



**DELİK İÇEREN GRAFEN KATKILI KARBON/EPOKSİ
NANOKOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE HASAR
ANALİZİ**

Hilmi Yavuz AĞA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hilmi Yavuz AĞA

12/01/2023

DELİK İÇEREN GRAFEN KATKILI KARBON/EPOKSİ NANOKOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE HASAR ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hilmi Yavuz AĞA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OCAK 2023

ÖZET

Grafen nanotozlar üstün mekanik, termal ve elektriksel özelliklere sahip oldukları için nano partikül takviyeli kompozit alanında oldukça ilgi çekmektedirler. Kompozit yapılardaki delikler veya süreksizlikler yapıda gerilim konsantrasyonu oluşturduğu için yapının dayanımını oldukça düşürmektedir. Literatürde grafen nanotoz katkısının delikli kompozitlerin dayanımına etkisi araştırılmamıştır. Bu tez çalışmasının kapsamında grafen nanotoz katkısının delikli kompozitlerin dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Takviye elemanı olarak karbon fiber, matris elemanı olarak epoksi ve katkı elemanı olarak grafen nanotoz kullanılmıştır. Karbon/epoksi nanokompozit plakalar katkısız, ağırlıkça %0,15; %0,30; %0,45 ve %0,60 grafen nanotoz katkılı olarak üretilmiştir. Grafen nanotozun epoksi içerisinde homojen dağıtımı için iki saat mekanik karıştırma ve bir saat sonikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Plakaların üretimi işleminde vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen plakalar test standartlarına uygun bir şekilde su jeti yardımıyla kesilmiştir. Yakma testi, üç nokta eğme testi, çekme testi, V-çentikli makaslama testi ve açık delik çekme testleri icra edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde grafen nanotoz katkılı numuneler ile katkısız numunelerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Yakma testine grafen nanotoz oranı arttıkça yapıda bulunan boşluk hacim oranının arttığı gözlemlenmiştir. Üç nokta eğme testinde ise %0,45 grafen nanotoz katkılı numunelerde maksimum dayanım gözlemlenmiştir. Yapılan açık delik çekme testi, çekme testi ve V-çentikli makaslama testinde en yüksek dayanım değeri %0,3 grafen nanotoz katkılı numunelerde gözlemlenmiştir. Tüm grafen katkılı numunelerin katkısız numunelere kıyasla dayanım, elastik modülü ve tokluklarında artış gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91417

Anahtar Kelimeler : Karbon/epoksi nanokompozit, grafen nanotoz, delikli kompozitler

Sayfa Adedi : 118

Danışman : Doç. Dr. Elmas SALAMCI

MECHANICAL PROPERTIES AND FAILURE ANALYSIS OF GRAPHENE
ENHANCED CARBON/EPOXY NANOCOMPOSITE LAMINATES CONTAINING A
HOLE

(M. Sc. Thesis)

Hilmi Yavuz AĞA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

JANUARY 2023

ABSTRACT

Graphene nanoplatelets are of great interest in the field of nanoparticle reinforced composites because they have superior mechanical, thermal and electrical properties. Hole or discontinuities in composite structures significantly reduce the strength of the structure because they create a stress concentration in the structure. In addition, the effect of graphene nanoplatelets additive on the strength of composite containing a hole has not been studied in the literature. Within the scope of this thesis, the effect of graphene nanoplatelets additive on the strength of composite containing a hole was investigated. Carbon fiber was used as the reinforcing element, epoxy as the matrix element and graphene nanoplatelets as the additive element. Carbon/epoxy nanocomposite plates are produced as non-doped and doped by weight 0,15%; 0,30%; 0,45% and 0,60% graphene nanoplatelets. For the homogeneous distribution of graphene nanoplatelets in epoxy, two hours of mechanical mixing and one hour of sonication were performed. The vacuum infusion method was used for the production process of the plates. The composite plates were cut with the water jet in accordance with the test standards. Burning test, three point bending test, tensile test, V-notch shear test and open hole tensile tests were performed. After the tests, the results of graphene nanoplatelets doped samples and non-doped samples were compared. In the burning test, it was observed that as the graphene nanoplatelets ratio increased, the void volume ratio in the structure increased. In the three-point bending test, the maximum strength was observed in samples doped with 0.45% graphene nanoplatelets. In the open hole tensile test, tensile test and V-notch shear test, the highest strength value was observed in 0.3% graphene nanoplatelets doped samples. It was observed that the strength, elastic modulus and toughness of all graphene-doped samples are greater than non-doped samples.

Science Code : 91417

Key Words : Carbon/epoxy nanocomposite, graphene nanoplatelets, composite containing a hole

Page Number : 118

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Elmas SALAMCI

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum tez çalışması süresince ve çalışma öncesinde desteğini hiç eksik etmeyen, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, gelişimime kattığı değerler sayesinde yol alabildiğim değerli danışman hocam Doç. Dr. Elmas SALAMCI'ya çok teşekkürlerimi sunarım. Çalışma ortamı sağlayan başta Toz Metalürjisi Laboratuvarı teknisyeni Yusuf ŞAHİNKAYA olmak üzere, Arş. Gör. Mustafa KAŞ'a ve Arş. Gör. Yusuf KARABULUT'a teşekkür ederim.

Manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen ve hep yanımda olan sevgili Ayşenur ŞAHİN'e ve bu günlere gelmemde çok büyük emekleri olan değerli anneme ve babama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Grafen Katkılı Nanokompozitlerle İlgili Çalışmalar.....	5
2.2. Delik İçeren Kompozitlerle İlgili Çalışmalar	11
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	19
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	19
3.1.1. Matris elamanına göre kompozitlerin sınıflandırılması	20
3.1.2. Takviye elamanına göre kompozitlerin sınıflandırılması.....	21
3.1.3. Ölçeğe göre kompozitlerin sınıflandırılması.....	22
3.1.4. Biyokompozitler	24
3.2. Kompozit İmalat Yöntemleri.....	24
3.2.1. El yatırma yöntemi.....	25
3.2.2. Püskürtme yöntemi	26
3.2.3. Elyaf sarma yöntemi	26
3.2.4. Vakum torbalama yöntemi	27

	Sayfa
3.2.5. Vakum infüzyon yöntemi	28
3.2.6. Reçine transfer kalıplama yöntemi	28
3.2.7. Hazır kalıplama yöntemi	29
3.2.8. Profil çekme yöntemi.....	30
3.2.9. Santrifüj dökme yöntemi	31
3.2.10. Sürekli laminasyon yöntemi.....	31
3.2.11. İleri imalat yöntemi.....	32
3.3. Grafen.....	32
3.3.1. Grafen üretim yöntemleri	34
3.4. Polimer Matrisli Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	36
3.4.1. Çözelti karıştırma.....	36
3.4.2. Eriyik karıştırma	37
3.4.3. In-situ polimerizasyonu	38
4. MATERYAL VE YÖNTEM	39
4.1. Malzeme.....	39
4.2. Grafen Nanotozun Epoksi İçerisinde Karıştırılması	44
4.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi Kullanılarak Levha Üretimi	46
4.4. Üç Nokta Eğme Testi	49
4.5. Çekme Testi	50
4.6. V-Çentikli Makaslama Testi.....	52
4.7. Açık Delik Çekme Testi.....	53
4.8. Yakma Testi.....	56
4.9. İstatistiksel Test	56
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	57

	Sayfa
5.1. Yakma Deneyi	57
5.2. Üç Nokta Eğme Deneyi	60
5.3. V-Çentikli Makaslama Deneyi.....	71
5.4. Çekme Deneyi	77
5.5. Açık Delik Çekme Deneyi.....	87
5.5.1. GNT katkısının çentik hassasiyetine etkisi	98
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	118

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Grafenin genel özellikleri.....	33
Çizelge 4.1. Kullanılan karbon elyafın teknik özellikleri	40
Çizelge 4.2. Kullanılan reçinenin teknik özellikleri	41
Çizelge 4.3. Kullanılan sertleştiricinin teknik özellikleri.....	42
Çizelge 4.4. Kullanılan grafen nanotozun teknik özellikleri.....	42
Çizelge 4.5. Numunelerin kodlama ve katkılanma yüzdeleri	44
Çizelge 5.1. Numunelerin hacim oranları	57
Çizelge 5.2. Üç nokta eğme deneyi sonuçları.....	61
Çizelge 5.3. Grafen katkısının eğme mukavemeti üzerindeki etkisi	62
Çizelge 5.4. Eğme dayanımlarının Student T-testi sonucunda elde edilen p değerleri..	64
Çizelge 5.5. Grafen katkısının eğme elastiklik modülü üzerindeki etkisi.....	64
Çizelge 5.6. Eğme elastiklik modülleri için Student T-test çıktıları	66
Çizelge 5.7. Grafen katkısının tokluk üzerindeki etkisi	67
Çizelge 5.8. Eğme toklukları için Student T-testi p değerleri	68
Çizelge 5.9. Grafen katkısının kesme dayanımına olan etkisi	72
Çizelge 5.10. Kesme dayanımları için Student T-testi p değerleri	74
Çizelge 5.11. Çekme deneyi sonuçları	77
Çizelge 5.12. Numunelerin ortalama elastik modül değişimleri	79
Çizelge 5.13. Elastik modüller için Student T-testi p değerleri	80
Çizelge 5.14. Numunelerin ortalama çekme dayanımı değişimleri	81
Çizelge 5.15. Çekme dayanımları için Student T-testi p değerleri	82
Çizelge 5.16. Numunelerin ortalama tokluk değişimleri	83
Çizelge 5.17. Çekme toklukları için Student T-testi p değerleri.....	84

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.18. Açık delik çekme deneyi sonuçları.....	87
Çizelge 5.19. Numunelerin tokluk değişimleri	88
Çizelge 5.20. Açık delik çekme toklukları için Student T-testi p değerleri	89
Çizelge 5.21. Numunelerin ortalama açık delik çekme dayanımı değişimleri	90
Çizelge 5.22. Açık delik çekme dayanımları için Student T-testi p değerleri	91
Çizelge 5.23. Çekme dayanımları ve açık delik çekme dayanımlarının karşılaştırması	99

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırması.....	19
Şekil 3.2. Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi	21
Şekil 3.3. Tabakalı kompozitin şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.4. Kompozit imalat teknikleri	24
Şekil 3.5. El yatırma yöntemi	25
Şekil 3.6. Püskürtme yöntemi	26
Şekil 3.7. Elyaf sarma yöntemi	27
Şekil 3.8. Vakum torbalama yöntemi	27
Şekil 3.9. Vakum infüzyon yöntemi	28
Şekil 3.10. Reçine transfer kalıplama yöntemi	29
Şekil 3.11. Hazır kalıplama yöntemi.....	30
Şekil 3.12. Profil çekme yöntemi.....	30
Şekil 3.13. Santrifüj döküm yöntemi	31
Şekil 3.14. Sürekli laminasyon yöntemi	32
Şekil 3.15. Karbon allotropları a) grafit, b) grafen, c) grafen oksit, d) karbon nanotüp, e)fulleren, f) karbon nanofiber, g) karbon top karşılaştırması	33
Şekil 3.16. Karbon allotropları a) mikro mekanik bölünme, b) anodik yapıştırma, c) fotoexfoliasyon, d) sıvı faz exfoliasyon, e)SiC’de yetiştirme, f) metalden ergitme, g) kimyasal buhar biriktirme, h) moleküler ışın epitaksi, i) kimyasal sentez	35
Şekil 3.17. Çözelti karıştırma işlemine ait örnek bir çalışma	37
Şekil 3.18. Eriyik karıştırma işlemi	38
Şekil 3.19. In-Situ polimerizasyon işlemi.....	38
Şekil 4.1. Grafenin epoksi içerisinde karıştırılmasının şematik gösterimi	44
Şekil 4.2. Eğme testinde üretilen numunelerin boyutları.....	49

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Çekme deneyi numune boyutları	50
Şekil 4.4. V-Çentikli makaslama testinde üretilen numunelerin boyutları	52
Şekil 4.5. Açık delik çekme testi için hazırlanan numunenin boyutları	54
Şekil 5.1. Yakma testi sonrası hesaplanan fiber hacim oranları	58
Şekil 5.2. Yakma testi sonrası hesaplanan matris hacim oranları.....	59
Şekil 5.3. Yakma testi sonrası hesaplanan boşluk hacim oranları	59
Şekil 5.4. Tüm numunelerin eğme gerilmesi-gerinim grafikleri	62
Şekil 5.5. Numunelerin eğme dayanımı yüzde değişimleri	63
Şekil 5.6. Numunelerin ortalama eğme elastiklik modülleri yüzde değişimi	65
Şekil 5.7. Eğme tokluklarının yüzde değişimi	67
Şekil 5.8. Numunelerin ortalama kesme dayanımı yüzde değişimleri.....	73
Şekil 5.9. Tüm numunelerin çekme gerilmesi-yüzde uzama grafikleri	78
Şekil 5.10. Numunelerin çekme elastiklik modülü yüzde değişimi.....	79
Şekil 5.11. Numunelerin ortalama dayanım yüzde değişimleri	81
Şekil 5.12. Numunelerin ortalama tokluk yüzde değişimleri	83
Şekil 5.13. Tüm numunelerin açık delik çekme gerilmesi-yüzde uzama grafikleri	88
Şekil 5.14. Numunelerin ortalama açık delik çekme tokluk değişim yüzdeleri	89
Şekil 5.15. Numunelerin ortalama açık delik çekme dayanım yüzde değişimi	90

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Nano yapıların görüntüleri a) nanopartiküller, b) nanofiberler	23
Resim 4.1. Çalışmada kullanılan karbon elyaf kumaşın görüntüsü	39
Resim 4.2. Çalışmada kullanılan epoksi ve sertleştiricinin görüntüsü	41
Resim 4.3. Çalışmada kullanılan grafen nanotozun SEM görüntüsü	43
Resim 4.4. Çalışmada kullanılan grafen nanotozun topaklanmış görüntüsü	43
Resim 4.5. Grafenin epoksi içerisinde karıştırılma anı	45
Resim 4.6. Kumaşların ve soyma kumaşının serilmesi aşaması.....	47
Resim 4.7. Epoksinin fiberleri ıslatma anı	48
Resim 4.8. Üç nokta eğme deneyi test anı	50
Resim 4.9. Çekme deneyi test anı	51
Resim 4.10. V-Çentikli makaslama test anı	53
Resim 4.11. Açık delik çekme testi test anı	55
Resim 4.12. Yakma numunesinin yüzey görüntüsü a)yakma işleminden önce b) yakma işleminden sonra	56
Resim 5.1. Yakma testi numune görüntüleri a)yakma işleminden önce b) yakma işleminden sonra	60
Resim 5.2. G60-1 kodlu numunenin delaminasyon gözlemlenmiş uç görüntüsü.....	61
Resim 5.3. Numunenin 3 nokta eğme testindeki yükleme durumu	69
Resim 5.4. G45 kodlu 3 nokta eğme testi sonrası kesit alanı hasar bölgesi a) makro görüntüsü b) mikro görüntüsü	70
Resim 5.5. G45 kodlu 3 nokta eğme testi sonrası yüzey hasar bölgesi a) makro görüntüsü b) mikro görüntüsü	71
Resim 5.6. G15-1 kodlu numunenin kırık görüntüsü a) tam boyut b) sağ ve sol kenar görüntüsü.....	72
Resim 5.7. G30 kodlu numunenin V çentikli makaslama testi yükleme durumu.....	75

Resim	Sayfa
Resim 5.8. G30 kodlu numunenin V çentikli makaslama testi sonrası yüzey-hasar a) makro görüntüsü, b) mikro görüntüsü	76
Resim 5.9. Numunenin çekme testi esnasında kopma anı	85
Resim 5.10. G30 kodlu numunenin çekme testi sonrası hasar bölgesi a) makro görüntüsü, b) mikro görüntüsü	86
Resim 5.11. Numunenin açık delik çekme testi sırasında kopma görüntüsü.....	92
Resim 5.12. Açık delik çekme testi sonrası numune görüntüleri a) G30 kodlu numunenin makro görüntüsü, b) G60 kodlu numunenin delik delik sınırını mikro görüntüsü, c) G30 kodlu numunenin delik sınırı SEM görüntüsü	93
Resim 5.13. Açık delik çekme testi sonrası numune hasar bölgesi a) G30 kodlu numunenin kesit görüntüsü b) G30 kodlu numunenin yüzey görüntüsü	94
Resim 5.14. Açık delik çekme deneyi sonrası kırık kesiti a) G00, b) G30, c) G45 ve d) G60 numunelerinin SEM görüntüler	95
Resim 5.15. Açık delik çekme deneyi sonrası kırık kesiti matris hasarı a) G00, b) G30, c) G45 ve d) G60 numunelerinin SEM görüntüleri	96
Resim 5.16. Açık delik çekme deneyi sonrası kırık yüzey a) G00, b) G30, c) G45 ve d) G60 numunelerinin SEM görüntüleri	97
Resim 5.17. Delik çevresi yüzey SEM görüntüsü a) G00 numunesi, b) G30 numunesi.....	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan
b	Genişlik
C	Karbon
cm³	Santimetrekaare
dk	Dakika
E	Elastik Modül
g	Gram
GPa	Gigapaskal
h	Kalınlık
K	Kelvin
kJ	Kilojul
L	Boy
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
m²	Metrekare
nm	Nanometre
P	Kuvvet
µm	Mikrometre
δ	Sehim Miktarı
σ	Gerilim
ε	Gerinim
τ	Kesme Gerilimi

Kısaltmalar**Açıklamalar****ASTM**

Amerikan Malzeme ve Test Derneği

GNT

Grafen Nanotoz

PVA

Polivinil Alkol

RTK

Reçine Transfer Kalıplama

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

ViY

Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vf

Fiber Hacim Oranı

Vm

Matris Hacim Oranı

Vv

Boşluk Hacim Oranı

1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek dayanım ve düşük ağırlık oranına sahip kompozitler izotropik malzemelerin yerini almaktadır. Özellikle fiber takviyeli polimer kompozitler, yüksek mukavemet ve modül özellikleri gibi olağanüstü özellikleri sebebiyle havacılık ve diğer endüstrilerde çok geniş kullanıma sahiptir [1]. Son yıllarda ise kompozit malzemelerin mekanik davranışı iyileştirmenin yanı sıra verimli özelliklere sahip çok ölçekli kompozitlerin geliştirilmesine odaklanılmıştır [2-3]. Yeni malzeme tasarımı konseptlerini keşfetmek ve nano ölçekli dolguları geleneksel kompozitlerle entegre etmek için fabrikasyon süreçleri geliştirilmiştir [4].

Nano ölçekli dolguların eklenmesindeki asıl amaç, küçük boyuttaki ve mükemmel özelliklere sahip (dayanım, elektrik ve ısı iletkenliği gibi) malzemedan yararlanarak makro ölçekteki malzemenin özelliklerini iyileştirme gayesidir. Bir malzemenin nanoyapı, yeni özelliklerin geliştirilmesinde ve yapının nano düzeyde kontrol edilmesinde kilit faktördür. Bu nedenle nanoteknoloji, yarı iletkenler, inorganik, organik maddeler, enerji depolama ve biyoteknoloji alanlarındaki teknolojik uygulamaları tamamen yeniden yapılandırması beklenen yirmi birinci yüzyılın oldukça umut verici bir alanıdır.

Nanomalzeme tanımı en az bir boyutu 100 nm'den küçük olan malzemeler için kullanılan bir terimdir. Bu malzemeler, elektronik cihazların, biyomedikal ürünlerin, yüksek performanslı malzemelerin ve tüketici ürünlerinin üretimi için kolay süreçler geliştirmek için kullanılabilecek yeni malzeme özellikleri oluşturmak için kimya, fizik, malzeme bilimi ve biyolojiyi entegre edilmeye çalışılır. Nanoteknolojinin ticarileştirilmesinin geniş teknolojik gelişmeyi artırması, yaşam kalitesini ve dünyadaki toplumsal faydaları iyileştirmesi beklenmektedir.

Nano kompozit malzemenin tanımı, yıllar içinde, belirgin şekilde farklı bileşenlerden yapılmış ve nanometre ölçeğinde karıştırılmış, tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve amorf malzemeler gibi çok çeşitli sistemleri kapsayacak şekilde önemli ölçüde genişlemiştir. Tipik olarak nanokompozitlerin kil, karbon, polimer veya bu malzemelerin nanoparçacık yapı taşları ile bir kombinasyonudur [5]. Hacim büyüklüğündeki eşdeğerlerine kıyasla özelliklerini önemli ölçüde değiştiren son derece yüksek bir yüzey / hacim oranına

sahiptirler. Bu sebeple nanomalzemeler mikro yapıya sahip malzemeler ile aynı moleküler kombinasyona sahip olsalar dahi birbirlerinden farklı özellikler gösterebilirler.

Nanokompozitler mukavemet modül ve boyutsal kararlılık dahil mekanik özellikleri, elektriksel iletkenliği, gaz ve su geçirgenliğini, alev almayı geciktirme, termal kararlılığı ve kimyasal dayanımı önemli ölçüde iyileştirebilir.

Nanomalzemelere örnek olarak; grafen, karbon nanotüp, fulleren, nano kil, alüminyum oksit, bakır, titanyum dioksit, demir oksit örnek verilebilir. Bu nanomalzemeler arasında bulunan, karbon allotropu olan 2 boyutlu yapıya sahip ve kovalent bağ ile bağlanan karbon atomlarından oluşan grafen parçacığı oldukça yakın bir tarih olan 2004 yılında sentezlenebilmiştir. Grafenin temeli olan karbon elementinin ametal olması ve elektrik iletkenliğinin çok düşük olmasına rağmen bu yeni malzemenin elektrik iletkenliği metal olmamasına karşın çok iyidir. Grafenin mükemmel elektriksel iletkenliğinin yanında yaklaşık 130 GPa çekme dayanımına sahiptir. Bu değer bir A36 çeliğinin çekme dayanımından 325 kat daha yüksek bir çekme dayanımına sahip olduğu anlamına gelir. Ayrıca yaklaşık olarak 1 TPa elastiklik modülüne sahiptirler.

Kompozit malzemelerin çentikli mukavemeti, tasarımcılar için önemi nedeniyle son 45 yılda kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bir laminatın yükleme döngüsü sırasında mevcut olan karmaşık hasar ve arıza mekanizmaları, bir gerilim konsantrasyonunun varlığı nedeniyle büyüyerek, fark edilemeyen çok çeşitli etkilere neden olur ve beklenmedik yüklerde hasarlar görünebilir [6]. Bir kompozitin çentiğe veya bir süreksizliğe duyarlılığı, kompozitin boyutu ve kalınlığı, oluşturulan çentiğin boyutu ve geometrisi, serim yönü ve serilen kumaşların kalınlığı ve yoğunluğu, işleme kalitesi ve kullanılan malzemenin türüne göre değişmektedir.

Çentikler ve bağlantı elemanı delikleri gibi yapısal süreksizlikler özellikle uçak yapısal bileşenlerinde sıklıkla görülmektedir. Kesikler özellikle anizotropik bir malzeme sistemindeki gerilme konsantrasyonu nedeniyle kritik öneme sahiptirler [7]. Bu nedenle, lokal hasarın değerlendirilmesi ve bu hasar mekanizmalarını hafifletme yöntemleri, yapının genel tepkisini iyileştirmek için oldukça önemlidir.

Çentikli kompozitlerin mukavemetindeki önemli azalmanın deliklerin ve kesiklerin varlığının bir sonucu olduğu gerçeği göz önüne alındığında, açık delik çekme testleri, fiber

takviyeli polimerlerin ilerlemeli hasar ve arıza mekanizmalarının gelişimini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. Matris çatlaması, fiber-matris ayrılması, liflerin uzunlamasına ayrılması vb. kompozitlerin katılığında azalmaya yol açan hasar mekanizmalarından bazılarıdır. Ayrıca kompozitlerin ortotropik özelliği göz önüne alındığında kırılma modu, fiberin yönüne ve yükleme tipine göre değişmektedir [9].

Çentikler ve deliklerden kaçınılmasının mümkün olmadığı için fiber takviyeli polimer kompozitlerin mukavemetini arttırmak için birden fazla teknik araştırılmıştır. Grafen nanotoz dahil edilmesinin mikro düzeyde hasar mekanizmalarını değiştirerek fiber takviyeli polimer kompozitlerin statik dayanımını arttırdığı literatürde bulunmaktadır [10-16].

Merkezi bir deliğe sahip bir plaka kompozit yapılarda süreksizliği temsil eder. Bugüne kadar süreksizliğe sahip elyaf takviyeli kompozitler üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Ancak literatürde süreksizliğe sahip nanokompozit yapıları incelenmesi konusunda oldukça sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Sınırlı olan bu çalışmaların tamamına yakını karbon nanotüp katkılı elyaf takviyeli kompozitler üzerinde yapılmıştır. Yapılan bu çalışmanın yeniliği; grafen nanotoz katkısının süreksizliğe sahip kompozit yapılara olan etkisinin deneysel incelenmesidir. Bu çalışma kapsamında elyaf takviyeli kompozitlerde grafen katkısının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş olup delikli üretilmiş karbon fiber takviyeli kompozitlerde grafen takviyesinin dayanım ve oluşan hasar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu tez kapsamında, ağırlıkça %0,15; %0,30; %0,45 ve %0,6 oranında grafen nanotoz ile katkılanan ve vakum infüzyon yöntemi ile üretilen karbon fiber epoksi kompozit plakaların üç nokta eğme testi, V-çentikli makaslama testi, çekme ve açık delik çekme testleri yapılmıştır. Test sonuçlarında elde edilen değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Özellikle GNT katkısının açık delik çekme ve çekme dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiş olup mekanik özellikleri kıyaslandığında optimum GNT katkı yüzdesinin tespiti yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde nano katkılı veya katkısız kompozitler ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ayrıca grafen katkısıyla yapılan nanokompozit malzemeler üzerine de birçok çalışma mevcuttur. Fakat nano katkıların delik bulunan veya süreksizliği ve bir hasarı bulunan kompozitler için yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Bu bölümde grafen katkılı nano kompozitler ilgili yapılan çalışmalardan ve delikli ve süreksizlik içeren kompozit yapılar ile ilgili çalışmalardan bahsedilecektir. Yapılan bu çalışmanın literatürdeki yeri vurgulanacaktır.

2.1. Grafen Katkılı Nanokompozitlerle İlgili Çalışmalar

Bu bölümde grafen katkılı nanokompozitler mekanik özelliklerine etkisi (çekme ve basma dayanımları, toklukla, elastik modül, sertlik, kayma modülü gibi) hakkında yapılan araştırmalar derlenmiş ve anlatılmıştır. Bunların yanı sıra grafenin eşsiz ısı ve elektrik iletkenliği sebebiyle ısı ve elektrik alanlarında da yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır.

Kumar ve diğerleri [17], ağırlıkça %0,01 oranında grafen içeren grafen/epoksi nanokompoziti mikroskop ile incelemişler ve mikron boyutunda topaklanma gözlemlemişlerdir. Ayrıca kırılma tokluğu, elastik modül ve mukavemetini incelemişlerdir. Katkılanmamış kompozitleri referans aldıklarında kırılma tokluğunun %51 arttığını, eğme modülünün %23 arttığını ve mukavemetinin ise %22 arttığını gözlemlemişlerdir.

Tang ve diğerleri [18], grafenin epoksi içinde dağıtımının etkisini araştırmışlardır. Farklı hızlarla dağıtımını sağladıkları ve ağırlıkça %0,2 katkılı grafen/epoksi nanokompozit hazırlamışlar ve bunları bilyalı değirmen yöntemiyle oluşturmuşlardır. Bir karışımda grafen parçacıkların homojen dağıldığı gözlemlenmiş diğerinde ise yeterli homojen dağılım sağlanamamıştır. Sonuç olarak iyi dağıtılmış grafen epoksi karışımının kırılma tokluğunu %52 daha fazla arttırdığı kötü dağıtılmış olanın ise %24 oranında arttırdığını gözlemlenmiştir.

Raza ve diğerleri [19], farklı boyutlarda grafen ile hazırladıkları grafen/epoksi nanokompoziti mekanik karıştırma yöntemiyle hazırlamışlardır. Bu elde ettikleri yapıların sertlik değerlerini incelemişlerdir. Karşılaştırmaları sonucunda ağırlıkça %20 oranında

katkılanan nanokompozitlerin sertliklerinin %25 oranında katkılananlara oranla daha düşük sertliğe sahip olduklarını gözlemlemişlerdir. Ayrıca grafen boyutu arttıkça kompozitlerin sertliklerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Chandrasekaran ve diğerleri [20], sonikasyon ve 3 merdaneli mil kullanarak ürettikleri ve ağırlıkça çeşitli oranlarda katkıladıkları grafen epoksi nanokompozitlerin kırılma tokluklarını incelemişlerdir. %0,0; %0,3; %0,5; %1; %2 ağırlıkça katkıladıkları numuneler arasında kırılma tokluğu %43 oranında daha fazla olan %1 grafen katkılı nanokompozit olduğunu elde etmişlerdir.

Kamar ve diğerleri [21], ağırlıkça %0,1; %0,25; %0,5 ve %1 grafen katkılı cam fiber nanokompozitlerin kırılma tokluklarını incelemişlerdir. Vakum infüzyon yöntemiyle ürettikleri bu plakalarda %0,25 grafen katkılı kompozitlerin eğme dayanımlarının %25 daha fazla olduğu ve mod 1 kırılma tokluklarını %29 daha fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca %0,1 ve %0,5 katkılı numunelerde de katkılanmamış numunelere kıyasla bir miktar artış görmüşler fakat %1 katkılı numunelerin bu değerleri katkılanmamış numunelerin altında kalmıştır.

Rafiee ve diğerleri [22], ağırlıkça %0,1 oranda katkıladıkları karbon nanotüp/epoksi nanokompozitler ile %0,1 ağırlıkça oranda katkılı grafen/epoksi nanokompozitlerin, elastik modülleri, çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Çekme elastiklik modülleri incelendiğinde grafen katkılı nanokompozitlerin karbon nanotüp katkılı nanokompozitlere kıyasla %3 daha fazla, saf epoksiye göre de %31 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çekme mukavemeti değerlerinde ise grafen katkılılarda %40 oranında bir artış, karbon nanotüp katkılılar için ise %14'lük bir artış gözlemlenmiştir.

Wang ve diğerleri [23], ağırlıkça %5 ve %3 oranlarda grafen katkılı cam fiber epoksi nano kompozitlerde iki farklı boyutta grafen kullanmışlardır. Aynı kalınlıklara sahip olan bu grafenlerden birinin çapı 1 mikron seviyesinden düşük olup diğerinin ise yaklaşık olarak beş mikron seviyesindedir. Eğme dayanımları incelendiğinde %3 ve %5 oranında beş mikron boyutundaki grafen katkılanan numunelerin dayanımları katkılanmamış ve bir mikron boyutunda grafen katkılanmış numunelere oranla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bir mikron boyutundaki grafenler kullanılarak elde edilen kompozitlerdeki dayanım değerleri katkılanmamış numunelere kıyasla oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Yaptıkları SEM incelemelerinde ise küçük boyutlarda grafen katkılanmış numunelerde daha fazla topaklanma gözlemlenmiştir.

David ve diğerleri [24], %0,1 oranında grafen ve karbon/grafen katkılı numunelerin kırılma tokluklarını incelemiştir. Çözelti karıştırma tekniğiyle hazırladıkları bu kompozitlerde grafen içeren kompozitlerin kırılma toklukları grafen içermeyen epoksiye göre %128 daha fazla oldukları gözlemlenmiştir. Ayrıca grafen katkılı karbon epoksi kompozitlerin kırılma toklukları ise karbon epoksi kompozitlere göre %11,4 oranında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Li ve diğerleri [25], ağırlıkça %5 oranında grafen katkılanan karbonfiber nanokompozitlerin tabakalar arası kayma gerilmelerini incelemiştir. İncelemeleri sonucunda %5 oranında grafen katkılı numunelerin tabakalar arası kayma gerilmeleri katkısız olanlara kıyasla %33 daha fazla olduğunu gözlemlenmiştir.

King ve diğerleri [26], ağırlıkça (%0, %1, %2, %3, %4, %5, %6) grafen katkılacakları epoksinin çekme dayanımlarını, elastik modüllerini ve sertliklerini incelemiştir. İncelemeleri sonucunda grafen oranı arttıkça elastik modülünün arttığını gözlemiştir. Fakat numunelerin çekme dayanımlarında ise tam tersi olarak grafen miktarı arttıkça azalma gözlemlenmiştir. Sertliklerinde ise kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. %6 oranında katkılanmış grafen epoksi, epoksi ile kıyaslandığında çekme dayanımında yaklaşık %50 oranında bir azalış, elastik modülünde ise %23 oranında bir artış gözlemlenmiştir.

Chatterjee ve diğerleri [27], biri 5 mikron diğeri ise 25 mikron boyutlarında olan iki farklı grafeni sırasıyla ağırlıkça %0; %0,1; %0,5; %1 ve %2 oranlarında karıştırarak grafen epoksi nanokompozitleri elde etmişlerdir. Numunelerin eğme modüllerini incelediklerinde %1 oranında 25 mikron boyutunda olan grafen katkılı epoksinin eğme modülü 2,88 GPa ile en yüksek değer olarak elde edilmiştir. Diğerleri incelendiğinde ise 5 mikron boyutunda grafen katkılanan numunelerin elastik modül değerleri 25 mikron seviyesinde katkılanan numunelerin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Aynı durumu kırılma tokluğu içinde gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkarak grafenin boyutu arttıkça makro yapıya olan etkisinin daha fazla olduğu sonucunu çıkarmışlardır.

Uğur ve diğerleri [28], farklı karıştırma teknikleri deneyerek karıştırma yöntemlerinin grafen epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonikasyon ve yüksek kesme kuvvetli mekanik karıştırma kullandıkları bu çalışmada ana hatlarıyla birinde sertleştiricinin içinde grafen nanotozları dağıtmışlar, diğerinde ise epoksi içinde dağıtım işlemi gerçekleştirmişlerdir. Çekme dayanımlarını incelediklerinde epoksi içinde karıştırdıkları numunelerin kopma uzamalarının sertleştirici içinde karıştırdıklarından daha yüksek değerlerde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Edward ve diğerleri [29], ağırlıkça %0,1; %0,5; %1; %2 ve %5 grafen katkılı epoksi nanokompozitlerin farklı devirlerde ve farklı sürelerde mekanik karıştırma yaparak maksimum topaklanma miktarlarını incelemiş ve ardından çekme dayanım değerlerini incelemişlerdir. 1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000, 9 000 dev/dk devir hızlarında hem 1 saat hem de 2 saat olacak şekilde karıştırma yapmışlardır. Bu karıştırma işlemlerinden sonra optik mikroskop altında topaklanma boyutlarını ölçmüşlerdir. Buradan hareketle en az topaklanmanın 5000 dev/dk hızla karıştırdıkları numunelerde olduklarını gözlemlemişlerdir. Elastiklik modülünün en yüksek değerini 3 000 dev/dk hızla ve 2 saat karıştırılan numunelerde olduğunu bildirmişlerdir. En yüksek dayanım değerini ise 5 000 dev/dk ile 1 saat karıştırılan numunelerde yakaladıklarını bildirmişlerdir.

Avila ve diğerleri [30], karbon fiber kompozitlere ağırlıkça %0,5; %1; %1,5 oranında grafen katkılı yapıp bunların eğme dayanımına olan etkisini incelemişlerdir. Eğme modülleri incelendiğine katkısız olarak referans aldıkları kompozitte 27,94 GPa olarak elde ettikleri değer, %0,5 katkılanan numuneler 76,86 GPa %1,5 katkılanan numunelerde 38,44 GPa %2 katkılanan numunelerde ise 58,71 GPa değerlerini elde etmişler ve değerlerdeki en çok sapmayı %1,5 katkılı numunelerde gözlemlemişlerdir. Buradan hareketle grafen miktarındaki artışın; homojen karıştırmayı zorlaştığı kanısına varmışlardır. Ayrıca en büyük eğme dayanımını da %0,5 katkılı numunelerde gözlemlemişlerdir.

Zaman ve diğerleri [31], grafen katkılı grafen/epoksi nanokompoziti incelemişlerdir. Nanokompozitin üretimi için çözelti içinde sonikasyon işlemini kullanmışlardır. %4 grafen katkısının kırılma enerjisini %96 oranında arttırdığını bildirmişlerdir.

Klimek ve diğerleri [32], ağırlıkça %1, %2, %3, %4 oranında katkılacakları epoksi-grafen nanokompozitin çekme dayanım ve modül değerlerini incelemişlerdir. Grafeni epoksi içinde

önce 1 saat 300 devirde mekanik karıştırma ardından 1 saat sonikasyon işlemine tabi tutarak dağıtmışlardır. Elastik modülleri incelediklerinde katkılanmamış epoksinin modül değeri 2,72 GPa olarak elde edilirken en yüksek elastik modül değeri, %4 grafen katkılı epoksida 2,93 GPa olarak ölçülmüştür. Çekme dayanımları incelendiğinde ise katkılanmamış epoksinin dayanım değeri 77,6 MPa gelirken %1 grafen katkılı epoksi 81,2 MPa'lık dayanım değeriyle en yüksek değeri olduğunu bildirmişlerdir.

Ahmedi ve diğerleri [33], ağırlıkça %0,5; %1; %1,5 ve %2 oranlarında grafeni epoksi içinde 15 dakika ve 2 000 dev/dk olarak mekanik karıştırma işlemi uygulayıp ardından 3 merdaneli milde 174 dev/dk'da homojen dağıtımını gerçekleştirip grafen/epoksi nanokompozitleri üretmişlerdir. Elastik modülleri karşılaştırıldığında %2 oranında katkılanan grafen epoksi nanokompozitlerin, %9 oranında daha fazla olduklarını bildirmişlerdir. Ayrıca yarı empirik hesaplama yöntemi olan Halphin-Tsai yöntemi ile deneysel sonuçlara daha yakın değerler elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Qin ve diğerleri [34], karbon fiber kompozitlerde grafen kaplamasının mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Grafen ile kaplanan karbon fiberlerin eğme mukavemeti, elastik modülü ve tabakalar arası kayma gerilimi kaplanmayan numunelere kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığını bildirmişlerdir.

Hadden ve diğerleri [15], Grafen katkılı karbon fiber epoksi nanokompozitlerin elastik modül değerlerini nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Simülasyonlarında 1 tabakalı, 2 tabakalı, 3 tabakalı ve 4 tabakalı grafen nanotoz modellemişler ve elastik modüllerini hacimce %0,01; %0,02 ve %0,03 için hesaplamışlardır. Grafen nanotozların da mekanik karıştırma ardından sonikasyon işlemi ile epoksi içinde dağıtımını sağlamışlardır. Grafen katkısının serime dik yöndeki özellikleri oldukça iyileştirdiği serim yönünde ise çok etkisinin olmadığını bunun nedeni olarak karbon fiberin özelliklerinin baskın olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca nümerik olarak ele aldıkları 4 tabakalı grafen yaklaşımının test sonuçlarıyla daha uyumlu olduğunu bildirmişlerdir.

Ming ve diğerleri [35], çözelti içinde karıştırma yöntemini kullanarak, grafenin epoksi reçine içinde dağıtımını sağlamışlardır. Ağırlıkça %0,25 katkılادıkları karbon fiber epoksi grafen nanokompozitlerin yorulma ömürlerini incelemişlerdir. Katkılanan numunelerin çatlak

ilerlemesini zorlaştırdığı ve kırılmayı minimize ettiğini bundan dolayı yorulma ömürlerini iyileştirdiklerini bildirmişlerdir.

Zafeiropoulou ve diğerleri [36], ağırlıkça %0,5 oranında 300 m²/g ve 500m²/g olan iki farklı grafeni katkılayarak karbon fiber epoksi nanokompozitlerini elde etmişlerdir. Bu çalışmadaki amaçları spesifik yüzey alanının mod I ve mod II kırılma tokluklarına etkisini incelemektir. Mod II kırılma toklukları karşılaştırıldığında katkılanmamış numunelerin kırılma tokluğunu 1,02 kJ/m², 300 m²/g spesifik yüzey alana sahip grafen ile katkılanmış numunenin kırılma tokluğunu 1,07 kJ/m², 500 m²/g spesifik yüzey alana sahip grafen ile katkılanmış numunenin kırılma tokluğunu 1,36 kJ/m² olarak elde ettiklerini bildirmişlerdir. Mod I kırılma toklukları karşılaştırıldığında katkılanmamış numunelerin kırılma tokluğunu 0,55 kJ/m², 300 m²/g spesifik yüzey alana sahip grafen ile katkılanmış numunenin kırılma tokluğunu 0,48 kJ/m², 500 m²/g spesifik yüzey alana sahip grafen ile katkılanmış numunenin kırılma tokluğunu 0,69 kJ/m² olarak elde ettiklerini bildirmişlerdir. Sonuç olarak grafenin spesifik yüzey alanı arttıkça daha homojen karışımı sağlayabildiklerini ve tokluk değerlerinde daha iyileştirici değerlere ulaştıklarını bildirmişlerdir.

Papageorgiou ve diğerleri [37], cam elyaf kompozitlere ağırlıkça %5'den %20 oranına kadar grafen eklemişlerdir. Eklenen grafen nanotozun kompozitlerin çekme dayanım ve modüllerini arttırdığını bildirmişlerdir.

Pathak ve diğerleri [38], grafen nanotoz katkılı hibrit karbon fiber kompozitler ile ilgili bir inceleme yapmışlardır. Ağırlıkça %0,3 grafen nanotoz katkısının eğme mukavemetini ve eğme modülünü %70'e varan oranda arttırdığını bildirmişlerdir. Bunun yanı sıra grafen içeren nanokompozitlerin darbe direncini de incelemişlerdir.

Namdew ve diğerleri [39], ağırlıkça %0,3 %0,5 ve %0,7 oranlarında katkıladıkları karbon fiber epoksi kompozitlerin çekme, eğme, kesme ve darbe dayanımlarını incelemişlerdir. %0,5 grafen katkısının üstündeki değerlerde katkılanan kompozitlerin aşırı topaklanmadan dolayı mekanik değerleri düşürdüğünü bildirmişlerdir. %0,5 oranında katkılanan numunelerin çekme dayanımlarının katkılanmamış numunelere kıyasla %11 daha fazla ve eğme dayanım değerlerinin de %18 daha fazla olduğunu bildirmişlerdir.

Abbandanak ve diğerleri [40], Al2024-hibrit cam/kevlar epoksi kompozitlere ağırlıkça %0, %0,1; %0,25 ve %0,5 oranında grafen nanotoz ilavesi gerçekleştirmişlerdir. Hibrit cam/kevlar epoksi ile güçlendirilmiş 2024 Alüminyum kompozitleri el yatırma yöntemiyle üretilmiştir. Bu kompozitlerde %0,1 oranındaki grafen katkısı eğme dayanımını %10, eğme modülünü %9 ve darbe direncini %11 oranında iyileştirmiştir. Bu kompozitlere %0,25 oranında grafen katkısı ise eğme dayanımını %13,7, elastik modülünü %3 ve darbe direncini %25,5 oranında azaltmıştır. Yine benzer şekilde %0,5 oranında grafen katkısı eğme dayanımını %31,3, elastik modülünü %8,8 ve darbe direncini %29,5 oranında azaltmıştır. Charpy darbe testinde ise %0,25 ve %0,5 oranında katkılanan numunelerin değerleri sırasıyla %33 ve %37 oranında %0,1 katkılanan numunelerin değerlerinden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir.

2.2. Delik İçeren Kompozitlerle İlgili Çalışmalar

Özer ve diğerleri [41], poliyamid ve propilen matrisli cam fiber kompozitlerin açık delik çekme testlerini ve çekme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri değerleri incelediklerinde poliyamid matrisli kompozitlerde delikten dolayı oluşan süreksizlik nedeniyle dayanım değerlerinin çekme değeri referans alındığında %17 azaldığını gözlemlemişlerdir. Propilen matrisli kompozitlerde ise delikten dolayı oluşan süreksizlik nedeniyle dayanım değerlerinin çekme değeri referans alındığında %20 azaldığını gözlemlemişlerdir. Merkezdeki deliğin dayanım ve gerinim davranışını değiştirdiğini bildirmişlerdir.

