaplamanın özelliklerini etkiler (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

6.1.3. Solventler

Solventler, boya uygulamasında yarıkların, boşlukların veya çökük düzensizliklerin kapatılmasına yardımcı olur ve ıslanabilirliği sağlar. Fakat kuruyan kaplamada akmaları ve sarkmaları önlemek için hızlı buharlaşmalıdır. Hemen hemen tüm kaplama formülasyonları, gerekli sertliğe, sertleşmeye ve nihai özelliklere ulaşmasını sağlamak için bir solvent karışımı kullanır. Yaygın olarak kullanılan çözücüler terebentinler, hidrokarbonlar, ketonlar, esterler, alkoller ve glikol eterlerdir (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

6.1.4. Katkı maddeleri

Boya formülasyonunda bazı özellikleri katmak için birtakım bileşikler gereklidir. Bunlar arasında kurutucular, kabuklanma önleyici ve çökme önleyici maddeler, mantar öldürücüler veya bakteri öldürücüler ve pigment dağılımına yardımcı olmak için kullanılan yüzey aktif maddeler bulunur. Genişleticiler ise, maliyeti düşürmek ve pigmentin bir kısmını değiştirmek için kullanılan bileşenlerdir (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

6.2. Boya Uygulamaları

Geniş dış ve iç yüzey alanlarına sahip askeri araçların yapımında birkaç çeşit malzeme türü kullanılabilir. Fakat ana yapısal malzemeleri alüminyum alaşımları oluşturur. Yüzey korumasına ek olarak, yüzeye bağlı kalan türbülanssız bir hava akışını desteklemek için dış yüzeye boyalar uygulanmaktadır. Askeri hava araçları operasyonlar sırasında düşmana karşı gizlenmede, kamuflaj özellikleri için boya uygulamasına gerek duymaktadır (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

6.2.1. Epoksi astarlar

Epoksi astarlar 15,5 °C ile 37,7 °C arasındaki sıcaklıklarda uygulanırken hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Astarlar, alt tabakanın korozyonunu engellerken, uygulanacak son katların yapışma özelliğini artırır. Reçine moleküllerinin uçlarındaki epoksit halkaları ve moleküler zincir boyunca bir dizi hidroksil grubu, reçineleri polar yapar

ve polar/metalik yüzeylere iyi yapışmasını destekler. Epoksilerin iyi kimyasal ve nem direnci, kararlı C-C bağı ve eter bağlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Eter kısmı, boya filmine çok daha iyi renk verir (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

6.2.2. Asitleme/yıkama astarları

Ön işlemden geçmemiş demir dışı metallere, sarı bir epoksi astar uygulanmadan önce ön işlemler olarak kullanılırlar ve bunlara metal koşullandırıcılar denir. Asitleme astarları, metal yüzeylere uygulanan fosfatlama ve kromatla durulanması ortadan kaldırır. Aşındırma astarlarının üç yönlü etkisi vardır:

- a. İlk olarak, metal üzerinde bir çinko fosfat filmi biriktirilir.
- b. İkinci olarak, fosfat filminde bulunan herhangi bir iğne deliğinin onarımı için sürekli bir kromat iyonu temini sağlar.
- c. Üçüncü olarak, bir polivinil bütiral (PVB) film, bir krom kompleksi aracılığıyla organik katmana kimyasal olarak bağlanır (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017) .

6.2.3. Son katlar

Epoksi son katlar

Işık ve hava etkisiyle solma, matlaşma, tebeşirlenme gibi eğilime sahip olduğundan dolayı sadece iç mekan uygulamalarında kullanılır.

PU son katlar

Düşük sıcaklıkta kürlenebilme, yüksek esneklik, tokluk, aşınma direnci ve kimyasallara karşı direnç ve hava koşullarına dayanıklılık gibi özelliklere sahip olduklarından dolayı PU son katlar dış yüzeylerde kullanılmaktadır. Son kat kaplamalar, izosiyanatla kürlenmiş bir polyester polioliol/akrilik polioliol reçinesinden oluşur ve izosiyanat içeren ($-N=C=O$) bir malzeme ile apolihidroksilat içeren ($-OH$) yardımcı reaktanlı bir malzeme arasındaki çapraz bağlanma reaksiyonuyla oluşturulur. Polihidroksil grubunun aktif hidrojeni için teizosiyanat grubunun yüksek reaktivitesi ve afinitesi nedeniyle çapraz bağlanma meydana gelir. İzosiyanat reaktanı bir alifatik hidrokarbon olması, bunların solmaya veya kararmaya

karşı dirençleri ve içeriğinde bir benzen halkası içermemesi nedeniyle iyi ışık stabilitesine sahiptirler (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).

Akrilik son katlar

DTD 5602, uçaklarda genel amaçlı kullanılan akrilik bir ciladır ve DTD 5599, seçici olarak sıyrılabilen akrilik bir kaplamadır. MIL-L-81352, metal yüzeyler için dış koruyucu kaplama olarak kullanım için birinci sınıf akrilik nitroselüloz cila (parlak, kamuflaj tonları) kapsar (Shunmugapriya ve diğerleri, 2017).



7. MATERYAL YÖNTEM

7.1. Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar

Poliüretan çift komponentli boya; Şahikagroup, Karbon(C) tozu (%99,99 saflık); Sigma Aldrich, MnO₂ tozu; Merck Schuchardt OHG, Fe tozu; ZAG Kimya tarafından temin edilmiştir.

Poliüretan/Karbon, Poliüretan/MnO₂, Poliüretan/Karbon/MnO₂, Poliüretan/Karbon/Fe, Poliüretan/MnO₂/Fe kompozitleri, Alüminyum plaka yüzeyine uygulanan spreylendirme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Poliüretan boyanın, bileşenli ve bileşensiz analizi TGA/DSC (HITACHI/ NEXT STA 300 marka model) yöntemi ile 30°C-500°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Toz numunelerin analizi dalga kılavuz yöntemiyle, 2-18 GHz frekans aralığında analizi gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin radar dalgası özellikleri, (Agilent 2-Port PNA-L marka) Network Analizör'ünde analiz edilmiştir. Ölçümler 3–18 GHz geniş frekans aralığında, numune tarafından iletilen ve yansıyan sinyallerin araştırması yapılmıştır.

