



**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DİKEREK FİBER YERLEŞTİRME (TFP) TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİLMİŞ  
KOMPOZİT YAPILARIN MEKANİK KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gökhan K.ÇOBAN**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**ŞUBAT 2023**

T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DİKEREK FİBER YELEŞTİRME (TFP) TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİLMİŞ  
KOMPOZİT YAPILARIN MEKANİK KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan K. ÇOBAN  
20393040017

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cihan KABOĞLU

ŞUBAT 2023



BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 20393040017 numaralı Yüksek Lisans / Öğrencisi Gökhan K.ÇOBAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DİKEREK FİBER YERLEŞTİRME (TFP) TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİMİŞ KOMPOZİT YAPILARIN MEKANİK KARAKTERİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**     **Doç. Dr. Cihan KABOĞLU**  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**       **Prof. Dr. Deniz UZUNSOY**  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK**  
Kocaeli Üniversitesi

**Teslim Tarihi**        **: 20 Şubat 2023**  
**Savunma Tarihi**     **: 17 Şubat 2023**



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Gökhan K. ÇOBAN

İmzası :

X X X X

*Eşime, kızıma ve emeği geçenlere,*



## ÖNSÖZ

Çalışma sürecinde bana her türlü desteği vermekten çekinmeyen, yapıcı ve olumlu tavrı ile beni cesaretlendiren, farklı bakış açıları ve yorumları sayesinde çalışmanın akademik değerini yükselten sayın hocam ve danışmanım Doçent Doktor Cihan KABOĞLU' na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle tüm hayatım boyunca benim arkamda duran babam Seyit Battal K.ÇOBAN, merhameti ve sevgisi ile beni hep cesaretlendiren annelerim Hürü K.ÇOBAN ve Nuriye ÖZCAN' a sonsuz şükranlarımı sunarım. Ömrü boyunca eğitime-öğrenciye ve eğitimciye sonsuz saygı duyan rahmetli dedem Ahmet KÜÇÜKKURT' a tüm emekleri ve öğütleri için teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Son olarak yüksek Lisans çalışmam sırasında dünyaya gelen biricik kızım Belis Vera' nın hayatımıza kattığı renk ve heyecan ile tamamladığım bu çalışma sürecinde; her daim yanımda olan beni destekleyen ve her türlü fedakarlıktan kaçınmayan canım eşim Gözde K.ÇOBAN' a sonsuz teşekkür ve sevgilerimi sunarım.

Şubat 2023

Gökhan K. ÇOBAN

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
KISALTMALAR .....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY .....	xv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ .....</b>	<b>3</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>16</b>
3.1 Materyal.....	16
3.1.1 Karbon fiber.....	16
3.1.2 Poliamid 6.....	18
3.1.3 Epoksi reçine sistemi .....	20
3.1.4 Diğer malzemeler.....	22
3.2 Yöntem .....	22
3.2.1 Hibrit fiber teknolojisi .....	22
3.2.2 Fiber yerleştirme teknolojisi .....	24
3.3 Numune Üretimi.....	26
3.3.1 Numune kalıplama.....	26
3.3.2 Numune kesimi .....	27
3.3.3 Numune boyutlandırması.....	28
3.3.3.1 Çekme testi numuneleri .....	29
3.3.3.2 Eğme testi numuneleri .....	29
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>31</b>
4.1 Numune Tip – 1 Üretimi (PA6) .....	32
4.2 Numune Tip – 2 Üretimi .....	35
4.3 Termal Karakterizasyon Çalışmaları.....	37
4.4 Çekme Test Sonuçları .....	41
4.4.1 12K Karbon fiber + PA6 – çekme testi sonuçları.....	41
4.4.2 12K Karbon fiber + epoksi çekme testi sonuçları.....	43

4.5 Eğme Testi Sonuçları .....	46
4.5.1 12K Karbon fiber + PA6 – eğme testi sonuçları.....	46
4.5.2 12K Karbon fiber + epoksi – eğme testi sonuçları .....	48
<b>5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>51</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>53</b>