O'Higgins ve diğerleri [42], yüksek dayanımlı cam fiber kompozit ile karbon fiber kompozitlerin açık delik çekme karakteristiklerini kıyaslamışlardır. $[45/0/-45/90]_{2s}$, $[90/0]_{4s}$, $[90/0]_{2s}$, $[90_2/0_2]_{2s}$ dizilimleri ile yaptıkları denemelerde karbon fiber kompozitlerin dayanımlarında sırasıyla %53, %45, %52, %85 oranında azalma, yüksek dayanımlı cam fiber kompozitlerde ise sırasıyla %54, %40, %46, %59 oranında azalma gözlemlemişlerdir. Genel olarak cam fiberin delik hassasiyetinin daha düşük olduğunu ve $[90/0]_{4s}$ diziliminin daha iyi performans gösterdiğini bildirmişlerdir.

Green ve diğerleri [7], $[45/90/-45/0]$ serimine sahip kompozitleri farklı kalınlıklarda üretip, farklı boyutlarda da delik açarak, kompozitlerde delik boyutunu ve kalınlık etkisini incelemek için çekme testi gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri testlerde maksimum

%64'lük bir dayanım artışı gözlemlediklerini bildirmişlerdir. Farklı kalınlıkların çentik hassasiyetinde düşüşler ve artışlara neden olduğunu kaydetmişlerdir. Test ettikleri numunelerde 3 farklı hasar modunu gözlediklerini bildirmişlerdir. Bunlar delaminasyon, matris kırılması, fiber kopması hasarlarıdır.

Farid ve diğerleri [43], karbon fiber ve cam fiber kompozitler ile 6065 alüminyum numunelerin açık delik çekme, tek ve çift bağlantılı çekme özelliklerini inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Alüminyum 6065 malzemeden yapılmış numunelerin açık delik çekme mukavemetinin çekme mukavemetine oranının %85 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer sonucunda alüminyum malzeme için çentik hassasiyetinin olmadığını bildirmişlerdir. Cam fiber kompozitlerde ise bu oran %53, karbon fiber kompozitlerde ise bu oran %69 olarak elde ettiklerini bildirmişlerdir. Kompozitler ile alüminyum kıyaslandığında kompozitler daha kırılgan yapıda oldukları için çentiğe duyarlılıklarının fazla olduğunu bildirmişlerdir.

Tarfoui ve diğerleri [44], karbon nanotüp ile katkıladıkları karbon fiber nanokompozitlerde açık delik çekme testi yapıp karbon nanotüp katkılı delikli kompozitlerin dayanımını incelemişlerdir. Karbon nanotüp katkısının dayanımı %2 oranında arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bu gerçekleştirdikleri çalışmada karbon nanotüp takviyesinin delikli kompozitlerin dayanımı için çok etkisi olmadığını bildirmişlerdir.

Broughton ve diğerleri [45], cam fiber kompozit yapılarıdaki delik hassasiyetini deneysel olarak incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada çekme testinde malzemenin dayanımını 484 MPa, elastik modülünü ise 21,9 GPa olarak elde etmişlerdir. Çentikli çekme testi sonuçlarında ise malzeme dayanımını 346 MPa, elastik modülünü ise 20,6 GPa olarak elde etmişlerdir. Sonuç olarak dayanımda %29 oranında azalma, elastik modülünde ise %6'lık bir azalma olduğunu bildirmişlerdir.

Ogasawara ve diğerleri [46], fulleren katkılı karbon fiber epoksi kompozitlerin delik hassasiyetlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Ağırlıkça %0,1; %0,5 ve %1 katkıladıkları kompozitleri el yatırma yöntemiyle üretmişlerdir. %0, %0,1; %0,5 ve %1 katkılı numunelerin çekme dayanımları sırasıyla 753 MPa, 768 MPa, 799 MPa, 726 MPa olarak elde etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri açık delik çekme testlerinde ise sırasıyla 350 MPa, 320 MPa, 379 MPa, 291 MPa dayanım değerlerini elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın

sonucunda en yüksek dayanımı %0,5 katkılı karbon fiber epoksi kompozitlerde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Cristopher ve diğerleri [47], cam fiber ve karbon fiber kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırdıkları bir çalışma yapmışlardır. Cam fiber kompozitler için yaptıkları çekme testinde 544 MPa, açık delik çekme testinde %32'lik azalışla 367 MPa dayanım değeri elde etmişlerdir. Karbon fiber kompozitlerde ise çekme testinde 958 MPa, açık delik çekme testinde %35'lik azalışla 621 MPa dayanım değeri elde etmişlerdir. Karbon fiberin cam fiber dayanımına oranlarını; çekme testi için 1,76, açık delik çekme testi için ise 1,69 olduğunu bildirmişlerdir.

Zhang ve diğerleri [48], farklı serim yönü ve kumaş serim sayılarına sahip cam kompozitlerin farklı kalınlıkta ve farklı delik çaplarındaki dayanımlarını incelemişlerdir. Kalınlık ve delik çapının arttıkça açık delik çekme dayanımının azaldığını bildirmişlerdir. Ayrıca delik çapının daha önemli bir faktör olduğunu vurgulamışlardır.

Norazeen ve diğerleri [49], farklı oranlardaki kevlar/cam fiber hibrit kompozitleri 20/80, 50/50, 80/20 oranlarında vakum torbalama yöntemiyle üretmişlerdir. 80/20 oranında ürettikleri kevlar/cam fiberlerden oluşan hibrit laminatların diğer hibrit sistemlere göre daha yüksek dayanıma ve elastik modüle sahip olduklarını bildirmişlerdir. Ayrıca delik varlığından dolayı delikli numunelerin dayanımlarının ve elastik modüllerinin deliksiz numunelere göre %50 ile %63 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir. Bunlara ek olarak hibrit kompozitlere %5 nanosilika ilave edilip çalışma tekrarlandığında cam fiber kompozitler ve 20/80 kevlar/cam fiber kompozitlerin dayanımlarının daha fazla arttığını belirtmişlerdir.

Katkılanmamış cam fiber kompozitlerin delikli ve deliksiz çekme dayanımlarının oranı %49,7 iken katkılanmış olanlarda bu oran %57,4 olarak gözlemlenmiştir. En yüksek oran ise 20/80 oranında hazırlanan kevlar/cam fiber kompozitlerde gözlemlenmiştir. Katkılanmamış hibrit kompozitlerin delikli ve deliksiz çekme dayanımlarının oranı %62,7 iken katkılanmış olanlarda bu oran %67,8 olarak gözlemlenmiştir.

Jayaram ve diğerleri [50], ağırlıkça %0,1 oranında karbon nanotüp katkıladıkları karbon fiber kompozitlerde karbon nanotüpler manyetik alan oluşturarak çekme eksenine dik,

çekme eksenine paralel ve rastgele olarak dağıtmışlardır. Yaptıkları açık delik çekme deneylerini katkısız numuneler ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda katkısız numunelerin çentikli dayanım değeri 195 MPa, rastgele karbon nanotüp dağıttıkları numunelerde 220 MPa, çekme eksenine dik olarak dağıttıkları numunelerde 255 MPa, çekme ekseninde dağıttıkları numunelerde 230 MPa dayanım değerlerini elde etmişlerdir. Buradan hareketle çekme eksenine dik olarak dağıtılmış numunelerin kırılmayı engellediğini ve çatlak ilerlemesini zorlaştırdığını bildirmişlerdir.

Velukkudi ve diğerleri [51], mikro muz lifleri ve nano silisyum karbür katkıladıkları bazalt epoksi hibrit kompozitlerin çentikli çekme dayanımlarını incelemişlerdir. Nano silisyum karbür katkılı bazalt fiber kompozit numuneler ve mikro muz lifi katkıladıkları bazalt fiber kompozitleri el yatırma yöntemiyle üretmişlerdir. Yaptıkları çentikli çekme testinde nano silisyum katkılı kompozitin dayanımını 83,45 MPa olarak elde ettiklerini Muz lifi katkılı kompozitin dayanımını ise 61,72 MPa olarak elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Seyed ve diğerleri [52] 3 boyutlu yazıcı ile ürettikleri karbon fiber takviyeli kompozitler için çeşitli çaplarda delikler oluşturup çekme testi yapmışlardır. 3,175 mm, 6,35 mm, 9,525 mm ve 12,7 mm çaplarında delik oluşturdukları numunelerle yapılan testlerde açık delik çekme testinin çekme testine olan oranı 0,72'den 0,53'e kadar düşmektedir. Burada elde edilen değerler ile teorik hesaplamaları karşılaştırmış ve ilgili metodolojinin 3 boyutlu yazıcıyla elde ettiği karbon fiber numuneler içinde geçerliliğini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçların ise büyük oranda analitik yaklaşım ile uyuştuğunu bildirmişlerdir.

Han ve diğerleri [53], ağırlıkça %0,5 karbon nanotüp katkılı karbon fiber kompozit numunelerin açık delik çekme dayanımı ile katkısız numunelerin açık delik çekme dayanımını karşılaştırmışlardır. Numuneleri çözelti karıştırma işlemi ile epoksi içinde dağıtmışlar ve vakum infüzyon yöntemi ile kompozitleri üretmişlerdir. Sonuçları incelediklerinde ortalama dayanımların katkısız numunelerde 515,7 MPa katkılı numunelerde ise 535,38 MPa olarak elde etmişlerdir. Karbon nanotübün dayanımı artırıcı etkisi olduğunu vurgulamışlardır.

Mohammad ve diğerleri [54], $[0_2/90_3/0_2]_s$ kat dizilimine sahip karbon fiber epoksi numuneleri el yatırma tekniği ile üretmişlerdir. Daha sonra 1 mm/dk, 2 mm/dk, 20 mm/dk, 200 mm/dk hızlarında açık delik çekme testine tabi tutmuşlardır. Maksimum dayanımları

sırasıyla 769 MPa, 806 MPa, 834 MPa, 869 MPa olarak elde etmişlerdir. Yükleme hızını arttırdıklarında maksimum dayanımın arttığını bildirmişlerdir.

Tayyap ve diğerleri [55], karbon/epoksi kompozitlerde çeşitli matkap ilerleme hızlarında delinen kompozitlerin çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Yaptıkları deneysel çalışmanın sonucunda en yüksek dayanımları 2 400 mm/dk hızında açılan deliklerde olduğunu bildirmişlerdir.

Erçin ve diğerleri [56], [90/45/0/-45]_{3s} dizilimine sahip karbon fiber kompozit numunelerde farklı çaplarda delik açmışlardır. Aynı genişlik/delik çapı oranına sahip, 12/3, 20/5, 28/7 oranlarında numuneler hazırlamışlardır. Ortalama dayanım değerlerini karşılaştırdıklarında 12/3 oranındaki numunenin 560 MPa, 20/5 oranındaki numune dayanımının 534 MPa, 28/7 oranındaki numunelerde ise 500 MPa dayanım değeri elde etmişlerdir. İnceledikleri numuneler de sabit genişlik/çap oranına sahip olmalarına rağmen delik boyutu büyük olan numunelerin daha düşük değerlerde koptuğunu bildirmişlerdir. Bunun sebebini ise oluşturulan delik sınırının büyük olması daha yüksek gerilme yığılmasına sebep olması ile açıklamışlardır.

Ma ve diğerleri [57], [0]₈, [0/90]_{2s}, [0/90/45/ - 45]_s dizilimlerine sahip 3 farklı 160/100 genişlik/delik oranına sahip karbon fiber kompozit numunelerde açık delik çekme testi gerçekleştirmiştir. Kırılma kuvvetlerini [0]₈ dizilimli numuneler için 43,96 kN, [0/90]_{2s}, numuneler için 31,53 kN, [0/90/45/ - 45]_s dizilimli numuneler için ise 21,81 kN olarak elde etmişlerdir. Bu çalışma sonucunda çekme doğrultusuna dik yöndeki dizilime sahip numunelerin delikten kaynaklanan çatlağı engelleme de yetersiz olduğunu ve [0/90/45/ - 45]_s dizilimine sahip numunelerde ise delaminasyon, fiber matris kırılması gibi komplike kırılma modlarını gözlediklerini bildirmişlerdir.

Wang ve diğerleri [58], [0]_{8s}, [45 /-45]_{4s}, ve [45/0/-45/90]_{2s} dizilimlerine sahip 3 farklı karbon fiber kompozit numunelerde deliksiz, 2 mm, 3,81 mm, 6,35 mm, ve 9,55 mm delik açıp ASTM 3039 standardına göre çekme testi yapıp incelemişlerdir. Delik çapı arttıkça ortalama net dayanımın düştüğünü ve delik çevresindeki gerilme yığılmasının düştüğünü bildirmişlerdir. Ayrıca katman katman dayanım dağılımını incelediklerinde 90° deki katmanların daha düşük yüklerde kırıldığını, 0° yönündeki katmanların kırılmasının

numunenin kırılımına sebep olduğunu ayrıca $\pm 45^\circ$ katmanların ise lineer olmayan gerilim ve gerinim davranışı gösterdiğini bildirmişlerdir.

Bilel ve diğerleri [59], farklı katman dizilimlerine sahip karbon fiber kompozit numunelerin ortasında farklı boyutlarda çentik açıp çekme dayanımlarını incelemişlerdir. $[0/45/-45/90]_s$, $[45_2/-45_2]_s$, $[0_2/90_2]_s$ olarak hazırladıkları numunelere ait çekme dayanımları sırasıyla 109,8 MPa, 702,9 MPa, 1086 MPa'dır. Delikli numunelerin ise dayanımları sırasıyla 80,46 MPa, 527,83 MPa ve 825,65 MPa elde etmişlerdir. Çekme dayanımları ve delikli çekme dayanımlarını oranladıklarında dizilimlere göre sırasıyla 0,73; 0,75 ve 0,76 oranlarını elde etmişlerdir. Buradan hareketle çentik hassasiyetinin $\pm 45^\circ$ dizilime sahip numunelerde nispeten daha az olduğunu bildirmişlerdir.

Liang ve diğerleri [60] örgülü kompozit yapıların açık delik çekme dayanımlarını incelemişleridir. 3 boyutlu kompozitlerin yüzey örgü açıları $\pm 12^\circ$ 'dir. 18 ve 24 dokumadan oluşan örgülü kompozitlerin dayanımları incelenmiştir. Yapılan çekme testlerinde deliksiz çekme kırıklarının enine olduğunu, açık delik çekme testlerinin ise çapraz veya delik boyunca kırıkların oluştuğunu bildirmişlerdir.

Arifin ve diğerleri [61], kırılmış cam keçe ve cam elyafı beraber takviye elamanı olarak kullanarak, biri epoksi reçine matrisli ve diğeri polyester reçine matrisli olarak 2 farklı kompozit numune üretmişlerdir. Kırılmış cam keçeler iki numunede de aynı oranda kullanılmış olup, polyester matris kullanılan kompozit numunelerde 6 kat cam elyaf, epoksi ile üretilen kompozit numunelerde ise 2 kat cam elyaf kullanılmıştır. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde yüzeylerin benzerlik gösterdiğini bildirmişlerdir. Her iki tip numunenin de çentiksiz dayanımlarının yüksek olduğunu ve her ikisinin de yüksek elastik modülleri sebebiyle elastik-plastik davranış gösterdiklerini bildirmişlerdir.

Kannan ve diğerleri [62] keten halka iplik ile propilen dokulu iplikten oluşan ve $[0_6],[\pm 45_6],[0/90/0]_s$ dizilimlerine sahip kompozit yapıların çentikli ve çentiksiz mukavemetlerini karşılaştırmışlardır. Genişlikleri 25mm olarak sabit tutulan bu numuneler üzerinde 2mm ve 4mm çaplarında delikler açılmış ve çekme testine tabi tutulmuştur. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda, $[\pm 45_6]$ dizilime sahip kompozit numunelerde %66 ve %54 oranlarında dayanım düşüşü gözlemlemişler ve dizilimin çentik hassasiyetine etkisini

vurgulamışlardır. Ayrıca tüm numuneler için delik çapı arttıkça dayanımın düştüğünü bildirmişlerdir.

Omar ve diğerleri [63], cam fiber /epoksi kompozit numunelerde tam delik, basamaklı delik açarak çekme testine tabi tutmuş ve diğer numunelerde tamir olarak bu delikleri cam fiber epoksi ile kapatarak çekme testi uygulamışlar ve elde ettikleri değerleri deliksiz numunelerin dayanımları ile kıyaslamışlardır. Tamir ettikleri numunelerin dayanımları tamir edilmeyenlere göre daha yüksek olduğunu ve hasarların numunelerin deliğe yakın matraste başladığını ve düz delikli numunelerin dayanımları basamaklı delikli olan numunelere kıyasla daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Literatürde nanokompozitler ve çentikli kompozitlerin dayanımları ile ilgili çalışmalar incelendiğinde nanopartikül takviyesinin kompozitler üzerindeki etkisini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca çentik hassasiyeti veya delik içeren kompozitlerin dayanımlarını inceleyen çalışmalar ise daha çok katkısız kompozitler ile ilgili çalışmaların olduğu gözlemlenmiştir. Nanopartikül katkılı kompozitler üzerinde çentik hassasiyeti ile ilgili çalışmalar literatürde sınırlı sayıda bulunmaktadır [46,50,51,53]. Yapılan çalışmalarda genellikle karbon nanotüp kullanılmış olup, karbon nanotübün çentikli dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada literatürde var olan sınırlı sayıdaki çalışmalardan farklı olarak grafen katkısının karbon epoksi kompozit plakalardaki çentik hassasiyetine ve kompozit plakaların delikli çekme dayanımına olan etkisi araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında farklı oranlarda GNT (ağırlıkça %0; %0,15; %0,3; %0,45 ve %0,60) katkılı karbon fiber epoksi nanokompozit plakaların mekanik özellikleri incelenmiştir. Yakma testi yapılarak grafen nanotoz katkısının fiber, matris ve boşluk hacim oranlarına etkisi incelenmiştir. Ayrıca eğme testi, çekme testi, makaslama testi, açık delik çekme testleri yapılarak malzemelerin davranışları incelenmiş ve katkı oranının etkisi araştırılmıştır. Matris elemanı olarak epoksi, takviye elemanı olarak karbon elyaf ve katkı elemanı olarak grafen nanotoz kullanılmıştır.

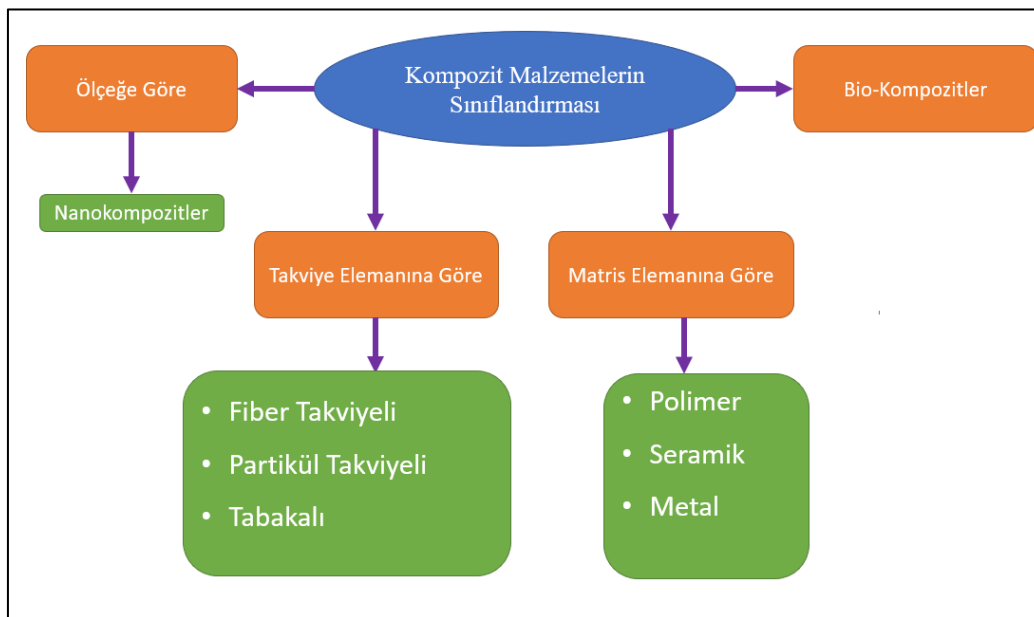
3. KOMPOZİT MALZEMELER

Bu bölümde kompozit malzemelerin ve grafen nanotozun, gelişimi, üretim yöntemleri, sınıflandırılması, çeşitleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

İki veya daha fazla malzemenin farklı kimyasal ve fiziksel veya biyolojik özellikler ile birleştirilmesiyle hazırlanan yeni bir malzemeye kompozit adı verilir. Mühendislik ve malzeme bilimleri alanında kompozit malzemelerin kullanımındaki ve ünündeki hızlı büyümenin nedeni bu malzemelerin dayanım, tokluk ile hafiflik ve korozyon direnci özelliklerinin son derece iyileştirici bir kombinasyonunu sağlamalarıdır [64-67]. Kompozit malzemeler genellikle takviye elemanı ve matris elemanı olarak 2 fazdan oluşur. Takviye elemanını bir insan iskeleti gibi açıklanabilirken matris elemanı da iskeleti saran kaslar olarak açıklanabilir. Bunlara ek olarak partikül takviyesi gibi unsurlar eklenerek kompozit malzemeler daha karmaşık yapılarda da elde edilebilirler.

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler Şekil 3.1'de gösterildiği gibi içeriklerinin çeşitliliğine göre sınıflandırılabilir. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması ölçeğe göre, matris elemanına göre, takviye elemanına göre ve biyokompozitler olarak 4 genel başlık altında toplanabilir.



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırması [68]

3.1.1 Matris elemanına göre kompozitlerin sınıflandırılması

Matris fazına göre kompozitler 3 başlık altında toplanabilir. Bunlar polimer matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitler olarak ayrılırlar.

Polimer matrisli kompozitler termoset veya termoplastik matris elemanı ile birlikte karbon, cam, kevlar veya metal fiberler ile takviye edilmiş malzemelerden oluşurlar [69-72]. Yüksek dayanım ve yüksek sıcaklıklara dayanımları sebebiyle termosetlerin kullanımı daha fazladır [73]. Termosetler reçine ve sertleştirici ile birlikte hazırlanırlar. Özellikle laminar yapılarda katmanların birbirine yapıştırılması ve istifleme sonrasındaki boşlukların kapatılıp malzeme sürekliliğinin sağlanması hususunda termoset reçineler çok kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra termoplastik matris kullanımı da günden güne yaygınlaşmaya ve kullanım alanlarının artırılması çalışmalarına devam edilmektedir. Polimer matrisli kompozitler kolay kullanımları ve basit imalat yöntemleri özellikle düşük maliyetleri sebebiyle güçlendirme maksadıyla oldukça tercih edilen bir kompozit sınıfıdır.

Seramik matrisli kompozitler genellikle karbon, silisyum karbid (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum nitrit (SiN) gibi malzemelerin seramik matrisli yapının içine katılmasıyla oluşurlar. Bu sınıftaki kompozitler seramiklerin aşırı kırılgan özelliklerini iyileştirmek için oluşturulurlar. Bu kompozitlerin diğer sınıflara göre bir farklılığı da matrisin kopma gerinimi fiberin kopma geriniminden daha düşük olmasıdır. Bu yüzden bu sınıf ters kompozitler olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle yükleme koşulları altında kırılgan liflerin erken kopmasını önlemek için ilk kırılan matristir. Seramik matrisli kompozitlerin üretimleri gaz veya sıvı faz olarak adlandırılan bir takım spesifik işleme teknikleri ile yapılmaktadır. Bu işlemde iç faz ve matris ile gaz veya sıvılar liflerin etrafını sarmaktadır [74-76].

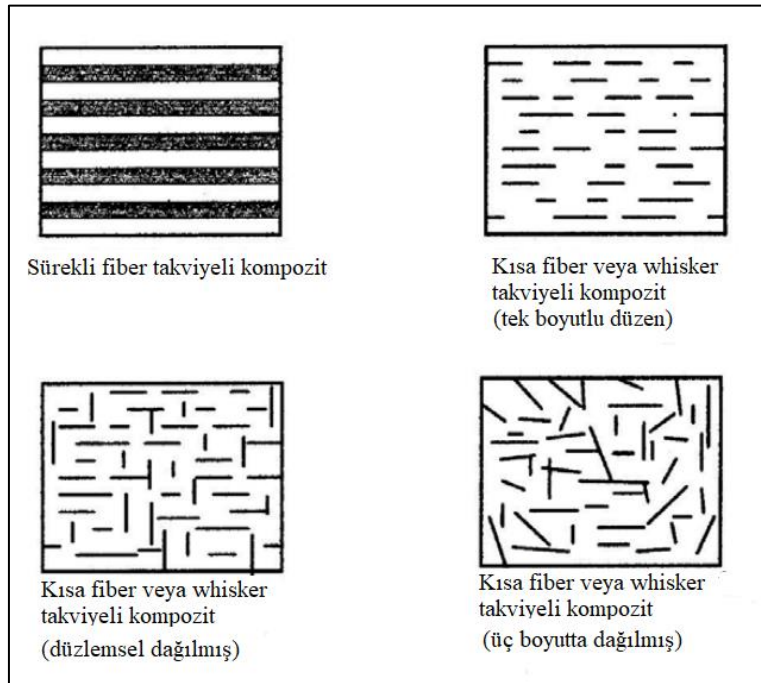
Metal matrisli kompozitlerin matris elemanı olarak çoğunlukla alüminyum (Al), magnezyum (Mg), bakır (Cu) olabilirken tungsten, molibden veya kurşun gibi metallerde olabilir. Bu sınıfta takviye oranı yaklaşık hacimce %50 oranında olmaktadır. Alüminyum matrisli kompozit yapılar uzay, havacılık ve otomotiv endüstrisinde oldukça sık kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet, uygun sertlik, kontrollü termal genleşme ve aşınmaya karşı direnç için SiC ve Al_2O_3 gibi takviye elemanları ile birleştirilip kullanılmaktadır [77,78]. Bu sınıftaki kompozitlerin genellikle yüksek sertlik ve aşındırıcı yapıları olmaktadır. Bu yüzden metal matrisli kompozitlerin işlenmesi hem maliyetli hem de takım

aşınması nedeniyle oldukça zordur. Bu yüzden bu kompozitlerin işlenmesinde geleneksel olmayan işleme yöntemleri kullanılmaktadır [79].

3.1.2. Takviye elemanına göre kompozitlerin Sınıflandırılması

Takviye elemanına göre kompozitler 3 başlık altında toplanabilir. Bunlar polimer fiber takviyeli, partikül takviyeli ve tabakalı kompozitler olarak ayrılırlar.

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde cam, bazalt, aramid, karbon gibi sentetik liflerin kompozit malzeme içinde düzenli ve sürekli veya süreksiz olarak meydana gelmesiyle oluşmaktadır [80-82]. Kompozit içerisinde dağılan bu lifler sayesinde yüksek mukavemet, yüksek sertlik, korozyona aşınmaya ve sıcaklığa dirençli yeni malzemelerin geliştirilmesine olanak tanınmıştır. Günümüzde doğal elyaf takviyesinin kullanımı hususunda araştırmacıların çalışmaları büyük bir ivme kazanmıştır. Gelişmiş darbe tokluğu ve yorulma mukavemeti gösteren kimyasal olarak işlenmemiş doğal lifler ucuz ve bol miktarda bulunurken biyolojik olarak parçalanabilmektedir [83].

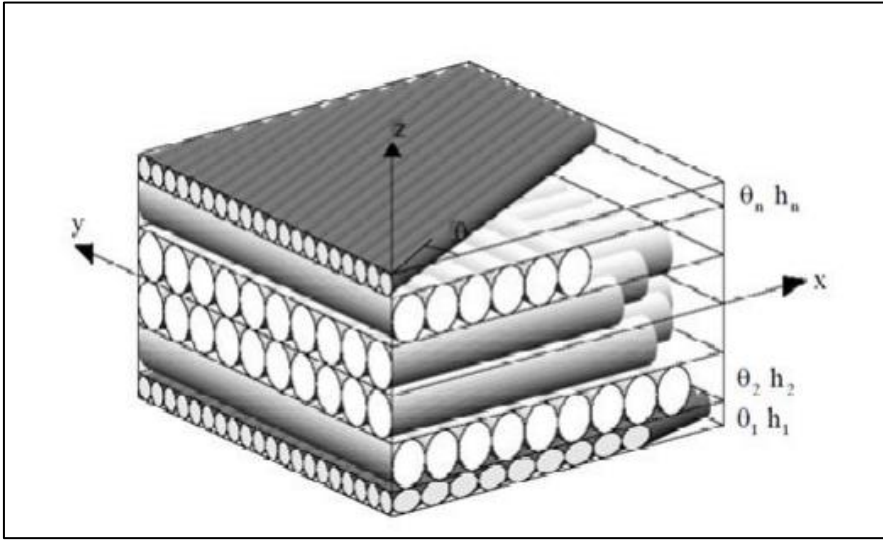


Şekil 3.2. Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi [84]

Partikül takviyeli kompozitler fiber takviyeli kompozitlere kıyasla güçlendirme anlamında daha az etkilidir. Bunun sebebi ise partikül yapısı sebebiyle yük iletiminde daha

kesikli ve süreksiz yapıya sahip olması söylenebilir. Partikül takviyeli kompozitler daha çok aşınma direncini arttırmak için kullanılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozitlerin en önemli avantajı, düşük maliyetleri, üretim ve şekillendirme kolaylığıdır [85,86].

Tabakalı kompozitler aynı yönde veya farklı yönlerde fiberlerden oluşan en az iki tabakadan ve bu tabakaların üst üste konularak bir araya getirilmesiyle oluşurlar. Bu tabakalarda kullanılan malzeme yelpazesi oldukça geniştir. Metal, cam, ahşap veya plastikler tabaka malzemesi olarak kullanılabilirler. Tabakalı kompozitlerin en büyük avantajı yükleme yönüne ve tipine bağlı olarak tasarlanabilmeleridir.



Şekil 3.3. Tabakalı kompozitin şematik gösterimi [87]

3.1.3. Ölçeğe göre kompozitlerin sınıflandırılması

Ölçeğe göre kompozitler başlığı altında makro ölçek ve nanokompozitler olarak ikiye ayrım söz konusu olabilir. Geleneksel olarak da tabir edilen makro ölçek kompozitler diğer sınıflandırmalarda anlatılmıştır. Bu bölümde nanokompozitlerden bahsedilmiştir.

Diğer alt başlıklarda da anlatılan kompozitlerin özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha verimli hale getirilmesi için nanokompozitler adı verilen ve nano boyutta iki veya daha fazla farklı malzemenin birleştirilmesi ile elde edilen kompozitlerdir. Bir kompozite nanokompozitler denilebilmesi için içinde bulunan fazlardan en az birinin 100 nm'den düşük bir boyuta sahip olması gerekmektedir. Nanokompozitlerin geliştirilmesinin arkasında yatan sebep nano ölçekteki malzemelerin eşsiz özelliklerinden faydalanıp benzeri görülmemiş yeni

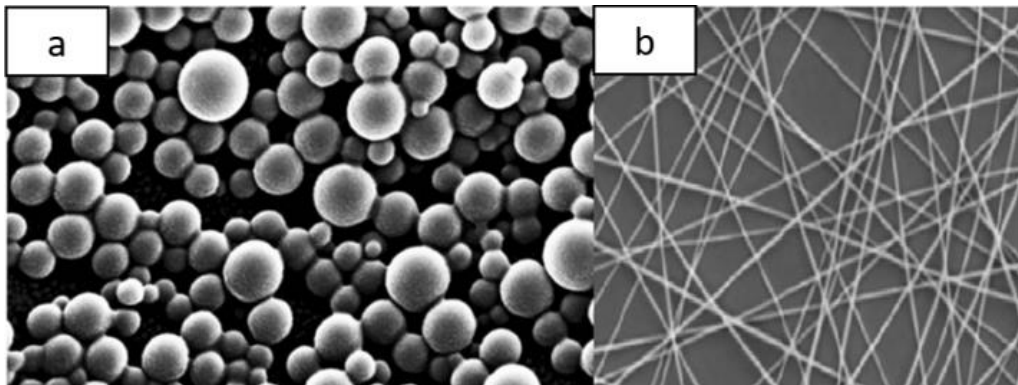
malzemeler oluşturma isteğinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu nano boyuttaki malzemelerin yüksek spesifik yüzey alanları nedeniyle geleneksel kompozitlerde kullanılan malzemelerden de oldukça farklıdır. Yüksek spesifik yüzey alanı sayesinde takviye ve katkı malzemesi olarak kullanıldıklarında makro ölçekte yapının özelliklerinde gözlemlenebilir bir etkiye sahip olurlar [88,89]. Örnekleme gerekirse; grafenin eklenmesiyle bir yapının elektriksel iletkenliği iyileştirilebilir [90]. Grafen ile birlikte karbon nanotüp, nano kil gibi birçok nano katkıyla birlikte geleneksel kompozitlerin optik, ısı aşınma direnci ve dayanıklılık gibi birçok özelliği iyileştirilebilir. Resim 3.1’de nanoparçacıkların görüntüleri verilmiştir.

Diğer kompozit malzemeler kıyasla nanokompozitlerin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Yüksek yüzey hacim oranına sahiptirler bu durum küçük dolgu boyutuna ve dolgu malzemeleri arasındaki mesafenin oranında esneklik sağlar
- Daha iyi mekanik özelliklere sahiptirler, aşınmaya karşı dirençli, yüksek tokluk ve dayanım değerleri vardır.
- Boyutları sebebiyle optik özellikleri iyileştirirler.

Diğer kompozit malzemelere kıyasla nanokompozitlerin dezavantajları ise aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Nanokompozitlerin üretimi maliyet verimliliği açısından düşüktür.
- Üretimleri, özellikleri, yapısı, makro yapı ve formülasyonları üzerindeki etkileri üzerindeki belirsizlikler devam etmektedir.



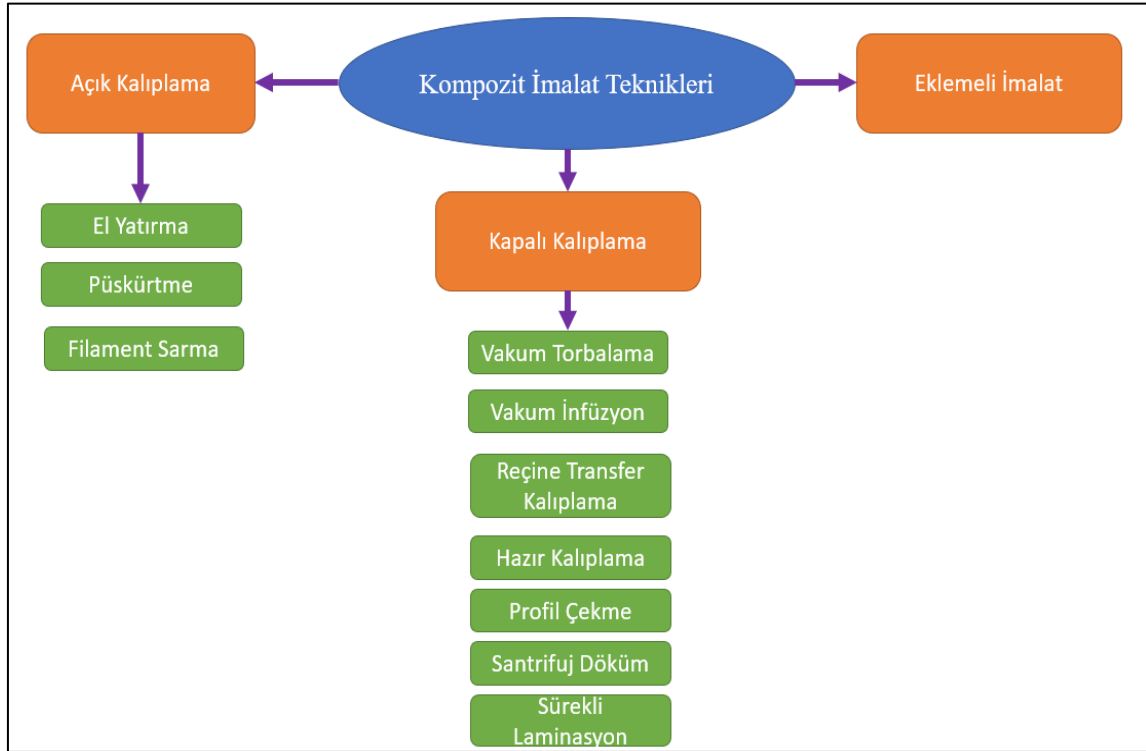
Resim 3.1. Nano yapıların görüntüleri a) nanopartiküller, b) nanofiberler [91,92]

3.1.4. Biyokompozitler

Günümüzde kendiliğinden bozunan çevre dostu malzemelere olan talep araştırmacıları biyokompozitleri geliştirmek için çalışmaya zorlamaktadır. Muz lifi, kayısı lifi gibi doğal lifleri kullanarak, bozulmayan ve hurda haline geldiğinde çevreyi kirleten kompozitlerin yerine yeni kompozit malzemelerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Örneğin nişasta matrisinin içinde hurma liflerinden yapılan kompozit malzemenin termal stabilitede iyi, su penetrasyonuna dayanıklı ve daha sağlam yeni bir malzemeyi oluşturduğu gözlemlenmiştir [93-97]. Bir diğer örnek olarak ise antibakteriyel özelliği bulunan zencefil lifi gıda paketlerinde kullanılarak paketlenen ürünün kalitesini korumasını sağlamaktadır [98].

3.2. Kompozit İmalat Yöntemleri

Kompozitler, farklı teknikler ile üretilmektedir, bazen iki veya daha fazla teknik kullanılarak kompozit üretimi gerçekleştirilebilir [99]. İmalat yöntemleri matris ve fiber elemanlarının tiplerine göre seçilmektedir. Genel olarak imalat teknikleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



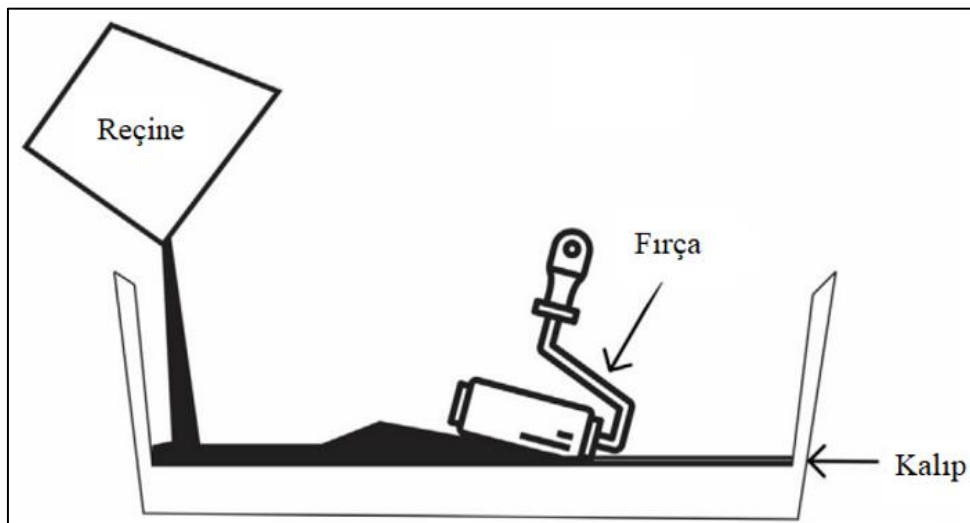
Şekil 3.4. Kompozit imalat teknikleri

Kompozit imalat yöntemleri 3 ana başlık altında toplanabilir bunlar açık kalıplama, kapalı kalıplama ve eklemeli imalat yöntemidir.

Açık kalıplama yöntemlerinde kompozit malzemenin sertleşmesi ve kürleşmesi esnasında yapı açıktadır yani havaya maruz kalmaktadır. Kapalı kalıplama da ise reçine ve takviye elemanının bir kalıp içerisinde ve dış ortamla ilişkisi kesilmiş bir şekilde kürleşmesi sağlanır. Son olarak ise eklemeli imalat yöntemleri, kapalı ve açık kalıplama tekniklerindeki üretimi gerek maliyet gerek ise şekillendirilebilirlik kısıtını ortadan kaldırmak için geliştirilen yeni imalat yöntemidir.

3.2.1. El yatırma yöntemi

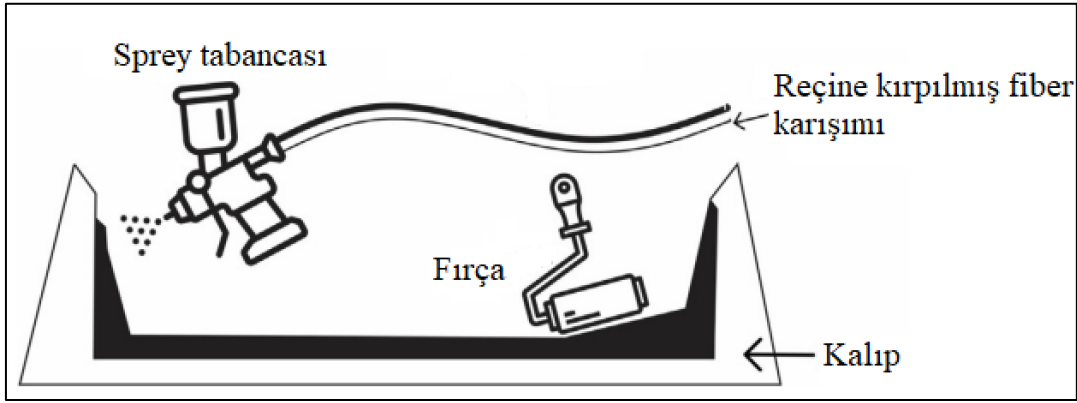
El yatırma yöntemi çok az ekipman ile yapıldığından oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Az ekipman ile yapılmasının getirdiği avantajın yanı sıra üretimi yapan kişinin el becerisine ve tecrübesine çok bağlı bir işlemdir [100]. Bu yüzden uygulamada zorlukları bulunmaktadır. Üretim aşamasında ise ilk olarak kalıba jelkot işlemi uygulanır, ardından kumaşlar ile ardışık olarak reçine sürme uygulaması gerçekleştirilir. Her bir kat için elyaflar el ile serilir ve bir fırça yardımıyla üzerine epoksi sürülür. Bu işlem nihai ürün için elde edilen katman sayısına ulaşılan kadar tekrarlanır. Kürleşme esnasında herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmaz ve oda sıcaklığında kürleşme işlemi gerçekleştirilir. Şekil 3.5'te el yatırma işleminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.5. El yatırma yöntemi [100]

3.2.2. Püskürtme yöntemi

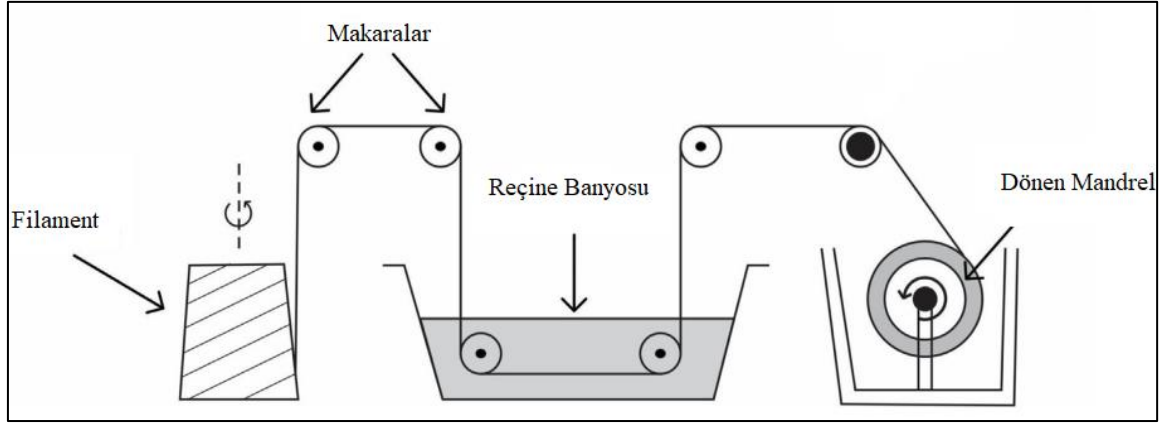
Püskürtme işleminde takviye malzemesi kırılmış fiberlerdir ve bir el tabancası yardımıyla reçineye bulanmış fiberler aynı anda kalıba püskürtülür bir fırça veya rulo yardımıyla püskürtülen reçine ve fiberler kalıp üzerinde dağıtılır. Şekil 3.6'da püskürtme yöntemi gösterilmiştir. Reçine ve fiberler daha sonra oda sıcaklığında kürleşmeye bırakılır. El yatırma işlemine göre özellikle kompleks kalıp yüzeyleri için püskürtme yöntemi daha hızlı bir yöntemdir. Yerinde imalata izin veren bu yöntem ile üretilen yapının kalınlıkları ve işin düzgünlüğü yapan kişiye bağlıdır. Bu yüzden bu işlem için otomatikleşmiş sistemler geliştirilmiştir [101].