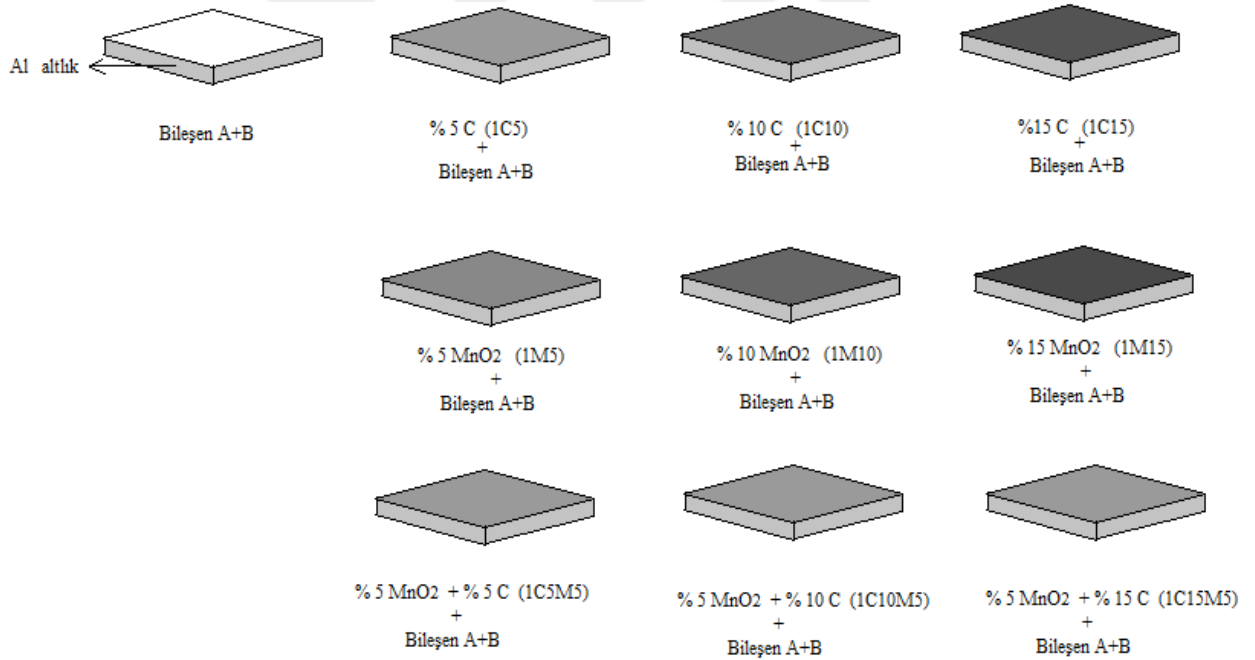
7.2. Yöntem

Bu çalışmada hazırlanan bileşenlerin oranları ve kodları Tablo 7.2'de belirtilmiştir.

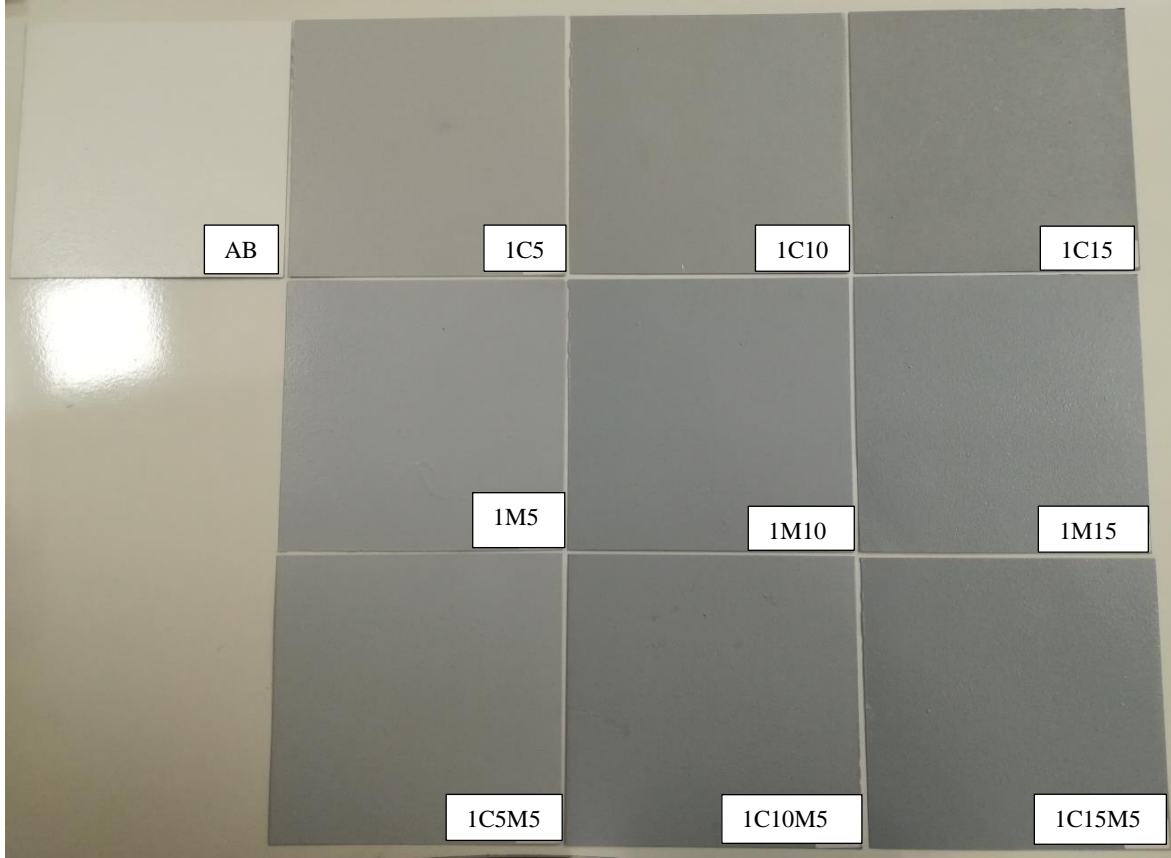
Tablo 7.2. Al yüzeyine tek kat uygulanan boya içerisinde farklı oranlarda kullanılan tozların karışım oranları ve plaka kodları

	C Miktarı	MnO ₂ Miktarı	(C+MnO ₂) Miktarı	Fe Miktarı
1. Karışım (%)	5	5	5	-
Numune Kodu	1C5	1M5	1C5M5	-
2. Karışım (%)	10	10	10	10
Numune Kodu	1C10	1M10	1C10M5	1F10
3. Karışım (%)	15	15	15	-
Numune Kodu	1C15	1M15	1C15M5	-
4. Karışım (%)	20	20	20	-
Numune Kodu	1C20	1M20	1C20M5	-
5. Karışım (%)	25	25	25	-
Numune Kodu	1C25	1M25	1C20M5	-

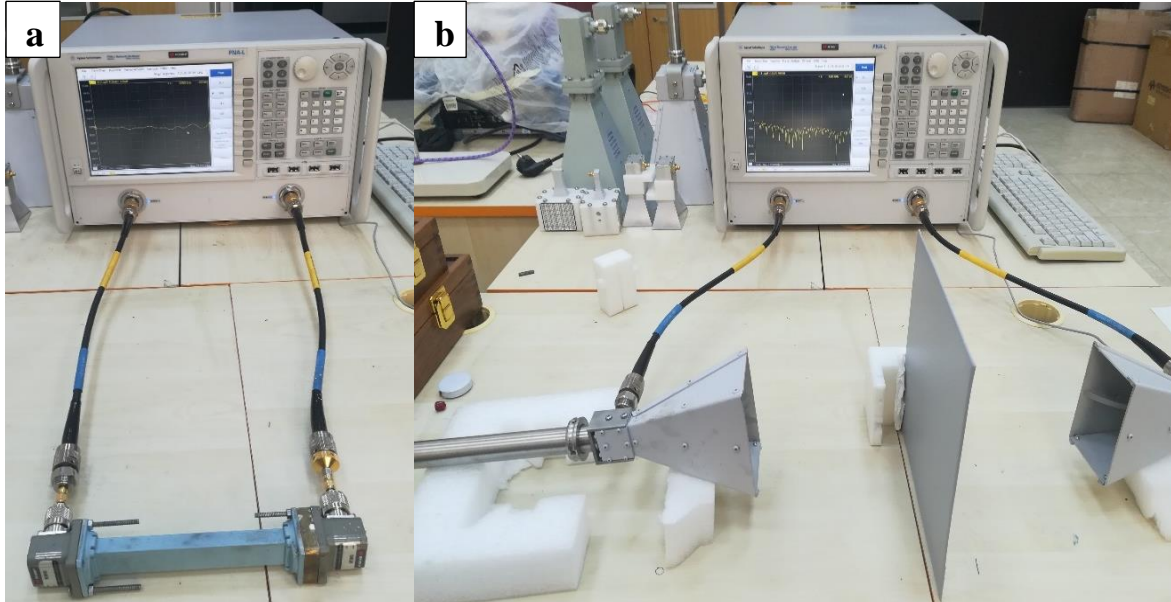
Üç farklı takviye elemanı (Karbon, MnO_2 , $C+MnO_2$) ile hazırlanmış kompozit kaplamalar, farklı konsantrasyonlarda (ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 katkı) hazırlandı. Plakalara, ilk olarak tek kat kaplama yapılmıştır. Ağırlıkça farklı derişimlerdeki C, MnO_2 ve $C+MnO_2$ tozları, ayrı numune karıştırma şişelerinde, 3 g tiner içerisinde disperse edildi. Hazırlanan homojen karışımların her birine, 20 g A komponenti ve 2 g B komponenti ilave edildi. Karışımın homojen hale getirilmesi turbula cihazı yardımı ile gerçekleştirildi ve 1 saat boyunca karıştırıldı. Uygulama viskozitesinde hazırlanan boya karışımı, sprey kaplama yöntemi kullanılarak uygulandı. Oda sıcaklığında ($17^{\circ}C-22^{\circ}C$) ve yardımcı inert gaz (Ar) ile 15-18 L/min değerleri arasında basınç uygulanarak sprey tabancasıyla yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. (Her bir karışım için kullanılan plakaların ölçüleri 20 mm genişlik \times 20 mm uzunluk \times 0,5 mm kalınlığında Alüminyum plakalardır ve toz, kir, yağ gibi olumsuz davranışlar sergileyen parametrelerden uzaklaştırmak için zımpara işlemi uygulanarak, yüzeyi temizlenip boyanmaya hazır hale getirildi.)