## **KISALTMALAR**

<b>3D</b>	: 3 Boyut
<b>AOPS</b>	: Advanced Optimization For Principal Stress
<b>CNC</b>	: Computerized Numerical Control
<b>DSC</b>	: Differential Scanning Calorimetry
<b>FEA</b>	: Finite Element Analysis
<b>FEM</b>	: Finite Element Method
<b>FVF</b>	: Fiber Volume Fraction
<b>GPa</b>	: Giga Pascal
<b>HM</b>	: High Modulus
<b>HT</b>	: High Tensile
<b>HTT</b>	: High Heat Treatment
<b>IHT</b>	: Intermediate Heat Treatment
<b>IM</b>	: Intermediate Modulus
<b>kN</b>	: KiloNewton
<b>Mm</b>	: Mili metre
<b>MPa</b>	: Mega Pascal
<b>PA6</b>	: Polyamide 6
<b>PBO</b>	: Polybenzoxazol
<b>PBT</b>	: Polybutylene terephthalate
<b>PLC</b>	: Programmable Logic Controller
<b>PPS</b>	: Polyphenylene sulfide
<b>SHT</b>	: Super High Tensile
<b>Spin-COM</b>	: Spinning and Commingling
<b>TFP</b>	: Tailored Fiber Placement (Dikerek Fiber Yerleştirme)
<b>Tg</b>	: Glass Transition Temperature
<b>UHM</b>	: Ultra High Molecular
<b>VARTM</b>	: Vakum Destekli Reçine Transfer Yöntemi

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 3.1:</b> ISO14125 – Sınıf 4 eğme numunesi numune boyutları ve test düzeneği ayarları.....	<b>30</b>
<b>Çizelge 4.1:</b> Hyosung- Tansome – H2550 tip karbon fiber özellikleri [25].....	<b>31</b>
<b>Çizelge 4.2:</b> PA6 ve Epoksi reçine temel özellikleri [26, 27] .....	<b>31</b>
<b>Çizelge 4.3:</b> Numune Tip-1 üretimine dair detaylar .....	<b>33</b>
<b>Çizelge 4.4:</b> Numune üretiminde kullanılan sıcaklık-zaman ilişkili mekanik test sonuçları .....	<b>33</b>
<b>Çizelge 4.5:</b> Numune Tip – 2 üretimine dair detaylar. ....	<b>36</b>
<b>Çizelge 4.6:</b> Numune Tip – 2 konsolidasyon parametreleri .....	<b>36</b>
<b>Çizelge 4.7:</b> Numune gruplarının termal özellikleri .....	<b>38</b>
<b>Çizelge 5.1:</b> Ortalama test sonuçlarının karşılaştırılması .....	<b>51</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1:</b> Delikli ve deliksiz numunelerin test çekme test sonuçları [3].....	<b>4</b>
<b>Şekil 2.2:</b> TFP ile farklı dikiş iplikleri ile üretilmiş numunelerin Mode-I test sonucu [4].....	<b>5</b>
<b>Şekil 2.3:</b> Dört farklı tip numune test sonuçları [8]. .....	<b>8</b>
<b>Şekil 2.4:</b> Farklı tiplerdeki hibrit fiberler ve bunların imalat özellikleri [13].....	<b>11</b>
<b>Şekil 2.5 :</b> SpinCOM teknolojisi ile hibrit fiber imalatı çalışma prensibi [14].....	<b>12</b>
<b>Şekil 2.6:</b> Farklı sıcaklıkta test edilen numunelerin üç nokta eğme test sonuçları [15]. .....	<b>14</b>
<b>Şekil 3.1:</b> Termoplastik polimer tipleri ve kristalinite durumuna göre sınıflandırılması [20]. .....	<b>19</b>
<b>Şekil 3.2:</b> Epoksi reçinelerin genel yapısı [21]. .....	<b>20</b>
<b>Şekil 3.3:</b> Hibrit fiber üretim adımları ve şematik bir hibrit yapısı gösterimi [22]. ..	<b>23</b>
<b>Şekil 3.4:</b> Karbon fiber takviyeli PPS ve PA6 matrisli hibrit fiberler. ....	<b>24</b>
<b>Şekil 3.5:</b> TFP makinası.....	<b>25</b>
<b>Şekil 3.6:</b> TFP makinası düzeneği [14] .....	<b>25</b>
<b>Şekil 3.7:</b> TFP yönteminde zikzak dikiş prensibi ve örnek uygulaması.....	<b>26</b>
<b>Şekil 3.8:</b> TFP ile üretilmiş A350 tipi uçakların cam çerçevesi .....	<b>26</b>
<b>Şekil 3.9:</b> Isıtmalı hidrolik pres şematik gösterimi ve ünitesi.....	<b>27</b>
<b>Şekil 3.10:</b> 3 eksenli CNC kesim tezgâhı. ....	<b>28</b>
<b>Şekil 3.11:</b> ISO 527-5'e göre çekme numunesinin şematik gösterimi [23].....	<b>29</b>
<b>Şekil 3.12:</b> ISO 14125'e göre 3 nokta eğme test düzeneği ve numunesinin şematik gösterimi [24]. .....	<b>30</b>
<b>Şekil 4.1:</b> Tek yönlü TFP laminasyon tasarımı .....	<b>32</b>
<b>Şekil 4.2:</b> Farklı parametrelerle üretilmiş test gruplarının kırık görselleri. a.60°C, 7 dakika; b.280°C, 7 dakika .....	<b>35</b>
<b>Şekil 4.3:</b> 280°C kalıplama sıcaklığı ve 12 dakika bekleme süresi ile hazırlanmış numunenin çekme kuvveti altında hasarlanması.....	<b>35</b>
<b>Şekil 4.4:</b> 12K Karbon fiber – Epoksi numunesinin kalıplama sonrası görüntüsü... ..	<b>37</b>
<b>Şekil 4.5:</b> PA6 esaslı numunenin Tg değeri ve kristalinite oranının ilk ısıtma eğrisi üzerinde gösterimi. ....	<b>39</b>