Şekil 3.6. Püskürtme yöntemi [102]

3.2.3. Elyaf sarma yöntemi

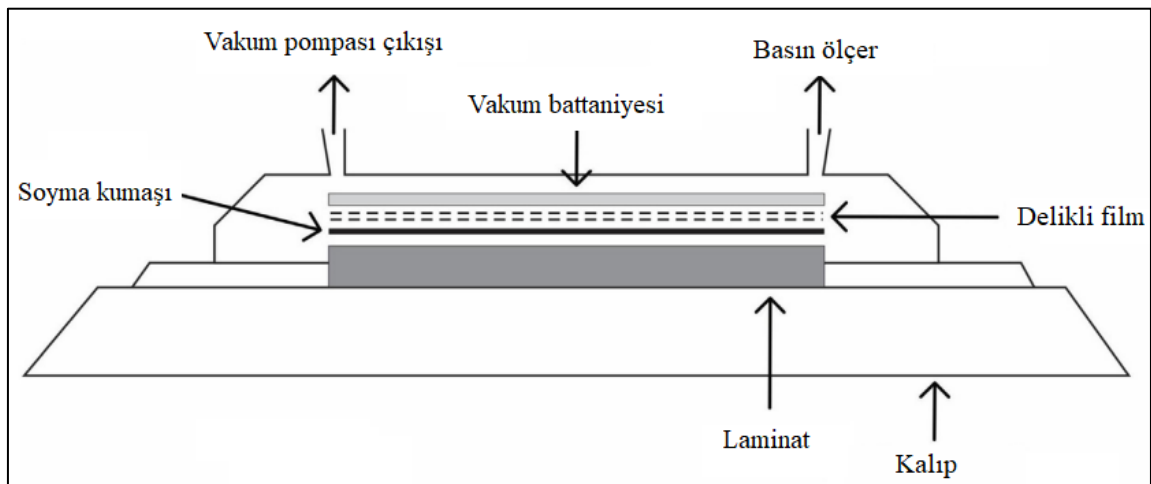
Kalıp olarak dönen mandrel kullanılan bir açık kalıplama işlemi olan elyaf sarma yöntemi Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Sürekli bir makaradan çekilen ve takviye olarak kullanılan filamentler reçine banyosu içerisinde geçirilerek ıslatılır ve mandrele sarılır. Burada mandrel kalıp olarak kullanılır [103]. Gerekli miktarda filament katı oluşturulduktan sonra kürleşme işlemine tabi tutulur ve kalıp olarak kullanılan mandrel çıkarılarak son ürün elde edilir. Bu yöntem elde edilen ürünlerin yüksek çekme mukavemetine ve yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olmalarını sağlar. Otomatik olarak gerçekleştirilen bir süreçtir genellikle içi boş silindirik yapıların üretilmesinde kullanılır [104,105].



Şekil 3.7. Elyaf sarma yöntemi [106]

3.2.4. Vakum torbalama yöntemi

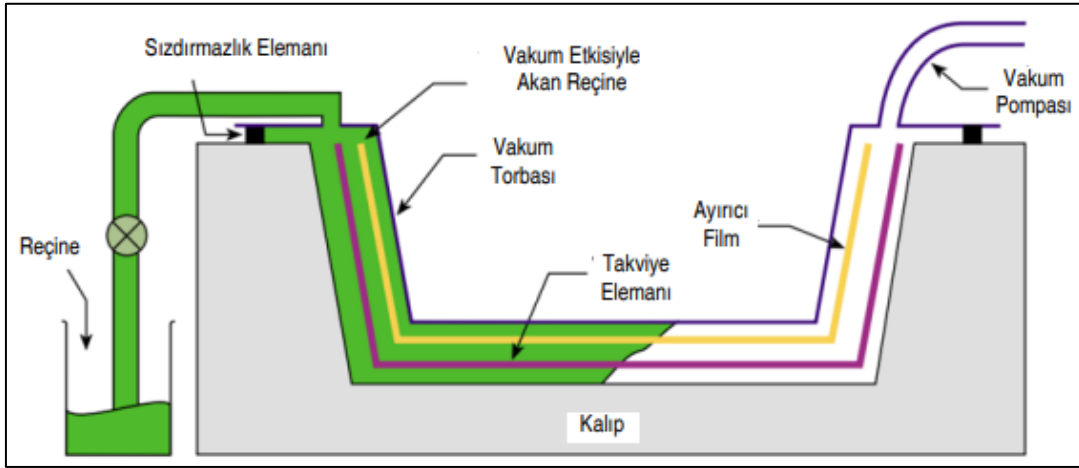
Serim ve reçine ile ıslatma işlemi gerçekleştirildikten sonra ince esnek bir film kullanılarak (bu naylon, PVA veya polietilen film olabilir) kalıp ve ıslatılmış liflerin üzeri kaplanır. Ardından sızdırmazlık bantlarıyla sistem, dış ortamdan tamamen ayrılır. Oluşturulan kapalı ortam bir pompa yardımıyla vakumlanır dış hava basıncının da sayesinde ıslatılmış fiberler üzerine basınç uygulanır. Böylece kurulum içindeki fazla reçine ve kusur olarak sayılabilecek hava kabarcıkları sistemin dışarısına çıkarılır [107,108]. Bu işlem sayesinde el yatırma yönteminde elde edilen fiber hacim oranlarının artması sağlanır ve daha sağlam, daha az boşluklu kompozitler üretilir.



Şekil 3.8. Vakum torbalama yöntemi [109]

3.2.5. Vakum infüzyon yöntemi

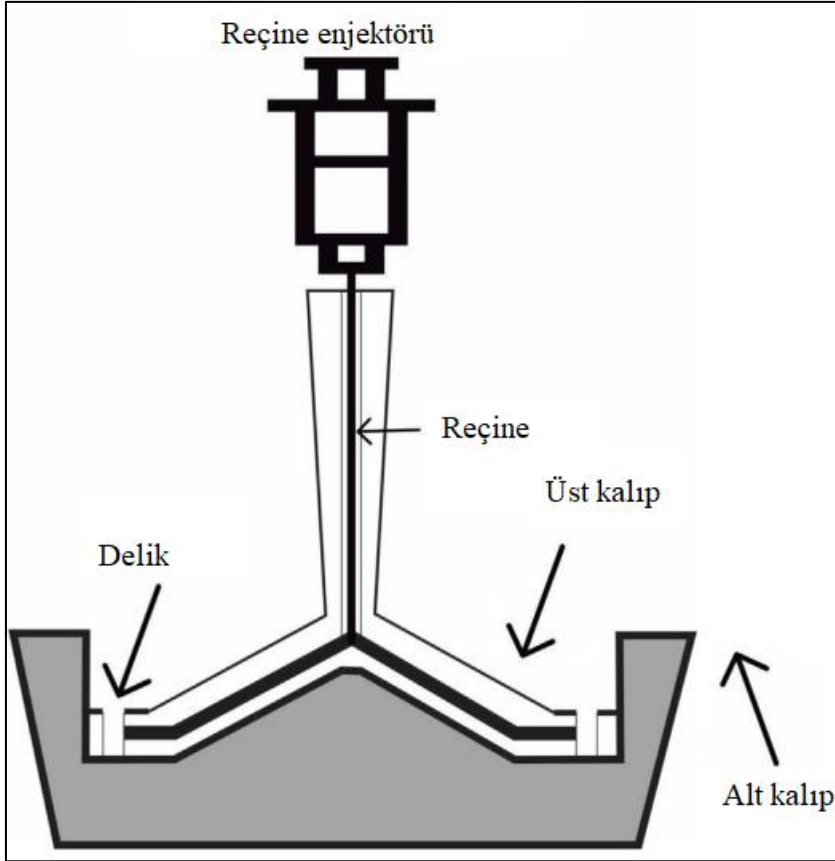
Elyafar vakum ortamından reçine ile ıslatıldığından dolayı vakum torbalama işleminden farklıdır. Bu üretim yönteminde elyafar kalıba yerleştirilir üzerine soyma kumaşı, akış filesi ve vakum hortumları konulur reçine giriş ve çıkış hatları oluşturulduktan sonra sistem içerisinde vakum sağlanır. Vakum ortamı sağlandıktan sonra giriş hattından reçine vakum yardımıyla çekilerek fiberler ıslatılır. Sistem içerisindeki vakum kalıba basınç uygular ve kurulumu sıkıştırır. Böylece fazla reçine ve hava kabarcıkları vakum yardımıyla kapalı sistemden uzaklaştırılarak daha yüksek fiber hacim oranlarına sahip kompozitler elde edilir [107,110].



Şekil 3.9. Vakum infüzyon yöntemi [111]

3.2.6. Reçine transfer kalıplama yöntemi

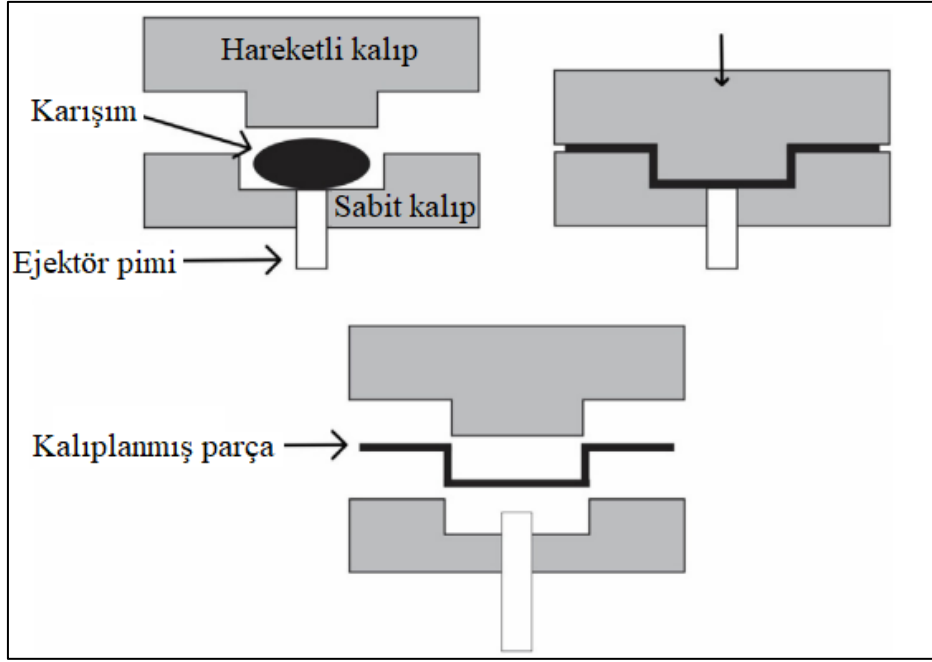
Kuru takviye elemanına enjeksiyon ekipmanı yardımıyla reçine basınçlandırılarak enjekte edilir. Bu yöntemde alt ve üst kalıp olmak üzere iki kalıp kullanımı mevcuttur. Bu gereksiniminden dolayı vakum infüzyon yöntemine göre daha pahalı bir yöntemdir. Fiberlerin dizilim ve yönlenme kombinasyonlarına esneklik sağlar [112]. Ayrıca daha yüksek basınç ve iki kalıp kullanımından dolayı kalınlıkları daha homojen ve yüzeyi daha düzgün kompozitlerin üretimine olanak tanır.



Şekil 3.10. Reçine transfer kalıplama yöntemi [112]

3.2.7. Hazır kalıplama yöntemi

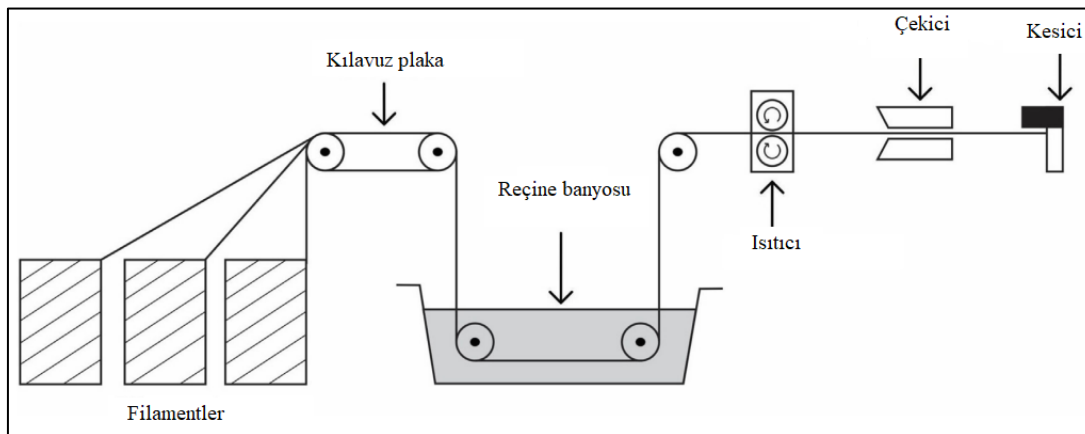
Basınçlı kalıplama yöntemi hızlı bir kürleşme süresine sahip ve yüksek basınç kullanarak yüksek hacimli üretim yapılabilen bir yöntemdir. Özellikle karmaşık geometriye sahip fiber takviyeli polimer parçalar için kullanılmaktadır. Yaklaşık 120-200 °C sıcaklıkta hidrolik sistem ile basınçlandırılan metal kalıplar kullanılmaktadır. Kalıplanacak malzeme tipine bağlı olarak çeşitli hazır kalıplama yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar; saç hazır kalıplama, yığın hazır kalıplama, ıslak sistemli preform presleme ve takviyeli termoplastik levha preslemedir [113].



Şekil 3.11. Hazır kalıplama yöntemi [113]

3.2.8. Profil çekme yöntemi

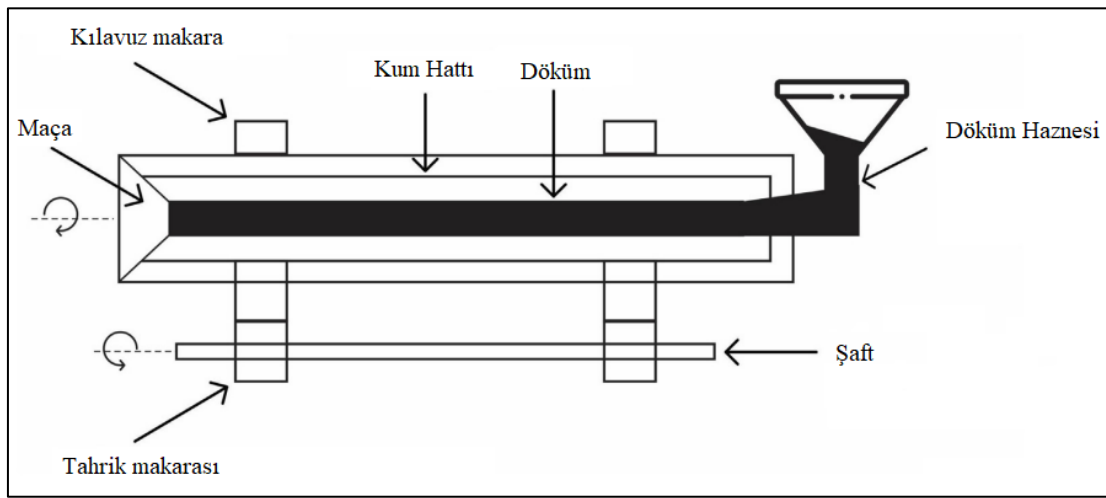
Profil çekme yani pultrüzyon yöntemi fiber takviyeli kompozitler için kullanılan bir yöntemdir. Yalnızca Sabit kesitli ve ölçeklenebilen kompozitlerin üretilmesi durumu söz konusudur [114,115]. Karmaşık kesit alanlarına sahip kompozitlerin üretimine de olanak sağlayan bu üretim yöntemi sürekli bir süreçtir. Bir çekici vasıtasıyla reçine banyosuna daldırılan sürekli elyaf şeritleri çelik bir kalıptan çekilir. Çekilen kısmın şeklini alması için metal kalıplar ısıtılır ve kalıp çıkışında reçine bakımından doygunluğa ulaşmış fiberlerin şekil alması sağlanır [116,117].



Şekil 3.12. Profil çekme yöntemi [118]

3.2.9. Santrifüj döküm yöntemi

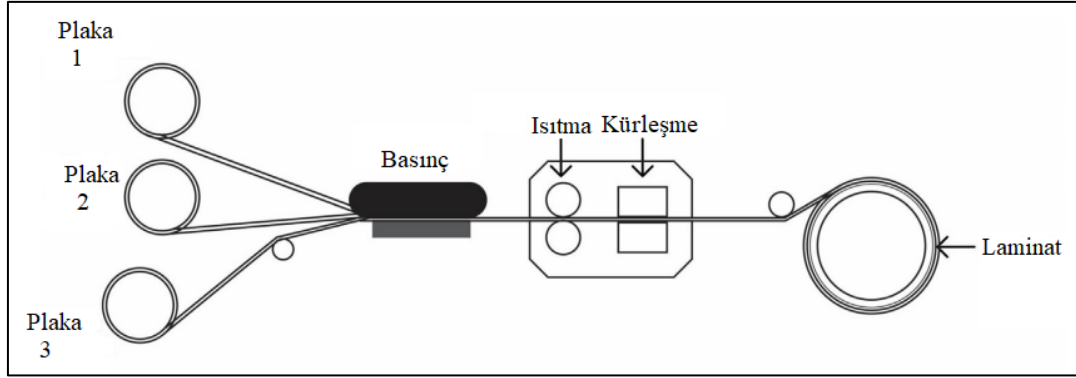
Santrifüj döküm yönteminde matris ve takviye elemanı dönen silindirik bir kalıbın yüzeyinin içindedir. Kalıbın dönmesiyle oluşan merkezkaç kuvveti, karışım kürlenene kadar devam eder ve bu kuvvet sayesinde matris ve takviye elemanı kalıbın iç yüzeyinde kürleşir. Şekil 3.13'te gösterildiği gibi ergiyik matris elemanı kalıp boşluğuna yerleşen hazneye dökülür. Örneğin bu yöntem alüminyum matris içinde TiB_2 nanopartikülleri üretilirken düşük partikül hacminin arttırılmasını sağlamak için kullanılır [119-121].



Şekil 3.13. Santrifüj döküm yöntemi [122]

3.2.10. Sürekli laminasyon yöntemi

Opak, yarı saydam düz panel benzeri ürünler sürekli laminasyon yöntemi ile üretilmektedir. Matris ve takviye elemanı plastik bir film üzerinde birleştirilir. Sıkıştırma silindirleri vasıtasıyla basınç uygulanır. Basınç sayesinde sıkışan takviye ve reçine arasındaki hava dışarı atılır. Ardından fırın ve ısı yardımıyla kürleşme işlemi gerçekleştirilir. Kürleşme sonrası elde edilen paneller bir silindir üzerine sarılarak laminat levhalar şeklinde saklanır [123]. Daha sonra istenilen uzunluklarda kesilirler. Şekil 3.14'te sürekli laminasyon işlemi gösterilmiştir.



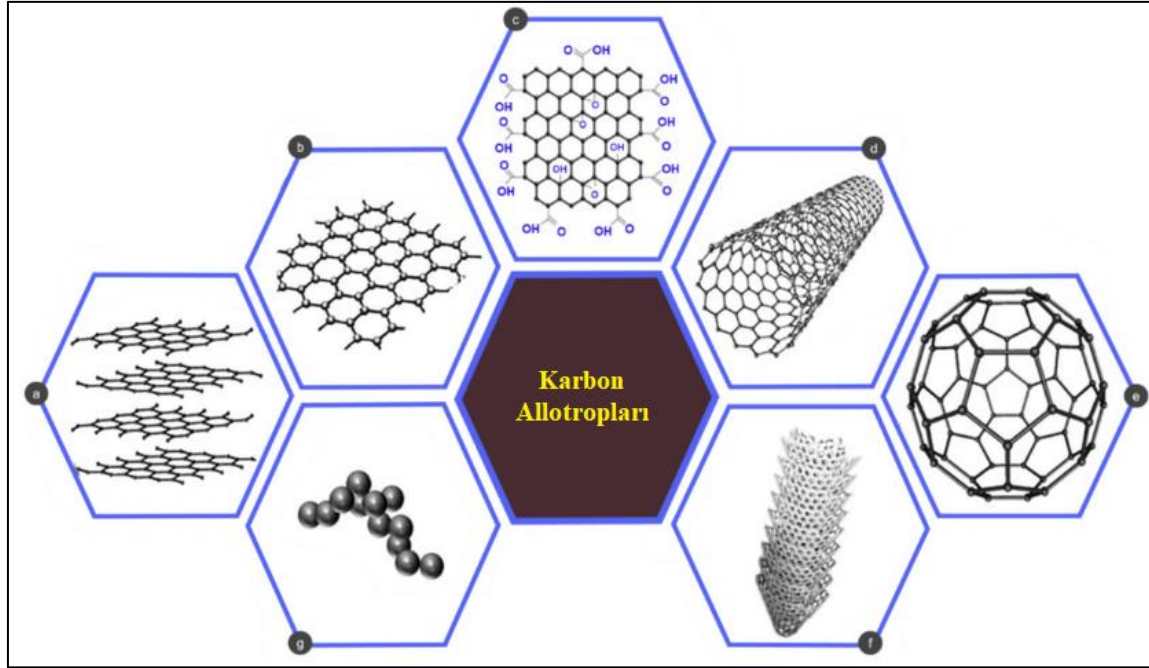
Şekil 3.14. Sürekli laminasyon yöntemi [123]

3.2.11. İleri imalat yöntemi

Geleneksel kompozit imalat yöntemlerinde şekillendirilebilirliği sınırlayan, işleme maliyetleri yüksek ve karmaşık yapılar söz konusu olduğundan sınırlayıcı birtakım zorluklar bulunmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için kompozit yapıların katman katman işlendiği imalat yöntemi olan eklemeli imalat yöntemi kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yönteminin geleneksel yöntemlere kıyasla ön plana çıkaran özelliği fiber hacmi ve yönü seçiminde esneklik sağlıyor olmasıdır. Geleneksel yöntemler ile üretilen kompozitlerde elde edilen zayıf özellikler eklemeli imalat yöntemi kullanılarak iyileştirilebilir [124].

3.3. Grafen

Karbonun allotropik türleri olan karbon nanotüp fulleren ve grafendir. Karbonun tüm allotropik formları Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Grafen 2004 yılında Andre Geim ve Konstantin Novoselov tarafından iki boyutlu grafen üzerine yaptıkları incelemeler sayesinde geliştirilen karbon iyonlarının tek tabakalı petek türüdür. Bu çalışma sayesinde 2010 yılında Nobel Fizik ödülü kendilerine verilmiştir [125]. Keşfedilişinden bu yana bilimsel ve endüstrideki çalışmalar hız kazanmıştır.



Şekil 3.15. Karbon allotropları a) grafit, b) grafen, c) grafen oksit, d) karbon nanotüp, e) fulleren, f) karbon nanofiber, g) karbon top [126]

Grafen kullanımı son zamanlarda büyük ölçüde yaygınlaşmıştır. Bunun nedeni içinde eşsiz özelliklere sahip olmasının oldukça büyük bir katkısı bulunmaktadır. Grafenin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Grafenin genel özellikleri [127]

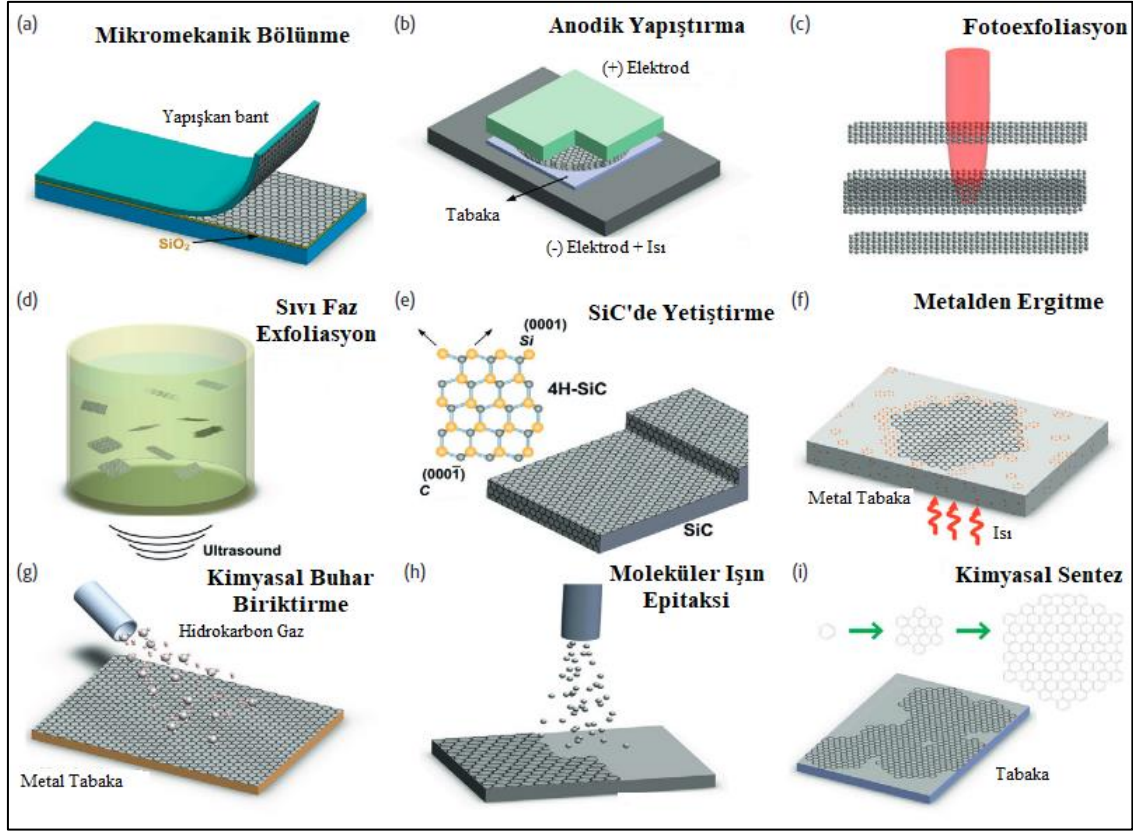
Özellik Çeşidi	Yüzey Düzlemindeki Özellikleri	Düzleme Dik Yöndeki Özellikleri
Termal İletkenlik (watt/m-K)	3000	6
Termal Genleşme (m/m/dg-K)	$4-6 \times 10^{-6}$	$0.5-1 \times 10^{-6}$
Çekme Modülü (GPa)	1000	-
Çekme Dayanımı (GPa)	5	-
Elektrik İletkenlik (siemens/m)	107	102

Karbon nanotüpler ve grafen özellikleri bakımından her ne kadar birbirlerine benzeseler de karbon nanotüpler toksiklik ve üretim maaliyeti olarak dezavantajlı bir malzemedir [128,129]. Örneğin karbon nanotüpler insan vücudunda olması durumunda hücre ölümünü tetikleyebileceği, insan DNA yapısının bozulmasına sebep olacağı ve ciltte ve iç organlarda tahribata yol açabileceği bildirilmiştir [130,131]. Ayrıca grafen metal kalıntılarından arındırılmıştır bu sebeple karbon nanotüplere göre daha biyouyumlu bir malzemedir [132]. Grafen karbon nanotüplere nazaran daha yüksek yüzey alanlarına sahiptir. Ayrıca grafen 2 boyutlu yapısı ve yüksek mekanik mukavemet değerleri, olağanüstü ısı ve elektrik iletkenliğe sahip olması ve mükemmel esnekliği sayesinde karbon nanotüpten sonra keşfedilmesine rağmen ondan daha fazla dikkat çekmektedir [133].

Grafen bazlı malzemeler, enerji, giyilebilir teknoloji, tıp, tarım, sağlık, havacılık, otomotiv, denizcilik gibi pek çok uygulama alanında kullanılmaktadır. Ayrıca bulunan yüzyılda ihtiyaç duyulan yeni malzeme ihtiyaçları grafen bazlı polimer kompozitler ile önemli ölçüde karşılanabilir [134]. Özellikle güneş pilleri, Li-ion piller ve mikrobiyal yakıt hücreleri, yenilenebilir ve yeşil enerjide grafen / polimer kompozitin uygulanmasının önemli örnekleridir. Ek olarak, grafen / polimer kompozit malzemelerden geliştirilen sensörler ile insan vücut ısısı, kan basıncı ve kalp atış hızı kolayca izlenebilir. Ayrıca, bu malzemeler ilaç dağıtım sistemlerinde, gen terapisinde, doku mühendisliğinde ve yapay kemiklerde, biyogörüntüleme ve potansiyel kanser terapilerinde başarıyla kullanılabilir [135-141].

3.3.1. Grafen üretim yöntemleri

Kuru veya mekanik exfoliasyon yöntemleri mikro mekanik bölünme, anodik yapıştırma ve fotoexfoliasyon olarak alt başlıklara ayrılır. Mikro mekanik bölünme olarak adlandırılan üretim biçimi bir bant yardımıyla tabakaları yüksek derecede düzenli pirolitik grafit yüzeyinden ayırmaktır. Bantlar yüzeye bastırılır ve ardından yavaşça çekilir [142]. Çok sayıdaki tekrardan sonra grafit tabakası tek bir grafen tabakası kalana kadar inceltirilir. Diğer bir yöntem olan anodik yapıştırma yöntemini gerçekleştirmek için grafit bir cam plaka üzerine bastırılır ve yüksek gerilim uygulanır. Daha sonra plaka ısıtılır. Bu işlem sırasında grafit elektrostatik etkileşim sayesinde cama yapışır. Daha sonra camdan grafen olarak çıkarılır. Fotoexfoliasyonda ise grafen elde etmek için lazer enerjisi kullanılır. Ayrıca lazer enerjisi ile grafenlerin katman sayılarını belirlemek mümkün olabilir. Grafen parçacıklarının oksitlenmemesi için genellikle vakum altında yapılmaktadır [143].



Şekil 3.16. Karbon allotropları a) mikro mekanik bölünme, b) anodik yapıştırma, c) fotoexfoliasyon, d) sıvı faz exfoliasyon, e) SiC’de yetiştirme, f) metalden ergitme, g) kimyasal buhar biriktirme, h) moleküler ışın epitaksi, i) kimyasal sentez [141]

Sıvı Faz exfoliasyonu üretim yönteminde grafit sıvı ortamında pul pul olup dökülebilir ve grafenleri oluşturabilir. Bu işlem üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak grafit çözücü bir sıvının içine bırakılır daha sonra çözücü sıvı grafitin ayrışmasını sağlamaya başlar. Ayrışmayan grafiti de ayırtmak için de sonikasyon veya ultra-santrifüzleme işlemleri kullanılarak grafenin üretimi sağlanır.

SiC’de yetiştirme işleminde SiC vakum altında 1000 °C sıcaklığın üstünde ısıtılarak yapısındaki Si’inin buharlaşmasıyla C atomları yüzeyde kalır. Daha sonra tavlama işlemi gerçekleştirilerek grafen yapısı oluşturulur. SiC’de yetiştirme işlemine aynı zamanda epitaksiyel yetiştirme adı da verilmektedir.

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ise birçok katı, sıvı ve gaz fazındaki malzemelerin kristal filmlerini biriktirmek veya yetiştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Birçok kimyasal biriktirme yöntemi bulunmaktadır bunlar termal, plazma ile güçlendirilmiş, sıcak

veya soğuk duvar işlemleri olarak ayrılabilir. Bu yöntemler elde edilmek istenen malzemenin kalınlığı, boyutu ve kalitesine göre seçilir.

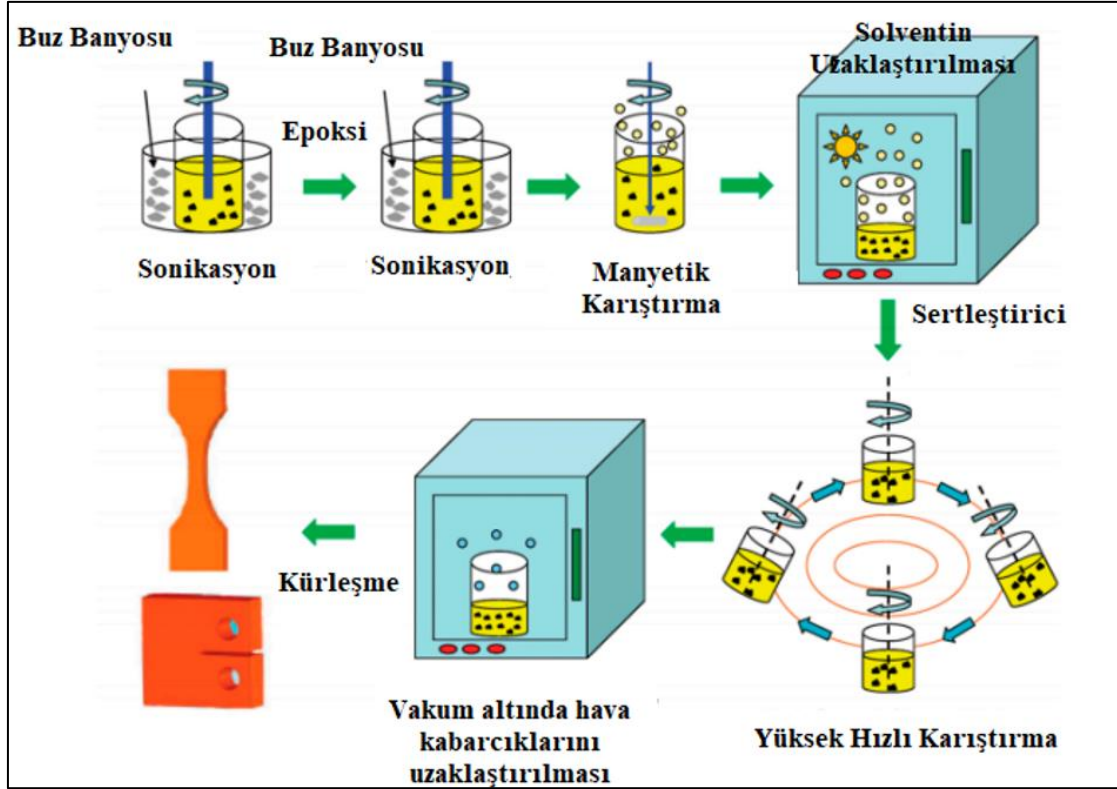
Moleküler ışın epitaksi yöntemi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bileşik ve yarı iletkenlerin biriktirilmesi için kullanılan bu yöntem özellikle karbon atomlarının büyütülmesi için oldukça uygundur. Yüksek sıcaklıklar altında çeşitli substratlar üzerinde yüksek saflıkta karbon kaynakları ile grafit katmanları büyütülür [144].

3.4. Polimer Matrisli Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozitler için nanopartiküllerin karıştırılması oldukça önemli bir husustur. Zira uygun karıştırma işlemi sağlanamazsa üretilen kompozitlerde kusurlar oluşmakta ve kompozitler de istenilen özellikler elde edilemeyebilir. Bu bölümde, en çok kullanılan yöntemler olan çözelti karıştırma, eriyik karıştırma ve In-Situ polimerizasyon işleminden bahsedilecektir.

3.4.1. Çözelti karıştırma

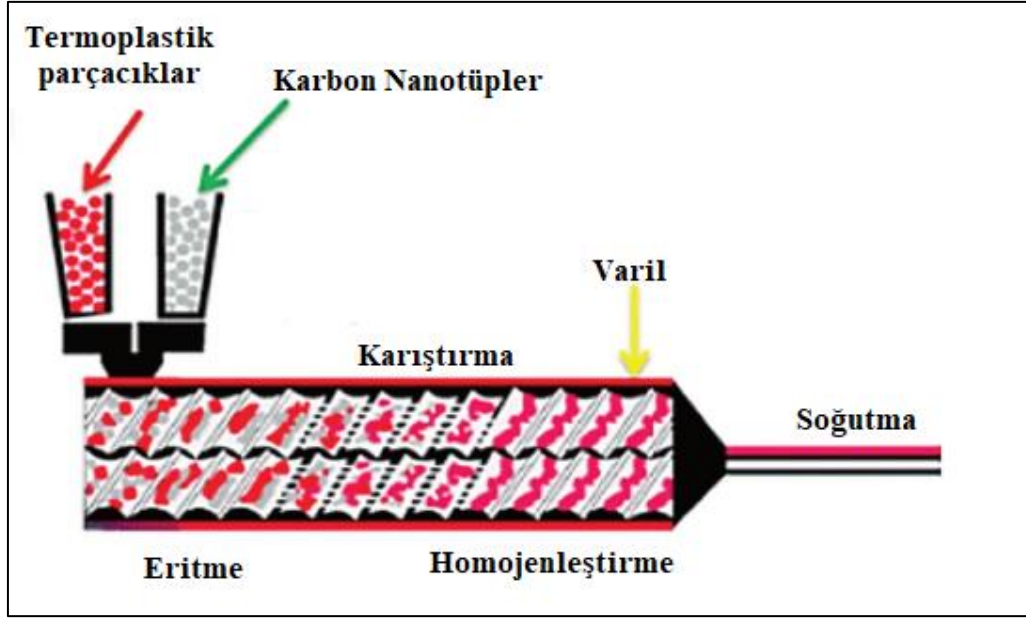
Çözelti karıştırma, dolgu maddelerinin yani nanopartiküllerin çözücülerdeki çözünürlüğüne göre sonikasyon ve mekanik olarak kesme işlemiyle polimer çözeltilerine dağıtılması işlemidir [22]. Şekil 3.17’de grafenin polimer çözeltilerine dağıtılması sürecinin bir örneği gösterilmiştir. Birçok polimer, çözelti karıştırma yönteminde kullanılabilir. Bu yüzden uygulama alanı oldukça geniştir. Bu yöntemin dezavantajları da vardır. Örneğin nanopartiküller polimerler içinde dağıtılırken genellikle toksik çözücüler eklenir. Bu çözücülerin sistemden çıkarılması üretim boyutları kısıtlamaktadır [145,146].



Şekil 3.17. Çözelti karıştırma işlemine ait örnek bir çalışma [22]

3.4.2. Eriyik karıştırma

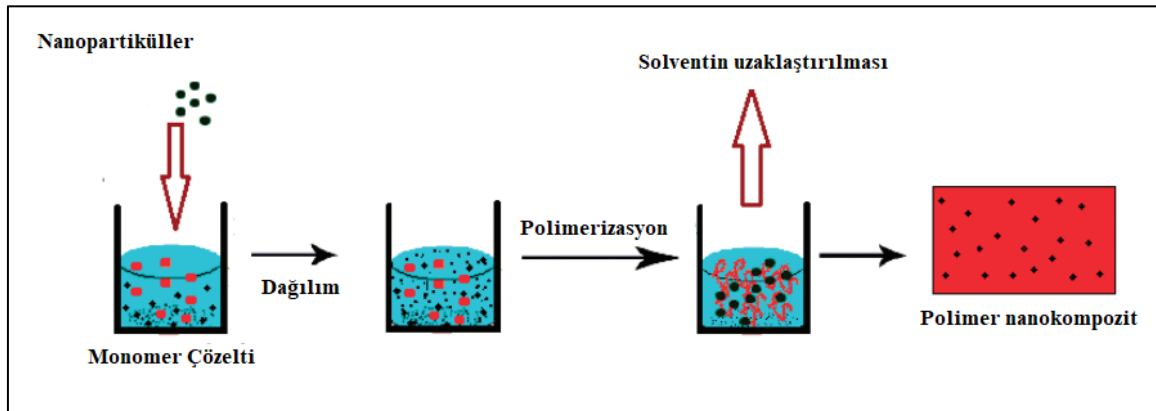
Bir termoplastik matrisin nanokompozitlerini hazırlamak için eriyik karıştırma tercih edilen bir yöntemdir. Genellikle bu yöntemde polimer eritilir ve karıştırılmak istenen nanopartikül ile birleştirilir. Eriyik harmanlama, argon nitrojen gibi asal gazların bulunduğu ortamda gerçekleşir [147]. Bu yöntemde alternatif olarak polimerler ile katı olarak da karıştırılabilir ve ardından ısıtılarak karıştırılmaya devam edilir. Karıştırma esnasında yeterli kesme kuvveti uygulaması gerekir. Eriyik harmanlama yöntemi içinde çözücülerin kullanılmaması sebebiyle diğer yöntemlere kıyasla çevreye oldukça zararsız bir yöntemdir.



Şekil 3.18. Eriyik karıştırma işlemi [148]

3.4.3. In-situ polimerizasyonu

Grafenlerin karıştırılmasında oldukça sık kullanılan bu yöntem, öncesinde bir karıştırma veya dağıtım olayı olmaksızın In-Situ polimerizasyon yöntemi kullanılarak polimerler içinde iyi bir şekilde dağıtılabılır. In-Situ polimerizasyon işleminde polimer matrisi ve katkı partikülleri arasında güçlü etkileşimler meydana gelir. Organik olarak değiştirilmiş partikül, sıvı bir monomer çözeltisi içinde yetiştirilir. Polimerizasyon işlemi ısı veya radyasyon yardımıyla uygun bir başlatıcının ortama katılmasıyla başlatılabilir [149].



Şekil 3.19. In-Situ polimerizasyon işlemi [150]

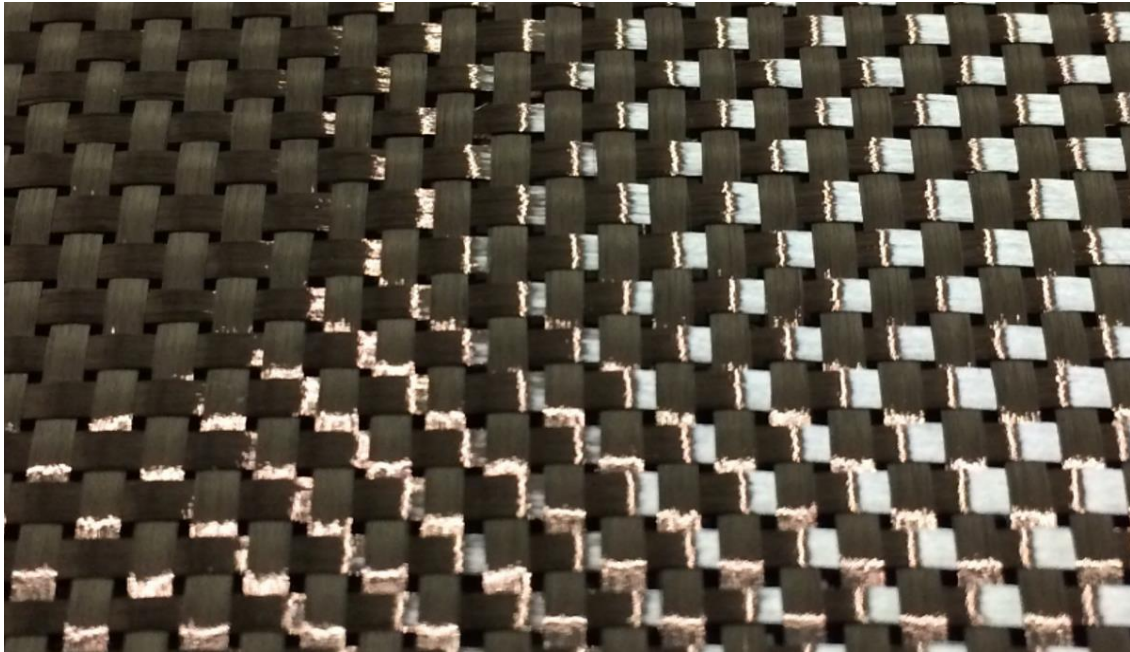
4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde ilgili tez kapsamında kullanılan üretim ekipmanları, kullanılan test cihazları, yapılan test detayları, uygulanan üretim tekniği ve kullanılan malzemeler anlatılmıştır.

4.1. Malzeme

Bu tezde üretilen kompozit plakalarda takviye elemanı olarak karbon fiber elyaf, matris elemanı olarak epoksi ve katkı elemanı olarak ise grafen nanotoz kullanılmıştır.

