



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜZEYİNE GRAFEN FİLM KAPLANMIŞ

KARBON FİBER EPOKSİ İLERİ

KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

Gökhan MUTLU

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği

Anabilim Dalı

ÇANAKKALE

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜZEYİNE GRAFEN FİLM KAPLANMIŞ
KARBON FİBER EPOKSİ İLERİ
KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

Gökhan MUTLU

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği

Anabilim Dalı

Tezin Sunulduğu Tarih: 29/01/2019

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK

ÇANAKKALE

Gökhan MUTLU tarafından Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK yönetiminde hazırlanan ve **29/01/2019** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Yüzeyine Grafen Film Kaplanmış Karbon Fiber Epoksi İleri Kompozitlerin Üretimi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

Prof. Dr. Ahmet YAPICI

.....

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR

.....

Üye

Prof. Dr. Levent GENÇ

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:.....

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FYL-2016-962

İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Gökhan MUTLU

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmalarım süresince hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen; rehberliğinden, sabrından ve fedakarlığından dolayı saygı değer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK'e teşekkür eder, öğrencisi olmaktan dolayı duyduğum mutluluğu ifade etmek isterim.

Üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan testlerde cihaz temininde Prof Dr. Ahmet AVCI ve Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR' a teşekkür ederim.

Çalışma süresince manevi destekleriyle yanımda olan çok değerli arkadaşlarım Öğr. Gör. Osman Fatih DAMNALI, Öğr. Gör. Ahmet KURT, Dr. Öğr. Üyesi. Mustafa KAPLAN, İnşaat Mühendisi Ali Şahin GÜNGÖR ve İnşaat Mühendisi Mustafa DALYAN'a; Çanakkale İl Özel İdaresi' nin değerli personelleri Yol ve Ulaşım Hizmetleri Müdür Erhan TÜRKER, Yatırım ve İnşaat Müdürü Özgür ŞAHİN ve Endüstri Mühendisi Ertan ERBAŞI' ya özellikle teşekkür etmek isterim.

Son olarak, gösterdikleri anlayış, sabır ve desteğinden dolayı eşim Fatma MUTLU ve bugünlere gelebilmemdeki emeklerinden dolayı aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım...

Gökhan MUTLU
Çanakkale, Ocak 2019

SİMGELER VE KISALTMALAR

KNT	Karbon nanotüp
GR	Grafen
KNT/GR	Karbon nanotüp/Grafen
KF	Karbon fiber
FTPK	Fiber takviyeli polimer kompozit
GO	Grafen oksit
0D	Sıfır boyutlu
1D	Bir boyutlu
2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
TDKNT	Tek duvarlı karbon nanotüp
ÇDKNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
DMF	Dimetil formamid
STD	Standart sapma
ORT	Ortalama
YŞD	Yüzde şekil değişikliği
σ	Gerilme
$\sigma_{\max}$	Çekme dayanımı
P	Numuneye uygulanan yük
$P_{\max}$	Numunenin taşıyabildiği en büyük yük
A	Kesit alanı
N	Nevton
ϵ_i	Şekil değişimi
δ_i	Yer değişimi
E_f	Çekme elastisite modülü
$\Delta\sigma$	Gerilme farkı
$\Delta\epsilon$	Şekil değiştirme farkı
l	Numune boyu
L_g	Ekstansometre temas uzunluğu
d	Mesnetler arasındaki mesafe

ÖZET

YÜZEYİNE GRAFEN TABANLI FİLM KAPLANMIŞ KARBON FİBER EPOKSİ İLERİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

Gökhan MUTLU

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK

29/01/2019, 50

Grafen, karbon nanoyapılar arasında istisnai mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olduğu için polimer kompozitlerde yapısal takviye elemanı olarak kullanılabilecek mükemmel bir malzemedir. Grafen takviyesi ile kompozitler yüksek mukavemet, elektriksel iletkenlik, optik özelliklerin yanı sıra fonksiyonel kompozitler elde edilebilir. Hafiflik, yüksek iletkenlik ve esneklik grafen takviyeli ileri polimer kompozitlerin en ilgi çekici özellikleri olup ileri elektronik, nano-mekanik sistemler ve enerjinin depolanması gibi gelişmiş uygulamalara adapte edilebilecek potansiyele sahiptir.

Bu tez çalışmasının amacı, deneysel yöntemler kullanılarak laboratuvar şartlarında grafen tabanlı karbon fiber/epoksi ileri polimer kompozitlerin ölçeklendirilebilir üretim prosesleri ile üretimi ve mekanik karakterizasyonudur. Bu amaca ulaşmak için, karbon fiber kumaş yüzeylerine grafen film biriktirmek suretiyle karbon fiber hibrit kumaşlar üretilmiş ve bu hibrit kumaşlara epoksi termoset polimer infüze edilerek grafen ileri polimer kompozitler hazırlanmıştır. Karbon fiber kumaşların grafen film ile kaplanma aşamasında, prosese etki eden üretim parametreleri kumaşların mikroskobik ve makroskobik karakterizasyonlarında elde edilen sonuçlara göre optimize edilmiştir. Böylece karbon fiber kumaş yüzeyinde homojen ve sürekli grafen filmi oluşturulmuştur. Üretilen grafen tabanlı ileri polimer kompozitlerin mekanik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda grafen kaplanmış ileri kompozitlerde kontrol numunesine göre kopma dayanımında %38 artış sağlanmıştır. Yapılan çekme testlerine göre grafen film kalınlığının optimum değerinin üzerinde kopma dayanımında azalma belirlenmiştir. Çekme dayanımı, çekme elastisite modülünün ölçülmesinde elde edilen değerlere bakıldığında grafen kaplanmış kompozite göre özelliklerde iyileşme

sağlanmıştır. Çekme testlerinde malzemenin kırılıncaya kadar yuttuğu enerji miktarları değerlendirildiğinde de grafen katkısının açık şekilde sünekliliğini ve rijitliğini arttırdığı görülmüştür. Eğilme testleri incelendiğinde eğilme gerilmesi ve eğilme elastisite modülü değerlerinde kontrol numunesi olan grafen kaplanmamış kompozite göre artış gözlemlenmiştir. Karbon fiber kumaşların grafen ile kaplanması fiber ile matriksin arayüzeylerinde kuvvetli yapışma sağlamış olup kırılma mekanizmalarını geciktirmiştir. Kırılma yüzeylerinde gözlemlenen fiberlerdeki matriks kalıntıları da bu durumu desteklemektedir.

Anahtar sözcükler:Karbon Fiber, Grafen, Kompozit, Ara Yüzey, Mekanik Özellikler



ABSTRACT

FABRICATION OF GRAPHENE FILM DEPOSITED CARBON FIBER-EPOXY ADVANCED COMPOSITES

Gökhan MUTLU

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master of Science Thesis in Bioengineering and Materials Engineering

Advisor: Assist. Prof. Volkan ESKİZEYBEK

29/01/2019, 50

Graphene is an excellent material that can be used as a structural reinforcing element in polymer composites because it has exceptional mechanical and physical properties among carbon nanostructures. Graphene reinforced composites can be obtained with high strength, electrical conductivity, optical properties as well as functional composites. Lightness, high conductivity and flexibility are the most interesting features of advanced polymer composites with graphene reinforcement and have the potential to be adapted to advanced applications such as advanced electronics, nano-mechanical systems and storage of energy.

The aim of this thesis is to fabricate the graphene based carbon fiber/epoxy advanced polymer composites with scalable production processes and to characterize the resulting advanced composites. To achieve this goal, carbon fiber hybrid fabrics were prepared by grafting graphene film on carbon fiber fabric surfaces, and these hybrid fabrics were infused with epoxy polymer to fabricate advanced polymer composites. In the case of coating of carbon fiber fabrics with graphene film, the main process parameters were optimized according to the results obtained in the microscopic and macroscopic characterizations of the fabrics and thus advanced polymer composites with improved mechanical and physical properties were produced.

As a result of the tensile tests performed, a 38% increase in the tensile strength of the graphene film interleaved advanced composites compared to the control sample was achieved. According to the tensile tests performed, a decrease in the tensile strength with respect to the graphene film thickness over the optimum value was determined. When the tensile strength, tensile elasticity modulus were measured, the properties were improved

according to the graphene interleaved composite. In the tensile tests, when the amount of energy absorbed until the material was broken, it was observed that the graphene interleave clearly increased the ductility and stiffness of the carbon/epoxy composite. According to the bending tests, it was observed that the bending stress and bending elasticity modulus were increased compared to the control sample. The graphene film on carbon fiber fabrics has provided strong adhesion on the fiber-matrix interface. The matrix residues in the fibers observed on the fracture surfaces also support this observation.

Keywords: Carbon Fiber, Graphene, Composite, Interface, Mechanical Properties



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ SINAVI SONUÇ FORMU	ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Kompozit Malzemeler	3
2.1.1. Fiber Takviyeli Polimer Polimer Kompozitler	3
2.1.2. Polimer Reçineler	4
2.1.3. Fiberler Ve Kompozitlerde Kullanılan Fiber Türleri	5
2.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi	7
2.4. Nanoboyutlu Takviyeler Ve Dolgu Malzemeleri	9
2.5. Takviye Elemanı Olarak Kullanılan Grafen	11
2.5.1. Grafen Üretim Yöntemleri	12
2.5.2. Grafen Uygulama Alanları	14
2.6. Polimer- Fiber Ara Yüzeyinin Grafen İle Takviye Edilmesi	14
2.7. Bu Çalışmanın Literatürdeki Yeri	16
BÖLÜM 3	
MATERYAL VE YÖNTEM	19
3.1. Grafen Tabanlı Karbon Fiber Hibrit Kumaşların Geliştirilmesi	19
3.2. Vakum Yardımlı Reçine Transferi Kalıplama Metodu ile Grafen Tabanlı Film Kaplanmış Karbon Fiber İlerikompozit Üretimi	21
3.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	23
3.3.1. Çekme deneyleri	23
3.3.2. Eğilme Deneyleri	25

BÖLÜM 4	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	28
4.1. Grafen Film Kaplanmış Kompozit Malzemenin Morfolojik Karakterizasyonu	28
4.2. Grafen Film Kaplanmış Kompozit Malzemenin Mekanik Karakterizasyonu	29
4.2.1. Eğilme Deneyleri Sonucu Kırılan Yüzeylerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi	36
BÖLÜM 5	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	42
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	I



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Fiber takviyeli kompozitlerde tercih edilen farklı türlerde fiber yapıları a) İki eksenli örgü b) Üç eksenli örgü c) Tek eksenli dokuma d) Çapraz Dokuma e) 3 Boyutlu silindirik yapı f) 3 Boyutlu örgü g) 3 Boyutlu ortogonal kumaş h) Açısal Kilitlenmiş Yapı.....	7
Şekil 2.2 VARTM yöntemine ait üretim adımlarının şematik gösterimi	8
Şekil 2.3 FTPK' lerde takviye türleri – türlere ait geometri ve yüzey alanı/hacim oranları	10
Şekil 2.4 Grafenin bağ yapısı ve şematik gösterimi	11
Şekil 2.5 Grafen ve grafenin farklı boyutlarından olşan türevleri a) Tek tabakalı grafen b) Çok tabakalı grafen c) Karbon nanotüp d) Fulleren	12
Şekil 3.1 Grafen film kaplama işlemi için çözelti hazırlanmasının şematik gösterimi	20
Şekil 3.2 Karbon fiber kumaş yüzeyine emdirme yöntemi ile grafen kaplama işlemi şematik gösterim	21
Şekil 3.3 Vakum yardımcı reçine transferi kalıplama metodu ile grafen tabanlı film kaplanmış karbon fiber ileri kompozit üretiminin şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.4 Şematik olarak çekme numunelerinin boyutları (ASTM D 3039 standardından alınarak değiştirilerek kullanılmıştır.) ve tek eksenli çekme yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı ileri kompozit numunesi	24
Şekil 3.5 Şematik olarak eğilme numunelerinin boyutları (ASTM D 7264 standardından alınarak değiştirilerek kullanılmıştır.) ve üç noktadan eğilme yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı ileri kompozit numunesi	26
Şekil 4.1. Kompozit üretiminde kullanılan grafenin morfolojik olarak incelenmesine ait fotoğraflar a) Grafen tabakasına ait AFM fotoğrafları b) Grafen tabakasına ait AFM' da ölçülen yükseklik profile.....	28
Şekil 4.2 Karbon fiber kumaş yüzeyine emdirme yöntemi ile kaplanan grafen filmine ait taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları	29
Şekil 4.3 Tabakalı ileri kompozitlerin tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri	30
Şekil 4.4 Tabakalı nanokompozitlerin tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen çekme dayanımı değerleri	31
Şekil 4.5 Tabakalı ileri kompozitlerin tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen elastisite modülü değerleri	32
Şekil 4.6 Tabakalı ileri kompozitlerin tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen tokluk değerleri	33
Şekil 4.7 Tabakalı ileri kompozitlerin üç noktadan eğilme deneyi sonucu elde edilen eğilme gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri	34
Şekil 4.8 Üç noktadan eğilme deneylerinde tabakalı ileri kompozitlerin ulaştığı en büyük eğilme gerilmesi değerleri.....	35
Şekil 4.9 Üç noktadan eğilme deneylerinde tabakalı ileri kompozitlerin eğilme elastisite modülü değerleri	36
Şekil 4.10 Yüzeyine grafen film kaplanmış karbon fiber epoksi ileri kompozitlere ait eğilme testi sonrasına ait SEM görüntüleri a) GM0 b) GM1 c) GM05 d) GM01	37
Şekil 4.11 Grafen tabanlı film kaplanmış karbon fiber ileri kompozitlere ait Sem görüntüleri a) GM01 numunesine ait görüntü b) GM1 numunesine ait görüntü	40
Şekil 4.12 Grafen tabanlı film kaplanmış karbon fiber ileri kompozitlere ait Sem görüntüleri.....	41

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Fiber takviyeli polimer kompozitler (FTPK) yüksek dayanım-ağırlık oranı nedeniyle özellikle uzay, havacılık ve otomobil sektörlerinde yüksek performans sergileyen metal alaşımlarının yerine tercih edilmektedir. Fiber takviyeli polimer kompozitlerde fiber-matriks arayüzey dayanımı kompozit malzemenin performansını kontrol eden parametrelerin başında gelmektedir. Fiber takviyesi ile onu çevreleyen polimer matriks arasındaki yapışma özelliklerinin iyileşmesi fiber ile matriks arasındaki kuvvet aktarımını iyileştireceği için ara yüz bölgesinde oluşabilecek gerilme konsantrasyonlarını azaltır. Böylece, kompozit malzemenin statik ve dinamik yükler etkisi altındaki mekanik özellikleri iyileştirir (Chou ve ark., 2000).

Son yıllarda, nanoparçacık takviyeli kompozitlerin geliştirilmesi yeni ve ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Karbon nanoyapılar FTPK'lerin uygulama şekli ve türlerine göre mekanik, elektriksel, termal özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılabilecek en uygun dolgu malzemelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Günümüzde karbon nanoyapıların (karbon nanotüp, grafen, karbon nanotop vb.) uygulama alanlarının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar sonucunda ileri kompozitlerin teknolojik gelişiminde önemli yol katedilmiştir (Eskizeybek ve ark., 2011a; Eskizeybek ve ark., 2014).

FTPK' de dolgu malzemesi olarak kullanılabilecek nanoparçacıklar arasında sahip oldukları eşsiz özellikleri sayesinde grafen büyük önem kazanmaktadır. Grafen, karbon nanoyapılar arasında istisnai mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olduğu için polimer kompozitlere fonksiyonellik katabilecek mükemmel bir malzemedir. Hafiflik, yüksek iletkenlik ve esneklik grafen ile takviye edilmiş polimer kompozitlerin en ilgi çekici özellikleri olup ileri elektronik ve nano-mekanik sistemler gibi gelişmiş uygulamalara adapte edilebilecek potansiyele sahiptir (Lee ve ark., 2013; Qin ve ark., 2015).

Karbon nanoyapıların sahip oldukları bu özellikleri ortaya çıkarabilmek için öncelikli olarak dikkat edilmesi gereken husus, bu yapıların polimer reçine içerisinde homojen bir şekilde dağıtılmasıdır. Fakat, nanoboyutlu malzemeler sahip oldukları büyük yüzey alanlarından dolayı birbirlerini kuvvetli van der Waals bağları ile çekerler, dolayısıyla polimer içerisindeki dağılımları zorlaşır. Nanoparçacıkların etkin şekilde dağıtılması için birçok fiziksel ve kimyasal yöntem kullanılmıştır. Ancak kullanılan bu yöntemlerin verimi istenilen seviyelere ulaşamamıştır. Bu yöntemlere alternatif olarak, nanotakviyeler fiber

yüzeylerinde süreklilik oluşturacak şekilde film olarak kaplanabilirler (Eskizeybek ve ark., 2018b).

Grafen ile kaplanmış fiberler kullanılarak üretilen polimer kompozitlerin özellikle fiber/matriks ara yüzeyinin mekanik performansını iyileştirdiği yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Bunlara ilaveten, yüksek fiziksel özellikler sergileyen (elektriksel ve ısı iletkenlik gibi) nanoyapıların fiber yüzeylerindeki varlığı polimer kompozitlerin ısı ve elektriksel iletkenliklerini iyileştirmekle birlikte kompozitlere fonksiyonellik de kazandırmaktadır.

Son on yılda özellikle karbon tabanlı nanoyapıların fiber-matriks arayüz bölgesine farklı yöntemler kullanılarak yerleştirilmesi ile fiber takviyeli kompozitlerin servis ömürlerinin uzatılmasına yönelik derinlemesine araştırmalar yapılmıştır. Son dönemde, karbon nanotüplerin fiber-matriks ara yüzeyinde kullanılması ile sağlanan mekanik iyileşmelere dayanarak, araştırmacılar grafen tabakaları benzer olarak fiber-matriks ara yüzeyinde kullanmayı amaçlamaktadır. Bundaki amaç, ileri kompozit malzemenin mekanik, ısı ve elektriksel özelliklerini iyileştirilmesiyle servis performansının artırılmasıdır. Grafen tabakalar (iki boyutlu), karbon nanotüplere (bir boyutlu) göre daha büyük etkin yüzey alanları ve iki boyutlu plaka şeklindeki yapıları nedeniyle fiber-matriks ara yüzeyinde meydana gelen eğilme veya kayma gerilmeleri ile ortaya çıkan mikro çatlakların yönlerini değiştirerek kırılma tokluğunu artırıcı yönde katkı sağlayabilir.

Bu tez çalışmasında, yüzeylerine farklı kalınlıklarda grafen film kaplanmış hibrit karbon fiber kumaşlara epoksi reçine emdirilip, vakum yardımcı reçine transfer kalıplama yöntemi (VARTM) kullanılarak ileri polimer kompozitler üretilmiştir. Üretilen ileri kompozit tabakaların mekanik (statik çekme ve eğilme testleri ile) ve morfolojik özellikleri belirlenmiştir. Yapılan bu sistematik deneyler sayesinde karbon fiber kumaş yüzeyinde biriktirilen grafen filmin tabakalı kompozit malzemenin mekanik özelliklerine katkısı çok yönlü olarak incelenmiştir.

BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Kompozit Malzemeler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler birbirinden farklı kimyasal ve fiziksel özellikleri olan iki veya daha fazla malzemenin, özelliklerinde iyileştirme sağlama amacıyla makroskobik ya da mikroskobik boyutlarda birleşmesiyle elde edilir. Bir polimeri, cam, karbon veya başka bir polimer gibi, farklı bir malzeme ile birleştirerek, benzersiz kombinasyonların veya özellik düzeylerinin elde edilmesi genellikle mümkündür. Amaç, bir matris veya bağlanma fazına parçacıklar veya lifler katmak suretiyle mukavemeti, sertliği, tokluğu veya boyutsal kararlılığı arttırmaktır. Doğada bulunan kompozitler arasında odun ve kemik (kolajen ile bağlanmış mineraller) örnek olarak gösterilebilir. Burada kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerin özelliklerinin iyileştirilip, daha üstün özelliklerde malzeme üretimi esastır. Takviye malzemeleri ile matriks veya bağlayıcılardan oluşmaktadır. Kullanılan takviye malzemesi ve matrikse göre farklı türleri vardır. Otomotiv, uzay ve havacılık, savunma sanayi ve yapı malzemesi gibi birçok sektörde kullanımı söz konusudur (Chou ve ark., 2000; Yapici ve ark., 2001).

2.1.1. Fiber Takviyeli Polimer Polimer Kompozitler

Polimer matriksli kompozitler günümüzde en çok kullanılan mühendislik yapı malzemelerindendir. Polimer bir matriks ve takviye elemanı olan fiberlerden oluşmaktadır. Sentetik polimer kompozitlerin tipik örnekleri arasında cam, karbon- veya polimer-fiber takviyeli, termoplastik veya ısıyla sertleşen reçineler, karbon takviyeli kauçuklar, polimer harmanları, silika veya mika takviyeli reçineler ve polimer ile bağlanmış veya emdirilmiş beton veya ahşap bulunur. Aynı zamanda, kaplamalar (pigment bağlayıcı birleşimleri) ve kristalli polimerler (polimer matrisinde kristalitler) gibi materyaller de kompozit polimer kompozit olarak adlandırılırlar (Eskizeybek ve ark., 2018a).

