



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ
KARAKTERİZASYONU**

Seher Selen AYDIN

**DANIŞMAN
Doç. Dr. İlven MUTLU**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2020

Bu çalışma, [6.08.2020] tarihinde aşağıdaki jüri tarafından [Metalurji ve Malzeme Mühendisliğı Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliğı Programında [Yüksek Lisans tezi] olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

[Doç. Dr. İlven MUTLU (Danışman)
[İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi]

[Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÖZDEMİR
[İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi]

[Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan DEMİR
[Bilecik Şeyh Edebali Üniversite
Mühendislik Fakülte]



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

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 34115 numaralı projesi ile desteklenmiştir. |

ÖNSÖZ

[Hayatım boyunca attığım her adımda yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

|

Ağustos 2020

[Seher Selen AYDIN]



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	2
2.1. POLİMER MALZEMELER.....	2
2.2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.3. AKILLI POLİMERLER.....	7
2.4. KENDİ-KENDİNİ ONARAN MALZEMELER.....	8
2.5. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ.....	10
2.6. LİTERATÜR ÖZETİ.....	12
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	14
3.1. POLİMER MATRSİLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	14
3.1.1. Polietilen (PE) esaslı kompozitler.....	15
3.1.2. Epoksi esaslı kompozitler.....	17
3.1.3. Polimetilmetakrilat (PMMMA) esaslı kompozitler.....	18
3.1.4. Poliüretan (PU) esaslı kompozitler.....	21
3.1.5. Polietereterketon (PEEK) esaslı kompozitler.....	22
3.2. KENDİ-KENDİNİ ONARAN MALZEMELER.....	24
3.3. KARAKTERİZASYON.....	31
3.3.1. Mikroyapı.....	31
3.3.2. Mekanik Özellikler.....	32
4. BULGULAR.....	38
4.1. POLİMER MATRSİLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	38
4.1.1. Mikroyapı.....	38
4.1.2. Mekanik Özellikler.....	51

4.2. KENDİ-KENDİNİ ONARAN MALZEMELER.....	.59
5. TARTIŞMA VE SONUÇ62
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ	68



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Fiber türleri.....	6
Şekil 2.2: Mikrokapsülasyon ile onarım mekanizması.....	9
Şekil 2.3: a) Darbe-yankı yöntem blok diyagramı, b) A-tarama.....	11
Şekil 3.1: Plastik enjeksiyon cihazının şematik resmi.....	15
Şekil 3.2: Enjeksiyon yöntemi, a) PE, toz, kaplı PE, b) karışım, c) numune ve yolluk.....	16
Şekil 3.3: a) Mekanizma, b) karbon, c) Cu, d) Fe takviyeli epoksi numuneler.....	17
Şekil 3.4: a) BPO'dan radikal oluşumu, b) PMMA'nın polimerizasyonu, c) Hidrokinon.....	19
Şekil 3.5: a) karbon fiber, b) Sn tozu, c) cam fiber, d) kevlar fiber takviyeli PMMA.....	20
Şekil 3.6: PU kompozitler a) mekanizma, b) numuneler.....	21
Şekil 3.7: Presleme-sinterleme yöntemi ile kompozit üretimi.....	22
Şekil 3.8: PEEK numunelerin sülfonasyon yüzey işlemi.....	23
Şekil 3.9: PU-polyester reçine esaslı kendi-kendini onaran numuneler.....	24
Şekil 3.10: PU-epoksi esaslı kendi-kendini iyileştiren numuneler.....	25
Şekil 3.11: PU-polyester reçine esaslı kendi-kendini iyileştiren numunelerin üretimi.....	26
Şekil 3.12: PU-MMA/PMMA esaslı kendi-kendini iyileştiren numuneler.....	27
Şekil 3.13: PU-PMMA/MMA esaslı kendi-kendini iyileştiren numunelerin üretimi.....	28
Şekil 3.14: PU-PEG esaslı kendi-kendini iyileştiren numuneler.....	29
Şekil 3.15: PU-silikon esaslı kendi-kendini iyileştiren numuneler.....	30

Şekil 3.16: Çekme-basma cihazı, çekme çeneleri ve çekme numunesi kalıbı.....	32
Şekil 3.17: Ultrasonik test cihazı.....	33
Şekil 3.18: Termal kamera.....	34
Şekil 3.19: Gerinim ölçerler (strain gauges).....	35
Şekil 3.20: Vector Network Analyzer (VNA) cihazı.....	37
Şekil 4.1: a) PMMA tozu, b) PMMA-Ti kompozit.....	38
Şekil 4.2: a) Cam-fiber, b) fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit.....	39
Şekil 4.3: Karbon-fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit.....	40
Şekil 4.4: Aramid-fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit.....	41
Şekil 4.5: a) Enjeksiyonla üretilmiş numune ve b) Sn tozu takviyeli PE matrisli kompozit.....	42
Şekil 4.6: a) PEEK numuneler, b) PEEK tozu, ve c) PEEK-Fe kompozit.....	43
Şekil 4.7: PU-Fe tozu kompozit numunenin SEM fotoğrafı.....	44
Şekil 4.8: PEG-Ti numunenin SEM fotoğrafı.....	44
Şekil 4.9: Kompozitlerin DTA/TG analiz sonuçları a) epoksi-Ni, b) PU-Ni, c) PEEK.....	45
Şekil 4.10: Matrislerin etil alkol ile ıslatılabilirlikleri a) PE, b) PMMA, c) PEEK.....	46
Şekil 4.11: PE numunenin FTIR grafiği.....	47
Şekil 4.12: PMMA numunenin FTIR grafiği.....	47
Şekil 4.13: PU numunenin FTIR grafiği.....	48
Şekil 4.14: Epoksi numunenin FTIR grafiği.....	48
Şekil 4.15: Yüzey işlem görmüş PEEK numunelerin a) FTIR grafikleri ve b) fotoğrafları.....	49
Şekil 4.16: Epoksi ve PU numunelerin UV absorbans grafikleri.....	50

Şekil 4.17: PU Kompozitin basma eğrisi.....	51
Şekil 4.18: PE Kompozitin basma eğrisi.....	51
Şekil 4.19: PMMA Kompozitin basma eğrisi.....	51
Şekil 4.20: PU kompozit numunelerin termal görüntüleme cihazı sonuçları.....	53
Şekil 4.21: Kendi-kendini onaran numunelerin termal görüntüleme cihazı sonuçları.....	54
Şekil 4.22: Fiber takviyeli PMMA numunelerin termal görüntüleme cihazı sonuçları.....	55
Şekil 4.23: Numunelerin a) radyografi fotoğrafı, c) tomografi fotoğrafı.....	56
Şekil 4.24: Gerinim ölçer sonuçları.....	57
Şekil 4.25: Vector Network Analyser (VNA) ölçüm sonuçlar	58
Şekil 4.26: Kendi-kendini onaran numunede ultrasonik cihaz ekran görüntüsü	59

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 4.1: Ultrasonik yöntem ile belirlenen elastisite modülleri.....	52
Tablo 4.2: Polimerlerin kimyasal bileşimi.....	61
Tablo 4.3: Polimerlerin ultrasonik zayıflama katsayıları.....	61



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
E	: Elastisite modülü
ρ	: Yoğunluk
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
°	: Derece

Kısaltmalar	Açıklama
PE	: Polietilen
PEEK	: Polietereterketon
PEG	: Polietilenglikol
PMMA	: Polimetilmetakrilat
PU	: Poliüretan
PMMA	: Polimetilmetakrilat

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ KARAKTERİZASYONU

Seher Selen AYDIN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. İlven MUTLU

Bu tez çalışmasında, polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle plastik enjeksiyon kalıplama yöntemiyle polimer matrisli parçacık takviyeli kompozit numuneler üretilmiştir. Plastik enjeksiyon kalıplamada polimer hammadde ve katkıları karıştırılmıştır. Polimetilmetakrilat, polietereterketon, epoksi ve poliüretan matrisli kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca döküm yöntemiyle ve presleme-sinterleme yöntemleriyle kompozit numuneler üretilmiştir. Son olarak, kendi-kendini onaran polimer matrisli kompozit numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin çekme-basma davranışı, elastisite modülü, akma dayanımı, sertlik gibi mekanik özellikleri çekme-basma testi ile belirlenmiştir. Ayrıca numuneler tahribatsız ultrasonik test ile incelenmiştir. Numunelerin yapıları ayrıca termal görüntüleme cihazı ile incelenmiştir. Mikroyapı ve mekanik özellikler (elastisite modülü) ultrasonik hız ölçümü ile belirlenmiştir.

.Ağustos 2020, [83.] sayfa.

Anahtar kelimeler: Polimer malzeme, Kompozit malzeme, Tahribatsız muayene, Ultrasonik Test, Plastik enjeksiyon

SUMMARY

M.Sc. THESIS

DESTRUCTIVE AND NONDESTRUCTIVE CHARACTERISATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS

Seher Selen AYDIN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. İlven MUTLU

In this study, production and characterisation of polymer matrix composite materials were carried out. Initially, polymer matrix particule reinforced composite specimens were produced by plastic injection moulding method. Polymer raw materials and reinforcements were used in plastic injection moulding. Polymethymetacrylate, polyetheretherketone, epoxy and polyurethane matrix composite specimens were manufactured. In addition, specimens were produced by casting method and pres-sintering method. Lastly, self-healing polymer matrix composite specimens were manufactured. Microstructure and mechanical properties of the materials were determined by compression-tension test. In addition, specimens were investigated by nondestructive ultrasonic test. Structure of the specimens was investigated by thermal imaging device. Microstructure and mechanical properties (elastic modulus) were determined by ultrasonic velocity measurements.

August 2020, 83 pages.

Keywords: Polymer material, Composite material, Nondestructive test, Ultrasonic test, Plastic injection

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve mekanik özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Polimetilmetakrilat (PMMA), polietereterketon (PEEK), epoksi ve poliüretan (PU) matrisli kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle plastik enjeksiyon kalıplama yöntemiyle polimer matrisli parçacık takviyeli kompozit numuneler üretilmiştir. Plastik enjeksiyon metodunda polimer ve katkı maddeleri birbiri ile karıştırılmıştır. Ayrıca soğuk döküm ve presleme-sinterleme yöntemleriyle polimer matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Son olarak, kendi-kendini onaran polimer matrisli kompozit numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri tahribatlı ve tahribatsız yöntemler ile incelenmiştir. Malzemelerin çekme-basma davranışı, elastisite modülü, gibi mekanik özellikleri çekme-basma testi ile belirlenmiştir. Ayrıca numuneler tahribatsız ultrasonik test ile incelenmiştir. Mikroyapı ve mekanik özellikler (elastisite modülü) ultrasonik hız ölçümü ile belirlenmiştir. Ayrıca, termal görüntüleme ile yapı incelemesi gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak polimer malzemeler, monomer adlı küçük organik moleküllerin kovalent bağlarla birine birbağlanak oluşturdukları dev moleküllerdir. Kompozit malzeme, arzulanan performansta bir malzeme elde etmek amacıyla en az iki olmak üzere, iki, üç veya daha çok farklı malzemenin fiziksel olarak makro ölçekte karıştırılmasına denir. Genellikle kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak polimerler kullanılmaktadır. Akıllı malzemeler; yük, sıcaklık, pH, elektrik alan, manyetik alan gibi uyarıcılar ile kontrollü olarak, belirli bazı özelliklerini değiştirebilecek şekilde üretilmiş malzemelerdir. Akıllı malzeme sınıfında tanımlanabilecek olan kendi kendini onarma, bir malzemenin hasarları bağımsız bir şekilde, yani herhangi bir dış müdahale olmadan onarabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Kendi-kendini onaran malzemeler genellikle polimer matrisli kompozit şeklinde bir yapıya sahiptirler. Özellikle havacılıkta, tahribatlı testlerin yanında tahribatsız ve hızlı testler büyük önem taşımaktadır ve kullanımları giderek artmaktadır. |

2. GENEL KISIMLAR

2.1. POLİMER 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 kullanılabilir [1-3].

Termoplastik Polimerler

Lineer veya dallanmış zincire sahip polimer malzemelerdir.

- Isıtıldıklarında önce yumuşak viskoz sıvı sonra sıvı duruma geçer
- Camlaşma sıcaklığının altında gevrektiler.
- Geri dönüşümlüdürler (tekrar-kullanılabilirlik).
- Düşük sürtünme katsayıları bulunmaktadır.
- Pres, enjeksiyon, haddeleme, ekstrüzyon, gibi imalat yöntemlerine uygundur

Termoset Polimerler

Üç boyutlu çapraz kovalent bağlı polimerler.

- Isı ile yanarak kömürleşirler; ısıtıldıklarında yumuşamazlar.
- Kondanzasyon reaksiyonu ile üretilirler; yan ürün verirler
- Kırılganlığı azaltmak için dolgu maddesi ilave edilir.
- Kompozit malzemelerin üretimine uygundur [1-3].

Genel Amaçlı Plastikler

Genel ticari plastikler endüstriyel ölçekte çok fazla üretilen ve yaşantımızda çok karşılaştığımız plastiklerdir. Genel olarak mekanik özelliklerinin ve sıcaklık dayanımlarının metal ve seramik malzemelere kıyasla oldukça yetersiz olduğu ifade edilebilir [3-6].

Mühendislik Plastikleri

Genel olarak mühendislik plastikleri, ısıya, kimyasallara, mekanik yüklere, darbeye, alev dayanıklı plastiklerdir. Yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamalarına uygun polimerlerdir. Maliyetleri genel amaçlı plastiklerden daha fazladır, fakat metallerden düşüktür. Mühendislik plastikleri genel olarak aşağıdaki gibi üç ana grupta sınıflandırılabilir [3-6].

- ❑ Genel Amaçlı Mühendislik Plastikleri
- ❑ Yüksek Performanslı Mühendislik Plastikleri
- ❑ Süper (Termal Dirençli) Mühendislik Plastikleri

Genel olarak, mühendislik plastikleri, yüksek sıcaklıklara, çeşitli kimyasal maddelere, darbeye, karşı dayanıklı olan polimerlerdir. Mühendislik plastikleri kimyasal yapılarına göre polikarbonatlar (PC), poliesterler (PET), stirenik kopolimerler (ABS), poliamidler (PA), akrilikler (PMMA), asetaller (POM) şeklinde sınıflandırılabilir [3-6].

Mühendislik plastiklerinin kullanım alanlarına göre sınıflandırılması:

- ✓ Mekanik Özellikler
- ✓ Elektriksel Özellikler
- ✓ Termal Özellikler
- ✓ Diğer Özellikler
 - ◆ Şekil Bellek / Hidrojel
 - ◆ Biyobozunurluk
 - ◆ Likit Kristal
 - ◆ Optik/Optoelektronik

2.2. KOMPOZİT MALZEMELER

Genel olarak ifade edildiğinde kompozit malzeme, mühendislik açısından istenen özelliklere sahip bir malzeme elde etmek için iki, üç veya daha çok farklı malzemenin myasal değil fiziksel olarak (makro ölçekte) karıştırılmasına denir [7-10]. Kompozit malzemeler üç ana bileşenden meydana gelir;

- Matris
- Takviye (fiber veya parçacık)
- Katkı/Dolgu

Matris malzemelerin yerine getirdiği temel fonksiyonlar şöyledir.

- 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.
- Malzemenin katı-halini (ilk şeklini) muhafaza etmesini temin eder.
- Gelebilecek çeşitli kimyasal ve fiziksel dış-etkilere karşı kompozit malzemeyi korur.

Fiberlerin yerine getirdiği temel fonksiyonlar şöyledir;

- Uygulanan dış-kuvvetin büyük bölümünü fiber taşımaktadır. Yüksek elastisite modülüne (rijitliğe) sahip bulunduğu kompozit malzemenin rijitliğinden sorumludur.
- Kompozitin temel mühendislik özelliklerini fiberin mühendislik özellikleri tayin eder.

Fiber Malzemeleri

Cam Fiber: SiO_2 'den oluşup ayrıca Na, Ca, Al, B ve Fe oksitleri içerir. Ucuzdur. Yoğunluğu 2.5 g/cm^3 , elastisite modülü 75 GPa değerindedir. % 50 SiO_2 , % 20 CaO, % 10 Al_2O_3 içerir].

- Yüksek mukavemete sahiptir, birim ağırlık başına mukavemeti çelikten yüksektir.
- Isıl dirençleri düşüktür. Yanmaz, yüksek sıcaklıkta yumuşarlar.
- Kimyasallara karşı oldukça dayanıklıdır.
- Düşük miktarda nem absorbe eder, fakat matris ile fiber arasında nemin etkisiyle çözülme olabilir. Kaplama ile bu etki önlenbilir.
- İletkenlik göstermemektedir. Yalıtımın önemli olduğu ürünlerde kullanılır [7-10].

Aramid (Kevlar) Fiber: Havacılıkta ve uçaklarda, düşük basma mukavemetlerinden dolayı, karbon fiberler ile beraber kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadır. Fiber boyunca sağlam kovalent bağ, diğer yönde zayıf hidrojen bağları bulunmaktadır. 3-boyutlu, kristalin tabakalardan meydana oluşmaktadır. İletken değildir. Basma mukavemetleri ve nem çekme özellikleri kötüdür. Elastisite modülü 110 GPa, yoğunluğu 1.4 g/cm^3 değerindedir. Zincirdeki aromatik halkalar fiberin dayanımını oldukça arttırmaktadır [7-10].

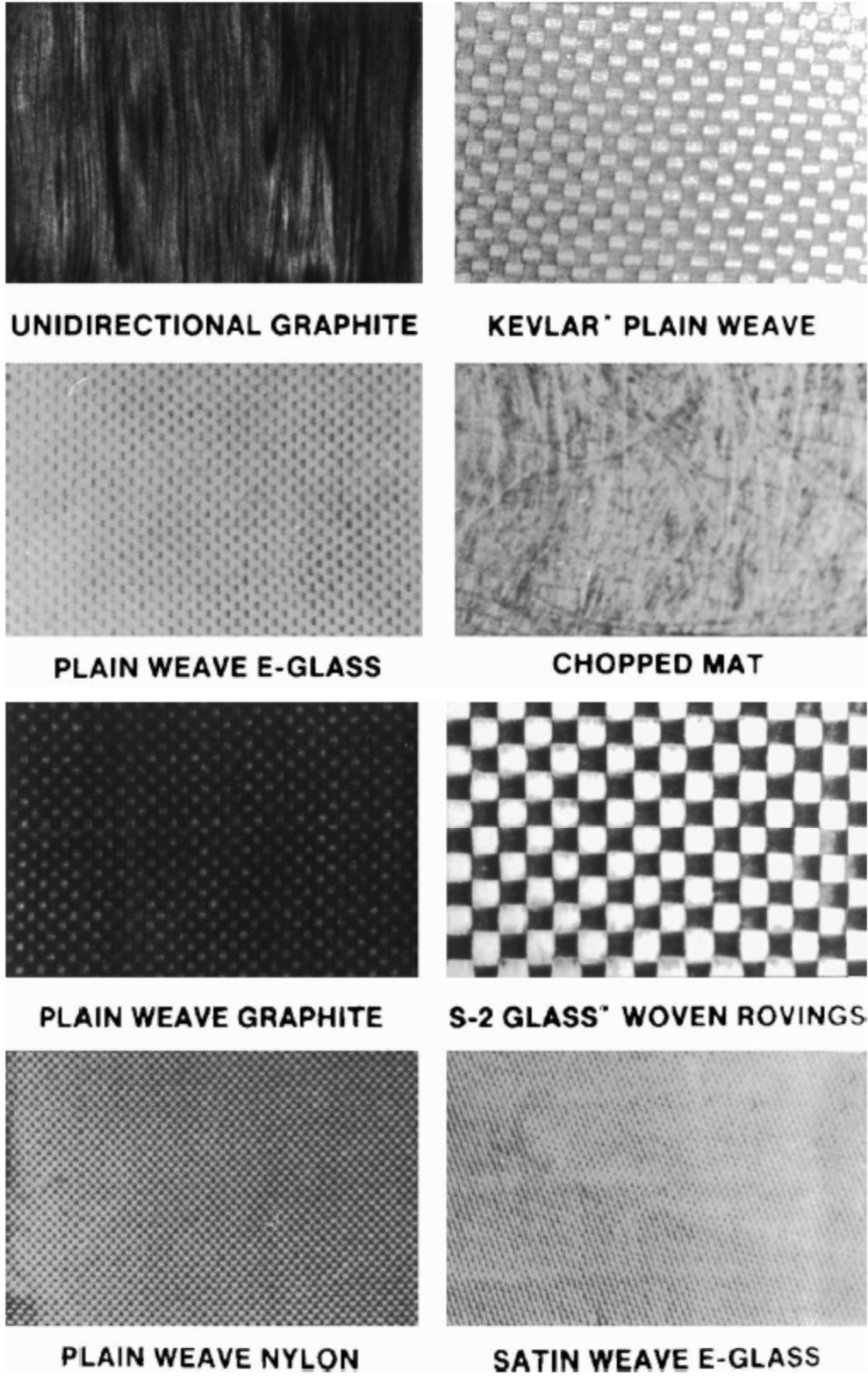
Karbon Fiber: Düşük yoğunluğa sahiptir (hafiftir), yüksek mukavemete sahiptir ve enerji absorpsiyon (darbe enerjisi) ve tokluğa sahiptir. Nemden etkilenmezler, yüksek sıcaklıklarda sürünmeye dayanıklıdır. Elastisite modülü 230-50 GPa, yoğunluğu 1.8 g/cm^3 değerindedir. Aşınma ve yorulma dayanımları oldukça yüksek değerlerdedir [7-10].

