T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TAKVİYE MALZEMELERİ İLAVE EDİLMİŞ KARBON FİBER KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ ANALİZ EDİLMESİ

HİKMET BARIŞ KAROL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. NİLHAN ÜRKMEZ TAŞKIN

EDİRNE-2017

HİKMET BARIŞ KAROL'un hazırladığı "FARKLI TAKVİYE MALZEMELERİ İLAVE EDİLMİŞ KARBON FİBER KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ ANALİZ EDİLMESİ" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri: İmza

Yrd. Doç. Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN

Prof. Dr. Metin AYDOĞDU

Prof. Mehmet Emin YURCİ

Tez Savunma Tarihi: 10/10/2017

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Yrd. Doç. Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN
Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Murat YURTCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

10/10/2017

Hikmet Barış KAROL

Yüksek Lisans Tezi
Farklı Takviye Malzemeleri İlave Edilmiş Karbon Fiber Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının Analiz Edilmesi
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Karbon fiber kompozitler, özellikle havacılık, uzay ve otomotiv gibi kritik ve maliyetli sektörlerde tercih edilmektedir. Bunun en önemli sebebi bu malzemelerin hafif olmaları ve bunun sonucunda da az yakıt tüketimi sağlayarak maliyet kazancı elde edilmesidir.

Bu çalışmada, karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirebilmek adına çalışmalar yapılmıştır. Bunun sebebi; karbon fiberin özellikle diğer polimer esaslı kompozit malzemelere göre çok daha hafif olması ve buna karşın mukavemetinin çok daha yüksek olmasıdır.

Karbon fiber takviyeli kompozitlerin kullanım alanlarının daha çok genişleyebilmesi için mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesi gerekmektedir. Polimerin içerisine farklı katkı malzemeleri ilave ederek dayanım değerleri arttırılabilir. Bununla birlikte, katkı malzemeleri ile kompozitin esneklik gerektiren yapılarda kullanabilmesi için elastisite modülü arttırılabilmektedir.

Yapılan bu çalışmada; karbon fiber takviyeli kompozitte polimer olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak da; silisyum karbür, magnezyum silikat (talk) ve kaolen tercih edilmiştir. Katkısız ve kullanılan reçinenin ağırlıkça % 5, % 10, % 15 oranlarında katkı malzemesi içeren karbon fiber plakalar üretilmiştir. Plakaların üretimi vakum infüzyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin tercih edilmesinin sebebi; reçinenin takviye malzemesine homojen bir şekilde emdirilebilmesi ve bu sayede mukavemet değerleri yüksek kompozitler elde edilebilmesidir. Hazırlanan

karbon fiber kompozitlerin morfolojik yapıları SEM ile incelenmiş, mekanik özelliklerinin tespit edebilmesi amacıyla da çekme, üç noktadan eğme ve düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır.

Yıl : 2017
Sayfa Sayısı : 100
Anahtar Kelimeler : Kompozit malzeme, polimer esaslı kompozit malzeme, karbon fiber, katkı malzemesi, vakum infüzyon

Master's Thesis

The Analysis of Mechanical Behaviours of Carbon Fiber Composite Materials Which Have Additional Different Reinforcement Material

Trakya University Institute of Natural Sciences

Mechanical Engineering

ABSTRACT

Carbon fiber composites, have become dominant advanced composite material especially for aviation, aerospace and automabile and other sectors which is critic and costly. The most significat reason for this situation is this materials are light and so provides fuel consumption and gets cost savings.

This study aims, to improve mechanical properties of carbon fiber reinforced composite materials. The reason of this; carbon fibers properties are much lighter than other polymer based composite materials, while the strength is much higher.

The mechanical properties of carbon fiber reinforced composites need to be improved in order to expand their usage area. Strength values can be increased by adding different additive materials into the polymer. In addition to this; elastic modulus can be increased with additive materials to use in the structures requiring flexibility.

In this study, epoxy resin was used as polymer in carbon fiber reinforced composite material. As additive material; silicon carbide, magnesium silicate (talc) and kaolin are preferred. Carbon fiber plates containing additive material 5%, 10%, 15% by weight of undoped and used resin were produced. Plates were produced using vacuum infusion method. This method is preferred because; the resin can be homogeneously absorbed into the reinforcing material and thus to obtain composites with high strength values. Morphological structures of prepared carbon fiber composites were examinde by SEM,

in order to determine the mechanical properties tension, three-point bending and low velocity impact test were performed.

Year : 2017
Number of Pages : 100
Keywords : Composite material, polymer based composite materials, carbon fiber, additive material, vacuum infusion,

TEŞEKKÜR

Bana inanan ve güvenen, fikirlerimi ve çalışmalarımı destekleyen, çalışmalarım boyunca fikirleri ve önerileri ile bana destek ve yardımcı olan, her zaman bilgi ve deneyimiyle bir yol gösterici olan değerli danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN başta olmak üzere, bu yüksek lisans projesinin 2017/38 no'lu Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmesini sağlayan Trakya Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim. Son olarak, bana karbon fiber kompozitleri sevdirerek tezimi bu konuda yapmama vesile olan, Pehlivan Team ile birçok başarılar elde ettiğimiz danışman Hocalarım Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN, Yrd. Doç. Dr. Deniz TAŞKIN, Yrd. Doç. Dr. Cem TAŞKIN, Uzm. Fahrettin DOLAŞTIR ve Arş. Gör. Gökhan GÜNAY ile tüm takım arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **v**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **ix**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xi**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xii**

BÖLÜM 1

GİRİŞ **1**

BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER **2**

2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 6

2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler 6

2.1.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler 7

2.1.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler 8

2.2. Polimer Esaslı Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri 12

2.2.1. Polyester Reçine 14

2.2.2. Fenolik Reçine 15

2.2.3. Epoksi Reçine 16

2.3. Polimer Esaslı Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri 19

2.3.1. Aramid Elyaf 21

2.3.2. Cam Elyaf 22

2.3.3. Karbon Elyaf 23

2.4. Polimer Esaslı Kompozitlerde Kullanılan Katkı Malzemeleri 28

2.4.1. Silisyum Karbür 28
2.4.2. Magnezyum Silikat 30
2.4.3. Kaolen 31
2.5. Polimer Esaslı Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri 32
2.5.1. El Yatırma 34
2.5.2. Püskürtme 35
2.5.3. İplik Sarma 36
2.5.4. Vakum Torbalama 36
2.5.5. Otoklav 37
2.5.6. Reçine Transfer Kalıplama 38
2.5.7. Vakum İnfüzyon Yöntemi 39
2.6. Polimer Esaslı Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları 42

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ÖZETİ 45

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR 50
4.1. Karbon Fiber Kompozit Malzemelerin Hazırlanması 50
4.1.1. Kullanılan Malzeme, Alet ve Cihazlar 50
4.1.2. Karbon Fiber Kompozit Plakaların Üretilmesi 56
4.2. Karbon Fiber Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu 63
4.2.1. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları 63
4.2.2 Karbon Fiber Kompozit Malzemelerin Elektron Mikroskobunda (SEM) İncelenmesi 66
4.2.3. Üç Noktadan Eğme Testi 71

4.2.4. Çekme Testi 73
4.2.5. Düşük Hızlı Darbe Testi 74

BÖLÜM 5

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA 77
5.1. Üç Noktadan Eğme Testi 77
5.2. Çekme Testi 78
5.3. Düşük Hızlı Darbe Testi 80

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER 94

KAYNAKLAR 95
ÖZGEÇMİŞ 100

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al_2O_3	Alüminyum Oksit
ASTM	American Section of the International Association for Testing Materials
BaO	Baryum Oksit
BMC	Bulk Molding Compounds
CTP	Cam Elyaf Takviyeli Polyester
D_{50}	Ortalama Tane Boyutu
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
F_n	Nominal kuvvet
GPa	Gigapaskal
HIP	Sıcak İzostatik Pres
HIPS	Sıcak İzostatik Presle Sinterleme
HP	Sıcak Pres
J	Joule
K	Kristalize
K_2O	Potasyum Oksit
kN	Kilonewton
Li_2O_2	Lityum Peroksit
MgO	Magnezyum Oksit
MPa	Megapaskal
ms	Milisaniye
MWCNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp

N	Newton
Na_2O	Sodyum Oksit
PAN	Poliakrilonitril
PEEK	Polyether - Etherketone
PES	Polyethersulfone
PI	Polyimide
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
PU	Poliüretan
PU-CF	Poliüretan - Karbon Fiber
R	Rekristalize
RB	Reaksiyon Bağlı
RTM	Reçine Transferli Kalıplama
S	Sinter
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si_3N_4	Silisyum Nitrür
SiC	Silisyum Karbür
SiO_2	Silisyum Dioksit
SMC	Sheet Molding Compound
SRIM	Structural Reaction İnjection Moulding
Tg	Camsı Geçiş Sıcaklığı
TiO_2	Titanyum Dioksit
µm	Mikrometre

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Bazı Mühendislik Malzemelerinin Mekanik Özellikleri……...…5

Çizelge 2.2: Polimer Matrisli Malzemeler ile Çelik ve Alüminyumun Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması……..……...….9

Çizelge 2.3: Bazı Termoset Malzemelerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri……...…13

Çizelge 2.4: Cam, Karbon ve Aramid Elyaf Takviyeli Epoksi-Matris Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Kıyaslanması…….….20

Çizelge 2.5: Aramid Elyafların Mekanik Özellikleri…….……..…21

Çizelge 2.6: Farklı Cam Elyaf Türlerinin Mekanik Özellikleri……..…….....22

Çizelge 2.7: SiC Malzeme Tiplerinin Mekanik Özellikleri……..…….…...29

Çizelge 2.8: Silisyum Karbürün Mekanik ve Fiziksel Özellikleri……30

Çizelge 2.9: Magnezyum Silikatın Mekanik ve Fiziksel Özellikleri……...….31

Çizelge 2.10: Kompozit Malzemelerin Üretimin Yöntemini Belirleme Kriterleri….....33

Çizelge 2.11: Karbon Liflerinin Karakteristik Özellikleri ve Uygulama Alanları…….....43

Çizelge 4.1: Kullanılan Karbon Fiber Kumaşın Mekanik Özellikleri…….……....50

Çizelge 4.2: Kullanılan Reçine + Sertleştiricinin Mekanik Özellikleri……...…….51

Çizelge 4.3: Karbon Fiber Plakaların İhtiva Ettiği Katkı Maddesi ve Oranları ile Tabaka Sayısı……...57

Çizelge 5.1: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Eğme Mukavemeti ve Elastisite Modülü Değerleri…….....……..……77

Çizelge 5.2: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Çekme Mukavemeti, Maksimum Yüzde Kopma Uzaması ve Elastisite Modülü Değerleri……..79

Çizelge 5.3: Katkılı Karbon Fiber Kompozitler Tarafından Absorbe Edilen Enerji Miktarları…….....……85

Çizelge 5.4: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Mekanik Değerlerinin Büyüklüklerine Göre Sıralaması……93

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Elyaf ve Reçine Kullanımı ile Kompozit Malzeme Oluşumu……....2

Şekil 2.2: Elyaf ile Matris Arasındaki Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi……....10

Şekil 2.3: Polyester Reçine Kimyasal Formülü……..…..15

Şekil 2.4: Fenolik Reçine **a)** Fenol **b)** Formaldehit…….….16

Şekil 2.5: Epoksi Reçinenin Kimyasal Formülü…….….17

Şekil 2.6: Çapraz Bağlanmış Epoksi Polimeri…….……18

Şekil 2.7: Karbon Lif Formları **a)** Tek Yönlü **b)** Dokuma **c)** Örgü Elyaflar……...…..23

Şekil 2.8: Karbon Fiber Kumaş.....…..……..…...24

Şekil 2.9: Karbon Fiberin Kimyasal Bileşimi…….....25

Şekil 2.10: Karbon / Karbon Kompozitlerin Üretim Süreçleri……..…...26

Şekil 2.11: Çekme Dayanımı ve Elastisite Modülü Üzerine Sıcaklığın Etkisi…….....27

Şekil 2.12: El Yatırma ile Kompozit Üretimi……...34

Şekil 2.13: Püskürtme Yöntemi Uygulaması……...35

Şekil 2.14: İplik Sarma Yöntemi Uygulaması…….….36

Şekil 2.15: Otoklav Üretim Yöntemi……...37

Şekil 2.16: RTM Yönteminde Reçine Enjeksiyon Aşaması…….38

Şekil 2.17: Vakum İnfüzyon Yönteminde Kullanılan Elemanlar……..…...39

Şekil 2.18: Vakum İnfüzyon Sistemi……...41

Şekil 4.1: Reçine + Sertleştiricinin X Işını Spektrometresi ile Elementel Analizi……52

Şekil 4.2: Silisyum Karbür (SiC) ün X Işını Spektrometresi ile Elementel Analiz……...54

Şekil 4.3: Magnezyum Silikatın X Işını Spektrometresi ile Elementel Analizi……55

Şekil 4.4: Kaolenin X Işını Spektrometresi ile Elementel Analizi……56

Şekil 4.5: PVA Sıvı Kalıp Ayırıcı Uygulaması……..…..57

Şekil 4.6: Vaks Uygulaması…….……58

Şekil 4.7: Karbon Fiber Kumaşların Serilmesi……..…...58

Şekil 4.8: Peel Ply (Ayırma Kumaşı) Serilmesi…….……..59

Şekil 4.9: Akış Filesi, İnfüzyon Spiral Hortumları ve İnfüzyon Konnektörlerinin Yerleşimi…….59

Şekil 4.10: Vakum İnfüzyon Sistemi Bağlantıları……..……..60

Şekil 4.11: Katkı Malzemesinin Reçine ve Sertleştirici ile Karıştırılması…….…...61

Şekil 4.12: Karbon Fiber Kumaşa Reçine Verilme İşlemi……...61

Şekil 4.13: Reçine Emdirilmiş Karbon Fiber Plaka ……..……..…62

Şekil 4.14: Su Jeti ile Kesilmiş Karbon Fiber Kompozit Numuneler……..…….62

Şekil 4.15: Zeiss Evo LS10 Elektron Mikroskobu…….……..63

Şekil 4.16: Zwick Z250…….……...64

Şekil 4.17: Instron Dynatup 9250 HV Darbe Test Cihazı……..…..65

Şekil 4.18: SiC Katkılı Karbon Fiber Plakaların SEM Görüntüleri **(a)** 250 Kat **(b)** 500 Kat **(c)** 1000 Kat **(d)** 5000 Kat Büyütülmüş……..……66

Şekil 4.19: Magnezyum Silikat Katkılı Karbon Fiber Plakaların SEM Görüntüleri **(a)** 250 Kat **(b)** 500 Kat **(c)** 1000 Kat **(d)** 5000 Kat Büyütülmüş……..…….67

Şekil 4.20: Kaolen Katkılı Karbon Fiber Plakaların SEM Görüntüleri **(a)** 250 Kat **(b)** 500 Kat **(c)** 1000 Kat **(d)** 5000 Kat Büyütülmüş…….…….68

Şekil 4.21: Magnezyum Silikat Katkılı Karbon Fiber Plakalarda Bulunan Elementlerin Dağılım Haritası **(a)** C/O/N/Fe/Si/Cl/Mg/Al Haritası **(b)** Fe Haritası **(c)** Si Haritası **(d)** Mg Haritası……..69

Şekil 4.22: SiC Katkılı Karbon Fiber Plakalarda Bulunan Elementlerin Dağılım Haritası **(a)** C/O/N/Si/Al Haritası **(b)** Si Haritası…….……70

Şekil 4.23: Kaolen Katkılı Karbon Fiber Plakalarda Bulunan Elementlerin Dağılım Haritası **(a)** C/O/N/Si/Al/Cl Haritası **(b)** Si Haritası **(c)** Al Haritası **(d)** Cl Haritası…....71

Şekil 4.24: Üç Noktadan Eğme Testi Numunesi…….....72

Şekil 4.25: Üç Noktadan Eğme Testi……...72

Şekil 4.26: Çekme Testi Numunesi……..……...73

Şekil 4.27: Çekme Testi ……..74

Şekil 4.28: Düşük Hızlı Darbe Testi Numunesi……..……...75

Şekil 4.29: Düşük Hızlı Darbe Testi…….……..76

Şekil 5.1: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Eğme Mukavemeti Dağılımı…..……....78

Şekil 5.2: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Dağılımı...…..……79

Şekil 5.3: Katkısız Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi…….80

Şekil 5.4: % 5 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi……....80

Şekil 5.5: % 10 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi……..81

Şekil 5.6: % 15 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi……..81

Şekil 5.7: % 5 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi…….82

Şekil 5.8: % 10 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi……...82

Şekil 5.9: % 15 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi…….…..83

Şekil 5.10: % 5 Kaolen Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi…….….83

Şekil 5.11: % 10 Kaolen Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi……84

Şekil 5.12: % 15 Kaolen Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi……..…84

Şekil 5.13: Katkısız Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi……...86

Şekil 5.14: % 5 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi……86

Şekil 5.15: % 10 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi……87

Şekil 5.16: % 15 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi……...….87

Şekil 5.17: % 5 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi……...….88

Şekil 5.18: % 10 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi……...….88

Şekil 5.19: % 15 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi……....89

Şekil 5.20: % 5 Kaolen Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi…….….89

Şekil 5.21: % 10 Kaolen Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi…….....90

Şekil 5.22: % 15 Kaolen Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi……..…..90

Şekil 5.23: Katkısız Karbon Fiber Plakanın Darbe Hasarı……...91

Şekil 5.24: Magnezyum Silikat Katkılı Karbon Fiber Plakanın Darbe Hasarı **(a)** % 5 katkılı **(b)** % 10 katkılı **(c)** % 15 katkılı…….91

Şekil 5.25: Silisyum Karbür Katkılı Karbon Fiber Plakanın Ön ve Arka Yüzündeki Darbe Hasarı **(a)** % 5 katkılı **(b)** % 10 katkılı **(c)** % 15 katkılı…….....92

Şekil 5.26: Kaolen Katkılı Karbon Fiber Plakanın Ön ve Arka Yüzündeki Darbe Hasarı **(a)** % 5 katkılı **(b)** % 10 katkılı **(c)** % 15 katkılı……92

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mukavemetleri ve hafiflikleri sayesinde yüksek teknoloji içeren sektörlerde tercih edilmektedir. Kullanım alanlarının artması için bazı mekanik özelliklerinin geliştirilmesi veya kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Bu kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için farklı takviye, matris malzemeleri ve üretim yöntemleri denenmektedir.

Yapılan çalışmalarda kompozitten beklenen özelliklere bağlı olarak çok çeşitli katkı malzemeleri kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise birbirinden çok farklı mekanik özellikler gösteren silisyum karbür, magnezyum silikat (talk) ve kaolen tercih edilmiştir. Bunun sonucunda da, üretilen karbon fiber takviyeli kompozitlerin mukavemet değerlerindeki değişim incelenmiştir.

Farklı oranlarda katkı malzemeleri içeren karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mukavemet değerlerine sahip kompozitler elde edebilmek ve takviye malzemesinin homojen bir şekilde ıslatılabilmesi amacıyla vakum infüzyon yöntemi ile üretildikten sonra; bu malzemelerden çıkarılan numunelere çekme, üç noktadan eğme ve düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır.

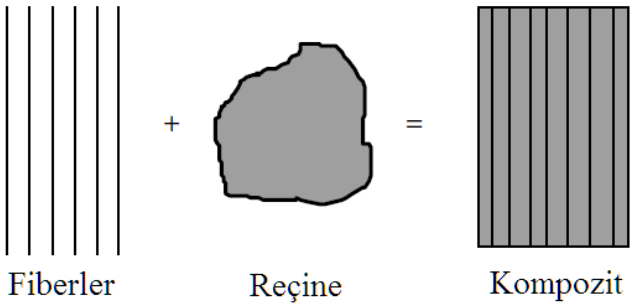
Kompozit malzemeler ve çeşitlerinin tanıtımıyla başlayan bu çalışmada; kompozit malzemeyi ortaya çıkaran, matris ve takviye malzemelerine yer verilmiştir. Bu çalışmanın da konusu olan katkı malzemeleri ve özelliklerinin açıklanmasının ardından, polimer esaslı kompozitlerin üretiminde en çok tercih edilen yöntemler kısaca tanıtılmaktadır. Karbon fiber kompozit plakaların üretim süreçlerinin ve yapılan testlerin ayrıntılı olarak anlatılmasının ardından, son olarak elde edilen mukavemet değerleri ışığında sonuçlar ve öneriler ortaya konulmaktadır.

BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER

Malzemeler, sertlik, mukavemet, yoğunluk ve ergime sıcaklığı gibi temel özelliklerine göre; metaller, plastik, seramik ve kompozitler olmak üzere dört ana kategoriye ayrılabilir. Bu sınıfların içerisinde yer alan malzemelerin bazı özellikleri farklı sınıflarda yer almalarına rağmen benzerlik gösterebilmektedir. En yaygın seramik malzemelerden olan silisyum karbür ve alümina 3,2 ila 3,5 g/cm^3 aralığında yoğunluklara sahiptirler ve metal malzemelerden olan demir (7,8 g/cm^3), bakır (6,8 g/ cm^3) ve alüminyum (2,7 g/cm^3) ile yoğunlukları benzerlik göstermemektedir. (Mazumdar, 2002)

Kompozit malzemeler, birbirinden farklı malzeme kombinasyonuna sahip ve birbiri içerisinde çözünmeyen birden fazla bileşenin karışımından veya birleşiminde oluşan gelişmekte olan güncel bir malzeme sistemidir. Doğrudan doğruya istenilen maksatta kullanılmayan birden çok malzemeden, belli şartlar altında ve belli bir oranda bu malzemelerin fiziksel olarak birleştirilmesi ile istenilen özellikleri taşıyan bir kompozit malzeme elde edilir.



Şekil 2.1: Elyaf ve Reçine Kullanımı ile Kompozit Malzeme Oluşumu (Mazumdar, 2002)

Kompozit malzemeler **Şekil 2.1**' de de görüldüğü gibi matris elemanı olan reçine, takviye malzemesi ve katkı maddeleri olmak üzere üç temel bileşenden oluşur. Kompozit malzemelerde sürekli fazı oluşturan matris elemanı takviye malzemesini bir arada tutarak yükün takviye malzemesine homojen olarak dağılmasını sağlar. Takviye malzemesini kimyasal ve fiziksel dış etkilerden korur. Ayrıca, takviye malzemesinin yapı içinde bireysel davranmalarını sağlamak amacıyla izole eder. Tüm bu faydalarının arasında en önemli görevi, gelen yükü takviyeye iletmektir; bu sayede gelen yükün büyük bir kısmı takviye tarafından taşınmaktadır. Kompozitlerde, darbe dayanımı ve esneklik gibi özellikler; matris malzemesi olarak seçilen seramikler, polimerler ve metallerin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Matris içerisine gömülmüş olan takviye elemanı kompozit malzemelere fiber (elyaf), parçacık ve whisker gibi farklı formlarda katılabilir. Temel görevi gelen yükü taşımak olan takviye elemanları, kompozit malzemenin mukavemetini etkileyen temel bileşenlerden biridir. Takviye malzemeleri, düşük yoğunluk, yüksek elastisite modülü ve sertlik, korozyona karşı yüksek dayanım gibi özellikleri sayesinde; kompozit malzemeye sertlik, elektriksel veya termal iletkenlik gibi farklı özellikler kazandırmaktadır. Ayrıca kompozit malzemelerde fiber-matris kombinasyonunu kullanılacağı alana yönelik olarak geliştirebilmek amacıyla, çeşitli kimyasal malzemeler katkı maddeleri olarak kullanılabilir.

Takviye edici elyaf veya kumaş, kompozit malzemenin içerisine yerleştirilme şekline bağlı olarak mukavemet ve sertlik gibi özellikler kazandırırken, matris katılık ve bununla beraber çevre etkilerine karşı direnç kazandırmaktadır.

Kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinde biri, gelen yükü taşıyan elyafın mukavemetinin elyaf ekseni boyunca en yüksek değerde olmasıdır. Yük yönündeki uzun sürekli elyaflar, matris reçinesinin kendisinden yüksek özelliklere sahip bir kompozit oluşumu ile sonuçlanır.

Kısa uzunluklarla kıyılmış elyaflar, aynı özelliklerdeki sürekli elyaflardan daha düşük mukavemet özelliklerine sahiptir. Elyaf formu uygulama türüne ve imalat yöntemine bağlı olarak seçilmektedir. Yapısal uygulamalar için sürekli elyaf veya uzun elyaf kullanımı uygun görülürken, yapısal olmayan uygulamalarda kısa elyaf önerilir.

Enjeksiyon ve sıkıştırma kalıplama ile yapılan uygulamalarda kısa elyaf kullanılırken, filament sarım ve pultrüzyon ile yapılan uygulamalarda sürekli elyaf kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin kullanımının giderek arttığı günümüzde, özellikle polimer esaslı kompozit malzemeler endüstriyel uygulamalarda geniş kullanıma sahiptir. **Çizelge 2.1'** de kompozit malzemeleri meydana getiren çeşitli mühendislik malzemelerinin mekanik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.1: Bazı Mühendislik Malzemelerinin Mekanik Özellikleri (Mazumdar, 2002)

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm^3)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Maks. Kullanım Sıcaklığı (°C)
Metaller				
Dökme Demir, grade 20	7,0	100	140	230-300
Çelik, 1045 haddelenmiş	7,8	205	570	500-650
Alüminyum 2024-T4	2,7	73	450	150-250
Alüminyum 6061-T6	2,7	69	270	150-250
Plastikler				
Naylon 6/6	1,15	2,9	82	75-100
Polipropilen	0,9	1,4	33	50-80
Epoksi	1,25	3,5	69	80-215
Fenolik	1,35	3,0	6	70-120
Seramikler				
Alümina	3,8	350	170	1425-1540
MgO	3,6	205	60	900-1000
Kısa Lifli Kompozitler				
Cam Dolu Epoksi (%35)	1,9	25	300	80-200
Cam Dolu Polyester (%35)	2,0	15,7	130	80-125
Cam Dolu Naylon (%35)	1,62	14,5	200	75-110
Cam Dolu Naylon (%60)	1,95	21,8	290	75-110
Tek Yönlü Kompozitler				
S-cam/Epoksi (%45)	1,81	39,5	870	80-215
Karbon/Epoksi (%61)	1,59	142	1730	80-215
Kevlar/Epoksi (%53)	1,35	63,6	1100	80-215

2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Saf halde iken yumuşak ve mukavemeti düşük olan metaller, alaşımlandırma işlemi ve sıcak- soğuk şekillendirme ile mukavemetli hale getirilirler. Metal malzemeler yüke maruz kaldıklarında birden kırılmazlar ve akıp yükü bütün sisteme dağıtarak kullanımı güvenilir hale getirir. Metaller tokluk ve mukavemet özellikleri sayesinde, makine ve metalurji endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Metallere ince tel halindeki liflerin veya taneciklerin takviye edilmesi ile kompozit malzemeler elde edilmektedir. Örneğin; tungsten alaşımlı liflerle takviye edilmiş 1000 ºC' ye kadar dayanıklı metal alaşımlı kompozitler, yüksek sıcaklıklarda çalışan jet motorlarında kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozitlerde matris olarak genellikle alüminyum, magnezyum ve titanyum kullanılmaktadır. Kobalt ve kobalt-nikel alaşımları ise yüksek sıcaklıklarda kullanım için yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye olarak kullanılan fiberler, karbon ve silika karbür içerirken; katkı malzemesi olarak da Al_2O_3 ve SiC tercih edilmektedir. Metaller, tasarlanan kompozit malzemeye eklenildiğinde elastisite modülü, aşınma direnci ve mukavemeti arttırırken; kompozitin termal genleşmesini, termal ve elektriksel iletkenliklerini arttırarak olumsuz etkilemektedir. Çelik gibi malzemenin yüksek mukavemetini, titanyum gibi bir malzemenin düşük yoğunluğunda sunabilmek amacıyla metal matrisli kompozitler geliştirilmiştir.

Metal matrisli kompozitlerin polimer matrisli kompozitlere karşı bazı avantajları;

- Yüksek çalışma sıcaklıkları ve nem direnci,
- Yüksek tokluk ve dayanım,
- Yüksek termal ve elektriksel iletkenlik,
- Kolay şekillendirilebilme ve kaynakla birleştirebilme olanağı,
- Yüksek aşınma, korozyon ve çatlak direnci şeklinde sıralanabilir.

Kobalt matrisli, tungsten karbür tozu takviyeli karbür matkap uçları imal edilmektedir. Tank zırhlarında kullanılmakta olan çeliklerde, çeliğin erime sıcaklığında çözünmeyen ve sert bir yapı elde edilmesini sağlayan boron nitrit takviyesi kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozitlerde, matris olarak magnezyum, çinko vb. alaşımlarına nazaran alüminyum daha çok tercih edilmektedir. Alüminyum matrisli kompozit malzemeler mukavemet, geleneksel malzemelere nazaran % 200'e kadar artarken; ağırlık, alüminyum alaşımlara göre % 60 azalma göstermektedir. Termal genleşme katsayısı sıfıra yakın olduğundan dolayı yüksek sıcaklıkta çalışılan parçalarda kullanılmaktadır. Bunun yanında elektriksel iletkenlik, yüksek korozyon direnci gibi özellikler sunmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde tercih edilen bir diğer malzeme olan titanyum da düşük ısıl genleşme katsayısı, rijitliği, yüksek mukavemeti, oda sıcaklığında yüzeyinde oluşturduğu TiO_2 tabakası sayesindeki yüksek korozyon direnci ile birlikte; kompresör pervanelerinde, denizcilikte ve yüksek çalışma sıcaklığı gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Alüminyum matrisli kompozitlere katkı maddesi olarak ilave edilen silisyum karbür, oranı arttıkça akma ve çekme mukavemetini arttırdığı ve uzamasında düşüş olduğu görülmektedir. Bir başka katkı maddesi olan alüminyum oksidin de dayanımı arttırdığı ve esnekliği azalttığı görülmektedir. (Ongun, 2015)

2.1.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik malzemeler; metal ve ametal bileşenlerden elde edilen yüksek sıcaklığa dayanıklılık, hafiflik, yüksek kimyasal kararlılık, sertlik, erozyon ve aşınmaya karşı direnç gibi özelliklere sahip inorganik metalik olmayan bir malzeme grubudur. Bunun yanında seramikler oldukça gevrek malzemeler olup, çekme mukavemetleri düşük olmasına rağmen basma mukavemetleri oldukça yüksektir. Yapısal uygulamalarda kullanımının kısıtlı olmasının sebebi, düşük güvenilirliğe ve tokluğa sahip olmasıdır.