En yaygın fiber takviyeli polimer kompozitleri, bir epoksi veya polyeester reçine matriksine gömülmüş cam elyafı, kumaş, keçe veya fitillere oluşmaktadır. Bor, poliaramidler ve özellikle karbon fiberleri içeren güçlendirilmiş, ısıyla sertleşen reçineler özellikle yüksek mukavemet ve sertlik seviyelerine sahiptir. Karbon fiber kompozitler çelik malzemelere göre beş kat nispi bir rijitliğe sahiptir (Masuelli ve ark., 2013). Bu mükemmel özelliklerden dolayı, yeni jet uçağındaki bileşenler, otomobil parçaları, tekne

gövdeleri, roket motoru kılıfları ve kimyasal reaksiyon kapları gibi birçok uygulamada epoksi ve polyester kompozitler kullanılır.

Modern kompozitlerde amaç aynı olmak ile birlikte uygulama farklılık gösterebilir. Matriks genelde epoksi reçine, polidisiklopentadien veya bir poliamid gibi bir termosettir. Takviye elemanı olarak ta cam, karbon fiber ya da kevlar kullanılmaktadır. Fiber takviyeli kompozitlerde daha dayanıklı ve daha hafif malzeme elde edilmesi hedeflenmektedir. Genellikle kompozit takviye etmek için fiberlerin dokuma kumaş özelliğinde olanını kullanılır. Dokuma fiberler, birçok yönde bir kompozit iyi mukavemet sağlar.

2.1.2. Polimer Reçineler

Polimer reçineler malzemeyi bir arada tutan matriks fazını oluştururlar. Aynı zamanda yapısal olarak ta basma ve kayma dayanımı gibi mekanik özelliklerin belirlenmesinde görev alırlar. Polimerler monomer olarak adlandırılan, yüksek moleküler ağırlığı olan organik bileşiklerin sürekli tekrarlanması ile oluşmaktadırlar. Polimerlerin oluşmasında 103 ila 106 monomerin kimyasal reaksiyonu söz konusudur. Polimer matriksli kompozitlerde takviye maddelerini bir arada tutan matriks malzemeleri termoset veya termoplastik olabilir.

Termoplastikler, uzun zincirli hidrokarbon moleküllerinden oluşan ve bu zincirlerin birbirlerine bağlar çekim kuvveti düşünüldüğünde zayıf bağ olarak adlandırılan van der Waals bağları ve mekanik kilitlenmeler ile bağlandığı plastik yapılardır. Bu bağlara ait çekim kuvvetinin, kovalent bağlara oranla daha zayıf olması sebebiyle termoplastikler daha kolay olarak eritilebilmektedirler. Hatta artan sıcaklık ile mekanik kilitlenmenin sebep olacağı etki de azalacağından dolayı termoplastik reçinelere ait viskozite değeri de rahatlıkla düşürülebilir. Bu yüzden termoplastik malzemeler sıcaklık artışıyla birçok kez şekil değiştirebilen plastik çeşitleridir (Chou ve ark., 2000).

Termoset plastikler de yine uzun zincirli hidrokarbon moleküllerinden oluşmuştur. Ancak, termosetler malzemelerde uzun molekül zincirlerinin birbirlerine ait bağlar termoplastiklerden farklı olarak kovalent bağlardır. Termosetler ile termoplastikler arasındaki moleküler arasındaki bağ farklılığı iki malzemeyi birbirinden ayrı kılan en önemli özellik olmuştur. Bu nedenle termosetler termoplastikler ile kıyaslandığında daha dayanıklı, rijit özelliklere sahip olup; daha az sünek davranış gösterir. Bu davranışlarda üç boyutlu karmaşık katı yapıya sahip olması önemli rol oynar. (Sheikh-Ahmad, 2009). En çok kullanılan termosetler epoksi, polyester ve fenolik reçinelerdir. Polyester reçinelerin farklı mühendislik malzemeleri ve kompozit uygulamalarında kullanımı söz konusudur.

Epoksi reçineler ise daha dayanıklı ve daha rijittir. Bu özelliklerinden dolayı kompozit yapılar ve yapıştırıcılarda kullanılır. Epoksi reçineler genel olarak incelendiğinde termomekanik, elektriksel ve kimyasal direnç özellikleri olarak yüksek performans gösterirler (Kundu ve Sinha, 2006)

Bu çalışmada epoksi matriksli kompozitler incelenmiştir. Epoksi reçine termoset bir polimer olup epoksid monomerinin poliamid sertleştiriciler ile reaksiyonu sonucunda oluşur. Epoksi reçineler FTPK üretiminin dışında genel yapıştırıcı elemanı ya da kaplama malzemesi olarak ta kullanılabilir. Mekanik özelliklerinin yüksek oluşu ve kimyasal etkilere karşı olan yüksek dirençleri epoksi reçineleri diğer polimerlerden ayıran en önemli farklılıklarıdır. Epoksi reçineleri önemli yapıştırıcılar sınıfına sokan özellikleri çok farklı türden yüzeye rahatça intisap edebilmesidir. Polimerleşmeden önce hem epoksid monomerleri hem de setleştirici olarak kullanılan poliamidler yüksek viskoziteye sahip olmalarına karşın, epoksi reçineler vakum infüzyon tekniği kullanılarak kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan reçine türüdür. İlaveten, epoksi reçinelerde kütleme işlemi sırasında büzülme davranışına yönelim düşük olduğundan iç gerilme oluşumu minimize edilir (Biron, 2004).

2.1.3. Fiberler Ve Kompozitlerde Kullanılan Fiber Türleri

Fiberler takviye elemanlarıdır. Kompozit malzemelere ait çekme dayanımı ve rijitlik gibi mekanik performansın tayininde etkindirler (Eskizeybek ve ark, 2017). Fiberler genel olarak bir solüsyon ya da eriyiğin eğrilmesi metodu ile üretilirler. Cam, karbon ve polimerlerden fiberlerin üretimi sağlanabilir. Kırpılmış olarak veya sürekli elyaf şeklinde kullanılabilirler. İçerisinde kırpılmış elyaf bulunan kompozitlerin kısa ya da uzun fiber takviyeli olarak adlandırılması, elyaflara ait boy/çap oranına göre değişiklik göstermektedir. Şayet boy/çap oranındaki değer 100'den büyük olarak hesaplanmış ise uzun fiber takviyeli, küçük olarak hesaplanmışsa ise kısa fiber takviyeli kompozitler olarak adlandırılmaktadır. Sürekli fiberler içeren kompozit malzemelerde fiberler, fitil, demet, tel ya da iplik şekillerinde kullanılmaktadırlar. Demetler 100 ila 48000 tane fiberin birleşmesi ile oluşur ve genellikle eliptik kesite sahiptirler (Eskizeybek, 2012). Oluşan bu demetlerin arzu edilen biçimde örülmesi veya dokunması ile fiber kumaşlar üretilir. Birçok fiberin oluşturduğu demetlere ait kesit alanları veya kalınlık ölçüleri milimetre boyutlarında olup, çok farklı şekillerde bir araya getirilerek kumaş türlerini oluştururlar.

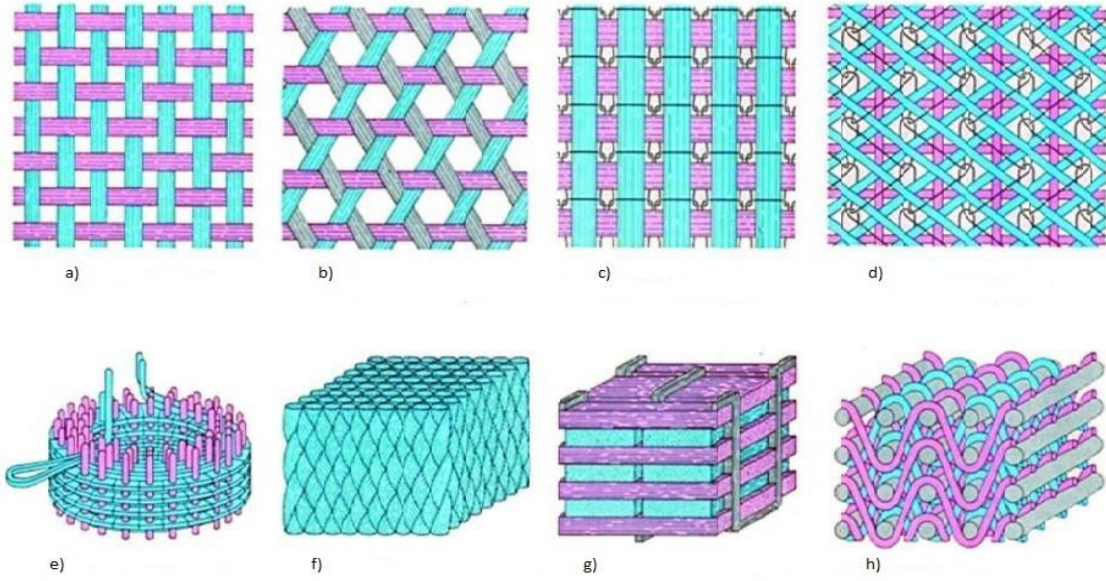
Bu çalışmada örgü karbon fiberlerden Şekil 2.1' de de görülen iki eksenli karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Karbon fiberler, normalde gevrek özellik gösteren polimer,

metal ve seramiklere takviye elemanı olarak katılarak bu malzemelerin dayanım özelliklerini arttırır. Elektriksel ve termal olarak iletken olan karbon fiberlerin takviye elemanı olarak iletken olmayan polimer matrise katılması ile üretilen kompozitin elektriksel ve termal iletkenliği arttırılmış olur. Aynı zamanda karbon fiberlerin termal genleşme katsayısı yaklaşık sıfır olduğu için malzemenin termal genleşme değerini aşağıya çeker. Yüksek termal iletkenlik ve genleşmenin kombinasyonundan dolayı karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitler boyut kararlılığının gerekli olduğu uzay araçlarında kullanımı mümkündür Karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitler, uzay araçları, otomobil, inşaat, biyomedikal ve diğer endüstrilerde geniş çapta kullanılmaktadır. Bu durumdan dolayı bu tür kompozitlerin araştırma ve geliştirilmesinde büyük bir talep görülmektedir. Karbon fiberler, cam fiberlere ve polimer fiberlere oranla yüksek termal dirence, yalıtım özelliklerine, yüksek elastiklik modülüne sahiptir.

Yaklaşık 7.6 μm çapındaki karbon fiberler, ince ve sürekli şekilde kolaylıkla çekilebilen veya sarılabilen organik bir filamentin karbürlenmesi veya ısı etkisi ile eritilerek üretilmektedir (Dokur, 2009). Bir flaman içindeki karbon fiber sayısı 3, 6, 12 ve 24 bin olarak değişmektedir. Ön malzeme olarak bilinen organik filament genellikle naylon (bir selülozik polimer), poliakrilonitril (PAN) veya zifttir (farklı aromatik organik bileşikler). Yüksek sıcaklıklar, karbon hariç diğer elementlerin giderilmesine neden olacak şekilde organik polimerlerin ayrışmasını sağlar. Karbonlama sıcaklığı 1000 °C' den 3000 °C' ye yükseltildiğinde, elastisite modülü artarken çekme dayanımı azalmaktadır.

Karbon fiberlerin özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- düşük yoğunluk
- yüksek çekme modülü ve dayanımı
- düşük termal genleşme katsayısı
- 3000 °C üzerinde oksijen varlığında termal kararlılık
- mükemmel sürünme dayanımı
- güçlü asitlerde daha iyi kimyasal kararlılık
- biyouyumluluk
- yüksek termal iletkenlik
- düşük elektrik öz direnç



Şekil 2.1 Fiber takviyeli kompozitlerde tercih edilen farklı türlerde fiber yapıları a) İki eksenli örgü b) Üç eksenli örgü c) Tek eksenli dokuma d) Çapraz Dokuma e) 3 Boyutlu silindirik yapı f) 3 Boyutlu örgü g) 3 Boyutlu ortogonal kumaş h) Açısal Kilitlenmiş Yapı

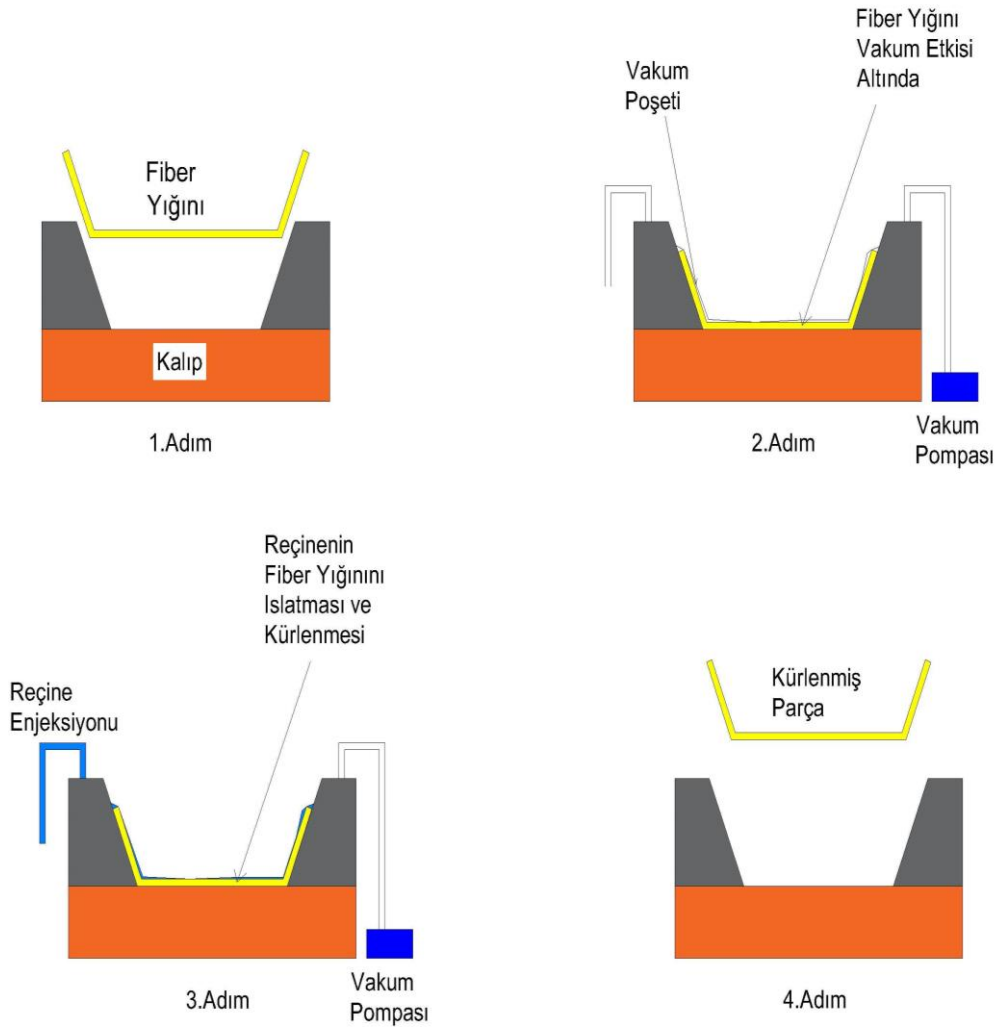
2.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi

Kompozit malzeme üretiminde, üretim sürecinde kullanılan fiberlerin türü, boyunun uzun ya da kısa oluşu, sürekli veya süreksiz olması, yönü gibi değişkenler üretim yöntemini belirler. İlaveten üretim esnasında kullanılacak olan reçinenin termoset veya termoplastik özelliklerde oluşu da üretimi etkileyen bir başka unsurdur. Parçanın hangi boyutlarda ve kaç adet üretileceği ve geometrisi de üretim parametreleri arasındadır. Termosetler uzun zamanlardan bu yana insanlığın hizmetinde olan plastik türleridir. Bu yüzden termoplastik reçine içeren kompozitlerin üretim yöntemleri genellikle termosetlerden türetilmiştir.

Vakum yardımcı reçine transferi yöntemi (VARTM), sıvı kalıplama yöntemi olup (bu yöntem vakum infüzyon yöntemi olarak da adlandırılır), reçinenin fiber yığınlarına emdirme prensibine dayanır. Bu üretim yönteminde reçine, kalıp içerisinde yaratılan vakum desteği ile fiber yığını içine çekilir. Maliyetinin düşüklüğü, zamandan sağladığı tasarruf ile birlikte tek yüzeye sahip kalıpla, oda sıcaklığında üretime imkan tanıyan bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde amaç, fiberler arasında var olan boşluklu yapıların reçine yardımıyla fakat reçine sıvı formda iken kapatılmasıdır (Advani ve Sozer, 2003).

Şekil 2.2' de VARTM yöntemine ait üretim adımları şematize edilmiş haliyle gösterilmiştir. Bu adımlar;

- Üretimin yapılacağı kalıbın hazırlanıp ve fiber yığının kalıba serilme işlemi
- Üretimin yapılacağı kalıbın vakum işlemini gerçekleştirmek için vakum çantası ile kaplanması ve vakum işleminin başlatılması
- Kalıba reçinenin enjekte edilmesi
- Üretimi gerçekleştirilen malzemelerin kurlenme işlemi



Şekil 2.2 VARTM yöntemine ait üretim adımlarının şematik gösterimi

Kompozitler yüksek rijitlik/yoğunluk oranları ve mükemmel fiziksel özelliklerinin yanında farklı yönlerinde fiber takviyesi ile farklı mekanik özelliklere sahip olabilirler. Bu özellikleri sebebiyle havacılık ve uzay sanayi, savunma ve silah sanayi, haberleşme cihazları, deniz taşıt ve ekipmaları, otomotiv, yeni nesil yapı malzemeleri, rüzgâr türbini

ve spor ve sağlık malzemeleri endüstrileri için kompozitlerin ilgi çekici malzemeler statüsüne girmesine neden olmaktadır.

Termoset matriksli kompozitler geniş uygulama sahaları bulmalarına karşın yüksek mukavemetin gerekli olduğu uygulamalarda yüksek kırılgenlıkları nedeni ile sınırlı kullanıma sahiptir. Termoset matriksli kompozitlerden yüksek performans alabilmek için bazı yapısal özellikler iyileştirilmelidir.

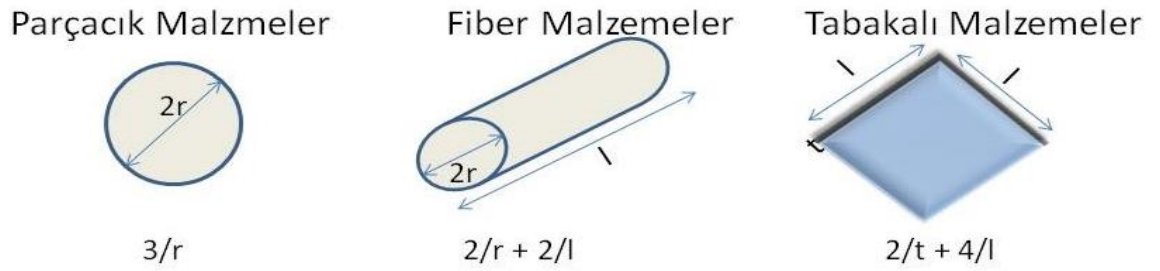
2.4. Nanoboyutlu Takviyeler Ve Dolgu Malzemeleri

Organik ya da inorganik katkıları ile üretimi gerçekleştirilen polimer kompozit malzemelerin sayısı hızlı bir şekilde artmaktadır. Polimer kompozit malzemeler uzay endüstrisinde, otomotiv sanayisinde ve spor malzemeleri sektöründe oldukça fazla kullanılmaktadır. Son 20 yılda polimer nanokompozitlerin üretilip geliştirilmesi hususunda bilim insanları arasında ortak bir çaba oluşmuştur. Özellikle 1980'li yıllarda icat edilen taramalı tünelleme mikroskobunun (STM) ve taramalı prob mikroskobunun bu alanlarda kullanılması ile araştırmacılar atomik boyutlarda yüzey yapısının doğasını tetkik etme şansını yakalamışlardır. Aynı zamanda, bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler sayesinde nano boyutlardaki karakterizasyon, tahmin yapabilen modelleme ve simülasyon programları bilim insanlarının araştırmalarını oldukça rahatlatmıştır. Genel olarak, harika boyutsal ve mekanik performansa sahip nanomalzemeler ile polimerlerin bir araya getirilip karakterizasyon işlemlerinin yapılabilirliğinin özgüveni sonucund bilim insanları nanokompozit malzemeler üzerine yoğunlaşmışlardır. Ayrıca birçok nanokompozit malzeme üretiminde, geleneksel olarak adlandırılan kompozit malzemelerin üretiminde de kullanılan yöntemler kullanılarak üretilebildiğinden dolayı, üretim açısından bu konuya olan ilgi daha da artmaktadır (Kara ve ark., 2018; Kaybal ve ark., 2018; Yildirim ve ark., 2017).

Nanoteknolojinin sahip olduğu potansiyel, Amerika Birleşik Devletleri Federal Destekleme Fonu' nun dikkatini çekmiş ve Ulusal Nanoteknoloji Girişim için yatırım ve teşvikler her geçen yıl hatırı sayılır miktarlarda arttırılmıştır. Doğal olarak, artan büyük maddi fonlamalar nanoteknoloji arge çalışmalarını hızlandırmıştır. Artan çalışmalar sonucunda, daha kolay, hızlı ve verimli üretim yöntemlerinin bulunup denenmesine ve iyileştirilmiş özelliklere sahip yeni malzemelerin ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır.