Polimer Matris Olarak Kullanılan Malzemeler

Genellikle fiberler/parçacıklar polimer matrise içine gömülüdür. Gelebilecek yük, ısı/sıcaklık, kimyasal maddelere maruz kalan matrisdir. Kompozitin çeşitli mühendislik özelliklerini matris malzemesi tayin eder [7-10].

Termoset Esaslılar: Matris olarak en çok kullanılan malzeme termosetlerdir. Bu malzemelerin üretiminde bir defa ısıtılıp şekillendirilir, daha sonra tekrar ısıtıp şekil verilemez. Üç boyutlu çapraz bağlı olduklarından geri dönüşümü değildirler, bu nedenle ısıtıp-soğutmak suretiyle tekrar-tekrar kullanılamazlar. Epoksi reçineler epoksit içeren bileşenlerden meydana gelirler. Poli-fenol ve epikloridinin reaksiyonu ile sentezlenirler. Polyester reçineler ise di-bazik asitlerin alkoller (glükol) veya fenollerle yoğunlaşması ile sentezlenirler [7-10].

Termoplastik Esaslılar: Termoplastik polimerler çapraz kovalent bağlı değildirler bu nedenle tekrar-kullanılabilirler (geri dönüşüm). Isıtma-soğutma yapıp tekrar kullanılabilirler (matrislerin fiziksel özellikleri değişir, kimyasal özelliklerinde değişiklik olmaz) [7-10].



Şekil 2.1: Fiber türleri [9].

2.3. AKILLI POLİMERLER

Akıllı malzemeler; sıcaklık/ısı, gerilim, pH, elektrik alan, manyetik alan vb gibi etkiler tarafından kontrollü olarak, sahip oldukları bir ya da daha fazla özelliği değiştirebilen mühendislik malzemeleridir.

Genel olarak bir malzemenin akıllı malzeme olarak sınıflandırılması için gerekli temel özellikler şunlardır:

Özellik Değişimi: dış uyaran etkisiyle mikro yapıda oluşan değişiklikler malzemenin bir özelliğini değiştirir. Örnek: gerilim uygulandığında renk değiştiren elektrokromik malzemeler.

Enerji Dönüşümü: faz değişimi esnasında enerji bir formdan diğerine dönüşür.

Özellik Değişimi: Malzemeyi dış uyarıcılara ilişkin bir değişikliğe cevap olarak malzeme özelliklerinden (kimyasal, mekanik, elektriksel, manyetik ve ısı) bir veya daha fazlasında değişim gösteren akıllı malzeme:

Termokromik: termal enerji girişi ile moleküler yapı değiştirir. Malzemenin rengi değişir.

Magneto-reolojik: manyetik alanın uygulanması, sıvının viskozitesinde bir değişiklik ile sonuçlanan, mikro-yapısal yönlendirmede bir değişiklik meydana getirir.

Termotropik: termal enerji girişi ile oluşan faz değişikliği mikro yapıyı değiştirir. Farklı fazda, malzeme farklı iletkenlik, geçirgenlik, hacimsel genleşme ve çözünürlük gösterir.

Şekil Bellek

Enerji Dönüşümü: Enerjiyi bir biçimden başka bir enerji biçimine dönüştüren malzemeler:

Fotovoltaik

Termoelektrik: elektrik akımının girişi malzemenin kenarları üzerinde bir sıcaklık farkı oluşturur. Bu sıcaklık farkı, bir ısı motoru, esas olarak bir ısı pompası üretir.

Piezoelektrik: elastik enerji girişi bir akım üretir. Piezoelektrikler, açılıp kapatılabilecek şekilde iki yönlüdür ve dış elektrik akımı deformasyon meydana getirebilir.

Fotoparlayan: UV enerjisi girişi görünür spektrumda radyasyon enerjisi çıkışına dönüştürülür.

Elektrosınırlayıcı: akım uygulanması polarizasyon ile atomlar arası mesafe değiştirir. Bu mesafedeki değişiklik, elastik enerji üretir. Bu gerilme malzemenin geometrisini deforme eder.

2.4. KENDİ-KENDİNİ ONARAN MALZEMELER

Akıllı malzeme esaslı kendi kendini onarma (iyileşme) teknolojisi, bir malzemenin hasarları bir dış etki olmaksızın onarabilme kabiliyetidir. Kendi kendini onarma iç ve dış temelli olarak iki ana sınıfta değerlendirilir.

İç Kaynaklı Kendi Kendini Onarabilen Malzemeler

Bu sistemde iyileştirme için uyarıcıya ihtiyaç kalmamaktadır, kendiliğinden oluşur. Çatlak oluşunca matrisin davranışına bağlı olarak malzeme iyileştirilir. Kompozit yapı ısı, ışık ve kimyasal madde gibi bir uyarıcı ile kendi kendini iyileşme mekanizması tetiklenebilir. Dışarıdan bir ajan gerektirmeme ve çoklu onarıma olanak vermesi gibi üstünlükleri vardır. Ancak küçük çatlak bölgeleriyle sınırlıdır. İyileştirme mekanizması hem fiziksel hemde kimyasal etkileşimlere oldukça bağlıdır.

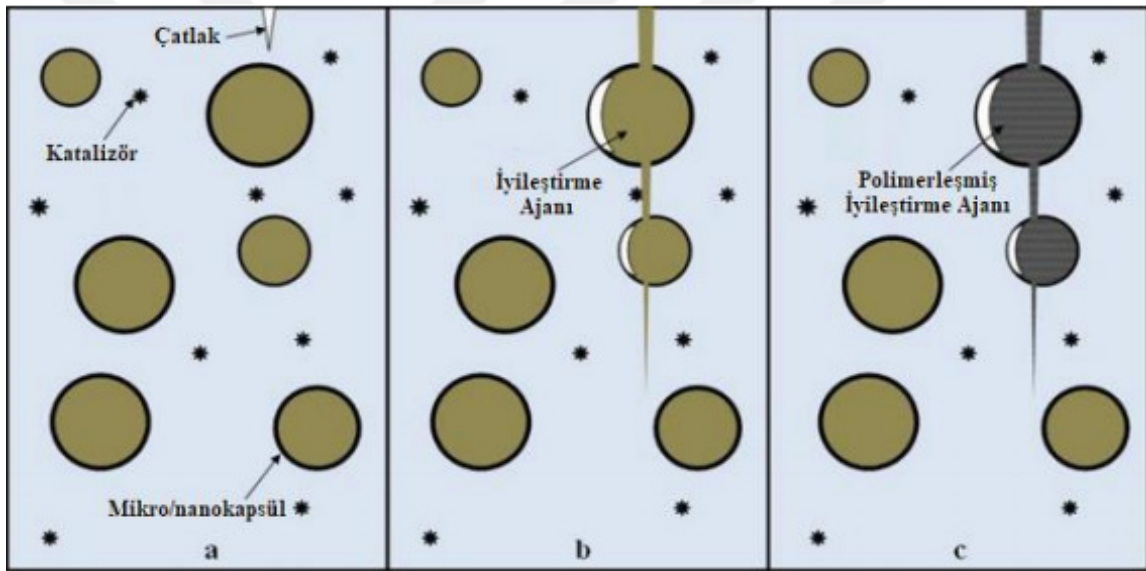
- Fiziksel Çapraz Bağlanma: poliizosiyanat, poliesterdiol ve di-n-bütildilardarat katalizörü kullanılarak PU sistemde gösterilmiştir. Fiziksel kendi kendini iyileştirme dışarıdan bir etki ile tetiklenen moleküler difüzyona dayanır. Termosetlerde, parçalanmış zincirlerin difüzyon ile tekrar polimer zinciri haline gelmesiyle meydana gelir.
- Kimyasal Çapraz Bağlanma: kendi kendini iyileştirme ısı, basınç, ve elektrik akımı gibi tetikleyiciler ile olur. Bu sistemler kovalent veya hidrojen bağı ve iyonik etkileşimler gibi kovalent olmayan etkileşimlere dayanmaktadır [11-17].

Dış Kaynaklı Kendi Kendini Onarabilen Malzemeler

Bu sistemler mikrokapsüller, mikrovasküler ağlar ve polimer matrisin içine gömülmüş parçacıklar olarak sıralanabilir. İyileştirici madde çatlığa sızar. Burada polimerizasyon oluşarak çatlak doldurulmuş olur. Çok az mukavemet düşüşü ile malzemenin kullanım ömrü geliştirilmiş olur.

Mikro-kapsülasyon:

Mikro-kapsül kullanılarak ilk otonom kendi kendini iyileştirme mekanizması termoset epoksi ile test edilmiştir. Mikro kapsüllerin dışı polimer kabukla çevrilidir ve içi sıvı malzemeyle doludur. Mikro-kapsül üretim yöntemleri; ara yüzey polimerizasyonu, sol-gel, ve ekstrüzyondur. Kendi kendini iyileştirmede önce çatlak meydana gelir. Daha sonra kapsüldeki iyileştirici ile katalizör çatlağa sızar ve polimerizasyonu başlatırlar ve çatlak (hata) dolar. Çapraz bağlı termoset polimerler için uygulanabilir bir yaklaşımdır. Malzemenin aynı bölgesinde birden fazla kez çatlak olursa onarım olmaz. [11-17].



Şekil 2.2: Mikrokapsülasyon ile onarım mekanizması [12].

Mikro-vasküler Ağlar:

Bir, iki veya üç boyutta birbirine bağlanan kılcal kanal ağında iyileştiriciler depolanır. Çatlak oluşup ağı parçaladığında iyileştirici sıvı salınır ve çatlağa sızar. Çatlak içinde gerçekleşen polimerizasyon neticesinde çatlak kapanır (dolar) ve iyileşme oluşur. Bu yöntemle daha fazla iyileştirici sıvı yüklenebilir ve nispeten daha iri hatalar kapanabilir. Aynı bölgede oluşan hata tekrar iyileşebilir. Ağlar oldukça homojen olarak dağıtılabilir. İyileştirici viskozitesi düşük ağların çapı küçük olduğunda çatlak oluşsa bile iyileştirici sıvı sisteme verilemez [11-17].

2.5. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

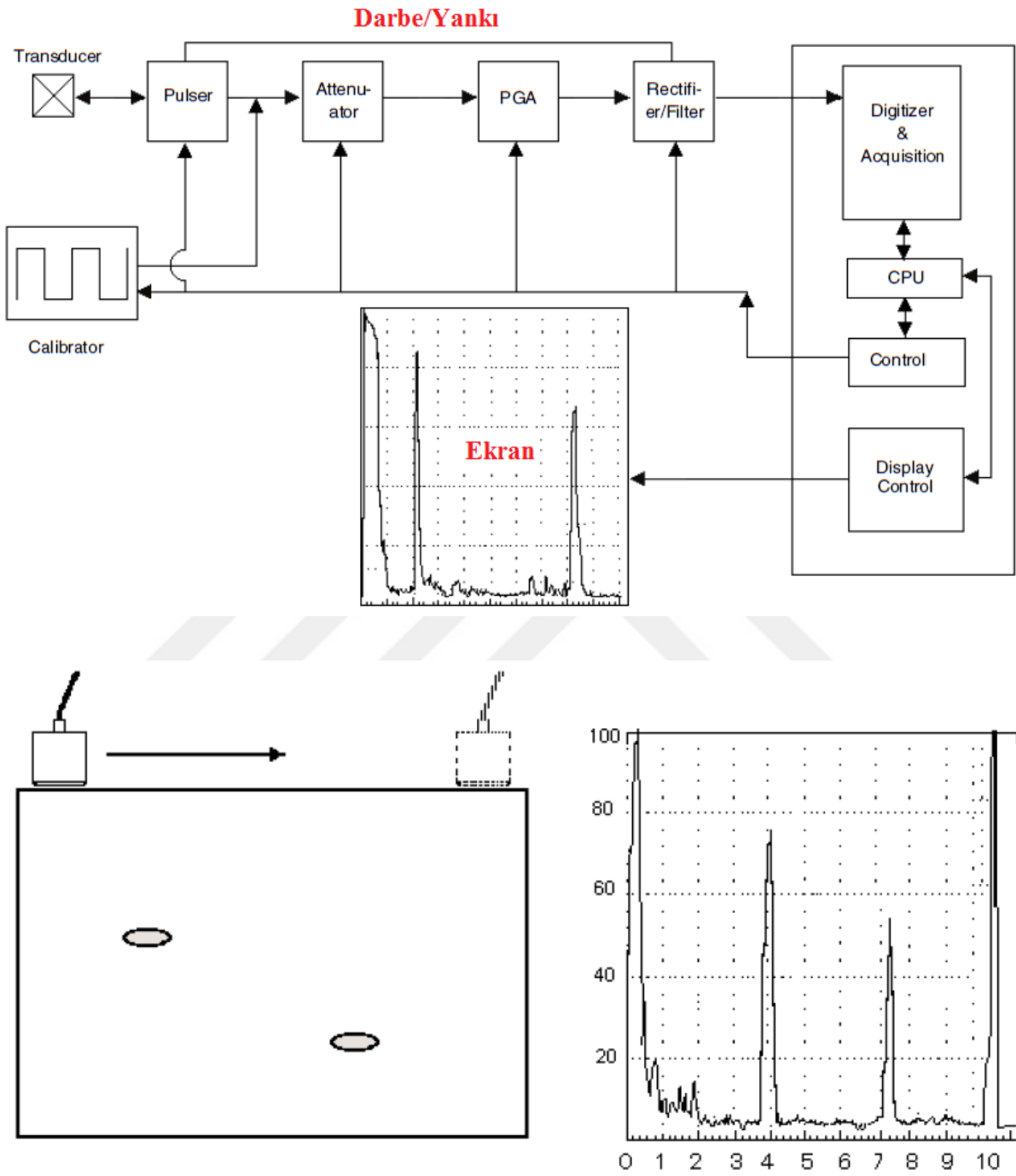
Ultrasonik Muayene

Ultrasonik ses dalgalarının malzemeye gönderilmesi sonucunda malzeme özellikleri, kalınlık ve süreksizlikler hakkında bilgi edinilir. Ultrasonik kontrol havacılıktan boru hatlarına, demiryollarına kadar çok geniş uygulama sahasına sahiptir. Ultrasonik dalgalarla yapılan testlerde temel prensip ses dalgalarının süreksizlikten geri yansiyarak probda bulunan piezoelektrik kristale ulaşması ve sinyal olarak yansımastır. Ultrasonik dalgalar 20 kHz ve üzeri frekanslı ses dalgalarıdır. İnsanın 20 Hz üzeri sesleri algılama kabiliyeti yoktur [18].

Ultrasonik ses dalgalarından yararlanılarak malzemenin kompozisyonu, yapısı, yoğunluğu ve geometrisi hakkında bilgi sahibi olunacağı gibi süreksizlik tespiti yapılabilir. Süreksizlikten dönen ses dalgaları eko olarak yansır. Bu ekolardan yararlanılarak süreksizliğin pozisyonu, boyutu ve şekli tespit edilebilir. Hacimsel yöntemlerden olan ultrasonik kontrolün prensibi, prob tarafından üretilen yüksek frekanstaki ses dalgalarının malzeme içinde yayılması ve bir süreksizliğe çarptıktan sonra proba yansımalarına dayanır. Prob tarafından algılanan dalgalar sinyallere dönüştürülür ve ekranda yankılar halinde görülür. Ekranda gözlenen yankıların konumları ve genlikleri hatanın bulunduğu yer ve boyutları hakkında bilgi verir [18].

Yankının şiddeti yansıyan sesin ne kadarının proba geri yansıdığına bağlıdır. Küçük yansıtıcılar ve sesin güçlü saçılmasına neden olan bazı süreksizlikler (gözenekler) çok zor algılanır. Karmaşık olmayan şekilli parçalarda sesin düz gönderildiği hallerde arka duvar yankısındaki zayıflama ile ilave bir yankı olmaksızın hata tespiti olasıdır. Arka duvar yankı (pik) yüksekliği belirli bir değerin (% ekran yüksekliği) altına indiğinde hatanın varlığı söz konusudur [18].

Hataların tespit edilebilme özellikleri hataların şekillerine ve hataların malzeme içerisindeki konumlarına bağlıdır. Ses dalgasının saçılmasına sebep olan çeşitli süreksizliklerden sadece düşük enerjili yansımalar proba ulaşılabilir. Bundan dolayı cihaz ekranında görüntünün belirtisi gerçekteki hata büyüklüğüne göre oldukça küçük olabilmektedir [18].



Şekil 2.3: a) Darbe-yankı yöntemi blok diyagramı, b) A-tarama [19].

2.6. LİTERATÜR ÖZETİ

Yıldızhan [10] gerçekleştirdiği yüksek lisans tez çalışmasında polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Gerçekleştirdiği çalışmada karbon ve cam ilave edilmiş düz dokumalı kompozitlerin dinamik özellikleri, yorulma, titreşim sönüm davranışları, frekans ölçümleri ve eğilme testleri ile araştırılmıştır. Yorulma özellikleri için tabakalı kompozitlerin gerilme ve tekrarlı yük sayıları grafiklerle elde edilmiştir. Eğilme özellikleri için tabakalı ve bindirmeli kompozit malzemelerin eğilme dayanım sonuçları elde edilmiştir. Malzemenin doğal frekans ve sönüm özellikleri, sıcaklığa bağlı olarak elde edilmiştir.

Akhan [12] gerçekleştirdiği yüksek lisans tez çalışmasında kendini onarma davranışı gösteren grafen oksit-poliüretan temelli kompozit malzemeleri araştırmıştır. Poliüretan kompozit kaplamanın mikrokapsüllenmiş katılma reaksiyonu ile oluşan çatlakları onarması ile kendini iyileştirmesi incelenmiştir. Alkoksisilan ile modifiye edilmiş PU ve perflorooktil alkoksisilanlarla sol-jel yöntemiyle kompozit kaplamalar üretilmiştir. Ardından kendini iyileştirme temin eden alkin fonksiyonel grafen oksit sentezi yapılmış ve çok fonksiyonlu azid içeren polivinilformal mikrokapsüller üretilmiştir. PU kompozite eklenen bu maddeler ile kendini iyileştirebilen kaplamalar üretilmiştir. Filmlerin DSC, TGA, SEM ve korozyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kaplama yüzeyinde hasar meydana geldikten sonra, azid-alkin katılmasından sonra malzemenin kendi-kendini iyileştirmesini takiben mekanik özelliklerini geri kazanımı da araştırılmıştır.

Tezel [13] gerçekleştirdiği yüksek lisans tez çalışmasında UV ile kuruyabilen, kendi-kendini iyileştiren kaplamaları üretmiş ve incelemiştir. Onarıcı ajanı ihtiva eden mikro-kapsüllerin üretilmesi ve mikro-kapsül ihtiva eden kaplamaların akrilik plakalara UV ışınları ile uygulanması ve kaplamanın hasar alma durumunda kendi kendini iyileştirme davranışının araştırılması amaçlanmıştır. Elde edilen mikro-kapsüller FTIR ve SEM ile araştırılmış ve termal, optik ve morfolojik davranışları incelenmiştir. Mikro-kapsüller UV ışınları ile kürlenmiş, kaplamanın davranışı FTIR ile karakterize edilmiştir. Kaplamaların hasar sonrası kendi kendini iyileştirmesi dijital kamera, optik mikroskop ve SEM ile incelenmiştir.