Seramik malzemeler yüksek oksidasyon dirençleri sayesinde, yüksek sıcaklık uygulamalarında; yüksek yoğunluğa sahip metal malzemelere alternatif olarak kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeler ise hidrokarbon yapılarından dolayı bu uygulamalarda tercih edilememektedir.

Seramik malzemeler düşük yoğunluklu, mukavemetli ve sert olmalarına karşın gevrek bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı bu malzemelerden üretilmek istenen parçaların çok dikkatli ve doğru tasarlanmaları gerekmektedir. Yüksek termal ve kimyasal dayanımları özellikleri de göstermektedir. Ergime sıcaklıklarının yüksek olması, sert ve kırılgan olmaları işlenmelerini zorlaştırırken, aynı zamanda güvensiz hale getirmektedir. Seramik matrisli kompozit malzemelerde matris olarak Li_2O_2 - Al_2O_3 - SiO_2 ve BaO - SiO_2 - Al_2O_3 - Si_3N_4 kullanılırken, takviye malzemesi olarak da genellikle tercih edilen Al_2O_3, SiC ve Si_3N_4 partikül halinde matris malzemesine ilave edilir.

Seramik matrisli kompozit malzemelerin, 1000 °C üstündeki yüksek sıcaklıklarda kullanımı sırasında fiber malzemenin, matris malzemesi ile reaksiyona girmesi sonucunda kimyasal değişime uğraması ve özelliklerini yitirmesi sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

İmalat firmaları ürettikleri tasarımlarda istenilen mukavemet değerlerini elde etmek amacıyla Al_2O_3, SiC ve C gibi katkı maddelerini kullanmaktadır. Bu sayede çekme mukavemeti ve elastisite modülünü arttırabilmektedirler. Ancak bunun yanında bu katkı maddeleri yoğunluğu da arttırmaktadır.

Seramik matrisli kompozit malzemeler;

- Havacılık alanında uçaklarda alçak basınçlı türbin parçalarında ve savaş uçaklarının stator kanat parçalarında,
- Uzay araçlarının kenar ve burun kısımlarında, yönlendirici flaplarında ve termal kalkanlarda,
- Fren diskleri ve rulmanlarda,
- Yüksek performanslı spor araçların egzoz kapaklarında kullanılmaktadır.

2.1.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer matrisli kompozitler düşük fiyatları, yüksek mukavemetleri ve kolay üretim metotlarıdır nedeniyle günümüzde yaygın kullanım alanına sahip malzemelerdir. PMK (Polimer Matrisli Kompozitler)de epoksi, polyester gibi matris malzemeleri ile elyaf olarak karbon, cam, boron, aramid, kevlar gibi ince çaplardaki lifler kullanılır. Takviye

malzemesi olarak kulanılan liflerin miktarı arttıkça da kompozitin mukavemeti artmaktadır. **Çizelge 2.2**' de malzemelerin takviye halindeyken ve kompozit olarak üretildikten sonraki mekanik değerleri karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 2.2: Polimer Matrisli Malzemeler ile Çelik ve Alüminyumun Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması (Ongun, 2015)

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm^3)	Kopma Uzaması (%)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m/ºC)
E-Camı	2.5	2.5	2 - 3.5	70	
S-Camı	2.5	2.8	4.57	86	
Cam / Epoksi	1.8		1.1	38.6	8.6
Grafit	1.4	1.4 - 1.8	4	230 - 240	
Grafit / Epoksi	1.6		1.5	181	0.02
Kevlar	1.4	3.3 - 3.7	3 - 3.15	63 - 67	
Çelik	7.8		0.64	206	11.7
Alüminyum	2.6		0.28	68.95	23

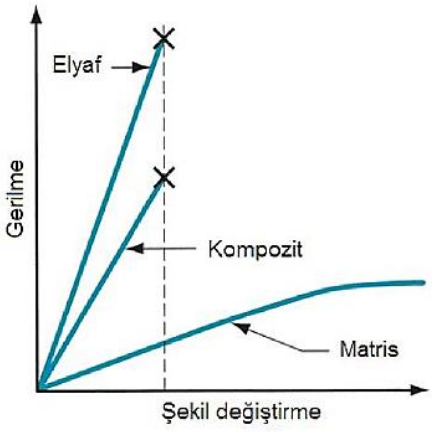
Plastiklerin ana maddesini genellikle, büyük moleküllü organik bileşikler olan organik polimerler oluşturmaktadır. Plastiklerin kimyasal yapılarında bulunan karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N), silisyum (Si), kükürt (S), klor (Cl) ve flor (F) elementlerinin çeşitli yöntemlerle tepkimeye girmesi sonucunda makromolekül adı verilen kompleks moleküller meydana gelmesiyle polimerler ortaya çıkmış olur. (Mitsubishi Chemical Corporatian)

Polimer matrisli kompozit malzemeler, ana yapısında yer alarak kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlayan fiber malzeme ile bu malzemeyi çevreleyerek hacimce çoğunluğu oluşturan, fiber malzemeleri yük altında bir arada tutarak yükün lifler arasında homojen olarak dağılmasını sağlayan matris malzemesinden oluşmaktadır. Böylece matris malzemesi, fiber malzemelerde plastik deformasyon sonucunda oluşacak çatlak ilerlemesini önleyerek, kompozit malzemenin kopma süresini

uzatmaktadır. Bunun yanında matris olarak kullanılan polimerler düşük elastisite modülü ve düşük kullanım sıcaklığına sahip olmaları ile beraber ucuz ve kolay çalışılabilir malzemelerdir. Liflerin kompozitin mekanik dayanıklılığına etkisi, ancak kompozit içerisindeki hacmi % 10' u geçtikten sonra gözlemlenmektedir. (Demirel, 2007 / Çivi, Sütçüoğlu & Atik, 2012)

Polimer kompozitlerin en önemli özelliklerinin yüksek özgül mukavemet ve özgül elastisite modülü olmasının yanında, yüksek çekme ve basma dayanımı, yüksek elastisite modülü ve yüksek tokluk gibi özelliklere de sahiptirler. Diğer malzemelere ile de karşılaştırıldığında üstünlüğü görülebilmektedir. Çeliklerin özgül mukavemeti 110 Nm/g iken, polimer matrisli kompozitler olan cam lifi poliesterlerde 620 Nm/g, karbon lifi epokside 700 Nm/g ve kevlar epokside 886 Nm/g'dır. (Demirel, 2007)

Şekil 2.2' de kompozit malzeme ve kompoziti oluşturan elyaf ile matrisin gerilme-şekil değiştirme eğrisi görülmektedir. Polimer matrisli kompozitlerde takviye malzemesi olan elyaf sert ve kırılgandır, bunun yanında matris (polimer) sünektir. Malzemelerde genellikle elyaf halindeki dayanım, matris ile etkileşime girerek kompozit yapıyı oluşturduğu durumdaki dayanımından daha büyüktür. Elyaf yüzeyini sarmış olan düşük dayanımlı polimer matrise dışarıdan bir yük uygulandığında, gerilmeyi yüksek dayanıma sahip elyaf liflerine aktarır. Böylelikle matris, burkulmaya karşı direnç gösteren bir yapı meydana getirir. (Ongun, 2015)



Şekil 2.2: Elyaf ile Matris Arasındaki Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi (Aran, 1990)

Polimer matrisli kompozitlerin düşük sıcaklıklarda üretimi mümkün olduğundan dolayı, metal ve seramik matrisli kompozit malzemelere göre üretimi daha kolaydır. Matris olarak kullanılan termoset çeşitlerinden olan epoksi ve fenolik reçinelerde işlem sıcaklığı genelde oda sıcaklığı ile 200 °C arasında değişirken; termoplastik çeşitlerinden olan PI (polyimide), (PES) polyethersulfone ve (PEEK) polyether-etherketone reçinelerde ise 300 °C ile 400 °C arasında değişmektedir.

Polimer matrisli kompozit malzemeler arasında yer alan karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerde, matris malzemesi olarak termoset ve termoplastik polimerleri tercih edilmektedir. Termoplastikler bir çözücü içinde çözünmüş polimer ya da erimiş polimerlerken, termoset reçineler polimerize olmamış matris malzemeleridir. Bunun yanında takviye elemanı olarak kullanılan karbon fiberlerde kısa (süreksiz) ve sürekli elyaf olmak üzere çeşitlendirilir. Sürekli fiber ile takviyelendirilmiş kompozitlerde mekanik özellikler, elektriksel özdirenç ve termal iletkenlik daha iyidir.

Polimer matrisli karbon fiber takviyeli kompozitler için birçok üretim yöntemi bulunmaktadır. Kısa (süreksiz) fiberli kompozitler fiber ile sıvı reçinenin karıştırılması sonucunda kalıplanarak üretilirken; termoset polimer matrisli kompozitler, öncelikle termoset malzemenin katılaşması amacıyla karışımın bir kalıba doldurularak yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında katılaşmasının ardından, basınçlı kalıplama veya çift kalıp yöntemleri ile üretimi gerçekleştirilmektedir. (Dokur, 2009)

Polimer matrisli karbon fiber kompozitlerin özellikleri aşağıda görülmektedir.

- Alüminyumdan % 40 daha düşük yoğunluğa sahiptir.
- Yüksek mukavemetli çeliklerle eşdeğer mukavemete sahiptir.
- Düşük sürtünme katsayısı sahiptir ve aşınma direnci yüksektir.
- Titanyum kadar yüksek rijitliğe sahiptir.
- Termal genleşme katsayısı sıfır olmasından dolayı, boyut kararlılığına sahiptir.
- Kimyasal ve korozyon direnci yüksektir.
- Sürünme ve yorulma dayanımı yüksektir.
- Metallerden daha yüksek tokluk ve darbe toleransına sahiptir.
- Düşük elektriksel dirence ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir.
- Metallere göre, titreşimi absorbe etme özelliği çok yüksektir.

Kompozitin her tabakasında bağ yapısının oluşabilmesi için, kompozite uygulanan yükü taşıyan takviye elemanı olan elyafın, matris malzemesi olan reçine ile arasındaki bağlantının mükemmel olmasını sağlayan reçine katılaştırma ve kürleme işlemleri kompozit malzeme üretiminde en önemli aşamalardır. Termoset polimerli kompozit parçanın kürlenme işlemi sırasında, parçada fiziksel ve kimyasal değişimlere sebep olacak, bazı aşamalarının doğrudan kontrol edilebildiği şekillendirilme gerçekleştirilir. Takviye elemanlarının matrise ilavesi sırasında oluşan boşluklar ve yer değiştirmeler kürlenme işlemi sona ermiş kompozitte büyük değişikliklere sebep olabilir.

2.2. Polimer Esaslı Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri

Polimer esaslı kompozitlere ismini veren ‘polimerler’, bu kompozitlerde matris olarak kullanılan reçinelerdir. Tüm polimer çeşitleri uzun zincire benzer moleküllerden oluştuğundan dolayı genellikle benzer özellikler göstermektedir. Polimerler, ısı etkisi altında gösterdikleri tepkilere göre ‘termoplastik’ ve ‘termoset’ olmak üzere ikiye ayrılır.

Bununla beraber fenolik ve vinilester reçinelerin kullanımı da giderek artmaktadır. Termoplastik grubunda ise poliamid ve polipropilen kullanımının yanında, hibrid formdaki Termosetler grubunda polyester ve epoksi en yaygın kullanılan reçine çeşitleridir. polietilen ve polibutilen tereftalat ile polietereterketon ve polietersulfon tercih edilmektedir. Ayrıca ticari uygulamalarda naylon ve polikarbonatlar da kullanılmaktadır.

Termoplastikler, ısıtıldıkları zaman yumuşar ve erir, soğutulduğunda ise tekrar sertleşir. Her iki durumda da yumuşama ve erime noktalarını geçen bu işlemler, malzemenin kimyasal özelliklerinde herhangi bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Termosetlerde ise, reçine ve sertleştiricinin karıştırılması ile birlikte geri dönüşümü olmayan kimyasal bir reaksiyon sonucunda sert ve gevrek bir ürün ortaya çıkmaktadır. Fenolik reçineler gibi bazı termosetlerde yan ürün olarak uçucu maddeler üretilmektedir. Isı ile sertleşen polyester ve epoksi reçinelerde ise yan ürün olarak uçucu maddeler üretilmemesinden dolayı işlenmesi daha kolay olan mekanizmalarla kürleşme gerçekleşmektedir.

Termosetler bir kere sertleştikten sonra ısıtıldığında tekrar sıvı hale geçmemesine rağmen, molekül segmentlerinin hareket etmeye başladığı Tg (camsı geçiş sıcaklığı)nda mekanik özellikleri önemli derecede değişmektedir. Tg sıcaklığının üzerinde, malzemenin esnekliğinden dolayı kırmadan bükmek ve malzemeye tork uygulanabilmektedir. Tg sıcaklığının altında ise termoplastikler sert bir yapıya sahip olmalarından dolayı kırılgandırlar. Bunun sonucunda da sünme mukavemetleri yüksek, yorulma mukavemetleri düşüktür.

Karbon fiber kompozitlerde matris olarak başta epoksi reçine olmak üzere daha çok tercih edilen termoset reçinelerin mekanik ve fiziksel özellikleri **Çizelge 2.3**' te görülmektedir. (Dokur, 2009)

Çizelge 2.3: Bazı Termoset Malzemelerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri (Demirel, 2007)

Özellikler	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (g/cm^3)	1,11	1,04 - 1,46	1,24 - 1,32
Elastisite Modülü (GPa)	7	3,4	4,8
Çekme Dayanımı (MPa)	70	41 - 90	34 - 62
Kopma Uzaması (%)	3 - 6	4,2	1,5 - 2,0
Isıl İletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl Genleşme Katsayısı (I/C^o)	45 - 65	55 - 100	68

Termoset matrisli kompozitleri üretmenin avantajları aşağıdaki gibidir;

- Takviye elemanları, kullanılan termoset matris ile kolay ıslatılabildiğinden dolayı, gözenek ve boşluklar daha az olmaktadır.
- Termoset reçineler başlangıçta sıvı halde olduğundan, kompozit üretim aşamasında işlemleri kolaylaştırmaktadır.
- Termoset matrisli kompozitlerin üretiminde, yüksek ısı ve basınç gereksinimi olmadığından, enerji kazancı sağlanmaktadır.

- Termoset matrisli kompozitlerin üretiminde az karmaşık ve düşük maliyetli teçhizatlar kullanılmaktadır.

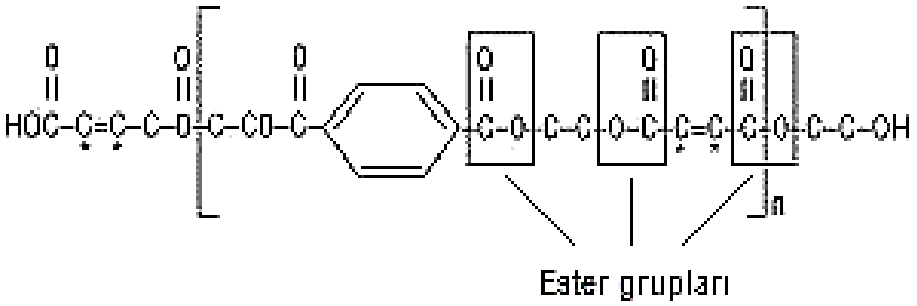
Termoset matrisli kompozitleri üretmenin dezavantajları ise aşağıdaki gibidir;

- Termoset matrislerin kürleşmesi uzun zaman gerektirdiğinden, kompozitlerin üretimi uzun sürebilmektedir.
- Termoset matrisli kompozitler parçalar kürleştikten sonra, tekrar şekil değiştiremezler.
- Termoset matrisli kompozitlerin geri dönüşümü sorun teşkil etmektedir.

2.2.1. Polyester Reçine

Polyesterler, termoset malzemeler arasında, sahip oldukları tepkimeye girmeye eğimli çift karbon-karbon bağlarıyla çapraz bağlanabilirler. **Şekil 2.3**' te de görüldüğü gibi ester bağlayıcı alkolün, bir organik asitle tepkimeye girmesiyle polyester meydana gelmektedir. Kimyasal tepkimeye daha da açarsak; bir diolün (iki ―OH grubu olan alkol) tepkimeye giren çift karbon- karbon bağı içeren bir diasitle (iki ―COOH grubu olan asit) tepkimesiyle polyester oluşmaktadır.

Etilen glikolun (alkol), maleik asitle (organik asit) tepkimeye girmesi sonucu doğrusal bir polyester oluşturmasında olduğu gibi ticari amaçlı reçinelerde farklı diol ve diasit karışımları ile istenilen bazı özellikler elde edilebilmektedir. Serbest köklü bir olgunlaştırma maddesi olan stirenin bulunduğu bir durumda, genellikle çizgisel polyester vinil türü moleküllerle çapraz bağ yapabilmektedir. (Kompozit Sanayicileri Derneği)

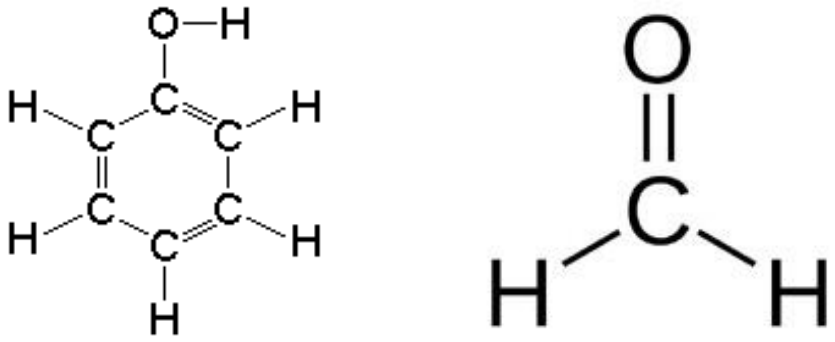


Şekil 2.3: Polyester Reçine Kimyasal Formülü (Cripps, 2017b)

Polyester reçine, % 80'e varan oranlarda cam elyaf takviyesi ve yüksek miktarda katkı maddeleri ile karıştırılabilen düşük viskoziteye sahip matris malzemesidir. Bu sayede cam elyafların her bir noktasını çok iyi ıslatabilmektedir. Cam elyaf takviyeli ve katkı maddesi ilave edilmiş polyester matrisler, çapraz bağlarını yaparak kimyasal reaksiyonu tamamladıklarında 172-344 MPa dayanıma, yüksek darbe dayanımına ve kimyasal dirence sahip olmaktadır. Polyesterin sertleşme sırasında kendini çekme oranı (%5 - %12) yüksek olduğundan dolayı; basma gerilmeleri altında malzemenin burkulmasına sebep olabilmektedir. Basma gerilmeleri altındaki dayanımı düşük olduğundan, düzgün yüzey elde etmek zordur. Korozyon dayanımı alkali ve bazik ortamlarda yüksek değildir. (Kompozit Sanayicileri Derneği / Aran, 1990)

2.2.2. Fenolik Reçine

Fenolik reçine, sanayide kullanılan ilk termoset malzemedir. Fenolik reçine, **Şekil 2.4**' te kimyasal formülleri görülen fenol ile formaldehit arasında oluşan kondensasyon polimerizasyon reaksiyonu ile üretilmektedir. Fenol, kömür katranının destilasyonundan veya sentetik olarak benzenden elde edilen katı bir malzemedir. Formaldehit ise, metil alkolün oksidasyonuyla elde edilen bir gazdır.



(a) **(b)**

Şekil 2.4: Fenolik Reçine **a)** Fenol **b)** Formaldehit (Dokur, 2009)

Ticari amaç için üretilen fenolik reçinelerde ilk olarak, resol veya novalak adı verilen düşük molekül ağırlıklı bir polimer üretilmektedir. Daha sonra bu polimere gerekli maddelerin ilavesiyle birlikte bir işlem daha uygulanarak yüksek molekül ağırlıklı bir malzeme elde edilmektedir. Bu işlemler sonucunda ortaya çıkan reçine, çok miktarda çapraz bağ içermesine rağmen, sıcaklık ve basınç altında dağılacak durumdadır. Son olarak uygulanan sıcak ortamda kalıplama ile çapraz bağlanmada son aşama gerçekleştirilerek dağılamayan bir termoset elde edilmektedir.

Düşük maliyetli fenolik reçineler, sert ve oldukça gevrek olup, iyi ısı yalıtımı ve iyi elektriksel yalıtkanlığa sahip matris malzemeleridir. RTM, enjeksiyon kalıplama ve basınçlı kalıplama gibi yöntemler kullanılarak kompozitlerin üretiminde matris olarak faydalanılmaktadır. Kompozit malzemeye işlenebilirlik ve yüksek dayanım kazandırmaktadır. Fenolikler reçineler, egzoz ve füze parçalarında, elektrik düğmelerinde ve fren balatalarında yüksek sıcaklık dayanımından dolayı tercih edilmektedir.

2.2.3. Epoksi Reçine

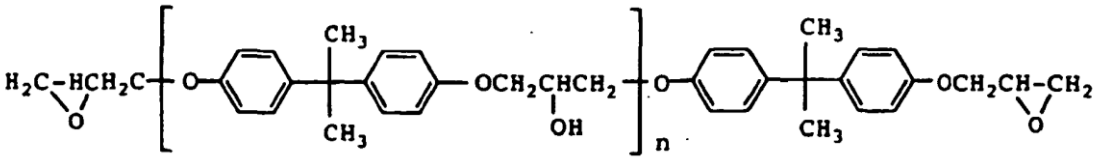
Epoksi reçineler doğrusal yapılı oligomer bileşikler olduğundan dolayı, tek başına fiziksel ve mekanik özellikleri çok düşüktür. Sertleştiriciler ile bir araya gelerek kimyasal olarak çok sayıda çapraz bağ içeren yapılara dönüştürülmektedir. Bu sayede epoksi

reçineler, yüksek fiziki ve mekanik özelliklerin yanında, yüksek kimyasal direnç ve elektrik yalıtkanlığı kazanmış olmaktadır. Epoksi reçinelerin sertleştirilmesi, çok fonksiyonlu maddelerle gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bazıları; poliamidler ile poliamid reçinesi, izosiyanatlar ile fenol formaldehit ve aminoformaldehit reçineleri, organik asitlerin anhidridleri ile polikondenzasyonu sertleştirilmektedir.

Sertleştirilmiş epoksi reçinenin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen faktörler aşağıda sıralanmıştır;

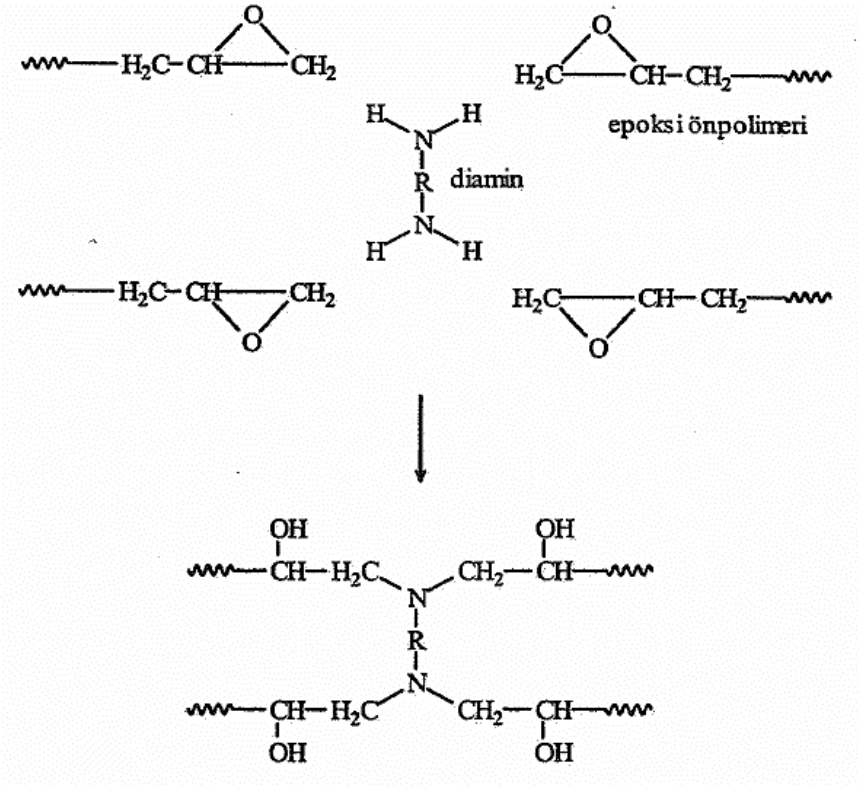
- Reçine ve sertleştiricinin fonksiyonel gruplarının türü ve bu grup sayılarına bağlı olarak çapraz bağlanma yoğunluğu,
- Reçine ve sertleştiricideki fonksiyonel grupların arasındaki çapraz bağların moleküler yapısı,
- Reçine ve sertleştiricinin arasındaki çapraz bağlanma yoğunluğu,
- Reçine ve sertleştiricinin sertleşme koşulları ve sertleşme derecesi.

Şekil 2.5' te kimyasal formülü görülen epoksi reçinelerin, her bir molekülünde iki veya daha fazla epoksi grubu bulunmaktadır. Formülde görülen n, genellikle sıvılarda 1'den küçük değer alırken, katılarda 2 veya daha büyük değerler alabilmektedir. Epoksi reçineler, çapraz bağlanma sağlayan sertleştirici veya katalizörlerle olgunlaştırılarak termoset malzemeler elde edilmektedir. Çapraz bağlanma tepkimeleri, gerekli olan aminler, anhidritler ve aldehit kondensasyon ürünleri ile epoksi hidroksil grubunun (—OH) bulunduğu yerlerde gerçekleşmektedir. (Kompozit Sanayicileri Derneği)



Şekil 2.5: Epoksi Reçinenin Kimyasal Formülü (Mitsubishi Chemical Corporatian)

Termoset epoksi elde edebilmek için bir sonraki aşamada; önpolimer, diamin ile birleştirilerek uygun bir çapraz bağ yaparak sertleşmesi sağlanır. Önpolimer ve diamin karıştırıldığında **Şekil 2.6**' da görüldüğü gibi epoksit grupları üzerinden çapraz bağlanma gerçekleşir ve termoset yapı elde edilmiş olur. (Demirel, 2007)



Şekil 2.6: Çapraz Bağlanmış Epoksi Polimeri (Demirel, 2007)

Olgunlaştırılmamış sıvı haldeki epoksi reçineler sahip oldukları düşük molekül ağırlığı, onlara işlem sırasında yüksek molekül hareketliliği sağlamaktadır. Bu sayede takviye malzemelerinin yüzeylerini hızlı ve tam olarak ıslatabilmektedir. Epoksid gruplarının aminlerle, yüksek dereceli tepkimeye girme isteğiyle gerçekleşen olgunlaştırma sonucunda; yüksek derecede çapraz bağlanma, iyi bir sertlik, dayanım ve kimyasal direnç meydana gelmektedir.

Dietilen triamin ve trietilen tetramin gibi aminler epoksi katı malzemenin ısı ihtiyacının çok olmadığı, oda sıcaklığında gerçekleşen olgunlaştırmada kullanılabilmektedir. Epoksid halkasının açılması sonucunda, epoksid grubundan bir oksijenin, amin veya hidroksil grubundan bir hidrojen ile tepkimeye girmesiyle epoksi tepkimesi oluşmaktadır.

Epoksi reçinenin pahalı olmasına rağmen diğer matris çeşitlerine göre tercih edilmesinin sebepleri aşağıda sıralamıştır;

- Düşük viskositesi sayesinde fiberlerin her noktasının iyi derecede ıslanmasını sağlamaktadır.
- Sahip olduğu düşük akım hızıyla, reçinenin uygulanması sırasında fiberlerin kayması önlenmektedir.
- Yüksek mukavemete sahiptir.
- Reçinenin kürleşmesi sırasında düşük uçuculuğa sahiptir.
- Düşük büzülme oranları sayesinde, epoksi ve sertleştirici arasında oluşan çapraz bağlarda görülen büyük kayma gerilmelerini azaltıcı etki göstermektedir.

2.3. Polimer Esaslı Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

Elyaflar polimer esaslı kompozitlerde takviye malzemesi olarak, matris hacminin yaklaşık % 30 - 70' ini kaplayan en önemli unsurlardan biridir. Elyafların kompozitlerde kıyılmış, dokunmuş, dikişli ve örgülü olmak üzere farklı kullanım şekilleri mevcuttur. Cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf polimer esaslı kompozit uygulamalarında en yaygın kullanılan elyaf çeşitleridir. **Çizelge 2.4**' te mekanik özellikleri verilen elyaf türleri arasında en pahalı fiyata karbon elyaf sahipken, cam elyaf en ucuz elyaf türüdür. (Bagherpour, 2012)

Çizelge 2.4: Cam, Karbon ve Aramid Elyaf Takviyeli Epoksi-Matris Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Kıyaslanması (Callister, 2007)

Özellikler	Cam Elyaf	Karbon Elyaf	Aramid Elyaf
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2,1	1,6	1,4
Çekme Modülü			
Boyuna [GPa]	45	145	76
Enine [GPa]	12	10	5,5
Çekme Dayanımı			
Boyuna [MPa]	1020	1240	1380
Enine [MPa]	40	41	30
Nihai Çekme Gerilmesi			
Boyuna	2,3	0,9	1,8
Enine	0,4	0,4	0,5

*** (**Elyaf / Hacim Oranı 0.60**)**

Kompozit yapının mukavemeti etkileyen en önemli etkenlerin başında, takviye elemanı olan elyafların matris içindeki yerleşimi gelmektedir. Birbirine paralel olacak şekilde matris içine yerleştirilen uzun elyafların doğrultusunda yüksek mukavemet elde edilirken, bu elyaflara dik doğrultuda düşük mukavemet değerleri elde edilmektedir. Yatay ve dikey olarak liflerle örülmüş elyaflarda ise her iki yönde de eşit mukavemet değerleri elde edilirken, kısa elyafların matris içerisinde homojen olarak dağıldığı yapılarda ise izotrop bir yapı görülmektedir.

