

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE NANOPARTİKÜL**  
**KATKISININ YORULMA, BURKULMA VE DARBE**  
**DAVRANIŞINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**BERKANT DİNDAR**

**DENİZLİ, OCAK - 2019**

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE NANOPARTİKÜL**  
**KATKISININ YORULMA, BURKULMA VE DARBE**  
**DAVRANIŞINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**BERKANT DİNDAR**

**DENİZLİ, OCAK - 2019**

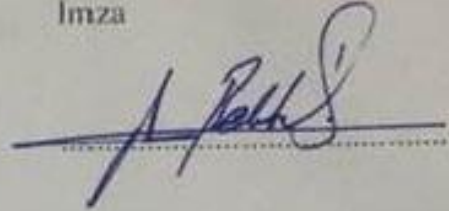
## KABUL VE ONAY SAYFASI

Berkant DINDAR tarafından hazırlanan "Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Nanopartikül Katkısının Yorulma, Burkulma ve Darbe Davranışına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi" savunma sınavı 23/01/2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ



Üye  
Prof. Dr. Osman ASİ



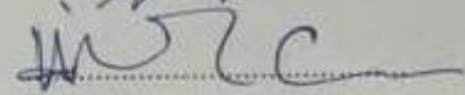
Üye  
Doç. Dr. Yasin YILMAZ



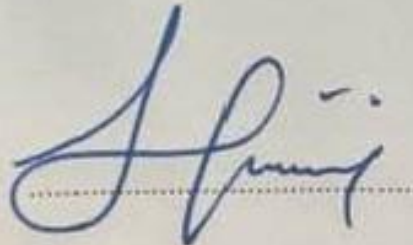
Üye  
Doç. Dr. Yusuf ARMAN



Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Hilal CAN



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
13/02/2019 tarih ve ...07/18... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

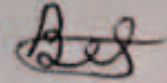


Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

BERKANT DİNDAR



## ÖZET

**ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE NANOPARTİKÜL  
KATKISININ YORULMA, BURKULMA VE DARBE DAVRANIŞINA  
ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ  
DOKTORA TEZİ  
BERKANT DİNDAR  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. NUMAN BEHLÜL BEKTAŞ)**

Bu tez çalışmada, E-cam ve karbon elyaflarla güçlendirilmiş epoksi bazlı kompozit malzemenin üretimi esnasında, epoksi içerisine ilave edilen karbon nanotüp (KNT) ve nanokil (NK) katkısının kompozit malzemenin mekanik özelliklerine, yorulma, burkulma ve darbe davranışlarına etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda nano partiküller epoksi reçineye ağırlıkça %0,5 oranlarında ilave edilerek ultrasonik karıştırıcı ile homojenize edilmişlerdir. Katkısız, KNT ve NK içeren kompozit plakalar el yatırması yöntemi ile üretilmiştir. Kumaş takviye elemanı olarak tek yönlü ve dikişli kıvrımsız kumaş türleri tercih edilmiştir. Kompozit malzemelere ait kopma mukavemetleri, elastisite modülleri, kritik burkulma dayanımları, genel değişken şartlarda (çeki-çeki) yorulma dayanımları, ve darbe dayanım yükleri elde edilerek grafikler halinde sunulmuş ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) alınmıştır. Deney sonuçlarına göre KNT ve NK katkıların kompozit malzemelerin çekme, burkulma ve yorulma mukavemetlerine olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Diğer taraftan ağırlık düşürmeli darbe testlerinde ise düşük enerjili deneylerde darbe dayanımında artış görülürken yüksek enerjili deneylerde sonuçlar katkısız plakalara benzer çıkmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Nanokompozit, Epoksi, E-cam, Karbon elyaf, Nanokil, Karbon nanotüp.

## **ABSTRACT**

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NANOPARTICULAR ADDITIVES ON FATIGUE, BUCKLING AND IMPACT BEHAVIOUR OF FIBER REINFORCED COMPOSITES**

**PH.D THESIS**

**BERKANT DINDAR**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. NUMAN BEHLÜL BEKTAŞ)**

In this thesis, the effects of carbon nanotube (CNT) and nanoclay (NC) additives on the mechanical properties, fatigue behavior, buckling and impact behavior of E-glass and carbon fiber reinforced epoxy based composites were investigated. Additives were added to epoxies at a certain rate in the production process. In this context, nanoparticles were added to epoxy resin at a ratio of 0.5% by weight and homogenized by ultrasonic mixer. Composite plates containing CNT, NC additives and also as neat were produced by hand lay-up method. As the fabric reinforcing element, unidirectional and Non-crimp fabric types were preferred. The tensile strengths, modulus of elasticity, critical buckling, fatigue life (pull-pull), and impact loadings of composite materials were presented in graphs, and some scanning electron microscope (SEM) images taken from broken faces of specimens were also presented. According to the results of the experiments, CNT and NC additives changed the tensile, buckling and fatigue behaviors of composite materials positively. In impact tests, impact strengths increased in low-energy impact tests, while results in high-energy impact tests were found similar to unadulterated plates.

**KEYWORDS:** Nanocomposite, Epoxy, E-glass, Carbon fiber, Nanoclay, Carbon nanotube.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	1
<b>2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI</b> .....	<b>3</b>
2.1 Mekanik Özellikler ile İlgili Çalışmalar .....	3
2.2 Yorulma Davranışları ile İlgili Çalışmalar .....	4
2.3 Darbe Davranışları ile İlgili Çalışmalar .....	6
2.4 Burkulma Davranışları ile İlgili Çalışmalar .....	9
2.5 Çalışmanın Literatürdeki Yeri .....	10
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELER</b> .....	<b>12</b>
3.1 Tabakalı Kompozitler .....	12
3.1.1 Simetrik tabakalanma .....	12
3.1.2 Anti-simetrik tabakalanma.....	14
3.2 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları .....	15
3.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	17
3.4 Kompozit Malzemenin Sınıflandırılması.....	18
3.5 Tekstil Takviyeler.....	19
3.5.1 İki boyutlu (2D) kumaşlar.....	19
3.5.2. Üç boyutlu (3D) kumaşlar .....	21
3.6 Elyaf Malzemeleri .....	23
3.6.1 Cam elyaflar.....	24
3.6.2 Karbon elyaflar .....	25
3.6.3 Kevlar elyaflar .....	25
3.7 Polimerik Reçineler .....	25
3.8 Katkı ve Dolgu Malzemeleri .....	27
3.8.1 Karbon nanotüpler .....	27
3.8.2 Nanokil partikülleri.....	28
3.9 Epoksi-KNT-Elyaf Ara Yüzeyi.....	29
3.10 Yorulma Yükleme Durumları .....	30
3.10.1 S-N (Wöhler) eğrileri.....	31
3.11 Darbe Test Metodları ve Hasar Değerlendirmeleri .....	33
3.12 Tabakalı Kompozitlerde Darbe Hasar Modları .....	33
3.13 Burkulma Modları .....	35
<b>4. MALZEME ve YÖNTEM</b> .....	<b>37</b>
4.1 Kompozitlerin Üretim Süreci .....	40
4.1.1 Nano partiküllerin reçine içerisine dağıtılması.....	40
4.1.2 El yatırması yöntemi ile kumaşlara reçine emdirilmesi.....	43
4.1.3 Kürleştirme işlemi.....	46
4.1.4 Numunelerinin su jeti ile ebatlandırılması.....	47

4.2	Deneyel Çalışmalar .....	48
4.2.1	Çekme Deneyleri .....	51
4.2.2	Yorulma Deneyleri .....	58
4.2.3	Burkulma Deneyleri.....	61
4.2.4	Darbe Deneyleri.....	65
4.2.4.1	Kuvvet-çökme (F-d ) eğrileri .....	69
4.2.5	Taramalı elektron mikroskobu (SEM analizleri) .....	72
<b>5.</b>	<b>SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>76</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>78</b>
<b>7.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>84</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1: İzotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit.....	13
Şekil 3.2: Ortotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit.....	13
Şekil 3.3: Anti-simetrik tabakalı kompozit.....	14
Şekil 3.4: Kompozitlerin bazı kullanım alanları .....	15
Şekil 3.5: Yolcu uçağında kompozit malzemelerden oluşan bileşenler.....	16
Şekil 3.6: Karbon elyaf/epoksi gövdeli Formula 1 araçları .....	16
Şekil 3.7 Kompozitlerin takviye malzemesine göre şematik sınıf.....	18
Şekil 3.8 Kompozitlerin matris malzemesine göre şematik sınıf.....	18
Şekil 3.9: Tekstil takviyelerin farklı dokuma tipleri .....	21
Şekil 3.10: Kıvrımsız kumaşın şematik görünümü .....	22
Şekil 3.11 Dikiş desenleri .....	22
Şekil 3.12 Kıvrımsız dikişli kumaşlar için üretim aşamaları .....	23
Şekil 3.13 Epoksi diglisidil ether bisfenol A'nın moleküler yapısı .....	26
Şekil 3.14 Genel değişken yükleme durumu .....	30
Şekil 3.15 S-N grafiği örnekleri .....	32
Şekil 3.16 Çeşitli yükleme koşullarının burkulmaya etkisi .....	36
Şekil 4.1: Kullanılan malzeme ve metodların şematize hali .....	38
Şekil 4.2: Yapılmış olan deneylerin şematize hali .....	39
Şekil 4.3: Epoksi reçine ve nanopartiküller .....	41
Şekil 4.4: Homojenizasyon işlemi.....	42
Şekil 4.5: El yatırması yöntemi.....	43
Şekil 4.6: Üç eksenli kumaşlar.....	44
Şekil 4.7: Kürleme öncesi hazırlık.....	45
Şekil 4.8: Kürleştirme süreci.....	46
Şekil 4.9: Su jeti ile kesim .....	47
Şekil 4.10: 8801 Instron çeki-bası/yorulma test cihazı .....	48
Şekil 4.11: Instron-Dynatup 9250 HV darbe test cihazı .....	50
Şekil 4.12: Numune kaplama cihazı.....	50
Şekil 4.13: Kompozit numunelerin teknik resim çizimleri .....	51
Şekil 4.14: Çekme dayanımları .....	52
Şekil 4.15: Kompozit numunelerin açılara göre çekme dayanımları.....	53
Şekil 4.16: Mekanik özellikler .....	53
Şekil 4.17: Tipik hasar şekilleri .....	54
Şekil 4.18: E-cam ile takviye edilmiş kumaşların çekme diyagramı örnekleri.55	
Şekil 4.19: E-cam takviye edilmiş kompozitlerin çekme dayanımı değerleri ..56	
Şekil 4.20: E-cam ile takviye edilmiş kumaşların çekme diyag. örnekleri. ....57	
Şekil 4.21: Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri.....58	
Şekil 4.22: Farklı oryantasyon açısına sahip kompozitlerin S-N eğrileri .....	59
Şekil 4.23: E-cam/epoksi kompozitlere ait S-N eğrileri .....	60
Şekil 4.24: Karbon/epoksi numunelere ait S-N eğrileri .....	61
Şekil 4.25: E-cam/epoksi kompozite ait burkuma deneyi.....	61
Şekil 4.26: Burkulma numuneleri teknik resim çizimleri .....	62
Şekil 4.27: Farklı oryantasyon ve katkı maddelerinde Pkr burkulma yükleri...63	
Şekil 4.28: 30° oryantasyonunda E-cam/epoksi için bir burkulma grafiği örn .64	
Şekil 4.29: Farklı oryant. ve katkı mad. burkul. (E) elastisite mod. değ.....64	

Şekil 4.30: Tipik bir darbe deneyi.....	65
Şekil 4.31: 66,12 J darbe enerjisindeki E-cam komp. numn. hasar fotoğ.....	66
Şekil 4.32: DKK E-cam takviyeli numunelerin hasar fotoğrafları .....	66
Şekil 4.33: TYK E-cam takviyeli numunelerin hasar fotoğrafları .....	67
Şekil 4.34: DKK karbon takviyeli numunelerin hasar fotoğrafları.....	68
Şekil 4.35: TYK karbon takviyeli numunelerin hasar fotoğrafları .....	69
Şekil 4.36: E-cam takviyeli kompozitlerin Kuvvet-çökme eğrileri .....	70
Şekil 4.37: Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin Kuvvet-çökme eğrileri.....	71
Şekil 4.38: E-cam takviyeli kumaşların 48J darbe enerj. Kuvv.-çökme eğri. ..	72
Şekil 4.39: Taramamalı elektron mikroskobu (SEM) görünt. E-cam/epoksi....	73
Şekil 4.40: Taramamalı elektron mikroskobu (SEM) görünt. karbon/epoksi....	74
Şekil 4.41: Taramamalı elektron mikroskobu (SEM) görünt. E-cam/epoksi....	75

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 3.1: Yaygın kullanılan elyaf özellikleri .....	24
Tablo 3.2: Karbon nanotüplerin bazı önemli özellikleri .....	28
Tablo 4.1: Üretimi yapılan kompozit plakaların yapısal özellikleri .....	40
Tablo 4.2: Nano partiküllerin genel özellikleri .....	41
Tablo 4.3: Tek eksenli kompozit plakaların yapısal özellikleri .....	51
Tablo 4.4: Kompozit plakaların kritik burkulma yükleri .....	54
Tablo 4.5: Kompozit plak. kritik burkul. yüklerindeki Pkr oransal değişimi ..	63

## SEMBOL LİSTESİ

<b>A</b>	:	Genlik oranı (MPa)
<b>ASTM</b>	:	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
<b>b</b>	:	Numune genişliği (mm)
<b>DGBEA</b>	:	Diglisidil ether bisfenol A
<b><math>E_1</math></b>	:	Elyaf yönündeki elastisite modülü (MPa)
<b><math>E_2</math></b>	:	Elyafa dik yöndeki elastisite modülü (MPa)
<b><math>E_{ef}</math></b>	:	Efektif elastisite modülü
<b><math>E_x</math></b>	:	İlgili tabakanın elastisite modülü
<b>h</b>	:	Plaka kalınlığı
<b>j</b>	:	Tabaka numarası
<b>f</b>	:	Yük frekansı
<b>F</b>	:	Uygulanan yük (N)
<b>DKK</b>	:	Dikişli kıvrımsız kumaş
<b>KNT</b>	:	Karbon nanotüp
<b><math>m_t</math></b>	:	Toplam numune ağırlığı (g)
<b><math>m_e</math></b>	:	Elyaf ağırlığı (g)
<b><math>m_r</math></b>	:	Reçie ağırlığı (g)
<b>N</b>	:	Yük tekrar sayısı
<b>NK</b>	:	Nanokil
<b><math>\rho_f</math></b>	:	Cam fiberin yoğunluğu ( $g/cm^3$ )
<b><math>\rho_k</math></b>	:	Kompozit plaka malzemesinin yoğunluğu ( $g/cm^3$ )
<b><math>\rho_m</math></b>	:	Matrisin yoğunluğu ( $g/cm^3$ )
<b>L</b>	:	Numune toplam boyu (mm)
<b>T</b>	:	Periyot süresi
<b>TYK</b>	:	Tek yönlü kumaş
<b>t</b>	:	Numune kalınlığı (mm)
<b>PA</b>	:	Poliamid
<b>PE</b>	:	Polietilen
<b>PET</b>	:	Polietilen tetrifat
<b>PMMA</b>	:	Polietil metakrilat
<b>PP</b>	:	Polipropilen
<b>PTFE</b>	:	Politetrafloroetilen
<b>PS</b>	:	Polistiren
<b><math>P_{kr}</math></b>	:	Kritik burkulma yükü (N)
<b>R</b>	:	Gerilme oranı (MPa)
<b><math>Y_t</math></b>	:	Boyuna çekme mukavemeti (MPa)
<b><math>z_j</math></b>	:	Nötr düzlemeolan mesafe
<b><math>X_t</math></b>	:	Enine çekme mukavemeti (MPa)
<b><math>\sigma</math></b>	:	Normal gerilme (MPa)
<b><math>\sigma_g</math></b>	:	Gerilme genliği (MPa)
<b><math>\sigma_r</math></b>	:	Gerilme aralığı (MPa)
<b><math>\sigma_{ort}</math></b>	:	Ortalama gerilme (MPa)
<b><math>\sigma_{maks}</math></b>	:	Yorulmadaki Maksimum gerilme (MPa)
<b><math>\sigma_{min}</math></b>	:	Yorulmadaki Minimum gerilme (MPa)
<b><math>\epsilon</math></b>	:	Şekil değiştirme (%)

## ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamda rehberliğinden, dolayı danışman hocam Prof. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ'a teşekkür eder, öğrencisi olmaktan dolayı duyduğum mutluluğu ifade etmek isterim. Tez izleme komitesi üyeleri olan değerli hocalarım Doç. Dr. Yasin YILMAZ, Dr. Öğr. Üyesi Hilal CAN ve Dr. Öğr. Üyesi Arzum İŞİTAN'a çalışmam boyunca önerileri ve yardımları dolayısıyla minnetlerimi sunarım. Ayrıca darbe çalışmalarındaki fikirleriyle destek olan Arş.Gör. İnan AĞIR'a bu teze yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma, Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 2016FEBE017 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Son olarak, gösterdikleri anlayış, sabır ve desteğinden dolayı, sevgili aileme ve her zaman bana destek olan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Berkant DİNDAR  
DENİZLİ-2019

# 1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte kullanım amacına uygun özelliklere sahip malzeme ihtiyacı da artmaktadır. Özellikle sanayide yüksek dayanımla beraber hafifliğin de istendiği malzemeler çok fazla kullanılmaktadır. Bu ileri düzey malzemeler kompozit malzeme olarak üretilebilmektedir. Kompozitler birbirlerinin zayıf yönlerini kapatacak şekilde makro ve mikro düzeyde bir araya getirilerek üretilebilmektedirler.

Kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini yapıyı bozmadan epoksi içerisine katılacak nano partiküller ile arttırmak mümkündür.

Son zamanlarda, nanopartikül katkıların kompozitlere uygulanması bu alanın ilgi çekici bir hale gelmesine neden olmuştur. Nano partiküller, elyaf takviyeli polimerik kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılacak en uygun katkı malzemeleri olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, nano partiküller uygulanma şekilleri ve türlerine bağlı olarak nano kompozitlerin ısıl ve elektriksel özelliklerini de geliştirebilmektedirler. Katkı malzemesi olarak kullanılacak nano partiküller arasında yüksek mekanik özellikleri sayesinde karbon nanotüpler (KNT) öne çıkmaktadır. Yüzey alanları ve yüksek çap/boy oranları ile polimerik kompozitlerde katkı olarak kullanılacak en önemli yapılardır. Çalışmalarda geniş kullanım yeri bulan diğer nano partikül türü nanokillerdir (NK). Nanokillerin yaygın olarak kullanılmasının nedeni doğada bol bulunabilirliğinden dolayı ekonomik olmasındandır. Bu tez çalışmasının nanopartikül seçimi bu parametreler doğrultusunda yapılmıştır.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın ana amacı, E-cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde nanopartiküllerin mekanik özelliklere, yorulma, burkulma ve darbeye olan etkisini incelemektir. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için çekme deneyleri yapılmıştır. Nanopartikül katkıların yorulma dayanımına olan

etkilerinin belirlenebilmesi için genel değişken şartlarda  $R=0,1$  (çeki-çeki) yorulma deneyleri yapılmıştır. Burkulma dayanımına etkilerinin araştırılması içinde burkulma testleri yapılmıştır. Ayrıca nanopartikül katkıların darbe dayanımına etkilerini araştırmak içinde ağırlık düşürmeli darbe deneyleri tatbik edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elyaf yüzeylerindeki nonopartiküller'in dağılımları ve çekme deneylerinde kullanılan numunelerin kırılma yüzeyleri araştırılmıştır. Son olarak bu tezde elde edilen sonuçlara göre ileride yapılması düşünölen çalışmalar ifade edilmiştir.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Yapılan literatür taramasından kompozit malzemeler üzerine teorik ve deneysel olarak bir çok çalışmanın son yıllarda araştırmacılar tarafından sıkça makalelere konu edildiği görülmüştür. Ancak nano partiküllerin karakteristik özelliklere etkisinin araştırıldığı az sayıda teorik ve deneysel çalışma vardır. Amaç, deneysel olarak bu çalışmayı yaparak literatürdeki bu boşluğu doldurmaktır. Yapılan literatür taraması aşağıda sunulmuştur.

### 2.1 Mekanik Özellikler ile İlgili Çalışmalar

Zhou Y. ve arkadaşları (2008) karbon/epoksi kompozitlerde karbon nanofiber kullanarak mekanik özellikleri geliştirmeyi amaçlamışlar ve epoksiye ağırlıkça (%1-2-3) oranlarında karbon nanofiber ilave etmişlerdir. Ürettikleri bu kompozit malzemenin karbon nano elyaf katkısı sayesinde çekme dayanımının %11, eğilme dayanımının %22 ve yorulma dayanımının da önemli ölçüde arttığını ifade etmişlerdir.

Islam M.E., ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada; karbon/epoksi kompozite ağırlıkça %2 NK ve %0,3 KNT eklemişler ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. NK ve KNT takviyesinin eğilme dayanımını sırası ile %19 ve %20 arttırdığını tespit etmişlerdir.

Qi B. ve arkadaşları (2006) DGEBA (Diglycidyl Ether of Bisphenol A) temelli epoksi reçineye NK ilave ederek mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Ağırlıkça %2, %5 ve %10 olarak ekledikleri NK miktarı sonucunda katkı oranının artması ile birlikte elastisite modüllerinin de arttığını belirtmişlerdir.

Eskizeybek V. çalışmasında (2012); yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü E-cam/epoksi nanokompozitlerin tabakalar arası kırılma davranışlarını incelemiştir. Çalışmasında, KNT'lerin kırılma tokluğunda ki çatlak başlangıcı ve çatlak yayılması derlerini sırasıyla %165 ve %155 arttırdığını ifade etmiştir.



## 2.2 Yorulma Davranışları ile İlgili Çalışmalar

Borrego L.P. ve arkadaşları (2014) çalışmalarında; E-cam/epoksi plakaları NK ve KNT ile modifiye etmişlerdir. Bu nanopartiküllerin etkisini görebilmek amacıyla ürettikleri kompozit plakaları çekme ve yorulma testine tabi tutmuşlardır. Çalışmanın sonucunda her iki nanopartikül modifiyesinin de plakaların dayanımını iyileştirdiğini görmüşlerdir.

Böger L. ve arkadaşları. (2010) çalışmalarında; E-cam/epoksi kompozitlerin yorulma davranışlarını geliştirmek amacıyla kompozite %0,3 oranında KNT eklemişlerdir. KNT'lerin malzemenin yorulma dayanımını belirgin bir şekilde arttırdığı, bununla birlikte elyafların kırılma dayanımını %16 oranında iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Shao Y. ve arkadaşları (2015) çalışmalarında; Karbon/epoksi kompozit malzemeye ağırlıkça %0,3 oranında nano selüloz ekleyerek yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda nano selüloz katkısının kompozit malzemenin yorulma dayanımını iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Mortazavian S. ve Fatemi (2015) çalışmalarında; farklı oryantasyon açılarındaki kısa elyaf takviyeli polimer kompozitlerin üç farklı sıcaklıktaki 23-40-125 C° yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda bu 3 farklı sıcaklıktaki yorulma dayanımları kıyaslanmış ve 125 °C'deki yorulma dayanımının 23 °C'deki yorulma dayanımına göre ciddi şekilde düşük olduğu belirtilmiştir.

Manjunatha C. M. ve arkadaşları (2013) yaptıkları çalışmada; cam elyaf takviyeli plastik reçineden imal edilmiş kompozit malzemeye ağırlıkça %10 oranında nano-silika ilave etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda nano silikanın kompozit malzemenin yorulma dayanımını 4-5 kat arttırdığını belirtmişlerdir.

Liang S. ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada; keten/epoksi ve E-cam/epoksi kompozitlerin yorulma dayanımlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda E-

cam/epoksi malzemenin yorulma dayanımının, keten/epoksi malzemenin yorulma dayanımından 64 MPa daha iyi çıktığını ifade etmişlerdir.

Helmy S. ve Hoa S. M. (2014) çalışmalarında; el yatırması yöntemi ile üretilmiş E-cam/epoksi kompozite ağırlıkça % 2 oranında NK ilave ederek, çapraz katlı  $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$  ve yarı izotropik  $0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$  oryantasyon açılarındaki kompozit plakaların yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda NK katkısının yorulma dayanımını çapraz katlı numunelerde %50 oranına kadar ömür artışı sağladığını, yarı izotropik kompozit plakada ise %54 orana kadar artış olduğunu ifade etmişlerdir.

Manjunatha C. M. ve arkadaşları (2009) çalışmalarında; E-cam/epoksi kompozite ağırlıkça % 10 oranında silis nanopartükülleri ilave etmişler ve bu partiküllerin yorulma dayanımına etkisini incelenmiştir. Araştırmanın sonucunda silis katkısının yorulma dayanımını 3 kat arttırdığını ifade etmişlerdir.

Johannes M. ve arkadaşları (2009) çekme kuvvetindeki kompozitlerde farklı katkı malzemelerin birleştiği alanlardaki bölgesel etkileri araştırmışlardır. Bölgesel etkiler, numuneler üzerinde statik ve dinamik testleriyle araştırılmıştır. Bununla birlikte sonlu elemanlar yöntemi ile hasar tahmini yapmışlardır.

Selmy A.I. ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada; tek yönlü ve rastgele elyaf dizilimli olmak üzere iki tip E-cam/epoksi kompozitin eğilme altındaki yorulma davranışlarını incelenmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, tek yönlü E-cam takviyeli kompozit malzemenin çatlak ilerleme direncinin, rastgele dizilimli kompozite göre daha iyi olduğunu ve tek yönlü cam elyafın yorulma dayanımının rastgele elyafli kompozite göre beş kat daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Brunbauer J. ve arkadaşları (2014) çalışmalarında; karbon/epoksi kullanmışlar ve karbon elyaf oranının yorulma davranışına etkisini araştırmışlardır. Araştırmanın sonucunda kompozitteki karbon elyafın hacimce oranın artmasının yorulma dayanımının da artmasını sağladığını ifade etmişlerdir.

Khan S. U. ve arkadaşları (2010) karbon/epoksi kompozite ağırlıkça %1, %3, %5 oranlarında ilave ederek mekanik ve yorulma özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmanın sonucunda hem çekme dayanımında hemde yorulma

dayanımında en iyi performansı % 3 NK katkılı numunelerin sergilediğini ifade etmişlerdir.

Ferreira J.A.M. ve arkadaşları (2013) çalışmalarında epoksi reçineli kompozitlere nanokil ilave ederek yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Katkısız, %1 ve % 3 NK olmak üzere araştırdıkları bu numunelerin hem çekme dayanımı hemde yorulma dayanımının katkılı numunelere göre yüksek çıkmış ve NK oranı arttıkça bu iki dayanım değerinin düşme gösterdiğini belirtmişlerdir.

Weiss A. ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada; karbon/epoksi kompozit malzemenin farklı oryantasyon açılarındaki yorulma davranışları incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda 0°'li (eksenel yönlü) tabakaların yorulma davranışlarının daha iyi çıktığını ifade etmişlerdir.

### **2.3 Darbe Davranışları ile İlgili Çalışmalar**

Boumbimba R.M. ve arkadaşları (2014) çalışmalarında; E-cam/epoksi kompozit malzemeyi nano güçlendirici ile takviye etmişler ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Nano güçlendiricinin özellikle düşük darbe testlerinde iyi sonuçlar vererek malzemenin darbe dayanımını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Üzümcü N. (2017) çalışmasında farklı oranlı KNT katkılı woven örgülü E-cam/epoksi kompozit plakaların darbe davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. KNT etkisinin daha iyi anlaşılması üç farklı nano karbon oranında (%0,5-1-2) yapılarak üretilen numuneler katkısız olan numuneler ile darbe dayanımları açısından karşılaştırılmışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kritik enerji seviyesinin altında ve üstünde kompozit numuneler farklı darbe karakteristiklerini ifade etmiştir. Çalışmanın sonucunda karbon nanotüp katkılı kompozit levhaların düşük darbe enerjisinde katkısız olan numunelere kıyasla daha da iyi performans gösterdiklerini gözlemlemiştir.

Ünal H.Y. (2016) değişik oranlarda (%0,5-0,75-1,25 ve 2) NK'li, E-cam/epoksi bazlı kompozitlere ilave ederek mekanik ve yorulma dayanımlarına etkisini incelenmiştir. Bunun için, çekme, düşük hızlı darbe ve genel değişken (çeki-çeki) yorulma

deneyleri yapmıştır. Yapılan bu deneyler sonucu tüm oranların çekme, darbe ve yorulma davranışlarını olumlu yönde değiştirdiğini ifade etmiştir. Ayrıca en iyi elastisite, darbe dayanımı ve yorulma dayanımını ağırlıkça %0,5 NK içeren numunelerde gözlemlemiştir.

Bektaş N. B. ve Ağır İ. (2013) çalışmalarında cam elyaf takviyesinde iki eksenli, üç eksenli ve eksenli olmak üzere üç tür kumaşı polyester reçineli matriste kullanmışlardır. Çalışmanın devamında vakum infüzyon yöntemi ile ürettikleri kompozit plakaların düşük hız darbe deneylerini yapmışlar ve çalışmanın sonucunda, üç eksen/polyester kompozitin sırası ile %27 ve %22 oranında dört eksen/polyester ve iki eksen/polyester kompozitlerden darbe dayanım değerinin yüksek çıktığını ifade etmişlerdir.

