T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İLETKEN POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Mohammed BEKDASH

DANIŞMAN
Prof. Dr. İlven MUTLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Şubat, 2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Mohammed BEKDASH tarafından, **Prof. Dr. İlven MUTLU** danışmanlığında hazırlanan "İletken Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **10/02/2023** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. İlven MUTLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Selva ÇAVUŞ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Oğuzhan DEMİR Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi		☒ Kabul ☐ Ret

Aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

İLETKEN POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Desteklerinden ve yardımlarından dolayı Danışman hocam Prof. Dr. İlven MUTLU'ya çok teşekkür ederim.

Bugüne kadar maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen çok değerli aileme çok teşekkür ederim

Şubat 2023 **Mohammed BEKDASH**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xii**
ABSTRACT ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **3**
2.1. HAYALET TEKNOLOJİSİ **3**
2.2. KOMPOZİT MALZEMELER **16**
2.3. METAMALZEMELER **19**
2.4. EKLEMELİ İMALAT **23**
3. YÖNTEM **26**
4. BULGULAR **36**
5. TARTIŞMA **48**
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **53**
KAYNAKLAR **57**
EKLER **61**
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI **62**
ETİK KURUL İZİN YAZISI **63**
KURUM İZNİ YAZILARI **64**
ÖZGEÇMİŞ **65**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Radar cihazı çalışma prensibi……..…5
Şekil 2.2. Radar algılama parametreleri……..5
Şekil 2.3. İlk nesil uçaklar (a) F-117 Nighthawk and (b) B-2 Spirit…….…..7
Şekil 2.4. Son nesil uçaklar (a) F-22 Raptor, (b) F-35 Lightning, (c) Eurofighter Typhoon…..7
Şekil 2.5. Son nesil askeri gemiler……..8
Şekil 2.6. RAS tipleri a) Dallenbach, b) Salisbury, c) Jaumann, d) Pyramidal……...11
Şekil 2.7: Elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama…….13
Şekil 2.8: Dalga empedansının kaynaktan uzaklığa göre değişimi……...14
Şekil 2.9: EMI kalkanlama a) EM dalga, b) elektrik-manyetik alanlar, c) dalga ayrılması..…14
Şekil 2.10: a) Yıldırım çarpması ve b) uçak üzerinde elektrik iletimi……15
Şekil 2.11: a) Katkı maddelerinin iletkenliğe etkisi, b) katkı maddelerinin dağılımı…….17
Şekil 2.12: İletken tabaka ile elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama mekanizması…….18
Şekil 2.13: Farklı frekanslarda dielektrik mekanizmaları…….18
Şekil 2.14: Çekme kuvveti altında a) Geleneksel malzeme, b) auxetic malzeme…….19
Şekil 2.15: Re-entrant yapısı…….19
Şekil 2.16: Elektromanyetik metamalzemeler……..20
Şekil 2.17: Geçirgenlik-dielektrik ve refraktif indeks diagramı……20
Şekil 2.18: Bölünmüş halka rezonatör birim hücreleri……..21
Şekil 2.19: Bölünmüş halka rezonatörde ve eşdeğer LC devresi……...21
Şekil 2.20: Tek ve çift BHR konfigurasyonları ve eşdeğer LC devreleri [25]…….22
Şekil 2.21: a) Pozitif indeks, b) negatif indeks, c) metamalzeme d) gizleme……...22
Şekil 2.22: Eklemeli imalat adımları [13]…….23
Şekil 2.23: Polimer hammadde kullanılan eklemeli imalat işleminde parametreler…….24
Şekil 2.24: Fotopolimerizasyon (stereolitografi) yöntemi [11]…….25
Şekil 2.25: Seçimli lazer sinterleme (SLS) yöntemi [11]……...25
Şekil 3.1: Hedeflenen radar absorblama malzemesinin şematik yapısı…….26
Şekil 3.2: Poliüretan (PU) esaslı numunelerin üretimi……...27

Şekil 3.3: Epoksi esaslı numunelerin üretimi……28
Şekil 3.4: Kullanılan fiberler a) karbon, b) cam fiberler……...29
Şekil 3.5: Eklemeli imalat cihazı……..30
Şekil 3.6: Replika yöntemi ile metamalzeme üretim kademeleri……..…31
Şekil 3.7: Bölünmüş halka rezonatör (BHR) metamalzeme birim hücresi……31
Şekil 3.8: Çekme cihazı…….32
Şekil 3.9. Shore sertlik testi……...32
Şekil 3.10. Darbe testi……33
Şekil 3.11: Termal kamera……....34
Şekil 3.12: Girdap akımları test cihazı ……34
Şekil 3.13: Gaussmetre cihazı……...35
Şekil 4.1. SEM fotoğrafları a) karbon nanotüp, b) karbon siyahı ve c) Fe tozları ……..……..36
Şekil 4.2. Kompozit numunelerin optik mikroskop fotoğrafları…….…...37
Şekil 4.3. CB ve CNT katkısının iletkenliğe etkisi ……..38
Şekil 4.4. CB ve CNT katkısının sertliğe etkisi ……...39
Şekil 4.5. CB ve CNT katkısının Young's modülüne etkisi ……40
Şekil 4.6. CB ve CNT katkısının darbe enerjisine etkisi ……..…41
Şekil 4.7. Fe katkısının Young's modülüne etkisi ……42
Şekil 4.8. Fe katkısının sertliğe etkisi ……43
Şekil 4.9. Fe katkısının darbe enerjisine etkisi ……..44
Şekil 4.10. Karbon fiber katkısının a) Young's modülüne ve b) darbe enerjisine etkisi ……..45
Şekil 4.11. Bölünmüş halka metamalzemeler a) alginate kalıp ve b) ürün……...46
Şekil 4.12. Epoksi matrisli karbon fiber takviyeli malzemenin termal analizi……..47
Şekil 4.13. Metamalzemelerin absorbans ve termal analiz görüntüleri ……48

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Çeşitli malzemelerin radar kesitletleri……..12

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

E : Elastisite modülü

Kısaltmalar **Açıklama**

CB : Karbon siyah
CNT : Karbon nanotüp
EMI : Elektromanyetik girişim
IR : Kızıl ötesi
PU : Poliüretan
RAM : Radar absorban malzeme
RAS : Radar absorban yapısal malzeme
RCS : Radar kesit alanı
VNA : Vektör network analizör

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İLETKEN POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

MOHAMMED BEKDASH

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. İlven MUTLU

Bu tezin amacı termal ve elektriksel iletkenlik gösterebilen polimer matrisli kompozitlerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin ve termal/elektriksel iletkenlik özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılarak karakterizasyonudur. Üretilen polimer matrsisli kompozit malzemelerin radar absorban malzeme veya elektromanyetik giriş kalkan malzemesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Matris malzemesi olarak epoksi ve poliüretan (PU) kullanılmıştır. Üretim aşamasında çeşitli fiber ve parçacık katkı/takviye malzemeleri ilave edilerek polimer matrisli kompozit ürünün mekanik, termal ve elektriksel özelliklerine etkileri incelenmiştir. Üretim aşamasında, döküm yöntem ve el yatırma yöntemleri ile fiber ve parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen fiber/parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin öncelikle mikroyapısı ve temel mekanik özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin çekme-basma davranışı, elastisite modülü, enerji absorblama kapasitesi gibi temel mekanik özellikleri tahribatlı çekme-basma testi ile ve tahribatsız ultrasonik muayene ile belirlenmiştir. Üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin termal ve elektriksel özellikleri tahribatsız girdap akımları (eddy current) yöntemi ile ve termal kamera

cihazı ile incelenmiştir. Mikroyapı kusurları ve mekanik özellikler (elastisite modülü) ultrasonik hız ölçümü ile belirlenmiştir. Takviye olarak kullanılacak parçacık türü, parçacık toplam miktarı ve parçacık şeklinin (morfoloji) mekanik, elektriksel ve termal özelliklere etkisi araştırılmıştır. Üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile incelenmiştir.

Ocak 2023 , 80 sayfa.

Anahtar kelimeler: İletken Polimer, Mikrodalga Absorblama, Kompozit Malzeme

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CONDUCTIVE POLYMER MATRIX COMPOSITES

Mohammed BEKDASH

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor : Prof. Dr. İlven MUTLU

The aim of this thesis is the fabrication of polymer matrix composites with thermal and electrical conductivity. Also, determination of the mechanical and thermal/electrical properties of the specimens by destructive and nondestructive methods was aimed. Polymer matrix composite materials were fabricated for radar absorbing material or electromagnetic interferance shielding material applications. Polyurethane (PU) and epoxy was used as matrix material. Several fiber and particle additives/reinforcements were included and their effect on the polymer matrix composite product was investigated. Fiber and particle reinforced polymer matrix specimens were fabricated by casting and hand layout methods. Initially, microstructure and mechanical properties of the fiber/particle reinforced polymer matrix specimens were investigated. Mechanical properties, such as tensile properties, elastic modulus, energy absorbtion capacity, of the specimens were investigated by destructive tensile test, and nondetsructive ultrasonic test. Thermal and electrical properties of the polymer matrix composite specimens were characterized by nondestructive eddy current tesyt,, gaussmeter, and thermal camera device. Microstructural defects and mechanical properties were investigated by

ultrasonic velocity measurements. Effect of particle type, particle amount, and particle shape on the mechanical, electrical and thermal properties was studied. Microstrure of the polymer matrix composite materials was studied by scanning electron microscope (SEM) analysis.

January 2023, 80. pages.

Keywords: Conductive Polymer, Microwave Absorbtion, Composite Material

1. GİRİŞ

Bu tezin amacı termal ve elektriksel iletkenlik gösterebilen polimer matrisli kompozitlerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin ve termal/elektriksel iletkenlik özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılarak karakterizasyonudur. Üretilen polimer matrsisli kompozit malzemelerin radar absorban malzeme veya elektromanyetik giriş kalkan malzemesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Genellikle radar absorban malzemeler (RAM) ince film kaplama veya boya olarak savaş uçaklarının yüzeyine uygulanmaktadır. Fakat bu RAM esaslı tasarımın büyük dezavantajları da bulunmaktadır. Radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı tasarımın ise hem yüksek mukavemetinden dolayı ük taşıma hem de radar absorbsiyon özelliği bulunmakta olup, uçak yapımında yapısal parça olarak kullanılabilir. Bu amaçla radar absorban malzeme özellikli kompozitlerin içerisine karbon fiber veya cam fiber ilave edilerek radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı kompozitler üretilmiştir. Matris malzemesi olarak epoksi ve poliüretan (PU) kullanılmıştır. Üretim aşamasında çeşitli fiber ve parçacık katkı/takviye malzemeleri ilave edilerek polimer matrisli kompozit ürünün mekanik, termal ve elektriksel özelliklerine etkileri incelenmiştir. Üretim aşamasında, döküm yöntem ve el yatırma yöntemleri ile fiber ve parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen fiber/parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin öncelikle mikroyapısı ve temel mekanik özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin çekme-basma davranışı, elastisite modülü, enerji absorblama kapasitesi gibi temel mekanik özellikleri tahribatlı çekme-basma testi ile ve tahribatsız ultrasonik muayene ile belirlenmiştir. Üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin termal ve elektriksel özellikleri tahribatsız girdap akımları (eddy current) yöntemi ile ve termal kamera cihazı ile incelenmiştir. Mikroyapı kusurları ve mekanik özellikler (elastisite modülü) ultrasonik hız ölçümü ile belirlenmiştir. Takviye olarak kullanılacak parçacık türü, parçacık toplam miktarı ve parçacık şeklinin (morfoloji) mekanik, elektriksel ve termal özelliklere etkisi araştırılmıştır. Üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile incelenmiştir.

Polimerler, monomer adlı küçük organik moleküllerin kovalent bağlarla birbirine bağlanak oluşturdukları dev moleküllerdir. Yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahiptirler. Polimerler seramik ve metallere göre oldukça genç sayılabilecek bir malzeme

sınıfıdır. Polimerlere dev makromoleküller, polimerleri oluşturan oldukça küçük organik moleküllere ise monomer adı verilir. Monomer, polimerin sentezlendiği birim moleküle verilen isimdir. Tekrarlayan birim (mer) ve monomer birbirinden tamamen farklıdır, ancak bazen monomer veya birim monomer, doğru karşılığı olan, tekrarlayan birim yerine kullanılabilmektedir [1-3].

Hayalet teknolojisi veya düşük görünürlük teknolojisi, gemi, uçak, füze, denizaltı, uyduları radar, sonar gibi yöntemlerle tanımlanamaması/belirlenememesi için özellikle savunma sanayinde kullanılmaktadır [1-12].

Genel olarak hayalet teknolojisi (düşük görünürlük) savunma sanayiinde önemldir.

- Akustik görünmezlik (denizaltı, taşıtlar)
- Termal görünmezlik (IR, uçak burunu, asker kıyafetleri)
- Radar görünmezlik (RAM, askeri muharip uçaklar)

Hayalet Teknolojisinde Metotlar

- Kamuflaj taktikleri
- Hava aracının şekli
- Plazma hayalet teknolojisi
- Radar absorblayıcı malzeme (RAM)
- Aktif engelleme sistemi

Hedefin (uçak, denizlatı, gemi) radar ile tespit edilebilirliğini, hedef yüzeyinden geri yansıyan radar sinyalinin şiddeti belirlemektedir. Geri yansıyan sinyal şiddeti hedefin şekline, hedefin boyutlarına, hedef yüzey malzemesinin radar kesitine (RCS) bağlıdır [1-8].

Mikrodalgaların (radar dalgası) hedef yüzeyinden geri yansımasını azaltma yöntemleri

- *Hedef Şekillendirme*: radar dalgalarını farklı yönlere saçmak amacıyla hedefin geometrisini şekillendirme,
- *Radar Absorblama Malzemeleri (RAM)*: Mikrodalgaların (radar dalgaları) hedef yüzeyi tarafından absorblanması
- *Absorblayıcı Yapısal Malzemeler (Active/Passive Saçma)*

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. HAYALET TEKNOLOJİSİ

Hayalet teknolojisi (stealth technology) veya düşük görünürlük teknolojisi, gemi, uçak, füze, denizaltı, uyduları radar, sonar gibi yöntemlerle tanımlanamaması/belirlenememesi için özellikle savunma sanayinde kullanılmaktadır. Düşük gözlemlenebilir teknoloji (LO teknolojisi) olarak da adlandırılan hayalet teknoloji, askeri taktikler, pasif ve aktif elektronik karşı önlemlerin bir alt disiplinidir. Personeli, gemileri, uçakları, füzeleri, uyduları, kara araçlarını radar, kızılötesi (IR), sonar ve diğer tespit tespit yöntemlerine göre daha az görünür yapmak için kullanılan yöntemidir. ABD'de modern hayalet teknolojilerinin gelişimi 1958'de başlamıştır. Sovyetler Birliği tarafından Lockheed U-2 casus uçaklarının radar takibini önlemeye yönelik önceki girişimler başarısız olmuştur [1-12].

Genel olarak hayalet teknolojisi (düşük görünürlük) savunma sanayiinde önemldir.

- Akustik görünmezlik (denizaltı, taşıtlar)
- Termal görünmezlik (IR, uçak burunu, asker kıyafetleri)
- Radar görünmezlik (RAM, askeri muharip uçaklar)

Hayalet Teknolojisinde Metotlar

- Kamuflaj taktikleri
- Hava aracının şekli
- Plazma hayalet teknolojisi
- Radar absorblayıcı malzeme (RAM)
- Aktif engelleme sistemi

Radar Absorblayıcı Malzemeler (RAM)

- Karbon esaslı malzemeler
- Metal tozları
- İletken Polimerler

Radar (mikrodalga) emici malzemeler şunlardan yapılır;

- *Dirençli malzemeler*
- *Manyetik malzemeler*

Radar (mikrodalga) emici malzemeler, elektromanyetik dalga ile etkileşimlerine göre 2 tipte sınıflandırılır:

- Dalga elektrik alanı ile etkileşime giren dielektrik kayıpları olan malzemeler,
- Dalga manyetik alanı ile etkileşime giren manyetik kayıpları olan malzemeler.

Radar Kesit Alanı (RCS)

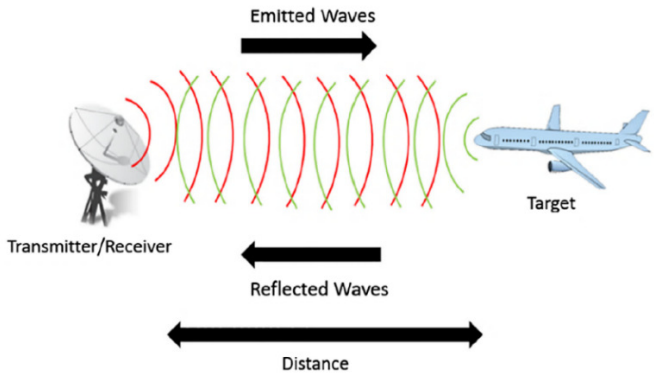
*Radar kesit alanı k*ısaca bir cismin (hedef) radarda görünürlük miktarı olarak tanımlanabilir. Bir hedeften yansıyan radar sinyal gücü, onun tespit edilebilirliğini belirler. Hedefin aldığı gücün hedeften saçılan güce oranıdır. Bu, hedefin şekline ve boyutuna bağlıdır ve radar kesiti (RCS) olarak tanımlanır. Bir hedefin radar dalgalarını ne kadar geri yansıttığını göstermektedir. Radar kesiti frekansa oldukça bağımlıdır. Hedeflerin tespitinde önemli olmakla birlikte, vericinin gücü ve mesafe RCS hesaplamasını etkileyen faktörler değildir, çünkü RCS hedefin yansıtıcılığının bir özelliğidir. Radar kesiti, çeşitli uçakları tespit etmek için kullanılır. Hayalet uçak (düşük görünürlüğe sahip şekilde tasarlanmış uçak), düşük bir radar kesiti veren tasarım özelliklerine (radar emici boya, düz yüzeyler, radarı özellikle kaynaktan farklı bir yere yansıtması için açılı yüzeyler) sahip olacaktır. Yolcu uçağının radar kesiti ise çıplak metal, kaynağa geri bir sinyal yansıtması için yuvarlak yüzeyler, motorlar, antenler vb. yapısal özelliklerden dolayı büyük olacaktır. Askeri uçaklar için radar kesiti verileri en yüksek derecede gizli olarak sınıflandırılmıştır.

Radar Kesitini (RCS) azaltmak için 4 yöntem vardır;

- Hedef şekillendirme
- Radar absoblayıcı malzemeler
- Pasif engelleyici
- Aktif engelleyici

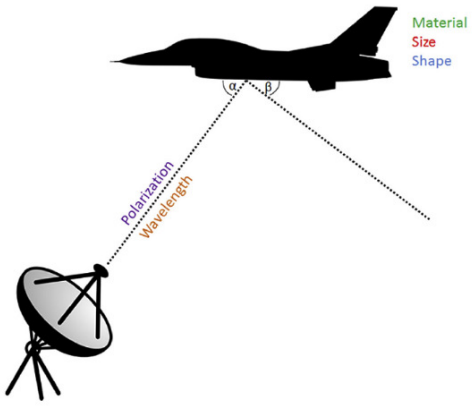
Radar (Radio Detection and Ranging)

Sözcük olarak radar, radyo ile tespit etme ve menzil tayinini ifade eder. Bir alıcı verici düzeninden oluşan radar, bir hedefi tespit etme, hedefin yönü ve uzaklığını belirleme görevlerini yerine getirir. Radar cihazları genel olarak bir sinyal üreteci, bir verici, bir alıcı ve bir veya daha çok antenden oluşur. Genel olarak Radar (Radio Detection and Ranging) belirli bir hedefin (askeri uçak, yolcu uçağı, taşıt) hız, konum ve koordinatlarını belirlemekte kullanılan bir yöntemdir. Yöntem, hedef konumunu tespit etmek için radyo (mikrodalga) dalgalarının hedef yüzeyinden yansıması sonucu elde edilen cevabın işlenmesini ve değerlendirilmesini içermektedir. Gönderilen ve yansıyan radar dalgalarının işlenmesi ile hedef (uçak, denizaltı vb) hakkında bilgi elde edilmektedir. Radar sinyali hedef yüzeyinin radar kesiti (RCS) ile belirlenmektedir. Aşağıdaki şekilde bir radarın çalışma prensibi şematik olarak görülmektedir [1-14].



Şekil 2.1. Radar cihazı çalışma prensibi [13]

Aşağıdaki şekilde radar ile hedef tespitinde önemli parametreler görülmektedir (polarization, dalgaboyu, hedef malzemesi, hedef boyutları, hedef şekli).