Ünçe [14] gerçekleştirdiği yüksek lisans tez çalışmasında kendi kendini iyileştiren oplibenzoksazin temelli kompozitleri incelemiştir. Amacı, havacılık ve otomotiv alanlarında kullanılacak kendi kendini iyileştirebilen malzemelerin geliştirilmesidir. Elektroğirme yöntemiyle çekirdek kısmı disiklopentadien, kabuk kısmı poliakrilonitrilden meydana gelen fiberler üretmiştir. DCPD onarım sıvısı, PAN ise DCPD'yi hapsetmek ve yapıda dağılmasını sağlamak üzere kabuk görevi görmesi için kullanılmıştır. DCPD ile katalizör arasında, metatez polimerizasyon reaksiyonu ile halka açılımı gerçekleşmekte, hasar gören bölge dolmaktadır. Benzoksazin reçinesinin içerisine eklenen katalizör ve fiber kaplı karbon kumaşlar birleştirilerek kompozit üretilmiştir ve kendini iyileştirme incelenmiştir. El yatırma ile benzoksazin reçinesi karbon kumaşa uygulandıktan sonra kürleştirilerek plaka üretimi gerçekleştirilmiştir. Elektroğirme ile kumaş üzerine nanofiber üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit üzerinde hasar meydana getirerek kırış testi ile kendi kendini iyileştirme araştırılmıştır. Hasar sonucunda açığa çıkan iyileşebilme kabiliyeti kazandırılmıştır.

Erbayrak [17] gerçekleştirdiği Doktora tez çalışmasında termoplastik katılmış epoksi malzemeleri araştırmıştır. Gerçekleştirilen Doktora çalışmasında, boşluk ve çatlak gibi eşitli hatalara karşı hassasiyeti yüksek yapıstırıcılarda oluşacak çeşitli hasarların malzemenin kendi-kendini onarmasını sağlayan bir proses ile onarım amaçlanmıştır. Malzemenin kendi-kendini iyileştirme davranışı deneysel ve sayısal yöntemler ile araştırılmıştır. Epoksi içine termoplastik partiküller ilave edilmiştir. Epoksinin, termoplastik ilavenin erime sıcaklığının üzerinde kendi-kendini iyileştirmesi sağlanmıştır. Kendi-kendini iyileştirme verimliliği, iyileşme öncesi ve sonrasındaki darbe enerjisinin karşılaştırılarak incelenmiştir. Ayrıca, sayısal analizler yapılarak, elde edilen veriler ve kohesif yöntem ile epoksinin iyileşme öncesi ve sonrasında parametre değişimleri incelenmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. POLİMER MATRSİLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Bu tez çalışması kapsamında çeşitli fiber ve parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler farklı yöntemler yardımı ile üretilmiş ve çeşitli tahribatlı ve tahribatsız karakterizasyon yöntemleri ile incelenmiştir.

Üretilen kompozitler aşağıdaki kullanım alanlarına yönelik olması amaçlanmıştır

- Kendi-kendini onaran malzeme (Havacılık ve medikal fantom uygulamaları)
- Hayalet teknolojisi amaçlı radar absorpsiyon malzemesi (RAM)
- Medikal sektör amaçlı fantom (doku eşdeğeri malzeme)

Polimer Esaslı Matris Malzemeleri

- Polimetilmetakrilat (PMMA)
- Poliüretan (PU)
- Epoksi
- Polietilenglikol (PEG)
- Polietereeterketon (PEEK)
- Polietilen (PE)

Parçacık Takviye Malzemeleri

- Karbon Siyahı
- Grafit
- Metal tozları

Fiber Takviye Malzemeleri

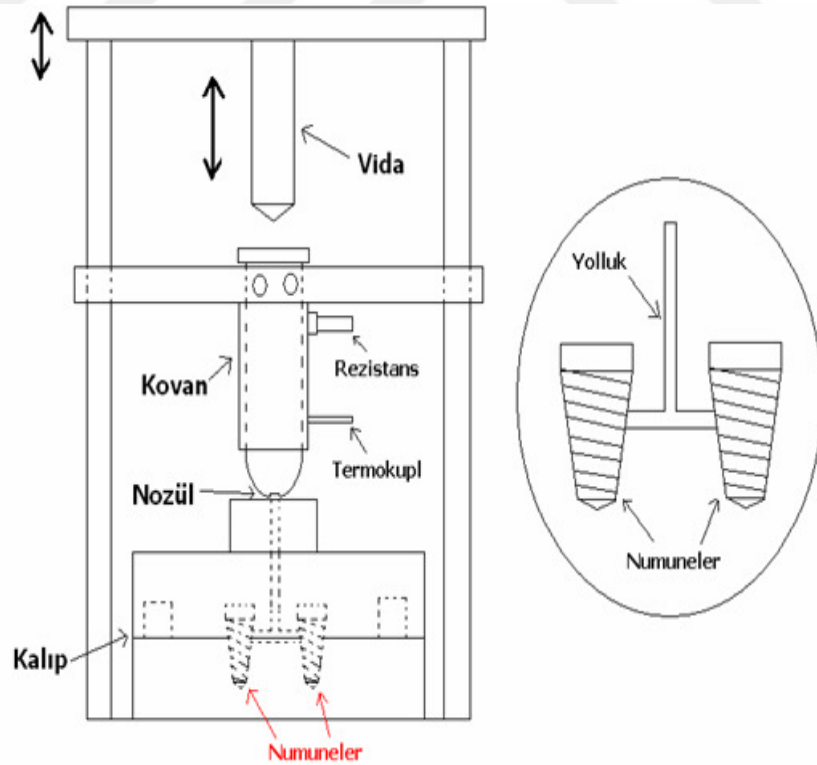
- Cam Fiber (E-camı)
- Karbon Fiber
- Aramid Fiber (Kevlar)

3.1.1. Polietilen (PE) Esaslı Kompozitler

Numune üretimi kapsamında hammadde olarak polietilen (MSE Teknik, Türkiye) ve lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLD-PE) granül kullanılmıştır. PE matrisli kompozit malzemeler parçacık takviyeli olarak aşağıda şematik olarak görülen plastik enjeksiyon kalıplama (PEK) yöntemi ile üretilmiştir.

Plastik Enjeksiyon Kalıplama

Plastik enjeksiyon kalıplama (PEK) ile numune üretiminde hammadde olarak çeşitli takviye elemanları, parafin ve PE kullanılmıştır. PE granulleri, parafin ve yaklaşık % 20-30 takviye elemanı (metal tozu) homojen olarak karıştırılmıştır. Karışım kovan içerisinde konulmuş ve 180 °C sıcaklığa ısıtılmış, uygun viskoziteye gelen karışım 9 bar basınçta metal kalıp içerisine aşağıda görüldüğü gibi enjekte edilmiştir.



Şekil 3.1: Plastik enjeksiyon cihazının şematik resmi

Aşağıdaki Şekilde plastik enjeksiyon kalıplama (PEK) yönteminin farklı aşamalarındaki malzemeler görülmektedir. Şekilde a) polietilen (PE) granüller (üst sol), takviye olarak kullanılan metal tozu (üst orta), yüzeyleri metal tozu ile kaplanmış PE granüller (üst sağ), b) plastik enjeksiyon kalıplama cihazına beslemeye hazır haldeki karışım (alt sol), ve son olarak c) üretilmiş numune ve yolluk görülmektedir (alt sağ).



Şekil 3.2: Enjeksiyon yöntemi, a) PE, toz, kaplı granül, b) karışım, c) numune ve yolluk

3.1.3. Polimetilmetakrilat (PMMA) Esaslı Kompozitler

PMMA matrisli kompozit malzeme üretiminde, 80-85 gr PMMA tozu (Alfa Aesar, USA), 1.5-2.0 gr Benzoil Peroksit (BPO), 0.1-0,5 gr Hidrokinon ve 10 gr BaSO₄ karıştırılmıştır (Merck, Germany). Daha sonra karışım ile 20-25 ml sıvı metilmetakrilat (MMA) karıştırılmıştır (Merck, Germany). Polimer uygun bir viskozite değerine ulaştığında teflon kalıba dökülmüştür.

Kırpılmış kısa fiberler ve toz takviyeler döküm işleminden önce viskoz sıvı karışım içerisine ilave edilip mekanik (fiziksel) olarak karıştırılmıştır. Örülü haldeki fiberlerde ise uygun viskoziteye sahip sıvı polimer karışımı fiberin üzerine dökülmüş ve sıvanmıştır. Üretim aşamasında sıvı metilmetakrilat (MMA) kullanılması akışkanlığı geliştirmiş (viskoziteyi düşürmüş), fiberlerin matris tarafından ıslatılmasını oldukça geliştirmiştir.

PMMA Polimer Matris Hammaddeleri;

Katı Kısım

- *PMMA*
- *BPO*
- *Hidrokinon*
- *BaSO₄*

Sıvı Kısım

- *MMA*

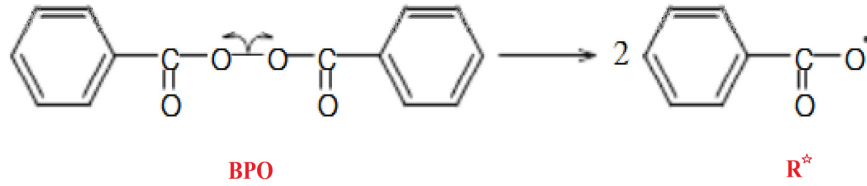
Polimetilmetakrilat (PMMA): amorf ve şeffaf bir termoplastiktir. Yoğunluğu 1.1 gr/cm³ değerindedir. Erime sıcaklığı 137 °C, camsı geçiş sıcaklığı 114 °C değerindedir. Mukavemeti 61-68 MPa değerindedir. MMA monomerinin, zincir polimerizasyonu veya anyonik polimerizasyon metodları ile üretilir. PMMA zinciri iri metakrilat gruplarından dolayı kristalleşme göstermez dolayısıyla amorfür (şeffaf).

Metil-metakrilat (MMA): Sıvı metil-metakrilat (MMA) ısı-katalizör etkisi ile kolayca polimerleşerek akrilik reçine (PMMA) oluşturmaktadır.

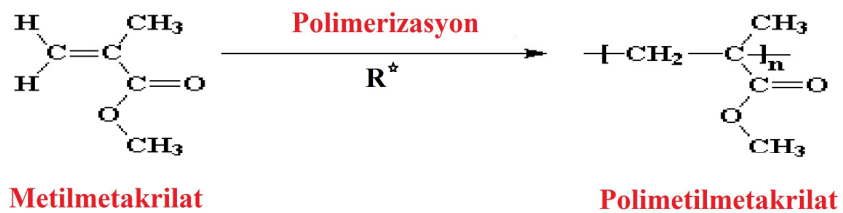
Benzoil Peroksit (BPO): Başlatıcı malzeme olarak BPO kullanılarak MMA monomerinden zincir (radikal) büyüme polimerizasyonu neticesinde katı PMMA sentezlenir.

Hidrokinon: MMA ısı, oksijen veya ışık ile kendiliğinden hızla polimerizasyona uğrayabilir. Polimerizasyonu yavaşlatıcı-kontrol edici inhibitör hidrokinon ilave edilmiştir.

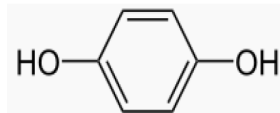
Baryum Sülfat ($BaSO_4$): Numunelerin tahribatsız radyografik muayene kabiliyetini geliştirmek (görünürlük/parlaklığı arttırmak) için karışıma radyo-opaklaştırıcı kontrast madde olarak belirli bir miktarda dolgu maddesi olarak $BaSO_4$ eklenmiştir.



(a)



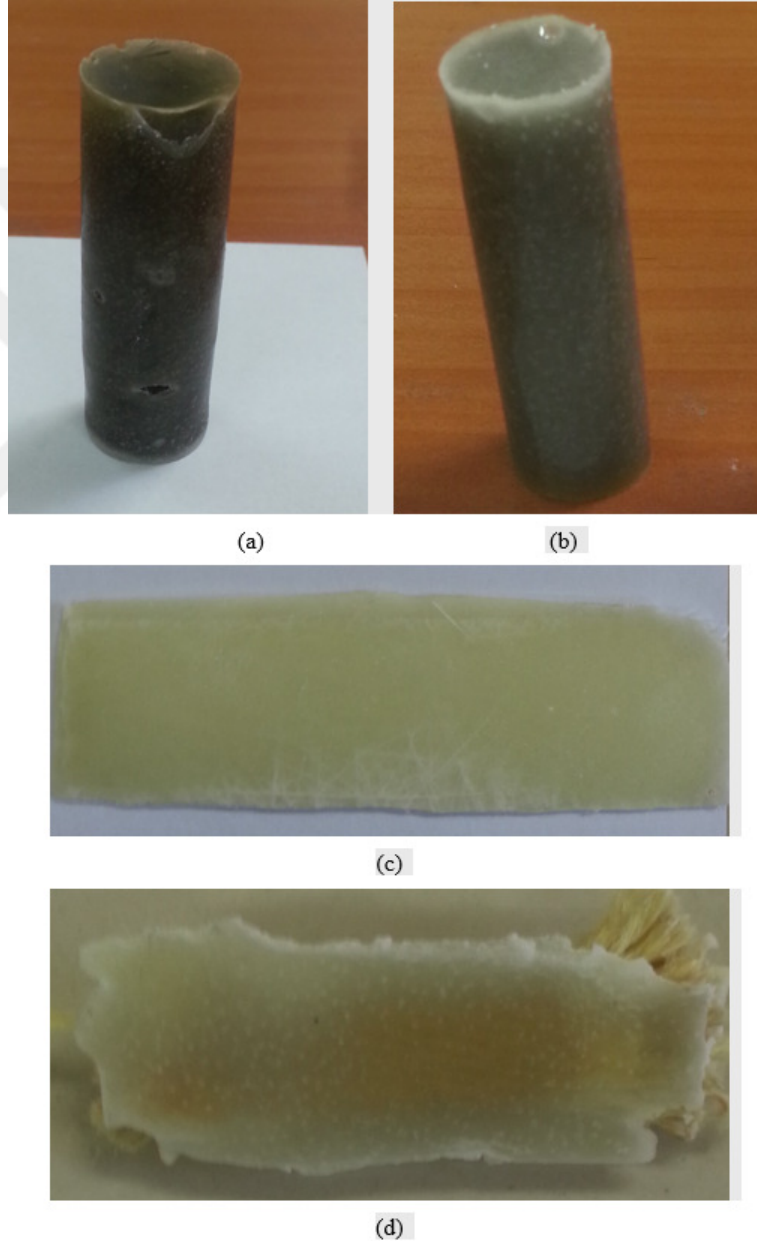
(b)

**Hidrokinon**

(c)

Şekil 3.4: a) BPO'dan radikal oluşumu, b) PMMA'nın polimerizasyonu, c) Hidrokinon.

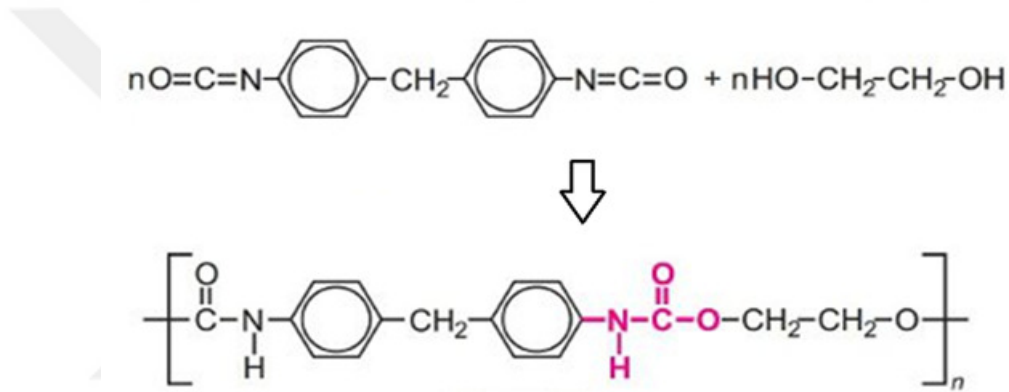
Aşağıdaki Şekilde a) karbon fiber takviyeli PMMA kompozit silindir şekilli numune, b) Sn tozu takviyeli PMMA kompozit silindir şekilli numune, c) cam fiber takviyeli PMMA kompozit plaka numune, d) kevlar fiber takviyeli PMMA kompozit plaka numunelerin fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 3.5: a) Karbon fiber, b) Sn tozu, c) cam fiber, d) kevlar fiber takviyeli PMMA

3.1.4. Poliüretan (PU) Esaslı Kompozitler

Poliüretan (PU) temelli kompozitlerin üretimi kapsamında, ağırlıkça % 50 poliöl 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 içerisinde ilave edilmiş ve homojen oluncaya kadar 3 dakika boyunca daha karıştırmaya devam edilmiştir. Son olarak ise elde edilen sıvı kompozit malzeme teflon kalıp içerisinde dökülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 3.6: PU kompozitler a) mekanizma, b) numuneler

3.1.5. Polietereterketon (PEEK) Esaslı Kompozitler

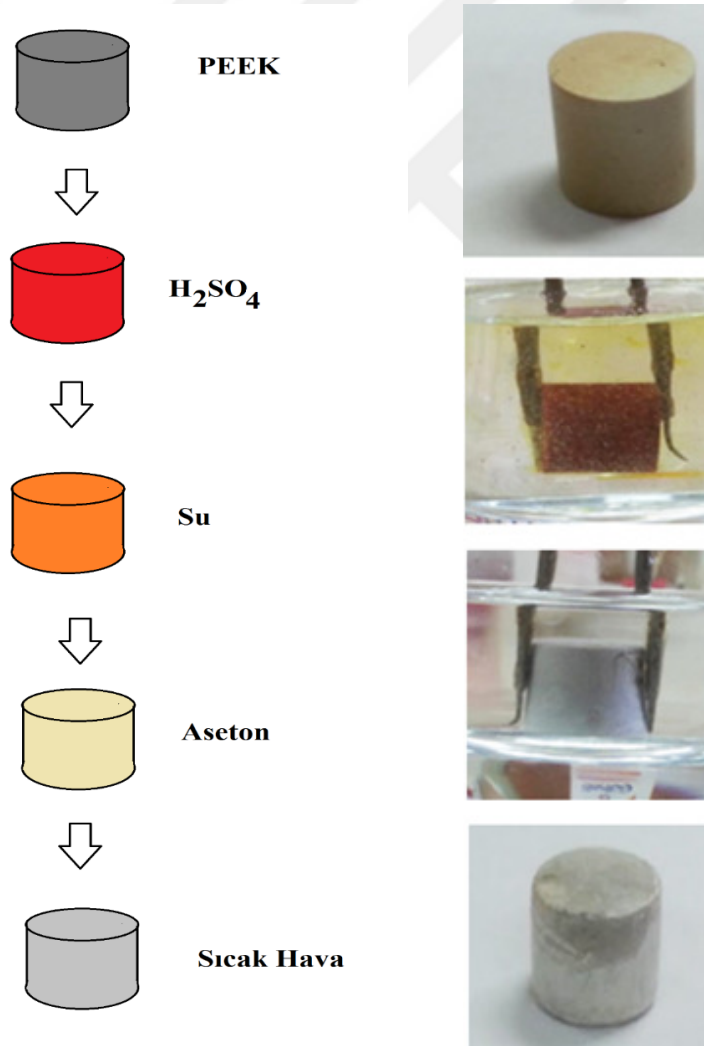
PEEK esaslı numuneler döküm yerine presleme-sinterleme (toz metalurjisi) yöntemi ile üretilmiştir. Kompozit numune üretimi yüksek saflıkta 80 µm tane boyutlu poli-etereterketon (PEEK) tozu (GoodFellow, England) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle PEEK tozları ve takviyeler (metal tozu) karıştırılmış, ardından tek eksenli hidrolik preste (MSE Teknik) preslenmiş, son olarak ise 340 °C sıcaklıkta 60 dakika süreyle sinterlenmiştir.



Şekil 3.7: Presleme-sinterleme yöntemi ile kompozit üretimi

PEEK Numunelerin Sülfonasyon Yüzey İşlemi

Polietereterketon (PEEK) esaslı kompozit malzemelerin özelliklerini geliştirmek amacıyla, numunelere sülfonasyon yüzey işlemi uygulanmıştır. Aşağıdaki şekilde PEEK numunelere uygulanan sülfonasyon yüzey işleminin temel adımları görülmektedir. Sülfonasyon yüzey işlemi sülfürik asidin dağlama etkisi ile PEEK yüzeyinde mikroporoz bir yüzey ve aynı zamanda yüzeye tutunan sülfon grupları nedeniyle daha aktif ve ıslatılabilirliği yüksek bir yüzey elde edilir. Numuneler öncelikle 5 dakika sülfürik asit içerisinde bekletilmiş, daha sonra destile su ile yıkanmış, daha sonra aseton ile yıkanmış, son olarak sıcak hava ile kurutulmuştur.