Takviye elemanlarının mikro boyutlardan nano boyutlara düşürülmesi ile fiziksel özelliklerde büyüleyici değişimler görülür. Sahip oldukları hacme göre nano boyutlu malzemelerin çok daha büyük miktarda yüzey alanına sahip olduğu görülmektedir (Luo ve

Daniel, 2003). Yüzey ve yüzey özellikleri tarafından büyük öneme sahip bir çok fiziksel ve kimyasal etkileşim kontrol edilmektedir. Bu yüzden, nano boyuta sahip parçacık, aynı kombinasyona sahip ancak daha büyük boyuttaki parçacıklardan daha farklı özelliklere sahip olacaktır. Boyutsal farklılıklara parçacıklar ve fiberler tarafından bakıldığında, birim hacimde yüzey alanının malzemenin çapı ile ters bir orantıya sahip olduğu görülür. Buradan yola çıkacak olursak, daha küçük boyutlardaki malzemeler birim hacimde daha büyük yüzey alanlarına sahip olmaktadır (Luo ve Daniel, 2003). Fiberler ve tabakalı malzemelerde, yüzey alanı/hacim oranını belirleyen denklemdeki birinci terimdir. İkinci terimin ise (2/l ve 4/l) etkisi çok az olup, hesaba katılmaz. Bundan dolayı hesaplamalarda, parçacığın boyutunda, tabakanın kalınlığında ve fiberin çapında mikro boyuttan nano boyuta bir eksilme söz konusu olduğunda, yüzey alanı/hacim oranında küp derecesinde ((alan/hacim)³) değişiklik görülecektir (Thostenson ve ark., 2005). Karakteristik nanomalzemelerden olan nanoparçacıklar, nanotüpler, nanofiberler, fullerenler ve grafen günümüzde de titizlikle araştırılıp incelenmektedir. Bahse konu malzemeler genellikle şekillerine (geometri) göre sınıflara ayrılırlar ve en genel halde parçacıklar, fiberler ve tabakalı yapılar olarak gruplandırılırlar (Schmidt ve ark., 2002). Örnek verecek olursak; silika ve karbon siyahı parçacıklar grubuna dahil olurken, nanofiberler ile KNT fiber malzemeler grubunda yer alır.

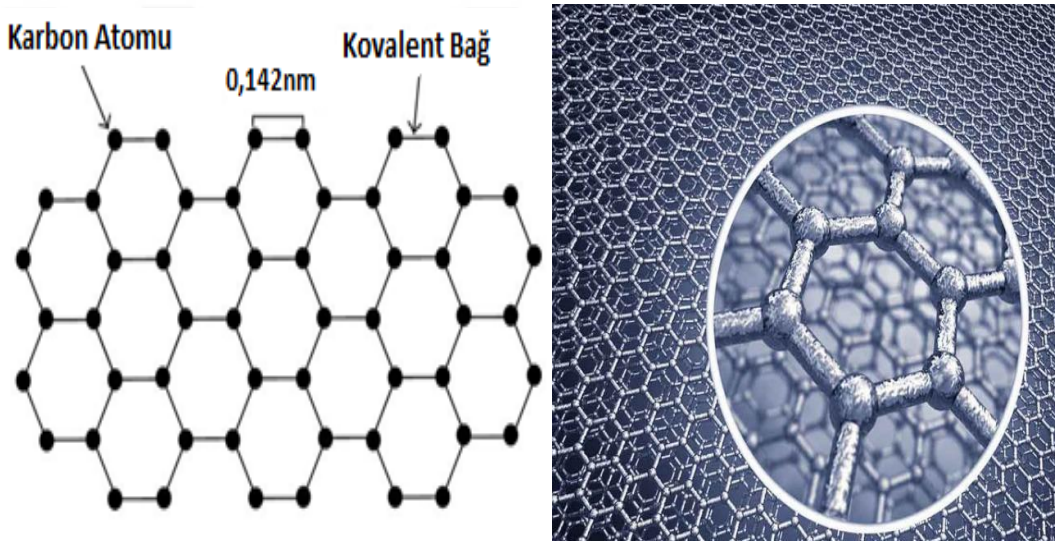


Şekil 2.3 FTKP' lerde takviye türleri – türlere ait geometri ve yüzey alanı/hacim oranları

Polimer matrikslerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla dolgu malzemesi olarak nanoparçacıkların kullanılması günümüzde bilim insanlarının araştırmalarına konu olmaktadır. Nanometre boyutundaki bu parçacıkların yüzey alanları 1000 m²/g yaklaşmaktadır (Gojny ve ark., 2005). Bu büyük yüzey alanlarından dolayı yükün matriksten nanoparçacığa transferi kolaylaşacak ve matriksin mekanik özellikleri artırılmış olunacaktır (Njuguna ve ark., 2007). Karbon nanofiberler, nanokiller ve nanotüpler yük transferini gerçekleştirebilecek en ideal adaylardır.

2.5. Takviye Elemanı Olarak Kullanılan Grafen

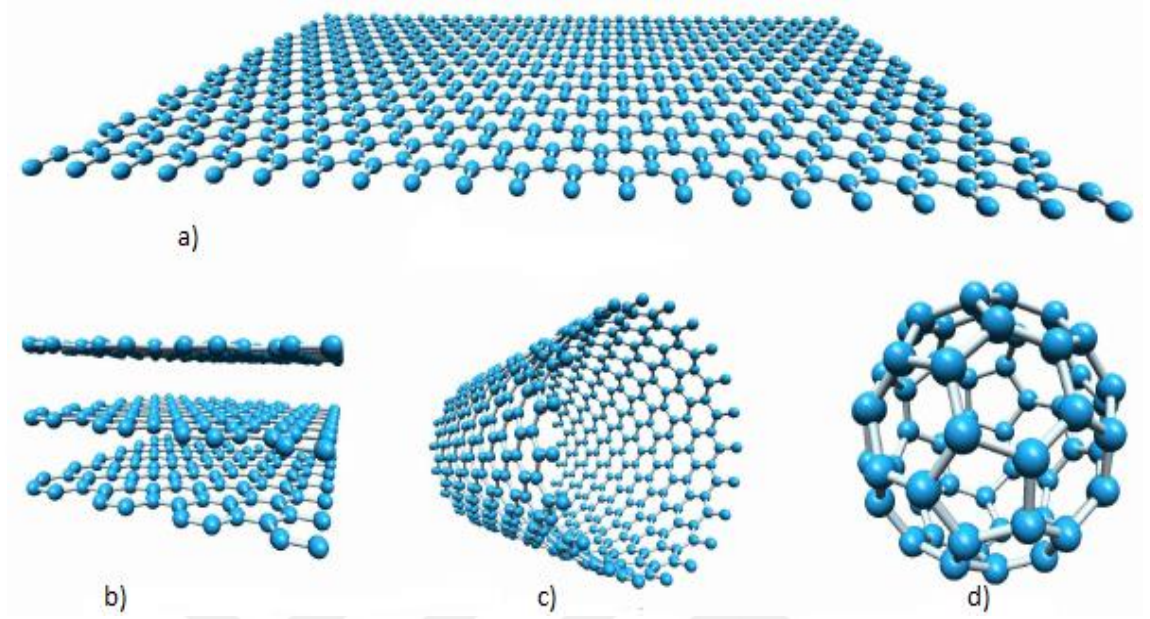
Grafen, karbon atomları arasında sp^2 bağ yapısının oluşturduğu grafit yapısının iki boyutlu (2D) hegzagonal olarak sıralanmış tek tabakalı yapısıdır (Şekil 2.4). Grafenin yaklaşık olarak 1100 GPa elastisite modülüne ve 130 GPa çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Grafen, oda sıcaklıklarında $15.000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ elektrik iletkenliği ve yaklaşık $2675 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 'lik yüzey alanı değerlerine sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda saptanmıştır. Grafen $5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ termal iletkenliği değerlerine sahip olup KNT ile altın, gümüş ve bakır gibi yüksek iletkenlik özelliği gösteren metallerden daha iyi performans sergiler. Grafene ait optik geçirgenlik değeri ise %97,7'dir (Niftaliyeva ve ark., 2018; Polat ve ark., 2018).



Şekil 2.4 Grafenin bağ yapısı ve şematik gösterimi

Grafenin üst üste olacak şekilde dizilmesi ile 3 boyutlu (3D) grafit, bir rulo gibi sarıldığında 1 boyutlu (1D) KNT ve top şeklini alacak gibi sarıldığında ise 0 boyutlu (0D) fullerene oluşmaktadır (Şekil 2.5). Aralarında 0,142 nm uzaklık olan karbon atomları arasındaki π - π etkileşimi ve bal peteğine benzer yapısı sayesinde yüksek özgül yüzey alanı ($2640 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), yüksek elastikiyet, yüksek mekanik – termal performans ile kimyasal stabilite ve yüksek iletkenlik gibi üstün özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır. Bu üstün özellikleri dolayısıyla grafen giyilebilen cihazlar, esnek ekranlı aygıtlar, şeffaf elektrotlar, enerji depolama aygıtları, güneş pilleri, sensörler, otomotiv parçaları, uzay ve havacılık, savunma sanayi ve antenler gibi birçok uygulamalar için etkin bir malzeme olup büyük ilgi görmektedir. Bilim insanlarının odak noktasında nano boyuttaki grafen tabakalarının ilave

edilmesiyle makro boyutlarda yeni nesil malzemelerin ve cihazların geliştirilmesi bulunmaktadır.



Şekil 2.5 Grafen ve grafenin farklı boyutlarından oluşan türevleri a) Tek tabakalı grafen b) Çok tabakalı grafen c) Karbon nanotüp d) Fulleren

Grafenin sahip olduğu bal peteği yapısından kaynaklanan yüksek yüzey alanından dolayı, grafen tabakalarının makro boyutlarda sahip olduğu mekanik ve elektriksel performansları; mikro boyutlardaki performans değerlerine kıyasla daha yüksek olduğu saptanmıştır. Yüksek kalitede, daha büyük proseslerde uygulanabilecek, boyutsal olarak kontrol edilmesi mümkün, makro boyutlarda grafen tabakalarının üretilmesi ve üretilen bu tabakaların sanayide verimli ve işlevsel olarak kullanılabilmesi için bazı sıkıntılar vardır. Bu sıkıntıların ortadan kaldırılabilmesinde kullanılabilecek bazı uygun üretim yöntemlerine aşağıda değinilmiştir (Polat ve ark., 2018).

2.5.1. Grafen Üretim Yöntemleri

Grafen, birçok yöntem ile üretimi gerçekleştirilen nano boyuttaki yapılardır . Mikromekaniksel bakımdan çok katmanlı olan grafit tabakalarının tek katmana ayrılması (eksfolyasyon) kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD) , epitaksiyel büyütme , Grafen oksitin (GO) Hummer's metodu kullanılarak indirgenmesi grafene ait üretim yöntemlerinin en sık kullanılanlarındandır (Niftaliyeva ve ark., 2018).

Grafen tabakalarının paketlenmiş vaziyette Van der Waals bağları ile bağlanması ile bir arada bulunan hali grafiti oluşturur (Bianco ve ark., 2013). Bu yüzden saflık oranı yüksek grafit kullanarak zayıf bağların kırılması sonucunda hammadde olarak kullanılan grafitten grafen üretilmektedir (Choi ve ark., 2010). Grafitin sahip olduğu zayıf bağların kırılması için kimyasal ya da mekanik yöntemler kullanılabilir. Yüksek oryantasyon pirolitik grafit ve yapışkan bant yardımıyla, grafitin bant arasında bloklara ayrılması ve ayrılan bu blokların defalarca aynı işleme tabi tutulması ile birkaç atom inceliğinde grafen üretmeyi başarmışlardır (Novoselov ve ark., 2004). Bu yöntem sayesinde geniş yüzey alanına sahip ve yüksek kalitede bir kaç atom inceliğinde grafen tabakaları üretilmektedir ancak bu yöntem büyük miktarlardaki üretimlere uygun değildir (Zhu ve ark., 2010). Ayrıca yapısal olarak bozuklukluk oranı diğer yöntemler ile kıyaslandığında üstün olduğu görülmüş olmakla birlikte üretimi gerçekleştirilen tabakanın boyutsal özellik kontrolünün sağlanmasında sınıfta kalmaktadır (Eda ve ark., 2011).

Grafen üretimi için birçok üretim tekniği bulunsa da kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD) diğer yöntemlere kıyasla daha maliyet açısından daha hesaplı, verimi yüksek, çok daha kaliteli ve tekrarlanabilirlik imkanı veren bir üretim metodu olarak kimyasal buhar biriktirme metodu (CVD) kabul görmektedir (Eda ve ark., 2011). Grafen oksit (GO) üretiminden ve indirgenmesinden üretilen grafen tabakalarında hatalar olduğu gözlenmiştir. CVD prosesi aşağıdan-yukarıya (bottom-up) üretim yöntemidir ve hatasız grafen tabakalarını üretebilmek için en uygun yöntemdir. Ancak üretim maliyeti kullanılan cihazlar ve ekipmanlar göz önüne alındığında diğer yöntemlere kıyasla maliyetlidir.

Çok katmanlı grafit tabakalarının oksitlenmesiyle birbirinden ayrılarak oluşan tek katmanlı yapı grafen oksittir (Bianco ve ark., 2013). Kimyasal prosesler yardımıyla üretilen GO'nun farklı türden metodların kullanılması sonucu grafene indirgenmesi, grafenin daha büyük proseslerde üretimine en uygun yöntemdir. Grafen üretiminde Hummer' s Yöntemi en yaygın kullanılanıdır (Allen ve ark., 2010). Bu yöntemde ucuz grafit hammaddesi kullanımı ile verimli üretime olanak sağlanması ve üretimi gerçekleştirilen grafitin hidrofilik olmasından dolayı stabil çözeltiler hazırlanabilmesi iki önemli avantajdır (Allen ve ark., 2010).

Bir diğer yöntem olan epitaksiyel büyümede grafen Silisyum Karbür (SiC) üzerine büyütülür. Bu süreçte SiC tabakası büyütme şartlarına göre 1150 ile 2000 °C lik değerler arasında bir sıcaklığa kadar ısıtılır Gerçekleştirilen ısıtma işlemi sonucunda Si desorpsiyonu (yüzeyden ayrılma durumu) oluşur ve geriye kalan karbonlar da epitaksiyel olarak bir araya gelerek grafeni oluştururlar. Karbon kaynağı olarak SiC' ün

kullanılmasından dolayı tabakalar, oluşan ilk tabakanın altında oluşur ve çok tabakalı grafenler üretilir. SiC tabakasının kalınlığı grafen tabaka sayısını belirler. Bu yönetime ait en büyük dezavantaj, silisyumun ilk oluşan grafen tabakaların dolayı desorbe olup çıkış bulamayıp tabakadan uzaklaşamamasıdır. Silisyumun uzaklaşamaması da epitakisyel büyümeyi engeller ve büyütülebilir proseslerin uygulanmasına elverişsiz hale getirir (Kosynkin ve ark., 2009).

2.5.2. Grafen Uygulama Alanları

Bal peteği örgülü tek tabakalı yapısı ve içerdiği π - π etkileşimi grafenin elektriksel, mekanik ve termal olarak yüksek performans göstermesine olanak sağlar (Tan ve Lee, 2013). Grafeni, yüksek esneklik, sertlik, mukavemet, termal iletkenlik, yüksek elektron mobilitesi ve ayarlanabilir bant aralığı (yarıiletkenlik) gibi harkulade özellikleri nedeniyle nanaoyapılar içerisinde araştırmacılar tarafından çok fazla ilgi görmektedir. olup en fazla üzerinde durulan nano yapıları malzemeler içerisinde en çok biri haline gelmiştir (Ghany ve ark., 2017). Grafen mükemmelen nano boyutlu malzeme olup, yarı iletken özelliği ile elektronik aygıtlarda, elektriksel ve yüksek esneklik özellikleri sayesinde esnek ekranlı cihazlar (Yun ve ark., 2006) ile giyilebilen cihazlarda (Tao ve ark., 2017), enerjiyi depolayabilme özellikleri sayesinde süperkapasitörlerde (Hu ve ark., 2014), elektromanyetik koruyucu özelliği ile askeri alanda (Lee ve ark., 2016), solar pillerde (Kumar ve ark., 2016), sensörlerde (Chen ve ark., 2017) ve tekstil endüstrisinde (Neves ve ark., 2017) yaygın şekilde kullanılmaktadır. İlaveten grafen bu uygulamalardan farklı olarak daha birçok malzemenin yerine kullanılabilir ve bu uygulamalar da yeni teknolojilere kapı aralayabilir (Ghany ve ark., 2017).

Grafen gibi nanoparçacıkların sahip olduğu üstün mekanik ve elektriksel özelliklerinin yanında uygun matriks malzemelerin kullanılmasıyla, yeni nesl çok yönlü ve özellikle malzeme üretimi gerçekleştirilebilir ve bu sayede teknolojik olarak hızlı ilerlemeler söz konusu olabilir. Bu sebeplerden dolayı nano boyuttaki katkılar bilim adamlarınca geçen gün daha da fazla araştırma isteği uyandırmaktadır.

2.6. Polimer- Fiber Ara Yüzeyinin Grafen İle Takviye Edilmesi

FTPK malzemeleri oluşturan bileşenlerden fiberler, kompozit malzemedeki yükü taşıyan bileşen, matriks ise fiberlere yükü aktaran ve fiberleri bir arada tutan ana unsurdur. Ancak kuvvet aktarımında fiberler ile matriks arasında kalan ve ara yüzey olarak tanımlanan bölge FTKP malzeme kilit rol oynamaktadır. Ara yüzeyin sahip olduğu

mekanik özellikler, iletilecek gerilmenin büyüklüğünü tamamen belirlediği için; ara yüzey FTPK malzemelerde önemli bir tasarım parametresidir. Ara yüzeyin kimyasal bileşimi ve mikro yapısı ara yüzeyin özelliklerini kontrol eden parametrelerdir. Ara yüzey kalınlığı 1-1000 nm arasında olup kompoziti oluşturan ana bileşenlere, kaplama ve üretim koşullarına bağlıdır. Ara yüzeyin özellikleri ve fiber ile matriks arasındaki yapışma derecesi yük aktarımını belirleyen unsurlardır (Park ve Kim, 2001).

FTPK ara yüzeyin özelliklerini kontrol edebilmek ve daha iyi fiber/matriks etkileşimi sağlayabilmek için fiber yüzeylerine organik çapraz bağlayıcıların ilave edilmesi denenmiştir. Fiber yüzeylerine bağlanan organik çapraz bağlayıcılar aynı zamanda fiberleri üretime hazırlama esnasında oluşabilecek hasarlardan korunmasına da yardımcı olur. Ancak organik çapraz bağlayıcıların asıl görevi fiber ile matriks arasında iyi bir yapışma sağlayarak fiber-matriks veya matriks-fiber yük aktarım kapasitesini arttırmaktır (Eskizeybek, 2012). Ara yüzey özellikleri hem matriksten hem de fiberin özelliklerinden farklıdır. Bu ara yüzey bölgesi çeşitli mekanizmalar sonucu oluşur ve kompozit malzemenin dayanım, enerji yutma, kararlılık, yorulma direnci ve hasar toleransı gibi çok önemli özelliklerini etkileyerek genel performansını belirleyici bir bölgedir. Elyaf takviyeli kompozitlerde sürtünme kayması nedeniyle yutulan enerji, fiber-matriks ara-yüzeyinin ayrılması sırasında yutulan enerjiden önemli ölçüde büyüktür (Foley ve ark., 2002). Mekanik kilitlenmenin arttırılmasına ilişkin literatürde temelde iki çeşit çalışma mevcuttur. Bunlar fiberlerin bitim bölgelerinin şeklinin değiştirilmesi (end-shape changing) ve fiberlerin yüzey morfolojilerinin değiştirilmesidir. (Bagwell ve Wetherhold, 2005) uçları plastik deformasyon ile ezilmiş kısa fiberler kullanarak kompozit malzemenin kırılma tokluğunu %46 arttırdığını ve bu artışın temel nedenin fiberlerin matriks içine çapa gibi saplanarak mekanik kilitlenmenin artması olarak açıklamıştır. Ara yüzeyin boyutunun fibere göre küçük oluşu nedeniyle, fiber yüzey morfolojilerinin değiştirilerek fiber ile polimer matriks arasındaki mekanik kilitlenme etkisinin arttırılması pratik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Chou ve Lin, 2001) (Chou ve ark., 2000). Ancak, fiber takviyeli kompozit malzemelerde ara yüzey dayanımının arttırılması genellikle kırılma tokluğunun azalmasına neden olmaktadır (Feih ve ark., 2005) (Bagwell ve Wetherhold, 2003); (Khanna ve ark., 2003).