<b>Şekil 4.6:</b> Epoksi esaslı numunenin Tg değerinin ilk ısıtma eğrisi üzerinde gösterimi. .....	<b>40</b>
<b>Şekil 4.7:</b> Numune Tip – 1, Çekme Testi Kuvvet, kN- Uzama, mm grafiği .....	<b>41</b>
<b>Şekil 4.8: (a.)</b> Numune Tip – 1 çekme testi uygulanmış hasarlı numune örneği <b>(b.)</b> Numune Tip – 2 çekme testi uygulanmış hasarlı numune örneği .....	<b>42</b>
<b>Şekil 4.9:</b> Numune tip -1 Çekme Testi, Mukavemet, MPa - % Uzama grafiği .....	<b>42</b>
<b>Şekil 4.10:</b> Numune Tip -1, Çekme Testi, Çekme Mukavemeti, MPa – Elastik Modül, GPa grafiği .....	<b>43</b>
<b>Şekil 4.11:</b> Numune Tip – 2, Çekme Testi, Kuvvet, kN- Uzama, mm grafiği .....	<b>44</b>
<b>Şekil 4.12:</b> Numune tip – 2, Çekme Testi, Mukavemet, MPa- % Uzama grafiği .....	<b>45</b>
<b>Şekil 4.13:</b> Numune Tip – 2, Çekme Testi, Çekme Mukavemeti, MPa – Elastik Modül, GPa grafiği .....	<b>45</b>
<b>Şekil 4.14:</b> Numune Tip – 1, Eğme Testi Kuvvet, N - Deplasman, mm grafiği .....	<b>46</b>
<b>Şekil 4.15:</b> Numune Tip – 1, Eğme Testi Mukavemet, MPa-% Deplasman grafiği .	<b>47</b>
<b>Şekil 4.16:</b> Numune Tip – 1, Eğme Testi Mukavemet, MPa- Eğme Modülü, GPa ..	<b>48</b>
<b>Şekil 4.17:</b> Numune Tip – 2, Eğme Testi Kuvvet, N- Deplasman, mm grafiği .....	<b>49</b>
<b>Şekil 4.18:</b> Numune Tip – 2, Eğme Testi Mukavemet, MPa- % Deplasman grafiği	<b>50</b>
<b>Şekil 4.19:</b> Numune Tip – 2, Eğme Testi Mukavemet, MPa- Eğme Modülü, GPa ..	<b>50</b>
<b>Şekil 5.1:</b> Eğme ve Çekme test sonuçlarının karşılaştırılması.....	<b>52</b>