Kompozit yapının mukavemetini etkileyen diğer önemli bir unsur ise elyafların mukavemetidir. Büyük kütlelere sahip yapılara karşın ince çaplı olarak üretilen elyaflar, üstün mekanik özelliklere sahiptir. Elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının başlıca nedenleri aşağıda sıralanmıştır;

- Mikroyapısal özelliklerinin diğer malzemelere göre üstün gelmesi,
- Küçük tane boyutu ve küçük lif çaplarına sahip olmaları,
- Yüksek elastisite modülü değerlerine sahip olması,

- Liflerin boy/çap oranı yükseldikçe, matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması.

2.3.1. Aramid Elyaf

Aramid elyaflar, mükemmel yorulma ve sürünme direncine sahip; aromatik polyamidlerden oluşan sentetik organik elyaflardır. Yapısal kompozit uygulamalarda en çok tercih edilen ve mekanik özellikleri **Çizelge 2.5**' te verilen aramid elyaf türleri; Kevlar 29, Kevlar 49 ve Kevlar 149' dur. Elastisite modülü eğrisi; Kevlar 29 için 83 GPa değerinde doğrusal iken, Kevlar 49 için kırılma sırasında 124 GPa değerinde doğrusal ve daha sonra koptuğu 100 GPa değerine kadar hafifçe içbükey bir hale gelmektedir. (Bagherpour, 2012)

Çizelge 2.5: Aramid Elyafların Mekanik Özellikleri (Bagherpour, 2012)

Özellikler	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149
Yoğunluk (gr/cm^3)	1,43	1,44	1,47
Elastisite Modülü (GPa)	83-100	124	143
Çekme Dayanımı (MPa)	2920	3000	3450

Aramid elyafın bazı önemli özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek çekme ve darbe dayanımı değerlerine sahiptir.
- Aşınma ve yorulma dayanımları oldukça yüksektir.
- Yüksek kimyasal dirence sahiptir.
- Aramid elyaflar cam elyaflara kıyasla % 35 daha hafiftir.
- Diğer elyaf türlerine göre daha düşük yoğunluğa sahiptir.

Aramid elyafın dezavantajlarını ise şöyle sıralamak mümkündür:

- Bazı aramid elyaf türleri ultraviyole ışınlarına maruz kaldığında bozulduğundan dolayı, karanlık ortamda saklanmaları gerekmektedir.
- Aramid elyaflar, matris ile kimyasal veya mekanik bir bağ oluşturmada güçlük çekebilmektedir. Böyle bir durumda da iyi bir birleşme sağlanamayarak, reçinede çatlaklar oluşmasına ve malzeme yorulduğu esnada su emişi gerçekleşmesine sebebiyet verir. (Kompozit Sanayicileri Derneği/Bagherpour, 2012)

2.3.2. Cam Elyaf

Cam elyaf, polimer esaslı kompozitlerin üretiminde en çok tercih edilen takviye malzemesidir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde daha çok el yatırması, vakum torbalama ve vakum infüzyon yöntemleri kullanılmaktadır.

Bazı cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri **Çizelge 2.6**' da verilmiştir. En yaygın kullanılan cam elyaf türlerinden olan A-camı, kimyasal direnci yüksek, maliyeti düşük olmasına karşın yüksek oranda alkali içerdiğinden dolayı elektriksel yalıtkanlığı düşüktür. Yüksek korozyon direnci sahip olan C-camı, inşaat mühendisliği uygulamalarında tercih edilmektedir. E-camı ise A-camının tersine düşük alkali oranına sahip olduğundan dolayı elektriksel yalıtkanlığı yüksektir. Aynı zamanda suya karşı direncinden dolayı nemli ortamlar için üretilen kompozitlerde tercih edilebilir.

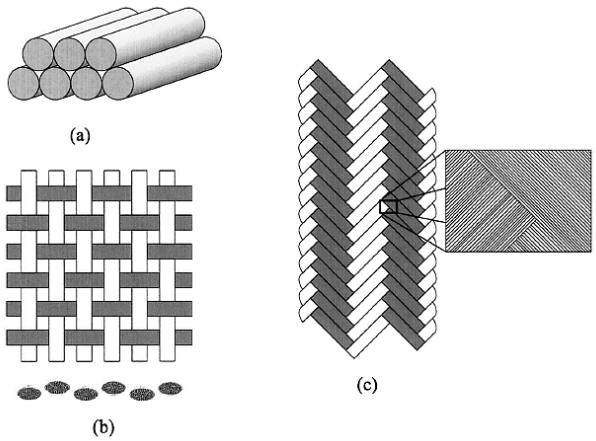
Çizelge 2.6: Farklı Cam Elyaf Türlerinin Mekanik Özellikleri (Bagherpour, 2012)

Özellikler	A-Cam	C-Cam	D-Cam	E-Cam
Yoğunluk (gr/cm^3)	2,44	2,52	2,11 - 2,14	2,58
Çekme Dayanımı (MPa) – 196 ºC		5380		5310
Çekme Dayanımı (MPa) – 23 ºC	3310	3310	2415	3445

Kireç, alümina ve borosilikattan üretilen cam elyaf, çapları $2x10^{-6}$ ila $13x10^{-6}$ m arasında değişen çok ince liflerden oluşmaktadır. Bu çok ince yapıdaki izotropik lifler, çelikten daha düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. Artan sıcaklık ile mukavemeti azabilen cam elyaf; sürekli bir yük altındaki kompozit yapının tasarımında, istenildiği gibi kullanılabilme özgürlüğüne sahiptir. (Ongun, 2015/Bagherpour, 2012)

2.3.3. Karbon Elyaf

Karbon elyaf, grafit lifinin 2400 °C' den daha yüksek bir sıcaklığa ısıtıldıktan sonra elde edilen bir lifler grubudur. Grafitleşme süreci, çok yönlü ve katmanlı bir kristalografik yapıya neden olmasının sonucunda; karbon formların kimyasal ve fiziksel yapılarında önemli ölçüde değişimler olmaktadır. Anizotropik yapıdaki grafit, kristal altıgen simetriye sahiptir. Karbon elyafında, liflerin uzunluğu boyunca veya enine doğrultuda elastisite modülü farklı olacaktır. Karbon elyafta yapının daha grafitik hale gelmesi sonucunda, eksen doğrultusunda elastisite modülü artar ve anizotropi derecesi artmaktadır. **Şekil 2.7**, karbon elyafların kullanılabileceği farklı biçimleri göstermektedir. Liflerin, **Şek. 2.7 (b)** ve **(c)**' de görüldüğü gibi dokuma ve örgü şekillerini alabilmeleri gerekli esnekliğe sahip küçük çaplı elyaflar ile mümkün olabilmektedir.



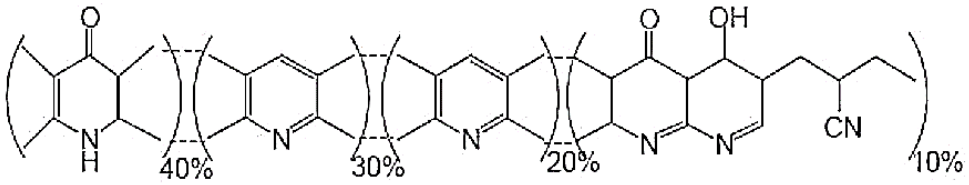
Şekil 2.7: Karbon Lif Formları **a)** Tek Yönlü **b)** Dokuma **c)** Örgü Elyaflar (Chawla, N. & Chawla, K., 2013)

Şekil 2.8’ de görülmekte olan karbon elyaf takviyeli polimer esaslı kompozitler, 6061 alüminyum yapılardan 7 kat daha dayanıklı ve 2 kat daha sert olmasına karşın 1,5 kat daha hafiftir. Ayrıca 1020 çelik yapılardan ise 5 kat daha dayanıklı olmasına karşın 5 kat daha hafiftir. Karbon elyafın yorulma dayanımı metallerden daha yüksektir. Karbon fiber takviyeli kompozitlerin korozyon direnci oldukça iyidir. Özellikle katran esaslı karbon elyafların elektriksel iletkenliği bakırdan daha yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda çalışan uçak frenlerinde ve roket parçalarında, yüksek sıcaklık direncinden dolayı karbon elyaflar kullanılmaktadır. (Yaman, Öktem & Seventekin, 2007)



Şekil 2.8: Karbon Fiber Kumaş

Karbon elyaflar, yüksek dayanım değerleri ve hafiflikleri sayesinde son yıllarda yüksek performanslı kompozitlerin hazırlanmasında en çok tercih edilen takviye malzemelerindendir. Kimyasal yapısında, % 90’ dan fazla karbon ve onu tamamlayacak oranlarda azot, oksijen ve hidrojen elementleri bulunan karbon elyafın bileşimi ise, oksidasyon şartlarına, sıcaklığa ve zamana göre farklılık göstermektedir. **Şekil 2.9**’ da PAN (poliakrilonitril) bazlı karbon elyafın kimyasal bileşimi görülmektedir.



Şekil 2.9: Karbon Fiberin Kimyasal Bileşimi (Akgün, 2008)

Karbon elyaflar, üretim yöntemi ve kullanılacağı alana göre iki biçimde bulunmaktadır;

- *Sürekli Elyaflar:* Tüm reçinelerin matris olarak kullanılabileceği dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve prepreglerde kullanılmaktadır.
- *Kırpılmış Elyaflar:* Genellikle enjeksiyon kalıplama ve basınçlı kalıplama yöntemiyle üretilebilen makine parçaları ve valf yapımında kullanılmaktadır.

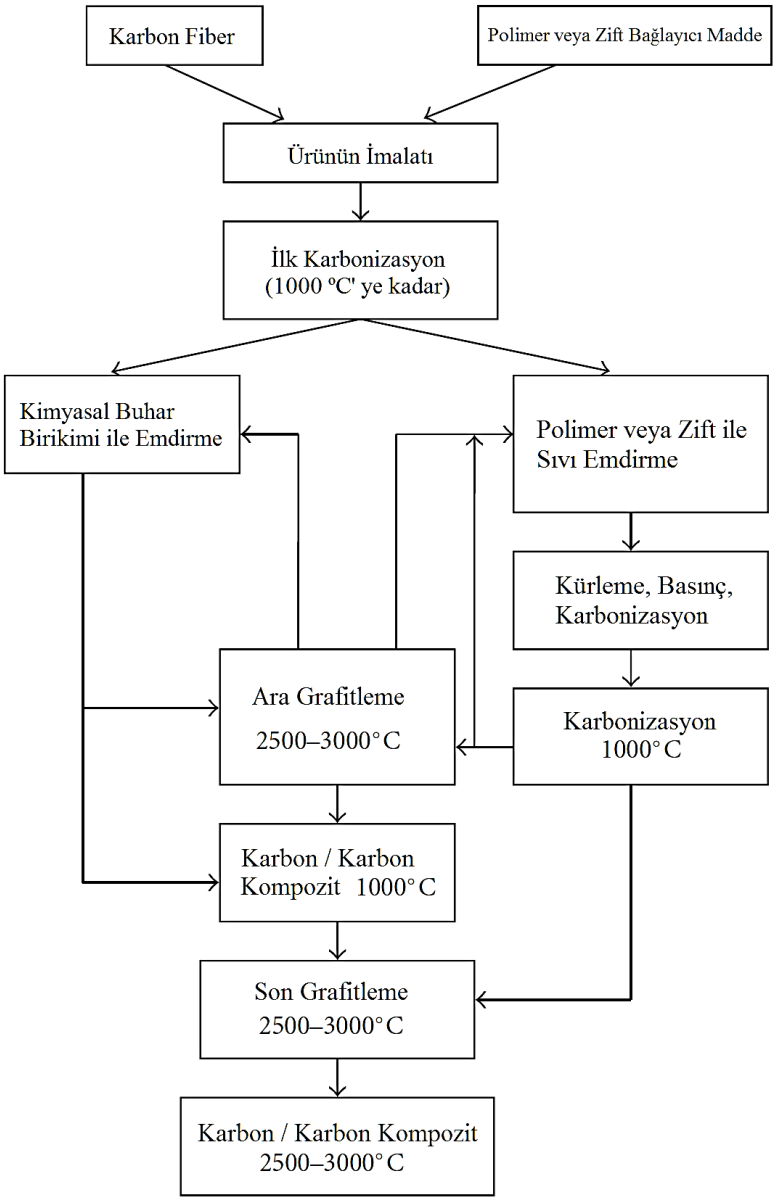
Ham madde olarak PAN, Selüloz (Rayon) ve Ziftin kullanıldığı karbon elyaf üretim sürecinde; PAN bazlı elyafların çekme mukavemeti değerleri 2413 ile 3102 MPa arasında değişmektedir. 2069 MPa çekme mukavemetine sahip zift bazlı elyafların mekanik özellikleri PAN bazlı elyaflar kadar iyi olmasa da maliyetleri daha düşüktür. **Şekil 2.10**' da da görülmekte olan, PAN bazlı karbon elyafın üretimi birbirini takip eden dört aşamada gerçekleşmektedir;

1. Oksidasyon: Elyaflar hava ortamında 300 ºC' de ısıtılarak, yapısındaki H' nin ayrılması ve daha uçucu olan O' nin eklenmesi sağlanmaktadır. Karbonizasyon aşaması için hazırlanan elyaflar kesilerek grafit teknelerine konur. Polimerin kararlı bir halka yapısına dönüştüğü bu aşamada; elyafın rengi beyazdan kahverengiye ve son olarak siyah rengini alır.

2. Karbonizasyon: Uygulanan sıcaklık miktarına göre aynı zamanda sınıfı da belirlenen elyafların, yanıcı olmayan atmosferde 3000 °C' ye kadar ısıtılmasıyla liflerin % 100 karbonlaşması sağlanmaktadır.

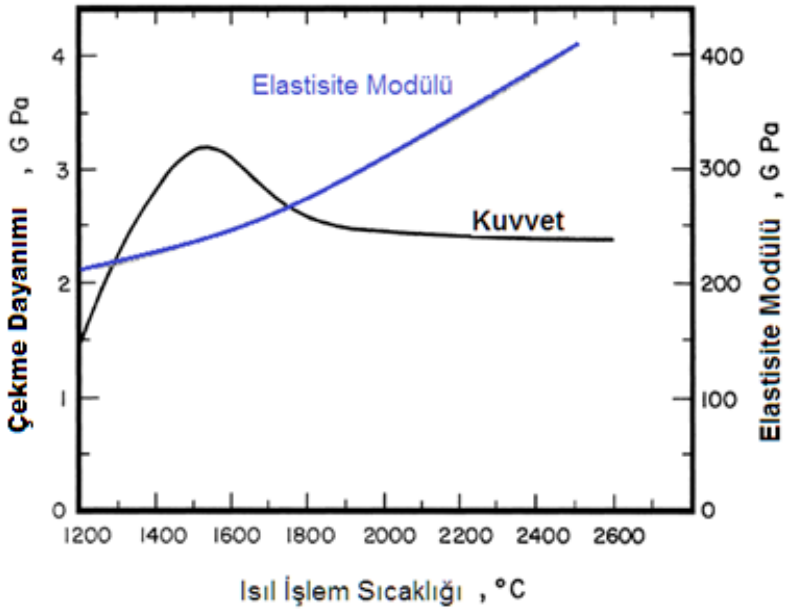
3. Yüzey iyileştirmesi: Elyafın kompozit malzemenin matrisi olan reçine ile daha iyi yapışabilmesi için, karbonun yüzeyi temizlenerek ve elektrolitik banyoya yatırılmaktadır.

4. Kaplama: Genellikle epoksi reçine kullanılarak elyafın kaplandığı bu işlemde; elyafı, matris ile aralarında bir ara yüzey oluşturarak sonraki işlemlerden korumak amaçlanmaktadır. (Demirel, 2007)



Şekil 2.10: Karbon / Karbon Kompozitlerin Üretim Süreçleri (Li, Shen, Su, Chiang & Yip, 2012)

PAN bazlı karbon elyafların çekme mukavemetini sınırlayan en önemli hacim kusurlarından biri, bazal düzlem (Mrozowski) çatlaklarıdır. 1500 °C' nin üzerinde gerçekleşen yüksek sıcaklık işleminin ardından yapılan soğutma sırasında, şerit şeklindeki anizotropik termal kasılmaların sonucunda Mrozowski çatlakları oluşmaktadır. Isıl işlem görmüş elyaflarda, lif ekseni boyunca görülen bu çatlaklar, **Şekil 2.11**' de görüldüğü gibi çekme mukavemetini düşürürken elastisite modülünde değişikliğe sebep olmazlar. (Lubin, 1982)



Şekil 2.11: Çekme Dayanımı ve Elastisite Modülü Üzerine Sıcaklığın Etkisi (Chawla N. & Chawla K., 2013)

2.4. Polimer Esaslı Kompozitlerde Kullanılan Katkı Malzemeleri

Katkı malzemeleri, üretilen kompozitin mekanik ve fiziksel özelliklerini kontrol etmek amacıyla matrise katı halde eklenen malzemelerdir. Eklenen katkı malzemesi yüzeyiyle polimer zincirinin temas edebilmesi, katkı malzemesinin matris içerisinde homojen dağılımı sayesinde olabilmektedir.

Genel olarak katkı malzemelerinin temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır;

- Kompozite uygulanan yükün reçine ile takviye malzemesi arasında dağılımını sağlayarak, mekanik ve fiziksel performansı arttırmaktadır.
- Reçineye boyutsal kararlılık, ısıl dayanım, su ve hava direnci, sertlik kazandırır.
- Alev dayanımını yükseltici etkisi vardır.
- Yoğunluğu düşük katkı malzemeleri, hafif ve performansı yüksek kompozitler ortaya çıkmasını sağlayarak maliyeti düşürür.

Kompozitin uzamasını ve çekme gerilmesini arttırabilmek için, eklenen katkı malzemesinin matrise göre mukavemetinin yüksek olması gerekirken, basma gerilmesini iyileştirmek için küçük ve küresel katkı malzemeleri kullanılmalıdır. Matrise göre daha yüksek elastisite modülüne sahip katkı malzemeleri kullanılarak, kompozitin tokluğu arttırılabilir. Sert katkı malzemeleri kullanılarak kompozitin sertliği arttırılabilirken, yumuşak ve kayma özelliği yüksek katkı malzemeleri ile düşük aşınma özelliğine sahip kompozitler elde edilebilir.

2.4.1. Silisyum Karbür

Silisyum karbür, çok sert ve aşındırıcı özelliği olmasının yanında, yüksek sürünme mukavemetine sahip olmasından dolayı en çok tercih edilen seramik malzemelerden biridir. Kimyasal etkilere karşı yüksek bir dirence sahiptir.

Silisyum (Si) elde etmek amacıyla, silisyum dioksitin (SiO_2) kok kömürü (grafit) ile elektrikli fırında indirgenmesi sırasında gereğinden fazla karbon kullanılması durumunda silisyum karbür elde edilmektedir. **Çizelge 2.8'** de özellikleri yer alan SiC, kovalent bağlara sahiptir ve bu sayede yüksek elastisite modülü değeri vermektedir. En önemli özelliği ise yüksek sıcaklık altında, özelliklerini kaybetmemesidir. **Çizelge 2.7**' de farklı SiC tiplerinin mekanik özellikleri görülmektedir. (Wikipedia/Eker Akdoğan, 2008b)

Çizelge 2.7: SiC Malzeme Tiplerinin Mekanik Özellikleri (Metalurji ve Malzeme Platformu, 2013a)

SiC Malzeme Tipi	Yoğunluk (gr/cm^3)	Elastisite Modülü (GPa)	Genleşme Katsayısı 30-1500 ºC (10^{-6}/K)	Termal İletkenlik 600 ºC (W/mK)	Eğme Mukavemeti 20 ºC (MPa)
K-SiC	2,55	100	5,8	16	30
R-SiC	2,60	240	5,0	28	100
RB-SiC por.	2,60	250	5,0	25	250
RB-SiC yoğ.	3,18	280	4,2	-	350
Si-SiC	3,12	400	4,3	60	350
S-SiC	3,15	410	4,9	50	430
HP-SiC	3,20	450	4,5	55	640
HIP-SiC	3,21	450	4,5	75	640
HIPS-SiC	3,19	450	4,8	50	450

*** K:** kristalize, **R:** rekristalize, **RB:** reaksiyon bağlı, **S:** sinter, **HP:** sıcak pres, **HIP:** sıcak izostatik pres, **HIPS:** sıcak izostatik presle sinterleme

SiC saflık seviyelerine göre; metalurjik, abrasif ve sinter amaçlı olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. % 90' ın altında saflıktaki SiC' ler metalurjik uygulamalarda, saflığın % 97,5 veya daha düşük olduğu durumlarda abrasif ve refrakter amaçlı kullanılmaktadır. Yüksek saflıktaki (yeşil) silisyum karbür ise sertlik, kimyasal saflık ve aşınma dirençli karakteristiklerinden dolayı sinter amaçlı kullanılmaktadır. (Metalurji ve Malzeme Platformu, 2013b)

Çizelge 2.8: Silisyum Karbürün Mekanik ve Fiziksel Özellikleri (Townsend, 2017/ Munro, 1997)

Yoğunluk (g/cm^3)	Termal İletkenlik (W/cmK)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
3,21	3,2 – 4,9	250	442 - 448

SiC' ün belirtilen fiziksel özelliklerine göre kullanım alanları şöyledir;

- Sertlik özelliğinden dolayı; kimyasal işlem endüstrisi için kaplamalar ve valfler, hidrosiklonlar, lens kalıpları, roket memeleri, sprey kurutma için aşınma plakalarında kullanılmaktadır.
- Aşınma ve erozyon direnci özelliğinden dolayı; havacılık endüstrisinde yağ, yakıt deposu, pompa malzemeleri ve kalıplarda kullanılmaktadır.
- Isı dayanımından dolayı; yüksek sıcaklıkta çalışan roket meme bağlantılarında, ısı değişim tüplerinde, difüzyon fırını parçalarında, karbon elyaf takviyeli seramik fren disklerinde kullanılmaktadır.

2.4.2. Magnezyum Silikat

Çizelge 2.9' da özellikleri verilen magnezyum silikat; suda çözünmeyen, beyaz, kaygan ve yumuşak amorf yapılı bir katkı malzemesidir. Bileşiminde % 63,5 SiO_2, % 31,7 MgO ve % 4,8 H_2O bulunan magnezyum silikatın teorik formülü $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$' dir. Monoklinik kristal yapıya sahip olan magnezyum silikatın, ısı ve elektrik iletkenliği düşüktür. Yüksek sıcaklıklarda ısıtıldığında sertleşerek katı hale dönüşür. Ayrıca asitlerden etkilenmeyerek yapısında bozulma gözlenmemektedir. (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü / Olgun, 2009)

Çizelge 2.9: Magnezyum Silikatın Mekanik ve Fiziksel Özellikleri (The Engineering ToolBox)

Yoğunluk (g/cm^3)	Termal İletkenlik (W/cmK)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
2,3 – 2,8	3 - 5	17,2	27,6 – 34,5

Magnezyum silikat, 1400 °C sıcaklığa sahip cam ergitme fırınlarında kuvarsın sodyum karbonat ile kimyasal reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan sodyum silikat çözeltisinin, suda çözünebilen magnezyum tuzu ile reaksiyonu ile üretilmektedir.

Ticari olarak kullanılan magnezyum silikatların saflıkları birbirinden çok farklılıklar göstermektedir. Bu katkı malzemeleri; saf magnezyum silikat halinde veya magnezyum silikat yataklarında bulunan dolomit, kalsit, diyopsit, magnetit, pirit, tremolit-aktinolit, serpantin, kuvars ve mika gibi minerallerin değişik oranlarda karışımı halinde bulunmaktadır. (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

2.4.3. Kaolen

Kaolen "china clay" olarak da bilinen, saflığı düşük olan önemli bir kil mineralidir. Birçok sektörde üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle, çok çeşitli amaçlar için tercih edilen katkı malzemelerinden biridir. Beyaz yakın tonlardaki rengi, içeriğindeki yüksek Al_2O_3 miktarı, su ile birleştiğinde plastik özellik kazanması, mukavemet değerlerinin pişirilerek artabiliyor olması kullanımını arttırmaktadır. Kaolenin tabakaları arasında değişebilir katyonları sayesinde; ilaç, kozmetik, boya, plastik sanayisinde kullanılmaktadır.

Kaolen, tetrahedral tabakanın oksijen atomları vasıtasıyla alümina oktahedral tabakaya bağlanması ile ortaya çıkmaktadır. Bileşiminde % 38,8 Al_2O_3, % 45,4 SiO_2, % 0,2 MgO, % 0,97 K_2O, % 0,07 Na_2O ve kalanında Fe ile çeşitli mineraller bulunan kaolenin teorik formülü $Si_2Al_2O_5(OH)_4$' tür. Tane boyutlarına bakıldığında; sert kaolen tanelerinin % 75'inin boyutu 2 μm' dan küçük, yumuşak kaolenlerin tane boyutları ise daha büyüktür. Kimyasallara karşı direnci yüksek ve elektrik iletkenliği yoktur. Kullanıldığı kompozitte

su emme oranını düşürür. Bunun dışında daha Lamelar yapıya sahip olan kaolende ortaya çıkan kompozitin sertlik derecesi yüksektir. İlave edildiği kompozitte iyi bir şok direnci ve yüzey kalitesi elde edilmesini sağlamaktadır. (Ongun, 2015 / Kompozit Sanayicileri Derneği / Eygi & Ateşok, 2010)

2.5. Polimer Esaslı Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

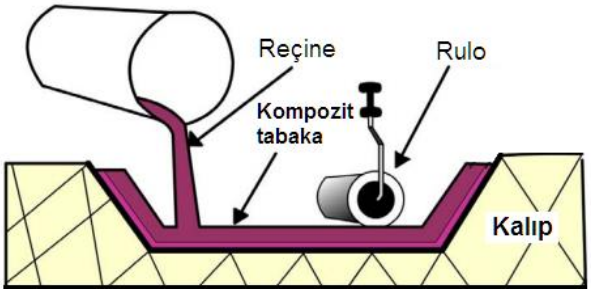
Polimer esaslı kompozit malzemelerde seçilecek olan üretim yöntemi; takviye malzemesi (elyaf), matris (reçine), üretilecek olan parça şekline, zamana ve parçanın kullanılacağı alana göre istenen mekanik özelliklere göre seçilmektedir. **Çizelge 2.10**' da kompozit malzemelerin üretim yöntemlerini belirleme kriterleri yer almaktadır.

Çizelge 2.10: Kompozit Malzemelerin Üretimin Yöntemini Belirleme Kriterleri (Mazumder, 2002)

Üretim Yöntemi	Üretim Hızı	Ücret	Güç	Boyut	Şekil	Hammadde
İplik Sarma	Yavaştan hızlıya	Düşükten yüksek fiyata	Yüksek	Küçükten büyüğe	Silindirik ve Asimetrik	Sürekli fiberler / epoksi ve polyester reçineler
Pultrüzyon	Hızlı	Düşükten orta fiyata	Yüksek (boyuna yönde)	Uzunluk kısıtlaması yok, küçükten orta büyüklüğe kesit	Sabit kesit	Sürekli elyaflar / polyester ve vinilester reçineler
El Yatırma	Yavaş	Yüksek	Yüksek	Küçükten büyüğe	Basitten karmaşığa	Prepreg ve kumaş ile epoksi reçine
Islak Yatırma	Yavaş	Orta	Ortadan yükseğe	Orta büyüklükten büyüğe	Basitten karmaşığa	Kumaş ile polyester ve epoksi reçineler
Püskürtme	Orta hızdan hızlıya	Düşük	Düşük	Küçükten orta büyüklüğe	Basitten karmaşığa	Reçine ile kısa fiber
Reçine Transferli Kalıplama (RTM)	Orta hızda	Düşükten orta fiyata	Orta	Küçükten orta büyüklüğe	Basitten karmaşığa	Vinilester ve epoksi ile preform ve kumaş
SRIM	Hızlı	Düşük	Orta	Küçükten orta büyüklüğe	Basitten karmaşığa	Kumaş ve poliizosiklinal reçine ile preform
Basınçlı Kalıplama	Hızlı	Düşük	Orta	Küçükten orta büyüklüğe	Basitten karmaşığa	Hazır kalıplama bileşenleri (SMC, BMC)
Presleme	Hızlı	Orta	Orta	Orta büyüklük	Basitten karmaşığa	Termoplastiğe emdirilmiş kumaş
Enjeksiyonla Kalıplama	Hızlı	Düşük	Düşükten ortaya	Küçük	Karmaşık	Termoplastik ile kısa lif
Rulo Sarma	Orta hızdan hızlıya	Düşükten orta fiyata	Yüksek	Küçükten orta büyüklüğe	Boru şeklinde	Prepregler

2.5.1. El Yatırma

El yatırma yöntemi özellikle CTP (cam elyaf takviyeli polyester) gibi elyaf takviyeli plastiklerin üretiminde kullanılan, en basit üretim yöntemidir. Bu yöntemde; hazırlanan kalıbın içerisine yerleştirilen dokuma kumaş şeklindeki elyaf, fırça gibi basit el aletlerinin yardımı ile reçine tarafından ıslatılır. İstenilen kalınlık elde edilene kadar her bir tabaka için bu işleme devam edilir. Reçinenin elyafı ıslatma işlemi sona erdikten sonra, reçine içinde kalan hava kabarcıkları **Şekil 2.12**' de görüldüğü gibi bir rulo yardımıyla çıkartılır. Reçine, işlem öncesinde sertleştirici ilavesi yapılmasından dolayı genellikle oda sıcaklığında kürleşmektedir. Ancak tam sertleşme istenildiği takdirde ek bir ısıl işlem yapılabilmektedir.