Şekil 7.1. Farklı oranlarda hazırlanan boya ve kod karşılığının şematik gösterimi



Şekil 7.2. Al plaka yüzeyine uygulanan ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarına sahip plakaların görselleri



Şekil 7.3. a) Toz numunelerin dalga kılavuzu yöntemiyle (8-12 GHz) test edilmesi. b) Plakaların, iletilen ve yansıyan sinyallerinin (3-18 GHz) analiz edilmesi

% 5 MnO ₂	% 10 MnO ₂	% 15 MnO ₂
%5 C	% 10 C	% 15 C
Al altlık	Al altlık	Al altlık
1C52M5	1C102M10	1C152M15

Şekil 7.4. Karbon katmanına ikinci kat uygulanan boyanın oranları

Tablo 7.3. Al yüzeyine ikinci kat uygulanan boya içerisine farklı oranlarda kullanılan tozların karışım oranları ve plaka kodları

Oran	1. Kat	2. Kat	Plaka Kodları
% 5	C	MnO ₂	1C52M5
	MnO ₂	C	1M52C5
	C+ MnO ₂	C	1C5M52C5
% 10	C	MnO ₂	1C102M10
	MnO ₂	C	1M102C10
	C+ MnO ₂	C	1C10M52C10
	Fe	-	1F10
	C	Fe	1C102F10
	MnO ₂	Fe	1M102F10
	C+ MnO ₂	Fe	1C10M10F10
% 15	C	MnO ₂	1C152M15
	MnO ₂	C	1M152C15
	C+ MnO ₂	C	1C15M52C15

Plakalara uygulanan ikinci kat kaplama işleminde ise;

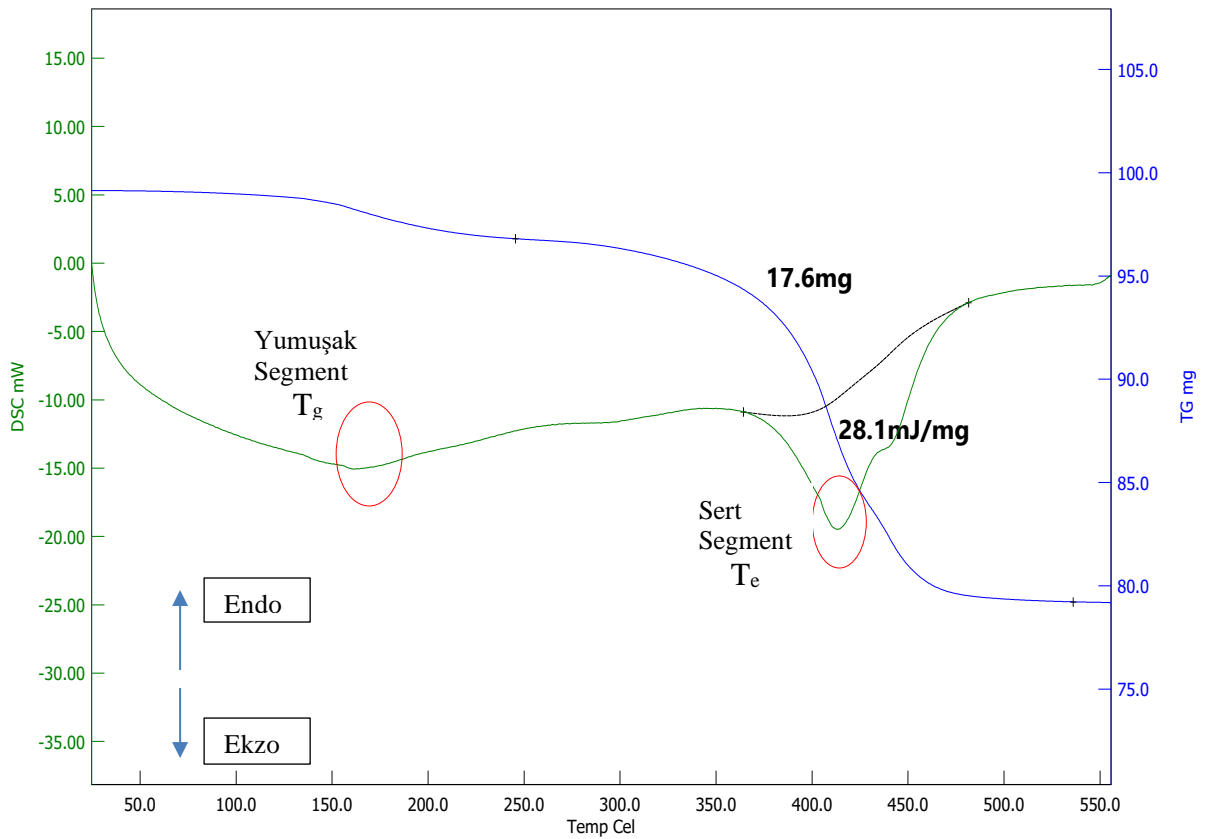
Ağırlıkça farklı derişimlerdeki C ile hazırlanan karışım, ilk katı kaplanmıştır ve kuruması için birkaç gün beklenmiştir. Daha sonra ağırlıkça farklı derişimlerdeki MnO₂ karışımı yukarıda da belirtildiği gibi aynı konsantrasyonlara sahip C ile eşleştirilerek ikinci kat tatbik edilmiştir. Aynı işlemler MnO₂-C, C+ MnO₂-C için gerçekleştirilmiştir.

İlk kat uygulanan C, MnO₂, C+ MnO₂ ilaveli kaplamanın ardından ikinci katmanında Fe takviyeli boyama gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %10 oranında kullanılan Fe tozu 6 g tiner içerisinde disperse edilmiştir. Hazırlanan çözelti, 40 g A komponenti ve 4 g B komponenti kullanılarak elde edilen boya karışımına takviye edilmiştir. Kaplanmış plakaların, yansıma ve iletim ölçüm değerleri Network Analizöründe incelenmiştir.