# DİKEREK FİBER YERLEŞTİRME (TFP) İLE ÜRETİLMİŞ KOMPOZİT YAPILARIN MEKANİK KARAKTERİZASYONU

## ÖZET

Günümüz endüstrisinde çok fonksiyonlu tasarımlar ve çok işlevli ürünlere duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Ürünlerden beklenen yüksek performans gereksinimlerinin yanı sıra çevreye olan etkisi, geri dönüőtürülmeye ve tekrar kullanıma uygunluk gibi çevreci yaklaşımlar ve zorlayıcı endüstriyel kısıtların oluşumu başlamıştır. Bu ve benzeri birçok etkenden dolayı kompozit ürünler ve çözümler tüm endüstrilerde giderek önem kazanmaktadır. Endüstriyel ve fonksiyonel beklentilerin ışığında bir üründen beklenen özelliklerin en iyileőtirilmiş çıktıları ile elde edilmesini sağlayan temel değişkenler arasında hammadde tipleri ve üretim teknolojileri gösterilebilir.

Yürütölen bu yüksek lisans çalışmasında kompozit endüstrisinde en yaygın kullanıma sahip olan epoksi matris sistemi birincil değerlendirme olarak termoplastik bir matris sistemi ile mekanik açıdan eğme ve çekme testleri uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıőtır. Termoplastik matris sistemi seçiminde çevreci ve tekrar kullanıma uygun olması göz önünde bulundurulmuőtur.

Çalışmanın yenilikçi ve yüksek akademik değerleri arasında tercih edilen numune üretim tekniği olan dikerek fiber yerleştirme (TFP) ve karıştırılmış hibrit fiber teknolojisi gösterilebilir. TFP tekniğinin temel avantajı bir üründen beklenen çok yönlü yüklenmeleri karşılayabilecek, geleneksel imalat teknikleri ile mümkün olmayan fiber yerleőim açılarının ve tasarımının yapılabilir olmasıdır. Dikerek fiber yerleştirme tekniği; yüksek performans, düşük ağırlık, düşük maliyet açısından en iyileőtirilmiş ürünü ortaya çıkartmada ve ileri mühendislik tasarımları ve uygulamalarında tercih edilebilir yenilikçi bir yöntemdir.

**Anahtar kelimeler:** Dikerek Fiber Yerleştirme, Termoplastik Kompozit, Karbon Fiber, Hibrit Fiber, Karıştırılmış Fiber.

**MECHANICAL CHARACTERIZATION OF COMPOSITE LAMINATES  
MANUFACTURED BY TAILORED FIBER PLACEMENT TECHNOLOGY  
(TFP)**

**SUMMARY**

In today's industry, the need for multifunctional designs and products is increasing. In addition to the high performance requirements expected from the products, environmentalist approaches such as environmental impact, suitability for recycling and reuse, and the existence of compelling industrial constraints have begun. Due to these and such similar factors, composite products and solutions are increasingly becoming more important in all industries. In the light of industrial and functional expectations, raw material types and production technologies can be shown among the main variables that ensure the features expected from a product to be obtained with optimized outputs.

In this conducted master's study, the epoxy matrix system, which has the most common use in the composite industry, was compared with a thermoplastic matrix system as a primary evaluation with mechanical comparative bending and tensile tests. At the same time, environmentalist and reusable possibilities were taken into consideration in the selection of the thermoplastic matrix system.

Among the innovative and high academic values of the study, Tailored fiber placement and commingled hybrid fiber technology, which is the preferred sample production technique, can be shown. The main advantage of this technique is that a fiber placement angles and design can be made that can meet the multi-directional loads expected from a product, which is not possible with traditional manufacturing techniques. The stitching fiber placement technique is an innovative method that can be preferred in advanced engineering designs and applications in terms of high performance, low weight, low cost, and to reveal the optimized product.