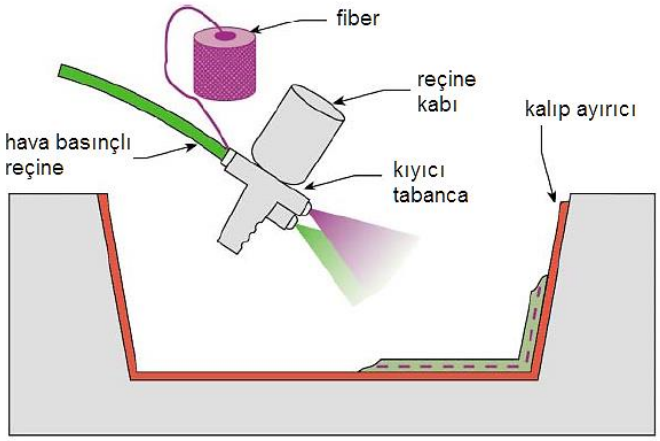
Şekil 2.12: El Yatırma ile Kompozit Üretimi (Zin, Razzi, Othman & Mazlan, 2016)

El yatırma yönteminde tüm termoset reçineler kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak ise ağır aramid kumaşların bu yöntemle ıslatılması zor olmasından dolayı onun haricindeki aramid elyaflar ile karbon ve cam elyaflar kullanılabilir.

Bu yöntemde, araç ve gereç için yapılan yatırımın düşük olması ve çok fazla teknik bilgi gerektiren durum olmaması avantaj olarak görülürken; dezavantaj olarak da model, prototip gibi az sayıda parça üretimi için tercih edilebilir olması ve genellikle elyafın reçine tarafından homojen bir şekilde ıslatılamamasında dolayı parçanın her yerinde aynı mekanik özelliklerin elde edilememesi sıralanabilir.

2.5.2. Püskürtme

Püskürtme yönteminde tabancaya sürekli olarak beslenen elyaf, kesici bıçaklardan geçerek kırpıldıktan sonra reçine ve sertleştirici ile karıştırılarak jelkot uygulanmış kalıp yüzeyine **Şekil 2.13**' te gösterildiği gibi püskürtülür ve oda sıcaklığında sertleşmeye bırakılır.

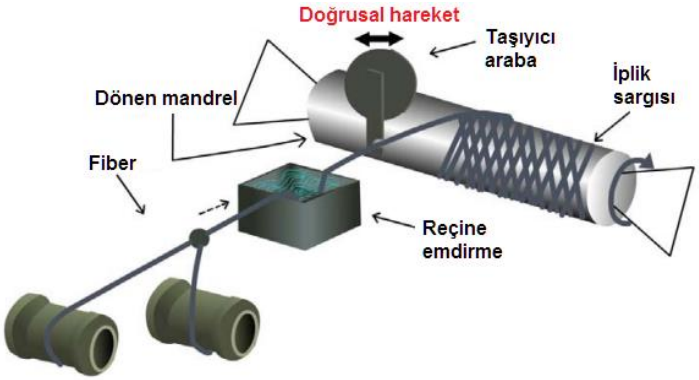


Şekil 2.13: Püskürtme Yöntemi Uygulaması (Ataş)

Püskürtme yöntemi, dokuma kumaş kullanılarak yapılan el yatırmanın mekanize olarak yapılan halidir. El yatırmada olduğu gibi, rulo ile reçine içinde kalan havayı çıkarma ve yüzeyi düzeltme işlemi uygulanır. Matris olarak genellikle polyester reçine ve takviye malzemesi olarak da demet halindeki lifler kullanılmaktadır. Karmaşık yapılı parçaların üretimi için uygun bir yöntem olmasına karşın, kıyılmış elyaflar ile uygulanabilmesinden dolayı üretilen parçalarda düşük mekanik özellikler elde edilebilmektedir.

2.5.3. İplik Sarma

İplik sarma yönteminde, **Şekil 2.14**' te görüldüğü üzere sürekli fiberler kendi ekseni etrafında dönen mandrel etrafına belirli hız ve açıda sarılır. Sarma sırasında elyafa bir gergi kuvveti uygulanmaktadır. Bu yöntemle roket gövdeleri, depo, boru ve basınçlı kap gibi silindirik parçalar üretilmektedir. Bu silindirik parçaların üretiminde, epoksi, polyester gibi herhangi bir termoset reçine kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak ise kumaş şeklindeki elyaflar yerine sürekli lifler kullanılmaktadır. Sürekli lifler ise iki şekilde kullanılabilir. İlk yöntemde elyaf sarılmadan hemen önce reçineye daldırılarak serme işlemi gerçekleştirilir, diğer yöntemde ise daha önceden reçine emdirilmiş prebreg kullanılır. İki ucu kapalı parçaların üretiminde, içerisinden çıkarılabilecek malzemeden üretilmiş kalıplar tercih edilmektedir.



Şekil 2.14: İplik Sarma Yöntemi Uygulaması (NPTEL)

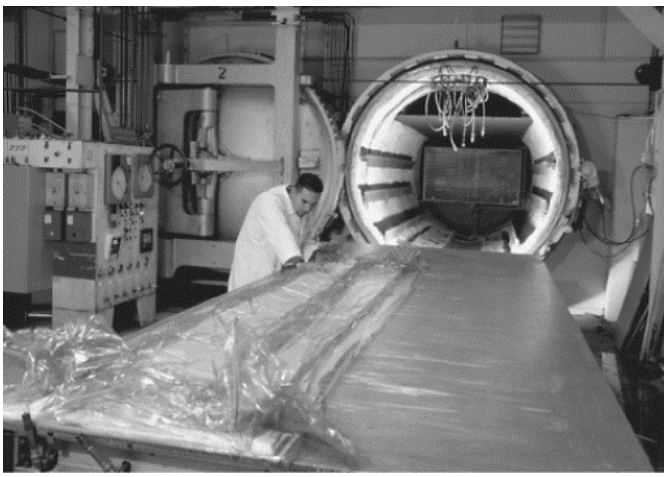
2.5.4. Vakum Torbalama

Vakum torbalama yöntemi; büyük ve karmaşık şekilli parçaların üretilebildiği, el yatırmanın gelişmiş bir uygulamasıdır. Bu yöntemde el yatırma işleminin devamında, reçine sürülmüş tabakalı yapı vakum ortamına alınmaktadır. Vakum işleminin ardından

fırında pişme işlemi uygulanır. Matris olarak özellikle epoksi ve fenolik reçine kullanımı uygundur. Vakum sayesinde sağlanan yüksek basınçlı ortam ile reçinenin liflerin arasına nüfuz etmesi kolaylaşır ve fazlalık reçinenin dışarı atılması sağlanır. Bu özelliklerinden dolayı; el yatırma yöntemine göre daha az hava kabarcığı ve boşluklar görülürken, daha yüksek karbon fiber oranı elde edilmektedir.

2.5.5. Otoklav

Otoklav yöntemi, iç basıncın, sıcaklığın ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı kap içerisinde gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. Vakum torbalama yönteminden farklı olarak; fırın yerine bir otoklav kullanılmaktadır. Böylece üretilecek parçanın kullanım alanlarına uygun olarak, yüksek kalitede üretim yapabilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilmektedir. Bu yöntemi uygulayabilmek için kurulacak sistemin ilk yatırım maliyeti yüksektir ve diğer yöntemlere göre daha uzun sürede uygulanmaktadır.



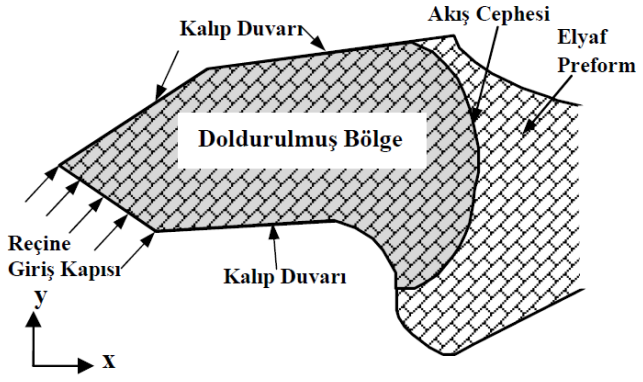
Şekil 2.15: Otoklav Üretim Yöntemi (Ataş)

Bu yöntemde sırasıyla; üretimi yapılacak parçanın laminasyon şemasına uygun olarak, genellikle prepreg kullanılarak tabakalama işlemi ve vakum torbalaması yapılmaktadır.

Hazırlanan malzeme daha sonra; kontrol edilebilir basınç ve sıcaklık altında, pişme ve katılaşma işlemlerini gerçekleştirmek amacıyla **Şekil 2.15**' te görülmekte olan otoklav fırınının içine yerleştirilir. Pişme ve katılaşma; reçine tipi (reçine ve sertleştirici), üretilecek malzemenin kalınlığı ve geometrisine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Otoklavda ihtiyaç duyulan basınç; vakum torbalamada olduğu gibi torbalanmış malzemeye iç vakum uygulayarak veya otoklav içine dışarıdan basılan hava veya azot gazı ile oluşturulan dış basınç ile elde edilebilmektedir. Yüksek pişme sıcaklıklarında, tutuşma ve yanma olasılığına karşın azot gazı daha çok tercih edilmektedir.

2.5.6. Reçine Transfer Kalıplama

Reçine transfer kalıplama yönteminde, yüzeyine jelkot uygulanarak düzgün ve parlak hale getirilmiş iki kalıp (dişi ve erkek kalıp) kullanılmaktadır. Alt dişi kalıba öngörülen takviye malzemeleri yerleştirildikten sonra üzerine üst erkek kalıp kapatılır. Daha sonra **Şekil 2.16**' da görüldüğü gibi kalıpların arasına vakum yoluyla reçine enjekte edilir.



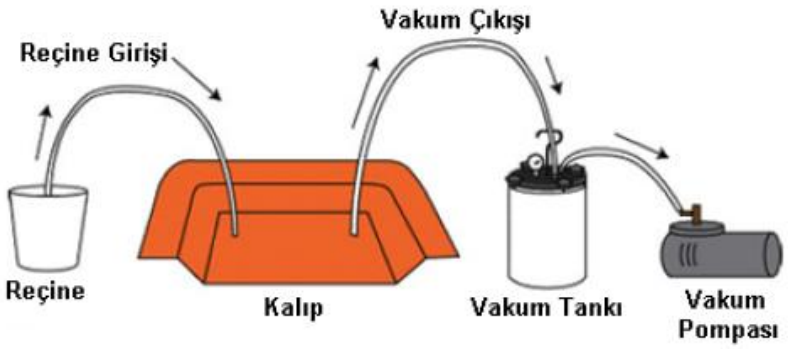
Şekil 2.16: RTM Yönteminde Reçine Enjeksiyon Aşaması (Erdal, İpek & Şaş, 2009)

Reçinenin ilerlemesinin güç olabileceği bazı uygulamalarda vakum da yapılmaktadır. Kalıplar arasında akışkanlığı sağlayabilmek için düşük viskoziteli reçineler tercih

edilmelidir. Bu yöntemle, 2-10 mm cidar kalınlığına ve % 20-30 fiber oranına sahip kompozit parçalar üretilebilmektedir. (Ataş)

2.5.7. Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi tüm dünyada başta gemi ve otomotiv imalatı olmak üzere birçok sektörde uygulanmakta olan bir yöntemdir. Bu yöntem en genel tanımıyla; vakumlanmış kapalı ortam içerisinde reçinenin vakum deliğine doğru ilerlemesi prensibiyle çalışmaktadır. Karmaşık geometri ve yapılara sahip parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Dar aralıkların, uzun akış yollarının ve yerçekimine karşı reçine akışının söz konusu olduğu yerlerde, zorlu geometrilere sahip parçalarda reçinenin en kısa sürede elyaflara emdirilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı, üretilecek parçalara ve ortam koşullarına uygun viskoziteye sahip reçineler tercih edilmelidir. Vakum infüzyon yöntemi **Şekil 2.17**' de görüldüğü gibi; vakum pompası, vakum tankı (reçine akış tankı), kalıp ve reçine kovası olmak üzere dört ana bölümden oluşur. Bu dört bölümün genel sistem mantığı aynı olmakla birlikte, bağlantı şekillerinde değişiklik olabilmektedir.

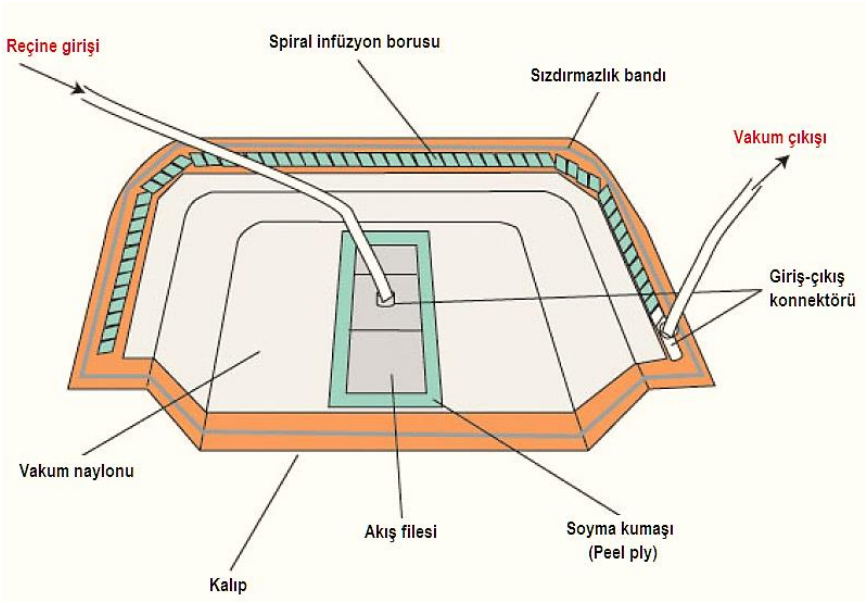


Şekil 2.17: Vakum İnfüzyon Yönteminde Kullanılan Elemanlar (Durgun, 2014)

Vakum infüzyon yöntemi şu aşamalardan oluşmaktadır:

- Kalıp yüzeyi; toz ve yağ gibi yabancı maddeler ile daha önce kullanılmışsa üzerindeki kalıp ayırıcıdan arındırılmalıdır.
- Kalıp yüzeyindeki çizikleri kapatmak ve üretilecek parçanın rahat çıkarılabilmesi amacıyla kalıp ayırıcı yüzeye uygulanır.
- Kalıba uygun ölçülerden kesilmiş takviye malzemeleri (cam elyaf, karbon elyaf vb.) istenilen kalınlığı sağlamak üzere üst üste konulur. Kalıp yüzeylerinin yatay kısımlarında, elyafların kaymaması için katmanlar arasına yapıştırıcı uygulanabilir.
- Serilen elyafların kalıba yapışmadan ayrılmasını sağlayacak olan, peel ply (ayırma kumaşı) serilir.
- Reçinenin vakum altında homojen ve hızlı dağılmasını sağlayacak olan akış filesi, ayırma kumaşının üzerine serilir.
- **Şekil 2.18**' de görüldüğü gibi kalıbın çevresine spiral infüzyon boruları yerleştirilir ve reçinenin kalıba girişini ve fazla reçinenin de çıkışını sağlayacak olan konnektörler yerleştirilir. Sızdırmazlık bandı kalıbın etrafını çevreleyecek şekilde yapıştırılır.
- Vakum naylonu kalıp üzerine yeterli derecede baskı yapabilmesi için kalıbın şekline uygun olarak kesildikten sonra sızdırmazlık bandı ile kalıp etrafına yapıştırılır. Özellikle derin kalıplarda vakum naylonu elyaf yüzeyine tam olarak baskı uygulayabilmesi için derinlik hesaplanarak kesim yapılmalıdır.
- Naylonun yapıştırılmasının ardından, reçine girişini ve vakum çıkışını sağlayacak olan borular konnektörlere bağlanır ve vakum çıkış borusunun diğer ucu reçine akış tankına bağlanır.
- Akış tankının ucuna bağlı olan vakum pompası açılarak sistemde kaçak olup olmadığı basınç göstergesi ve kaçak detektörü ile kontrol edilir.
- Hortum içinde kalacak miktar da hesaplanarak gerekli reçine ve sertleştirici karışımı hazırlanarak karıştırılır.
- Elde edilen reçine ve sertleştirici karışımı, kalıbın her noktası ıslanacak şekilde kalıba aktarılır. Kalıbın tüm noktaları ıslandıktan sonra reçine besleme hatları klemp ile kapatılarak reçine verme işlemi sonlandırılır.

- Parça tamamen sertleşene ve kendini salmayacak hale gelene kadar vakum altında tutulur. Kürleşme işleminin sona ermesi ile de naylon kalıptan sökülür ve reçine akış hatları temizlenir. Son olarak da parça kalıptan çıkarılır.



Şekil 2.18: Vakum İnfüzyon Sistemi (Durgun, 2014)

Vakum İnfüzyon Yönteminin Avantajları:

- El yatırması yöntemindeki yüksek reçine/elyaf oranına karşılık, vakum infüzyon yönteminde tam tersine yüksek elyaf/reçine oranı elde edilmektedir. Böylelikle malzeme daha sağlam ve uzun ömürlü olmaktadır.
- El yatırma yöntemine karşılık; üretilen her üründe harcanan reçine miktarı aynıdır.
- Uygulanan vakum sayesinde, reçine elyaf yüzeyine dağılımı ve emilimi homojen bir şekilde gerçekleşir. Böylelikle reçine birikmeleri ve elyaf katlanmalarının önüne geçilerek homojen ve mukavim bir parça elde edilir.
- Reçine transfer kalıplama yönteminin aksine, tek taraflı bir kalıp kullanılmaktadır.
- Büyük ve karmaşık parçaların üretimi mümkündür.

Vakum İnfüzyon Yönteminin Dezavantajları:

- Diğer basit kompozit imalat yöntemlerinin aksine, kullanılan ekipman sayısı fazla olduğundan dolayı yüksek maliyet ve iş gücü gerektirir.
- Kısmen karmaşık işlem basamaklarından dolayı, uygulama uzmanlık gerektirmektedir.
- Bazı bölgelerin reçine ile ıslanmaması sonucunda, pahalı atık malzeme ortaya çıkacaktır.

2.6. Polimer Esaslı Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Polimer esaslı kompozit malzemeler hafiflik ve yüksek mukavemet gibi özelliklerinden dolayı, uzay ve havacılık sanayinde tercih edilmektedir. Bu sayede daha az yakıt harcayarak daha yüksek hızlara ulaşılabilmektedir. Bu alanlardaki kullanımında maddi kazanç sağlamasının yanında; titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi özellikleri de bu malzemelerin tercih edilmesine sebep olmuştur. Havacılık sektöründe Boeing ve Airbus tipi uçaklarda, uydularda, uluslararası uzay istasyonlarında, uçak motoru kaplamalarında ve Boeing delta programları gibi uzatılabilir taşıma araçlarında karbon fiberler çokça kullanılmaktadır. (Yaman, Öktem & Seventekin, 2007)

Çizelge 2.11' de karbon liflerinin fiziksel özelliklerine göre hangi alanlarda kullanıldığı görülmektedir.

Çizelge 2.11: Karbon Liflerinin Karakteristik Özellikleri ve Uygulama Alanları (Yaman vd., 2007)

Karakteristik Özellikleri	Uygulama Alanları
1. Fiziksel dayanım, özel tokluk ve düşük ağırlık	Uzay, yol ve liman yapımlarında, spor malzemelerinde
2. Yüksek boyut stabilitesi, düşük termal uzama katsayısı ve düşük aşınma	Füze, uçak frenlerinde, uzay antenlerinde ve destek yapılarda, büyük teleskoplarda
3. İyi mukavemet	İşitsel ekipmanlar, Hi-fi ekipmanları için hoparlör, loudspeakers for Hi-fi equipment, pikap kolu, robot kolu
4. Elektriksel iletkenlik	Otomobil, elektronik ekipmanlar için kaplamalar, EMI ve RF koruyucu kılıf, fırçalar
5. X-ray geçirgenliği ve biyolojik hareketsizlik	Protez gibi tıbbi uygulamalar, araştırma ve x-ray cihazları, implantlar, tendonlar
6. Yorulma direnci, kendi kendini yağlama, yüksek sönüm	Tekstil makineleri
7. Kimyasal hareketsizlik, yüksek korozyon direnci,	Kimyasal endüstri, nükleer alan, valfler, yelkenler, pompa bileşenleri
8. Elektromanyetik özellik	Zincir koparan büyük jeneratörler, radyolojik ekipmanlar

Düşük termal uzama katsayısı ve düşük aşınma kapasitesi sayesinde karbon fiberler, ses hızının üstünde uçan uçakların fren disklerinde takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Özellikle Formula 1 başta olmak üzere yarış arabalarının gövde, yakıt tankları ve daha birçok aksesuarında hafif olmalarından dolayı karbon fiberler tercih edilmektedir.

Spor alanında ise tenis raketlerinde, golf sopalarında, bisiklet kadrolarında, rüzgâr sörfü ve kayak ekipmanlarında polimer esaslı kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Sağlık alanında ise, ortopedik malzeme üretiminde karbon fiberin sağlamlık ve yanmazlık özelliklerinden faydalanılmaktadır. Yüksek yorulma direnci, biyouyumluluğu ve inert malzemeler olduklarından dolayı diş implantı, kalça ve diz protezi gibi biyomedikal malzemelerin yapımında da kullanılmaktadır. Çok ince olmaları ve biyouyumluluğu sayesinde de elektrot olarak nöroloji alanında tercih edilmektedirler. (Yaman vd., 2007 / Akgün, 2008)

Enerji depolamak için kullanılan bataryalarda, X-ray ekipmanlarında, yer merkezli antenlerde, endüstride kullanılmak üzere vakum pompası ve kompresör pervanesinde, rüzgâr değirmenlerinde bu malzemeler kullanılmaktadır.

Tarım sektöründe ise polimer esaslı kompozit malzemelerin ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık gibi özelliklerinden dolayı; seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında bu malzemelerden yararlanılmaktadır.

İnşaat sektöründe de, depremde hasar görmüş veya kullanım amacı değişen yapıların kirişlerinin güçlendirilmesinde karbon elyaflar kullanılmaktadır. Bu sayede, yapılan güçlendirme sonucunda kirişlerin eğilme bölgesinde meydana gelebilecek bir hasarda öncelikle kullanılan karbon fiber malzemenin kopması, ondan sonra çelik yapının akması ve son olarak da betonun ezilmesi amaçlanmaktadır. (Mert & Elmas, 2007)

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ÖZETİ

Polimer esaslı kompozit malzemelerine, çeşitli katkı maddeleri ilavesi sonucunda mekanik davranışlarını inceleyen farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıdaki gibidir:

Akgün (2008) tarafından, termoplastik PU (poliüretan) matrisli takviye elemanı olarak 3-5 mm uzunluğundaki PAN bazlı karbon fiberler kullanılarak döküm-evaporasyon yöntemi ile üretilen PU-CF (poliüretan-karbon fiber) kompozitlerde, farklı karbon fiber konsantrasyonlarının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. 100-150 μm arasında değişen kalınlıklara sahip beş farklı konsantrasyonda PU-CF hazırlanmıştır. DMA (dinamik mekanik analiz) sonuçlarına göre, karbon fiberler matrisin molekül zincirlerindeki hareketliliğini ve deformasyonunu azaltarak, mekanik dayanımı ile rijitliği artırmaktadır. Karbon fiber konsantrayonunun artışıyla birlikte çekme mukavemeti ve elastisite modülü artarken, kopma anındaki % uzama miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Genel olarak karbon fiber konsantrasyonun artışıyla birlikte mekanik mukavemette % 244' lük yükselme olduğu sonucuna varılmıştır. (Akgün, 2008)

Morais, Monteiro ve d'Almeida (2005), tekrarlanan düşük enerjili darbeler karşısında cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli kompozitlerin dayanımlarında tabaka kalınlığının etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar göre belirli bir darbe enerjisinin altında, çarpma direnci ile ilgili en önemli faktörün enine kesit olduğu görülmüştür. Uygulanan darbe enerjisi arttırıldığında ise elyaf özelliklerinin belirleyici faktör olduğu tespit edilmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerde tabaka kalınlığının artmasıyla darbe enerjisinin de arttığı görülmüştür. (Demirel, 2007)

Sudarisman, Davies ve Hamada (2007), silisyum karbür katkılı epoksi matrisli karbon fiber kompozitlerin basma hasarını incelemişlerdir. Basma yüklemesi altında test edilen silisyum karbür katkılı tek yönlü karbon fiber kompozitte; basma dayanımı ve elastisite modülünde önemli bir artış tespit edilmemiştir. SiC miktarının artması sonucu yoğunluğun yükselmesiyle özgül basma dayanımı ve özgül elastisite modülünde düşüş görülmüştür. (Demirel, 2007)

Kompozit Sanayicileri Derneği web sitesinde yayınlanan bitirme tezi çalışmasında; katkısız ve % 10 oranında kaolen, kalsit A30, talk ET5 (Mısır Talkı) ve mikro talk AT-200 katkılı, % 30 oranında cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca cam elyafın da etkisini inceleyebilmek amacıyla katkısız sadece polyester reçine içeren numune hazırlanmıştır. Yapılan çekme, eğme testleri, Izod ve Charpy darbe testleri sonucunda; cam elyaf takviyeli kompozit numunenin çekme ve eğme mukavemetinin, cam elyaf takviyesiz numuneye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. En yüksek çekme mukavemeti mikro talk AT-200 katkılı numunede, en yüksek eğme mukavemeti talk ET5 katkılı numunede, en yüksek Izod darbe mukavemeti talk ET5 katkılı numunede ve en yüksek Charpy darbe mukavemeti ise kalsit A30 katkılı numunede gözlemlenmiştir. Katkı maddesiz cam elyaf takviyeli numunelerin mekanik değerlerinin yüksek olmasının nedeni; elyaf ıslanmasını zorlaştıran katkı maddesinin delaminasyona neden olarak, numunede boşlukların artmasıdır. (Kompozit Sanayicileri Derneği)

Ashrafi vd. (2011), tek duvarlı karbon nanotüp katkılı epoksi matrisli karbon fiber tabakalı kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Kullanılan epoksi reçinenin ağırlığının % 0,1' i oranında kullanılan tek duvarlı karbon nanotüp ile hazırlanan numune ile darbe sonrası basma testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; darbe hasarında % 5 azalma, kırılma tokluğunda % 13 ve tabakalar arası kırılma tokluğunda % 28' lik artış gözlenmiştir. (Ongun, 2015)

Soliman, Sheyka ve Taha (2012) tarafından, % 0,5, % 1 ve % 1,5 oranlarında MWCNT (çok duvarlı karbon nanotüp) katkılı karbon fiber kompozit tabakaların, düşük hızlı darbe testi ile mekanik davranışları incelenmiştir. 15 J - 24 J - 30 J - 60 J - 120 J' lük enerjilerle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testlerinde; yük, enerji, hız ve şekil değiştirme değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre; MWCNT' nin karbon fiberlerin darbe

dayanımını arttırırken, darbe hasarını azalttığı gözlemlenmiştir. % 1,5 oranında MWCNT katkılı numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarlarında % 50'lik bir artış tespit edilmiştir. (Ongun, 2015)

Rahman vd. (2012), el yatırma ve daha sonra sıcak presleme ile üretilen, % 0,1, % 0,2, % 0,3 ve % 0,4 oranlarında MWCNT katkılı cam elyaf kompozit tabakaların mekanik özelliklerini inceleyerek optimum değerlere sahip olan malzemeyi tespit etmişlerdir. Bu doğrultuda yapılan kırma ve DMA testleri sonucunda; % 0,3 oranında MWCNT katkılı numunenin elastisite modülünde % 21, akma mukavemetinde % 37 ve gerilme değerinde % 21' lik artış tespit edilmiştir. (Ongun, 2015)

Ergun, Topçu ve Üzümcü (2015), yaptıkları çalışmada katkısız ve % 0,5, % 1, % 2 karbon nanotüp katkılı, cam elyaf takviyeli kompozit plakaların darbe davranışlarını yaptıkları deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Numunelere uygulanan 5 J ve 15 J darbe enerjilerinde, karbon nanotüp katkılı kompozitlerin katkısız olanlara göre daha fazla yük taşıyabildiği görülürken, 20 J ve 30 J darbe enerjilerinde ise katkısız olan numuneler daha fazla yük taşıyabildiği tespit edilmiştir. Nano boyuttaki katkının malzemenin mekanik özelliklerini arttırmasına karşın malzemeyi gevrekleştirmesinden dolayı yüksek enerji seviyelerinde böyle bir durumun ortaya çıktığı görülmüştür. (Ergun, Topçu & Üzümcü, 2015)

Kepplea, Sanbornb, Lacassea, Gruenbergc ve Readyd (2008), karbon nanotüp katkılı karbon fiber kompozitlerin kırılma tokluklarını araştırmak üzere mekanik testler yapmışlardır. Yapılan testler sonucunda; kırılma tokluğunda % 50 oranında artış ve üç noktadan eğme testlerinde ise eğilme dayanımında yaklaşık % 5 oranında artış tespit edilmiştir. (Ongun, 2015)

Singh S. K., Singh S., Sharma S. ve Sharma V. (2014), % 1, % 3 ve % 5 oranlarında nanokil katkılı epoksi reçine matrisli cam elyaf takviyeli kompozitler elle yatırma yöntemiyle tabakalar üretilerek mekanik testler uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda en iyi değerler % 3 oranında nanokil katkılı numunede tespit edilmiştir. Eğme mukavemetinde % 57, çekme mukavemetinde ise % 8 oranında artış gözlemlenmiştir. (Ongun, 2015)

Kanny ve Mohan (2014) yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda nanokil katkılı reçinenin cam elyafa infüzyon hızını ve bunun sonucunda ortaya çıkan mekanik özellikleri analiz etmişlerdir. Katkısız ve % 5 nanokil katkılı reçinenin cam elyafa infüzyonu sırasında, nanokil oranı arttıkça reçine akış hızının düştüğü (% 0 için 1.48 m/s , % 5 için 0.9 m/s) ve bundan dolayı nanokilin cam elyaftaki boşlukları yeterince dolduramadığı tespit edilmiştir. En iyi mekanik değerler % 3 nanokil katkılı cam elyafta gözlemlenmiştir. Akma mukavemetinde % 9, elastisite modülünde % 21 ve yüzde uzamasında % 15 artış gözlemlenmiştir. (Ongun, 2015)

Reis, Ferreira, Zhang, Benameur ve Richardson (2012), % 1,5, % 3 ve % 6 oranında nanokil katkılı epoksi matrisli kevlar elyaf takviyeli kompozit levhaların, düşük hız darbe ile darbe hasarı ilişkisi incelemiştir. En iyi sonuç, % 6 oranında nanokil katkılı levhalarda elde edilirken, ise % 1,5' dan % 3 oranına çıkarken ise en iyi iyileşmenin olduğunu gözlemlenmiştir. % 1,5' dan % 3' e oranına çıkarken % 32,22 oranında artış, % 3' den % 6 oranına çıkarken % 1,15 artış tespit edilmiştir. (Ongun, 2015)

Kostopoulos, Baltopoulos, Karapappas, Vavouliotis ve Paipetis (2010), % 0,5 oranında MWCNT katkılı karbon fiber kompozit levhanın darbe anındaki ve sonrasındaki mekanik özelliklerini incelemişlerdir. MWCNT katkılı numunelerde, darbe dayanımının, sönümlenen enerji miktarının, basma dayanımının ve yorulma dayanımının katkısız numunelere kıyasla arttığı tespit edilmiştir. (Ongun, 2015)

Ongun (2015) tarafından, katkısız ve % 1, % 3, % 5 oranlarında nanokil ve her bir numunede % 0,3 oranında MWCNT katkılı karbon fiber kompozit levhaların; çekme, üç noktadan eğme ve düşük hızlı darbe testleri ile mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; katkılı numunelerin katkısız numunelere göre mekanik değerlerindeki değişim şu şekilde oluşmuştur: % 1 nanokil takviyeli numunelerin çekme gerilmesinde % 10 azalma ve eğilme gerilmesinde % 9 azalma, % 3 nanokil takviyesi çekme gerilmesinde % 1 artış ve eğilme gerilmesinde % 22 azalma, % 5 nanokil takviyeli numunede ise çekme gerilmesinde % 3 artış ve eğilme gerilmesinde % 20 azalma tespit edilmiştir. (Ongun, 2015)

Topçu, Ergun ve Tekin (2015) çalışmaları kapsamında; kalınlığın da etkisini görebilmek için 4 mm ve 6 mm kalınlılara sahip ve katkısız, % 0,5, % 1, % 2 oranlarında karbon nanotüp katkılı cam elyaf takviyeli kompozit plakaların burkulma davranışını

incelemişlerdir. Prepreg yöntemi kullanılarak üretilen bu numunelerde; % 0,5 katkı oranının elastisite modülü, poisson oranı, kayma modülü, kayma mukavemeti ve kopma mukavemeti gibi mekanik özellikler bakımından kritik katkı oranı olduğu belirlenmiştir. % 2 oranında katkılı numunenin burkulma değerinin ise katkısız olan numuneden daha yüksek olduğu görülmüştür. (Topçu, Ergun & Tekin, 2015)

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Karbon Fiber Kompozit Malzemelerin Hazırlanması

4.1.1. Kullanılan Malzeme, Alet ve Cihazlar

Karbon Fiber Kumaş

Plakaları hazırlamak için takviye malzemesi olarak, **Çizelge 4.1**' de özellikleri yer alan TORAY T700 12K karbon fiber kumaş kullanılmıştır.