8. DENEYSEL BULGULAR

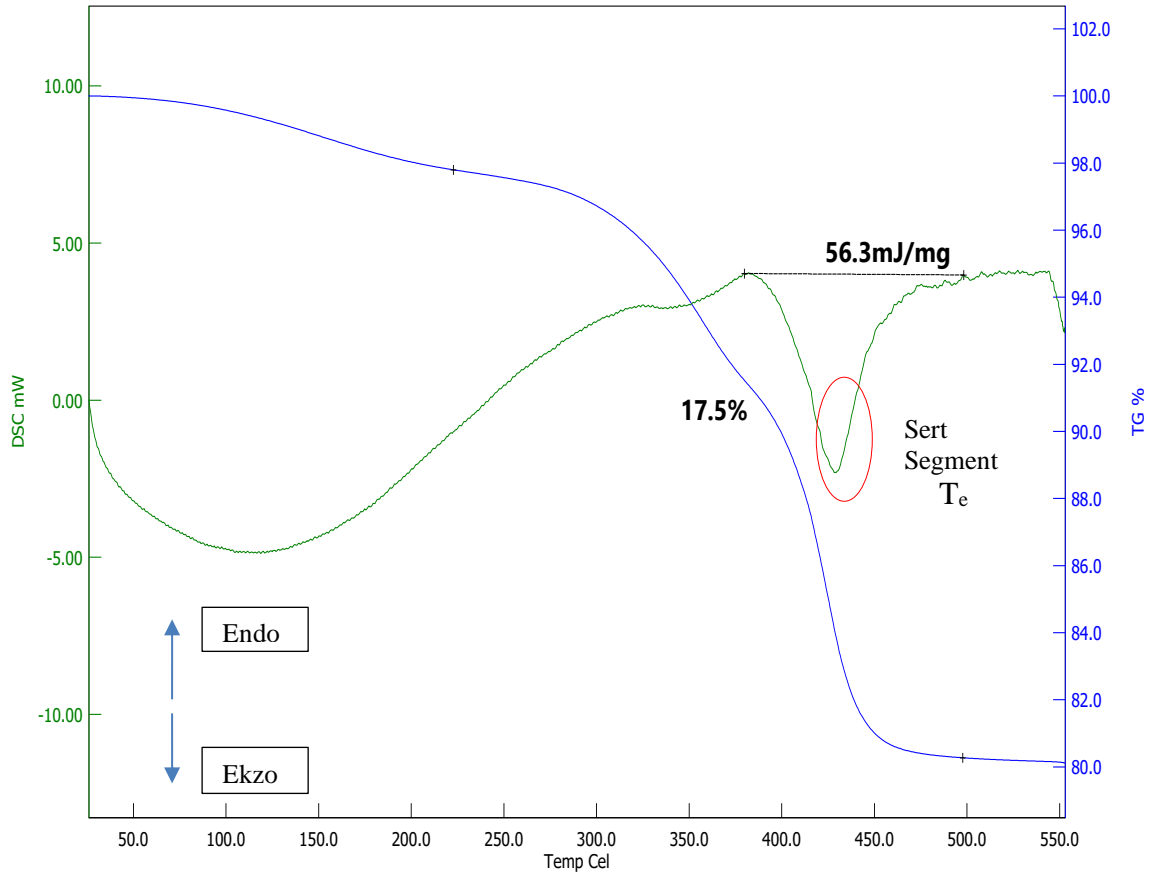
8.1. TGA/DSC Analiz Sonuçları

Komponent A ve komponent B arasındaki etkileşimleri incelemek için TGA-DSC analizi yapıldı. Analiz, 35°C-550°C arasında, N₂ atmosferinde, 10°C/min ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.1. Komponent A'nın TGA-DSC analiz sonuçları

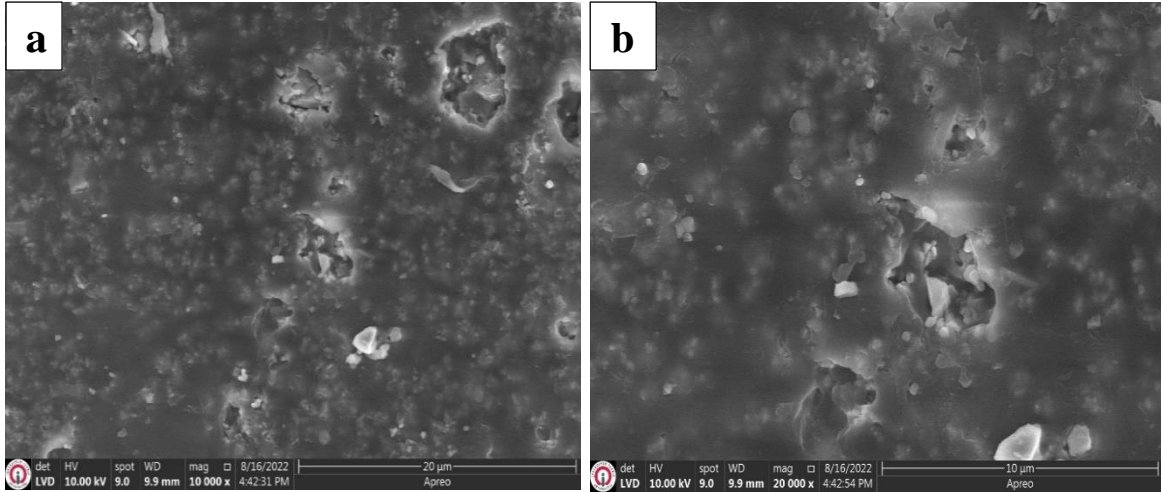
Komponent A için yapılan TGA/DSC analizi sonucundaki bazı karakteristik değişimlerde; DSC eğrisinde görülen 400°C-425°C arasındaki ekzoterm pik vermektedir. Bu pik sıcaklığın artmasıyla birlikte yapıdaki değişimi ifade etmekte ve entalpinin 28,1 mJ/mg olduğunu belirtmektedir. TGA eğrisinde ise iki aşamalı kütle kaybı söz konusu olup, % 17,6 oranındaki kayıp, yapıdan uzaklaşan uçucu bileşikleri ifade etmektedir.



Şekil 8.2. Komponent A ve komponent B karışımının TG-DSC analizi sonuçları

Komponent A ve komponent B bileşeni için yapılan TGA-DSC analizi sonucundaki bazı karakteristik değişimlerde;

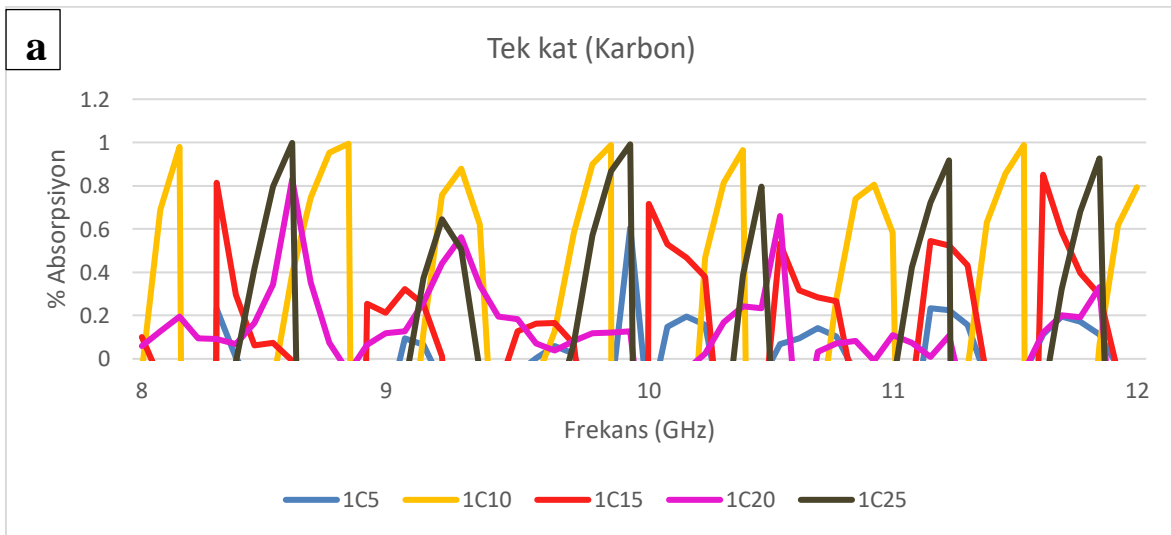
DSC eğrisinde 390°C-490°C arasında görülen pikin, ekzotermik karakterde bir reaksiyonu ifade etmekte ve tepkime entalpisinin 56,3 mJ/mg olduğu görülmektedir. Bu reaksiyon sonucu % 17,5 oranındaki kütle kaybının, yapıdan ayrılan uçucu bileşiklerden veya ürünlerdeki desorpsiyondan kaynaklı olduğu TGA eğrisinde görülmektedir.