Şekil 2.2. Radar algılama parametreleri [14]

Radar (Mikrodalga) Absorblama

Mikrodalga birbirine dik elektrik ve manyetik alanlardan oluşan bir çeşit elektromanyetik radyasondur. Elektromanyetik spektrumun TV ve Radyo frekans bölgeleri arasında yer alır. Genel olarak radar (mikrodalga) absorblama gelen elektromanyetik dalganın (mikrodalga) elektrik ve manyetik bileşenlerinin absorblanması (ısıya dönüşmesi) prensibine dayanmaktadır. Hedefin (uçak, denizlatı, gemi) radar ile tespit edilebilirliğini, hedef yüzeyinden geri yansıyan radar sinyalinin şiddeti belirlemektedir. Geri yansıyan sinyal şiddeti hedefin şekline, hedefin boyutlarına, hedef yüzey malzemesinin radar kesitine (RCS) bağlıdır [1-8].

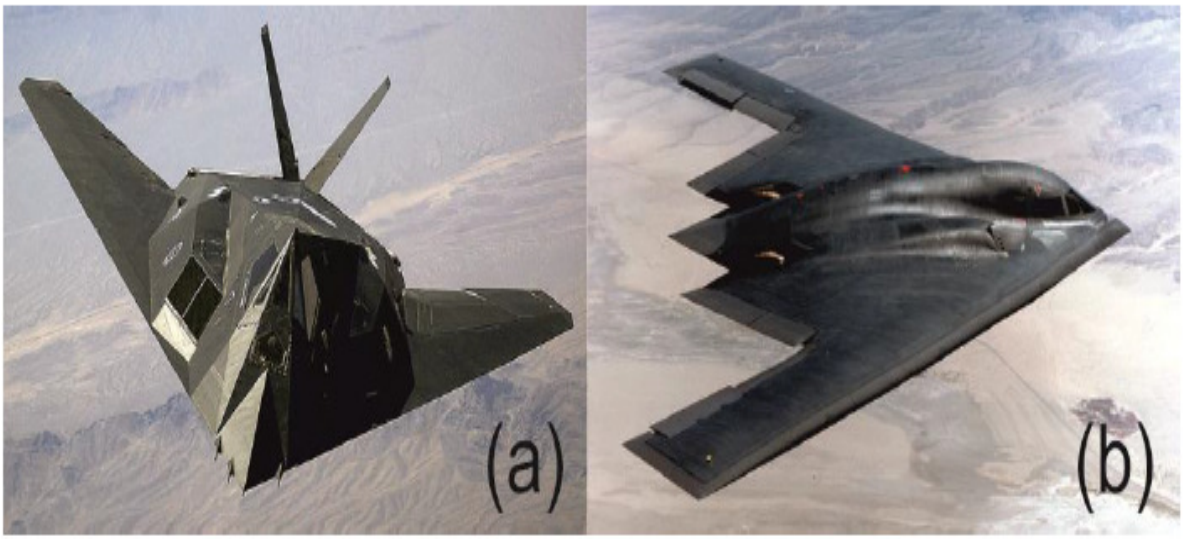
Mikrodalgaların (radar algası) hedef yüzeyinden geri yansımasını azaltma yöntemleri

- *Hedef Şekillendirme*: radar dalgalarını farklı yönlere saçmak amacıyla hedefin geometrisini şekillendirme (dihedral açılar, keskin köşeler)
- *Radar Absorblama Malzemeleri (RAM):* Mikrodalgaların (radar dalgaları) hedef yüzeyi tarafından absorblanması
- *Absorblayıcı Yapısal Malzemeler (Active/Passive Saçma):*

Savaş alanında stratejik ve taktik üstünlük sağlayabilmek amacıyla, tehditleri uzak mesafelerde tespit edebilmek gereklidir. Bu üstünlüğü sağlayabilme çabasının bir tarafı radar teknolojisinin sınırlarına dayanırken, diğer tarafı radar elektronik harp kendini koruma (EHKK) teknolojilerine ve radar kesit alanı (RCS) azaltımı tekniklerinin sınırlarına dayanmaktadır.

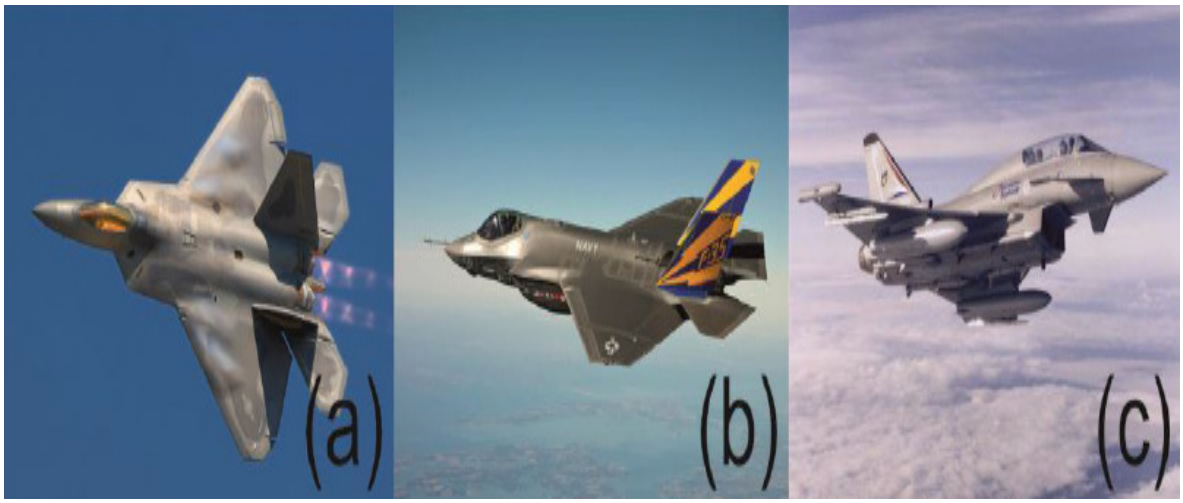
Hedef Şekillendirme

Hedef şekillendirme yönteminde, hedef yüzeyi mikrodalga (radar dalgası) radar cihazından farklı bir yöne saçılacak/yansıtılacak şekilde (dihedral açılar, keskin köşeler) yönlendirilmeltedir [1-8]. Aşağıdaki şekilde ilk nesil düşük görünürlüklü askeri savaş uçakları görülmektedir (a) F-117 Nighthawk ve (b) B-2 Spirit.



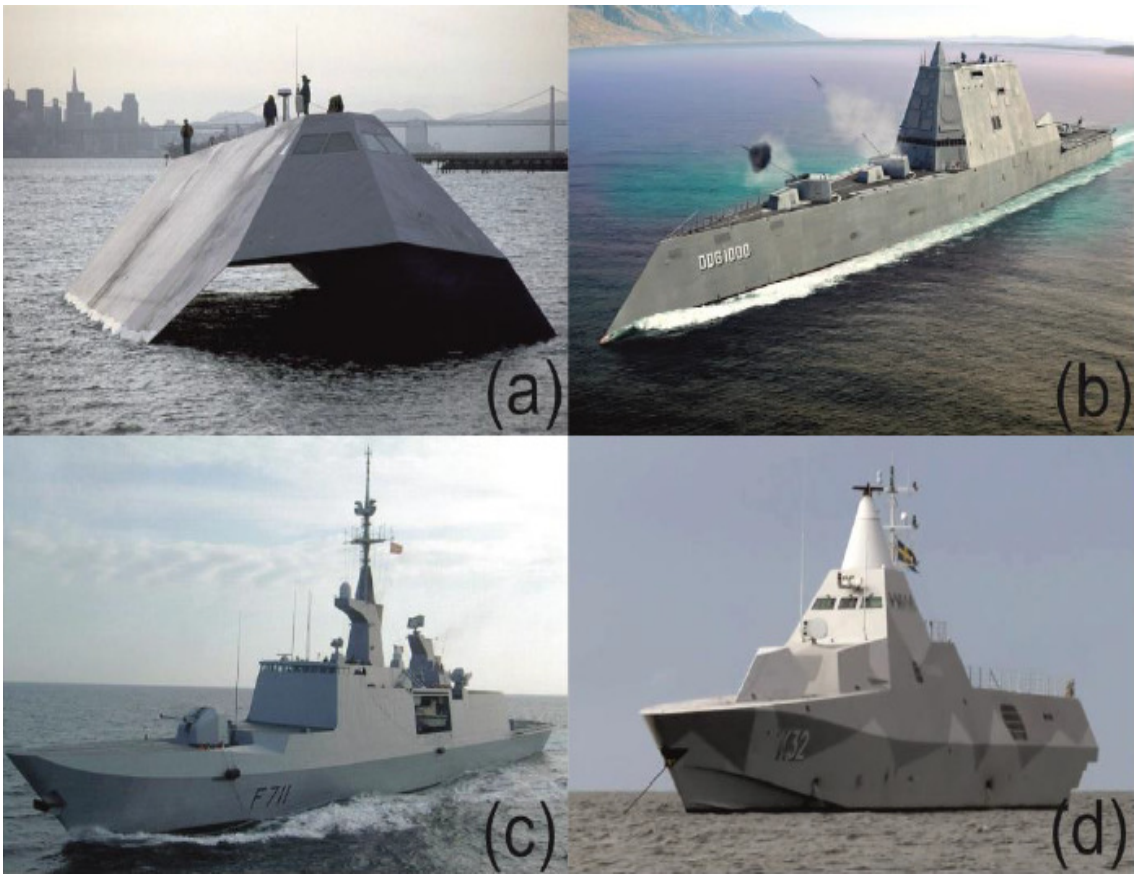
Şekil 2.3. İlk nesil uçaklar (a) F-117 Nighthawk and (b) B-2 Spirit [1]

Aşağıdaki şekilde son nesil düşük görünürlüklü askeri savaş uçakları görülmektedir (a) F-22 Raptor, (b) F-35 Lightning (Lockheed Martin, ABD) ve (c) Eurofighter Typhoon.



Şekil 2.4. Son nesil uçaklar (a) F-22 Raptor, (b) F-35 Lightning, (c) Eurofighter Typhoon [1]

Aşağıdaki şekilde düşük görünürlüğe sahip son nesil askeri savaş gemileri görülmektedir. Askeri araçların tasarımında hedef şekillendirme (dihedral açılar, keskin köşeler) prensiplerine uyulduğu görülebilmektedir.



Şekil 2.5. Son nesil askeri gemiler. [1]

Radar (Mikrodalga) Absorblama Malzemeleri (RAM)

Genel olarak, radar (mikrodalga) absorblama malzemeleri (RAM) aşağıdaki özelliklere sahip malzemelerden üretilmektedir;

- Elektrik dirençli dielektrik malzemeler (polimer esaslı)
- Manyetik malzemeler (Fe tozu vb)

Genel olarak, radar (mikrodalga) absorblama malzemeleri (RAM) elektromanyetik dalgalarla etkileşimlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır;

- Dielektrik kayıp gösteren malzemeler (mikrodalganın elektrik alanı ile etkileşim gösterir). Genel olarak polimer esaslı malzemeler kullanılmaktadır.
- Manyetik kayıp gösteren malzemeler (mikrodalganın manyetik alanı ile etkileşim gösterir)

Radar (mikrodalga) absorblama malzemeleri gelen elektromanyetik dalganın (mikrodalga) enerjisini absorblamalı ve geri yansıyan dalga enerjisini azaltmalıdır. Gelen elektromanyetik dalganın enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmektedir.

Radar (mikrodalga) absorblama malzemelerinin (RAM) dielektrik ve manyetik özelliklerini belirleyen en önemli iki parametre yalıtkanlık (dielektrik) sabiti (permittivity) ve geçirgenlik (permeability) özellikleridir.

Dielektrik sabiti (permitivity) elektromanyetik dalganın elektrik alandan etkilenme ölçüsüdür. Dielektrik sabiti (permitivity) malzemelerin yük depolama özelliklerini/kapasitelerini ifade etmektedir. Yalıtkan malzemelerin elektriksel alana karşı tepkilerini ifade etmektedir [1-8].

Genel olarak elektromanyetik geçirgenlik (permeability) bir dış manyetik alan etkisi altındaki bir malzemenin manyetikleşme ölçüsüdür [1-8]. Bir malzemenin manyetik alan oluşturabilme veya mıknatıslanabilme kapasitesini ifade eder.

Karbon Esaslı Malzemeler

Karbon esaslı radar absorblama malzemeleri (RAM) oldukça hafiftir. Ayrıca, manyetik absorblama malzemelerine göre ilave edilmesi gerekli miktarları çok daha azdır. Karbon nanotüp (CNT), karbon siyahı, grafit, grafen gibi malzemeler kullanılmaktadır.

Manyetik Malzemeler

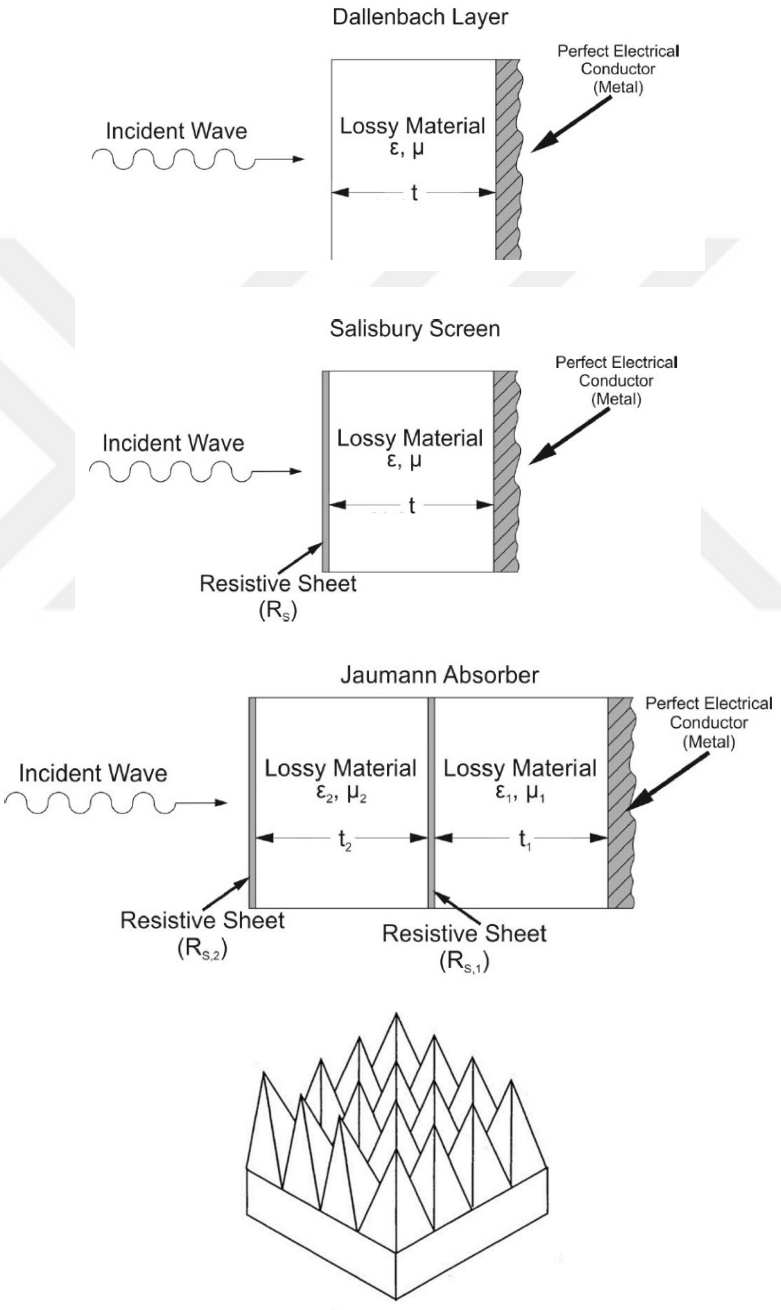
Manyetik esaslı radar absorblama malzemeleri (RAM) olarak nikel (Ni), demir (Fe), demir oksit (Fe_3O_4), mangan (Mn) ve çinko (Zn) kullanılmaktadır. Absorbsiyon mekanizması manyetik esaslı radar absorblama malzemelerinin manyetik dipol momentine bağlıdır. Genel olarak metaller yüksek iletkenlik göstermekle beraber yüksek yansıtma özelliği de göstermektedirler. Elektromanyetik dalganın penetrasyon derinliği çok düşüktür. Düşük dielektrik kayıp yaşanılan malzemelerde elektromanyetik dalganın penetrasyonu yüksek olup absorbsiyon yüksek seviyededir.

İletken Polimerler

Polianilin (PAN) veya polipirol (PPy) gibi iletken polimerlerde kısmi oksidasyon (doping) işlemi ile elektriksel iletkenlik kazandırılmaktadır. Kısmi oksidasyon işleminde polarınlar ve bipolaronlar (yük taşıyıcı) oluşmaktadır [1-14]. İletken polimer veya kendiliğinden iletken polimerler (ICP'ler) elektriği ileten polimerlerdir. Bu tür polimerler metalik iletkenliğe sahip olabilir veya yarı-iletkenler olabilir. İletken polimerlerin en büyük avantajı işlenebilir olmalarıdır. İletken polimerler genellikle termoplastik değildir. Yüksek elektrik iletkenlik gösterebilirler, ancak ticari polimerlere benzer mekanik özellikler göstermezler.

Absorblayıcı Yapısal Malzemeler (RAS)

Absorblayıcı yapısal malzemeler (RAS) son yıllarda ilgi çekmeye başlayan bir konudur. Aşağıdaki şekilde radar absorblayıcı yapısal malzemeler (RAS) a) Dallenbach, b) Salisbury, c) Jaumann, d) Pyramidal görülmektedir.



Şekil 2.6. RAS tipleri a) Dallenbach, b) Salisbury, c) Jaumann, d) Pyramidal [1]

Aşağıdaki tabloda çeşitli radar absorblayıcı malzemelerin radar kesitleti (RCS) değerleri görülmektedir. Genel olarak metaller yüksek iletkenlik göstermekle beraber yüksek yansıtma özelliği de göstermektedirler. Elektromanyetik dalganın penetrasyon derinliği çok düşüktür. Düşük dielektrik kayıp yaşanılan malzemelerde elektromanyetik dalganın penetrasyonu yüksek olup absorbsiyon yüksek seviyededir. Kısaca bir cismin radarda görünürlük miktarı olarak tanımlanabilir. Bir hedeften yansıyan radar sinyal gücü, onun tespit edilebilirliğini belirler. Genel olarak, hedefin aldığı gücün hedeften saçılan güce oranıdır. Bu, hedefin şekline ve boyutuna bağlıdır ve radar kesiti (RCS) olarak tanımlanır. Bir hedefin radar dalgalarını ne kadar geri yansıttığını göstermektedir. Radar kesiti frekansa oldukça bağımlıdır.

Tablo 2.1. Çeşitli malzemelerin radar kesitletleri [15]

Target	RCS (m^2)
Navy cruiser (length 200m)	14000
B-52 Stratofortress	100 – 125
C-130 Hercules	80
F-15 Eagle	10 – 25
Su-27 Flanker	10 – 15
F-4 Phantom	6 – 10
Mig-29 Fulcrum	3 – 5
F-16 A	5
F-18 C/D Hornet	1 – 3
M-2000	1 – 2
F-16 C (with reduced RCS)	1,2
T-38 Talon	1
B-1B Lancer	0,75 – 1
Sukhoi FGFA prototype*	0,5
Tomahawk TLAM	0,5
Exocet, Harpoon	0,1
Eurofighter Typhoon	0,1 class
F-18 E/F Super Hornet	0,1 class
F-16 IN Super Viper**	0,1 class
Rafale	0,1 class
B-2 Spirit	0,1 or less
F-117A Nighthawk	0,025 or less
bird	0,01
F-35 Lightning II	0,0015 – 0,005
F-22 Raptor	0,0001 – 0,0005
insect	0,00001

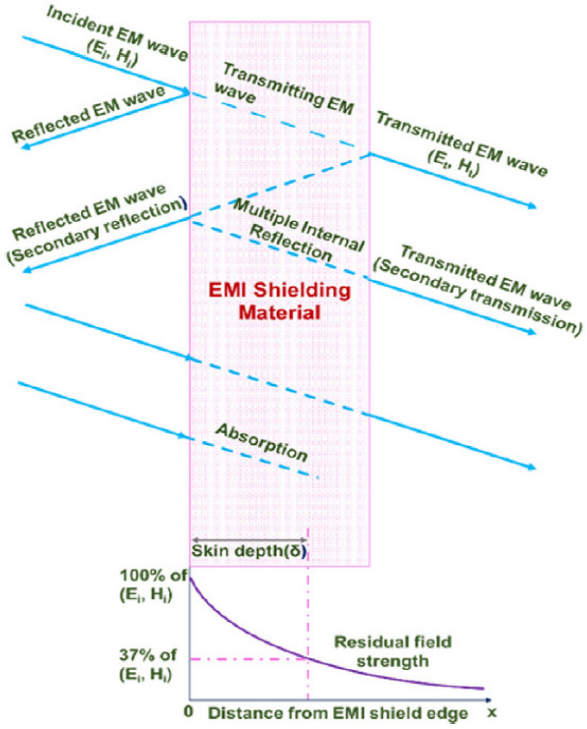
Elektromanyetik Girişim (EMI) Kalkanlama Malzemeleri

Genel olarak, elektromanyetik girişim (EMI), kısaca çeşitli elektrikli cihazlardan, yıldırımdan kaynaklanan elektromanyetik dalgaların etkisi ile belirli elektrik devrelerinin veya elektrikli cihazların elektromanyetik kirlenmesini/etkilenmesini ifade etmektedir. Genel olarak, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama malzemeleri istenen elektrikli cihazları elektromanyetik girişimden korumaktadır. Tüm elektromanyetik dalgalar birbirine dik hareket eden elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden oluşmaktadır [12].