Çizelge 4.1: Kullanılan Karbon Fiber Kumaşın Mekanik Özellikleri

TORAY T700 12K Karbon Fiber Kumaş	
Dokuma Tipi	2x2 twill
Alan Ağırlığı	380 gr/m^2
Filament Çapı	7 μm
Uyumlu Reçine Türü	Epoksi, vinilester
Yoğunluk	1.80 g/cm^3
Çekme Dayanımı	4900 MPa
Çekme Modülü	240 GPa
Uzama	% 2.0

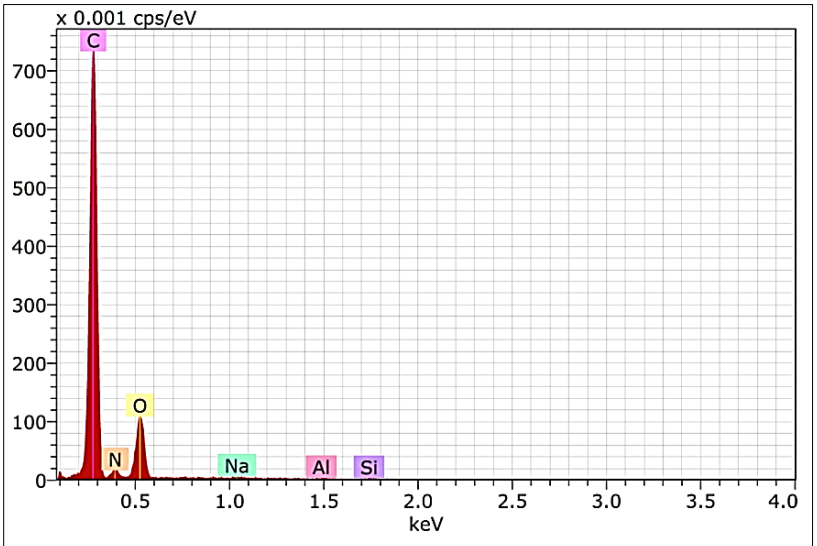
Epoksi Reçine ve Sertleştirici

Karbon fiber plakaları üretebilmek için matris malzemesi olarak, Duratek marka DTS 2110 solventsiz epoksi laminasyon reçinesi ve DTE 1200 sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi reçinenin mekanik özellikleri aşağıdaki **Çizelge 4.2'** de görülmektedir.

Çizelge 4.2: Kullanılan Reçine + Sertleştiricinin Mekanik Özellikleri

DTE 1200 + DTS 2210 Reçine ve Sertleştirici	
Çekme Mukavemeti	78 – 83 MPa
Maks. Çekme Uzaması	% 4,5 - 5
Çekme Elastisite Modülü	3,1 – 3,4 GPa
Eğilme Mukavemeti	113 – 118 MPa
Eğilme Elastisite Modülü	3 – 3,3 GPa
Isı Altında Deformasyon Sıcaklığı (HDT)	77 – 82 ºC
Su emme	48 – 53 mg

Epoksi reçine ve sertleştirici karışımının SEM' de X ışını spektrometresi ile elementel analizi **Şekil 4.1**' de görülmektedir. Yapısındaki elementler incelendiğinde, yaklaşık % 60 oranında C elementi içerdiği görülmektedir. O ve N elementleri de yüksek oranlarda bulunmaktadır. Eser miktardaki elementlerde sırasıyla görülmektedir.



El	AN	Series	Net unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	34860	60.58	66.37	7.38
O	8	K-series	6049	28.23	23.21	4.30
N	7	K-series	945	10.96	10.29	2.55
Na	11	K-series	193	0.10	0.06	0.04
Si	14	K-series	119	0.09	0.04	0.04
Al	13	K-series	101	0.05	0.02	0.03

Şekil 4.1: Reçine + Sertleştiricinin X Işını Spektrometresi ile Elementel Analizi

PVA Sıvı Kalıp Ayırıcı ve Vaks

Karbon fiber plakayı kalıptan rahatlıkla ayırabilmek ve düzgün bir yüzey elde edebilmek amacıyla Polivaks marka sıvı kalıp ayırıcı ve vaks kullanılmıştır.

Vakum İnfüzyon Malzemeleri

Karbon fiber plakaları vakum infüzyon yöntemi ile üretebilmek amacıyla aşağıda yer alan malzemeler ve cihazlar kullanılmıştır:

- Peel ply (ayırma kumaşı)
- İnfüzyon akış filesi
- Vakum naylonu
- Spiral vakum hortumu (PE) 10x12 mm
- İnfüzyon konnektörü (giriş-çıkış) iç çap:12 mm

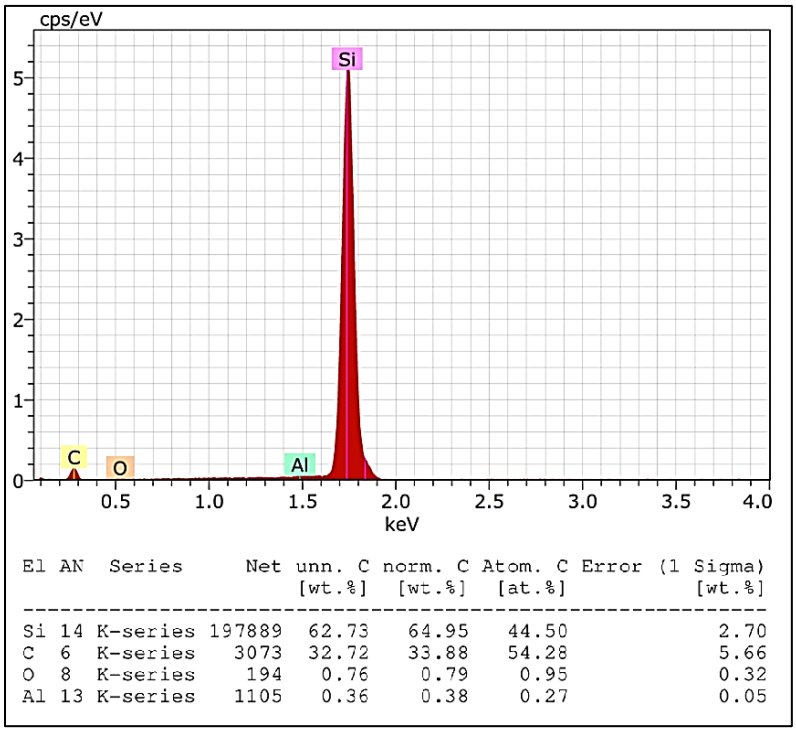
- İnfüzyon T/L bağlantı iç çap:10 mm
- Vakum sızdırmazlık bandı
- Reçine akış tankı (5 lt)
- Vakum pompası

Katkı Malzemeleri

Katkı malzemelerinin karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin mekanik davranışları üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmada; katkı malzemesi olarak silisyum karbür, magnezyum silikat (talk) ve kaolen tercih edilmiştir.

Sika (Norveç) firması tarafından üretilen**,** ortalama tane boyutu 3 μm olan yeşil silisyum karbür kullanılmıştır.

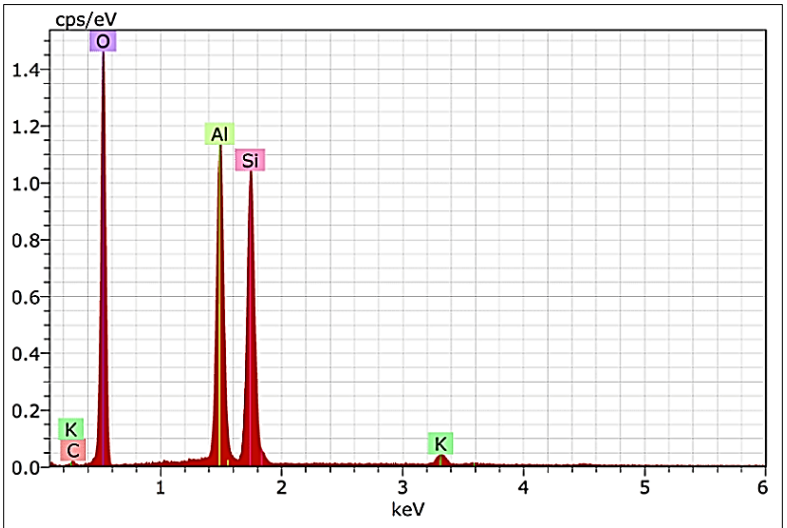
Silisyum karbürün SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)nda, enerji dağılımlı X ışınları spektrometresi vasıtasıyla yapılan kimyasal analizi sonuçları **Şekil 4.2**' de görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre; % 62.73 gibi yüksek bir oranda Si elementi bulunurken, onu % 32.72'lik oranla C elementi takip etmektedir. Eser miktarda da O ve Al elementleri bulunmaktadır.



Şekil 4.2: Silisyum Karbür (SiC) ün X Işını Spektrometresi ile Elementel Analizi

Amberger Kaolinwerke (Almanya) firması tarafından üretilen; D_{50} değeri (ortalama tane boyutu) 1,5 µm, tane boyutu dağılımı (< 2 µm) oranı % 59 olan ve 0,35 g/cm^3 kütle yoğunluğuna sahip kaolen kullanılmıştır.

Kaolenin SEM' de, enerji dağılımlı X ışınları spektrometresi vasıtasıyla yapılan kimyasal analizi sonuçları **Şekil 4.3**' te görülmektedir. Analize sonuçlarına göre % 47.51 oranında O elementi bulunurken, onu % 15.46'lık oranla Si ve % 13.89'luk oranla Al elementleri takip etmektedir. Eser miktarda da C ve P elementleri bulunmaktadır.

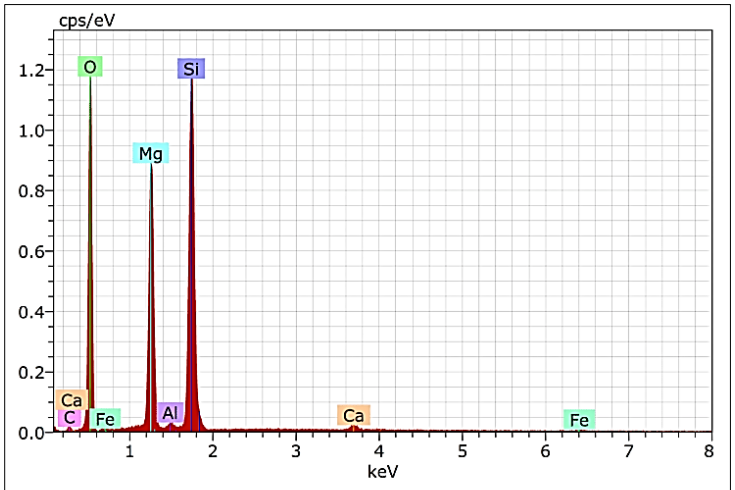


El	AN	Series	Net unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	55833	47.51	59.56	70.59	5.58
Si	14	K-series	61755	15.46	19.38	13.08	0.69
Al	13	K-series	61369	13.89	17.41	12.24	0.69
C	6	K-series	424	1.69	2.12	3.35	0.52
K	19	K-series	2966	1.22	1.52	0.74	0.07

Şekil 4.3: Kaolenin X Işını Spektrometresi ile Elementel Analizi

Özmen Kimyevi Maddeler (İstanbul)' den tedarik edilen, ortalama tane boyutu 4 µm olan magnezyum silikat (talk) kullanılmıştır.

Magnezyum silikatın SEM' de, enerji dağılımlı X ışınları spektrometresi vasıtasıyla yapılan kimyasal analizi sonuçları **Şekil 4.4**' te görülmektedir. Analize sonuçlarına göre yapısında; % 48.86 oranında O elementi bulunurken, onu % 22.43'lük oranla Si ve % 14.62'lik oranla Mg elementleri takip etmektedir.



El	AN	Series	Net unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	49341	48.86	54.49	65.00	5.79
Si	14	K-series	79509	22.43	25.02	17.00	0.99
Mg	12	K-series	50523	14.62	16.30	12.80	0.83
C	6	K-series	552	2.56	2.86	4.54	0.72
Ca	20	K-series	1453	0.63	0.70	0.33	0.05
Fe	26	K-series	352	0.29	0.32	0.11	0.04
Al	13	K-series	829	0.28	0.31	0.22	0.04

Şekil 4.4: Magnezyum Silikatın X Işını Spektrometresi ile Elementel Analizi

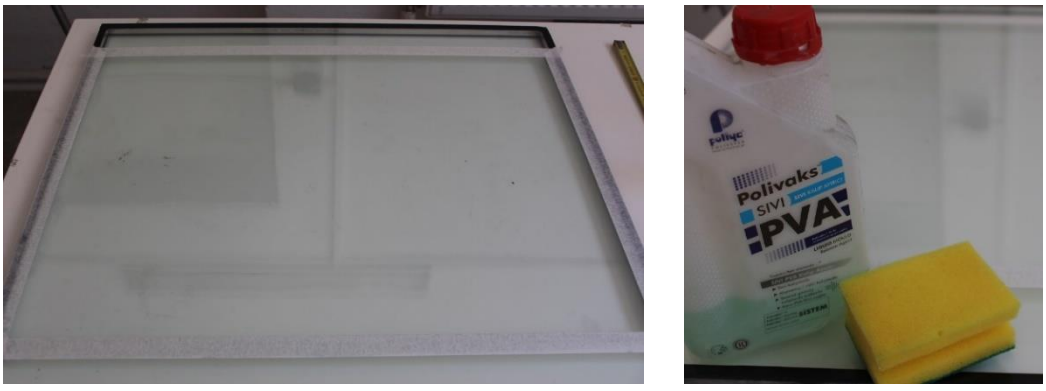
4.1.2. Karbon Fiber Kompozit Plakaların Üretilmesi

Silisyum karbür, magnezyum silikat ve kaolen içeren karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin mekanik testlerinin yapılması için ASTM (American Section of the International Association for Testing Materials) standartlarında çekme, üç noktadan eğme ve düşük hızlı darbe testi numuneleri hazırlanmıştır. **Çizelge 4.3**' te görüldüğü üzere; katkı malzemesinin ortaya çıkardığı etkileri kıyaslayabilmek amacıyla katkısız ve kullanılan reçinenin ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 oranında katkı malzemesi içeren toplam 10 adet karbon fiber plaka üretilmiştir.

Çizelge 4.3: Karbon Fiber Plakaların İhtiva Ettiği Katkı Maddesi ve Oranları ile Tabaka Sayısı

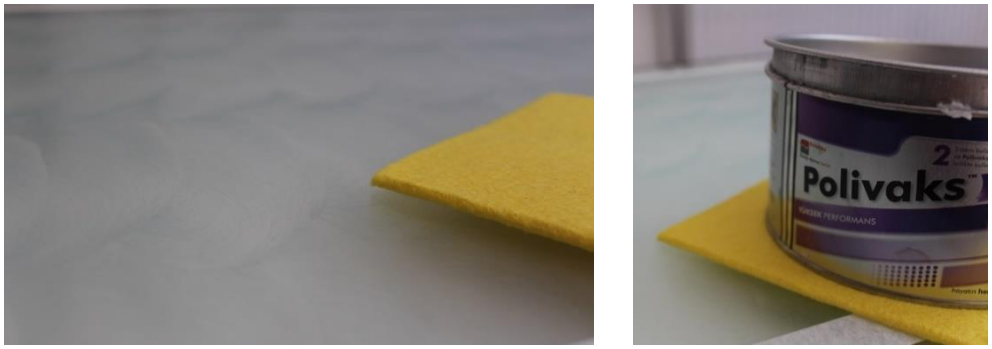
Numune No	Katkı Maddesi	Katkı Maddesi Ağırlıkça Oranı (%)	Tabaka Sayısı
KF-R-00	---	---	6
KF-MS-05	Magnezyum Silikat	5	6
KF-MS-10	Magnezyum Silikat	10	6
KF-MS-15	Magnezyum Silikat	15	6
KF-SK-05	Silisyum Karbür	5	6
KF-SK-10	Silisyum Karbür	10	6
KF-SK-15	Silisyum Karbür	15	6
KF-K-05	Kaolen	5	6
KF-K-10	Kaolen	10	6
KF-K-15	Kaolen	15	6

Kalıp olarak kullanılan cam levhanın yüzeyindeki çukur veya çiziklerin kapatılması ve üretilecek numunenin düzgün bir yüzeye sahip olabilmesi için, **Şekil 4.5**' te görüldüğü gibi PVA sıvı kalıp ayırıcı bir sünger ile kalıp yüzeyine sürülür ve kuruması için 15-20 dk beklenir.



Şekil 4.5: PVA Sıvı Kalıp Ayırıcı Uygulaması

Ardından **Şekil 4.6**’ da da görüldüğü gibi, vaks bir sünger vasıtasıyla ince bir film elde edecek şekilde kalıp yüzeyine uygulanır. Kuruması için 15-20 dk bekledikten sonra kalıp yüzeyi bir bezle silinip parlatılır.



Şekil 4.6: Vaks Uygulaması

Şekil 4.7’ de görüldüğü gibi, 50 x 35 cm boyutlarında kesilen karbon fiber kumaşlar 6 kat olmak üzere cam kalıba serilir.



Şekil 4.7: Karbon Fiber Kumaşların Serilmesi

Daha sonra karbon fiber plakanın üzerindeki akış filesinden ve konnektörlerden kolay ayrılabilmesi için **Şekil 4.8**' de görüldüğü üzere, karbon fiber kumaşın üzerine peel ply (ayırma kumaşı) serilir.



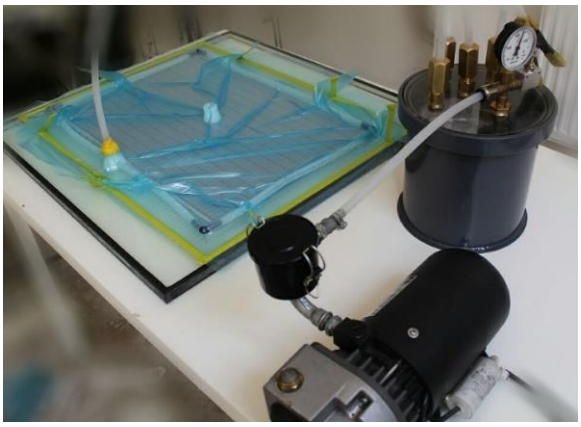
Şekil 4.8: Peel Ply (Ayırma Kumaşı) Serilmesi

Matris malzemesi olarak kullanılan epoksi reçinenin karbon fiber kumaşın her bölgesini ıslatabilmesi ve homojen bir şekilde yayılabilmesi amacıyla **Şekil 4.9**' da görüldüğü gibi akış filesi serilir. Ardından naylon içerisindeki havayı çekecek ve elyaf tarafından emilemeyen fazla reçinenin akış tankına aktarılmasını sağlayacak olan infüzyon hortumları ve konnektörler yerleştirilir.



Şekil 4.9: Akış Filesi, İnfüzyon Spiral Hortumları ve İnfüzyon Konnektörlerinin Yerleşimi

Son olarak da sızdırmazlığı sağlayacak olan vakum naylonu, tüm tabakaları kaplayacak şekilde sızdırmazlık bandı ile kalıp yüzeyine yapıştırılır. Reçineyi elyaflara aktarabilmek, infüzyon boruları ile akış tankı arasındaki bağlantıyı sağlayacak olan borular bağlanarak **Şekil 4.10**' da görüldüğü gibi infüzyon sistemi kurulur.



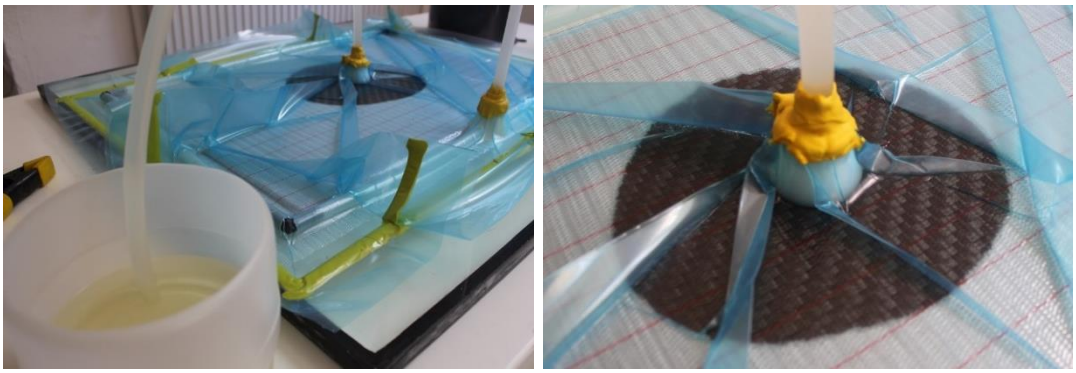
Şekil 4.10: Vakum İnfüzyon Sistemi Bağlantıları

İnfüzyon sisteminin kurulmasının ardından katkı malzemesi içeren matris malzemesinin hazırlanması aşamasına geçilmiştir. Her bir plakada, kullanılacak olan takviye malzemesinin ağırlığı kadar matris malzemesi (epoksi reçine + sertleştirici) kullanılmaktadır. Epoksi reçine ile sertleştirici de kendi arasında 1'e 4 oranında olacak şekilde 480 g epoksi reçine ve 120 g sertleştirici hazırlanmıştır.

KF-R-00 no'lu numune için katkı malzemesi olmaksızın, belirtilen miktarlarda reçine ve sertleştirici **Şekil 4.11**' de görüldüğü gibi hızlı bir şekilde kürleşmemesi ve içerisinde hava kabarcıkları oluşmaması amacıyla yavaş bir şekilde karıştırılır ve vakum sistemine aktarılır. Katkı malzemesi içeren diğer numunelerde ise, **Çizelge 4.3**' te belirtilen oranlarda katkı malzemesi ile reçineye göre viskozitesi daha düşük olan sertleştirici karıştırılır. Oluşan karışımın içerisine artan miktarlarda reçine yavaş şekilde eklenerek karıştırılır. Bu sayede topaklanmanın önüne geçilerek, homojen bir karışım elde edilebilmektedir. Elde edilen bu karışım son olarak, ortalama 500 mmHg basınç değerine sahip vakum sistemine **Şekil 4.12**' deki gibi borular vasıtasıyla aktarılır.

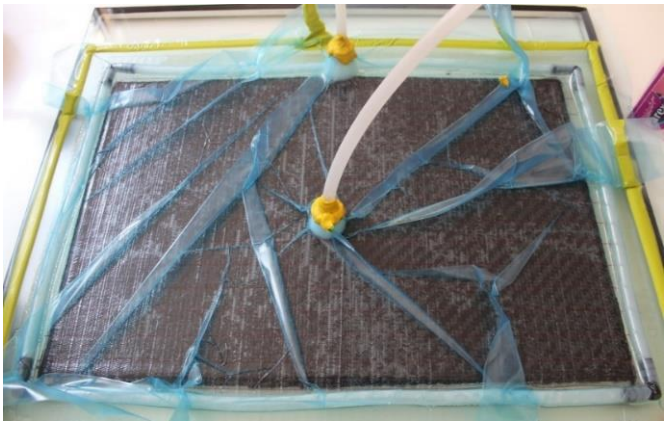


Şekil 4.11: Katkı Malzemesinin Reçine ve Sertleştirici ile Karıştırılması



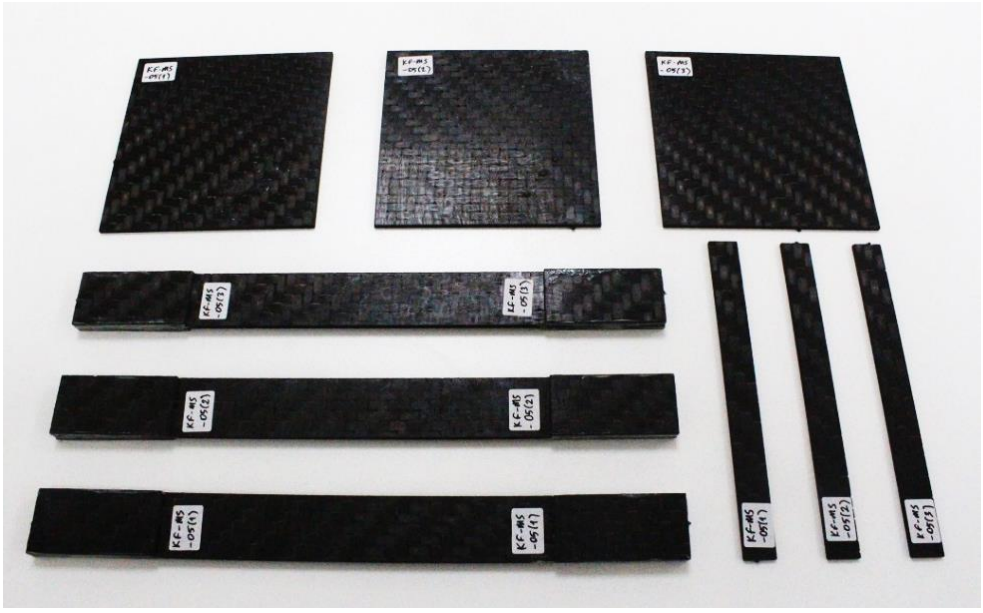
Şekil 4.12: Karbon Fiber Kumaşa Reçine Verilme İşlemi

Şekil 4.13' te olduğu gibi karbon fiber kumaşın reçine tarafından tamamen ıslatılmasının ardından matris malzemesinin elyafa aktarımını sağlayan boru klips ile kapatılarak reçine akışı durdurulur. Vakum infüzyon işlemi vakum pompası tarafından sağlanan havasız ortamda 4 saat boyunca devam eder. Bu süre zarfında reçinenin kürleşmesi gerçekleşir. 4 saat sonunda ise vakum pompası kapatılır ve yaklaşık 12 saat sonra karbon fiber plaka, epoksinin tamamen kürleşmesiyle hazır hale gelir.



Şekil 4.13: Reçine Emdirilmiş Karbon Fiber Plaka

Tüm plakaların üretilmesinin ardından; plakalar, mekanik testler için hassas numune boyutları elde edilebilmesi ve pürüzlü kesim sonucunda çentik etkisi yaratmaması amacıyla **Şekil 4.14**' te görüldüğü gibi ASTM standartlarına uygun ölçülerde su jeti ile kesilir.