Grafen ilaveli FTPK, grafen ile karbon fiber ve matriks ara yüzeyinin mekanik performansının arttığı gözlemlenmiştir (Tan ve Lee, 2013) (Lordi ve Yao, 2000). Grafen takviyeli kompozitlerde grafen, matriks sistemi ile etkileşebilecek noktalar oluşturduğu için ara yüzey dayanımını arttıracaktır. Grafen ile polimer matriks arasındaki bağlantının

zayıf olması durumunda matrik içindeki grafen süreksiz elyaflar gibi davranır. Grafen ile takviye edilen kompozit malzemelerde, kompozite yük uygulandığında yükün etkin bir şekilde ara yüzey kayma dayanımı ile grafene aktarılmasıdır. Ancak grafenin epoksi içinde dağıtılarak uygulanması ile KNT nin epoksi içinde dağıtılıp uygulanması karşılaştırıldığında, KNT ile gerçekleştirilen uygulamanın daha yüksek performans verdiği gözlemlenmiştir (Wang ve ark., 2017). Grafen takviyesi ile üretilen kompozitlerde ise KNT lere oranla daha fazla dayanım elde edilmiştir. Grafenin KNT ye göre mekanik özellikleri ve yüzey alanı büyüklüğü grafen kaplanmış kompozitlerin mekanik performanslarını daha fazla arttırmıştır. Grafenin tabakalar arası ayrılma, burkulma ve elektriksel özelliklere katkısının oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir (Qin ve ark., 2015).

2.7. Bu Çalışmanın Literatürdeki Yeri

Sürekli FTPK uçaklar, botlar ve tekneler, otomobiller, rüzgâr türbinleri ve spor malzemeleri ve ekipmanları vb. birden çok yüksek performans gerektiren durumlarda tercih sebebidir. Tabakalı kompozit malzemeler, fiber katmanlarının doğru reçineler ile birleştirilmesiyle malzemenin bütün olarak yüksek dayanım özelliği göstermesi için planlanırlar. Fakat, en büyük dezavantajları fiber yönündeki yüksek dayanımın aksine fiberlere dik yönde aynı performansı gösterememeleridir. Bunun nedeni fibere dik yönlerde takviyenin olmayışıdır. Bundan dolayı, kompozit malzemeler için matriksin fazla olduğu arayüzeyler zayıf bölgeler olup, fiber yönüne dik yönlerde kuvvet söz konusu olduğunda kolaylıkla tabakalar arası ayrılmalar olabilir. Fiber tabakalarına dik yönlerdeki mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için kullanılan yöntemlerden biri polimer matriksi modifiye etmektir. Genelde fiber tabakalarına dik doğrultulardaki malzeme özellikleri tabakalar arası kırılma tokluğu (TAKT) ile anlatılır (Barbezat ve ark., 2009). TAKT 29 tabakalı kompozitlerde fiber-matriks yapışmasını kapsayacak şekilde matriksin kırılma tokluğu hakkında fikir veren bir tasarım parametresidir.

FRP kompozitlerde matriks olarak kullanılan epoksi reçinelerin kırılma toklukları yüksek (Kawaguchi ve Pearson, 2003) ve düşük elastikiyet modüllerine sahip mikro boyuttaki dolgu malzemeleri kullanılarak artırılabilir. Bu sayede, kırılma tokluğunu arttıran çatlak köprülenmesi, çatlak yön değiştirmesi, çatlak önünde çatlak oluşumu veya polimer akması gibi mekanizmalar reçineye katılan parçacık sayesinde etkin bir şekilde çalışabilir (Kawaguchi ve Pearson, 2003) (Johnsen ve ark., 2007). Epoksi reçine içersine alümina, silika, kauçuk ve cam kürecikleri atarak hibrit kompozitler üretmiş ve bu kompozitlerin TAKT'nu incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre kauçuk takviyeli hibrit

kompozitlerin kırılma tokluğu arttırılmış ancak dayanımları azalmıştır. Fiber takviyeli epoksi kompozitler içerisine kısa Kevlar elyaflar katarak TAKT artışı sağlamıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, çatlak başlangıcı tokluk değerlerinde küçük artışlar gözlemlenirken, çatlak yayılması kırılma tokluğu değerleri artan fiber kötülenmesi etkisiyle önemli derecede artmıştır. Polimer matriks içerisine katılabilecek en uygun katkı malzemelerden olan KNT'ler ve karbon nanofiberler, son yıllarda özellikle araştırmacılar tarafından sıkça makalelere konu edilmektedir (Arai ve ark., 2008) (Fan ve ark., 2008). Ancak, FRP kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanılan KNT'ler her zaman elastisite modülünü ve kırılma tokluğunu arttırmayabilir (Fan ve ark., 2008); (Seyhan ve ark., 2008); (Zhou ve ark., 2008). FRP kompozitlerde birçok işlem ve dolgu malzemesine ait parametreler tek başlarına mekanik özellikler üzerine etki ederler ve henüz bu etkiler tam olarak karakterize edilememiştir.

Lee ve arkadaşları yaptığı çalışmada çeşitli oranlarda indirgenmiş GO ile KF (Karbon fiber) kumaşları kaplamış (Elektroforoz yöntemiyle kaplama) ve GO nun dolgu malzemesi olarak özelliklerini incelemiştir (Tan ve Lee, 2013). KF epoksi sisteminde GO in performansının iyi olduğu görülmüştür. GO in yapısındaki hidrofolik oksijen grupları sayesinde epoksi ile bağlanması, büyük boyutlarda ve adetlerdeki üretimlerde uygulası daha kolay olduğu gözlenmiştir. GO in homojen olarak dağıtılması ve kaplanmasının büyük önem arz ettiği gözlenmiştir. Ayrıca dağıtılması işleminde saf su kullanılabilmesi işlem kolaylığı açısından da önemlidir. Yapılan çalışmalarda GO miktarının optimum değerlerin üzerinde olumlu yönde etki eden özellikleri değişim göstermiştir. Dolgu olarak GO sayesinde arayüzey dayanımı artmıştır. Optimum seviyede katılan indirgenmiş GO ile tabakalar arası kayma dayanımında referans numuneye (GO ile kaplanmamış) göre %14 iyileşme sağlanmıştır. Ağırlıkça en fazla GO ilavesi olan numune incelendiğinde ise referans numuneye göre tabakalar arası kayma dayanımında %23 lük bir düşüş hesaplanmıştır. Yapılmış olan bu çalışmada da görülen grafen miktarı belirli bir değerin üzerine çıktığında bir başka deyişle tabaka kalınlıkları arttığında reçinenin fibere düzgün olarak nüfuz etmesi engellenmiş olur. Bu engelleme sonucunda fiber demetleri arasında boşluk oluşumu gözlenir ve bu boşluklar malzemede hasar oluşumunu ve hasarın ilerlemesini hızlandırır. SEM görüntülerinde de referans numune ve GO ile kaplanmış numunler arasında çatlak oluşma ve ilerleme durumu gösterilmiştir.

Qin ve arkadaşları Optimum oranlarda oluşturulan grafen süspansiyonu ile KF kumaşlar kaplanmıştır (Qin ve ark., 2015). Kaplanan kumaşlardan kompozitler üretilerek mekanik ve elektriksel davranışları incelenmiş. Yapılan testlerde %50 lere varan oranlarda

eğilme dayanımı ve tabaklar arası kayma değerlerinde artış gözlenmiştir. Grafen kaplanmasıyla düşük çatlak direncine sahip KF lerin de dirençleri artmıştır. Arayüzey yapışması arttırılmış olup; yapılan eğilme testlerindeki değerler dayanımın artığı göstermiştir. Kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve KF lerde matriks kalıntıları gözlenmiştir. Gözlenen bu matriks kalıntıları yapışmanın yüksek olduğunu kanıtı niteliğindedir.

Grafen üstün özelliklere sahip olması sebebiyle, kompozit malzemelerin geliştirilmesinde yüksek potansiyele ve araştırma geliştirme çalışmalarına sahiptir. Grafen ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin önemi ve değeri kısa zamanda anlaşılıp, bir çok bilim insanı bu konulara yönelmiştir. Grafenin yukarıda bahsi geçen mekanik özelliklere etkisi ve mekanik performansı, kompozit malzeme üretiminde ve uygulamalarında yarar sağlayacaktır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması değişik oranlarda grafen ilavesiyle oluşturulan karışımın KF kumaşlara homojen olarak kaplanması işlemi sonucunda elde edilen grafen kaplı kumaşlar ile kompozit üretimini ele almıştır. Böylece grafenin üstün özellikleriyle birlikte daha yüksek performansa sahip kompozit malzeme eldesi amaçlanmıştır. Grafen kaplanması tabakalar arası dayanımı arttırıp, kompozit malzemelerde kullanımı başta mekanik performans olmak üzere kırılma tokluğunun iyileştirilmesini önemli bir şekilde etkileyebilecektir. İlavaten, ileri kompozit malzemelerin üretiminde sanayi beklentilerine cevap vermek adına grafenin, katkı maddesi olarak kullanımıyla yeni bir malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışma literatüre katkı sağlamasının yanı sıra ülkemizin uluslararası piyasalarda yerli ve milli savunma sanayisinde, havacılık ve uzay sektöründe daha iyi yerlere gelebilmesi için nanoteknoloji ve nanokompozit gibi uygulama alanlarının aktif olarak kullanımına ihtiyaç duyulması bakımından önemli bir yere sahip olduğu da görülmektedir.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada ileri kompozitlerin üretilmesi için kullanılan yöntemler karbon fiber kumaşların üzerine belirli oranlarda karıştırılmış grafen - dmf çözeltisinin emdirilmesi grafen emdirilen KF' lerin vakum infüzyon yöntemi kullanılarak tabakalı ileri kompozitlerin üretilmesi şeklindedir.

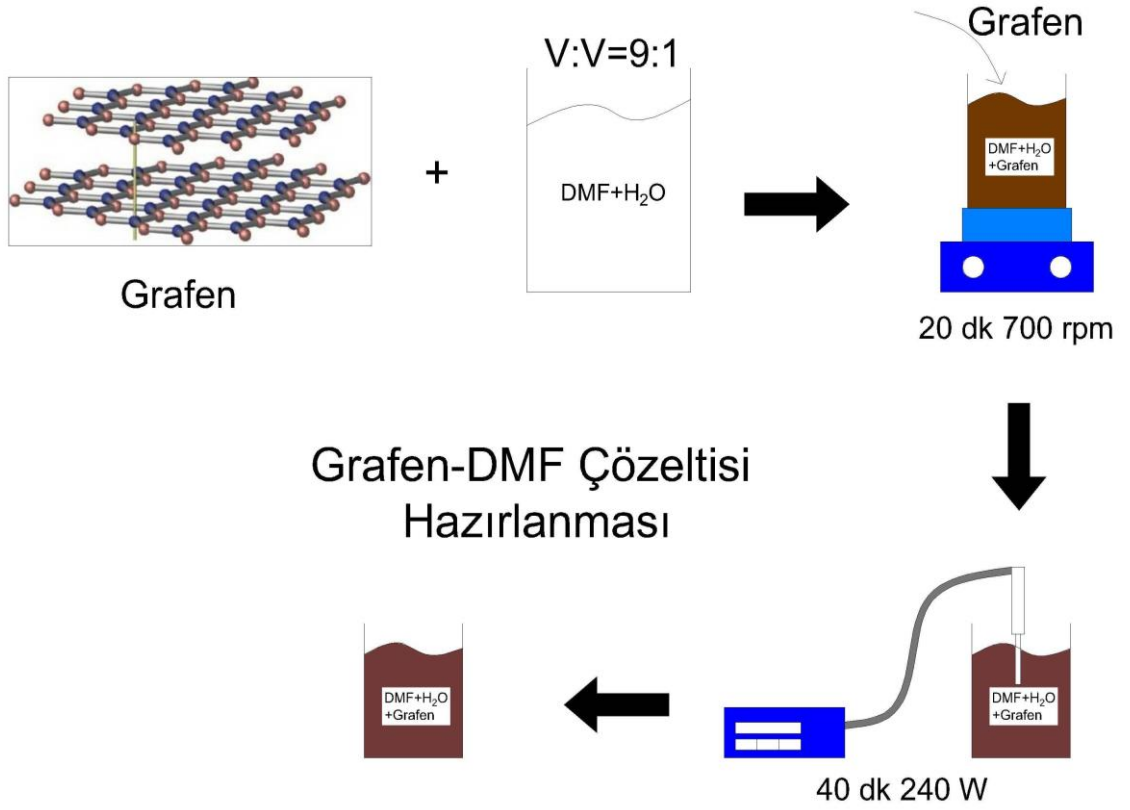
Daha sonra üretimi gerçekleştirilen grafen film ile kaplanmış karbon fiber epoksi ileri kompozitlerin deneysel aşamalardan sonra yapısal morfolojik özelliklerini incelemek için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri grafen filmin kalınlığı, dağılımı ve yüzey morfolojisinin değişimleri hakkında detaylı olarak tartışılmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada 5-10 nm ortalama kalınlığa, 120 m²/g spesifik yüzey alanına, 5-10 µm ortalama çapa ve < 99 % saflığa sahip toz formdaki grafen (Nanografi) kullanılmıştır. Dimetilformaldehit (DMF) Merck firmasından 99 % saflıktadır. Epoksi reçine ticari olarak bulunabilen ve Momentive firması tarafından sağlanmış olan MGS-L160 laminasyon reçinesidir. Bu reçine düşük viskoziteli ve iki fazlı olup (%80-90 diglisidil eter bisfenol A ve %10-20 alifatik diglisidil eter karışımı) kürleştiricisi ise yine Momentive firmasından temin edilen MGS-H260 (%70-90 sikloalifatik amin ve %10-30 polioksil alkil amin karışımı) dir. Bu reçine VARTM yöntemi ile fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde tercih edilen reçine grubundadır.

3.1.Grafen Tabanlı Karbon Fiber Hibrit Kumaşların Geliştirilmesi

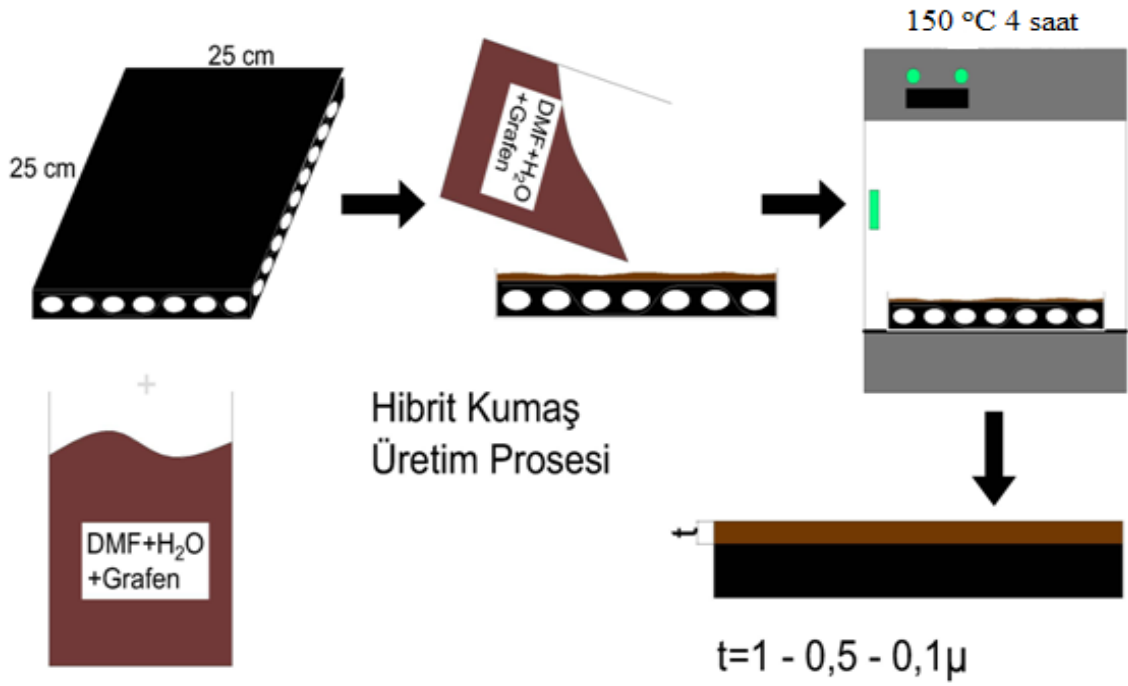
Grafen tabanlı karbon fiber hibrit kumaşların geliştirilmesine yönelik olarak grafen emdirme yöntemi ile kumaş yüzeyinde çeşitli kalınlıklarda film tabakası oluşturulması amaçlanmıştır. Bu süreçte 3 farklı tipte üretim planlanmıştır. Buna göre, karbon fiber kumaş yüzeylerinde 0,1–0,5–1 µm kalınlığında sürekli grafen filminin oluşturulması hedeflenmiştir. Bunun için kumaşların yüzey alanları hesaplanarak grafen film kalınlığı ile çarpılarak elde edilmek istenen hacim bulunmuştur. Bulunan hacim değerleri grafen yoğunluğu ($\approx 1,6 \text{ gr/ cm}^3$) ile çarpılarak gerekli olan grafen miktarı belirlenmiştir. Hesaplanan grafen miktarı DMF – H₂O çözeltisine ilave edilerek karışım elde edilmiştir. Bulunan hacim değerleri grafen yoğunluğu Bu yöntemde, grafen tabakaları farklı konsantrasyonlarda hacimce 9:1 oranında DMF-H₂O 100 ml çözeltisi 20 dk boyunca manyetik karıştırıcı kullanılarak (700 rpm) karıştırıldı. Çözelti 20dk süren karıştırma işlemi sonrasında 40 dk 240 W'lık metal uçlu sonikasyon ile (tip sonication) karıştırma işlemine

maruz bırakıldı. Çözeltinin yüksek sıcaklığını kontrol altında tutmak adına ($\sim 90^\circ\text{C}$ çıkmaması için) 10 dk süreyle manyetik karıştırıcıda (700 rpm) karıştırma işlemine tabi tutuldu. Bu fiziksel karıştırma süreci sonucunda Grafenin DMF – H₂O içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması amaçlanmıştır. Grafen/DMF karışımının hazırlanma süreci Şekil 3.1’ de gösterilmiştir .



Şekil 3.1 Grafen film kaplama işlemi için çözelti hazırlanmasının şematik gösterimi

Grafen konsantrasyonu seçilen karbon fiber kumaş yüzeyinde (25x25 cm) 0,1 – 0,5 - 1 μm kalınlıklarında grafen filmi oluşturacak şekilde hacim değerlerinden belirlenmiştir. Bu hesaplama yapılırken grafen özkütlesi 1.4 gr/cm³ olarak alınmıştır. Çözeltiye eklenen grafen miktarları ise sırasıyla 14 mg, 70, mg ve 140 mg olarak hesaplanmıştır. Karbon fiber kumaşlar grafen / DMF çözeltileri içerisinde daldırılmış ve DMF'in ortamdaki 150 $^\circ\text{C}$ 4 saat süreyle buharlaştırılmasıyla grafen tabakaları karbon fiber kumaşlar üzerine çökertilmiştir. Emdirme yöntemi ile karbon fiber kumaş yüzeyine grafen film kaplanması işlemi Şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Elde edilen hibrit kumaşların yüzeyleri mikroskopik olarak incelenmiş ve kumaş yüzeyindeki grafen film morfolojisi ortaya konulmuştur.



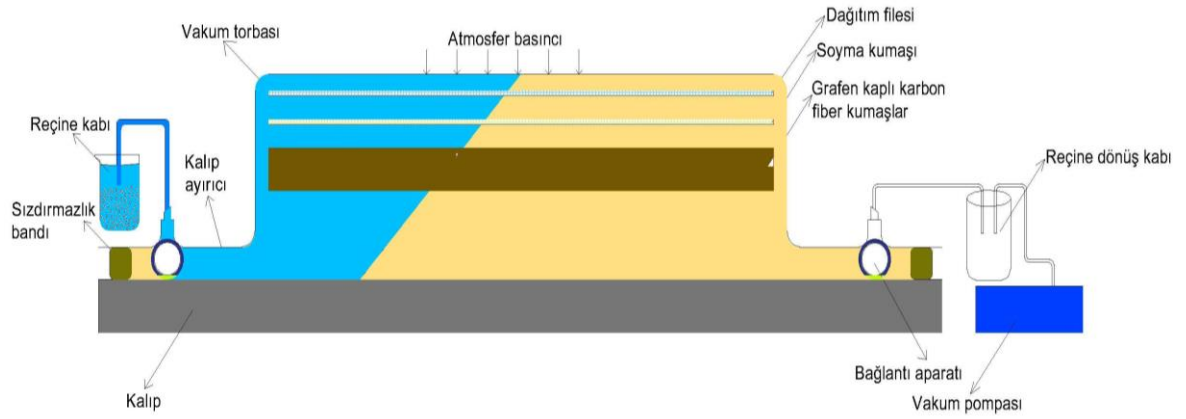
Şekil 3.2 Karbon fiber kumaş yüzeyine emdirme yöntemi ile grafen kaplama işlemi şematik gösterim

Üretilen grafen kaplı hibrit karbon kumaşlar daha sonra karbon/epoksi kompozit üretiminde kullanılmıştır. Karbon epoksi kompozit tabakaların üretimi reçine infüzyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

3.2.Vakum Yardımlı Reçine Transferi Kalıplama Metodu ile Grafen Tabanlı Film Kaplanmış Karbon Fiber İlerikompozit Üretimi

Grafenin epoksi reçine içerisinde dağıtılması başarılı bir şekilde ileri kompozit üretebilmek için oldukça önemli bir adımdır.