Genel olarak, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama üç mekanizmaya dayanmaktadır:

- Absorpsiyon
- İç yansıma
- Yansıma

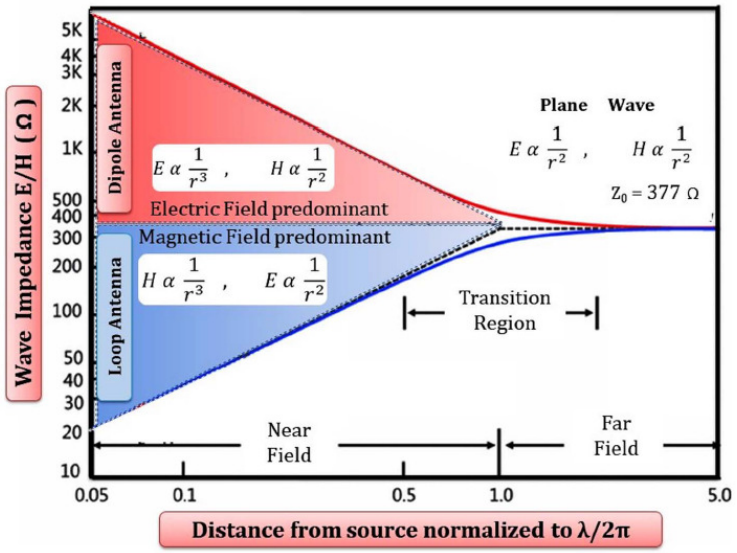
Aşağıdaki şekilde, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama olayında elektromanyetik dalga ile malzeme etkileşimleri görülmektedir. Görüldüğü gibi, yansıma, geçirim, absorbsiyon mekanizmaları bulunmaktadır.



Şekil 2.7: Elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama [12]

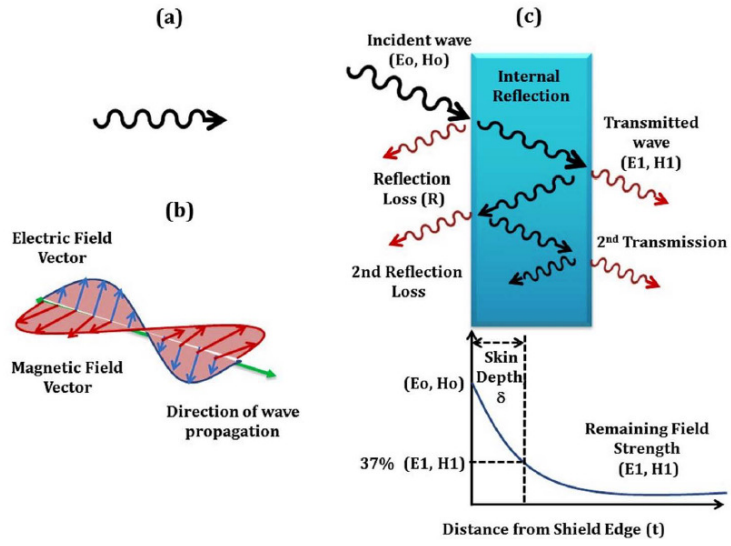
Elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama ya da ekranlama; genel olarak kart, devre ya da cihaz düzeyinde iki ortamı birbirinden elektromanyetik alanda izole etmek olarak tanımlanabilir. Elektromanyetik girişime günlük hayatta cep telefonuna mesaj gelecekken yakındaki hoparlörün cızırtı yapması şeklinde rastlanabilir.

Aşağıdaki şekilde dalga empedansının kaynaktan uzaklığa göre değişimi görülmektedir.



Şekil 2.8: Dalga empedansının kaynaktan uzaklığa göre değişimi [8]

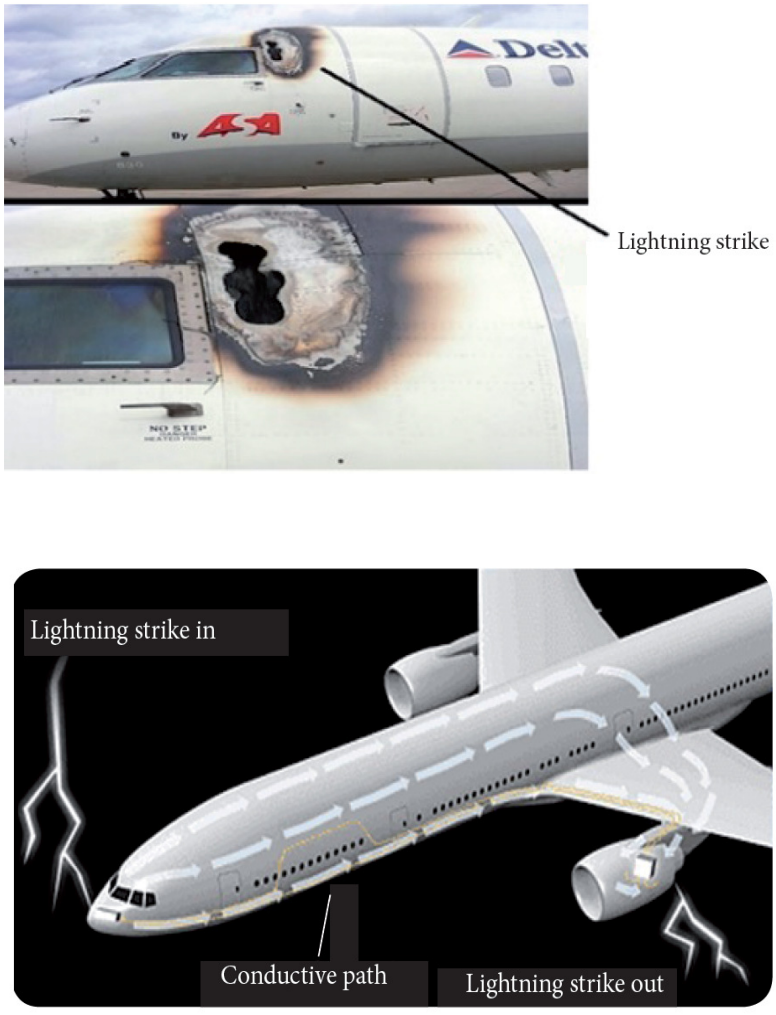
Aşağıdaki şekilde elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama a) elektromanyetik (EM) dalga, b) elektrik ve manyetik alanlar, c) dalga ayrılması şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.9: EMI kalkanlama a) EM dalga, b) elektrik-manyetik alanlar, c) dalga ayrılması [8]

Yıldırımdan Korunma ve Elektriksel İletkenlik

Genel olarak şimşek elektrik yüklü bir veya iki bulut arasındaki gözle görülür etkileşimdir (elektrik deşarj). Yıldırım ise elektrik yüklü bir bulut ile yer arasındaki elektrik boşalmasıdır (en tehlikelişmşek türüdür). Aşağıdaki şekilde, a) uçak yüzeyindeki yıldırım çarpması sonucu meydana gelmiş hasar ve b) uçak üzerindeki şematik elektriksel iletkenlik yolu (yıldırım girişi ve çıkışı) görülmektedir. Genel olarak hava araçları sıklıkla yıldırım çarpmasına maruz kalmaktadır. Hava araçları yıldırım çarpmasının olumsuz etkilerinden korunmak için belirli bir elektriksel iletkenliğe sahip olmalıdır. Genel olarak metal ağ (mesh) kullanılmakta olup, bu yöntem hava aracının ağırlığını arttırmakta, diğer yandan radar görünürlüğünü arttırmaktadır.



Şekil 2.10: a) Yıldırım çarpması ve b) uçak üzerinde elektrik iletimi [16]

2.2 KOMPOZİT MALZEMELER

Polimerler, monomer adlı küçük organik moleküllerin kovalent bağlarla birbirine bağlanak oluşturdukları dev moleküllerdir. Yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahiptirler. Polimerler seramik ve metallere göre oldukça genç sayılabilecek bir malzeme sınıfıdır. Polimerlere dev makromoleküller, polimerleri oluşturan oldukça küçük organik moleküllere ise monomer adı verilir. Monomer, polimerin sentezlendiği birim moleküle verilen isimdir. Tekrarlayan birim (mer) ve monomer birbirinden tamamen farklıdır, ancak bazen monomer veya birim monomer, doğru karşılığı olan, tekrarlayan birim yerine kullanılabilmektedir [17-23]

Genel olarak ifade edildiğinde kompozit malzeme, mühendislik açısından istenen özelliklere sahip yeni bir malzeme elde etmek için iki, üç veya daha çok farklı özelliklere sahip malzemenin kimyasal değil fiziksel olarak (makro ölçekte) karıştırılmasına denir.

Kompozit malzemeler üç ana bileşenden meydana gelir;
- Matris
- Takviye (fiber veya parçacık)
- Katkı/Dolgu

Matris malzemelerin yerine getirdiği temel fonksiyonlar şöyle ifade edilebilir.

- Fiberleri veya parçacıkları bir arada tutar, tekil fiber/parçacık hareketlerine izin vermez.

- Etki eden dış-yükü fiberlere yük kaybı olmadan yüksek bir verimle transfer eder.

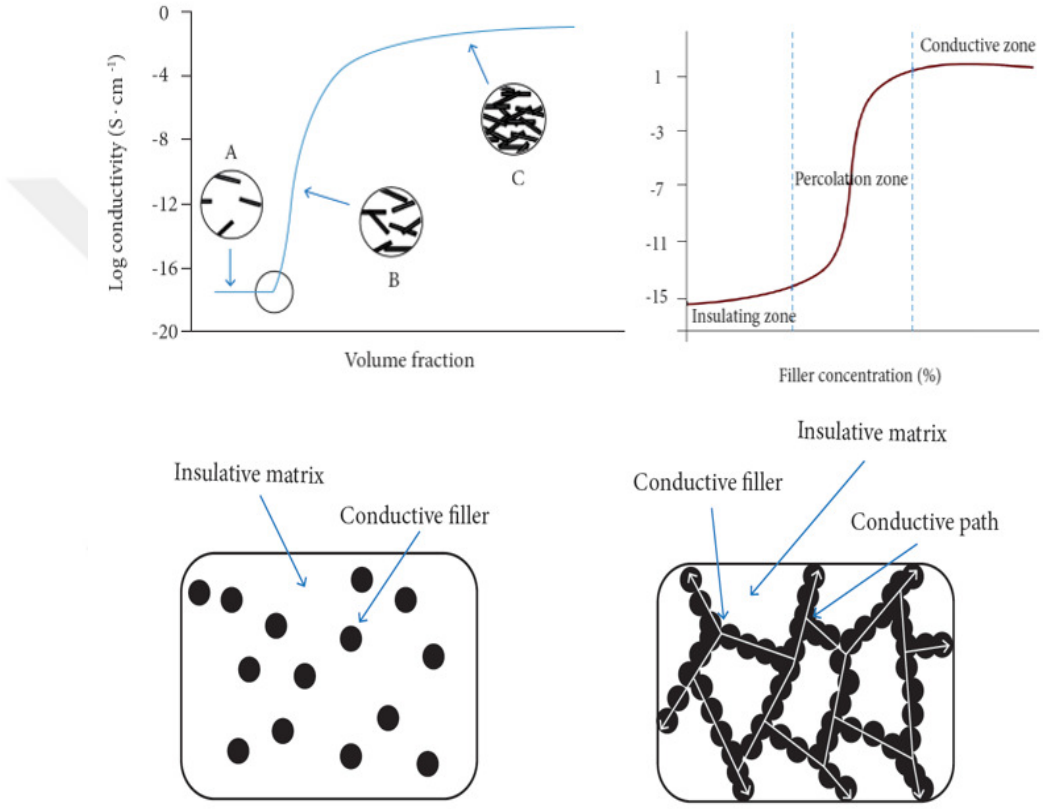
- Gelebilecek çeşitli kimyasal ve fiziksel dış-etkilere karşı kompozit malzemeyi korur.

Fiberlerin yerine getirdiği temel fonksiyonlar şöyle ifade edilebilir;

- Uygulanan dış-kuvvetin büyük bölümünü fiber taşımaktadır.

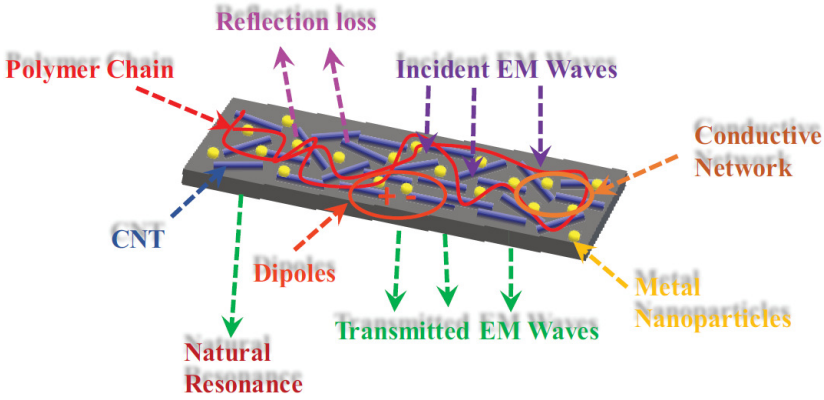
- Kompozitin temel mühendislik özelliklerini fiberin mühendislik özellikleri tayin eder [19-23].

Aşağıdaki şekilde, a) polimer matrise yapılan çeşitli katkıların (karbon nanotüp, karbon siyahı, grafit, metal tozu) elektriksel iletkenliğe olan etkileri ve b) çeşitli katkıların (karbon nanotüp, karbon siyahı, grafit, metal tozu) polimer matris içinde dağılımları şematik olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi, belirli bir eşik (perkolasyon) bölgesi bulunmakta olup, kritik miktardan daha fazla iletken katkı yapıldığında polimer matrisli kompozit malzemeler yalıtkan davranıştan ani olarak iletken davranışa geçmektedir.



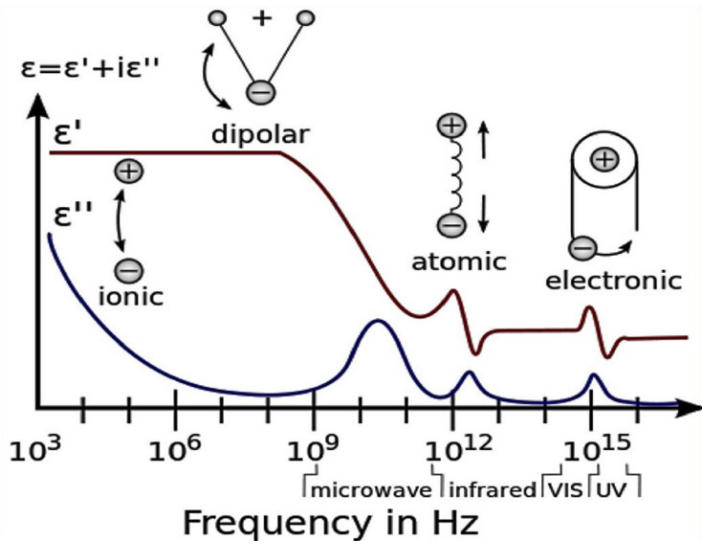
Şekil 2.11: a) Katkı maddelerinin iletkenliğe etkisi, b) katkı maddelerinin dağılımı [16]

Elektromanyetik girişim (EMI), elektrik ve elektronik aletlerin performasında düşüşe, neden olan radyo frekanslarında doğal veya insan kaynaklı bozucu etkilerdir. Elektromanyetik uyumluluk (EMC), elektromanyetik enerjinin üretimi ve iletimi durumlarında sağlanan ve elektromanyetik girişim oluşturmayacak her türlü etkidir. Elektromanyetik girişim (EMI), elektrikli cihazlardan, yıldırımdan kaynaklanan elektromanyetik dalgaların etkisi ile belirli elektrik devrelerinin veya elektrikli cihazların elektromanyetik kirlenmesini/etkilenmesini ifade etmektedir. Elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama malzemeleri istenen elektrikli cihazları elektromanyetik girişimden korumaktadır. Aşağıdaki şekilde iletken tabaka ile elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama mekanizması şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.12: İletken tabaka ile elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama mekanizması [8]

Aşağıdaki şekilde farklı frekanslarda farklı dielektrik mekanizmaları şematik olarak görülmektedir. Genel olarak, dipolar, atomik, elektronik, iyonik mekanizmalar önemlidir.



Şekil 2.13: Farklı frekanslarda dielektrik mekanizmaları [8]

2.3. METAMALZEMELER

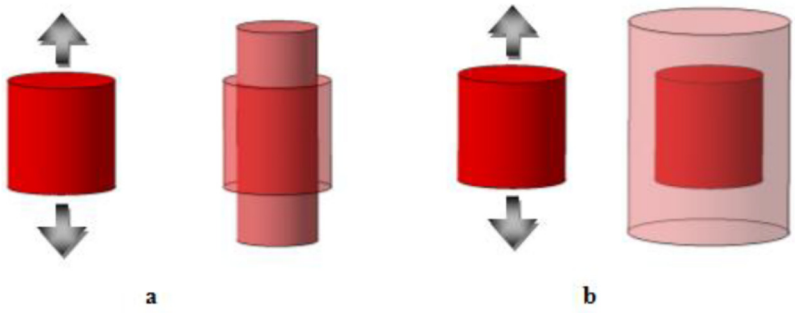
Metamalzemeler, doğada bulunan malzemelerde bulunmayan mekanik, manyetik, optik veya elektriksel özelliklere sahip şekilde tasarlanan sentetik malzemelerdir. Genellikle polimer veya metal gibi malzemelerle oluşturulan mikro-boyutlardaki yapıların tekrarlanan şekiller olarak birleştirilmesiyle elde edilirler [24-35].

Metamalzemelerin Sınıflandırılması

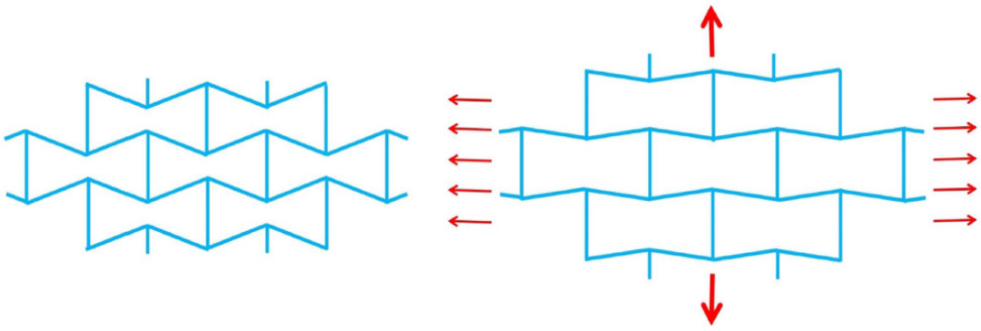
- Mekanik Metamalzemeler (negatif Poisson oranı)
- Elektronik Metamalzemeler (negatif kırınım indisi)

Ökzetik (Auxetic) Metamalzemeler (Mekanik Metamalzemeler)

Genel olarak Poisson oranı bir malzemenin çekme gerilmesi uygulandığında kesit daralmasının, malzemenin boyunun uzamasına oranıdır (basma gerilmesi altında boy kısalmasının, enin genişlemesine oranı). Auxetic malzemeler negatif Poisson oranı gösteren mekanik metamalzemelere verilen isimdir.