Şekil 3.8: PEEK numunelerin sülfonasyon yüzey işlemi

3.2. KENDİ-KENDİNİ ONARAN MALZEMELER

PU-Polyester Esaslı Malzeme

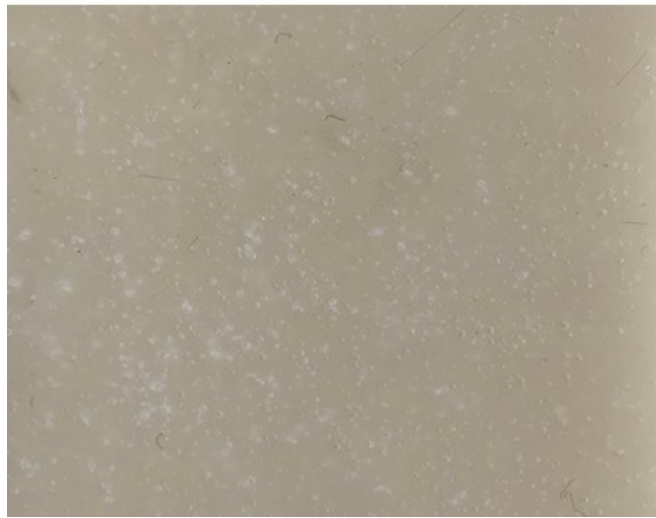
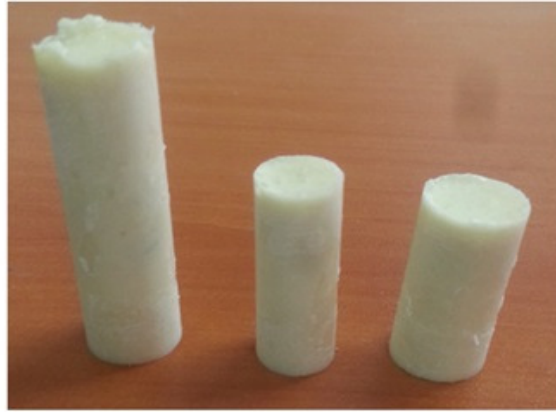
Öncelikle poliüretan hammaddeleri 30 cm³ polyol ve 30 cm³ izosiyanat karıştırılmıştır. Ardından karışım eşit olarak ikiye bölünmüştür. Karışımların viskozitesi artmaya başladığında, bir karışıma sıvı doymamış polyester reçine, diğer karışıma ise reçinenin sertleştiricisi ilave edilmiştir. Daha sonra her iki karışım karıştırılmıştır. Son olarak karışım kalıplara dökülmüştür.



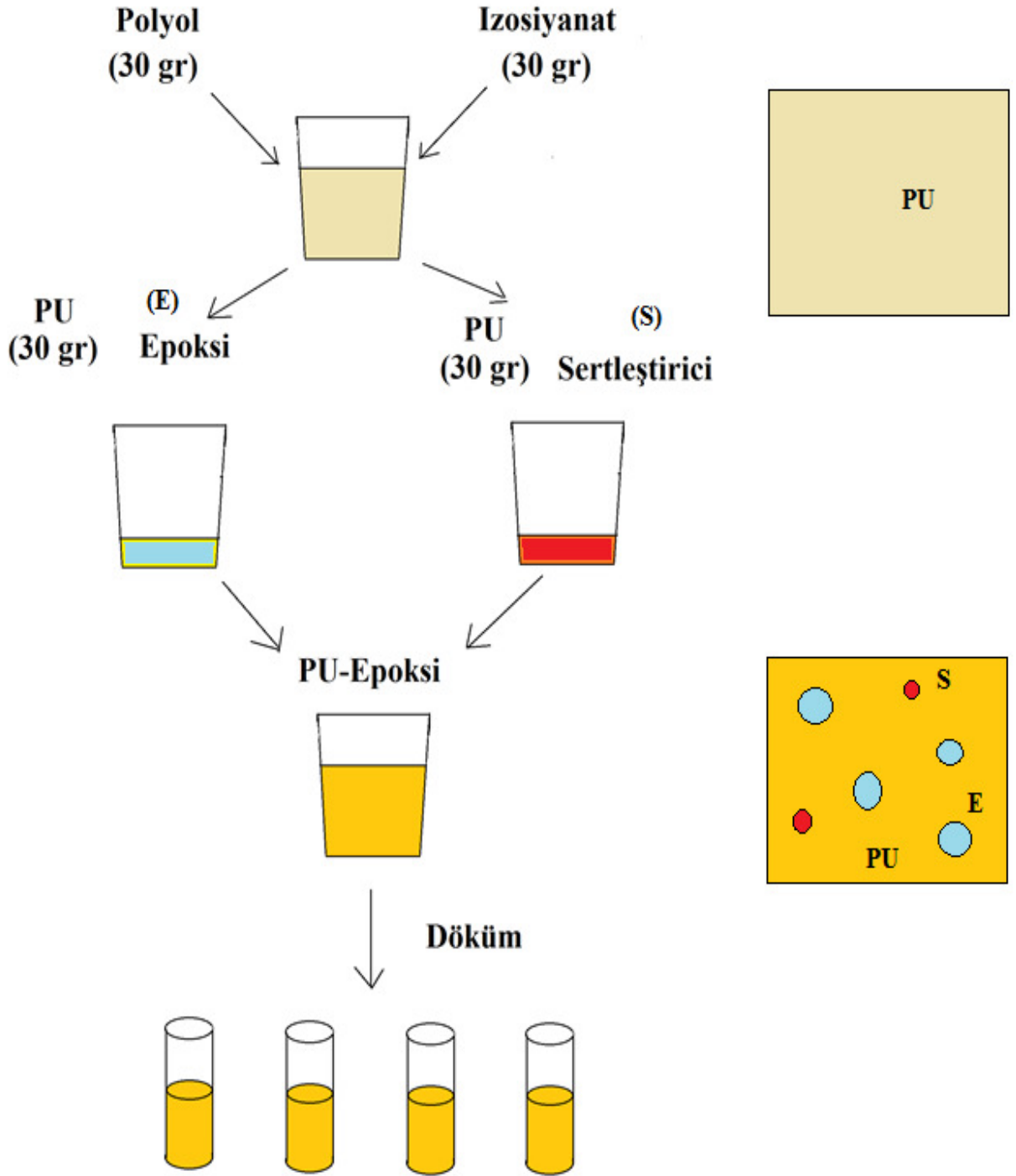
Şekil 3.9: PU-polyester reçine esaslı kendi-kendini onaran numuneler

PU-Epoksi Esaslı Malzeme

Öncelikle poliüretan hammaddeleri 30 cm³ polyol ve 30 cm³ izosiyanat karıştırılmıştır. Karışım eşit olarak ikiye bölünmüştür. Karışımların viskozitesi artmaya başladığında, bir karışıma sıvı epoksi reçine, diğer karışıma ise epoksi reçinenin sertleştiricisi ilave edilmiştir. Daha sonra her iki karışım karıştırılmıştır. Son olarak elde edilen karışım kalıplara dökülmüştür.



Şekil 3.10: PU-epoksi esaslı kendi-kendini iyileştiren numuneler



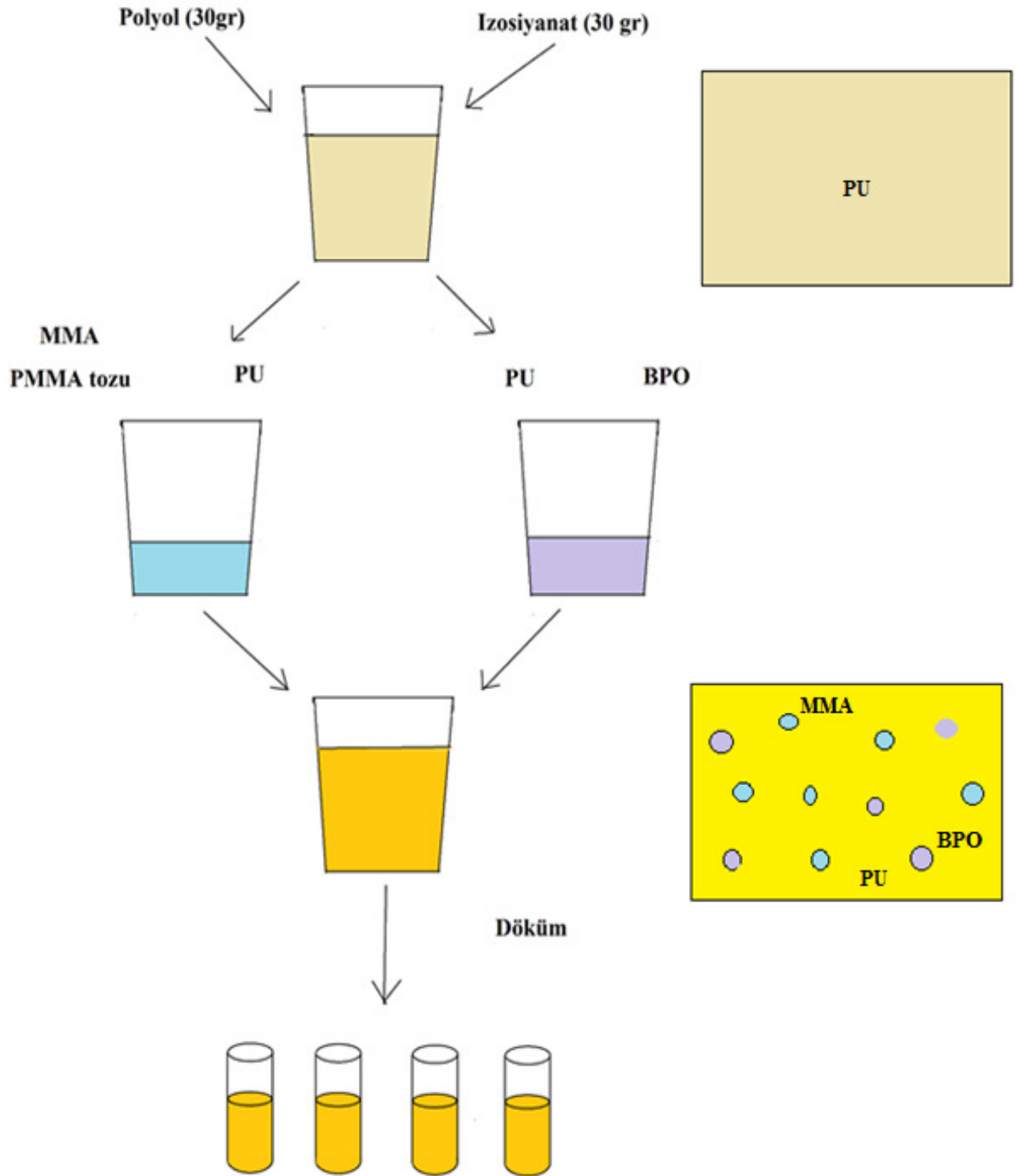
Şekil 3.11: PU-polyester reçine esaslı kendi-kendini iyileştiren numunelerin üretimi

PU-MMA/PMMA Esaslı Malzeme

Öncelikle poliüretan hammaddeleri 30 cm³ sıvı polyol ve 30 cm³ sıvı izosiyanat karıştırılmıştır. Karışım eşit olarak ikiye bölünmüştür. Karışımların viskozitesi artmaya başladığında, bir karışıma sıvı metilmetakrilat, diğer karışıma ise BPO ve PMMA tozu ilave edilmiştir. Daha sonra her iki karışım karıştırılmıştır. Son olarak elde edilen karışım kalıplara dökülmüştür.



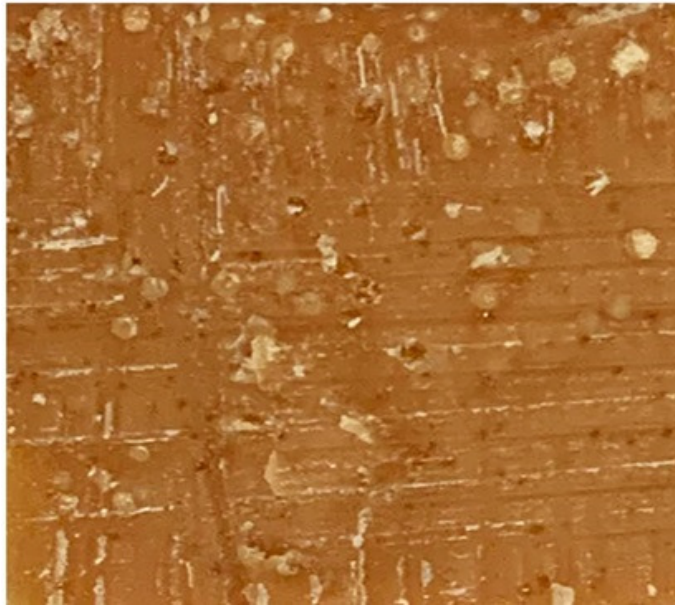
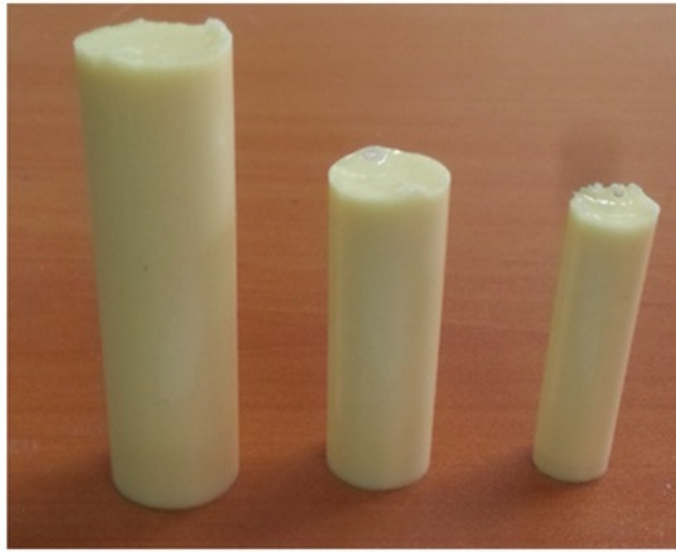
Şekil 3.12: PU-MMA/PMMA esaslı kendi-kendini iyileştiren numuneler



Şekil 3.13: PU-PMMA/MMA esaslı kendi-kendini iyileştiren numunelerin üretimi

PU-PEG Esaslı Malzeme

Öncelikle poliüretan hammaddeleri 30 cm³ sıvı polyol ve 30 cm³ sıvı izosiyanat birbirine ilave edilmiş ve karıştırmaya başlanmıştır. Karışımın viskozitesi artmaya başladığında, karışım içerisine ince PEG tozu ilave edilmiş ve karıştırmaya devam edilmiştir. Son olarak ise elde edilen karışım teflon kalıplara dökülmüştür.



Şekil 3.14: PU-PEG esaslı kendi-kendini iyileştiren numuneler

PU-Silikon Esaslı Malzeme

Öncelikle poliüretan (PU) hammaddeleri 30 cm³ polyol ve 30 cm³ izosiyanat bir müddet karıştırılmıştır. Elde edilen karışım eşit olarak ikiye bölünmüştür. Karışımların viskozitesi artmaya başladığında, bir karışıma sıvı silikon reçine, diğer karışıma ise silikon reçinenin sertleştiricisi ilave edilmiştir ve bir müddet daha karıştırılmıştır. Daha sonra ise her iki karışım birbirine katılıp karıştırılmıştır. Son olarak elde edilen homojen karışım teflon kalıplara dökülmüştür.



Şekil 3.15: PU-silikon esaslı kendi-kendini iyileştiren numuneler

3.3. KARAKTERİZASYON

3.3.1. Mikroyapı

Malzemelerin mikroyapıları, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Kimya Mühendisliği Bölümünde bulunan FEI Quanta FEG 450 markalı taramalı elektron mikroskopunda (FEG-SEM) incelenmiştir.

Malzemelerin termal davranışı İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Kimya Mühendisliği Bölümünde bulunan diferansiyel termal analiz (Seiko SII Exstar 6000 TG/DTA 6300, Japan) cihazı ile 10 °C /dakika sabit ısıtma hızında incelenmiştir.

Malzemelerin mikroyapıları ve kimyasal özellikleri İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Kimya Mühendisliği Bölümünde Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve ultraviyole-görünür ışık (UV-Vis) absorpsiyon spektroskopisi analizleri ile de incelenmiştir.

Malzemelerin CHNS-O analizi Thermo Finnigan Flash EA cihazı ile İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, MERLAB bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

Islatılabilirlik (Temas Açısı)

Fiberlerin ve matris malzemelerinin ıslatılabilirliği (temas açısı) optik tensiyometre (Attension Theta) yardımıyla İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Kimya Mühendisliği Bölümünde araştırılmıştır. Numune yüzeyine çeşitli noktalarda 5 µL su veya etil alkol damlacıkları damlatılmıştır. Damlacık etrafında Young-Laplace denklemi kullanılarak statik temas açısı belirlenmiştir.

3.3.2. Mekanik Özellikler

Tahribatlı Çekme-Basma Testi

Mekanik özelliklerin incelenmesi kapsamında üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin çeşitli mekanik özellikleri (elastisite modülü, mukavemet) öncelikle tahribatlı basma-çekme testleriyle (Devotrans, Türkiye) incelenmiştir. Aşağıdaki şekilde deneylerde kullanılan çekme-basma cihazı, çekme çeneleri ve çekme numunesi hazırlama kalıbı görülmektedir.



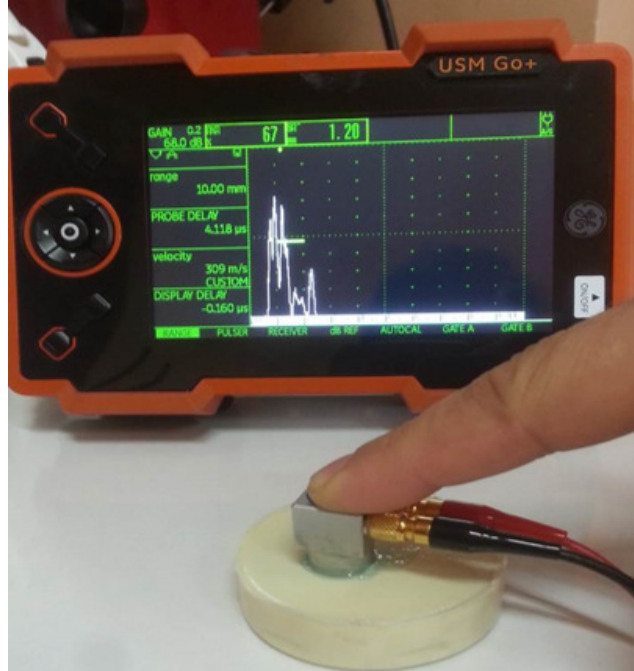
Şekil 3.16: Çekme-basma cihazı, çekme çeneleri ve çekme numunesi kalıbı

Tahribatsız Ultrasonik Muayene

Tahribatsız ultrasonik hız ölçümleri ultrasonik ölçüm cihazıyla yapılmıştır (General Electric, USM Go). Darbe-yankı tipi çift kristalli normal prob kullanılmıştır. Proben frekansı 4 MHz'dir. Ölçümler doğrudan temas tekniği ile yapılmıştır. Sesin probdan numuneye geçişini kolaylaştırmak için numune ile prob arasına ince bir sıvı film (yağ) sürülür. Elastisite modülü (E), ultrasonik dalgaların hızları yardımıyla, aşağıdaki (3.1) bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır. Ultrasonik zayıflama katsayısı (α) ise aşağıdaki (3.2) bağıntısı ile bulunmuştur. Bağıntılarda V_T ve V_L ultrasonik enine ve boyuna dalga hızları, A piklerin ekran yüksekliğini, d numune kalınlığını ifade etmektedir.

$$E = \rho V_T^2 \frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \quad (3.1)$$

$$\alpha = \frac{20 \log(A_1 / A_2)}{2d} \quad (3.2)$$



Şekil 3.17: Ultrasonik test cihazı

Dijital Radyografi (DR) ve Bilgisayarlı Tomografi (CT) İncelemesi

Tahribatsız yapı incelemesi kapsamında numunelerin yapısı Özel Avcılar Medicana Hastanesinde x-ışını dijital radyografi ile incelenmiştir (Siemens). Numuneler 90 kV, 20 mA şartlarında 10 saniye x-ışınları ile ışınlanmıştır.

Kompozitlerin yapılarının incelemesi kapsamında ayrıca bilgisayarlı tomografi (Dental CT Systems) metodu kullanılmıştır. Test kapsamında numuneler, 90 kVp, 9 mA değerlerinde x-ışını ile ışınlanmıştır. Işınlamada sistem numune etrafında dönmekte ve veriler konik x-ışını demeti ile elde edilmektedir. Dijital fotoğrafların değerlendirilmesi OnDemand3dDental yazılımı ile yapılmıştır.