Şekil 4.14: Su Jeti ile Kesilmiş Karbon Fiber Kompozit Numuneler

4.2. Karbon Fiber Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu

4.2.1. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları

Zeiss Evo LS10 Elektron Mikroskobu

SEM, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyindeki istenilen alanı tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Katı numune yüzeyindeki incelenmek istenilen alan, yüksek enerjili elektron demeti ile taranarak, numune yüzeyine enerji transferi sağlanır. Gönderilen bu birincil elektronlar, numuneden bazı elektronların yerinden oynamasına neden olur. Yerinden oynayan bu ikincil elektronlar bir algılayıcı tarafından toplanır ve sinyale dönüştürülür. **Şekil 4.15' t**eki SEM' de elektron demetinin numune yüzeyiyle buluşma açısına bağlı olarak, numunenin farklı bölgelerinden kopan ikincil elektronların sayısı değişebilmektedir.

Enerji ve/veya dalga boyu dağılım spektrometresi vasıtası ile nokta analizi, çizgi analizi ve alan haritalandırılması yapılarak elementlerin kimyasal analizi gerçekleştirilmektedir. Bu sayede numunelerde bulunan element miktarları ve dağılımları tespit edilebilmektedir.



Şekil 4.15: Zeiss Evo LS10 Elektron Mikroskobu (Labwrench)

Zwick Z250

Zwick Z250 test makinesi ile malzemelerin kalitesinin değerlendirilmesini sağlayan; statik gerilme testi, statik basma ve bükme testi, elastisite modülünün belirlenmesi gibi statik mukavemet testlerinin tümü yapılabilmektedir. Farklı boyutlardaki numunelerin mukavemet testlerini gerçekleştirmek üzere birçok alet bulunmaktadır. **Şekil 4.16**' daki cihazda, numunelerin ölçüm sırasındaki boyuna ve enine değişimleri ölçmek üzere iki adet ekstansometre bulunmaktadır. Gerinim değişimi ve gerçek uzama bu sayede kaydedilebilmektedir.

Test cihazının teknik özellikleri:

- Konumlamanın doğruluğu ve tekrarlanabilirliği: ± 2 μm
- Mukavemet ölçümü: 0.5 class
- Kuvvetin ölçüm aralığı: Nominal kuvvet (F_n) in % 165'i
- Maksimum test kuvveti: 250 kN
- Tüm yük aralıklarındaki test hızı aralığı: 0.0001 – 600 mm/dk
- Ekstansometrenin maksimum ölçüm mesafesi: 30 mm (Instytut Metalurgii Żelaza)



Şekil 4.16: Zwick Z250

Instron Dynatup 9250 HV Darbe Test Cihazı

Dynatup 9250 HV darbe test cihazı; darbe ucunu yakalayarak tekrar sekmesini önleyen havayla çalışan sistemi sayesinde, test numune yüzeyine sadece bir defa vuruş yapabilme özelliğine sahiptir. "Impulse Data Acquisition" programı vasıtasıyla, farklı özellikteki malzemelerin darbe dayanımları, darbe anından uygulanan enerjinin emilmesinin sonuna kadar geçen zaman aralığındaki sayısal veriler toplanarak otomatik olarak grafik haline getirilmektedir. **Şekil 4.17**' de görülen test cihazında elektronik olarak serbest düşme yüksekliği, darbe ucu ağırlığını ve darbe hızı elektronik olarak tespit edilebilmektedir. (TÜBİTAK MAM)

Test cihazının teknik özellikleri:

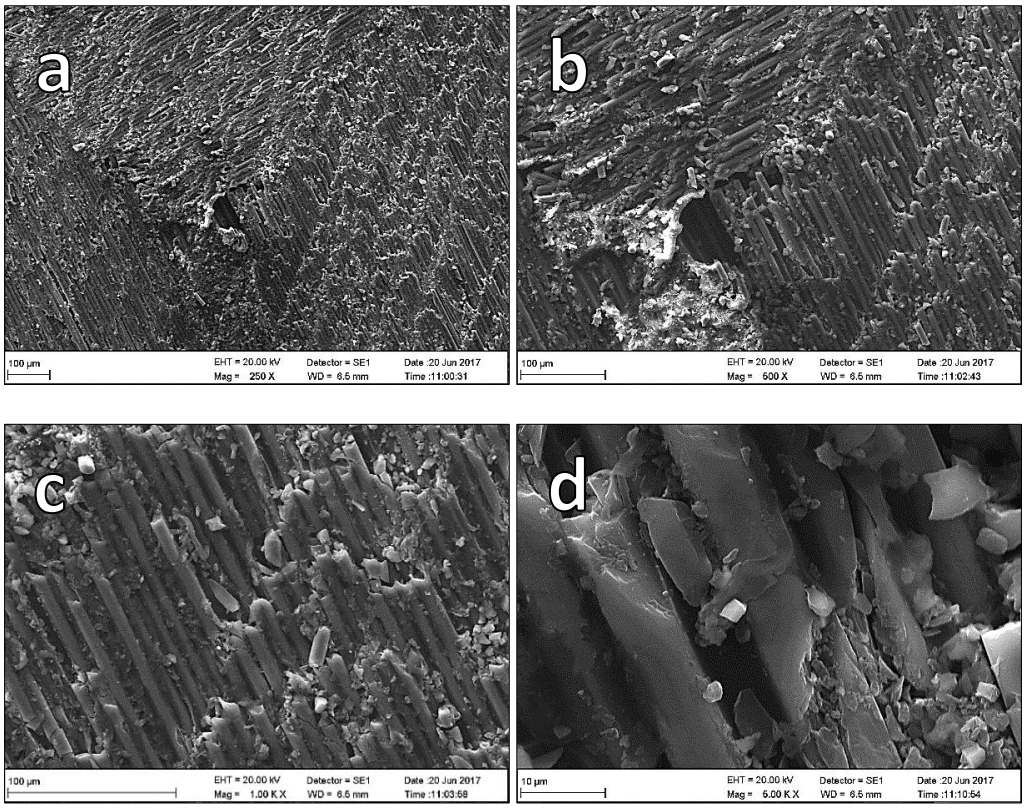
- Darbe yükü enerjisi aralığı: 2,6 J – 1603 J
- Tüp kapasite aralığı: 1 kN – 222 kN
- Darbe yükü ağırlığı aralığı: 2.7 kg - 80.5 kg
- Maksimum yük düşüş yüksekliği: 1.25 m
- Maksimum yük hızı: 20 m/s
- Transdüser maksimum yük aralığı: 90.7 kg
- Transdüser maksimum yükü: 136 kg
- Çalışma sıcaklığı: +10…+38 °C (UseScience)



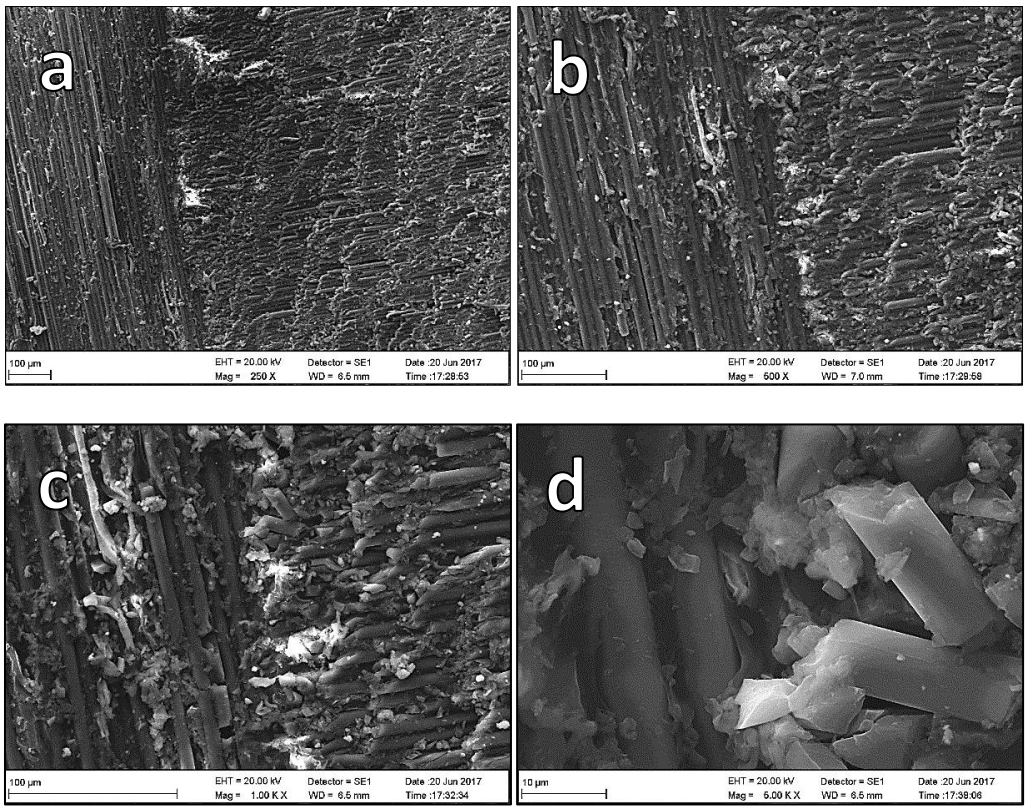
Şekil 4.17: Instron Dynatup 9250 HV Darbe Test Cihazı

4.2.2 Karbon Fiber Kompozit Malzemelerin Elektron Mikroskobunda (SEM) İncelenmesi

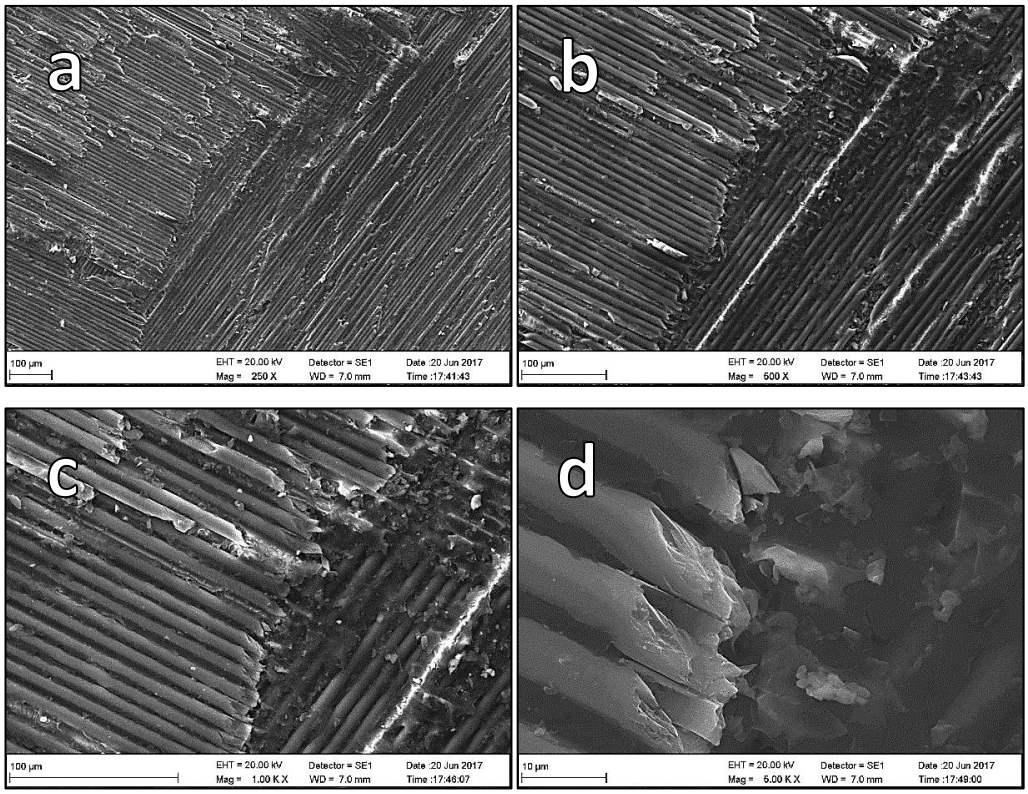
Farklı katkı malzemeleri ile üretilmiş olan karbon fiber numunelerin morfolojisi ve mikro yapısı, SEM kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen **Şekil 4.18**, **4.19** ve **4.20**' deki SEM görüntülerinde, elyaf doğrultusu ve örgülerin kesişim bölgelerinde elyaf oranının arttığı görülmektedir. Matris elemanı olan epoksi reçinenin, takviye elemanı olan karbon elyafı tamamen kapladığı görülmektedir.



Şekil 4.18: SiC Katkılı Karbon Fiber Plakaların SEM Görüntüleri **(a)** 250 Kat **(b)** 500 Kat **(c)** 1000 Kat **(d)** 5000 Kat Büyütülmüş



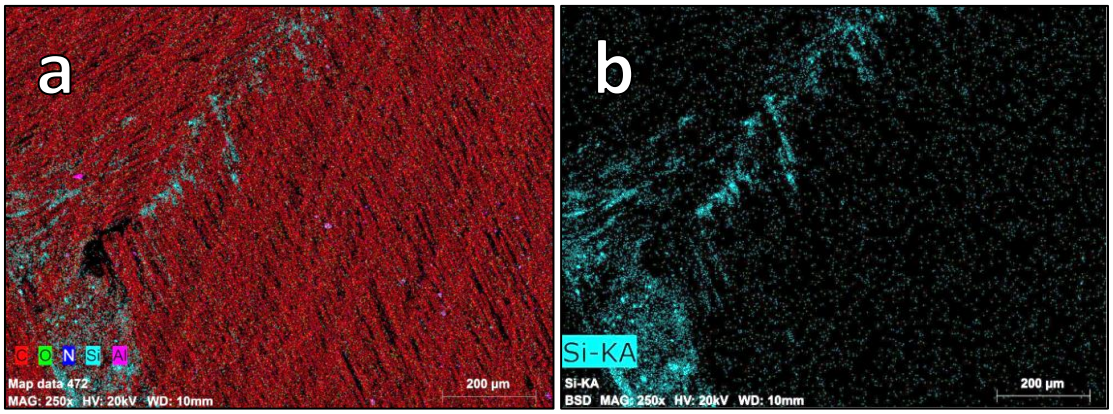
Şekil 4.19: Magnezyum Silikat Katkılı Karbon Fiber Plakaların SEM Görüntüleri **(a)** 250 Kat **(b)** 500 Kat **(c)** 1000 Kat **(d)** 5000 Kat Büyütülmüş



Şekil 4.20: Kaolen Katkılı Karbon Fiber Plakaların SEM Görüntüleri **(a)** 250 Kat **(b)** 500 Kat **(c)** 1000 Kat **(d)** 5000 Kat Büyütülmüş

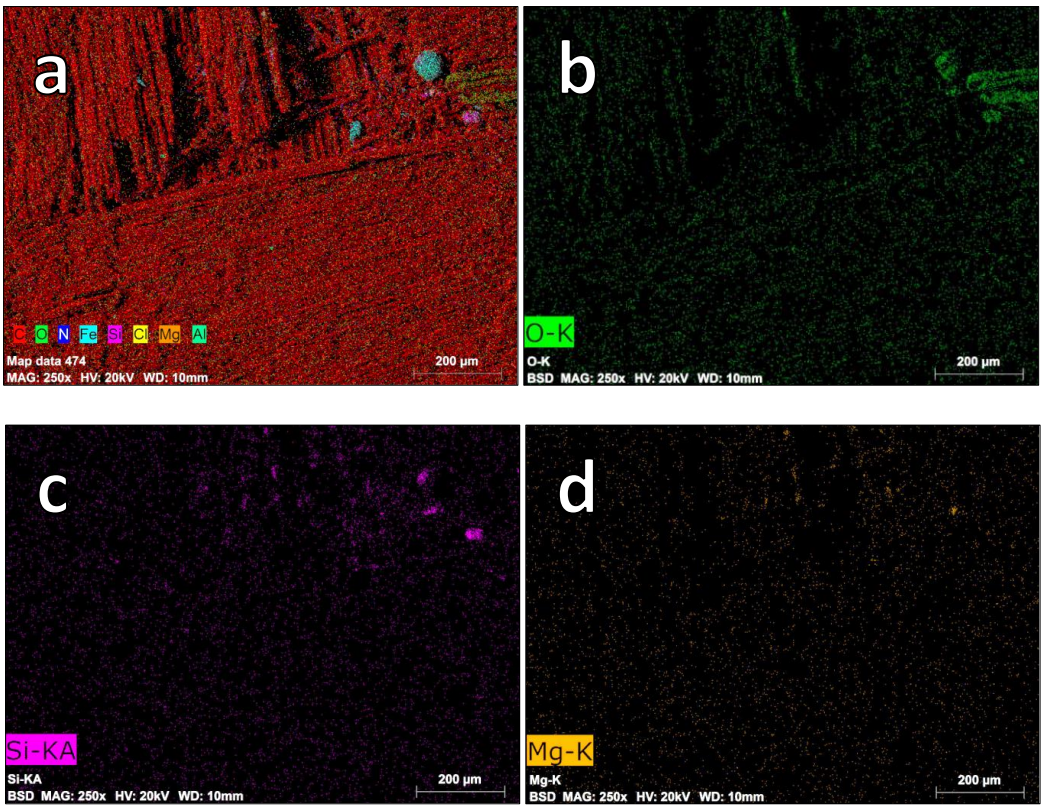
Enerji dağılımlı X ışınları spektrometresi tarafından, alan analizi yapılan karbon fiber numunelerin içeriğinde bulunan katkı malzemelerindeki elementlerin dağılımını gösteren haritalar elde edilmiştir. Her bir element, kendilerine atanan farklı renkler sayesinde haritada kolaylıkla ayırt edilebilmektedir.

SiC katkılı karbon fiber numune incelendiğinde, C elementinin yoğun olarak bulunduğu, ardından Si elementinin geldiği **Şekil 4.21**' de görülmektedir. Karbon elyaf örgülerinin üst üste geldiği kesişim bölgelerinde Si elementinin diğer bölgelere kıyasla daha yoğun olarak bulunduğu görülmektedir. Ancak başta C ve Si elementleri olmak üzere homojen bir dağılımın olduğu söylenebilir.



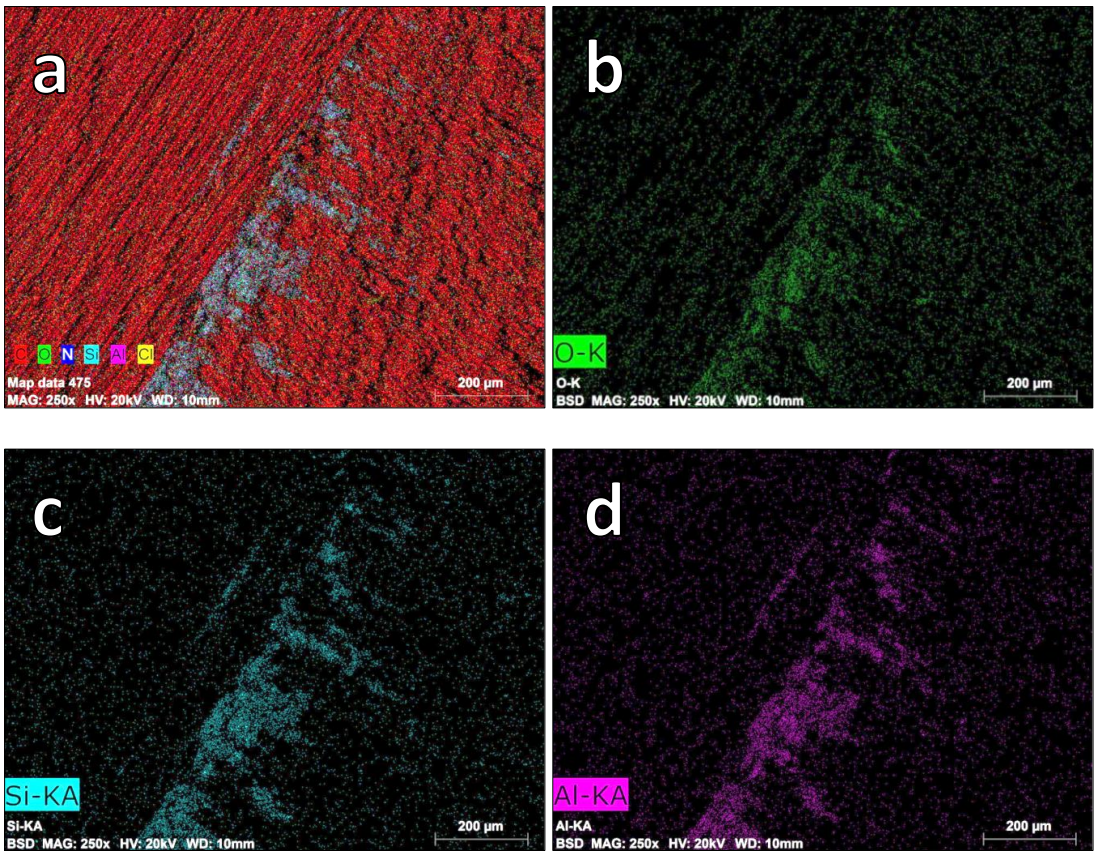
Şekil 4.21: SiC Katkılı Karbon Fiber Plakalarda Bulunan Elementlerin Dağılım Haritası **(a)** C/O/N/Si/Al Haritası **(b)** Si Haritası

Magnezyum silikat katkılı karbon fiber numune incelendiğinde, O, Si ve Mg elementinin yoğun olarak bulunduğu **Şekil 4.22**' de görülmektedir. Karbon elyaf örgülerinin üst üste geldiği kesişim bölgelerinde, az yoğunlukta olmakla birlikte Si ve Fe elementlerinin diğer bölgelere kıyasla fazla bulunurken, O elementi kesişim bölgesinde daha az görülmektedir. Ancak katkı malzemesinin içeriğinde bulunan tüm elementler genel olarak homojen bir dağılım göstermiştir.



Şekil 4.22: Magnezyum Silikat Katkılı Karbon Fiber Plakalarda Bulunan Elementlerin Dağılım Haritası **(a)** C/O/N/Fe/Si/Cl/Mg/Al Haritası **(b)** Fe Haritası **(c)** Si Haritası **(d)** Mg Haritası

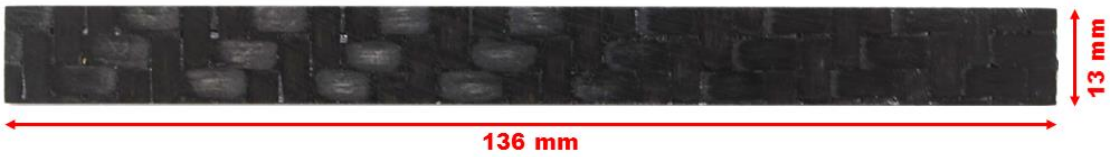
Kaolen katkılı karbon fiber numune incelendiğinde ise O, Si ve farklı olarak Al elementinin yoğun olarak bulunduğu **Şekil 4.23**' te görülmektedir. Karbon elyaf örgülerinin üst üste geldiği kesişim bölgelerinde, bütün elementlerin diğer bölgelere kıyasla yoğunlukta olduğu görülmektedir. Ancak katkı malzemesinin içeriğinde bulunan tüm elementler homojen bir dağılım göstermiştir.



Şekil 4.23: Kaolen Katkılı Karbon Fiber Plakalarda Bulunan Elementlerin Dağılım Haritası **(a)** C/O/N/Si/Al/Cl Haritası **(b)** Si Haritası **(c)** Al Haritası **(d)** Cl Haritası

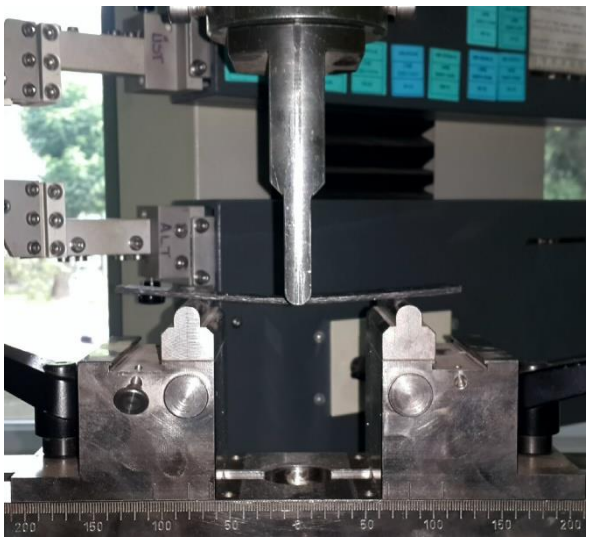
4.2.3. Üç Noktadan Eğme Testi

Üç noktadan eğme testi numuneleri ASTM D7264 standartlarına uygun olarak, ortalama 2,20 - 2,30 mm kalınlıkta ve **Şekil 4.24**' te görülen ölçülerde hazırlanmıştır. Doğru ve güvenilir bir sonuç elde edebilmek amacıyla her bir test için 3 adet numune hazırlanarak, TÜBİTAK Marmara Malzeme Enstitüsü'nde testleri gerçekleştirilmiştir. Zwick Z250 eğme test cihazında testler yapılmadan önce numunelerin genişlikleri ve kalınlıkları iki baştan ve ortadan ölçülerek en küçük değerler bilgisayara girilmiştir. Numunelerin en ince bölgeden kopacağı öngörüldüğü için her bir numune birkaç kez ölçülerek test cihazına yerleştirilmiştir.



Şekil 4.24: Üç Noktadan Eğme Testi Numunesi

Üç noktadan eğme testi, üretilen numunenin eğme anındaki dayanımını bulmak amacıyla yapılmaktadır. **Şekil 4.25**' te görüldüğü üzere mesnet aralığı 80 mm olan iki sabit nokta üzerine yerleştirilen numune; yukarıdan 2 mm/dk hızında inen pim tarafından uygulanan kuvvet sayesinde eğilir. Kırılma gerçekleştikten sonra test sonlandırılır. Testler, **Çizelge 4.3**' te belirtilen özelliklere sahip her bir numune için tekrarlanmıştır.



Şekil 4.25: Üç Noktadan Eğme Testi

4.2.4. Çekme Testi

Çekme testi numuneleri ASTM D3039 standartlarına uygun olarak, ortalama 2,20 - 2,30 mm kalınlığında ve **Şekil 4.26**' da görülen ölçülerde hazırlanmıştır. Doğru ve güvenilir bir sonuç elde edebilmek amacıyla her bir test için 3 adet numune hazırlanarak, TÜBİTAK Marmara Malzeme Enstitüsü'nde testleri gerçekleştirilmiştir. Zwick Z250 çekme test cihazında testler yapılmadan önce numunelerin genişlikleri ve kalınlıkları iki baştan ve ortadan ölçülerek en küçük değerler bilgisayara girilmiştir.



Şekil 4.26: Çekme Testi Numunesi

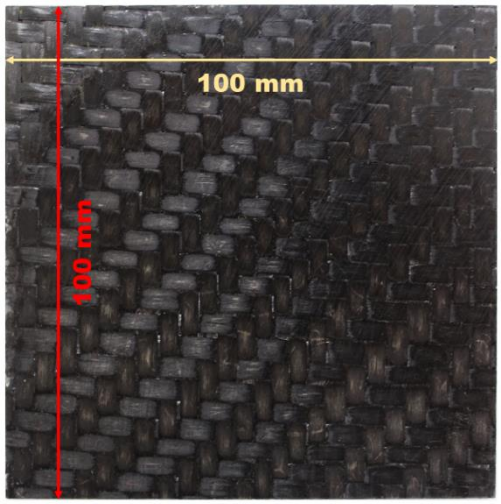
Çekme testi, üretilen numunenin maksimum çekme mukavemetinin tespit edilmesi amacıyla yapılmaktadır. **Şekil 4.27**' de görüldüğü üzere, numunenin iki başı çekme cihazının çenelerine paralel olacak şekilde takılır ve numunede boyuna-enine uzamaları tespit etmek üzere ekstansometre ayarlanır.



Şekil 4.27: Çekme Testi

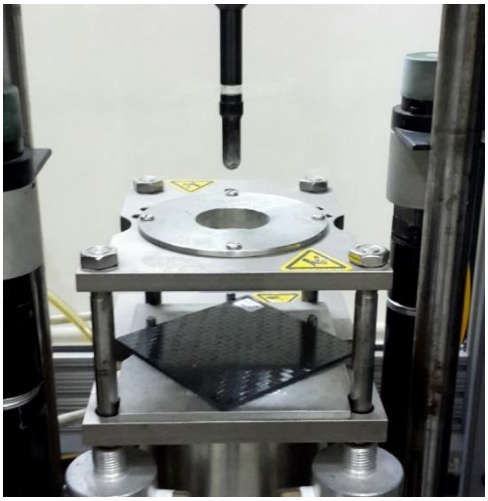
4.2.5. Düşük Hızlı Darbe Testi

Düşük hızlı darbe testi numuneleri ASTM D7136 standartlarına uygun olarak, ortalama 2,20 - 2,30 mm kalınlığında ve **Şekil 4.28**' de görülen ölçülerde hazırlanmıştır. Doğru ve güvenilir bir sonuç elde edebilmek amacıyla her bir test için 3 adet numune hazırlanarak, TÜBİTAK Marmara Malzeme Enstitüsü'nde testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler Instron Dynatup 9250 HV darbe test cihazına yerleştirilmeden önce genişlikleri ve kalınlıkları ölçülerek bilgisayara değerler girilmiştir.



Şekil 4.28: Düşük Hız Darbe Testi Numunesi

Darbe deneyi ile numunenin, bir tek darbe sonucunda verdiği tepki ve hasar mekanizması gözlemlenebilmektedir. Düşük hızlı darbe testine başlamadan önce yedek olarak hazırlanmış olan numunelere, en uygun darbe enerjisini tespit etmek amacıyla ön düşük hızlı darbe testi uygulanmıştır. Bu kapsamda, farklı katkı maddeleri ile hazırlanmış numunelere sırasıyla **Şekil 4.29**' da görüldüğü gibi 5 J - 10 J - 11 J - 12 J - 20 J değerlerinde darbe enerjisi uygulanmıştır. Testler sonucunda elde edilen hız-zaman grafikleri ve numunelerin hasar mekanizmaları incelediğinde, tüm test numunelerine 10 J darbe enerjisi ile düşük hızlı darbe testi uygulanması gerektiği tespit edilmiştir. **Çizelge 4.3**' te belirtilen özelliklere sahip her bir numuneye ayrı ayrı 10 J darbe enerjisi ve 10 kg' lık küresel darbe ucu ile testler uygulanmıştır.



Şekil 4.29: Düşük Hızlı Darbe Testi

BÖLÜM 5

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Üç Noktadan Eğme Testi

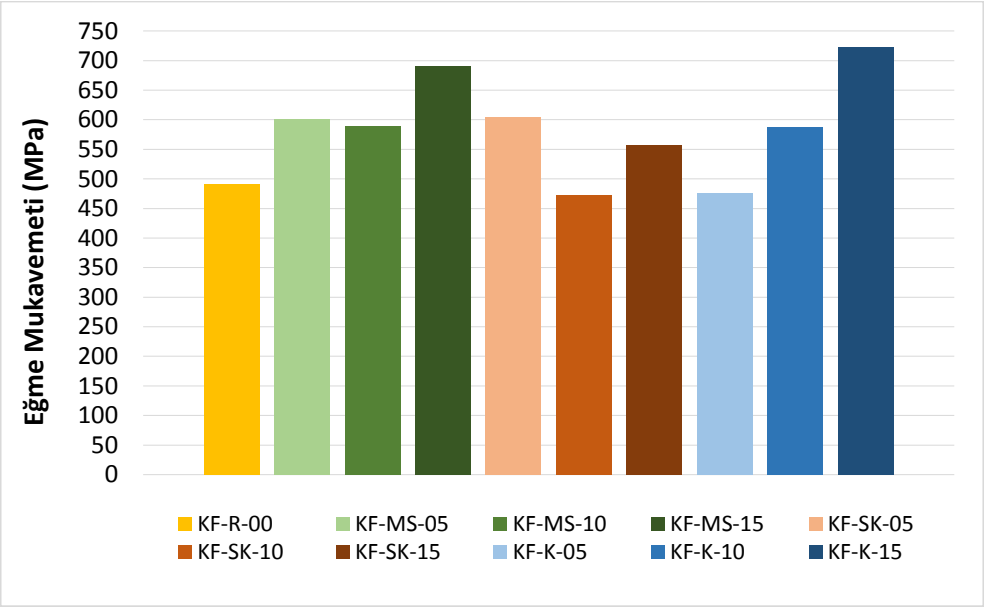
Çizelge 5.1' deki eğme mukavemeti değerlerine bakıldığında; en düşük değer % 10 silisyum karbür katkılı kompozitte, en yüksek değer ise % 15 kaolen katkılı kompozitte görülmektedir. **Şekil 5.1'** de görüldüğü gibi katkı malzemesi oranı arttıkça eğme mukavemeti değerlerinin, silisyum karbür istisna olmak üzere arttığı görülmektedir. Yalnızca % 10 silisyum karbür ve % 5 kaolen katkılı kompozitte, katkısız kompozite göre mukavemet değerlerinde düşüş görülmektedir.

Çizelge 5.1: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Eğme Mukavemeti ve Elastisite Modülü Değerleri

Numune No	Eğme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
KF-R-00	490,1	47227
KF-MS-05	601,2	48641
KF-MS-10	589,9	52039
KF-MS-15	690,7	50773
KF-SK-05	604,7	42951
KF-SK-10	471,7	41473
KF-SK-15	556,7	44210
KF-K-05	476,2	51449
KF-K-10	588,3	49814
KF-K-15	722,9	54428

***** Sonuçlar, 3 adet numunenin test sonuçlarında ortaya çıkan değerlerinin ortalamasıdır.

Üç noktadan eğme testi sonucunda elde edilen elastisite modülü değerlerine bakıldığında ise katkısız kompozitlere göre önemli bir artış görülmemektedir. Eğme mukavemetinde olduğu gibi, en yüksek elastisite modülü % 15 oranında kaolen katkılı kompozit malzemede görülmektedir.



Şekil 5.1: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Eğme Mukavemeti Dağılımları

5.2. Çekme Testi

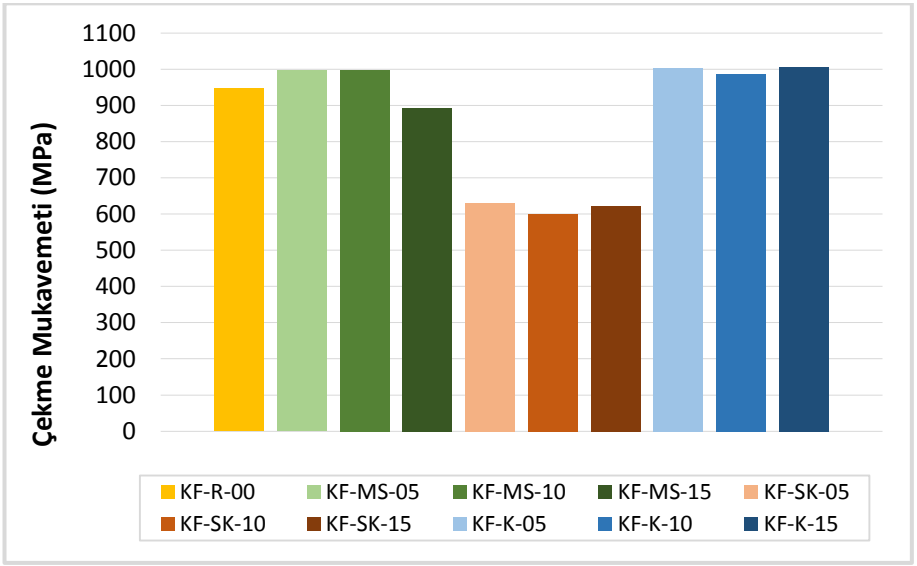
Yapılan çekme testi sonucunda; **Çizelge 5.2'** de görüldüğü gibi en düşük çekme mukavemeti değeri % 10 silisyum karbür katkılı kompozitte görülürken, en yüksek değer % 15 kaolen katkılı kompozitte tespit edilmiştir. **Şekil 5.2'** de görüldüğü üzere, silisyum karbür katkılı kompozitlerin çekme mukavemetinde katkısız kompozitlere göre önemli bir düşüş görülürken, diğer kompozitlerin eğme mukavemeti değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.2: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Çekme Mukavemeti, Maksimum Yüzde Kopma Uzaması ve Elastisite Modülü Değerleri

Numune No	Çekme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yüzde Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (MPa)
KF-R-00	946,7	1,54	61975
KF-MS-05	996,5	1,60	64758
KF-MS-10	996,9	1,55	63082
KF-MS-15	893,0	1,49	63378
KF-SK-05	630,2	1,04	59619
KF-SK-10	599,5	0,97	63604
KF-SK-15	620,8	1,05	60352
KF-K-05	1003,1	1,63	66183
KF-K-10	985,9	1,59	62883
KF-K-15	1005,7	1,46	65681

***** Sonuçlar, 3 adet numunenin test sonuçlarında ortaya çıkan değerlerinin ortalamasıdır.

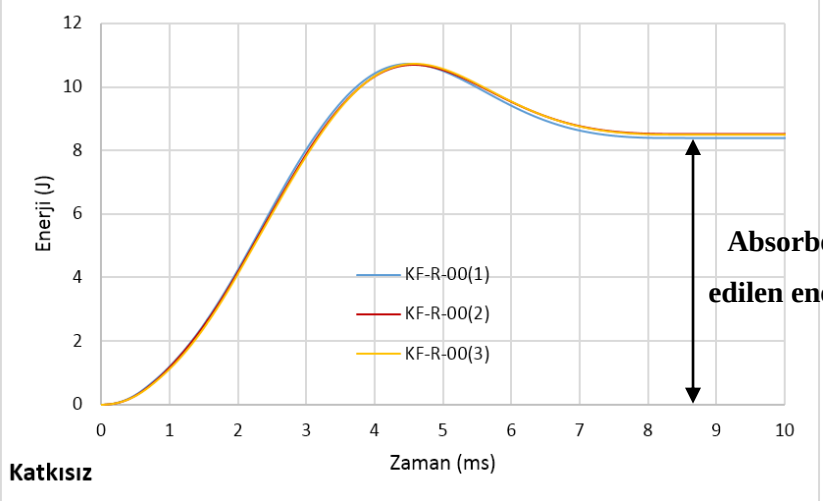
Çekme testi ile elde edilen elastisite modülü değerlerine bakıldığında ise, katkısız kompozite göre magnezyum silikat ve kaolen katkılı kompozitlerde artış görülmektedir.



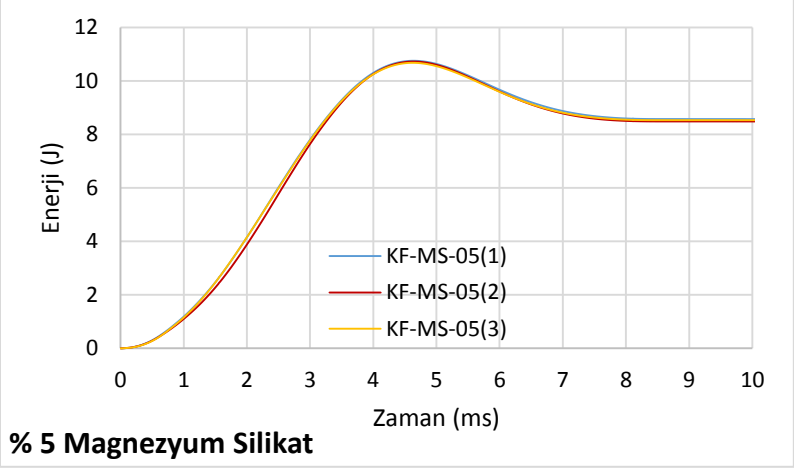
Şekil 5.2: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Çekme Mukavemeti Dağılımı

5.3. Düşük Hızlı Darbe Testi

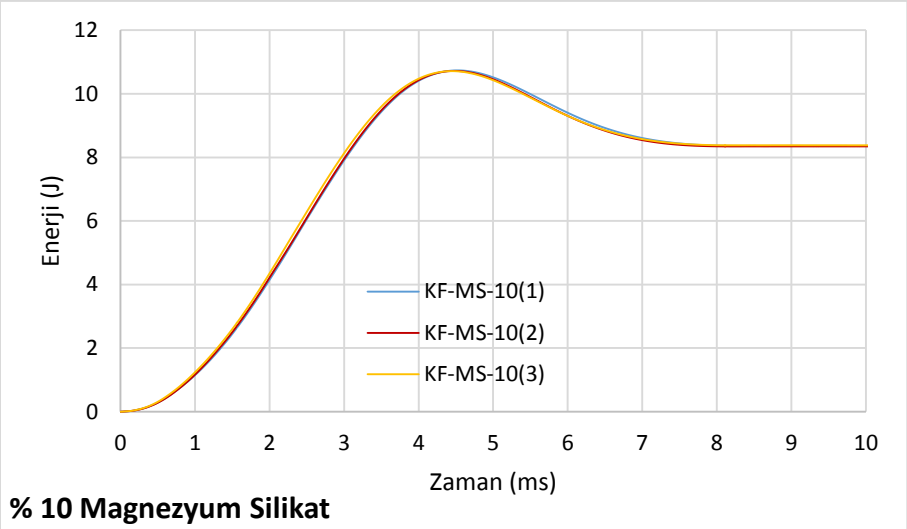
10,7 J' lük düşük hızlı darbe enerjisi ile yapılan test sonucunda katkısız ve % 5, % 10 ve % 15 katkılı numunelerin oluşan enerji-zaman grafikleri **Şekil 5.3-4-5-6-7-8-9-10-11-12'** de verilmiştir. Numunelere uygulanan darbe enerjileri ve bunun sonucunda numunelerin aldıkları hasara göre absorbe ettikleri enerjiler tespit edilebilmektedir.



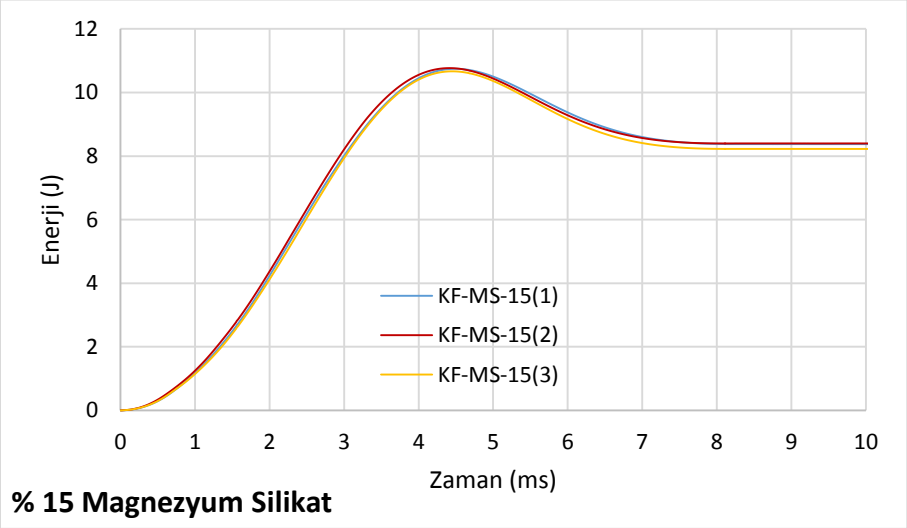
Şekil 5.3: Katkısız Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi



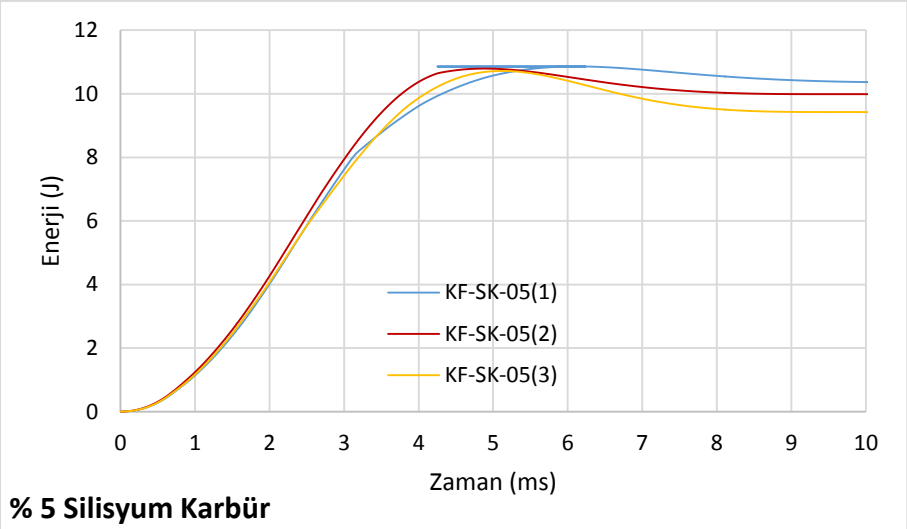
Şekil 5.4: % 5 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi



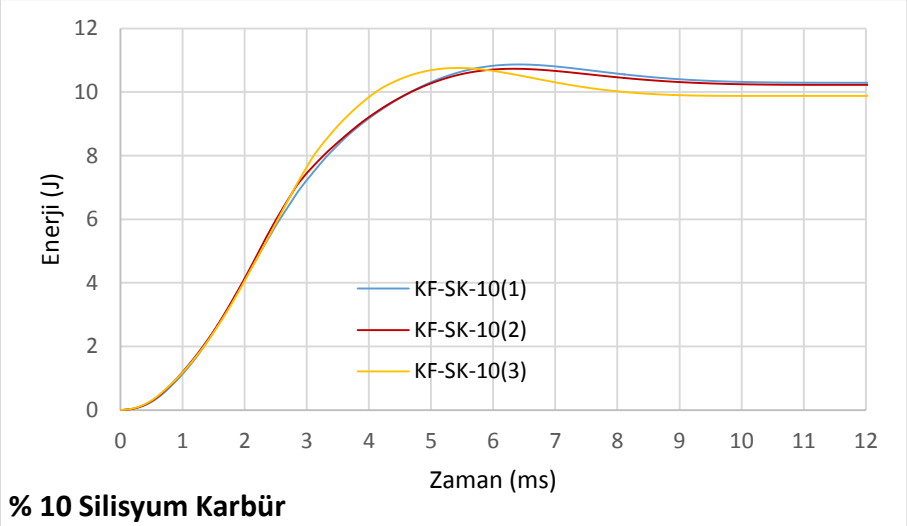
Şekil 5.5: % 10 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi



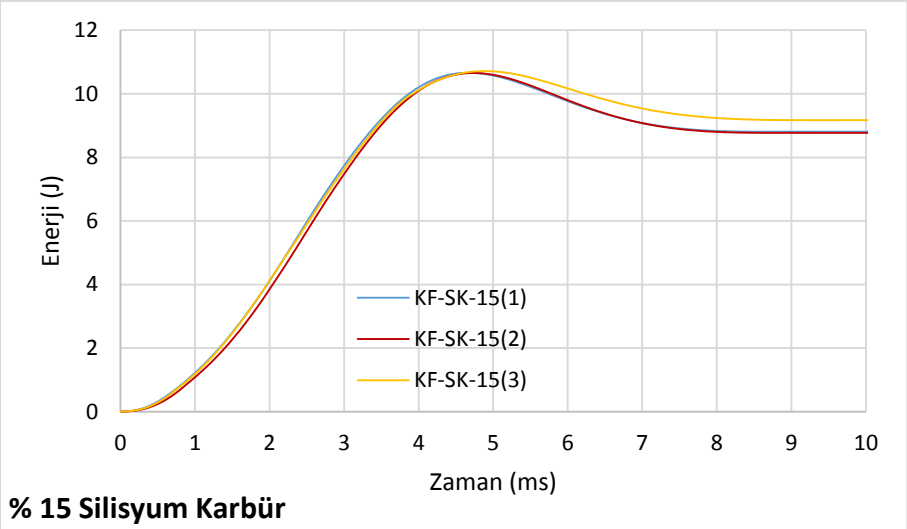
Şekil 5.6: % 15 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi



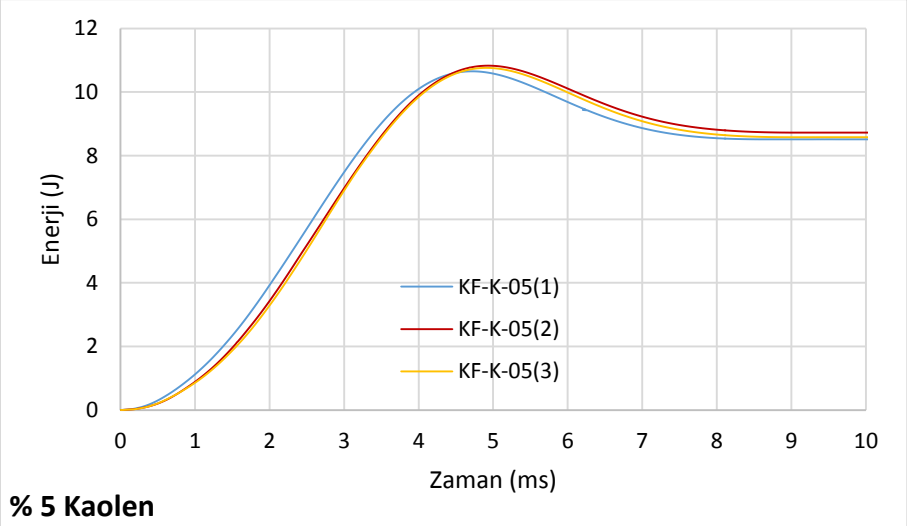
Şekil 5.7: % 5 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi



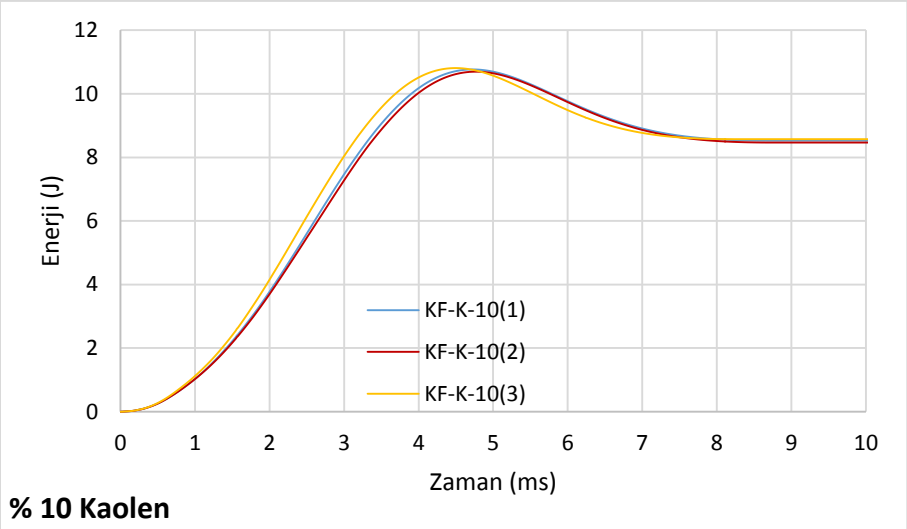
Şekil 5.8: % 10 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi



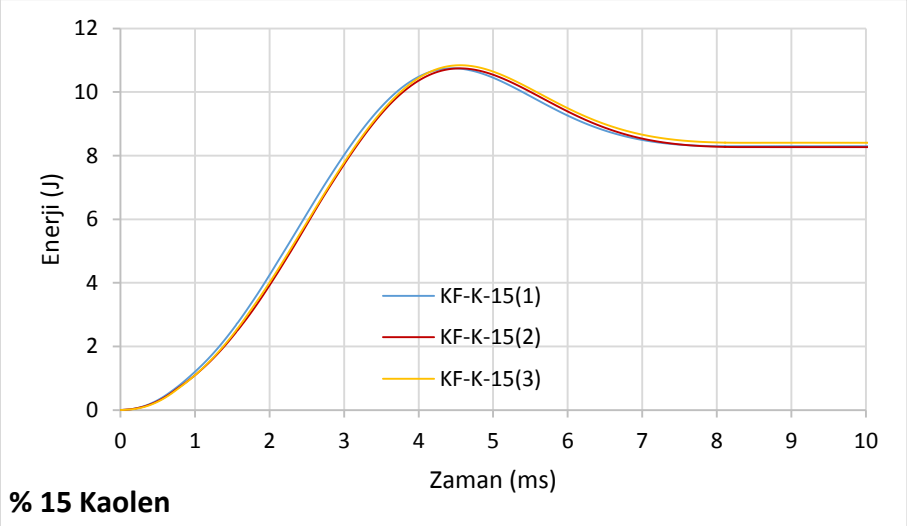
Şekil 5.9: % 15 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi



Şekil 5.10: % 5 Kaolen Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi



Şekil 5.11: % 10 Kaolen Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi



Şekil 5.12: % 15 Kaolen Katkılı Numunelerin Enerji-Zaman Eğrisi

Uygulanan 10,7' lik darbe enerjisi sonucunda numuneler tarafından absorbe edilen enerji miktarları **Çizelge 5.3**' te görülmektedir. En az enerjiyi 8,31 J ile % 15 magnezyum silikat katkılı numune absorbe ederken, % 10 silisyum karbür katkılı numune 10,13 J ile en çok enerjiyi absorbe etmiştir.

Çizelge 5.3: Katkılı Karbon Fiber Kompozitler Tarafından Absorbe Edilen Enerji Miktarları

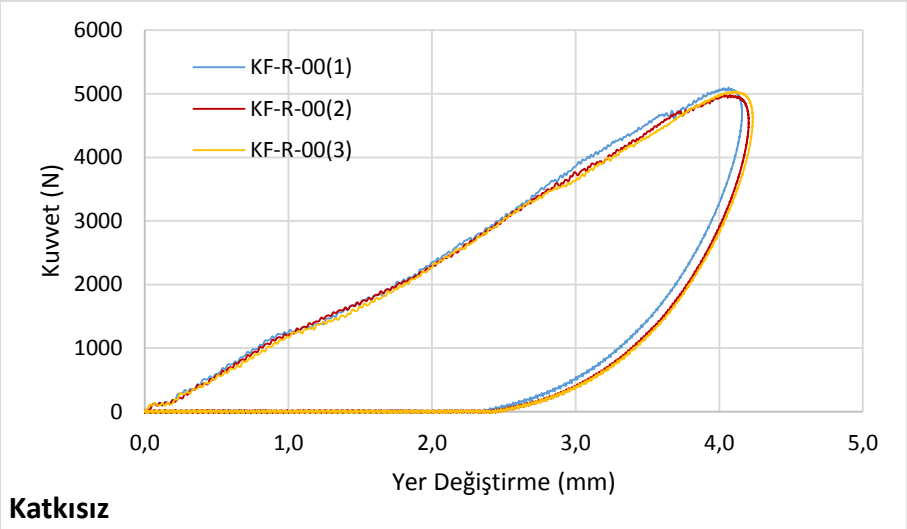
Numune No	Toplam Enerji (J)	Absorbe Edilen Enerji (J)
KF-MS-15	10,7	8,31
KF-K-15	10,7	8,32
KF-MS-10	10,7	8,34
KF-R-00	10,7	8,42
KF-MS-05	10,7	8,50
KF-K-10	10,7	8,52
KF-K-05	10,7	8,60
KF-SK-15	10,7	8,91
KF-SK-05	10,7	9,92
KF-SK-10	10,7	10,13

***** Sonuçlar, 3 adet numunenin test sonuçlarında ortaya çıkan değerlerinin ortalamasıdır.

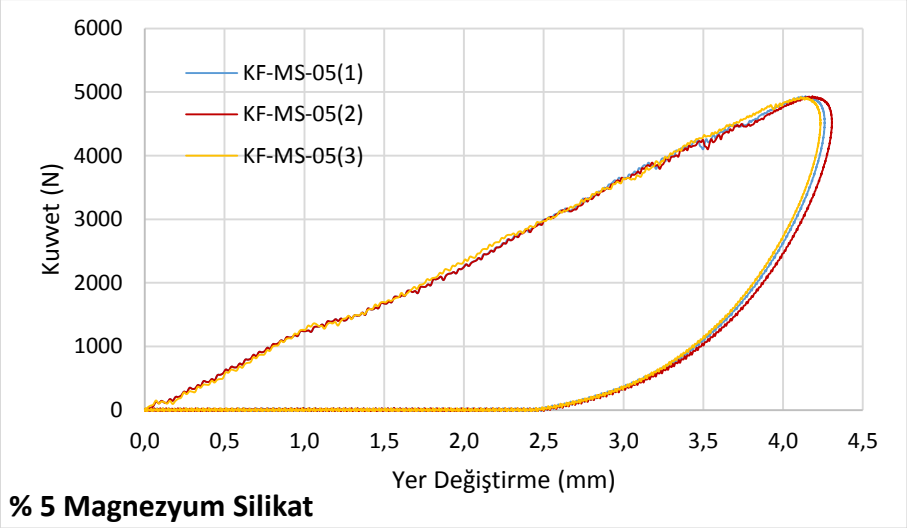
Düşük hızlı darbe enerjisi ile yapılan test sonucunda katkısız ve % 5, % 10 ve % 15 katkılı numunelerin oluşan kuvvet-yer değiştirme eğrileri **Şekil 5.13-14-15-16-17-18-19-20-21-22'** de verilmiştir. Grafiklerde, görülmekte olan salınımlar kuvvet en yüksek değerine ulaşıncaya kadar hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir. Salınım miktarı arttıkça oluşan hasar miktarı da artış göstermektedir. Matris çatlaması ile başlayan hasarlar, uygulanan enerjiye, hıza, malzemeye bağlı olarak delaminasyon oluşumu ve onu takiben tam penetrasyon ile sonuçlanmaktadır.

Matris çatlaması ve delaminasyon gibi hasarlarda, kuvvet-yer değiştirme eğrisi kapalıyken, numunenin tam penetrasyona uğradığı durumlarda ise açık eğri görülmektedir. Düşük darbe enerjilerinde numunede sadece matris çatlaması hasarı ortaya çıkarken, artan darbe enerjisi seviyesi ile kuvvet-yer değiştirme eğrisinin pik yaptığı yerde delaminasyon hasarı oluştuğu tespit edilmektedir.

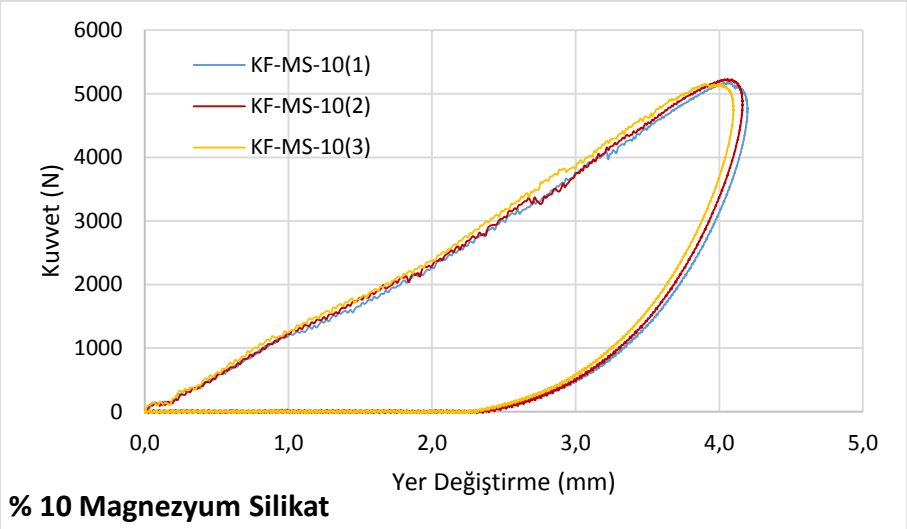
Düşük hızlı darbe enerjisi uygulanan katkısız numuneler ile magnezyum silikat ve kaolen katkılı numunelerde, matris çatlaması hasarı oluştuğu eğrilerde görülmektedir.



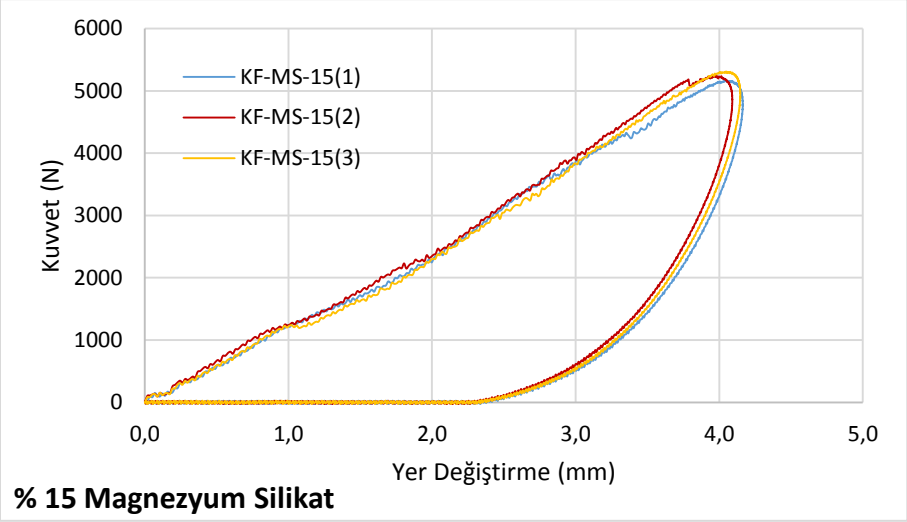
Şekil 5.13: Katkısız Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi



Şekil 5.14: % 5 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi



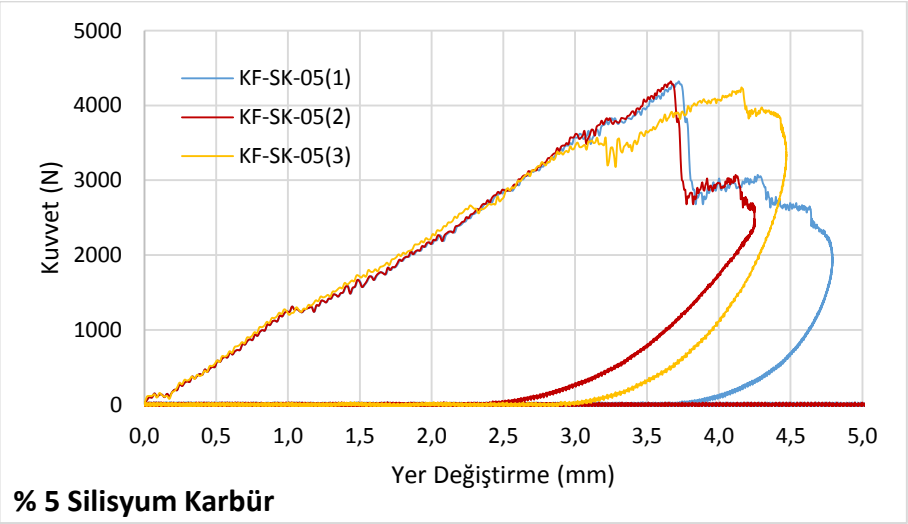
Şekil 5.15: % 10 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi



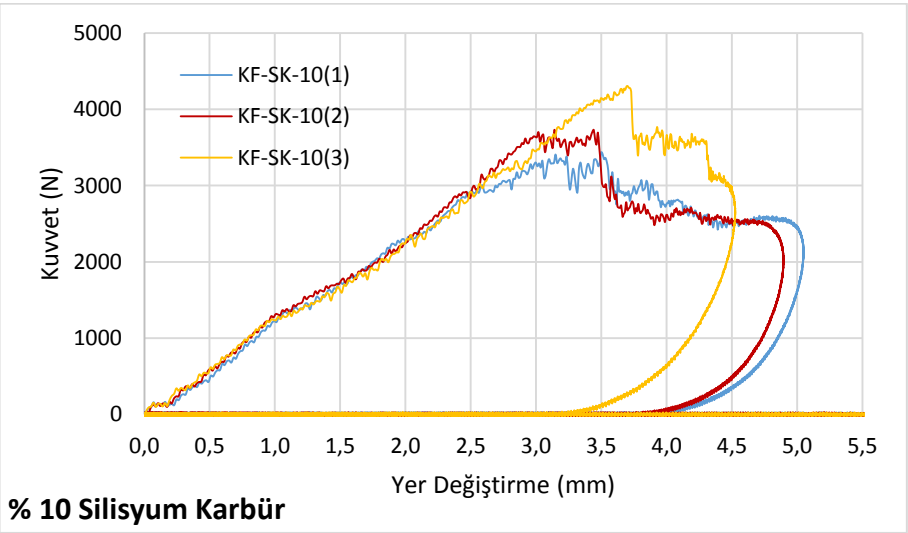
Şekil 5.16: % 15 Magnezyum Silikat Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi

% 5 ve % 10 oranlarında silisyum karbür katkılı numunelere uygulanan düşük hızlı darbe enerjisi sonucunda; numuneler tam penetrasyona uğrayarak **Şekil 5.17-18'** de görüldüğü gibi kuvvet-yer değiştirme eğrisi açık eğri şeklini almıştır. % 15 silisyum karbür katkılı numunede ise **Şekil 5.19'** da görüldüğü gibi matris çatlamasının ardından

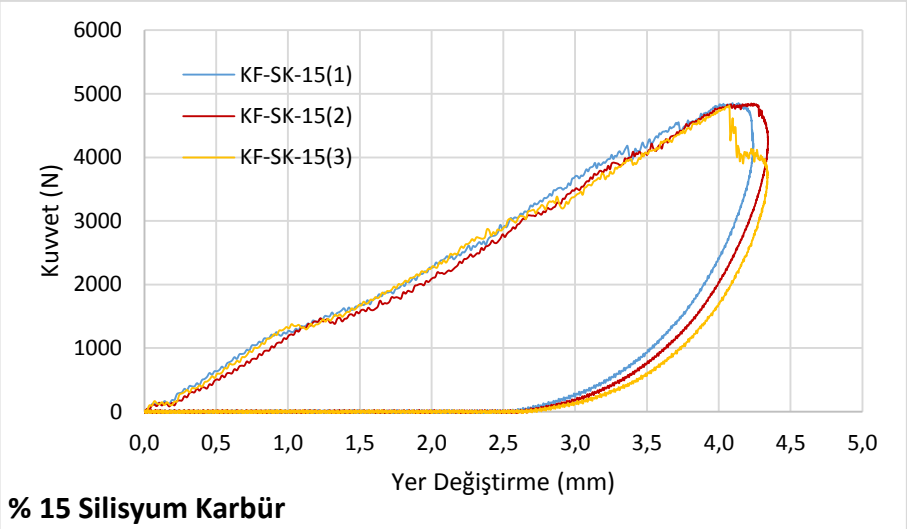
delaminasyon hasarı meydana gelmiştir. Silisyum karbür katkılı kompozitlerde delaminasyon ve tam penetrasyonun hasarlarının görülmesinin sebebi olarak, silisyum karbürün kompozit malzemeye kazandırdığı sertlik ile birlikte gevrek bir yapı oluşturması düşünülmektedir.



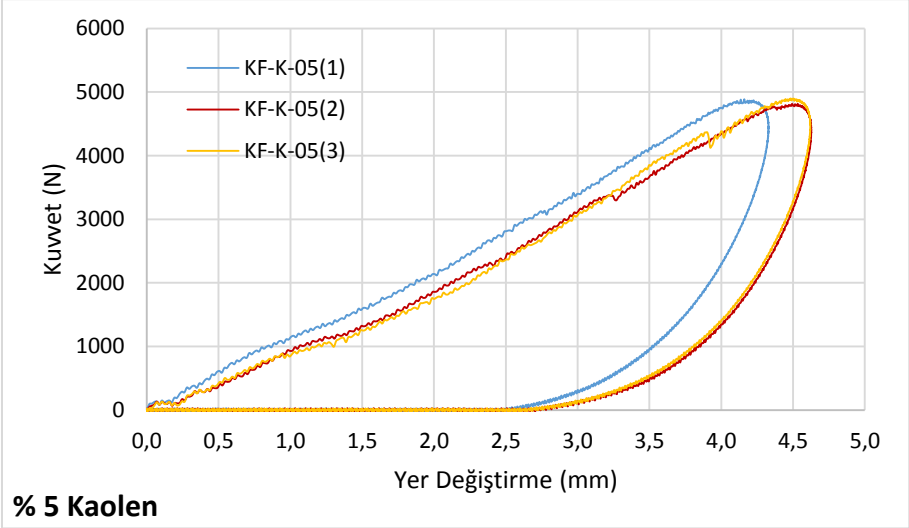
Şekil 5.17: % 5 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi



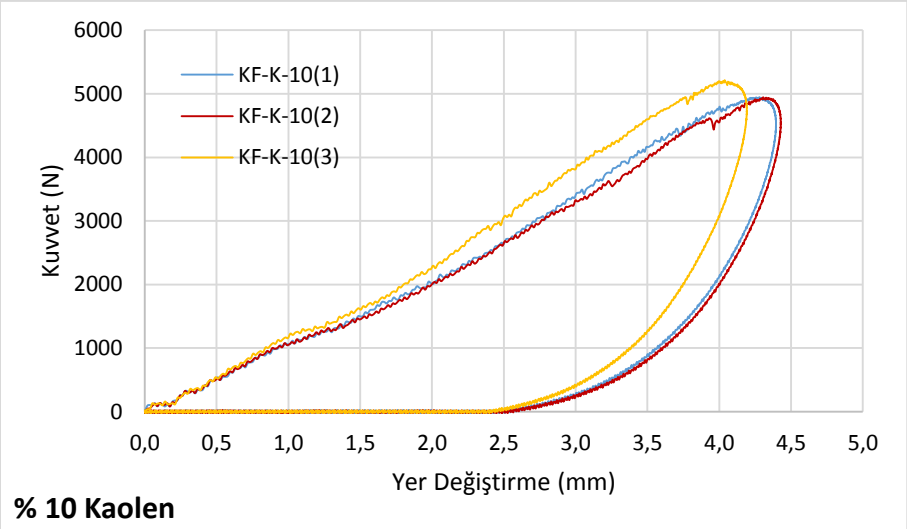
Şekil 5.18: % 10 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi



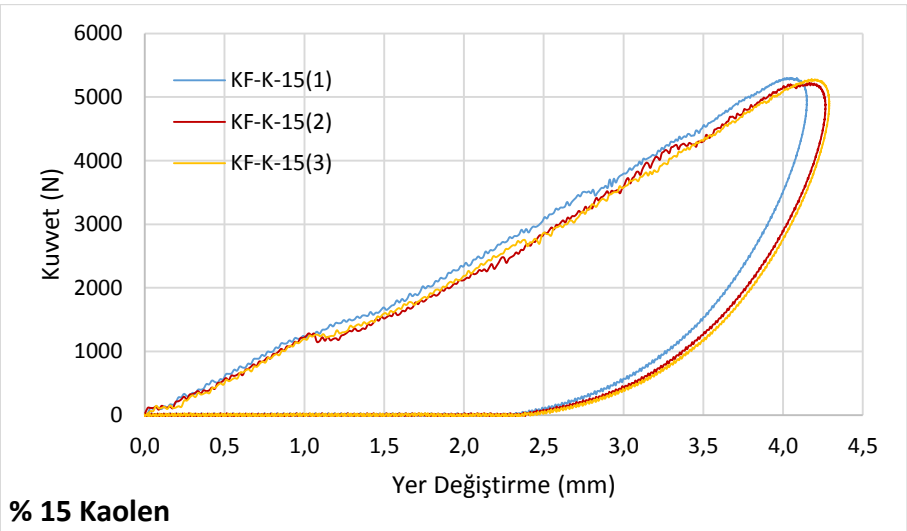
Şekil 5.19: % 15 Silisyum Karbür Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi



Şekil 5.20: % 5 Kaolen Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi

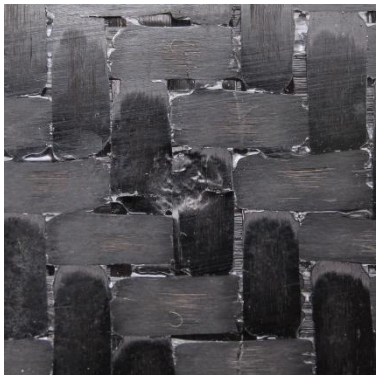


Şekil 5.21: % 10 Kaolen Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi

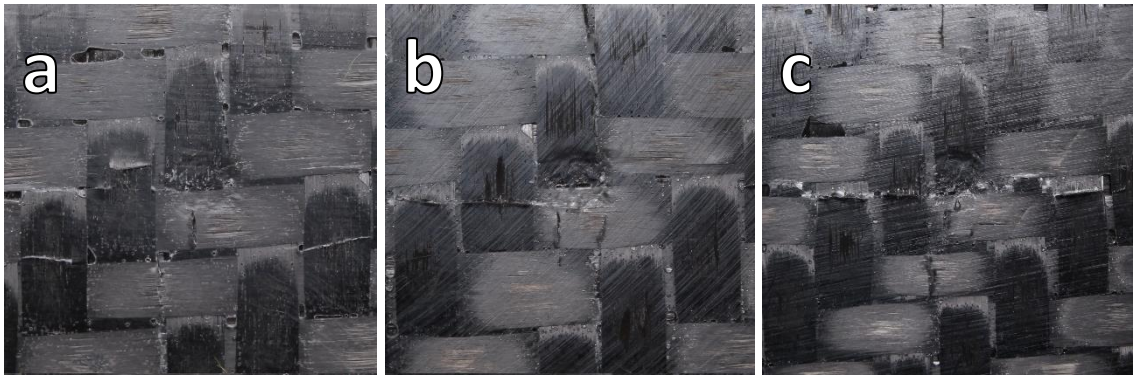


Şekil 5.22: % 15 Kaolen Katkılı Numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrisi

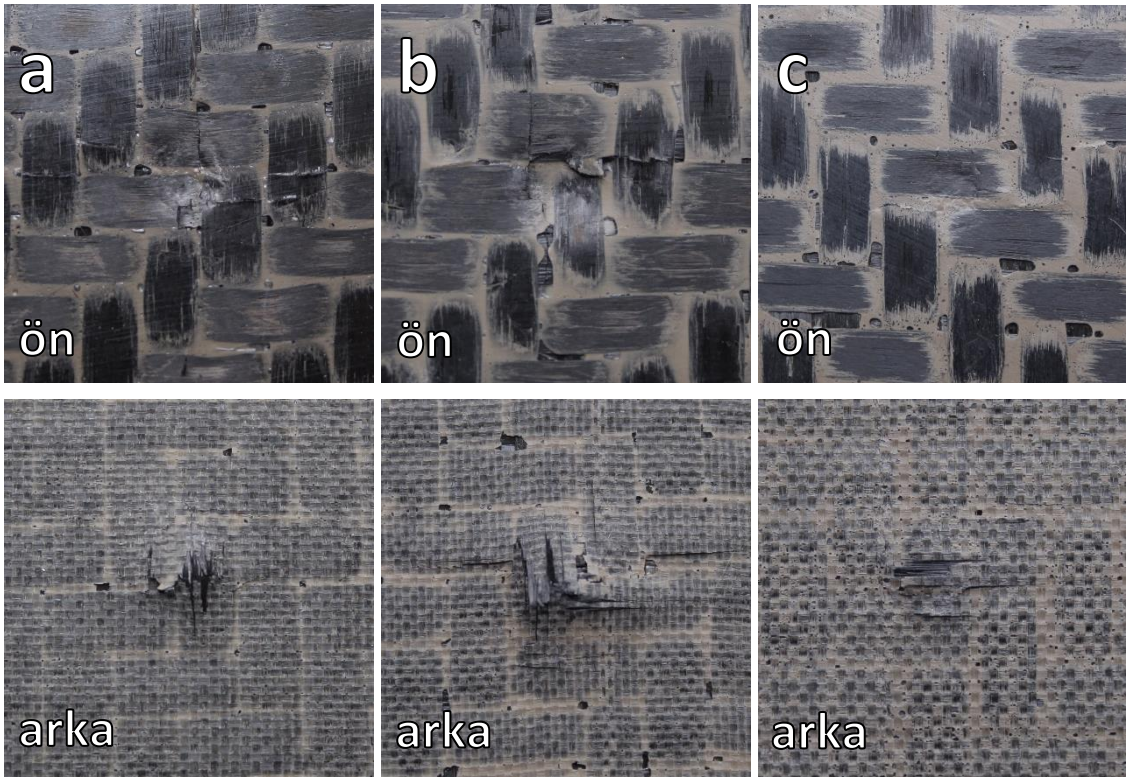
Düşük hızlı darbe testi sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde de görüldüğü üzere karbon fiber plakalarda farklı hasarlar tespit edilmiştir. Oluşan bu hasarların görüntüleri **Şekil 5.23-4-5-6** verilmektedir. **Şekil 5.23-4-6'** da katkısız, magnezyum silikat katkılı, kaolen katkılı plakalarda matris çatlaması gibi düşük hasarlar görülmektedir. **Şekil 5.25 (a) ve (b)'** de % 5 ve % 10 silisyum karbür katkılı plakalarda darbe ucunun arka yüzden çıkarak tam penetrasyon hasarına neden olduğu görülmektedir. **Şekil 5.25 (c)'** de ise % 15 silisyum karbür katkılı plakada darbe ucunun arka yüzden çıkamadığı ve delaminasyon hasarına neden olduğu görülmektedir.



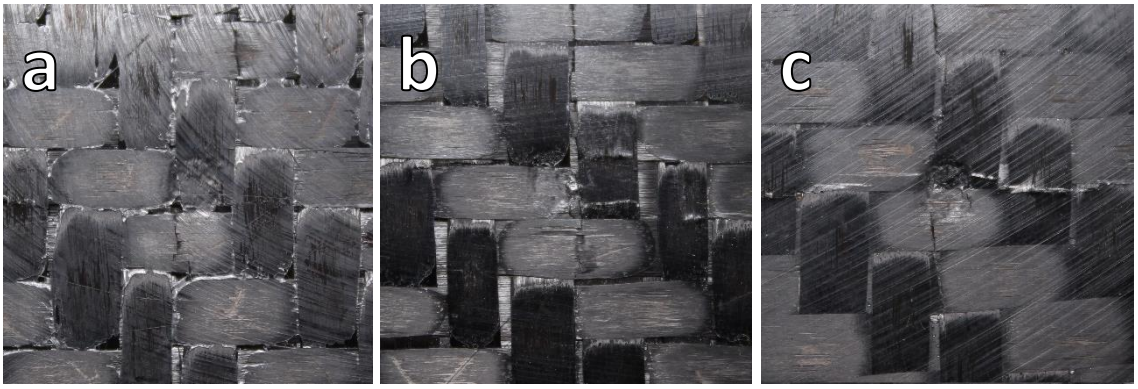
Şekil 5.23: Katkısız Karbon Fiber Plakanın Darbe Hasarı



Şekil 5.24: Magnezyum Silikat Katkılı Karbon Fiber Plakanın Darbe Hasarı **(a)** % 5 katkılı **(b)** % 10 katkılı **(c)** % 15 katkılı



Şekil 5.25: Silisyum Karbür Katkılı Karbon Fiber Plakanın Ön ve Arka Yüzündeki Darbe Hasarı **(a)** % 5 katkılı **(b)** % 10 katkılı **(c)** % 15 katkılı



Şekil 5.26: Kaolen Katkılı Karbon Fiber Plakanın Ön ve Arka Yüzündeki Darbe Hasarı **(a)** % 5 katkılı **(b)** % 10 katkılı **(c)** % 15 katkılı

Katkılı ve katkısız karbon fiber kompozitlerin mekanik özelliklerini tespit edebilmek amacıyla yapılan testler sonucunda elde edilen gerçek mekanik değerler baz alınarak; en küçük değeri temsilen 1, en büyük değeri temsilen 10 olduğu varsayımı ile **Çizelge 5.4** oluşturulmuştur. Oluşturulan çizelgede gösterilen değerler gerçek sonuçların tek bir ölçek sistemi ile değerlendirilmesi açısından oluşturulmuştur.

Çizelge 5.4: Katkılı Karbon Fiber Kompozitlerin Mekanik Değerlerinin Büyüklüklerine Göre Sıralaması

Katkı Malzemesi	Oranı	Eğme Mukavemeti	Çekme Mukavemeti	Elastisite Modülü	Absorbe Edilen Enerji
Katkısız		8	6	8	7
Magnezyum Silikat	**% 5**	4	4	3	6
	% 10	5	3	6	8
	% 15	2	7	5	10
Silisyum Karbür	**% 5**	3	8	10	2
	% 10	10	10	4	1
	% 15	7	9	9	3
Kaolen	**% 5**	9	2	1	4
	% 10	6	5	7	5
	% 15	1	1	2	9

***** 1= en küçük değer, 10= en büyük değer

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Vakum infüzyon yöntemi, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin mikrometre boyutundaki parçacıklar ile takviye edilerek üretilmesine uygun bir yöntemdir.

2. Farklı boyutlardaki takviye malzemeleri epoksi reçine içerisinde homojen bir şekilde dağılımı sağlandığı takdirde, vakum infüzyon yöntemiyle hibrit kompozit malzeme üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

3. Vakum infüzyon yöntemiyle karbon elyaf takviyeli kompozit üretiminde, katkı malzemelerinin tane boyutları ile karbon elyafın örgüleri arasında bir ilişki mevcuttur. Karbon fiber kumaşın lifleri arasındaki boşluklar göz önüne alınarak katkı malzemesi boyutu uygun seçildiği takdirde, katılan takviye malzemeleri bütün yapı içerisine homojen dağılabilmektedir.

4. Matris içerisine eklenen katkı malzemelerinin, matris tarafından ıslatılabilir olması üretilecek kompozitin başarısını etkilemektedir. Katkı malzemesinin reçine tarafından ıslatılabilirliği sağlandığı takdirde, takviye ile matris arasındaki bağ kuvvetinin artması üretilen kompozitin istenen dayanım değerlerine ulaşmasını sağlamaktadır.

5. Takviye olarak kullanılan malzemelerin ıslatılabilirliklerini arttıracak herhangi bir işlem yapılmamasına rağmen, kaolen ve magnezyum silikat katkılı karbon fiber kompozitlerin çekme ve eğme mukavemeti değerlerinde artış görülmüştür.

7. Kaolen ve magnezyum silikat katkılı karbon fiber kompozitlerin elastisite modüllerinin, katkısız kompozitlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

8. Düşük hızlı darbe testi sonucunda, silisyum karbür katkılı karbon fiber kompozitler diğer takviyelerle güçlendirilmiş kompozitlere göre daha fazla enerji absorbe etmiştir.

KAYNAKLAR

Akgün, H. (2008). Poliüretan-Karbon Fiber Kompozitlerin Hazırlanması Ve Karakterizasyonu. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Aran, A. (1990). Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Ataş, C. http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/kompozit/4_%20Uretim%20Yontemleri.pdf, Erişim: 09.08.2017.

Bagherpour, S. (2012). Fibre reinforced polyester composites. Intech. Advance online publication. doi: 10.5772/48697

Bartın Üniversitesi. http://muh.bartin.edu.tr/Files/i4jrhsicxaesu54tnxj5txxyi2016121155529i4jrhsicxaesu54tnxj5txxyi2016121155529.pdf. Erişim: 07.09.2017.

Callister, W. (2007). Materials Science and Engineering. A.B.D.: John Wiley & Sons. s. 600

Chawla, N., Chawla, K. (2013). Metal Matrix Composites Second Edition. A.B.D.: Springer.

Cripps, D. (2017a). http://netcomposites.com/guide-tools/guide/resin-systems/resin-types/. Erişim: 07.07.2017.

Cripps, D. (2017b). http://netcomposites.com/guide-tools/guide/resin-systems/polyester-resins/. Erişim: 10.08.2017.

Çivi, C., Sütçüoğlu, N., Atik, E. (2012). Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Üretilen Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Tabaka Sayısına ve Yöne Bağlı Olarak Mekanik Özelliklerinin Değişiminin İncelenmesi. Denizli: 14. Uluslararası Malzemeler Sempozyumu.

Demirel, A. (2007). Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.

Dokur, M. (2009). Karbon Fiber Esaslı Polimerik Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Durgun, İ. (2014). Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi. Bursa: 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi.

Eker Akdoğan, A. (2008a). Plastik Matrisli Kompozitler Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi. İstanbul.

Eker Akdoğan, A. (2008b). Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi. İstanbul.

Eker Akdoğan, A. (2009). http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/plastikmalzeme/Polimerler. Erişim: 15.09.2017.

Erdal, M., İpek, H., Şaş, H. (2009). İleri kompozit malzemelerin reçine transfer kalıplama yöntemiyle üretiminde kalıp içi reçine akışının modellenmesi. ResearchGate.

Ergun, E., Topçu, M., Üzümcü, N. (2015). Çoğul Duvarlı Karbon Nanotüp Katkılı Cam Elyaf Takviyeli Nano Karbon Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi, Aydın: Uluslararası Katılımlı III. Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu.

Eygi, M., Ateşok, G. (2010). Anyonik polielektrolitlerin kaolen üzerindeki adsorplanma mekanizması, *İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 9*(3), 75-86.

Fidan, S., Sınmazçelik, T., Bora, M. Ö., Çoban, O. (2010). Düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu kompozit malzemelerde ortaya çıkan hasar mekanizması. *Mühendis ve Makine, 611*(51).

Harris, A. J., Vaughan, B., Yeoman, J. A., Smith P. A., Burnage, S. T. (2013). Surface preparation of silicon carbide for improved adhesive bond strength in armour applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(15-16), 2925–2934.

Instytut Metalurgii Żelaza. http://www.imz.pl/en/aktualnosci.php?wid=30&news=291&druk=1. Erişim: 22.08.2017.

İTÜ Biyomalzeme Araştırma ve Karakterizasyon Laboratuvarı. http://www.biomaterials.itu.edu.tr/Elektron_Mikroskop_Incelemeleri.html. Erişim: 08.09.2017.

Kalemtaş, A. (2015). Seramik matrisli kompozit malzemeler. ResearchGate.

Kompozit Sanayicileri Derneği. http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2017/05/Bitirme-Tezi.pdf. Erişim: 19.07.2017.

Labwrench. http://www.labwrench.com/?equipment.view/equipmentNo/7230/ZEISS/EVO--LS-10/. Erişim: 22.08.2017.

Li, Y., Shen, M., Su, H., Chiang, C., Yip, M. (2012). A study on mechanical properties of cnt-reinforced carbon/carbon composites. Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials. Advance online publication. doi: 10.1155/2012/262694

Lubin, G. (1982). Handbook of Composites, A.B.D.: Van Nostrand Reinhold. s. 210.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/talk. Erişim: 07.07.2017.

Mazumdar, S. (2002). Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering. A.B.D.: CRC.

Mert, N., Elmas, M. (2007). Fiber Takviyeli Polimerle Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Analizi, Kocaeli: International Earthquake Symposium.

Metalurji ve Malzeme Platformu. (2013a). http://www.metalurjik.net/seramikler/silisyum-karbur-sic-ve-ozellikleri.html. Erişim: 27.01.2017.

Metalurji ve Malzeme Platformu. (2013b). http://www.metalurjik.net/seramikler/silisyum-karbur-kullanim-alanlari.html. Erişim: 27.01.2017.

Metin, M. (2008). E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya.

Milli Eğitim Bakanlığı. (2012). Kimya Teknolojisi – Reçineler. Ankara.

Mitsubishi Chemical Corporatian. http://www.google.com/patents/EP1666515B1?cl=en. Erişim: 19.07.2017.

Munro, R. G. (1997). Material Properties of a Sintered α- SiC. National Institute of Standarts and Technology. A.B.D.

Nanokon. http://www.nanokon.yildiz.edu.tr/nanoteknoloji/taramali-elektron-mikroskobu-scanning-elektron-microscope-sem/. Erişim: 22.08.2017.

NPTEL. http://nptel.ac.in/courses/112107085/module5/lecture7/lecture7.pdf, Erişim: 19.09.2017.

Olgun, Z. (2009). Pirinç Kabuğu Külünden Magnezyum Silikat Üretimi ve Kızartma Yağlarının Rejenerasyonunda Kullanılması. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Ongun, A. (2015). Karbon Nanotüp ve Nanokil Katkılı, Karbon Fiber / Epoksi Kompozitlerin Düşük Hız Darbe Testiyle Enerji Absorbsiyon Davranışlarının İncelenmesi. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Kırıkkale Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü. Kırıkkale.

Şahin, Y. (2000). Kompozit Malzemelere Giriş. Ankara: Gazi.

The Engineering ToolBox, http://www.engineeringtoolbox.com/ceramics-properties-d_1227.html, Erişim: 07.09.2017.

Topçu, M., Ergun, E., Tekin, F. (2015). Nano Karbon Katkılı Kompozit Malzemelerin Burkulma Davranışlarının İncelenmesi, Aydın: Uluslararası Katılımlı III. Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu.

Townsend, J. (2017). Fabrication and Characterization of Silicon Carbide Epoxy Composites. (Yayımlanmamış doktora tezi). Clemson University. A.B.D.

TÜBİTAK MAM. http://me.mam.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlar/cihazlar-17. Erişim: 22.08.2017.

UseScience. https://scientificservices.eu/item/shock-tower-instron-9250/494. Erişim: 22.08.2017.

Wikipedia. https://tr.wikipedia.org/wiki/Silisyum_karb%C3%BCr. Erişim: 27.01.2017.

ÖZGEÇMİŞ

H. Barış KAROL, 1991 yılında İstanbul ili Fatih ilçesinde doğmuştur. Pendik Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2010 yılında Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde akademik eğitimine başlamıştır. 2015 yılında tamamladığı lisans eğitimi sırasında Trakya Üniversitesi Tasarım ve Proje Topluluğu bünyesinde kurulan Pehlivan Team ekibi ile birlikte güneş arabası ve elektrikli araç imal ederek TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araç Yarışları'nda Türkiye 3.lüğü ve Tasarım Ödülü kazanmıştır. Lisans eğitimini takiben 2015 yılında da Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisansa başlamıştır.