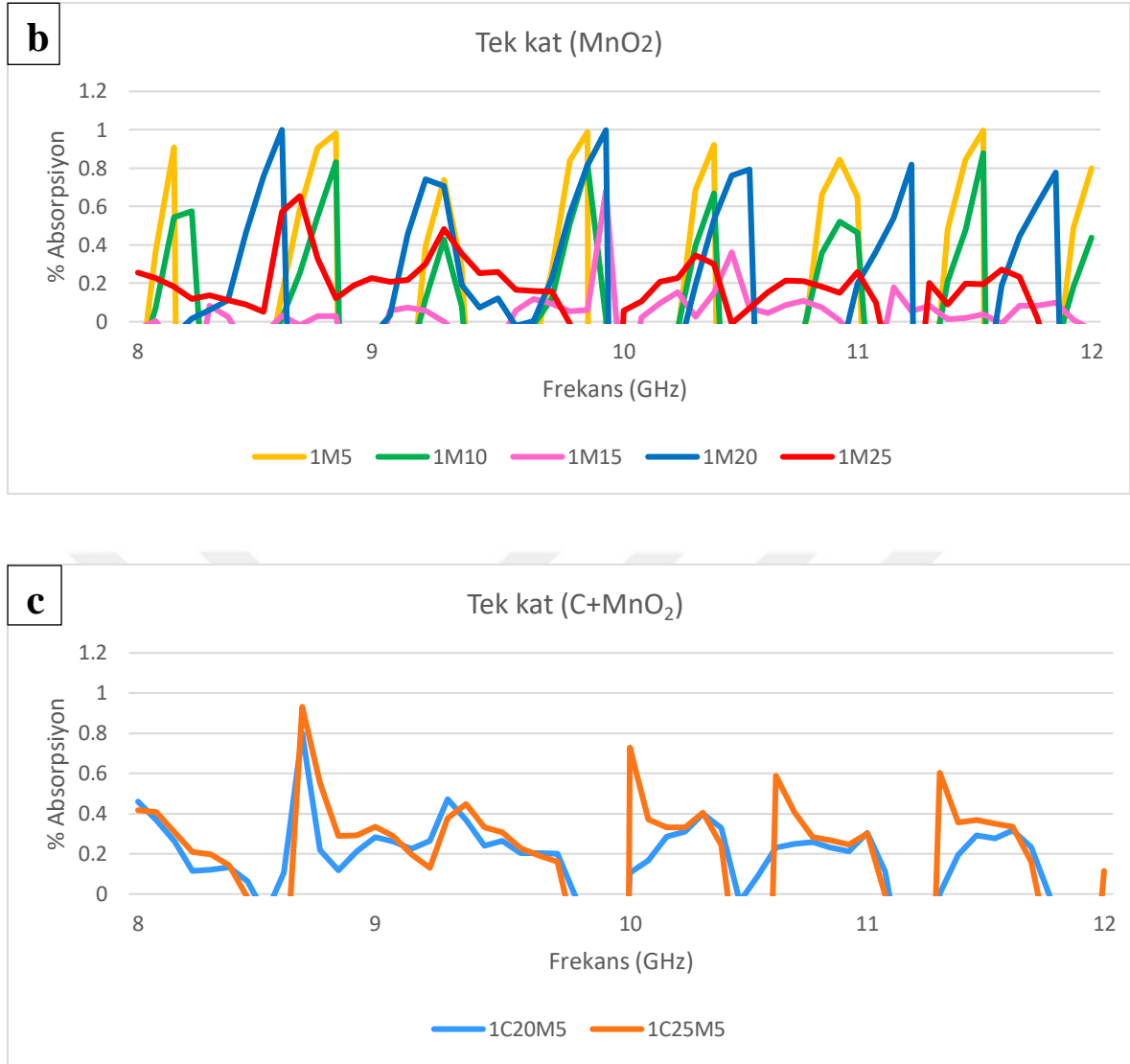


Şekil 8.4. Saf boyanın (Bileşen A+B ile tiner karışımı) a)10 000x b)20 000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 8.4'te ise saf boyanın 10.000X ve 20.000X büyütmelere sahip SEM görüntüsü verilmektedir. Şekil 8.4'te saf boyaya ait SEM görüntüleri incelendiğinde, komponent A ve komponent B çözücüde disperse olamamış bu nedenle aglomere olmuştur. Bölgesel kalıntıların mevcut olduğu görülmektedir.

8.3. Network Analiz Sonuçları



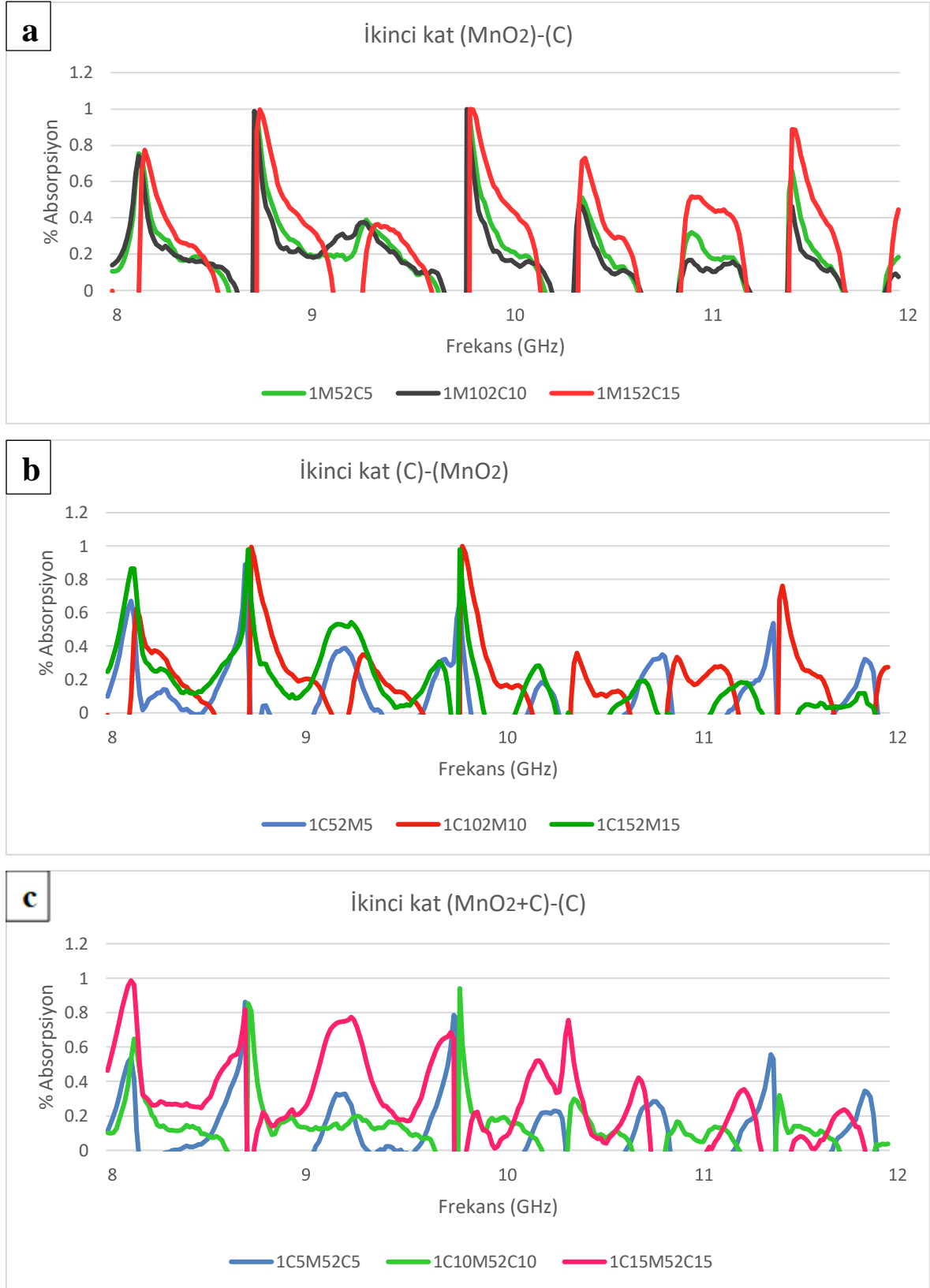


Şekil 8.5. a) C, b) MnO₂ c) C+MnO₂ takviye tozları ile hazırlanmış poliüretan boyanın alüminyum plaka yüzeyine tek katman uygulanması sonucu elde edilen X bandına ait absorpsiyon sonuçları