Tahribatsız Termal Kamera Cihazı ile İnceleme

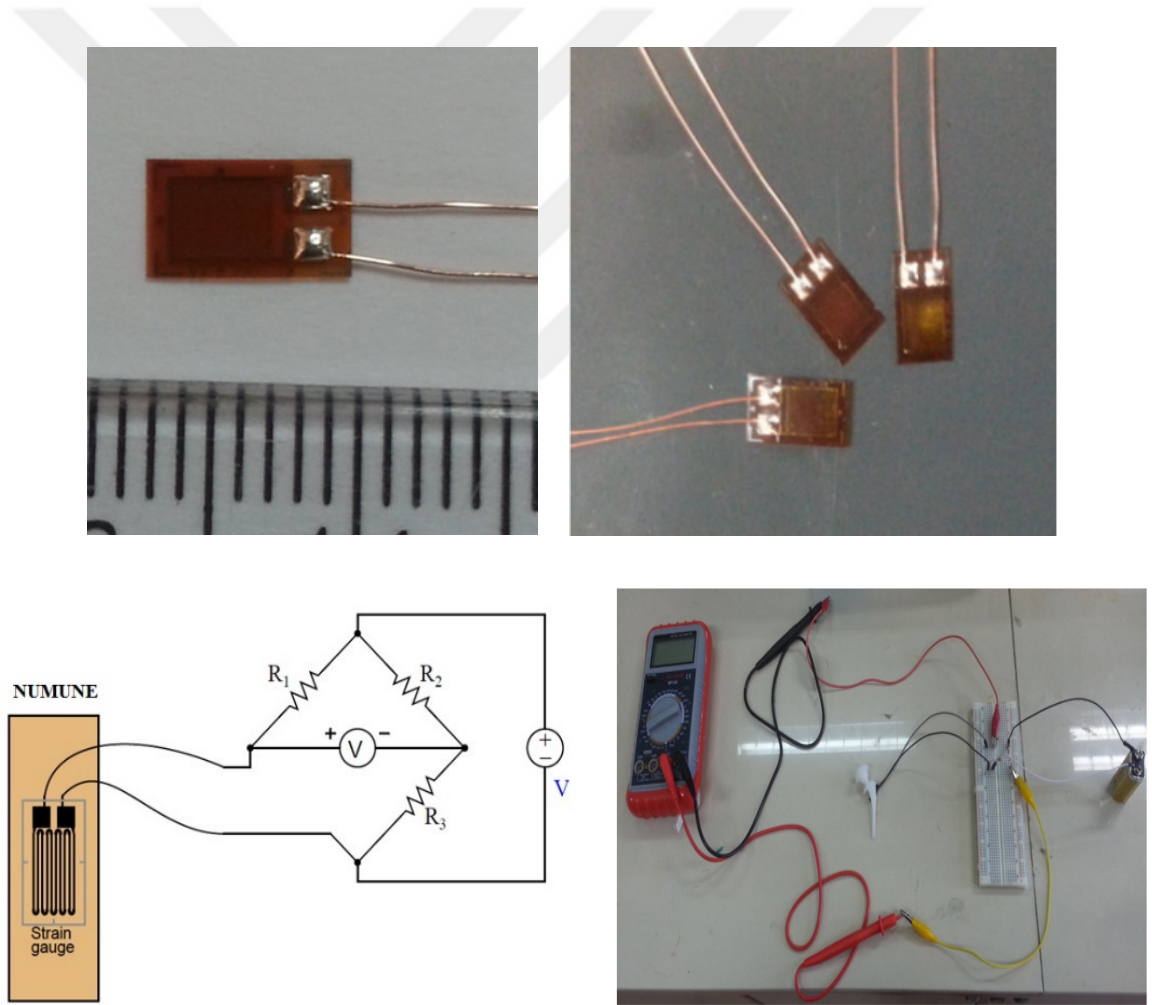
Numuneler ayrıca aşağıda görülen termal kamera (IR görüntüleme) cihazı (Bosch GTC 400 C) ile tahribatsız olarak incelenmiştir. Termal görüntüleme cihazı -10 ile 400 °C sıcaklıkları arasında ölçüm yapabilme kapasitesine sahiptir. Cihazın çözünürlüğü 0.1 °C değerinde olup kızılötesi (IR) ölçüm hassasiyeti ± 3 °C değerindedir. Cihaz 19200 (160x120) piksellik kızılötesi (IR) sensöre sahiptir. Cihaz mikrobolometre tipi kızılötesi (IR) sensöre sahiptir.



Şekil 3.18: Termal kamera cihazı

Gerinim Ölçer (Strain Gauge) ile Mekanik Analizi

Kompozit numunelerdeki gerilim (stress) ve gerinim (deformasyon) strain gauge (gerinim ölçer) yöntemi yardımı ile ölçülmüştür (BF350-3AA). Gerinim ölçerin direnç değeri 350Ω , boyutları 7.4×4.4 mm, hassasiyeti 2.0-2.2 değerindedir. Öncelikle incelenecek numunelere yüzey hazırlama işlemi yapılmış, daha sonra siyano-akrilat esaslı yapıştırıcı ile gerinim ölçer numune üzerine daha önceden belirlenmiş uygun bölgeye yapıştırılmıştır. Son olarak gerinim ölçerin bağlantı kabloları lehimleme ile ölçüm devresine bağlanmıştır.



Şekil 3.19: a) Gerinim ölçerler, b) rozet, c) Wheatstone köprüsü

Gerinim ölçer ile direnç değişimini doğrudan ölçmek çok küçük olduğundan mümkün değildir. Wheatstone Köprüsü ölçülemeyen çok küçük direnç değişim değerlerini ölçülebilir voltaj değişim değerlerine dönüştürür.

Gerinim ölçer (strain gauge) direnç değişimin ölçerek gerinim (deformasyon) miktarını ölçmektedir. ε : normal genleme, R direnç, ΔR direnç değişimi, K hassasiyet (gauge factor). e : çıkış voltajı, E : giriş voltajı, R_1 strain gauge direnci, R_2 , R_3 ve R_4 sabit dirençler. $\Delta R \ll R$, olduğundan, strain (ε) çıkış voltajı ölçümü ile belirlenebilir (Δe).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R / R}{K} \quad (3.3)$$

$$e = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E \quad (3.4)$$

$$\Delta e = \frac{\Delta R}{4R} E = \frac{E}{4} K \varepsilon \quad (3.5)$$

Asal gerilmelerin/genlemelerin ölçümü (45 ° rozet)

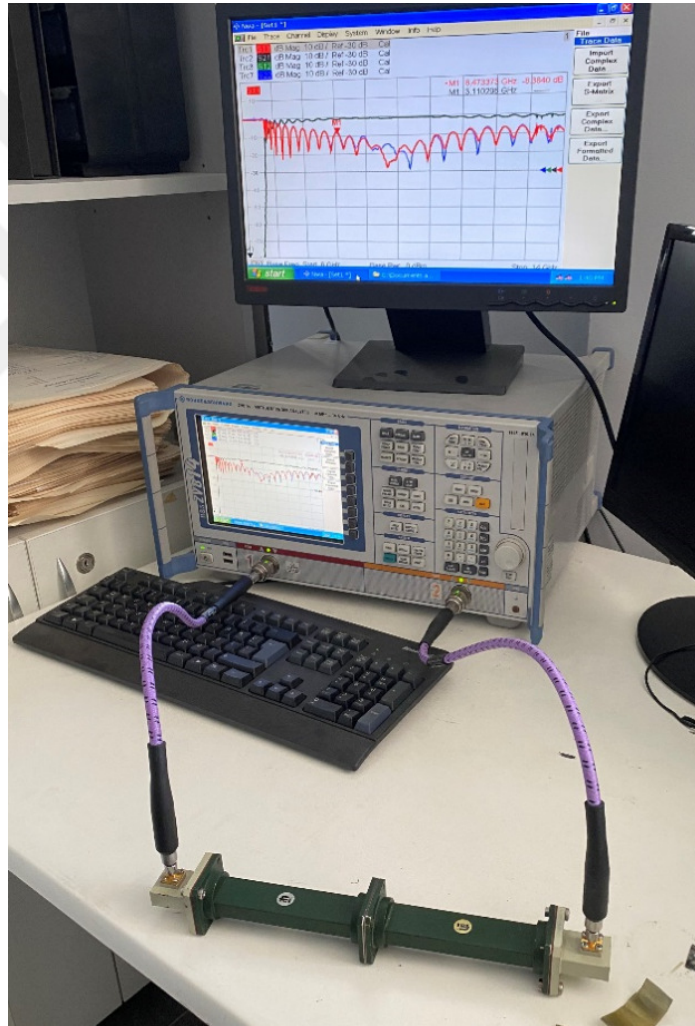
$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{45} - \frac{\varepsilon_{90} + \varepsilon_0}{2} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_{90} + \varepsilon_0}{2} + \sqrt{\frac{(\varepsilon_{90} - \varepsilon_{45})^2}{2} + \frac{(\varepsilon_{45} - \varepsilon_0)^2}{2}} \quad (3.7)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_{90} + \sigma_0}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_{90} - \sigma_{45})^2}{2} + (\tau_{45})^2} \quad (3.8)$$

Vector Network Analyser (VNA)

Numunelerin absorbans ve geçirgenlik değerleri İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde bulunan Vector Network Analyser (VNA) cihazı ile ölçülmüştür ve S11, S12, S21 ve S22 absorbans değerleri belirlenmiştir. Aşağıdaki şekilde Vector Network Analyser (VNA) cihazı görülmektedir.



Şekil 3.20: Vector Network Analyser (VNA) cihazı

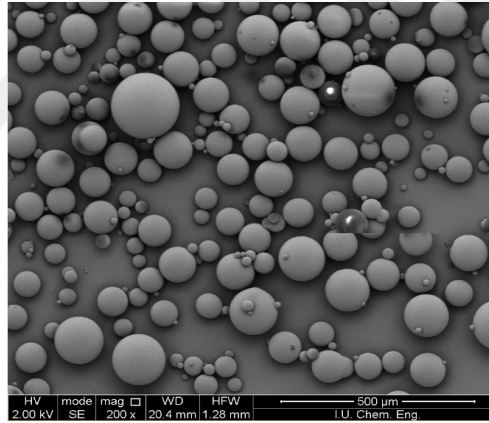
4. BULGULAR

4.1. POLİMER MATRSİLİ KOMPOZİT MALZEMELER

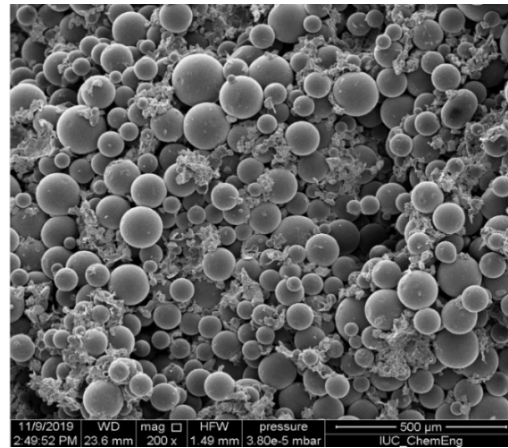
4.1.1. Mikroyapı

PMMA Matrisli Kompozit Malzemeler

Aşağıdaki Şekilde kompozit numune üretiminde hammadde olarak kullanılan başlangıç PMMA tozunun taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafı ve PMMA-Ti kompozit numunenin SEM fotoğrafları görülmektedir. Genel olarak takviye parçacıkların polimer matris tarafından ıslatıldığı ve oldukça homojen bir mikroyapının sağlandığı söylenebilir.



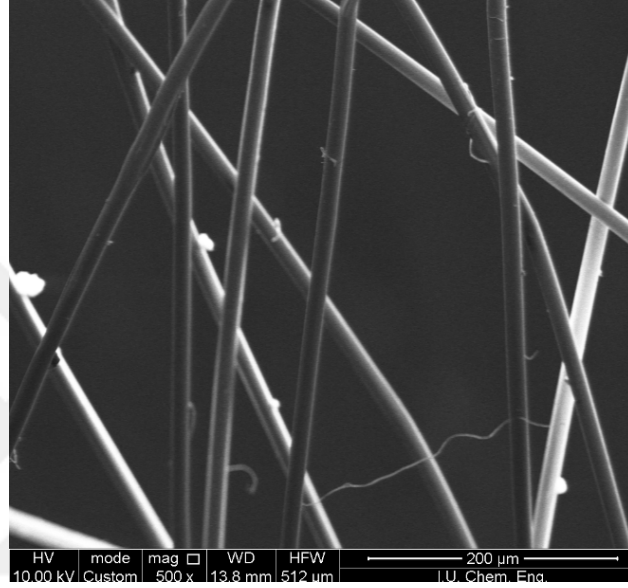
(a)



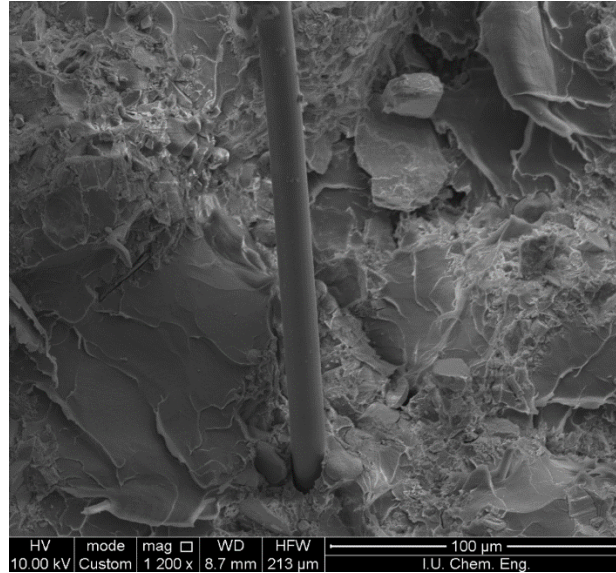
(b)

Şekil 4.1: a) PMMA tozu, b) PMMA-Ti kompozit.

Cam Fiber Takviyeli PMMA Matrisli Kompozit Malzeme: Aşağıdaki Şekilde numune üretiminde kullanılan cam-fiberler ve cam-fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit malzemenin mikroyapı resimleri görülmektedir. SEM fotoğrafından da görüldüğü gibi takviye fiberlerin polimer matris tarafından ıslatıldığı ve homojen bir yapının sağlandığı söylenebilir.



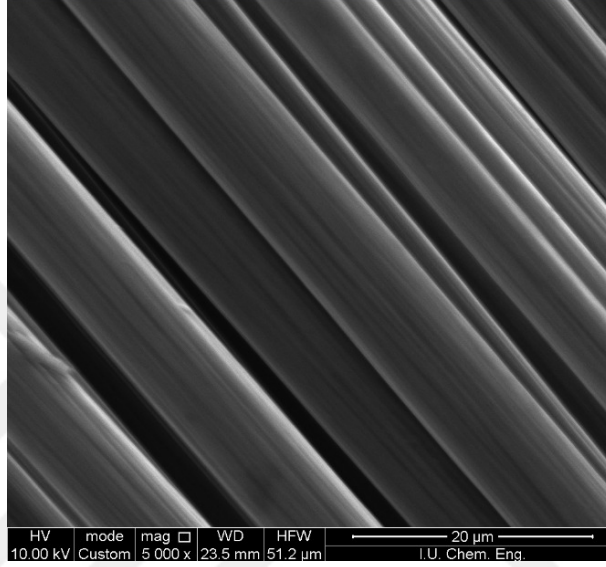
(a)



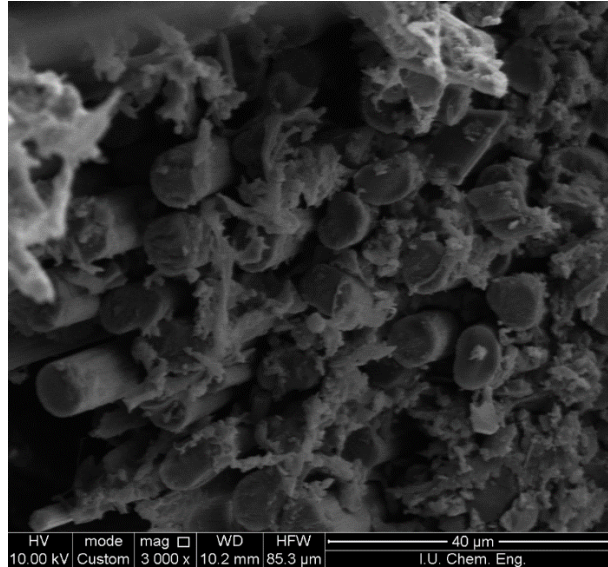
(b)

Şekil 4.2: a) Cam-fiber, b) fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit.

Karbon Fiber Takviyeli PMMA Matrisli Kompozit Malzeme: Aşağıdaki Şekilde kullanılan karbon fiberler ve karbon-fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit mikroyapısı görülmektedir. SEM fotoğrafından da görüldüğü gibi takviye fiberlerin polimer matris tarafından ıslatıldığı ve homojen bir yapının sağlandığı söylenebilir.



(a)

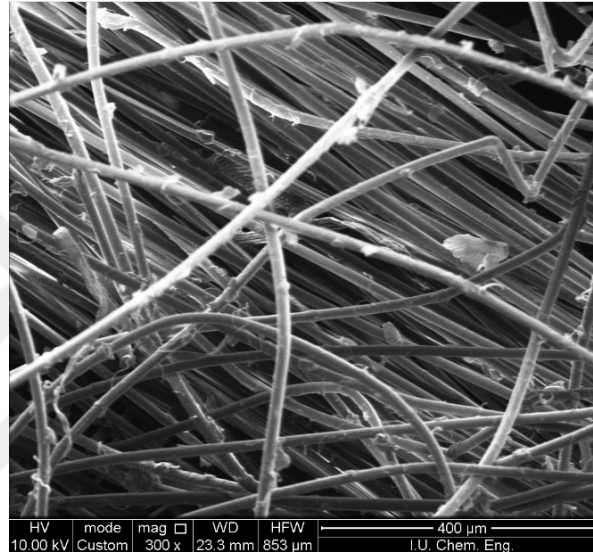


(b)

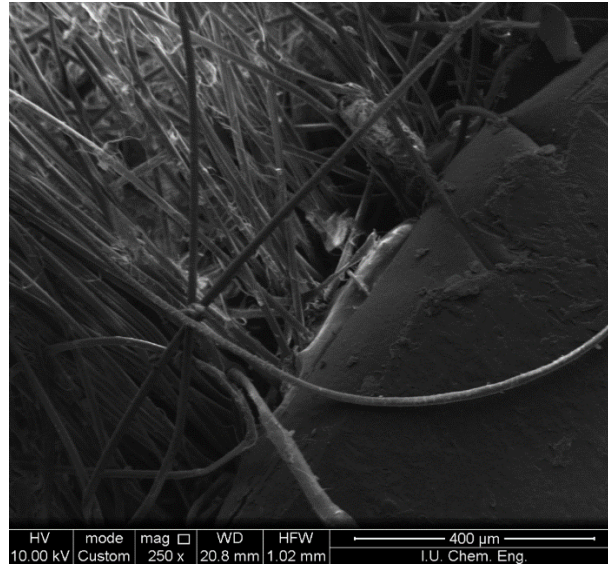
Şekil 4.3: Karbon-fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit.

Aramid (Kevlar) Fiber Takviyeli PMMA Matrisli Kompozit Malzemeler:

Aşağıdaki Şekilde fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılan aramid (Kevlar) fiberler ve aramid-fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit malzemenin mikroyapısı görülmektedir. SEM fotoğrafından da görüldüğü gibi takviye fiberlerin polimer matris tarafından ıslatıldığı ve homojen bir karışımın sağlandığı söylenebilir.



(a)



(b)

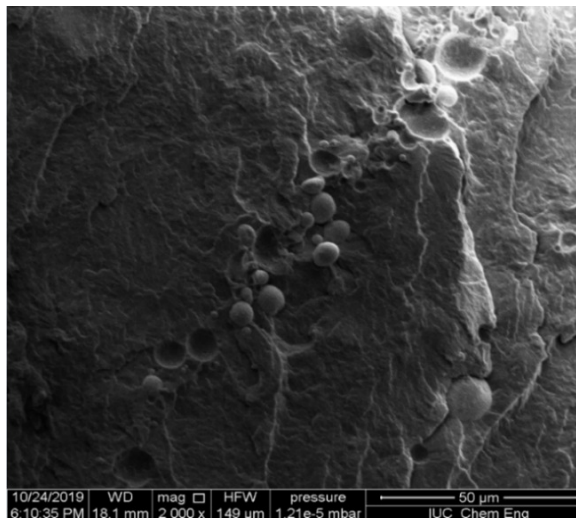
Şekil 4.4: Aramid-fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit.