Kim J.K., ve arkadaşları (2000) çalışmalarında farklı oryantasyon açılara sahip tek yönlü karbon elyaf takviyeli kompozitler ile karbon dokuma kumaşları (woven) karşılaştırmışlardır. Çalışmadan darbe mukavemetinin dokuma kumaşlarda daha iyi olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

Qian H. ve arkadaşları (2017) elyaf takviyeli polimer kompozitlere KNT'lerin ilave edilmesi performansı önemli ölçüde artırabilmektedir. Çalışmalarında, elyaf takviyeli nanokompozitlerin oluşturulmasına yönelik bugüne kadar ki ilerlemeyi gözden geçirmekte ve yeni nesil gelişmiş çok fonksiyonlu malzemelerin potansiyelini değerlendirmektedir. KNT tabanlı kompozitlerin oluşturulması için iki alternatif strateji, birleşik elyaf yüzeyine KNT'lerin doğrudan doğruya bağlanmasının karmaşık matriste dağılımı ile karşılaştırılmasıdır. Kompozitlerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerindeki değişim ve iyileştirmelerini açıklamışlardır.

Tian Y. ve arkadaşları (2017) çalışmalarında nanopartiküllerin elyaf ile epoksi arasındaki ara yüzey özelliklerine etkilerini, mikro ve makro-mekanik deneyler temel olarak değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak nanopartiküllerin ara yüzey özelliklerini etkili bir şekilde geliştirdiğini ifade etmişler. Kırılma yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu ile görüntülemişler ve alınan bu görüntülerden nanopartiküllerin, elyaf/epoksi kompozitlerinde kırılma esnasında daha iyi enerji yayımı ve daha etkili bir stres aktarımı sağladıklarını ifade etmişlerdir.

Mili F. ve arkadaşları (2001) E-cam/epoksi laminalı kompozit plakaların darbe karakteristiklerini, düşük hızlarda (3,1m/sn) alüminyum mermi etkisi altında deneysel olarak incelenmiştir. Bu hususta üç farklı katlı lamina [0<sub>2</sub>/90<sub>6</sub>/0<sub>2</sub>], [0<sub>3</sub>/90<sub>4</sub>/0<sub>3</sub>] ve [0<sub>4</sub>/90<sub>2</sub>/0<sub>4</sub>] için araştırma yapılmış ve mermi hızları ile kompozit plakaların laminasyon dizilerinin darbeye etkisini tartışmışlardır.

Ma ve arkadaşları (2016) E-cam/epoksi polimer kompozitler, farklı sıcaklık ortamlarında (199-295-100 K) kompozitlerin karşılaştıkları darbe tepkilerini araştırmışlardır. Görünür hasarlar ve bunların büyüklüğü görsel olarak incelenmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Darbe yükü, eğilme ve her hasar türünün enerji absorpsiyonu gibi etki parametreleri ile analiz etmişlerdir. Deneysel sonuçlar, kriyojenik koşullardaki kompozitlerin daha belirgin bir hasar sergilediğini ve diğer vakalara kıyasla daha sert olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, düşük sıcaklık koşullarında nispeten zayıf enerji emilimi göstermişlerdir. Ayrıca, iyileştirmenin, belirgin hasarı azaltabileceği ve kompozitlerinin enerji absorpsiyonunu arttırabildiği ifade etmişlerdir.

Warrier A. ve arkadaşları (2010) E-cam/epoksi kompozitlerine ilave ederek kompozitin termofiziksel özelliklere ve laminalar arası kırılma tokluğuna etkisini araştırmışlardır. KNT'lerin ilave edilmesinin, kırılma tokluğunda %10'luk bir artış sağladığını ifade etmişlerdir.

Fan Z. ve arkadaşları (2008) çalışmada, E-cam/epoksi kompozite KNT süspansiyonları stratejik olarak enjekte ederek geliştirilmiş geleneksel E-cam/epoksi kompozitlerin tabakalar arası kesme dayanımını (TAKD) incelenmiştir. Süspansiyonlar, yüksek hızlı mekanik karıştırma, ultrasonikasyon ve asit oksidasyon teknikleri kullanılarak hazırlamışlardır. E-cam/epoksi/KNT kompozitlerinin imalatında üç tip proses tasarımı araştırılmış ve onların göreceli avantajları tartışılmıştır.

Rahman M. ve arkadaşları (2013) çalışmada, E-cam/epoksi kompozitlerinin balistik performansı üzerine KNT etkisini araştırmışlardır. E-cam/epoksi panelleri KNT katkılı ve katkısız olarak hazırlamışlardır. Epoksi reçinede iki farklı ağırlık yüzdesi 0,3 ve % 0,5 kullanılmıştır. KNT'ler, sonikasyon ve 3 silindirli öğütme yöntemleri ile epoksi reçine içerisine dağıtımı yapılmıştır. E-cam kumaşlı kompozit paneller elle

yatırma ve ardından sıkıştırma kalıplama yöntemi ile üretilmişlerdir. Daha sonra üretilen numuneler balistik hız sınırını belirlemek için bir gaz tabancası seti kullanılarak farklı hızlardaki küresel mermi darbelerine maruz bırakılmıştır. Balistik hız hasar eşiğinin, ağırlıkça % 0,3 KNT'lü laminatlarda yaklaşık 15-19 m/s arttığını ifade etmişlerdir.

Adden S. ve arkadaşları (2006), RTM yöntemi ile üretilen kıvrımsız kumaşlardan yapılmış tüp şeklindeki numunelerin deneysel testlerindenini yapmışlardır. Çalışmanın temel odak noktası hasar davranışı olmasına rağmen, tüp örnekleri statik ve yorulma yükleri altında da test edilmiştir.

## **2.4 Burkulma Davranışları ile İlgili Çalışmalar**

Sayer M. (2014) çalışmasında E-cam/epoksi kompozit plakaları %5, %10, %15 oranlarında silikon karbid (SiC), alüminyum oksid ( $Al_2O_3$ ), boron karbid ( $B_4C$ ) ile modifiye ederek maksimum burkulma dayanım artışını boron karbid ile % 42 olarak tespit etmiştir.

Muthu J. ve Dendere C. (2014) araştırmalarında; ağırlıkça farklı oranlardaki (%0,1, 0,5 ve 1) karbon nanotüpler E-cam/polimer kompozite takviye edilerek mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda en iyi mekanik özellikler ağırlıkça % 0,5 karbon nanotüp katkısıyla sağlanmıştır. %0,5 karbon nanotüp oranında kırılma tokluğunun % 19 eğilme dayanımının % 8 arttığını ifade etmişlerdir.

Özben T. (2009) analitik ve sonlu eleman yöntemlerini kullanarak simetrik ve anti-simetrik kompozit levhaların kritik burkulma kapasitelerini tespit etmiştir. Kritik burkulma yükü hesaplanırken kompozit levhaların boyutları esas alınmıştır. Analizler farklı sınır koşulları kullanılarak burkulma değerleri bulunmuştur.

Pekbey Y. (2005) Kritik burkulma yükü ve gerilmeleri çubukların boylarına, kesitinin şekline, sertliğine ve yükleme koşullarına bağlıdır.

## 2.5 Çalışmanın Literatürdeki Yeri

Tabakalı kompozitler, elyaf tabakalarının reçineler ile birleştirilmesi sonucunda yüksek dayanımlı yapılar oluşturmak için tasarlanırlar. Ancak, tabakalı kompozit malzemelerin en büyük dezavantajı elyaf yönünde yüksek dayanım değerleri elde edilmesine rağmen elyaf takviyesine dik doğrultularda bu durumun geçerliliğini yitirmesidir. Bunun nedeni elyafa dik yönlerde takviyenin olmayışıdır. Bu nedenle, matrisce zengin ara yüzeyler kompozit malzemeler için zayıf bölgeler olup, kompozit elyaf yönüne dik yönlerde kuvvetlere maruz kaldığında kolaylıkla tabakalar arası hasarlar olabilir. Elyaf tabakalarına dik yönlerdeki mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için kullanılan yöntemlerden biri polimer matrisi modifiye etmektir.

Elyaf takviyeli kompozitlerde matris olarak kullanılan düşük elastikiyet modüllerine sahip epoksi reçinelerin dayanımları nano boyuttaki katkı malzemeleri kullanılarak artırılabilir. Bu sayede, kompozit mukavemetini arttıran matris-elyaf ara yüzey bağ kalitesi, reçineye katılan parçacık sayesinde etkin bir şekilde artırılabilir (Muthu ve Dendere 2014). Böger ve ark. (2010) epoksi reçine içersine karbon nanotüpler ilave ederek hazırlanmış nanokompozitler üretmiş ve bunların yorulmasını incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre karbon nanotüp modifiyesi kompozitlerin yorulma dayanımı arttırmıştır. Islam M.E., ve ark. (2015) elyaf takviyeli epoksi kompozitler içersine NK ve KNT'ler ilave ederek çekme dayanımı artışı elde etmişlerdir.

Üzümcü N., 2017, E-cam/epoksi takviyeli kompozitlere KNT'ler ilave ederek düşük enerjili darbelerde iyileşme elde etmiştir. Yavuz Ü., H. 2017, ise yine E-cam/epoksi kompozitlere NK ilave etmiş ve kompozitlerin yorulma dayanımını iyileştirdiğini belirtmiştir.

Böger ve ark., 2008 kompozitlerin mekanik özellikleri sadece elyaf ve matris tarafından belirlenmez. Bu iki eleman arasındaki ara yüzey davranışları da dikkate değer bir etki oluşturur. Kompozite uygulanan yük elyaf ve matris arasındaki ara yüzeyden elyaflara aktarılır, bundan dolayı elyaf-matris ara yüzey kompozitlerde mukavemeti etkileyen önemli bir etmendir. Karbon nanotüp katkılı kompozitlerin mekanik özelliklerinin literatürde farklılık göstermesi, matris-KNT ve elyaflar arasındaki bağ etkisinin bir göstergesi olabileceğini ifade etmişlerdir.

Bu tez çalışmasında, yukarıdaki literatüre alternatif olarak E-cam ve karbon elyaf kumaşlar farklı oryantasyon açılarında nano partikül katkılı kompozit haline getirilmişlerdir. Bu çalışmanın amacı, tabakalı kompozitlerde elyaf-matris ara yüzeyleri gibi kritik bölgelerde nanopartiküller (KNT, NK) kullanarak çekme, yorulma, burkulma ve darbe davranışlarını iyileştirmektir. Nanopartiküllerin elyaf yüzeylerine uygulanmasında el yatırması yöntemi tercih edilerek kolay ve ekonomik bir üretim sağlanmıştır.



## **3. KOMPOZİT MALZEMELER**

### **3.1 Tabakalı Kompozitler**

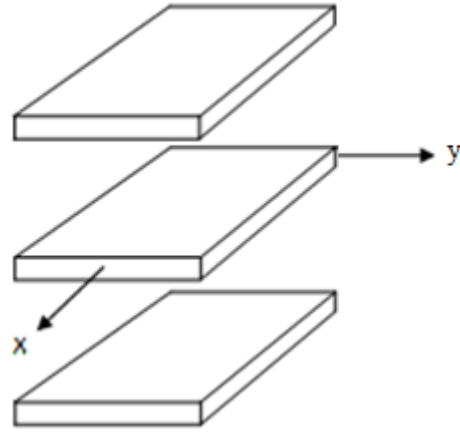
Tabakalı kompozitler, matris ile takviye elemanı olan elyaflardan meydana gelir. Matris kısmını oluşturan reçine termoplastik veya termoset içerikli olabilir. Takviye elemanı olarak kullanılan elyaflar ise genellikle E-cam ve karbondan üretilmektedir bununla birlikte balistik uygulamalarda kevlar takviyeler ön plana çıkmaktadır.

Tabakalı kompozitler yani laminant yapılar, malzeme eksenleri yönünde farklı yönlerdeki tabakaların üst üste konarak bir araya getirilmesi sonucunda oluşturulmaktadır. Laminantlar, imal yöntemine göre matris içerisinde rastgele yönlü, tek yönlü veya farklı yönlü elyaf takviyeli tabakalardan oluşturulabilirler (Şahin, 2006).

Laminalı kompozitler için amaç bu kompozitlerin maruz kalacağı kuvvetlere uyumlanması için mukavemet ve rijitliğin doğrusal bağımlılığından yararlanmaktır. Bu sebeple laminalar bu amaç için yönlendirilirler. Tabakalı kompozitler, simetrik ve antisimetrik olarak iki farklı şekilde gruplandırılırlar. Simetrik veya antisimetrik tabakalamanın tayininde tabaka açıları, malzeme ve tabaka kalınlığındaki farklılıklar belirleyici olur (Yağcı, 2007).

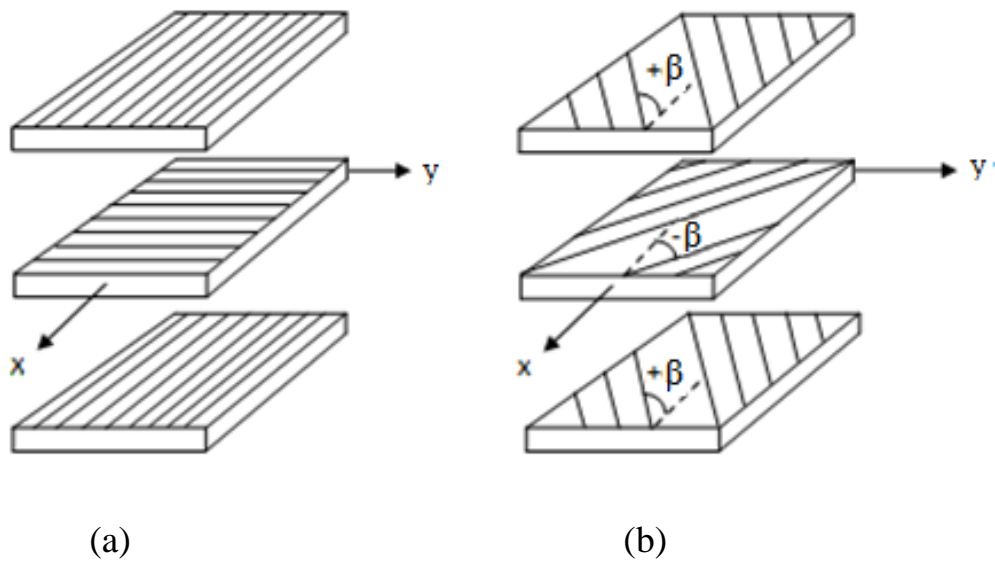
#### **3.1.1 Simetrik tabakalanma**

Hem geometrik özellikler hemde malzeme özellikleri ile orta düzleme göre simetrik olan tabakalandırmaya “simetrik tabakalanma” denmektedir ( Yağcı, 2007). Simetrik tabakalama, izotropik ve ortotropik olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Farklı kalınlıklardaki izotropik tabakalar, hem malzeme özellikleri bakımından hem de geometrik bakımdan orta eksene göre simetrik olarak konumlandırılırsa, izotropik simetrik tabakalar oluşturulur (Yağcı, 2007). Şekil 3.1’de simetrik olarak yerleştirilen üç tane izotropik tabaka görülmektedir.



Şekil 3.1: İzotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit.

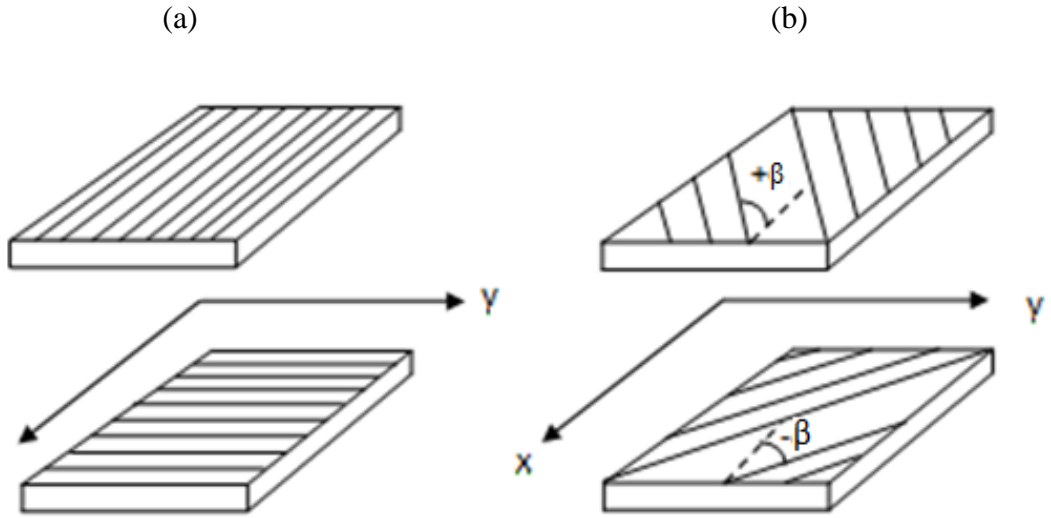
Ortotropik simetrik tabakalanma da kendi arasında özel ve genel olarak iki kısma ayrılmaktadır. Özel ortotropik tabakalanma, ya özel ortotropik malzemenin tek bir katmanında ya da tabakalı orta yüzey çevresinde simetrik olarak konumlandırılmış özel ortotropik laminalardan oluşmuştur. Genel ortotropik simetrik tabakalanma da ise orta yüzey çevresinde simetrik olarak konumlandırılmış genel ortotropik laminalardan oluşmaktadır. Bu yapıda, her lamina eşit kalınlıktadır ve birbirine bitişik bu laminalar birbirlerine göre açılmal olarak zıt işaretlere sahiptir (Yağcı, 2007). Şekil 3.2’de ortotropik simetrik tabakalanmanın her iki türüne ait örnekler görülmektedir. (Şekil 3.2.(a))’da  $(0^0/90^0)$  takviyeli çapraz katlı tabakalı kompozit malzemede, (Şekil 3.2 (b))’de ise  $(\beta +, \beta -)$  takviyeli açılı katlı tabakalı kompozit malzemede tabakalar orta yüzeye göre simetrik dizilmiştir.



Şekil 3.2: Ortotropik tabakalardan oluşan simetrik tabakalı kompozit: (a)  $(0^0/90^0)$  takviyeli çapraz katlı tabakalı kompozit, (b)  $(\beta +, \beta -)$  takviyeli açılı katlı tabakalı kompozit

### 3.1.2 Anti-simetrik tabakalanma

Tabakalı kompozitlerin uygulamasında dizayn ihtiyacını karşılamak için antisimetrik tabakalamaya ihtiyaç duyulur (Yağcı, 2007). Eğer tabakalamada, lamina kalınlıkları, ve malzemeler orta eksenin yukarısına ve aşağısına göre aynı özelliklerde, fakat orta eksenin yukarısına ve aşağısına göre eşit mesafedeki lamina oryantasyonu, birbirine zıt ise bu tür tabakalamaya antisimetrik tabakalama denmektedir (Yağcı, 2007). Antisimetrik tabakalanma, çapraz katlı ve açılı katlı olarak ele alınmaktadır. Antisimetrik çapraz-katlı bir tabakalanma (Şekil 3.3 (a))’da görüldüğü gibi  $0^0$  ve  $90^0$ ’de değişen temel malzeme doğrultusunda uzanan, üst üste konulmuş çift sayıda ortotropik ince tabakalardan meydana gelir. Antisimetrik açılı-katlı bir tabakalama ise orta eksene bir tarafındaki tabakalamanın koordinat eksenleriyle  $-\beta$  derecesinde açı oryantasyonu yapması ve diğer tarafındaki tabakalanmanın koordinat eksenleriyle  $+\beta$  derecesinde oryantasyon yapması ile oluşan özdeş aynı kalınlıktaki ince tabakalardan meydana gelir (Yağcı, 2007). (Şekil 3.3 (b))’de bu tabakalanmaya ilişkin örnek görülmektedir.



Şekil 3.3: Anti-simetrik tabakalı kompozit: (a) antisimetrik çapraz-katlı bir tabakalanma, (b) açılı-katlı tabakalanma.

### 3.2 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Diğer malzemelere göre daha hafif ve özgül mukavemeti yüksek olan kompozit malzemeler, yaygın olarak birçok farklı uygulama alanında kullanılmaktadır. Kompozit malzemenin bazı sektörlerde kullanım alanları Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Kompozit malzemeler, özellikle havacılık, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

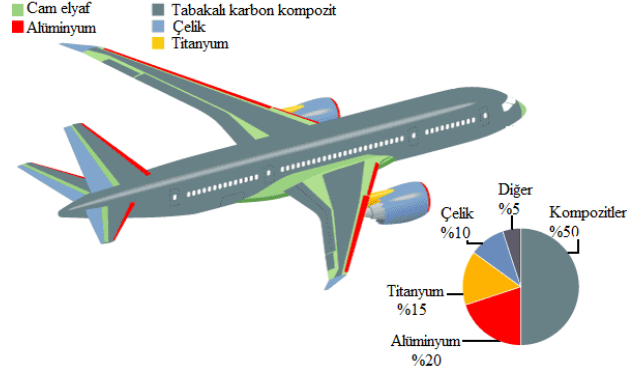


Şekil 3.4: Kompozitlerin bazı kullanım alanları (falmx.com,2019).

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemeler karşısında yüksek çekme mukavemetinin veya yüksek elastik modülünün yoğunluğa olan oranının büyük değerlerde elde edilmesinden dolayı son yıllarda bunların üretim yöntemleri üzerinde daha çok çalışmalar yapılmıştır.

**Havacılık endüstrisinde kompozitler;** Tasarımlar güvenlik, hız ve ekonomikliğe yönelik optimize edilmişlerdir. Kompozit malzemeler bu amaçlar doğrultusunda uygun bir malzeme gurubu oluşturmaktadırlar. Özellikle gelişmiş kompozit malzemeler havacılık endüstrisinde geniş uygulama alanına sahiptirler. Hafif polimerik matris malzemelerin üstün mekanik özellikleri sayesinde uçak ve helikopterlerin yapısal bileşenlerinde kullanılmaktadır (Algan, 2009).

Bir uçaktaki en önemli kriterlerden birisi yüksek hızlara çıkabilmesi için hafif olmasıdır. Bu yüzden uzay araçları ve uçaklar gibi hava araçları kompozit malzemelerin ideal kullanım yerleridir. Uçak bileşenlerinin yapısında karbon elyaf ya tek başlarına veya sandiviç bileşenler halinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 3.5’de Boing 787 uçağında kompozit malzemelerden oluşan bileşenler sunulmaktadır.



Şekil 3.5: Boing 787 uçağında kompozit malzemelerden oluşan bileşenler (Söyleyici, 2011).

**Otomotiv endüstrisinde kompozitler:** Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kullanımı giderek artmakta ve birçok üretici bu teknolojileri geliştirmek ve uygulamak için çalışmaktadırlar. Özgül yakıt sarfiyatını düşürmek için araçlarda ağırlığı azaltmak başlıca çalışma alanları arasındadır. Bu sebepten kompozit malzemeler rakipsiz birer malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Karbon elyaf şasili Formula 1 araçları Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: Karbon elyaf/epoksi gövdeli Formula 1 araçları (motorsportmagazine.com).

**Denizcilik endüstrisinde kompozitler:** Hafif ve yüksek korozyon direnci gibi malzeme özellikleri bir gemi tasarımında büyük önem taşır. Diğer tüm alanlarda olduğu gibi, deniz alanındaki kompozitlerin kullanımı yıllardır hızla artmaktadır.

Cam elyaf tekne üreticileri cam fitil, dokuma kumaşlar, paspaslar, vinlyester ve polyester reçineler, epoksi, balsa, köpük ve petek özleri, E-cam, S-cam, karbon ve kevlar lifleri gibi çeşitli takviye materyallerini bu sektörde kullanmaktadırlar.

### 3.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin günümüzde araştırmacılar, tasarımcılar ve üreticiler tarafından yaygın olarak kabul görmesindeki en önemli etkenler sağladıkları değişik performans ve avantajlarıdır. Bu avantajların hepsi aynı anda sağlanamaz. Gerçekte de bu özelliklerin belli değerlerde olmasına gerek yoktur. Kullanım alanlarına ve özelliklerine bağlı olarak gerek duyulan özellikler artırılır ve böylece uygun kompozit malzemeler kullanılan matris ve elyafların özelliklerini taşıyacak şekilde tasarlanırlar.

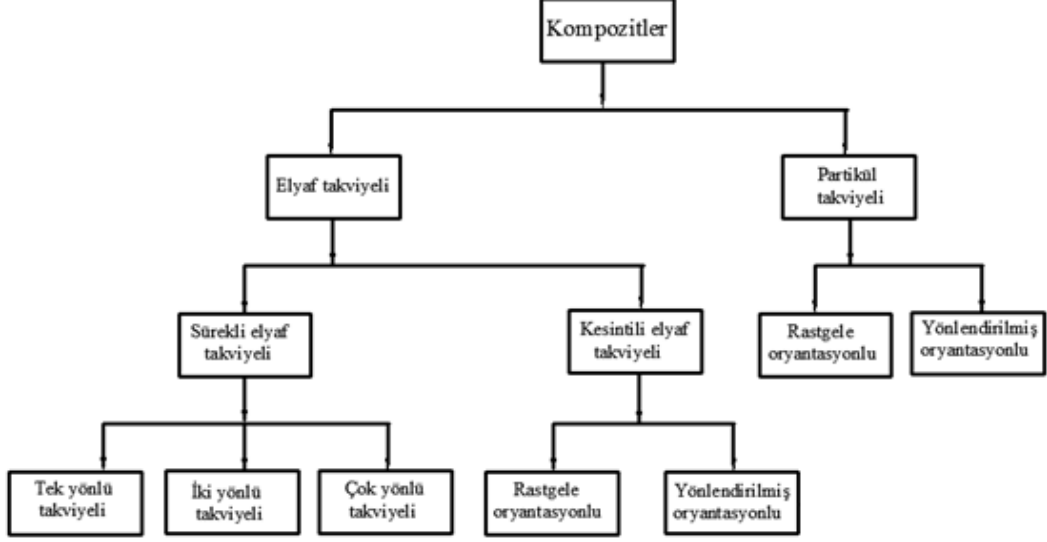
- Yüksek mukavemet
- Yüksek rijitlik
- İyi korozyon direnci
- Aşınma direnci
- Hafiflik
- Isı izolasyonu
- Akustik izolasyon
- Çekicilik ve estetik görünüm
- Yorulma ömrü
- İmalat kolaylığı

Kompozit malzemelerin bu avantajları yanında bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar aşağıda verilmiştir (Şahin, 2006).

- Ham maddenin pahalı olması
- Üretimin güçlüğü
- İşlenmesinin güç olması
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışı
- Tamir edilmelerinin yeni problemler yaratabilmesi (Şahin, 2006)

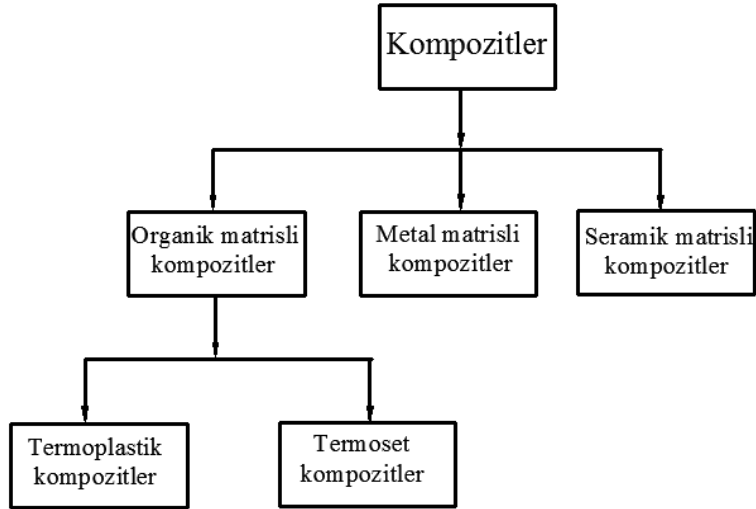
### 3.4 Kompozit Malzemenin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler genellikle iki ayrı temel başlıkta sınıflandırılır bunlar takviye ve matris malzemesine göre. (Şekil 3.7). (Balcıoğlu, 2012)



Şekil 3.7: Kompozitlerin takviye malzemesine göre şematik sınıflandırması (Balcıoğlu, 2012).

Kompozitlerin bir başka sınıflandırması kullanılan matrise göre yapılmıştır. Bunalar, organik matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üç geniş katagoriye ayrılırlar. Organik matriks kompozitler terimi genellikle, termoplastik ve termoset kompozitler olarak adlandırılan kompozitler olmak üzere iki sınıfa ayrılır (Şekil 3.8) (Balcıoğlu, 2012).



Şekil 3.8: Kompozitlerin matris malzemesine göre şematik sınıflandırması (Balcıoğlu, 2012).

### 3.5 Tekstil Takviyeler

Kompozit takviye kumaşları başlıca iki boyutlu ve üç boyutlu kumaşlar olarak iki ana başlık altında toplanabilmektedir. Bu tez çalışmasında iki boyutlu dokuma kumaşlar (unidirectional) ve üç boyutlu (Non-crimp fabric) kumaşlar kullanılmıştır. Bu iki kumaş türü aşağıda başlıklar altında açıklanmıştır.

#### 3.5.1 İki boyutlu dokuma (2D) kumaşlar

Dokuma kumaşlar iki veya daha fazla iplik sisteminin birbirleri arasından geçmesiyle üretilmektedir. Dokuma kumaşlar, özellikle cam, karbon ve aramid takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılır. Dokuma takviye malzemelerinin atkı ve çözüğü yönündeki stabilitesi ile kumaş kalınlığıyla bağlantılı olarak örtücülük faktörü oldukça yüksektir. Dokuma kumaşların kullanım alanlarının genişlemesi, 1980'li yılların başında cam elyaflarına göre daha yüksek dayanıklılığa sahip karbon ve aramid elyafların geliştirilmesiyle mümkün olmuştur. Şekil 3.9'de kompozit güçlendirmesinde kullanılan bazı iki boyutlu dokuma kumaş yapıları gösterilmiştir.

Birden fazla elyaf oryantasyonu gerektiren uygulamalar için, 0° ve 90° elyaf oryantasyonları birleştiren bir kumaş yararlıdır. Dokuma kumaşlar, çözüğü (0°) elyafları ve atkı (90°) elyaflarının düzenli bir desen veya dokuma tarzında birbirine geçirilmesiyle üretilir. Kumaşın bütünlüğü, elyafların mekanik olarak birbirine kenetlenmesiyle korunur. Aşağıda, daha yaygın olarak bulunan dokuma stillerinden bazıları açıklanmaktadır: ([netcomposites.com/guide-tools](http://netcomposites.com/guide-tools))

**Düz (plain) kumaşlar:** (Şekil 3.9 (a)) her çözüğü elyafı, her atkı elyafının altında ve üzerinde dönüşümlü olarak geçer. Kumaş, iyi stabilite ve makul gözeneklilik ile simetriktir. Dokumaların en zor olanıdır ve yüksek elyaf kıvrımı seviyesi, diğer dokuma stillerine kıyasla nispeten düşük mekanik özelliklere neden olur. Yüksek TEX'e sahip elyaflar aşırı kıvrım oluşturduğu için genelde bu tür kumaşlarda kullanılmazlar ([netcomposites.com/guide-tools](http://netcomposites.com/guide-tools)).

**Kabartma çizgili kumaşlar (twill):** (Şekil 3.9 (b)) bir ya da daha fazla çözüğü elyafı, sırayla tekrarlanan bir şekilde, iki ya da daha fazla atkı elyafının üzerinde ve altında



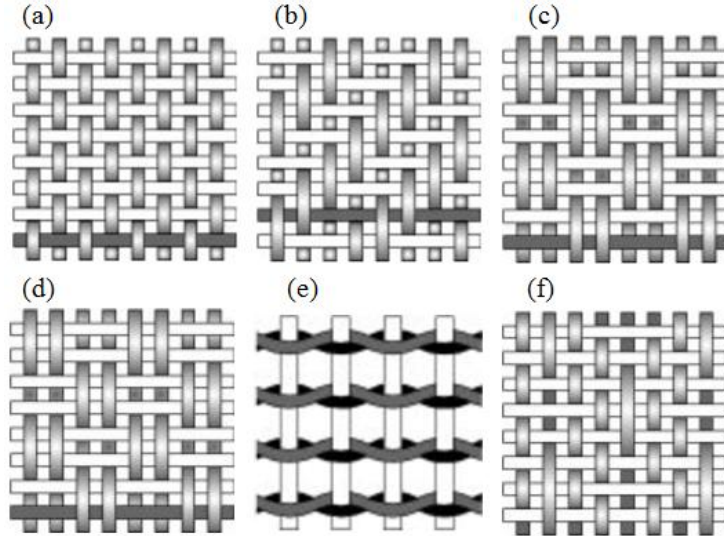
örülür. Bu düz veya kırık diyagonal görselliğe hitap eder. Ayrıca kumaşın kıvrımı az olduğu için daha pürüzsüz bir yüzeye ve biraz daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir ([netcomposites.com/guide-tools](http://netcomposites.com/guide-tools)).

**Saten dokuma kumaşlar;** (Şekil 3.9 (c)) çözgü ve atkı daha az kesişim oluşturmak için temelde dimi dokunmuş örgülerdir. Düşük kıvrım, iyi mekanik özellikler verir. Saten örgüleri, elyafların en yakın mesafede dokunmasına ve sıkı bir örgü ile kumaş üretebilmelerine olanak sağlar. Asimetri kumaşın bir yüzünün, çözgü yönünde baskın olarak çalışan elyaflara sahip olmasına neden olurken, diğer yüzün ağırlıklı olarak atkı yönünde ilerleyen elyafları vardır ([netcomposites.com/guide-tools](http://netcomposites.com/guide-tools)).

**Sepet (basket) tip dokuma kumaşlar;** (Şekil 3.9 (d)), iki veya daha fazla çözgü elyafın dönüşümlü olarak iki veya daha fazla atkı elyafı ile yer değiştirmesi haricinde düz örgü ile aynıdır. İki atkıyı geçen iki çözgü düzenlemesi 2x2 sepet olarak tanımlanmıştır, fakat lif düzeninin simetrik olması gerekmez. Bu nedenle 8x2, 5x4 vb. olması mümkündür. Sepet örgüsü daha düzdür ve daha az kıvrılarak düz bir örgüden daha güçlü, ancak daha az kararlıdır. ([netcomposites.com/guide-tools](http://netcomposites.com/guide-tools))

**Leno dokuma stili;** (Şekil 3.9 (e)), düşük elyaf sayısına sahip kumaşlarda stabiliteyi artırır. Bir bitişik çözgü elyaflarının, her atkı yerinde etkili bir şekilde "kilitlemek" için bir spiral çift oluşturacak şekilde ardışık atkı elyafları etrafında büküldüğü bir düz örgü şekli. Leno dokumadaki kumaşlar normal olarak diğer dokuma stilleri ile birlikte kullanılırlar ([netcomposites.com/guide-tools](http://netcomposites.com/guide-tools)).

**Mock Leno;** (Şekil 3.9 (f)) ara sıra çözgü elyaflarının, düzenli aralıklarla, fakat genellikle birkaç elyafın birbirinden ayrıldığı, alternatif alttan içe geçmeli tabakadan saptığı ve bunun yerine her iki veya daha fazla elyafı birbirinden ayıran düz bir dokuma versiyonu. Atkı yönünde sıklık benzerdir. Pürüzlü yüzeye ve ek gözenekliliğe sahip bir dokuma stildir ([netcomposites.com/guide-tools](http://netcomposites.com/guide-tools)).



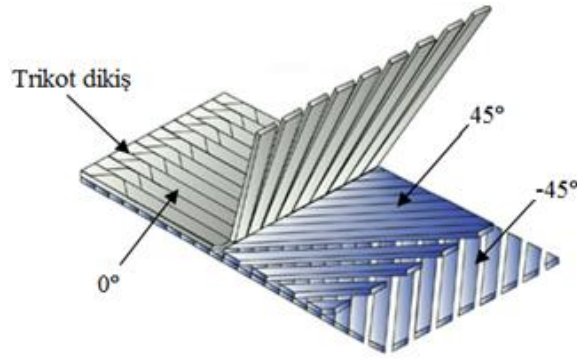
Şekil 3.9: Tekstil takviyelerin farklı dokuma tipleri (a) düz plain, (b) kabartma, (c) saten, (d) sepet, (e) leno, (f) mock leno (netcomposites.com/guide-tools, 2019).

### 3.5.2. Üç boyutlu (3D) kumaşlar

Kompozit malzemenin güvenilirliği veya sağlamlığı, güçlendirme elemanının x, y ve z doğrultularındaki mukavemetine yani lif dağılımına ve lif miktarlarına bağlıdır. Ayrıca yapıdaki lifler veya iplikler arasında da bağlantı olması, yani yapının bütünleşmiş olması gerekir. Üç boyutlu tekstil yapıları lif sürekliliği, yapıda istenen doğrultuda iplik veya liflerin çok katmanlı olarak yatırılabilmesi ve doğrultularının kontrol edilebilmesi, yapıdaki lif veya ipliklerin kesişimlerinin yeterli olması nedeniyle yük taşıyan elemanların imalatı için en uygun güçlendirme malzemesi olarak kabul edilmektedirler. Bu yapılarda katmanlar arası delaminasyon ve ayrılma riski ortadan kaldırılmaktadır (Ağır, 2007).

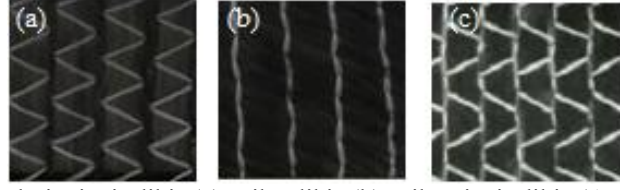
Üç boyutlu örme kumaşlar, hem çözügü örmeciliği hem de atkı örmeciliği yöntemlerinin her ikisi ile üretilebilmektedirler. Çok eksenli çözgü örme (Multi-Axial Warp Knitting) örme ve dokumanın kombinasyonundan meydana gelen bir üretim yöntemi olarak bilinir, fakat üretilen kumaşın görüntüsüne göre kıvrımsız kumaşlar olarak bilinmektedirler (Tong ve ark, 2002). Kıvrımsız dikişli kumaşlar, triko ve zincir dikişleri ile birbirine bağlanan, 90° atkı iplikleri, 0° çözgü iplikleri, ve  $\pm\theta^\circ$  çapraz ipliklerden oluşmaktadırlar. Kalınlık yönünde kompozitin malzemelerin mukavemetini arttıran bu yapılar özellikle tek yönlü kumaşların yerini almaya

başlamışlardır (Ağır 2012). Atkı örmeciliğinde ise diğer yapılarda olmayan üstün bir özelliği, bu sistemlerin kompozit üretiminde rahatlıkla istenilen şekli almasıdır.  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  derece yönünde ek bir takviyelendirme gerektiğinde aksel yönde doğrusal dolgu iplikleri yapıya kolaylıkla ilave edilebilmektedir. Bu yapıların dezavantajı ise, yapının hacimsel olarak daha fazla yer kaplaması ve yapı içerisinde hava boşlukları bulundurmasıdır, bundan dolayı kompozit malzemelerin üretiminde bu yapıların kullanılması durumunda elyaf-matris oranı normalden düşük olmaktadır Atkı örmeciliği ile oluşturulan yapılar sınırlı bir kullanım alanı sunarken, çok yönlü çözgülu örme yapıların uygulama alanları son yıllarda hızla artmaktadır (Gündoğan, 2010). Şekil 3.10'da bu tez çalışmasında da kullanılmış olan üç eksenli kıvrımsız kumaşın şematik görüntüsü sunulmuştur.



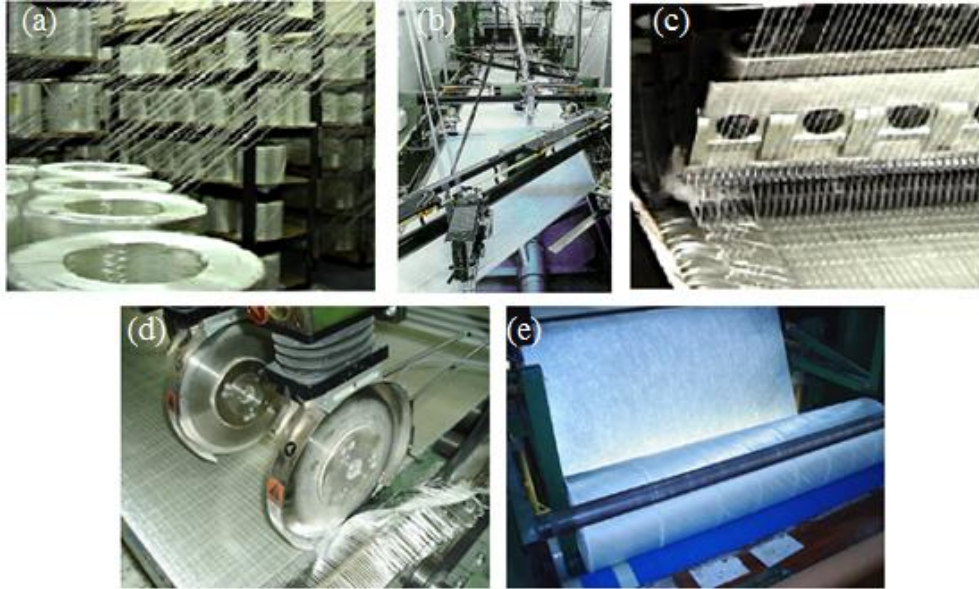
Şekil 3.10: Kıvrımsız kumaşın şematik görünümü (Ağır, 2012).

Dikiş ipliklerinde genellikle polyester bazlı malzemeler kullanılmaktadır. Fakat, bazen cam elyaf veya kevlar iplikler de kullanılabilir. Yüksek dayanımlı bu iplerin kullanılmasındaki amaç elyafa dik yöndeki (transverse) malzeme dayanımı artırmanın yanı sıra daha iyi delaminasyon ve darbe direnci elde etmektir. Bu tür kumaşlara yapısal kıvrımsız dikişli kumaşlar denir. En çok kullanılan dikiş desenlerinden olan zincir dikiş, triko dikiş ve triko-zincir dikiş Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Eğer kıvrımsız dikişli kumaşa çözgü ( $0^\circ$ ) doğrultusunda elyaf bulunuyorsa, kumaşın yapısal bütünlüğünü sağlamak için mutlaka triko veya triko-zincir dikiş kullanılması gerekir (Vallons, 2009).



Şekil 3.11: Dikiş desenleri: zincir dikiş (a), triko dikiş (b), triko zincir dikiş (Ağır, 2012)

Kıvrımsız dikişli kumaşlar genellikle lüks yatlar ve rüzgar tribünlerinin kanatlarındaki kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Özellikle havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde kullanımları günden güne artmakta, gelecekte bu alandarda kullanılan rakipsiz bir malzeme olacağı öngörülmektedir. Bu yapı ile tek seferde farklı kumaş katmanlarına sahip bir yapı oluşturulduğundan işçilik maliyetleride diğer türlere göre düşüktür. Kıvrımsız dikişli kumaşların ipliklerinde büzülme olmadığından dolayı özellikle aynı düzlemdeki mekanik özellikleri, eşdeğer elyaf hacim oranına sahip dokuma kumaşlara kıyasla oldukça mukavimdir. Kıvrımsız dikişli kumaşlar, özellikle normal dokuma kumaşlara kıyasla daha kolay bir şekilde kompleks şekiller elde edilebilmektedir (Ağır, 2012). Bu tez çalışmasında da kullanılan kıvrımsız dikişli kumaşların üretim aşamaları Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12: Kıvrımsız dikişli kumaşlar için üretim aşamaları a) makinenin elyaf rulolarından beslenmesi, b) çok eksenli çözgülü dokuma makinesi, c) dikiş çubuğuna monte edilmiş iğneler, d) kumaşın kesilmesi, e) kumaşın rolo halinde sarılması (vectorply.com,2019).

### 3.6 Elyaf Malzemeleri

Elyaf lar kompozit malzemede ana bileşenlerdir. Yük bu bileşenler üzerinde taşınır. Hacimsel olarak reçineden daha fazla yer kaplar. Elyaf ların tipinin, miktarının ve oryantasyonunun uygun seçimi özgül ağırlık, çekme mukavemeti ve modülü yorulma mukavemeti, elektriksel ve termal iletkenlik gibi kompozit malzemenin karakteristiklerini etkilemesi nedeniyle çok önemlidir (Pekbey, 2005). Piyasada yaygın kullanılan bazı elyaf ların özellikleri Tablo 3.1’de listelenmiştir.

Tablo 3.1: Yaygın kullanılan elyaf özellikleri (Pekbey, 2005)

Fiber Türü	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (%)
E-cam	2,54	72,4	3450	4,8
Karbon	1,86	380	5650	0,7
Aramid (Kevlar-49)	1,45	131	3620	2,8

#### 3.6.1 Cam elyaf lar

Cam elyaf lar, sıradan bir camdan yüksek saflıktaki kuartz camına kadar pek çok tipte üretilebilmektedirler. Cam elyaf üretimi için silis kumu, kaolen, kireçtaşı, kolemanit gibi ham malzemeler ile birlikte kuru halde iken yaklaşık 1600°C civarında ısıtılır ve oluşan cam eriği ısıtılmış kovanlardaki delik çaplarına bağlı olarak sabit bir çap oluşturacak şekilde kontrol altında soğumaya bırakılarak cam elyaf demetleri elde edilir. Cam elyaf ların; çekme mukavemetleri, birim yük başına çeliğinkinden yüksektir. Isıl dayanımları düşüktür. Yanmazlar, fakat yüksek sıcaklıklarda yumuşarlar. Kimyasallara karşı dayanıklıdırlar. Nem emme davranışı göstermezler, fakat cam elyaf takviyeli kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisinden dolayı bağ kuvvetlerinde azalma olabilmektedir. Elyaf ların kimyasal kaplama işlemleri ile bu zayıflık giderilebilmektedir. Yalıtkan oldukları için elektriği iletmezler. Cam elyaf imalinde silis kumuna çeşitli kimyasal katkı malzemelerin kompozisyonlarına göre farklı cam elyaf tipleri bulunmaktadır. Bunlar A-cam (Alkali), yüksek miktarda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği zayıf fakat yüksek kimyasal dirence sahiptir. C-cam (Korozyon) camı, kimyasal maddelere karşı direnci çok yüksektir. E-cam (Elektrik) camı, düşük alkali

oranı nedeni ile elektriksel yalıtkanlığı diğer cam elyaflarına kıyasla çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksek ve suya karşı direnci de oldukça iyidir. Islak ve nemli ortamlarda kullanılan kompozitlerde malzemelerde genellikle E-camı tercih edilir. Yüksek mekanik dayanımı istenen kompozitler için geliştirilen cam elyaf tiplerine Amerika'da S-camı (Mukavemet camı), Avrupa'da ise R-camı (Mukavemet camı) adı verilmektedir. Bu cam elyafının çekme dayanımı E-camına göre %33 oranında daha yüksektir. Bununla birlikte yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direnci sergilemektedirler. Bu özellikleri nedeniyle asgari alanlar, havacılık ve uzay endüstrilerinde tercih edilmektedir. Cam elyaflar genellikle epoksi ve plastik reçineler ile kullanılmaktadırlar (Altan 2009).

### **3.6.2 Karbon elyaflar**

Karbon elyaflar yüksek spesifik mukavemetlerinden dolayı havacılıkta ve bazı spor uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sertlik ve dayanım ile düşük ağırlık kombinasyonu avantajına rağmen maliyet giderlerinden dolayı kullanımları cam elyaflardan sonra ikinci sırada gelmektedir. Düşük maliyetli karbon elyaflar piyasaya sürülmeye başlansada mevcut koşullarda hala alüminyuma göre birkaç kat pahalıdır. Maliyet farklılığı kompozit malzemelerin özelliklerine uygun spesifik yerler için kullanılmaya devam edeceğini göstermektedir (Pekbey, 2005).

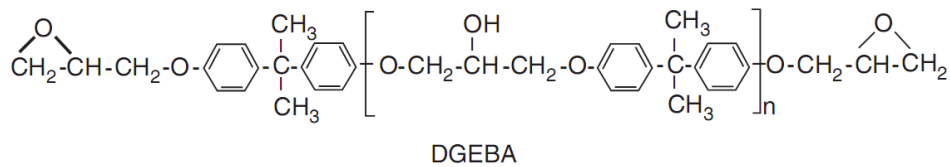
### **3.6.3 Kevlar elyaflar**

Kevlar elyaflar düşük özgül ağırlık ve yüksek çekme mukavemetine sahiptirler. Bu elyaflar darbe şartlarında yüksek tokluk gösterirler. Hafiflik, yüksek çekme mukavemeti ve darbe hasarına karşı direncin önemli olduğu birçok denizcilik ve havacılık uygulamalarında kullanılır. Kevlar elyaflar yüksek çekme mukavemetine sahiptir ancak düşük sıkıştırma dayanımına sahiptir. Kevlar elyaflar darbe kuvvetine karşı cam ve karbon elyaflarla karşılaştırıldığında daha sünek davranış gösterirler (Pekbey 2005).

### 3.7 Polimerik Reçineler

Polimerik reçineler termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Termoplastikler, uzun hidrokarbon moleküllerinden meydana gelir ve bu moleküller birbirlerine Van Der Waals bağları ile bağlanırlar. Bu bağların, kovalent bağlara kıyasla zayıf olmalarından dolayı termoplastikler kolaylıkla eriyebilmektedirler. Bununla birlikte sıcaklığın artması halinde termoplastik reçinelerin viskoziteleri kolaylıkla azalabilmektedirler. Dolayısı ile termoplastiklere sıcaklıkla tekrar şekil verilebilmektedir. Termosetler de yine uzun hidrokarbon zincirlerinden meydana gelmiştir. Fakat, termosetlerde uzun molekül zincirleri de birbirlerine kovalent bağlar ile bağlanmıştır. Bu fark termosetler ile termoplastikleri birbirlerinden ayıran en önemli farklılıktır. Bu yüzden termosetler üç boyutlu spesifik katı yapıya sahip olup, termoplastiklere göre daha dayanıklı, daha az sünek ve daha rijit davranış gösterirler (Eskizeybek, 2012).

Bu tez çalışmasında epoksi matrisli kompozitler araştırılmıştır. Epoksi reçine termoset bir polimer olup epoksid monomerinin poliamid sertleştiriciler ile reaksiyonu ile meydana gelir. Epoksiler elyaf takviyeli kompozitler üretmenin yanında genel amaçlı olarak kaplama veya yapıştırıcı olarak da kullanılabilir. Epoksiler diğer polimerlerden farklı olarak, yüksek mekanik özellikleri ve çevresel etkilere karşı olan yüksek dirençleri sayılabilir. Epokisilerin birçok güçlü kimyasala karşı olan dayanımları ve çok çeşitli yüzeylere kolaylıkla bağlanabilmesi epoksi reçineleri önemli bir yapıştırıcı sınıfına sokar. Polimerleşmeden önce hem epoksid monomerleri hem de setleştirici olarak kullanılan poliamidler yüksek viskoziteye sahip olmalarına rağmen, epoksi reçineler vakum infüzyon tekniği kullanılarak kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan reçine türüdür. İlavenen, epoksiler kürlenme sırasında düşük bir büzülme eğilimi gösterdiklerinden iç gerilme oluşumu düşük olmaktadır (Eskizeybek 2012). Şekil 3.13.'de bu tez çalışmada kullanılmış olan doymamış bir epoksi türü diglisidil ether bisfenol A'nın moleküler yapısı verilmektedir.



Şekil 3.13 Epoksi diglisidil ether bisfenol A'nın moleküler yapısı (Kim ve ark., 2009)

### 3.8 Katkı ve Dolgu Malzemeleri

Partiküllerde mikron boyutundan nano boyuta geçildiğinde fiziksel özelliklerde etkileyici değişiklikler meydana gelmektedir. Nanometre boyutundaki malzemeler sahip oldukları hacme kıyasla oldukça büyük yüzey alanlarına sahiptirler (Luo ve Daniel, 2003). Birçok önemli fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin yüzeysel özellikler tarafından tayin edildiği bilindiğine göre, nano boyuttaki bir partikül büyük boyutlardaki partiküllerden farklı özelliklere sahip olmaktadır. Bu duruma partiküller ve elyaflar boyutundan incelendiğinde, birim hacim için yüzey alanı malzemenin çapı ile ters orantılıdır. Bundan dolayı, küçük çaplı malzemeler birim hacim için büyük yüzey alanları sunmaktadırlar (Luo ve Daniel, 2003). Nanomalzemeler özellikle nanotüpler, fullerenler nanoelyaflar, ve grafen, halen çalışmalara detaylı bir araştırma konusu oluşturmaktadır. Bu malzemeler genel olarak geometrilerine göre sınıflandırılarak tabaka yapılar, elyaflar, parçacıklar olarak ayrılmaktadırlar (Schimidt ve ark., 2002).

Polimer matrisleri fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için nanoparçacıkların dolgu ve katkı malzemesi olarak kullanılması günümüzde araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Nanometre boyutundaki bu parçacıkların yüzey alanları  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ 'a kadar çıkabilmektedir (Gojny ve ark., 2005). Bu büyük yüzey alanları nedeni ile yükün matristen nanoparçacığa transferi kolaylaşarak matrisin mekanik özelliklerini arttırmaktadırlar (Njuguna ve ark., 2007).

#### 3.8.1 Karbon nanotüpler

Karbonnanotüplerin yapısı, grafenin tüp haline getirilmiş bir formu olarak düşünülebilir. Literatürde cidar sayılarına göre üç farklı karbon nanotüp tanımlanmaktadır. Bunlar, tek cidarlı, iki cidarlı ve çok cidarlı karbon nanotüplerdir. Karbon nanotüpler dayanıklı, hafif yüksek elektrikselsel iletkenlik ve termal özelliklere sahip boy ve çap oranları büyük nano boyuttaki malzemelerdir. Karbonnanotüplerin özellikleri boylarına, çaplarına, yüzeysel özelliklerine ve yönlendirmelerine bağlıdır (Fan, 2007).



Günümüzde, karbon nanotüplerin büyük miktarlarda üretimi için ark-deşarj, lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar yoğunlaştırma gibi yöntemler tercih edilmektedir. Bu yöntemlerin çeşitli gaz ortamlarında veya vakum altında gerçekleştirilmektedir.

Grafit elektrotlar ile gerçekleştirilen ark boşalması ile açığa çıkan yüksek sıcaklıklar sonucu grafit elektrot buharlaşarak meydana gelen yapıda ağırlıkça %30 civarında karbon nanotüp bulunmaktadır (Eskizeybek, 2012).

Karbon nanotüpler mükemmel termal ve mekanik özelliklere sahip olsalar bile (Tablo 3.2) bu özelliklerinden takviye elamanı olarak etkili şekilde yararlanabilmek için bunların reçine içerisinde düzgün bir şekilde homojenize edilerek topaklanmanın önlenmesi gereklidir (Eskizeybek, 2012).

Tablo 3.2: Karbon nanotüplerin bazı önemli özellikleri (Eskizeybek 2012)

Özellikler	Karbon nanotüpler	Yorumlar
Elastisite modülü	270 GPa-1 TPa	En güçlü çelikten 10-100 kat dahabüyüktür.
Çekme dayanımı	11-63 GPa	Yüksek dayanımlı çelikten 150-900 kat daha büyüktür.
Termal iletkenlik	200 W(mK)	Elmasın iki katıdır.
Maksimum akım yoğunluğu	10 A/m <sup>2</sup>	Bakır tellerden 1000 kat daha büyüktür.

### 3.8.2 Nanokil partikülleri

Kil, kristal yapıları birbirinden farklı olan bir kaç mineralin oluşturduğu mineral karışımının genel adıdır. Doğada bol miktarda bulunmaktadır ve saf olarak bulunması son derece zordur. Yapısındaki kil mineralleri dışında en çok kalker, silis, mika ve demir oksit bulunmaktadır.

Nanokil, nano metre aralığında, en az tek boyutlu olan aynı zamanda boy-en oranları son derece yüksek olan partiküllerdir. Tabakalı yapılar ve zengin iç kimyasına sahip olduğu, aynı zamanda kolay temin edildiği, her bölgede bulunduğundan dolayı hafif ve yüksek performanslı nano kompozit üretimi konusunda umut vermektedir. Nano kil, çok çeşitli, yüksek performanslı nano-kompozit malzemeler için yeni nesil bir

malzemedir. Killer, kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılmıştır. Aşağıda bazı kil türleri verilmiştir.

- Kaolin grubu; kaolinit, halloysit, diksit
- Simektit grubu; montmorillonit, biedelit, nontronit
- Illit grubu,
- Klorit, grubudur.

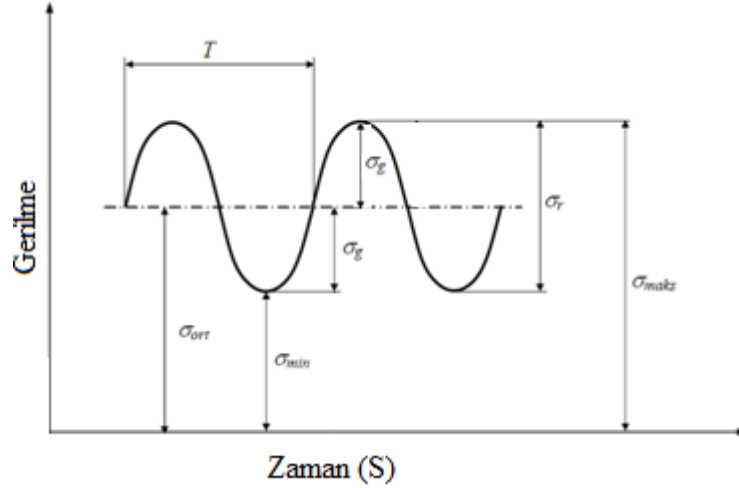
### **3.9 Epoksi-KNT-Elyaf Ara Yüzeyi**

Tabakalı kompozit malzemeleri oluşturan bileşenlerden elyaflar, kompozit malzemede yükü taşıyan bileşen olup matris ise elyaflara yükü aktaran ve elyafları bir arada tutan ana unsurdur. Ancak kuvvet aktarımında elyaflar ile matris arasında kalan ve ara yüzey olarak tanımlanan bölge kompozitlerde kilit rol oynamaktadır. Bu bölgedeki mekanik özellikler aktarılacak yükün tayininde bire bir rol oynadığı için, ara yüzeyin tasarımı önemli bir parametredir. Ara yüzeyin kimyasal ve mikroskopik yapısı bu bölgenin özelliklerini belirleyen başlıca etmendir (Eskizeybek, 2012). Karbon nanotüpler ile matris arasındaki yüzey bağlarının zayıf olması durumunda karbon nanotüpler matris içerisinde süreksiz elyaflar gibi davranış gösterirler. Karbon nanotüp takviyeli kompozitlerde beklenen davranış, kompozit malzemeye uygulanan yükü matristen elyaflara etkin bir şekilde aktarımına aracılık etmesidir.

Karbon nanotüpler ile matris arasındaki yük aktarımının hangi mekanizmalar aracılığı ile gerçekleştiğinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda literatürde iki mekanizmanın adı geçmektedir. Bunlardan ilki mekanik kilitlenme; bu mekanizmada matris içerisindeki karbon nanotüpler sert ve cidarlı yapıları sayesinde matris ve elyaflara fiziksel olarak saplanarak kilitlenirler. Diğer mekanizmada ise karbon nanotüpler ile matris arasında atomik boyutta olan bağlanmadır. Bu bağlanmada karbon nanotüpler ile matris arasında kimyasal olarak tepkime oluşmakta ve moleküler zincirleri birbirlerine bağlanmaktadır. Bu hususta bağlanma miktarını arttırmak amacı ile karbon nanotüpler fonksiyonelleştirilme işlemine tabi tutulurlar. Bu işlemle karbon nanotüplerin yüzeyleri kimyasal olarak aktifleştirilerek matris ile uyumlu kimyasal yapıya getirilmektedir (Eskizeybek, 2012).

### 3.10 Yorulma Yükleme Durumları

Yorulma, malzemelerin statik gerilme veya yük altındaki davranışlarından farklı olarak tekrarlı gerilme veya yüklemelerin söz konusu olduğu durumlardaki davranışlardır. Genel olarak yük değişimi sinüzoidal olur. Tekrarlı yükleme çeşitleri sırasıyla; genel değişken ( $R=0,1$ ) (çeki-çeki), dalgalı değişken ( $R=0$ ) ve tam değişken ( $R=-1$ ) yükleme tipleridir. Bu tez çalışmasındaki yorulma deneylerinde yükleme durumu olarak, Şekil 3.14'de gösterildiği gibi genel değişken yükleme durumu kullanılmıştır.



Şekil 3.14 Genel değişken yükleme durumu ( $R=0,1$ ) (çeki-çeki) (Altan 2009)

Tekrarlı yüklemelerde gerilmeler  $\sigma_{maks}$  maksimum üst gerilme ile  $\sigma_{min}$  minimum alt gerilme arasında değişir. Ortalama gerilme  $\sigma_{ort}$  maksimum ve minimum gerilmelerinin cebirsel ortalamasıdır. Ortalama gerilme aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.1)$$

Gerilme aralığı  $\sigma_r$ ; aşağıdaki gibi maksimum gerilme ile minimum gerilme arasındaki cebirsel farka eşittir.

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.2)$$

Gerilme genliği  $\sigma_g$ , gerilme aralığının yarısına eğittir. Ağağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\sigma_g = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3.3)$$

Gerilme oranı ( $R$ ) ve genlik oranı ( $A$ ) olmak üzere iki tip tekrarlı tesir halinde yorulma yapılır ve ağağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Gerilme oranı; } R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \text{ genlik oranı; } R = \frac{\sigma_g}{\sigma_{ort}} \quad (3.4)$$

Diğer yorulma parametreleri ağağıdaki gibidir.

Periyot süresi=  $T$  (s)

Yük tekrar sayısı =  $N$

Yük frekansı =  $f = \frac{1}{T}$  (Hz)

### 3.10.1 S-N (Wöhler) eğrileri

S-N (Wöhler) eğrisi, malzemenin yorulma hasarına uğradığı yük tekrar sayısı karşılık gelen gerilmenin büyüklüğünü göstermektedir. S-N eğrileri oluşturulurken gerilme ve yük tekrar sayıları logaritmik olarak gösterilmektedir.

S-N eğrileri numerik veya bir test cihazı kullanılarak oluşturulabilmektedir. Günümüzde genellikle test cihazı yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde deney numunesi test cihazına yerleştirilerek numunede çatlak veya hasar meydana gelene kadar tekrarlı yük yük uygulanmaktadır (serdarkarakurt.com, 2019).

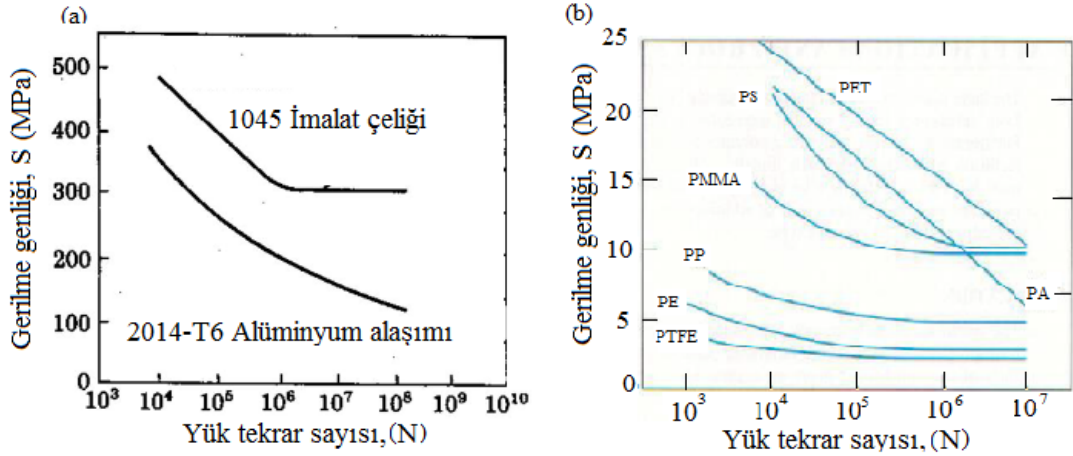
S-N eğrileri genellikle sol üstten başlar ve yorulma yükünün azalmasıyla birlikte sağ alta doğru eğim oluşturur. Bu durum, yüksek gerilmeli yüklemelerde, düşük gerilmeli yüklemelere kıyasla hasarın daha az çevrim sayısında olduğunun bir

göstergesidir. Bu tür bir yorulma testinde, yük tekrar sayılarının frekansı, hasar oluşumu için gerekli olan çevrim sayısını etkilemez (serdarkarakurt.com, 2019).

Bir S-N eğrisinin oluşturulabilmesi için aynı özellikteki deney numunelerin farklı gerilme seviyelerinde teste tabi tutulması ve bunların logaritmik tabanda grafik haline getirilmesi gerekir (serdarkarakurt.com, 2019).

Çelik gibi bazı malzemeler, sonsuz ömür bölgesine sahiptir. Uygulanan gerilme seviyeleri belirli bir seviyenin altındaysa, hasara neden olmadan sonsuz sayıda çevrim uygulanabilir. Kompozit malzemelerde bir gerilmeye karşılık gelen çevrim sayısı  $10^6$ 'dan büyükse sonsuz ömür kabul edilmektedir.

Plastiklerde ise S-N eğrilerinin logaritmik ekseninde lineer değişim gösterir. Çelik ve alüminyum alaşıma ait örnek S-N diyagramı (Şekil 3.15 (a))'da ve bazı polimerlere ait Polietilen tetrafat (PET), Poliamid (PA), Polistiren (PS), Polietil metakrilat (PMMA), Polipropilen (PP), Polietilen (PE), Politetrafloroetilen (PTFE) S-N diyagramı Şekil (3.15 (b))'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15 S-N grafiği örnekleri (a) çelik ve alüminyum (slideplayer.com, 2019), (b) çeşitli polimerler, (Can, 2004)

### **3.11 Darbe Test Metodları ve Hasar Değerlendirmeleri**

Darbe, düşük veya yüksek hızlarda olmak üzere çok kısa süreli olarak malzemeye etkiyen anlık bir dış kuvvet olarak tanımlanabilir. Darbeler düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak başlıca iki sınıfta incelemek mümkündür. Darbe hızının 1 ila 10 m/s arasında olması durumunda düşük hızlı darbe olarak kabul görmektedir. Buna örnek olarak kompozitin üzerine düşen bir el aleti veya sert bir cisim düşük hızlı darbe olarak kabul edilebilir. Bu çarpma kompozit plakanın iç tabakalarında hasar oluşturan ve delaminasyonları meydana getiren darbelerdir(Sayer, 2009).

Balistik limitte olan darbeler ise yüksek hızlı darbelerdir ve bunların hızları ise 10 m/s ile 74,1 m/s'ye kadar olan hızlar olarak belirlenmiştir (Sayer, 2009).

Örnek olarak bir uçağın havalanması sırasında uçağa çarpan bir taş parçası yüksek hızlı darbe sınıfındadır. Bu tür darbede de küçük ağırlıktaki bir parçanın yüksek hızla çarpması durumudur. Bu tür darbelerde parçacık kompozit malzemeye saplanmakta veya delip geçebilmektedir.

Malzemelerin üzerine gelebilecek bu iki türdeki darbelerin, malzemede meydana getirebileceği hasarın önceden bilinmesini sağlamak amacı ile test mekanizmaları oluşturularak, bunların dinamik özelliklerinin belirlenmesi (kırılma tokluğu, enerji absorbe etme kabiliyeti, çentik hassasiyeti ve mukavemet düşüşü hasar mekanizmaları) amacıyla yapılan bazı darbe testleri mevcuttur (Sayer, 2009 ). Bu kapsamda darbe testleri düşük hızlı olanlar; Pendulum darbe test metodu ve Izod ve Charpy darbe test metotları, ağırlık düşürmeli darbe ve ankastre edilmiş kiriş darbe test metodlarıdır. Yüksek hızlı darbe test metotları ise Split-Hopkinson basınçlı çubuk test metodu ve basınçlı hava ile darbe test metodu.

### **3.12 Tabakalı Kompozitlerde Darbe Hasar Modları**

Kompozitlerin elyaflarına aksenal yönde bir gerilme meydana gelmesi durumunda, bu yönde bir darbe mukavemeti gösterirler. Ancak elyafa dik yönde (transverse) darbe veya gerilmeye maruz kaldıkları durumda ise bu mukavemet zayıf kalarak düşük darbe mukavemeti sergilemektedirler. Ve bu durum kolaylıkla hasar oluşmasına neden olmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlere uygulanan çeşitli

seviyelerdeki darbeler (düşük veya yüksek darbe hızları), bu kompozitlerin hasar ve sonrasında meydana gelen yıkıcı hasar modlarının belirlenmesini sağlayan önemli bir ayırıcı özelliktir. Bu özellik bölgesel ve global seviyelerdeki veriler, (hasar/yıkıcı) hasar modlarının ikisini de içermektedir. Bölgesel ve global veriler genelde malzeme ve geometrik özelliklere bağlı verilerden elde edilmektedir. Bunları elyaf özellikleri, matris özellikleri, ematris/elyaf arayüzey özellikleri, elyaf yönlendirme açıları ve elyafların dizilim sırası, numunenin bulunduğu ortam şartları, numunenin rijitliği ve sabitlenme şekli, vurucunun boyutu ve şekli gibi birçok özellik şeklinde sıralanabilmektedir (Sayer, 2009).

Genel olarak bir kompozit malzemenin darbeye maruz kalması ile oluşan darbe hasarı elyaf hasarı, delaminasyonlar, matris çatlaklarını, içermektedir. Düşük hızlı darbelerde, matris çatlakları ile başlayan hasar ilerleyerek farklı elyaf oryantasyon açılarındaki tabaka ara yüzeylerinde delaminasyonların olmasına sebep olurlar. Kompozit malzemelere uygulanan darbe enerjisinin artması durumunda delaminasyonlar ve sonunda da elyaf hasarları meydana getirerek, vurucu ucun numuneye saplanması ve en sonunda da kompozit numunenin vurucu uç tarafından delinmesi gerçekleşir (Sayer, 2009).

**Matris hasarı:** Genel olarak tabakalı/polimerik kompozitler üzerine yapılan çalışmalardan anlaşıldığı üzere, darbeye maruz kompozit malzemenin gösterdiği darbe davranışları reçine sisteminin toklukluğuna bağlıdır. Bu özellik, kompozit malzemenin gerilme yoğunluğu etkisini azaltma kabiliyeti, kayma çatlaklarına karşı gösterdiği direnç ve şekil değiştirme enerjisine ait bir ölçünün ifadesidir. Yapılan çalışmalara göre, termoplastik matrisli kompozitlerin daha yüksek tokluk sergiledikleri anlaşılmaktadır. Matris çatlakları kompozitlerde numunenin darbe uygulanan yüzeyinde oluşan yüksek temas gerilmelerinden dolayı başlar. Darbe meydana geldikten sonra kompozit numunede birçok matris çatlakları oluşur. Darbe hasarının matris çatlakları ile başlaması tabakaların ara yüzeylerinde delaminasyonlar meydana getirir. Bu bağlamda çeki ve kayma çatlakları olarak iki tip matris çatlakları meydana gelmektedir (Sayer 2009).

Çeki çatlakları, eksenel düzlemdeki normal gerilmelerin, tabakaların elyafa dik yönde direncinin aşılmasıyla meydana gelir. Kayma çatlakları ise orta yüzeydeki bir

açıda meydana gelir ki, bu da elyafa dik yöndeki kayma gerilmelerinin çatlak oluşumu ve yayılmasına etkisini göstermektedir (Sayer 2009).

**Delaminasyonlar:** Bitişik laminalar arasında yapışmanın azalmasıyla oluşarak kompozit plakanın dayanımının düşmesine sebep olan hasarlardır. Deneysel çalışmalar delaminasyonun sadece farklı elyaf yönlendirme açılarındaki tabakalar arasında meydana geldiğini rapor etmektedir. Eğer iki bitişik lamina aynı yönlü elyaf yönlendirmesine sahip ise bu iki lamina arasında delaminasyon oluşabilmektedir. Kompozite plakaya üst yüzeyinden darbeye maruz bir tabakada, farklı oryantasyonlu elyaflarda lamina arayüzeylerinde ve alt lamina arayüzeylerinde elyaf oryantasyonlarına göre oluşan delaminasyonlu bölgeler yarfıstığı veya dikdörtgen şeklinde olabilmektedir. Delaminasyonun başlamasına sebep olan başlangıçtaki kinetik enerjinin sınır değerini belirlemek zor olduğundan dolayı birkaç deneysel testin yapılması gerekmektedir. (Sayer, 2009).

**Elyaf hasarı:** Kompozitlerin üretiminde kullanılan elyaflar, hasar toleransının geliştirilmesinde ve hasar kontrolünde önem arz etmektedir. Örnek olarak eşdeğer darbe enerjilerinde, kompozit numunenin enerji absorbe etme kabiliyeti, daha az veya daha fazla elyaf hasarı ile sonuçlanabilmektedir. Bir kompozit numunenin hasarında, yüksek kırılma şekil değişimine sahip bir elyaf, tok bir reçine sistemi, dikişli veya örgülü bir lamina kullanılarak laminalar arasında uyumlu bir düzen oluşturulması durumunda da bu kompozitin numunenin darbe mukavemeti geliştirilebilmektedir.

Elyafın elastisitesi genelde matrisin elastisitesinden yüksek olduğu için elyaflar daha rijit gözükümler. Bu sebeple elyaf türü delaminasyonların başlamasına ve matris çatlağında önemli bir rol oynamaktadır. Fakat yüksek darbe enerjilerinde elyaf özellikleri ve elyaf dizilimi etkisini yitirmektedir (Sayer, 2009).

### 3.13 Burkulma Modları

Burkulma hesapları yapılırken kısa ve orta uzunluktaki çubuklarda Johnson eşitliği kullanılırken uzun çubuklarda Euler eşitliği kullanılmaktadır. Bu çalışmada uzun numuneler kullanılmış ve bu yüzden Euler'e yoğunluk verilmiştir. Burkulmadaki



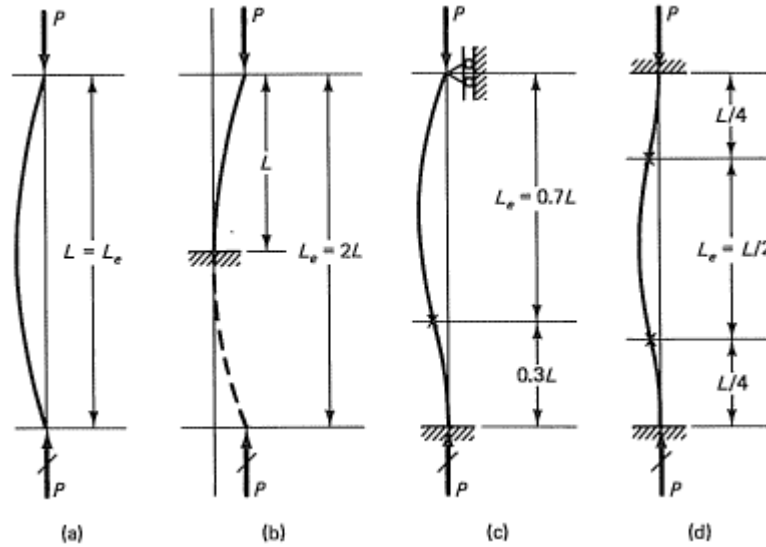
kritik yük Euler burkulma yükü olarak bilinir. Burkulma yükü Euler'e ulaştığında başka bir yük artışı olmasa da burkulma ani olarak gerçekleşir. Kritik Euler burkulma denklemi çubuğun güvenli yük limitini açıkça ifade eder. Bu yük limitine ulaşıldığında çubuk stabilitesini kaybederek daha fazla yük taşıyamaz. Bu eşitlik sabit-sabit sınır şartları için aşağıdaki gibidir.

Eşitlik 3.5'de,  $I$  bölgedeki en küçük ikinci moment,  $E$ , elastisite modülü,  $L$ , çubuğun uzunluğu ve  $P_{kr}$  çubuğun taşıyabileceği maksimum kritik yük, çubuktaki en küçük  $P$  değerini bulmak için Şekil 3.16 (d)'deki deneylerin yapıldığı yükleme koşullarına göre  $L$  etkili uzunluğu temsil eder (Popov 1990). Tez çalışmasında Şekil 3.16 (d)'deki sınır şartı öngörülerek burkulma deneyleri yapılmıştır.

$$P_{kr} = \frac{4\pi^2 E_{ef} I}{L^2} \quad (3.5)$$

$$E_{ef} = \frac{8}{h^3} \sum_{j=1}^{N/2} (E_x)_j (z_j^3 - z_{j-1}^3) \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6'da  $E_{ef}$  efektif elastisite modülü,  $h$  plakanın kalınlığı,  $N$  tabaka sayısı,  $E_x$  ilgili tabakanın elastisite modülü  $j$  tabaka numarası, ve  $z_j$  nötr düzleme olan mesafedir.

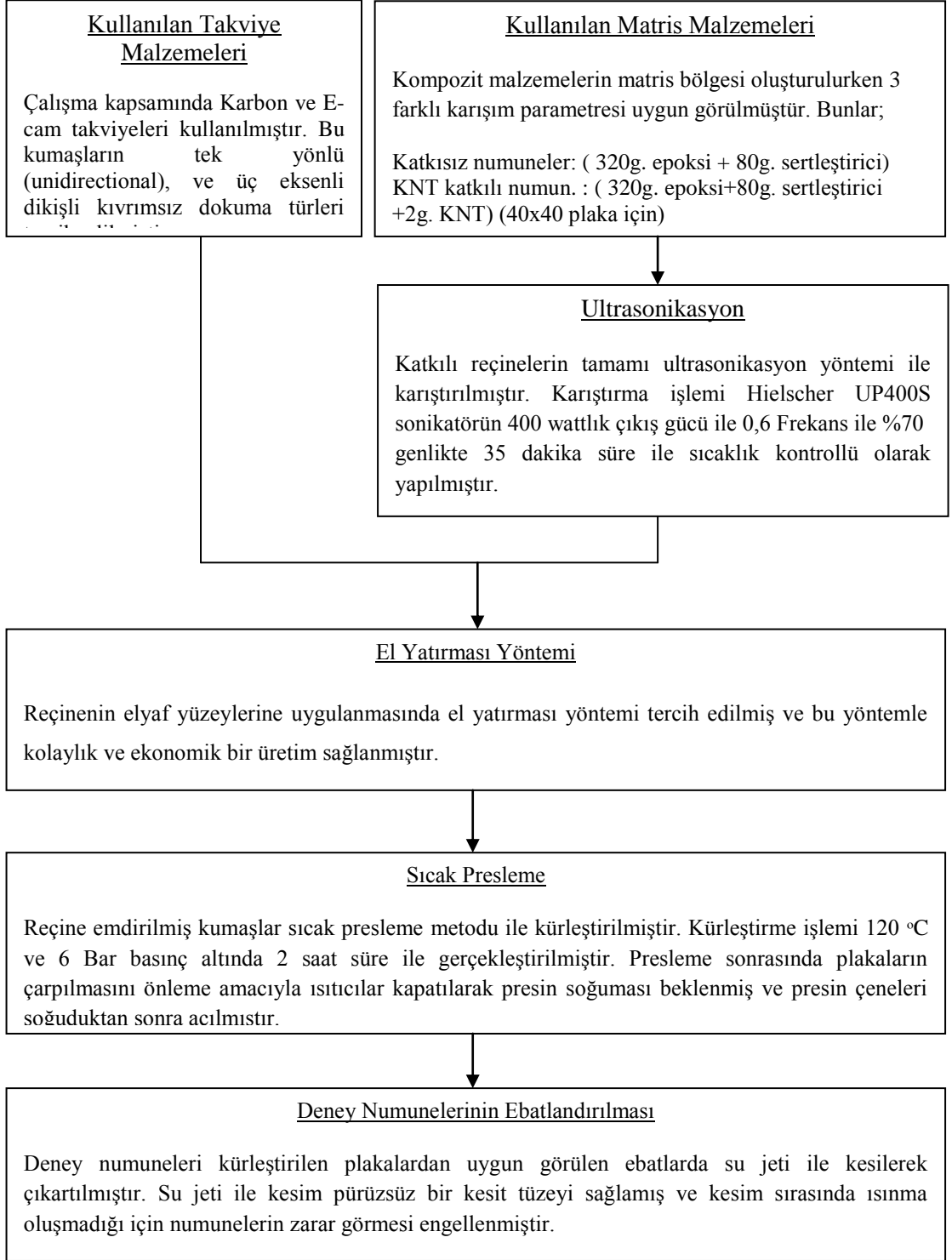


Şekil 3.16: Çeşitli yükleme koşullarının burkulmaya etkisi (Popov, 1990)

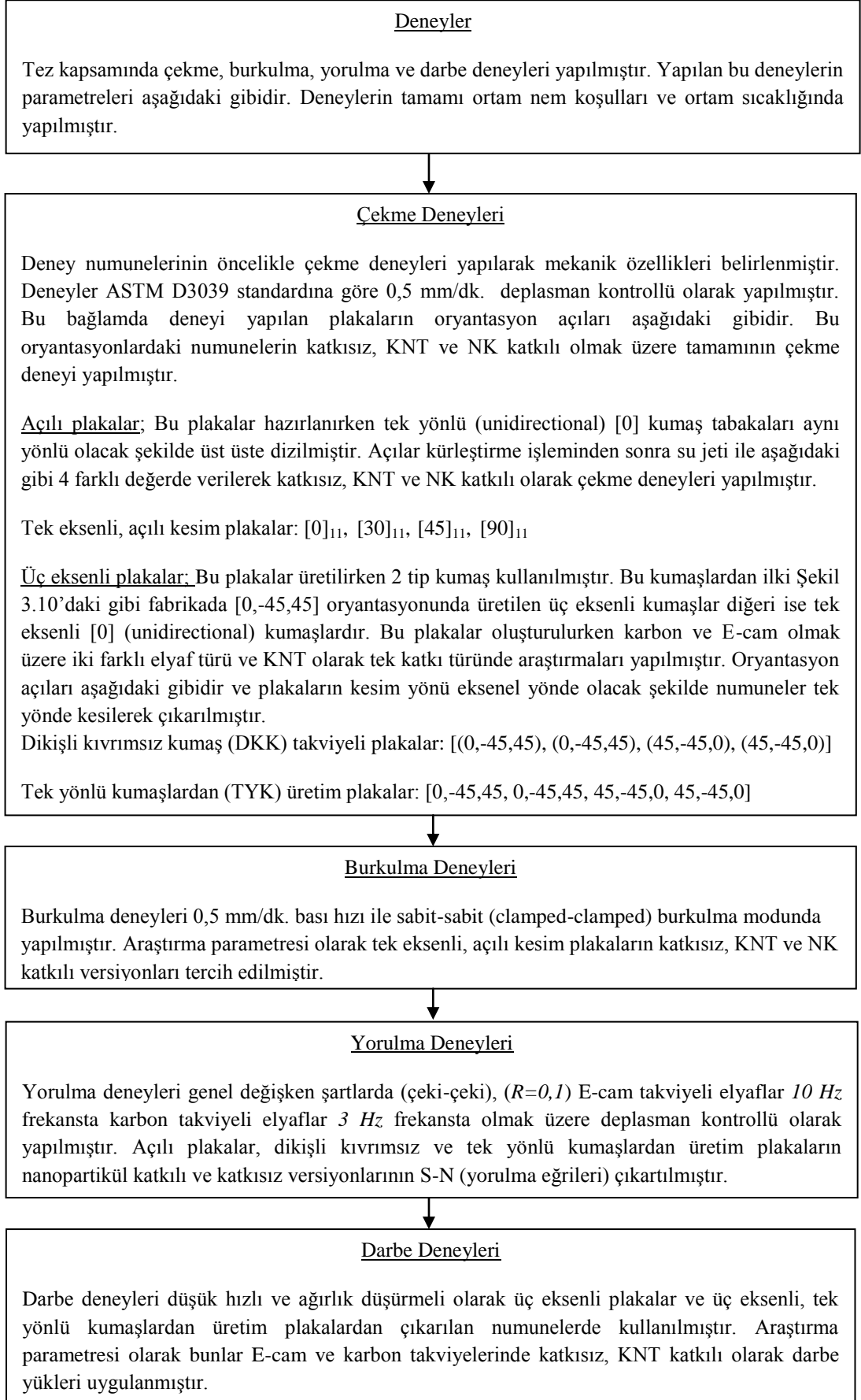
#### 4. MALZEME ve YÖNTEM

Bu bölüm; kompozit plakaların üretimini, kompozitlerin karakteristik özelliklerinin anlaşılması amacıyla yapılan deneysel çalışmaları ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçları kapsamaktadır. Çalışmada tabaka oryantasyon açılarına yönelik KNT ve NK içerikli bir üretim ve dikişli kıvrımsız kumaşlar ile tek eksenli (unidirectional) kumaşların kullanıldığı KNT içerikli diğer bir üretim yapılmıştır. Üretimi yapılan bu kompozitler kendi içlerinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Çalışma sürecinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 4.1'deki ve Şekil 4.2'deki şematik akış diyagramı hazırlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında üretilen tüm kompozit plakalarda el yatırması yöntemi kullanılmış ve nanopartiküller reçine içerisine ultrasonik karıştırıcı yardımı ile ses dalgaları kullanılarak dağıtılmıştır. KNT ve NK partikülleri reçinenin ağırlığının %0,5'i oranında reçineye ayrı ayrı ilave edilmiştirler. Bu oranın tercih edilme nedeni literatür incelendiğinde KNT partiküllerinin bu orana kadar pozitif etki etmesi ve bu orandan sonra topaklanmalar oluşturarak kompozit malzemede gerilme yığılmalarına sebep olarak malzemenin dayanım değerlerini düşürmesidir. Ayrıca reçine bu oranda doyuma ulaşmakta ve daha fazla partikül kompozit malzemenin dayanım değerlerini düşürmektedir.



Şekil 4.1: Kullanılan malzeme ve metodların şematize hali.



Şekil 4.2: Yapılmış olan deneysel çalışmaların şematize hali.

## 4.1 Kompozitlerin Üretim Süreci

Üretim sürecinde farklı aralıklarla iki farklı firmaya iki üretim yaptırılmıştır.(Tablo 4.1) Yapılan her iki üretim de el yatırması metodu kullanılmış ve sıcak presleme yapılmıştır. Aradaki fark Fibermak Ltd. Şti.'de yapılan ilk üretimde sadece E-cam/epoksi bazlı kompozitlerde tabaka oryantasyon açıları ve KNT ile NK katkılarının etkisi araştırılmıştır. Meduza Karbon Ltd. Şti.'de yapılan ikinci üretimde ise E-cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozitlerde KNT katkısının etkisi araştırılmıştır.

Tablo 4.1: üretilen kompozit plakaların yapısal özellikleri

Firma	Reçine	Sertleştirici	Elyaf	Nanopartikül	Elyaf yönlendirmesi
Fibermak Ltd. Şti.	Araldite LY 1564	Aradur 3487	E-cam	KNT ve NK	$[0_{11}]$ (0°,30°,45°,90°)
Meduza Karbon Ltd. Şti.	EP 828 Epikote	EK 875 Epikure	E-cam ve Karbon	KNT	4x[(0°/45°/-45°)]

### 4.1.1 Nano partiküllerin reçine içerisine dağıtılması

Nanopartikül takviyeli kompozitlerin performansını etkileyen en önemli iki faktör, partiküllerin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması ve partiküllerin elyaf ile matris arasındaki ara yüzey yapışmasıdır. Nanopartiküllerin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması, nanopartiküllerin matris tarafından ıslatılabilmesi gibi etkenler, nanopartiküllerin takviye elemanı olarak göstereceği performansı etkileyen en önemli konulardır (Eskizeybek 2012).

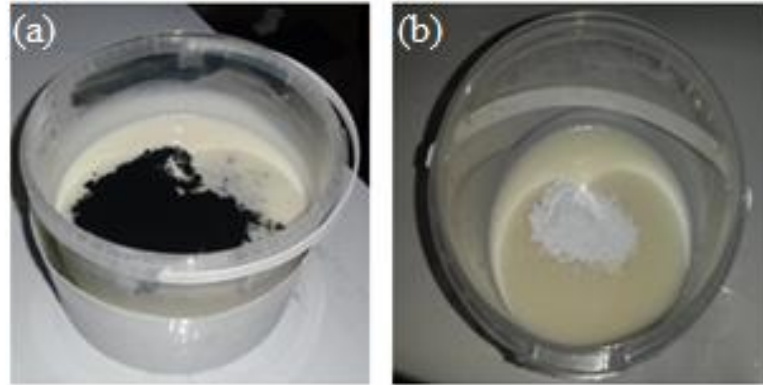
Bu çalışmada kullanılan Nanomer NCs Esan nano 1-140 kodlu NK partikülleri Eczacıbaşı Şirketi İstanbul'dan, -OH fonksiyonelli KNT partikülleri ise Ege Nanotek şirketi aracılığı ile İsviçre'den ithal edilmiştir.

Nanopartiküllerin reçine ile karıştırılması çok güçlü bir fiziksel karıştırma yöntemi olan ultrasonikasyon yöntemi ile sıcaklık kontrolü sağlanarak yapılmış ve karıştırma süresi ile sonikasyon şiddeti literatür çalışmaları referans alınarak (35 d. 0,6 Hz, %70 genlik) belirlenmiştir. KNT ve NK katkıların genel özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2: KNT ve NK partiküllerinin genel özellikleri.