Karbon fiber grafit fiber olarak da bilinen bir polimerdir. Karbon fiber malzemeyi güçlendirmek için kullanılan ince, güçlü kristal karbon filamentlerinden yapılmıştır. Karbon fiber, çok incedir gücünü ise iplik gibi büküldüğünde alır. Daha sonra ise birlikte dokunarak kumaş şeklinde oluşturulabilir. Karbon fiber cam ve aramid gibi diğer malzemelere kıyasla daha yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Ayrıca yorulma direnci ve korozyon değerleri diğer fiberlere göre de oldukça iyidir. Tek dezavantajı ise karşılaştırılan malzemelere göre daha pahalı oluşu ve daha kırılgan bir malzeme oluşudur. Kullanılan Karbon fiber elyaf, 200 gr/m² yoğunluğa sahip kumaş olup Dost Kimya firmasından temin edilmiştir. Kullanılan karbon fiberin özellikleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Çalışmada kullanılan karbon elyaf kumaşın görüntüsü

Çizelge 4.1. Kullanılan karbon elyafın teknik özellikleri

Karbon Fiber Elyaf (E HTA 40 3k)	
Elyaf çapı (μm)	7
Yoğunluk (g/cm^3)	1,76
Ağırlık (g/m^2)	200
Elastisite Modülü (GPa)	238
Çekme Dayanımı (MPa)	3950
Kopma Uzaması (%)	1,7

Poliepoksitler olarak da bilinen epoksi reçineler, epoksit grupları içeren bir reaktif polimer sınıfıdır. Epoksi termoset reçine grubunda olup kimyasal direnci yüksek, mekanik özellikleri iyi ayrıca yapılardaki süreksizliği ortadan kaldırdığı için gerilme yığılmalarını önleyen ve iyi bağlama özelliklerine sahip olması nedeniyle, yapıştırma maksadıyla da kullanılan bir üründür. Bu çalışma da Dost Kimya firmasından temin edilen Hexion firmasının ürünü olan MGS LR285 epoksi reçine ve MGS LH285 sertleştirici ikilisi kullanılmıştır. Kullanılan reçinenin teknik özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiş olup Çizelge 4.3’te de kullanılan sertleştiricinin teknik özellikleri verilmiştir.



Resim 4.2. Çalışmada kullanılan epoksi ve sertleştiricinin görüntüsü

Çizelge 4.2. Kullanılan reçinenin teknik özellikleri

MGS LR285 Epoksi	
Yoğunluk (g/cm^3)	1,18-1,20
Elastisite Modülü (GPa)	3-3,3
Çekme Dayanımı (MPa)	70-80
Basma Dayanımı (MPa)	120-140
Kopma Uzaması (%)	5,0-6,5
Eğme Dayanımı (MPa)	110-120
Darbe Dayanımı (kJ/m^2)	45-55
Viskozite (mPA.s)	600-900

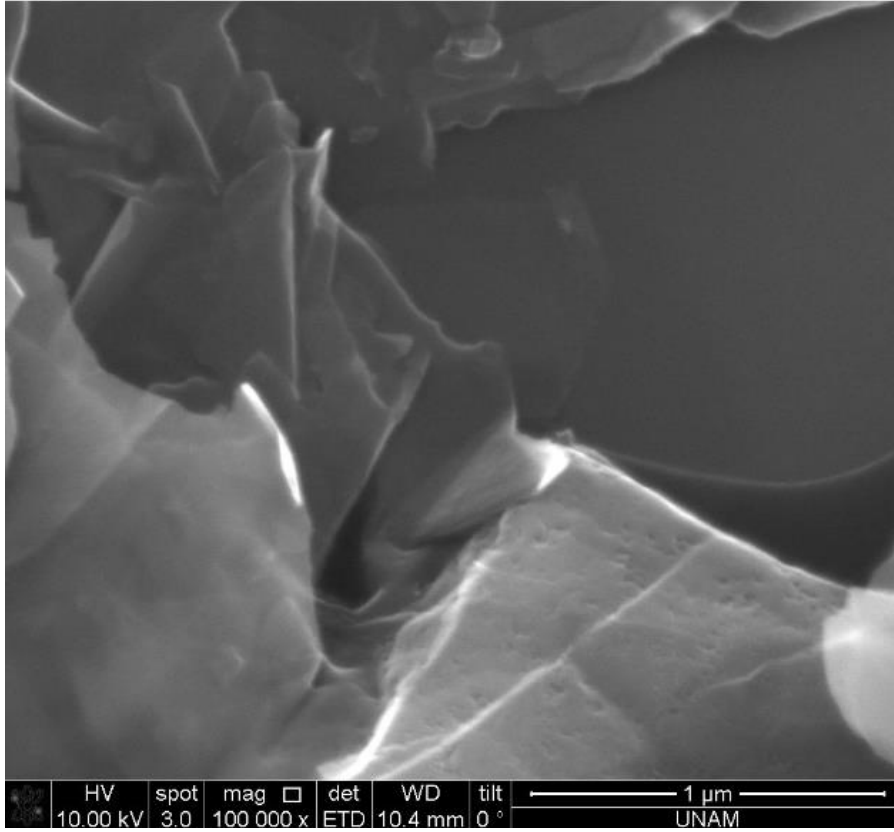
Çizelge 4.3. Kullanılan sertleştiricinin teknik özellikleri

MGS LH285 Sertleştirici	
Yoğunluk (g/cm ³)	0,94-0,97
Viskozite (mPA.s)	50-100
Pot Ömrü(dk)	15-20
Refrakter İndeksi	1,500-1,506

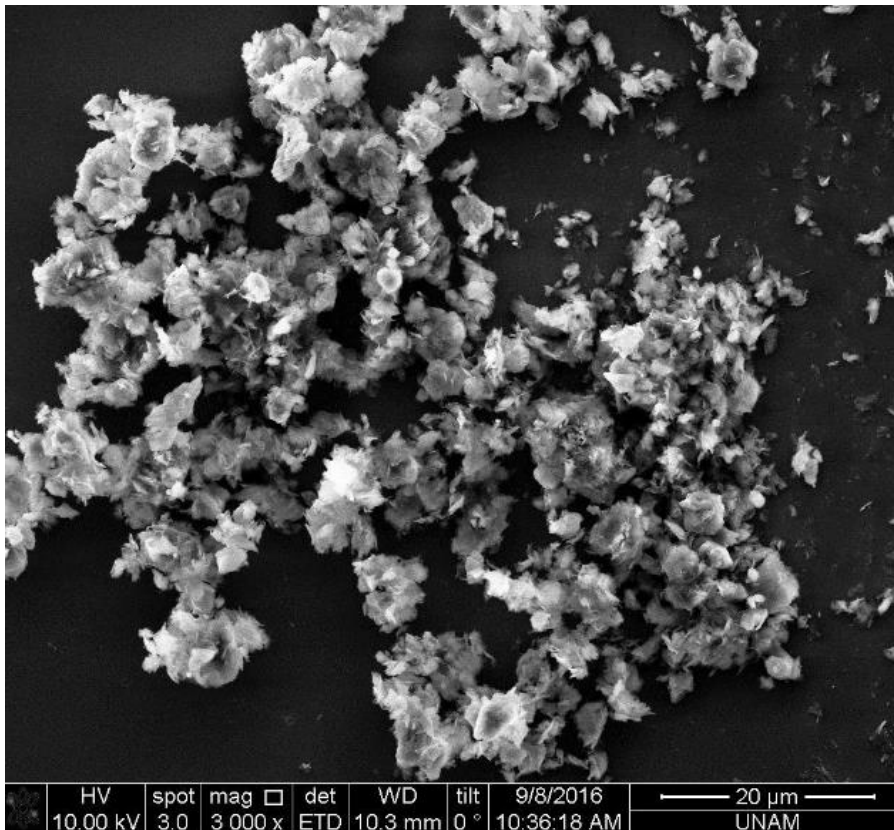
Grafen nanotozlar eşsiz boyut ve morfolojileri sayesinde sertlik, dayanım ve elektrik-ısı iletkenliği gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu çalışma da %99,9 saflıkta 800 m²/gr spesifik yüzey alanına sahip 1,5 µm çapında 3 nm kalınlığında grafen nanotoz kullanılmış olup Nanografi Nano Teknoloji A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir. Kullanılan grafen nanotozun teknik özellikleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Kullanılan grafen nanotozun teknik özellikleri

Grafen Nanotoz	
Saflık (%)	99,9
Kalınlık (nm)	3
Çap (µm)	1,5
Belirli Yüzey Alanı (m ² /g)	800
Çekme Dayanımı (MPa)	5000
Çekme Modülü (GPa)	1000



Resim 4.3. Çalışmada kullanılan grafen nanotozun SEM görüntüsü [151]



Resim 4.4. Çalışmada kullanılan grafen nanotozun topaklanmış görüntüsü [151]

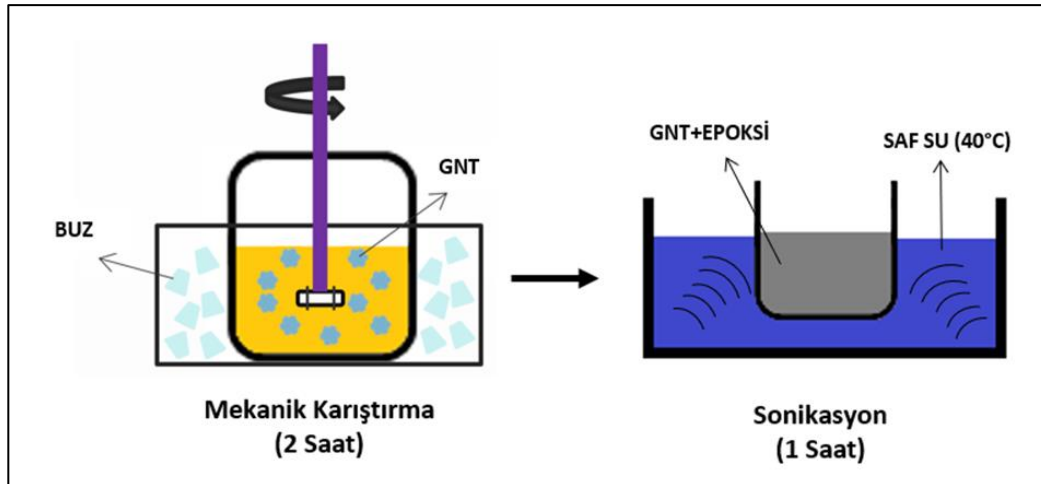
Grafen nanotozların matris içerisine ağırlıkça katılma yüzdeleri ve üretilen numunelerin kodlamaları Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Numunelerin kodlama ve katılanma yüzdeleri

Numune Kodu	Grafen Nanotozun Ağırlıkça katkı oranı (%)
G00	0,0
G15	0,15
G30	0,30
G45	0,45
G60	0,60

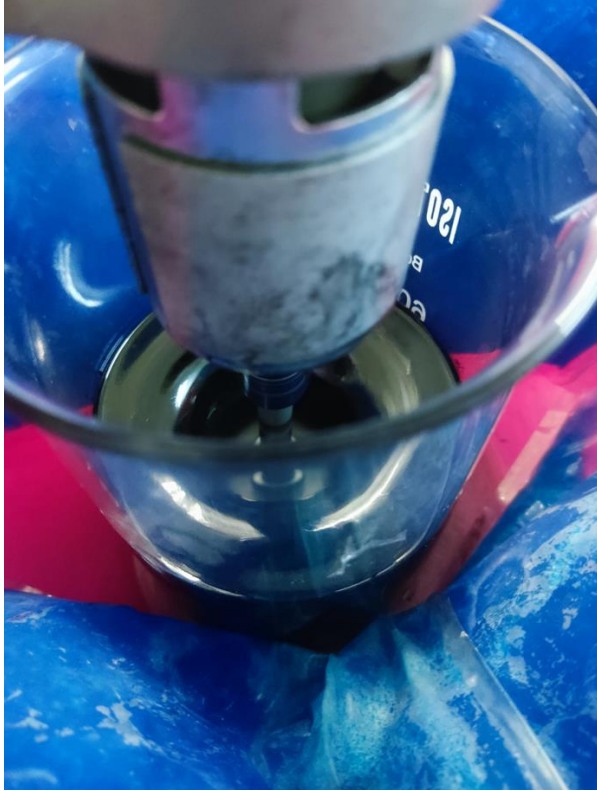
4.2. Grafen Nanotozun Epoksi İçerisinde Karıştırılması

Üretimin ilk aşaması olan bu aşamada grafen nanotozların (GNT) epoksi içinde homojen ve kümelenme oluşturmayacak şekilde dağıtımı oldukça büyük bir zorluktur. Bunun için literatürde mekanik karıştırma [29], manyetik karıştırma [16] ve sonikasyon [152] yöntemleri kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışması içinde mekanik karıştırma ardından sonikasyon işlemi kullanılarak grafenin epoksi içinde dağıtımı işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de epoksi içinde grafenin karıştırılması aşamasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.1. Grafenin epoksi içerisinde karıştırılmasının şematik gösterimi [153]

Bu aşamada grafenin epoksi içinde daha iyi karışmasını sağlamak için 40°C sabit sıcaklıkta karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık epoksinin viskozitesini ve yoğunluğunu düşürerek grafen nanotozun epoksi içerisinde daha iyi dağıtımına yardımcı olmaktadır. Ayrıca karışım içindeki hava kabarcıklarının uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Mekanik karıştırmada pervane ve epoksi arasındaki sürtünmeden dolayı karışım sıcaklığında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Fazla sıcaklık artışı epoksinin kimyasal yapısını değiştirip bozulmasına sebebiyet verebilir. Bu durumu engellemek için karıştırma kabı etrafı buz ile kaplanmış ve anlık olarak epoksi sıcaklığı ölçülmüştür. Belirlenen sıcaklığın üzerine çıkıldığında karıştırmaya ara verilip soğutma işlemine devam edilmiştir. Karıştırma işlemi 5 000 dev/dk sabit devirde 2 saat olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Resim 4.5'te mekanik karıştırma anına ait görüntüsü verilmiştir.



Resim 4.5. Grafenin epoksi içerisinde karıştırılma anı

Mekanik karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra sonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Sonikasyon işlemi için ultrasonik banyo kullanılmıştır. 40°C sabit sıcaklıkta saf su dolu hazneye beher içindeki grafen-epoksi karışımı bırakılmıştır. Bu işlem de bittikten sonra vakum infüzyon işlemiyle grafen epoksi karışımının fiberlere emdirilmesi işlemine

geçilmiştir. Bu işlem katkısız levha üretimi haricinde her levha üretimi için uygulanmıştır. Sadece katılan grafen nanotoz miktarı değiştirilip tüm süreçler tekrar edilmiştir.

4.3. Vakum İnfüzyon Yöntemi Kullanılarak Levha Üretimi

Grafen nanotoz katkılı kompozit levhaların üretimi için vakum infüzyon yöntemi (VİY) kullanılmıştır. VİY nano parçacık katkılı ve katkısız kompozit levhaların üretimi için kullanılan yöntemlerden biridir [154]. Reçine transfer kalıplama yöntemindeki (RTK) dezavantajlardan olan takım pahalılığını, basınç seviyesinin yüksek olması gerekliliğini azaltmak amacıyla VİY geliştirilmiştir. VİY’de erkek kalıp kullanımı yerine vakum naylonu kullanılmaktadır. Torba kalıp olarak da adlandırılan vakum naylonu, vakum basıncı yardımıyla fiberlerin dişi kalıbın şeklini almasını sağlar. Bu sayede RTK’da önemli bir gereksinim olan yüksek basınç ortamına ihtiyaç duyulmamaktadır [155]. Ayrıca vakum naylonu kullanımı kürleşme sırasında oluşan zararlı gazların da kapalı sistemin içinde kalmasını ve üretim ortamına dağılmasına mâni olmaktadır.

İlk etapta plaka boyutları belirlenmiştir. Temin edilen karbon fiber elyaflar makas yardımıyla uygun boyutlarda kesilmiştir. Ardından sıyırma kumaşı, infüzyon filesi, vakum naylonu ve ayırıcı kumaş da elyaflara uygun bir biçimde kesilmiştir. Bu çalışma da üretilen tüm plakalar 8 kat serime sahip olacak şekilde ve $[0/90]$ serim yönüne sahip olacak şekilde üretilmiştir.

Kumaşların kesim işlemi tamamlandıktan sonra serim işlemine başlamadan cihazın tabla yüzeyi alkol ile temizlenerek yüzey üzerinde bulunan kir ve toz vb kalıntılar giderilmiştir. Ardından üretilecek olan kompozitin kürleşme sırasında tablaya yapışmaması için ayırıcı film kullanılmış olup düzgünce tablanın üzerine ilk olarak yerleştirilmiştir. Ayırıcı filmin kenarlarına yarısı tablaya yapışacak yarısı ise ayırıcı film üzerinde kalacak şekilde sızdırmazlık bandı çekilmiştir. Kesilmiş haldeki karbon fiber kumaşlar 8 kat olacak şekilde serilmiştir. Karbon fiber kumaşlar serildikten sonra üzerine akış filesinin yapışmasını önlemek için kullanılan soyma kumaşı serilmiştir. Soyma kumaş akış filesinin kompozite yapışmasını önlemesinin yanı sıra infüzyon sırasında parça da kalabilecek havanın vakum yardımıyla dışarı çıkarılmasını sağlamaktadır. Soyma kumaşı, karbon elyaflar ve ayırıcı filmin hazırlandığı aşama Resim 4.6’da gösterilmiştir.



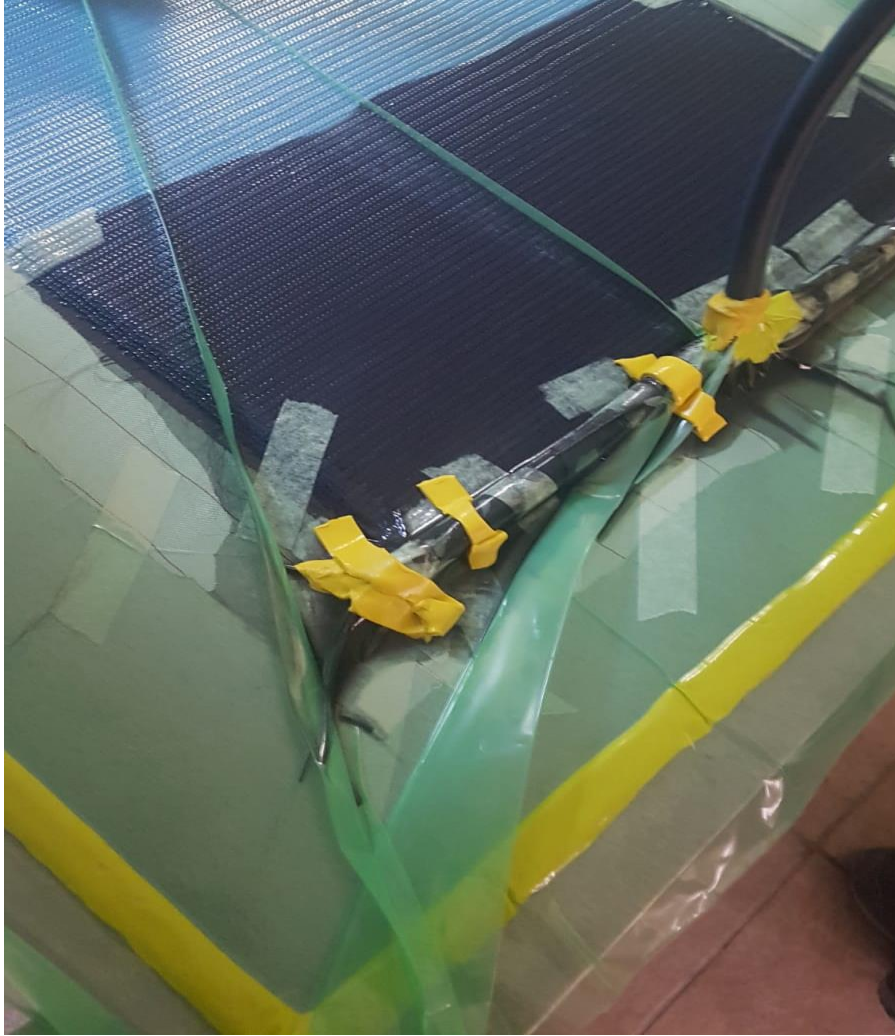
Resim 4.6. Kumaşların ve soyma kumaşının serilmesi aşaması

Soyma kumaşı serildikten sonra akış filesi kurulumun üzerine serilmiştir. Akış filesi epoksinin yayılımını hızlandırmak ve kalıp yüzeyine eşit ve homojen yayılmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Akış filesi serildikten sonra bir girişte ve bir çıkışta olacak şekilde spiral hortumlar soyma kumaşı üzerine sabitlenmiştir. Spiral hortumların ortasına epoksinin giriş ve çıkışını sağlamak için birer adet t bağlantı eklenmiş olup, sızdırmazlık bandı ile kurulumu sabitlenmiştir. Hortumlar ve kumaşlar sabitlendikten sonra sızdırmazlığı sağlayacak olan vakum naylonu ile kurulumun üstü kaplanmıştır. Vakum naylonu daha önce serilen sızdırmazlık bandı yardımıyla kurulumu yapıştırılmıştır. Ardından vakum hortumları girişte epoksiyi içeri alması için çıkışta da vakum pompasına kurulumun bağlanması için yerleştirilmiş ve hortumların bağlantıları tamamlanmıştır. Tüm kurulum tamamlandıktan sonra sızdırmazlığın sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmek maksadıyla vakum pompası çalıştırılıp sistemin doğruluğu test edilmiştir. Tüm gerekli kontroller yapıldıktan sonra epoksi sistem içine dahil edilip üretim işlemine geçilmiştir.

GNT oranı epoksinin vizkozitesini arttırmaktadır. Grafen miktarı arttıkça epoksinin sistem içinde ilerleyişinin yavaşladığı gözlemlenmiştir. Katkı oranının vizkoziteye olan etkisinin

yanı sıra bu yöntemde epoksinin kumaşları ıslatmaması oldukça sık karşılaşılan bir durumdur [156]. Bu sorunun yaşanmamasını sağlamak adına fiberlere 40°C ön ısıtma uygulanmıştır.

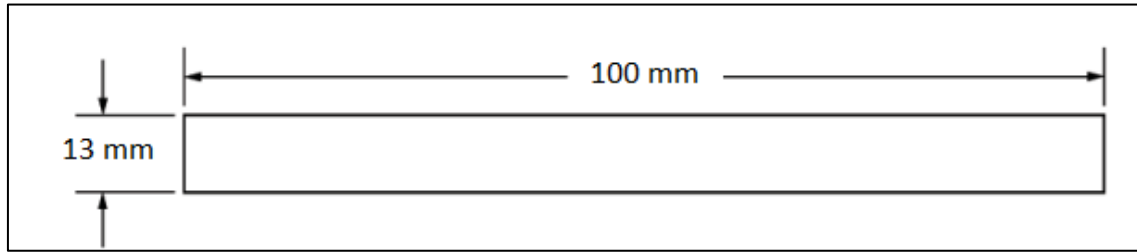
Ön ısıtma işleminden sonra hazırlanan epoksinin ağırlıkça 100/40'ı oranında sertleştirici eklenmiş ve karıştırılarak sertleştiricinin epoksi içinde homojen bir şekilde yayılımı sağlanmıştır. Ardından kürleşme başlamadan vakum yardımıyla fiberlere emdirilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Kürleşme işlemi 100°C'de 2 saat olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Vakum pompası kürleşme işlemi bitene kadar çalıştırılmaya devam edilmiştir. Resim 4.7'de epoksi grafen karışımının elyaflara emdirilme anı gösterilmiştir.



Resim 4.7. Epoksinin fiberleri ıslatma anı

4.4. Üç Nokta Eğme Testi

Eğme testi, Amerikan Malzeme ve Test Derneği (ASTM) ASTM D7264/D7264M standartlarına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili test Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez laboratuvarında Zwick/Roell Z250 test cihazında yapılmıştır. Bu test yöntemi sayesinde polimer matrisli kompozitlerin eğme elastiklik modülü ve eğme mukavemeti belirlenir [157]. Numunelerin boyutları Şekil 4.2’deki gibi olup yük uygulama noktasının ilerleme hızı ise 1 mm/dk olarak seçilmiştir. Test numuneleri plakalardan su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 4.2. Eğme testinde üretilen numunelerin boyutları

İlgili test standardında prosedür A’ya göre numune iki desteğe dayanır ve desteklerin ortasından uygulanan yükleme ile test gerçekleştirilmiştir.

ASTM D7264/D7264M’de belirtildiği gibi eğme mukavemeti Eş. 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

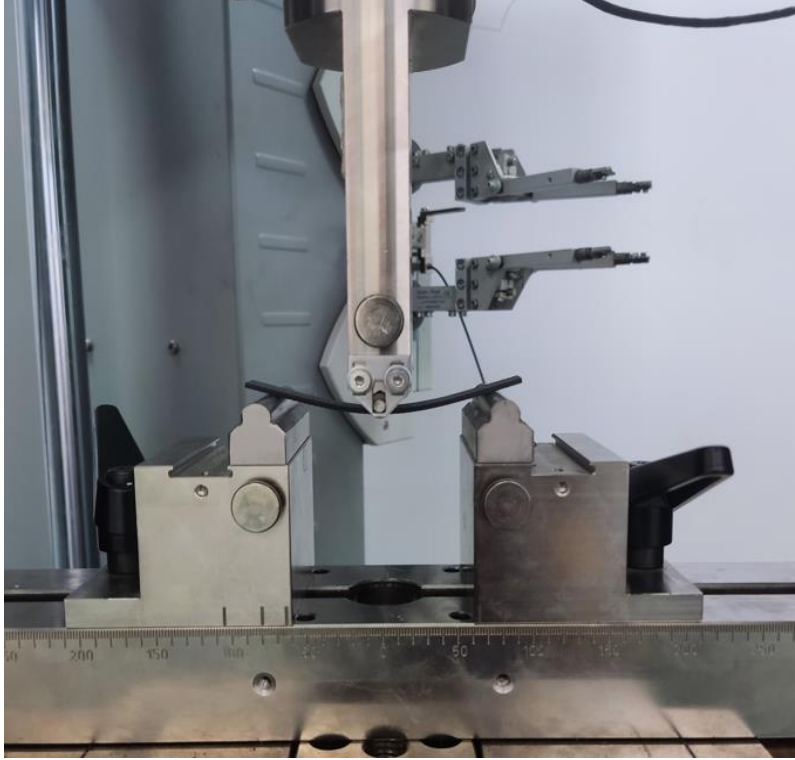
$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (4.1)$$

ASTM D7264/D7264M’de belirtildiği gibi sehim Eş. 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (4.2)$$

ASTM D7264/D7264M’de belirtildiği gibi elastik modülü kiriş yöntemi Eş. 4.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

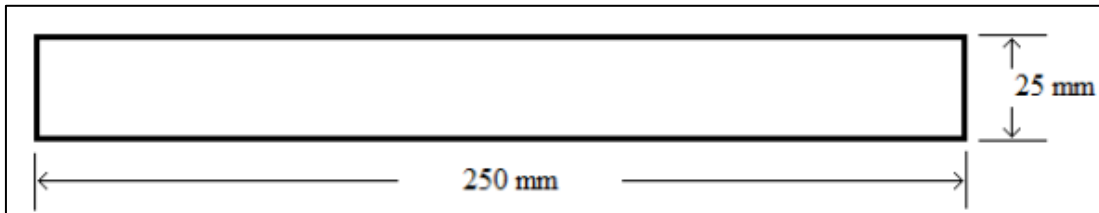
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.3)$$



Resim 4.8. Üç nokta eğme deneyi test anı

4.5. Çekme Testi

Çekme testi ASTM D3039/D3039M standartlarına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili test Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez laboratuvarında Zwick/Roell Z250 test cihazında yapılmıştır. Tüm kompozit malzeme formları, kat dizilimlerinin farklılığı ve serim yönü farklılığı sebebiyle ayrı ayrı çekme testine tabi tutulur. Uygulanan bu standartta yüksek modüllü elyaflarla güçlendirilmiş polimer matrisli kompozit malzemelerin düzlem içi gerilme özellikleri belirlenir [158]. Çene ilerleme hızı 2 mm/dk olarak belirlenmiş olup Şekil 4.3'te test numunelerinin boyutları verilmiştir. Test numuneleri plakalardan su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 4.3. Çekme deneyi numune boyutları

ASTM D3039/D3039M’de belirtildiği gibi çekme mukavemeti Eş. 4.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.4)$$

ASTM D3039/D3039M’de belirtildiği gibi gerinim Eş. 4.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_g} \quad (4.5)$$

ASTM D3039/D3039M’de belirtildiği gibi elastik modülü kiriş yöntemi Eş. 4.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.6)$$



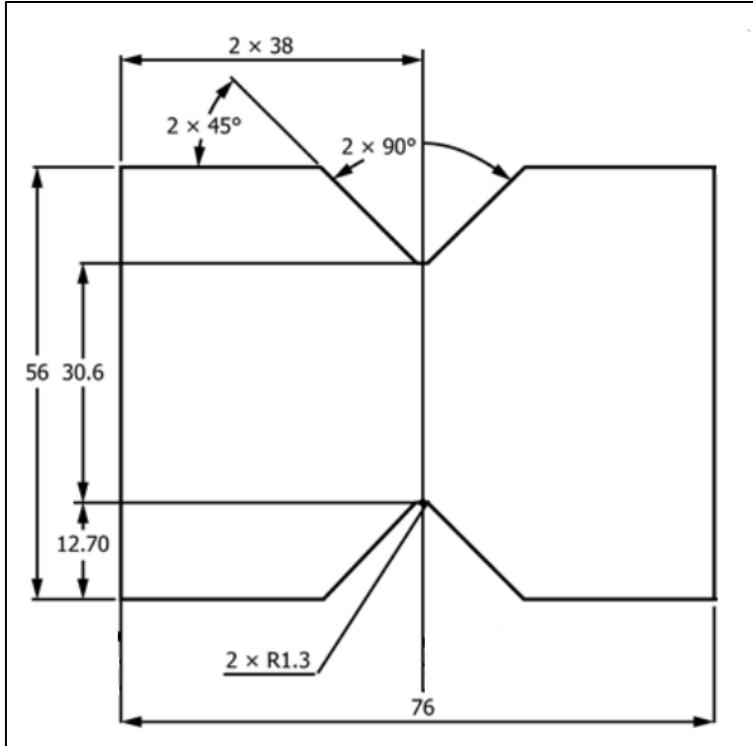
Resim 4.9. Çekme deneyi test anı

4.6. V-Çentikli Makaslama Testi

Çekme testi ASTM D7078/D7078M standartlarına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili test 9 Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında Shimadzu test cihazında yapılmıştır. Bu test yöntemi, V-çentikli bir numunenin uçlarını iki çift yükleme rayı arasına sıkıştırarak yüksek modüllü fiber takviyeli kompozit malzemelerin kesme özelliklerinin belirlenmesini kapsar [159]. Yüzey yüklemesi, gerekirse numuneye daha yüksek kesme kuvvetlerinin uygulanmasına izin verir. Bu sebeple diğer standartlara göre daha avantajlıdır. Çene ilerleme hızı 1mm/dk olarak belirlenmiş olup Şekil 4.4'te test numunelerinin boyutları verilmiştir. Test numuneleri plakalardan su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır.

ASTM D7078/D7078M'de belirtildiği gibi kesme mukavemeti Eş. 4.7 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (4.7)$$



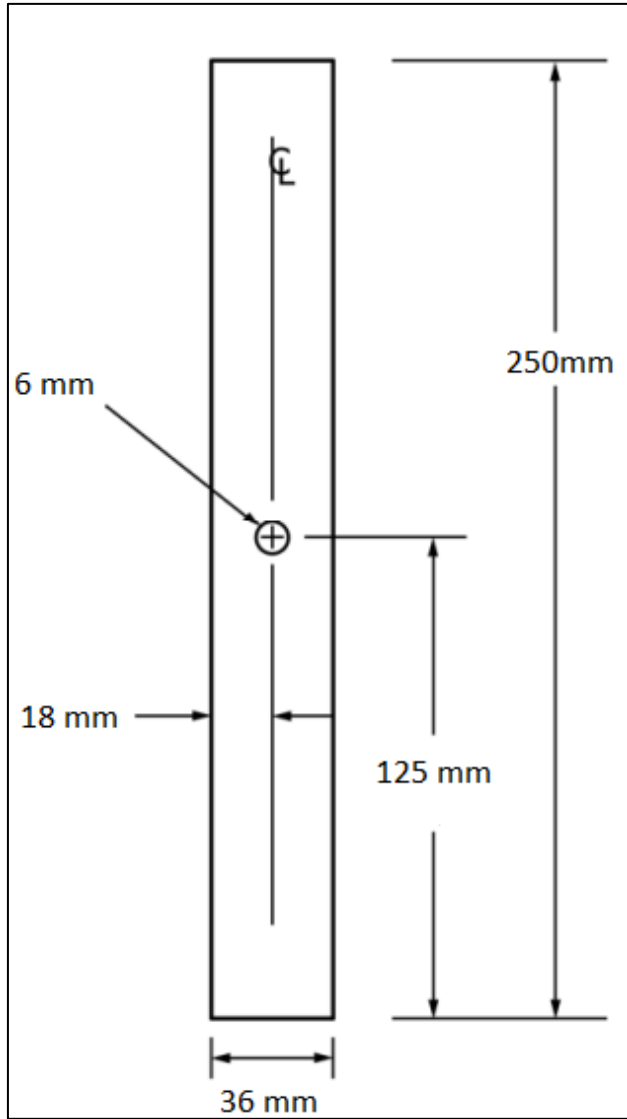
Şekil 4.4. V-Çentikli makaslama testinde üretilen numunelerin boyutları



Resim 4.10. V-Çentikli makaslama test anı

4.7. Açık Delik Çekme Testi

Açık delik çekme testi ASTM D5766/D5766M standartlarına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İlgili test Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez laboratuvarında Zwick/Roell Z250 test cihazında yapılmıştır. Bu standartta hazırlanan test numunesinin merkezinde bir delik bulunmaktadır. Delik içeren numunenin kopması için gerekli kuvvetin ölçülmesi gerçekleştirilir. Bu test metodu ile kırılgan yapıya sahip olan kompozit malzeme üzerindeki kusurlar simüle edilmektedir ve çentik/delik hassasiyetleri incelenir. Çene ilerleme hızı 2 mm/dk olarak belirlenmiş olup Şekil 4.5'te test numunelerinin boyutları verilmiştir. Test numuneleri plakalardan su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. Ayrıca 6 mm çapındaki delik de numune merkezinden su jeti ile kesilerek oluşturulmuştur. Numune genişliği/delik çapı oranı 6 (36/6) olarak, standarda uygun bir şekilde hazırlanmıştır.

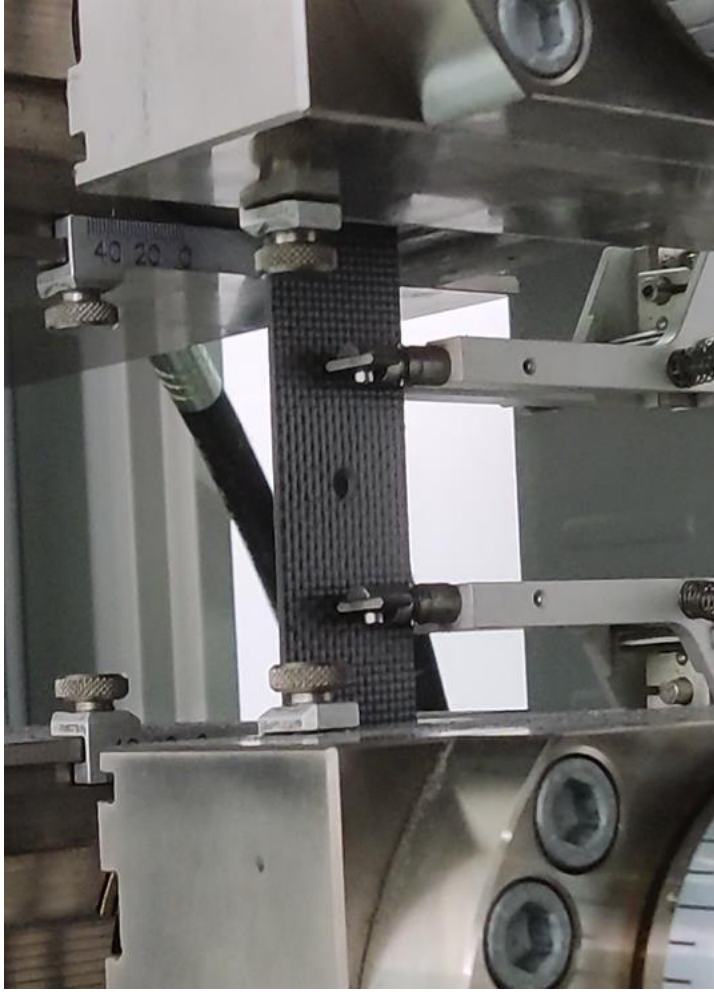


Şekil 4.5. Açık delik çekme testi için hazırlanan numunenin boyutları

ASTM D5766/D5766M’de belirtildiği gibi açık delik çekme mukavemeti Eş. 4.8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.8)$$

Bu metotta kesit alanı deliksiz hali olarak hesaplanır. Yani çekme deneyinde hesaplandığı şekilde hesaplanır.

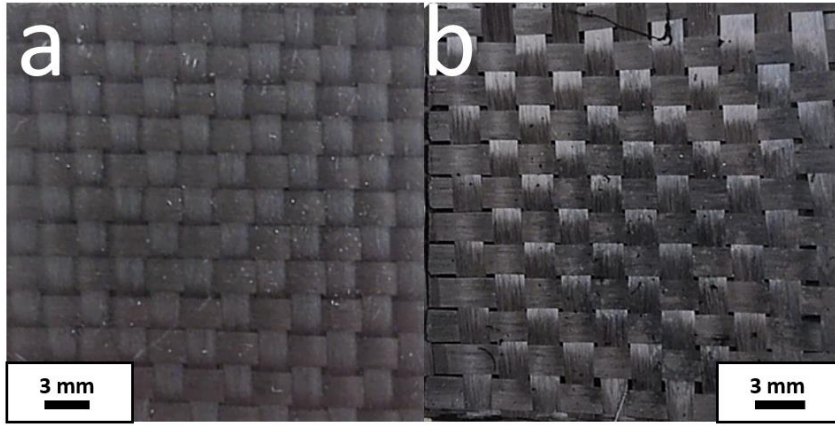


Resim 4.11. Açık delik çekme testi test anı

4.8. Yakma Testi

Yakma testi ASTM D2734 ve ASTM D2584 standartlarına göre uygun bir şekilde yapılmıştır. Yakma deneyi; üretilen GNT katkılı kompozit plakaların boşluk hacim, fiber hacim ve matris hacim oranlarının katkısız numuneler ile kıyaslanması amacıyla yapılmıştır. Bu deney sayesinde GNT katkısının kompozitin önemli bir parametresi olan ve mekanik özelliklerini belirleyen fiber, matris ve boşluk hacim oranlarına etkisini incelemek maksadıyla gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakaların mevcudiyetinde fazla boşluk hacim oranı arzu edilmeyen bir durumdur. Boşluk hacim oranının yüksek olması, malzemenin dayanımının ve elastiklik modülünün azalmasına neden olabilir. Bu sebeple dayanım ve elastik modül gibi mekanik özelliklerinin yorumlamasını zorlaştırmaktadır. Üstelik kompozit yapısının içinde bulunan boşluk hacmi malzeme içinde süreksizlik oluşturduğu için yorulma ömürlerini ve dirençlerini de kısaltmaktadır. Yakma testi için kullanılan

numuneler 25 mm X 25 mm olarak su jeti yardımıyla her setten 3 adet olacak şekilde kesilmiş ardından standartlara uygun sıcaklık ve nem koşullarında bekletilmiştir. Ardından mevcut durumlarındaki ağırlıklarını ölçmek için hassas terazi yardımıyla tartılarak toplam kütle değerleri bulunmuştur. Toplam kütle değerleri kaydedildikten sonra numuneler 565°C sıcaklıktaki fırın içerisinde yakılarak kompozit içerisindeki epoksi yapı içerisinde uzaklaştırılmıştır. Epoksi uzaklaştırıldıktan sonra geriye kalan kül tekrar tartılarak fiber kütlesi olarak hesaplanmıştır. Üretimde kullanılan takviye elemanı ve matrisin yoğunluk değerleri kullanılarak hacim değerleri hesaplanmış ve hesaplanan toplam hacim değerinden çıkarılarak yapı içindeki boşluk hacmi hesaplanmıştır. Resim 4.12’de numunelerin yakılmadan önce ve yakıldıktan sonraki görüntüleri verilmiştir.



Resim 4.12. Yakma numunesinin yüzey görüntüsü a) yakma işleminden önce, b) yakma işleminden sonra

4.9. İstatistiksel Test

Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarında elde edilen değerlerin dağılımının birbirine göre istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığına bakılmıştır. İstatistiksel analizler IBM SPSS Statistics yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Test yöntemi olarak Student T-testi kullanılmıştır. Bağımlı örneklem, bağımsız örneklem ve bağımsız tek örneklem olarak üç farklı şekilde gerçekleştirilen istatistik test yöntemlerinden bağımlı örneklem için Student T- testi seçilmiştir. Açık delik çekme testi, çekme testi, eğme testi ve V-çentikli makaslama testlerinin çıktılarında, grafen katkı miktarının etkisi incelenmiştir. T-test sonucunda elde edilen p değerlerinin 0,05’ten küçük olması durumunda karşılaştırılan iki grubun birbirine göre anlamlı olduğu kabul edilirken; 0,05’ten büyük olması durumunda birbirine göre istatistiksel olarak anlamsız olduğu kabul edilmiştir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde GNT katkılı karbon fiber kompozit plakaların, yakma, eğme, makaslama, çekme ve açık delik çekme deneylerinden ve bu deneylerin sonuçlarından bahsedilmiştir. Katkı oranlarının dayanımlara etkisi incelenmiş ve bulunan sonuçlar değerlendirilmiştir.

5.1. Yakma Deneyi

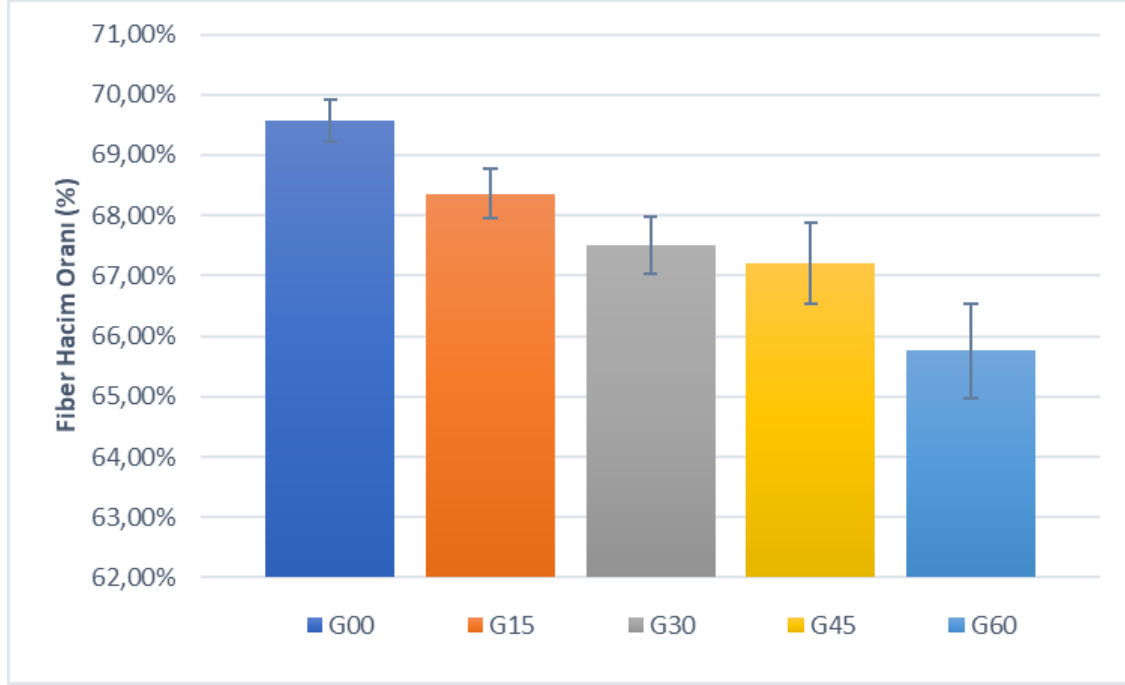
Yakma deneyin üretilmiş olan karbon fiber/epoksi plakaların fiber hacim, matris hacim ve boşluk hacim oranları hesaplanmış ve incelenmiştir. GNT katkısının numunelerin matris, fiber boşluk hacim oranlarına etkisi incelenmiştir. Çizelge 5.1.'de ilgili numunelerin yakma deneyi ile hesaplanan fiber hacim, matris hacim ve boşluk hacim oranları gösterilmiştir. V_m matris hacim oranını, V_f fiber hacim oranını V_v ise boşluk hacim oranını belirtmektedir.