**Keywords:** Tailored Fiber Placement, Thermoplastic Composite, Carbon Fiber, Hybrid Fiber, Commingled Fiber.

## 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler yüzyıllardır farklı malzeme kombinasyonları ve konsantrasyonları ile kullanılmaktadır. Kronolojik olarak değerlendirildiğinde insanoğlu çok eski zamanlardan beri bu malzeme grubunu kullanmakta olup yine bu malzemeleri ilk olarak doğada buldukları halleri ile kullanmıştır. Bilinen örnekleri arasında ağaç gövdesi ve reçinesi gösterilebilir ayrıca kerpiç, asfalt ve betonarme yapılar da diğer örnekleri arasında yer almaktadır.

Genel tanım olarak kompozit malzemeler; hedeflenen amaçlar için tek başlarına uygun olmayan farklı en az iki ya da daha fazla malzemenin istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli koşullar ve oranlarda mikroskobik düzeyde birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde birleştirilmesi ile oluşan yeni malzemelere verilen addır [1].

21. yüzyılda özellikle gelişen teknoloji, ileri mühendislik çalışmaları ve tasarımları doğrultusunda; endüstriyel beklentiler farklılaşarak mühendislik ürünlerinden çok fonksiyonlu işlevler beklemektedir. Bu beklentilerin bazıları mekanik özellikleri ile ilgili olabilirken bazıları da termal ya da kimyasal özelliklerin bileşiminden oluşmaktadır. Farklılaşan bu beklentilere cevap verebilecek en üstün malzeme grubu olarak kompozit ürün çözümleridir. Bu alanda yürütülen hem endüstriyel hem de akademik çalışmalar gün geçtikçe artmakta ve çeşitlenmektedir.

Kompozit ürünlerin yaygınlaşması ve gelişimi özellikle havacılık ve uzay sanayindeki ilerlemeye paralel olarak gerçekleşmiştir. Günümüzdeki hava araçlarında kullanılan yapısal ve yarı yapısal parçaların 50% den fazlasını kompozit ürünler oluşturmaktadır. Teknolojik ve mühendislik çalışmalarının ilerlemesiyle bu oran giderek artacak olması kaçınılmazdır. Hatta diğer endüstrilerde de özellikle otomotiv, raylı taşımacılık, makine sanayii, spor ürünleri alanlarında yaygınlaşarak kullanımı artacaktır.

Kompozit ürünler özellikle havacılık alanında büyük çoğunlukla termoset matrisli olup değişen ihtiyaçlar ve gelişen beklentilere istinaden termoplastik matrisli kompozit ürün ve uygulamalara yönelim giderek artmaktadır. Bunun en büyük göstergeleri

arasında global havacılık firmalarının ve akademik çalışmaların bu alana yoğunlaşmış olarak gösterilebilir.

Kompozit ürünlerin birçok farklı endüstride farklı uygulama alanlarına sahip olmasına yol açan temel nedenler arasında yüksek dayanım ve mukavemete sahipken oldukça düşük yoğunluk & ağırlıktadırlar. Bununla birlikte otomotive endüstrisinde global CO<sub>2</sub> düzenlemeleri doğrultusunda otomotiv endüstrisinde hafifletme ihtiyacı oldukça önem kazanmıştır [2].

Birçok endüstride “hafifleştirme” kapsamı altında binlerce proje yürütülmektedir. Hafifleştirmenin temel amaçları arasında otomotive ve havacılık endüstrisi için yakıt tasarrufu, taşınabilir yük, çevreye olan etkilerin azaltılması başlıcaları olarak gösterilebilir. Yürütülen birçok hafifleştirme projelerinin, fiber takviyeli kompozitler üzerine yoğunlaştığı bilinmektedir. Fiber takviyeli kompozitler anizotropik yapıya sahip oldukları, fiber yönelimlerindeki farklılaştırma ile çalışma koşullarına göre optimize edilmiş ve hafifletilmiş çözüm üretimine uygundur. Termoplastik matris sistemlerinin mühendislik ürün ve çözümlerde giderek ilgi çekmesine yol açan başlıca avantajları aşağıda listelenmiştir [1];