Son yıllarda VARTM kompozit üretimlerinde daha çok başvurulan yöntemdir. Bu üretim yöntemi farklı isimlerle literatürde kullanılabilir. Her yöntemin birbirinden farkları olsa da proste amaç, kuru fiberin vakum etkisiyle sıvı reçine tarafından ıslatılmasına dayanmaktadır. VARTM yöntemi büyüklük olarak esnek bir aralıkta kompozitlerin üretimine olanak sağlaması ve uygulama maliyeti olarak ucuz olması sebebiyle tercih edilmektedir. Ayrıca, kompozit tabakalar arasında muhteva eden hava kabarcığı hatalarını en aza indirerek, üretim tekniğinin sebep olduğu hurda oluşumunu azaltır (Khattab ve El-Gizawy, 2005). Bu bölümde VARTM yöntemi kullanılarak ileri kompozit üretimi anlatılacaktır. İleri kompozit üretiminde kullanılan vakum infüzyon ünitesine ait şematik gösterim Şekil 3.3' te anlatılmıştır.



Şekil 3.3 Vakum yardımcı reçine transferi kalıplama metodu ile grafen tabanlı film kaplanmış karbon fiber ileri kompozit üretiminin şematik gösterimi

Vakum infüzyon ünitesi sıcaklığı ve vakum basıncı kontrol edilebilen paslanmaz çelik sac altlık ve vakum pompasından oluşmaktadır. Paslanmaz çelik sac üzerinde kalıplama işleminin yapılacağı bölge öncelikle kalıp temizleyicisi kullanılarak temizlendi. Temizlenen bölgeye kalıp ayırıcı kalıp ayırıcı sürüldü ve katılaşması için 12 - 15 dk beklendi. Bu kalıbın üzerine, on iki adet grafen emdirilmiş olan karbon fiber kumaşlar uygun pozisyonlarda konuldu. Karbon fiber kumaşların üzerine tekrar soyma kumaşı ve dağıtıcı file serildi. Reçine enjeksiyonunun yapılacağı giriş ve vakum yapılacağı çıkış spiralleri kumaşların etrafına; kumaşların uzunluğunda kesilerek yerleştirildi. Son olarak vakum çantası oluşturularak karbon fiber kumaşlar epoksi katılmasına hazır hale getirildi.

Epoksi karışımı karbon fiber yığını içine gönderilmeden önce kürleştiricisi üretici firma tarafından belirlenen miktarda katılarak ve 5 dk boyunca el ile karıştırıldı. Reçine enjekte edilmeden önce vakum torbasına 0.8 bar vakum uygulanarak içerisindeki hava emildi. Ayrıca, epoksi karışımının viskozitesini azaltmak için paslanmaz çelik sac ön ısıtma ile 50 °C' ye ısıtıldı. Karbon fiber yığını, içindeki havanın tamamen emilmesi için 26-30 dk vakum işlemine maruz bırakıldı. Üretilen ileri nanokompozit levha 85 °C' de 9 saat kürlendi (Eskizebek ve ark., 2014;2017).

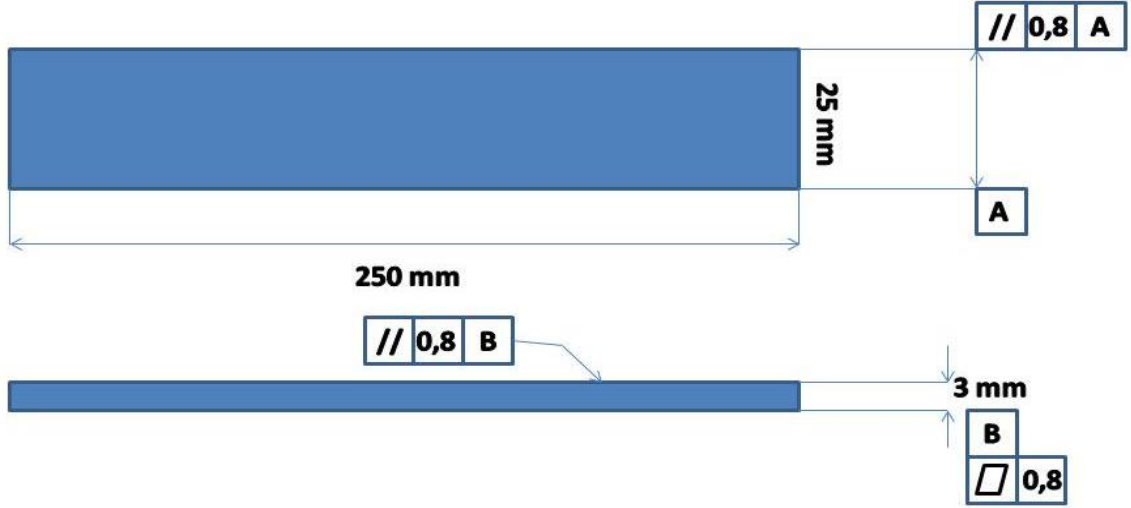
VARTM yöntemi ile 4 farklı ileri kompozit numunesi üretilmiştir. İlk tür numuneler kontrol numuneleri olup karbon fiber kumaşın yüzeylerinde grafen bulunmamaktadır. Bu numuneler GM0 olarak adlandırılmıştır. İkinci tür numunelerde 1 μ kalınlığında film oluşturulmuştur ve bu tür numuneler GM1 olarak adlandırılmıştır. Üçüncü tür numunelerde ise 0.5 μ kalınlığında film oluşturulmuştur ve bu tür numuneler GM05 olarak adlandırılmıştır. Dördüncü tür numunelerde ise 0.1 μ kalınlığında film oluşturulmuştur ve bu tür numuneler GM01 olarak adlandırılmıştır.

3.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

3.3.1. Çekme Deneyleri

Üretilen ileri karbon/epoksi kompozit tabakaların ASTM 3039 standardı şartlarına uygun olarak tek yönlü statik çekme işlemi sonucunda dayanım ve çekme elastisite modülü hesaplanmıştır. Çekme deneyleri Shimadzu AGX 10kNX çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. TH94 Model pnomatik çeneler kullanılarak kompozit numunelere yük uygulanmış, uygulanan basma yükünden kaynaklanabilecek hasarları engellemek için de çene yüzeylerine kauçuk film kaplanmıştır. 10 N yük kapasitesine sahip birinci sınıf hassasiyetli yük hücresi yardımıyla kompozit numunelere uygulanan yük ölçülmüştür. SIE serisi otomatik ekstansiyometre yardımıyla uygulanan yük etkisi sonucunda gerçekleşen, numulerdeki uzama tespit edilmiştir. Çekme deneyleri esnasında kompozit numunelere ait kuvvet-uzama grafikleri anlık olarak bir bilgisayar yardımıyla kayıt altına alınmıştır. ASTM D 3039 standardı ile polimer matriksli kompozit malzemeler için malzeme özellikleri, ar-ge, kalite tayini, yapısal tasarım ve analizleri için çekme özellikleri bilgilerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Polimer matriksli kompozitlerin çekme davranışlarını etkileyen etmen; kompozit malzemenin bileşenleri, üretim yöntemi, tabakaların yönleri, numune hazırlama safhası, numunenin koşullandırılması, deneyin yapıldığı ortam şartları, numunenin uygun bağlanması ve konumu, deney hızı, sıcaklık, numunenin içerdiği boşluk miktarı, takviyenin hacimsel oranıdır.

Bu çalışmada, ASTM D 3039/D 3039M-00 standardı baz alınarak hazırlanan numunelerin genişlikleri 25 mm ve boyları ise 250 mm dir. Numunelerin kalınlıkları en az 3 mm olmak üzere değişkenlik göstermektedir. Çekme deneylerinde kullanılan numune boyutları Şekil 3.4' te verilmiştir. İlgili standartta belirtildiği üzere, örgü kumaş ile üretilen kompozitlerde çift taraflı zımpara kâğıdı kullanılarak hem numuneler korunmuş hem de tutucular ile numuneler arasındaki temas alanı artırılarak numunelerin kayma olasılığı azaltılmıştır. Her bir numune için en az beş numuneye çekme deneyi uygulanmıştır. Bu deneylerde standarda uyarak çekme hızı 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.4 Şematik olarak çekme numunelerinin boyutları (ASTM D 3039 standardından alınarak değiştirilerek kullanılmıştır.) ve tek eksenli çekme yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı ileri kompozit numunesi

Numunelere uygulanan yük P ve yer değiştirme δ değerleri an be an kayıt altına alınmış ve numunelere ait çekme dayanımları aşağıdaki Denklem 3.1 ve Denklem 3.2' de yardımıyla ile hesaplanmıştır;

$$\sigma_i = P_i / A \quad (3.1)$$

$$\sigma_{max} = P_{max} / A \quad (3.2)$$

Denklem 3.1' de σ_i numunede i ' inci kuvvet sırasında oluşan gerilmeyi (MPa), P_i uygulanan yükü (N), A ortalama kesit alanını (mm^2), P_{max} numunenin taşıyabildiği maksimum yükü (N) ve σ_{max} ise numunede oluşan maksimum gerilmeyi (MPa) göstermektedir.

Numunenin tabi tutulduğu yük dolayısıyla yer değişimine bağlı numunenin şekil değişimi;

$$\varepsilon_i = \delta_i / L_g \quad (3.3)$$

Denklem 3.3' de ε_i inci yer değiştirme noktasındaki şekil değiştirme miktarını (mm/mm), δ_i yer değişimini (mm), L_g ekstansometre gage uzunluğunu (mm) temsil etmektedir.

Çekme elastisite modülü ;

$$E_f = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \quad (3.4)$$

Çekme elastisite modülü hesabında kullanılan Denklem 3.4' te E_f çekme elastisite modülünü (MPa), $\Delta\sigma$ seçilmiş iki gerilme noktası arasındaki fark (MPa), $\Delta\varepsilon$ seçilmiş iki şekil değiştirme miktarı arasındaki farktır (normalde $\Delta\varepsilon = 0.002$ alınır ve bu değerler arasındaki gerilme noktalarının farkı elastisite modülünün büyüklüğünü belirler).

Bu denklemler yardımıyla hesaplanan ve bulunan veriler sayısallaştırılmış ve bu değerler grafiklere aktarılarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

3.3.2. Eğilme Deneyleri

Bu çalışmada üretilen ileri kompozitlerin eğilme dayanımı özelliklerinin ve eğilme elastisite modülünün belirlenebilmesi için ASTM D 7264 standardına uygun olarak üç noktadan eğilme deneyleri yapılmıştır. Eğilme deneyleri Instron 3369 çekme cihazında gerçekleştirilip, numunelerin sehimleri Instron 2601-064 sehim sensörü ile ölçülmüştür.

Numunenin hangi yüzeyine basma gerilmesi uygulandığına göre tabakalı kompozit malzemelerin eğilme özelliklerinde de değişim söz konusu olur. Tabakalı kompozitlerin simetrik olarak bilinmesine rağmen, değişiklikler tarafsız eksenin yer değiştirmesine sebep olabilir ve tabakalı kompozitin asimetrik davranış göstermesine neden olabilir. Tabakalı kompozitlerde eğilme davranışı, deney hızına, kalınlığa, deney yapılan ortamın şartlarına bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu sebeple her numune için yukarıda belirtilen şartların farklılık göstermesi elde edilecek deney bilgilerinin uyumunu ve doğruluğunu oldukça etkileyecektir.

Bu çalışmada, ASTM D 7264 standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin genişlikleri 13 mm olup kalınlık/mesnetler arası açıklık oranı 1/32 olarak alınmıştır: Şekil 3.5' te eğilme numunelerin boyutları şematik olarak verilmiştir. Ayrıca numunelerin boyu mesnetler arası açıklığın %20 kadar daha uzundur. Her numune türü için en az 5 numune eğilmeye maruz bırakılmıştır.

Her numuneye uygulanan yük P ve sehim δ değerleri anlık olarak kayıt altına alınmış ve numunelere ait eğilme dayanımları aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır;

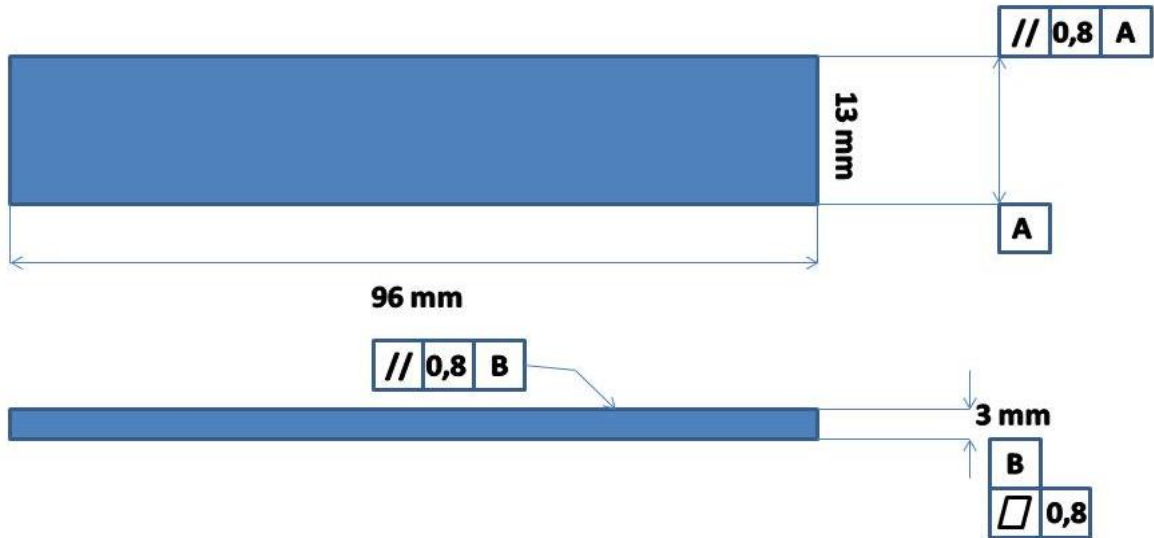
$$\sigma_{\max} = 3P_{\max}L / 2bh^2 \quad (3.5)$$

Denklem 3.5' te σ numunenin orta noktası dış yüzeyde oluşan gerilmeyi (MPa), P uygulanan yükü (N), L mesnetler arası açıklığı (mm), b numunenin genişliğini (mm) ve h ise numune kalınlığını (mm) göstermektedir.

Numunenin orta noktasında dış yüzeyinin şekil değişimi ise aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır;

$$\varepsilon = 6\delta h / L^2 \quad (3.6)$$

Denklem 2.2. de ε dış yüzeyde oluşan en büyük şekil değiştirme miktarını (mm/mm), δ orta noktadaki sehimini (mm), L mesnetler arası açıklığı (mm) ve h ise numune kalınlığını (mm) temsil etmektedir.



Şekil 3.5 Şematik olarak eğilme numunelerinin boyutları (ASTM D 7264 standardından alınarak değiştirilerek kullanılmıştır.) ve üç noktadan eğilme yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı ileri kompozit numunesi

Eğilme elastisite modülü ise;

$$E_f = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \quad (3.7)$$

Eğilme elastisite modulünün hesaplanması için başvuru Denklemin 3.7' de E_f eğilme elastisite modulünü (MPa), $\Delta\sigma$ seçilmiş iki gerilme noktası arasındaki fark (MPa), $\Delta\epsilon$ seçilmiş iki şekil değiştirme miktarı arasındaki farktır (normalde $\Delta\epsilon = 0.002$ alınır ve bu değerler arasında oluşan gerilme noktalarının farkı elastisite modulünün büyüklüğünü belirler.)

Bu denklemler yardımıyla hesaplanan ve bulunan veriler sayısallaştırılmış ve bu değerler grafiklere aktararak birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

3.4. Morfolojik Karakterizasyon

Karbon fiber kumaş yüzeylerindeki grafen filmi ve mekanik deneyler sonrasında ileri kompozitlerin kırılma yüzeylerinin morfolojik olarak incelenmesinde taramalı elektron mikroskopisi analizleri kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskopunda (SEM), hazırlanan numunenin yüzeyine elektron gönderilmesi ile meydana gelen etkileşimlerden faydalanılması esastır. Bu amaç doğrultusunda, yoğunlaştırıcı elektromanyetik mercekle yardımıyla (condenser lense) toplanan, objektif mercekle yardımıyla odaklanan elektron demeti numune yüzeyinde tarama işlemi (scanning) gerçekleştirir.

Elektron demeti, inceleme işlemi yapılan numune yüzeyi ile gerçekleştirdiği fiziksel etkileşimler (elastik, elastik olmayan çarpışmalar ve diğerleri) neticesinde meydana gelen sinyallerin toplanması ve analiz edilmesi prensibi SEM' e ait görüntü oluşumunun temelini oluşturmaktadır.

Grafen tabakalarının, tabaka kalınlıklarının ve tabaka boyutlarının tespit edilmesinde Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) (WITEC ALPHA 3100R) kullanılmıştır. AFM de elde edilen görüntü yüksek çözünürlüklü ve üç boyutludur. Bu kaliteli görüntü atomik boyutlara kadar sivriltilmiş iğne ucu vasıtasıyla elde edilir.

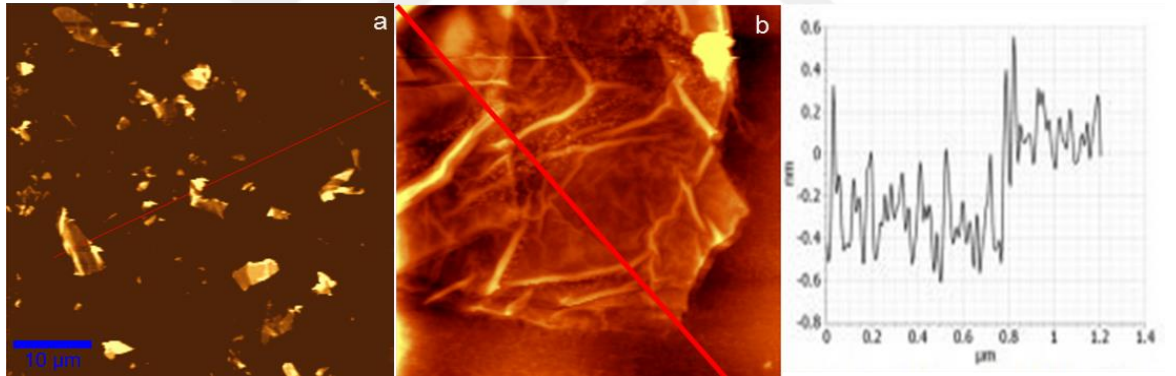
BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Grafen Film Kaplanmış Kompozit Malzemenin Morfolojik Karakterizasyonu

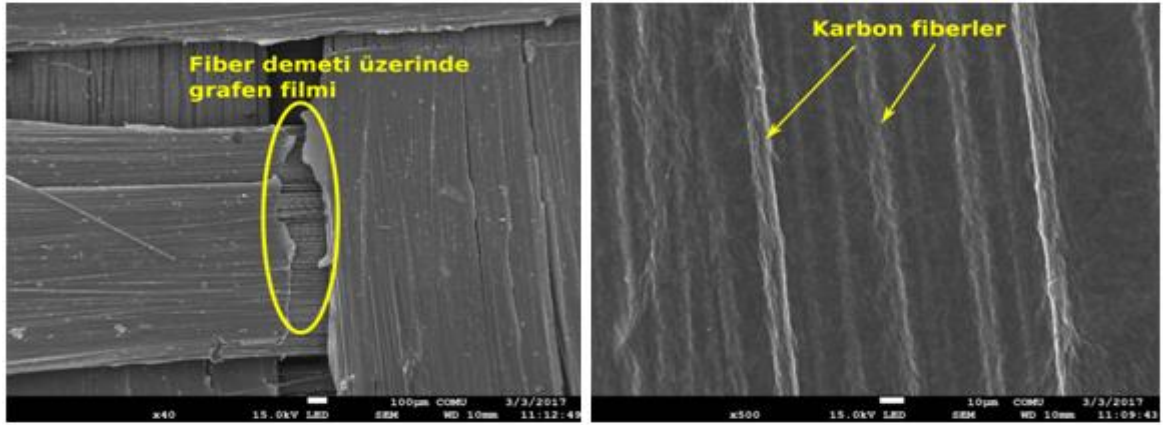
Elde edilen numunelerin morfolojik karakterizasyonları yapılmıştır. Gerçekleştirilen karakterizasyon işlemleri sırasında Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve SEM’ den yararlanılmıştır.

Öncelikli olarak grafen film ile kaplanmış karbon fiber epoksi ileri kompozitlerin üretiminde kullanılan grafenin morfolojik olarak incelenmesi için AFM analizleri incelenmiştir. Görüldüğü üzere Şekil 4.1a AFM analizlerine göre kullanılan grafen numunelerinde 1 ile 50 μm kenar uzunlukları bulunan grafen tabakaları mevcuttur (Eskizeybek, 2018). Grafen tabakasına ait kalınlık yaklaşık 1nm olup, yüzey alanı ise 1 μm^2 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.1b).