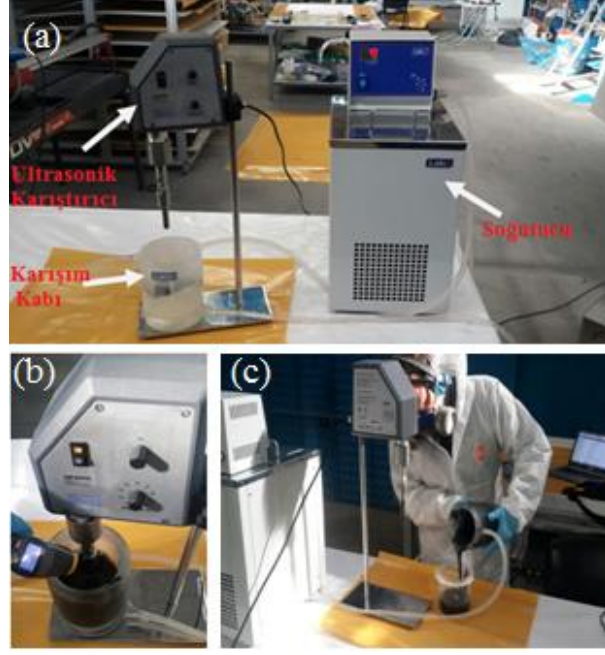
	Ağırlıkça -OH (%)	Dış Çap (nm)	İç Çap (nm)	Uzunluk ( $\mu$ m)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Saflık (%)
KNT	1,76	10-20	5-10	0,5-2	0,22	98
Nanokil (1-140)	-	-	-	20	1,4-1,8	Yüksek

Öncelikle karışım yapılacak olan epoksi reçine ve sertleştirici oranı üretici firmanın tavsiye ettiği şekilde %80-%20 şeklinde hazırlanmıştır daha sonra bu karışımın ağırlıkça %0,5'i kadar nanopartikül ilavesi yapılarak (Şekil 4.3 (a)) epoksi/(KNT %0,5) ve (Şekil 4.3(b)) epoksi/(NK %0,5) partiküllerin tozumasını önlemek amacıyla tahta bir çubukla mekanik karıştırılmış ve partiküller reçineye emdirilmiştir. Sonra karışım suğutuculu behere alınarak (Şekil 4.4 (b)) karıştırmaya sonikatör ile devam edilmiştir.



Şekil 4.3: Epoksi reçine ve nanopartiküller (a) epoksi/ (KNT %0,5), (b) epoksi/(NK %0,5)

Sonikasyon sürecinin süresi ve şiddeti partiküllerinlerin epoksi içerisine dağılımında kilit rol oynamaktadır. Sonikasyonun partiküllerinlerin yapısına zarar vermeyecek uygun genlik ve sürede yapılması (Gkikas,2012) gerektiği için Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Laboratuvarına kayıtlı Hielscher UP400S marka sonikatör cihazı, İzmir'e üretim yerine götürülerek sonikatörün 400 wattlık çıkış gücü ile titanyum alaşım (Ti-4Al-4V) ucundan üretilen ses dalgaları %70 genlik ve 0,6 frekans ile 35 dakika boyunca karıştırılmıştır.



Şekil 4.4: Homojenizasyon işlemi: (a) ultrasonik karıştırıcı ve soğutucu (b) sıcaklık kontrollü soniksasyon, (c) kaba alma işlemi.

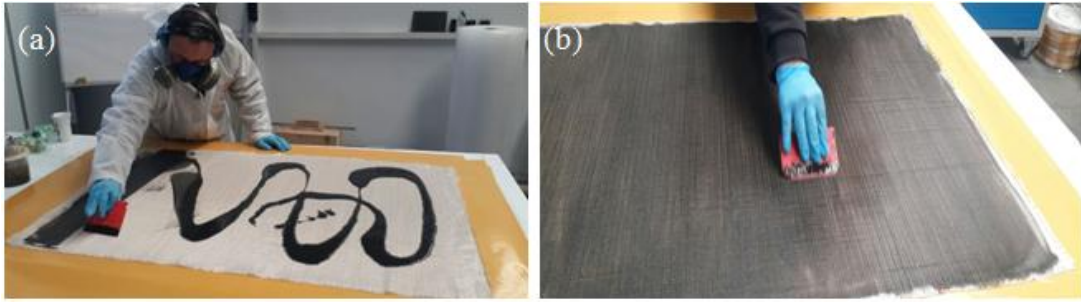
Ultrasonik karıştırıcı ses dalgaları vasıtasıyla nanopartikülleri homojen bir şekilde dağıtarak karıştırmıştır. Bu ses dalgalarının oluşturduğu titreşimler nedeni ile epoksi reçinede ısınma meydana gelmektedir. Karıştırma esnasında oluşan ısınmadan dolayı kendiliğinden küreleşmeyi engellemek amacıyla ultrasonik karıştırıcı ile birlikte Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarı demirbaşına kayıtlı  $\pm 0,05$  °C hassasiyet ile 5°C ve 30°C su sirküle edebilen (etil alkol kullanılarak -20/30°C) Labo CH750 model soğutucu İzmir'e üretim yapılan firmaya götürülerek kullanılmıştır (Şekil 4.4(a)). Ayrıca reçine karışımının sıcaklığı Şekil 4.4(b)'de gösterildiği gibi lazerli ısı ölçer ile karıştırma süresince ölçülerek kontrol altında tutulmuştur. Homojenizasyon işlemi biten reçine (Şekil 4.4(c))'deki gibi takviye kumaşlarına sürülmek üzere plastik kaba alınmıştır.

#### 4.1.2 El yatırması yöntemi ile kumaşlara reçine emdirilmesi

Fibermak Ltd şti.'de üretimi yapılan kompozitlerin  $300 \text{ g/m}^2$  ağırlığındaki 1200 TEX E-cam kumaşlar elyaf rulolarından uygun ebatlarda kesilmiş ve düzgün bir masa üzerine serildikten sonra hazırlanan reçine/nanoparikül solüsyonu (Şekil 4.5 (a,b))'deki gibi kumaşlara uygulanmıştır.

Reçine emdirilmiş bu kumaşlar hava kabarcıklarının uzaklaştırılması ve reçinenin kumaşlara daha iyi difüze olması için 10 gün kadar rafta tutulmuştur. Bu süre zarfında reçine emdirilmiş bu kumaşlar yapışmaz kuşe kâğıtlar arasında muafaza edilerek prepeg haline gelmişlerdir.

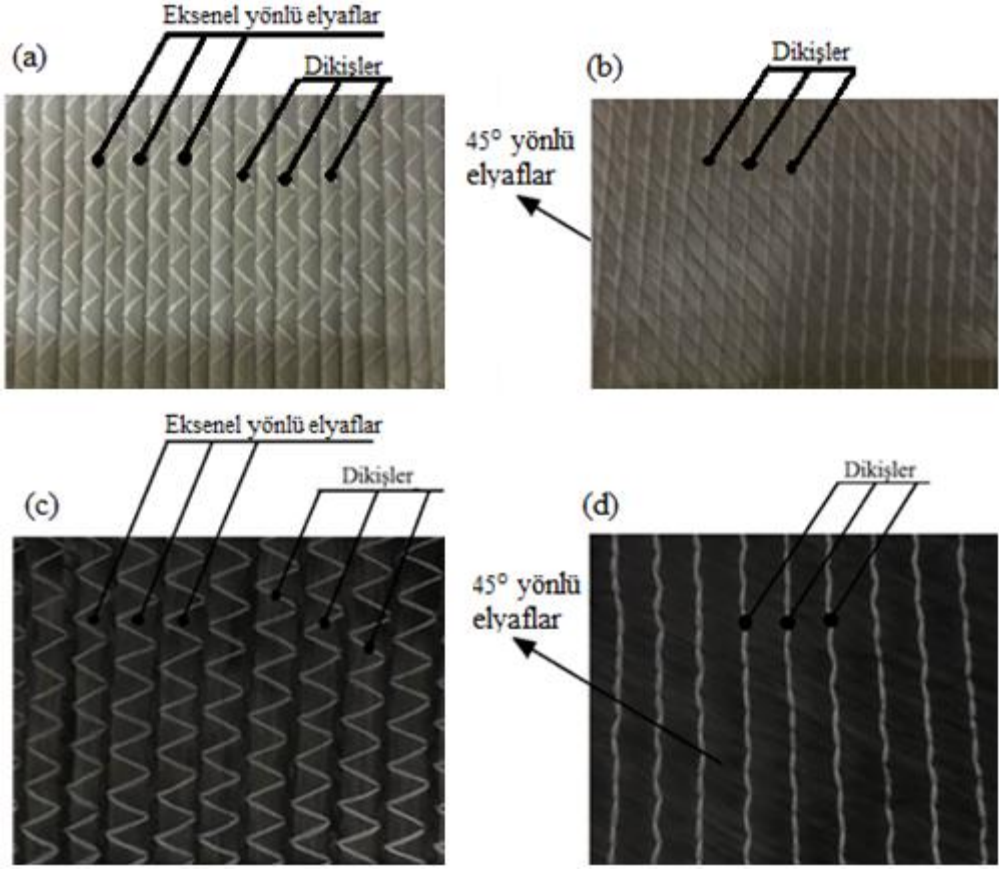
İyice difüze olan bu kumaşlar çelik cetvel ve maket bıçağı ile  $40 \times 40 \text{ cm}$  ebatlarında kesilerek 11 kat olacak şekilde üst üste konularak yapışmaz kâğıt ile paketlenmişlerdir. Üretim süreci KNT ve NK katkıları için ayrı ayrı tekrarlanmıştır.



Şekil 4.5: El yatırması yöntemi (a), reçine-partikül solüsyonunun cam elyafa uygulanışı (b)

Meduza Karbon Ltd. Şti'de yapılan diğer üretimde ise tek yönlü geleneksel karbon kumaşlar ( $300 \text{ g/m}^2$ , 1100 TEX) ve E-cam kumaşlara ( $300 \text{ g/m}^2$ , 1200 TEX) ilaveten özel üretim üç eksenli kıvrımsız dikişli  $[0, +45, -45]$  yönlü (Şekil 4.6 (a,b)) E-cam kumaşlar ( $0^\circ$  yönü  $413 \text{ g/m}^2$ , 2100 TEX,  $45^\circ$  yönlü elyaflar,  $200 \text{ g/m}^2$ , 300 TEX) ve (Şekil 4.6 (c,d)) karbon kumaşlar ( $0^\circ$  yönü  $300 \text{ g/m}^2$ , 1600 TEX,  $200 \text{ g/m}^2$ ,  $45^\circ$  yönlü elyaflar 800 TEX) özelliktedirler.

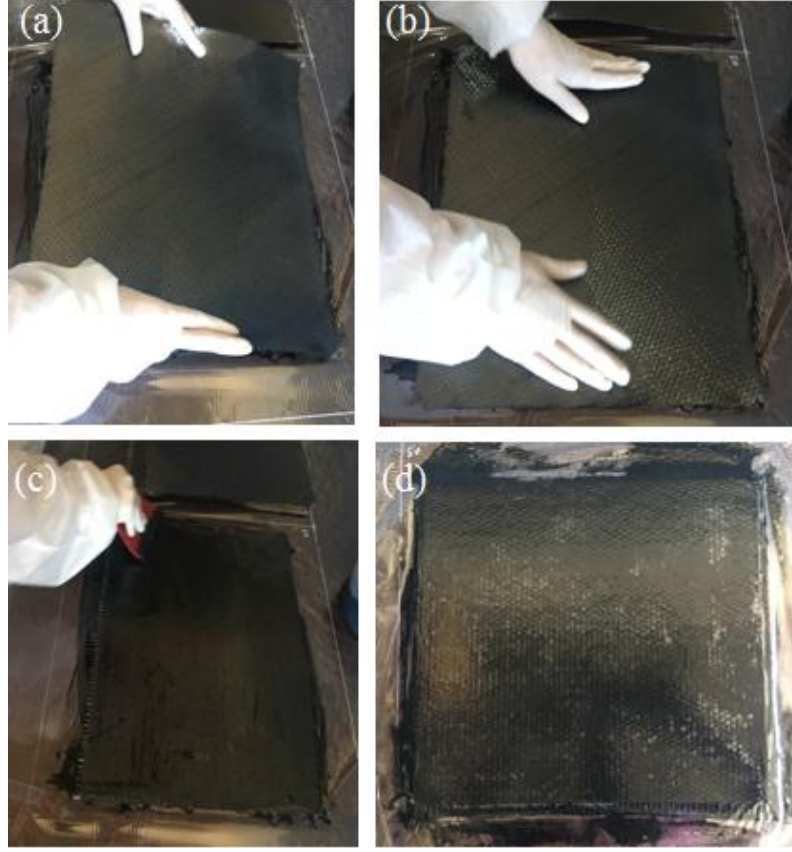




Şekil 4.6: Üç eksenli dikişli kıvrımsız kumaşlar: a) cam elyaf ön yüzey, b) cam elyaf arka yüzey, c) karbon elyaf ön yüzey, d) karbon elyaf arka yüzey

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi üç eksenli kumaşlar elyaf rulusundan 40x60 cm ebatlarında kesilerek reçine emdirilmiş ve elyaf açıları  $[(0,+45,-45)/(0,+45,-45)/(-45,+45,0)/(-45,+45,0)]$  düzeninde 12 tabaka olarak üst üste dizilmiştir.

Yapılan el yatırması işlemi ile epoksi/partikül karışımının elyaf kumaşına daha iyi emdirilmesi ve oluşabilecek arayüzey boşlukları için hava kabarcıklarının yok edilmesi sağlanmıştır. Böylelikle her elyaf tabakasına epoksi reçinesi uygulanarak 12 tabakalı ıslak bir kompozit malzeme elde edilmiştir.

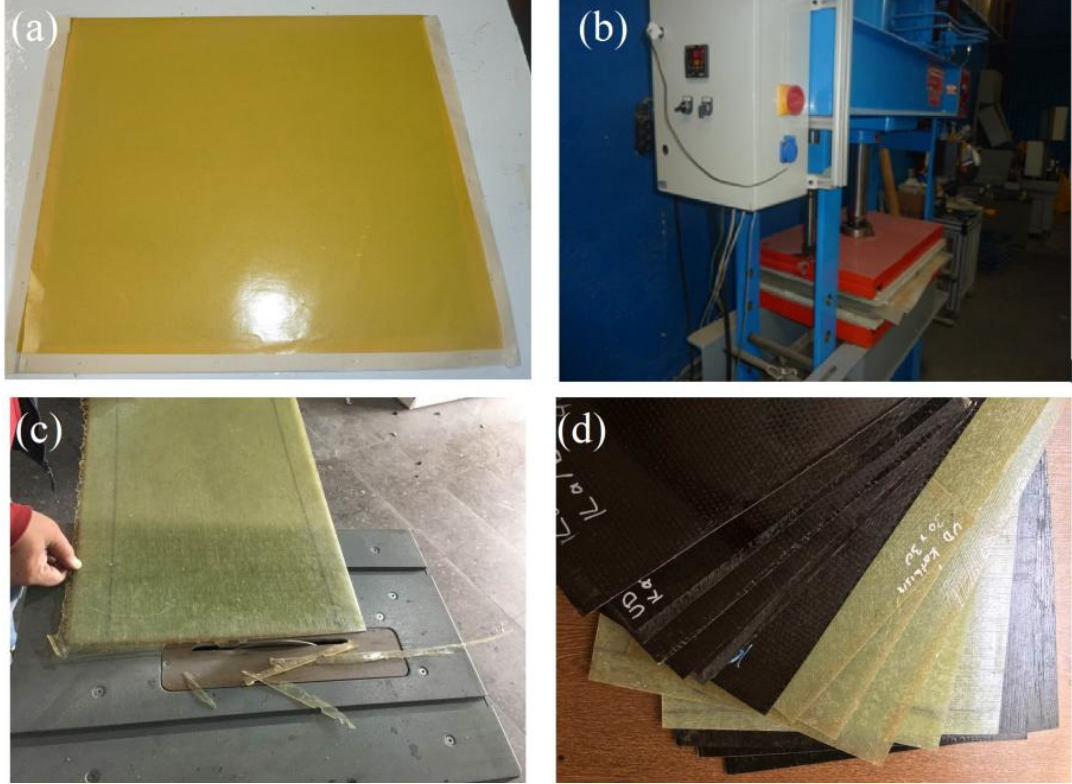


Şekil 4.7: K rleme  ncesi hazırlık: a) karbon kumaşın hizalanması, b) kumaşın yerine yerleştirilmesi, c) Epoksi/KNT reçinenin kumaşa uygulanması, d) yapışmaz-ısıya dayanklı naylonla paketlenmesi

12 tabakalı bu kompozit yapı elde edilirken üç eksenli kumaşlar [0,-45,+45] olarak üçlü katmanlar halinde 4 grup olacak şekilde üst üste konulmuş tek eksenli kumaşlar ise üç eksenli kumaşlar model alınarak elyaf rulosundan bu açılarda kesilmiş ve teker teker 12 katlı aynı yapı elde edilmiştir. Meduza Karbon Ltd. şti'de üretilen bu kompozitlerin farkı Fibermak Ltd. şti.'de 11 katlı bir yapı oluşturulurken burada 12 katlı bir yapı oluşturulmasıdır.

### 4.1.3 Kürleştirme işlemi

Elde edilen reçine emdirilmiş kompozit malzeme (Şekil 4,8 (a))'daki gibi kuşe kağıt ile paketlenerek kürleşmesi ve üzerindeki fazla reçineyi atarak her tarafı eşit bir kalınlık ölçüsüne gelmesi için (Şekil 4.8(b))'de gösterildiği gibi preslenerek 6 bar basınç altında ve 120°C sıcaklıkta iki saat boyunca kürleme işlemi yapılmıştır.

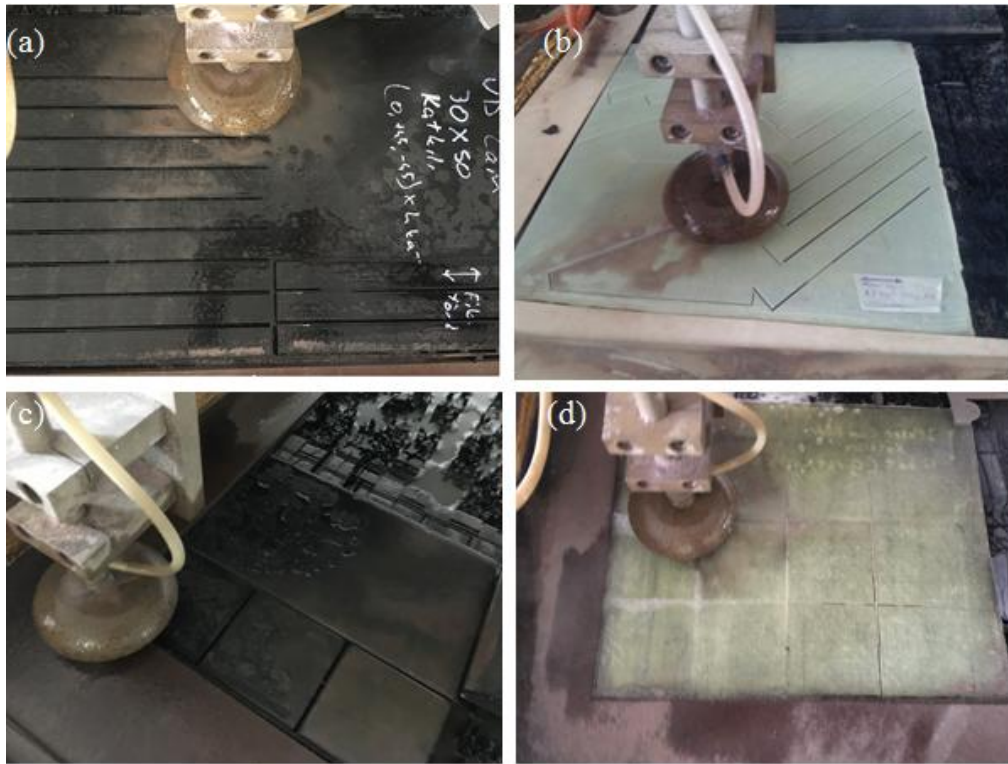


Şekil 4.8: Kürleştirme süreci a) sıcak presleme öncesi paketlenme (b) sıcak presleme (c) plakaların traşlanması, (d) kompozit plakalar.

Pres içerisinde iki saat boyunca kürleştikten sonra tabakalanmış kompozit plaka sıcaklık farkından dolayı çarpılma oluşmaması için çıkarılmadan pres ile birlikte soğuması beklenmiş ve oda sıcaklığına kadar soğuduğunda presin çeneleri açılarak plaka presten çıkartılmıştır. Presleme esnasında fazla reçinenin akmasıyla meydana gelen epoksi çapakları ve bu çapakları traşlamak için gerekli olan kesim makinesi (Şekil 4.8 (c))'de plakaların son hali (Şekil 4.8 (d))'de gösterilmiştir.

#### 4.1.4 Numunelerinin su jeti ile ebatlandırılması

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde kullanılan tüm numuneler, Kardeş Cam Ltd. Şti.'de, öngörülen geometrik parametrelere bağlı olarak üretilen kompozit plakalardan su jeti ile kesilmiştir. Kesim yöntemi olarak su jetinin kullanılmasıyla kompozit numunelerde oluşabilecek kesim hatası ve kesim sırasında ısınmanın önüne geçerek ideal bir kesim imkanı sunmuştur. İlgili deneyler için numune çıkarma işlemi Şekil 4.9 (a),(b) çeki-burkulma-yorulma ve (c),(d) darbe numuneleri şeklinde kesilerek çıkartılmıştır.



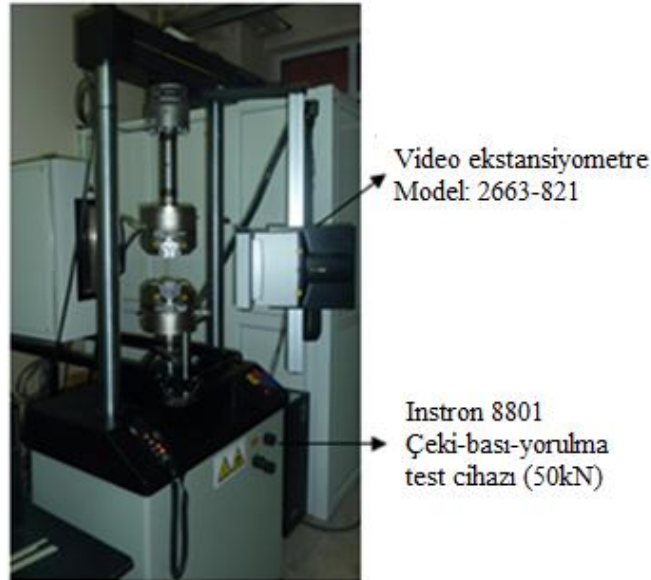
Şekil 4.9: Su jeti ile kesim (a) E-cam/epoksi/KNT içerikli numuneler, (b) E-cam/epoksi içerikli numuneler ( 45° oryantasyon açılı), (c) Karbon elyaf/epoksi içerikli darbe numuneleri, (d) E-cam/epoksi içerikli darbe numuneleri.

Numuneler ebatlandırıldıktan sonra ağırlıkça elyaf-reçine oranları belirlenmiştir. Bunun için numuneler hassas terazide tartılarak toplam numune ağırlığından elyafın ağırlığı düşülmüş ve matris ağırlığı bulunmuştur bu doğrultuda E-cam takviyeli numunelerin toplam ağırlığı  $m_t=28,6$  g ve elyaf ağırlığı  $m_e=21,6$  g olarak, karbon takviyelilerde ise  $m_t=36,6$  g ve  $23,2$  g tespit edilmiştir. Ağırlıklar bulunduktan sonra ağırlıkça elyaf-reçine oranları E-cam için  $m_e=0,75$  ve  $m_r=0,25$  karbon takviyeli kompozitler için  $m_e=0,63$  ve  $m_r=0,37$  şeklindedir.

## 4.2 Deneysel Çalışmalar

Tez çalışması süresince çekme yorulma ve burkulma deneylerinin yapıldığı cihaz Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında bulunan 50 kN yük kapasiteli Instron 8801 Servo Hidrolik test cihazıdır, (Şekil 4.10) Cihazın bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

- $\pm 50$  kN kapasitede yükleme imkanı sunmakta ve stroku  $\pm 75$  mm olan aktivatöre sahiptir.
- Test cihazı  $\pm 100$  kN kapasitesinde hidrolik çenelere ve hidrolik çene kontrol ünitesine sahiptir. 0-15 mm kalınlığındaki düz numuneleri tutmak için 50 mm genişliğinde düz testere dişli çene yüzeylerine sahiptir.
- Instron 8801 test cihazı, 207 Bar hidrolik basınca çıkabilen, çift sütunlu, sabit üst çeneli ve ayarlanabilir sütun yüksekliğine sahiptir.
- Instron 8801 test cihazı 27 lt/d debi kapasiteli hidrolik güç birimine sahiptir.
- Çenelerin ayarlaması hidrolik basınç ile yapılmakta ve hidrolik kilitlere sahiptir. Ayrıca üst kafada bir Loadcell bulunmaktadır.
- Test cihazı iklimlendirme kabine sahiptir.  $-70^{\circ}\text{C}$  ve  $+350^{\circ}\text{C}$  değerleri arasında deney yapma imkanı sunmaktadır.



Şekil 4.10: 8801 Instron çeki-bası/yorulma test cihazı

Darbe karakteristiklerinin belirlenmesinde ise Şekil 4.11'de görünen Instron Dynatup 9250HV darbe deney cihazı kullanılmıştır. Darbe cihazı serbest ağırlık düşürme

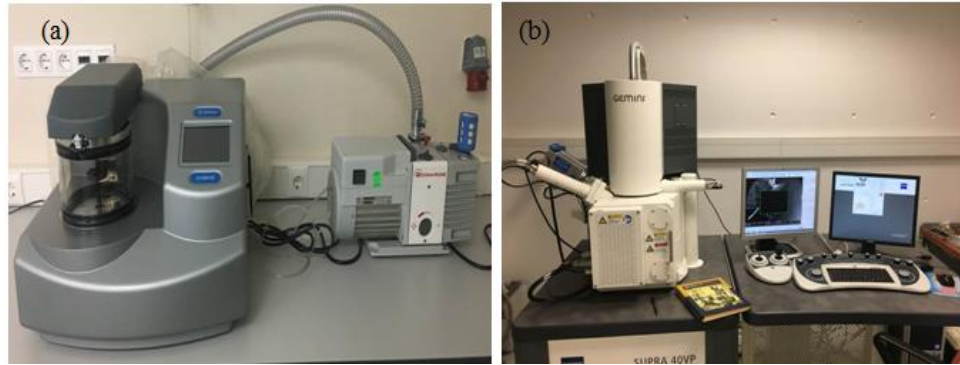
prensibiyle çalışan, yer tipi, bilgisayar kontrollü ve yüksek hızlı bir deney cihazıdır. Bilgisayar kontrolü, veri elde etme yazılımına, impuls veri toplama kartına, impuls ve sinyal şartlandırma biriminden oluşmaktadır. Ayrıca deney cihazı, düşen ağırlığın hız, enerji ve yükseklik gibi istenen parametrelerde kontrollüne imkan sağlamaktadır.

Deney cihazı Şekil 4.11’de görüldüğü gibi ağırlık ve ekipmanları kaldırmada kullanılan çapraz bir kafaya ve üzerinde bir yük hücreğine sahiptir. Deney cihazının maksimum yükleme kapasitesi 15,5 kN’dur. Darbe yükü, yay enerjisi desteği veya ek ağırlıklar kullanılarak arttırılabilmektedir. Ağırlık kutusununun altında ki vurucu uç ise numuneye darbenin uygulanmasını ve yük sinyallerinin oluşmasını sağlar. Darbenin uygulanmasından sonra vurucu tarafından oluşturulan bu yük sinyalleri, sinyal birimi aracılığıyla yük sinyalleri olarak veri toplama kartına aktarılır. Bu veri toplama kartı da verilerin impuls veri elde etme yazılımı aracılığıyla deney sonuçlarının düzenlenerek topluca veya ayrı ayrı grafikler ve tablolar oluşturulmasına olanak tanır. Hız detektörü ise vurucu uç tarafından numuneye darbenin uygulanmasından hemen önceki hızını bir fotoelektrik diod sistemi ile ölçerek sinyal birimi ile darbe hızının veri toplama kartına iletilmesini sağlar. Numune sabitleyici ise, iki çene arasına konulan (100x100 mm) numunenin üzerine basarak 76 mm çapındaki bir dairesel alanda darbe yapılabilmesine olanak tanır. Pnömatik geri sekme frenleri ise vurucu uç aracılığı ile ilk darbenin yapılmasından sonra numune üzerine tekrarlı darbelerin oluşmasını önlemektedir.



Şekil 4.11: Instron-Dynatup 9250 HV darbe test cihazı

Çalışmalarda kullanılan diğer bir cihaz ise kompozit numunelerin içyapı görüntülerinin alındığı Pamukkale Üniversitesi Merkez Laboratuvarında bulunan ZEISS SUPRA 40VP taramalı elektron mikroskobudur (Şekil 4.12(b)). Malzemenin iç yapı görüntüleri alınmadan önce iletkenliklerinin artması için altın alaşımı ile kaplanmaları gereklidir bu işlem de yine aynı laboratuvarında bulunan Quorum 150R ES (Şekil 4.12(a)) numune kaplama cihazıdır.



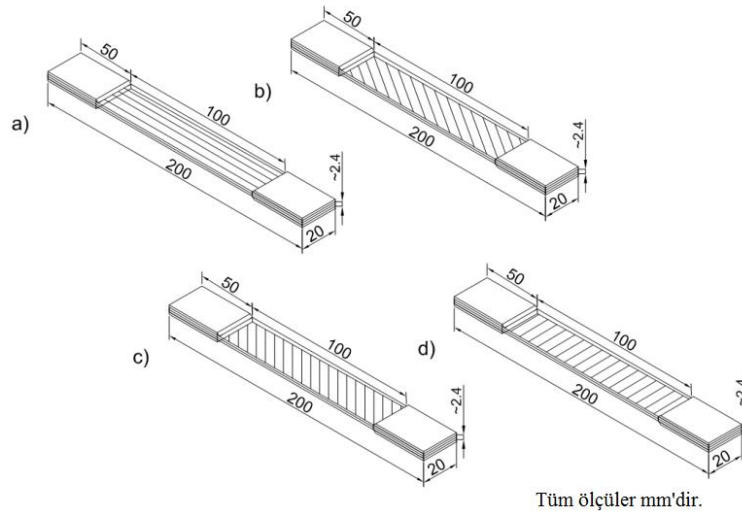
Şekil 4.12: a) Numune kaplama cihazı b) taramalı elektron mikroskobu (SEM Cihazı)

#### 4.2.1 Çekme deneyleri

Kompozit plakaların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla Fibermak Ltd. Şti.'de ürettiği olan (ilk üretim) kompozitlerin Şekil 4.13 ilk önce çekme deneyleri tamamlanmış ve daha sonra diğer deneylere geçilmiştir. Çekme deneyleri farklı oryantasyon açılarının  $[0]_{11}$ ,  $[30]_{11}$ ,  $[45]_{11}$ ,  $[90]_{11}$  ve nanopartiküllerin (KNT, NK) etkisinin tespitine yönelik çekme deney cihazının kapasitesi dikkate alınarak Şekil 4.13 deki öngörülen numune ölçülerinde ASTM 3039D standardından bağımsız olarak kestirilmiş ve sonrasında deneyler yapılmıştır. Tablo 4.3'de numunelerin yapısal özellikleri sunulmuştur.

Tablo 4.3: Tek eksenli kompozit plakaların yapısal özellikleri.

Kompozit Numuneler	Tabaka sayısı ve oryantasyon açısı(°)	Plaka Kesim Açıları (°)
Tek yönlü E-cam/Epoksi	$[0]_{11}$	0-30-60-90
Tek yönlü E-cam/Epoksi/NK	$[0]_{11}$	0-30-60-90
Tek yönlü E-cam/Epoksi/KNT	$[0]_{11}$	0-30-60-90

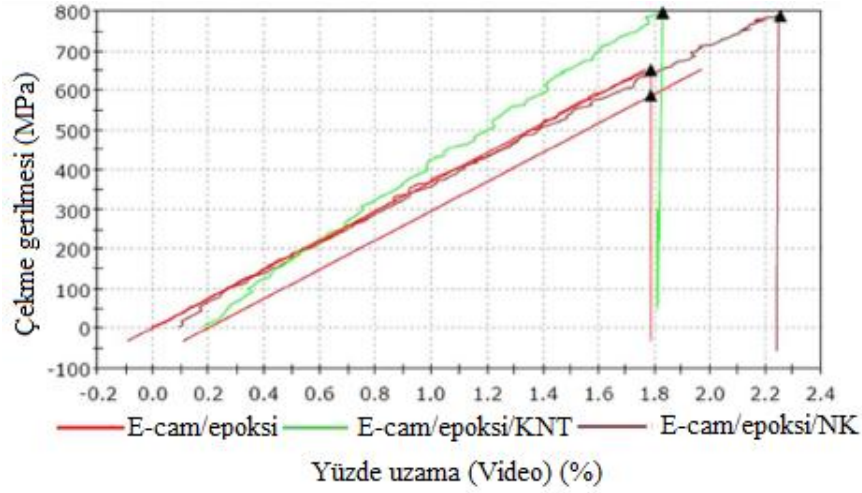


Şekil 4.13: Kompozit numunelerin teknik resim çizimleri: a) 0° yönlü (eksenel), b) 30° yönlü numune, c) 45° (1-2 yönlü) yönlü numune, d) 90° (transverse) yönlü numune.

Kompozit plaka, tek yönlü dokunmuş elyaf kumaşlarından yapıldığı için mekanik özellikler iki farklı yönde değişmektedir. Elyaf doğrultusundaki yön (1) yönü, elyafa dik olan yön (2) yönü olarak kabul edilmiştir. Kompozit plakanın (1) ve (2) düzlemindeki mekanik özellikleri her mekanik özellik için üçer adet numune



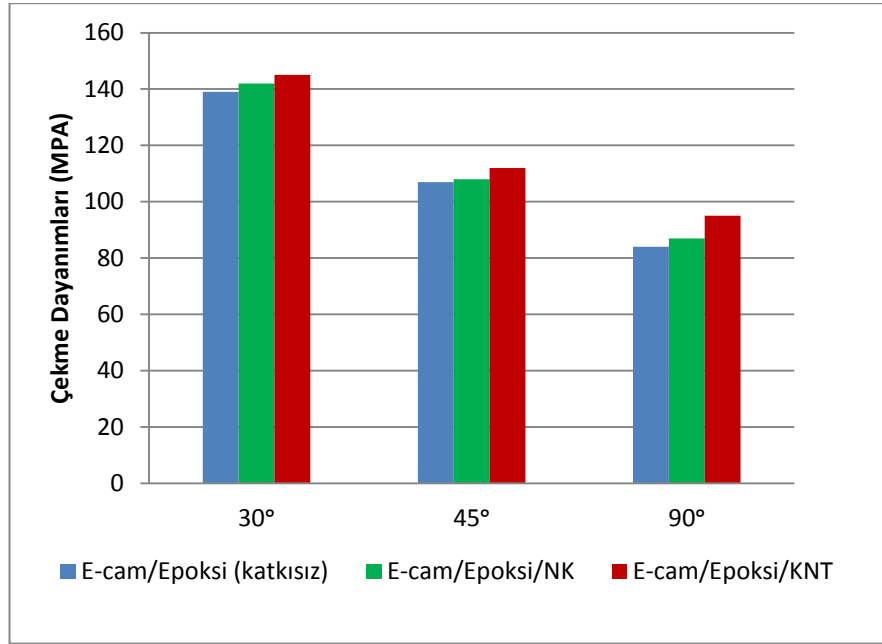
kullanılarak elde edilmiş ve ortalama özellikler tespit edilmiştir. Çekme, burkulma ve yorulma dayanımlarının tespit edildiği tabakalı kompozitlerin teknik tesim çizimleri 4.13 (a) 0° yönlü (eksenel) numune, ( b) 30° yönlü numune, (c) 45° (1-2 yönü) yönlü numune,(d) 90° (transverse) yönlü numunedir.



Şekil 4. 14: Çekme dayanımları, (E-cam/epoksi, E-cam/epoksi/KNT, E-cam/epoksi/NK)

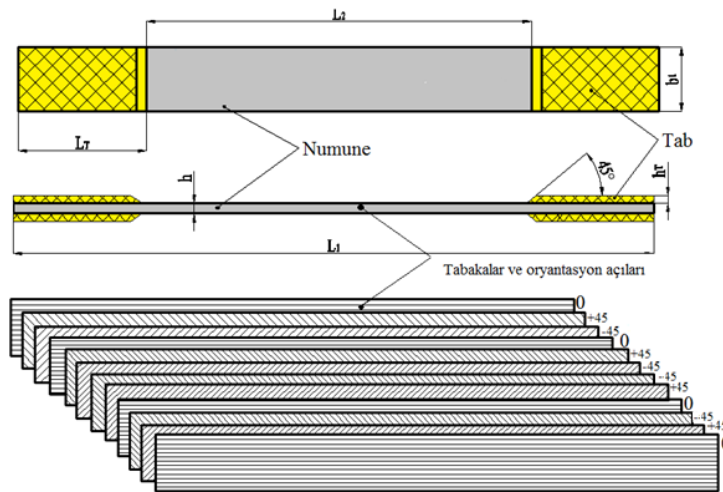
Şekil 4.14'de aksenal yönlü (0°) kompozitlere ait çekme grafiği örneği verilmiştir. Grafik her numune çeşidinden birer deney içermektedir. Çekme deneyleri üçer numune ortalaması üzerinden yapılmıştır ve ortalamaları alınmıştır. Bu bağlamda çekme dayanımı en yüksek KNT katkılı numune de 794 MPa daha sonra NK katkılı ve numune 779 MPa ve en son olarak 650 MPa ile katkısız numunenin değerleri elde edilmiştir. Elastisite modülleri de benzer şekilde en yüksek KNT katkılı numunenin 47 GPa daha sonra NK katkılı numunenin 41GPa ve 42 GPa'da katkısız numunenin ki olarak deney cihazından elde edilmiştir.

Açılı numunelerin dayanım değerleri aksenal yön (0°) ile karşılaştırıldığında çok düşüktür. Açılara göre çekme dayanımları incelendiğinde açı değeri büyüdükçe (30-45-90) çekme dayanımlarında bu değerlere bağlı olarak düşüş göstermektedir (Şekil 4.15). Yine burada da aynı açı değeri için sırasıyla KNT katkılı numneler daha sonra NK katkılı numuneler ve son olarak da katkısız numuneler dayanım açısından kategorize edilmişlerdir.



Şekil 4.15: Kompozit numunelerin açılara göre çekme dayanımları

Meduza karbon Ltd. Şti.'de üretilen diğer kompozitlerin (ikinci üretim) teknik resim görünüşü ve yapısal özellikleri Şekil 4.16'de görülmektedir. Burada, üç eksenli dikişli kıvrımsız kumaşlardan imal edilmiş kompozitler [(0,+45,-45) (0,+45,-45) (-45,+45,0) (-45,+45,-0)] ve tek eksenli kumaşlardan imal edilmiş [(0,+45,-45) (0,+45,-45,+45,0,-45,+45,-0)] kompozitlerin KNT ve katkısız haldeki çekme performansları incelenmiştir.



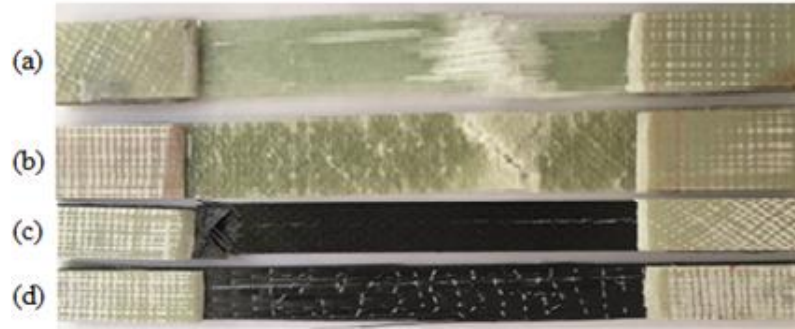
Şekil 4.16: Deney numunelerinin teknik tesim çizimi.

Tablo 4.4’de üretimi yapılmış olan kompozit levhadan su jeti ile kesilen numune ölçüleri verilmiştir. Burada karbon takviyeli kompozitler ile E-cam takviyeli kompozitlerin boyut ölçüleri farklıdır. Bunun nedeni karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek çekme dayanımından dolayı kullanılan çekme cihazı (Instron 8801)’nin yükleme kapasitesidir. E-cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitler kendi aralarında kıyaslanacağı için bu çalışmaya herhangi bir olumsuz etkisi bulunmamaktadır.

Tablo 4.4: E-cam ve karbon elyaf takviyeli deney numunelerinin boyut ölçüleri.

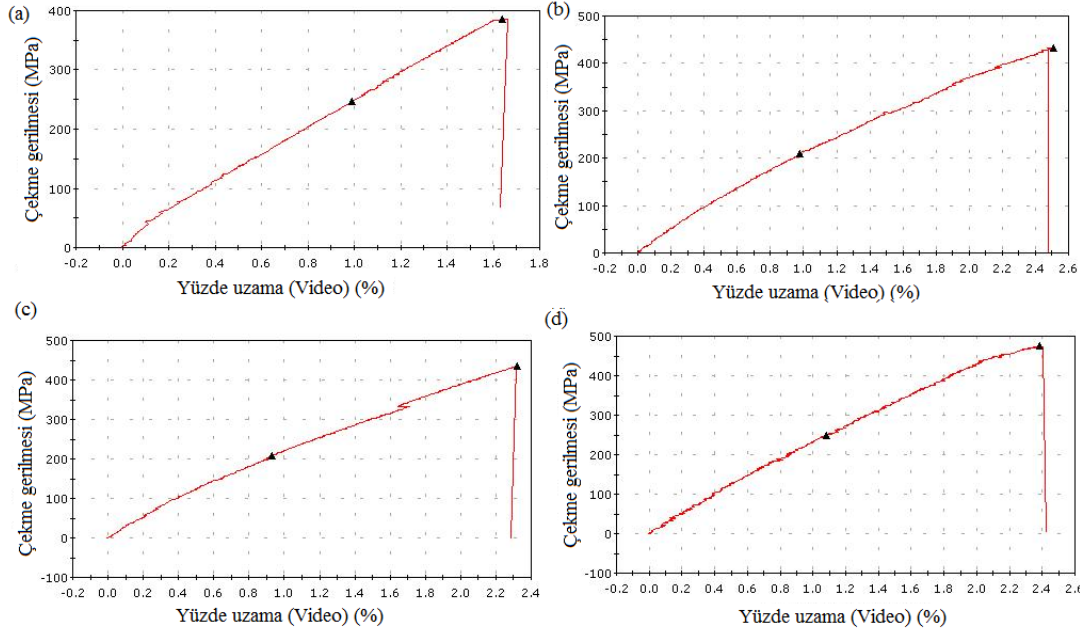
Sembol	E-cam/Epoksi Numune Ölçüleri (mm)	Karbon elyaf/Epoksi Numune Ölçüleri (mm)
L <sub>1</sub>	250	250
L <sub>2</sub>	150	150
L <sub>T</sub>	50	50
b <sub>1</sub>	25	15
H	3	4
h <sub>T</sub>	3	3

Benzer şekilde üç eksenli kompozitlerin deneyleri ASTM 3039D kompozit çekme standardına göre 0,5 mm/d hızla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.17’de tipik hasar şekilleri görülmekte; (a) üç eksenli E-cam kumaşla takviyelendirilmiş, (b) tek eksenli E-cam kumaşla takviyelendirilmiş, (c) üç eksenli karbon kumaşla takviyelendirilmiş ve (d) tek eksenli karbon kumaşla takviyelendirilmiş kompozitler.



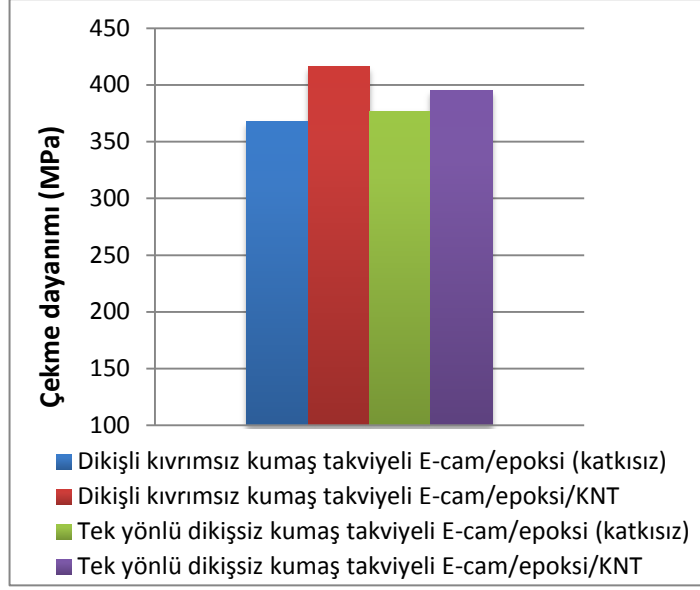
Şekil 4.17: Tipik hasar şekilleri: (a) üç eksenli E-cam kumaşla takviyelendirilmiş (b) tek eksenli E-cam kumaşla takviyelendirilmiş, (c) üç eksenli karbon kumaşla takviyelendirilmiş, (d) tek eksenli karbon kumaşla takviyelendirilmiş numuneler (katkısız).

Şekil 4.18’de E-cam takviyeli kompozitlere ait çekme deneylerinden örnek grafikler sunulmuştur. (Şekil 4.18 (a))’da dikişli kıvrımsız kumaş (DKK) takviyeli E-cam/epoksi’ye ait diyagram, (Şekil 4.18 (b))’de DKK takviyeli E-cam/epoksi/KNT katkılı numune, (Şekil 4.18 (c))’de tek yönlü kumaş (TYK) takviyeli E-cam/epoksi ve (Şekil 4.18 (d))’de TYK takviyeli E-cam/epoksi/KNT kompozitlere ait birer deney örneği görülmektedir. E-cam takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları tespit edilirken ortalama değerler kullanılarak Şekil 19’daki grafik oluşturulmuştur.



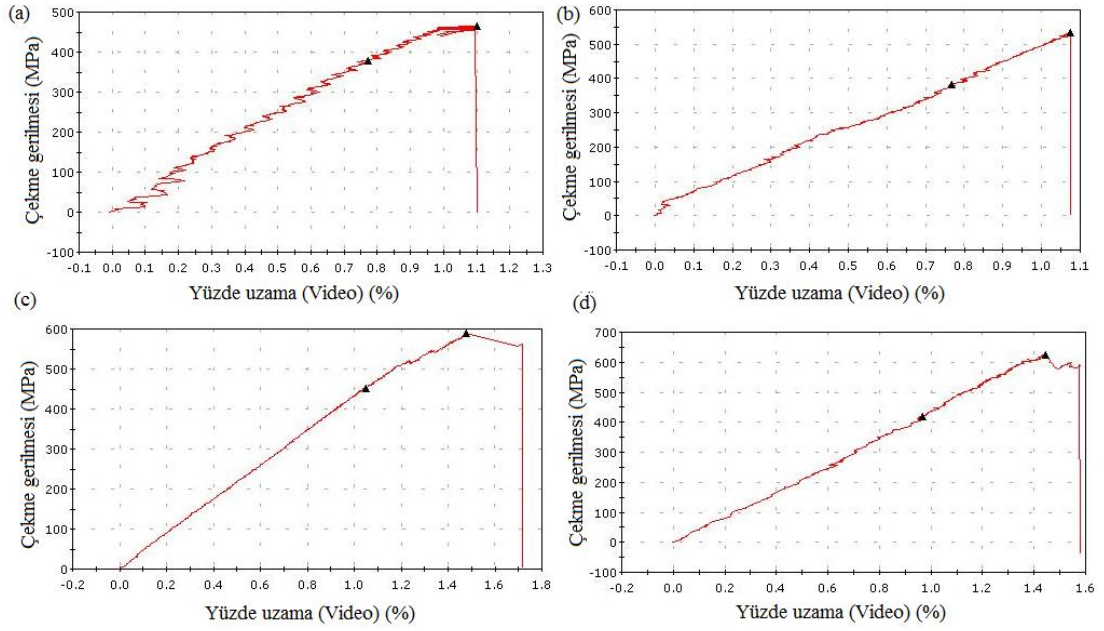
Şekil 4.18: E-cam ile takviye edilmiş kumaşların çekme diyagramı örnekleri; (a) dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli E-cam/epoksi, (b)dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli E-cam/epoksi/KNT, (c) tek yönlü dikişsiz kumaş takviyeli E-cam/epoksi (d) tek yönlü dikişsiz kumaş takviyeli E-cam/epoksi/KNT

E-cam ile takviyelendirilmiş kumaşların çekme dayanım değeri ortalamaları Şekil 4.19’deki grafikte verilmiştir. Burada dikişli kıvrımsız E-cam/epoksi numunenin çekme dayanımı 368 MPa iken, E-cam/epoksi/KNT katkılı numunenin çekme dayanımı 416 MPa’ya ulaşmıştır. Dolayısıyla KNT katkısı %12 dayanım artışı sağlamıştır. Tek yönlü dikişsiz E-cam/epoksi ise 377 MPa dayanım göstermiş ve bu numune türünde de KNT katkısı %5 dayanım artışı sağlayarak katkılısının dayanım değerini 395 MPa’la taşımıştır. Elastisite modülleri ise bir birlerine benzer ve 18 GPa seviyesindedir.



Şekil 4.19: E-cam ile takviye edilmiş kumaşların çekme dayanımı değerleri

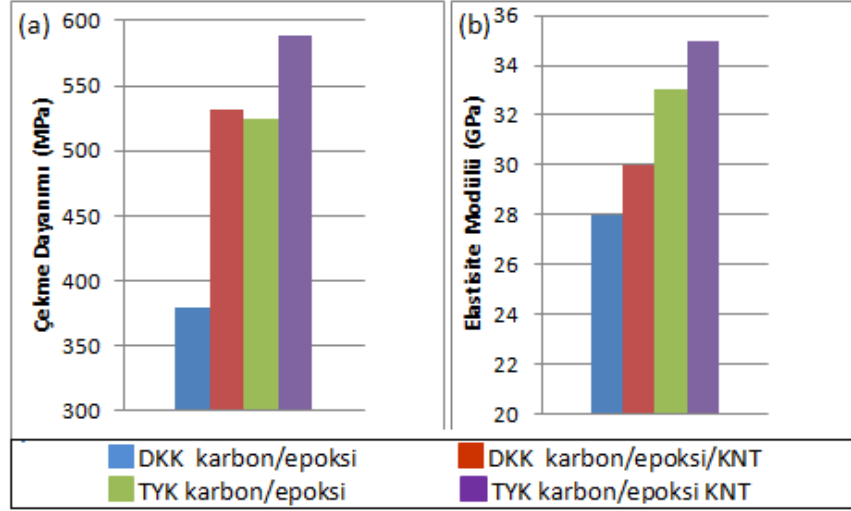
Şekil 4.20’de karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait çekme deneylerinden örnek grafikler sunulmuştur. (Şekil 4.20 (a))’da dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli karbon/epoksi’ye ait diyagram, (Şekil 4.20 (b))’de dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli karbon/epoksi/KNT katkılı numunenin diyagramı, (Şekil 4.20 (c))’de tek yönlü dikişsiz takviyeli karbon/epoksi ve (Şekil 4.20 (d))’de tek yönlü dikişsiz takviyeli karbon/epoksi/KNT kompozitlere ait birer deney örneğine ait çekme diyagramları görülmektedir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımları tespit edilirken ortalama değerler kullanılarak Şekil (4.21 (a))’daki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.20: Karbon elyaf ile takviye edilmiş kumaşlara ait çekme diyagramı örnekleri; (a) dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli E-cam/epoksi, (b) dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli E-cam/epoksi/KNT, (c) tek yönlü dikişsiz kumaş takviyeli E-cam/epoksi (d) tek yönlü dikişsiz kumaş takviyeli E-cam/epoksi/KNT

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı ve elastisite modülü ortalamaları (Şekil 4.21 (a,b))' de verilmiştir. Burada görüldüğü üzere dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli karbon/epoksi numunelerin çekme dayanımı (Şekil 4.21 (a)) 380 MPa'dır ve KNT katkısı ile bu oran 531 MPa'a çıkarak %28 artış göstermiştir. Tek eksenli dikişsiz kumaştan üretilen numunelerde ise 525 MPa ve yine KNT katkısı ile %10 artış göstererek 589 MPa dayanım değerine ulaşmıştır. Elastisite modülleri ise dikişli kıvrımsız karbon/epoksi numunelerde 28 GPa Dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli karbon/epoksi/KNT 30 GPa tek eksenli dikişsiz karbon/epoksi 33 GPa tek eksen karbon/epoksi/KNT 35 GPa bulunmuştur (Şekil 4.21 (b)). Bu değerlerden anlaşıldığı üzere KNT'ler elyaf-matris bölgesinde kompozitin yapısıyla uyumlu çalışmış ve mukavemet değerlerini belirgin şekilde arttırmıştır. Burada tek yönlü dikişsiz kumaş takviyeli numunelerin, dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli numunelere göre daha yüksek dayanım sergilemesini, tek eksenli dikişsiz kumaş takviyeli numuneler de reçine her tabakanın hem üst hemde alt yüzeyine bire bir paletle uygulanarak nüfuz ettirilmede dikişli kıvrımsız kumaş takviyelilerde ise kumaşın yapısı gereği (0,+45,-45) palet sadece 0 yönün bir yüzeyine ve -45 yönünde bir yüzeyine temas etmektedir. İçte kalan yüzeylere palet ve reçine bire bir temas etmediği için burada tek yönlü kompozitler reçine ve

partiküllerin kumaşa homojen uygulanması ve nüfuzu bakımından daha avantajlıdır, bu yüzden tek eksenli kumaşlardan imal edilen karbon takviyeli bu kompozitlerin dayanım değerlerinin DKK'ya göre yüksek çıktığı öngörülmektedir.

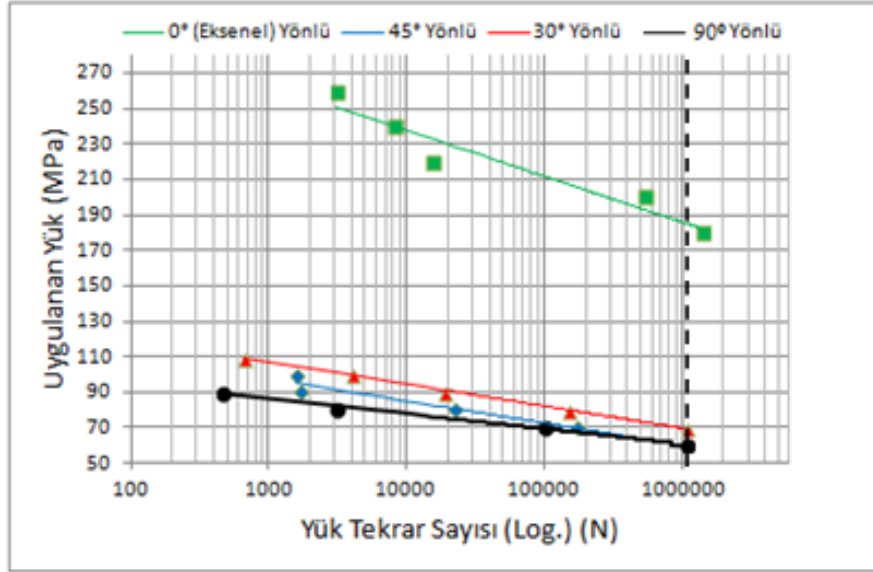


Şekil 4.21: Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri (a) çekme dayanımları (b) elastisite modülleri

#### 4.2.2 Yorulma deneyleri

Yorulma deneylerinin tamamı genel değişken şartlarda (çeki-çeki)  $R=0,1$  olacak şekilde karbon elyaf takviyeli kompozitler 3 Hz E-cam takviyeli kumaşlar 10 Hz frekans ile Instron 8801 deney cihazında yapılmıştır. Bunun nedeni karbon elyaf takviyeli kompozitler yüksek yorulma mukavemetine sahiptirler ve bu yüzden yüksek yorulma yükleri altında yorulmaya maruz bırakılmamalıdır. Deney cihazı 3 Hz'in üzerindeki frekanslarda bu yükleri karbon takviyeli numunelere uygulayamadığından dolayı bu numunelerin yorulma frekans değeri ( $f$ ) 3 Hz olarak uygun görülmüştür. Yapılan bu deneyler sonucunda üretilmiş olan yeni özellikteki kompozit plakaların S-N eğrileri elde edilmiştir. Deneyler yüksek genliklerde üçer defa tekrar edilirken zaman gereksinimin fazla olmasından dolayı sonsuz ömüre giden numunelerde birer deney yapılmıştır. Şekil 4.22'da açılı kompozitlere E-cam/epoksi/katkısız'a ait  $[0^\circ]_{11}$ ,  $[30^\circ]_{11}$ ,  $[45^\circ]_{11}$ ,  $[90^\circ]_{11}$  açılarda ki S-N eğrileri elde edilmiştir. Burada eksenel yönlü numune açılı numunelere kıyasla yüksek yorulma ömrü sergilemiştir. Bunun nedeni eksenel yönde elyaflar numunede boydan boyadır, çeneler kapanarak numune iki ucundan sabitlenip yorulma yükü uygulandığında bu

yükün büyük kısmı elyaflar tarafından karşılamaktadır. Açılı kesilmiş diğer numunelerde ise yükün büyük kısmı reçine tarafından karşılanmaktadır.

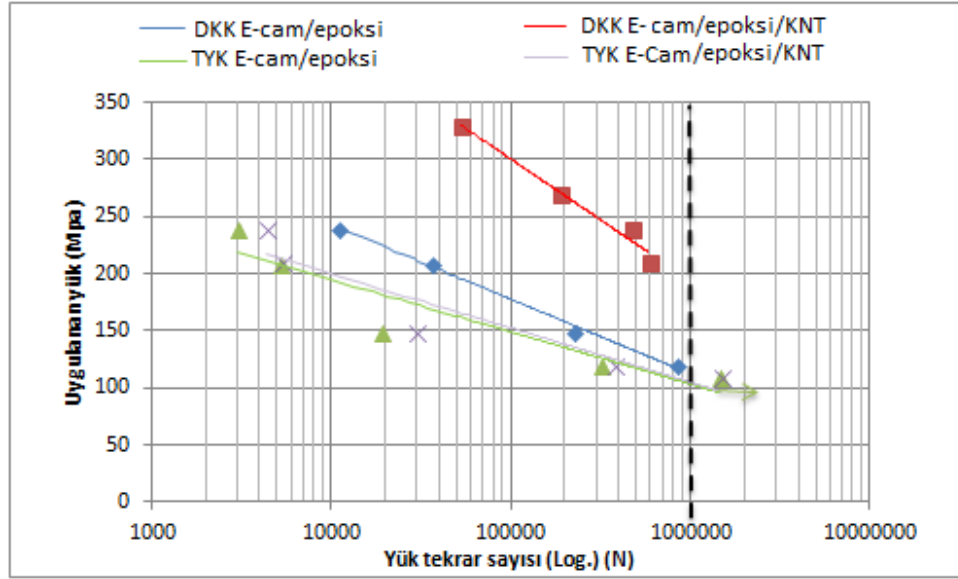


Şekil 4.22: Farklı oryantasyon açısına sahip kompozitlerin S-N diyagramı (E-cam/Epoksi/Katkısız)

Dikişli kıvrımsız ve tek yönlü dikişsiz E-cam kumaşlarla takviyelendirilmiş KNT katkılı ve katkısız kompozitlerin yorulma (S-N) diyagramları elde edilmiş ve Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Dikişli kıvrımsız kumaş takviyeli E-cam/epoksi/KNT numuneler en iyi yorulma performansını sergilemiş ve yorulma dayanımı yüksekteen düşüğe doğru sırasıyla dikişli kıvrımsız E-cam/epoksi, tek yönlü dikişsiz E-cam/epoksi/KNT ve tek yönlü dikişsiz E-cam/epoksi numuneler göstermiştir. Karbon nanotüp katkısının kompozit plakanın yorulmaya karşı olan direncini belirgin bir şekilde arttırdığı gözlemlenmiştir. Burada sonuçların dikişli kıvrımlı kumaşlarda tek eksenli dikişsiz kumaşlara kıyasla yüksek çıkmasının nedeninin kumaşın yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kumaş özellikleri incelendiğinde Dikişli kıvrımsız E-cam kumaşlar (0° yönü 413g/m<sup>2</sup>, 2100 TEX, 45° yönlü elyaflar, 200 g/m<sup>2</sup>, 300 TEX), tek eksenli dikişsiz E-cam kumaşlar 300g/m<sup>2</sup> ağırlığındadır. Kompozitin belirli bir yöndeki mukavemetini belirleyen etmenlerin başında o yöndeki eksenel yönlü elyafların miktarı gelir. Dikişli kıvrımsız kumaşların yapısı gereği 0° yönünde 413 g/m<sup>2</sup> ağırlığında elyaf bulunurken tek eksenli dikişsiz kompozitlerde 0° kumaşlarda 300 g/m<sup>2</sup> ağırlığında elyaf bulunmaktadır. Kumaşların bu yapısal özelliklerinden dolayı dikişli kıvrımsız kumaşlardan imal edilen

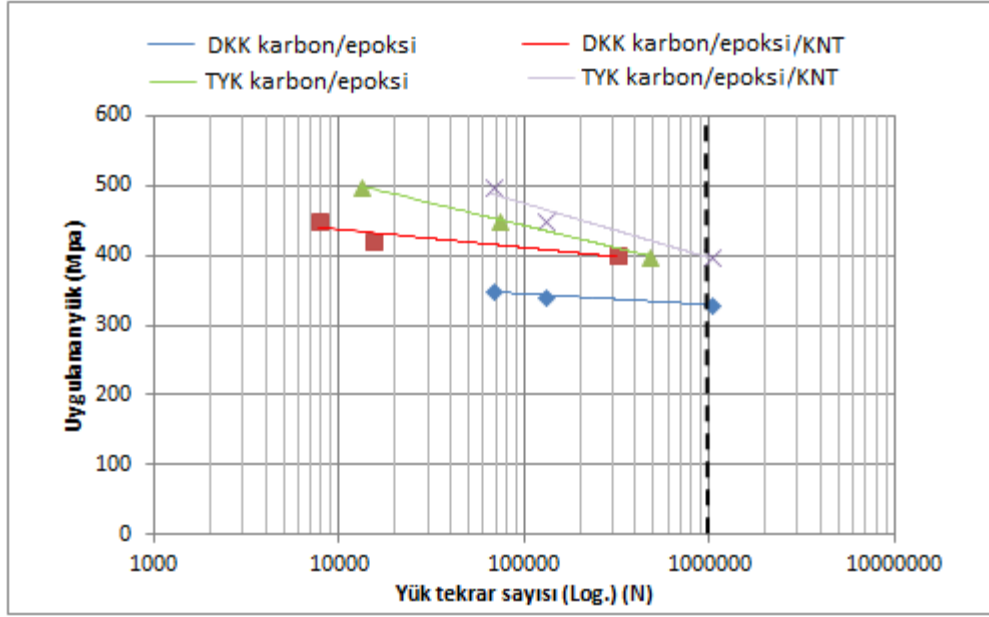


kompozitlerin yorulma değerleri yine çekme deneyleri ile benzerlik göstererek yüksek çıktığı öngörülmüştür.



Şekil 4.23: E-cam/epoksi kompozitlere ait S-N eğrileri

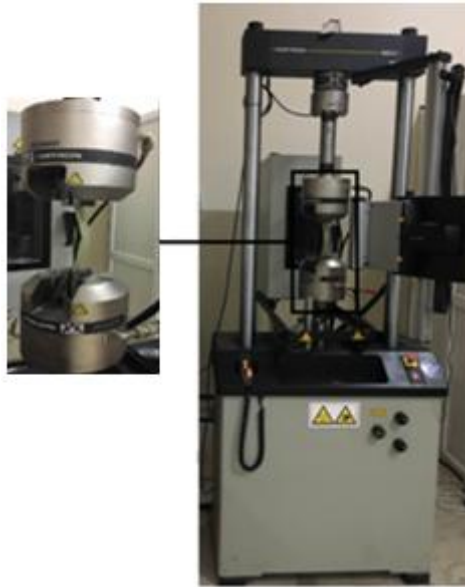
Şekil 4.24’de dikişli kıvrımsız karbon kumaş takviyeli kompozitler ve tek yönlü dikişsiz karbon kumaşlarla takviyelendirilmiş KNT katkılı ve katkısız kompozitlerin yorulma (S-N) diyagramları görülmektedir. Burada yorulma performansı sırasıyla tek yön katkılı, tek yön katkısız, dikişli kıvrımsız katkılı, dikişli kıvrımsız katkısız şeklinde görülmektedir. Çekmede olduğu üzere yorulmada da karbon kumaşlar benzer performans göstermişlerdir. Yorulma deneyleri yüksek tekrarlı çekme deneyleri olarak düşünüldüğünde çekme ve yorulma deneylerinin bir birine uyumlu olması beklenir. Karbon elyafların çekme deneylerinde anlatıldığı üzere burada da yorulma dayanımının tek yönlü dikişsiz kumaştan imal kompozitlerde yüksek çıkmasının nedeni reçinenin tek yönlülerde her yüzeye palet ile bire bir teması sonucu daha yüksek değerler elde edilmesini sağladığı düşünülmektedir. Yine beklendiği üzere KNT katkısı her iki kumaş türünde pozitif etki ederek dayanım artışı sağlamıştır.



Şekil 4.24: Karbon /epoksi kompozitlerin S-N diyagramı. (üç eksen karbon/epoksi, üç eksen karbon/epoksi/KNT, Tek eksen karbon/epoksi, Tek eksen karbon/epoksi/KNT)

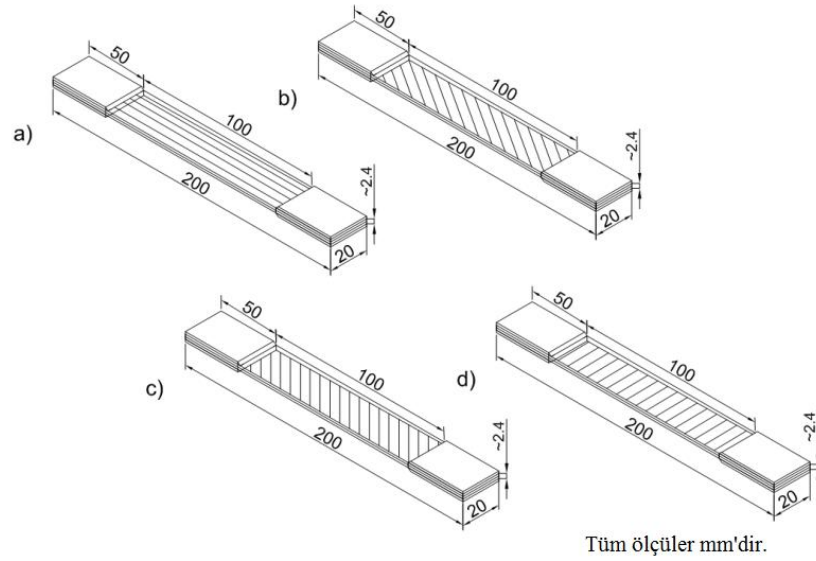
### 4.2.3 Burkulma Deneyleri

Kritik burkulma yükünün tespiti için 50 kN kapasiteli servo-hidrolik Instron 8801 Çekme Test cihazı kullanılmıştır. Deney numuneleri için, sabit-sabit (Clamped-Clamped) sınır şartı ele alınmıştır. Sabit-sabit sınır şartı için numune alt ve üst tarafından sabitlenmiştir. (Şekil 4.25).



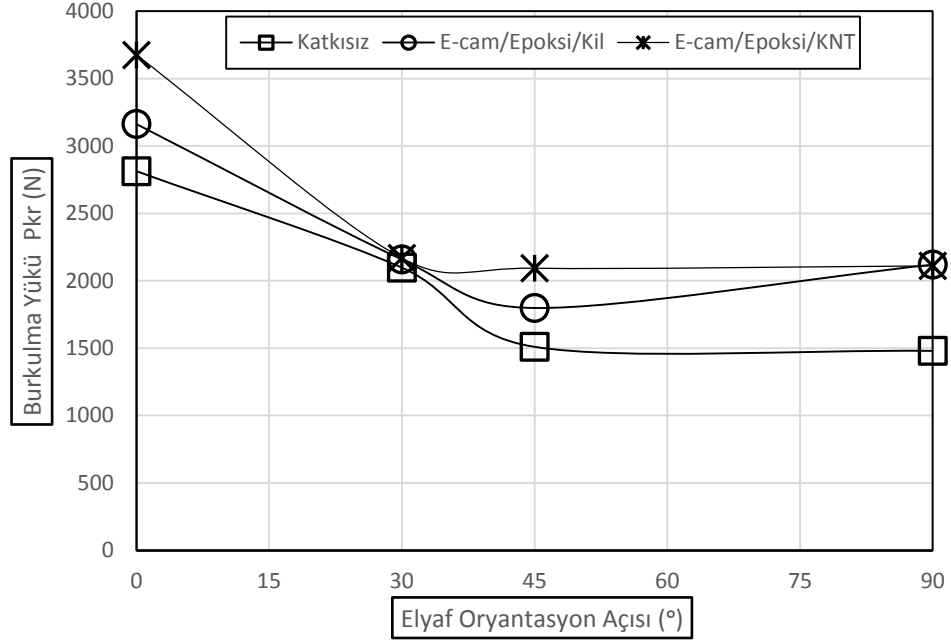
Şekil 4.25: E-cam/epoksi kompozite ait burkulma deneyi

Burkulma deneyleri deplasman kontrollü olarak, 0,5 mm/d hız ile bası yükü uygulanarak yapılmıştır. Burkulma deneyi için, burkulma uzunluğu 100 mm olan, 200x20 mm (Şekil 4.26 ) ebatında numuneler kullanılmış ve her deney üç kez tekrar edilmiştir. Deney sonuçları arasında büyük farklılık olması durumunda o deneyler ortalamaya dahil edilmeyerek, yakın sonuçlu deneyler elde edilene kadar deneylere devam edilmiştir. Kritik burkulma değerlerini deney cihazı deney sonunda kendisi otomatik olarak vermektedir.



Şekil 4.26: Burkulma numuneleri teknik resim çizimleri: a) 0° yönlü (eksenel), b) 30° yönlü numune, c) 45° (1-2 yönü) yönlü numune, d) 90° (transverse) yönlü numune.

E-cam/epoksi/ KNT kompozit plaka eksenel yönde (0°) eklenen katkıları bakımından karşılaştırıldığında KNT katkısı burkulma yükünü dolayısıyla burkulma dayanımını %30, NK katkısı ise %12 arttırmıştır. Eksenel yöden eksene dik yöne doğru olan açılmal değişimle birlikte tüm kompozit türlerinde genel olarak burkulma yükünde ( $P_{kr}$ ) bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27: Farklı oryantasyon ve katkı maddelerinde  $P_{kr}$  burkulma yükleri

Bu çalışmada, farklı yönlendirme açılarına ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) sahip kompozit plakaların kritik burkulma yüklerindeki oransal değişiklikler Tablo 4.5'de verilmiştir. Tablo 4.5'den görüleceği üzere burkulma dayanım değerleri katkısız numuneler için (E-cam/epoksi)  $0^\circ$  yönden  $30^\circ$  yönüne geçildiğinde %25 dayanım azalması meydana gelmiş  $30^\circ$  yönden  $45^\circ$  yönüne geçildiğinde ise dayanım değeri %46 daha azalmıştır.  $30^\circ$  ve  $90^\circ$  yönü karşılaştığında dayanımlar benzer çıkmıştır. Bunun nedenin  $90^\circ$ 'li numunelerin yapısal mekanması göz önüne alındığında elyafların biribiri üzerine stabil olarak basarak açılma kaymayı nispeten azaltması olarak düşünülmektedir. Katkılı numunelerde de durum benzer davranış göstererek ve açı değerleri büyüdükçe  $P_{kr}$  değeri azalmaktadır.

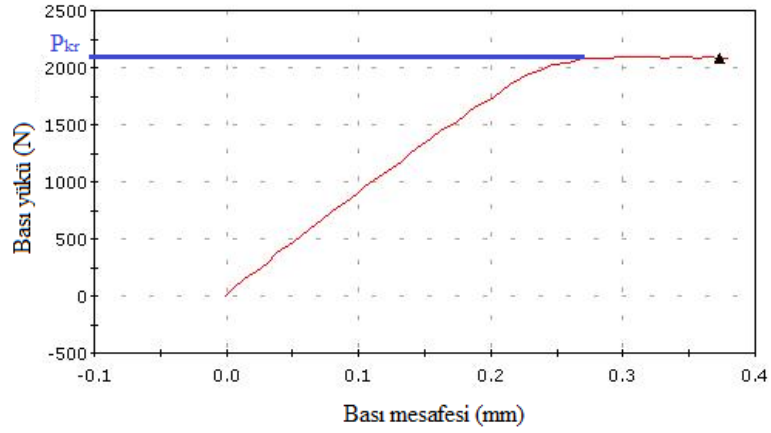
Tablo 4.5: Kompozit plakaların kritik burkulma yüklerindeki  $P_{kr}$  oransal değişimler

Burkulma Yükü $P_{kr}$ (N), (% Yüzselsel değişim, - azalış, + artış)				
Elyaf Oryantasyonu	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
E-cam/Epoksi	2812	2097, (-25)	1510, (-46)	1480, (-47)
E-cam/Epoksi/NK	3163, (+12)*	2158, (-32), (+3)*	1798, (-43), (+20)*	2120, (-33), (+43)*
E-cam/Epoksi/KNT	3674, (+30)*	2168, (-41), (+3.3)*	2093, (-43), (+38)*	2110, (-42), (+42)*

\* Her bir oryantasyon açısında katkısız numune ile yüzsel karşılaştırma.

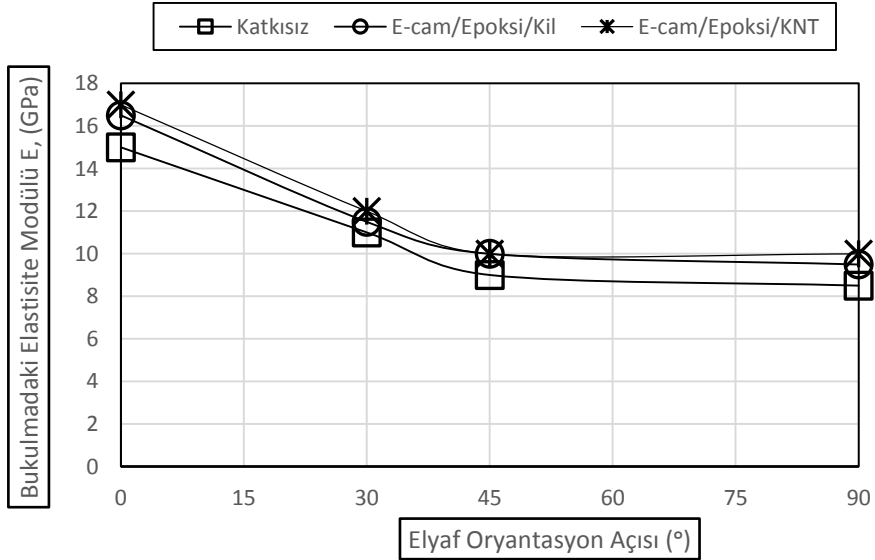
Her kompozitin kritik burkulma yükü, yük yer değiştirme eğrilerinden belirlenmiştir. Yük eğrisinin yön değiştirdiği noktakritik burkulma yükünü ( $P_{kr}$ ) temsil eder.  $30^\circ$  yönlü E-cam/epoksi kompozit numuneye ait yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.28'de örnek olarak gösterilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere bu deneyde ( $P_{kr}=2083$  N)

olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç tek bir deneyin sonucudur. Kritik burkulma yükleri üç deneyin ortalaması alınarak hesaplanmış ve Tablo 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.28: 30° oryantasyonunda E-cam/epoksi için bir burkulma grafiği örneği.

Nanopartiküller numunelerde burkulma elastisite değerlerini küçük oranlarda değiştirmişlerdir (Şekil 4.29). Buradaki elastisite modülleri Instron 8801 test cihazından alınan değerlerdir. Elastisite modülleri de  $P_{kr}$  dayanım değerinde olduğu gibi açisal değişimin aksenal yönden eksene dik yöne (transverse) doğru azaldığı görülmektedir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29: Farklı oryantasyon ve katkı maddelerinde burkulmadaki ( $E$ ) elastisite modülü değerleri

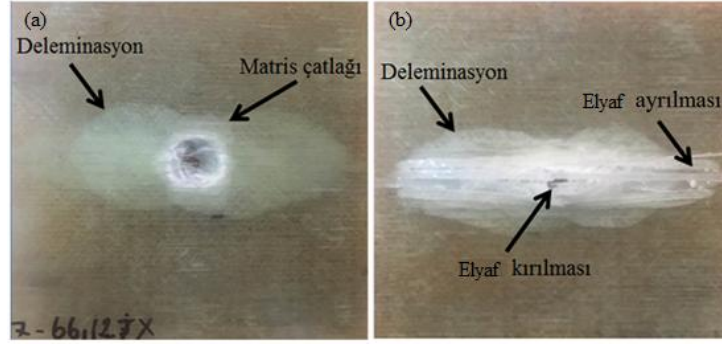
#### 4.2.4. Darbe Deneyleri

Tez çalışmasının bu kısmında kompozit plakların darbe davranışları oda sıcaklığında deneysel olarak araştırılmıştır. Takviye malzemesi olarak üç eksenli ve tek yönlü kumaşlardan ağırlıkça %0,5 KNT katkılı epoksi ve katkısız epoksi reçine kullanılarak dört tip kompozit plakalar üretilmiştir. Darbe deneyleri Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Araştırmalar Laboratuvarında bulunan Instron Dynatup 9250HV darbe deney cihazında yapılmıştır (Şekil 4.30). Darbe deneylerinde ortasında çapı 76,2 mm olan dairesel delik bulunan pnömatik çeneler numunenin tüm kenarlarından sıkı bir şekilde tutmaktadır. Vurucu uç ve üzerindeki yük hücresinin toplam ağırlığı 6.3 kg dır. Yük hücreğine harici ağırlık konularak yük arttırılabilmektedir. Numuneler su jeti kesimi ile 100x100mm olarak ebatlandırılmıştır. Darbe deneyleri belirli darbe enerjilerinde hasar başlangıcından tam delinme durumuna kadar arttırılmak suretiyle aynı özellikte her bir enerjide yeni bir numuneye uygulanarak yapılmıştır. Numunelerin hasar analizleri; kuvvet-yer değiştirme (çökme) eğrileri ve hasarlı numuneler incelenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yapılmıştır.



Şekil 4.30: Tipik bir darbe deneyi

Darbe hasarının en belirgin gözlemlendiği numunelerden darbe enerjisi  $E_i=66.12 \text{ J}$ 'deki hasarlı numunenin resminden görüleceği üzere (Şekil 4.31), tabaka kalınlığı boyunca bütün cam elyafların kırıldığı, fakat en alttaki son tabakalarda ise delaminasyonların yayılarak eksenel yönünde ( $0^\circ$ ) yönlendiği görülmektedir. Bunun nedenin alt katmanlarda yükü karşılayan elyafların vurucu ucun ötelemesiyle tabakalar arası ayrılmalara (deleminasyonlara) neden olduğu elyafların eksenel yönde daha mukavim olduğundan dolayı tabaka ayrılmalarında bu alyaf yönünde olduğu öngörülmüştür.



Şekil 4.31: 66,12 J darbe enerjisindeki üç eksenli katkısız E-cam kompozit numuneye ait hasarlı numune fotoğrafları, a) ön yüzey, b) arka yüzey.

E-cam darbe çalışmalarına yönelik deneylerin hasar resimleri ön görünüş ve arka görünüş halinde Şekil 4.32’de verilmiştir. DKK takviyeli E-cam/epoksi, Şekil 4.32 (a,b) geri sekme, (c,d) saplanma, (e,f) delinme hasarıdır.

Üst Yüzey (Darbe Tarafı) Hasarı (Katkısız)	Üst Yüzey (Darbe Tarafı) Hasarı (Katkısız)	Üst Yüzey (Arka Tarafı) Hasarı (KNT katkılı)	Üst Yüzey (Arka Tarafı) Hasarı (KNT katkılı)
(a) Ön 30J	Arka	(b) Ön 30J	Arka
(c) Ön 48J	Arka	(d) Ön 48,6J	Arka
(e) Ön 54,2J	Arka	(f) Ön 56,9J	Arka

Şekil 4.32: DKK E-cam takviyeli katkısız ve katkılı kompozit numunelere ait (a,b) geri sekme, (c,d) saplanma, (e,f) delinme için hasarlı numune fotoğrafları

Üst Yüzey (Darbe Tarafı) Hasarı (Katkısız)	Üst Yüzey (Darbe Tarafı) Hasarı (Katkısız)	Üst Yüzey (Arka Tarafı) Hasarı (KNT katkılı)	Üst Yüzey (Arka Tarafı) Hasarı (KNT katkılı)
(a) Ön 24J	Arka	(b) Ön 27J	Arka
(c) Ön 34,4J	Arka	(d) Ön 38J	Arka
(e) Ön 67J	Arka	(f) Ön 65,6J	Arka

Şekil 4.33: Tek yönlü E-cam takviyeli katkısız ve katkılı (KNT) kompozit numunelere ait ait (a,b) geri sekme, (c,d) saplanma, (e,f) delinme için hasarlı numune fotoğrafları

Standart kumaşlarla takviyelendirilmiş E-cam/epoksi kompozitler Şekil 4.33 (a,b) geri sekme, (c,d) saplanma, (e,f) delinme hasarıdır.



Üst Yüzey (Darbe Tarafı) Hasarı (Katkısız)	Üst Yüzey (Darbe Tarafı) Hasarı (Katkısız)	Üst Yüzey (Arka Tarafı) Hasarı (KNT katkılı)	Üst Yüzey (Arka Tarafı) Hasarı (KNT katkılı)
(a) Ön 25,6J	Arka	(b) Ön 25J	Arka
(c) Ön 48,2J	Arka	(d) Ön 47,6J	Arka
(e) Ön 49,6J	Arka	(f) Ön 57,2J	Arka

Şekil 4.34: DKK karbon elyaf takviyeli katkısız ve katkılı (KNT) kompozit numunelere ait (a,b) geri sekme, (c,d) saplanma, (e,f) delinme için hasarlı numune fotoğrafları

Karbon darbe çalışmalarına yönelik deneylerin hasar resimleri ön görünüş ve arka görünüş halinde Özel dikişli karbon kumaşlı numuneler için Şekil 4.34 (a,b) geri sekme (c,d) saplanma, (e,f) delinmedir.

Üst Yüzey (Darbe Tarafı) Hasarı (Katkısız)	Üst Yüzey (Darbe Tarafı) Hasarı (Katkısız)	Üst Yüzey (Arka Tarafı) Hasarı (KNT katkılı)	Üst Yüzey (Arka Tarafı) Hasarı (KNT katkılı)
(a) Ön 24J	Arka	(b) Ön 24J	Arka
(c) Ön 46.4J	Arka	(d) Ön 46.4J	Arka
(e) Ön 67.9J	Arka	(f) Ön 67.9J	Arka

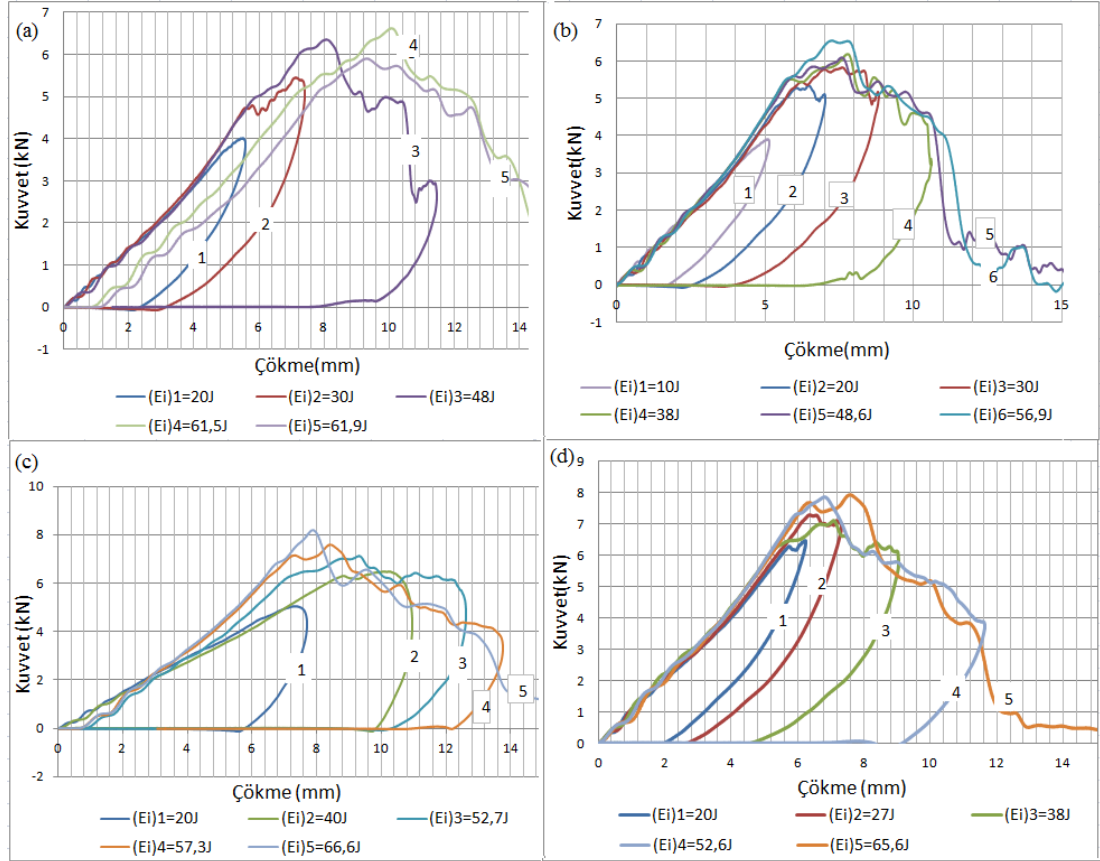
Şekil 4.35: TYK takviyeli katkısız ve katkılı (KNT) karbon kompozit numunelere ait (a,b) geri sekme, (c,d) saplanma, (e,f) delinme için hasarlı numune fotoğrafları

Karbon darbe çalışmalarına yönelik deneylerin hasar resimleri ön görünüş ve arka görünüş halinde standart karbon kumaş takviyeli kompozit numuneler için Şekil 4.35 (a,b) geri sekme (c,d) saplanma, (e,f) delinmedir.

#### 4.2.4.1 Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri

Kuvvet-çökme eğrileri darbe anındaki kompozit numunelere ait darbe karakteristiklerinin anlaşılmasında kullanılan grafik türlerinden biridir. Şekil 4.36'da artan darbe enerjisi ile kuvvetin çökmeye karşı değişimlerini gösteren bir kuvvet çökme (F-d) grafikleri görülmektedir. Her bir eğri yük anında bir artış bölgesi, bir maks. kuvvet değeri ile yükten boşalmada da bir azalma bölgesinden oluşmaktadır. Kuvvet-çökme (F-d) eğrisinde artış bölgesi darbe yüküne karşı numunenin gösterdiği dirençten dolayı eğilme rijitliği olarak kabul edilir. Artan darbe enerjisi ile meydana

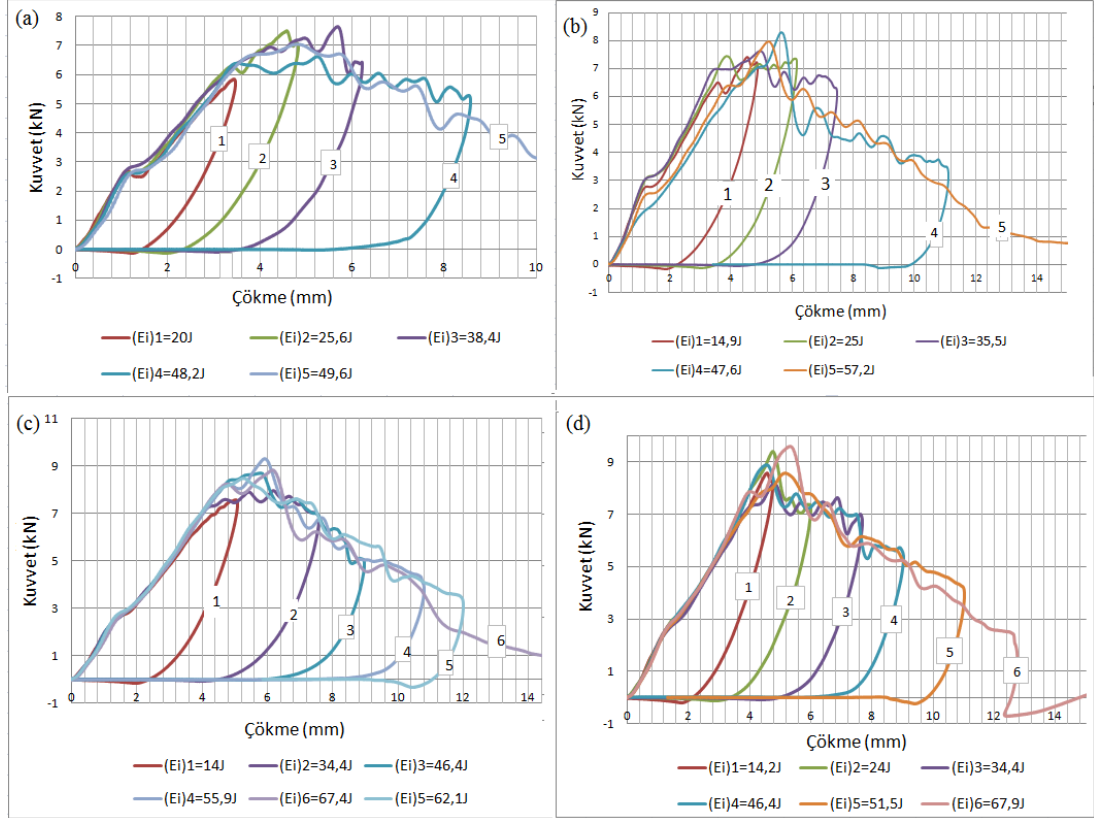
gelen bu eğriler kapalı ve açık tip eğri olarak iki grup da incelenir. Kapalı tip eğri vurucunun numuneye darbe uyguladıktan sonra geri sekerek oluşan eğrilerdir. Burada uygulanan darbenin büyük oranda numune tarafından absorbe edilmesi ve absorbe edilmeyen darbe enerjide vurucunun geri sekmesi için kullanılması söz konusudur.



Şekil 4.36: E-cam takviyeli kompozitlerin Kuvvet-çökme eğrileri; (a) DKK E-cam/epoksi, (b) DKK E-cam/epoksi/KNT, (c) TYK E-cam/epoksi (d) TYK E-cam/epoksi/KNT,

Darbe enerjisi arttırıldığında, geri sekme bölgesi azalarak kapalı tip eğri genişmeye başlar ve numunenin deformasyonu artar. Şekil 4.36 (a,3)'den görüldüğü gibi kompozit numune kapalı tip bir eğri sergilemesine rağmen kapalı tip eğriden açık eğriye geçişin eşliğinde bulunmaktadır ve darbe enerjisinin arttırılmasıyla birlikte eğri kapalı durumdan açık duruma geçecektir. Eğer eğri açık durumda ise vurucu uç kompozit numuneye saplı kalmış veya numuneyi delmiştir. Bu durumda kompozit numuneye saplanan uç numune kalınlığı doğrultusunda aşağı doğru hareket eder ve geri sekme meydana gelmez. Dolayısı ile Şekil 4.36 (a-4)'den görüldüğü gibi ya saplanma veya delinme oluşmuştur. Katkılı ve katkısız darbe numunelerine artan enerji seviyelerinde darbe yükleri uygulanmıştır. E-cam takviyeli kompozitlerde

düşük yüklü darbe deneylerinde KNT katkısı pozitif etki ederken saplanma sınırından sonra negatif etki ettiği görülmüştür. KNT'lerin kompozitin yapısını gevrekleştirerek kırılmayı kolaylaştırdığı ve darbe hasarının daha kolay meydana geldiği öngörülmüştür. Malzemenin sertleşerek gevrekliğinin artması düşük yüklü kullanım yerleri için avantaj olarak kabul edilebilir.

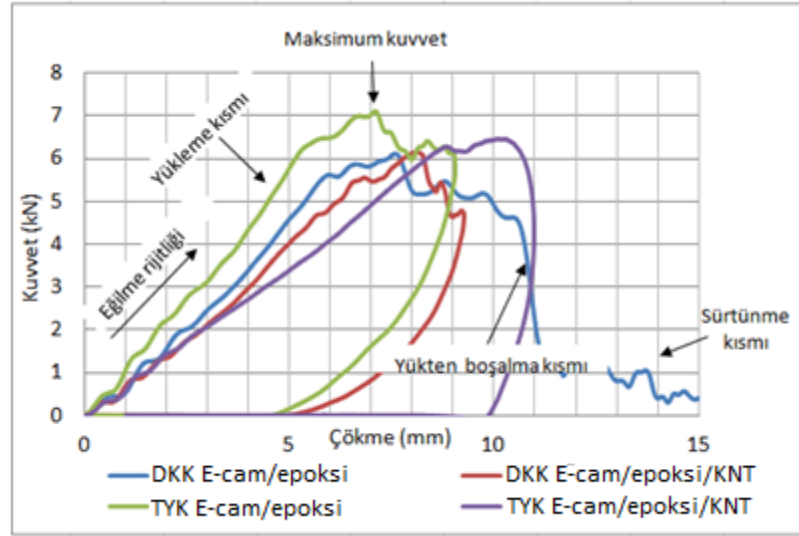


Şekil 4.37: Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin Kuvvet-çökme eğrileri: (a) DKK karbon/epoksi, (b) DKK karbon/epoksi/KNT, (c) TYK karbon/epoksi, (d) TYK karbon/epoksi/KNT

Darbe enerjisi arttırılmaya devam edildiğinde vurucu numuneye saplanır, numune kalınlığı boyunca hareket eder ve sonunda da numuneyi delerek alt yüzeyden çıkar yani delinme olayı gerçekleşir. Şekil 4.37 (a-5), (b-5), (c-5), (d-6) kompozit numuneler vurucu uç ile delinmiş numunelerdir. Eğrilerin uç kısımlarından anlaşıldığı üzere, yatay eksenin sonuna doğru devam eden bu kısım kompozit numunenin vurucu uç ile arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan sürtünme kısmını ifade etmektedir. Bundan dolayı bu darbe enerjisinden sonra darbe enerjisi arttırılsa bile kompozit numunenin daha fazla darbe enerjisini absorbe edemeyeceği anlaşılmaktadır. KNT katkısı karbon elyaf takviyeli kompozitlerde de cam elyaf kompozitlerde olduğu gibi yüksek darbe yüklerinde (saplanma eşiğinden sonra)

dayanımı nispeten düşürmüştür. Bu sonuçlar literatüle de benzerlik göstermektedir. KNT katkısının malzemeyi gevrekleştirmesi bir dezavantaj olarak görülmektedir.

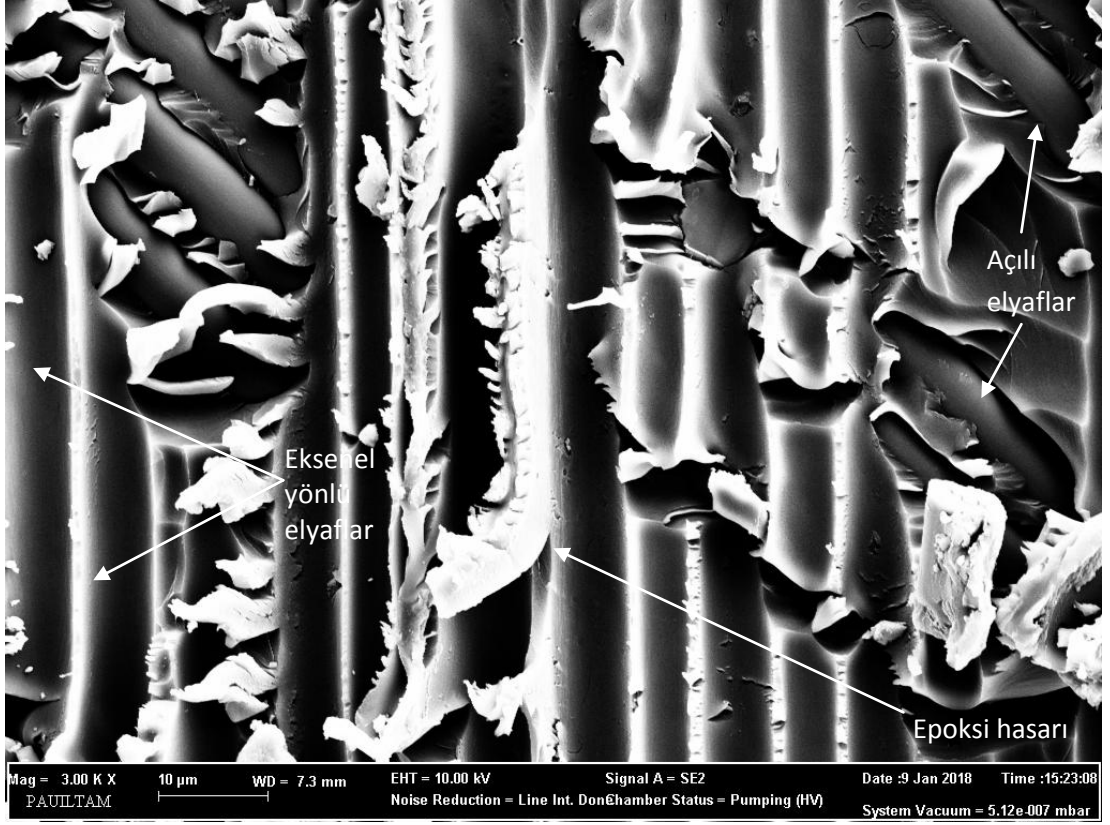
Şekil 4.38’de 48 J darbe enerjisinde E-cam takviyeli kompozitleri kendi arasında kıyasladığımızda TYK takviyeli katkılı kompozit numunenin darbe enerjisini en iyi absorbe ettiği görülmekte, bu darbe enerjisinde en zayıf numunenin yine görüldüğü üzere DKK takviyeli katkılı numune olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.38: E-cam takviyeli kumaşların 48J darbe enerjisinde Kuvvet-çökme eğrileri.

#### 4.2.5 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri

Çekme deneyleri gerçekleştirilen numunelerden alınan SEM incelemelerine dayanarak hasar analizi şu şekildedir. Yapışma yüzeyinde başlayan tabakalar arası kesme kuvveti etkisinde enine olarak yayılarak ara yüzey hasarı ve devamında elyafların hasara uğrayarak koptukları görülmektedir. SEM görüntülerinden anlaşıldığı üzere kompozit mukavemetinin artmasının temel nedeni partiküllerin homojen şekilde dağılması ve reçine ile elyaf arasındaki bağları güçlendirerek yük aktarımının kompozit bileşenleri üzerinde daha dengeli olmasını sağlamasıdır.



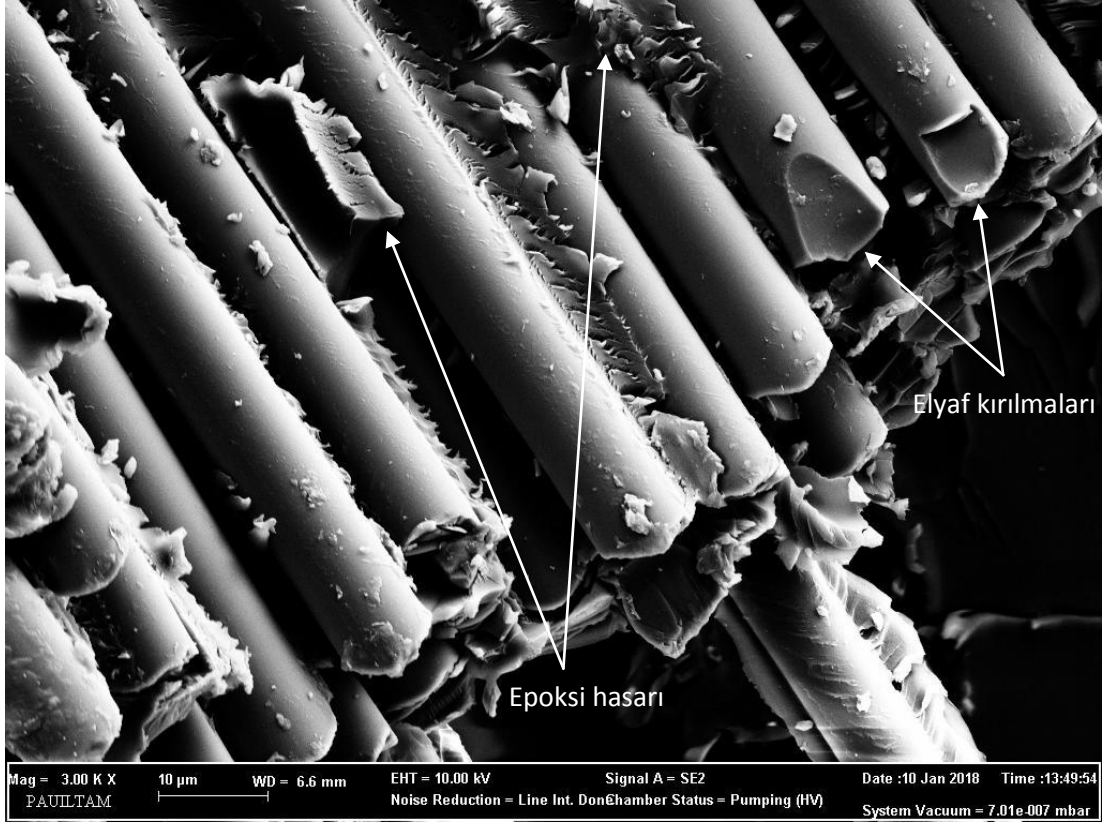
Şekil 4.39: Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, Özel dikişli kumaş takviyeli E-cam/epoksi

Şekil 4.39'da üç eksenli E-cam/epoksi/katkısız, verilmiştir. Plakanın tabakalar arası ara yüzey ayrılımlarının düzgün bir şekilde meydana geldiği ve bununla birlikte matris malzemelerinin elyaflara güçlü bir şekilde yapıştığı görülmektedir. Yine görüntüden anlaşılacağı üzere elyaf düzeninde preslemeden kaynaklanan bir bozulma görülmemektedir.



Şekil 4.40: Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü, tek yönlü dikişsiz kumaş takviyeli karbon/epoksi/KNT

Şekil 4.40 tek yönlü dikişsiz karbon/epoksi/KNT (%0,5) kompozitin tabakalar arası ayrılma yüzeyleri ve kopma hasarları görülmektedir. SEM görüntülerinden anlaşılacağı üzere reçine ve elyaflar arası yapışma düzgün ve KNT partiküllerinin dağılımı homojendir. Ayrıca KNT partikülleri elyaf yüzeylerinde pürüzlü bir yapı meydana getirerek sanki nervürlü bir demir gibi işlev görmüş ve epoksi-matris arayüzey bağları daha güçlü olmuştur.



Şekil 4.41: Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü tek yönlü dikişsiz E-cam/epoksi

Şekil 4.41’de tek yönlü dikişsiz E-cam/epoksi/katkısız kompozit numuneye ait kopma hasarı görülmektedir. Burada matrisden elyafa aktarılan çekme yükü aksenal gerginlik yaratarak öncelikle tabakalar arası matris hasarına neden olmuş ve sonrasında elyafları hasara uğratarak demetler halinde kopmalarına neden olmuştur.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, E-cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozit malzemelere eklenen nanopartiküllerin, KNT ve NK, malzemenin mekanik özelliklerine, yorulma dayanımına, burkulma davranışına ve darbe performanslarına nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan araştırmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Nanokil (NK) katkısı elyaf oryantasyon açıları  $30^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$  olan laminalarda ortalama %4, Karbon Nano Tüp (KNT) katkılı laminalarda ortalama %8 çekme dayanımı artışı sağlamıştır. Elyaf oryantasyon açısı  $0^{\circ}$  olan laminalar için bu oran NK katkısında ortalama %16 ve KNT katkısı olanlar için ise ortalama %20 artış olmuştur.
- Elyaf oryantasyon açılara göre malzeme dayanımı incelendiğinde “ $0^{\circ}$ ” oryantasyon açısında maksimum çekme ve yorulma dayanım değerleri göstermiş fakat oryantasyon açı değerleri fibere dik yön olan  $90^{\circ}$ 'ye yaklaştıkça hem çekme dayanımı hemde yorulma dayanımı değerleri azalmıştır. Kompozit numunelerin elyaf doğrultusundaki ( $0^{\circ}$ ) çekme dayanımı, elyafa dik yöndeki ( $90^{\circ}$ ) çekme dayanımından yaklaşık 7 kat daha fazla çıkmıştır.
- Yorulma deneyleri sonuçlarında elde edilen S-N grafikleri nanopartikül katkılarının etkileri bakımından incelendiğinde, KNT katkılı numuneler tüm numuneler için en iyi yorulma dayanımlarını sergilemişlerdir. NK katkılı numunelerin yorulma dayanımları da katkısız numunelerden yüksek çıkmıştır. Nanopartikül katkılı kompozitlerin yorulma dayanımları elyaf oryantasyon açılara göre incelendiğinde,  $0^{\circ}$  derece oryantasyon açılı olanların diğerlerine göre daha yüksek oldukları tespit edilmiştir
- Kompozitlerin elastisite modülleri ve yük taşıma kapasiteleri, KNT ve NK katkılarından önemli ölçüde etkilendiği sonucuna varılmıştır. Genel olarak, KNT parçacıklarının kompozitlere eklenmesi kompozitlerin elastisite modüllerini ve yük taşıma kapasitesini artırır. Buna göre, ağırlıkça % 0,5 KNT ile modifiye edilmiş olan tüm elyaf oryantasyon açılı kompozitlerin elastisite modülü değerleri ve kritik burkulma yükleri en yüksek değerde çıkmıştır. Dolayısıyla, KNT ve NK katkılarının kompozitlerin burkulma direncini arttırdığı sonucuna

varılmıştır. Nanokil (NK) katkıli kompozitlerin kritik burkulma yükünü katkısız olanlarına göre % 12 arttırdığı ve benzer şekilde KNT katkıli olanlarında % 30 arttırdığı tespit edilmiştir.

- Düşük enerjili darbe deneylerinde, darbe dayanımları, kompozitlerin yapıldığı kumaş türü bakımından, hem karbon elyaf hem de cam elyaf takviyeli kompozitlerde en iyi sonuçları tek eksenli katkıli numunelerin verdiği görülmüştür.
- Nanopartikül katkıların, dikişli kıvrımsız karbon elyaf kumaş takviyeli kompozitlerde darbe dayanımına ortalama %14 oranında pozitif olarak etki ettiği belirlenmiştir.

İleri çalışma konusu önerisi olarak, gerekli literatür araştırması yapıldıktan sonra Nano Kil ve Nano Karbon Tüp katkı elemanları haricinde diğer nano boyuttaki katkı malzemelerinin polimer kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkileri araştırılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

Adden S. and Horst P., “Damage propagation in non-crimp fabrics under bi-axial static and fatigue loading”, *Composites Science and Technology*, 66, 626-633, (2006).

Altan G., “Değişik sıcaklık ve nem etkisinde çalışan birleştirilmiş kompozit malzemelerin yorulma mukavemetlerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Denizli, (2009).

Algan B., “Impact on laminated composites”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekanik Anabilim Dalı*, İzmir, (2009).

Ağır İ., Kıvrımsız dikişli cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit plakların darbe davranışının incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Denizli, (2012).

Balcıoğlu H. E., “Lateral buckling of laminated composites with delamination”, Yüksek Lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Uşak, (2012).

Bektaş N., and Ağır İ., “Impact response of composite plates manufactured with stitch-bonded non-crimp glass fiber fabrics”, *Science and Engineering of Composite, Materials*, 21(1), 111-120, (2013).

Boumbimba R. M., Froustey C., Viot P., Olive J. M., Leonardi F., Gerard P., Inoubli R. “Preparation and mechanical characterisation of laminate composites made of glass fiber/epoxy resin filled with tri bloc copolymers”, *Composite Structures*, 116, 414-422, (2014).

Borrego L. P., Costa J.D.M., Ferreira J.A.M., Silva H., “Fatigue behaviour of glass fibre reinforced epoxy composites enhanced with nanoparticles”, *Composites: Part B*, 62, 65-72, (2014).

Böger L., Sumfleth J., Hedemann H., Schulte K. “Improvement of fatigue life by incorporation of nanoparticles in glass fibre reinforced epoxy”, *Composites*, 41, 1419-1424, (2010).

Brunbauer j., Stadler H., Pinter G. “Mechanical properties, fatigue damage and microstructure of Carbon/epoxy laminates depending on fibre volume Content”, *International journal of Fatigue*, 70, 85-92, (2015).

Can H., ‘Ön Gerilmeli Plastik Dişli Çark Tasarımı’, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Anabilim Dalı*, Ankara, (2004).

Eskizeybek V., “Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Konya, (2012).

<ftp://ftp.vectorply.com>, (2018).

<ftp://ftp.netcomposites.com/guide-tools>, (2018).

<ftp://ftp.serdarkorkut.com/2018/01/27/sn-wohler-egrisi-nedir/>, (2019)

<ftp://ftp.slideplayer.com/slide/8425431/>, (2019)

<ftp://ftp.afbmetal.com/steel-genel-celik/c45-imalat-celik-steel-1045/>, (2019)

Islam M. E., Tanjheel H.M., Mahesh V. H., Shaik J. “Characterization of carbon fiber reinforced epoxy composites modified with nanoclay and carbon nanotubes”, *Procedia Engineering*, 105, 821-828, (2015).

Fan Z., Santare M. H., Advani S.G. “Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes”, *Composites: Part A*, 39, 540-554, (2008).

Ferreira J. A. M., Borrego L.P., Costa J.D.M., Capela C., “Fatigue behaviour of nanoclay reinforced epoxy resin composites”, *Composites: Part B*, 52, 286-291, (2013).

Gkikas G., Barkoula N.-M., Paipetis A.S. “Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy”, *Composites: Part B* 43, 2697-2705, (2012).

Gojny F., Wichmann, M., Fiedler, B. ve Schulte, K., “Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study. *Composites Science and Technology*, 65, 2300-2313, (2005).

Helmy S. and Hoa S.V. “Tensile fatigue behavior of tapered glass elyaf reinforced epoxy composites containing”, *Composites Science and Technology*, 102, 10-19, (2014).

Johannes M., Jakobsen J., Thomsen O.T., Bozhevolnaya E., “Examination of the failure of sandwich beams with core junctions subjected to in-plane tensile loading”, *Composite Science and Technology*, 9, 1447-1457, (2009).

Khan S.U., Munir A., Hussain R., Kim J.K., “Fatigue damage behaviors of carbon elyaf-reinforced epoxy composites containing nanoclay”, *Composites Science and Technology*, 70, 2077-2085, (2010).

Kim J.K. and Sham M.L., “Impact and delamination failure of woven-fabric composites, *Composites Science and Technology*, 60, 745-751, (2000).

Liang S., Gning P.B., Guillaumat L. “A comparative study of fatigue behaviour of Flax/epoksi and Glass/epoksi composites”. *Composites Science and Technology*, 72, 535-543, (2012).

Luo, J.J., and Daniel, I.M., “Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer/clay nanocomposites, *Compos. Sci. Technology* (63)11, 1607–1616, (2003).

Ma H., Jia Z., Lau K., Leng J., Hui D., “Impact properties of glass fiber/epoxy composites at cryogenic enviroment”, *Composites Part:B* (92), 210-217, (2016).

Manjunatha C.M., Bojja R., Jagannathan N., Kinloch A.J., Taylor A.C. “Enhanced fatigue behavior of a glass fiber reinforced hybrid particles modified epoxy nanocomposite”, *International journal of Fatigue*, 54, 25-31, (2013).

- Mortazavian S., Fatemi A. “Fatigue behaviour and modeling of short fiber reinforced polymer composites including anisotropy and temperature effects”, *International Journal of Fatigue*, 77, 12-27, (2015).
- Manjunatha C.M., Taylor A.C., Kinloch A.J., Sprenger S. “The tensile fatigue behavior of a silica nanoparticle-modified glass fibre reinforced epoxy composite”. *Composites Science and Technology*, 70, 193-199, (2010).
- Muthu, J. and Dendere, C., “Functionalized multiwall carbon nanotubes strengthened GRP hybrid composites: Improved properties with optimum fiber content”, *Composites: Part B*, 67, 84-94, (2014).
- Mili F., Necib B., “Impact behavior cross-ply laminated composite plates under low velocities”, *Composite Structures*, 51, 237-244, (2001).
- Njuguna, B.J., Pielichowski, K. and Alcock, J.R., (2007), Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites, *Advanced Engineering Materials*, 9(10): 835-847.
- Pekbey Y., “Buckling of economical composite bars”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, İzmir, (2005).
- Popov Egor P., “Engineering mechanics of solids”, New Jersey, US, (1990).
- Rahman M., Hosur M., Zainuddin S.,... “Effects of amino-functionalized MWCNTs on ballistic impact performance of E-glass/Epoxy composites using a spherical projectile”, *International Journal of Impact Engineering* 57, 108-118, (2013).
- Sayer M., “Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Denizli, (2009).
- Schmidt, D., Shah, D., Giannelis, E.P., “New Advances in Polymer/Layered Silicate Nanocomposites”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6(3): 205–212, (2002).

Shao Y., Yashiro T., Okubo K., Fujii T. “Effect of cellulose nano fiber (CNF) performance of carbon fiber fabric composites”, *Composites*, 76, 244-254, (2015).

Selmy A.L., Azab A.N., El-baky M.A.A. “Flexural fatigue characteristics of two different types of glass fiber/epoxy polymeric composite laminates with statistical analysis”, *Composites*, 45, 518-527, (2013).

Söyleyici M. U. “Stacking sequences optimization of the anti-buckled laminated composites considering various failure criteria” *MSc Thesis, Izmir Institute of Technology*, Izmir, (2011).

Şahin, Y., *Kompozit Malzemelere Giriş*, Ankara: Seçkin Yayıncılık, 424s, (2006).

Qi B., Zhang Q. X., Bannister M., Mai Y.-W., “Investigation of the mechanical properties of DGEBA-based epoxyresin with nanoclay additives”, *Composite Structures* 75, 514-519, (2006).

Qian H., Greenhalgh E.S., Shaffer M.S.P., “Bismarck A., Carbon nanotube-based hierarchical composites: a review”, *Journal of Materials Chemistry* 20, 4729-4956, (2010).

Tian Y., Zhang H., Zhang Z., “Influence of nanoparticles on the interfacial properties of fiber-reinforced-epoxy composites”, *Composites: Part A*, 98, 1-8, (2017).

Tong, L., Mouritz, A., P. and Bannister, M., K., “3D Fibre Reinforced Polymer Composites, *Elsevier Science Ltd.*, Oxford, (2002).

Özben, T. “Analysis of critical buckling load of laminated composites plate with different boundary conditions using FEM and analytical methods”, *Computational Materials Science*, 45, 1006-1015, (2009).

Ünal H.Y., “Nano takviyeli kompozit malzemelerde yorulma karakteristiğinin araştırılması”, Yüksek Lisan Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, İzmir, (2016).

Üzümcü N., “Nano karbon partikül ile güçlendirilmiş kompozit levha üretimi ve darbe davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Denizli, (2017).

Vallons, K., “The behaviour of carbon fibre - epoxy NCF composites under various mechanical loading conditions, PhD Thesis, *University of Leuven Engineering Faculty*, Belgium, (2009).

Warrier A., Godora, “The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix”, *Composites: Part A*, 41, 532-538, (2010).

Weiss A., Trabelsi W., Michel L., Barrau J.J. and Mahdi S. “Influence of ply-drop location on the fatigue behaviour of tapered composites laminates”, *Procedia Engineering*, 2, 1105-1114, (2010).

Yağcı, E., “Tabakalı kompozit ince plakların plak düzlemine dik yükleme etkisi altındaki eğilme analizi” Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Adana, (2007).

Zhou Y., Pervin F., Jeelani S., Mallick P. K., “Improvement in mechanical properties of carbon fabric–epoxy composite using carbon nanofibers”, *Journal of materials processing technology*, 198, 445-453, (2008).



## 7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Berkant DİNDAR
Doğum Yeri ve Tarihi	: Kırcalı-1983
Lisans Üniversite	: Pamukkale Üniversitesi, Makine Bölümü
Y. Lisans Üniversite	: Pamukkale Üniversitesi, Makine Bölümü
Elektronik posta	: berkantdindar20@gmail.com
İletişim Adresi	: Kınıklı/DENİZLİ

### Yayın Listesi :

- Dindar, B., Bektaş, N.B., “Experimental Investigation of Fatigue and Mechanical Properties of Unidirectional Composite Plates Filled Nanoparticles”, *Acta Physica Polonica A*, DOI: 10.12693/APhysPolA.134.285, (2018).
- Dindar, B., Bektaş, N.B., “Experimental Investigation of Buckling Loads of Glass/Epoxy Composites Modified with Nano Particles”, *Acta Physica Polonica A*, x(x) xxx-xxx, (2019). (Kabul edildi yayınlanması bekleniyor.)

### Konferans listesi:

- Dindar, B. and Bektaş, N.B, Experimental Investigation of Buckling Loads of Glass/Epoxy Composites Modified with Nano Particles, *8th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition (APMAS2018)*, (Poster Presentation), April 24-30,2018, Oludeniz, TURKEY, Abstrac book, pp. 191.
- Dindar, B. and Bektaş, N.B, Experimental Investigation of Fatigue and Mechanical Properties of Unidirectional Composite Plates Filled Nanoparticles, *7th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition (APMAS2017)*, (Poster Presentation), April 22-26, 2017, Oludeniz, TURKEY, Abstrac book, pp.124.