Şekil 8.5.a'da görüldüğü gibi en yüksek absorpsiyon değerleri belirli frekans bantlarında 1C10 numunesi kullanılarak elde edilmiştir. Bu teste metal levha ve hava kullanılarak kalibrasyon yapılmıştır. Metalik plaka, yansımaya parametresini normalleştirmek için kullanılan tam yansımaya sağlarken, iletim parametresini normalleştirmek için kullanılan tam aktarım için hava kullanıldı. Absorpsiyon davranışını belirlemek için hem iletim hem de yansımaya parametreleri kullanılmıştır.

Şekil 8.5.b grafiğinde ise 1M5 kodlu numune, X bandında en iyi soğurma davranışını sağlarken, diğer örnekler daha düşük soğurma oranlarına sahipti.

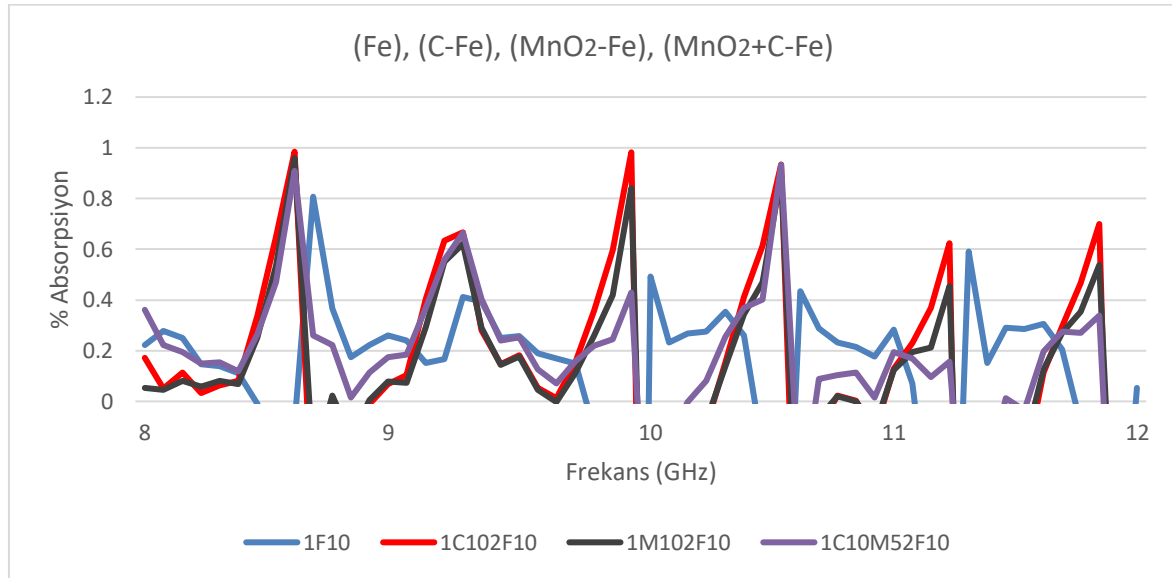
Şekil 8.5.c grafiğinin soğurma değerlerinde ise 1C25M5 kodlu numunenin 10-12 GHz frekans aralığında absorpsiyon değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8.6. a) İlk kat MnO₂ ikinci kat C, b) İlk kat C ikinci kat MnO₂, c) İlk kat MnO₂+C ikinci kat C ile kombine edilmiş plakalara ait X bandı absorpsiyon sonuçları

Şekil 8.6.b grafiğinde 1C102M10 kodlu numune örneği özellikle 8,7 GHz ve 9,75 GHz'de yüksek absorpsiyon davranışı sağlamasına rağmen, 1C152M15 örneği de geniş bant gerektiğinde daha iyi absorpsiyon sağlamıştır.

Şekil 8.6.c grafiğinde ikinci katın uygulandığı durum için 1C15M52C15 numunesi diğer numunelere göre en iyi absorpsiyon davranışını sağlamıştır. Absorpsiyon ayrıca, özellikle yaklaşık 9,2 GHz'de diğerinden nispeten daha yüksek bir banda sahiptir.



Şekil 8.7. Birinci kata %10 derişimindeki C, MnO₂, C+ MnO₂ tozları eklenerek boyanmış Al plakalara, ikinci kat olarak %10 Fe tozu kullanılarak hazırlanan poliüretan boya uygulaması sonucunda elde edilen X bandı absorpsiyon sonuçları

İkinci kat Fe tozu kullanılarak hazırlanan numunede diğerleri daha düşük değerlerde kalırken, 1C102F10'a karşılık gelen (kırmızı) grafik absorpsiyonun neredeyse %99'a ulaştığı 3 frekans bandında en iyi sonuçları verdiği belirlendi.

9. SONUÇ

Farklı oranlardaki çeşitli takviye elemanlarının, boya içerisine homojen karışım ile spreycaplamaya (püskürtme boya) yöntemi kullanılarak yüzey kaplamaya işlemi uygulanmasında oluşan kompozit malzeme ve özellikleri ile ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Başarılı bir şekilde yaş polimer kompozit malzeme üretilmiş ve itici argon gazı kullanılarak boyanmış ve kaplamaya kompozit oluşturulmuştur. Homojen karışım eldesi ve homojen boyamaya işlemi gerçekleştirilmiştir. Alüminyum plaka yüzeyine ince bir film halinde uygulanan boyanın kurumaya sonucu film(kompozit) tabakasında şekil değişikliği, çatlak ve kabarmaya gibi olumsuz durumlar görülmemiştir. Böylelikle çok katlı boyamaya işlemi gerçekleştirilebilmiştir.

SEM analizi sonucunda, Fe tozlarının morfolojisinin ligoman türü iğnemsiyapıda ve keskin uçlu, C tozlarının ise grift şeklinde keskin köşeli, MnO_2 ' in morfolojisinin küresel formda kompozit takviyesi olarak kullanılması boya içerisinde tutunma arayüzeyini artırarak takviyelendirme görevini yerine getirmiştir. Fakat çift komponentten oluşan hazır boyanın karışımını sırasında ve uygulanma sırasında dağılmamış, bu nedenle aglomera olduğu ve bölgesel kalıntıların varlığı gözlenmiştir.

Network analizi sonucu, tek kat boyaya uygulamasında C için yapılan analizde en yüksek absorpsiyon değerleri belirli frekans bantlarında 1C10 numunesinde elde edilmiştir. MnO_2 analizinde 1M5 kodlu numune, X bandında en iyi soğurma davranışını sağlamıştır. İkinci kompozit katmanın uygulandığı durumda ise 1C102M10 kodlu numune özellikle 8,7 GHz ve 9,75 GHz'de yüksek absorpsiyon davranışı sağlamasına rağmen, 1C152M15 numunesinde geniş bant gerektiğinde daha iyi absorpsiyon sağlamıştır. Fe tozu kullanılarak hazırlanan numunede, 1C102F10 kodlu numunedeki absorpsiyonun neredeyse %99'a ulaştığı belirlenmiştir. Düşük absorpsiyon değerlerine sahip numunelerde ise boyaya istenilen yapışma şartını sağladığından dolayı radom boyası olarak kullanılabilmesi öngörülmüştür. Geçirgenlik analizlerinde boyanın kendisinde meydana gelen bölgesel kalıntılar, ölçümler de herhangi belirgin bir değişiklik meydana getirmemiştir. Burada boyanın ana matrisinden çok takviyenin oranı ve dağılım şekli belirleyici olduğu belirlenmiştir.