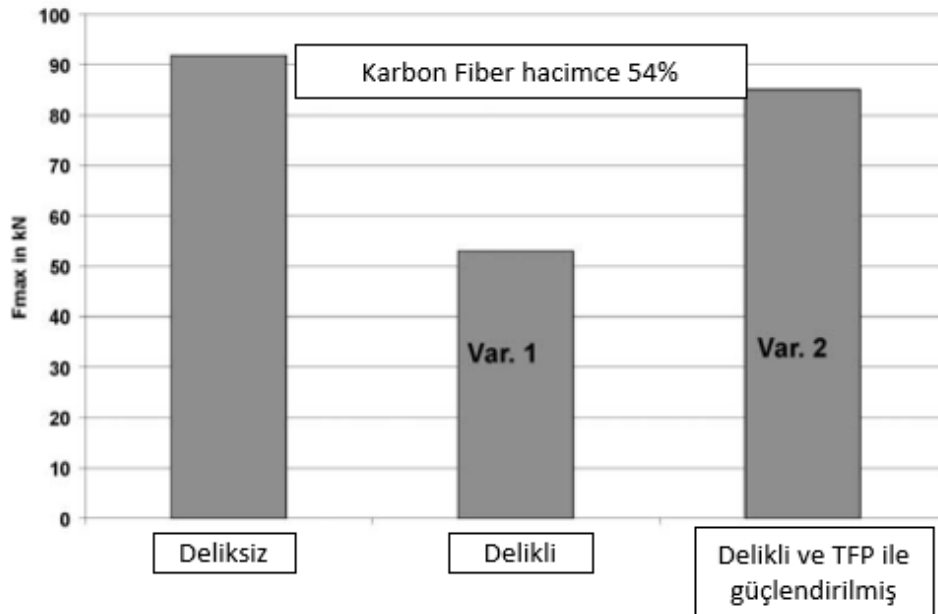
- Kimyasallara karşı yüksek dayanım
- Geniş çalışma sıcaklık aralığı
- Yüksek darbe dayanımı
- Tekrar şekillendirilebilirlik
- Kullanım- raf ömrünün olmaması
- Düşük nem ve su hassasiyeti
- Hızlı çevrim ve üretim zamanı

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kompozit malzemeler üzerine son yıllarda yapılan akademik endüstriyel çalışmalar giderek artmaktadır. Bunların başlıca sebepleri arasında özellikle otomotiv endüstrisinin ürün beklentisini maliyet avantajı olan üründen ziyade hafif ve fonksiyonel parçalara yönlendirmiş olması, havacılık endüstrisinde giderek artan kompozit kullanım miktarları gibi endüstriyel ihtiyaçlar gösterilebilir. Bununla birlikte kompozitlerin doğası gereği yapısal karmaşıklığı, anizotropik özellikler ve farklı imalat metodu ve bileşenlerle çok farklı sonuçların elde edilebilir olması da akademik ilginin kaynakları arasında göstermek mümkündür. Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde özellikle petrol türevi olan termoset matris malzemesinin yerini daha çok termoplastik matris malzemesinin aldığı göz ardı edilemez bir gerçektir. Bunun temel sebepleri arasında gelişen teknoloji ve değişen çevre bilinci gösterilebilir. Özellikle akademik çalışmalar ve endüstriyel ürünlerde tüketiciler çalışmanın ve ürünün çevreye olan etkisinde göz önünde bulundurarak değerlendirmeye başlamışlardır. Termoplastik kompozitlerin tekrar proseslenebilme özellikleri nedeni ile ana ürün fonksiyonu yitirdikten sonra değer zincirine daha az enerji harcayarak başka bir ürün olarak katılabilmektedirler. Buda bu ürünün çevreye olan etkisini azaltıcı bir fonksiyon olarak karşımıza çıkmaktadır. Aşağıda detayları paylaşılan literatür taramasında özellikle son 20 yıl içerisinde yapılan akademik çalışmalar ve bu çalışmalara istinaden yayınlanan makaleler taranmıştır. Bu taramada iki temel araştırma konusu üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlardan biri üstün bir kuru fiber yerleştirme prosesi olarak son yıllarda kullanımı gittikçe artan “Tailored Fiber Placement (TFP) – dikerek fiber serme” teknolojisidir, bir diğer temel araştırma konusu da termoplastik matrisli karıştırılmış hibrit fiberler üzerinedir.