Şekil 4.1. Kompozit üretiminde kullanılan grafenin morfolojik olarak incelenmesine ait fotoğraflar a) Grafen tabakasına ait AFM fotoğrafları b) Grafen tabakasına ait AFM’ da ölçülen yükseklik profile

Karbon fiber kumaş yüzeyine emdirilen grafen filminin sürekliliğini incelemek için SEM’ den yararlanılmıştır. İncelenen kumaş yüzeylerinde filmin sürekliliğinin sağlandığı Şekil 4.2’ de görüntülenmiştir. Görüntülerden anlaşıldığı üzere uygulanan emdirme yönteminde başarılı olunmuş ve kuvvet aktarımında mekanik performansı artırması beklenen film tabakasının sürekliliği gerçekleştirilmiştir.

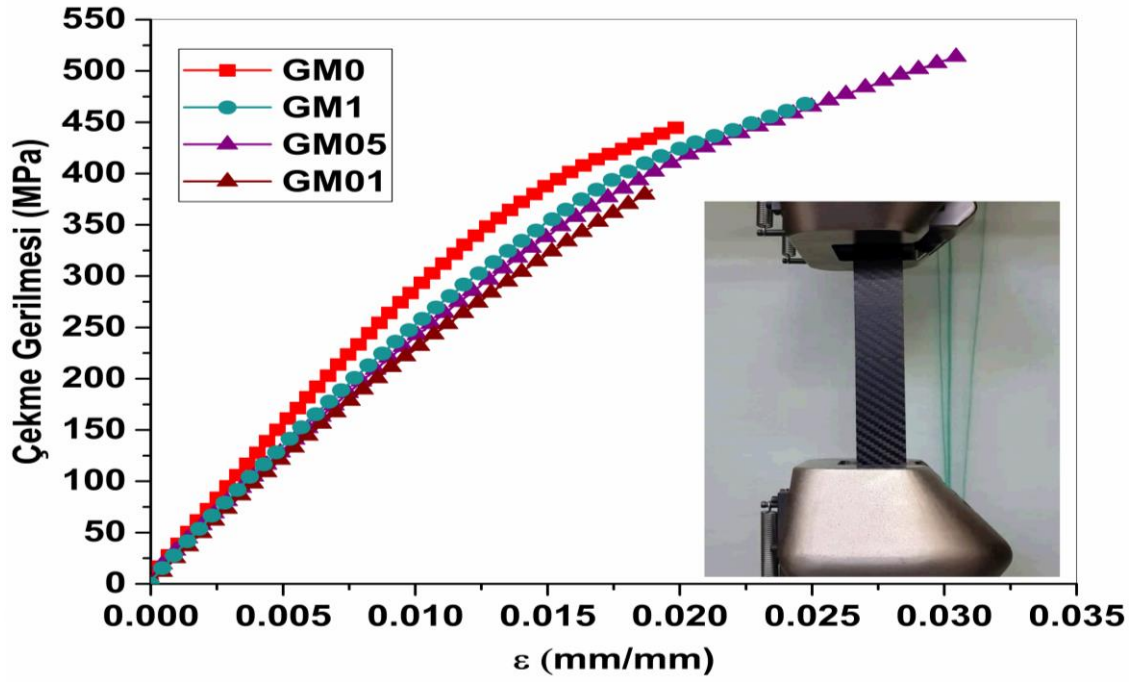


Şekil 4.2 Karbon fiber kumaş yüzeyine emdirme yöntemi ile kaplanan grafen filmine ait taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları

Grafen film kaplanmış kompozit malzemelerin mekanik testlerinin gerçekleşmesinden sonra elde edilen veriler ve grafikler tartışılmıştır. Eğilme testleri sonucunda kırılan numunelerin yüzeyleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kırılma yüzeylerinin incelenmesiyle elde edilen sonuçlar deneyden elde edilen grafiklerle desteklenilmiştir.

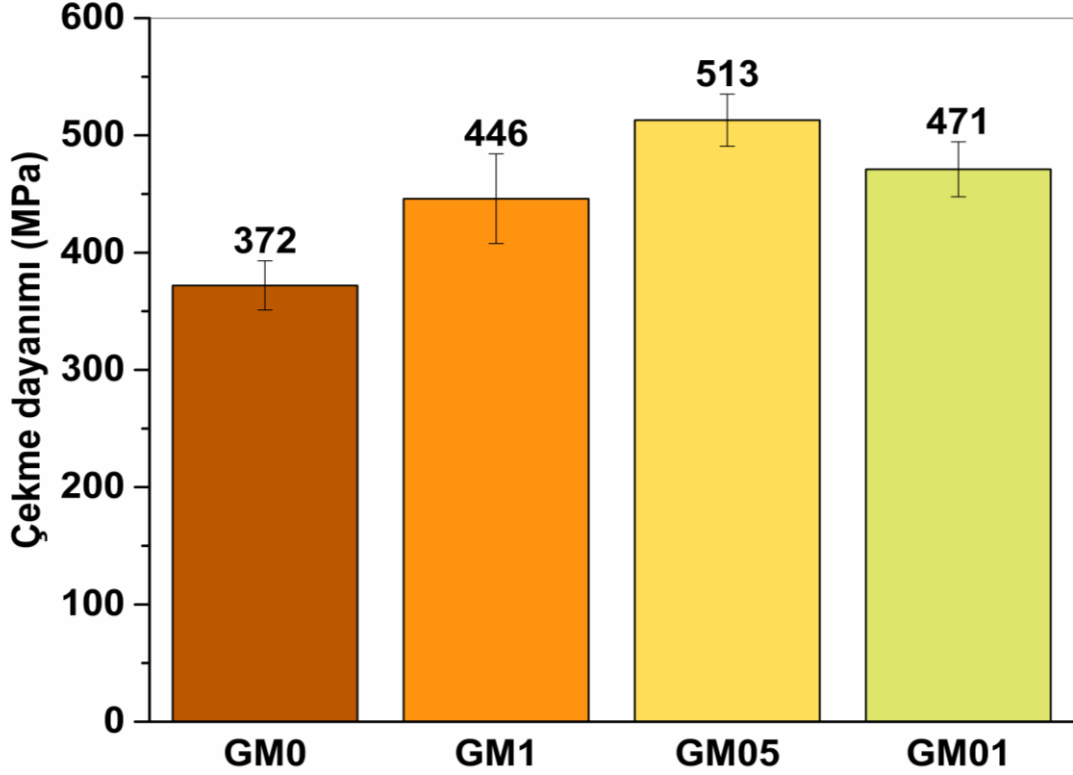
4.2. Grafen Film Kaplanmış Kompozit Malzemenin Mekanik Karakterizasyonu

Çekme deneyleri sonucunda elde edilen tipik gerilme - şekil değiştirme grafiği Şekil 4.3' de verilmiştir. Çekme gerilmesi-şekil değiştirme grafiğinde görüldüğü gibi grafenlerin karbon fiberlerin yüzeylerine kaplanması sonucunda kompozit malzemenin karakteristik çekme davranışı değişmektedir. GM1, GM05 ve GM01 tabakalı ileri kompozitlerin saf karbon/epoksi çekme dayanımında artma görülmektedir. GM1 isimli tabakalı kompozit 140 mg grafen (100 ml DMF içerisinde dağılma) 1 μ m kalınlığında film tabakasıyla kaplanmıştır. GM05 isimli tabakalı kompozit 70 mg grafen (100 ml DMF içerisinde dağılma) 0,5 μ m kalınlığında film tabakasıyla kaplanmıştır. GM01 isimli tabakalı kompozit 14 mg grafen (100 ml DMF içerisinde dağılma) 0,1 μ m kalınlığında film tabakasıyla kaplanmıştır ve şekil değiştirme miktarlarında artışlar belirlenmiştir.



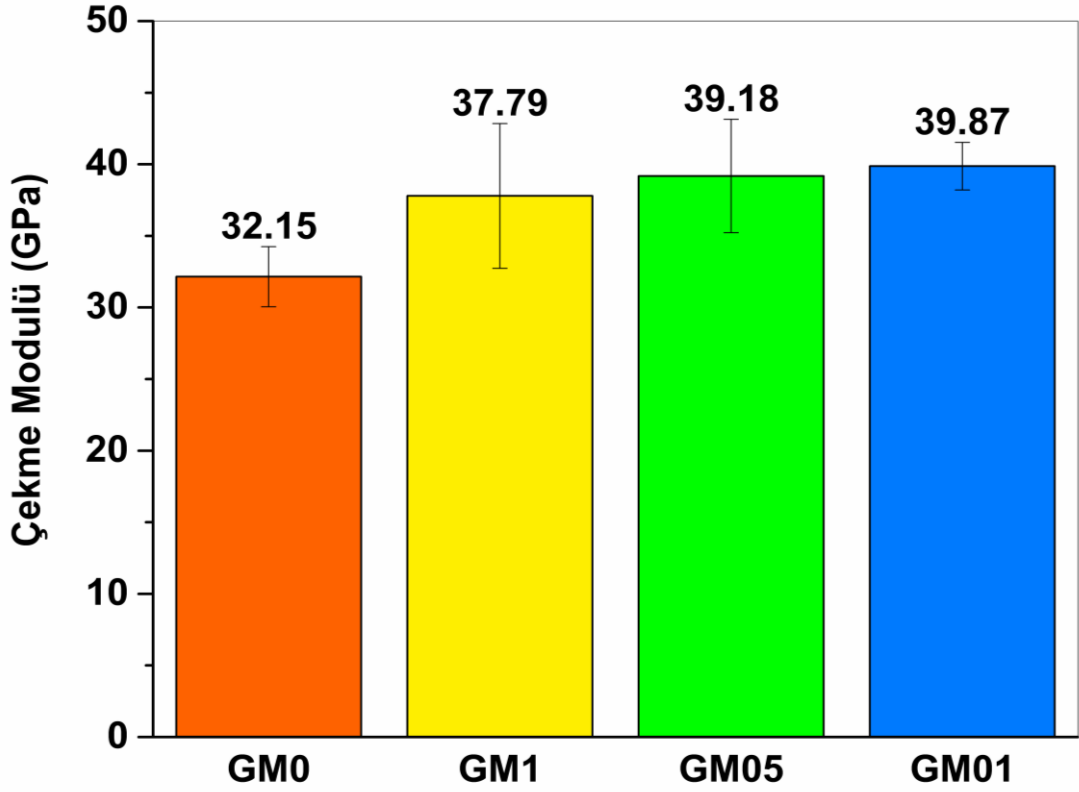
Şekil 4.3 Tabakalı ileri kompozitlerin tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri

Üretilen tabakalı ileri kompozitlerin çekme gerilmesi - şekil değiştirme grafikleri (Şekil 4.3.) çekme dayanımı, elastisite modülü ve şekil değiştirme miktarının değişimlerini göz önüne almak üzere detaylı incelenmiştir. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** Şekil 4.4' de görüldüğü gibi kontrol numunesinin (GM0) kopma dayanımı 372 MPa' dır. GM1' in kopma dayanımında %20 artış meydana gelmiştir. Gm05' te ise %38 gerçekleşen artış GM01' de %26 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre grafen ile farklı kalınlıklarda kaplanan karbonfiber, kopma dayanımına olumlu etki yaparken, bu etkinin grafen miktarı ile doğru orantı olmadığı görülmüştür. Ancak her iki durum içinde kopma dayanımı değerlerindeki değişimler grafen ile kaplanmamış duruma göre iyileşme göstermiştir.



Şekil 4.4 Tabakalı nanokompozitlerin tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen çekme dayanımı değerleri

Tabakalı ileri kompozitlere ait tek eksenli çekme deneyinden elde edilen verilere göre hesaplanan elastikiyet modülleri Şekil 4.5’ te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kontrol numunesi olan GM0’ a ait çekme elastikiyet modülü 32,15 GPa olarak hesaplanmıştır. GM1 tabakalı ileri kompozitlerine ait elastikiyet modülünde GM0’ a göre %17’ lük bir artış belirlenmiştir. GM05’ in elastikiyet modülü GM0’ a göre %22’ lik bir artış hesaplanmışken GM01 için bu değer %24 civarındadır. Bu sonuçlar grafen kaplanmış tabakalı ileri kompozit malzemenin grafen kaplanmamış tabakalı ileri kompozitlere göre çekme elastikiyet modülünde önemli sayılabilecek artışların olduğunu ortaya koymuştur.



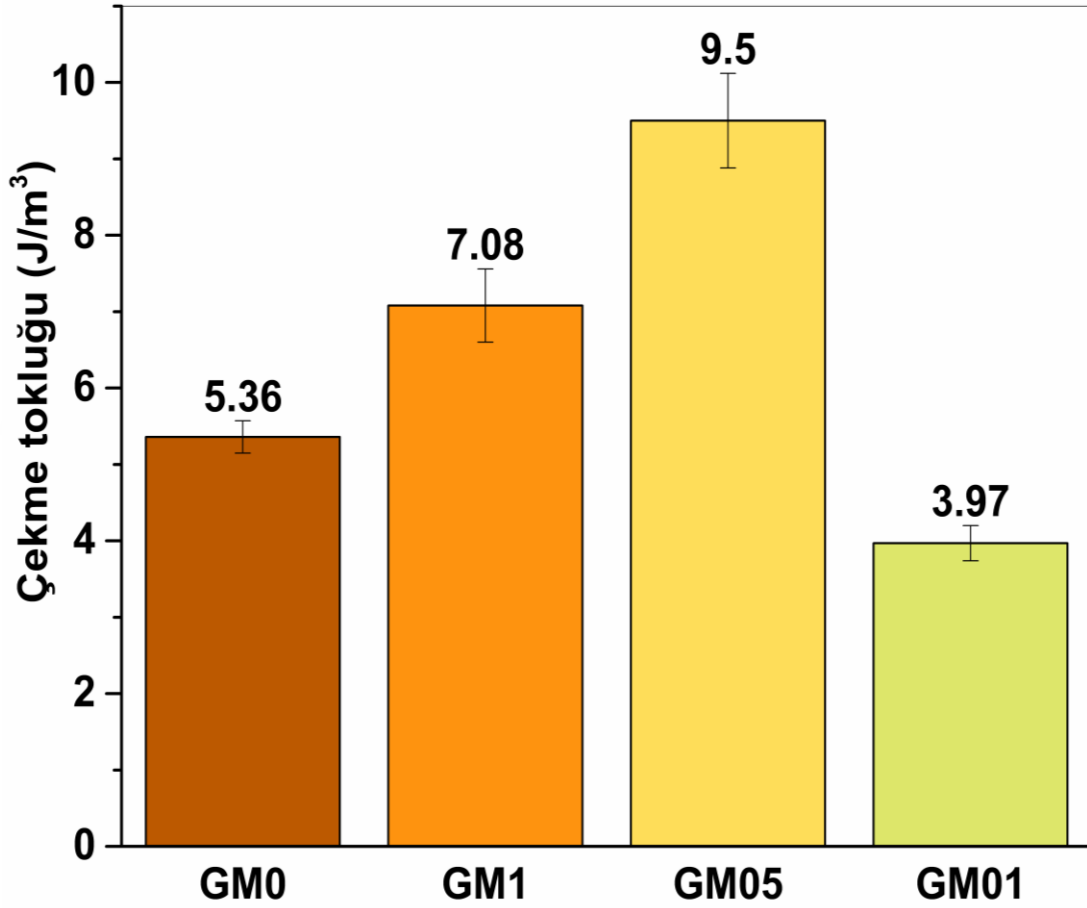
Şekil 4.5 Tabakalı ileri kompozitlerin tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen elastisite modülü değerleri

Tabakalı ileri kompozitlere grafenin şekil değiştirme miktarları üzerine önemli etkiler yaptığı şekilden açıkça görülmektedir. Örneğin, GM0' a ait % şekil değiştirme miktarı yaklaşık olarak 0,010 mm/mm' dir GM1 tabakalı kompozit malzemeye ait şekil değiştirme miktarı ise GM0' a göre artış göstermemiştir. GM01' e ait şekil değiştirme miktarı GM0' göre %30 artış göstermiştir. Şekil değiştirme miktarında en önemli değişiklik ise GM05 tabakalı kompozit malzemede gözlenmiştir. Öyle ki, GM05 ait şekil değiştirme miktarı GM0' a göre %40 artış göstermiştir. Bu sonuçlara göre, grafen tabakalı kompozitlere ilave edildiğinde şekil değiştirme miktarlarını iyileştirmektedir.

Üretilen tabakalı ileri kompozit malzemeler için kopma dayanımları ve şekil değiştirme miktarındaki değişimler, malzemenin kopana kadar yuttuğu toplam enerjiyi yani tabakalı ileri kompozitlerin tokluğunu nasıl etkilediği sorusunu akla getirmektedir.

Üretilen tabakalı ileri kompozitler için grafenin farklı kalınlılarda karbon fiber ile kaplanmasının kompozit malzemenin tokluk değerleri üzerine etkisi Şekil 4.6' te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kontrol numunesi olan GM0 tabakalı kompozit malzemenin tokluğu yaklaşık olarak 5,36 J/m³'tür. GM1 tabakalı ileri kompozitinde tokluk yaklaşık %32 artmıştır. GM01 tabakalı ileri kompozit malzemenin tokluğu GM0 'a göre

yaklaşık %26 artış göstermiştir. GM05 te ise tokluk GM0' a göre yaklaşık %69 artmıştır. Bu önemli artış, tabakalı ileri kompozit malzemenin sünekliliğindeki iyileşmenin sonucudur.

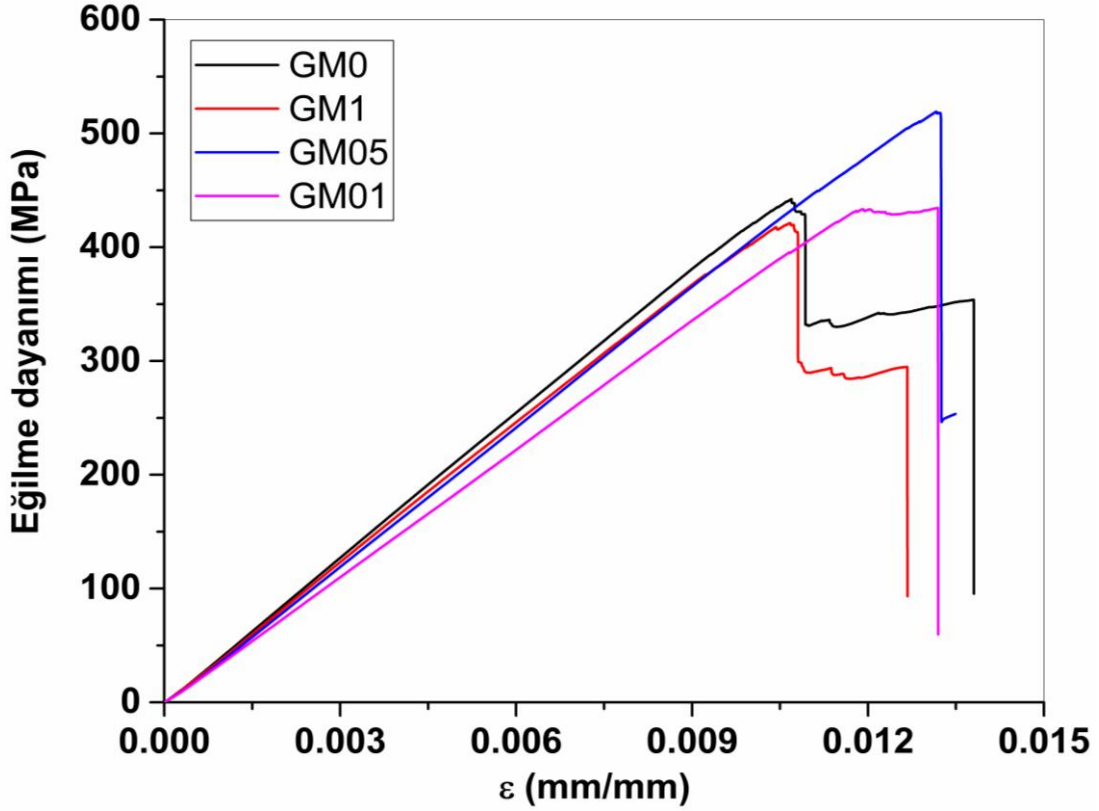


Şekil 4.6 Tabakalı ileri kompozitlerin tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen tokluk değerleri

Yukarıdaki incelemeler açıkça ortaya koymaktadır ki, grafen tabakalı kompozit malzemenin karakteristik çekme davranışını değiştirmiştir. Farklı kalınlıklarda grafen ile kaplama işlemi hem kopma dayanımının hem de şekil değiştirme miktarının artmasını sağlayarak tabakalı kompozit malzemenin rijitliğini artırırken sünekliliğini de iyileştirmiştir. Böylece tabakalı kompozit malzemenin tokluğu artmıştır. Bunun sonucunda tabakalı kompozit malzemenin tokluğu önemli miktarlarda artarak tabakalı kompozit malzemenin kırılincaya kadar ki yuttuğu enerji miktarı arttırılmıştır (Eskizeybek ve ark., 2014;2017; Eskizeybek ve ark., 2018b).