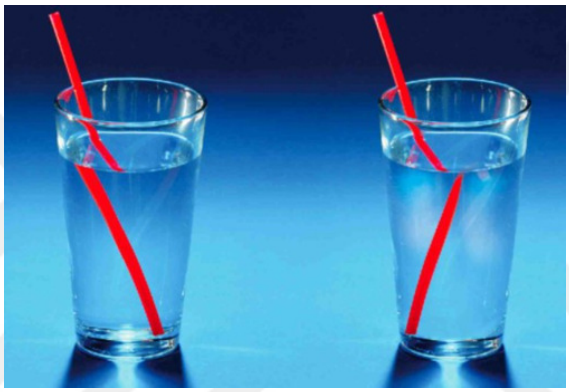
Şekil 2.14: Çekme kuvveti altında a) Geleneksel malzeme, b) auxetic malzeme [31]



Şekil 2.15: Re-entrant yapısı [32]

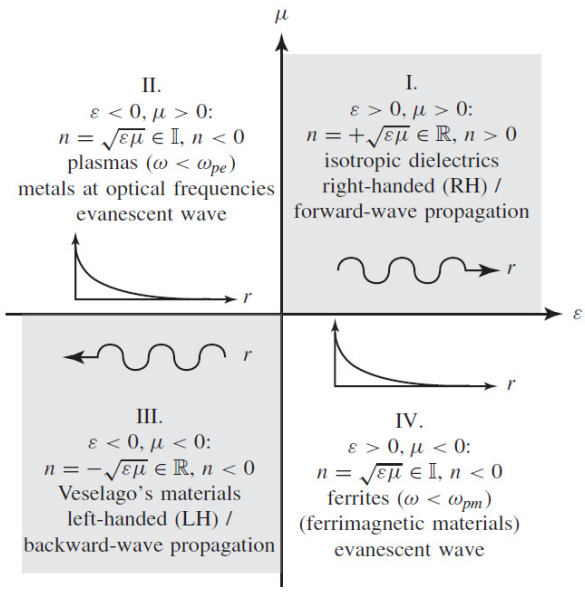
Elektromanyetik Metamalzemeler

Genel olarak elektromanyetik metamalzemeler negatif kırınım indisine sahip olan metamalzeme grubudur. Elektromanyetik radyasyonun dalga boyundan daha küçük yüzey özellikleriyle etkileşime giren elektromanyetik dalgaları etkiler. Elektromanyetik radyasyonun en geniş dalga boyu mikrodalgalardır ve bunlarla çalışmak üzere tasarlanmış metamalzemeler milimetre mesafeye kadar özelliklere sahiptir. Mikrodalgaları manipüle etmek için uygun endüktif ve kapasitif özelliklere sahip elektriksel olarak iletken eleman dizileri (örneğin tel halkaları) yapılabilir.



Şekil 2.16: Elektromanyetik metamalzemeler [33]

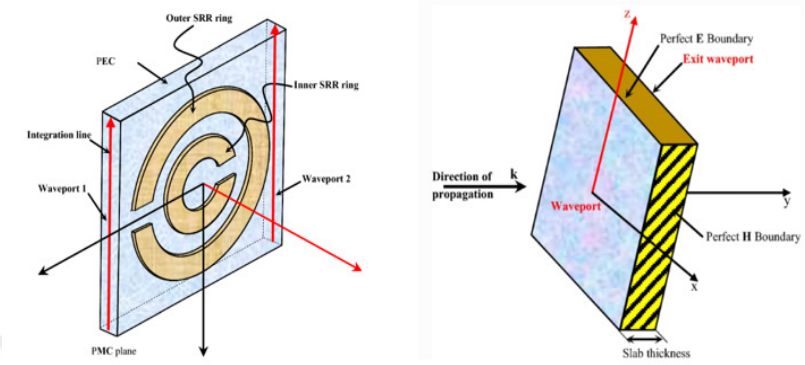
Aşağıdaki şekilde geçirgenlik-dielektrik ve refraktif indeks diagramı görülmektedir.



Şekil 2.17: Geçirgenlik-dielektrik ve refraktif indeks diagramı [25]

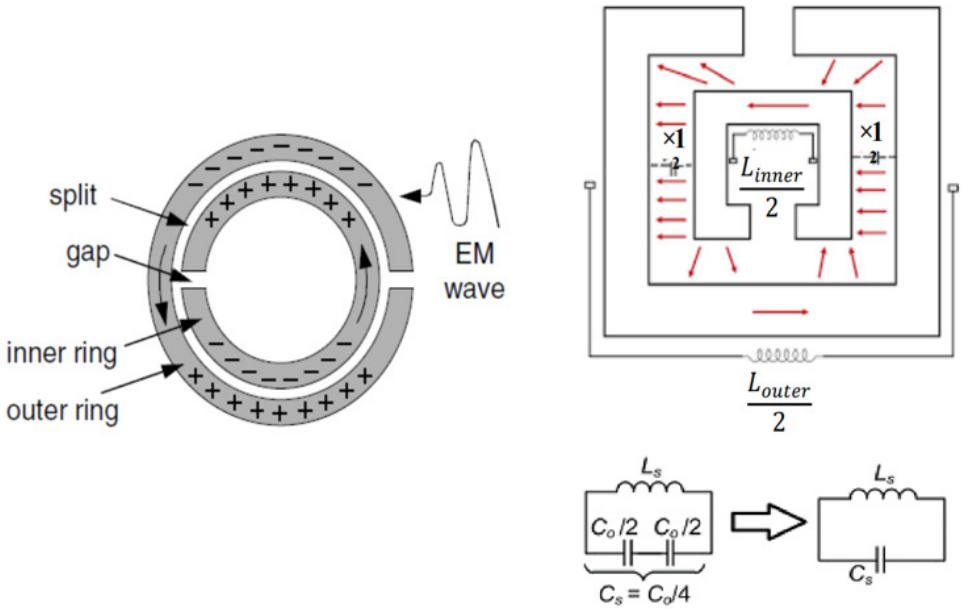
Bölünmüş Halka Rezonatör (BHR) Metamalzemeler (Splint Ring Resonator (SRR))

Bölünmüş halka rezonatör esaslı elektromanyetik metamalzemeler görünmezlik (hayalet) teknolojisi uygulamalarında kullanılma potansiyeli sunmaktadır.



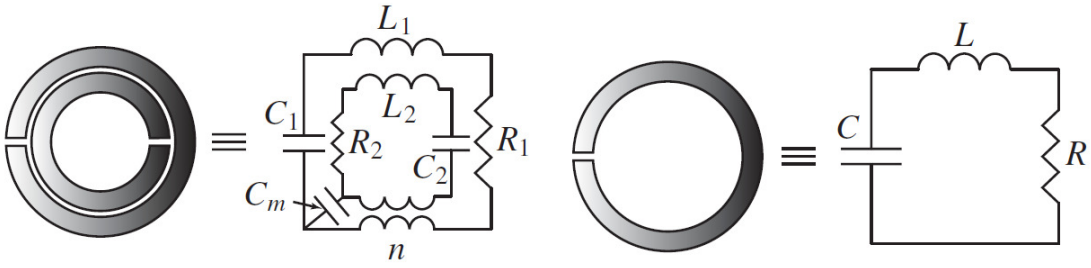
Şekil 2.18: Bölünmüş halka rezonatör birim hücreleri [34]

Aşağıdaki Şekilde bölünmüş halka rezonatörde (BHR) akım ve yük dağılımı ve eşdeğer LC devresi şematik olarak görülmektedir. Bölünmüş halka rezonatör (BHR) bir LC rezonatör gibi davranış göstermektedir. Elektromanyetik metamalzemelerde tekrarlayan birim paternin boyutları elektromanyetik dalganın dalga boyuna yakın veya ondan küçük olmalıdır. Genel olarak radar cihazları 1-18 GHz frekans aralığında çalışmaktadır.



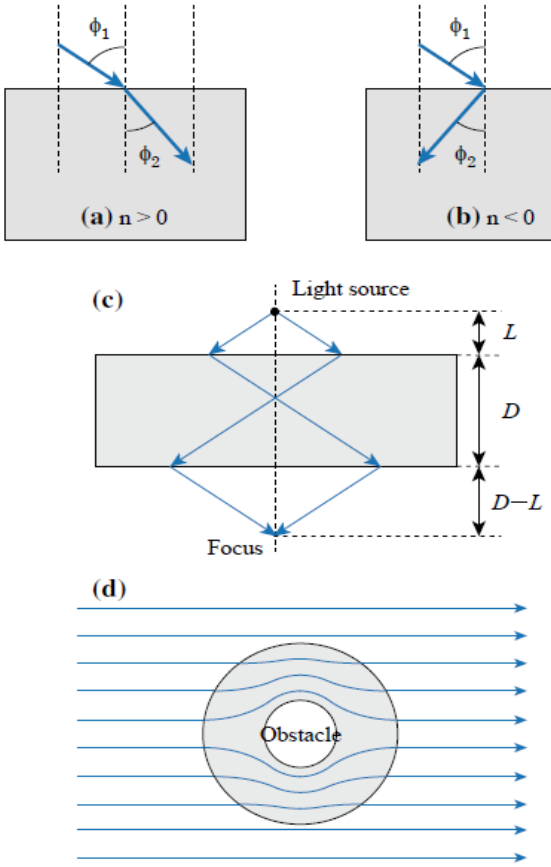
Şekil 2.19: Bölünmüş halka rezonatörde ve eşdeğer LC devresi [35]

Aşağıdaki şekilde şematik tek ve çift bölünmüş halka rezonatör (BHR) konfigurasyonları ve eşdeğer LC devreleri görülmektedir.



Şekil 2.20: Tek ve çift BHR konfigurasyonları ve eşdeğer LC devreleri [25]

Aşağıdaki şekilde a) pozitif indeks, b) negatif indeks, c) metamalzeme d) gizleme olayları görülmektedir.



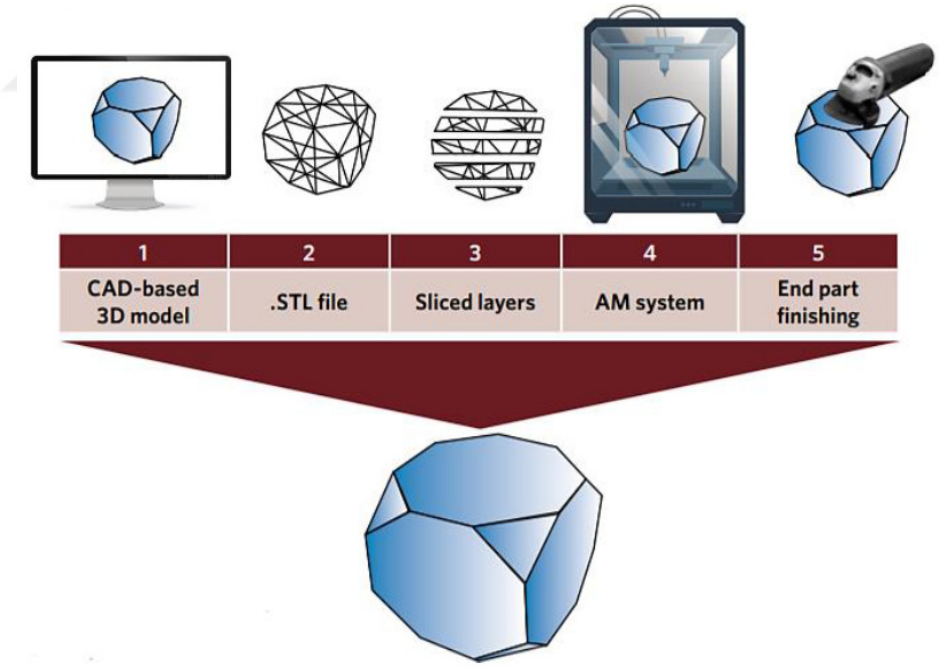
Şekil 2.21: a) Pozitif indeks, b) negatif indeks, c) metamalzeme d) gizleme [30]

2.4. EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli imalat son yıllarda hızla gelişenve yaygınlaşan ileri teknoloji yenilikçi bir üretim/imalat yöntemidir. Eklemeli imalat, dijital çizimlerden (bilgisayar destekli çizim, CAD) 3-boyutlu fiziksel ürünlerin katman-katman üretilmesini sağlayan imalat yöntemidir [36-41].

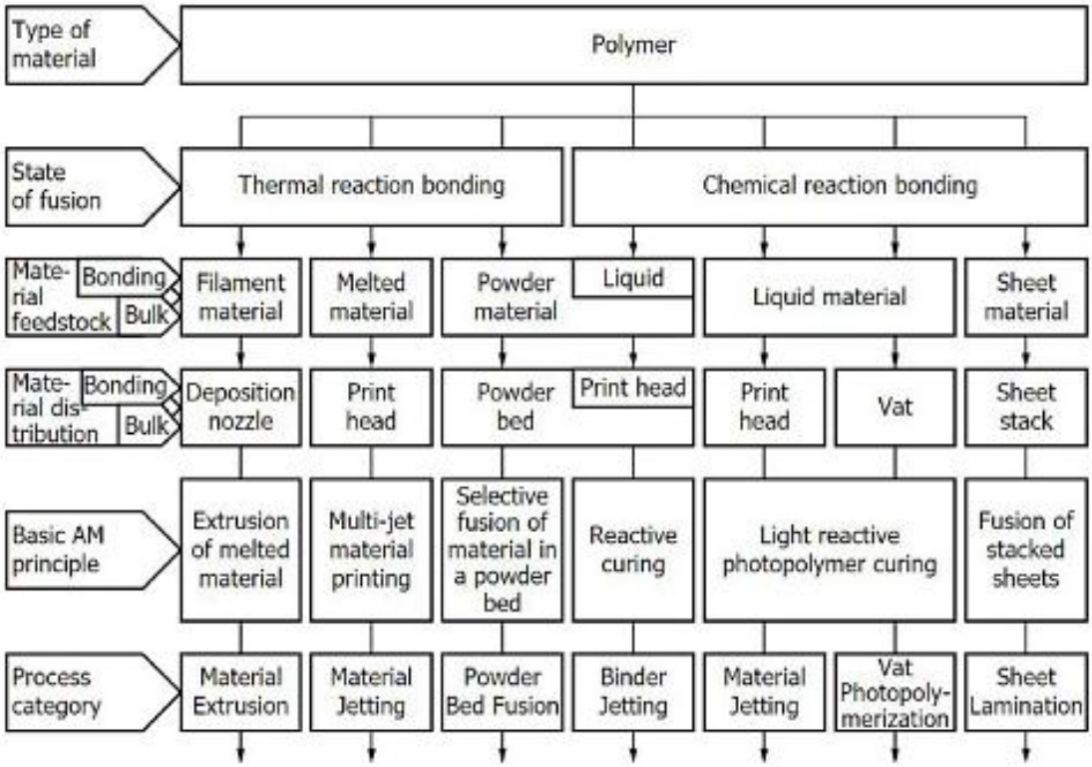
Eklemeli imalat yönteminin temel aşamaları

- Dijital model (CAD modeli) oluşturulması (yazılım ile çizim veya tarayıcı kullanımı)
- STL (standard triangulate language) dosyasına dönüştürülme
- İmalat yönünün belirlenmesi (Z-ekseni)
- Tasarımın yazılım tarafından dilimlenmesi
- Eklemeli imalatyöntemi ile parça üretimi
- İskelenin (destek yapıları) parçadan uzaklaştırılması
- Temizleme ve bitirme işlemleri



Şekil 2.22: Eklemeli imalat adımları [13]

Aşağıdaki şekilde polimer hammadde kullanılan eklemeli imalat işleminde dikkate alınması gereken temel parametreler görülmektedir. Genel molarak kimyasal veya termal bağlanma mekanizmaları bulunmaktadır. Hammaddeler filament, toz, tabaka veya sıvı olabilmektedir. Proses tipine göre ekstrüzyon, jet, toz yatağı, bağlayıcı püskürtme, stereolitografi (VAT) gibi tipleri bulunmaktadır.

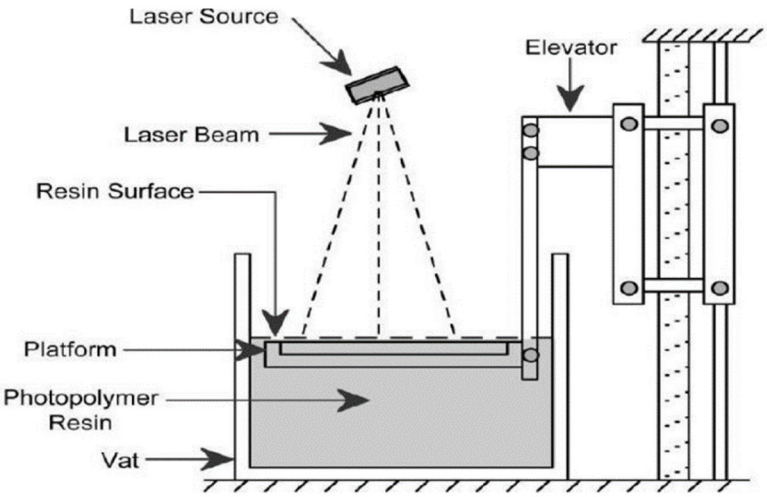


Şekil 2.23: Polimer hammadde kullanılan eklemeli imalat işleminde parametreler [13]

Başlıca eklemeli imalat yöntemleri

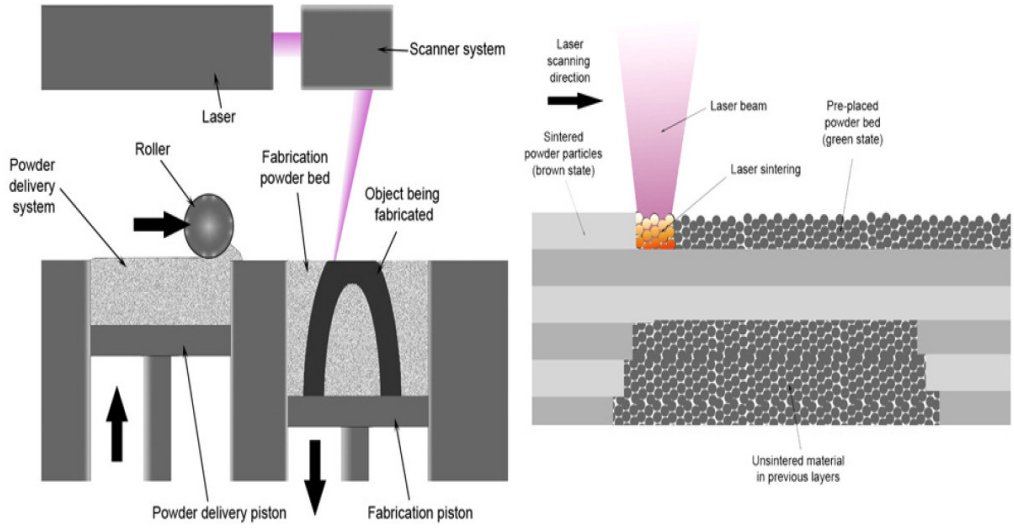
- Seçimli lazer sinterleme (SLS)
- Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)
- Stereolitografi (SLA)
- Fused deposition modeling (FDM)
- Elektron demeti ergitme (EBM)

Aşağıdaki şekilde bir sıvı hammadde esaslı eklemeli imalat yöntemi olan fotopolimerizasyon (stereolitografi) yöntemi şematik olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi UV ışını malzeme yüzeyinde ayna sistemi kullanılarak taranmakta ve sıvı fotopolimeri seçimli olarak katılaştırmaktadır (polimerizasyon).



Şekil 2.24: Fotopolimerizasyon (stereolitografi) yöntemi [11]

Aşağıdaki şekilde bir katı (toz yatak) hammadde esaslı eklemeli imalat yöntemi olan seçimli lazer sinterleme (SLS) eklemeli imalat yöntemi şematik olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi lazer ışını toz yatağında bulunan toz malzeme yüzeyinde ayna sistemi kullanılarak taranmakta ve tozları seçimli olarak katılaştırmaktadır (sinterleme).