Polietilen (PE) Matrisli Kompozit Malzemeler

Aşağıdaki Şekilde plastik enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiş numunelerin (yollukları ile beraber) fotoğrafı görülmektedir. Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretim esnasında uygun olmayan viskozite, düşük/yüksek akıcılık, besleme gücü karşılaşılmamıştır. Aşağıdaki Şekilde ayrıca enjeksiyonla üretilmiş parçacık (Sn tozu) takviyeli PE matrisli kompozit numunenin mikroyapısının SEM fotoğrafı görülmektedir. Takviyelerin yapıda homojen dağıldığı ve PE matris tarafından ıslatıldığı söylenebilir.



(a)

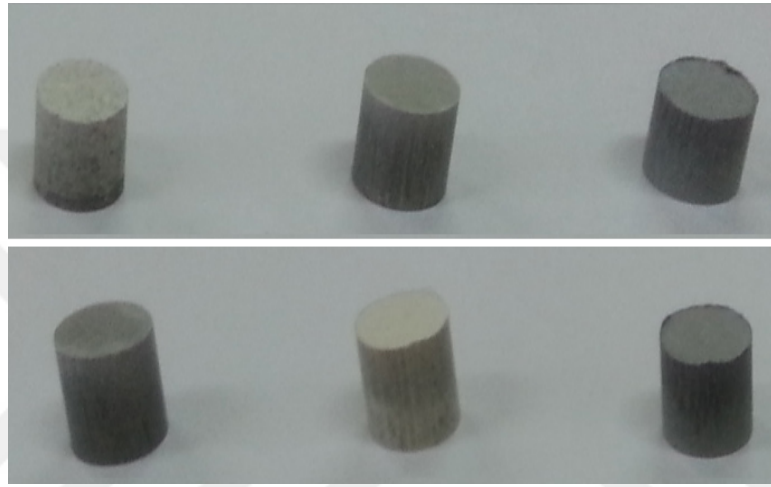


(b)

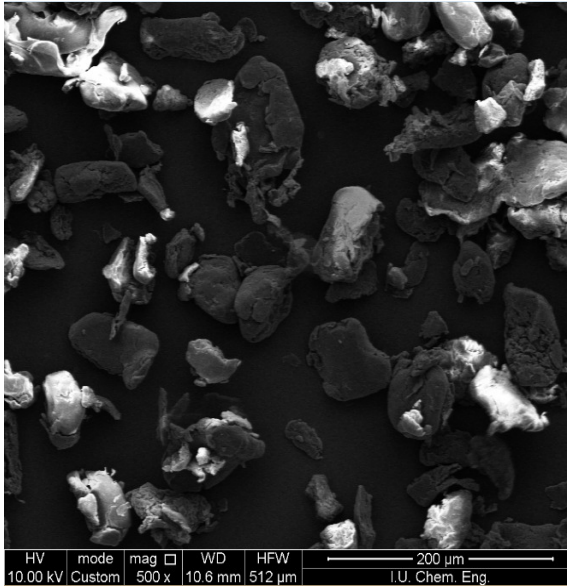
Şekil 4.5: a) Enjeksiyonla üretilmiş numune ve b) Sn tozu takviyeli PE matrisli kompozit.

PEEK Matrisli Malzemeler

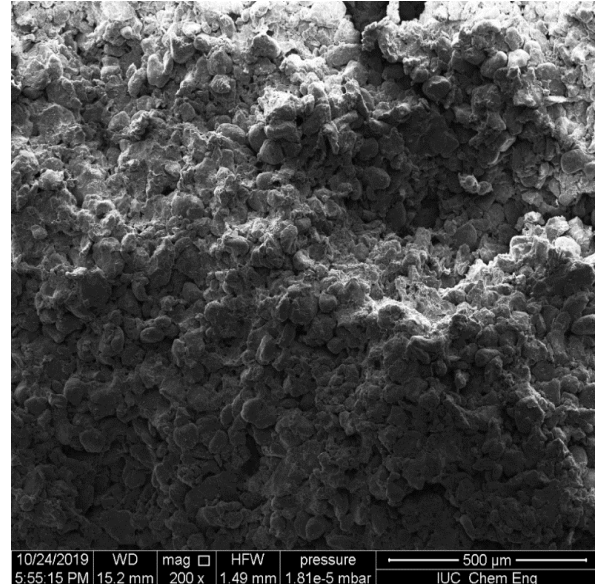
Aşağıdaki Şekilde presleme-sinterleme (geleneksel toz metalurjisi) ile üretilmiş polietereterketon (PEEK) matrisli parçacık (Ti tozu) takviyeli kompozit malzemelerin fotoğrafları ve mikroyapılarının SEM resimleri görülmektedir. Genel olarak, takviyelerin (Ti tozu) yapıda homojen dağıldığı ve PEEK matris tarafından ıslatıldığı söylenebilir.



(a)



(b)

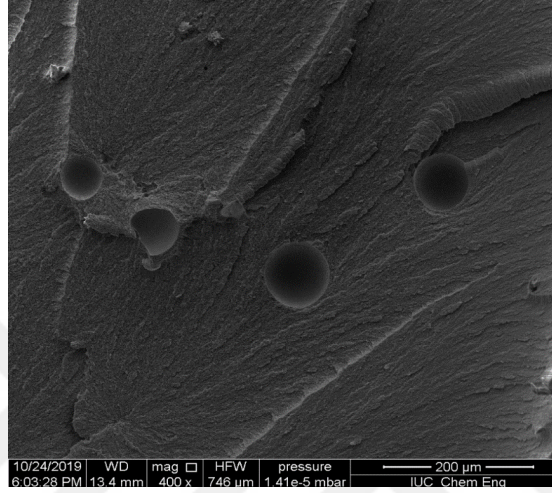


(c)

Şekil 4.6: a) PEEK numuneler, b) PEEK tozu, ve c) PEEK-Fe kompozit.

PU Matrisli Malzemeler

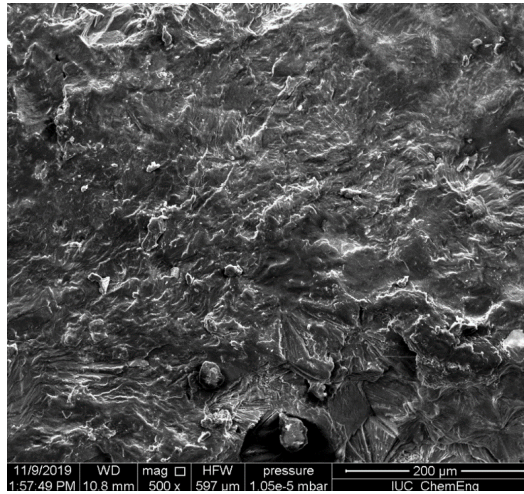
Aşağıdaki Şekilde Fe tozu takviyeli PU matrisli kompozit malzemenin SEM resmi görülmektedir. Fe tozlarının homojen dağıldığı ve PU matris tarafından ıslatıldığı söylenebilir.



Şekil 4.7: PU-Fe tozu kompozit numunenin SEM fotoğrafı

PEG Matrisli Malzemeler

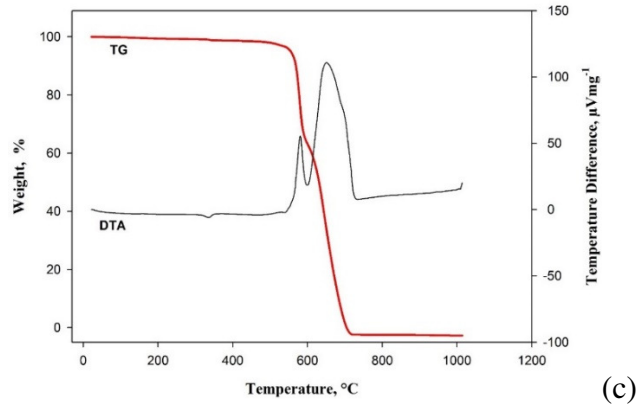
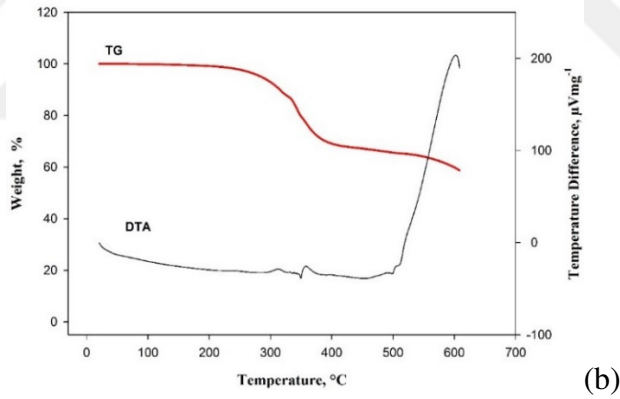
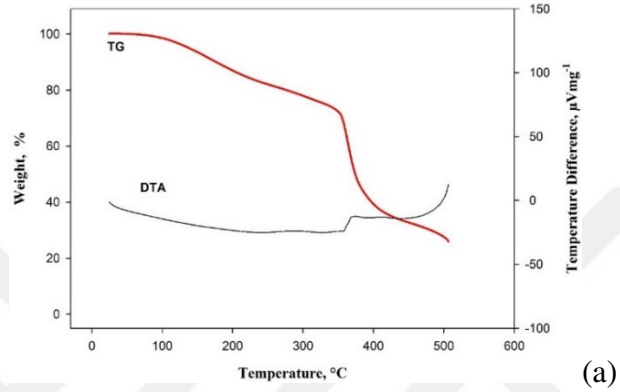
Aşağıdaki Şekilde Ti tozu takviyeli PEG matrisli kompozit malzemenin SEM resmi görülmektedir. Ti tozlarının homojen dağıldığı ve PEG matris tarafından ıslatıldığı söylenebilir.



Şekil 4.8: PEG-Ti numunenin SEM fotoğrafı

Termal Analiz Sonuçları (TG/DTA)

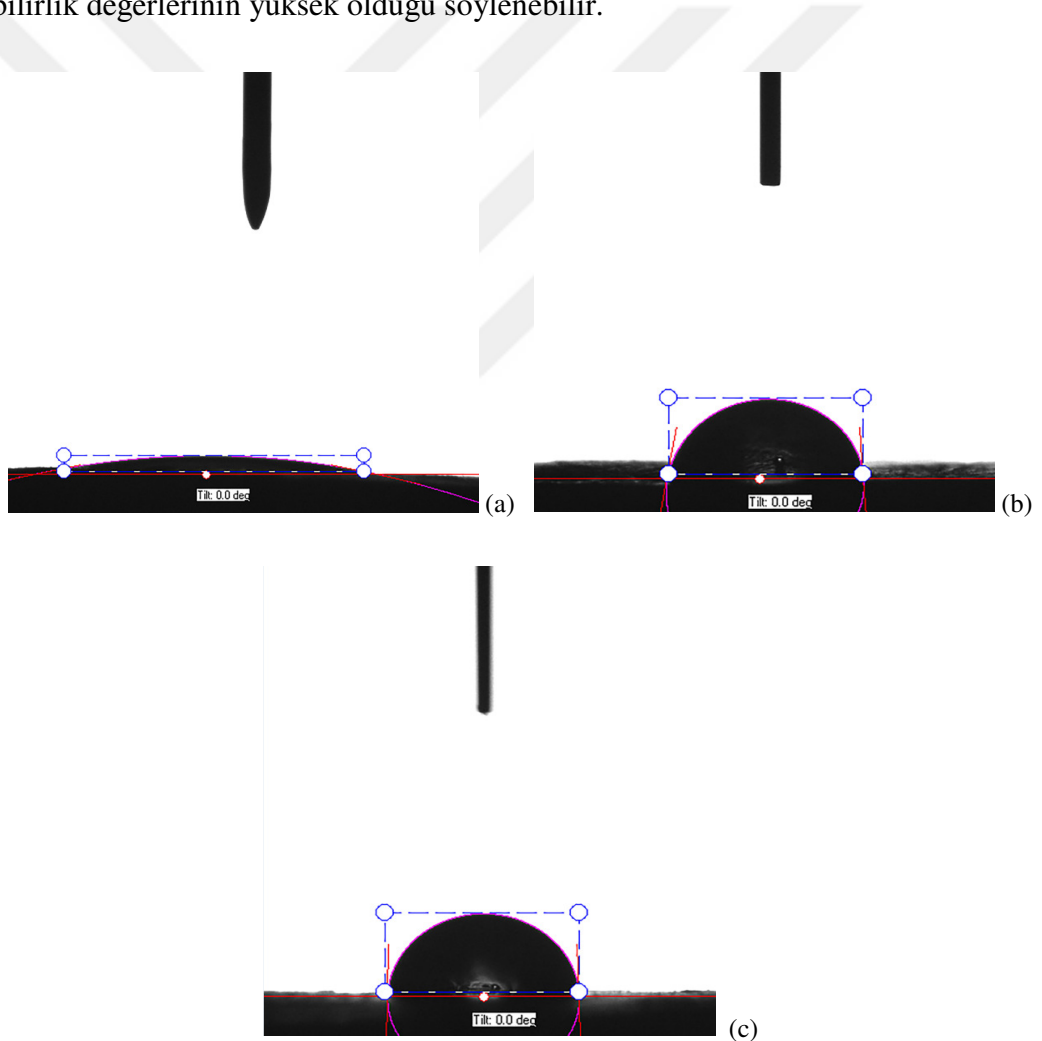
Malzemelerin termal davranışları ve yapıları TGA ve DTA ile incelenmiştir. Aşağıdaki şekilde üretimde kullanılan malzemelerin (PU, PEEK ve epoksi) TGA/DTA sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.9: Kompozitlerin DTA/TG analiz sonuçları a) epoksi-Ni, b) PU-Ni, c) PEEK

Islatılabilirlik Testi Sonuçları

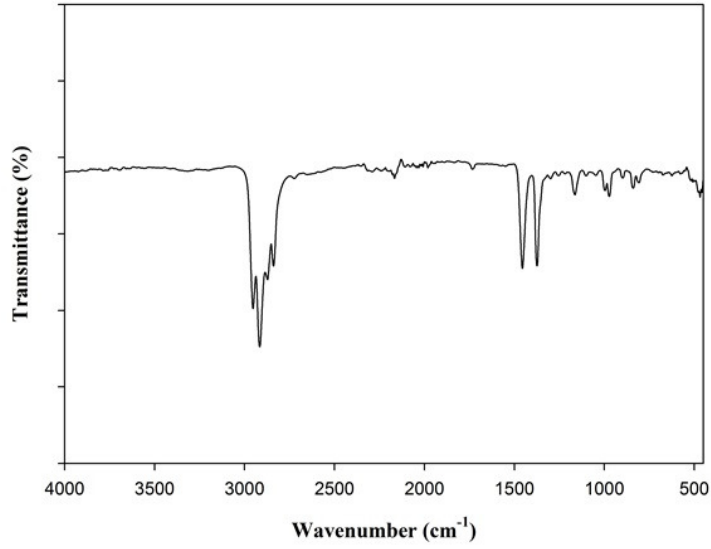
Kompozit malzemelerde takviye ve matris arasındaki ıslatılma çok önemlidir. Bu amaçla, malzemelerin ıslatılabilirliği (temas açısı) optik tensiyometre ile incelenmiştir. Genel olarak, hidrofil yüzeylerde, su veya etil-alkol damlasının temas açısı 90° değerinden küçük hidrofob yüzeylerde ise 90° değerinden büyüktür. Aşağıdaki Şekilde matris malzemelerinin etil alkol ile ıslatılabilirlikleri a) PE-etil alkol, b) PMMA-etil alkol, c) PEEK-etil alkol görülmektedir. Temas açısını gösteren fotoğraflar incelendiğinde, tez kapsamında kullanılan malzemelerin ıslatılabilirlik değerlerinin yüksek olduğu söylenebilir.



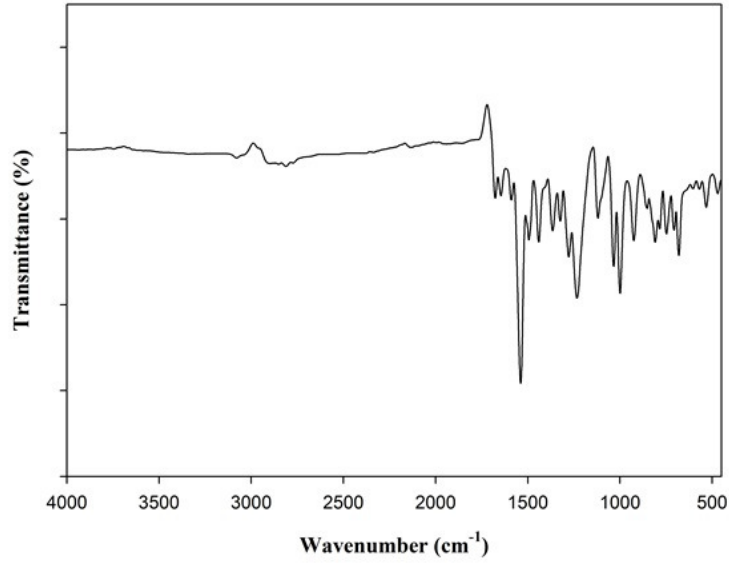
Şekil 4.10: Matrislerin etil alkol ile ıslatılabilirlikleri a) PE, b) PMMA, c) PEEK.

FTIR Analizi Sonuçları

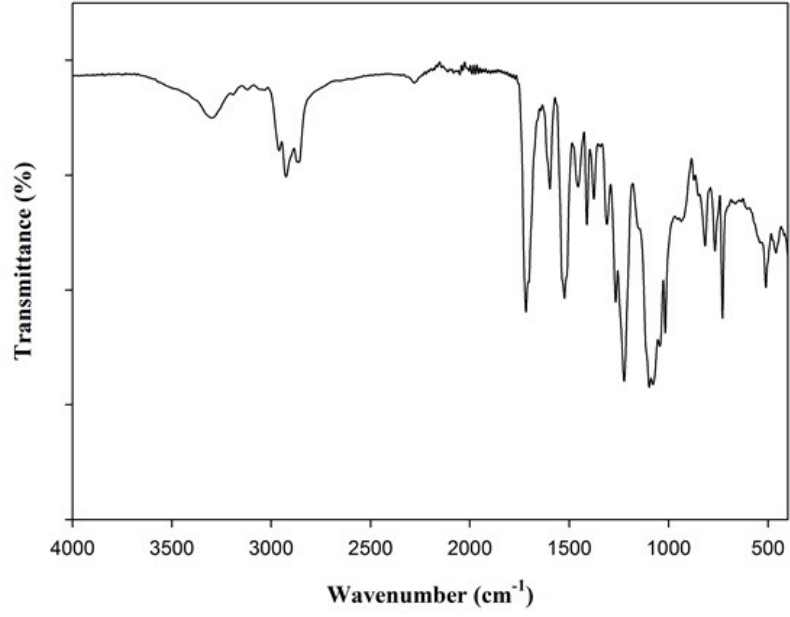
Polimer malzemelerin kimyasal yapılarının incelenmesi kapsamında Fourier transform infrared (FTIR) analizi gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekillerde PE, PMMA, PU ve epoksinin FTIR grafikleri görülmektedir.



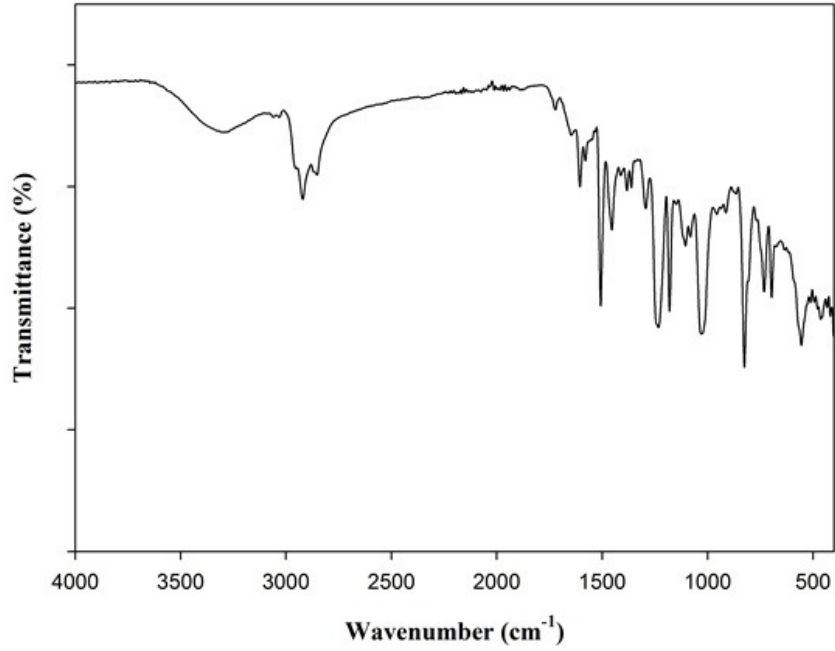
Şekil 4.11: PE numunenin FTIR grafiği.