Dünyada iletken ve yalıtkan malzemelerin bu tür kompozitler içerisindeki oranları ve kompozit oluşumu sırasında meydana gelen yapısal değişiklikler ileriki çalışmalarda daha da ön plana çıkabilecektir. İnsan ömrünün yetemeyeceği kadar zamana ihtiyaç olacağı düşünülebilir. Birçok polimer matris ve takviye malzeme kombinasyonları oluşturulup deneysel olarak çalışmalar yapıp veriler elde edilebilir. Uzayda yaşam kolonilerinin önümüzdeki yıllarda kurulacağı düşünüldüğünde bu tür malzemelerin kullanılacağı aşikardır. Uzay boşluğunda manyetik alanların varlığı bilinmektedir. Bu bilgiler ışığında yapılacak olan her RAM malzeme kendine çok geniş kullanım alanı sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Afzali, A., Mottaghitalab, V., Afghahi, S., Jafarian, M., ve Atassi, Y. (2017). Electromagnetic Properties of Absorber Fabric Coated with BaFe₁₂O₁₉/MWCNTs/PANi Nanocomposite in X and Ku Bands Frequency. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 442, 224-230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.119>
- Ahmad, H., Tariq, A., Shehzad, A., Faheem, M., Shafiq, M., Rashid, I., . . . Khaliq, Z. (2019). Stealth technology: Methods and composite materials—A review. *Polymer Composites*, 40(12), 4457-4472.
- Akram, N., Zia, K., Mumtaz, N., Saeed, M., Usman, M., ve Rehman, S. (2020). Polyurethane Coatings. R. Boddula, M. Ahamed, ve A. Asiri içinde, *Polymer Coatings: Technology and Applications* (s. 135-158). Faisalabad, Pakistan: John Wiley & Sons.
- Al-Ghamdi, A., ve El-Tantawy, F. (2010). New Electromagnetic Wave Shielding Effectiveness at Microwave Frequency of Polyvinyl Chloride Reinforced Graphite/Copper Nanoparticles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(11), 1693-1701. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.08.006>
- Allen, C., ve Warner, J. (2013). Properties of Graphene. *Graphene* (s. 61-127). içinde <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394593-8.00003-5>
- Bachmatiuk, A., ve Rmmeli, M. (2013). Methods for Obtaining Graphene. J. Warner, F. Schüffel, A. Bachmatiuk, & M. Rmmeli içinde, *Graphene* (s. 204-216). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394593-8.00004-7>
- Bağmancı, M., Akgl, O., Özaktürk, M., Karaaslan, M., nal, M., ve Bakır, M. (2018). Polarization Independent Broadband Metamaterial Absorber. *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mmce.21630>
- Ban, G., Liu, Z., Ye, S., Yang, H., Tao, R., ve Luo, P. (2017). Microwave Absorption Properties of Carbon Fiber Radar Absorbing Coatings Prepared by Water-Based Technologies. *RSC Advances*, 7(43), 26658-26664. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C7RA02631E>
- Bedeloğlu, A., & Taş, M. (2016). Grafen ve Grafen retim Yöntemleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 544-554. <https://doi.org/DOI:10.5578/fmbd.32173>

- Bhattacharyya, R., Jha, D., Prakash, O., Singh, A., Bhattacharyya, S., ve Das, S. (2017). Ultra Thin Ferrite Nanocomposite Coating as Broadband Microwave Absorber. 2017 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC) (s. 1-2). Aurangabad, India: IEEE. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/AEMC.2017.8325681>
- Bhattacharyya, R., Roy, S., Prakash, O., Singh, A., Bhattacharya, T., Maiti, P., . . . Das, S. (2019). Mg_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄/Polyurethane Thin Nanocomposite Coating as Broadband Microwave Absorber. SN Applied Sciences, 1(1), 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42452-018-0041-8>
- Bi, S., Zhao, Y., Hou, G., Zhang, J., Li, H., Song, Y., . . . Liu, Z. (2022). Microwave Absorption and Mechanical Properties of CNTs/ PU Composites with Honeycomb Structure. Applied Composite Materials(1-15). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10443-022-10021-8>
- Bora, P., Azeem, I., Vinoy, K., Ramamurthy, P., ve Madras, G. (2018). Morphology Controllable Microwave Absorption Property of Polyvinylbutyral (PVB)-MnO₂ Nanocomposites. Composites Part B: Engineering, 132, 188-196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.014>
- Burchfield, L., Al Fahim, M., Wittman, R., Delodovici, F., ve Manini, N. (2017). Novamene: A New Class of Carbon Allotropes. Heliyon, 3(2), e00242. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00242>
- Callister, W. (2007). Materials Science and Engineering: An Introduction (7 b.). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Chen, C., Pan, L., Jiang, S., Yin, S., Li, X., Zhang, J., . . . Yang, J. (2018). Electrical Conductivity, Dielectric and Microwave Absorption Properties of Graphene Nanosheets/Magnesia Composites. Journal of the European Ceramic Society, 38(4), 1639-1646. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.11.052>
- Chen, H., Ma, W., Huang, Z., Zhang, Y., Huang, Y., ve Chen, Y. (2019). Graphene Based Materials Toward Microwave and Terahertz Absorbing Stealth Technologies. Advanced Optical Materials. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adom.201801318>
- Çalikoğlu, Y. (2017). Epoksitlendirilmiş Soya Yağından Tioglikolik Asit ve Tioglikolik Asit Metil Esteri ile Halka Açarak Oluşan Poliollerden Yeni Poliüretan Sentezi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Das, A., ve Mahanwar, P. (2020). A Brief Discussion on Advances in Polyurethane Applications. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 3(3), 93-101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.07.002>

- Doğru, S. (2019, Ağustos). Bor Doplanmış Grafen Sentezi Ve Karakterizasyonu. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
- Duan, W., Li, X., Wang, Y., Qiang, R., Tian, C., Wang, N., . . . Du, Y. (2018). Surface Functionalization of Carbonyl Iron with Aluminum Phosphate Coating Toward Enhanced Anti-oxidative Ability and Microwave Absorption Properties. *Applied Surface Science*, 427, 594-602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.034>
- Ge, J., Liu, L., Cui, Y., Li, R., Meng, F., ve Wang, F. (2020). Optimizing the Electromagnetic Wave Absorption Performances of Designed $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{MnO}_2$ Hybrids. *Ceramics International*, 46(10), 15325-15332. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.074>
- Geim, A., ve Novoselov, K. (2009). The Rise of Graphene. *Nanoscience and Technology*, 11-19. https://doi.org/doi:10.1142/9789814287005_0002
- Georgakilas, V., Perman, J., Tucek, J., ve Zboril, R. (2015). Broad Family of Carbon Nanoallotropes: Classification, Chemistry, and Applications of Fullerenes, Carbon Dots, Nanotubes, Graphene, Nanodiamonds, and Combined Superstructures. *Chemical Reviews*, 15(11), 4744-4822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/cr500304f>
- Getiren, B. (2020). Grafen Oksit Temelli Nanokompozitlerin Sentezi, Karakterizasyonu Ve Fototermal Etkinliklerinin İncelenmesi. Ankara Üniversitesi, Türkiye.
- Haponiuk, J., ve Formela, K. (2017). PU Polymers, Their Composites and Nanocomposites: State of the Art and New Challenges. Gdansk, Poland. <https://doi.org/http://doi.org/10.1016/B978-0-12-804065-2.00001-2>
- Hu, J., Shen, Y., Xu, L., & Huang, H. (2019). Synthesis of Urchin-like MnO_2 /Reduced Graphene Oxide (RGO) Composite and Their Wave-absorbing Property. *Materials Research Express*, 6(9), 1-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab278e>
- Hu, J., Shen, Y., Xu, L., ve Liu, Y. (2020). Facile Preparation of Flower Like MnO_2 @reduced Graphene Oxide (RGO) Nanocomposite and Investigation of Its Microwave Absorption Performance. *Chemical Physics Letters*, 739, 136953. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.136953>
- Ibrahim, I., ve Rummeli, M. (2013). Methods for Obtaining Graphene. J. Warner, F. Schäffel, A. Bachmatiuk, ve M. Rummeli içinde, *Graphene* (s. 129-137). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394593-8.00004-7>

- (2019). IEEE Standard Letter Designations. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society.
- J.H., W. (2013). Methods for Obtaining Graphene. J. Warner, F. Schäffel, A. Bachmatiuk, ve M. Rümmeli, Graphene (s. 137-163). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394593-8.00004-7>
- Jafarian, M., Afghahi, S., Atassi, Y., ve Salehi, M. (2018). Enhanced Microwave Absorption Characteristics of Nanocomposite Based on Hollow Carbonyl Iron Microspheres and Polyaniline Decorated with MWCNTs. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 462, 153-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.04.061>
- Jayalakshmi, C., Inamdar, A., Anand, A., ve Kandasubramanian, B. (2019). Polymer Matrix Composites as Broadband Radar Absorbing Structures for Stealth Aircrafts. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(14). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.47241>
- Kolanowska, A., Janas, D., Herman, A., Jędrysiak, R., Giżewski, T., ve Boncel, S. (2018). From Blackness to Invisibility – Carbon Nanotubes Role in The Attenuation of and Shielding From Radio Waves for Stealth Technology. *Carbon*, 126, 31-52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.09.078>
- Kulkarni, G., Jadhav, S., Patil, K., Patil, P., ve Puri, V. (2021). α -MnO₂ Nanorods-polyaniline (PANI) Nanocomposites Synthesized by Polymer Coating and Grafting Approaches for Screening EMI Pollution. *Ceramics International*, 47(11), 15044-15051. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.061>
- Kumar, C., ve Pattammattel, A. (2017). Discovery of Graphene and Beyond. Introduction to Graphene (s. 1-15). içinde Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813182-4.00001-5>
- Kumar, N., ve Vadera, S. (2017). Stealth Materials and Technology for Airborne Systems. N. E. Prasad, & R. J. Wanhill içinde, *Aerospace Materials and Material Technologies* (Cilt 1, s. 519-537). Jodhpur, India: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_24
- Liu, Z., Tao, R., Luo, P., Shu, X., ve Ban, G. (2017). Preparation and Microwave Absorbing Property of Carbon Fiber/Polyurethane Radar Absorbing Coating. *RSC Advances*, 7(73), 46060-46068. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C7RA07666E>
- Loos, M. (2015). Allotropes of Carbon and Carbon Nanotubes. Carbon Nanotube Reinforced Composites (s. 73-101). içinde <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3195-4.00003-5>

- Micheli, D., Apollo, C., Pastore, R., ve Marchetti, M. (2010). X-Band Microwave Characterization of Carbon-based Nanocomposite Material, Absorption Capability Comparison and RAS Design Simulation. *Composites Science and Technology*, 70(2), 400-409. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.11.015>
- Palsaniya, S., Nemade, H., ve Dasmahapatra, A. (2019). Graphene based PANI/MnO₂ nanocomposites with enhanced dielectric properties for high energy density materials. *Carbon*, 150, 179-190. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.006>
- Pang, H., Duan, Y., Huang, L., Song, L., Liu, J., Zhang, T., . . . Liu, X. (2021). Research Advances in Composition, Structure and Mechanisms of Microwave Absorbing Materials. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109173>
- Paszkiwicz, S., ve Szymczyk, A. (2019). Graphene-Based Nanomaterials and Their Polymer Nanocomposites. *Nanomaterials and Polymer Nanocomposites* (s. 177-216). içinde Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814615-6.00006-0>
- Sabir, A., Zeeshan, M., Shafiq, M., Khan, R., ve Jacob, K. (2020). Adsorptive Polymer Coatings. R. Boddula, M. Ahamed, & A. Asiri içinde, *Polymer Coatings: Technology and Applications* (s. 121-134). John Wiley & Sons.
- Safadi, B., Andrews, R., ve Grulke, E. (2002). Multiwalled Carbon Nanotube Polymer Composites: Synthesis and Characterization of Thin Films. *Journal of applied polymer science*, 84(14). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.10436>
- Schäffel, F. (2013). The Atomic Structure of Graphene and Its Few-layer Counterparts. *Graphene* (s. 5-59). içinde Oxford: Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394593-8.00002-3>
- Shafieizadegan-Esfahani, A., Katbab, A., Pakdaman, A., Dehkoda, P., Shams, M., ve Ghorbani, A. (2012). Electrically Conductive Foamed Polyurethane/Silicone Rubber/Graphite Nanocomposites as Radio Frequency Wave Absorbing Material: The Role of Foam Structure. *Polymer Composites*, 33(3), 397-403. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.22161>
- Shunmugapriya, K., Kale, S., Gouda, G., Jayapal, P., & Tamilmani, K. (2017). Paints for Aerospace Applications. N. Prasad, & R. Wanhill içinde, *Aerospace Materials and Material Technologies* (Cilt 1, s. 539-562). Bangalore, India: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_25

- Tripath, K., Abbas, S., Sharma, R., Alegaonkar, P., ve Verma, M. (2015). Electromagnetic & Microwave Absorption Properties of Carbon Black/PU Di-electric Nano-Composite Absorber. 1(7), 12-17.
- Viculis, L., Mack, J., ve Kaner, R. (2003). A Chemical Route to Carbon Nanoscrolls. 299(5611), 1361. <https://doi.org/https://doi.org/10.1126/science.1078842>
- Wang, L., Huang, Y., Li, C., Chen, J., ve Sun, X. (2015). Hierarchical Graphene@Fe₃O₄ Nanocluster@Carbon@MnO₂ Nanosheet Array Composites: Synthesis and Microwave Absorption Performance. *Physical Chemistry Chemical Physics*(8), 5878-5886. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C4CP05556J>
- With, G. (2018). Polymers and Network Characteristics. *Polymer Coating: Guide to Chemistry, Characterization and Selected Applications* (s. 19-46). içinde <https://doi.org/DOI: 10.1002/978352780324>
- Wu, N., Wu, M., Zhou, J., ve Wu, B. (2019). Electromagnetic Scattering Modeling Method of Multiscale Structure Based on Absorbing Coating. Published in: 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - Fall). Xiamen, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021358>
- Yang, Y., Zhou, Y., ve Wang, T. (2014). Preparation of Optically Active Polyurethane/TiO₂/MnO₂ Multilayered Nanorods for Low Infrared Emissivity. *Materials Letters*, 133, 269-273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.06.184>
- Zeng, Z., Chen, M., Jin H., Li, W., Xue, X., Zhou, L., . . . Zhang, z. (2016). Thin and Flexible Multi-walled Carbon Nanotube/Waterborne Polyurethane Composites with High-performance Electromagnetic Interference Shielding. *Carbon*, 96, 768-777. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2015.10.004>
- Zhen, Z., ve Zhu, H. (2018). Structure and Properties of Graphene. *Graphene* (s. 1-12). içinde <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812651-6.00001-X>
- Zhou, Y., Xie, H., Zhou, W., ve Ren, Z. (2018). Enhanced Antioxidation and Microwave Absorbing Properties of SiO₂-Coated Flaky Carbonyl Iron Particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 446, 143-149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.09.022>



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