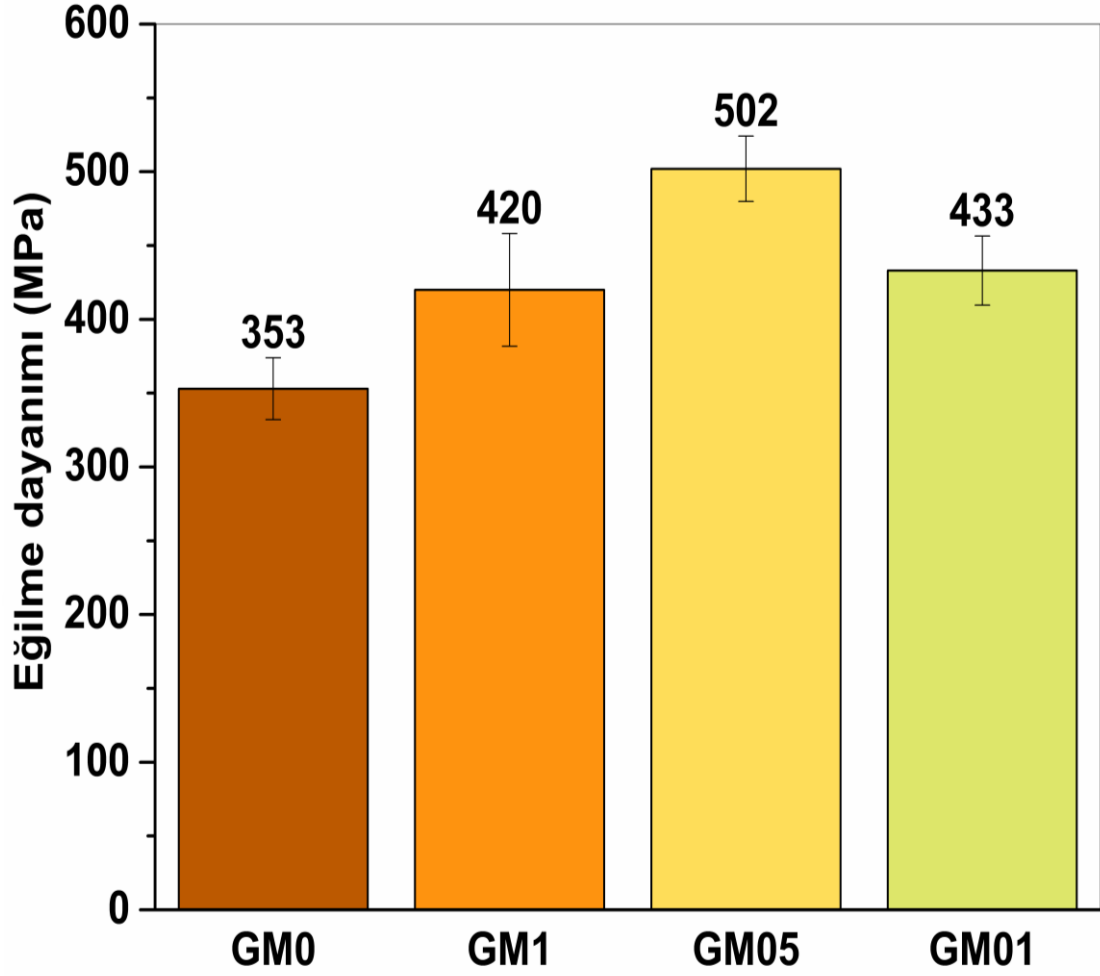
Üretilen ileri kompozitlerin eğilme yükü etkisi altındaki davranışlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilen üç noktadan eğilme deneyleri sonucu elde edilen eğilme

gerilmesi-şekil değiştirme grafiği Şekil 4.7’ te verilmiştir. Grafen karbon fiber yüzeylerine kaplandığı durumlarda eğilme dayanımına etkisindeki farklılık açıkça görülmüştür.



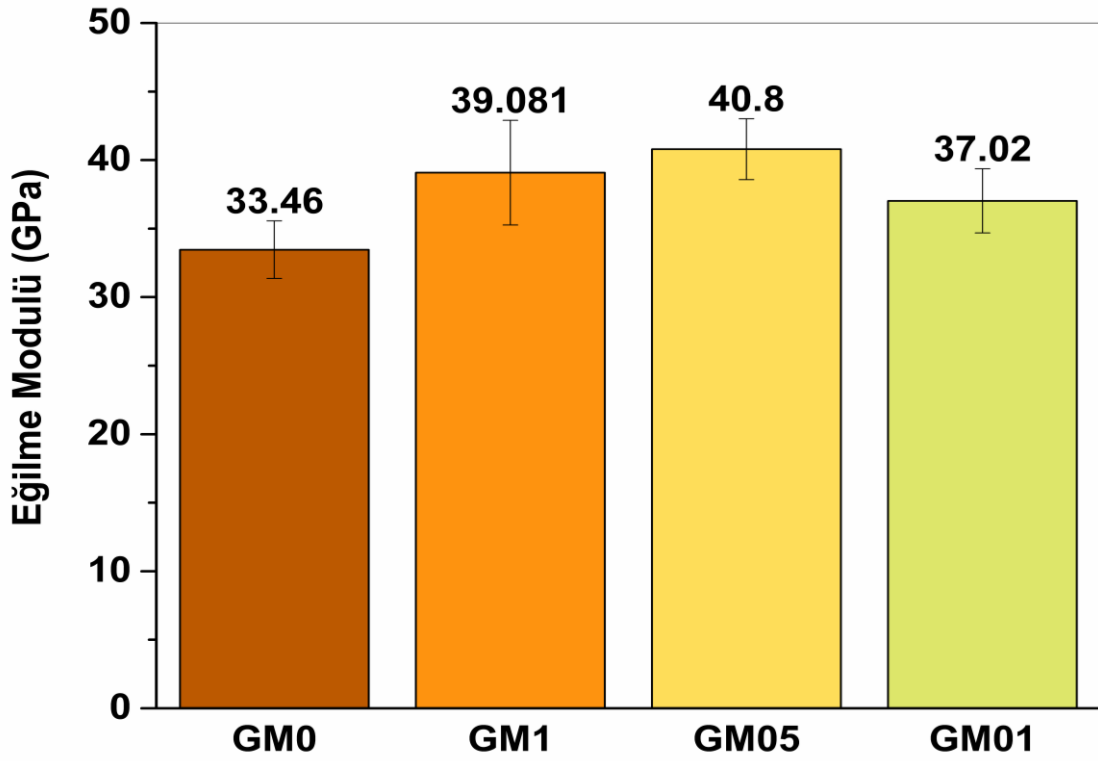
Şekil 4.7 Tabakalı ileri kompozitlerin üç noktadan eğilme deneyi sonucu elde edilen eğilme gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri

Tabakalı kompozit ve ileri kompozit malzemelerin eğilme yükü etkisi altında ulaştıkları eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.8’ de sütun grafiği şeklinde verilmiştir. Tabakalı kompozit malzeme GM0’ ın eğilme yükü etkisi altında ulaşılan eğilme gerilmesi 353 MPa dır. Bu değer GM1 tabakalı ilerikompozitinde ise yaklaşık %19 artış ile 420 MPa ulaşmaktadır. GM01 tabakalı ileri kompoziti ise kontrol malzemesine göre (GM0) %23’ lik artış göstermektedir.. GM05 tabakalı ileri kompozit numunelerde eğilme yükü etkisi altında ulaşılan en büyük eğilme gerilmesi olan 502 MPa ulaşmış ve kontrol numunesi olan GM0’ a göre yaklaşık %42 artış sağlanmıştır.



Şekil 4.8 Üç nokta eğilme deneylerinde tabakalı ileri kompozitlerin ulaştığı en büyük eğilme gerilmesi değerleri

Tabakalı ileri kompozitlere ait tek üç noktadan eğilme deneylerinden elde edilen verilere göre hesaplanan eğilme elastikiyet modülleri Şekil 4.9' de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre GM0' a ait eğilme elastikiyet modülü 34,46 GPa olarak hesaplanmıştır. GM1 tabakalı ileri kompozitlerine ait çekme elastikiyet modülünde GM0' a göre %17' lik bir artış belirlenmiştir. GM05 tabakalı ileri kompozit malzemenin eğilme elastikiyet modülü GM0' a göre %22' lik bir artış sağlanırken GM01 numunelerinin eğilme elastikiyet modüllerinin %11' lik artış sağlanmıştır.



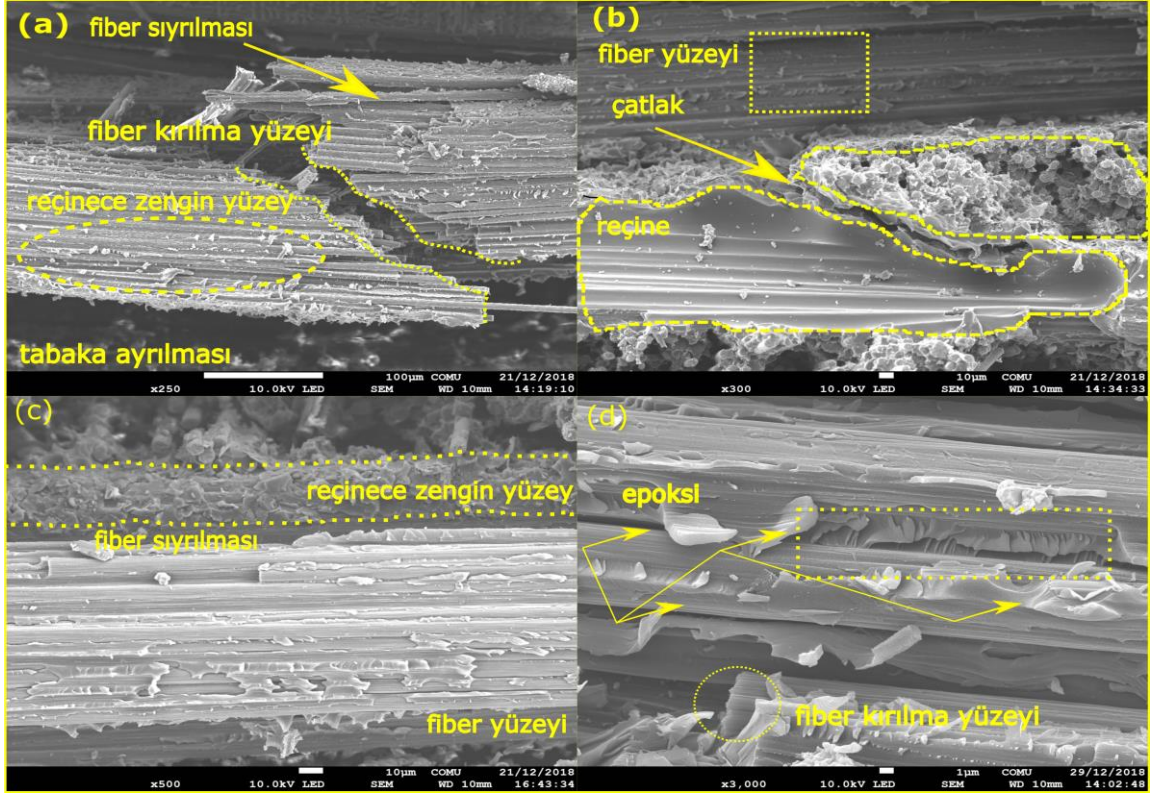
Şekil 4.9 Üç nokta eğilme deneylerinde tabakalı ileri kompozitlerin eğilme elastisite modülü değerleri

4.2.1. Eğilme Deneyleri Sonucu Kırılan Yüzeylerin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Karbon kumaş tabakaları ile tabakalar etrafındaki reçine zengin bölge arasındaki yük aktarımı tabakalı kompozit yapının toplam dayanımı açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, eğilme deneyleri ardından kırılma yüzeylerinin detaylı incelenmesi ile karbon kumaş-epoksi matriks arasındaki etkileşim hakkında önemli bilgilere sahip olunabilir.

Şekil 4.10 üretilen yüzeylerine grafen kaplanmış karbon-epoksi hibrit kompozitlerin eğilme deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM fotoğraflarını göstermektedir. Kontrol numunesi incelendiğinde karbon fiber tabakalarının neredeyse tamamının tabaka ayrılması hasarı sonucunda birbirlerinden ayrıldığı görülmüştür. Eğilme esnasında tabakalar arasında oluşan kayma gerilmeleri ile fiber ve epoksi matriksin mekanik özelliklerinin oldukça farklı olmasına bağlı olarak tabaka ayrılması ana hasar mekanizması olarak görülmektedir. Tabakalar arasında ilerleyen çatlak ayrıca tabaka içlerine de girerek bazı bölgelerde fiber tabakalarını kesmek suretiyle alt ve üst tabakalara doğru yayılmıştır (Şekil 4.10a). Ayrıca, özellikle karbon fiber ve epoksi tabakalarının birleştiği arayüzey incelendiğinde çatlağın ilerlediği fiber yüzeylerinin artık epoksi bakımından zayıf olduğu, temiz yüzeylere sahip

oldukları belirlenmiştir. Buna dayanarak çatlak ilerlemesi esnasında karbon fiber ve epoksice zengin tabaka arasındaki yapışmanın zayıf olması nedeniyle çatlak bu arayüzeyden kararsız bir şekilde ilerleyerek hasara neden olduğu görülmüştür (Eskizeybek ve ark., 2014; Eskizeybek ve ark., 2018b).



Şekil 4.10 Yüzeyine grafen film kaplanmış karbon fiber epoksi ileri kompozitlere ait eğilme testi sonrasına ait SEM görüntüleri a) GM0 b) GM1 c) GM05 d) GM01

Şekil 4.10b’de ise GM1 numunesine ait kırılma yüzeyi verilmiştir. Reçinece zengin bölge ile karbon fiber tabakaları arasındaki arayüzey açıkça görülmektedir. Özellikle reçinece zengin bölge içerisinde ilerleyen çatlak dikine uzanan fiber demeti etrafından geçerek enine uzanan fiber demeti ve reçine ara yüzeyine ulaşmıştır. Ancak, resimde açıkça görülmektedir ki, çatlak bu bölgede oldukça fazla yön değiştirmiş ve ilerleyebilmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duymuştur. Bununla birlikte, enine uzanan fiber yüzeylerindeki artık epoksi kalıntıları fiber-matriks ara yüzeyindeki artan yapışma kabiliyetinin göstergesidir (Avci ve ark., 2004; Demirci ve ark., 2017; Eskizeybek ve ark., 2014; Eskizeybek ve ark., 2011b; Eskizeybek ve ark., 2018a). Fiber yüzeyinde görülen epoksi kohezif kırılmaya örnek teşkil ederken, çatlak ilerleyişi esnasında çatlakın bıraktığı

zig - zag izlerinden çatlağın bu bölgede sürekli yön değiştirerek ilerlediği ve dolayısıyla enerjisini sürekli olarak kaybettiği sonucu çıkarılabilir.

Şekil 4.10c' de GM05 numunesine ait enine uzanmış bir karbon demeti ile dikine uzanan bir karbon demeti arasında net bir şekilde uzanan grafen tabakası ile takviye edilmiş reçinece zengin bölge görülmektedir. Görüldüğü üzere her iki karbon demeti arasında tabaka ayrılması oluşmamıştır. GM1 numunesine göre grafen tabaka kalınlığı yarıya düşürülen GM05 numunesinin arayüzey mekanik performansının etkin kohezif yapışma nedeniyle daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu gözlem eğilme deneyi sonuçları ile uyumludur. Enine uzanan fiber demeti üzerindeki epoksi artıkları da kohezif kırılma etkisini göstermektedir. Bu gözlemler açıkça, fiber yüzeyleri üzerindeki grafen tabakasının tabakalar arası reçinece zengin bölge ile fiber arayüzeyini takviye ederek bu bölgede çatlak oluşumunu geciktirdiğini, çatlak ilerleyişi esnasında çatlak ilerleyişini engellediği veya durduğunu, çatlakğın tabaka içerisinde sürekli yön değiştirerek enerji kaybetmesine neden olduğunu göstermektedir (Eskizeybek ve ark., 2014; Eskizeybek ve ark., 2018a; Eskizeybek ve ark., 2018b; Ulus ve ark., 2014; Ulus ve ark., 2016).

Şekil 4.10d' de GM01 numunesine ait yüksek büyütmeli SEM fotoğrafı verilmiştir. Fiber yüzeyleri üzerindeki epoksi artıkları fiber demeti ile epoksice zengin bölge arasında kohezif yapışmanın olduğunu göstermektedir. Ayrıca, epoksi artıklarından gözlemlenen dalgalanmalar gevrek davranış sergilemesi beklenen epoksi matrisinin çatlak ilerleyişi esnasında şekil değiştirerek çatlak ilerleme hızını düşürdüğünü göstermektedir. Fiber ekseninden kalınlık yönünde uzayan epoksi kalıntıları, fiber yüzeyine kaplanan grafen tabası sayesinde artan fiber-matriks dayanımı ile karbon fiber takabaları arasındaki kuvvet aktarımının iyileştiğini göstermektedir. Bu iyileşme tabakalı hibrit kompozitlerin uygulanan yüke gösterdiği direnci arttırmış ve daha büyük gerilme değerlerinde hasara uğramalarını sağlamıştır.

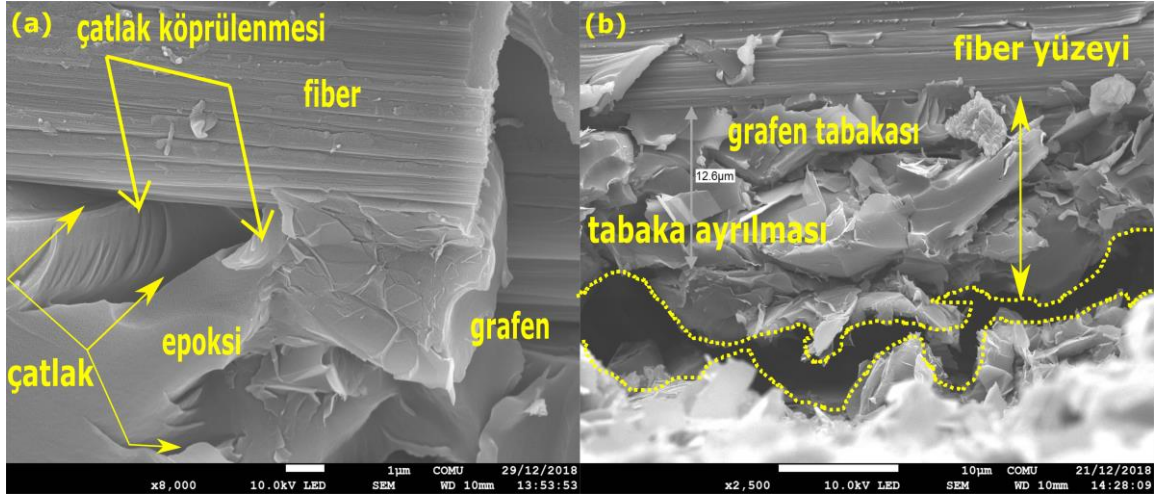
Grafen film ile kaplanmış karbon kumaş tabakalar kullanılarak üretilen hibrit kompozitlerde çekme ve eğilme performanlarındaki iyileşmeleri açıklayabilmek için SEM analizlerinde özellikle grafen film tabasının yer aldığı fiber - reçine ara yüzeyinde odaklanılmıştır. Yapılan incelemelerde GM01 numunesinde eğilme hasarı sonrası kopma yüzeyinin Sem fotoğrafları verilmiştir.

Şekil 4.11a' da fiber-matriks ara yüzeyinde oluşan bir çatlağın fiber yüzeyinde yer alan grafen parçacıkları tarafından durdurulması resimlenmiştir. Açıkça görülmektedir ki, arkasında temiz bir fiber yüzeyi bırakarak kararsız bir şekilde ilerleyen çatlak grafen parçacıklar ile karşılaştığında öncelikle grafen parçacıklar tarafından köprüleme

mekanizması köreltilmiş, sonrasında ise fiber yüzeyinde lokal olarak artan grafen miktarı nedeniyle durmaya zorlanmıştır. Bu mikro-mekanik mekanizmalar, fiber-matriks arayüzeyinde grafen ilavesi ile artan yüzey alanı ve grafen parçacıkların sahip olduğu üstün mekanik özellikler nedeniyle ortaya çıkmıştır. Spesifik olarak iki boyutlu yapıya ve üstün mekanik özelliklere sahip grafen parçacıklarının karbon kumaş yüzeylerinde ince film tabakası şeklinde birleştirilmesi ile fiber-matriks ara yüzeyinde reçine ile fiberin temas alanları büyütülerek kuvvet aktarımı iyileştirilmiştir. İlâveten, fiber-matriks ara yüzeyinde yer alan grafen parçacıkları yüksek dayanımları sayesinde bu bölgelerdeki mikro-çatlak oluşumlarını geciktirmekte ve çatlak ilerlemelerini yavaşlatarak/durdurarak tabakalı kompozit yapının toplam mekanik performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir.