Şekil 2.25: Seçimli lazer sinterleme (SLS) yöntemi [11]

3. YÖNTEM

Matris Malzemesi

- Poliüretan (PU)
- Epoksi

Katkı Maddeleri

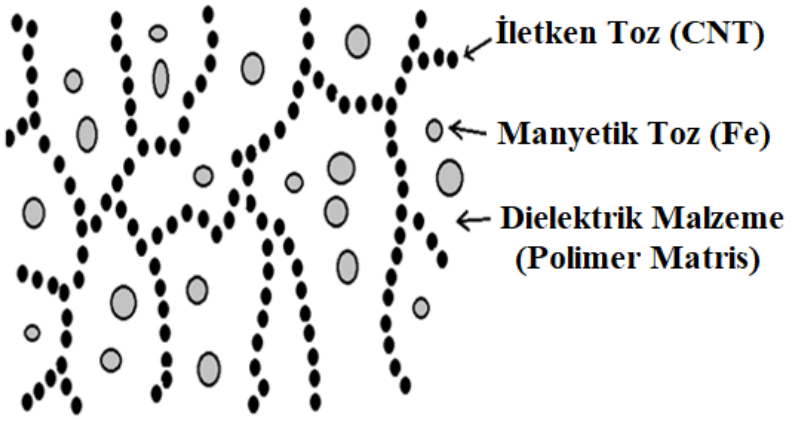
- Demir (Fe) tozu
- Alüminyum (Al) tozu
- Karbon siyahı
- Karbon nano tüp (CNT)
- Karbon fiber (örgülü - kırpılmış)

Radar (mikrodalga) absorblama malzemesinin (RAM) genel hedefleri şunlardır:

- Düşük Görünürlük
- Yıldırım Çarpmasına Dayanıklılık

Radar (mikrodalga) absormala malzemesinin (RAM) temel bileşenleri şunlardır:

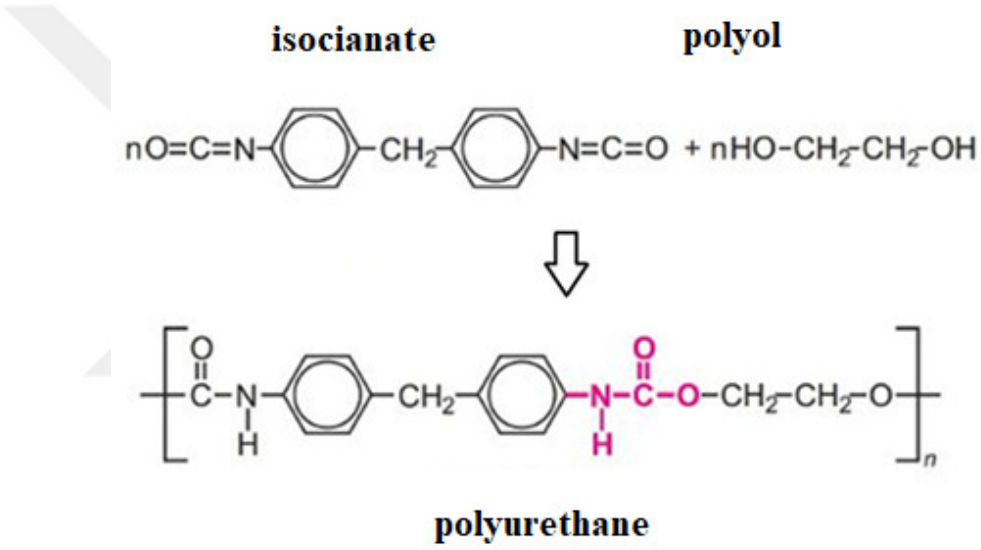
- Manyetik Fe tozu (Geçirgenlik/Manyetik Kayıp)
- Dielektrik Matris - Epoksi, PU (İzin/Dielektik Kaybı)
- İletken Parçacıklar - Karbon Fiber, Grafit tozu



Şekil 3.1: Hedeflenen radar absorblama malzemesinin şematik yapısı

Poliüretan (PU) Esaslı Numuneler

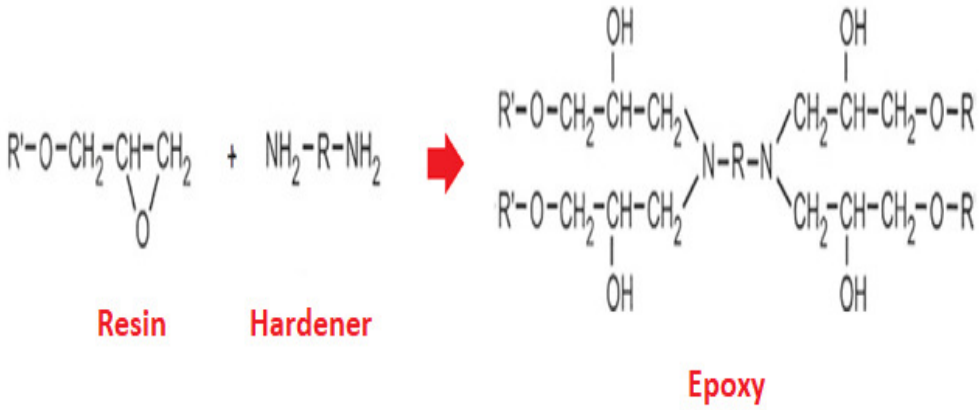
Genel olarak poliüretan, karbamat bağları içeren yaygın kullanılan bir polimer türüdür. Çoğu poliüretan termoset özelliktedir. Poliüretan (PU) esaslı numuneler, diizosiyanat ve polyol maddelerinin karıştırılması sonucu üretilmiştir. Poliüretan (PU) temelli kompozitlerin üretimi kapsamında, ağırlıkça % 50 poliol ve ağırlıkça % 50 poliizosiyanat birbirine katılmış ve 2 dakika boyunca homojen olana kadar ve viskozitesi artmaya başlayana kadar mekanik olarak karıştırılmıştır. Viskozite artmaya başladığında takviye malzemeleri sıvı içerisine ilave edilmiş ve homojen oluncaya kadar 3 dakika boyunca daha karıştırmaya devam edilmiştir. Son olarak ise elde edilen sıvı kompozit malzeme teflon kalıp içerisine dökülmüştür.



Şekil 3.2: Poliüretan (PU) esaslı numunelerin üretimi

Epoksi Esaslı Numuneler

Epoksi esaslı kompozitlerin üretiminde, öncelikle sıvı epoksi reçine (ağırlıkça % 90) ve epoksi sertleştirici maddesi (ağırlıkça % 10) karıştırılmıştır. Karışım 2 dakika boyunca homojen olana kadar ve viskozitesi artmaya başlayana kadar karıştırılmıştır. Viskozite artmaya başladığında takviye malzemeleri ilave edilmiş ve homojen oluncaya kadar 3 dakika boyunca karıştırmaya devam edilmiştir. Son olarak sıvı teflon kalıp içerisine dökülmüştür. Epoksi reçineler, bir veya daha fazla epoksit grubunun reaksiyonu ile oluşurlar. Epoksi reçineleri hazırlamak için farklı kürleştirici ajanlar gereklidir. Kürleşme, kürleştirici tarafından başlatılan homopolimerizasyon ya da çapraz bağlayıcı ile kopolimerizasyon reaksiyonu olabilir. Epoksi reçineler farklı kürleştiriciler ve sıcaklık ile kürleştirilerek termoset ürün haline getirilirler.



Şekil 3.3: Epoksi esaslı numunelerin üretimi

Radar Absorban Yapıl Parça Esaslı Kompozitler (Radar Absorbing Structure, RAS)

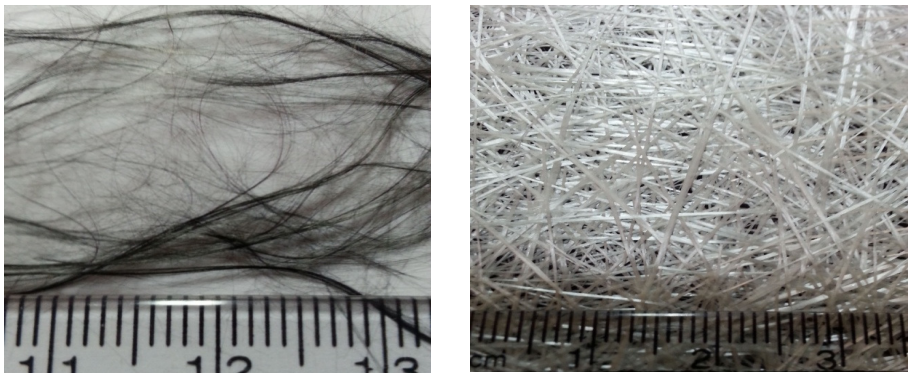
Genellikle radar absorban malzemeler (RAM) ince film kaplama veya boya olarak savaş uçaklarının yüzeyine uygulanmaktadır. Fakat bu RAM esaslı tasarımın büyük dezavantajları da bulunmaktadır. Radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı tasarımın ise hem yüksek mukavemetinden dolayı yük taşıma hem de radar absorbsiyon özelliği bulunmakta olup, uçak yapımında yapısal parça olarak kullanılabilir. Bu amaçla radar absorban malzeme özellikli kompozitlerin içerisine karbon fiber veya cam fiber ilave edilerek radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı kompozitler üretilmiştir.

Karbon Fiber

Fiber takviyeli kompozit üretiminde en yaygın kullanılan fiberlerden biri karbon fiberlerdir. Karbon fiber malzemeler örülmüş olarak (200 gr/m^2) Dost Kimya Firmasından temin edilmiştir. Karbon fiberler kompozit üretiminde örülmüş olarak veya kırpılarak polimere ilave edilmiştir.

Cam Fiber

E-camından, dokunmamış kumaş olarak üretilmiş "kırpılmış cam elyaf keçe" (CSM) temin edilmiştir (ECM 225 (emulsion), Asia Composite Materials (ACM, Tailand). Temin edilen fiberler silan/emülsiyon ile kaplanıp-bağlanmıştır. % 2-8 arası emülsiyon tipi bağlayıcı katkısı kullanılmıştır.



(a) (b)

Şekil 3.4: Kullanılan fiberler a) karbon, b) cam fiberler.

Metamalzeme Ürünlerin Üretimi

Eklemeli İmalat Yöntemi

Model (pozitif kalıp) üretimi eklemeli imalat yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekilde fotopolimer reçine kullanarak eklemeli (katmanlı) imalat esaslı stereolitografi yöntemiyle üretim yapan eklemeli imalat cihazın (3-boyutlu yazıcı) fotoğrafı görülmektedir. Akrilik esaslı fotopolimer reçine (sıvı) tankın içine konulmakta, numune platform yukarıya doğru hareket ettikçe katman katman oluşmaktadır. UV ışığı ile ayna sistemi vasıtasıyla taranan sıvı fotopolimer reçinenin katılaşması (polimerleşme) sonucu parça oluşumu gerçekleşmektedir. Üretilen numune alkolle yıkanmakta ve ardından iskelesinden uzaklaştırılmaktadır.



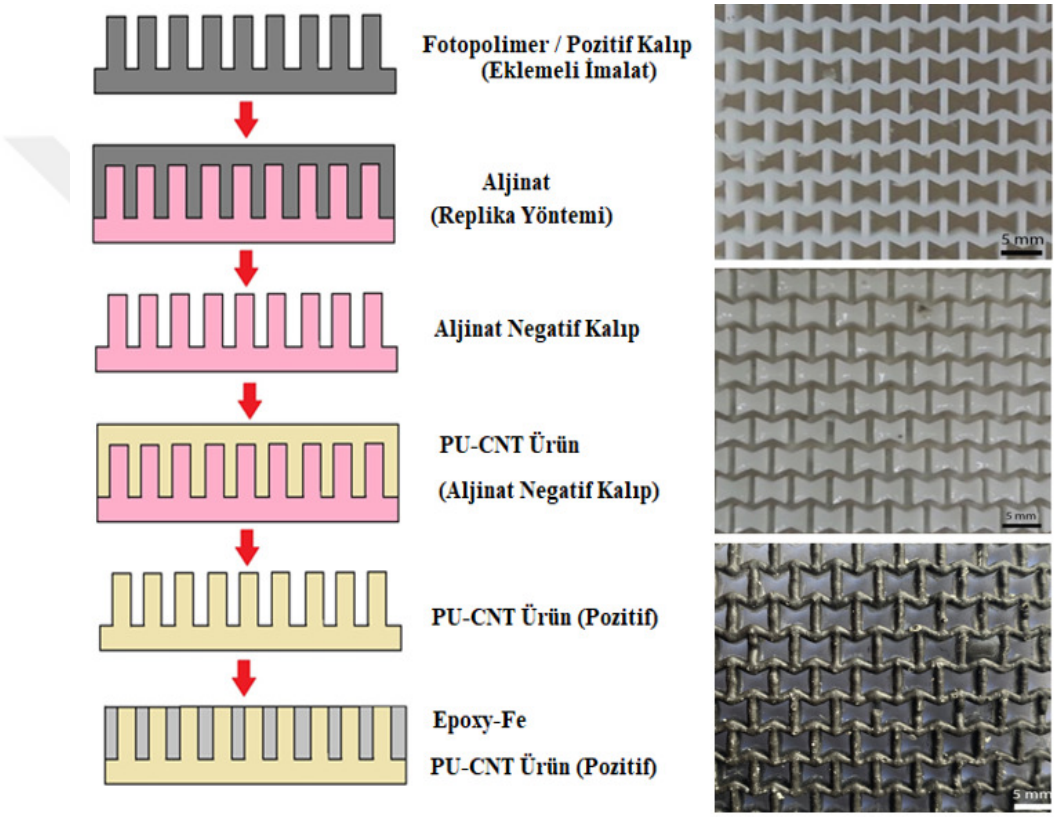
Şekil 3.5: Eklemeli imalat cihazı

Bölünmüş Halka Rezonatör Üretimi

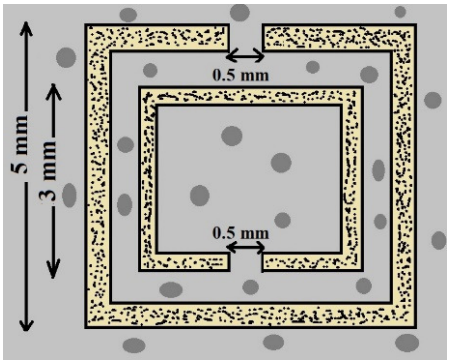
Çevrimsel halkalarda/karelerde bulunan küçük aralıklar (gap), yüksek kapasitans oluşturmakta ve rezonans frekansını düşürmektedir. Genellikle bölünmüş halka rezonatörler ince polimer üzerine bakır kaplanarak üretilmektedir. Bu çalışmada, karbon nanotüp esaslı bölünmüş halka rezonatörler polimer matrisin yüzeyine kaplanmayıp içine gömülmektedir. Böylece daha yüksek radar absorblama kapasitesi, daha düşük yoğunluk ve daha üstün mekanik özellikler elde edilmektedir.

Nihai kompozit ürünler eklemeli imalat ile üretilen modellerden yola çıkarak aljinat kalıplama (replika yöntemi) ile üretilmiştir. Aşağıdaki şekilde eklemeli imalat-replika yöntemi ile metamalzeme esaslı numune üretimi temel aşamaları şematik olarak görülmektedir.

Sağ tarafta farklı aşamalardaki ürünlerin fotoğrafları görülmektedir. Eklemeli imalat ile üretilmiş re-entrant tipi metamalzeme şekilli pozitif kalıp (en üstte), aljinat negatif kalıp (ortada), metamalzeme şekilli PU-CNT takviye ve epoksi-Fe matris (en altta).



Şekil 3.6: Replika yöntemi ile metamalzeme üretim kademeleri



Şekil 3.7: Bölünmüş halka rezonatör (BHR) metamalzeme birim hücresi

Karakterizasyon

Çekme Testi

Mekanik özelliklerin incelenmesi kapsamında üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin çeşitli mekanik özellikleri çekme testleriyle (Devotrans, Türkiye) incelenmiştir. Aşağıdaki şekilde deneylerde kullanılan çekme cihazının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.8: Çekme cihazı

Sertlik Testi

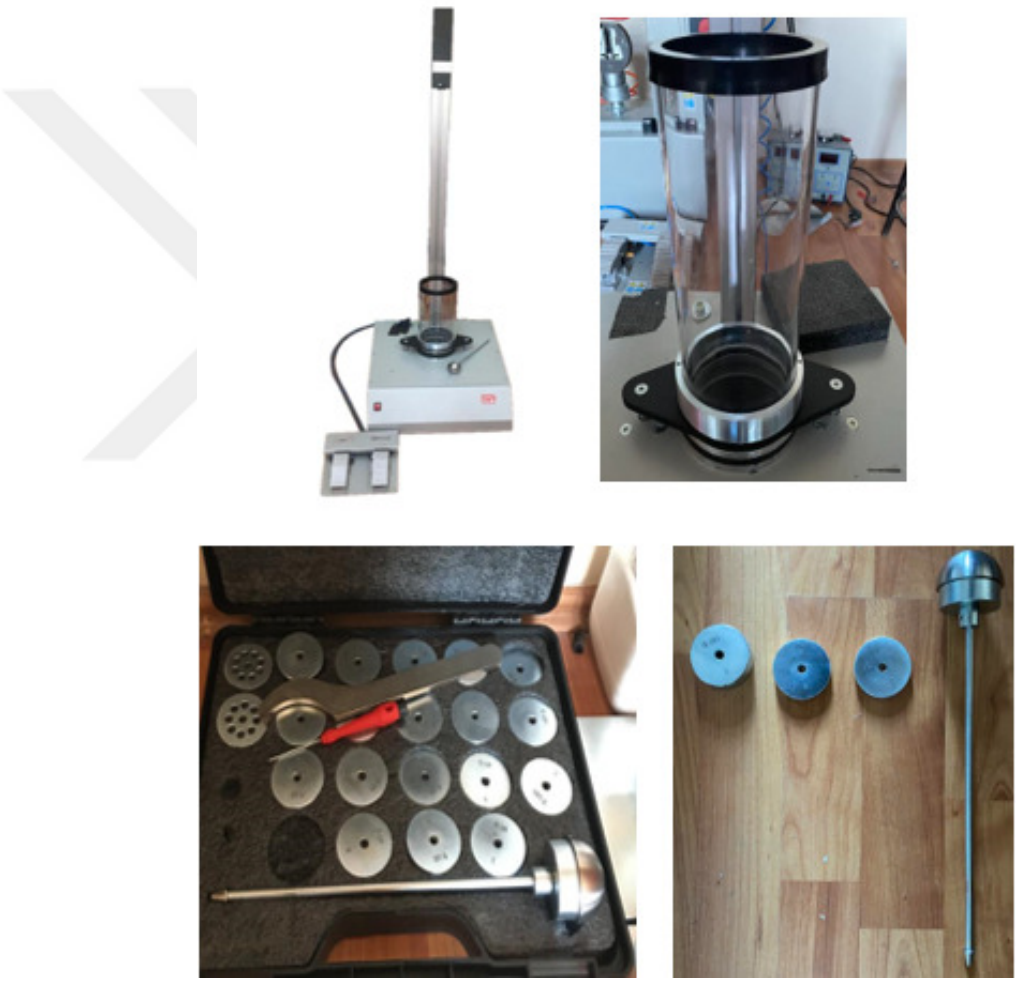
Mekanik özelliklerin incelenmesi kapsamında üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin sertlikleri shore sertlik cihazı ile ölçülmüştür (Devotrans, Türkiye). Sertlik, malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Shore sertliği plastik veya esnek malzemelerin sertliğini tanımlamak için kullanılan terimdir. Aşağıdaki şekilde deneylerde kullanılan sertlik cihazının (Devotrans) fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.9. Shore sertlik testi

Darbe Testi

Kompozit numunelere darbe testi ASTM D1709 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Ağırlık düşürmeli darbe testi, numunenin üzerine belirli yükseklikten ağırlık düşürülerek numunenin absorbe ettiği enerjinin ölçülmesi için kullanılan bir yöntemdir. Ağırlık arttırılarak malzemenin hangi ağırlıkta kırıldığı belirlenir. Testler Devotrans marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. 150 cm düşme yüksekliğinden 180-400 gr arasında 45 gr artışla değişen yükler uygulanmıştır. Aşağıdaki şekilde darbe cihazının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.10. Darbe testi

Termal Kamera

Numunelerin termal görüntülenebilirliği termal kamera ile incelenmiştir. Numuneler aşağıda fotoğrafı görülen termal kamera (IR görüntüleme) cihazı (Bosch GTC 400 C) ile test edilmiştir. Termal görüntüleme cihazı -10 ile 400 ºC sıcaklıkları arasında ölçüm yapabilmektedir. Termal kameranın çözünürlüğü 0.1 ºC değerindedir. Termal kamera cihazında mikrobolometre tipi kızılötesi (IR) sensör bulunmaktadır.



Şekil 3.11: Termal kamera

Girdap Akımları (Eddy Current) Testi

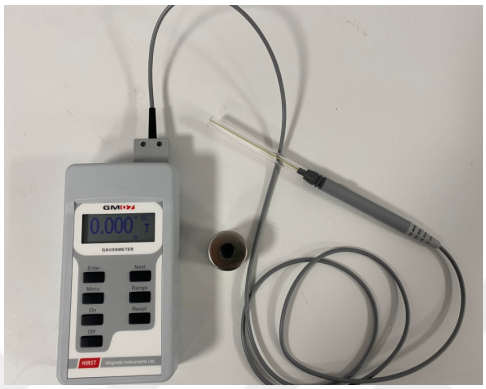
Üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin elektirksel iletkenlikleri % IACS (uluslararası tavlanmış bakır standardı) cinsinden girdap akımları (eddy current) cihazı ile (EtherCheck, Ether NDE) ile ölçülmüştür. Öncelikle kalibrasyon bloğu yardımı ile cihaz kalibre edilmiş ve ardından iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekilde girdap akımları cihazının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.12: Girdap akımları test cihazı

Gaussmetre (Hall Effect) ile Manyetik Alan Ölçümü

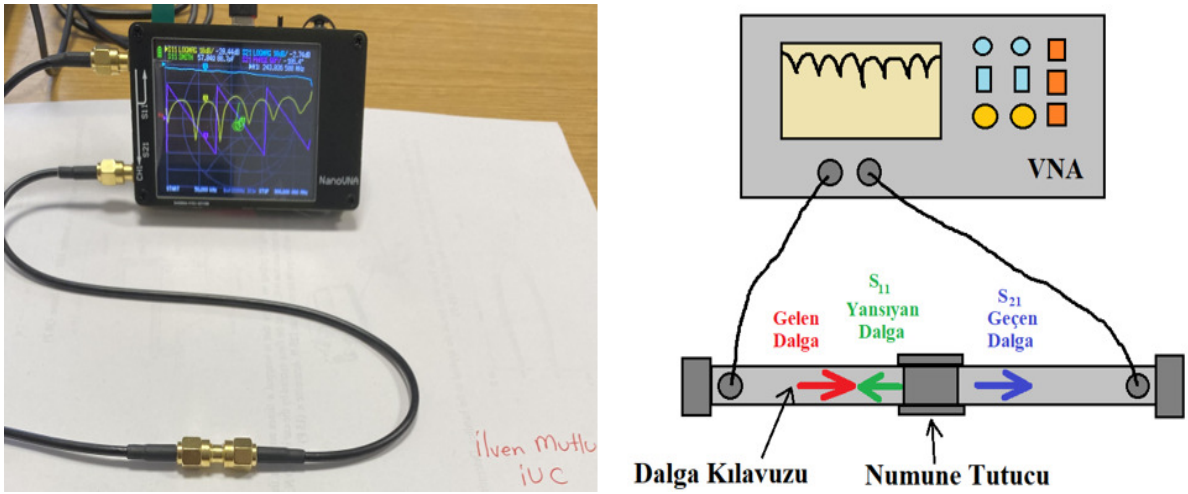
Numunelerin manyetik özellikleri gaussmetre ile araştırılmıştır. Gaussmetre (Gauss Magnetometre) küçük manyetik alanların yönlerini ve yoğunluklarını ölçmeye yarayan cihazdır. Daha büyük manyetik alanlar için teslametre kullanılmaktadır. Gausmetre "*Hall Etkisine*" göre çalışmaktadır. Aşağıdaki şekilde gaussmetre cihazının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.13: Gaussmetre cihazı

Numunelerin Absorbsiyon Özellikleri

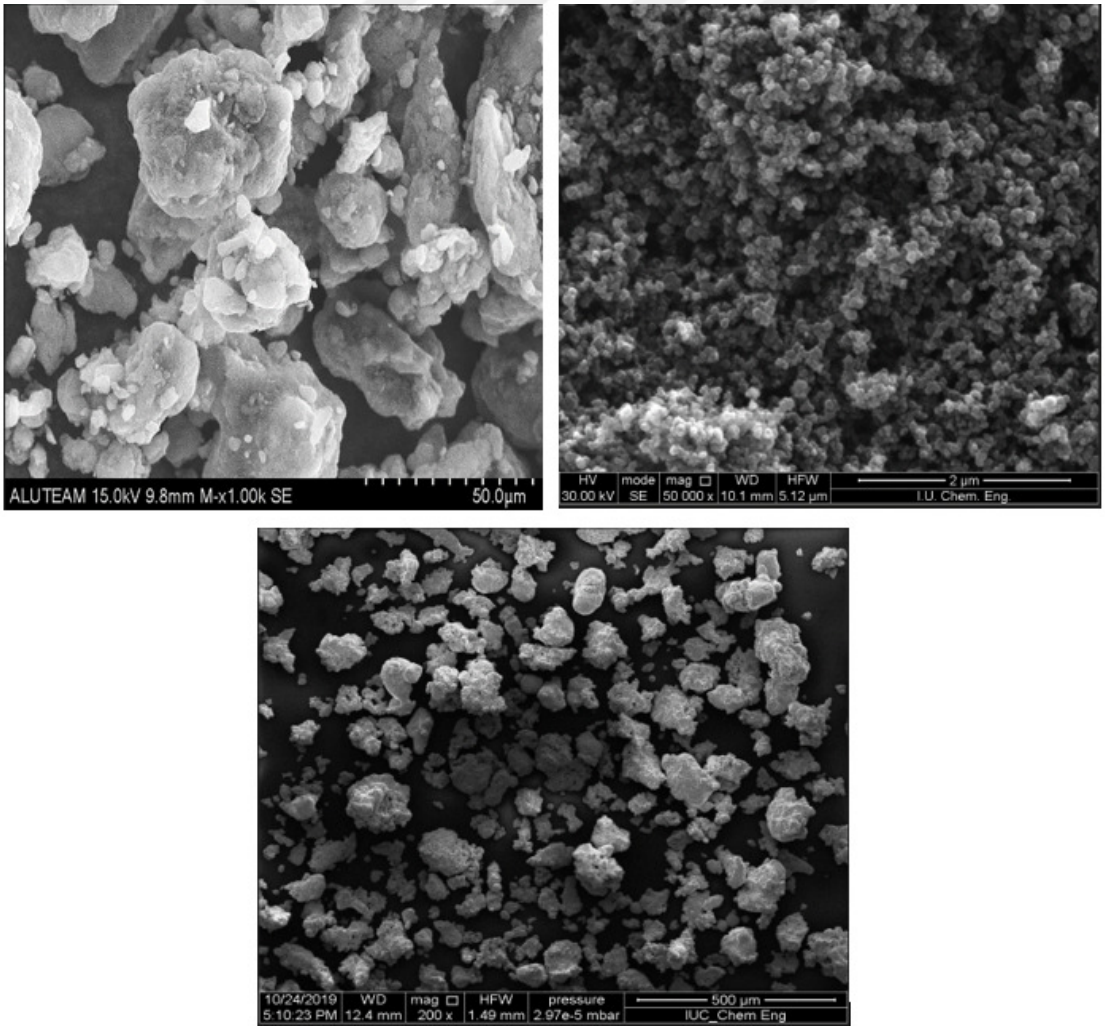
Numunelerin radar absorbsiyon özellikleri vektör ağ analizörü (vector network analyser, VNA) cihazı ile incelenmiştir (Nano VNA-F, China). Aşağıdaki şekilde kullanılan vektör ağ analizörü (VNA) cihazının şematik yapısı görülmektedir.



Şekil 3.14: Vektör ağ analizörü

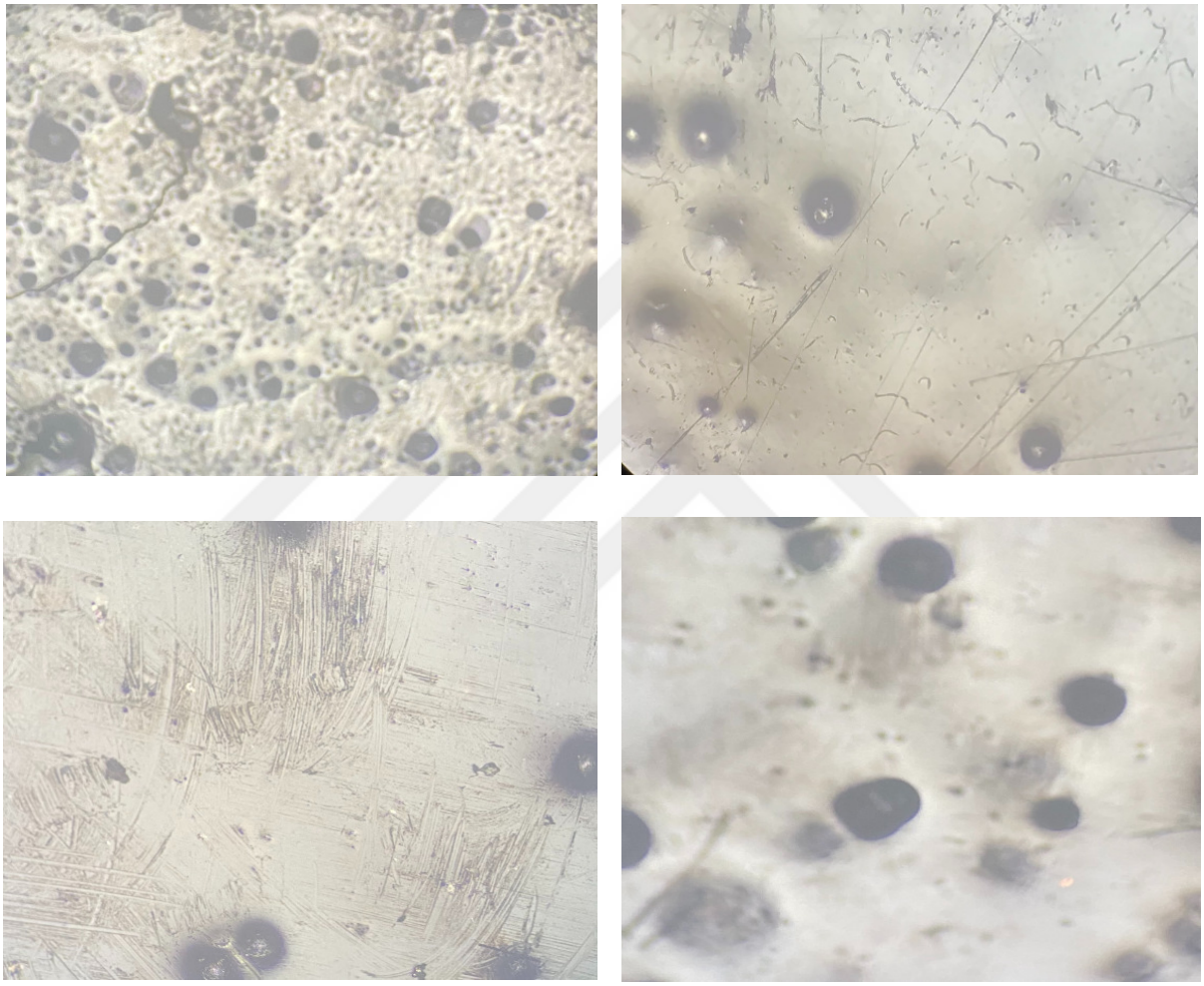
4. BULGULAR

Genel olarak metaller yüksek iletkenlik göstermekle beraber yüksek yansıtma özelliği de göstermektedirler. Elektromanyetik dalganın penetrasyon derinliği çok düşüktür. Düşük dielektrik kayıp yaşanılan malzemelerde elektromanyetik dalganın penetrasyonu yüksek olup absorbsiyon yüksek seviyededir. Aşağıdaki şekilde polimer matrisli kompozit malzemelere ilave edilen katkı (takviye) malzemelerinin SEM fotoğrafları görülmektedir a) karbon nanotüp, b) karbon siyahı ve c) Fe tozları. Görüldüğü gibi tozlar homojendir. Demir (Fe) tozları karmaşık şekillidir.



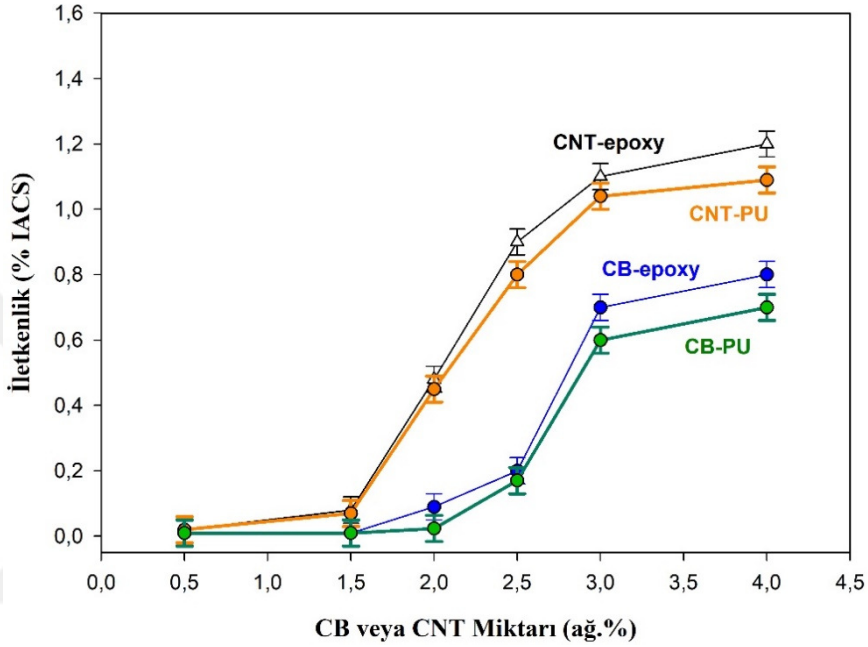
Şekil 4.1. SEM fotoğrafları a) karbon nanotüp, b) karbon siyahı ve c) Fe tozları

Aşağıdaki şekilde karbon nanotüp (CNT) ve Fe tozu katkılı kompozit numunelerin optik mikroskop fotoğraflar görülmektedir. Fotoğraflardan görüldüğü gibi, karbon nanotüp (CNT) tozlarından oluşan ince yollar (patikalar) oluşmuştur. Karbon nanotüp (CNT) tozlarından oluşan yollar (patikalar) polimer matrisli kompozit malzemeye elektriksel iletkenlik sağlamaktadır.



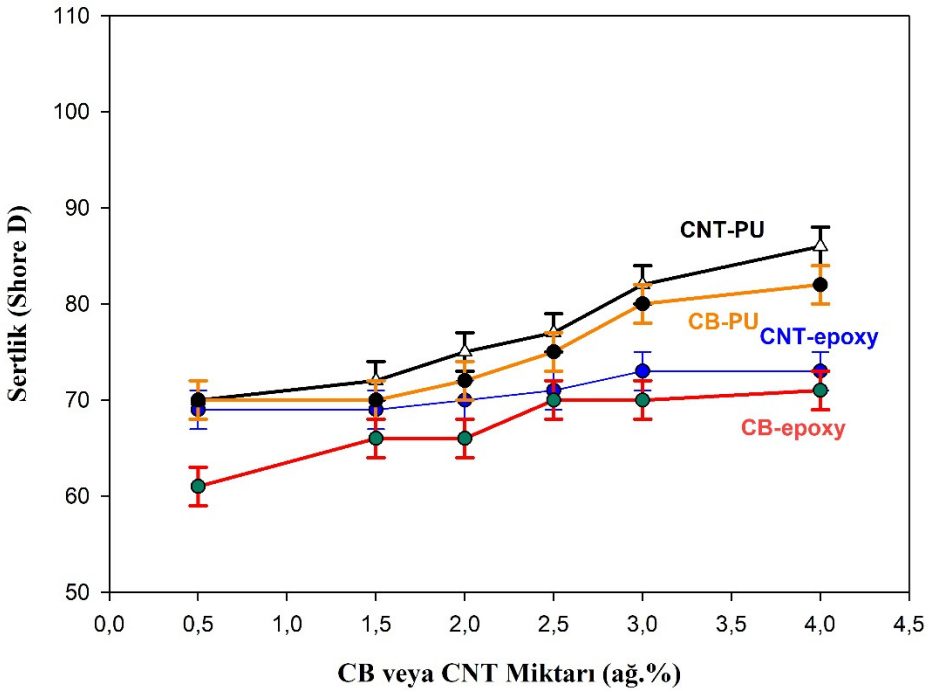
Şekil 4.2. Kompozit numunelerin optik mikroskop fotoğrafları

Aşağıdaki şekilde polimer matrise yapılan karbon nanotüp (CNT) ve karbon siyahı (CB) katkısının kompozit numunelerin elektrik iletkenliğine (% IACS) etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi epoksi esaslı kompozitlerin iletkenliği PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Karbon nanotüp (CNT) ilavesinin etkisi karbon siyahının (CB) etkisinden çok daha fazladır.



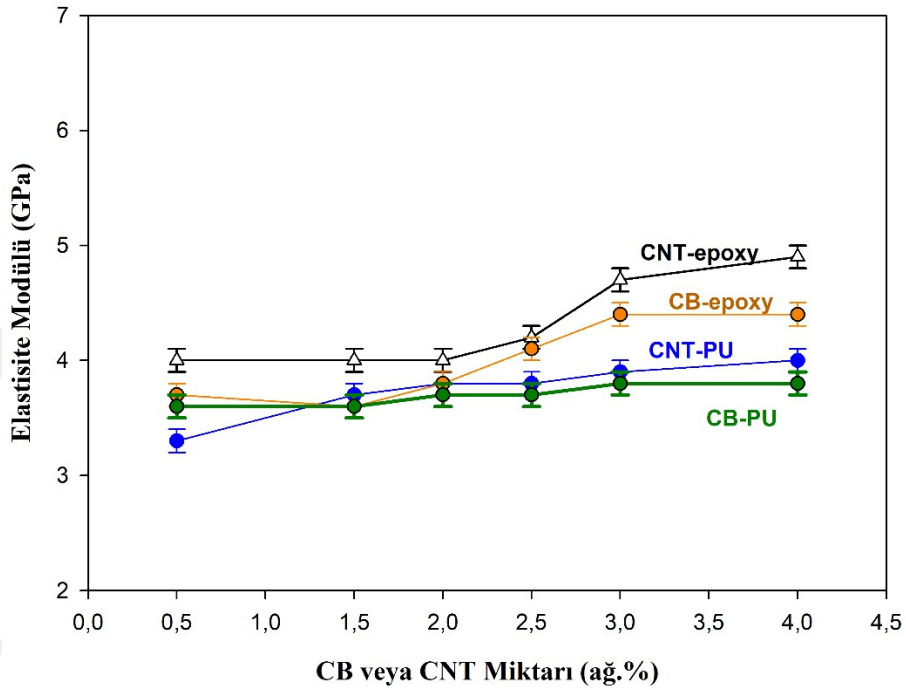
Şekil 4.3. CB ve CNT katkısının iletkenliğe etkisi

Aşağıdaki şekilde polimer matrise yapılan karbon nanotüp (CNT) ve karbon siyahı (CB) katkısının kompozit numunelerin sertlik değerlerine etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi epoksi esaslı kompozitlerin sertlik değerleri PU esaslı kompozitlere göre daha azdır. Karbon nanotüp (CNT) ilavesinin etkisi karbon siyahının (CB) etkisinden daha fazladır.



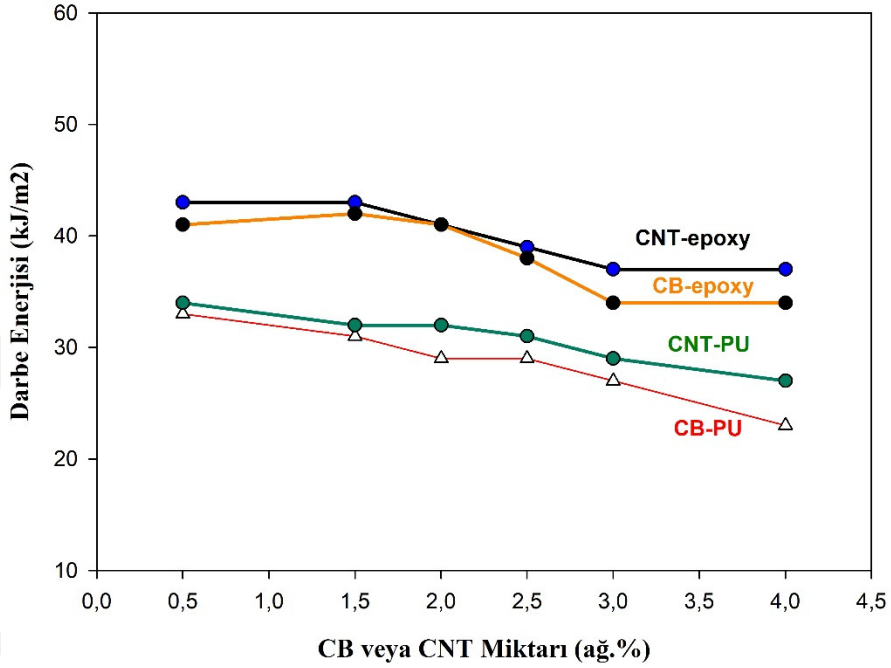
Şekil 4.4. CB ve CNT katkısının sertliğe etkisi

Aşağıdaki şekilde polimer matrise yapılan karbon nanotüp (CNT) ve karbon siyahı (CB) katkısının kompozit numunelerin elastisite modülüne etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi epoksi esaslı kompozitlerin elastisite PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Karbon nanotüp (CNT) ilavesinin etkisi karbon siyahının (CB) etkisinden daha fazladır.



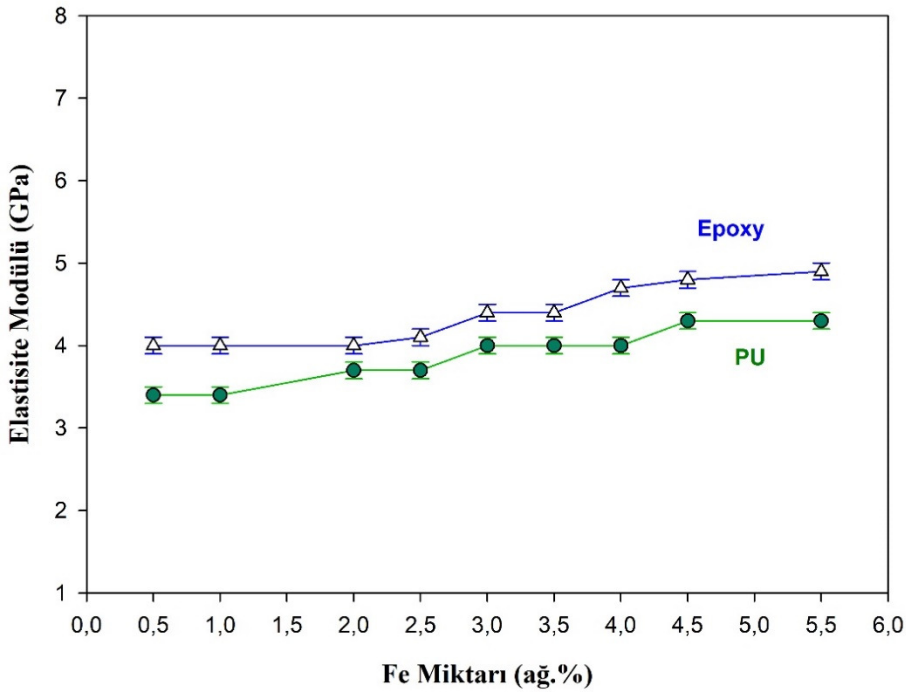
Şekil 4.5. CB ve CNT katkısının Young's modülüne etkisi

Aşağıdaki şekilde polimer matrise yapılan karbon nanotüp (CNT) ve karbon siyahı (CB) katkısının kompozit numunelerin darbe enerjisine etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi epoksi esaslı kompozitlerin darbe enerjisi PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Karbon nanotüp (CNT) ilavesinin etkisi karbon siyahının (CB) etkisinden daha fazladır.



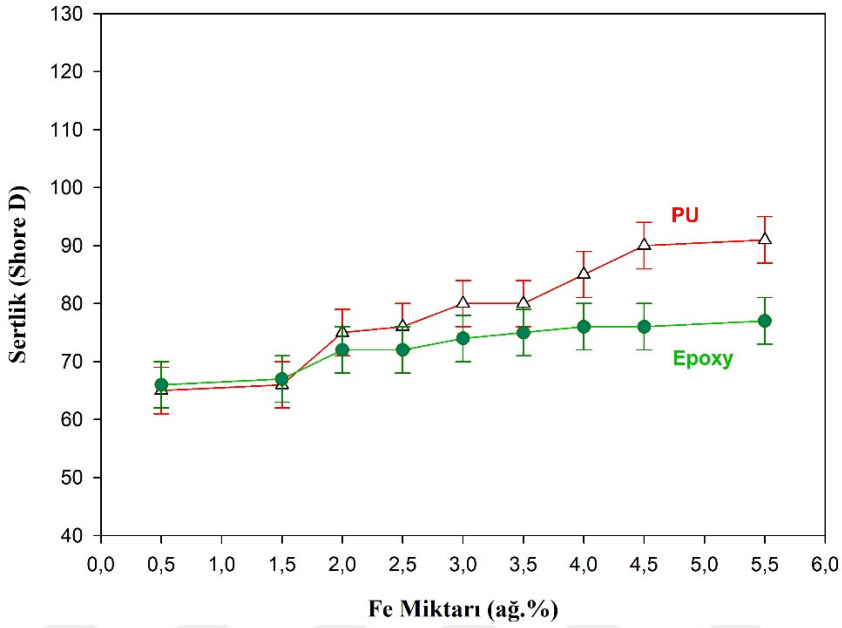
Şekil 4.6. CB ve CNT katkısının darbe enerjisine etkisi

Aşağıdaki şekilde polimer matrise yapılan Fe katkısının kompozit numunelerin Young's modülüne (elastisite modülü) etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi epoksi esaslı kompozitlerin elastisite modülü PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Fe ilavesi epoksi ve PU esaslı kompozit numunelerde elastisite modülü değerlerini artırmıştır.



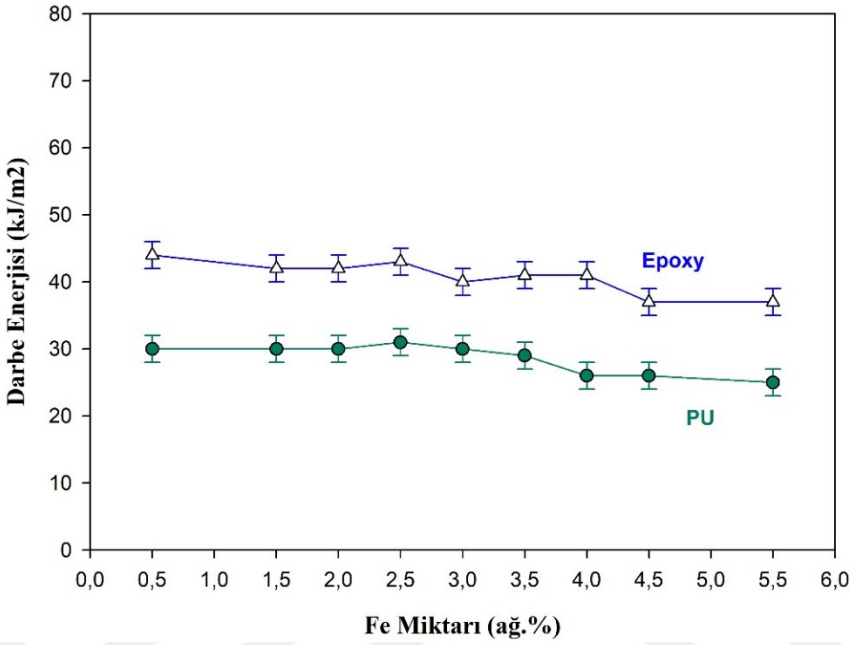
Şekil 4.7. Fe katkısının Young's modülüne etkisi

Aşağıdaki şekilde polimer matrise yapılan Fe katkısının kompozit numunelerin sertliğine etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi epoksi esaslı kompozitlerin sertliği PU esaslı kompozitlere göre daha azdır. Fe ilavesi epoksi ve PU esaslı kompozit numunelerde sertlik değerlerini arttırmıştır.



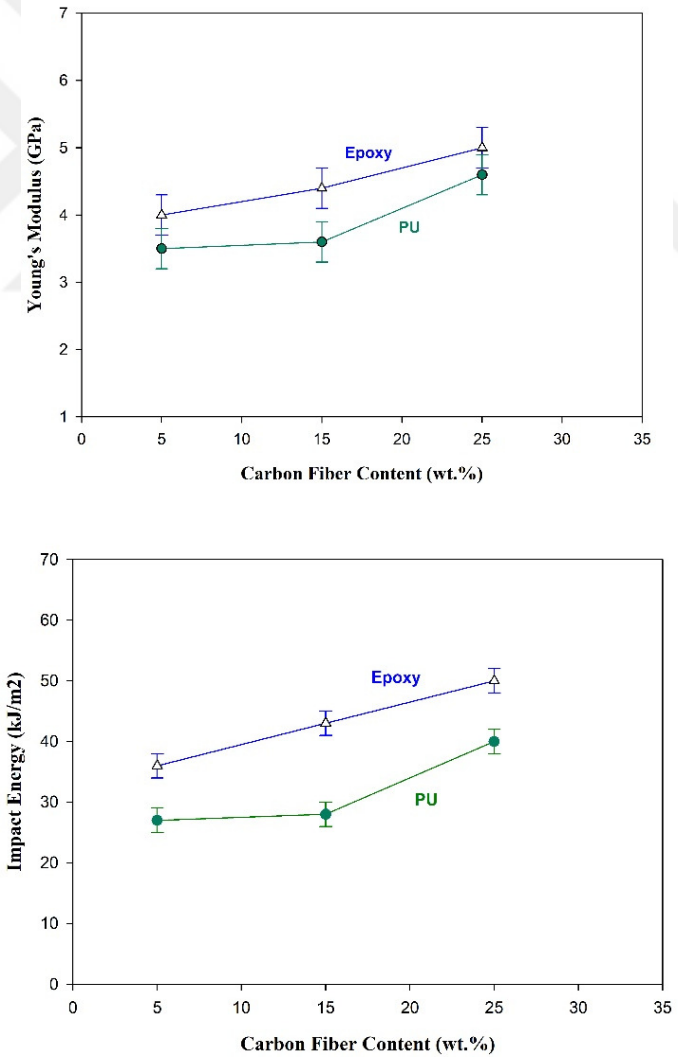
Şekil 4.8. Fe katkısının sertliğe etkisi

Aşağıdaki şekilde polimer matrise yapılan Fe katkısının kompozit numunelerin darbe enerjisine etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi epoksi esaslı kompozitlerin darbe enerjisi PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Fe ilavesi epoksi ve PU esaslı kompozit numunelerde darbe enerjisi değerlerini çok az azaltmıştır.



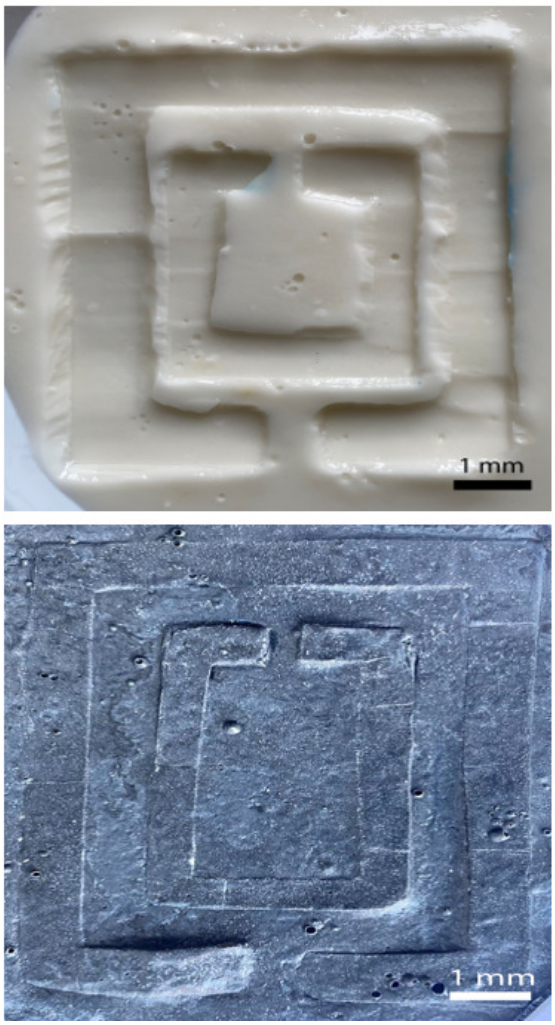
Şekil 4.9. Fe katkısının darbe enerjisine etkisi

Genellikle radar absorban malzemeler (RAM) ince film kaplama veya boya olarak savaş uçaklarının yüzeyine uygulanmaktadır. Fakat bu RAM esaslı tasarımın büyük dezavantajları da bulunmaktadır. Radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı tasarımın ise hem yüksek mukavemetinden dolayı ük taşıma hem de radar absorbsiyon özelliği bulunmakta olup, uçak yapımında yapısal parça olarak kullanılabilir. Bu amaçla radar absorban malzeme özellikli kompozitlerin içerisine karbon fiber veya cam fiber ilave edilerek radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı kompozitler üretilmiştir. Aşağıdaki şekilde polimer matrise yapılan karbon fiber katkısının kompozit numunelerin a) Young's modülüne ve b) darbe enerjisine etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi epoksi esaslı kompozitlerin Young's modülü PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Karbon fiber ilavesi epoksi ve PU esaslı kompozit numunelerde Young's modül (elastisite modülü) ve darbe enerjisi değerlerini arttırmıştır.



Şekil 4.10. Karbon fiber katkısının a) Young's modülüne ve b) darbe enerjisine etkisi

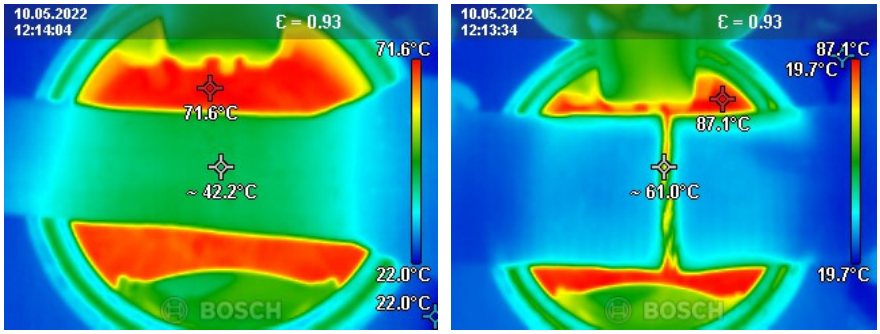
Çevrimsel halkalarda/karelerde bulunan küçük aralıklar (gap), yüksek kapasitans oluşturmakta ve rezonans frekansını düşürmektedir. Genellikle bölünmüş halka rezonatörler ince polimer üzerine bakır kaplanarak üretilmektedir. Bu çalışmada, karbon nanotüp esaslı bölünmüş halka rezonatörler polimer matrisin yüzeyine kaplanmayıp içine gömülmektedir. Böylece daha yüksek radar absorblama kapasitesi, daha düşük yoğunluk ve daha üstün mekanik özellikler elde edilmektedir. Aşağıdaki şekilde bölünmüş halka rezonatör (BHR) birim hücreli metamalzemeler a) aljinat kalıp ve b) polimer matrisli kompozit malzeme ürün görülmektrdir.



Şekil 4.11. Bölünmüş halka metamalzemeler a) alginate kalıp ve b) ürün

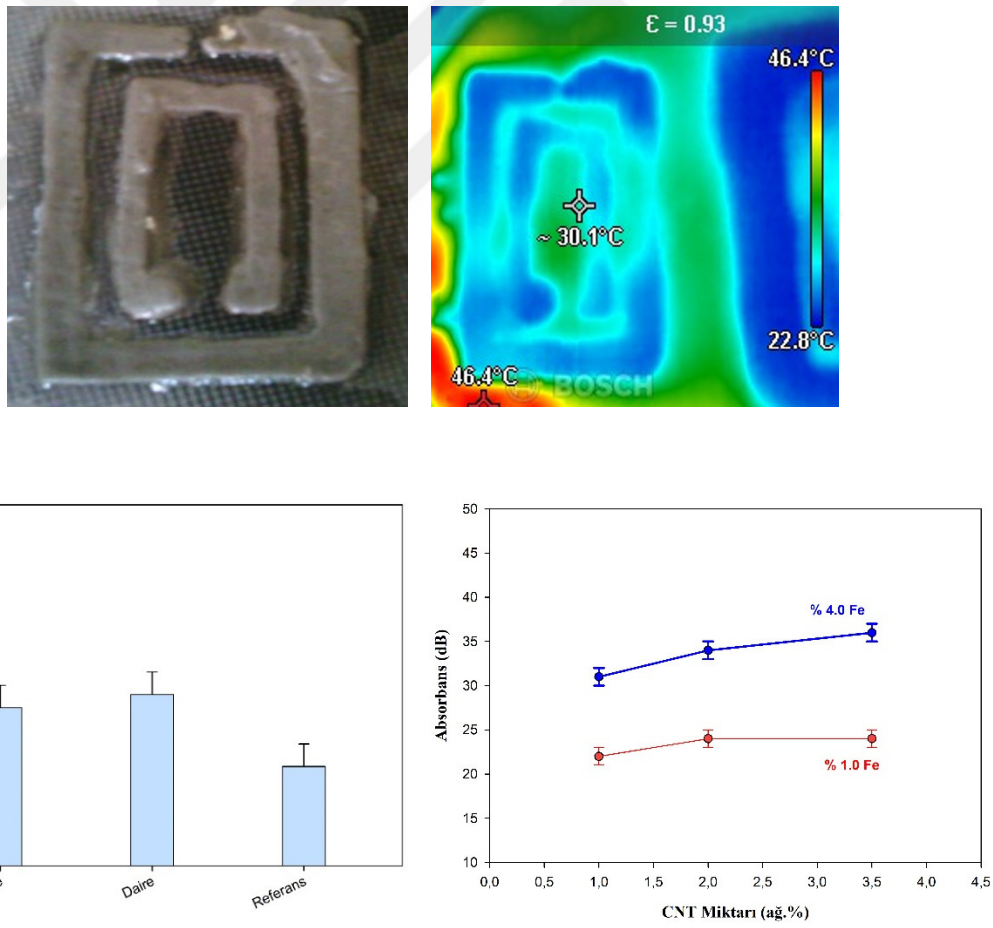
Termal Kamera Görüntüleri ve Absorbans Ölçümleri

Aşağıdaki şekilde karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit görülmektedir.



Şekil 4.12. Epoksi matrisli karbon fiber takviyeli malzemenin termal analizi

Aşağıdaki şekilde metamalzeme (bölünmüş halka) esaslı numunenin termal kamera görüntüsü ve absorbans grafiği görülmektedir.



Şekil 4.13. Metamalzemelerin absorbans ve termal analiz görüntüleri

5. TARTIŞMA

Bu tezin amacı termal ve elektriksel iletkenlik gösterebilen polimer matrisli kompozitlerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin ve termal/elektriksel iletkenlik özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılarak karakterizasyonudur. Üretilen polimer matrsisli kompozit malzemelerin radar absorban malzeme veya elektromanyetik giriş kalkan malzemesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır.

Genellikle radar absorban malzemeler (RAM) ince film kaplama veya boya olarak savaş uçaklarının yüzeyine uygulanmaktadır. Fakat bu RAM esaslı tasarımın büyük dezavantajları da bulunmaktadır. Radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı tasarımın ise hem yüksek mukavemetinden dolayı ük taşıma hem de radar absorbsiyon özelliği bulunmakta olup, uçak yapımında yapısal parça olarak kullanılabilir. Bu amaçla radar absorban malzeme özellikli kompozitlerin içerisine karbon fiber veya cam fiber ilave edilerek radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı kompozitler üretilmiştir.

Genel olarak metaller yüksek iletkenlik göstermekle beraber yüksek yansıtma özelliği de göstermektedirler. Elektromanyetik dalganın penetrasyon derinliği çok düşüktür. Düşük dielektrik kayıp yaşanılan malzemelerde elektromanyetik dalganın penetrasyonu yüksek olup absorbsiyon yüksek seviyededir.

Matris malzemesi olarak epoksi ve poliüretan (PU) kullanılmıştır. Üretim aşamasında çeşitli fiber ve parçacık katkı/takviye malzemeleri ilave edilerek polimer matrisli kompozit ürünün mekanik, termal ve elektriksel özelliklerine etkileri incelenmiştir. Üretim aşamasında, döküm yöntem ve el yatırma yöntemleri ile fiber ve parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen fiber/parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin öncelikle mikroyapısı ve temel mekanik özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin çekme-basma davranışı, elastisite modülü, enerji absorblama kapasitesi gibi temel mekanik özellikleri tahribatlı çekme-basma testi ile ve tahribatsız ultrasonik muayene ile belirlenmiştir. Üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin termal ve elektriksel özellikleri tahribatsız girdap akımları (eddy current) yöntemi ile ve termal kamera cihazı ile incelenmiştir. Mikroyapı

kusurları ve mekanik özellikler (elastisite modülü) ultrasonik hız ölçümü ile belirlenmiştir. Takviye olarak kullanılacak parçacık türü, parçacık toplam miktarı ve parçacık şeklinin (morfoloji) mekanik, elektriksel ve termal özelliklere etkisi araştırılmıştır. Üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile incelenmiştir.

Polimerler, monomer adlı küçük organik moleküllerin kovalent bağlarla birbirine bağlanak oluşturdukları dev moleküllerdir. Yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahiptirler. Polimerler seramik ve metallere göre oldukça genç sayılabilecek bir malzeme sınıfıdır. Polimerlere dev makromoleküller, polimerleri oluşturan oldukça küçük organik moleküllere ise monomer adı verilir. Monomer, polimerin sentezlendiği birim moleküle verilen isimdir. Tekrarlayan birim (mer) ve monomer birbirinden tamamen farklıdır, ancak bazen monomer veya birim monomer, doğru karşılığı olan, tekrarlayan birim yerine kullanılabilmektedir [1-3].

Hayalet teknolojisi veya düşük görünürlük teknolojisi, gemi, uçak, füze, denizaltı, uyduları radar, sonar gibi yöntemlerle tanımlanamaması/belirlenememesi için özellikle savunma sanayinde kullanılmaktadır [1-12].

Genel olarak hayalet teknolojisi (düşük görünürlük) savunma sanayiinde önemldir.