Şekil 4.12: PMMA numunenin FTIR grafiği.

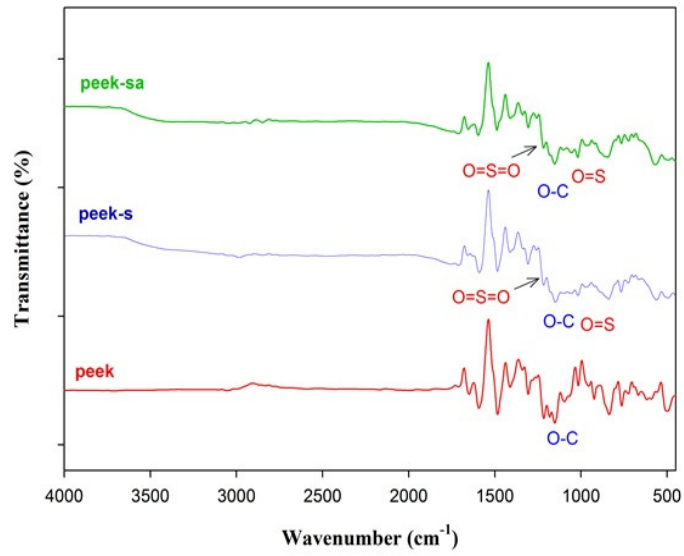


Şekil 4.13: PU numunenin FTIR grafiği.

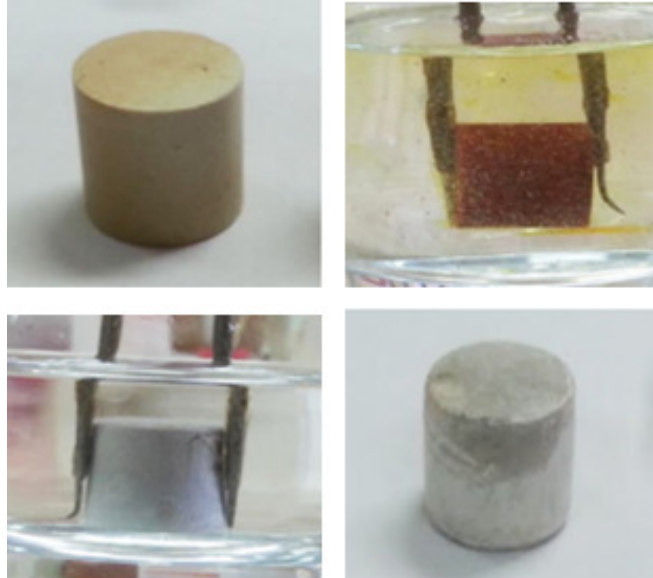


Şekil 4.14: Epoksi numunenin FTIR grafiği.

Aşağıdaki Şekilde PEEK ve sülfonasyon yüzey işlemi görmüş PEEK numunelerin FTIR sonuçları görülmektedir. PEEK numuneler sülfürik asitle muamele (sülfonasyon), destile su ile yıkama, aseton ile muamele ve kurutma adımlarından geçmiştir. Sülfonasyon yüzey işlemi sülfürik asidin dağlama etkisi ile PEEK yüzeyinde mikroporoz bir yüzey ve aynı zamanda yüzeye tutunan hidrofil karakterli sülfon (SO_3H) fonksiyonel grupları nedeniyle daha aktif ve ıslatılabilirliği yüksek bir yüzey elde edilir.



(a)

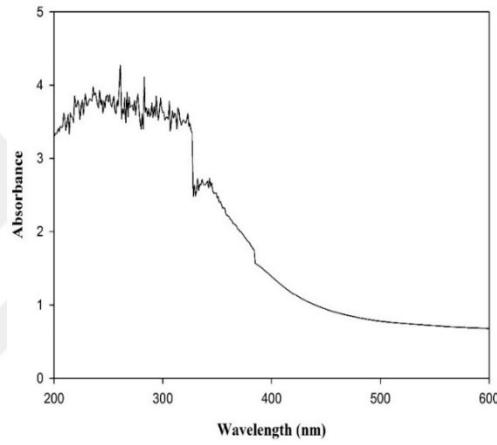


(b)

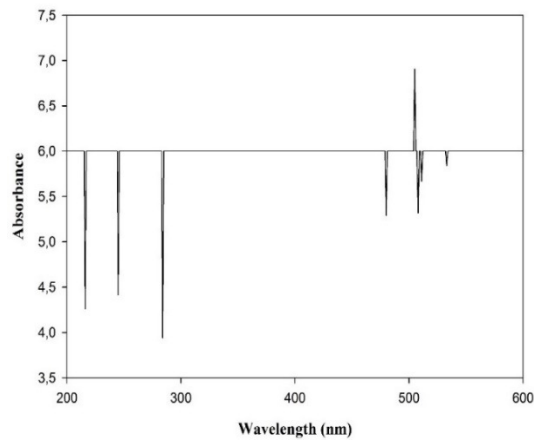
Şekil 4.15: Yüzey işlem görmüş PEEK numunelerin a) FTIR grafikleri ve b) fotoğrafları.

UV Analizi Sonuçları

Malzemelerin kimyasal yapılarının incelenmesi kapsamında ultraviyole (UV) absorpsiyon spektroskopisi analizi gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekilde epoksi ve poliüretan numunelerin UV absorpsiyon grafikleri görülmektedir. Metal tozu takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler havacılık uygulamaları için radyasyon emici malzeme (RAM) amaçlı kullanım potansiyeline sahiptir. Genel olarak, metal tozu takviyesi absorpsiyon değerlerini geliştirmiştir.



(a)

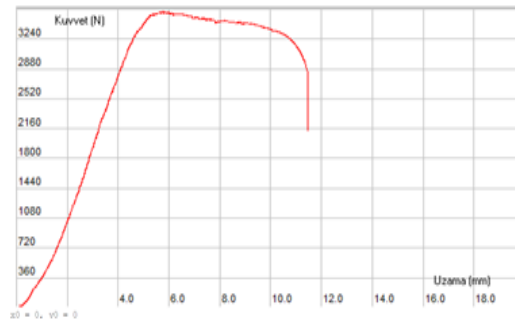


(b)

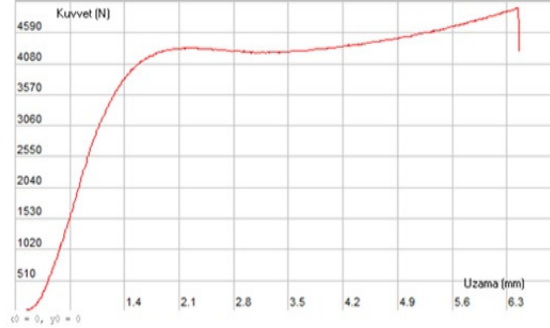
Şekil 4.16: Epoksi ve PU numunelerin UV absorpsiyon grafikleri.

4.1.2. Mekanik Özellikler

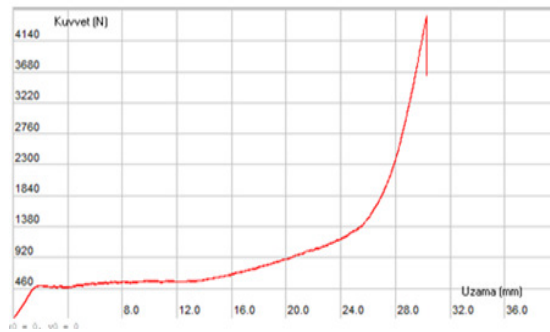
Malzemelerin mekanik özelliklerinin tahribatlı karakterizasyonu kapsamında çekme-basma cihazı ile mekanik özelliklerin incelenmesi gerçekleştirilmiştir Şekil 4.17’de PU matrisli kompozitin basma eğrisi görülmektedir. Şekil 4.18’de PE matrisli kompozitin basma eğrisi görülmektedir. Şekil 4.19’da PMMA matrisli kompozitin basma eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.17: PU Kompozitin basma eğrisi



Şekil 4.18: PE Kompozitin basma eğrisi



Şekil 4.19: PMMA Kompozitin basma eğrisi

Tahribatsız Ultrasonik Test Sonuçları

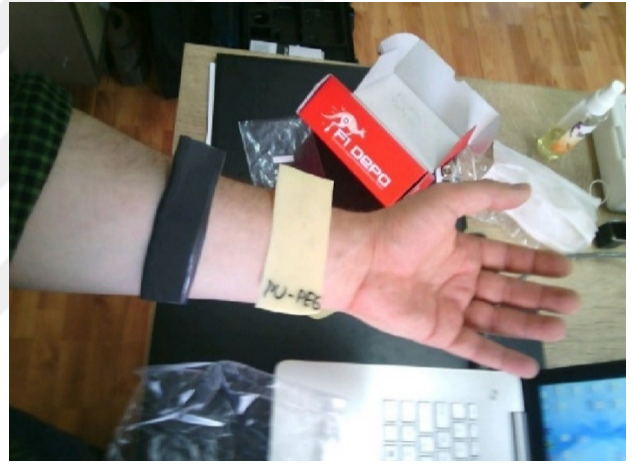
Kompozit malzemelerin tahribatsız karakterizasyonu kapsamında ultrasonik test cihazı ile inceleme gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki tabloda polimer matrisli kompozit (PU, Epoksi, PEEK, PMMA ve PE) numunelerin tahribatsız ultrasonik test ile ölçülmüş ses hızı ve hesaplanmış elastisite modülleri görülmektedir. Takviye ilavesi elastisite modülünü (ultrasonik dalgaların hızını) değiştirmiştir. Takviyeli kompozit ultrasonik hız ve elastisite modülü değerleri numunenin farklı noktalarında değişmemiştir (izotropik davranış). Aşağıdaki tabloda üretilen kompozitlerin tahribatsız ultrasonik yöntem ile belirlenen elastisite modülleri ve tahribatlı basma testi ile bulunan elastisite modülleri görülmektedir. Tahribatlı basma testi ve tahribatsız ultrasonik test ile bulunan elastisite modülü değerleri birbirine yakın olup değerler arasında yaklaşık % 5-10 sapma mevcuttur.

Tablo 4.1: Ultrasonik yöntem ile belirlenen elastisite modülleri

Malzeme	Ultrasonik Hız (m/s)	(Ultrasonik Test) Elastisite Modülü GPa	(Basma Testi) Elastisite Modülü GPa
PMMA	1960	2,9	2,7
PMMA-Metal tozu	2400	4,4	4,1
PU	1500	1,7	1,8
PU-Grafit tozu	1750	2,6	2,9
Epoksi	980	0,4	0,4
PEEK	2020	3,5	3,7
PEEK-Metal tozu	2610	5,7	5,4
PE	1000	0,5	0,4
PE-Metal tozu	1600	1,9	1,7

Termal Kamera İncelemesi Sonuçları

Malzemelerin yapılarının tahribatsız karakterizasyonu kapsamında termal görüntüleme cihazı ile inceleme gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki fotoğraflarda çeşitli numunelerin fotoğrafları ve aynı anda termal görüntüleme (kamera) cihazı (ısı dedektörü) ile çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Metal tozu takviyeli polimer matrisli kompozitler havacılık uygulamaları için düşük görünürlük (hayalet) teknolojisi amaçlı radyasyon emici malzeme ve termal hayalet amaçlı kullanım potansiyeline sahiptir. Görüldüğü gibi metal tozu takviyesi polimerlerin görünürlüğü azaltmıştır.

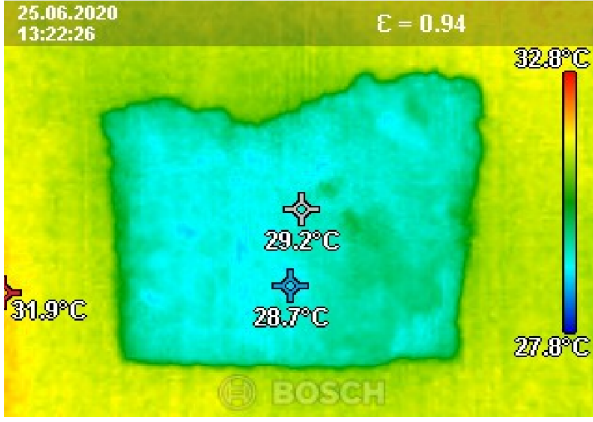


(a)

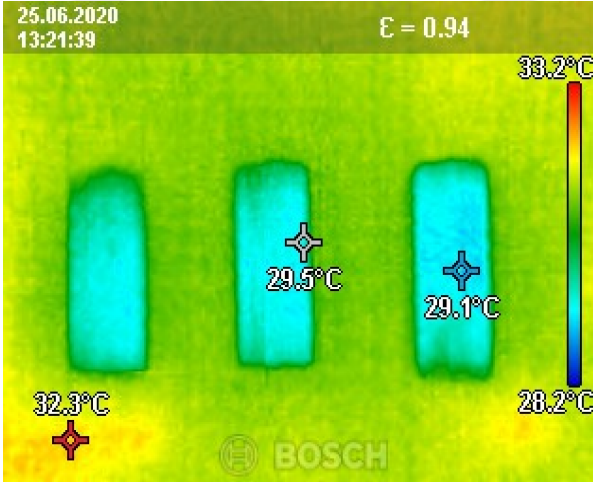


(b)

Şekil 4.20: PU kompozit numunelerin termal görüntüleme cihazı sonuçları



(a)

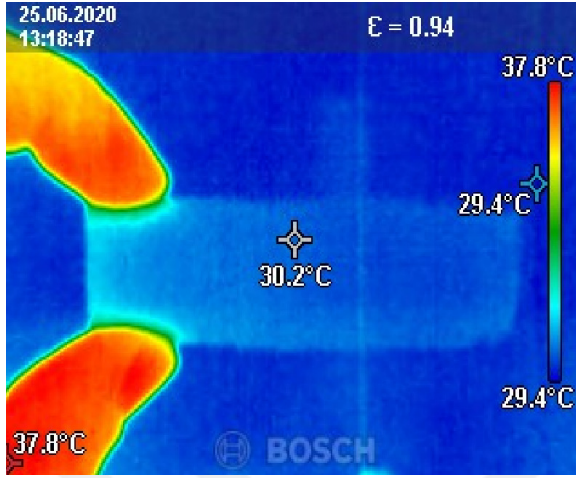


(b)



(c)

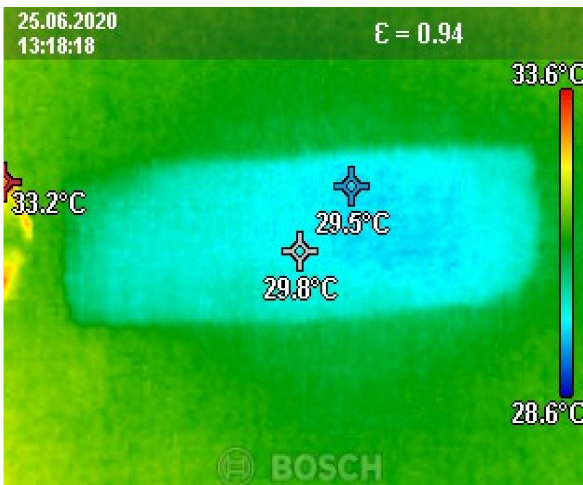
Şekil 4.21: Kendi-kendini onaran numunelerin termal görüntüleme cihazı sonuçları



(a)



(b)



(c)

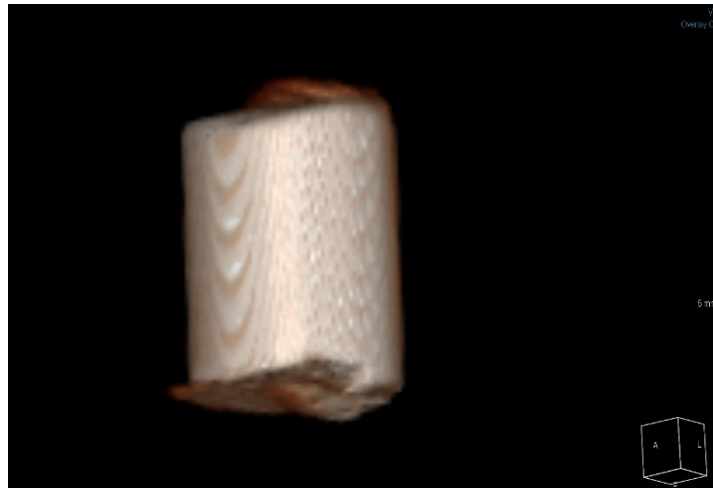
Şekil 4.22: Fiber takviyeli PMMA numunelerin termal görüntüleme cihazı sonuçları

Radyografi ve Tomografi İncelemesi Sonuçları

Aşağıdaki şekilde numunelerin dijital radyografi (DR) ve bilgisayarlı tomografi (CT) fotoğrafları görülmektedir. Genel olarak numunelerin yeterli radyopaklık gösterdikleri söylenebilir. Yapıda iri çatlak veya delaminasyona rastlanmamıştır. Radyografi ve tomografi yöntemleri kompozit malzemelerde fiber ve matris dağılımı, çatlak, ve gözenek gibi iç yapı özelliklerinin incelenmesinde kullanılabilir.



(a)

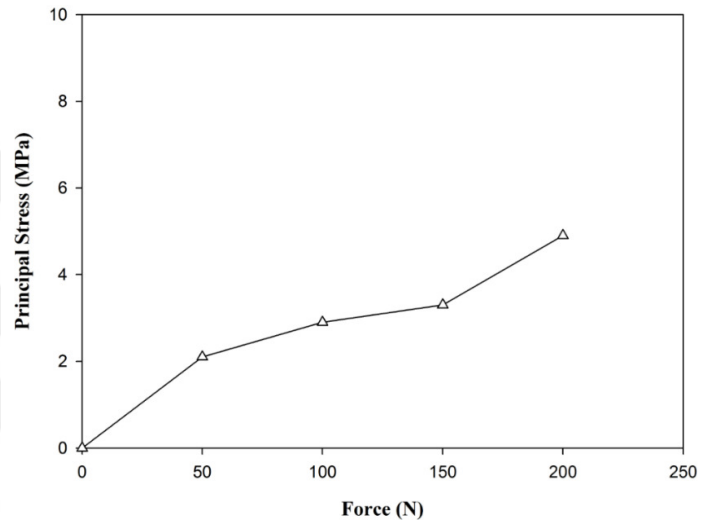


(b)

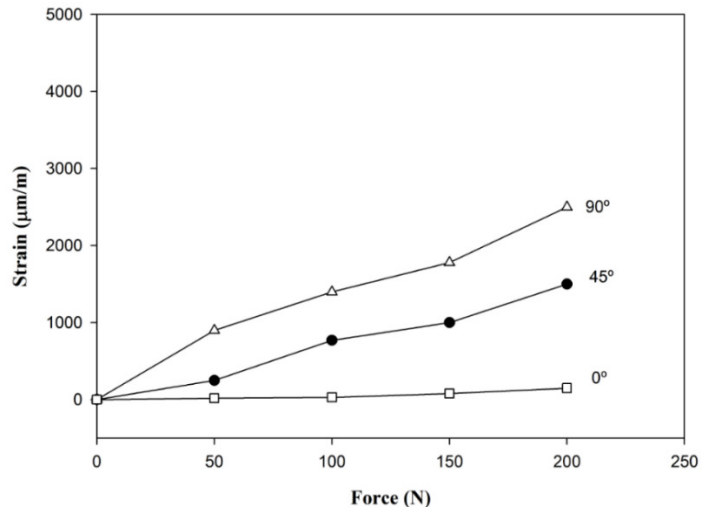
Şekil 4.23: Numunelerin a) radyografi fotoğrafı, c) tomografi fotoğrafı

Gerinim Ölçer (Strain Gauge) Sonuçları

Aşağıdaki şekilde kompozit numunelerin gerinim ölçer (strain gauge) sonuçları (asal gerilme ve gerinim) görülmektedir. Artan yük ile birlikte asal gerilme değerinde artış meydana gelmiştir.