Çizelge 5.1. Numunelerin hacim oranları

Numune	GNT Katkı oranı (%)	V_f (%)	V_m (%)	V_v (%)
G00	0,00	$69,56 \pm 0,34$	$29,40 \pm 0,06$	$1,04 \pm 0,02$
G15	0,15	$68,36 \pm 0,41$	$30,07 \pm 0,15$	$1,57 \pm 0,09$
G30	0,30	$67,51 \pm 0,47$	$30,70 \pm 0,24$	$1,78 \pm 0,07$
G45	0,45	$67,20 \pm 0,67$	$30,80 \pm 0,27$	$2,00 \pm 0,14$
G60	0,60	$65,75 \pm 0,68$	$31,71 \pm 0,34$	$2,54 \pm 0,18$

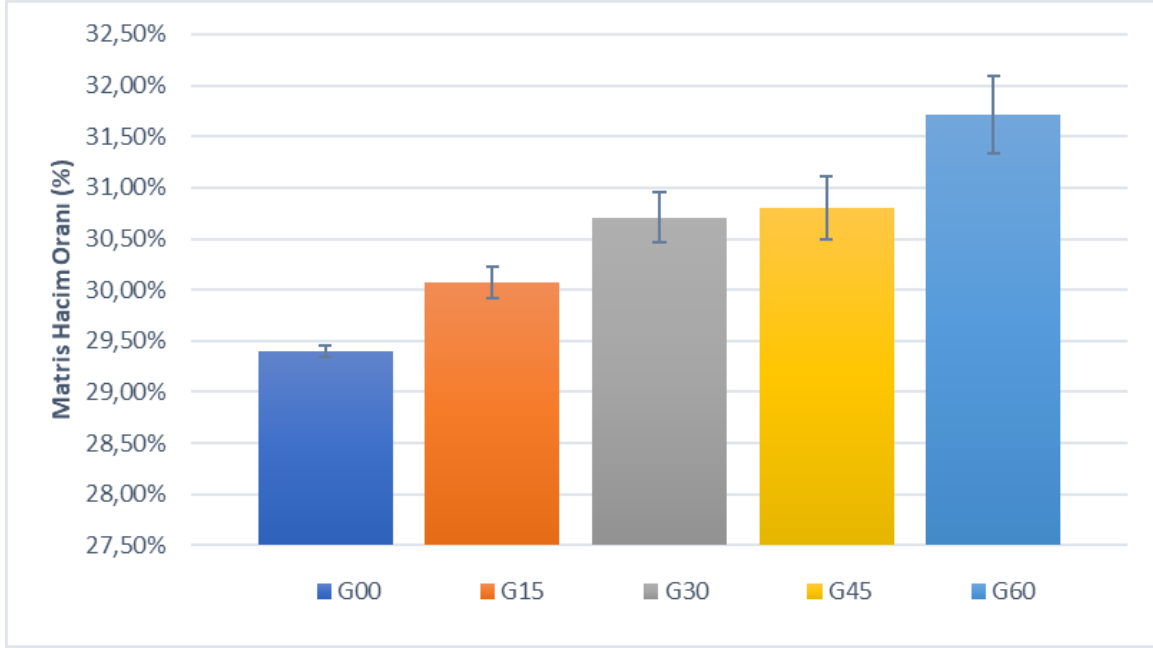
Karbon/epoksi kompozit plakaların tüm hacim oranları değerlendirildiğinde GNT katkı oranı arttıkça fiber hacim oranında düşüşleri gözlemlenmektedir. Matris hacim oranında ise artışlar gözlemlenmektedir. GNT katkı oranı yükseldikçe kullanılan epoksinin viskozitesinin artması matris hacim oranındaki artışı açıklayabilir. Viskozite artışı vakum infüzyon sırasında çok belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Epoksi içindeki GNT katkı oranı yükseldikçe epoksinin fiberler arasında ilerleme hızı yavaşlamıştır. Sistem içinde yavaşlayan epoksinin, sistem dışına çıkartılması zorlaşmaktadır. Bu sebeple viskozite artışı sistem içinde daha fazla epoksi kalmasına sebebiyet vermiş olabilir. Elde edilen bulgulardan hareketle GNT katkı oranındaki artışın kompozit plakalardaki matris hacim oranını arttırdığı

kanısına varılabilir. Şekil 5.1.'de yakma deneyi sonrası karbon fiber/epoksi numunelerin fiber hacim oranları verilmiştir.

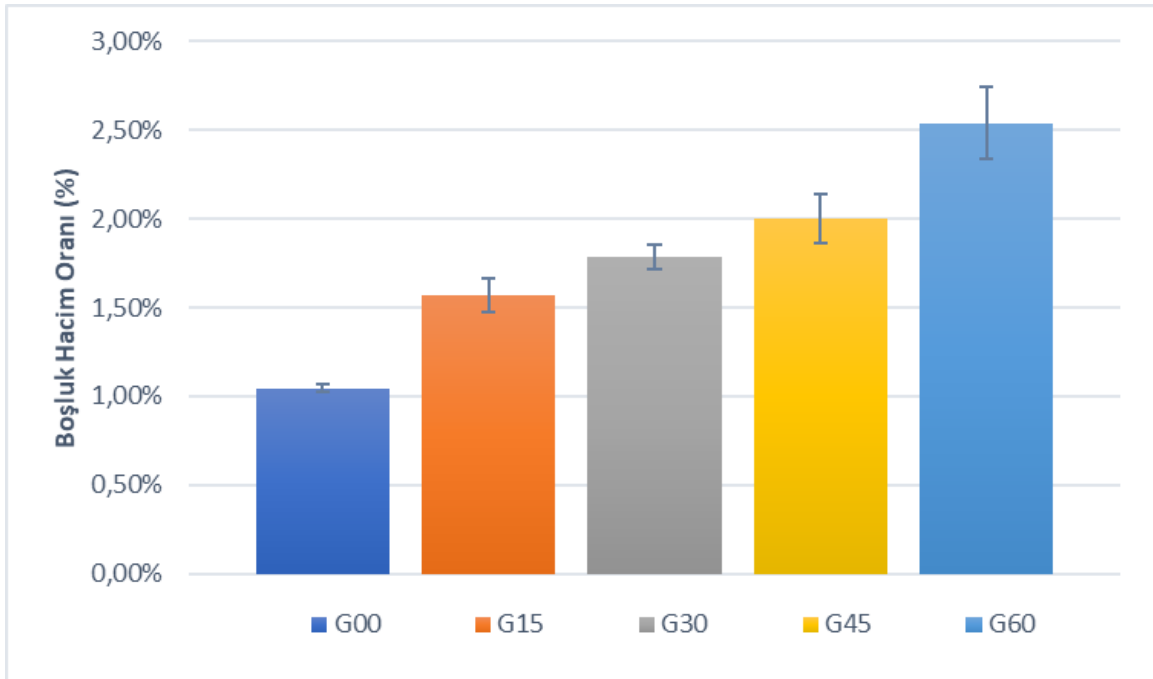


Şekil 5.1. Yakma testi sonrası hesaplanan fiber hacim oranları

Karbon fiber/epoksi kompozit plakaların fiber hacim oranlarına bakıldığında GNT katkılanmayan numuneler için %69,56 oranında fiber hacim oranı gözlemlenmiştir. Bu oran G15 numuneleri için %68,36 olarak gözlemlenmiştir. G30 ve G45 kodlu numuneler için %67,51 ve %67,20 fiber hacim oranları gözlemlenmiştir. G60 kodlu numuneler incelendiğinde ise %65,75 olarak gözlemlenmiştir. En yüksek fiber hacim oranı G00 kodlu numuneler de gözlemlenmiştir. G60 kodlu numuneler de bu oran %3,81 oranında azalmıştır. GNT katkısındaki artışın fiber hacim oranını azalttığı söylenebilir. Bu test ile elde edilen fiber hacim oranları literatürde bulunan diğer çalışmalar ile kıyaslandığında VİY ile üretimin başarıyla uygulandığı söylenebilir [160]. Şekil 5.2'de ve Şekil 5.3'te yakma deneyi sonrasında hesaplanan matris hacim oranları ve boşluk hacim oranlarının kıyaslanması sütun grafiği olarak verilmiştir.



Şekil 5.2. Yakma testi sonrası hesaplanan matris hacim oranları

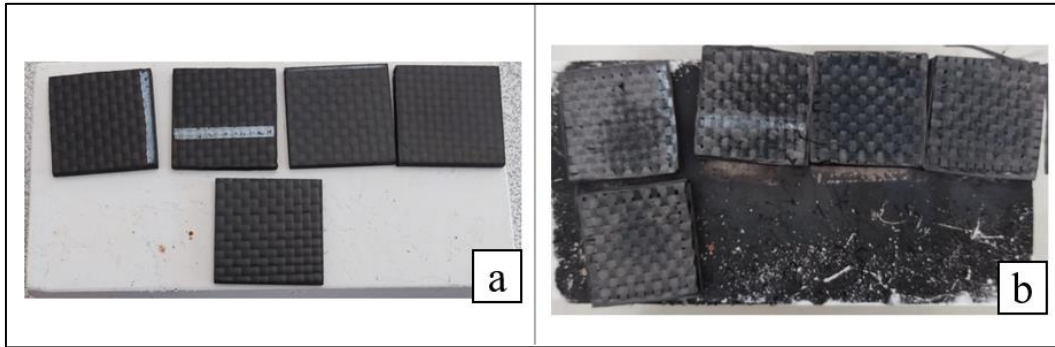


Şekil 5.3. Yakma testi sonrası hesaplanan boşluk hacim oranları

G00 kodlu numuneler için boşluk hacim oranı %1,04 olarak hesaplanmıştır. Boşluk hacim oranı G60 numuneleri için %2,54 olarak hesaplanmıştır. Boşluk hacim oranının maksimum %144,2'lik bir artışla G60 kodlu numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. GNT katkı oranı arttıkça boşluk hacim oranının arttığı gözlemlenmiştir. Kompozit yapıların içerisinde var olan boşluklar, matris ile fiber arasında bulunan arayüzey bağlarını zayıflatır. Ayrıca bu

boşluklar gerilme yığılması oluşturarak, ufak çatlaklar veya kusurlar olarak görülebilir. Yapı içerisinde bulunan boşluklarında hasar başlangıcına ve hasarın ilerlemesini hızlandırmasına sebebiyet verdiği söylenebilir. Kompozit yapılardaki mevcut boşlukların, yapının hasar mekanizması için çok etkili olduğu söylenebilir.

GNT katkı oranı ile kompozit plakalar içinde bulunan boşluk hacim oranının ilişkisi; GNT'lerin matris içerisinde tam homojen bir şekilde dağılmama probleminden kaynaklı olarak açıklanabilir. GNT katkı oranı arttıkça GNT parçacıklarının toplanması daha kolay gerçekleşmektedir. Kısım kısım kümelenme olarak gerçekleşen topaklar, matris yapıya arayüzeyinde boşluklar oluşturmaktadırlar. Oluşan topaklanmalar yapının epoksi tarafından tam ıslatılmasına mani olmakta ve yapının içinde hava boşluklarının oluşumuna sebep olmakta olduğu söylenebilir. Literatürde GNT katkısının matris hacim ve boşluk hacim oranını arttırdığını bildiren çalışmalar bulunmaktadır [16,161]. GNT katkısı bulunan numunelerin boşluk hacim oranları, GNT katkılanmayan numuneler ile kıyaslandığında GNT katkısının boşluk hacim oranını %50 ile %144 arasında arttırdığı gözlemlenmiştir.



Resim 5.1. Yakma testi numune görüntüleri a) testten önce b) testten sonra

5.2. Üç Nokta Eğme Deneyi

Bu deneyde hazırlanan numuneler eğme yüküne maruz bırakılmış ve GNT katkısının eğme davranışına etkisi incelenmiştir. Katkılanan numunelerin davranışları katkılanmayan numunelerin değerlikleri ile karşılaştırılmıştır. Bu deney kapsamında G00, G15, G30, G45, G60 kodlu olmak üzere üretilen 5 farklı plakanın her birinden 3 numune olacak toplamda 15 numune testi gerçekleştirilmiştir. Yalnızca G60 kodlu numunelerden bir tanesinde test sonrası delaminasyon hasarının olduğu gözlemlenmiştir. Su jeti ile kesim sırasında uygulanan kesme kuvveti nedeniyle tabakaların ayrılması durumu oluşmuştur. Bu yüzden

G60 kodlu numune setlerinden hasarlı numunenin sonuçları çıkarılmıştır. %0,60 GNT katkısına ait tüm elde edilen değerlikler ve değerlendirmeler 2 numune üzerinden gerçekleştirilmiştir. Resim 5.2’de delaminasyon olan numunenin görüntüsü verilmiştir.



Resim 5.2. Delaminasyon gözlemlenmiş ve hesaba katılmayan numunenin uç görüntüsü

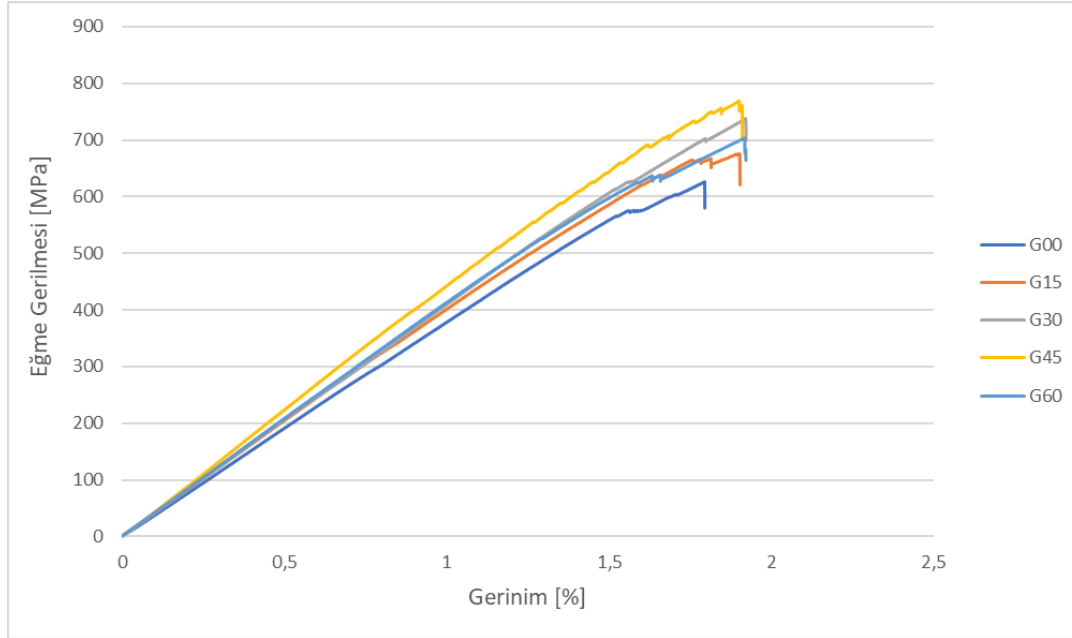
Çizelge 5.2’de üç nokta eğme deneyi sonrasında elde edilen eğme mukavemeti, eğme elastiklik modülü ve tokluk değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Üç nokta eğme deneyi sonuçları

Numune	Eğme Mukavemeti (MPa)	Eğme Elastiklik Modülü (GPa)	Tokluk (MJ/m ³)
G00	629,39 ± 6,39	38,47 ± 0,33	6,07 ± 0,09
G15	682,45 ± 26,86	40,51 ± 0,6	6,74 ± 0,14
G30	725,27 ± 10,52	42,17 ± 0,89	7,04 ± 0,02
G45	749,37 ± 22,32	43,61 ± 0,66	7,30 ± 0,42
G60	704,39 ± 0,76	41,36 ± 0,02	7,03 ± 0,04

Çizelge 5.2 incelendiğinde grafen miktarı arttıkça eğme mukavemeti, eğme elastiklik modülü ve tokluk değerlerinin artış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ortalama değerler incelendiğinde en düşük değerler katkısız numunelerde gözlemlenirken, en yüksek

değerler ise G45 kodlu numunelerde gözlemlenmiştir. Şekil 5.4'te üç nokta eğme deneyi eğrileri verilmiştir.

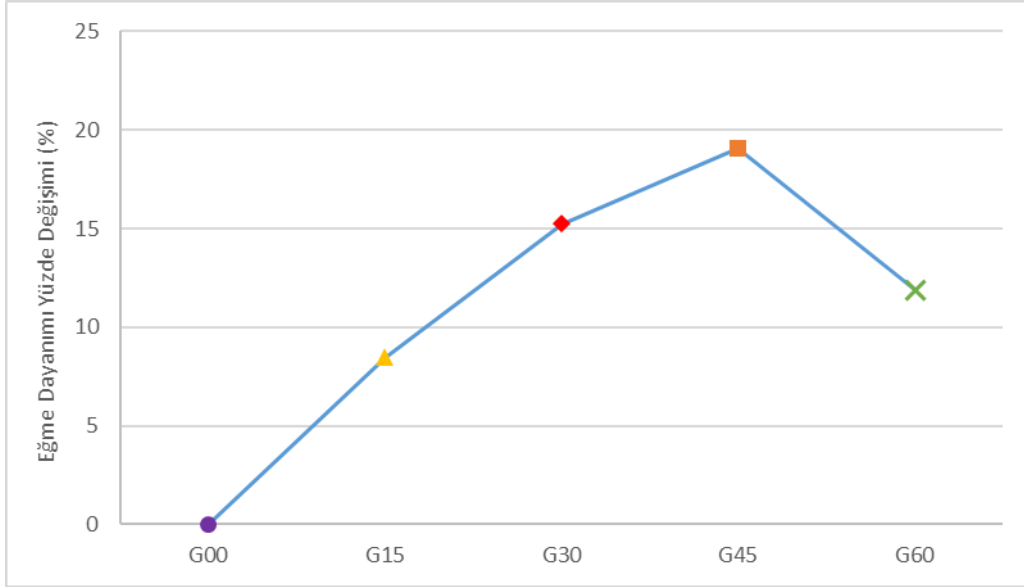


Şekil 5.4. Tüm numunelerin eğme gerilmesi-gerinim grafikleri

Grafikler incelendiğinde kopmaya yakın durumda dayanım değerlerinde dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise belirli bir sehim miktarından sonra fiberlerin eğme yüküne dayanamayıp kırılması ile açıklanabilir. Ayrıca eğrilerin gerinim miktarlarına bakıldığında grafen miktarı arttıkça maksimum yük altında gözlemlenen yüzde gerinimin arttığı söylenebilir. Çizelge 5.3'te karbon fiber kompozit plakalarda grafen katkısının eğme mukavemeti üzerindeki değişim yüzdeleri gösterilmiştir. Şekil 5.5'te ise numunelerin dayanım değerlerinin yüzde değişimleri grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Grafen katkısının eğme mukavemeti üzerindeki etkisi

Numune	Eğme Mukavemeti (MPa)	Yüzde değişim (%)
G00	629,39 ± 6,39	-
G15	682,45 ± 26,86	8,43
G30	725,27 ± 10,52	15,24
G45	749,37 ± 22,32	19,06
G60	704,39 ± 0,76	11,92



Şekil 5.5. Numunelerin eğme dayanımı yüzde değişimleri

G00 numuneleri incelendiğinde ortalama 629,39 MPa eğme dayanımı elde edilmiştir. G00 dayanım değeri referans alındığında %0,15 oranındaki grafen katkısının dayanımı yaklaşık olarak %8 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. %0,3 oranında GNT katkılı numunelerin dayanımı incelendiğinde ise bu oran yaklaşık %15,24 oranında artışla 725,27 MPa değerine ulaşmaktadır. %0,45 oranında katkılanan numuneler incelendiğinde ise %19,06 artışla 749,37 MPa değerinde ulaşmıştır. G60 kodlu numuneler incelendiğinde ise katkılanmamış numunelere kıyasla dayanım değeri %11,92 fazla olarak 704,39 MPa olarak gözlemlenmiştir. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği %0,45 oranında GNT katkılanan numunelerin dayanım değerleri diğer numuneler ile kıyaslandığında G00'ın eğme dayanımından %19,06 oranında daha fazla olduğu, G15'in eğme dayanımından %9,81 daha fazla olduğu, G30'in eğme dayanımından %3,32 daha fazla ve son olarak G60'ın eğme dayanımından ise %6,39 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama dayanım değerleri incelendiğinde GNT katkısının dayanım değerlerini pozitif yönde iyileştirdiği söylenebilir. Ek olarak literatürde yapılan eğme deneylerinin sonuçlarına bakıldığında GNT katkısının eğme dayanımını arttırdığı görülmektedir [21,23,30,39]. Ortalama dayanım kıyaslamasına ek olarak yapılan Student T-testi sonucunda elde edilen p değerleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

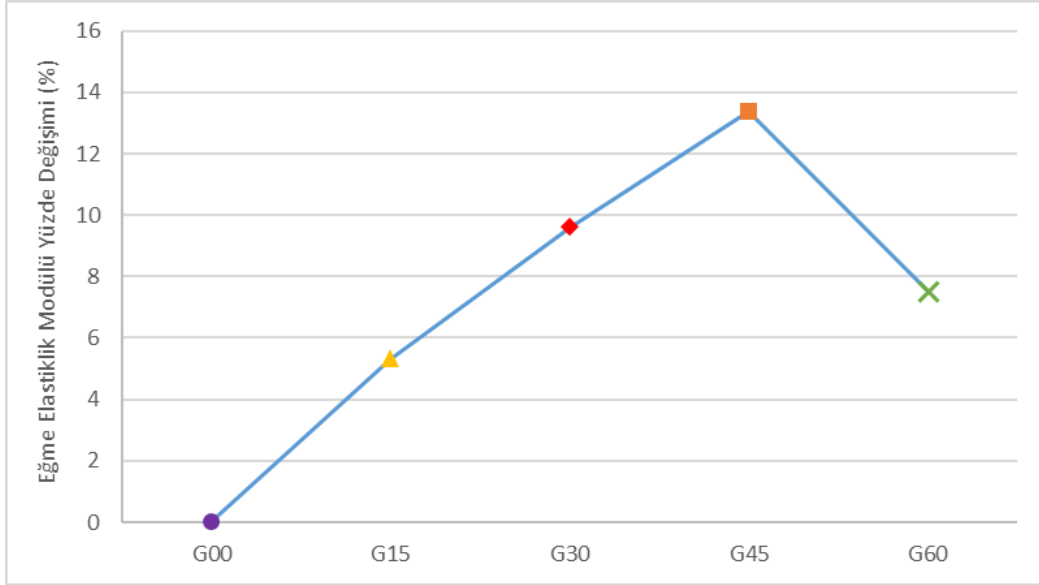
Çizelge 5.4. Eğme dayanımlarının Student T-testi sonucunda elde edilen p değerleri

Numune	G60	G45	G30	G15
G00	0,022*	0,026*	0,009*	0,041*
G15	0,159	0,161	0,151	
G30	0,326	0,201		
G45	0,173			

Çizelge 5.4’te ilk sütun ve ilk satır, karşılaştırılan numune gruplarını göstermektedir. Diğer satırlarda bulunan değerler ise t-testin sonucunda elde edilen p değerlerini göstermektedir. T-testiyle elde edilen p değerleri incelendiğinde katkısız numunelerin elde edilen dayanım değerleri ile tüm grafen katkılı numunelerin dayanım değerleri arasında $p \leq 0,05$ olduğu için anlamlı bir fark bulunmaktadır. Bu sebeple grafen katkısının dayanımı arttırdığı istatistiksel olarak da söylenebilir. Fakat grafen katkılı numuneler birbirleri arasında kıyaslandığında p değeri 0,05’ten büyük olduğu için, istatistiksel olarak anlamlı bir farktan bahsedilemez. Bundan dolayı ortalama dayanım değerleriyle yapılan kıyaslamada optimum grafen katkısının G45 kodlu numunelerde olduğu belirtilebilirken, grafen katkılı numunelerin eğme dayanımlarının değişimleri birbirine göre yakın olduğundan dolayı istatistiksel olarak ele alındığında anlamlı farklar oluşmamaktadır. Şekil 5.6’da numunelerin eğme elastiklik modüllerindeki artış yüzdeleri gösterilmiştir. Ayrıca GNT katkısının eğme elastiklik modülüne etkisi Çizelge 5.5’te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Grafen katkısının eğme elastiklik modülü üzerindeki etkisi

Numune	Eğme elastiklik modülü (GPa)	Yüzde değişim (%)
G00	$38,47 \pm 0,33$	-
G15	$40,51 \pm 0,6$	5,31
G30	$42,17 \pm 0,89$	9,62
G45	$43,61 \pm 0,66$	13,36
G60	$41,36 \pm 0,02$	7,52



Şekil 5.6. Numunelerin ortalama eğme elastiklik modülleri yüzde değişimi

G00 numuneleri incelendiğinde ortalama 38,47 GPa eğme elastiklik modülü elde edilmiş. G00 modül değeri referans alındığında %0,15 oranındaki grafen katkısının eğme elastiklik modülünü yaklaşık olarak %5,3 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. %0,3 oranında GNT katkılı numunelerin eğme elastiklik modülü incelendiğinde ise yine bu oran yaklaşık %9,6 civarında artışla 42,17 GPa değerine ulaşmaktadır. %0,45 oranında katkılanan numuneler incelendiğinde ise %13,36 artışla 43,60 GPa değerinde ulaşmıştır. Ve bu değer incelenen numuneler arasında maksimum eğme elastiklik modülü değeridir. Yani maksimum eğme elastiklik modülü değeri G45 kodlu numunelerde elde edilmiştir. G60 kodlu numuneler incelendiğinde ise katkılanmamış numunelere kıyasla eğme elastiklik modülü değeri %7,5 fazla olarak 41,36 GPa olarak gözlemlenmiştir. Maksimum eğme elastiklik modülü değerinin elde edildiği %0,45 oranında GNT katkılanan diğer numuneler ile kıyaslandığında G00'ın eğme elastiklik modülünden %13,36 oranında daha fazla olduğu, G15'in eğme elastiklik modülünden %7,64 daha fazla olduğu, G30'un eğme elastiklik modülünden %3,14 daha fazla ve son olarak G60'ın elastiklik modülünden ise %5,43 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Eğme elastiklik modülleri ele alındığında %0,45 GNT katkısına kadar eğme elastiklik modülü artmıştır. G60 kodlu numunelerin elastiklik modüllerindeki düşüş ise numunelerdeki fazla boşluk hacim oranı ile açıklanabilir. Literatürde grafen miktarının eğme elastiklik modülünü arttırıcı etkisinin olduğundan bahseden çalışmalar bulunmaktadır [17,21,30]. Eğme elastiklik modüllerinin değişimlerinin istatistiksel

olarak anlamlı olup olmadığı Student-T-testi ile kontrol edilmiştir. İstatistik testinin çıktıları Çizelge 5.6’da verilmiştir.

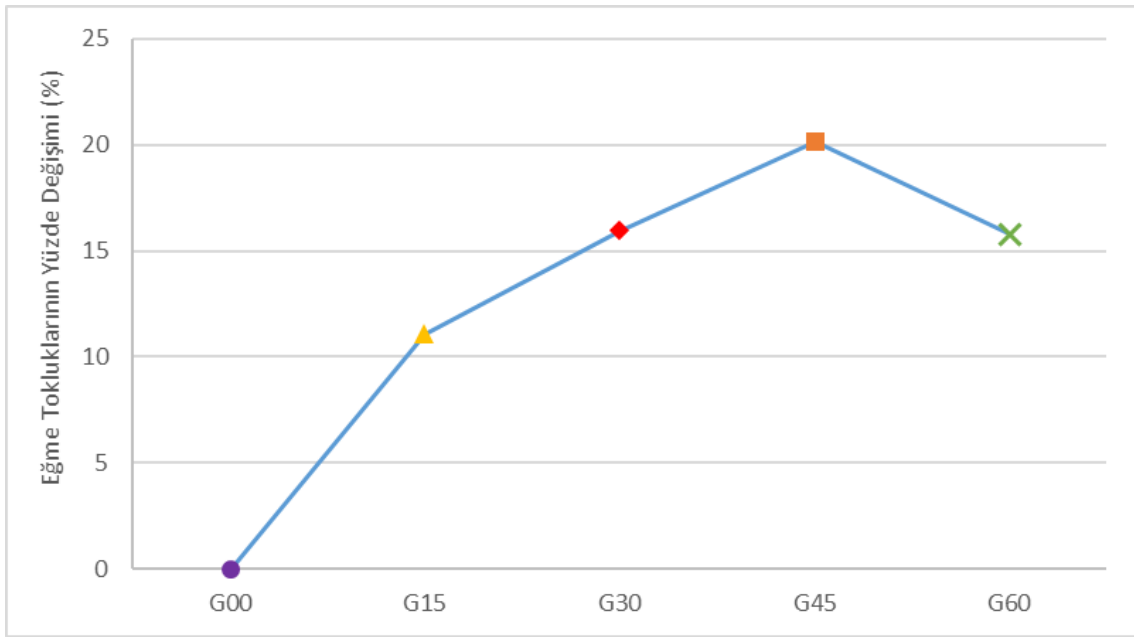
Çizelge 5.6. Eğme elastiklik modülleri için Student T-test çıktıları

Numune	G60	G45	G30	G15
G00	0,070	0,005*	0,034*	0,084
G15	0,072	0,036*	0,068	
G30	0,364	0,311		
G45	0,046*			

Çizelge 5.6 incelendiğinde %0,45 ve %0,30 grafen katkılı numunelerin eğme elastiklik modülleri katkısız numunelerin eğme elastiklik modülü ile arasındaki fark p değeri 0,05’ten küçük olduğu için önemli ve anlamlıdır. Fakat %0,60 ve %0,15 grafen katkılı numuneler ile katkısız numuneler arasında, p değeri 0,05’ten büyük olduğu için anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Ek olarak %0,45 grafen katkılı numuneler ile %0,15 ve %0,60 grafen katkılı numunelerin elastiklik modülleri arasında da anlamlı bir fark bulunmaktadır. Bu sebeple istatistiksel olarak G45 kodlu numunelerin ortalama elastiklik modülü G00, G15 ve G60 kodlu numunelerin elastik modüllerinden daha büyüktür denilebilir. %0,45 ve %0,30 grafen katkılı numuneleri kıyaslandığında p değeri 0,05’ten büyük olduğu için aralarındaki fark anlamlı değildir. Ortalama eğme elastiklik modülleri kıyaslandığında da G30 ve G45 kodlu numunelerin eğme elastiklik modülleri arasındaki farkın çok az olduğu gözlemlenmiştir. İstatistiksel olarak da grafen katkısının eğme elastik modülünü artırıcı etkisi olduğu söylenebilir. Şekil 5.7’de eğme tokluk değerlerinin yüzde değişim grafiği gösterilmiştir. Ayrıca GNT katkısının tokluk üzerindeki etkisi Çizelge 5.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. Grafen katkısının tokluk üzerindeki etkisi

Numune	Tokluk (MJ/m ³)	Yüzde değişim (%)
G00	6,07 ± 0,09	-
G15	6,74 ± 0,14	11,04
G30	7,04 ± 0,02	15,96
G45	7,30 ± 0,42	20,15
G60	7,03 ± 0,04	15,80



Şekil 5.7. Eğme tokluklarının yüzde değişimi

G00 numuneleri incelendiğinde ortalama olarak 6,07 MJ/m³'lük bir tokluk değeri gözlemlenmiştir. Bu tokluk miktarı referans alındığında G15 kodlu numunelerin ortalama tokluğu %11,04 artmıştır. G30 kodlu numuneler de ise %15,96'lık bir artış ile 7,3 MJ/m³ tokluk elde edilmiştir. G45 kodlu numuneler ise %20,1'lik bir artışla 7,29MJ/m³ olarak gözlemlenmiştir. G60 kodlu numunelerde ise %15,8'lik bir artış oluşmuştur. En fazla tokluk değeri ağırlıkça %0,45 GNT katkılı numunelerde gözlemlenmiştir. Ek olarak grafenin tokluğu artırıcı etkisi literatürde bulunan çalışmalarda da bulunmaktadır [20,21,24,36]. Eğme tokluklarının değişiminin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student T-testi ile kontrol edilmiştir. İstatistik testinin çıktıları Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Eğme toklukları için Student T-testi p değerleri

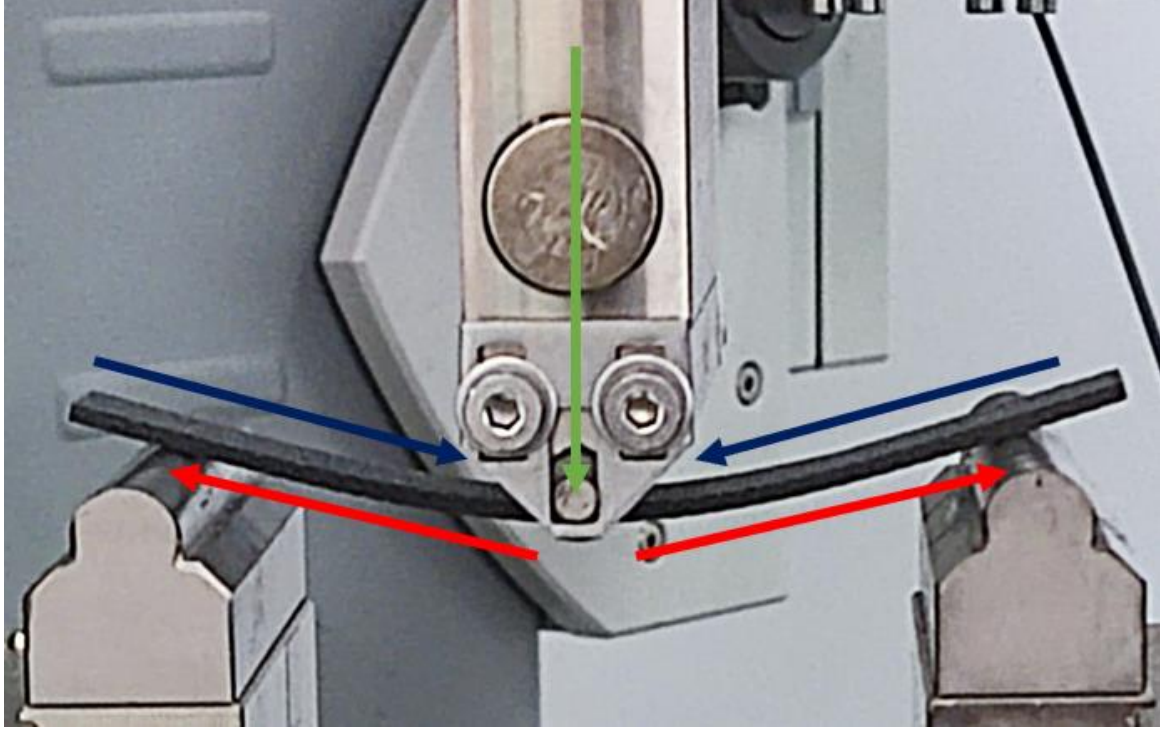
Numune	G60	G45	G30	G15
G00	0,038*	0,033*	0,006*	0,047*
G15	0,163	0,284	0,07	
G30	0,500	0,489		
G45	0,613			

Çizelge 5.8’de elde edilen p değerleri incelendiğinde, p değerleri 0,05’ten küçük olduğu için katkısız numuneler ile tüm katkılı numunelerin arasındaki tokluk farkları anlamlıdır. Bu sebeple istatistiksel olarak da grafen katkısının tokluğu arttırdığından söz edilebilir. Fakat katkılı numuneler kendi aralarında karşılaştırıldığında, aradaki artış farkları nispeten az olduğundan dolayı tokluk değerleri istatistiksel olarak anlamlı değildir.

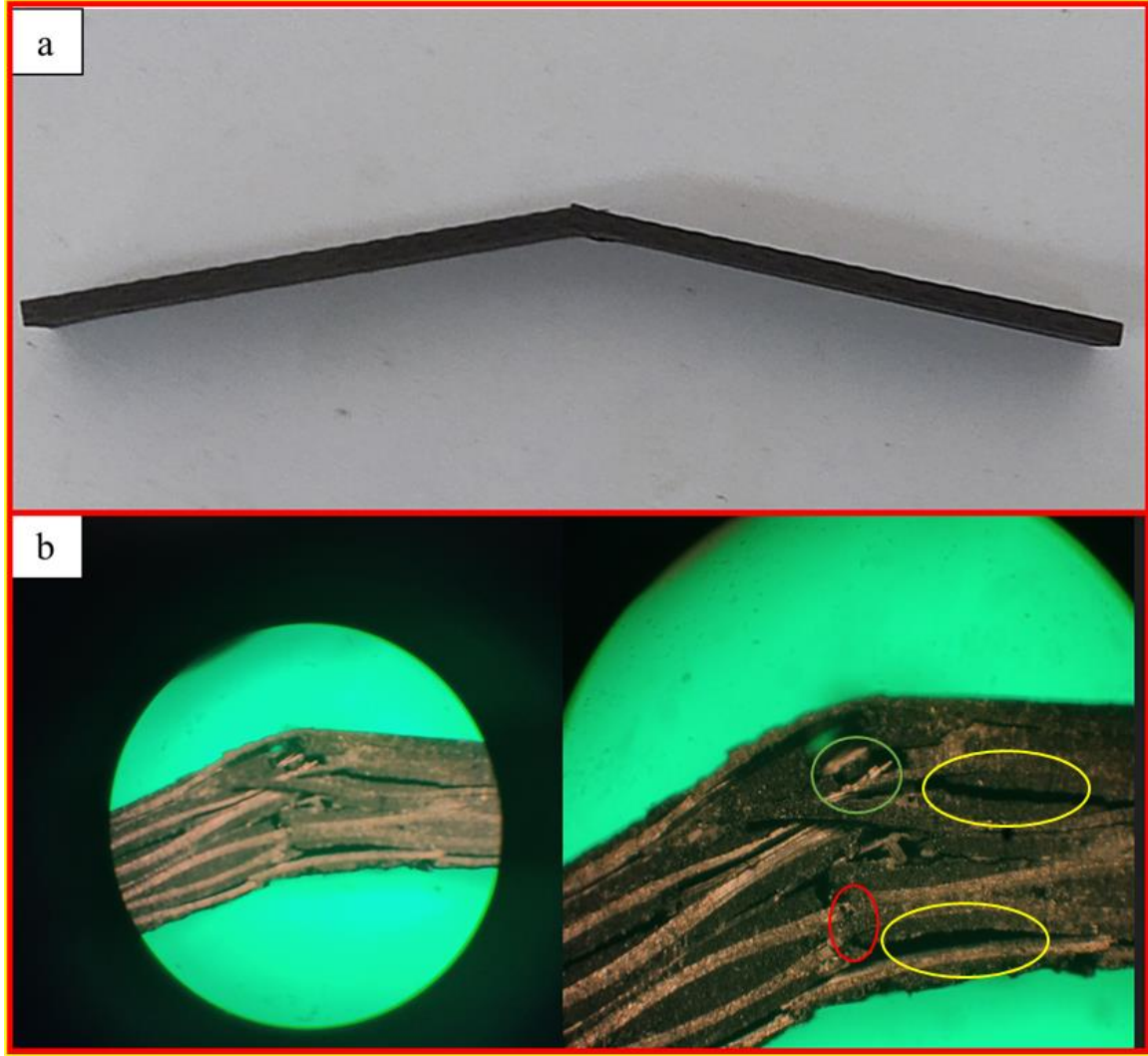
Ortalama dayanım, eğme elastiklik modülü ve tokluk değerleri göz önüne alındığında ağırlıkça GNT katkısının ilgili parametre değerlerini arttırdığı söylenebilir. GNT katkılı numunelerin değerlerinin katkısız numunelere kıyasla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Elastik modüllerindeki artışlara bakıldığında kompozitlerin üretiminin başarılı olduğu söylenebilir. %0,45 GNT katkılı numunelere kadar ortalama dayanım, tokluk ve elastik modülü değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. %0,45 GNT katkısından sonra ise ilgili ortalama değerlerde düşüşler gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %0,6 GNT katkılı numunelerde katkı artış oranına ters olarak; ilgili ortalama değerlerde değişim gözlemlense de bu numunelerin değerlikleri katkısız numunelere kıyasla daha büyüktür. Dayanım, eğme elastiklik modülü değerlerindeki azalma, belirli katkı yüzdesi sonrasındaki boşluk hacim oranı artışı ve topaklanma ile açıklanabilir. Zira belirli bir boşluk ve topaklanma oranından sonra kompozitlerin mekanik özellikleri olumsuz etkilenmektedir [21].

GNT katkısı, karbon fiber kompozit plakaları dayanımını %19 arttırmıştır. Eğme elastiklik modülünü ise %13 arttırmıştır. Toklukluğunu ise %20 arttırmıştır. Resim 5.3’te üç nokta eğme testi anındaki numunenin görüntüsü verilmiştir. Yeşil ile gösterilen ok yönünde kuvvet uygulanmaktadır. Bu uygulanan kuvvet sağ ve sol yöndeki destekler

tarafından taşınmaktadır. Oluşan sehim ile birlikte kırmızı ok ile belirtilen alt kısımda çekme kuvveti, mavi oklar ile belirtilen üst yüzeyde ise basma kuvveti oluşmaktadır. Bu oluşan kuvvetler sonucunda yapı hasarının oluştuğu görülmektedir.

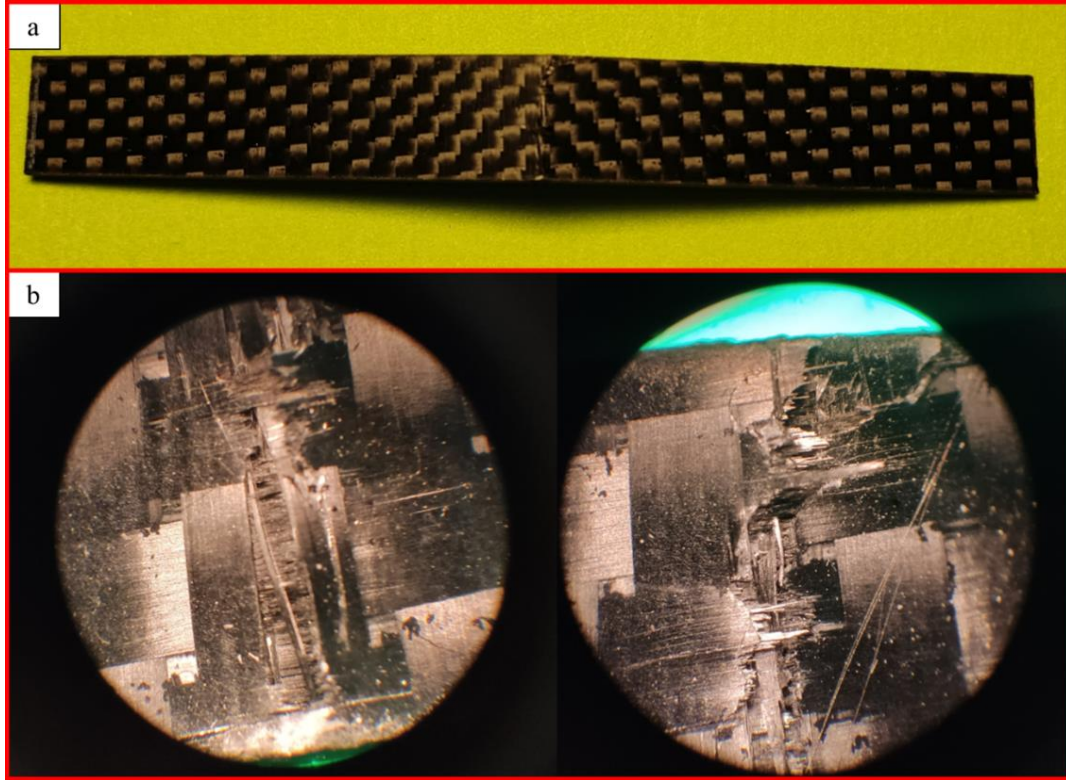


Resim 5.3. Numunenin 3 nokta eğme testindeki yükleme durumu



Resim 5.4. G45 kodlu 3 nokta eğme testi sonrası kesit alanı hasar bölgesi a) makro görüntüsü b) mikro görüntüsü

Resim 5.4'te G45 kodlu numunenin kesitinde bulunan makro ve mikro görüntüleri verilmiştir. Mikro görüntülere bakıldığında sarı ile işaretli yerlerdeki delaminasyon hasarı oldukça net görülmektedir. Bunun yanında ise fiberlerin yeşil ile gösterilen bölgede fiberlerin matrinden sıyrılması, kırmızı ile gösterilen yerde ise fiberlerin kopması görülmektedir. Resim 5.5'te G45 kodlu numuneni yüzey hasar bölgesini makro ve mikro görüntüleri verilmiştir.



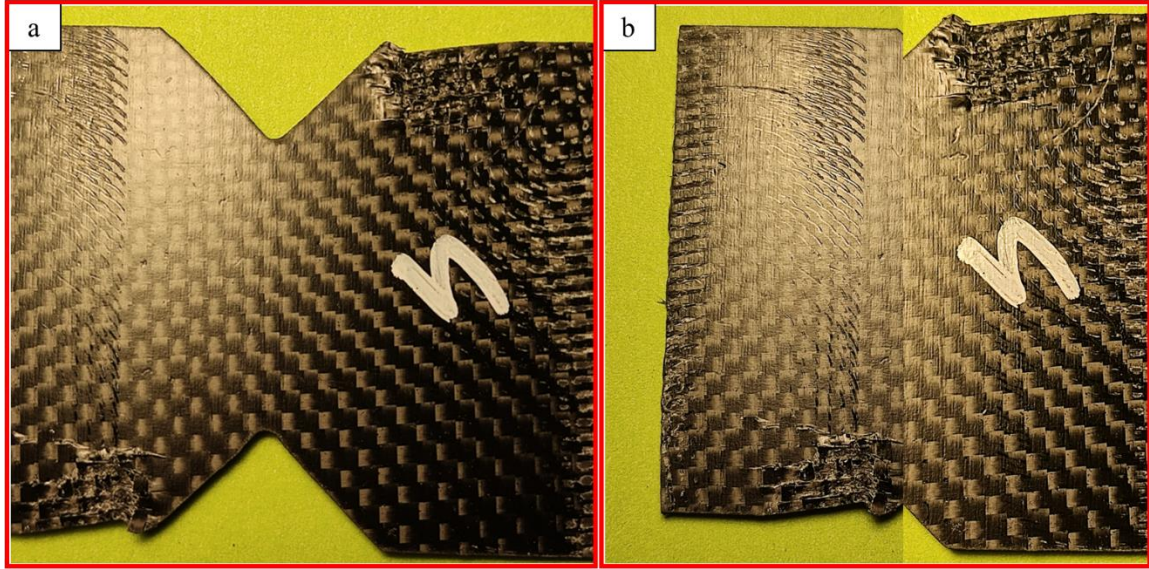
Resim 5.5. G45 kodlu 3 nokta eğme testi sonrası yüzey hasar bölgesi a) makro görüntüsü b) mikro görüntüsü

Yüklemeye sonrası düz olan numune yüzeyi V şeklini almıştır. Çekme kuvvetine maruz kalan yüzeydeki hasar incelendiğinde fiberlerde zikzaklı kırılmalar ve fiber kopmaları görülmektedir. Resim 5.5'te görülen hasar yüzeyi ilk kırılan tabakadır, kırılmalar tabaka tabaka devam etmektedir. Her tabakadaki fiberler koptukça eğme gerilmesi-gerinim grafiklerinde dalgalanmalar oluşmaktadır.

5.3. V-Çentikli Makaslama Deneyi

Bu deneyde hazırlanan numuneler kesme yüküne maruz bırakılmış ve GNT katkısının kesme davranışına etkisi incelenmiştir. Katkılanan numunelerin dayanımları katkılanmayan numunelerin dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Bu test ile normalde kesme modülü ve kesme dayanımı ölçülebilmektedir. Bu test kapsamında ise yalnızca kesme dayanımı değerlendirilmiş ve hesaplanmıştır. Bu deney kapsamında G00, G15, G30, G45, G60 kodlu olmak üzere üretilen 5 farklı plakanın her birinden 3 numune olacak toplamda 15 numune testi gerçekleştirilmiştir. Yalnızca G15-1 kodlu numune test sırasında kabul edilen kırılma modunun dışında bir kırılma davranışı sergilediğinden ortalama dayanım hesabının dışında

bırakılmıştır. Bunun sebebi numunenin fıkstüre tam oturtulamamasından kaynaklanmaktadır. Resim 5.6’da kırık yüzeyi görüntüsü verilmiştir.

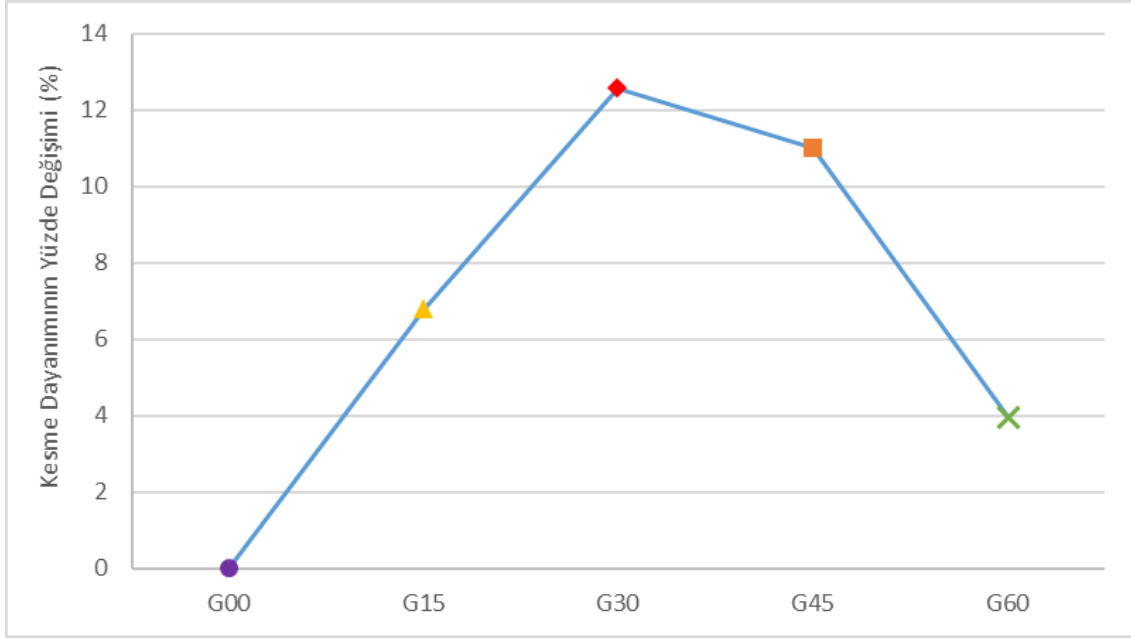


Resim 5.6. G15-1 kodlu numunenin kırık görüntüsü a) tam boyut, b)sağ ve sol kenar görüntüsü

Şekil 5.8’de numunelerin ortalama dayanım değişimi gösterilmiştir. GNT katkısının kesme dayanımına olan etkisi Çizelge 5.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9. Grafen katkısının kesme dayanımına olan etkisi

Sembol	Kesme Dayanımı (MPa)	Yüzde değişim (%)
G00	$72,89 \pm 1,68$	-
G15	$77,84 \pm 0,52$	6,79
G30	$82,06 \pm 1,68$	12,58
G45	$80,92 \pm 0,87$	11,02
G60	$75,77 \pm 3,08$	3,96



Şekil 5.8. Numunelerin ortalama kesme dayanımı yüzde değişimleri

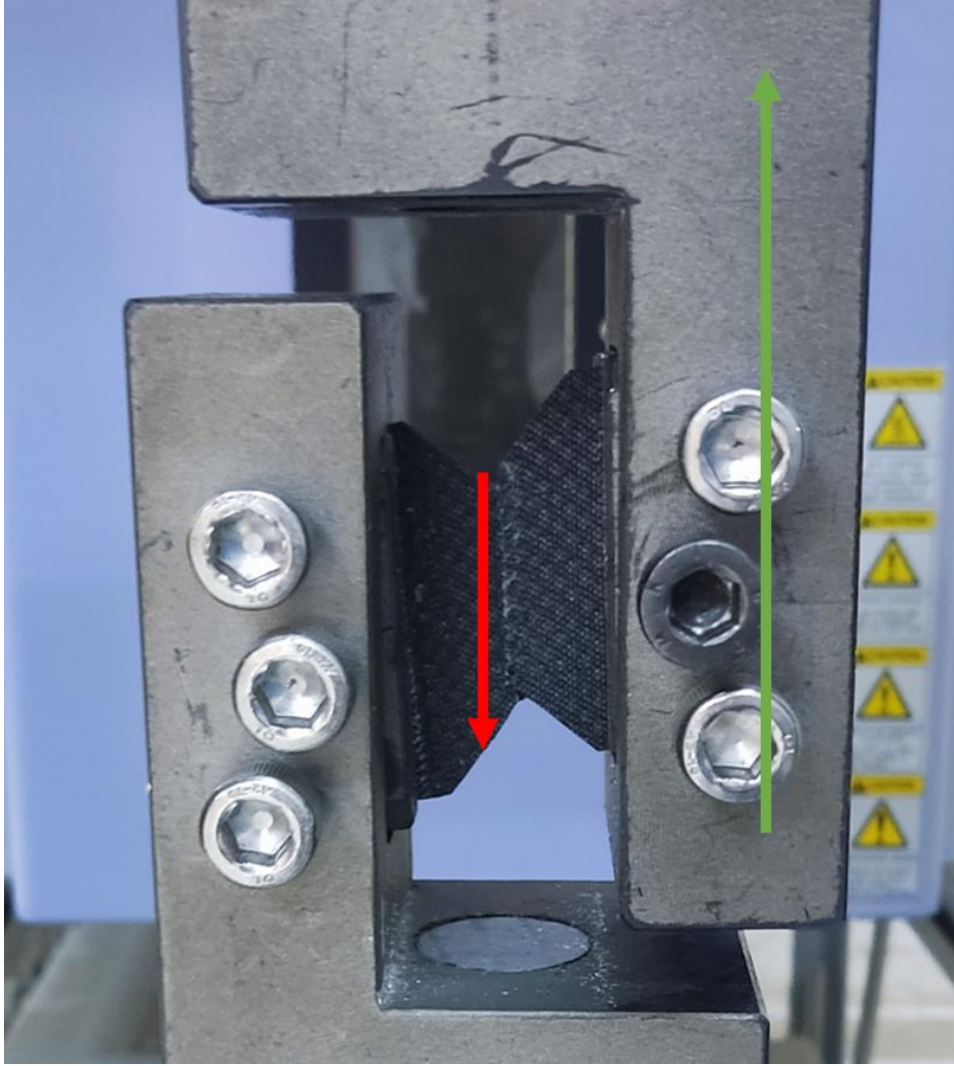
Numuneler incelendiğinde katkısız numunelerin 72,89 MPa dayanım değerinde kırıldıkları gözlemlenmiştir. Bu numuneler referans alındığında ağırlıkça %0,15 GNT katkılı numunelerde dayanım artışı %6,79 artarak 77,84 MPa olarak elde edilmiştir. %0,3 GNT katkılı numunelerde ise %12,58 oranında artış sağlanarak 82,06 MPa dayanım değeri elde edilmiştir. %0,3 katkıdan sonraki katkılarda ise artış miktarı düşmektedir. %0,45 GNT katkılı numunelerde %11,02 artış sağlanarak 80,92 MPa dayanım değeri elde edilmiştir. %0,6 GNT katkılı numuneler de ise %3,96'lık bir artış sağlanarak 75,77 MPa dayanım değeri elde edilmiştir. Tüm numuneler incelendiğinde %0,3 oranına kadar orantılı bir artış gerçekleşmiş denilebilir. Bu artış GNT'lerin matris elamanı ile iyi bir bağ kuvveti oluşturması olarak açıklanabilir. Dayanım kuvvetinin belirli bir katkı yüzdesinden sonra düşmesinin sebebi ise artan boşluk hacim oranı olduğu söylenebilir. Çünkü boşluklar yapı üzerinde bir kusur veya bir çatlak gibi davranır. Bu süreksizlikler mukavemetin düşüşünde oldukça etkilidir. GNT takviyesinin dayanımı arttırırken boşlukların fazla olması sebebiyle daha fazla dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Kesme dayanımı değişimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student T-testi ile kontrol edilmiştir. İstatistik testinin çıktıları Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Kesme dayanımları için Student T-testi p değerleri

Numune	G60	G45	G30	G15
G00	0,326	0,011*	0,029*	0,138
G15	0,750	0,326	0,09	
G30	0,110	0,54		
G45	0,095			

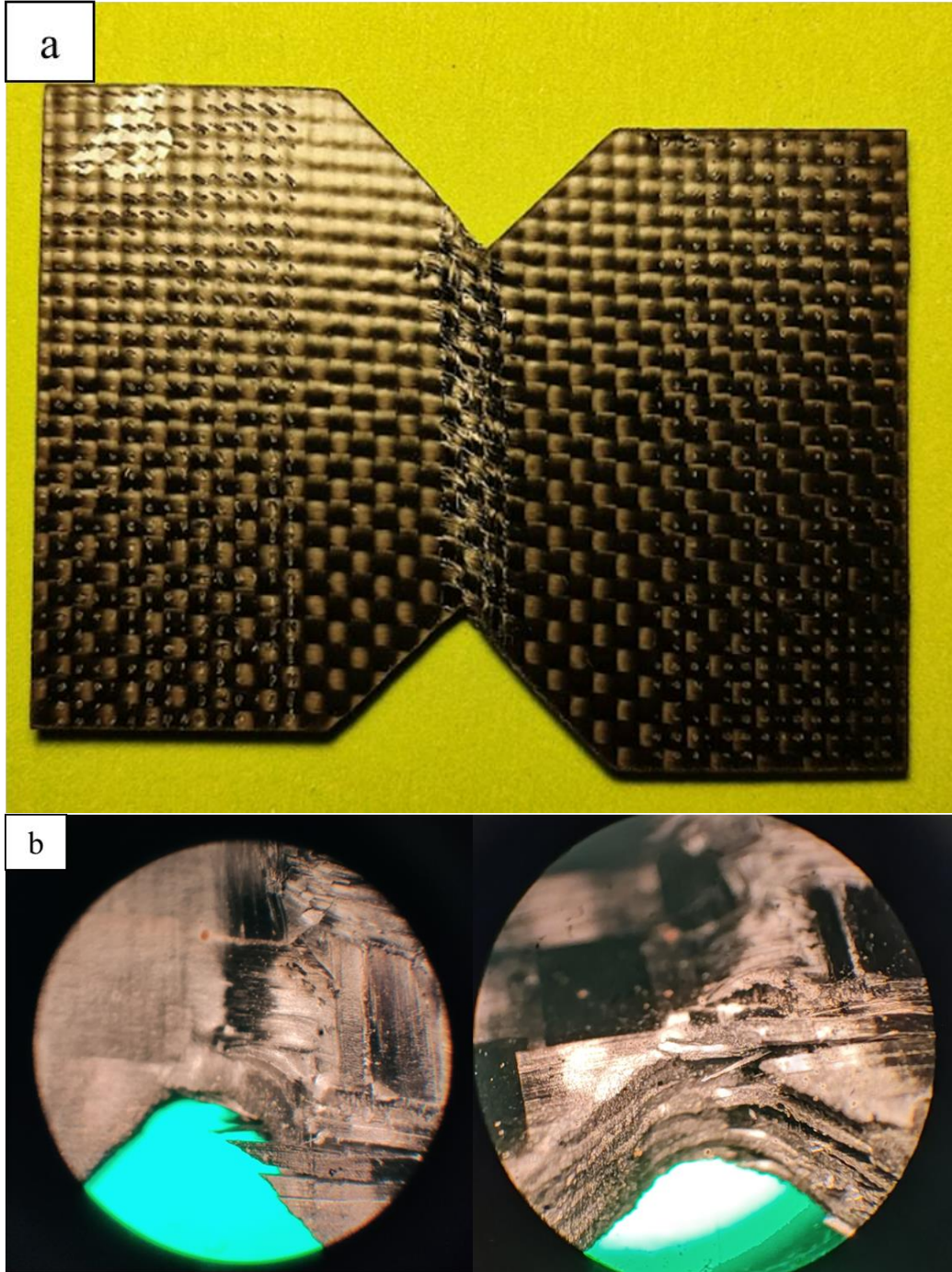
T test sonucunda elde edilen değerleri incelendiğinde, genel olarak test sonuçlarının arasındaki istatistiksel farkın önemli ve anlamlı olmadığı görülmüştür. Katkısız numuneler ile %0,45 ve %0,30 grafen katkılı numuneler arasındaki dayanım değerleri arasındaki fark önemli ve anlamlı iken, katkısız numuneler ve 0,15% grafen katkılı ve %0,60 grafen katkılı numuneler arasındaki fark önemli ve anlamlı değildir. Ayrıca tüm grafen katkılı numuneler birbirleri ile kıyaslandığında aralarındaki farkın anlamlı olmadığı gözlemlenmiştir. Buradan hareketle GNT katkısının kesme dayanımını arttırdığı söylenebilir fakat bu artış oranının düşük olması sebebiyle, düşük oranlardaki GNT katkısının etkisinin az olması ve yüksek katkı oranlarında da malzeme yapısındaki boşluklar sebebiyle elde edilen kesme dayanımı farkları istatistiksel olarak anlamsızdır.

Resim 5.7’de V çentikli makaslama test anındaki G30 kodlu numunenin görüntüsü verilmiştir. Yeşil ile gösterilen ok yönünde kuvvet uygulanmaktadır. Numune diğer yönden sabit tutulmaktadır. Uygulanan kuvvet ile birlikte çentikli kesitte kırmızı ok ile gösterilen bir kesme kuvveti oluşmaktadır. Bu kesme kuvveti fiberleri matris arasında hareket ettirmeye çalışarak önce fiberlerin sıyrılmasına sonra fiberlerin kopmasına sebebiyet vermektedir.



Resim 5.7. G30 kodlu numunenin V çentikli makaslama testi yükleme durumu

Resim 5.8’de V çentikli makaslama testi sonrası G30 kodlu numunenin hasar bölgesinin makro ve mikro görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde fiberlerin matrislerden ayrıldığı ve serim açılarının değiştiği gözlemlenmektedir. Serim açıları değiştikten sonra fiberler eksenel yük taşımaya başladıkları için yükleme durumu değişmektedir. Bu yüzden bu testte tam kopma görülene kadar devam edilmemiştir. İlk dayanım değerinde görülen düşüşte test sonlandırılmıştır. Makro ve mikro görüntüler incelendiğinde hasar bölgesinde tabakaların ayrılması ve üst tabakada, fiber yönlenmesi ve fiber kopmaları gözlemlenmiştir.



Resim 5.8. G30 kodlu numunenin V çentikli makaslama testi sonrası yüzey-hasar bölgesi
a) makro görüntüsü, b) mikro görüntüsü

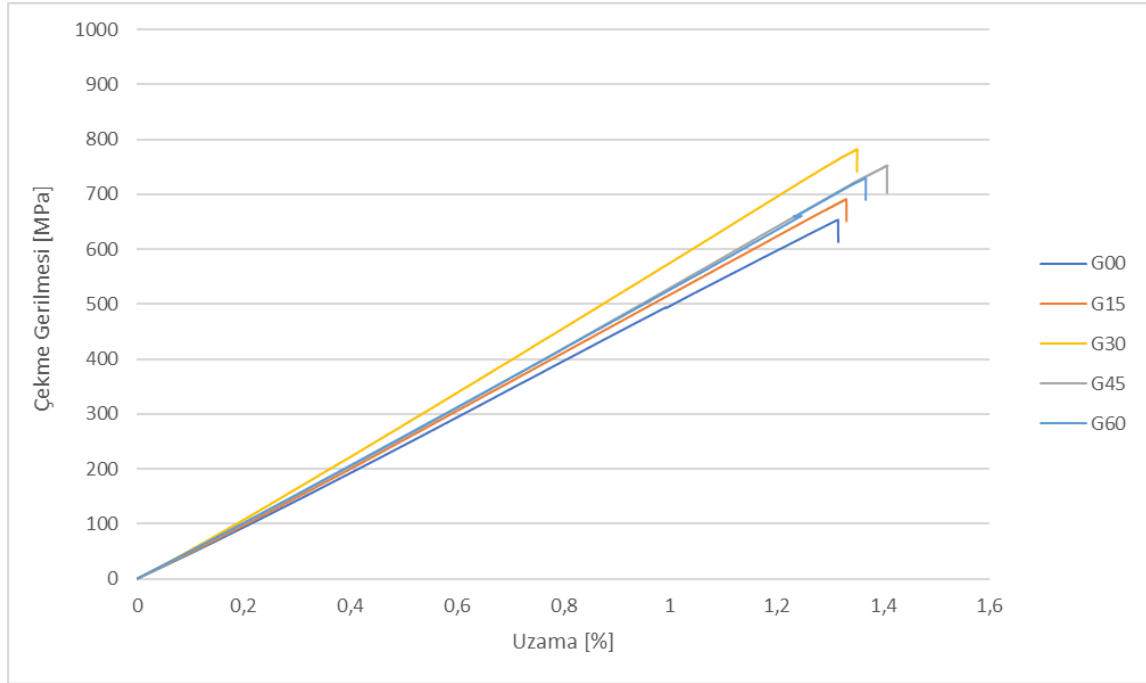
5.4. Çekme Deneyi

Bu deneyde hazırlanan numuneler çekme yüküne maruz bırakılmış ve GNT katkısının çekme davranışına etkisi incelenmiştir. Bu deney kapsamında G00, G15, G30, G45, G60 kodlu olmak üzere üretilen 5 farklı plakanın her birinden 3 numune olacak toplamda 15 numune testi gerçekleştirilmiştir. Yalnızca G15 kodlu numunelerden bir tanesinde test edildikten sonra üretim esnasında kullanılan sabitleme bantlarının arada kaldığı ve bundan dolayı enine kalınlıklarında aşırı farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple G15 kodlu numunelerden bir tanesi değerlendirme dışında bırakılmıştır. Çizelge 5.11’de çekme deneyi sonrasında elde edilen çekme mukavemeti, elastik modülü ve tokluk değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.11. Çekme deneyi sonuçları

Numune	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Tokluk (MJ/m ³)
G00	659,896 ± 4,91	46,305 ± 1,2	4,51 ± 0,15
G15	693,673 ± 17,49	48,735 ± 1,02	4,765 ± 0,04
G30	783,817 ± 13,26	53,957 ± 0,99	5,467 ± 0,26
G45	757,123 ± 19,23	49,675 ± 0,95	5,353 ± 0,15
G60	729,486 ± 15,95	48,331 ± 1,09	5,203 ± 0,06

Çizelge 5.11 incelendiğinde grafen miktarı arttıkça çekme mukavemeti, elastik modülü ve tokluk değerlerinin artış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ortalama değerler incelendiğinde en düşük değerler katkısız numunelerde gözlemlenirken, en yüksek değerler ise G30 kodlu numunelerde gözlemlenmiştir. Şekil 5.9’da çekme deneyi eğrileri verilmiştir.

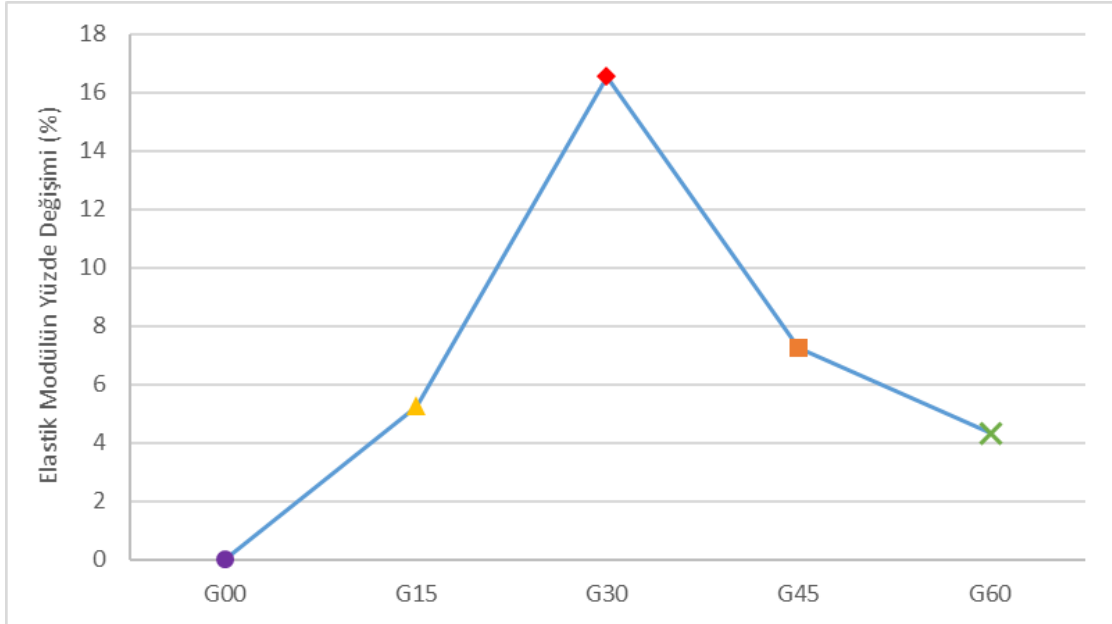


Şekil 5.9. Tüm numunelerin çekme gerilmesi-yüzde uzama grafikleri

Deney eğrileri incelendiğinde sonuçlardan da görüldüğü üzere GNT katkısı çekme mukavemetini arttırmıştır. Ayrıca eğri eğimleri de incelendiğinde GNT katkısı karbon fiber plakaların elastik modülünü de arttırmıştır. Bunun sebebi, GNT'lerin epoksi ve karbon fiberler ile güzel bir arayüzey bağı oluşturduğu olarak söylenebilir. %0,30 GNT katkılı numunelerde maksimum dayanım ve elastik modül değerlikleri elde edilmiştir %0,60 ve %0,45 GNT katkılı numunelerde ise bu değerlerde düşüş gözlemlenmiştir. Fakat uzama miktarları G30 katkılı numunelere göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum iki türlü şekilde açıklanabilir. Birincisi; GNT'lerin topaklanma şekline, miktarına, sentez yöntemine ve kullanılan bağlayıcının tipine bağlıdır [18]. Ortamda bulunan miktar parametresi hariç tüm parametreler sabit tutulduğundan GNT miktarı arttıkça topaklanmanın arttığı bundan dolayı gerilim yığılmaları olduğu ve arayüzey bağlarının tam kurulamaması gibi durumların olduğu söylenebilir. İkincisi ise numunelerde bulunan boşluk miktarının artmasıyla, epoksi, fiberler ve GNT'ler arasındaki yapışmanın zayıfladığı ve bu yapışma ile birlikte dayanım ve elastik modül değerlerinin düştüğü söylenebilir. Şekil 5.10'da numunelerin elastik modüllerinin yüzde değişimi grafik olarak gösterilmiştir. Ayrıca GNT katkısının elastik modülüne etkisi Çizelge 5.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12. Numunelerin ortalama elastik modül değişimleri

Numune	Elastik modülü (GPa)	Yüzde değişim (%)
G00	$46,305 \pm 1,2$	-
G15	$48,735 \pm 1,02$	5,25
G30	$53,957 \pm 0,99$	16,53
G45	$49,675 \pm 0,95$	7,28
G60	$48,331 \pm 1,09$	4,37



Şekil 5.10. Numunelerin çekme elastik modülü yüzde değişimi

G00 numuneleri elastik modülü incelendiğinde ortalama olarak 46,3 GPa elastik modülü elde edilmiş. G00 değeri referans alındığında %0,15 oranındaki grafen katkısının elastik modülünü yaklaşık olarak 5% oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. %0,3 oranında GNT katkılı numunelerin elastik modülü incelendiğinde ise bu oran yaklaşık %16,5 civarında artışla 53,96 GPa değerine ulaşmaktadır. %0,45 oranında katkılanan numuneler incelendiğinde ise %7,28 artışla 49,65 GPa değerinde ulaşmıştır. G60 kodlu numuneler incelendiğinde ise katkılanmamış numunelere kıyasla çekme modülü değeri 4,37% fazla olarak 48,33 GPa olarak gözlemlenmiştir.

Maksimum çekme elastik modülü değerinin elde edildiği %0,30 oranında GNT katkılanan numuneler diğer numuneler ile kıyaslandığında G00'ın çekme elastiklik modülünden %16,53 oranında daha fazla olduğu, G15'in çekme elastiklik modülünden %10,7 daha fazla olduğu, G45'in çekme elastik modülünden %8,6 daha fazla ve son olarak G60'ın elastiklik modülünden ise %11,64 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çekme elastiklik modülleri ele alındığında %0,30 GNT katkısına kadar çekme elastiklik modülü artmıştır. G45 kodlu ve G60 kodlu numunelerin elastik modül değerlerinde ise GNT katkı oranı artışı ve elastik modül artışı arasındaki ilişki bozulmuş ve elastik modül GNT katkısı artmasına rağmen düşmüştür. Ek olarak literatürde grafenin çekme elastik modülüne arttırıcı etkisinin olduğunu bildiren çalışmalar bulunmaktadır [32-34]. Çekme elastik modülü değişimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student T-testi ile kontrol edilmiştir. İstatistik testinin çıktıları Çizelge 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13. Elastik modüller için Student T-testi p değerleri

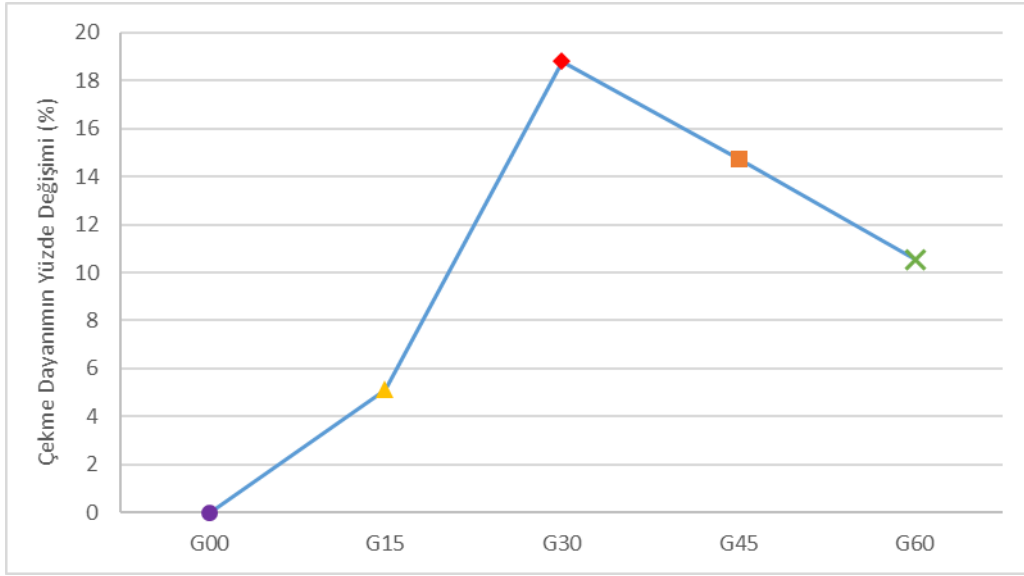
Numune	G60	G45	G30	G15
G00	0,226	0,153	0,009*	0,499
G15	0,727	0,823	0,253	
G30	0,047*	0,056		
G45	0,187			

Çizelge 5.13'te verilen p değerlerine bakıldığında genel olarak elde edilen elastik modüllerin birbirleri arasındaki farkın önemsiz ve anlamlı olmadığı gözlemlenmiştir. Fakat G30 kodlu numuneler ile katkısız ve G60 kodlu numunelerin elastik modülleri arasındaki fark anlamlı ve önemlidir. Bu sebeple grafen katkısının elastiklik modülünü arttırdığı söylenebilir. Ayrıca G15 kodlu numunelerindeki veri sayısının 2 olması sebebiyle G30 kodlu numuneler arasındaki elastik modül değerlerinin anlamsız çıkmasına neden olduğu söylenebilir.

Şekil 5.11'de numunelerin ortalama çekme dayanımlarının yüzde değişimi grafik olarak gösterilmiştir. Ayrıca GNT katkısının dayanıma olan etkisi Çizelge 5.14'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.14. Numunelerin ortalama çekme dayanımı değişimleri

Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde değişim (%)
G00	659,896 ± 4,91	-
G15	693,673± 17,49	5,12
G30	783,817 ± 13,26	18,78
G45	757,123 ± 19,23	14,73
G60	729,486± 15,95	10,55



Şekil 5.11. Numunelerin ortalama dayanım yüzde değişimleri

G00 numuneleri incelendiğinde ortalama olarak 659,9 MPa çekme dayanımı elde edilmiş. G00 dayanım değeri referans alındığında %0,15 oranındaki grafen katkısının dayanımı yaklaşık olarak %5,12 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. %0,3 oranında GNT katkılı numunelerin dayanımı incelendiğinde ise bu oran yaklaşık %18,78 oranında artışla 783,82 MPa değerine ulaşmaktadır. %0,45 oranında katkılanan numuneler incelendiğinde ise %14,73 artışla 757,12 MPa değerinde ulaşmıştır. G60 kodlu numuneler incelendiğinde ise katkılanmamış numunelere kıyasla dayanım değeri %10,55 fazla olarak 729,49 MPa olarak gözlemlenmiştir. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği %0,30 oranında GNT katkılanan numunelerin dayanım değerleri diğer numuneler ile kıyaslandığında G00'ın çekme dayanımından %18,78 oranında daha fazla olduğu, G15'in çekme dayanımından %13 daha fazla olduğu, G45'un çekme

dayanımından %3,5 daha fazla ve son olarak G60'ın çekme dayanımından ise %7,44 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama dayanım değerleri incelendiğinde %0,30 GNT katkısına kadar çekme dayanımı artmıştır. G45 ve G60 kodlu numunelerin dayanım değerlerinde ise GNT katkı oranı artışı ve dayanım artışı arasındaki ilişki bozulmuş ve dayanım değeri GNT katkısı artmasına rağmen düşmüştür. Ayrıca literatür de GNT katkısının çekme dayanımını arttırıcı etkisinin olduğunu bildiren çalışmalar bulunmaktadır [22,26,32]. Çekme dayanım değişimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student T-testi ile kontrol edilmiştir. İstatistik testinin çıktıları Çizelge 5.15'te verilmiştir.

Çizelge 5.15. Çekme dayanımları için Student T-testi p değerleri

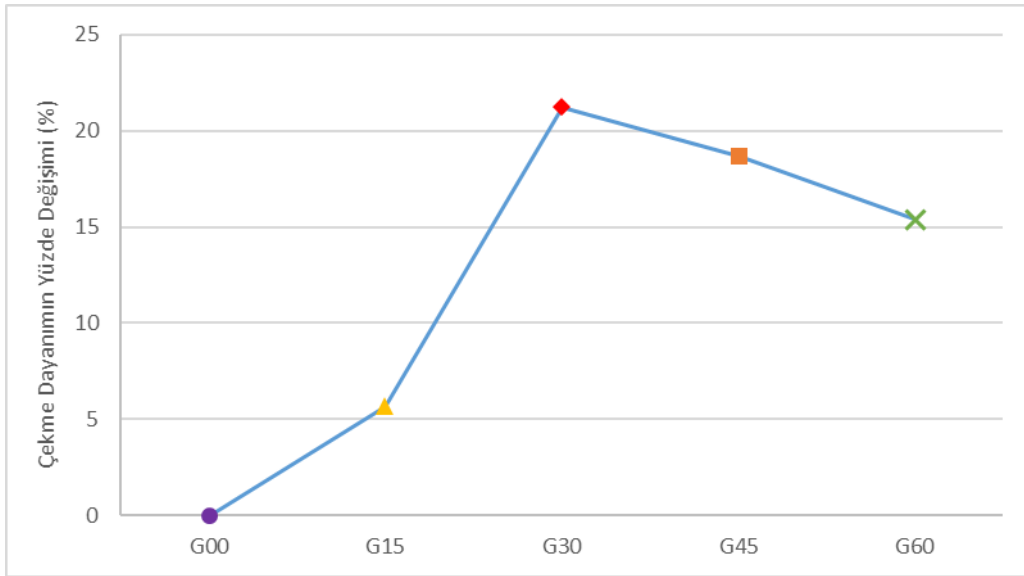
Numune	G60	G45	G30	G15
G00	0,05*	0,042*	0,023*	0,147
G15	0,096	0,048*	0,043*	
G30	0,026*	0,342		
G45	0,285			

Çizelge 5.15'te verilen p değerlerine bakıldığında, katkısız numuneler ile G30, G45 ve G60 kodlu numunelerin dayanım değerleri arasındaki fark önemli ve anlamlıdır. Bu sebeple grafen katkısının çekme dayanımını arttırdığı sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca G30 kodlu numuneler ile G15 ve G60 kodlu numunelerin dayanım değerleri arasındaki fark da istatistiksel olarak anlamlı ve önemli olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama çekme dayanımı değerleri kıyaslanırken de görüldüğü gibi G45 ve G30 kodlu numunelerin yüzde değişimlerinde az miktar farklılık bulunmaktadır. Bu sebeple istatistiksel olarak G45 ve G30 kodlu numuneler arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı önemli değildir.

Şekil 5.12'de numunelerin tokluk değerlerinin yüzde değişim grafiği gösterilmiştir. Ayrıca GNT katkısının tokluk değerine olan etkisi Çizelge 5.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.16. Numunelerin ortalama tokluk değişimleri

Sembol	Tokluk (MJ/m ³)	Yüzde değişim (%)
G00	4,51 ± 0,15	-
G15	4,765 ± 0,04	5,65
G30	5,467 ± 0,26	21,21
G45	5,353 ± 0,15	18,70
G60	5,203 ± 0,06	15,37



Şekil 5.12. Numunelerin ortalama tokluk yüzde değişimleri

G00 numuneleri incelendiğinde ortalama olarak 4,51 MJ/m³ 'lük bir tokluk değeri gözlemlenmiştir. Bu tokluk değeri referans alındığında G15 kodlu numunelerin ortalama tokluğu %5,65 artarak 4,77 MJ/m³ olarak elde edilmiştir. G30 kodlu numuneler ise %21,21 'lik bir artış ile 5,47 MJ/m³ olarak gözlemlenmiştir. G45 kodlu numuneler ise %18,70'lik bir artış oluşmuştur. G60 kodlu numunelerde ise %15,37'lik bir artışla 5,2 MJ/m³ olarak gözlemlenmiştir. En fazla tokluk değeri ağırlıkça %0,30 GNT katkılı numunelerde gözlemlenmiştir. GNT katkısının absorbe ettiği enerji miktarını arttırdığı söylenebilir. Çekme tokluk değişimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student T-testi ile kontrol edilmiştir. İstatistik testinin çıktıları Çizelge 5.17'de verilmiştir.

Çizelge 5.17. Çekme toklukları için Student T-testi p değerleri

Numune	G60	G45	G30	G15
G00	0,035*	0,022*	0,027*	0,101
G15	0,053	0,048*	0,043*	
G30	0,206	0,734		
G45	0,422			

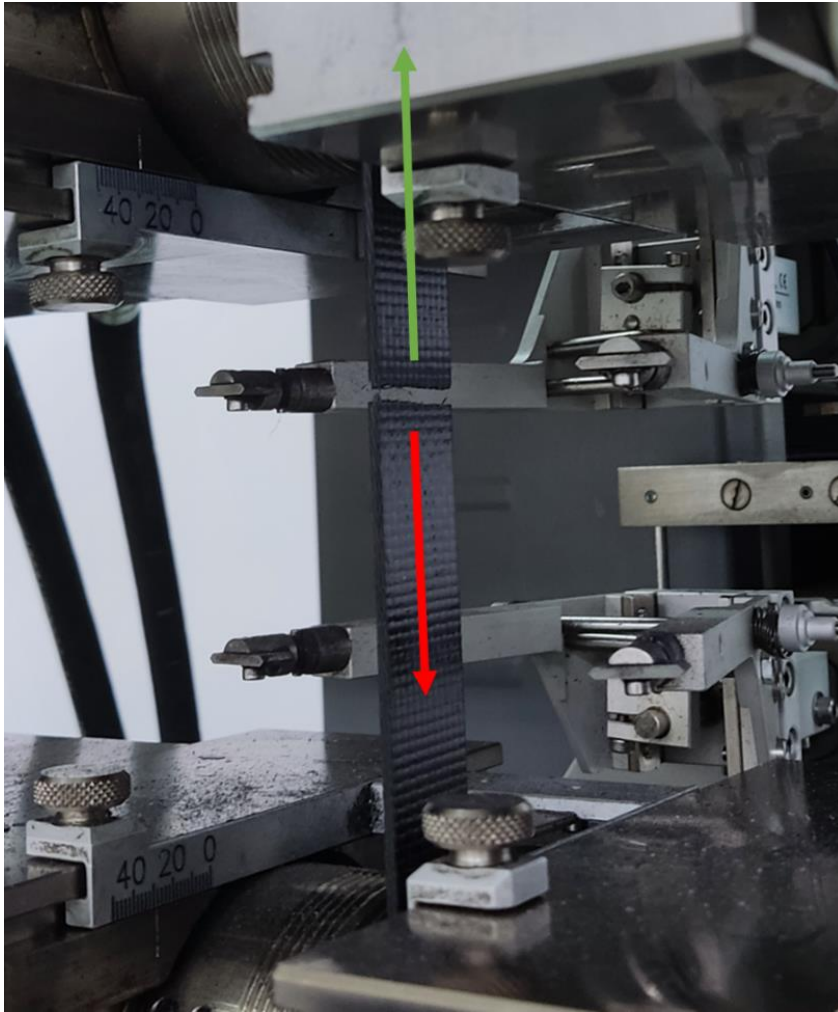
Çizelge 5.17 incelendiğinde katkısız numuneler ile %0,15 grafen katkılı numuneler haricindeki tüm grafen katkılı numunelerin tokluk değerleri arasındaki fark önemli ve anlamlıdır. Ayrıca %0,45 ve %0,30 grafen katkılı numunelerin tokluk değerleri ile %0,15 grafen katkılı numunelerin tokluk değerleri arasındaki farklar anlamlı ve önemlidir. Bu sebeple grafen katkısının tokluğu arttırdığı istatistiksel olarak da söylenebilir. G30, G45 ve G60 grafen katkılı numuneler arasındaki tokluk değişimleri ortalama tokluk değişimlerinde de görüldüğü gibi azdır bu sebeple istatistiksel olarak G30, G45 ve G60 grafen katkılı numunelerin toklukları arasındaki fark önemsiz ve anlamsızdır.

Dayanım ve elastik modülü değerleri göz önüne alındığında ağırlıkça %0,30 GNT katkılı numunelerde maksimum ortalama değerler gözlemlenmiştir. Çekme dayanımı katkı maddesi ile karmaşık bir ilişkiye sahiptir [163]. Katkı malzemesinin varlığı polimer zincirlerin çekilebilirliğini baskılayabilir ve kusur oluşturarak gerilme konsantrasyonunu arttırabilir, bu durumda çekme mukavemetinin azalmasına neden olabilir. Çekme mukavemetinde oluşmayan doğrusallık bu etkilerin sonucudur [163]. Aynı şekilde tokluk ve elastik modül değerleri de eklenen katkı maddesinin türüne, şekline, boyutuna, dolgu oryantasyonuna, dolgu-matris yapışmasına, yapı içindeki boşluklara, üretim yöntemi ve üretim koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [164]. Bundan dolayı belirli yüzdelere sonraki doğrusal olmayan değişimler bu durum ile açıklanabilir.

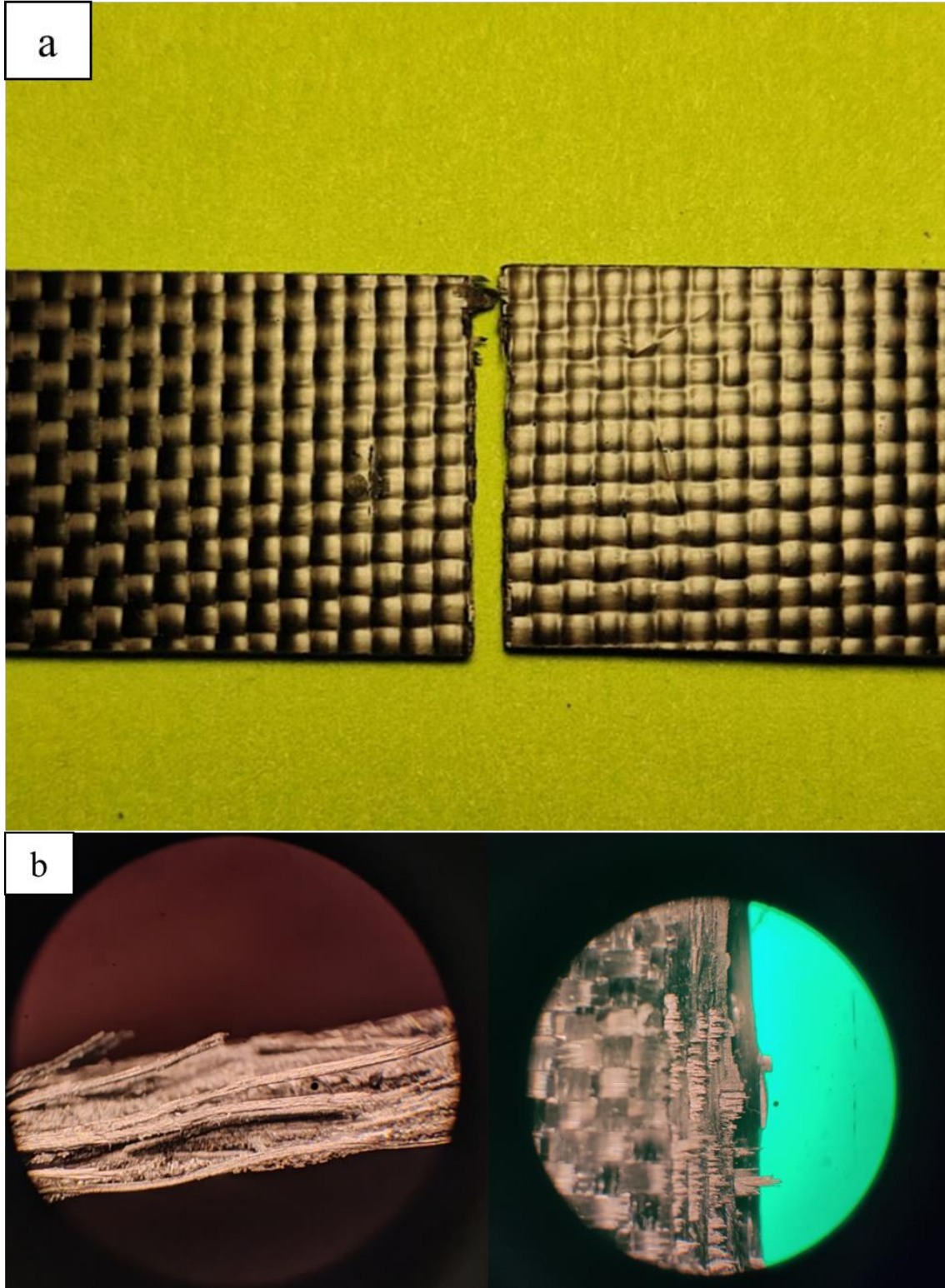
Ağırlıkça %0,15 ve %0,30 GNT katkılı numunelerde çekme elastiklik modülü, dayanım ve tokluk değerlerinde katkısız numunelere göre artışlar gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %0,45 ve %0,60 GNT katkılı numunelerde katkı artış oranına ters olarak ilgili

değerlerde değişim gözlemlense de bu numunelerin değerlikleri de katkısız numunelere kıyasla daha büyüktür. Yapılan bu deney kapsamında GNT katkısının çekme dayanımını, tokluğu ve çekme elastik modülünü arttığı gözlemlenmiştir.

Resim 5.9'da çekme testi kopma anındaki numunenin görüntüsü verilmiştir. Yeşil ile gösterilen ok yönünde kuvvet uygulanmaktadır. Numune diğer yönden sabit tutulmaktadır. Uygulanan kuvvet ile birlikte numunenin kesitinde kırmızı ok ile gösterilen çekme kuvveti oluşmaktadır. Çekme kuvveti elyafların serim yönünde olduğu için ana taşıyıcı fiberlerdir. Resim 5.10'da hasar bölgesinin makro ve mikro görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde fiberlerin kopması ve fiberlerin sıyrılması hasarı gözlemlenmiştir. Beklendiği gibi herhangi bir tabaka ayrılması gözlemlenmemiştir.



Resim 5.9. Numunenin çekme testi esnasında kopma anı



Resim 5.10. G30 kodlu numunenin çekme testi sonrası hasar bölgesi a) makro görüntüsü, b) mikro görüntüsü

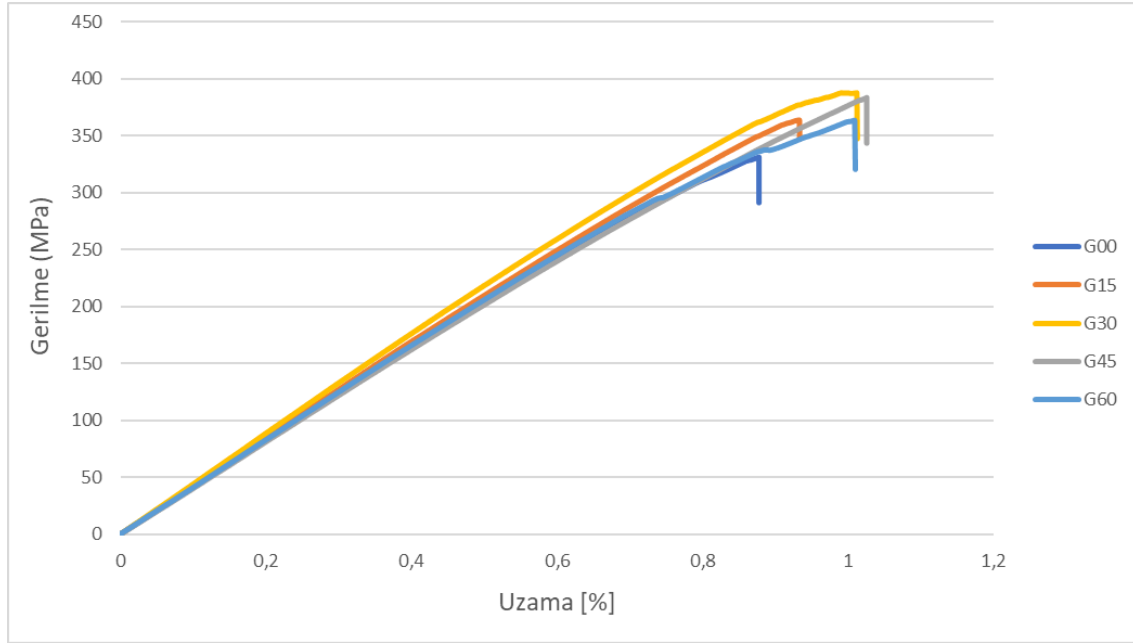
5.5. Açık Delik Çekme Deneyi

Bu deneyde hazırlanan numuneler çekme yüküne maruz bırakılmış ve GNT katkısının açık delik çekme davranışına etkisi incelenmiştir. Katkılanan numunelerin davranışları katkılanmayan numunelerin değerlikleri ile incelenmiştir. Bu deney kapsamında G00, G15, G30, G45, G60 kodlu olmak üzere üretilen 5 farklı plakanın her birinden 3 numune olacak toplamda 15 numune testi gerçekleştirilmiştir. Açık delik çekme testi sonucunda elde edilen tokluk ve dayanım değerleri Çizelge 5.18’de verilmiştir.

Çizelge 5.18. Açık delik çekme deneyi sonuçları

Numune	Açık Delik Çekme Mukavemeti (MPa)	Tokluk (MJ/m ³)
G00	329,193 ± 5,33	1,513 ± 0,07
G15	360,383 ± 2,97	1,777 ± 0,04
G30	393,010 ± 6,24	2,103 ± 0,05
G45	378,435 ± 4,75	2,063 ± 0,03
G60	357,379 ± 7,07	1,967 ± 0,09

Çizelge 5.18 incelendiğinde grafen miktarı arttıkça açık delik çekme dayanımı ve tokluk değerlerinin artış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ortalama değerler incelendiğinde en düşük değerler katkısız numunelerde gözlemlenirken, en yüksek değerler ise G30 kodlu numunelerde gözlemlenmiştir. Şekil 5.13’te açık delik çekme deneyi eğrileri verilmiştir.

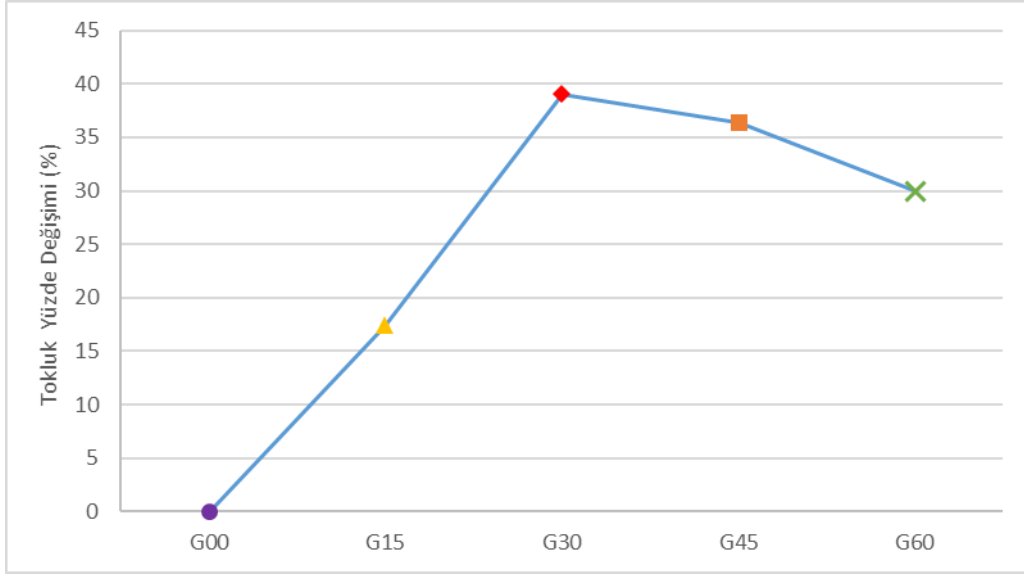


Şekil 5.13. Tüm numunelerin açık delik çekme gerilmesi- yüzde uzama grafikleri

Deney sonuçları incelendiğinde, GNT katkısı açık delik çekme mukavemetini arttırmıştır. Ayrıca kopma yüzde uzamaları incelendiğinde grafen katkılı numunelerin kopma yüzde uzamasının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. %0,30 GNT katkılı numunelerde maksimum dayanım değerlikleri elde edilmiştir. GNT katkılanmayan numunelerde ise tüm numunelere kıyasla dayanım değerlerinin en az olduğu gözlemlenmiştir. GNT katkısının açık delik çekme dayanımını arttırdığı sonucuna erişilebilir. Şekil 5.14'te numunelerin tokluk değerlerinin yüzde değişimleri grafik olarak gösterilmiştir. Ayrıca GNT katkısının tokluk değerlerine etkisi Çizelge 5.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.19. Numunelerin tokluk değişimleri

Numune	Tokluk (MJ/m ³)	Yüzde değişim (%)
G00	1,513 ± 0,07	-
G15	1,777 ± 0,04	17,40
G30	2,103 ± 0,05	38,99
G45	2,063 ± 0,03	36,33
G60	1,967 ± 0,09	29,96



Şekil 5.14. Numunelerin ortalama açık delik çekme tokluk değişim yüzdeleri

G00 numuneleri incelendiğinde ortalama olarak $1,513 \text{ MJ/m}^3$ 'tür. Bu tokluk değeri referans alındığında G15 kodlu numunelerin ortalama tokluğu %17,40 artarak $1,78 \text{ MJ/m}^3$ olarak gözlemlenmiştir. G30 kodlu numuneler ise %39'luk bir artış ile $2,10 \text{ MJ/m}^3$ olarak elde edilmiştir. G45 kodlu numuneler ise %36,33'lük bir artış oluşmuştur. G60 kodlu numunelerde ise %29,96'lık bir artışla $1,97 \text{ MJ/m}^3$ olarak gözlemlenmiştir. En fazla tokluk değeri ağırlıkça %0,30 GNT katkılı numunelerde gözlemlenmiştir. Açık delik çekme tokluk değişimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student T-testi ile kontrol edilmiştir. İstatistik testinin çıktıları Çizelge 5.20'de verilmiştir.

Çizelge 5.20. Açık delik çekme toklukları için Student T-testi p değerleri

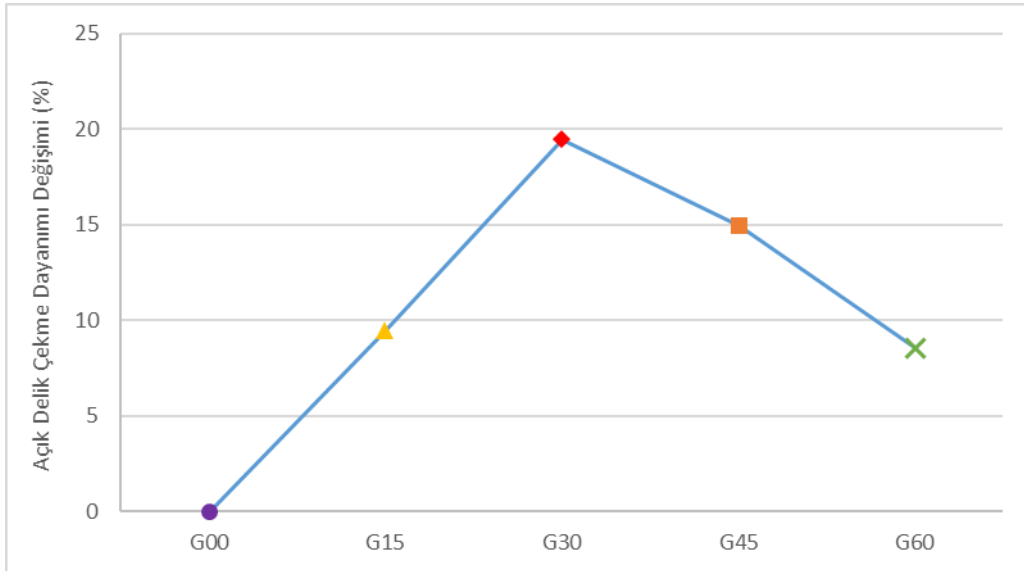
Numune	G60	G45	G30	G15
G00	0,050*	0,006*	0,005*	0,005*
G15	0,171	0,010*	0,009*	
G30	0,178	0,147		
G45	0,261			

Çizelge 5.20'de verilen p değerlerine bakıldığında, katkısız numuneler ile tüm GNT katkılı numunelerin tokluk değerleri arasındaki fark önemli ve anlamlıdır. Bu sebeple grafen katkısının çekme testinde de olduğu gibi açık delik çekme tokluklarını da

arttırdığı sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca G15 kodlu numuneler ile G45 ve G30 kodlu numunelerin tokluk değerleri arasındaki fark da istatistiksel olarak anlamlı ve önemlidir. Ortalama açık delik çekme tokluk değerleri kıyaslanırken de görüldüğü gibi G60, G45 ve G30 kodlu numunelerin yüzde değişimlerinde az miktar farklılık bulunmaktadır. Bu sebeple istatistiksel olarak G60, G45 ve G30 kodlu numuneler arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı önemli değildir. GNT katkısının çekme dayanım değerine olan etkisi Çizelge 5.21’de gösterilmiştir. Şekil 5.15’te numunelerin açık delik çekme dayanım değerlerinin yüzde değişimleri grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.21. Numunelerin ortalama açık delik çekme dayanımı değişimleri

Sembol	Açık Delik Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde değişim (%)
G00	329,193 $\pm$ 5,33	-
G15	360,383 $\pm$ 2,97	9,47
G30	393,010 $\pm$ 6,24	19,41
G45	378,435 $\pm$ 4,75	14,96
G60	357,379 $\pm$ 7,07	8,56



Şekil 5.15. Numunelerin ortalama açık delik çekme dayanım yüzde değişimi

G00 numuneleri incelendiğinde ortalama olarak 329,2 MPa açık delik çekme dayanımı elde edilmiştir. G00 dayanım değeri referans alındığında %0,15 oranındaki grafen

katkısının dayanımı yaklaşık olarak %9,47 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. %0,3 oranında GNT katkılı numunelerin dayanımı incelendiğinde ise bu oran yaklaşık %19,41 oranında artışla 393,01 MPa değerine ulaşmaktadır. %0,45 oranında katkılanan numuneler incelendiğinde ise %14,96 artışla 378,43 MPa değerinde ulaşmıştır. G60 kodlu numuneler incelendiğinde ise katkılanmamış numunelere kıyasla dayanım değeri %8,56 fazla olarak 357,38 MPa olarak gözlemlenmiştir. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği %0,30 oranında GNT katkılanan numunelerin dayanım değerleri diğer numuneler ile kıyaslandığında G00'ın açık delik çekme dayanımından %19,41 oranında daha fazla olduğu, G15'in açık delik çekme dayanımından %9,08 daha fazla olduğu, G45'in açık delik çekme dayanımından %3,88 daha fazla ve son olarak G60'ın açık delik çekme dayanımından ise %10,00 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Açık delik çekme dayanımları ele alındığında %0,30 GNT katkısına kadar açık delik çekme dayanımı artmıştır. Düşüşler ve artışlar çekme dayanımları ile benzerdir. Katkisız numuneler ile kıyaslandığında GNT katkısının dayanımı arttırdığı gözlemlenmiştir. Açık delik çekme dayanım değişimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı Student T-testi ile kontrol edilmiştir. İstatistik testinin çıktıları Çizelge 5.22'de verilmiştir.

Çizelge 5.22. Açık delik çekme dayanımları için Student T-testi p değerleri

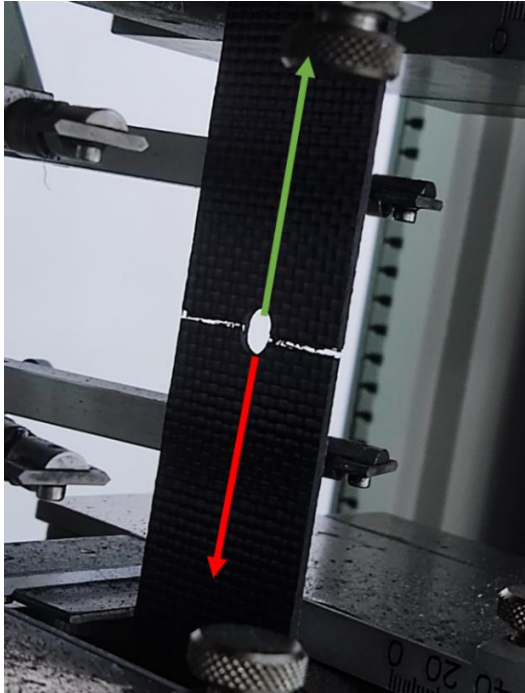
Numune	G60	G45	G30	G15
G00	0,126	0,033*	0,005*	0,014*
G15	0,723	0,084*	0,018*	
G30	0,032*	0,192		
G45	0,008*			

Çizelge 5.22'de verilen p değerlerine bakıldığında, katkisız numuneler ile %0,60 GNT katkılı numuneler hariç tüm GNT katkılı numunelerin açık delik çekme dayanımları arasındaki fark önemli ve anlamlıdır. Bu sebeple grafen katkısının çekme testinde de olduğu gibi açık delik çekme dayanımını arttırdığı sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca G15 kodlu numuneler ile G45 ve G30 kodlu numunelerin tokluk değerleri arasındaki fark da istatistiksel olarak anlamlı ve önemli olduğu gözlemlenmiştir. G60 kodlu numuneler ile

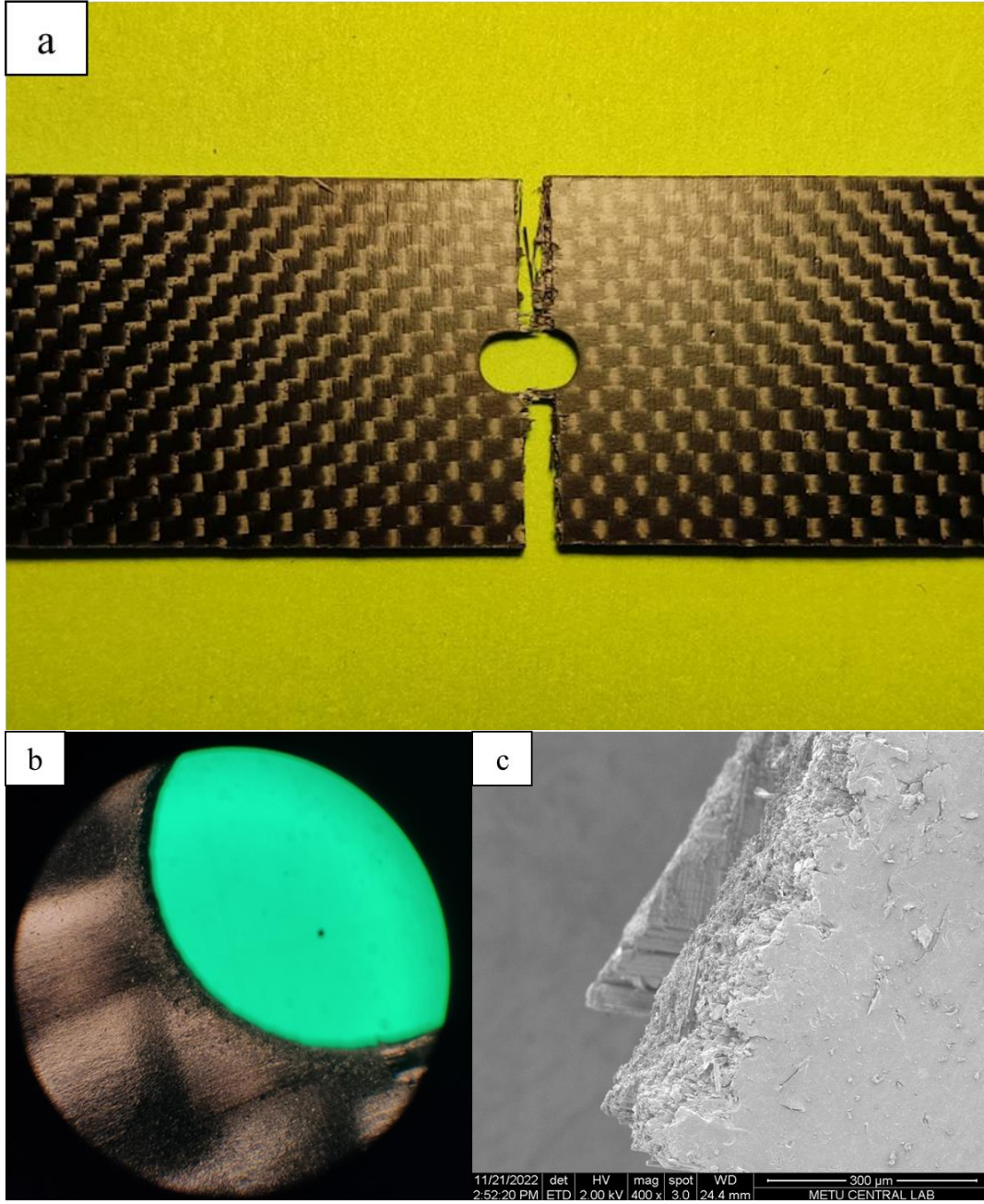
G45 ve G30 kodlu numunelerin dayanım değerleri arasındaki fark da benzer olarak önemli ve anlamlıdır. Ortalama çekme dayanımı değerleri kıyaslanırken de görüldüğü gibi G45 ve G30 kodlu numunelerin açık delik dayanım yüzde değişimlerinde az miktar farklılık bulunmaktadır. Bu sebeple istatistiksel olarak G45 ve G30 kodlu numuneler arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı ve önemli değildir. Bu durum G15 ve G60 kodlu numuneleri arasındaki fark içinde gözlemlenmiştir.

Çekme dayanımları ve açık delik çekme deneyi ve çekme deneyi incelendiğinde ortalama toklukları ve dayanımları kıyaslandığında ağırlıkça %0,30 GNT katkı oranına kadar bir artış gözlemlenmiştir. %0,6 GNT katkılı numunelerinde ise %0,45 ve %0,3 GNT katkılı numunelere kıyasla dayanım değerlerinde azalışlar gözlemlenmiştir. Yine de tüm katkılı numunelerin dayanım değerleri her iki test için de katkılanmamış numunelere kıyasla daha yüksek geldiği gözlemlenmiştir.

Resim 5.11’de açık delik çekme testi kopma anındaki numunenin görüntüsü verilmiştir. Yeşil ile gösterilen ok yönünde kuvvet uygulanmaktadır. Numune diğer yönden sabit tutulmaktadır. Uygulanan kuvvet ile birlikte numunenin kesitinde kırmızı ok ile gösterilen çekme kuvveti oluşmaktadır. Resim 5.12’de ise G30 ve G60 kodlu numunelerin açık delik çekme testi sonrası makro ve mikro görüntüleri görülmektedir

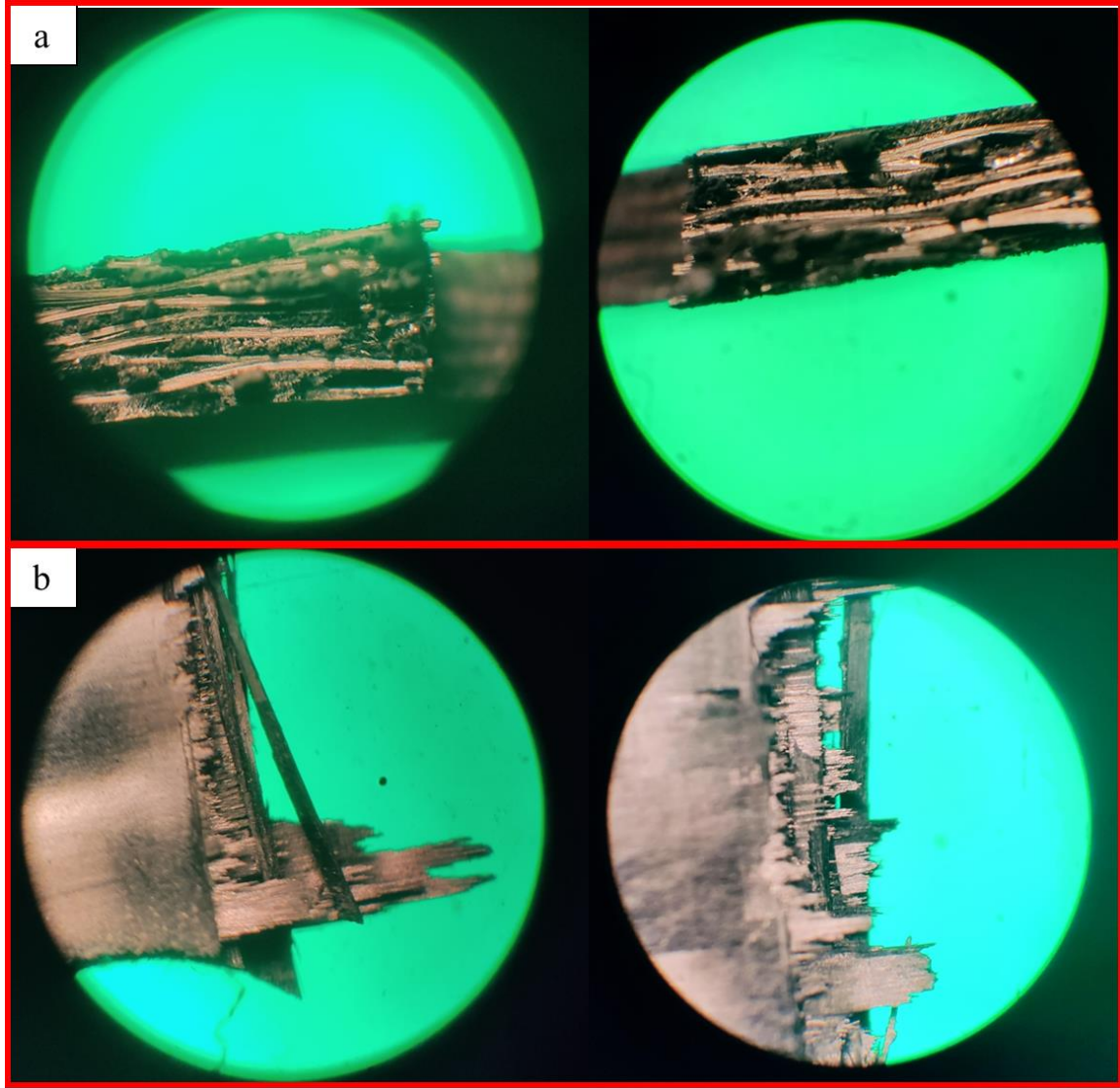


Resim 5.11. Numunenin açık delik çekme testi sırasında kopma görüntüsü



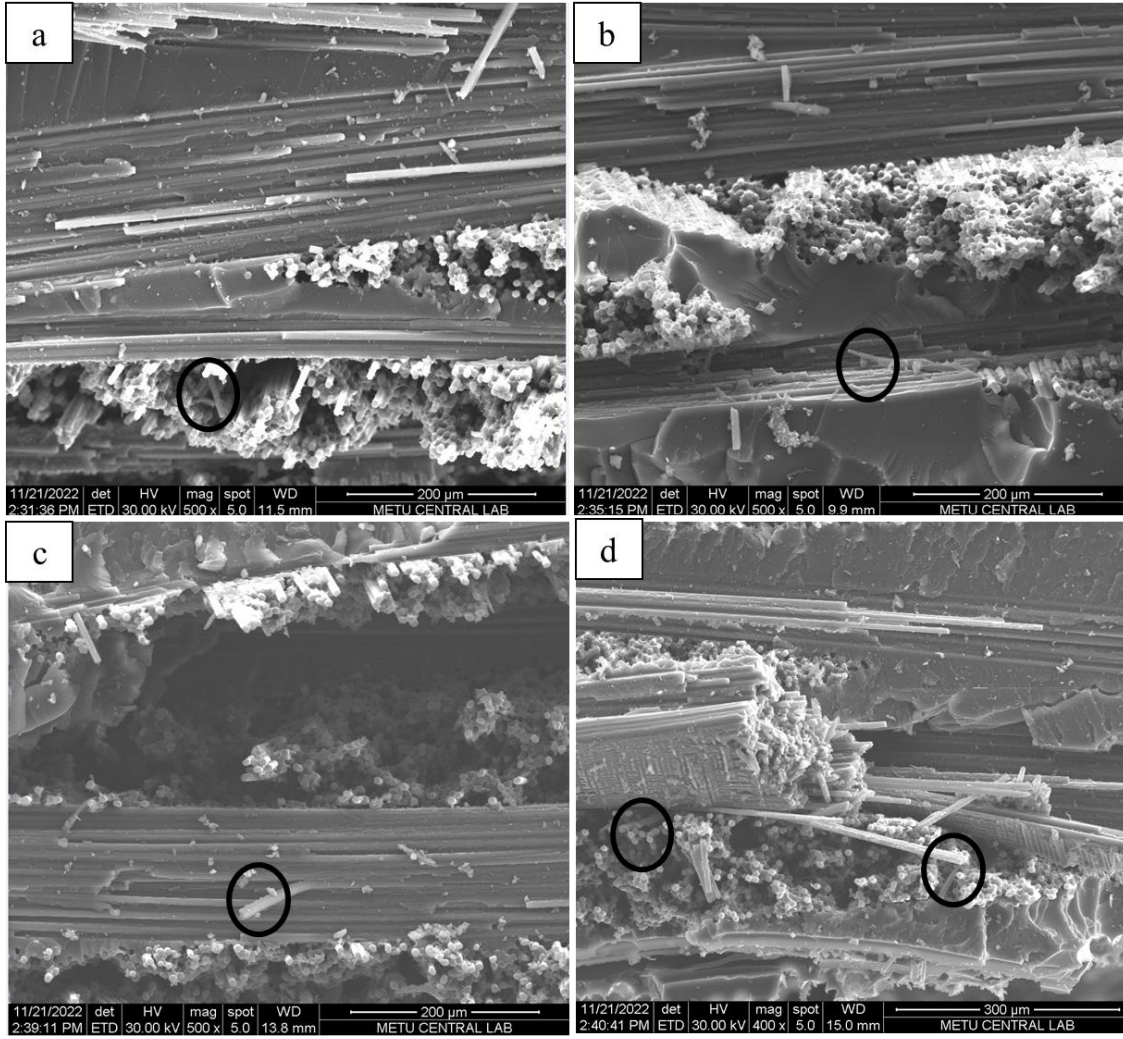
Resim 5.12. Açık delik çekme testi sonrası numune görüntüleri a) G30 kodlu numunenin makro görüntüsü, b) G60 kodlu numunenin delik sınırını mikro görüntüsü, c) G30 kodlu numunenin delik sınırı SEM görüntüsü

Delik çevresi incelendiğinde su jetinin aşındırıcı etkisinden dolayı epoksi ve fiberler üzerinde mikro aşınmalar görülmektedir. Bu durum dayanım değerlerini az da olsa düşürmesine sebep olabilir. Matkap gibi bir delici ile delindiğindeki ortaya çıkması muhtemel olan fiber sıyrılması veya delaminasyon gibi durumlar su jeti ile kesildiğinde gerçekleşmemiştir. Resim 5.13'te G30 kodlu numunenin hasar bölgesinin mikro görüntüleri verilmiştir



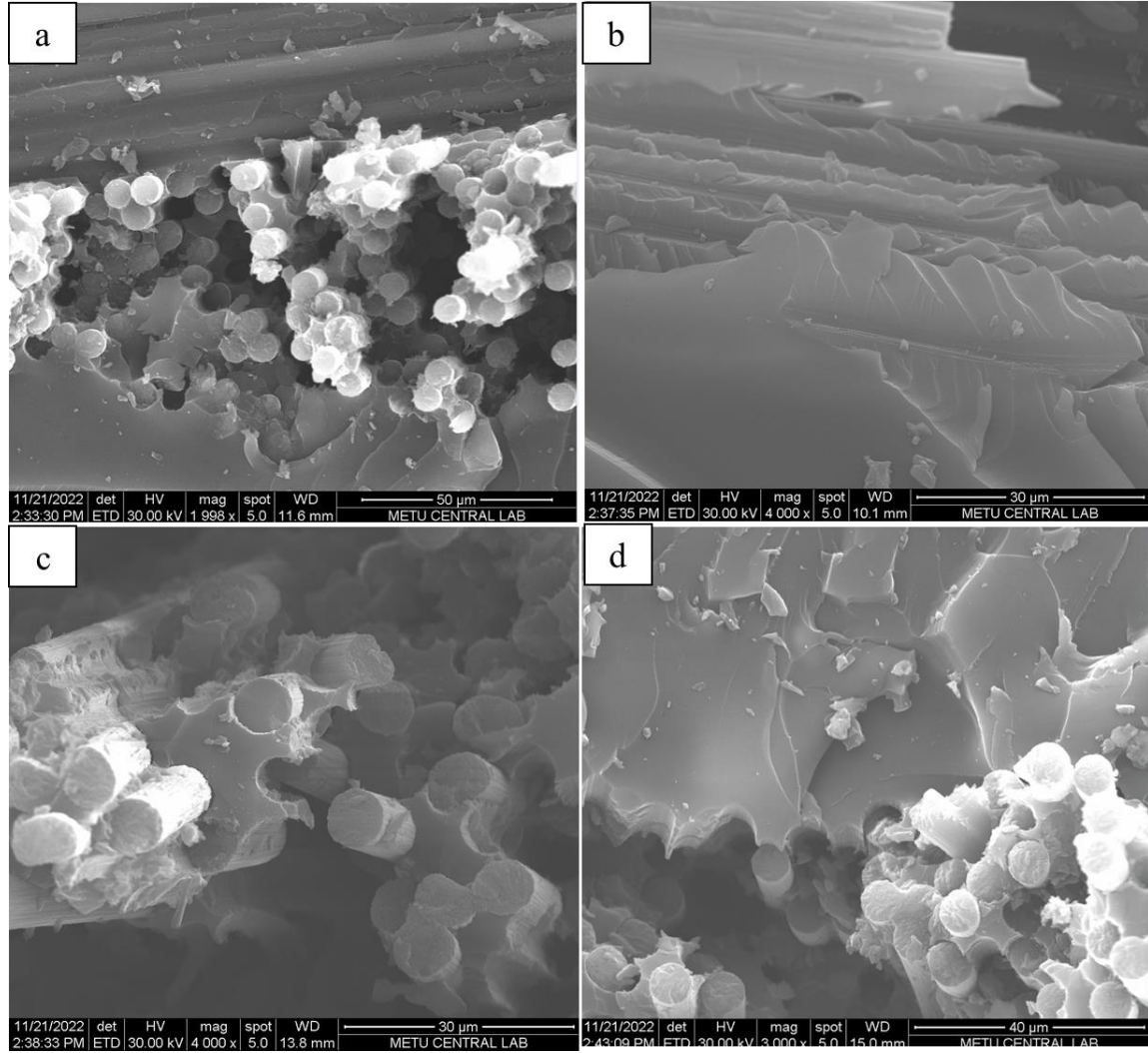
Resim 5.13. Açık delik çekme testi sonrası numune hasar bölgesi a) G30 kodlu numunenin kesit görüntüsü, b) G30 kodlu numunenin yüzey görüntüsü

Görüntüler incelendiğinde fiber sıyrılmaları ve fiber kopmaları oldukça net bir şekilde görülmektedir. Delik çevresi incelendiğinde çatlak başlangıcı olan bölgede yüksek gerilme yığılması olduğundan dolayı fiber demetlerinde daha büyük çıkıntılar olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi gerilme yığılması ile birlikte ilk önce fiber matristen sıyrılmış daha sonra da kopma işlemi gerçekleşmiştir. Çatlak ilerlemesi devam ederken gerilim yığılmasından dolayı oluşan enerji birikimi azalmış ve fiberler hemen hemen aynı hızadan kopmuştur. Resim 5.14'te açık delik çekme testi sonrası kesit yüzeyinin SEM görüntüsü verilmiştir.



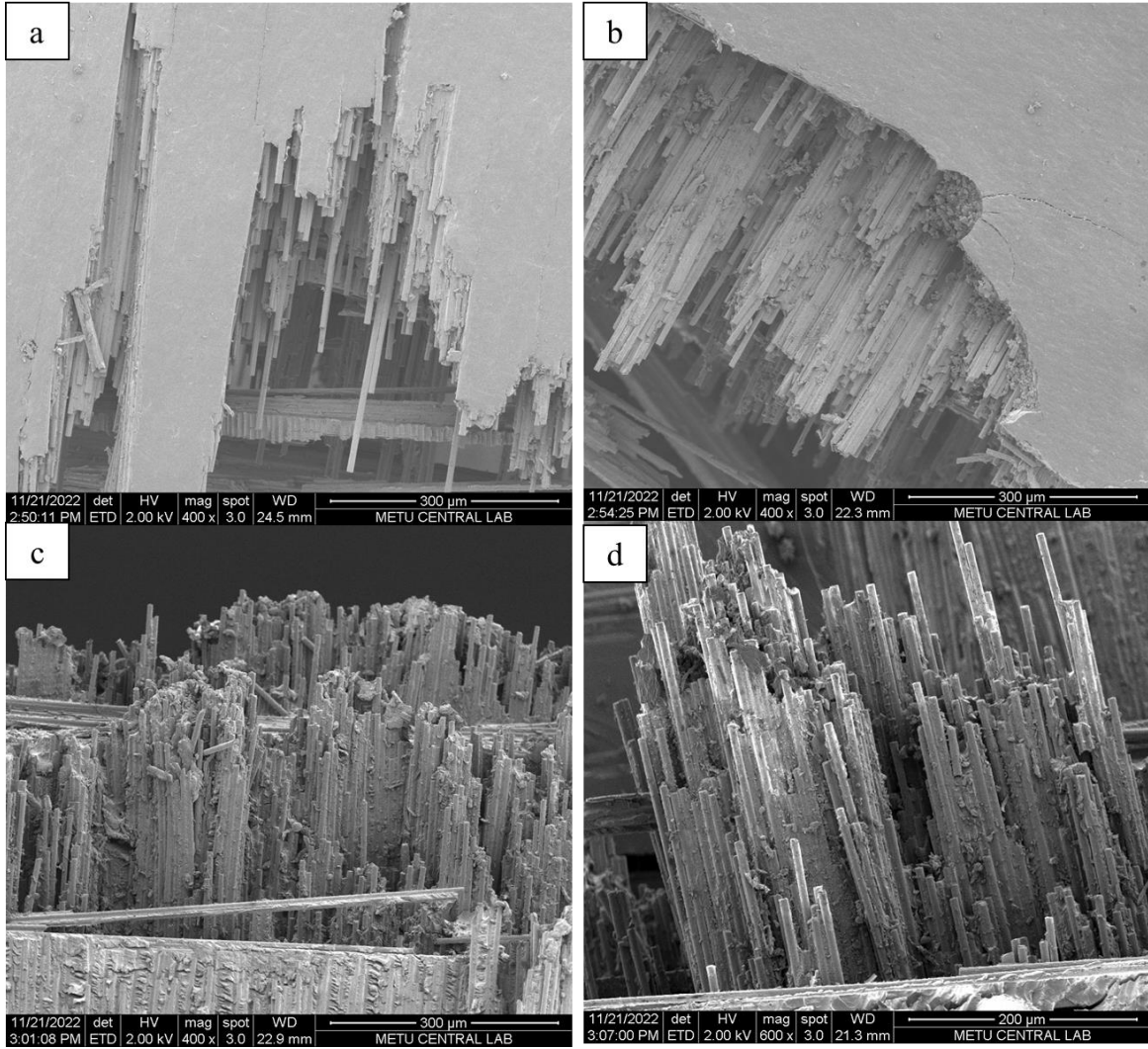
Resim 5.14. Açık delik çekme deneyi sonrası kırık kesiti a) G00, b) G30, c) G45 ve d) G60 numunelerinin SEM görüntüleri,

Katkılı ve katkısız numunelerin kırık yüzey görüntüleri incelendiğinde fiber kırıkları oldukça net görülmektedir. Çekme yükünde ana taşıyıcı fiberlerdir. Ana hasarın fiberlerde olması beklenir. Fiberlerin kopma dayanımına yapıda bulunan matris elemanı ile ara yüzey bağının da etkisi yadsınamaz derece de fazladır. Resim 5.14'te daire içinde belirtilen lokasyonlarda fiber matris ayrılımları gözlemlenmiştir. Resim 5.15'te fiber-matris kesişimlerindeki matris kırık yapısı gösterilmiştir.



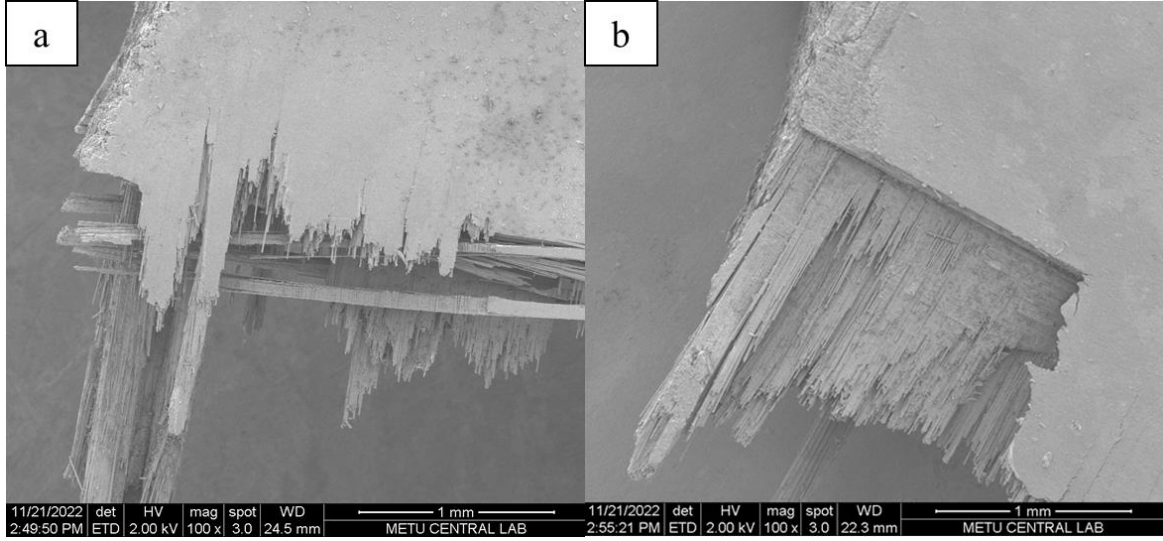
Resim 5.15. Açık delik çekme deneyi sonrası kırık kesiti matris hasarı a) G00, b) G30, c) G45 ve d) G60 numunelerinin SEM görüntüleri

Resim 5.15'teki SEM görüntülerinde fiber arayüzey sınırlarındaki epoksi hasarları gösterilmektedir. Katkısız numuneler incelendiğinde matris kırıklarının daha pürüzsüz olduğu gözlemlenmiştir. Pürüzsüz yapı, yapının daha gevrek olduğunu göstermektedir. Katkılı numunelerde fiber arayüzey'deki matris kırıkları incelendiğinde matris yüzeylerinin daha girintili daha pürüzlü olduğu gözlemlenmiştir. Bu pürüzlülük etkisi ile yapının sünekliğini arttığı çıkarımı yapılabilir [165]. GNT katkılı numunelerdeki artış ile matris daha sünek hale gelmekte ve açık delik çekme testinde elde edilen toplam uzama artışları bu şekilde açıklanabilir. Resim 5.16'da hasar bölgesinin kırık yüzey görüntüsü verilmiştir.



Resim 5.16. Açık delik çekme deneyi sonrası kırık yüzey a) G00, b) G30, c) G45 ve d) G60 numunelerinin SEM görüntüleri

Hasar bölgelerinin kırık yüzey görüntüleri incelendiğinde fiber kopmaları, fiber matris ayrılmaları ve matris yüzeyindeki pürüzlülükler daha belirgin görülmektedir. Matristeki girinti ve çıkıntılar matrisin elyaflara daha iyi yapıştığını ve arayüzey bağlarının daha iyi olduğunu göstermektedir. Pürüzsüz matris yapısı elyafların matristen daha kolay sıyrıldığını gösterebilir. Ayrıca elyafların lifleri incelendiğinde zikzaklar, girinti ve çıkıntıların oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu fiber kopmalarının şekli ve matris fiber ayrılmaları yapının fiber hacim oranının yüksek derecede olduğu yani $0,65 < v_f$ olduğunu göstermektedir [166]. Resim 5.17’de G00 ve G30 kodlu numunelerin delik çevresi kırık görüntüsü verilmiştir.



Resim 5.17 Delik çevresi yüzey SEM görüntüsü a) G00 numunesi, b) G30 numunesi

Her iki numunenin de delik sınırı incelendiğinde ileri doğru sivrilen bir fiber demeti görülmektedir. Ayrıca elyafların çekme yönüne dik yöndeki fiberlerde ayrılma gözlemlenmiştir. Sanki patlamış gibi görünen bu yapı oluşan gerilim yığılmasından kaynaklanmaktadır. Süreksizliğin çevresinde oluşan gerilme birikimi maksimum seviyeye ulaştıktan sonra matris zayıflamış ve dağılmaya başlamıştır. Ardından matristen ayrılmış fiberlerin kopması gerçekleşmiştir. Matrisle arayüzey bağlantısı bulunmayan ve matrise tutunamayan karbon fiber demetleri dağılmaya ve düzensiz kopmaya başlamışlardır. Bu yüzden özellikler delik çevresinde düzensiz ve girintili karbon fiber demetlerinin çıkıntıları ve çekme yönüne dik yönde konumlanan karbon fiber demetlerinin koptuğu ve dağıldığı gözlemlenmiştir.

5.5.1. GNT'nin çentik hassasiyetine etkisi

Açık delik çekme testi ve çekme testi kıyaslandığında her iki testte de G30 kodlu numunelerde maksimum dayanım değerleri gözlemlenmiştir. Ayrıca dayanım artışları ve azalışları kıyaslandığında benzer artışlar ve azalışlar gözlemlenmiştir. Çekme testi ve açık delik çekme testindeki dayanım değerlerinin karşılaştırması Çizelge 5.23'te verilmiştir.

Çizelge 5.23. Çekme dayanımları ve açık delik çekme dayanımlarının karşılaştırması

Sembol	Çekme Dayanımı (ÇD) (MPa)	Açık Delik Çekme Dayanımı (ADÇD) (MPa)	ÇD/ADÇD
G00	659,896	329,193	2,006
G15	693,673	360,383	1,925
G30	783,817	393,010	1,994
G45	757,123	378,435	2,001
G60	729,486	357,379	2,041

Çekme dayanımları ve açık delik dayanımları oranlandığında G00 kodlu numunelerin ÇD'si 659,8 MPa gelirken ADÇD'si ise 329,2 MPa gelmektedir. Bu iki değerin arasında yaklaşık 2 kat bir fark bulunmaktadır. G15 kodlu numunelerin ÇD'si 693,7 MPa gelirken ADÇD'si ise 360,4 MPa gelmektedir. Bu iki değerin arasında yaklaşık 1,93 kat bir fark bulunmaktadır. G00 katlı numunelere kıyasla aradaki dayanım farkı biraz az gibi elde edilse de 2 kat farktan bahsedilebilir. G30 kodlu numunelerin dayanımları incelendiğinde ise ÇD'si 783,8 MPa gelirken ADÇD'si ise 393,01 MPa gelmektedir. Bu iki değerin arasında yaklaşık 2 kat bir fark bulunmaktadır. G45 kodlu numunelerin dayanımları incelendiğinde ise ÇD'si 757,8 MPa gelirken ADÇD'si ise 378,4 MPa gelmektedir. Yine G45 kodlu numunelerde de 2'ye yakın bir dayanım oranı çıkmaktadır. Son olarak G60 kodlu numunelerde de dayanım oranı 2 olarak elde edilmiştir. Her ne kadar G15 ve G30 kodlu numunelerde sırasıyla 1,93 ve 1,99 dayanım oranları elde edilmiş olsa da bu oranlar 2'ye oldukça yakın oldukları için GNT katkısının karbon fiber kompozit plakalarda çentik hassasiyetini değiştirdiğinden bahsedilemez. Yakma deneyinde hesaplanan boşluk oranları göz önüne alındığında yapı içindeki boşluklar ve GNT oranı arttıkça topaklanmaya olan eğilim GNT'nin çentik hassasiyetine olan iyileştirici etkisini ortadan kaldırıyor olabilir. Fakat mevcut durumda elde edilen değerlere bakıldığında GNT katkısının çekme ve açık delik çekme dayanımlarını arttırdığı hükmüne varılabilirken, çentik hassasiyetine iyileştirici veya kötüleştirici bir etkisi olduğu söylenemez. Bu yüzden GNT katkısının çentik hassasiyetine etkisi yok denebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında grafen nanotoz ile katkılanmış delik içeren karbon fiber/epoksi nanokompozit plakaların dayanımları ve hasar bölgeleri incelenmiştir.

Takviye malzemesi olarak karbon fiber elyaf, matris malzemesi olarak epoksi katkı malzemesi olarak ise grafen nanotoz kullanılmıştır. Ağırlıkça %0,15; %0,30; %0,45 ve %0,60 oranında grafen nanotoz katkılanan plakalar vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Katkısız karbon fiber/epoksi kompozit plakalar ile birlikte bu çalışma kapsamında toplamda 5 adet plaka üretimi gerçekleştirilmiştir.

GNT'lerin epoksi içerisinde homojen dağıtımını sağlamak maksadıyla 2 saat 40°C sabit sıcaklıkta mekanik karıştırma ve 1 saat yine aynı sabit sıcaklıkta ultrasonik banyo da sonikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Plakaların üretim işlemi tamamlandıktan sonra her test için 3'er tane olacak şekilde numunelerin kesim işlemi su jeti kullanılarak yapılmıştır. İcra edilen tüm testler için her plakadan 15 numune hazırlanmış olup toplamda 75 adet numune standartlara uygun şekilde kesilmiştir.

Elde edilen numunelere yakma testi, üç nokta eğme testi, V- çentikli makaslama testi, çekme testi ve açık delik çekme testi gerçekleştirilmiştir. Toplamda 5 farklı test icra edilmiştir. Bu testler ile GNT katkısının malzemenin özelliklerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca açık delik çekme testinin kırık yüzey SEM görüntüleri çekilmiş ve GNT katkısının hasar mekanizmasına etkisi incelenmiştir.

Yakma testi ile üretilen kompozitlerin matris, fiber ve boşluk hacim oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yapı içinde grafen miktarı arttıkça matris ve boşluk hacim oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. Matris oranının artması; grafenin varlığının matris elemanının viskozitesini arttırması ve bu sebeple üretim esnasında vakum altında daha az epoksinin dışarı alınması ile açıklanabilir. Bu sebeple kompozit içerisinde grafen oranının artması fiber hacim oranını düşürmüş ve matris hacim oranını yükseltmiştir.

Üç nokta eğme testi ile üretilen kompozitlerin, eğme yükü altında nasıl davranış sergiledikleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre grafen katkısının eğme dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ancak belirli bir optimum seviyeden sonra eğme dayanımında

düşüş gözlemlenmiştir. Eğme elastiklik modülü de eğme dayanımına paralel olarak artmıştır. En yüksek değişimler tokluk artışlarında gerçekleşmiştir.

V çentikli makaslama testinde üretilen kompozit plakaların, kesme yükü altındaki dayanımları incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre katkılı numunelerin dayanımları katkısız numunelere kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu deneyde de optimum grafen katkısından sonra dayanımda azalmalar gözlemlenmiştir.

Çekme testi ile üretilen kompozit plakaların, çekme yükü altında mekanik özellikleri incelenmiştir. Test sonuçları değerlendirildiğinde grafen katkılı kompozit plakaların dayanım değerlerinde maksimum %18,78'lik bir artış elastiklik modülü ve tokluk değerlerinde sırasıyla %16,53'lük ve %21,21'lik artışlar gözlemlenmiştir. Grafen katkısının kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Açık delik çekme testi ile üretilen delikli kompozit plakaların, çekme yükü altında dayanımları incelenmiştir. Test sonuçları değerlendirildiğinde grafen katkılı kompozit plakaların dayanım değerlerinde maksimum %19,41'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Açık delik çekme testi dayanımları ile çekme dayanımları oranlandığında katkı oranlarına göre 1,92-2 kat oran olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple grafen katkısının dayanım değerlerini arttırdığı fakat kompozitlerin çentik hassasiyetine etkisi bulunmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılacak araştırmalar için muhtemel çalışma önerileri şu şekilde sıralanabilir:

- Plakalar, farklı boyut ve farklı spesifik yüzey alanına sahip grafen nanotoz katkılarıyla üretilip, grafen boyutunun delikli kompozit plakaların dayanımına etkisi araştırılabilir.
- Çekme deneyinde ve açık delik çekme deneyindeki dayanım artışlarında bir miktar farklar gözlemlenmiştir. Bu farklar vakum infüzyon yöntemiyle üretimi esansında, epoksinin kumaşlar üzerinde sıvanmasından kaynaklı homojen dağılmama sorununu yaratabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple optimum grafen katkı oranı kullanılarak daha büyük plaka üretimi yapıp farklı lokasyonlardan alınan numunelerin testi icra edilebilir ve vakum infüzyon yönteminin dağılımdaki rolü araştırılabilir.
- Grafen katkısının yalnızca delik çevresine püskürtülerek veya konumlandırılarak oluşan dayanıma olan etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Kostagiannakopoulou, C., Loutas, T. H., Sotiriadis, G., Markou, A., and Kostopoulos, V. (2015). On the interlaminar fracture toughness of carbon fiber composites enhanced with graphene nano-species. *Composites Science and Technology*, 118, 217-225
2. Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 90, 75-127.
3. Russello, M., Diamanti, E. K., Catalanotti, G., Ohlsson, F., Hawkins, S. C., & Falzon, B. G. (2018). Enhancing the electrical conductivity of carbon fibre thin-ply laminates with directly grown aligned carbon nanotubes. *Composite Structures*, 206, 272-278.
4. P.M., V., and Morlanes, M. J. M. (Ed.). (2016). *Nanomaterials and Nanocomposites: Zero- to Three-Dimensional Materials and Their Composites* (Birinci Baskı). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 325-342.
5. İnternet: Acquarulo Jr, L. and O'Neil, J. (2002). Enhancing Medical Device with Nanocomposite Polymers: Advances in Compounding Medical Plastics with Nanoclay Filters are Pushing the Materials Envelope for Minimally Invasive Devices. Web: <http://www.devicelink.com/mddi/archive/02/05/00.html> Son Erişim Tarihi: 17.03.2021.
6. Toubal, L., Karama, M., and Lorrain, B. (2005). Stress concentration in a circular hole in composite plate. *Composite Structures*, 68(1), 31-36.
7. Green, B. G., Wisnom, M. R., and Hallett, S. R. (2007). An experimental investigation into the tensile strength scaling of notched composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(3), 867-878
8. Bakhshan, H., Afrouzian, A., Ahmadi, H., and Taghavimehr, M. (2018). Progressive failure analysis of fiber-reinforced laminated composites containing a hole. *International Journal of Damage Mechanics*, 27(7), 963-978.
9. Kalyanasundaram, D., Gururaja, S., Prabhune, P., and Singh, D. (2018). Open hole fatigue testing of laser machined MD-CFRPs. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 111, 33-41.
10. Jamali, N., Rezvani, A., Khosravi, H., and Tohidlou, E. (2018). On the mechanical behavior of basalt fiber/epoxy composites filled with silanized graphene oxide nanoplatelets. *Polymer Composites*, 39(4), 2472-2482.

11. Galpaya, D., Wang, M., George, G., Motta, N., Waclawik, E., and Yan, C. (2014). Preparation of graphene oxide/epoxy nanocomposites with significantly improved mechanical properties. *Journal of Applied Physics*, 116(5), 053518
12. Cha, J., Kim, J., Ryu, S., and Hong, S. H. (2019). Comparison to mechanical properties of epoxy nanocomposites reinforced by functionalized carbon nanotubes and graphene nanoplatelets. *Composites Part B: Engineering*, 162, 283-288.
13. Chandrasekaran, S., Sato, N., Tölle, F., Mülhaupt, R., Fiedler, B., & Schulte, K. (2014). Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 97, 90-99.
14. Wang, Z., Soutis, C., and Gresil, M. (2021). Fracture Toughness of Hybrid Carbon Fibre/Epoxy Enhanced by Graphene and Carbon Nanotubes. *Applied Composite Materials*, 28(4), 1111-1125.
15. Hadden, C. M., Klimek-McDonald, D. R., Pineda, E. J., King, J. A., Reichenadter, A. M., Miskioglu, I., Gowtham, S., and Odegard, G. M. (2015). Mechanical properties of graphene nanoplatelet/carbon fiber/epoxy hybrid composites: Multiscale modeling and experiments. *Carbon*, 95, 100-112.
16. Khakzad, F., Tüzemen, M. Ç., Salamci, E., and Anıl, Ö. (2019). The effects on the flexural strength and impact behavior of nanographene ratio of the glass fiber nanocomposite plates. *Polymer Engineering & Science*, 59(10), 2082-2091.
17. Kumar, M., and Ando, Y. (2010). Chemical vapor deposition of carbon nanotubes: A Review on growth mechanism and mass production. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10(6), 3739-3758.
18. Tang, L. C., Wan, Y. J., Yan, D., Pei, Y. B., Zhao, L., Li, Y. B., Wu, L. B., Jiang, J. X., and Lai, G. Q. (2013). The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites. *Carbon*, 60, 16-27.
19. Raza, M. A., Westwood, A. V. K., and Stirling, C. (2012). Effect of processing technique on the transport and mechanical properties of graphite nanoplatelet/rubbery epoxy composites for thermal interface applications. *Materials Chemistry and Physics*, 132(1), 63-73.
20. Chandrasekaran, S., Seidel, C., and Schulte, K. (2013). Preparation and characterization of graphite nano-platelet (GNP)/epoxy nano-composite: Mechanical, electrical and thermal properties. *European Polymer Journal*, 49(12), 3878-3888.

21. Kamar, N. T., Hossain, M. M., Khomenko, A., Haq, M., Drzal, L. T., and Loos, A. (2015). Interlaminar reinforcement of glass fiber/epoxy composites with graphene nanoplatelets. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 70, 82-92.
22. Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.-Z., & Koratkar, N. (2009). Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content. *ACS Nano*, 3, 3884-3890
23. Wang, F., Drzal, L. T., Qin, Y., and Huang, Z. (2016). Size effect of graphene nanoplatelets on the morphology and mechanical behavior of glass fiber/epoxy composites. *Journal of Materials Science*, 51(7), 3337-3348.
24. Hawkins, D. A., and Haque, A. (2014). Fracture toughness of carbon-graphene/epoxy hybrid nanocomposites. *Procedia Engineering*, 90, 176-181
25. Li, Y., Zhang, H., Huang, Z., Bilotti, E., and Peijs, T. (2017). Graphite nanoplatelet modified epoxy resin for carbon fibre reinforced plastics with enhanced properties. *Journal of Nanomaterials*, 2017, 1-10.
26. King, J. A., Klimek, D. R., Miskioglu, I., and Odegard, G. M. (2013). Mechanical properties of graphene nanoplatelet/epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(6), 4217-4223.
27. Chatterjee, S., Nafezarefi, F., Tai, N. H., Schlagenhauf, L., Nüesch, F. A., & Chu, B. T. T. (2012). Size and synergy effects of nanofiller hybrids including graphene nanoplatelets and carbon nanotubes in mechanical properties of epoxy composites. *Carbon*, 50(15), 5380-5386.
28. Kilic, U., Sherif, M. M., and Ozbulut, O. E. (2019). Tensile properties of graphene nanoplatelets/epoxy composites fabricated by various dispersion techniques. *Polymer Testing*, 76, 181-191.
29. Pullicino, E., Zou, W., Gresil, M., and Soutis, C. (2017). The effect of shear mixing speed and time on the mechanical properties of GNP/epoxy composites. *Applied Composite Materials*, 24(2), 301-311.
30. Ávila, A. F., Peixoto, L. G. Z. de O., Silva Neto, A., Ávila Junior, J. de, and Carvalho, M. G. R. (2012). Bending investigation on carbon fiber/epoxy composites nano-modified by graphene. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34(3), 269-275.
31. Zaman, I., Phan, T. T., Kuan, H. C., Meng, Q., Bao La, L. T., Luong, L., Youssf, O., and Ma, J. (2011). Epoxy/graphene platelets nanocomposites with two levels of interface strength. *Polymer*, 52(7), 1603-1611.

32. Klimek, D. R., King, J. A., Miskioglu, I., Pineda, E. J., and Odegard, G. M. (2018). Determination and modeling of mechanical properties for graphene nanoplatelet/epoxy composites. *Polymer Composites*, 39(6), 1845-1851.
33. Ahmadi, B., and Taheri, F. (2014). Effect of processing parameters on the structure and multi-functional performance of epoxy/GNP nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 49(18), 6180-6190.
34. Qin, W., Vautard, F., Drzal, L. T., and Yu, J. (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.
35. Shen, M.-Y., Chang, T. Y., Hsieh, T. H., Li, Y. L., Chiang, C. L., Yang, H., and Yip, M. C. (2013). Mechanical properties and tensile fatigue of graphene nanoplatelets reinforced polymer Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2013, 1-9.
36. Zafeiropoulou, K., Kostagiannakopoulou, C., Sotiriadis, G., and Kostopoulos, V. (2020). A Preliminary study of the influence of graphene nanoplatelet specific surface area on the interlaminar fracture properties of carbon fiber/epoxy composites. *Polymers*, 12(12), 3060.
37. Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., and Young, R. J. (2016). Hybrid multifunctional graphene/glass-fibre polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, 137, 44-51.
38. Pathak, A. K., Borah, M., Gupta, A., Yokozeki, T., and Dhakate, S. R. (2016). Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 135, 28-38.
39. Namdev, A., Telang, A., and Purohit, R. (2022). Effect of graphene nano platelets on mechanical and physical properties of carbon fibre/epoxy hybrid composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(3), 1168-1181.
40. Hosseini, S. N., Abdollahi, M., Zamani, A., Fallahnejad, M., Eslami, R., and Siadati, H. (2022). Effect of graphene on the interfacial and mechanical properties of hybrid glass/kevlar fiber metal laminates. *Journal of Industrial Textiles*, 51(2), 2576-2593.
41. Özer, H., Kurtuluş, O., Güçlü, H., Taş, M., and Yazici, M. (2017). Open hole tensile experiments of thermoplastic composite laminates and finite element analysis. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 3(1), 44-46.

42. O'Higgins, R. M., McCarthy, M. A., and McCarthy, C. T. (2008). Comparison of open hole tension characteristics of high strength glass and carbon fibre-reinforced composite materials. *Composites Science and Technology*, 68(13), 2770-2778.
43. Gamdani, F., Boukhili, R., and Vadean, A. (2015). Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates. *Materials & Design*, 88, 702-712.
44. Tarfaoui, M., Lafdi, K., and El Moumen, A. (2016). Mechanical properties of carbon nanotubes based polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 103, 113-121.
45. Broughton, W. R., Gower, M. R. L., Lodeiro, M. J., Pilkington, G. D., and Shaw, R. M. (2011). An experimental assessment of open-hole tension–tension fatigue behaviour of a GFRP laminate. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(10), 1310-1320.
46. Ogasawara, T., Ishida, Y., and Kasai, T. (2009). Mechanical properties of carbon fiber/fullerene-dispersed epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 69(11-12), 2002-2007.
47. Wonderly, C., Grenestedt, J., Fernlund, G., and Čěpus, E. (2005). Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites. *Composites Part B: Engineering*, 36(5), 417-426.
48. Zhang, Z., Yang, Y., and Hamada, H. (2012). Mechanical property of glass mat composite with open hole. *Mechanics of Solids, Structures and Fluids*, 8, 105-110.
49. Shaari, N., Jumahat, A., Abdullah, S. A., and Hadderi, A. Z. (2015). Effect of hybridization on open hole tension properties of woven kevlar/glass fiber hybrid composite laminates. *Jurnal Teknologi*, 76(9), 12-18.
50. Pothnis, J. R., Kalyanasundaram, D., and Gururaja, S. (2021). Enhancement of open hole tensile strength via alignment of carbon nanotubes infused in glass fiber-epoxy-CNT multi-scale composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 140, 106-155.
51. Velukkudi, S. K., Sampath, P., Ponnusamy, B. S., and Bangaru, M. (2018). Effect of micro banana and nano SiC fillers on mechanical behaviors of basalt/epoxy hybrid composites. *Materials: Genetics to Structures*, 12, 9-15.
52. Sanei, S. H., Arndt, A., and Doles, R. (2020). Open hole tensile testing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, 54(20), 2687-2695.

53. Han, K., Zhou, W., Qin, R., Wang, G., and Ma, L.-H. (2020). Effects of carbon nanotubes on open-hole carbon fiber reinforced polymer composites. *Materials Today Communications*, 24, 101-106.
54. Azadi, M., Sayar, H., Ghasemi, A., and Jafari, S. M. (2019). Tensile loading rate effect on mechanical properties and failure mechanisms in open-hole carbon fiber reinforced polymer composites by acoustic emission approach. *Composites Part B: Engineering*, 158, 448-458.
55. Tayyab, M., Imran, M., and Rafai, A. (2021). Experimental investigation of open-hole compression strength of carbon epoxy composite material and determination of localized strains using digital image correlation technique. *Scientia Iranica*, 28(6), 3201-3215.
56. Erçin, G. H., Camanho, P. P., Xavier, J., Catalanotti, G., Mahdi, S., and Linde, P. (2013). Size effects on the tensile and compressive failure of notched composite laminates. *Composite Structures*, 96, 736-744.
57. Ma, Z., Chen, J., Li, Z., and Su, X. (2021). Experimental data on fracture of open-hole composite laminates subjected to tension loading. *Data in Brief*, 35, 106876.
58. Wang, J., Callus, P. J., and Bannister, M. K. (2004). Experimental and numerical investigation of the tension and compression strength of un-notched and notched quasi-isotropic laminates. *Composite Structures*, 64(3-4), 297-306.
59. Aidi, B., and Case, S. W. (2015). Experimental and numerical analysis of notched composites under tension loading. *Applied Composite Materials*, 22(6), 837-855
60. Liang, S., Zhou, Q., Mei, H., Chen, G., and Ko, F. (2020). Fatigue behavior of 3D braided composites containing an open-hole. *Polymers*, 12(9), 2147.
61. Arifin, A. M. T., Abdullah, S., Rafiquzzaman, Md., Zulkifli, R., and Wahab, D. A. (2014). Failure characterisation in polymer matrix composite for un-notched and notched (open-hole) specimens under tension condition. *Fibers and Polymers*, 15(8), 1729-1738.
62. Kannan, T., G., Wu, C., M., Cheng, K., B. (2012, 24-28 June). *A Study on the open hole tension of the unidirectional flax yarn reinforced composites*. ECCM15-15th European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 283-294.
63. Hassoon, O., Enzi, A., and Kashkool, L. (2022). Experimental study of failure analysis in notched and repaired fiberglass epoxy composite. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(2), 99-108.

64. Hale, D. K. (1976). The physical properties of composite materials. *Journal of Materials Science*, 11(11), 2105-2141.
65. Jones, R. M. (2018). *Mechanics of Composite Materials* (2nd edition). Florida: CRC Press, 42-48.
66. Yan, D. X., Ren, P. G., Pang, H., Fu, Q., Yang, M.-B., and Li, Z.-M. (2012). Efficient electromagnetic interference shielding of lightweight graphene/polystyrene composite. *Journal of Materials Chemistry*, 22(36), 18772-18774
67. Sahmaran, M., Li, Victor C., Andrade, C. (2008). Corrosion resistance performance of steel-reinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Materials Journal*, 105(3), 243-250
68. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., and Pruncu, C. I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354-6374.
69. Ray, B. C. (2006). Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 298(1), 111-117.
70. Xu, Y., Chung, D. D. L., and Mroz, C. (2001). Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(12), 1749-1757.
71. Davim, J. P., and Reis, P. (2003). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composite Structures*, 59(4), 481-487.
72. Mukherjee, M., Das, C. K., and Kharitonov, A. P. (2006). Fluorinated and oxyfluorinated short kevlar fiber-reinforced ethylene propylene polymer. *Polymer Composites*, 27(2), 205-212.
73. Dang, Z.M., Yuan, J.K., Zha, J.W., Zhou, T., Li, S.T., and Hu, G.H. (2012). Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer-matrix composites. *Progress in Materials Science*, 57(4), 660-723.
74. Zhang, C. (2014). Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites. *Advances in Ceramic Matrix Composites*, 21(3), 312-339.
75. Kopeliovich, D. (2014). Advances in the manufacture of ceramic matrix composites using infiltration techniques. *Advances in Ceramic Matrix Composites*, 22(3), 79-108.

76. Naslain, R. R., and Pomeroy, M. (2016). Ceramic matrix composites: matrices and processing. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 3(2), 81-98.
77. Mallick, P. K. (Ed.). (2010). *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles* (1st edition). Florida: CRC Press, 98-105.
78. Mallick, P. K. (2012). Advanced materials for automotive applications: An overview. *Advanced Materials in Automotive Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 5-27.
79. Li, J., and Laghari, R. A. (2019). A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(9-12), 2929-2943.
80. De Araújo, M. (2011). Natural and man-made fibres: Physical and mechanical properties. *Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications*. Amsterdam: Elsevier, 3-28.
81. Husic, S. (2005). Thermal and mechanical properties of glass reinforced soy-based polyurethane composites. *Composites Science and Technology*, 65(1), 19-25.
82. Singh, T. J., and Samanta, S. (2015). Characterization of kevlar Fiber and Its Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 1381-1387.
83. Dixit, S., Goel, R., Dubey, A., Shivhare, P. R., and Bhalavi, T. (2017). Natural fibre reinforced polymer composite materials a review. *Polymers from Renewable Resources*, 8(2), 71-78.
84. Scharzt, M. M. (Ed.). (1992). *Composite materials handbook* (1st edition). New York: McGraw-Hill, 102-105.
85. Gan, Y., Solomon, D., and Reinbolt, M. (2010). Friction stir processing of particle reinforced composite materials. *Materials*, 3(1), 329-350.
86. Gopalakrishnan, S., and Murugan, N. (2012). Production and wear characterisation of AA 6061 matrix titanium carbide particulate reinforced composite by enhanced stir casting method. *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 302-308.
87. Autio, M. (1999). *Studies on tailoring of thermomechanical properties of composites*. Doktora Tezi, Department of Mechanical Engineering, University of Oulu, Finland, 35-37.

88. Zeidi, M., Kim, C. I., and Park, C. B. (2021). The role of interface on the toughening and failure mechanisms of thermoplastic nanocomposites reinforced with nanofibrillated rubber. *Nanoscale*, 13(47), 20248-20280.
89. Rimal, V., Shishodia, S., and Srivastava, P. K. (2020). Novel synthesis of high-thermal stability carbon dots and nanocomposites from oleic acid as an organic substrate. *Applied Nanoscience*, 10(2), 455-464.
90. Hsiao, M. C., Liao, S. H., Yen, M. Y., Teng, C. C., Lee, S. H., Pu, N. W., Wang, C. A., Sung, Y., Ger, M. D., Ma, C. C. M., and Hsiao, M.-H. (2010). Preparation and properties of a graphene reinforced nanocomposite conducting plate. *Journal of Materials Chemistry*, 20(39), 8496.
91. İnternet: Kiesler E. (2015). Miniature device could unlock the promise of some kidney cancer drugs. Web: <https://www.mskcc.org/blog/> Son Erişim Tarihi: 04.08.2022.
92. Li, D., and Xia, Y. (2004). Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel? *Advanced Materials*, 16(14), 1151-1170.
93. Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., Ibrahim, R., Abral, H., Ishak, M. R., Zainudin, E. S., Asrofi, M., Atikah, M. S. N., Huzaifah, M. R. M., Radzi, A. M., Azammi, A. M. N., Shaharuzaman, M. A., Nurazzi, N. M., Syafri, E., Sari, N. H., Norrrahim, M. N. F., and Jumaidin, R. (2019). Sugar palm (*Arenga pinnata* (Wurmb.) Merr) cellulosic fibre hierarchy: A comprehensive approach from macro to nano scale. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 2753-2766.
94. Halimatul, M. J., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., and Ilyas, R. A. (2019). Effect of sago starch and plasticizer content on the properties of thermoplastic films: Mechanical testing and cyclic soaking-drying. *Polimery*, 64(06), 422-431.
95. Halimatul, M. J., Sapuan, S. M., and Jawaid, M. (2019). Water absorption and water solubility properties of sago starch biopolymer composite films filled with sugar palm particles. *Polimery*, 64(09), 596-604.
96. Abral, H., Basri, A., Muhammad, F., Fernando, Y., Hafizulhaq, F., Mahardika, M., Sugiarti, E., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A., and Stephane, I. (2019). A simple method for improving the properties of the sago starch films prepared by using ultrasonication treatment. *Food Hydrocolloids*, 93, 276-283.
97. Rushdan A. I., Salit M. S., Mohamad R. I., and Edi S. Z. (2018). Water transport properties of bio-nanocomposites reinforced by sugar palm (*Arenga Pinnata*) nanofibrillated cellulose. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 51(2), 234-246.

98. Abrial, H., Arikisa, J., Mahardika, M., Handayani, D., Aminah, I., Sandrawati, N., Pratama, A. B., Fajri, N., Sapuan, S. M., and Ilyas, R. A. (2020). Transparent and antimicrobial cellulose film from ginger nanofiber. *Food Hydrocolloids*, 98, 105-126.
99. Swift K.G., Booker J.D. (1992). *Plastics and composites processing. Manufacturing Process Selection Handbook* (1st edition). New York: McGraw-Hill, 146-148.
100. Kikuchi, T., Koyanagi, T., Hamada, H., Nakai, A., Takai, Y., Goto, A., Fujii, Y., Narita, C., Endo, A., and Koshino, T. (2012). biomechanics investigation of skillful technician in hand lay up fabrication method. *Design, Materials and Manufacturing, Parts A, B, and C*, 3, 533-539.
101. Perna, A. S., Viscusi, A., Astarita, A., Boccarusso, L., Carrino, L., Durante, M., and Sansone, R. (2019). Manufacturing of a metal matrix composite coating on a polymer matrix composite through cold gas dynamic spray technique. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(6), 3211-3219.
102. Mazumdar, S. K. (2002). *Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering* (1st edition). United States: CRC Press, 198-243.
103. Advani, S. G., and Hsiao, K. T. (Ed.). (2012). *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)* (1st edition). United Kingdom: Woodhead Publishing, 876-897.
104. Hopmann, C., Wruck, L., Schneider, D., and Fischer, K. (2019). Automated winding of preforms directly from roving. *Lightweight Design Worldwide*, 12(2), 58-63.
105. Peters, S. T. (Ed.). (2011). *Composite filament winding* (1st edition). Finland: ASM International, 278-294.
106. Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials* (1st edition). United Kingdom: Woodhead Publishing, 341-358.
107. Gören, A., and Atas, C. (2008). Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding. *Archives of materials science and engineering*, 34, 117-120.
108. İnternet: Composites net vacuum bagging, composite guide. Web: <https://netcomposites.com/guide/manufacturing/vacuumbagging/>. Son Erişim Tarihi: 05.08.2022.
109. Cardon, L. K., Ragaert, K. J., De Santis, R., and Gloria, A. (2017). Design and fabrication methods for biocomposites. *Biomedical Composites* 17, 17-36.

110. Yalcinkaya, M., Guloglu, G. E., Pishvar, M., Amirkhosravi, M., Sozer, E., and Altan, M. (2019). Pressurized infusion: A new and improved liquid composite molding process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(1), 110-117.
111. İnternet: SP systems guide to composites. Web: www.composites.com Son Erişim Tarihi: 06.07.2022.
112. İnternet: Masterbond resin transfer molding fabricating composites. URL: <https://www.masterbond.com/industries/resin-transfermolding-rtm> Son Erişim Tarihi: 06.07.2022.
113. Rosato D. V., Rosato M. (2004). *Plastic product material and process selection handbook* (1st edition). Amsterdam: Elsevier, 45-49.
114. Akil, H. M., De Rosa, I. M., Santulli, C., and Sarasini, F. (2010). Flexural behaviour of pultruded jute/glass and kenaf/glass hybrid composites monitored using acoustic emission. *Materials Science and Engineering: A*, 527(12), 2942-2950.
115. Cavaleri, L., Di Paola, M., Ferrotto, M. F., Scalici, T., and Valenza, A. (2019). Structural performances of pultruded GFRP emergency structures – Part 1: Experimental characterization of materials and substructure. *Composite Structures*, 214, 325-334.
116. Verma, D., Joshi, G., Dabral, R., and Lakhera, A. (2019). Processing and evaluation of mechanical properties of epoxy-filled E-glass fiber–fly ash hybrid composites. İçinde *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 19, 293-306.
117. Zhu, J., Chandrashekhara, K., Flanigan, V., and Kapila, S. (2004). Manufacturing and mechanical properties of soy-based composites using pultrusion. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(1), 95-101.
118. Meyer, R. W. (1986). *Handbook of Pultrusion Technology* (1st edition). Berlin: Springer, 87-93.
119. Sánchez, M., Rams, J., and Ureña, A. (2010). Fabrication of aluminium composites reinforced with carbon fibres by a centrifugal infiltration process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(11), 1605-1611.
120. El-Galy, I. M., Ahmed, M. H., and Bassiouny, B. I. (2017). Characterization of functionally graded Al-SiC p metal matrix composites manufactured by centrifugal casting. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 371-381.

121. Prasad, N. E., Nimbalkar, V., Rao, B., Deshmukh, V., and Marathe, K. (2019). Centrifugal casting of nano crystalline TiB₂ reinforcement particulate reinforcement in Al-Alloy matrix. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 3, 7-13.
122. Fangueiro, R. (2011). *Fibrous and composite materials for civil engineering applications* (1st ed.). United Kingdom: Woodhead Publishing, 87-101.
123. Gibson, R. F. (2016). *Principles of Composite Material Mechanics* (1st edition). Florida: CRC Press, 65-72.
124. Guo, N., and Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215-243.
125. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., and Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 3(6), 666-669.
126. Cardoso, C. E. D., Almeida, J. C., Lopes, C. B., Trindade, T., Vale, C., and Pereira, E. (2019). Recovery of rare earth elements by carbon-based nanomaterials. *Nanomaterials*, 9(6), 814.
127. Stankovich, S., Dikin, D. A., Dommett, G. H. B., Kohlhaas, K. M., Zimney, E. J., Stach, E. A., Piner, R. D., Nguyen, S. T., and Ruoff, R. S. (2006). Graphene-based composite materials. *Nature*, 4(7), 282-286.
128. Liu, W.-W., Chai, S. P., Mohamed, A. R., and Hashim, U. (2014). Synthesis and characterization of graphene and carbon nanotubes: A review on the past and recent developments. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1171-1185.
129. Dasgupta, K., Joshi, J. B., and Banerjee, S. (2011). Fluidized bed synthesis of carbon nanotubes – A review. *Chemical Engineering Journal*, 171(3), 841-869.
130. Liu, Y., Zhao, Y., Sun, B., and Chen, C. (2013). Understanding the Toxicity of Carbon Nanotubes. *Accounts of Chemical Research*, 46(3), 702-713.
131. Francis, A. P., and Devasena, T. (2018). Toxicity of carbon nanotubes: A review. *Toxicology and Industrial Health*, 34(3), 200-210.
132. Kim, T., Cho, M., and Yu, K. (2018). Flexible and Stretchable Bio-Integrated Electronics Based on Carbon Nanotube and Graphene. *Materials*, 11(7), 11-63.
133. Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354 (6348), 56-58.

134. Lin, L., Peng, H., and Liu, Z. (2019). Synthesis challenges for graphene industry. *Nature Materials*, 18(6), 520-524.
135. Wang, M., Duan, X., Xu, Y., and Duan, X. (2016). Functional three-dimensional graphene/polymer composites. *ACS Nano*, 10(8), 7231-7247.
136. Ji, X., Xu, Y., Zhang, W., Cui, L., and Liu, J. (2016). Review of functionalization, structure and properties of graphene/polymer composite fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 87, 29-45.
137. Markandan, K., and Lai, C. Q. (2020). Enhanced mechanical properties of 3D printed graphene-polymer composite lattices at very low graphene concentrations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 129, 105-126.
138. Kim, K. S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S. Y., Kim, J. M., Kim, K. S., Ahn, J.-H., Kim, P., Choi, J.-Y., and Hong, B. H. (2009). Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature*, 57(7), 706-710.
139. De Arco, L. G., Yi, Z., Kumar, A., and Chongwu, Z. (2009). Synthesis, transfer, and devices of single- and few-layer graphene by chemical vapor deposition. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 8(2), 135-138.
140. Emtsev, K. V., Bostwick, A., Horn, K., Jobst, J., Kellogg, G. L., Ley, L., McChesney, J. L., Ohta, T., Reshanov, S. A., Röhrl, J., Rotenberg, E., Schmid, A. K., Waldmann, D., Weber, H. B., and Seyller, T. (2009). Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide. *Nature Materials*, 8(3), 203-207.
141. Sutter, P. W., Flege, J. I., and Sutter, E. A. (2008). Epitaxial graphene on ruthenium. *Nature Materials*, 7(5), 406-411.
142. Bonaccorso, F., Lombardo, A., Hasan, T., Sun, Z., Colombo, L., and Ferrari, A. C. (2012). Production and processing of graphene and 2d crystals. *Materials Today*, 15(12), 564-589.
143. Schultz, R. A., Jensen, M. C., and Bradt, R. C. (1994). Single crystal cleavage of brittle materials. *International Journal of Fracture*, 65(4), 291-312.
144. Miyamoto, Y., Zhang, H., and Tománek, D. (2010). Photoexfoliation of graphene from graphite: An initio study. *Physical Review Letters*, 104(20), 208-212.
145. Vadukumpully, S., Paul, J., Mahanta, N., and Valiyaveetil, S. (2011). Flexible conductive graphene/poly(vinyl chloride) composite thin films with high mechanical strength and thermal stability. *Carbon*, 49(1), 198-205.

146. Li, W., Xu, Z., Chen, L., Shan, M., Tian, X., Yang, C., Lv, H., and Qian, X. (2014). A facile method to produce graphene oxide-g-poly(L-lactic acid) as an promising reinforcement for PLLA nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 237, 291-299.
147. Rane, A. V., Kanny, K., Abitha, V. K., and Thomas, S. (2018). Methods for Synthesis of Nanoparticles and Fabrication of Nanocomposites. *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*, 18, 121-139.
148. Khan, W., Sharma, R., and Saini, P. (2016). Carbon nanotube-based polymer composites: Synthesis, properties and applications. *Carbon Nanotubes Current Progress of their Polymer Composites*, 16, 145-146.
149. Sinha, R. S., and Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science*, 28(11), 1539-1641.
150. Dantas de Oliveira, A., and Augusto Gonçalves Beatrice, C. (2019). Polymer nanocomposites with different types of nanofiller. *Nanocomposites Recent Evolutions*, 19, 91-97.
151. İnternet: Nanografi. Web: <https://nanografi.com/graphene/graphene-nanoplatelet-purity-99-9-size-3-nm-s-a-800-m2-g-dia-1-5-m/>. Son Erişim Tarihi: 06.09.2022.
152. Tüzemen, M. Ç., Salıncı, E., and Avcı, A. (2017). Enhancing mechanical properties of bolted carbon/epoxy nanocomposites with carbon nanotube, nanoclay, and hybrid loading. *Composites Part B: Engineering*, 128, 146-154.
153. Ağa, H. Y., Salıncı E. (2022, 20-21 Ağustos). *Karbon fiber plakalarda grafen nanotoz katkısının fiber matris ve boşluk hacim oranlarına etkisinin incelenmesi*. UBAK 14. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Ankara, Türkiye, 321-330.
154. Maragoni, L., Carraro, P. A., and Quaresimin, M. (2016). Effect of voids on the crack formation in a [45/-45/0]_s laminate under cyclic axial tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 91, 493-500.
155. Parnas, R. S., and Walsh, S. M. (2005). Vacuum-assisted resin transfer molding model. *Polymer Composites*, 26(4), 477-485.
156. Maley, J., A. (2008). *An investigation into low-cost manufacturing of carbon epoxy composites and a novel "mouldless" technique using the Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) method*. Yüksek Lisans Tezi, Ottawa-Carleton Institute for Mechanical and Aerospace Engineering, Ottawa, 81-83.

157. İnternet: ASTM international standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials. Web: https://www.astm.org/d7264_d7264m-07.html Son Erişim Tarihi: 08.01.2021.
158. İnternet: ASTM international standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Web: https://www.astm.org/d3039_d3039m-05.html Son Erişim Tarihi: 08.01.2021.
159. İnternet: ASTM international shear properties of composite materials by v-notched rail shear method. Web: https://www.astm.org/d7078_d7078m-02.html Son Erişim Tarihi: 08.01.2021.
160. Bodaghi, M., Cristóvão, C., Gomes, R., and Correia, N. C. (2016). Experimental characterization of voids in high fibre volume fraction composites processed by high injection pressure RTM. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 82, 88-99.
161. Tüzemen, M. Ç., Khakzad, F., and Salamci, E. (2021). Investigation of tensile properties of glass fiber/epoxy nanocomposites laminates enhanced with graphene nanoparticles. *Fibers and Polymers*, 22(5), 1441-1448.
162. Mičušík, M., Omastová, M., Prokeš, J., and Krupa, I. (2006). Mechanical and electrical properties of composites based on thermoplastic matrices and conductive cellulose fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(1), 133-142.
163. Evgin, T., Turgut, A., Hamaoui, G., Spitalsky, Z., Horny, N., Micusik, M., Chirtoc, M., Sarikanat, M., and Omastova, M. (2020). Size effects of graphene nanoplatelets on the properties of high-density polyethylene nanocomposites: Morphological, thermal, electrical, and mechanical characterization. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 11, 167-179.
164. Martone, A., Formicola, C., Giordano, M., and Zarrelli, M. (2010). Reinforcement efficiency of multi-walled carbon nanotube/epoxy nano composites. *Composites Science and Technology*, 70(7), 1154-1160.
165. Boroujeni, A. Y., Tehrani, M., Nelson, A. J., and Al-Haik, M. (2014). Hybrid carbon nanotube–carbon fiber composites with improved in-plane mechanical properties. *Composites Part B: Engineering*, 66, 475-483.
166. Daniel M. (1977, June 14-17). *Failure Mechanisms in Fiber Reinforced Composites*. Proceedings of ARPA/AFML Review of Progress in Quantitative NDE, Ithaca, 17-25.



Gazili olmak ayrıcalıktır