- Akustik görünmezlik (denizaltı, taşıtlar)
- Termal görünmezlik (IR, uçak burunu, asker kıyafiyetleri)
- Radar görünmezlik (RAM, askeri muharip uçaklar)

Hayalet Teknolojisinde Metotlar

- Kamuflaj taktikleri
- Hava aracının şekli
- Plazma hayalet teknolojisi
- Radar absorblayıcı malzeme (RAM)
- Aktif engelleme sistemi

Hedefin (uçak, denizlatı, gemi) radar ile tespit edilebilirliğini, hedef yüzeyinden geri yansıyan radar sinyalinin şiddeti belirlemektedir. Geri yansıyan sinyal şiddeti hedefin şekline, hedefin boyutlarına, hedef yüzey malzemesinin radar kesitine (RCS) bağlıdır [1-8].

Mikrodalgaların (radar algası) hedef yüzeyinden geri yansımasını azaltma yöntemleri

- *Hedef Şekillendirme*: radar dalgalarını farklı yönlere saçmak amacıyla hedefin geometrisini şekillendirme,
- *Radar Absorblama Malzemeleri (RAM):* Mikrodalgaların (radar dalgaları) hedef yüzeyi tarafından absorblanması
- *Absorblayıcı Yapısal Malzemeler (Active/Passive Saçma)*

Metamalzemeler, doğada bulunan malzemelerde bulunmayan mekanik, manyetik, optik veya elektriksel özelliklere sahip şekilde tasarlanan sentetik malzemelerdir. Eklemeli imalat, dijital çizimlerden (bilgisayar destekli çizim, CAD) 3-boyutlu fiziksel ürünlerin katman-katman üretilmesini sağlayan imalat yöntemidir.

Poliüretan (PU) esaslı numuneler, diizosiyanat ve polyol maddelerinin karıştırılması sonucu üretilmiştir. Takviye malzemeleri sıvı içerisine ilave edilmiş ve homojen oluncaya kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Son olarak ise elde edilen sıvı kompozit malzeme teflon kalıp içerisine dökülmüştür. Epoksi esaslı kompozitlerin üretiminde, sıvı epoksi reçine ve epoksi sertleştirici maddesi karıştırılmıştır. Viskozite artmaya başladığında takviye malzemeleri ilave edilmiş ve karıştırmaya devam edilmiştir. Son olarak sıvı teflon kalıp içerisine dökülmüştür. Model (pozitif kalıp) üretimi eklemeli imalat yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sıvı fotopolimer reçine tankın içine konulmakta, numune platform yukarıya doğru hareket ettikçe katman katman oluşmaktadır. UV ışığı ile ayna sistemi vasıtasıyla taranan sıvı fotopolimer reçinenin katılaşması sonucu parça oluşumu gerçekleşmektedir. Nihai ürünler eklemeli imalat ile üretilen modellerden yola çıkarak aljinat kalıplama (replika yöntemi) ile üretilmiştir.

Mekanik özelliklerin incelenmesi kapsamında üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin çeşitli mekanik özellikleri çekme testleriyle incelenmiştir. Mekanik özelliklerin incelenmesi kapsamında üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin sertlikleri shore sertlik cihazı ile ölçülmüştür (Devotrans, Türkiye). Kompozit numunelere darbe testi ASTM D1709 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Ağırlık düşürmeli darbe testi, numunenin üzerine belirli yükseklikten

ağırlık düşürülerek numunenin absorbe ettiği enerjinin ölçülmesi için kullanılan bir yöntemdir. Numunelerin termal görüntülenebilirliği termal kamera ile incelenmiştir. Kullanılan termal görüntüleme cihazı -10 ile 400 ºC sıcaklıkları arasında ölçüm yapabilmektedir. Termal kamera cihazında mikrobolometre tipi kızılötesi (IR) sensör bulunmaktadır. Üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin elektirksel iletkenlikleri % IACS (uluslararası tavlanmış bakır standardı) cinsinden girdap akımları (eddy current) cihazı ile ile ölçülmüştür. Öncelikle kalibrasyon bloğu yardımı ile cihaz kalibre edilmiş ve ardından iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin manyetik özellikleri gaussmetre ile araştırılmıştır. Gaussmetre küçük manyetik alanların yönlerini ve yoğunluklarını ölçmeye yarayan cihazdır.

Polimer matrise yapılan karbon nanotüp (CNT) ve karbon siyahı (CB) katkısının kompozit numunelerin elektrik iletkenliğine (% IACS) etkisi belirlenmiştir. Epoksi esaslı kompozitlerin iletkenliği PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Karbon nanotüp (CNT) ilavesinin etkisi karbon siyahının (CB) etkisinden çok daha fazladır.

Ayrıca, polimer matrise yapılan karbon nanotüp (CNT) ve karbon siyahı (CB) katkısının kompozit numunelerin sertlik değerlerine etkisi sertlik cihazı ile ölçülmüştür. Epoksi esaslı kompozitlerin sertlik değerleri PU esaslı kompozitlere göre daha azdır. Karbon nanotüp (CNT) ilavesinin etkisi karbon siyahının (CB) etkisinden daha fazladır.

Polimer matrise yapılan karbon nanotüp (CNT) ve karbon siyahı (CB) katkısının kompozit numunelerin elastisite modülüne etkisi çekme testi ile belirlenmiştir. Epoksi esaslı kompozitlerin elastisite PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Karbon nanotüp (CNT) ilavesinin etkisi karbon siyahının (CB) etkisinden daha fazladır.

Polimer matrise yapılan karbon nanotüp (CNT) ve karbon siyahı (CB) katkısının kompozit numunelerin darbe enerjisine etkisi darbe testi ile incelenmiştir. Epoksi esaslı kompozitlerin darbe enerjisi PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Karbon nanotüp (CNT) ilavesinin etkisi karbon siyahının (CB) etkisinden daha fazladır.

Polimer matrise yapılan Fe katkısının kompozit numunelerin Young's modülüne (elastisite modülü) etkisi çekme testi ile incelenmiştir. Epoksi esaslı kompozitlerin elastisite modülü PU

esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Fe ilavesi epoksi ve PU esaslı kompozit numunelerde elastisite modülü değerlerini artırmıştır.

Polimer matris içerisine yapılan Fe katkısının kompozit numunelerin sertliğine etkisi shore sertlik cihazı ile ölçülmüştür. Epoksi esaslı kompozitlerin sertliği PU esaslı kompozitlere göre daha azdır. Fe ilavesi epoksi ve PU esaslı kompozit numunelerde sertlik değerlerini arttırmıştır.

Polimer matrise yapılan Fe katkısının kompozit numunelerin darbe enerjisine etkisi darbe testi ile incelenmiştir. Epoksi esaslı kompozitlerin darbe enerjisi PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Fe ilavesi epoksi ve PU esaslı kompozit numunelerde darbe enerjisi değerlerini çok az azaltmıştır.

Polimer matrise yapılan karbon fiber katkısının kompozit numunelerin a) Young's modülüne ve b) darbe enerjisine etkisi belirlenmiştir. Epoksi esaslı kompozitlerin Young's modülü PU esaslı kompozitlere göre daha fazladır. Karbon fiber ilavesi epoksi ve PU esaslı kompozit numunelerde Young's modül (elastisite modülü) ve darbe enerjisi değerlerini arttırmıştır.

Çevrimsel halkalarda/karelerde bulunan küçük aralıklar (gap), yüksek kapasitans oluşturmakta ve rezonans frekansını düşürmektedir. Genellikle bölünmüş halka rezonatörler ince polimer üzerine bakır kaplanarak üretilmektedir. Bu çalışmada, karbon nanotüp esaslı bölünmüş halka rezonatörler polimer matrisin yüzeyine kaplanmayıp içine gömülmektedir. Böylece daha yüksek radar absorblama kapasitesi, daha düşük yoğunluk ve daha üstün mekanik özellikler elde edilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezin amacı termal ve elektriksel iletkenlik gösterebilen polimer matrisli kompozitlerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin ve termal/elektriksel iletkenlik özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılarak karakterizasyonudur. Üretilen polimer matrsisli kompozit malzemelerin radar absorban malzeme veya elektromanyetik giriş kalkan malzemesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır.

Genellikle radar absorban malzemeler (RAM) ince film kaplama veya boya olarak savaş uçaklarının yüzeyine uygulanmaktadır. Fakat bu RAM esaslı tasarımın büyük dezavantajları da bulunmaktadır. Radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı tasarımın ise hem yüksek mukavemetinden dolayı ük taşıma hem de radar absorbsiyon özelliği bulunmakta olup, uçak yapımında yapısal parça olarak kullanılabilir. Bu amaçla radar absorban malzeme özellikli kompozitlerin içerisine karbon fiber veya cam fiber ilave edilerek radar absorban yapısal parça (RAS) esaslı kompozitler üretilmiştir.

Genel olarak metaller yüksek iletkenlik göstermekle beraber yüksek yansıtma özelliği de göstermektedirler. Elektromanyetik dalganın penetrasyon derinliği çok düşüktür. Düşük dielektrik kayıp yaşanılan malzemelerde elektromanyetik dalganın penetrasyonu yüksek olup absorbsiyon yüksek seviyededir.

Matris malzemesi olarak epoksi ve poliüretan (PU) kullanılmıştır. Üretim aşamasında çeşitli fiber ve parçacık katkı/takviye malzemeleri ilave edilerek polimer matrisli kompozit ürünün mekanik, termal ve elektriksel özelliklerine etkileri incelenmiştir. Üretim aşamasında, döküm yöntem ve el yatırma yöntemleri ile fiber ve parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen fiber/parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin öncelikle mikroyapısı ve temel mekanik özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin çekme-basma davranışı, elastisite modülü, enerji absorblama kapasitesi gibi temel mekanik özellikleri tahribatlı çekme-basma testi ile ve tahribatsız ultrasonik muayene ile belirlenmiştir. Üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin termal ve elektriksel özellikleri tahribatsız girdap akımları (eddy current) yöntemi ile ve termal kamera cihazı ile incelenmiştir. Mikroyapı

kusurları ve mekanik özellikler (elastisite modülü) ultrasonik hız ölçümü ile belirlenmiştir. Takviye olarak kullanılacak parçacık türü, parçacık toplam miktarı ve parçacık şeklinin (morfoloji) mekanik, elektriksel ve termal özelliklere etkisi araştırılmıştır. Üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop ile incelenmiştir.

Metamalzemeler, doğada bulunan malzemelerde bulunmayan mekanik, manyetik, optik veya elektriksel özelliklere sahip şekilde tasarlanan sentetik malzemelerdir. Eklemeli imalat, dijital çizimlerden (bilgisayar destekli çizim, CAD) 3-boyutlu fiziksel ürünlerin katman-katman üretilmesini sağlayan imalat yöntemidir.

Polimerler, monomer adlı küçük organik moleküllerin kovalent bağlarla birbirine bağlanak oluşturdukları dev moleküllerdir. Yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahiptirler. Polimerler seramik ve metallere göre oldukça genç sayılabilecek bir malzeme sınıfıdır. Polimerlere dev makromoleküller, polimerleri oluşturan oldukça küçük organik moleküllere ise monomer adı verilir. Monomer, polimerin sentezlendiği birim moleküle verilen isimdir. Tekrarlayan birim (mer) ve monomer birbirinden tamamen farklıdır, ancak bazen monomer veya birim monomer, doğru karşılığı olan, tekrarlayan birim yerine kullanılabilmektedir [1-3].

Hayalet teknolojisi veya düşük görünürlük teknolojisi, gemi, uçak, füze, denizaltı, uyduları radar, sonar gibi yöntemlerle tanımlanamaması/belirlenememesi için özellikle savunma sanayinde kullanılmaktadır [1-12].

Genel olarak hayalet teknolojisi (düşük görünürlük) savunma sanayiinde önemldir.

- Akustik görünmezlik (denizaltı, taşıtlar)
- Termal görünmezlik (IR, uçak burunu, asker kamuflajları/kıyafetleri)
- Radar görünmezlik (RAM, askeri muharip uçaklar)

Hayalet Teknolojisinde Metotlar

- Kamuflaj taktikleri
- Hava aracının şekli
- Plazma hayalet teknolojisi
- Radar absorblayıcı malzeme (RAM)
- Aktif engelleme sistemi

Hedefin (uçak, denizlatı, gemi) radar ile tespit edilebilirliğini, hedef yüzeyinden geri yansıyan radar sinyalinin şiddeti belirlemektedir. Geri yansıyan sinyal şiddeti hedefin şekline, hedefin boyutlarına, hedef yüzey malzemesinin radar kesitine (RCS) bağlıdır [1-8].

Mikrodalgaların (radar algası) hedef yüzeyinden geri yansımasını azaltma yöntemleri

- *Hedef Şekillendirme*: radar dalgalarını farklı yönlere saçmak amacıyla hedefin geometrisini şekillendirme,
- *Radar Absorblama Malzemeleri (RAM):* Mikrodalgaların (radar dalgaları) hedef yüzeyi tarafından absorblanması
- *Absorblayıcı Yapısal Malzemeler (Active/Passive Saçma)*

Gelecekte yapılacak çalışmalara öneriler;

- Üretilen radar absorban malzemelerde daha geniş bir frekans aralığında (1-18 GHz) absorbans ölçümü gerçekleştirilmelidir.
- Polimer matrise ilave edilen katkı maddelerinin etkileri daha geniş bir katkı miktarı aralığı için incelenmelidir.
- Polimer matrise daha farklı katkı maddeleri ilave edilerek etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmelidir.
- Polimer matris içerisine kevlar fiber ilave edilip etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmelidir.
- Farklı geometrilere sahip metamalzemeler üretilerek etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmelidir.
- Farklı boyutlara sahip metamalzemeler üretilerek etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmelidir.

KAYNAKLAR

[1] Sangal S. 2013, Development of Radar Absorbing Composite Structures, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Institute of Technology, Materials Science and Engineering.

[2] Green M, Chen X. 2019, Recent Progress in Nanomaterials for Microwave Absorbtion, Journal of Materiomics, 5, 503-541

[3] Wang B. Wu Q. Fu Y. Liu T. 2021, A Review on Carbon/Magnetic Metal Composites for Microwave Absorption. Journal of Materials Science & Technology 86, 91-109

[4] Gökçe S.. 2017, Magneto-Polymeric Microwave Composites and Theri Application in Anechoic Chamber Paint, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği.

[5] Engin Sağırlı F.Z.. 2017, Development of Multi-layer Conductive Polymer Nanocomposites for Electromagnetic Shielding Applications, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Materials Science and Engineering.

[6] Jayalakshmi C.G., Inamdar A., Anand A., Kandasubramanian B. 2019, J. of App Polymer Science. 47241 (1-21)

[7] Ertuş E.B. 2014, Production, Characterization and Industrial Applications of Radar Absorbing Materials, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Metalluegical and Materials Science Engineering.

[8] Dhawan S.K. Singh A.P. Ohlan A. Kakran K.S. Sambyal P.. 2022, Smart materials design for electromagnetic interference shielding applications. Bentham Books. Singapore, ISBN 978-981-5036-42-8

[9] Kaw A.K., 2006, Mechanics of Composite Materials, 2nd Edition, Taylor-Francis, CRC Press, USA.

[10] Chawla K.K., 2013, Composite Materials, Science and Technology, 3rd Edition, Springer, USA

[11]. Yıldızhan, H, Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 2010, Suleyman Demirel University, PhD Thesis.

[12] Jang D. Murugados V. Wang Y. Lin J. Ding T. Wang Z. Shao Q. Wang C. Liu H. Lu N. Wei R. Subramania A. Guo Z. 2019, Polymer Reviews, 59, 2, 280-337.

[13] Ahmah H. Tariq A. Shehzad A. Faheem M.S. Shafqi M. Rashidi I.A. Afzal A. Munir A. Riaz M.T. Haider H.T. Afzal A. Qadir M.B. Khaliq Z. 2019. Stealth Technology: Methods and Composite Materials-A Review. Polymer Composites. 40, 4457-4472.

[14] Kolanowska A. Janas D. Herman Boncel S. A.P. Jedrysiak R.G. Gizewski T. 2018, Carbon, 126, 31-52.

[15] Zikidis K. Skondras A. Tokas C. 2014, Journal of Computations and Modelling, 1, 1, 129-165.

[16] Alemour B. Badran O. Hassan M.R. 2019, Journal of Aerospes Techn Manag, 11, 1919.

[17] Demir C. 2016, Mühendislik Plastikleri ve Uygulamaları. İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Lisans Tezi.

[18] Onursal M. 2010, Uçaklarda Kullanılan Metal Malzemelere Uygulanan Tahribatsız Muayeneler. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı, Yüksek Lisans Tezi.

[19] Korkmaz Ö.E.. 2010, Uçaklarda Kullanılan Alüminyum Malzemelerdeki Korozyonun İncelenmesi, Önlenmesi ve Tahribatsız Muayene ile Tespiti. Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı, Yüksek Lisans Tezi.

[20]. Wanng R.M, Zheng S.R., Zheng Y., 2011, *Polymer Matrix Composites and Technology*, Woodhead Publishing, Beijing, China.

[21]. Chawla K.K., 2013, *Composite Materials*, Science *and Technology, Third Edition,* Springer, USA

[22]. Kaw A.K., 2006, *Mechanics of Composite Materials, Second Edition,* Taylor&Francis, USA.

[23]. Yıldızhan, H., 2010, *Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

[24] Dincer, F., 2015. Metamalzemeler, bakışımsız ortam ve mikrodalga uygulamaları, Doktora tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, 171 s , Hatay.

[25] Caloz C., Itoh T. 2006. Electromagnetic metamaterials: Transmission line theory and microwave applications. Wiley-Interscience, USA. ISBN-10: 0-471-66985-7.

[26] Engheta, N. and Ziolkowski, R.W., 2006. Metamaterials - Physics and Engineering Explorations. IEEE-Wiley Press, Piscataway, NJ.

[27] Karaaslan, M., 2009. Negatif kırılma indisli metamalzemelerin elde edilmesi, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, 128 s , Adana.

[28] Sabah, C. and Uckun, S., 2007. Electromagnetic wave propagation through the frequency-dispersive and lossy double-negative slab. Opto-Electronics Review. 15: 133-43.

[29] Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C. and Schultz S., (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Physical Review Letters, 84(18): 4184-4187.

[30] Sakoda K. Electromagnetic metamaterials, Modern insight into macroscopic electromagnetic field, Springer Series in Materials Science. Japan, ISSN 2196-2812

[31] Hazal Ovat Can, 2017. "Akıllı malzemelerin mekanik özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü (Danışman: Yrd.Doç. Dr. Sukhwinder Kaur Bhullar)

[32] Ren X., Das R., Tran P., Ngo T.G., Xie Y.M., 2018, Smart Mater. Struct. 27, 114-173.

[33] https://materialdistrict.com/article/metamaterials-new-world/

[34] Abdelkebir S., Mayouf A., Mayouf F., Zoubiri B., Devers T., "Study of metamaterial surface wave antenna based on split ring resonator" Microsystems Technologies Vol 25, 797–810 (2019)

[35] Elham A. Serria and Mousa I. Hussein. Implications of Metamaterial on Ultra-Wide Band Microstrip Antenna Performance. Crystals 2020, 10, 677; doi:10.3390/cryst10080677

[36] Shashi G.M., Laskar A.R.,Biswas H.,Saha A.K., 2017, Proceedings of 14th Global Engineering and Technology Conference.

[37] Wong K.V., Hernandez A., 2021, International Scholarly Research Network, 1-10.

[38] Burçin Özbay. 2017, Manufacturing and Characterization of Polymer Composites by Using Selective Lsser Sintering 3D Printing Method, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Polymer Science Technology.

[39] Unkovskiy A., Spintzyk, S., Axmann, D., Engel, E.M., Weber, H. and Huettig, F. (2019), "Additive manufacturing: a comparative analysis of dimensional accuracy and skin texture reproduction of auricular prostheses replicas", J. of Prosthodontics, Vol. 28No. 2, e460-e468

[40] Zadpoor, A.A, Design for additive biomanufacturing: from patient-specific medical devices to rationally designed meta-biomaterials, Int. J. of Molecular Sci., 18/8, (2017) 1607.

[41] Jindal, S.K., Sherriff, M., Waters, M.G. and Coward, T.J, Development of a 3D printable maxillofacial silicone: part II. Optimisation of moderator and thixotropic agent, The J. of Prosthetic Dent., Vol. 116/4 (2016) 617-623.

EKLER

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Mohammed BEKDASH Yüksek Lisans Tezi

ORİJİNALLİK RAPORU

%11	%8	%1	%6
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%5
2	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%2
3	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	%1
4	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	%1
5	www.coursehero.com İnternet Kaynağı	<%1
6	Submitted to Bursa Teknik Ãniversitesi Öğrenci Ödevi	<%1
7	acikerisim.aku.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
8	"Composite Materials", Springer Science and Business Media LLC, 2017 Yayın	<%1
9	acikerisim.omu.edu.tr	