(a)

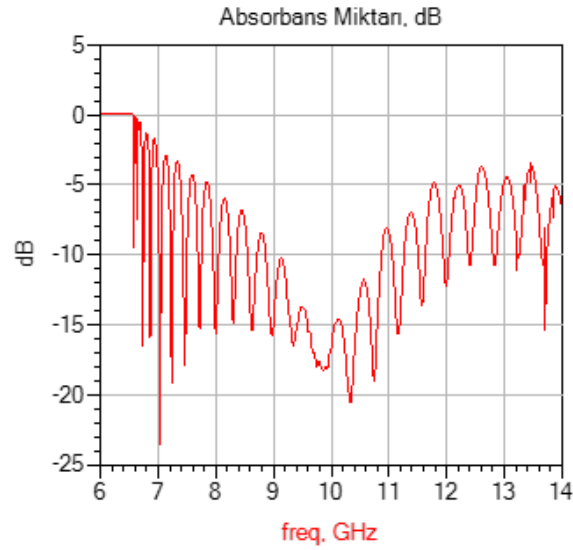
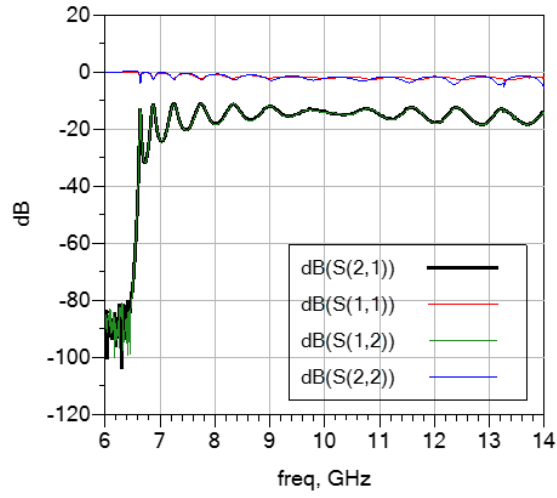


(b)

Şekil 4.24: Gerinim ölçer sonuçları

Vector Network Analyzer (VNA) Ölçüm Sonuçları

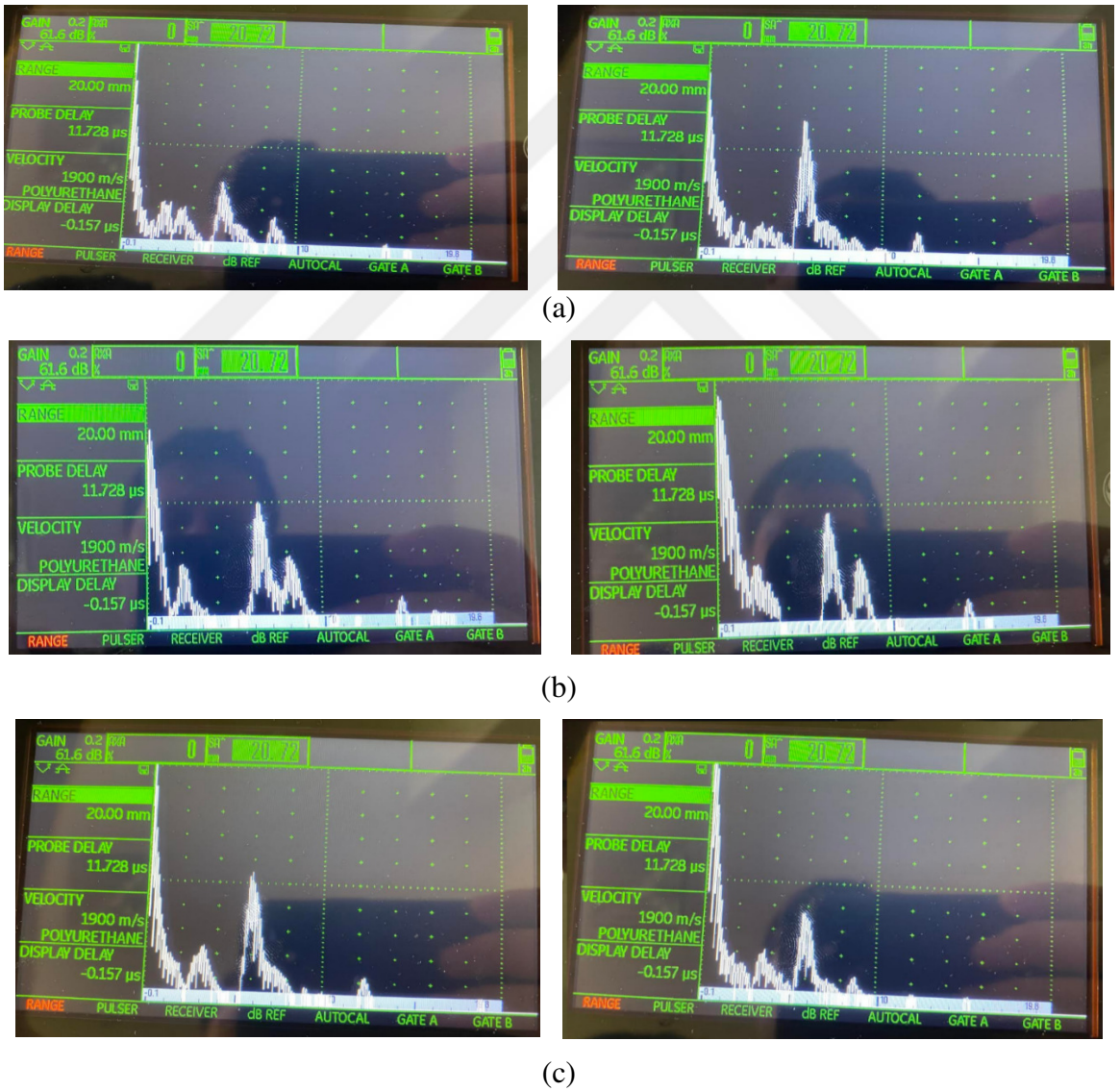
Radar absorban malzeme amaçlı malzemelerin absorbands değerleri Vector Network Analyzer (VNA) cihazı ile ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekilde parçacık takviyeli PU matrisli kmpozit numunenin VNA Ölçüm Sonuçları (absorbans) görülmektedir.



Şekil 4.25: Vector Network Analyzer (VNA) Ölçüm Sonuçları

4.2. KENDİ-KENDİNİ ONARAN MALZEMELER

Aşağıdaki şekilde kendi-kendini onaran kompozit numunede onarımdan önce (çatlaklı malzeme) ve onarımdan sonra (çatlaksız malzeme) ultrasonik cihaz ekran görüntüsü görülmektedir. Ekranlarda birinci ve ikinci arka cidar yankıları ve arka cidar yankıları arasındaki hata (çatlak) pikleri görülmektedir. Ayrıca, kendi kendine onarmanın sonucu olarak arka cidar pikleri arasındaki hata piklerinde azalma veya tamamen yok olma görülmektedir.



Şekil 4.26: Kendi-kendini onaran numunede ultrasonik cihaz ekran görüntüsü

Fantom Amaçlı Numuneler

Bu çalışma kapsamında üretilen parçacık takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler ayrıca medikal fantom malzemesi olarak da kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Üretilen polimer matrisli kompozit malzemeler, halen bu amaçla yaygın olarak kullanılan parafin esaslı fantom malzemelerine alternatif olabilme potansiyeline sahiptir.

Fantomlar kısaca doku eşdeğeri malzeme olarak tanımlanabilir. Fantomlar dokuların modellenmesi için kullanılan polimer esaslı malzemelerdir. Fantomlar doku eşdeğeri malzemedir ve yapıları ve radyasyonun insandaki etkisini temsil edecek ortamı sağlarlar. Medikal görüntüleme işlemlerinde kullanılan fantomlar, görüntüleme sisteminin ölçüm limitlerini belirlemede ve görüntü kalitesini değerlendirmede kullanılmaktadır. Kontrast ve çözünürlük sınırlarını belirlemek için kullanılırlar.

Kullanım alanlarına göre fantomlar

- Mamografi
- CT
- MRI
- Dental Görüntüleme
- Nükleer Tıp (Sintigrafi)
- Radyoterapi
- Radyografi - Floroskopi

Doku eşdeğeri malzeme (fantom) geliştirmek için gerekli temel kriterler şunlardır:

- Elementel eşitlik (% C ve % H)
- Kütle zayıflatma katsayısı
- Atom numarası
- Ultrasonik zayıflama
- Yoğunluk

Aşağıdaki tablolarda kullanılan polimerlerin ve karşılaştırma amaçlı olarak verilen çeşitli vücut kısımlarının (kemik, yumuşak doku, cilt) kimyasal bileşimleri görülmektedir. Ayrıca, ilgili polimerlerin ve karşılaştırma amaçlı kalp yapısının ultrasonik zayıflama katsayıları ve yoğunlukları verilmektedir. Parçacık takviyesi ilgili parametreleri istenilen seviyelere getirebilmektedir. Sonuç olarak, polimer matrisli kompozit malzemelerin parametreleri vücut dokuları ile uyumlu olup, malzemeler fantom (doku eşdeğeri malzeme) üretim malzemesi olarak kullanılabilir.

Tablo 4.2: Polimerlerin kimyasal bileşimleri

Malzeme	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
PU	69,20	7,92	6,37	
PMMA	59,30	7,37	4,31	25,70
Silikon	25,54	6,29		
Polyester reçine	80,00	10,00		
PE	85,39	13,57		
Yumuşak Doku	25,60	10,50	2,70	60,20
Kemik	15,50	3,40	4,20	43,50
Cilt	20,40	10,00	4,20	64,50

Tablo 4.3: Polimerlerin ultrasonik zayıflama katsayıları

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Ultrasonik Zayıflama (dB/cm)
PU	1,05-1,20	2,7
PMMA	1,15-1,21	2,7
Silikon	1,09-1,20	2,0
Polyester reçine	1,03-1,15	2,1
PE	0,90-1,15	2,3
Kalp	1,02	1,7

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve tahribatlı/tahribatsız karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Üretilen parçacık/fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin aşağıdaki kullanım alanlarına yönelik olması amaçlanmıştır

- Kendi-kendini onaran malzeme (Havacılık ve medikal fantom)
- Hayalet teknolojisi amaçlı radar absorpsiyon malzemesi (RAM)
- Medikal sektör amaçlı fantom (doku eşdeğeri malzeme)

Öncelikle plastik enjeksiyon kalıplama yöntemiyle polimer matrisli parçacık takviyeli kompozit numuneler üretilmiştir. Plastik enjeksiyon kalıplamada polimer hammadde ve katkıları karıştırılmıştır. Polimetilmetakrilat (PMMA), polietereterketon (PEEK), epoksi ve poliüretan (PU) matrisli kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca döküm yöntemiyle ve presleme-sinterleme yöntemleriyle kompozit numuneler üretilmiştir. Son olarak, kendi-kendini onaran polimer matrisli kompozit numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üretilen polimer matrisli kompozit malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri tahribatlı ve tahribatsız yöntemler ile incelenmiştir. Malzemelerin çekme-basma davranışı, elastisite modülü, akma dayanımı, sertlik gibi mekanik özellikleri çekme-basma testi ile belirlenmiştir. Ayrıca numuneler tahribatsız ultrasonik test ile incelenmiştir. Mikroyapı ve mekanik özellikler (elastisite modülü) ultrasonik hız ölçümü ile belirlenmiştir. Ayrıca, termal görüntüleme cihazı ile inceleme gerçekleştirilmiştir.

Polimerler, monomer adlı küçük moleküllerin kovalent bağlarla bağlanarak oluşturdukları dev moleküllerdir. Kompozit malzeme, arzu edilen performansta bir malzeme oluşturmak için iki veya daha çok malzemenin fiziksel olarak (makro ölçekte) karıştırılmasına denir. Genellikle kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak polimerler kullanılmaktadır.

Akıllı malzemeler; gerilim, ısı, nem, pH, elektrik/manyetik alanlar gibi uyarıcılar tarafından kontrollü bir şekilde, sahip oldukları bir ya da daha fazla özelliği değiştirebilecek şekilde tasarlanmış malzemelerdir. Akıllı malzeme sınıfında sayılabilecek kendi kendini onarma, bir malzemenin hasarları otomatik ve bağımsız bir şekilde, yani herhangi bir dış müdahale olmaksızın onarabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Kendi-kendini onaran malzemeler genellikle polimer matrisli kompozit şeklinde bir yapıya sahiptirler.

Özellikle havacılık ve uçak sanyinde, tahribatlı testlerin yanında tahribatsız ve hızlı testler büyük önem taşımaktadır ve kullanımları giderek artmaktadır.

Polimer matrisli kompozit numune üretiminde hammadde olarak kullanılan başlangıç PMMA tozunun ve PMMA-Ti kompozit numunenin SEM fotoğraflarına göre, olarak takviye parçacıkların polimer matris tarafından ıslatıldığı ve oldukça homojen bir mikroyapının sağlandığı söylenebilir.

Cam-fiber, karbon fiber, aramid fiber takviyeli PMMA matrisli kompozit malzemelerin SEM fotoğrafından da görüldüğü gibi takviye fiberlerin polimer (PMMA) matris tarafından ıslatıldığı ve homojen bir yapının sağlandığı söylenebilir.

Plastik enjeksiyon kalıplama (PEK) yöntemiyle kompozit numune üretimi esnasında uygun olmayan viskozite, düşük/yüksek akıcılık, besleme güçlüğü gibi sorunlar ile karşılaşılmamıştır. Enjeksiyonla üretilmiş parçacık (Sn tozu) takviyeli PE matrisli kompozit numunenin SEM fotoğrafına göre takviyelerin yapıda homojen dağıldığı ve PE matris tarafından ıslatıldığı söylenebilir.

Genel olarak, polimer matrisli kompozit malzemelerde takviye ve matris arasındaki ıslatılma çok önemlidir. Bu amaçla, polimer matris malzemelerinin ıslatılabilirliği (temas açısı) optik tensiyometre ile incelenmiştir. Genel olarak, hidrofil yüzeylerde, su veya etil-alkol damlasının temas açısı 90° değerinden küçük hidrofob yüzeylerde ise 90° değerinden büyüktür. Temas açısını gösteren fotoğraflar incelendiğinde, tez kapsamında kullanılan polimer matris malzemelerin ıslatılabilirlik değerlerinin kompozit malzeme uygulamaları için yüksek olduğu söylenebilir.

Polietereterketon (PEEK) esaslı kompozit numuneler yüzeylerinin geliştirilmesi amacıyla sülfürik asitle muamele (sülfonasyon), destile su ile yıkama, aseton ile muamele ve kurutma adımlarından geçmiştir. Genel olarak, sülfonasyon yüzey işlemi sülfürik asidin dağlama etkisi ile PEEK yüzeyinde mikroporoz bir yüzey ve aynı zamanda yüzeye tutunan hidrofil karakterli sülfon (SO₃H) fonksiyonel grupları nedeniyle daha aktif ve ıslatılabilirliği yüksek bir yüzey elde edilir.

Malzemelerin tahribatsız karakterizasyonu kapsamında ultrasonik test cihazı ile inceleme gerçekleştirilmiştir. Polimer matrisli kompozit numunelerin tahribatsız ultrasonik test ile ölçülmüş ses hızı ve hesaplanmış elastisite modülleri verilmiştir. Takviye ilavesi elastisite modülünü (ultrasonik dalgaların hızını) değiştirmiştir. Üretilen numunelerin tahribatsız ultrasonik yöntem ile belirlenen elastisite modülleri ve tahribatlı basma testi ile bulunan elastisite modülleri karşılaştırılmıştır. Tahribatlı basma testi ve tahribatsız ultrasonik test ile bulunan elastisite modülü değerleri birbirine yakın olup genel olarak değerler arasında yaklaşık % 5-10 sapma mevcuttur.

Malzemelerin yapılarının tahribatsız karakterizasyonu kapsamında termal görüntüleme cihazı ile inceleme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen fotoğraflarda takviye malzemeleri görülebilmektedir. Metal tozu takviyeli polimer matrisli kompozitler havacılık uygulamaları için düşük görünürlük (hayalet) teknolojisi amaçlı radyasyon emici malzeme ve termal hayalet amaçlı kullanım potansiyeline sahiptir. Görüldüğü gibi metal tozu takviyesi polimerlerin görünürlüğünü azaltmıştır.

Tahribatsız muayene kapsamında numunelerin dijital radyografi (DR) ve bilgisayarlı tomografi (CT) fotoğrafları çekilmiştir. Genel olarak numunelerin yeterli radyopaklık gösterdikleri söylenebilir. Yapıda iri çatlak veya delaminasyona rastlanmamıştır. Radyografi ve tomografi yöntemleri kompozit malzemelerde fiber ve matris dağılımı, çatlak, ve gözenek gibi iç yapı özelliklerinin incelenmesinde kullanılabilir.

Diğer yandan üretilen polimerlerin kendi kendinin onaran malzeme olarak kullanılması da amaçlanmaktadır. Aşağıdaki şekilde kendi-kendini onaran kompozit numunede onarımdan

önce (çatlaklı malzeme) ve onarımdan sonra (çatlaksız malzeme) ultrasonik cihaz ekran görüntüsü görülmektedir. Ekranlarda birinci ve ikinci arka cidar yankıları ve arka cidar yankıları arasındaki hata (çatlak) pikleri görülmektedir. Ayrıca, kendi kendine onarmanın sonucu olarak arka cidar pikleri arasındaki hata piklerinde azalma veya tamamen yok olma görülmektedir.

Ayrıca üretilen polimerlerin fantom (doku eşdeğeri malzeme) olarak kullanılması da amaçlanmaktadır. Bu nedenle, polimer esaslı numunelerin ve karşılaştırma amaçlı olarak verilen çeşitli vücut kısımlarının (kemik, yumuşak doku, cilt) kimyasal bileşimleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ilgili polimerlerin ve karşılaştırma amaçlı kalp yapısının ultrasonik zayıflama katsayıları ve yoğunlukları verilmiştir. Parçacık takviyesi ilgili parametreleri istenilen seviyelere getirebilmektedir. Sonuç olarak, polimer matrisli kompozit malzemelerin parametreleri vücut dokuları ile uyumlu olup, malzemeler fantom (doku eşdeğeri malzeme) üretim malzemesi olarak kullanılabilir. |

KAYNAKLAR

- [1] Demir C. 2016, Mühendislik Plastikleri ve Uygulamaları. İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Lisans Tezi.
- [2] 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.
- [2] 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.
- [3] Kundu A.K., 2010, *Aircraft Design*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [4] Özkan A. 2015, Ticari Uçak Motor Muhafaza Elemanında Kullanılan Kompozit Malzemenin Mukavemetinin İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [5] Ercan H. 2006, Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- [6] Gövce M.S. 2005, Uçak Bakımında Korozyon Analizi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [7]. Wang R.M, Zheng S.R., Zheng Y., 2011, *Polymer Matrix Composites and Technology*, Woodhead Publishing, Beijing, China.
- [8]. Chawla K.K., 2013, *Composite Materials, Science and Technology, Third Edition*, Springer, New York, USA
- [9]. Kaw A.K., 2006, *Mechanics of Composite Materials, Second Edition*, Taylor&Francis, CRC Press, Boca Raton, USA.

- [10]. Yıldızhan, H., 2010, *Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [11]. Wool R., 2008, Self-healing Materials: A Review, *Soft Matter*. 4, (2008). 400-418.
- [12]. Akhan S., 2019, Kendi Kendini Onarabilen Poliüretan Nanokompozit Kaplamaların Sentezi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [13]. Tezel Ö., 2019, Kendi Kendini Onarabilen UV Işınları İle Kuruyabilen Kaplamaların Hazırlanması ve Performans Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [14]. Ünçe S., 2019, Kendi Kendini Onarabilen Polibenoksazin Esaslı Nanokompozit Malzemelerin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi,
- [15]. Aissa B., Therriault D., 2011, Self-Healing Materials Systems: Overview of Major Approaches and Recent Deveoped Technologies, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012. 1-17
- [16]. Kotrotsos A., Repanas A., 2015, Self-healing Concepts for Aerospace Applications, Applied Mechanics Laboratory, Germany.
- [17]. Erbayrak E., 2018, Termoplastik Takviyeli Epoksi Yapıştırıcıların Kendi-Kendini Onarma Davranışının Nümerik Ve Deneysel Olarak Belirlenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Enstitüsü,
- [18] Mutlu, İ. 2006, Paslanmaz ve Takım Çeliklerinde Tane Boyutunun Ultrasonik DalgalarınSaçılmasına Etkisi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [19] Hellier, C.J. 2003, *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw Hill, New York, USA. |

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Seher Selen AYDIN
Doğum Yeri	Tekirdağ
Doğum Tarihi	1994
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0544 367 70 59
E-Posta Adresi	selen.aydin19@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2016

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler	