



**T.C.**  
**NECMETTİN ERBAKAN**  
**ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**PREPREG KOMPOZİT BORULARIN DÜŞÜK  
HIZLI DARBE CEVABINA KARBON  
NANOTÜP TAKVİYESİNİN ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**Zeliha GÖK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Şubat-2022**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Zeliha GÖK

Tarih: 28.02.2022

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## PREPREG KOMPOZİT BORULARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE CEVABINA KARBON NANOTÜP TAKVİYESİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Zeliha GÖK

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2022, 65 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Doç. Dr. Memduh KARA

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

Kompozitler önemli bir konu olduğundan bu çalışma ile literatürde daha çok desteklenmesi gereken tek cidarlı karbon nanotüp ve prepreg kumaş ile üretilen kompozit malzemeler ele alınmıştır. Yapmış olduğum tez çalışması için iki çeşit kompozit boru üretimi yapılmıştır. Borulardan biri ağırlıkça %0,3 oranında TCKNT ve epoksi karışımının homojen bir şekilde karbon elyaf prepreg kumaşa, diğeri ise epoksinin karbon elyaf prepreg kumaşa el yatırma metoduyla disperse edilmesiyle, 9 kat sarım yapılarak elde edilmiştir. Sarımı gerçekleşen numunenin aralarında oluşan hava boşluklarının gidermek amacıyla vakum poşetleme metoduyla vakumlaması yapılmış ve otoklav metoduyla kütleme işlemine tabii tutulmuştur. Üretimi tamamlanan kompozit borulara düşük hızda darbe deneyi uygulanarak kullanılan malzemelerin nasıl etkilendiği ve uygulanan farklı darbe enerji seviyelerinde nasıl bir davranış sergilediği araştırılmıştır. Böylece her iki boru çeşidinin gösterdiği darbe dayanımı ve darbe hasarı, darbe deney analizi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlenerek karşılaştırılmıştır. TCKNT takviyesi ve prepreg kumaş kullanılmasıyla daha yüksek ve sürekli elyaf oranı, daha iyi matris takviye elemanı ara yüzeyi, daha dayanıklı ve daha az hasar miktarı olan numuneler elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Darbe Hasar Analizi, Düşük Hızlı Darbe Deneyi, Epoksi Reçine, Karbon Elyaf Prepreg Kumaş, Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi, Tek Cidarlı Karbon Nanotüp

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CARBON NANOTUBE REINFORCEMENT ON LOW VELOCITY IMPACT RESPONSE OF PREPREG COMPOSITE PIPES**

**Zeliha GÖK**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN**

**2022, 65 Pages**

#### **Jury**

**Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN**

**Assoc. Prof. Dr. Memduh KARA**

**Asst. Prof. Dr. Mehmet KAYRICI**

Since composites are an important issue, composite materials produced with single-walled carbon nanotubes and prepreg fabrics, which should be supported more in the literature, have been discussed with this study. For my thesis work, two types of composite pipes were produced. One of the pipes was obtained by dispersing a mixture of 0.3% TCKNT and epoxy homogeneously on the carbon fiber prepreg fabric, and the other by dispersing the epoxy on the carbon fiber prepreg fabric by hand lay-up method, by wrapping 9 times. The wrapped sample was vacuumed by vacuum bagging method in order to remove the air spaces formed between them and it was subjected to the curing process with the autoclave method. By applying a low-speed impact experiment to composite pipes that have been completed for production, it was investigated how the materials used are affected and how they exhibit behavior at different applied impact energy levels. Thus, the impact strength and impact damage of both types of pipes were compared by observing them with impact experimental analysis and scanning electron microscope (SEM). By using TCKNT reinforcement and prepreg fabric, higher and continuous fiber ratio, better matrix and reinforcement element interface, more durable and less deformed samples were obtained.

**Keywords:** Carbon Fiber Prepreg Fabric, Epoxy Resin, Impact Damage Analysis, Scanning Electron Microscopy Analysis, Single Walled Carbon Nanotube, Low Velocity Impact Experiment

## ÖNSÖZ

Çalışma yaptığım Yüksek Lisans Tezimin tamamlanmasında her türlü yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN'a minnetle teşekkür ederim. Üretim konusunda bilgi ve desteğini esirgemeyen hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI'ya çok teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarımda her zaman destekçi olan eşim Onur GÖK'e sonsuz teşekkür ederim.

Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'nün, tezimin tamamlanması için 191331007 nolu projeme verdiği destekten dolayı çok teşekkür ederim.

Zeliha GÖK  
KONYA-2022

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xi
ÇİZELGELER LİSTESİ .....	xiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Kompozit Malzemeler.....	3
1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
1.2.1. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler .....	4
1.2.1.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler .....	5
1.2.1.1.1. Cam Fiber .....	6
1.2.1.1.2. Karbon Fiber.....	6
1.2.1.1.3. Aramid Fiber .....	7
1.2.1.2. Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	8
1.2.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler.....	8
1.2.1.4. Karma Kompozit Malzemeler.....	9
1.2.2. Matris Elemanına Göre Kompozit Malzemeler.....	9
1.2.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler .....	10
1.2.2.1.1. Termoplastikler .....	10
1.2.2.1.2. Termosetler .....	11
1.2.2.1.2.1. Epoksiler .....	12
1.2.2.1.2.2. Polyester.....	13
1.2.2.1.2.3. Fenolik .....	13
1.2.2.2. Metal Matrisli Kompozitler .....	14
1.2.2.3. Seramik Matrisli Kompozitler .....	14
1.2.2.4. Karbon Matrisli Kompozitler.....	15
1.3. Prepreg Malzemeler .....	16
1.3.1. Reçine Fiber Oranı Kontrolü .....	17
1.3.2. Üretim Standartlaştırma .....	17
1.4. Karbon Nanotüpler.....	18
1.4.1. Karbon Nanotüp Çeşitleri .....	20
1.4.2. Karbon Nanotüp Üretimi .....	21
1.4.3. Karbon Nanotüplerin Matris İçinde Dağılımı.....	22
1.5. Kompozit Malzemelerin Üretimi .....	23
1.5.1. Prepreg El Yatırma Metodu.....	24
1.5.2. Islak El Yatırma Metodu.....	24

1.5.3. Vakum Poşetleme Metodu.....	25
1.5.4. Filament Sarma Metodu.....	26
1.5.5. Otoklav Metodu .....	26
1.5.6. Reçine Transfer Kalıplama Metodu.....	27
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>29</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>33</b>
3.1. Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	34
3.2. Numune Üretimi .....	35
3.2.1. KNT Takviyeli Prepreg Kompozit Boru Üretimi .....	35
3.2.2. KNT Takviyesiz Prepreg Kompozit Boru Üretimi.....	38
3.3. Deney Numunelerinin Boyutlandırılması .....	39
3.4. Düşük Hızlı Darbe Deneyi.....	41
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>45</b>
4.1. TCKNT Takviyeli ve Takviyesiz Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları.....	45
4.1.1. 5J, 10J ve 15J Darbe Enerjileri İçin Kuvvet-Zaman Değişimi .....	45
4.1.2. 5J, 10J ve 15J Darbe Enerjileri İçin Kuvvet-Deplasman Değişimi .....	48
4.1.3. 5J, 10J ve 15J Darbe Enerjileri İçin Enerji-Zaman Değişimi .....	52
4.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Hasar Analizi.....	54
4.2.1. Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) Düşük Hızlı Darbe Deneyi Hasar Analizi.....	56
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>59</b>
5.1 Sonuçlar .....	59
5.2 Öneriler .....	60
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>62</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
m	Metre
cm	Santimetre
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
MPa	Megapascal
Gpa	Gigapascal
TPa	Terapascal
C <sub>h</sub>	Kiral vektör
°C	Santigrat
kg	Kilogram
gr	Gram
J	Joule
Kn	Kilonewton
m	Kütle
g	Yerçekimi
h	Yükseklik
V	Hız
SiO <sub>2</sub>	Silisyum dioksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
COOH	Karboksil
PAN	Poliakrilonitril
SiC	Silisyum karbür
TiC	Titanyum karbür
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alümina
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PA	Poliamid
PTFE	Politetrafloroetilen
PVC	Polivinil klorür

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
KNT	Karbon Nanotüp
TCKNT	Tek Cidarlı Karbon Nanotüp
ÇCKNT	Çok Cidarlı Karbon Nanotüp
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
CVD	Kimyasal Buhar Çökeltme
ILSS	Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti
ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
ark.	Arkadaşları

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Fiber ve matrizen oluşan kompozit malzemenin basit şekli [3] .....	3
Şekil 1.2. Takviye şekline göre kompozitler [5] .....	4
Şekil 1.3. Şekildeki üç malzemenin çekme gerilmesi eğrisi [8].....	5
Şekil 1.4. Farklı dokuması yapılmış karbon kumaşlar [11].....	7
Şekil 1.5. Aramid fiber – karbon ve aramid fiber – zırh [13].....	8
Şekil 1.6. Kompozit malzemelerin temel yapısı [12] .....	9
Şekil 1.7. Polyester, vinilester, epoksi reçinelerin gerilim-gerinim verilerinin karşılaştırılması [15] .....	11
Şekil 1.8. Takviye elemanı ve matrisin metal matrisli kompozitte görünümü [18] .....	14
Şekil 1.9. Karbon takviye ve karbon matrise sahip kompozitler [19] .....	15
Şekil 1.10. Prepreg kumaşın üretildiği sistem [20] .....	16
Şekil 1.11. Fiber kumaşların dokuma örgü stilleri [4].....	17
Şekil 1.12. A grafit, B karbon nanotüp [22] .....	18
Şekil 1.13. Farklı açılardaki karbon nanotüplerin gösterimi, A armchair, B zigzag, C chiral [24].....	19
Şekil 1.14. TCKNT ve ÇCKNT'ler [27] .....	20
Şekil 1.15. Islak serim aşaması [32] .....	25
Şekil 1.16. Islak serim aşamasından sonra vakum poşetleme metodu [32].....	25
Şekil 1.17. Filament sarma metodu [32].....	26
Şekil 1.18. Otoklavda torba kalıplama metodu .....	27
Şekil 1.19. Reçine transfer kalıplama metodu [32] .....	28
Şekil 3.1. Prepreg kumaşın serimi .....	36
Şekil 3.2. Mandrel ile yapılan elle sarım işlemi .....	36
Şekil 3.3. Ultrasonik karıştırıcı.....	37
Şekil 3.4. Vakum torbasına katılan kompozit boru .....	37
Şekil 3.5. Otoklav fırını .....	38
Şekil 3.6. TCKNT takviyeli kompozit boru .....	38
Şekil 3.7. TCKNT takviyesiz kompozit boru .....	39
Şekil 3.8. TCKNT takviyeli numune.....	40
Şekil 3.9. TCKNT takviyesiz numune.....	40
Şekil 3.10. 15x30 mm boyutundaki SEM analizine gönderilmiş numuneler.....	41
Şekil 3.11. Düşük Hızlı Darbe Deney Düzeneği .....	42
Şekil 3.12. Düşük Hızlı Darbe Deney Düzeneği .....	43
Şekil 4.1. KNT takviyesiz numunelerin 5-10-15 J darbe enerji grafiği .....	45
Şekil 4.2. KNT takviyeli numunelerin 5-10-15 J darbe enerji grafiği.....	46
Şekil 4.3. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 5 J darbe enerji grafiği .....	47
Şekil 4.4. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 10 J darbe enerji grafiği .....	47
Şekil 4.5. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 15 J darbe enerji grafiği .....	48
Şekil 4.6. KNT takviyesiz numunelerin 5-10-15 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği.....	49
Şekil 4.7. KNT takviyeli numunelerin 5-10-15 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği.....	50
Şekil 4.8. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 5 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği.....	51
Şekil 4.9. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 10 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği.....	51

<b>Şekil 4.10.</b> KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 15 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği.....	52
<b>Şekil 4.11.</b> KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 5-10-15 J darbe enerjisindeki Enerji-Zaman grafiği.....	53
<b>Şekil 4.12.</b> KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 5-10-15 J darbe enerjisindeki enerji dağılım miktarı.....	53
<b>Şekil 4.13.</b> TCKNT takviyesiz hasar analizi yapılan numuneler.....	54
<b>Şekil 4.14.</b> TCKNT takviyeli hasar analizi yapılan numuneler.....	55
<b>Şekil 4.15.</b> Darbe uygulanmamış (a) KNT takviyeli ve (b) KNT takviyesiz numunelerin SEM görüntüleri .....	57
<b>Şekil 4.16.</b> 15 J Darbe uygulanmış (a) KNT takviyeli ve (b) KNT takviyesiz numunelerin SEM görüntüleri .....	57

## ÇİZELGELER LİSTESİ

<b>Çizelge 1.1.</b> Bazı Termoset malzemelerin mekanik özellikleri [2] .....	12
<b>Çizelge 1.2.</b> Bazı termosetlerin özelliklerinin kıyaslanması [17].....	13
<b>Çizelge 1.3.</b> KNTlerin bazı temel özellikleri [23] .....	19
<b>Çizelge 1.4.</b> TCKNT ve ÇCKNT'lerin Özellikleri [28].....	21
<b>Çizelge 3.1.</b> Karbon fiber yapılı Prepreg kumaş özellikleri .....	34
<b>Çizelge 3.2.</b> TCKNT özellikleri .....	34
<b>Çizelge 3.3.</b> Reçine özellikleri.....	35

## 1. GİRİŞ

Mühendislik çalışmalarında, tasarımı yapılan ürünlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Gelişen ve gelişmekte olan teknoloji için kompozit malzemeler çok önemli bir yere sahiptir. Kompozitler düşük ağırlığa, iyi işlevselliğe, yüksek mekanik ve dinamik özelliklere sahip olduğundan birçok alanda tercih edilmektedir. Sert, kırılğan yapıda olan kompozitler havacılık, balistik, elektronik, uzay alanları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Böyle ciddi alanlarda kullanılan malzemenin istenilmeyen bir deformasyona uğraması tehlike oluşturmakta ve bunun için önlemler alınmalıdır. Bu önlemlerin alınabilmesi için kompozitler birçok deney ve analize tabii tutularak çeşitlendirilip, geliştirilmektedir. Böylece daha iyi ve istenilen özelliklerde ve boyutlarda malzeme elde edilmektedir.

Yapılan araştırmalar neticesinde kompozit malzemeleri, reçine içerisine katılan nano teknolojiye üretilmiş karbon nanotüplerin mekanik özelliklerini arttırdığı görülmektedir. Polimer kompozitlerde genellikle katkı malzemesi olarak karbon nanotüp kullanılmaktadır. Çünkü reçine içinde homojen bir şekilde dağılmakta ve hacim/yoğunluk oranının yüksek olmasındandır. Takviye malzemesi olarak kullanılan nano boyuttaki karbon nanotüpler kompozitin mukavemetini, ömrünü, sağlamlığını arttırdığından önemli bir elemandır. Bunun yanı sıra ısı, elektriksel iletkenliği açısından da kompozitleri geliştirmektedir.

Karbon elyaf takviyeli prepreg kumaşlar filaman sarım yapılan borularda yaygın olarak kullanılmaktadır. Prepreg kumaş kullanılması, üretim esnasında karbon elyafların reçine ile birleşiminde oluşacak fazla reçinenin dökülmesine engellemek, homojen dağılmasını ve yüksek elyaf oranını sağlamaktır. Daha dayanıklı ve mekanik özellikleri daha iyi olan prepreg kumaşlar, hazır gelen karbon elyaf takviye malzemesidir.

Matris malzemesi olarak kullanılan reçine çeşitlerinden olan epoksi, genellikle polimer kompozitlerde kullanılmaktadır. Epoksinin kırılğanlığı, düşük uzaması gibi zayıf özelliklerinden dolayı katkı malzemeleri ile kullanılması daha iyi mekanik özelliklere sahip olmaktadır.

Bu çalışmada elle yatırma methodu ile vakum poşetleme reçine transfer methoduyla iki çeşit kompozit boru üretimi yapılmaktadır. Bunlar karbon nanotüp takviyeli ve karbon nanotüp takviyesiz prepreg kompozit borulardan oluşmaktadır. Üretimi tamamlanan kompozit borulara düşük hızlı darbe deneyi uygulanarak kullanılan malzemelerin nasıl etkilendiği ve uygulanan enerjilerde nasıl bir davranış sergilediği

görülmektedir. Böylece her iki boru çeşidinin, farklı uygulanan darbe enerjisine gösterdiği darbe dayanımı ve darbe hasarı gözlemlenmektedir.

## 1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, farklı iki veya daha fazla malzemenin en üstün niteliklerinin ele alınmasıyla makro düzeyde oluşturulan yeni malzemelerdir. Yani malzemeler makro düzeyde birleşirken zayıf yönleri güçlendirerek en iyi özellikleri açığa çıkmaktadır. Kompozit malzemeler ana bileşen olarak matris ve takviye elemanının yanı sıra ara yüzey fazından da oluşan çok fazlı malzemelerdir. Malzemeye destekleme yapan takviye elemanı, takviyenin yapıldığı malzeme ise matristir [1]. Matrisler polimer, metal, seramik ve karbon matrisli kompozitler ile ana bileşendir. Takviye elemanı ise fiber, partikül veya tabakalı kompozitlerdir. Genel olarak takviye elemanı yükü taşımakta ve matrisin mukavemetini ve rijitliğini arttırmaktadır. Matris ise fiber ve matrisi birleştirerek fiberlere düzgün olarak yük aktarmak ve yüzeyleri çevresel etkenlerden muhafaza etmektir [2]. Ara yüzey fazı ise matris ve takviye elemanının arasında yer almakta ve malzemeye gelen yükü matristen takviye elemanına taşımaktadır.



Şekil 1.1. Fiber ve matristen oluşan kompozit malzemenin basit şekli [3]

Kompozit malzemelerin avantajı, bir malzemeyle oluşturamayan üstün özelliklerin, birkaç malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kompozit malzemenin oluşumu ile aşağıdaki üstün özellikler elde edilmektedir [2].

Yüksek dayanım/yoğunluk

Düşük ağırlık (hafiflik)

Yorulma dayanımı yüksek

Aşınma direnci iyi

Sıcaklık kapasitesi yüksek

Isı iletkenliği iyi

Korozyon direnci iyi

Yüksek rijitlik

Düzenli görünüm

Bu özelliklerin hepsinin bir kompozit malzemede olmasına gerek yoktur. Malzemenin nerede kullanılacağı ve orada hangi özelliklere ihtiyaç olacağına bağlı olarak uygun takviye elemanı ve matris tercih edilir. Uygun takviye elemanı ve matrisin yanı sıra yukarıdaki özellikler için üretim yöntemi, takviye ve matrisin dayanım özellikleri de dikkate alınarak üretim yapılmalıdır.

## 1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler iki ana bileşende incelenmektedir. Bunlar matris ve takviye elemanlarıdır. Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında matris türüne göre polimer, metal, seramik ve karbon matrisli kompozitlerden oluşmaktadır. Takviye elemanının sınıflandırılmasında ise fiber, partikül, tabakalı veya karma kompozitler yer almaktadır.

### 1.2.1. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde genel olarak takviye elemanı yükü taşımakta ve matrisin mukavemetini ve rijitliğini arttırmaktadır. Kompozit malzemelerde takviye elemanı desteklemeyi yani dayanım ve sağlamlığı sağlamaktadır. Takviye elemanları fiber kompozitler, partikül kompozitler, tabakalı kompozitler veya karma kompozitler olarak incelenmektedir. Şekil 1.2.'de takviye elemanlarının şekline göre kompozit malzeme türleri yer almaktadır. Kompozit malzemeler takviye elemanının türü, uzunluğu, geometrisi, yönü ve bileşimi etkenlerine bağlı olarak performansı belirlenmektedir [4].

#### KOMPOZİT MALZEMELER

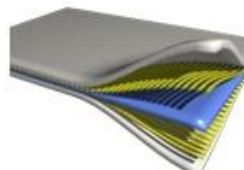
ELYAF TAKVİYELİ  
KOMPOZİTLER



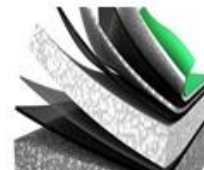
PARÇACIK TAKVİYELİ  
KOMPOZİTLER



TABAKALI  
KOMPOZİTLER



KARMA (HİBRİD)  
KOMPOZİTLER



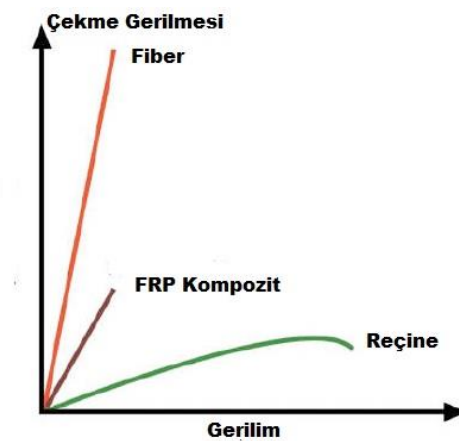
Şekil 1.2. Takviye şekline göre kompozitler [5]

### 1.2.1.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Fiber takviyeli kompozitlerde, fiber yüksek mukavemet ve yüksek elastisite modülüne sahip iken matris fazında bunlar düşük olmakta ve fiber ile matrisin bileşimi ile fiber takviyeli kompozit meydana gelmektedir [6]. Anizotropik olan kompozit malzemeler fiberin yönüne göre şekil almaktadır. Anizotropik malzemeler, malzemenin özellikleri atomik düzenlemeleri boyunca değişir ve yöne bağlıdır. İzotropik malzemeler ise malzemenin belirli özellikleri atomik düzenlemeleri boyunca değişmez ve yönden bağımsızdır. Anizotropik malzeme olabilmek için birçok parametre incelenmekte, izotropik malzeme için birkaç parametre incelenmektedir.

Fiberlerin boyları çaplarından fazlaca büyük olan malzemelerdir. Fiberlerin uygun seçimi, hacmi, şekli, uzunluğu, yönlendiği ve kullanılacak matrisin özellikleri açısından önemlidir. Bu parametreler fiber takviyeli kompozitlerin performanslarını etkilemektedir. Uzun fiberler matris içine yatay (paralel) şekilde koyulduğunda dayanım artmakta, dik koyulduğunda ise dayanımı azalmaktadır [7]. Kullanılacak fiber ve matris oranı da kompozit malzemenin dayanımını etkileyen parametredir. Bu parametreler oluşacak kompozit yapıyı yoğunluk, mukavemet, yorulma direnci, maliyet, elektriksel ve ısı iletkenlikler açısından etkilemektedir.

Şekil 1.3'de fiber takviyeli polimer kompozit malzeme ile yalnızca polimer matristen yani reçineden yapılmış bir malzemenin ve fiber malzemenin çekme deneyi yapılmıştır. Deney sonucu fiber takviyeli polimer kompozit malzemenin daha iyi mekanik özellikleri olduğu belirlenmiştir. Elyafta ise çekme mukavemeti yüksek olmasına rağmen gelen yükü matris fazı olmadan taşıyamayacağından tek kullanılmamaktadır.



Şekil 1.3. Şekildeki üç malzemenin çekme gerilmesi eğrisi [8]

### 1.2.1.1.1. Cam Fiber

Fiber takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan cam elyafların ana içeriğinde silis kum  $\text{SiO}_2$  bulunmaktadır. Silis kum içerisine sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor gibi elementler belirli oranlarda eklenip oksitlenmesiyle cam elyaflar oluşmaktadır. Belirli oranlarda eklenen bu elementlerle cam elyaflar farklı özellikler kazanmaktadır. Bunlar A – camı, C – camı, E – camı, S – camı ve R – camı olarak adlandırılan elyaf camlarıdır. A – camının elektrik yalıtkanlığı iyi değildir çünkü fazla alkali içeren bir cam elyaftır. Fakat kimyasal direnci oldukça iyidir. C – camının korozyon direnci yüksek, mekanik olarak düşüktür. E – camının elektriksel yalıtkanlığı çok iyidir çünkü düşük alkali içeren bir cam elyaftır. Dayanımı ve suya karşı direnci yüksektir. Nemli ortamlarda tercih edilmektedir. S – camı, E camına nazaran daha yüksek mukavemete sahiptir. S – camının yorulma direnci yüksektir. R – camları mekanik olarak çok yüksek mukavemete sahiptir. Özel uygulamalar, uçak ve uzay sanayisinde kullanılmaktadır [9].

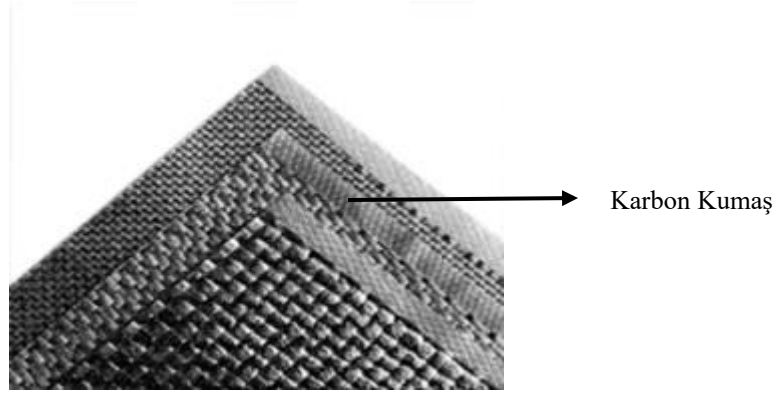
Cam elyafların üretiminde, camlar  $1200-1500^\circ\text{C}$  de ocakta eritilerek platin alaşımlı olan ve dibinde küçük küçük binlerce delik bulunan potadan eritilmiş camın itilmesiyle demetler halindeki lifler soğutma tarafına geçerek bobinlere sarılarak üretilmektedir.

### 1.2.1.1.2. Karbon Fiber

Karbon elyaf, fiber takviyeli kompozit malzemelerde takviye elemanı olan yüksek performansa sahip bir elyaf türüdür. Karbon elementinin elektriksel iletkenliği çok iyidir. Karbon elyafların üretimlerinden biri sentetik liflere yanma ve ısı işlem uygulanarak karbon elyaflar elde edilmektedir. Bu işlemler uygulanırken dayanımları için sıcaklık ayarı artırılıp azaltılarak kontrol altına alınmakta ve  $1500^\circ\text{C}$ 'ye kadar sıcaklıklara dayanmaktadır. Sentetik lif olarak poliakrilonitril PAN kullanılmaktadır. Karbon elyafların üretimlerinden diğeri ise zift ile yapılmaktadır. Sıvı kristal haline dönüştürülen zifte yanma işlemi uygulanarak elyaf malzemesi elde edilmektedir. Elyaflar içerisinde elastisite modülü daha yüksek, nemden ve oda ısısının etkilenmeyen elyaflar karbon elyaflardır.

Karbon elyaf fazla yüksek ısıya maruz kaldığında elyaflar karbonlaşmakta ve bunlara grafit elyafı denmektedir. Karbon elyaf matris fazı ile kombine edildiğinde

dayanımı ve sertliği çok yüksek olmaktadır. Fakat üretimden kaynaklı maliyeti yüksek olmaktadır. Maliyetten ötürü çok yüksek dayanım istenilen yerlerde kullanılmaktadır. Genellikle uçak ve uzay sanayisinde, savunma sanayisinde, spor ve önemli tıbbi ürünlerde kullanılmaktadır [10].

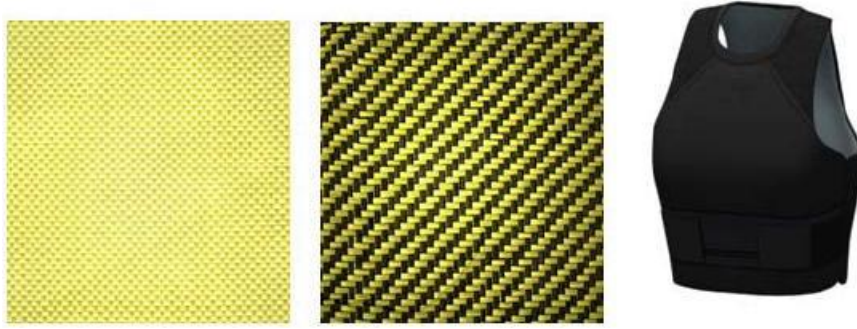


Şekil 1.4. Farklı dokuması yapılmış karbon kumaşlar [11]

### 1.2.1.1.3. Aramid Fiber

Aramid elyaf karbon, hidrojen azot ve oksijenden oluşmaktadır. Aramid elyaf polimer olmakta ve kompozit malzemeye yüksek sertlik ve dayanım sağlamaktadır. Elyaf lar içerisinde yoğunluğu en düşük ve dayanım/ağırlık oranı en yüksek olan malzemedir. Ayrıca darbe dayanımı, yorulama dayanımı, aşınma dayanımı, kimyasal dayanımı yüksek fakat elektrik iletkenliği ve nem absorbe özellikleri iyi değildir. Aramid ve karbon elyaflarında, elyaf eksen i ile aynı yönde ise mekanik özellikleri yüksek fakat elyaflara dik ise mekanik özellikler çok düşüktür. Karbon elyafın gevrekliği aramid elyafın gevrekliğinin iki katıdır. Bu nedenle aramid elyaflar daha basit şekil almaktadır.

Aramid elyafların en çok kullanılanı Kevlar'dır. Bu Kevlar 29 ve Kevlar 49 olarak en yaygın kullanılanlarıdır. Kevlar 29 balistik ürünlerde (asker kaskları, kurşun geçirmez yelek), kevlar 49 uçak sanayisinde kullanılmaktadır. Ayrıca kevlar sürtünme balataları, fren kampanaları gibi otomotiv alanında da kullanılmaktadır. Aramid elyafların basınç dayanımı düşük, güneş ışığında problemler oluşur ve üretimden sonra işleme si zordur [12].



Şekil 1.5. Aramid fiber – karbon ve aramid fiber – zırh [13]

### 1.2.1.2.Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

Partiküllü kompozit malzemeler, takviye elemanı olarak mikroskobik boyutta çok küçük partiküllerin matris içerisinde yer almasıyla oluşan kompozit malzemelerdir. Genellikle silis, mika, cam küre, kalsiyum karbonat vb. partiküller kullanılır. Bu partiküller yük taşımamakta, yükü taşıyan matris fazı olmaktadır. Partiküllü kompozitler ile elde edilen malzemeye dayanım kazandırmak yerine başka yeni özellikler kazandırmaktadır. Bu yeni özellikler takviye elemanı olan malzemenin özellikleri ve boyutlarına bağlı olmaktadır. Takviye malzemesi olan partiküller farklı şekillerde de olabilmektedir. Partiküller takviye elemanı olarak iyi etki etmesi için matris içerisine küçük ve eşit bir şekilde yerleştirilmelidir. Partiküllü malzemeler aşınma mukavemetini arttırmak, sürtünmeyi azaltmak, parçayı işlenebilir hale getirmek, sertliğini arttırmak gibi yeni özellikler kazandırmaktadır.

Partiküllü kompozit malzemeleri, fiber takviyeli kompozit malzemelerden ayıran özellik partiküllerin matris içerisinde rastgele yerleşmiş olmasıdır. Rastgele dağıldığından yön bakımından bağımsızdır böylece izotropik malzeme özelliği sergilemektedir.

### 1.2.1.3.Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozitler, farklı özellik ve yönlere sahip tabakaların üst üste dizilip kombinasyon haline gelmesiyle oluşur. Yaygın bir şekilde kullanılan kompozit türüdür. Bazı farklı katmanlanmış kompozitler üretilmektedir. Örneğin metal üzerine metalik, seramik kaplama, cam ve kağıt gibi malzemeler üzerine plastik katmanlar, yönleri farklı elyaf katmanlarının kombinasyonu ile farklı tabakalı kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu ve benzeri kombinasyon ile yüksek dayanım, yüksek korozyon

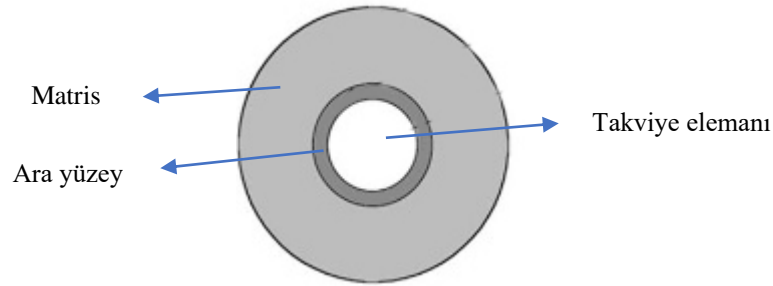
direnci, yüksek sertlik ve aşınma değerleri sağlanmaktadır. Hafif ve mukavemetli olduğundan metallere nazaran tercih edilmektedir.

#### 1.2.1.4.Karma Kompozit Malzemeler

Karma kompozit malzemeler diğer adıyla hibrit kompozit malzemeler, aynı kompozit yapıya sahip birden fazla elyaf türünün bulunmasıyla elde edilmektedir. Elyaf içerikli bir malzemenin tek başına düşük olan özelliklerinin iki veya daha fazla, çeşitli elyaf malzemesinin yüksek olan özellikleriyle birleşiminden yeni bir kompozit malzeme üretilmekte ve bu da karma kompozit malzemelerdir. Bu karma kompozit malzemeler elyafların birleşimiyle daha üstün yüksek özelliklere sahip olmaktadır.

#### 1.2.2. Matris Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin ana bileşenini matris fazı oluşturmaktadır. Dış etkenler ilk olarak matris fazını etkilediği için kompozit malzemelerin sıcaklığını, nemini, kimyasallara karşı dayanımını ilk belirleyen fazdır.



Şekil 1.6. Kompozit malzemelerin temel yapısı [12]

Genel olarak matrisler fiber ve matrisi birleştirerek fiberlere düzgün olarak yük iletme, rijitliği sağlama, yüzeyleri çevresel etkenlerden muhafaza etme, malzemedeki liflerde oluşacak çatlakları durdurarak malzemenin kırılmasını engelleme gibi önemli özelliklere sahip olmaktadır. Uygun seçilen matrisin mekanik özelliklerine göre takviye elemanı yükü taşımakta ve matrisin mukavemetini ve rijitliğini arttırmaktadır. Kompozit malzemelerde mukavemet özellikleri takviye elemanına göre belirlemektedir.

Malzemenin üretim yöntemi, nerede kullanılacağı ve orada hangi özelliklere ihtiyaç olacağına bağlı olarak uygun takviye elemanı ve matris tercih edilmektedir. Bu sebeple matris malzemeleri polimer, metal, seramik ve karbon matrisli kompozit malzemelerden oluşmaktadır.

### **1.2.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler**

Polimer birçok monomer molekülünün bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Polimerler plastik özelliği gösterdiğinden şekil alması kolay ve maliyeti ucuz olmaktadır. Polimerler kolay işlenebilirliği ve üretimi, hafifliği, esnekliği, maliyetinin az olması, korozyona karşı fazla direnç, düşük ısı iletkenliği ve yüksek elektriksel iletkenliği gibi özelliklere sahip olmaktadır. Düşük maliyetli olduğundan ambalaj üretiminde ve işlenebilirliği kolay olduğundan kırtasiye ürünlerinde yapıştırıcı ürünü olarak kullanımı sağlanmaktadır [14]. Düşük Isı iletkenliğine sahip olan polimerler malzemelerin içerisinde ısı toplanmakta ve bu toplanmayla malzemede ısı yorulmaları meydana gelmektedir. Isı yorulmaları polimerlerin içerisine metal toz ve bazı elyafların (karbon,cam elyaf) eklenmesiyle yok edilmektedir. Bu işlemler sonucuda 10 kat fazla ısı iletkenliğine sahip polimerler meydana gelmektedir [14]. Polimerlerin çalışma sıcaklığı ve elastisite modülü düşüktür. Metal ve seramiklerin dayanımı polimerlerin dayanımından yüksek olmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeler birçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Çok sayıda kompozit malzemeler polimer matrisinden oluşmaktadır. Polimer matrisler termosetler ve termoplastikler olarak iki ileme yöntemine göre ele alınmaktadır.

#### **1.2.2.1.1. Termoplastikler**

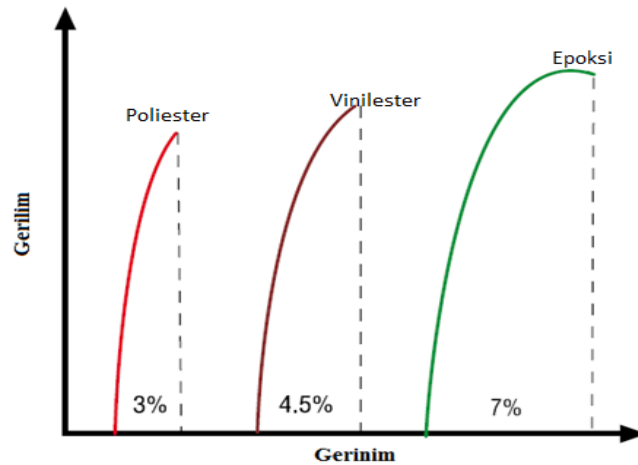
Termoplastikler, moleküllerin zayıf bağ olan Van Der Walls bağlarıyla bir arada tutulduğu polimerlerdir. Rijit bir özellikte olmamak için çarpaz bağlarla bağlanmamaktadır. Zayıf Van Der Walls bağlarından dolayı sıcaklık uygulandığında bağlar birbirinden ayrılmakta ve erime veya yumuşama başlamaktadır. Bu eriyen termoplastikler bulunduğu kabın şeklini alarak soğutulmaya bırakılıp tekrar katı hale gelmektedir. Yani soğutulma işleminde zayıf bağlar tekrar birbirine bağlanmaktadır. Termoplastikler aşırı sıcaklıktan dolayı mekanik olarak bozulana kadar bu işlemler birçok kez yapılabilmektedir. Genellikle parça parça ve kısa cam fiberli kompozitlerin imalatında kullanılmaktadır. Polietilen(PE), asetale, akrilik, polipropilen(PP), naylon,

poliamid(PA), Politetrafloroetilen(PTFE), polivinil klorür(PVC), akrilonitril bütadien stiren(ABS) gibi termoplastikler yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 1.2.2.1.2. Termosetler

Termosetler epoksi, polyester, fenolik poliamid, vinilester gibi reçineler ile matris fazını oluşturmaktadır. Termosetler, monomer molekülüne reçine ve katalizör ya da sertleştirici katılmasıyla kimyasal tepkimelere yani küremeye tabi tutulup çapraz bağlanarak güçlü kovalent bağlarla bir arada tutulduğu polimerlerdir. Termosetlerin kürlenmesi esnasında çapraz bağ olarak adlandırılan moleküler zincir şeklinde oluşmaktadır. Sıvı halde olan termosetlerin katılaşması için kimyasal tepkimelere yani küremeye ihtiyaç duyulmaktadır. Kimyasal tepkimelerle oluşan güçlü çapraz bağlar termosetlerin sert bir yapıya sahip olmasını sağlamakla beraber termosetler yüksek sıcaklıklara maruz bırakılsa dahi yumuşama ve eritilmesi yapılamamaktadır. Çapraz bağların artmasıyla malzemede termal kararlılık artmakta ve sertleşmektedir.

Şekil 1.7’de karşılaştırılan termoset reçinelerin 80°C’de 5 saatte post kürlenmesi yapıldıktan sonra elde edilen veriler grafik ile gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Polyester, vinilester, epoksi reçinelerin gerilim-gerinim verilerinin karşılaştırılması [15]

Polimer matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak genellikle termoset reçineler kullanılmaktadır. Termosetler, termoplastiklere göre yüksek dayanım, yüksek modüllü, yüksek rijitliğe sahiptir. Termosetler tekrar işlenemez, kür süresi uzun ve raf ömrü uzundur.

**Çizelge 1.1.** Bazı Termoset malzemelerin mekanik özellikleri [2]

Özellikler	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,11	1,04 – 1,46	1,24 – 1,32
Elastisite Modülü (MPa)	7000	3400	4800
Çekme Dayanımı (MPa)	70	41 - 90	34 - 62
Kopma Uzaması (%)	3 - 6	42	1,5 - 2
Isıl iletkenlik	0,19	0,19	0,15
Termal Genleşme Katsayısı (1/°C)	45 - 65	55 - 100	68

### 1.2.2.1.2.1. Epoksiler

Epoksiler kompozit ürün üretiminde en çok tercih edilen reçinelerdendir. Epoksiler diğer reçinelerle birleştirilip farklı özelliklerde elde edilebilir. Epoksi reçineler maliyetli ve iyi özelliklere sahip olduğundan, yüksek performans istenen yerlerde tercih edilmektedir. Genellikle denizcilik, otomotiv sektörü, elektronik ürün sektörlerinde kullanılmaktadır.

Epoksi reçineler çeşitli fiberleri bir arada tutmak için kullanılmaktadır. Bunun yanında çelik, bor karbür, grafit, karbon nanotüp gibi takviye elemanlarıyla matris fazı olarak kullanılmaktadır. Epoksi reçinelerin takviye malzemesi üzerine düzgün ve eşit bir şekilde büzülmeden yayılması istenmektedir. Bu reçineler yüksek dayanım ve yüksek sertlik gereksinimleri için tercih edilmektedir.

Epoksilerin viskozitesi diğer reçinelerden yüksek olduğundan ve yüksek mekanik özellikler sağlamak için epoksilere post kür uygulanması yapılmakta ve bu da epoksi reçinelerin kullanımını zorlaştırmaktadır [16]. Yapılan kür işlemleriyle epoksi reçineler yüksek sıcaklıklara dayanmaktadır.

Epoksilerde sıvı reçine ve katı reçine uygulamaları yapılmaktadır. Sıvı reçinelerde ıslak yatırma işlemi yapılmakta ve burada ısıyla sertleşmektedir. Ağırlık olarak düşük katı reçinelerde ise prepreg üretiminde yani yarı mamul üretiminde solüsyon olarak kullanılmaktadır. Islak epoksiler 140°C' ye kadar ısıya dayanmakta, kuru epoksiler ise 220°C' ye kadar ısıya dayanmaktadır.

Epoksi reçineler çeşitli fiberleri bir arada tutmak için kullanılmaktadır. Bunun yanında çelik, bor karbür, grafit, karbon nanotüp gibi takviye elemanlarıyla matris fazı olarak kullanılmaktadır. İyi yapışma özelliğine sahip epoksi reçinelerin takviye malzemesi

üzerine düzgün ve eşit bir şekilde büzülmeden yayılması istenmektedir. Bu reçineler yüksek dayanım ve yüksek sertlik gereksinimleri için tercih edilmektedir.

Epoksiler, kompozit ürünle birleştirilip yapıştırıldıktan sonra 230°C'ye kadar dayanmaktadır fakat oda ısısında daha iyi özelliklere sahip olmaktadır [14].

#### 1.2.2.1.2.2. Polyester

Polyesterler doymuş ve doymamış polyester reçineler olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Doymuş olan termoplastik özellikler gösterirken doymamış olana katalizör eklenerek termoset özellikler göstermektedir. Termoset reçineler genellikle kompozit malzeme üretiminde tercih edildiği için polyester reçinelerde doymamış olanı tercih edilmektedir. Doymuş reçineler ise enjeksiyon kalıplama işleminde ve fiberin üretiminde tercih edilmektedir.

Polyesterlerin kolay şekil alabilmesi, esnekliği sebebiyle kopma gerilmesinin artması, düşük viskozite ile takviye elemanının nemini dışarıya atabilmesi, çevresel etkenlere dayanıklı olması, düşük maliyette olmasıyla kullanımı kolaylaşmakta ve ticari uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadır.

#### 1.2.2.1.2.3. Fenolik

Termoset reçinelerinden olan fenoliklere ısı verilerek sertleşmesi sağlanan reçinelerdir. . Yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olan fenolikler sürekli ısı verildiğinde 300°C'ye kadar, kısa süreli ısı verildiğinde 1000°C'ye kadar dayanabilmektedir. Yani yüksek ısıya, ses geçirmezliğe, kimyasallara dayanımı (su ve alkali hariç) gibi özelliklere sahip olmaktadır. Fakat mekanik özellikler bakımından zayıf olmaktadır. Fenolik reçineler genellikle fren ve debriyaj balata sistemlerinde, izolasyon işlemlerinde kullanılmaktadır.

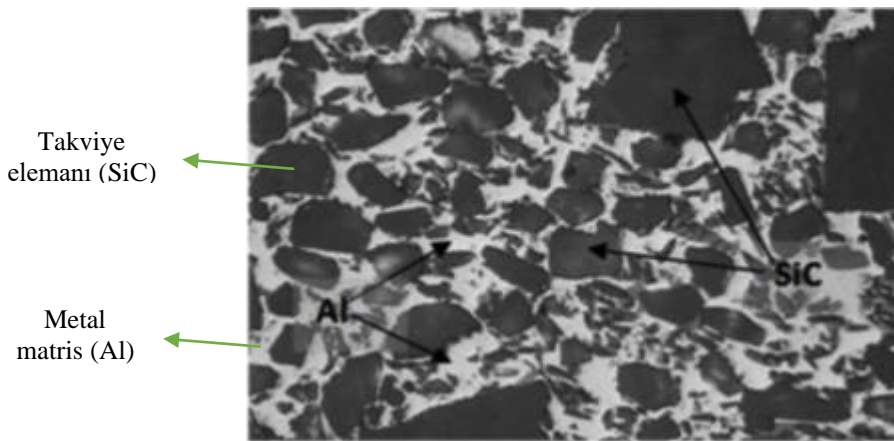
**Çizelge 1.2.** Bazı termosetlerin özelliklerinin kıyaslanması [17]

<b>Epoksi</b>	Sürekli fiberli kompozitlerde kullanılan yüksek performanslı matristir. 120 – 135 °C'ye kadar kullanılır. Polyester ve vinilestere göre yüksek sıcaklıklarda daha iyi performanstadır.
<b>Polyester</b>	Genellikle ticari uygulamalarda kullanılmaktadır. Yeterince ucuzdur ve işlenmeleri kolaydır. Sürekli ve Süreksiz fiberli kompozitlerde kullanılır.
<b>Fenolik</b>	Yanma direnci yüksek olan yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan reçinelerdir. Genellikle hava taşıtlarının iç aksamalarında kullanılır. Üretimleri zordur.
<b>Vinil Ester</b>	Reçinelerden polyesterlere benzer fakat daha tok ve daha iyi nem direncine sahiptir.

### 1.2.2.2. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozit malzemelerde alüminyum(Al), magnezyum(Mg), çinko(Zn), bakır(Cu), titanyum(Ti) ve nikel(Ni) gibi hafif metaller veya alaşımları ile matris fazı oluşmaktadır. Kompozitlerde matris fazı için hafif metaller daha iyi olmaktadır. Plastiklerin dayanımı ve tokluğu düşük olduğundan daha iyi dayanıma, tokluğa sahip matris malzemeleri istenmekte ve bunu metal malzemeler karşılamaktadır. Metal matrisli ile polimer matrisli kompozitler karşılaştırıldığında metal matrisli kompozitler daha yüksek mekanik özellik, rijitlik, mukavemet, elektrik iletimi, ısı iletimi ve sıcaklık dayanımına sahip olmaktadır. Fakat metal matrisli kompozitlerin üretimi çok daha zor olmaktadır. Metaller bir kısım elyaflar ile ara yüzey bağı sağlayamadığından kompozit oluşturamamakta ve üretiminde zorluk ve aksaklıklar meydana gelmektedir. Kompozitlerin sünekliliği metallere kıyasla daha düşüktür.

Takviye elemanı olarak alümina( $Al_2O_3$ ), silisyum karbür(SiC), titanyum karbür(TiC), karbon gibi malzemeler metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanının şekline göre partikül takviyeli, kısa elyaf takviyeli, sürekli elyaf takviyeli kompozitler bulunmaktadır. Şekil 1.8'de metal matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanı ve matris fazı gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Takviye elemanı ve matrisin metal matrisli kompozitte görünümü [18]

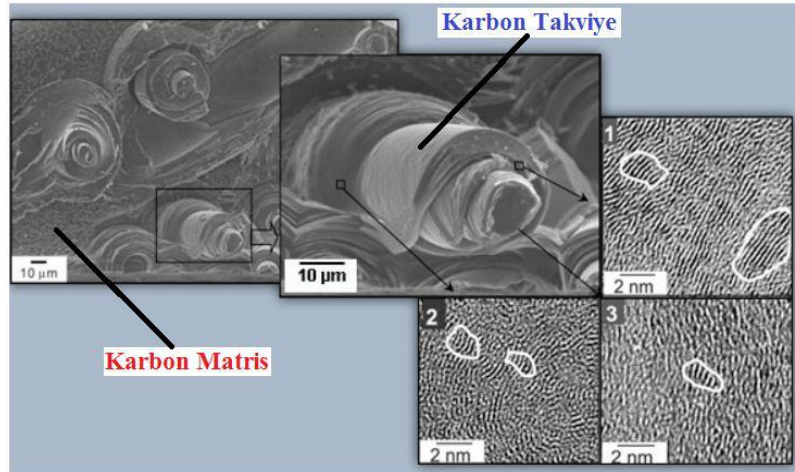
### 1.2.2.3. Seramik Matrisli Kompozitler

İnorganik yapıda olan seramikler bir ya da daha fazla metal malzemenin metal dışında başka elemanlarla birleşmesiyle oluşmaktadır. Doğada bulunan ve doğal olarak dış etkenlerden parçalanarak kayaların oluşturduğu kil, katoen gibi tortulların yüksek sıcaklık değerlerine maruz bırakılmasıyla elde edilen malzemelerdir.

Seramik malzemeler yüksek dayanım ve sertliktedir ancak gevrek malzeme özelliğine sahip olduğundan kırılğan yapıya sahiptir. Böylece seramik matrisli kompozitlerin yüksek tokluğa sahip olması için geliştirilmesi ve imal edilmesi hedeflenmiştir. Dolayısıyla yüksek dayanım ve sertliğe sahip seramiklerden faydalanılarak gevrekliği en düşük olması amaçlanmaktadır. Seramikler 1200°C kadar yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon dayanımı ve hafifliğinden kullanışlı olmaktadır. Otomotiv, havacılık ve uzay sektöründe yüksek sıcaklığa dayanım gereken yerlerde kullanılmaktadır.

#### 1.2.2.4. Karbon Matrisli Kompozitler

Karbon matris ve karbon fiberlerin bir arada bulunduğu malzemelerde matris elemanı olarak kullanılmaktadır. Buradaki karbon malzemesi hem takviye elemanı hem de matris elemanı olarak kullanılmaktadır. Kompleks işlemlerle imal edildiğinden maliyetli olmakta böylece çok fazla tercih edilmemektedir. Bu kompozit malzemeler, 3300 °C'ye kadar yüksek sıcaklık gereken yerlerde kullanılmaktadır. Ancak oksidasyon olursa 400-500°C'de bozulmalar meydana gelmektedir. Karbon- karbon matrisli kompozitlerin termal genleşmeleri düşük ve ısı iletimi yüksektir. Böylece ısı şoklarının oluştuğu yapılarda malzeme seçimi olarak tercih edilmektedir.

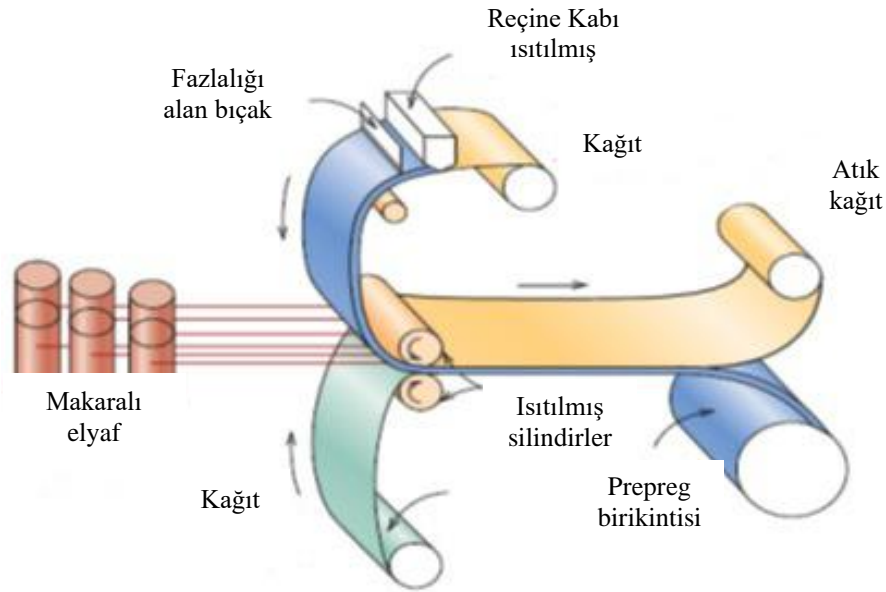


Şekil 1.9. Karbon takviye ve karbon matrise sahip kompozitler [19]

Karbon fiberin arasına, gaz ya da sıvı durumdaki karbonun emdirilmesiyle karbon karbon kompozit malzeme imal edilmektedir. Gaz kullanılarak yapılan işlemlerde ince ürünler, sıvı kullanılarak yapılan işlemlerde ise biraz daha kalın ürünler imal edilmektedir.

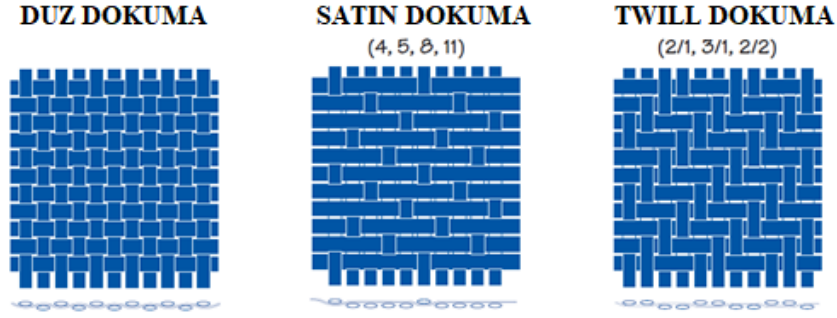
### 1.3. Prepreg Malzemeler

Prepregler, reçine matris içindeki fiber takviyesi birleşiminden oluşan bantlardır. Bu bantlar ya dokunmuş ya da tek yönlü fiber kumaşlardır. Kumaş üzerine reçine emdirilerek hazırlanmış fiberler için kısmen kürleştirme işlemi uygulanarak bu bantlar oluşturulur. Bant şekline getirilen prepregler, üretim esnasında gerekli reçine ve sertleştirici ilave edilip kısmen kürleştirildiğinden kullanım sırasında herhangi bir reçineye ihtiyaç olmadan hazır durumdadır. Reçine ve sertleştirici karışımı ısı ve basınca maruz kaldığında sertleşerek, prepreg malzemeyi mukavemetli, sert ve hafif yapmaktadır. Genişlikleri 72 – 1280 mm arasında üretilmekte, buzdolabı veya oda sıcaklığında muhafaza edilmektedir. Şekil 1.10’da prepreg kumaş üretim bandı gösterilmektedir.



Şekil 1.10. Prepreg kumaşın üretildiği sistem [20]

Prepreg bant üretiminde kullanılan fiber kumaşlar iki veya daha fazla ipliğin dokunmasından oluşur. Üç ana çeşit dokuma stilleri vardır. Bunlar düz dokuma, satın dokuma ve twill dokumadır. Fazla yük kumaşlara geldiğinden dokuma stillerinde kıvrım çok önemlidir. Kıvrımlar az olduğunda mekanik açıdan daha sağlam malzemeler elde edilmektedir.



Şekil 1.11. Fiber kumaşların dokuma örgü stilleri [4]

Prepregler rüzgar enerjisi, spor ürünleri, otomotiv sektörü, uzay ve uçak teknolojisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kompozit malzeme üretmek için kullanılan bu prepregler yüksek dayanım, hafiflik ve tasarımın oluşmasını sağlamaktadır.

### 1.3.1. Reçine Fiber Oranı Kontrolü

Prepreglerde elyaf reçine oranı, kullanılacak yere ve isteğe göre %35 ile %50 arası oranlarda uygulanabilmektedir. Bu oran kumaşa reçine emdirilme esnasında yapılmaktadır. Örneğin el yatırımı yönteminde reçine oranını istenilen ağırlıkta ayarlanamamakta ve fazla reçine oluşmaktadır. Fazla olan reçinelerin bir kısmı kürlenme işlemi esnasında dökülmektedir. Bu yöntemdeki problemler prepreg üretimi dışında, diğer kompozit üretim yöntemlerinde de oluşmaktadır. Reçine fazla olması ağırlığı ve kırılabilirliği artırır ve fiziksel özelliği azaltmaktadır. Prepreglerin maliyeti diğer üretim yöntemlerinde yapılan reçine, fiber ve kürlenme işlemlerinden daha pahalıdır.

### 1.3.2. Üretim Standartlaştırma

El yatırma, püskürtme serim, vakum poşetleme, filament sarma, pultrüzyon, reçine transfer kalıplama, otoklav ile kürlenme gibi yöntemlerle polimer matrisli kompozit malzeme üretilmektedir. Prepreg bant kullanılarak üretilen kompozit ürünler, diğer yöntemlerle üretilen kompozitlere göre daha az zamanda, daha az fire ile daha düzgün yüzey, kaliteli ürün, aynı kalınlık ve ağırlıkta parçalar elde edilmektedir. Prepreg kullanılarak yapılan kompozit parça üretiminde kısmi kürlenme işlemi yapılmakta ve bu işlemden sonra parça hazır hale gelmektedir. Diğer yöntemlerde ise tam kürlenme işlemi (48 saat) yapıldığından parça üretimi daha fazla zamanda yapılmaktadır. Prepreglerde

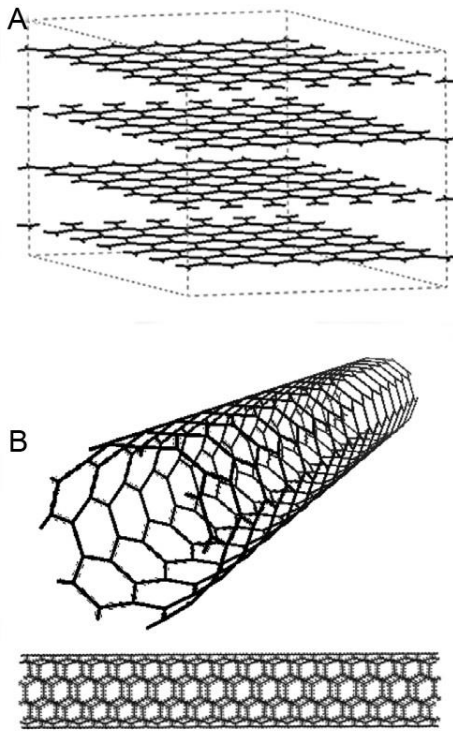
oranlanmış reçine kullanımı ile hava kabarcıkları sorunu ortadan kaldırılarak işlem verimliliği artar ve pürüzsüz, düzgün yüzey oluşur.

Prepregler 24°C de yani oda koşullarında 6 ay muhafaza edilebilmektedir. Bu sıcaklık üzerinde saklandığında kullanım ömrü azalmakta, bu sıcaklık altında yani donma oluştuğunda ömrü artmaktadır.

#### 1.4. Karbon Nanotüpler

Karbon nanotüplerin yapısı, altı karbon atomundan oluşan örülü yapıya sahip grafen düzleminin silindir olacak şekilde yuvarlatılmasıyla oluşur. µm boyuna ve nanometre çapına sahip karbon nanotüplerin boy/çap oranları 1000 kat büyüktür. Karbon elementi; grafit, fulleren ve elmasa bulunmaktadır. Grafit bağlarının boyları elmas bağlarının boylarından daha kısa olduğu için daha güçlüdür. Grafit (C-C sp<sup>2</sup>), elmas (C-C sp<sup>3</sup>) dür. Bu da karbon nanotüplerin çok iyi mekanik özelliklere sahip olmasını gösterir.

Karbon nanotüpler kimyasal olarak grafit yapısıyla benzerlik gösterebilir, izotropik ve nanotüp şeklinde olmaları bakımından diğer karbon yapılarından farklıdır ve benzersiz özellikleri olan ağ yapıları mevcuttur [21].



Şekil 1.12. A grafit, B karbon nanotüp [22]

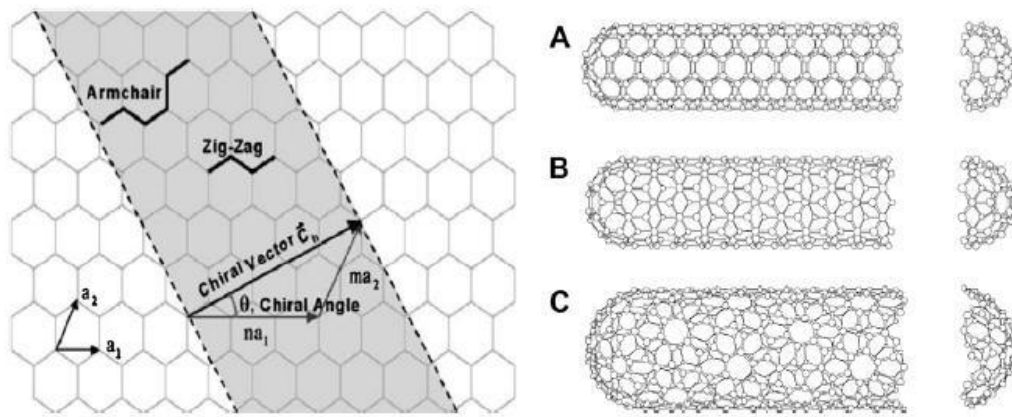
Çizelge 1.3. KNTlerin bazı temel özellikleri [23]

Özellikler	Karbon Nanotüpler	Yorumlar
Elastisite Modülü	270 GPa – 1 TPa (Krishnan ve ark., 1998)	En güçlü çelikten 10-100 kat daha büyüktür.
Çekme Dayanımı	11 – 63 GPa (Yu, 2000)	Yüksek dayanımlı çelikten 150-900 kat daha büyüktür.
Termal İletkenlik	2000 W/(mK) (Kim ve ark., 2001)	Elmasın iki katıdır.
Maks. Akım Yoğunluğu	10 A/m <sup>2</sup> (Frank, 1998)	Bakır tellerden 1000 kat daha büyüktür.
Boy/Çap Oranı	2000	

Karbon nanotüplerin oluşması için tüp haline getirilen grafenin katlanması sırasında karbon atomlarının yönelimiyle farklı açılar meydana gelmektedir. Bu açılar ile armchair, zigzag, chiral olarak adlandırılan üç farklı kiralite oluşmaktadır. Aşağıda kiral vektör ( $C_h$ ) denklemi verilmektedir.

$$C_h = na_1 + ma_2$$

Denklemdaki n ve m altıgenlerin basamak sayısını göstermekte ve bu da açılarının yönelimini belirlemekte,  $a_1$  ve  $a_2$  ise birim vektördür. n=m armchair, m=0 zigzag, bunların dışında ise chiral olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 1.13. Farklı açılardaki karbon nanotüplerin gösterimi, A armchair, B zigzag, C chiral [24]

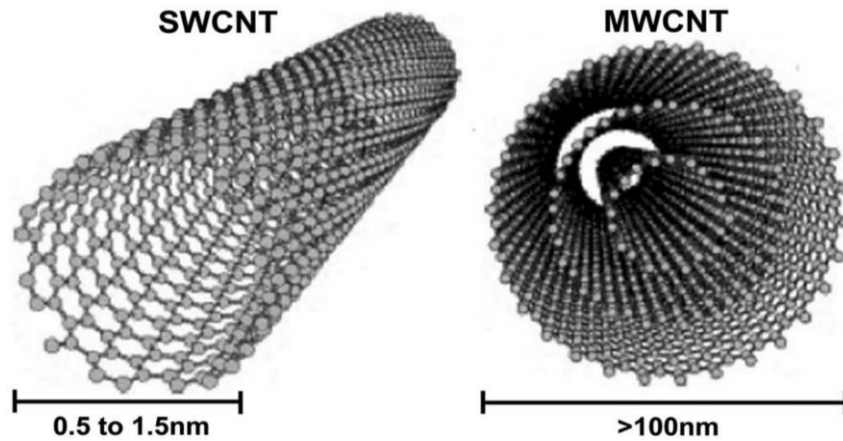
Kiral açısı ( $\theta$ );

$\cos \theta = (2n + m) / 2p(n^2 + nm + m^2)$  denklemi ile bulunmaktadır.

Karbon nanotüplerin altıgen kristal yapısının metalik veya yarı iletken olması  $(n - m)/3 = p$  denklemi ile belirlenmektedir.  $p$  değeri 0 veya tam sayı ise metalik yapıda,  $p$  değeri bunların dışında ise yarı iletken yapıdadır.

#### 1.4.1. Karbon Nanotüp Çeşitleri

Karbon nanotüpler, tek cidarlı karbon nanotüp, iki cidarlı karbon nanotüp ve çok cidarlı karbon nanotüp olmak üzere üç çeşitte üretilmektedir. TCKNT, tek grafen düzleminin tüp şeklinde yuvarlatılmasıyla oluşur ve çapı birkaç nm, uzunlukları genellikle mikrometre seviyelerdedir. İki cidarlı KNT, iki grafen düzleminin tüp şeklinde yuvarlatılmasıyla oluşur. ÇCKNT ise ikiden fazla grafen düzleminin yuvarlatılmasıyla oluşan iç içe geçmiş, eş merkezli tüplerden oluşur ve çapı TCKNT'lerin on katına kadar çıkar. Her bir grafen düzlemleri arasında çok zayıf olan Van der Waals kuvvetleri bulunur ve bu sebeple ÇCKNTlerde düzlemler birbirleri üzerlerinden kolaylıkla kayabilmekte ve bu da dayanımını düşürmektedir. Aslında iki cidarlı KNT'ler, ÇCKNTlerin içerisinde incelenir. ÇCKNTlerin en basiti iki cidarlı KNT'lerdir. Bu iki cidarlı KNT, TCKNT'lerin tüm özelliklerini gösterdiği gibi daha kararlı ve sıktır. TCKNT'ler tek grafen tüpten oluştuğu için ÇCKNT'lere göre daha dayanıklıdır [25]. ÇCKNT'lerin çapları TCKNT'den büyük olduğu için daha az eğilebilir. ÇCKNTlerin üretimi TCKNTlerin üretiminden ekonomik olması en büyük avantajıdır [26].



Şekil 1.14. TCKNT ve ÇCKNT'ler [27]

Benzersiz mekanik özelliklere sahip hafif, dayanıklı karbon nanotüpler, farklı fiziksel özelliklerde sahiptirler. Karbon nanotüpler diğer karbon bazlı malzemeler ile kıyaslandığında üstün elektriksel ve termal iletkenliğe sahiptirler [28].

Birçok üstün özelliğe sahip karbon nanotüpler, hidrojen depolama sisteminde, tıp alanında kimyasal sensörlerde (biyosensörler), elektronik devre elemanlarının imalatında, elektrik iletkenliği istenen yerlerde, kurşuna dayanıklı yeleklerde kullanılmaktadır.

Çizelge 1.4. TCKNT ve ÇCKNT'lerin Özellikleri [28]

Özellikler	TCKNT	ÇCKNT
Çekme Dayanımı (GPa)	50- 500	10- 60
Elastisite Modülü (TPa)	~1	0.3- 1
Kırılmadaki % Uzama	5.8	-
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.3 – 1.5	1.8- 2
Elektriksel İletkenlik (S/m)	~10 <sup>6</sup>	~10 <sup>6</sup>
Isıl Karalılık (havada)	>700 °C	>700 °C
Karakteristik Çap (nm)	1	20
Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	10- 20	10- 20

ÇCKNT'lerdeki her bir katmanın arasındaki kinetik özellikler ile karbon nanotüplerin sürtünme değerleri yakın olduğu için katmanlar arasında kayma sıyrılma (pull out) olayı gerçekleşeceğinden ÇCKNT'lerin çekme mukavemeti TCKNT'den düşüktür.

#### 1.4.2. Karbon Nanotüp Üretimi

Karbon nanotüplerin en çok nanotüp elde edilen 3 farklı üretim yöntemleri ark deşarj, lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar çökeltme (CVD) dir.

Ark deşarj ile katı karbon olan grafit elektrotlar yüksek sıcaklıkta buharlaştırılarak sıcak gaz halinde karbon atomları oluşur. Bu atomların yoğunlaştırılmasıyla karbon nanotüpler elde edilir. Yüksek sıcaklık grafitler arasında olan ark boşaltmasıyla ortaya çıkmaktadır.

Lazer buharlaştırma yöntemi de ark deşarja benzerlik göstermektedir. Lazer buharlaştırmada bir reaktör yüksek sıcaklıkta ısıtılıp ve asal gaz ile doldurularak içerisindeki katı haldeki grafit lazer ile buharlaştırılmaktadır. Reaktör kenarları su ile soğutulularak karbon nanotüpler oluşmaktadır.

Kimyasal buhar çökeltme işleminde, katalizör (nikel, demir gibi) ile kaplanmış yüzeyler ön ısıtma ile 700°C de tüp fırın içinde ısıtılır. Tüp fırının içine taşıyıcı gazlar (azot, hidrojen gibi) ile karbon kaynağı (asetilen, etilen, hidrokarbon gibi) olan gazlar gönderilir. Burada karbon içerikli gazlara katalitik ayrıştırma gerçekleştirilerek nanotüpler metal katalizler üzerine biriktirilir veya büyütülürler. CVD yöntemi diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında karbon nanotüplerin yapısı ve uzunluğu bakımından

daha kontrollü üretilmektedir. Endüstriyel boyuttaki üretimler ile ticari olarak kullanılan bir yöntemdir.

### 1.4.3. Karbon Nanotüplerin Matris İçinde Dağılımı

KNTler yükü taşıyan, matris ise karbon nanotüplere yükü aktaran temel unsurdur. Kompozitlerde, kuvvet aktarımında KNT ile matris arasında olan ve ara yüzey olarak adlandırılan bölgedeki mekanik özellikler, aktarılacak yükü etkilediğinden ara yüzey bağlanması çok önemlidir. KNTlerin matris içerisinde homojen olarak düzgün dağıtılmasıyla etkin bir şekilde yük aktarımı ve homojen gerilme dağılımı gerçekleşmekte ve gerilme yoğunluğunun meydana geldiği bölgelerde azalma olmaktadır.

Yük aktarımında van der Waals kuvvetleri önemli bir yoldur fakat zayıf kuvvetleri olduğundan yapışma sırasında homojen dağılmadığından diğer yollar daha önemlidir. KNT içerikli kompozit malzemede oluşan dağılım sorununu ortadan kaldırmak için fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Matrisin çeşidine ve viskozitesine göre KNTlerin matris (polimer) içerisinde dağıtılması belirlenmektedir.

#### Fiziksel Yöntem ile Dağılım

Bu yöntemde karbon nanotüpler mekanik işlemlerle dağıtılarak, matris ile karıştırılır. Fiziksel dağıtma yönteminde karbon nanotüpler ultrasonikasyon, silindirler arasından geçirilme ve kayma karıştırma gibi işlemlerden geçmektedir. Kayma karıştırma işleminde yüksek viskoziteli matris olan reçinelerle karışım yapılmaktadır. Bu karıştırılma işleminde, yüksek kayma kuvvetleri yardımıyla karbon nanotüpler birbirinden ayrılır. Ekstrüzyon işlemi kullanılarak karbon nanotüpler parçalar halinde ekstrüder desteği ile reçineyle karıştırılır. Burada matris (reçine) sıcaklığı artırılır viskozite düşürülür [29]. Karbon nanotüp ve matris karışımının homojenliğini arttırmak ekstrüder hızının artmasına bağlıdır [30].

Ultrasonikasyon ve silindir arasından geçirme işlemleri düşük veya orta viskoziteli matrislerin karbon nanotüple karıştırılması için kullanılan yöntemlerdir. Ultrasonikasyon işleminde basınç dalgalarının sıvı içine dağılmasıyla yüksek ve alçak basınç alanları oluşmaktadır. Bu alanlar ses frekanslarıyla sıklaşmaktadır. Şiddetli ses frekansları, düşük basınç alanlarında ufak boşluklara sebep olmaktadır. Bu boşlukların fazla sıklaşmasıyla enerjiyi absorbe etmeleri azalmakta ve yüksek basınç alanında sesli bir patlama meydana gelmektedir. Patlama sonucu yüksek sıcaklık ve basınç ortaya çıkmasıyla yüksek hızlı

sıvı jetleri oluşur. Bu sıvı jetler, karbon nanotüpler arasındaki kuvvetleri çok zayıf düşürerek sıvı içerisinde karbon nanotüplerin dağılmasına olanak sağlar [29].

#### Kimyasal Yöntem ile Dağılım

Karbon nanotüplerin fiziksel yöntemler ile dağıtılması yeterli olmayabilir ve karbon nanotüplerin matris (reçine) içerisindeki durumu kararlı olmayabilir. Karbon nanotüplerin dağıtılmasında kimyasal işlemler olarak kovalent ve kovalent olmayan yöntemler kullanılabilir.

Kovalent yöntemde, karbon nanotüplerin yüzeyleri çeşitli kimyasal tepkimelerle maruz bırakılarak kovalent bağlar ile matrise uyumlu kimyasal yapıya bağlanır. Burada fonksiyonelleştirme meydana gelir. Karbon nanotüplerin kuvvetli asitler içerisinde yıkanmasıyla karbon nanotüplerin uçlarında açılmalar oluşur ve buralara negatif yüklü karboksilik (- COOH gibi) grupların bağlanmasıyla fonksiyonelleştirme oluşur. Negatif yüklü - COOH gruplar karbon nanotüplerin dağılımını ve karbon nanotüplere yükün taşınmasını basitleştirir. Dağılma işleminde, bu gruplar van der Waals kuvvetlerini çok zayıflatarak karbon nanotüplerin kümelenmesine karşı koyar. Bu işlemler yüksek sıcaklıkta yapılırsa karbon nanotüpler hasar görebilir [31].

Kovalent olmayan yöntemde, yüzey aktifleyici maddeler ve karbon nanotüp çevresine matris (reçine) sarılması işlemleri kullanılmaktadır. Bu işlemler karbon nanotüplerin dağıtılmasında kullanılır. Yüzey aktifleyici maddeler karbon nanotüplerin yüzeylerine tutunur, yüzey gerilimini azaltır ve sıvı içinde daha rahat dağıtılması sağlar [24]. Yüzey aktifleyici maddeler, van der Waals kuvvetlerini çok zayıflatarak karşı koymaktadır. Kullanılacak olan yüzey aktifleyici maddelerinin çeşidi ve miktar oranı dağılma işlemi için çok önemlidir. Miktar oranı karbon nanotüp ve yüzey aktifleyici maddeler ile en uygun miktarda yapılmalıdır. Karbon nanotüpler ile matris arasında ara yüzey bağları oluşturamayabilen yüzey aktifleyici maddeler, karbon nanotüplerin dağılmasını artırır ve uygulaması basittir [29].

### **1.5. Kompozit Malzemelerin Üretimi**

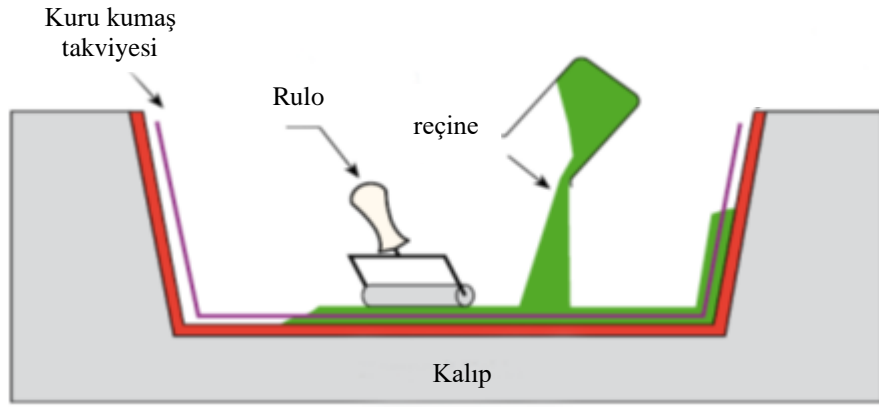
Kompozit ürün imal edilmesinde birçok metot bulunmaktadır. Bu metotlar ile gerekli özelliklerde kompozit ürün imalatı yapılmaktadır. Genellikle prepreg el yatırma metodu, ıslak el yatırma metodu, vakumlu torbalama metodu, otoklav metodu, elyaf sarma metodu, reçine transfer kalıplama metodu gibi birçok imalat metotları ele alınmaktadır.

### **1.5.1. Prepreg El Yatırma Metodu**

Açık kalıplı bir imalat metodu olan el yatırma metodu prepreg el ve ıslak el yatırma metoduyla yapılmaktadır. Prepreg üretim metodunda prepregler kaç kat sarılacağı ve istenilen sarım kalınlığına göre kesilmektedir. Kesilen bu prepregler, kalıp üzerine belirlenen şekilde sarılmakta veya dizilmektedir. Bu işlemin ardından kalıbın üzeri vakum poşetiyle kapatılmaktadır. Bu poşet, vakuma maruz bırakıldıktan sonra kalıp bütün bir şekilde fırına veya otoklava koyulmakta ve kürlenme işlemine bırakılmaktadır. Kürlenme işlemi ısı ve basınçla yapılmaktadır. Bu imalat metodunda işçilik maliyeti yüksek olmaktadır. Az sayıda ürün imal edilirse ilk maliyeti düşük olmaktadır. Bu metod ile yüksek elyaf hacmine sahip kompozitler imal edilmektedir. En çok uzay uçak endüstrisinde kullanılmaktadır.

### **1.5.2. Islak El Yatırma Metodu**

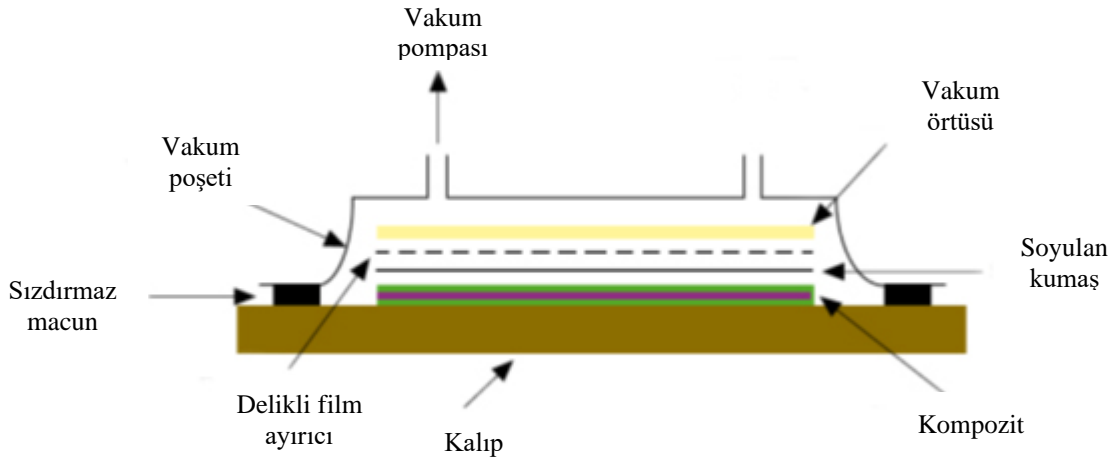
Islak el yatırma metodunda karbon, cam, aramid gibi malzemeler takviye elemanı olarak kullanılmakta, polyester, fenolik, epoksi gibi reçineler ise matris elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu metotta imal edilecek ürünün kalıptan kolayca ayrılması için ilk olarak kalıbın üzerine polivinil alkol, silikon sürülmektedir. Daha sonra kalıbın üzerine takviye elemanı yerleştirilmekte ve bunun üzerine ise reçine malzeme ilavesi yapılmaktadır. Yüksek viskoziteye sahip reçinenin bir merdane aracılığıyla takviye elemanına nüfuz etmesi sağlanmaktadır. Belirlenen ürün kalınlığı sağlanana kadar her katmana bu işlem yapılmaktadır. Bu işlemin ardından kalıbın üzeri vakum poşetiyle kapatılmaktadır. Bu poşet, vakuma maruz bırakıldıktan sonra kalıplanmış ürünün sertleşmesi için fırına veya otoklava koyulmakta ve kürlenme işlemine bırakılmaktadır. Bu imalat metodunda işçilik yoğun olarak kullanıldığından dolayı az sayıda imalatlar veya prototipler için tercih edilmektedir. Şekil 1.15’de ıslak el yatırma imalat metodu gösterilmektedir.



Şekil 1.15. Islak serim aşaması [32]

### 1.5.3. Vakum Poşetleme Metodu

Vakum poşetleme işleminde ürün üzerinde basınç oluşmasıyla fazla reçine temizlenmekte ve reçinenin fiberlere nüfuz etmesi basitleşmektedir. Böylece yüksek fiber reçine oranı sağlanmakta ve üründe oluşacak boşluklar en aza indirilmektedir. Kalıp vakum poşet ile kaplı olduğundan kütleme işlemi daha rahat olmaktadır. Genellikle gemi imalatı, yarış arabaları gibi yerlerde tercih edilmektedir. Şekil 1.16'da ıslak el yatırma metoduna vakumlu poşetleme sağlanması gösterilmektedir.

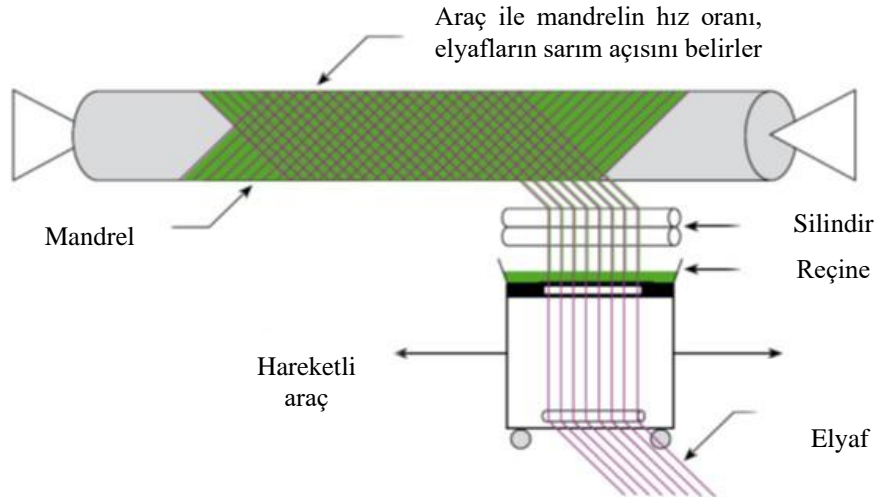


Şekil 1.16. Islak serim aşamasından sonra vakum poşetleme metodu [32]

#### 1.5.4. Filament Sarma Metodu

Filament sarım metodunda karbon, cam, aramid gibi malzemeler takviye elemanı olarak kullanılmakta, polyester, fenolik, epoksi gibi reçineler ise matris elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu metot ile içi boş daire ya da oval şeklindeki (tank, boru gibi) parçalar imal edilmektedir.

Takviye elemanı (elyaf), reçineye batırıldıktan sonra silindir şeklindeki mandrele sarılması sağlanmaktadır. Sarım açısı, mandrelin dönme ve sarım arabasının ilerleme hız oranlarının belirlenmesiyle sağlanmaktadır. Daha sonra atmosfer basıncında kür işlemi uygulanmaktadır. Parçanın yük altındaki durumuna göre sarım açılarının belirlenmesi ile yüksek mukavemete sahip parçalar imal edilmektedir. Kat kat takviye elemanının (elyaf) sarılmasıyla parça sertleşmektedir. Bu metot otomasyona bağlanmasıyla yüksek hızlı ve kaliteli parçaların seri imalatı yapılmaktadır. Şekil 1.17’de filament sarma metodu gösterilmektedir. Genel olarak silindir ve basınçlı kaplar, güç iletimini sağlayan araba şaftları, roket motorlarının kasası gibi parçalar üretilmektedir.



Şekil 1.17. Filament sarma metodu [32]

#### 1.5.5. Otoklav Metodu

Otoklav metodu yukarıda anlatılan vakumlama ile yapılan el yatırma işleminde imal edilecek parçanın sertleşmesi için fırına konulması yerine otoklava konulması ile yapılmaktadır. Otoklav silindirik şeklinde olan basınçlı ve ısı içerikli bir kaptır. Kalıplanmış parçanın kalınlığına ve kullanılan reçineye göre otoklavların basıncı, ısı ve sertleşme

zamanı değişkenlik göstermektedir. Parçanın sertleşme zamanına göre otoklavların basınç ve ısısı belirlenmektedir. Burada basınç olarak hava, CO2 veya azot gazı kullanılmaktadır. Şekil 1.18’de otoklav metodu gösterilmektedir. Vakum poşetleme ve otoklav işleminde parça üzerinde basınç oluşmasıyla hava boşlukları en aza indirilmekte ve fazla reçine temizlenmektedir. Bazı kompozit yapıya sahip uçak parçaları bu yöntemle imal edilmektedir.



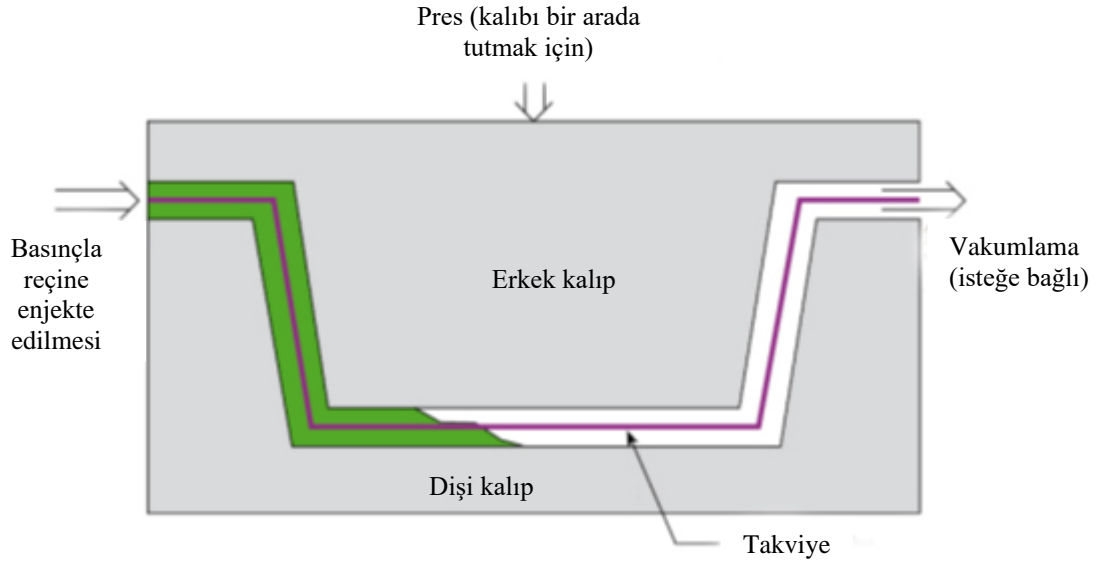
Şekil 1.18. Otoklavda torba kalıplama metodu

### 1.5.6. Reçine Transfer Kalıplama Metodu

Kapalı kalıp üretim metotlarından olan reçine transfer kalıplama metodu genellikle prepreg gibi önceden hazırlanmış kumaşlara (elyaf) yani takviye elemanlarına uygulanmaktadır. Diş kalıp üzerine yerleştirilmiş takviye elemanı, erkek kalıbın kapanması ile kalıp şeklini almaktadır. Matris elemanı olan reçine, basınç farkının oluşması ile kapalı kalıp içerisine enjekte edilmekte ve takviye elemanına emdirilmektedir. Burada oluşan hava dışarıya basınç farkının oluşturduğu vakum ile atılmaktadır. Reçinenin enjekte edilmesi en fazla 80°C sıcaklıkta olan kaplarda gerçekleşmektedir. Bu işlemlerden sonra parça kalıp ile birlikte ortam sıcaklığında veya kalıplara sıcaklık verilmesiyle kürlenme işlemine maruz bırakılmaktadır.

Reçine transfer kalıplama metodu ile parça aralarındaki boşluklar en aza indirilmekte ve elyaf/reçine oranının yüksek olduğu ürünler elde edilmektedir. Bu metot, yüksek basınca maruz kalan kompleks ve dayanımı yüksek olan fiber takviyeli kompozitlerin imalatında uygulanmaktadır. Genellikle havacılık, savunma ve otomotiv endüstrisinde küçük ve

karmaşık ürünlerin imalatında tercih edilmektedir. Bu prosesler için kurulacak olan sistemin maliyeti çok yüksek olmaktadır. Şekil 1.19’da reçine transfer kalıplama metodu şekil ile izah edilmektedir.



Şekil 1.19. Reçine transfer kalıplama metodu [32]

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dong ve ark. yaptıkları çalışmada %1 ve %2.5 karbon nanotüp içeren kompozit malzemeler üretmiştir. Bu kompozitin üretiminde epoksi ve karbon nanotüp karıştırılıp fiber kumaşa disperse edilerek oluşturulmuştur. İki farklı karbon nanotüpe sahip kompozitler karşılaştırılmıştır. SEM ile karbon nanotüp dağılımı, tabakalar arası kaymalar gözlemlenmiştir. Elektrik iletkenliği ve ILSS (tabakalar arası kayma mukavemeti) testi yapılmıştır. Gözlemlere göre TCKNT, karbon fiber kumaş üzerine daha sağlam bağlanmaktadır. Bu bağlanma ile karbon nanotüp fibere daha düzgün yayılmıştır. Düzgün dağılan karbon nanotüpler fiber kumaşa çözelti şeklinde verilmiş ve sürekli dondurarak kurutma ile sabitlenmiştir. %2,5 KNT içeren kompozitin elektrik iletkenliği diğerine göre daha iyi sonuç vermiştir. Elektrik iletkenliği %1 KNT içerende %71 artmış iken %2,5 KNT'te %558 artmıştır. Tabakalar arası kayma mukavemeti %1 KNT içerende %12 artmış fakat %2,5 KNT'te %20 azaldığı görülmüştür [33].

Ashrafi ve ark. yaptıkları çalışmada ağırlıkça %0.1 ve %0.2 oranında TCKNT, epoksi, karbon fiber laminantlarda darbe ve darbe sonrası sıkıştırma testleri, ayrıca tabakalar arası kırılma tokluğu ve tabakalar arası kırılma tokluğu testi yapılmıştır. Bu testler sonucu laminantlarda oluşan etkileri incelemek için ultrasonik Cscan ve SEM kullanılmıştır. Burada TCKNT ile ÇCKNT karşılaştırılır. TCKNT'ün deneyleri yapılırken ÇCKNT'ün değerleri daha önce yayınlanan makalelerden alınmıştır. TCKNT'ün daha düzgün yayıldığı görülmüştür. Kırılma tokluğunda, ağırlığı %0.1 olan TCKNT %13 artarken, %0.3 ÇCKNT de benzer şekilde yaklaşık %13 artmıştır. Bu da TCKNT'ün belli bir küçük yüklemelerde ÇCKNT'den daha iyi olduğunu göstermiştir. %0.1 TCKNT'lü de TCKNT'süz ile karşılaştırıldığında darbe hasarında %5 azalma, darbe sonrası sıkıştırmada gücünde %3.5 artma, kırılma tokluğunda %13 artma ve kırılma tokluğu testinde %28 artma görülmüştür. %0.2 TCKNT'lü numunelerde kırılma tokluğunda daha çok azalma görülmüş ve %19 olmuştur. Bu çalışma ile kompozitlerde TCKNTler, ÇCKNTlere göre mekanik özellikleri arttırmada daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. TCKNT epoksi içerisinde daha iyi dağılması, daha küçük çapa fakat daha yüksek en boy oranına sahip olması, yük aktarımının iyi olması ve yüksek kristallik yapısıyla mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun yanında TCKNTler bazı reçinelerde tokluğu arttırmakta bazılarında ise tokluğu azaltma gibi etkilerinin olacağı gözlemlenmiştir [34].

Siddiqui ve ark. yaptıkları çalışmada ağırlıkça %0, %0.5, %0.7 ve %1 oranında karbon nanotüp ve epoksi karışımı hazırlanmıştır. Bu dört farklı karışım ile CFRP (karbon fiber takviyeli polimerler) prepreg kompozitler üretilmiş ve bunların CFRP prepreglere etkisi ve kürlenme davranışları üzerinde durulmuştur. Karbon nanotüp oranlarının epoksinin sertleşme davranışına etkisi olmuştur. Yüzey aktifleştirici madde ile işlevselleştirilmiş karbon nanotüplerin katalitik aktivitesi ağırlıkça %0.5 oranına kadar ihmal edilebilir fakat %1 oranına geldiğinde katalitik aktivite belirginleşti. %0.5 ve %1 oranlarında karbon nanotüp içeren prepreglerin sertleşme (kür) derecesi, karbon nanotüpsüz veya düşük oranda karbon nanotüp içerenlere göre daha düşüktür. CFRP prepregler ağırlıkça %0.5 veya daha yüksek oranda karbon nanotüp içeren reçineyle üretildiğinde reçine içeriği veya prepreg kalınlığının önemli bir şekilde artmadığı belirlenmiştir. Epoksi içerisindeki karbon nanotüp oranının artmasıyla viskozite artmıştır. Fakat karbon nanotüpün işlevselleştirilmesi ve hızlı karıştırılması ile viskozite düşülmüştür [35].

Kostopoulos ve ark. yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %0.5 oranında çok cidarlı karbon nanotüp ile epoksi karıştırılarak hazırlanmıştır. Bu karışım yarı izotropik CFRP'ler ile birleştirilerek kompozit laminant numunesi üretilmiştir. Numuneler 2J, 8J, 12J, 16J ve 20J enerji seviyeleri uygulanarak darbe testine maruz bırakılmıştır. Daha sonra darbe davranışına etkisi, çarpma sonrası sıkıştırma (CAI), çarpma sonrası sıkıştırma yorulması (FCAI) testi, darbe sonrası yorulma ömrü araştırılmıştır. KNT'lerin kompozit numuneyi olumlu etkileri olmuştur. Fakat KNT içeren ve içermeyen numuneler arasında düşük darbe enerjisi ile test yapıldığında, delaminasyon alanındaki yutulmuş enerjide çok fark olmamıştır. Yüksek darbe enerjisiyle test edildiğinde KNT'ün etkisi ile daha belirgin farklar meydana gelmiştir. KNT'ler ile yüksek darbe enerjisinde hasara karşı mukavemeti artmış ve yüksek sıkıştırma gerilimine de dayanımı artmıştır. CAI'da 16J için %15'lik artma, diğer enerji değerleri için yaklaşık %12-15'lik artma olmuştur. FCAI testi ile KNT içeren numunede en az %20 yorulma ömründe artış olmuştur [36].

Soliman ve ark. yaptıkları çalışmada, karbon fiber dokuma kumaşlar üzerine epoksi ağırlığına göre %0.5 – 1 ve 1.5 oranında ÇCKNT kullanılarak güçlendirilmiştir. Bu plaka şeklindeki kompozitler düşük hızlı darbe deneyine 15 – 24 – 30 – 60 – 120 J enerjilere tabii tutulmuştur. Bu deneyde karbon nanotüplere negatif yüklü karboksilik (-COOH) grupları bağlanarak fonksiyonelleştirilmiş böylece karbon nanotüplerin dağılımı sağlanmıştır. Darbe deneyi ile plakalarda penetrasyon gözlemlenmiştir. 15 J enerjide darbenin tüm tabakalara etki etmediği, 24 J enerjide sadece epoksi tabakasına kadar etki

ettiği, 30 J enerjide tüm tabakalara etki ettiği gözlemlenmiştir. %1 ve 1.5 oranında karbon nanotüpde penetrasyon enerjisi %50 artmıştır. ÇCKNT oranı arttıkça penetrasyon sınırının altındaki hasar boyutu azalmıştır. Darbe enerjisinin artması ile penetrasyon sınırı azalmıştır. Karbon nanotüp oranı arttıkça yer değiştirmede %20 azalma görülmüş ve hasar önemli oranda azaltılmıştır. Fakat penetrasyon yer değiştirmesinde artış gözlemlenmiş ve buda gerilmeyi göstermektedir. Penetrasyon sınırının altında olan 15 J enerjide, karbon nanotüp arttıkça hasar boyutunda önemli oranda (%75) azalma görülmüştür. Penetrasyon sınırının üzerinde olan 30 J ve üzeri enerjilerde hasar boyutunda pek fark oluşmamıştır. 120 J enerji ile darbe deneyine maruz bırakılan farklı karbon nanotüp oranındaki plakalarda karbon nanotüp oranı arttıkça enerji absorbesi artmaktadır [37].

Yusuf Can Uz yaptığı doktora çalışmasında, karbon elyaf ile oluşturulmuş prepreg kumaşlar elde edilmiş ve bu prepreglere ağırlıkça %0.05 – 0.1 – 0.2 TCKNT ilavesiyle yeni kompozitler üretilmiştir. Daha iyi performansa sahip kompozitler elde etmek için incelenmiştir. TCKNT'lerin prepregler ve kompozitler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu deneyde karbon nanotüplere negatif yüklü karboksilik (-COOH) grupları bağlanarak fonksiyonelleştirilmiş böylece karbon nanotüplerin dağılımı sağlanmıştır. Üretimde vakum torbalama yöntemi kullanılmıştır. TCKNT takviyeli karbon elyaf prepregler ve TCKNT takviyesiz karbon elyaf prepreg kompozitlerin mekanik ve termo mekanik özellikleri üzerinde durulmuştur. %0.05 oranına sahip TCKNT takviyeli kompozitlerin en uygun ağırlıkta olduğu belirlenmiştir. TCKNT takviyesinin ağırlık oranı arttıkça kompozitin mekanik özelliği düşmüştür [38].

Bakis ve ark. yaptıkları çalışmada, ÇCKNT' ün epoksi reçinedeki kırılma tokluğu ve karbon fiber prepreg kumaştan üretilen plakalara etkisi incelenmiştir. Kompozit plakalara ağırlıkça %0.5 oranına kadar iyi dağılmış şekilde ÇCKNT ilave edilmiştir. Karbon nanotüp eklenmiş plakalarda epoksi, çatlak ilerlemesine iyi direnç göstermiştir. %0.5 karbon nanotüp ilavesi karbon nanotüpsüze göre %20 daha iyi tokluk değerinde olduğu incelenmiştir [39].

Sun L. ve ark. yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %1 fonksiyonelleştirilmiş poliamidoamin-0 TCKNT ile epoksi ve ağırlıkça %1 fonksiyonelleştirilmemiş TCKNT ile epoksi olmak üzere iki tür kompozit elde edilmiştir. Bu iki kompozit karşılaştırılarak TCKNT'ün mekanik özellikleri nasıl etkilediği incelenmiştir. Mekanik özelliklerden gerilme mukavemeti ve young modülü ele alınmıştır. Fonksiyonelleştirilmiş TCKNT'lerde gerilme mukavemeti %17, young modülü %27 artmıştır.

Fonksiyonelleştirilmemiş TCKNT'lerde ise gerilme mukavemeti %16, young modülü %18 artmıştır. Fonksiyonelleştirilmiş TCKNT'ler epoksi içerisinde daha düzgün dağılmış ve yapışma özelliğinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [40].

Bekyarova ve ark. yaptıkları çalışmada, negatif karboksilik grupları (-COOH) ile fonksiyonelleştirmiş TCKNT ile epoksi, karbon elyaf kullanılarak kompozit elde edilmiştir. Ağırlıkça %0.5 TCKNT ile epoksi içinde dağıtılmış ve karbon elyaf ile birleştirilerek vakum destekli reçine dağıtım kalıplama yöntemi ile kompozit oluşturulmuştur. Bu kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Kesme mukavemetinin %40 artmasıyla mekanik özelliklerin iyileştirildiği gözlenmiştir [41].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Mühendislik çalışmalarında, tasarımı yapılan ürünlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bu özelliklerin belirlenebilmesi için malzemeler mekanik testlere tabi tutulmaktadır. Kompozitler üstün mekanik özelliklerine sahip olmakta fakat kompozitlerde plastik şekil değişimi oluşmadığından darbe sırasında ve sonrasında hasarlar oluşmaktadır. Bu hasarlar matris çatlağı, matris takviye elemanı ayrılması, delaminasyon ve fiber ayrılması gibidir. Sert, kırılğan yapıda olan kompozitler havacılık, balistik, uzay alanları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Böyle ciddi alanlarda kullanılan malzemenin düşük enerjide bile deformasyona uğraması tehlike oluşturmaktadır. Bu nedenle düşük hızlı darbe deneyi ile kompozit malzemenin darbe özellikleri bilinmeli, darbeye karşı gösterilen direnç arttırılmalı ve kontrolü sağlayan çalışmalara önem verilmektedir.

Kompozit malzemeler önemli bir konu olduğundan literatürde araştırması fazlaca bulunmaktadır. Fakat karbon elyaf prepreg malzeme ve tek cidarlı karbon nanotüp (TCKNT) ile yapılan araştırmalar daha çok desteklenmesi için bu malzemelerden oluşan kompozit borular ele alındı. Bu boruların incelenmesi ile literatüre önemli çalışmalar sağlanması amaçlanmaktadır. Farklı enerjilerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi ile malzemede oluşan hasar ve gösterdiği direnç deneysel olarak yapılar aralarında karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada iki tür kompozit boru üretimi yapılmıştır. Bunlar karbon nanotüp takviyeli ve karbon nanotüp takviyesiz prepreg kompozit borulardır. Matris fazı olarak epoksi ve TCKNT karışımı kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak karbon elyaf prepreg kumaş kullanılmıştır. Prepreg kumaş yüksek elyaf oranını sağlamak için kullanılmıştır. Reçine ise iyi arayüz oluşturmak ve iyi yapışma sağlamak için kullanılmıştır. TCKNT ise daha iyi dayanıklılığı olduğu için, karbon nanotüplerin hacim yoğunluk oranları yüksek ve reçine içerisinde düzgün dağıldığı için kullanılmıştır. Bu şekilde üretimi gerçekleşen boruların darbe davranışı düşük hızda incelenmiştir. Numune olan takviyeli ve takviyesiz kompozit borular öncelikle 5J, 10J ve 15J enerjilerde darbe deneyine maruz bırakılmıştır. Deneyde elde edilen verilerle kuvvet zaman, kuvvet deplasman, enerji zaman ve enerji miktarı grafikleri çıkarılıp deneyin yorumlanması yapılmıştır. Ardından hasarın olduğu yerler gözle muayene edildikten sonra kesit olarak alınmıştır. Borudan kesit olarak alınan parçanın, mikroyapı hasarları SEM cihazında incelenmiştir.

### 3.1. Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

TCKNT takviyeli prepreg kompozit boru üretimi için takviye elemanı prepreg karbon elyaf kumaş, matris fazı ise tek cidarlı karbon nanotüp ve reçine olarak VTPDA100 (otoklav reçinesi) epoksi sistemi kullanılmıştır. Twill (2x2) dokumayla elde edilmiş bant şeklindeki karbon fiber yapıları prepreg kumaş 430 gr/m<sup>2</sup> ağırlığında ve 1000 mm genişliğindedir. Ocsial firmasının ürettiği Tuball Martix203 kodlu TCKNT kullanılmıştır. SPM firmasından reçine olarak VTPDA100 prepreg reçine sistemi tedarik edilmiştir. SPM firmasından SPM CFA 430T kodlu prepreg karbon kumaş tedarik edilmiştir. Prepreg kumaşın özellikleri Çizelge 3.1’ de verilmektedir. Karbon nanotüp özellikleri Çizelge 3.2’ de verilmektedir. Epoksi reçine sisteminin özellikleri Çizelge 3.3’ de verilmektedir.

**Çizelge 3.1.** Karbon fiber yapıları Prepreg kumaş özellikleri

Prepreg Karbon Fiber Kumaş	
Dokuma	2X2 Twill (12K atkı, 12K çözgü) (10cm’de 29 atkı, 25 çözgü)
Yoğunluk	1,8 gr/cm <sup>3</sup>
Isıl iletkenlik	20 W/mK
Çekme dayanımı	3450 – 4850 MPa
Lif çapı	5 – 8 µm
Kopma uzaması	% 1,6 – 2,2
Alansal ağırlık	430 gr/m <sup>2</sup>

**Çizelge 3.2.** TCKNT özellikleri

Tek Cidarlı Karbon Nanotüp Özellikleri	
Yüzey alanı	300 – 1500 m <sup>2</sup> /g (kumaş halinde)
Parçacık boyutu	1,2 – 2,2 nm
Parçacık şekli	Uzun tüpler
En / boy oranı	2000 – 10000:1
Kristallik	Amorf
Kaynama noktası	278°C
Çekme Dayanımı	50- 500 GPa
Elastisite Modülü	~1 TPa
Kırılmadaki % Uzama	5,8
Yoğunluk	1,3 – 1,5 g/cm <sup>3</sup>
Elektriksel İletkenlik	~10 <sup>6</sup> S/m
Isıl Karalılık (havada)	>700 °C

Çizelge 3.3. Epoksi Reçine özellikleri

VTPDA100 Epoksi reçine	
Kürleme sıcaklığı	90 – 130°C
Raf ömrü oda sıc.	2 ay
Raf ömrü dondurucuda (-18°C)	12 ay
Yoğunluk	1,1 – 1,2 g/cm <sup>3</sup>
Viskozite	1200 – 1400 MPa.s (25° C)
Eğilme mukavemeti	100 – 135 MPa
Eğilme mukavemetinde uzama %	6,4
Çekme mukavemeti	70 – 75 MPa

### 3.2. Numune Üretimi

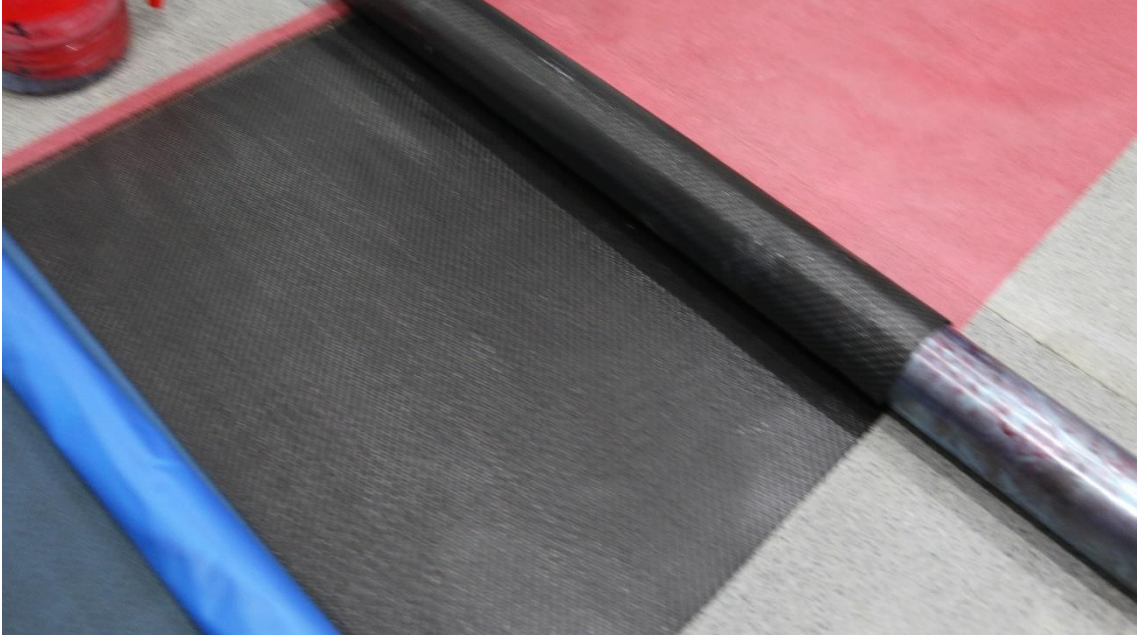
Bu çalışmada iki tür kompozit boru üretimi yapılmıştır. Bunlar karbon nanotüp takviyeli ve karbon nanotüp takviyesiz prepreg kompozit borulardır.

#### 3.2.1. KNT Takviyeli Prepreg Kompozit Boru Üretimi

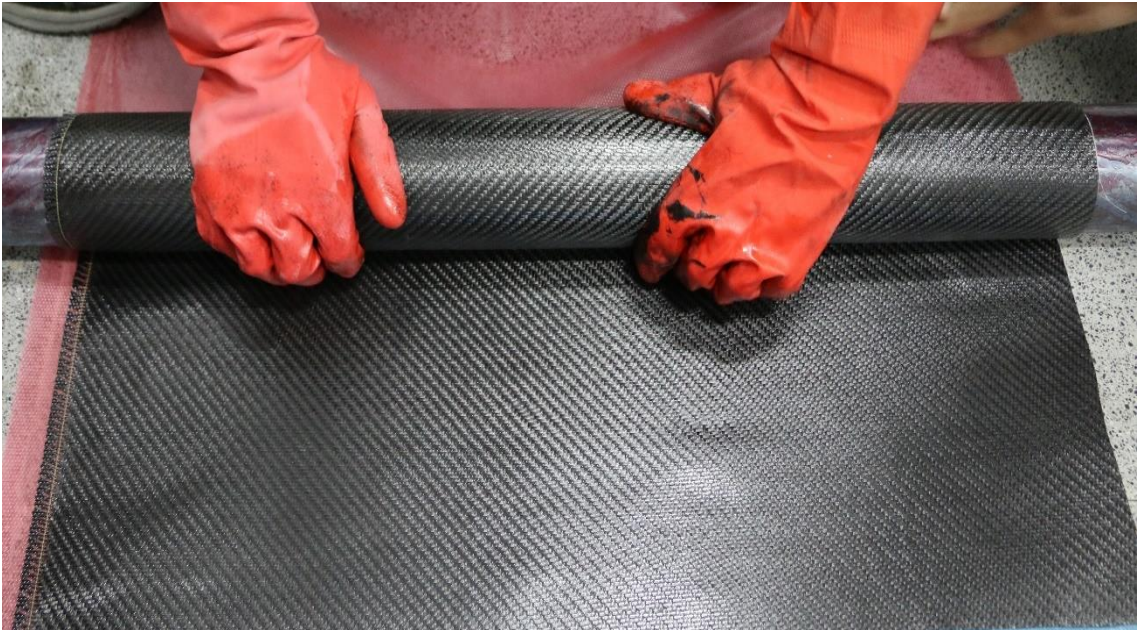
Boru üretim aşamaları öncelikle prepreg kumaşların serilmesi ile başlamaktadır. Hazır halde alınmış olan karbon elyafı prepreg kumaş dondurucuda saklanmıştır. Prepreg kumaş dondurucudan çıkarılıp üretimin yapılacağı ortamda 10 dakika bekletilmiş ve serilmiştir. Daha sonra üzerinde sarım yapılacak olan çelik boru şeklindeki mandrel ısıtılmış ve numunenin rahat çıkabilmesi için üzerine kalıp ayırıcı sürülmüştür. Epoksi ve ağırlıkça %0,3 oranında TCKNT'ün homojen karışması için öncelikle mekanik karıştırma daha sonra fiziksel karıştırma yöntemi olan ultrasonik karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karıştırma işleminden önce TCKNT toz halinde değilde prepreg halinde temin edildiği için karbon nanotüp etil alkol içerisinde inceltip daha sonra karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ultrasonik karıştırma işleminde, sıcaklığın artışı epoksinin ısınmasını böylece viskozitesinin artmasına sebep olur ve karbon nanotüplerin kısılmasına neden olur. Sıcaklığın artmaması için öncelikle 15 dakika mekanik karıştırma daha sonra 15'er dakika üç kez soğutma işlemi gerçekleştirilerek süren ultrasonik karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık kontrolünü sağlamak için üç kez sıcaklık ölçülmüştür.

430 gr/m<sup>2</sup> ağırlığındaki prepreg karbon elyaf kumaşa el yatırma yöntemiyle epoksi/karbon nanotüp karışımı sürülmüştür. Daha sonra karışım sürülmüş prepreg

kumaş, 72 mm çapa sahip mandrele elle sarım yapılarak kumaşın son aralığı  $3 \pm 0,5$  mm olacak şekilde 9 kat sarılmıştır.



şekil 3.1. Prepreg kumaşın serimi

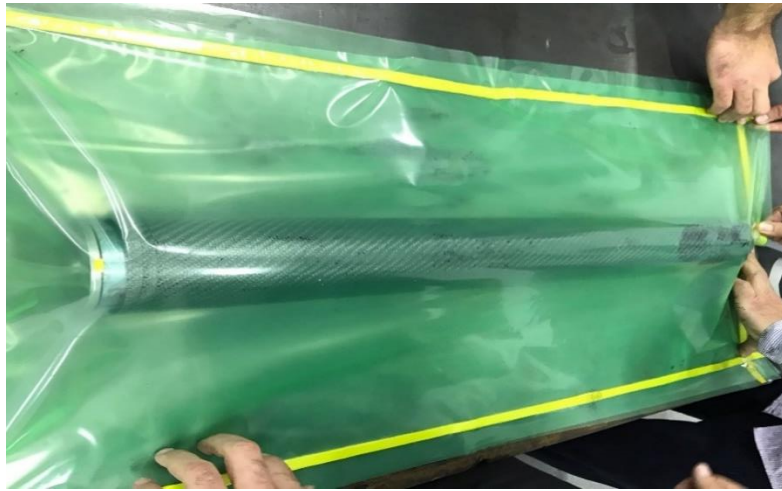


şekil 3.2. Mandrel ile yapılan elle sarım işlemi



Şekil 3.3. Ultrasonik karıştırıcı

Manderel üzerine sarılmış kompozit boru, vakumlama yöntemiyle bir torba ile sarılır. Torba üzerine vakum yolu koyulmuştur ve içerisindeki hava boşluklarını azaltmak için 1 atm basınçlı vakuma takılmıştır. Torba içerisindeki basıncı vakumlama işlemi 20 dakika sürmüştür. Daha sonra vakumlanmış şekilde otoklav işlemine tabi tutulmuştur. Otoklav fırınına koyularak sıcaklığı 85°C, basıncı ise 6 bar azot gazı olarak ayarlanmış ve 2 saat kürleme işleminde beklemiştir. Kürleme işlemi bittikten sonra otoklavda soğuması beklenmiş ve 24 saat sürmüştür. Soğutma işlemi doğal olarak gerçekleşmiştir. Mandrel kalıbından numune ürünümüz olan karbon nanotüp takviyeli prepreg kompozit borularımız çıkartılarak üretimi sağlanmıştır.



Şekil 3.4. Vakum torbasına katılan kompozit boru



Şekil 3.5. Otoklav firmı



Şekil 3.6. TCKNT takviyeli kompozit boru

### 3.2.2. KNT Takviyesiz Prepreg Kompozit Boru Üretimi

Boru üretim aşamaları öncelikle prepreg kumaşların serilmesi ile başlamaktadır. Hazır halde alınmış olan karbon elyaflı prepreg kumaş dondurucuda saklanmıştır. Prepreg

kumaş dondurucudan çıkarılıp üretimin yapılacağı ortamda 10 dakika bekletilmiş ve serilmiştir. Daha sonra üzerinde sarım yapılacak olan çelik boru şeklindeki mandrel ısıtılmış ve numunenin rahat çıkabilmesi için üzerine kalıp ayırıcı sürülmüştür. 430 gr/m<sup>2</sup> ağırlığındaki prepreg karbon elyaf kumaşa el yatırma yöntemiyle epoksi sürülmüştür. Daha sonra epoksi sürülmüş prepreg kumaş, 72 mm çapa sahip mandrelle elle sarım yapılarak kumaşın son aralığı  $3 \pm 0,5$  mm olacak şekilde 9 kat sarılmıştır.

Manderel üzerine sarılmış kompozit boru, vakumlama yöntemiyle bir torba ile sarılır. Torba üzerine vakum yolu koyulmuştur ve içerisindeki hava boşluklarını azaltmak için 1 atm basınçlı vakuma takılmıştır. Torba içerisindeki basıncı vakumlama işlemi 20 dakika sürmüştür. Daha sonra vakumlanmış şekilde otoklav işlemine tabi tutulmuştur. Otoklav fırınına koyularak sıcaklığı 85°C, basıncı ise 6 bar azot gazı olarak ayarlanmış ve 2 saat kürleme işleminde beklemiştir. Kürleme işlemi bittikten sonra otoklavda soğuması beklenmiş ve 24 saat sürmüştür. Soğutma işlemi doğal olarak gerçekleşmiştir. Mandrel kalıbından numune ürünümüz olan karbon nanotüp takviyesiz prepreg kompozit borularımız çıkartılarak üretimi sağlanmıştır.



Şekil 3.7. TCKNT takviyesiz kompozit boru

### 3.3. Deney Numunelerinin Boyutlandırılması

Düşük hızlı darbe deneyi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) için deney numuneleri üretilmiştir. Temin edilen prepreg kumaşın genişliği 1000 mm uzunluğunda, mandrelin çapı ise 72 mm'dir. Bu sebeple üretilen kompozit borular 1000 mm

uzunluğuna, 72 mm iç çapına,  $78 \pm 0,5$  mm dış çapına sahiptir. Üretilen her bir borudan 300 mm uzunluğunda üç parça olacak şekilde numune elde edilmiştir. Boruların kesimi elektrikli testere ile gerçekleşmiştir. şekil 3.8 ve 3.9'da kompozit borular gösterilmektedir.



şekil 3.8. TCKNT takviyeli numune



şekil 3.9. TCKNT takviyesiz numune

Darbe deneyi uygulanmış borulardan, vurucunun çapı 24 mm olduğu için darbenin oluştuğu alan 30 x 30 mm ölçüğünde olacak şekilde kesilmiştir. SEM analizine gönderilecek numunelerin cihaza yerleşmesi için bu boyutlar oluşturulmuştur. Elde edilen numunelerin kesiti inceleneceğinden darbenin uygulandığı alan tam ortadan olacak şekilde 15 x 30 mm boyutunda kesilmiştir. Şekil 3.10'da numune gösterilmektedir.

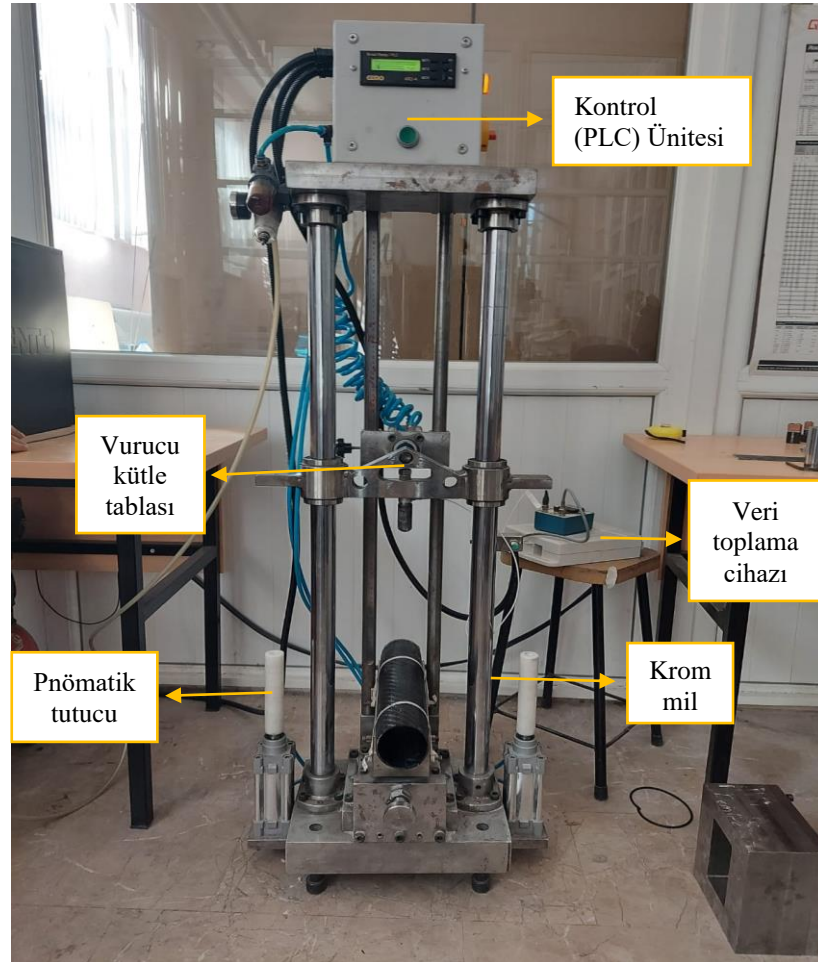


Şekil 3.10. 15x30 mm boyutundaki SEM analizine gönderilmiş numuneler

### 3.4. Düşük Hızlı Darbe Deneyi

KNT takviyeli ve takviyesiz prepreg kompozit boruların düşük hızlı darbeye karşı gösterdikleri dinamik özellikleri belirlemek için bu deney kullanılmıştır. Kompozit malzemelerde dışarıdan alınan darbe düşük hızda olmasına rağmen hasara yol açmaktadır. Alınan darbe sonucunda kompozit malzeme matris çatlağı, fiber hasarı, tabaka ayrılması (delaminasyon) gibi hasarlar oluşmaktadır. Bu hasarlar mukavemeti ciddi bir şekilde düşürmekte ve rijitliği de azaltmaktadır. Fakat rijitlikte azalma düşük olduğundan çoğunlukla ihmal edilebilmektedir. Metal ve metal içerikli malzemeler düşük hızda darbe aldıklarında herhangi bir hasar oluşmadan malzeme kullanılmaktadır. Çünkü metaller elastik ve plastik şekil değişimi göstermekte ve enerji absorbe edilmektedir. Kompozit malzemelerde plastik şekil değişimi yoktur. Kompozit malzemeler uzay ve havacılık, balistik gibi önemli yerlerde kullanıldığından darbe özelliklerinin bilinip darbeye olan direncinin artırılması sağlanmalıdır. Bu malzemelerin hasara karşı dirençleri darbe deneyi ile belli olmaktadır. Kompozit malzemelerin bu hassasiyetinden

dolayı ürettiğimiz numunenin darbeye olan direncini ve darbe etkisinin bu deney ile araştırmaktayız.

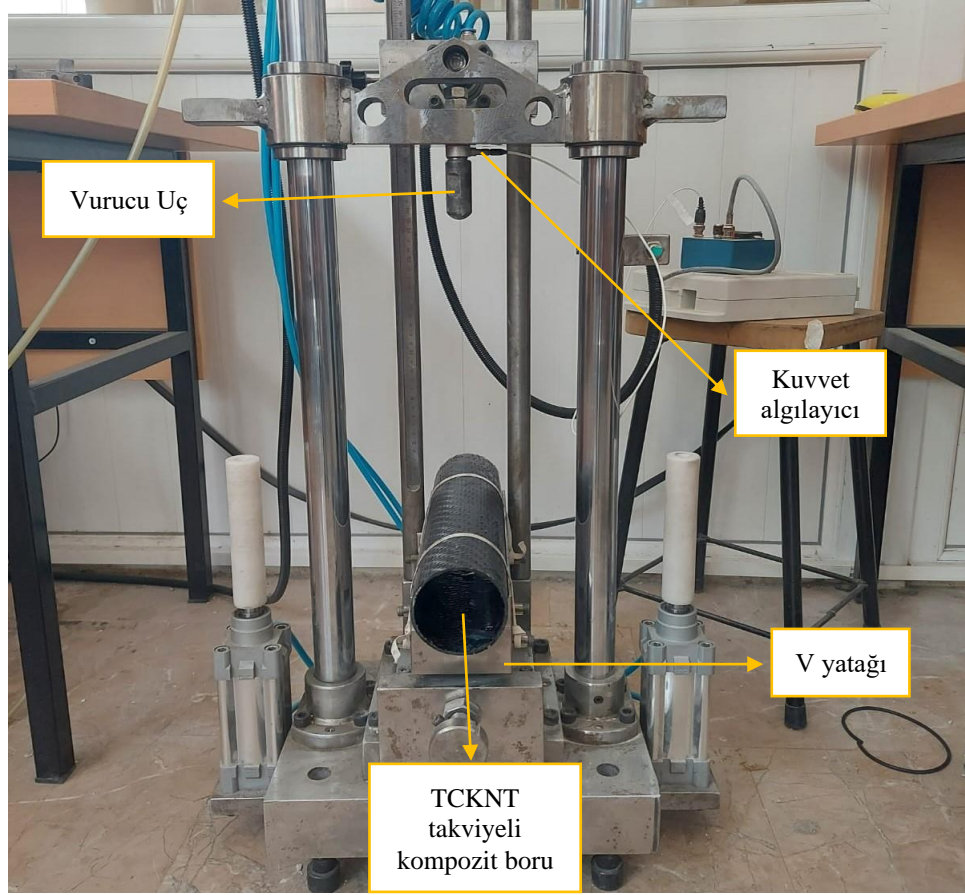


**Şekil 3.11.** Düşük Hızlı Darbe Deney Düzenegi

Deneyde üniversal darbe test cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ile istenilen darbe enerjileri ve hızları baz alınarak deney yapılmaktadır. Test düzeneğinde genel olarak iki mil arasında vurucu uç, V yatağı ve elektronik kontrol ünitesi bulunmaktadır.

Krom ile kaplı olan millere vurucu uç tablası bağlıdır. Vurucu ucun düşey hareketini sağlamak ve sürtünmeyi en aza indirmek için tabla millere ring yatak sistemi ile bağlıdır. Deney esnasında vurucu ucun, deney numunesine tekrarlı vuruş yapmaması için pnömatik piston sistemi bulunmaktadır. Vurucu uç yarım küre şeklinde 24 mm çapında ve 5,6 kg ağırlığındadır. Deney numunesi boru şeklinde olduğundan test düzeneğinin alt tablası V yatağı şeklindedir. Vurucu uç, tablaya bağlı ve aralarında kuvvet algılayıcı bulunmaktadır. Elektronik kontrol ünitesine, kuvvet algılayıcısından alınan

sinyaller ileilmekte ve bu ünite ile bilgisayara darbe verileri aktarılmaktadır. Darbe deneyi en fazla 1000 mm yükseklikten yapılmaktadır. Darbe deney düzeneği 8,8 kN kapasitededir.



Şekil 3.12. Düşük Hızlı Darbe Deney Düzeneği

Deney 5 J, 10 J ve 15 J enerji ile yapılmıştır. Karbon nanotüp takviyeli ve karbon nanotüp takviyesiz borular olmak üzere her bir darbe enerjisi için üç vurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Toplamda 18 vurma işlemi yapılmış ve üç farklı darbe enerjisinin her biri için yapılan üç vurma işleminden en büyük olan kuvvetler ve bunların etkileri ele alınmıştır. Deney numunesi V yatağına iki ucu sabitlenecek şekilde bağlanmıştır. Daha sonra vurucu uç darbe enerjisine göre belirlenen yüksekliğe çıkarılmıştır. Enerji, yükseklik ile değişkenlik gösterdiğinden istenilen darbe enerjisine göre yükseklik ayarlanabilmektedir. Serbest düşme ile yapılan deneyin darbe enerjisi, potansiyel enerji ile bulunmaktadır. Bilgisayardan deneyi başlatmakla vurucu uc numuneye çarpmıştır. Tekrarlı vuruş olmaması için pnömomatik piston sistemi devreye girmiştir. Signal Express

yazılımı kullanılarak darbenin başlangıcından sonuna kadar kuvvetin zamana göre değişimi sayısal veri ve grafik olarak elde edilmiştir.

Serbest düşme ile yapılan deney enerjisi, potansiyel enerji ile bulunmaktadır.

$E = m \cdot g \cdot h$  (J) formülü ile yükseklik belirlenmiştir.

m: kütle

g: yerçekimi ivmesi

h: yükseklik

Numuneye çarpma işlemi gerçekleştikten sonra potansiyel enerji kinetik enerji birbirine eşitlenerek hız bulunur.

$$mgh = \frac{1}{2}mV^2$$

$V = \sqrt{2gh}$  (m/s) formülü ile çarpma hızı hesaplanmıştır.

5 J enerji için 91,1 mm yükseklikten ağırlık düşürülmüş ve hızı 1,34 m/s olarak hesaplanmıştır. 10 J için 182,2 mm yükseklikten ağırlık düşürülmüş ve hızı 1,89 m/s olarak hesaplanmıştır. 15 J için 273,3 mm yükseklikten ağırlık düşürülmüş ve hızı 2,31 m/s olarak hesaplanmıştır.

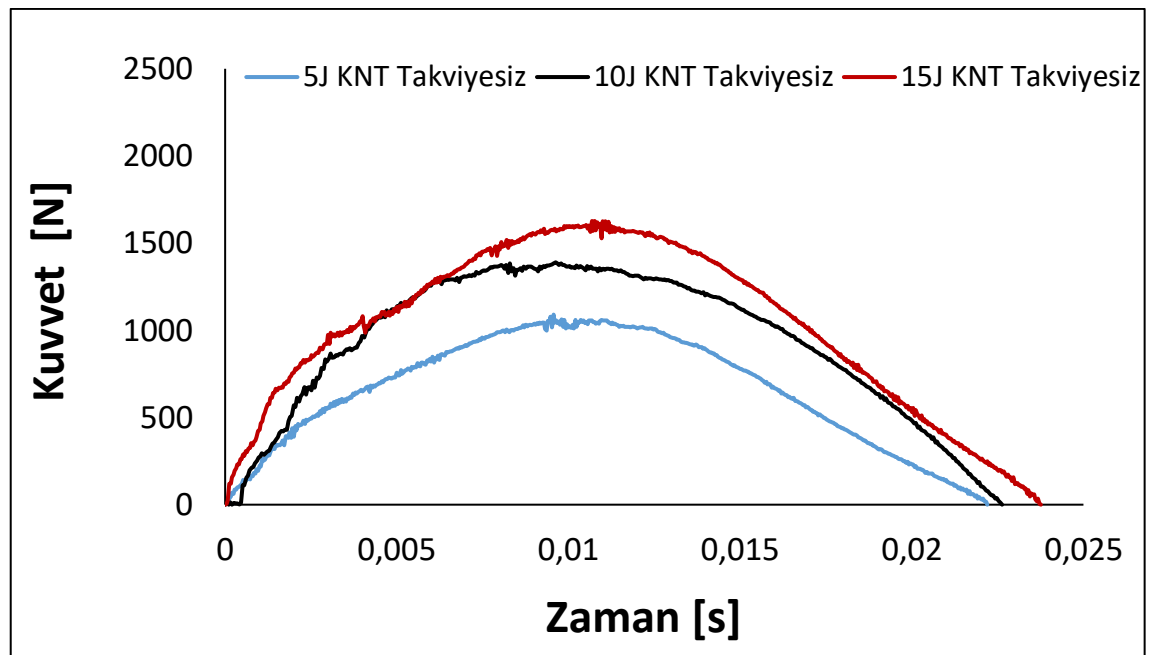
## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1. TCKNT Takviyeli ve Takviyesiz Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları

Elle yatırma, vakum poşetleme ve otoklav metoduyla üretilen, 9 kat karbon elyaf prepreg kumaş ile sarım yapılan tek cidarlı karbon nanotüp takviyeli ve takviyesiz kompozit borulara 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerjileri uygulanmıştır. Her darbe enerji seviyesi için 3 defa farklı numunelere vuruş yapılmış ve ortalaması alınarak veriler grafikte oluşturulmuştur.

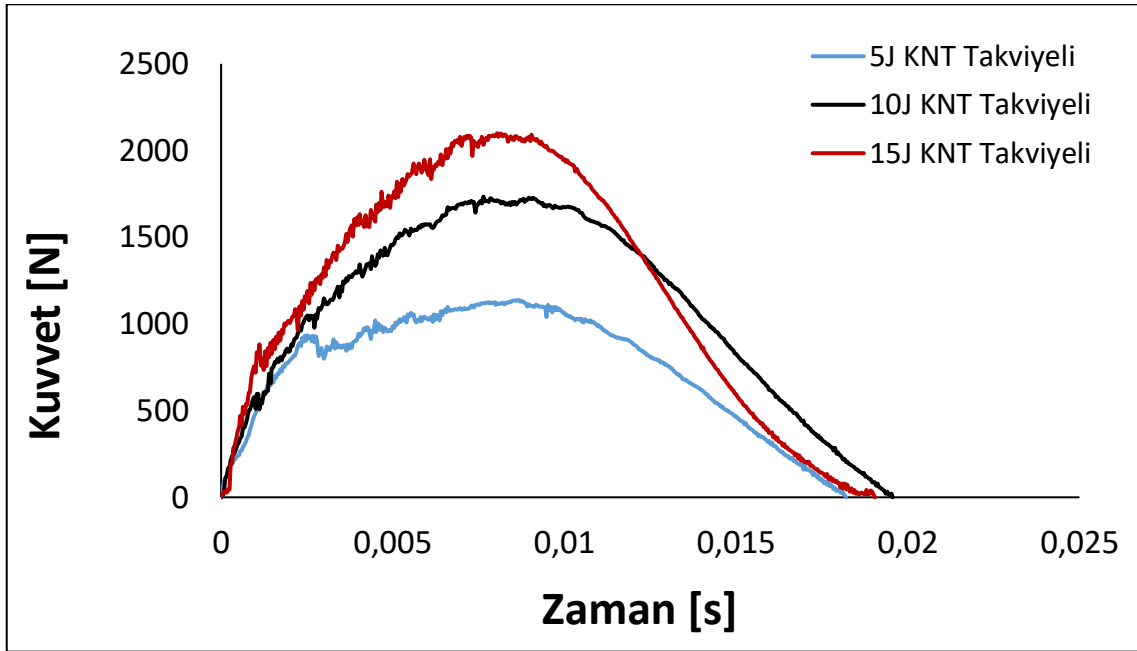
#### 4.1.1. 5J, 10J ve 15J Darbe Enerjileri İçin Kuvvet-Zaman Değişimi

TCKNT takviyeli ve takviyesiz kompozit numunelerin farklı enerji seviyelerinin temas etmesiyle başlayan kuvvet-zaman değişimi aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Kompozit borulara uygulanan darbenin dinamik davranışlarını belirlemek için bu eğrilerden yararlanılmıştır.



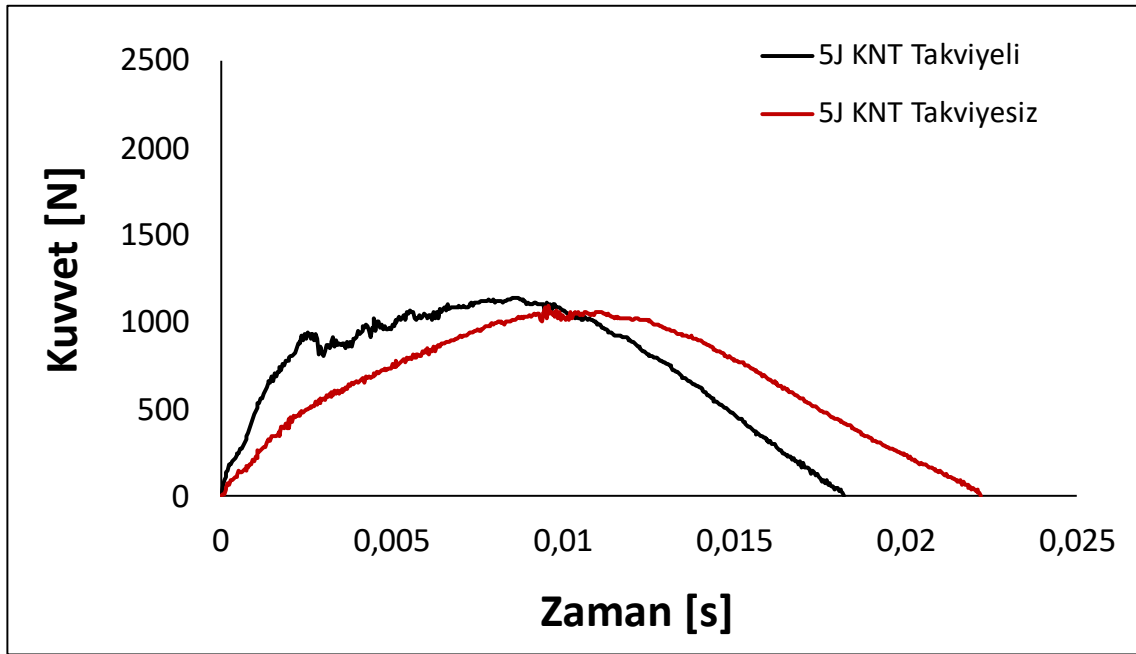
Şekil 4.1. KNT takviyesiz numunelerin 5-10-15 J darbe enerji grafiği

Şekil 4.1’de elde edilen grafikler ile KNT takviyesiz numuneye uygulanmış farklı darbe enerjilerinden meydana gelen kuvvetlerin daha net görülebilmesi için gruplandırılmıştır. Darbe enerjilerinin artmasıyla kuvvette de artış olduğu görülmüştür. 5J, 10J, 15J darbe enerjisinin uygulanmasıyla KNT takviyesiz numunede sırasıyla en yüksek 1090 N, 1390 N, 1627 N temas kuvvete ulaşılmıştır.

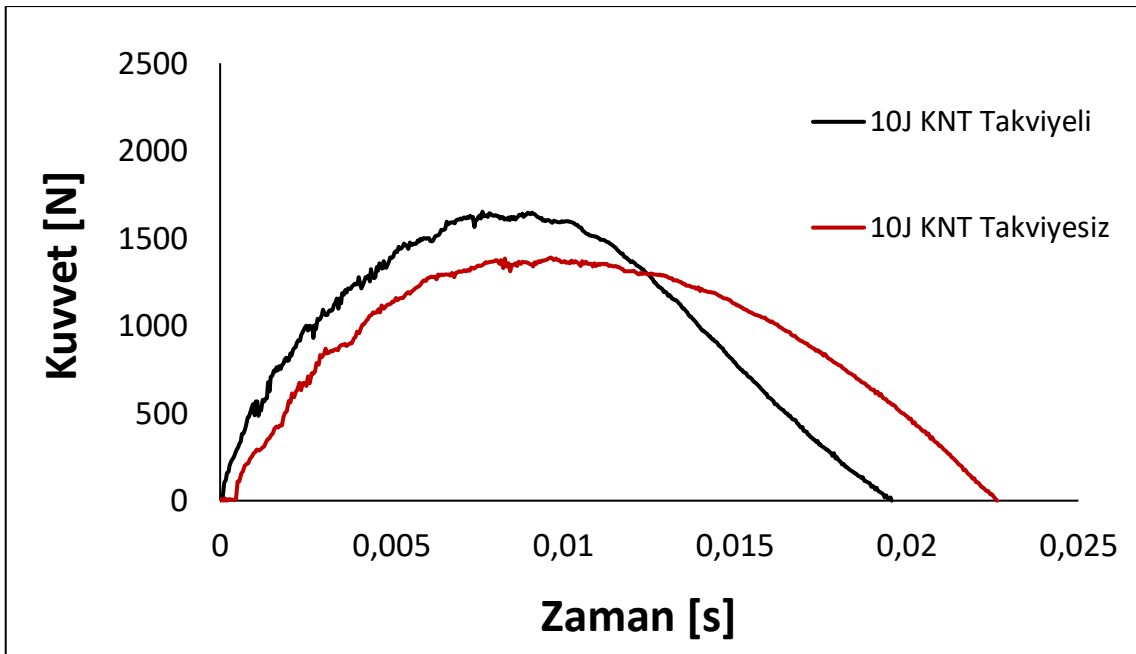


Şekil 4.2. KNT takviyeli numunelerin 5-10-15 J darbe enerji grafiği

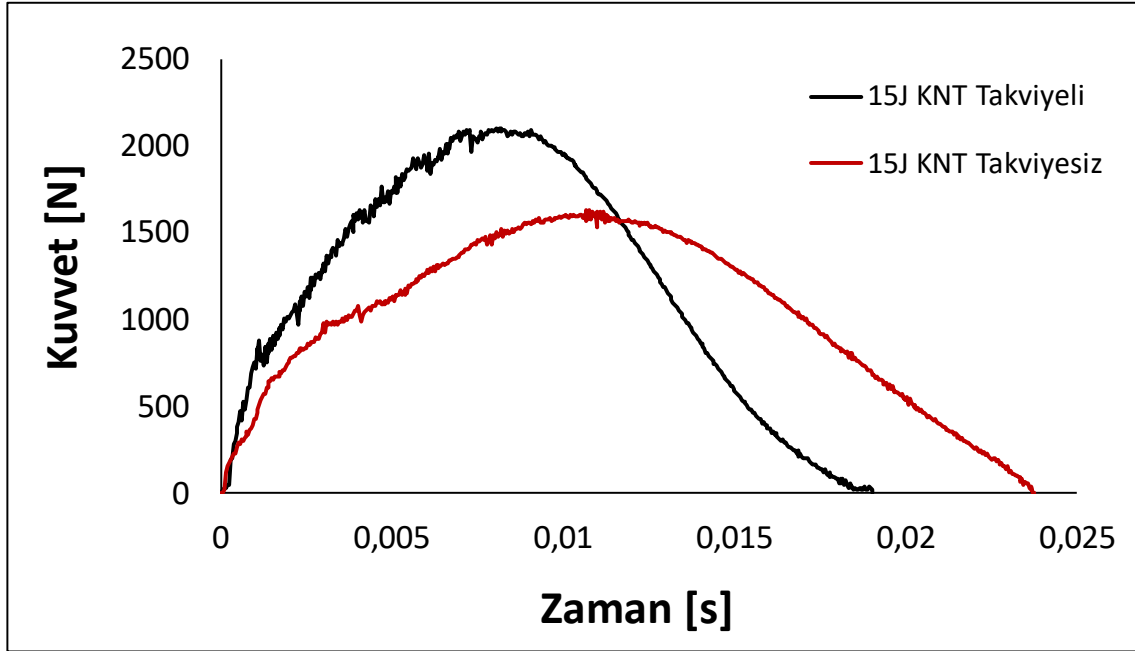
Şekil 4.2’de elde edilen grafikler ile 5 J, 10J, 15J darbe enerjisinin uygulanmasıyla KNT takviyeli numunede sırasıyla en yüksek 1137 N, 1652 N, 2100 N temas kuvvete ulaşılmıştır. Darbe enerjilerinin artmasıyla uygulanan kuvvette de artış olduğu görülmüştür. Fakat tüm enerjilerde KNT takviyeli numunelere uygulanan maksimum kuvvetin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 5 J darbe enerji grafiği



Şekil 4.4. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 10 J darbe enerji grafiği



Şekil 4.5. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 15 J darbe enerji grafiği

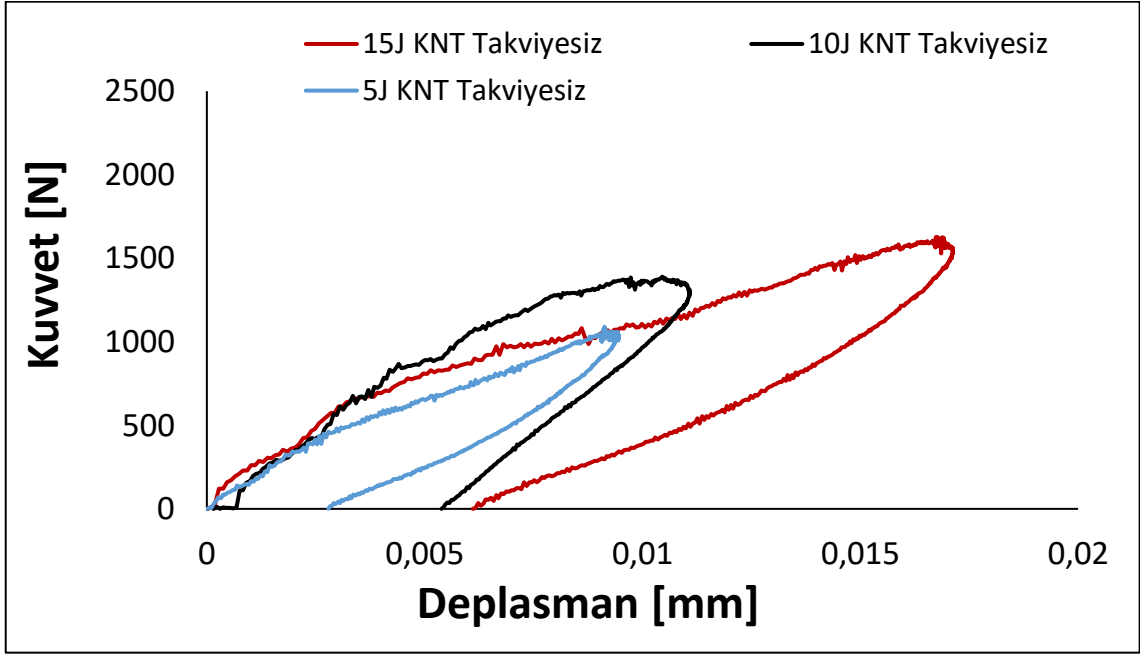
KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin farklı enerji seviyelerindeki darbe davranışlarını etkileyen kuvvet zaman grafiği Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5’de gösterilmiştir. KNT takviyeli numunelerin maksimum kuvvetleri takviyesizlere göre daha yüksek çıkmıştır. Matris malzemesi olan epoksi içerisine KNT katılmasıyla kompozit rijitlikte artma meydana gelmiştir [42]. Bundan dolayı maksimum kuvvetlerde artış daha fazladır.

#### 4.1.2. 5J, 10J ve 15J Darbe Enerjileri İçin Kuvvet-Deplasman Değişimi

TCKNT takviyeli ve takviyesiz kompozit numunelerin 5J, 10J, 15J enerji seviyelerinin temas etmesiyle başlayan kuvvet-deplasman değişimi grafik olarak verilmiştir. Kuvvet deplasman grafiği, numuneye uygulanan darbenin dinamik davranışını belirlenmede kullanılan eğrilerden bir diğeridir.

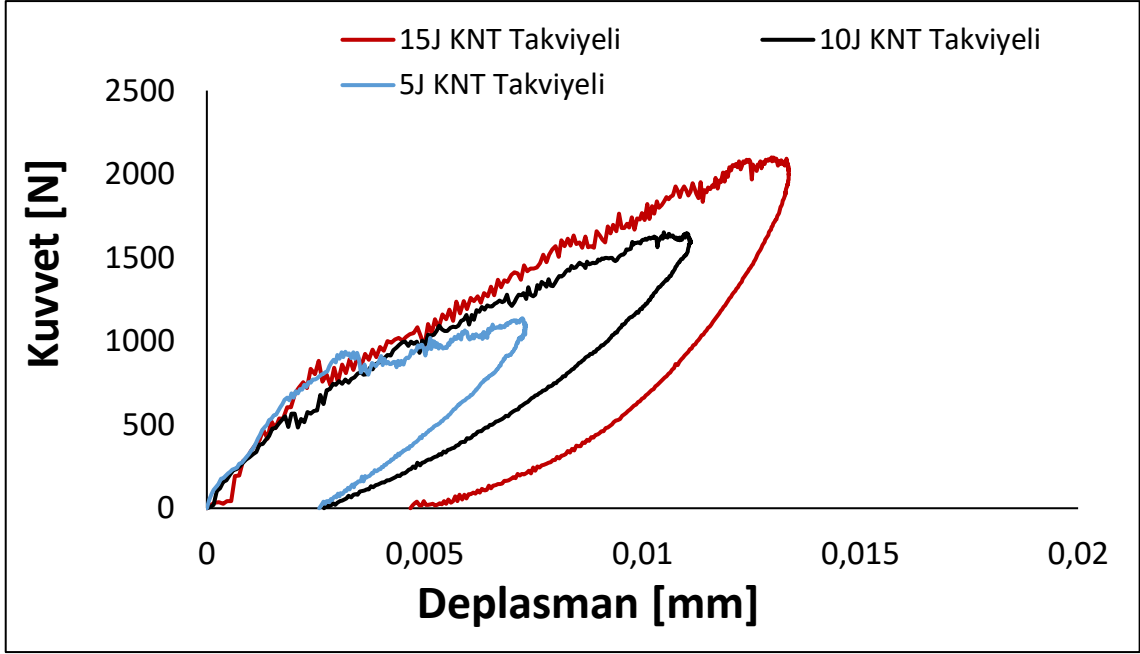
Vurucu ucun darbe numunesine değmesiyle deplasman başlar ve maksimum değere ulaşmaya kadar devam etmektedir. Maksimum kuvvet değerine ulaşınca maksimum deplasman değeri elde edilmektedir. Numunenin, darbe kuvvetine karşı gösterdiği direnç eğilme rijitliğini vermektedir. Kuvvet deplasman grafiğinde artmanın olduğu eğrideki eğim, eğilme rijitliğini vermektedir. Numunedeki hasarları eğilme rijitliğindeki eğim değişimleri vermektedir [43]. Kuvvet deplasman grafiğinde artmanın

olduğu eğride kuvvet belirli bir değere geldiğinde numunede hasar oluşmasıyla eğilme rijitliğindeki ani bir düşüş görülmektedir [44].



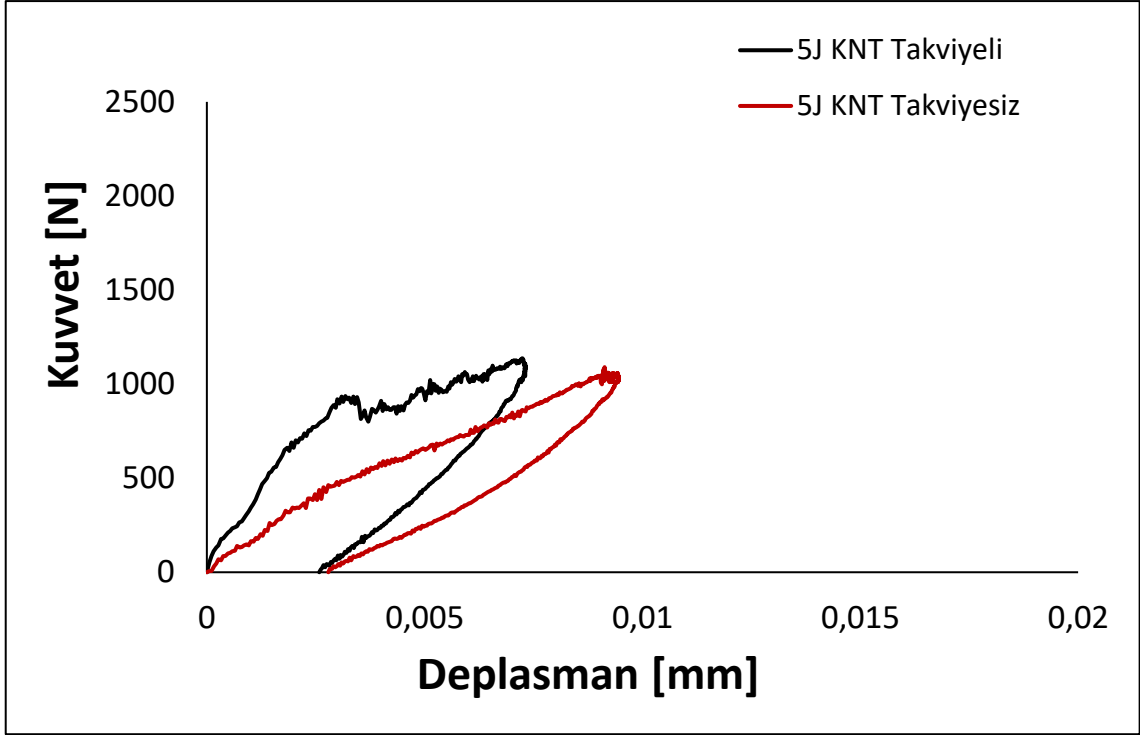
Şekil 4.6. KNT takviyesiz numunelerin 5-10-15 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği

Şekil 4.6’da elde edilen grafikler ile KNT takviyesiz numuneye uygulanmış farklı darbe enerjilerinden meydana gelen kuvvet deplasman eğrilerinin daha net görülebilmesi için gruplandırılmıştır. 5 J, 10J, 15J darbe enerjisinin uygulanmasıyla KNT takviyesiz numunede sırasıyla 0,00945 mm, 0,0122 mm, 0,0171 mm deplasmana rastlanmıştır. Darbe enerjilerinin artmasıyla kuvvette artış olduğu ve buna bağlı olarak deplasman miktarında da artış görülmüştür.

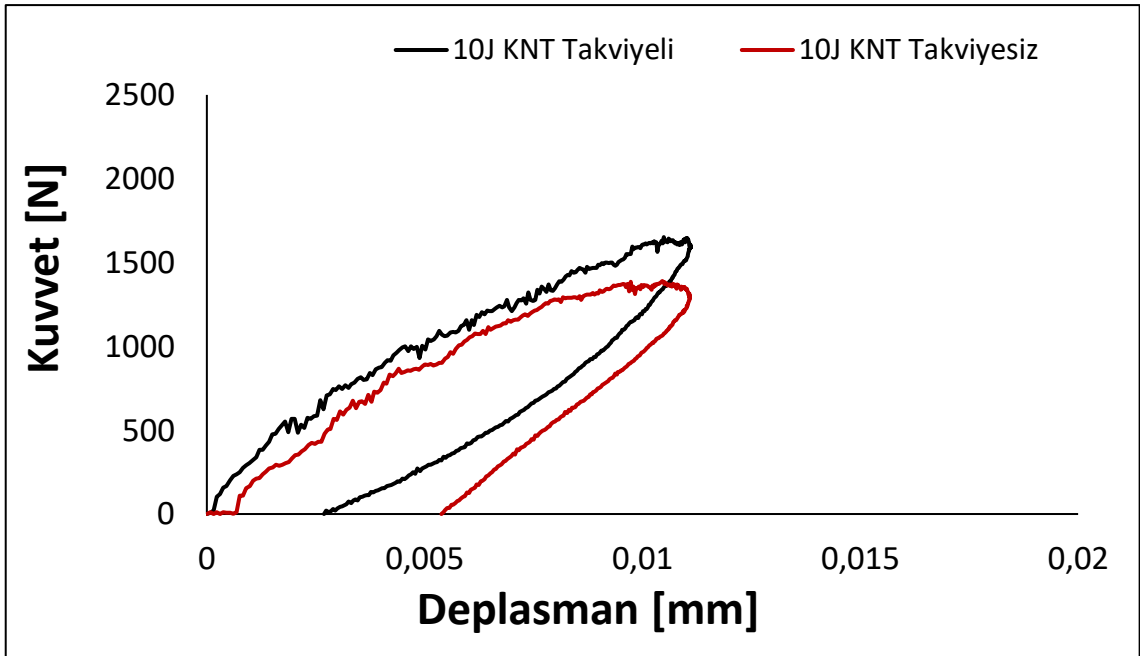


Şekil 4.7. KNT takviyeli numunelerin 5-10-15 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği

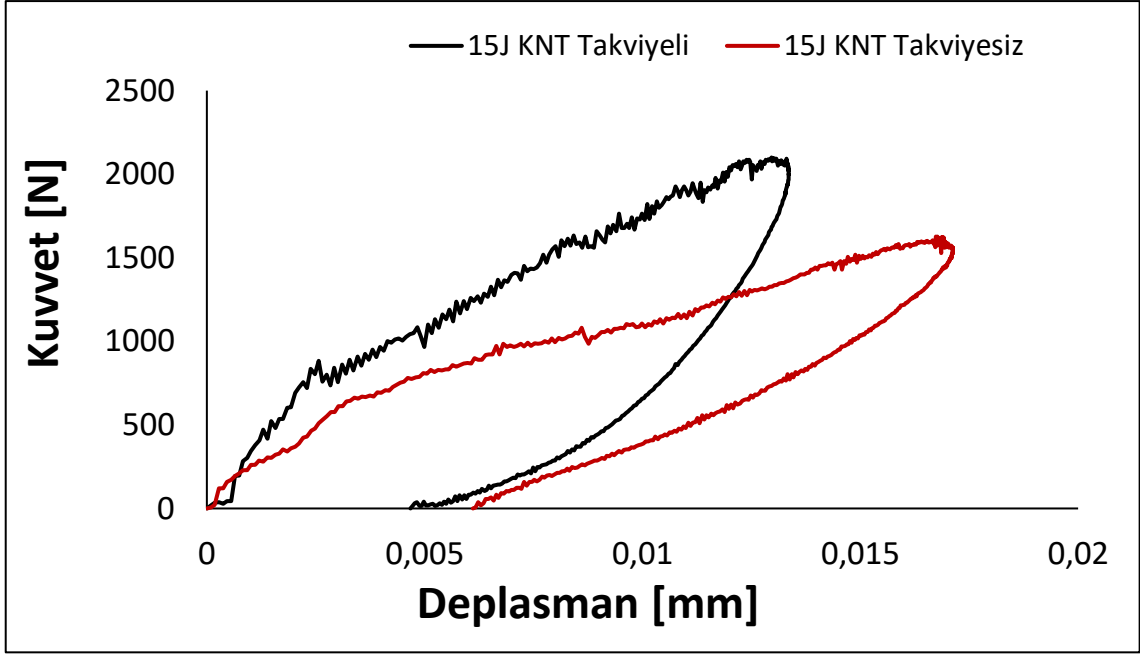
Şekil 4.7’de elde edilen grafikler ile 5 J, 10J, 15J darbe enerjisinin uygulanmasıyla KNT takviyeli numunede sırasıyla 0,0073 mm, 0,0111mm, 0,0134 mm deplasmana rastlanmıştır. Artan darbe enerjisiyle KNT takviyeli numunelerin kendi aralarında karşılaştırılmasında eğilme rijitliğinde pek fazla değişim olmadığı görülmüştür. Eğilme rijitliği, artan eğrinin eğiminden bulunmakta ve eğimin artmasıyla artmaktadır. Fakat artan darbe enerjisiyle absorbe edilen enerji miktarı artmıştır. Kuvvet deplasman grafiğinin altındaki alan numunede absorbe edilen enerjiyi yani yapılan işi vermektedir [43].



Şekil 4.8. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 5 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 4.9. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 10 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği

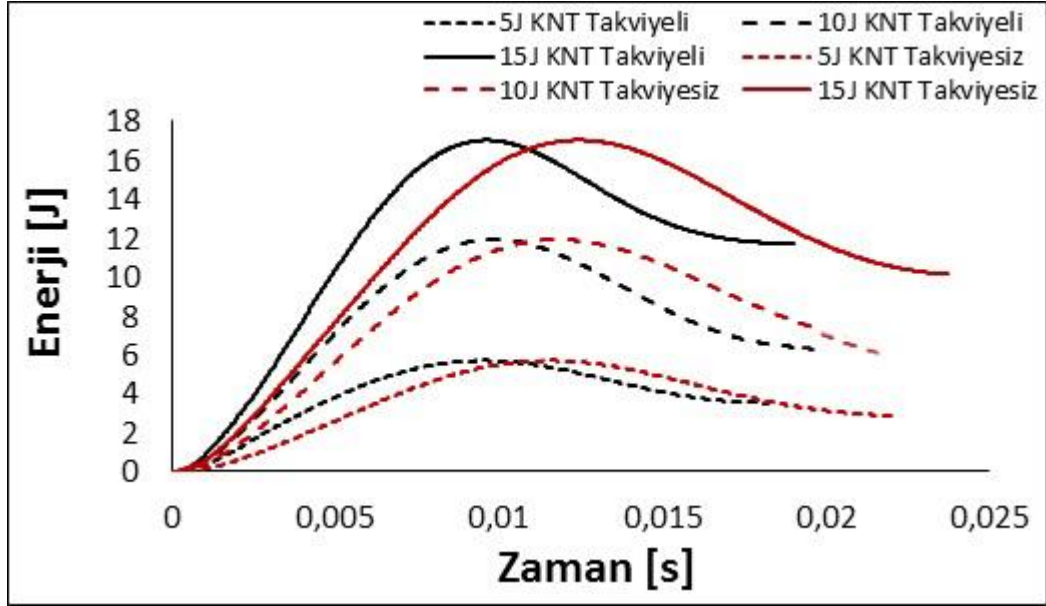


Şekil 4.10. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 15 J darbe enerjisindeki kuvvet-deplasman grafiği

KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin farklı enerji seviyelerindeki darbe davranışlarını etkileyen kuvvet deplasman grafiği Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da gösterilmiştir. Şekillere bakıldığında KNT takviyeli numunenin grafikteki eğimi daha fazla olduğundan eğilme rijitliği de daha fazla olmuştur. Epoksi içerisine karbon nanotüp katılmasıyla numunede eğilme rijitliğinin arttığı grafikte gösterilmiştir. Artan darbe enerjisiyle KNT takviyesiz numunede deplasman miktarının daha fazla arttığı görülmüştür. Maksimum deplasman miktarı maksimum kuvvetin olduğu yerde görülmüştür.

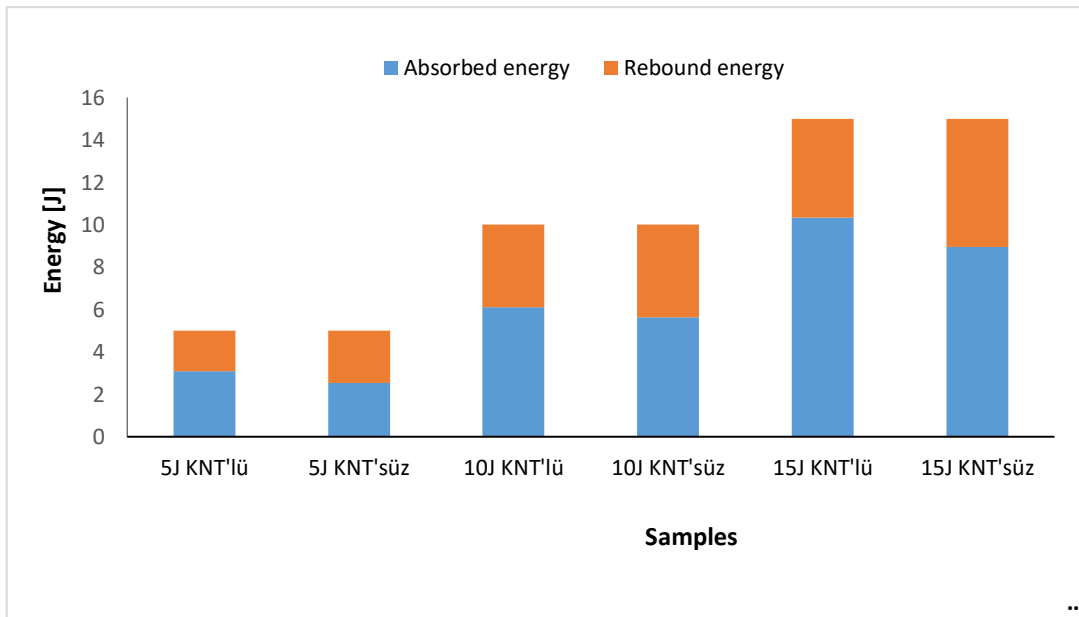
#### 4.1.3. 5J, 10J ve 15J Darbe Enerjileri İçin Enerji-Zaman Değişimi

Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da elde edilen kuvvet deplasman grafiğinin altında kalan alan ile enerji zaman grafikleri elde edilmiştir. Kuvvet zaman grafiğinin altında kalan alan absorbe edilen enerji miktarını vermektedir. Numuneye uygulanan darbe enerjisinin hepsi absorbe edilen enerji değildir. Absorbe edilen enerji numune tarafından yutulur, geri seken enerji ise vurucu ucun yani darbenin geri çekilmesini sağlayan enerjidir.



Şekil 4.11. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 5-10-15 J darbe enerjisindeki Enerji-Zaman grafiği

Şekil 4.11'de enerji zaman grafiğinde görüldüğü gibi artan darbe enerjisiyle absorbe edilen enerji miktarı da artmıştır. KNT takviyeli numunelerde maksimum kuvvet daha fazla olduğundan absorbe edilen enerji daha fazla olmuştur. Bu nedenle eğride daha hızlı azalma meydana gelmiştir. KNT takviyesiz eğride ise azalma daha yavaş gerçekleşmiştir. Burada absorbe edilen enerjinin daha az olduğu ve vurucunun geri sekmesinin daha yavaş bir şekilde gerçekleştiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.12. KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin 5-10-15 J darbe enerjisindeki enerji dağılım miktarı

Şekil 4.12’de enerji dağılım grafiğinde de görüldüğü gibi 5J, 10J, 15J uygulanan darbe enerjisinde KNT takviyeli kompozit numunelerde absorbe edilen enerji miktarı sırasıyla 3,1 J – 6,11 J – 10,33 J ve geri seken enerji miktarı ise sırasıyla 1,9 J – 3,89 J – 4,67 J’dir. KNT takviyesiz kompozit numunelerde absorbe edilen enerji miktarı sırasıyla 2,53 J – 5,62 J – 8,96 J ve geri seken enerji miktarı ise sırasıyla 2,47 J – 4,38 J – 6,04 J’dir. Bu enerji değerlerine göre KNT takviyeli numunelerde absorbe edilen enerji miktarı daha fazladır. Geri seken enerji miktarı ise KNT takviyeli numunelerde daha az olduğu görülmüştür.

#### 4.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Hasar Analizi

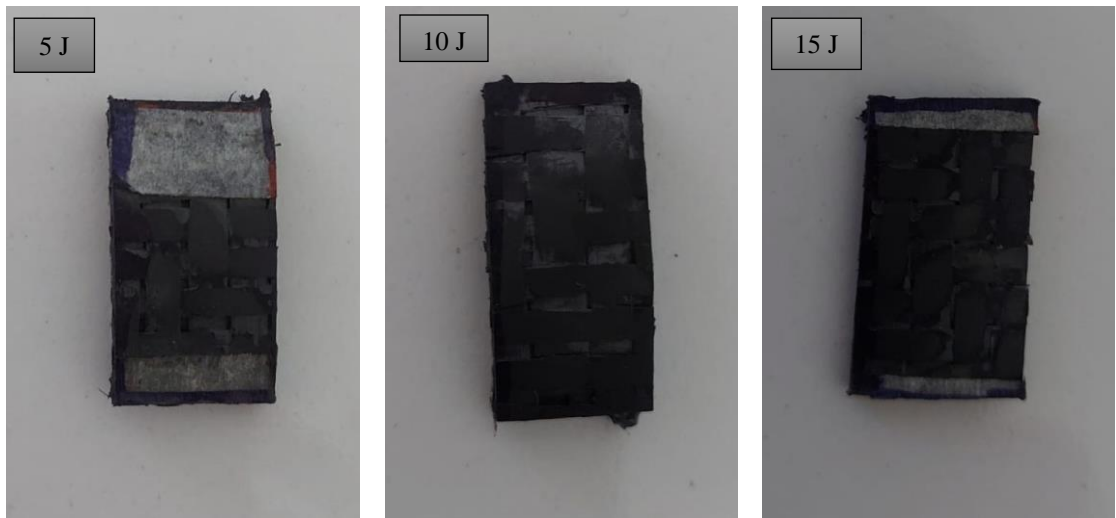
TCKNT takviyeli ve takviyesiz numunelere farklı darbe enerji seviyeleri uygulanmasıyla yüzeyde ve kesitte oluşan hasar bölgeleri ele alınmıştır. Yüzey görüntüleri fotoğraf makinesi ile çekilen numuneler Şekil 4.13 ve 4.14’de verilmiştir. Buradaki numuneler vurucu ucun temas ettiği yüzeyin tam ortasından kesilmiştir. Bunun sebebi hasarın oluştuğu bölgenin kesitine radyal yönden bakılıp tabakalar arasında inceleme yapılmasıdır. Numuneler ait yüzey ve kesit görüntüleri gözle muayene edilmiştir.



Şekil 4.13. TCKNT takviyesiz hasar analizi yapılan numuneler

Şekil 4.13'e bakıldığında KNT takviyesiz numunelerin yüzey görüntülerinde 5 J darbe enerjisinin uygulanmasıyla çok az hasar oluştuğu, 10 J darbe enerjisinde hasarın arttığı, 15 J enerjide ise daha büyük hasar oluştuğu görülmektedir. Yani artan darbe enerjileri ile yüzeydeki hasar miktarı da artmıştır.

Numuneler ait kesit görüntüleri gözle muayene edilmiştir. Ancak numune renginden ötürü görüntüleme sağlanamamıştır. Gözle muayene neticesinde KNT takviyesiz numuneye uygulanmış en düşük 5 J darbe enerji seviyesinde, numunede oluşan hasarın ilk tabakada olduğu gözlenmiştir. 10 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinde ise alt katmanlara doğru hasar ilerlemesi görülmüştür. Görülen hasarlar matris çatlağı ve delaminasyon hasarlarıdır. Ayrıca vurucu ucun temas ettiği yüzeyde nüfuziyet hasarı da ortaya çıkmıştır.

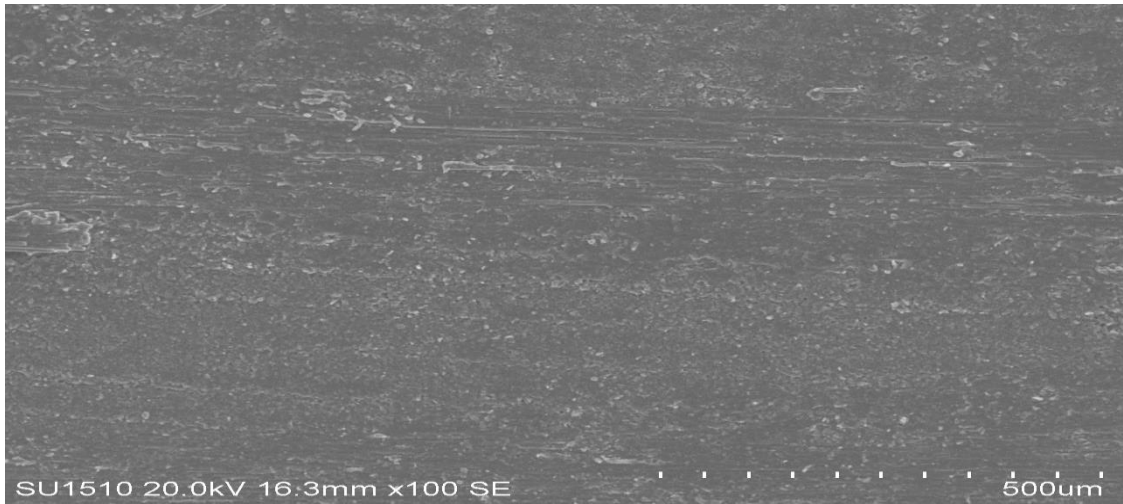


**Şekil 4.14.** TCKNT takviyeli hasar analizi yapılan numuneler

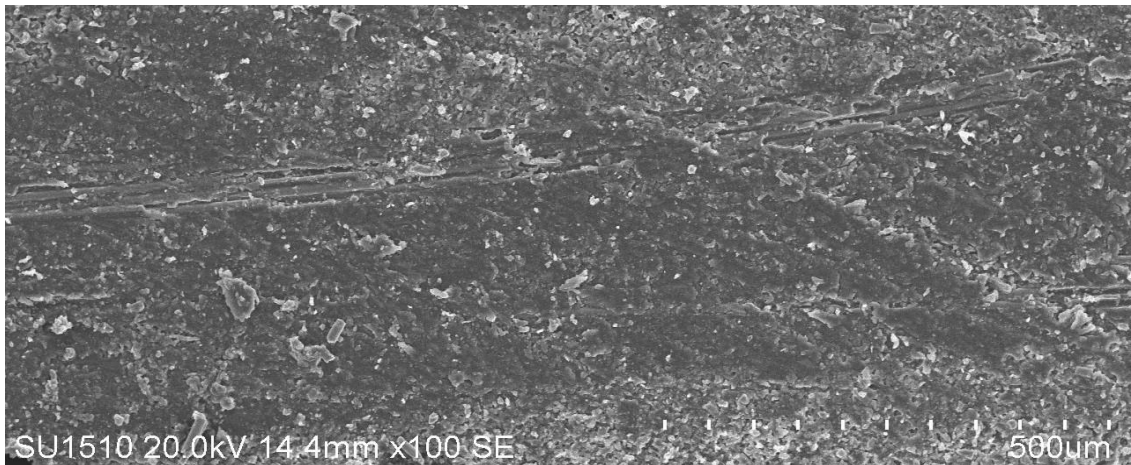
Şekil 4.14'e bakıldığında KNT takviyeli numunelerin yüzey görüntülerinde üç farklı darbe enerjisinin uygulanmasıyla yüzeyde hasar net bir şekilde görülememiştir. KNT takviye edilmiş numunelerde aynı enerji seviyesi için daha düşük hasar alanı oluşmuş ve numune kesitinde daha az hasar ortaya çıkmıştır. Üst tabakalara doğru daha küçük matris çatlakları ve delaminasyon meydana gelmiştir. Bunun en önemli nedeni epoksiye ilave edilen karbon nano partiküllerin elyaf matris ara yüzeyi bağını güçlendirmesidir. Ara yüzeyi bağı güçlenmiş olan kompozit numunelerde daha az hasar görülmesi literatür ile uyumludur.

#### 4.2.1. Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) Düşük Hızlı Darbe Deneyi Hasar Analizi

Düşük hızlı darbe deneyi uygulanan kompozit boruların hasarlı bölgeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizine gönderilmiştir. Numuneler yalıtkan özellik gösterdiğinden altın kaplama yapılarak iletken madde özelliği kazandırılmıştır. Bu analiz Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezinde farklı büyütme oranları ile yapılmıştır. Üç farklı darbe enerjisi uygulanmış ve darbe uygulanmamış TCKNT takviyeli ve takviyesiz numune kesitlerinin mikroyapı hasarları SEM analizi ile belirlenmiştir. Hasarlı ve hasarsız bölgelerin kesit alanı ele alınmış ve kompozit yapıdaki tabakalar (epoksi, karbon elyaf prepeg) görülmüştür. Böylece tabakalar arasındaki etkiler ve ara yüzey detaylı bir şekilde incelenmiştir.



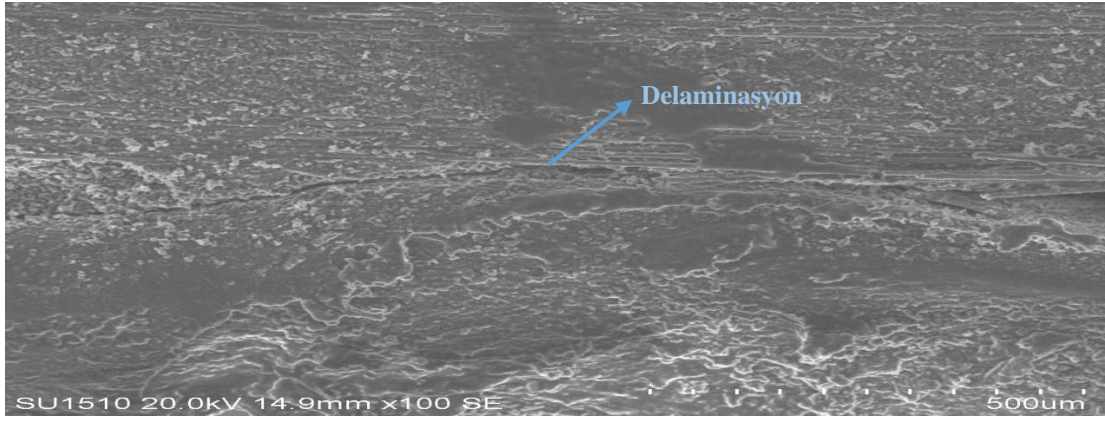
(a)



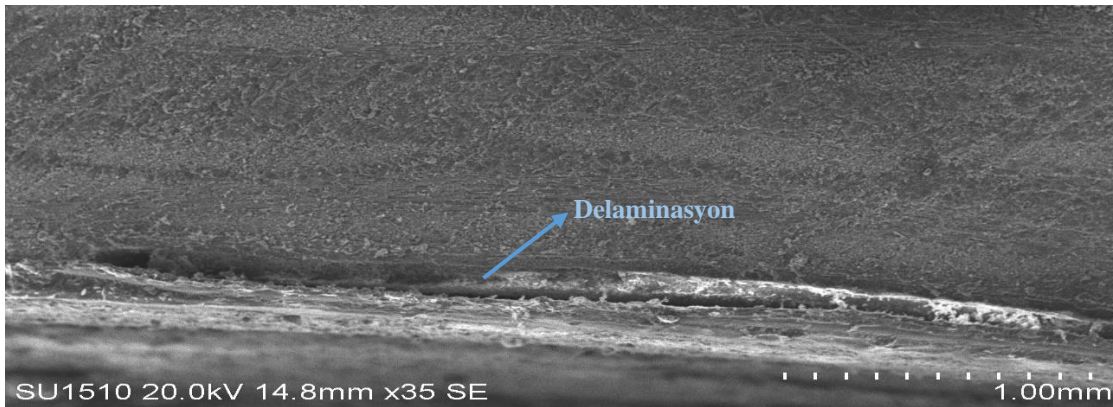
(b)

**Şekil 4.15.** Darbe uygulanmamış (a) KNT takviyeli ve (b) KNT takviyesiz numunelerin SEM görüntüleri

Darbe uygulanmamış KNT takviyeli numunenin Şekil 4.15a'daki SEM görüntülerinin incelenmesiyle KNT ve epoksi karışımının karbon elyaf prepeg kumaşa eşit dağıldığı, karbon elyafların yoğun olduğu doğrultuda düzenli dağılım sağladıkları ve tabakalar arası ara yüzeyde yapışmanın iyi olduğu görülmektedir. KNT takviyesiz Şekil 4.15b'deki görüntüler değerlendirildiğinde epoksinin karbon elyaf prepeg kumaşa disperse edilmesiyle homojen fakat pürüzlü bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Bu sebeple tabakalar arası ara yüzey yapışmasının KNT takviyeliye göre daha az olduğu ve hasar miktarının daha fazla olacağı düşünülmüştür.



(a)



(b)

**Şekil 4.16.** 15 J Darbe uygulanmış (a) KNT takviyeli ve (b) KNT takviyesiz numunelerin SEM görüntüleri

Darbe uygulanmış KNT takviyeli numunenin belirgin hasarları Şekil 4.16'da belirtilmiştir. Şekil 4.16a'daki görüntülerin incelenmesiyle oluşan delaminasyon üst tabakalara doğru meydana gelmiştir. KNT takviyesiz olan Şekil 4.16b'de ise alt tabakalara doğru delaminasyon daha yoğun ve büyük bir şekilde meydana gelmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi KNT takviyeli olan numunede rijitlik artmakta, ara yüzey yapışması daha iyi olmakta ve böylece gelen kuvvetin etkisi azalmaktadır. Hasar miktarı KNT takviyesizde daha fazla oluşmaktadır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

- KNT takviyeli ve KNT takviyesiz boru numunelerine uygulanan düşük hızda darbe deneyi sonuçlarına göre KNT takviyeli boru numunelerinde temas kuvvetleri daha fazla çıkmıştır.
- KNT takviyeli numunenin 15 J darbe enerjisindeki maksimum kuvvet 2100 N iken KNT takviyesizde 1627 N olmakta ve burada %29 civarında kuvvet artışı görülmektedir. 5 J darbe enerjisinde %4,5 ve 10J darbe enerjisinde %18 kuvvet artışı görülmektedir.
- KNT takviye durumuna bağlı olarak deney düzeneğindeki vurucu kütlesi ile numunenin silindirik yüzeyindeki temas süresi KNT takviyesiz boru numunelerinde daha fazla çıkmıştır. 15J darbe enerjisinde KNT takviyesiz numuneye maksimum kuvvetteki temas süresi 0,011 sn iken KNT takviyelide 0,008 sn olmaktadır.
- KNT takviyesiz numunelere uygulanan darbe enerjilerinin artmasıyla maksimum deplasman miktarı daha fazla artmaktadır. 15J darbe enerjisinde KNT takviyeli numunede maksimum deplasman miktarı 0,0134 mm iken KNT takviyesiz numunede 0,0171 mm olmakta ve burada KNT takviyesiz numunede %27,5 civarlarında deplasman miktarında artma görülmektedir. Bunun sebebi KNT takviyeli numunede absorbe edilen enerji miktarı daha fazla olduğundan deplasman miktarı daha düşük olmaktadır.
- KNT takviyeli borularda eğilme rijitliği, KNT takviyesiz numunelere göre daha fazladır. TCKNT ilave edilmesi, kompozit numunenin rijitliğinde artış olmasının göstergesidir.
- Enerji zaman değişim grafiğinde artan darbe enerji seviyeleriyle KNT takviyeli numunelerde absorbe edilen enerji miktarı daha fazla olmaktadır. KNT takviyeli numunede 15 J darbe enerjisinin %69'u, 10 J enerjinin %61'i ve 5 J enerjisinin %62'si absorbe edilen enerjidir. KNT takviyesiz numunelerde ise 15 J enerjinin %59'u, 10 J enerjinin %56'sı ve 5 J

enerjinin %50,6'sı absorbe edilen enerjidir. Bu sonuç TCKNT takviyelerinin enerjii absorbe etmede etkili olduğunun bir göstergesidir.

- KNT takviyesiz boru numunelerinde geri sekme enerjisi (rebound enerji) daha fazla bir değerdedir. Yukarıdaki absorbe edilen enerji yüzdelerinden geri kalanı geri sekme enerjinin oranlarıdır. KNT takviyeli numunede 15J darbe enerjisinin %31'i, 10 J enerjinin %39'u ve 5 J enerjinin %38'i geri seken enerjidir. KNT takviyesiz numunelerde ise 15 J enerjinin %41'i, 10J enerjinin %44'ü ve 5 J enerjinin %49,4'ü geri seken enerjidir.
- KNT takviyeli ve takviyesiz numunelerin radyal yöndeki kesitinin incelenmesiyle KNT takviyesizde alt tabakalara doğru matris çatlakları ve delaminasyon görülürken, KNT takviyelide üst tabakalara doğru matris çatlakları ve delaminasyon görölmektedir. Bu halde enerji zaman grafiğine bakıldığında KNT takviyeli numune daha kısa sürede enerjii absorbe etmekte ve geri sekmeyi sağlamakta olduğu ile açıklanabilmektedir.
- SEM görüntülerinin incelenmesiyle KNT takviyeli kompozit boruların mikro yapısında, karbon elyafların yoğun olduğu doğrultuda düzenli dağılım sağladıkları ve tabakalar arası ara yüzeyde yapışmanın iyi olduğu görölmektedir.
- KNT takviyesiz boruların SEM görüntüleri değerlendirildiğinde epoksinin düzenli fakat pürüzlü bir şekilde dağıldığı görölmektedir. Bu sebeple tabakalar arası ara yüzey yapışmasının KNT takviyeliye göre daha az olduğu ve hasar miktarının daha fazla olacağı düşünölmektedir. Karbon elyafların yoğun olduğu doğrultuda düzenli ve sürekli dağılım sağladıkları da görölmüştür. SEM görüntüleri incelenen her iki numunede de mukavemetin artması düşünölmekte ve KNT takviyelide daha fazla artış olacağı ön görölmektedir.

## 5.2 Öneriler

Sonuçlarda elde edilen deneysel verilere ve elde edilen tecrübelerle göre bundan sonraki çalışmalarda bu çalışmaya ek olarak yapılabilecek öneriler şu şekildedir;

- Darbe enerjilerindeki farklılıkları daha detaylı incelemek için darbe enerji seviyeleri 5J, 10J, 15J yerine delaminasyon ve sonrasında saplanma durumu oluşturan daha yüksek enerji seviyeleri ile yapılabilir.

- Bu çalışmaya ek olarak kompozit malzemelerdeki Tsai Hill hasar kriteri incelenip her enerji seviyeleri için analitik olarak güvenlik faktörleri çıkarılabilir.
- Bir optimizasyon matematiksel yaklaşımı seçilerek istatistiksel olarak katman sayıları ya da nano partikül seviyeleri matematiksel modellemelerle optimize edilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Taşyürek, M., 2014, Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız  $\pm 55^\circ$  Filaman Sarım CNT Takviyeli CTP Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerinin ve İç Basınç Etkisi Altındaki Yorulma Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- [2] Şahin, Y., 2015, Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayınevi, Ankara.
- [3] Caner, A.Y., 2016, Zamana Bağlı Olarak Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışına Soğuk Ortamın Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- [4] Yıldız, R., 2019, Karbon Prepreg, Cam Prepreg ve Bazalt Elyaf ile Üretilmiş Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [5] Yastımoğlu, F., Özkan, A., 2017, Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Düzce, 5 (2017), 56–66.
- [6] Gemi, L., 2004, Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- [7] Şimşek, R., 2019, Cam- Kevlar Elyaf/Epoksi Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışları Üzerine Fonksiyonellendirilmiş Nanokil İlavesinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- [8] Della, V. D., 2008, Modellazione del Trasporto di acqua in Strutture Composite Sandwich per applicazione aeronautiche, Doctoral Thesis, *Napoli Üniversitesi "FEDERICO II"*, Napoli.
- [9] Kayrak, M.A., 1999, Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet Maliyet Analizleri, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.
- [10] Aricasoy, O., 2006, Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.
- [11] Mazumdar, S.K., 2002, Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering, *CRC Press*, Washington.
- [12] Kaw, A.K., 2014, Kompozit Malzeme Mekaniği , Efil Yayınevi, Ankara.
- [13] Eryıldız, E., Akdoğan Eker A., 2015, Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları, *International Journal of Engineering Research and Development*. 7 (2015), 8–12.
- [14] Demirci, M.T., 2015, SiO<sub>2</sub> Nanopartikül Katkısının Yüzey Çatlaklı Ve Çatlaksız Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozit Boruların Yorulma Davranışlarına Etkisi,

Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

- [15] İnce, E., 2014, Amfibi Zırhlı Araçlar İçin Kompozit-Alüminyum Denge Plakası Tasarımı, Sonlu Elemanlar Analizi ve Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [16] Koruvatan, A., 2008, Farklı Kür Sıcaklığı ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- [17] Campbell, F., 2010, Structural Composite Materials, *ASM International*, Ohio.
- [18] Moore, D.T., 2022, Metal Matrix Innovations, *Dan T. Moore Company*. <http://www.dantmoore.com/companies/metal-matrix-innovations/> [Ziyaret Tarihi: 13 Ocak 2022].
- [19] Sarıkaya, E., 2019, Doğal Fiber Takviyeli Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Tespiti, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.
- [20] Callister, W.D., Rethwischch, D.G., 2013, Materials Science and Engineering, *John Wiley & Sons*, New York.
- [21] Celep, Ş., 2007, Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- [22] Kuchibhatla, S.V.N.T., Karakoti, A.S., Bera, D., Seal, S., 2007, One dimensional nanostructured materials, *Progress in Materials Science*. 52 (2007) 699–913.
- [23] Chandrasekaran, V.C.S., 2011, Role of Multiwalled Carbon Nanotube in Interlaminar Shear Strength of Epoxy / Glass Fiber / Multi Walled Carbon Nanotube Hybrid Composites, Doctoral Thesis, *Delaware University*, Newark.
- [24] Ma, P.C., Siddiqui, N.A., Marom, G., Kim, J.K., 2010, Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 41 (2010), 1345–1367.
- [25] Fan, Z., 2007, Flow and rheology of multiwalled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites, Doctoral Thesis, *Delaware University*, Newark.
- [26] Örs, A., 2009, Karbon Nanotüplerin Polimerle İle Fonksiyonlaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, İstanbul.
- [27] Clair, B. St., 2016, Nanotechnology And Predicting The Future (Review of The Current State of Nanotechnology And Making Future Predictions With A Discussion of Forecasting Methods), *The Amateur Academic*, 10.
- [28] Sahoo, N.G., Rana, S., Cho, J.W., Li, L., Chan, S.H., 2010, Polymer

- nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes, *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 35 (2010) 837–867.
- [29] Eskizeybek, V., 2012, Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fliber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- [30] Hwang, T.Y., Kim, H.J., Ahn, Y., Lee, J.W., 2010, Influence of twin screw extrusion processing condition on the properties of polypropylene/multi walled carbon nanotube nanocomposites, *Korea-Australia Rheology Journal*, 22 (2010), 141–148.
- [31] Ulus, H., Üstün, T., Eskizeybek, V., Şahin, Ö.S., Avcı, A., Ekrem, M., 2014, Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties, *Applied Surface Science*, 318 (2014), 37–42.
- [32] Gurit, 2022, *Guide To Composites*, <https://pdf.directindustry.com/pdf/gurit/gurit-guide-to-composites-v5/37817-203541.html> [Ziyaret Tarihi: 13 Ocak 2022].
- [33] Dong, L., Hou, F., Li, Y., Wang, L., Gao, H., Tang, Y., 2014, Preparation of continuous carbon nanotube networks in carbon fiber/epoxy composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 56 (2014), 248–255.
- [34] Ashrafi, B., Guan, J., Mirjalili, V., Zhang, Y., Chun, L., Hubert, P., Simard, B., Kingston, C.T., Bourne, O., Johnston, A., 2011, Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 71 (2011), 1569–1578.
- [35] Siddiqui, N.A., Khan, S.U., Ma, P.C., Li, C.Y., Kim, J.K., 2011, Manufacturing and characterization of carbon fibre/epoxy composite prepregs containing carbon nanotubes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (2011) 1412–1420.
- [36] Kostopoulos, V., Baltopoulos, A., Karapappas, P., Vavouliotis, A., Paipetis, A., 2010, Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 70 (2010), 553–563.
- [37] Soliman, E.M., Sheyka, M.P., Taha, M.R., 2012, Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes, *International Journal of Impact Engineering*, 47 (2012), 39–47.
- [38] Uz, Y.C., 2021, Development and Characterization of Innovative Fiber Reinforced Prepregs and Their Composites Containing Functional Fillers, Doctoral Thesis, *Izmir Institute of Technology*, Izmir.
- [39] Bakis, G., Wendel, J.F., Zeiler, R., Aksit, A., Häublein, M., Demleitner, M., Benra, J., Forero, S., Schütz, W., Altstädt, V., 2021, Mechanical properties of the carbon nanotube modified epoxy–carbon fiber unidirectional prepreg laminates,

*Polymers*, 13 (2021), 1–14.

- [40] Sun, L., Warren, G.L., O'Reilly, J.Y., Everett, W.N., Lee, S.M., Davis, D., Lagoudas, D., Sue, H.J., 2008, Mechanical properties of surface-functionalized SWCNT/epoxy composites, *Carbon*, 46, 320–328.
- [41] Bekyarova, E., Thostenson, E.T., Yu, A., Kim, H., Gao, J., Tang, J., Hahn, H.T., Chou, T.W., Itkis, M.E., Haddon, R.C., 2007, Multiscale carbon nanotube-carbon fiber reinforcement for advanced epoxy composites, *Langmuir*, 23 (2007) 3970–3974.
- [42] Kara, M., Kırıcı, M., Tatar, A.C., Avcı, A., 2018, Impact behavior of carbon fiber/epoxy composite tubes reinforced with multi-walled carbon nanotubes at cryogenic environment, *Composites Part B: Engineering*, 145 (2018), 145–154.
- [43] Kara, M., 2012, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama İle Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- [44] Şahin, A., 2011, Düşük Hızlı Darbe Görmüş Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.