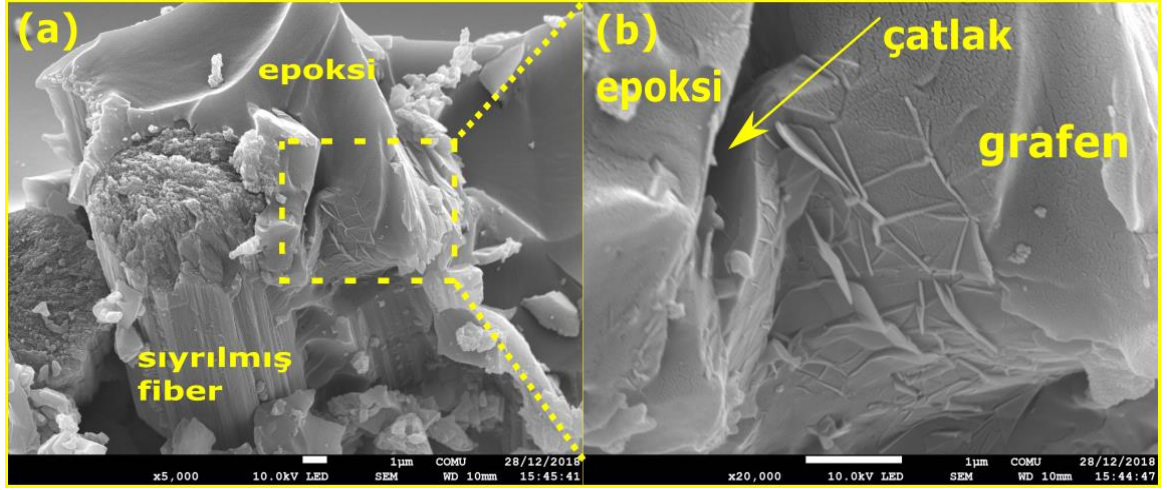
Şekil 4.11b’ de ise GM1 numunesine ait grafen film tabakası içeren fiber-matriks ara yüzeyi ayrılması gösterilmektedir. Görüldüğü üzere tabaka ayrılması şeklinde ortaya çıkan hasarda, çatlağın ilerleyişi esnasında grafen filmi tarafından sürekli yön değiştirmeye zorlandığı kesikli çizgüler ile gösterilmiştir. Bununla birlikte, fiber yüzeylerindeki grafen filmin çatlak ilerleyişine gösterdiği dirence rağmen hasardan sonra da fiber yüzeyinde kalması film tabakası ile fiber yüzeyinin iyi bir yapışma performansı ortaya koyduğunu göstermektedir. Bu çalışma kapsamında üretilen hibrit kompozitlerde karbon kumaş yüzeyindeki grafen filmi kalınlığı üretim esnasında karışım içerisindeki grafen miktarı ile kontrol edilmiştir.

Resimden görülebileceği gibi, GM1 numunesinde grafen film ile takviye edilen reçinece zengin bölgenin kalınlığı $\sim 20 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş, çatlak ilerleyişinin ise grafen takviyesinin olmadığı orta noktaya yakın bölgelerden ilerlediği belirlenmiştir. Bu gözleme dayanarak, çatlak ilerleyişi esnasında çatlağın grafen filmin bulunduğu bölgelerde ilerleyemediği, bunun yerine gevrek bir davranış sergileyen düşük mukavemetli reçinece zengin bölgede kalmaya zorlandığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.11 Grafen tabanlı film kaplanmış karbon fiber ileri kompozitlere ait Sem görüntüleri a) GM01 numunesine ait görüntü b) GM1 numunesine ait görüntü

Şekil 4.12' te GM01 numunesinde karbon fiber-epoksi matriks ara yüzeyinde sıyrılmış bir fiber görülmektedir. Şekil 4.12a' da sıyrılan fiber yüzeyinin epoksi matriks tarafından çevrelendiği ve özellikle fiber etrafında yoğun bir şekilde epoksinin deforme olduğu görülmektedir. Bununla birlikte ara yüzeyde görülen mikro - çatlak ve matrise yapışmış halde gözlenen grafen parçacıkları tabaka ayrılması esnasında grafen parçacıkların bölgesel olarak gerilme alanları yaratarak ara yüzeyin mekanik performansını arttırdığını ve reçinenin çatlak ilerleyişine karşı daha tok bir davranış sergileyerek enerji yuttuğunu işaret etmektedir. Grafen parçacıklarının olduğu bölgenin büyütülmesi ile elde edilen Şekil 4.12b' de çatlak ilerleyişinin ara yüzeye biriktirilen grafen film tabakası tarafından durdurulduğu görülmektedir. Grafen parçacıklarının epoksi reçine tarafından etkin bir şekilde ıslatılarak iyi bir yapışmanın oluştuğunu gösteren fotoğrafta çatlak ilerleyişine karşı grafen tabakaların 2D morfolojisi nedeniyle çatlak düzlemine dik şekilde uzayarak köprüleme etkisi ile çatlak enerjisini düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12 Grafen tabanlı film kaplanmış karbon fiber ileri kompozitlere ait Sem görüntüleri

SEM analizleri sonucunda elde edilen tüm gözlemler açıkça karbon fiber kumaş yüzeyine biriktirilen grafen film tabakalarının seçici olarak fiber-matriks ara yüzeyinde oluşturduğu tokluk artırıcı ilave mikro mekanizmalar ile mikro çatlak oluşum geciktirdiği, çatlak ilerleyişine direnç göstererek tabakalı hibrit kompozit yapının mekanik performansını arttırdığını göstermektedir. SEM analizleri ile elde edilen sonuçlar, çekme ve eğilme deneyleri sonucunda elde edilen mekanik performanslardaki iyileşmelerin mikro boyuttaki kaynaklarıdır.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İleri kompozitler son yıllarda bilim insanları tarafından detaylıca irdelenmektedir. Bu tez çalışmasında, karbon fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan karbon fiber kumaş yüzeylerinde oluşturulan grafen film tabakasının, tabakalı kompozitin mekanik performansı üzerine etkisi araştırılmıştır.

Karbon fiber yüzeylerine grafen film tabakası oluşturarak takviye edilmiştir. Film tabakası oluşturulurken grafen çözeltisinde dağılma sorununu ortadan kaldırmak adına yalnız saf su kullanılmamış hacimce belirlenen oranda DMF katkısı yapılmıştır. Ayrıca her bir numune için ağırlıkça farklı oranlarda grafen katkısıyla farklı ileri kompozitler üretilmiş olup her birinin ayrı ayrı karakterizasyon işlemi yapılmıştır.

İleri kompozitlerin üretiminde VARTM yöntemi kullanılmıştır. Üretim yönteminin ileri kompozite etkisini ortadan kaldırmak adına üretilen her numunede aynı işlem adımları tatbik edilmiştir.

Üretimi yapılan ileri kompozitlerin mekanik karakterizasyonu, çekme ve eğilme deneyleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile ileri kompozitlerin çekme dayanımları, eğilme dayanımları, çekme ve eğilme elastisite modülleri, toklukları belirlenmiş ve bulunan sonuçlar karbon fiber kumaş yüzeyindeki grafen film tabakasının kalınlığı ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, karbon fiber kumaş yüzeyindeki grafen filminin mekanik performansa etkisi incelenmek üzere kırılan yüzeylerden Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri alınmış ve sonuçlar mekanik performans deneyleri ile ilişkilendirilmiştir.

Yapılan çalışmalar grafenin kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde hatırı sayılır bir iyileşme oluşturduğunu ortaya koymuştur. Ancak farklı çalışmalar ile birlikte daha yüksek performanslı, daha fazla kullanım alanına sahip, geleceğin ihtiyaçlarını karşılamada daha cömert kompozitler üretilir. Bu malzemelerin geliştirilmesinde bazı farklı yaklaşımlar gerçekleştirilebilir.

Buna göre; grafen ile karbon fiber arasında kimyasal bir etkileşim söz konusu olduğunda nasıl sonuç elde edileceğine dair çalışmalar yapılabilir. Mekanik performansa etkileri üzerinde gerekli araştırmalar ve ölçümler gerçekleştirilebilir.

Kompozitlerin kırılma özellikleri incelenmemiş olup, bu konu ile ilgili deneyler yapılabilir. Arayüzey etkileri daha detaylı araştırılabilir.

Grafen özellikleri itibarıyla sadece mekanik özellikleri iyileştirmek için kullanılan bir dolgu malzemesi değildir. Bu sebeple farklı miktarlarda grafen ilavesi elektriksel ve diğer

fiziksel özelliklere yapmış olduğu katkıyı gözlemlemek adına incelenebilir. Aynı zamanda elektromanyetik dalga soğurma özelliklerinin incelenmesinde de değışimler gözlenip detaylandırılabilir.

Grafenin mükemmel yapısı dolayısıyla, kompozitlere ilavesi sonucunda termal özelliklere katkısı detaylı çalışmalar ile irdelenebilir. Bu ve yukarıda sayılan aynı zamanda daha birçok araştırmacının da üzerinde çalıştığı özelliklerin daha büyütülebilir ve daha az maliyetli proseslerde uygulanması üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Allen M.J., Tung V.C., Kaner R.B., 2010. Honeycomb Carbon: A Review of Graphene. Chemical Reviews, 110: 132-145.
- Arai M., Noro Y., Sugimoto K.I., Endo M., 2008. Mode I and mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates toughened by carbon nanofiber interlayer. Composites Science and Technology, 68: 516-525.
- Avci A., Arikan H., Akdemir A., 2004. Fracture behavior of glass fiber reinforced polymer composite. Cement and Concrete Research, 34: 429-434.
- Bagwell R.M., Wetherhold R.C., 2003. Improvement in fracture toughness of an epoxy/copper composite through the use of various end shaped fibers. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 361: 294-301.
- Bagwell R.M., Wetherhold R.C., 2005. Fiber pullout behavior and impact toughness of short shaped copper fibers in thermoset matrices. Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, 36: 683-690.
- Barbezat M., Brunner A.J., Necola A., Rees M., Gasser P., Terrasi G., 2009. Fracture Behavior of GFRP Laminates with Nanocomposite Epoxy Resin Matrix. Journal of Composite Materials, 43: 959-976.
- Bianco A., Cheng H.M., Enoki T., Gogotsi Y., Hurt R.H., Koratkar N., Kyotani T., Monthieux M., Park C.R., Tascon J.M.D., Zhang J., 2013. All in the graphene family - A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials. Carbon, 65: 1-6.
- Chen Q.W., Sun T., Song X.F., Ran Q.C., Yu C.S., Yang J., Feng H., Yu L.Y., Wei D.P., 2017. Flexible electrochemical biosensors based on graphene nanowalls for the real-time measurement of lactate. Nanotechnology, 28.
- Choi E.K., Jeon I.Y., Bae S.Y., Lee H.J., Shin H.S., Dai L.M., Baek J.B., 2010. High-yield exfoliation of three-dimensional graphite into two-dimensional graphene-like sheets. Chemical Communications, 46: 6320-6322.

- Chou S., Lin L.S., 2001. Effect of colloidal silica on adhesion of glass fibres to polypropylene. *Polymers & Polymer Composites*, 9: 175-183.
- Chou S., Lin L.S., Yeh J.T., 2000. Effect of surface treatment of glass fibres on adhesion to polypropylene resin. *Polymers & Polymer Composites*, 8: 131-138.
- Demirci M.T., Tarakcioglu N., Avci A., Akdemir A., Demirci I., 2017. Fracture toughness (Mode I) characterization of SiO₂ nanoparticle filled basalt/epoxy filament wound composite ring with split-disk test method. *Composites Part B-Engineering*, 119: 114-124.
- Eda G., Ball J., Mattevi C., Acik M., Artiglia L., Granozzi G., Chabal Y., Anthopoulos T.D., Chhowalla M., 2011. Partially oxidized graphene as a precursor to graphene. *Journal of Materials Chemistry*, 21: 11217-11223.
- Eskizeybek V., 2018. Influence of flake size on the morphology of wet spun graphene oxide fibers. *Selcuk University, Journal of Engineering, Science and Technology*, 6: 28-37.
- Eskizeybek V., Avci A., Chhowalla M., 2011a. Structural and optical properties of CdO nanowires synthesized from Cd(OH)₂ precursors by calcination. *Crystal Research and Technology*, 46: 1093-1100.
- Eskizeybek V., Avci A., Gulce A., 2014. The Mode I interlaminar fracture toughness of chemically carbon nanotube grafted glass fabric/epoxy multi-scale composite structures. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 63: 94-102.
- Eskizeybek V., Avci A., Gulce A., 2017. Preparation and mechanical properties of carbon nanotube grafted glass fabric/epoxy multi-scale composites. *Advanced Composite Materials*, 26: 169-180.
- Eskizeybek V., Demir O., Avci A., Chhowalla M., 2011b. Synthesis and characterization of cadmium hydroxide nanowires by arc discharge method in de-ionized water. *Journal of Nanoparticle Research*, 13: 4673-4680.
- Eskizeybek V., Ulus H., Kaybal H.B., Sahin O.S., Avci A., 2018a. Static and dynamic mechanical responses of CaCO₃ nanoparticle modified epoxy/carbon fiber nanocomposites. *Composites Part B-Engineering*, 140: 223-231.

- Eskizeybek V., Yar A., Avci A., 2018b. CNT-PAN hybrid nanofibrous mat interleaved carbon/epoxy laminates with improved Mode I interlaminar fracture toughness. *Composites Science and Technology*, 157: 30-39.
- Fan Z.H., Santare M.H., Advani S.G., 2008. Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 39: 540-554.
- Feih S., Wei J., Kingshott P., Sorensen B.F., 2005. The influence of fibre sizing on the strength and fracture toughness of glass fibre composites. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 36: 245-255.
- Foley M.E., Abu Obaid A., Huang X., Tanogu M., Bogetti T.A., McKnight S.H., Gillespie J.W., 2002. Fiber/matrix interphase characterization using the dynamic interphase loading apparatus. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 33: 1345-1348.
- Ghany N.A.A., Elsherif S.A., Handal H.T., 2017. Revolution of Graphene for different applications: State-of-the-art. *Surfaces and Interfaces*, 9: 93-106.
- Gojny F.H., Wichmann M.H.G., Fiedler B., Schulte K., 2005. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites - A comparative study. *Composites Science and Technology*, 65: 2300-2313.
- Hu Y., Cheng H.H., Zhao F., Chen N., Jiang L., Feng Z.H., Qu L.T., 2014. All-in-one graphene fiber supercapacitor. *Nanoscale*, 6: 6448-6451.
- Johnsen B.B., Kinloch A.J., Mohammed R.D., Taylor A.C., Sprenger S., 2007. Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers. *Polymer*, 48: 530-541.
- Kara M., Kirici M., Tatar A.C., Avci A., 2018. Impact behavior of carbon fiber/epoxy composite tubes reinforced with multi-walled carbon nanotubes at cryogenic environment. *Composites Part B-Engineering*, 145: 145-154.
- Kawaguchi T., Pearson R.A., 2003. The effect of particle-matrix adhesion on the mechanical behavior of glass filled epoxies. Part 2. A study on fracture toughness. *Polymer*, 44: 4239-4247.

- Kaybal H.B., Ulus H., Demir O., Sahin O.S., Avci A., 2018. Effects of alumina nanoparticles on dynamic impact responses of carbon fiber reinforced epoxy matrix nanocomposites. *Engineering Science and Technology-an International Journal-Jestech*, 21: 399-407.
- Khanna S.K., Winter R.M., Ranganathan P., Yedla S.B., Kalukanimuttam M., Paruchuri K., 2003. Sample preparation techniques for nano-mechanical characterization of glass fiber reinforced polyester matrix composites. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 34: 53-65.
- Khattab A., El-Gizawy A.S., 2005. Development of virtual flow model for process design in Vacuum Assisted Resin Infusion Molding operations. *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference 2005*, Vol 3, Pts A and B: 1093-1097.
- Kosynkin D.V., Higginbotham A.L., Sinitskii A., Lomeda J.R., Dimiev A., Price B.K., Tour J.M., 2009. Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons. *Nature*, 458: 872-U875.
- Kumar U., Sikarwar S., Sonker R.K., Yadav B.C., 2016. Carbon Nanotube: Synthesis and Application in Solar Cell. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 26: 1231-1242.
- Kundu C.K., Sinha P.K., 2006. Nonlinear transient analysis of laminated composite shells. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25: 1129-1147.
- Lee T.W., Lee S.E., Jeong Y.G., 2016. Carbon nanotube/cellulose papers with high performance in electric heating and electromagnetic interference shielding. *Composites Science and Technology*, 131: 77-87.
- Lee W., Lee J.U., Cha H.J., Byun J.H., 2013. Partially reduced graphene oxide as a multi-functional sizing agent for carbon fiber composites by electrophoretic deposition. *Rsc Advances*, 3: 25609-25613.
- Lordi V., Yao N., 2000. Molecular mechanics of binding in carbon-nanotube-polymer composites. *Journal of Materials Research*, 15: 2770-2779.
- Luo J.J., Daniel I.M., 2003. Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer/clay nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63: 1607-1616.

- Neves A.I.S., Rodrigues D.P., De Sanctis A., Alonso E.T., Pereira M.S., Amaral V.S., Melo L.V., Russo S., de Schrijver I., Alves H., Craciun M.F., 2017. Towards conductive textiles: coating polymeric fibres with graphene. *Scientific Reports*, 7.
- Niftaliyeva A., Pehlivan E., Polat S., Avci A., 2018. Chemical synthesis of single-layer graphene by using ball milling compared with NaBH₄ and hydroquinone reductants. *Micro & Nano Letters*, 13: 1412-1416.
- Njuguna J., Pielichowski K., Alcock J.R., 2007. Epoxy-based fibre reinforced nanocomposites. *Advanced Engineering Materials*, 9: 835-847.
- Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A., 2004. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306: 666-669.
- Park S.J., Kim T.J., 2001. Studies on surface energetics of glass fabrics in an unsaturated polyester matrix system: Effect of sizing treatment on glass fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*, 80: 1439-1445.
- Polat S., Avci A., Ekrem M., 2018. Fatigue behavior of composite to aluminum single lap joints reinforced with graphene doped nylon 66 nanofibers. *Composite Structures*, 194: 624-632.
- Qin W.Z., Vautard F., Drzal L.T., Yu J.R., 2015. Mechanical and electrical properties of carbon fiber composites with incorporation of graphene nanoplatelets at the fiber-matrix interphase. *Composites Part B-Engineering*, 69: 335-341.
- Schmidt D., Shah D., Giannelis E.P., 2002. New advances in polymer/layered silicate nanocomposites. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 6: 205-212.
- Seyhan A.T., Tanoglu M., Schulte K., 2008. Mode I and mode II fracture toughness of E-glass non-crimp fabric/carbon nanotube (CNT) modified polymer based composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 75: 5151-5162.
- Tan Y.B., Lee J.M., 2013. Graphene for supercapacitor applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 1: 14814-14843.

- Tao L.Q., Zhang K.N., Tian H., Liu Y., Wang D.Y., Chen Y.Q., Yang Y., Ren T.L., 2017. Graphene-Paper Pressure Sensor for Detecting Human Motions. *Acs Nano*, 11: 8790-8795.
- Thostenson E.T., Li C.Y., Chou T.W., 2005. Nanocomposites in context. *Composites Science and Technology*, 65: 491-516.
- Ulus H., Ustun T., Eskizeybek V., Sahin O.S., Avci A., Ekrem M., 2014. Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties. *Applied Surface Science*, 318: 37-42.
- Ulus H., Ustun T., Sahin O.S., Karabulut S.E., Eskizeybek V., Avci A., 2016. Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates. *Journal of Composite Materials*, 50: 761-770.
- Wang Y.L., Pillai S.K.R., Che J.F., Chan-Park M.B., 2017. High Interlaminar Shear Strength Enhancement of Carbon Fiber/Epoxy Composite through Fiber- and Matrix-Anchored Carbon Nanotube Networks. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 9: 8960-8966.
- Yapici A., Tarakcioglu N., Akdemir A., Avci A., 2001. Elasto-plastic stress analysis of thermoplastic matrix composite laminated plates under in-plane loading. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 14: 146-159.
- Yildirim F., Aydin M., Avci A., 2017. Mechanical properties of nano-SiO₂ reinforced 3D glass fiber/epoxy composites. *International Journal of Materials Research*, 108: 308-321.
- Yun Y.H., Shanov V., Tu Y., Subramaniam S., Schulz M.J., 2006. Growth mechanism of long aligned multiwall carbon nanotube arrays by water-assisted chemical vapor deposition. *Journal of Physical Chemistry B*, 110: 23920-23925.
- Zhou Y.X., Pervin F., Lewis L., Jeelani S., 2008. Fabrication and characterization of carbon/epoxy composites mixed with multi-walled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 475: 157-165.

Zhu Y.W., Murali S., Cai W.W., Li X.S., Suk J.W., Potts J.R., Ruoff R.S., 2010. Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications. *Advanced Materials*, 22: 3906-3924.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gökhan MUTLU

Doğum Yeri : Çanakkale

Doğum Tarihi : 26.09.1990

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Kocaeli Üniveristesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Yüksek Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

BİLİMSEL FAALİYETLER

a) Yayınlar -SCI -Diğer

b) Bildiriler -Uluslararası –Ulusal

Mutlu G., Eskizeybek V., “Spray Coated Graphene Carbon Fabric/Epoxy Composites With Enhanced Interfacial Performance”, “20th INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE STRUCTURES (ICCS20)”, Paris, FRANCE, 4-7 Eylül 2017

c) Katıldığı Projeler

“Yüzeyine Grafen Film Kaplanmış Karbon Fiber Epoksi İleri Kompozitlerin Üretimi”, BAP Araştırma Projesi, 962, 2016

İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurum : Çanakkale İl Özel İdaresi Yol ve Ulaşım Hizmetleri

İLETİŞİM

E-posta Adresi : gokhanmutluu@gmail.com