Gliesche ve diğerleri [3] yaptıkları çalışmada “Tailored Fiber Placement (TFP)” prosesi kullanarak bölgesel güçlendirme yaparak, termoset epoksi matrisi ile ıslatmak sureti ile “open hole” test numuneleri üretmişlerdir. (Şekil 2.1) Çalışmanın temel amacı oluşan stres eğrilerine göre lokal olarak güçlendirilmiş test numunelerinin yükün transfer edilmesine ve yük altında delik etrafında oluşan gerilmeler üzerine

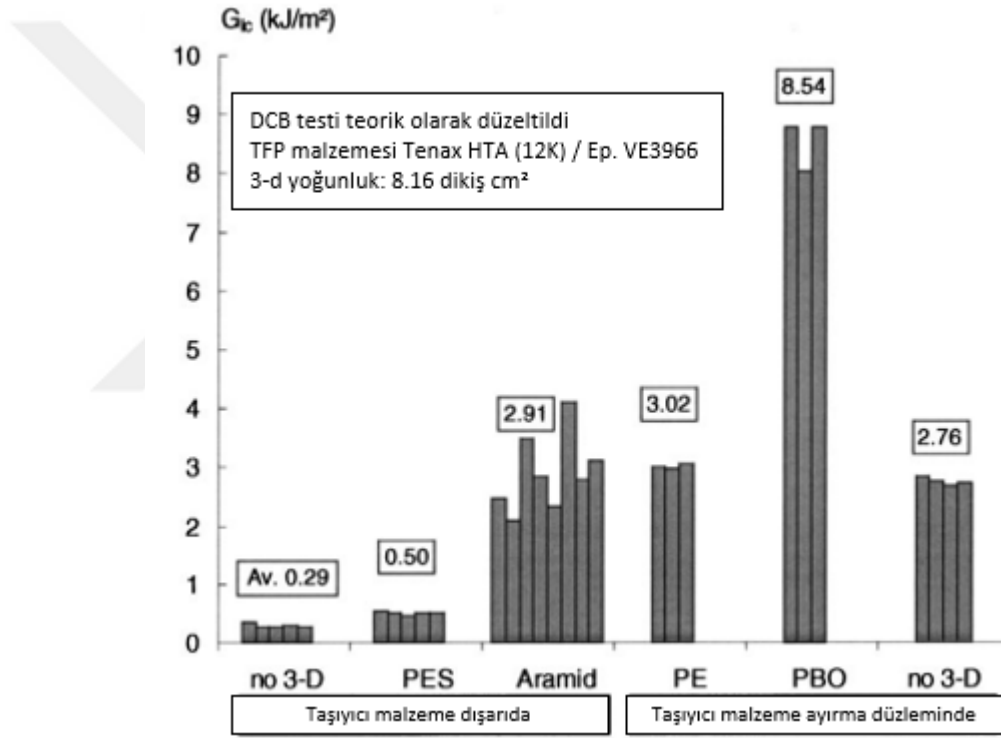
etkisini optik deformasyon ölçüm metodu ile tespitine yöneliktir. Yürütülen numune tasarım, analiz ve uygulamalı test sonuçlarına göre optik deformasyon yöntemi anizotropik deformasyonların ölçümde oldukça etkili bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Yapılan analiz ve test sonuçları arasındaki uyum yapılan çalışmanın güvenilirliğinin bir göstergesi olarak ortaya çıkmıştır. Yürütülen uygulama test sonuçlarına göre TFP güçlendirilmesi olmadan üretilen numune plaka delik açılmadan 90kN da hasarlanırken açılan delik sonrasında 55kN da hasarlanmıştır. Geleneksel yöntemlerde bu durumu iyileştirmek için delik bölgesinde ciddi kalınlık artırılması yapılmaktadır. Oysaki TFP ile lokal olarak güçlendirilmiş test numunesi çok az bir ağırlık artışı yaratarak 85kN da hasarlanmıştır olup bu sonuçlar TFP prosesinin yapısal güçlendirmede bir üstün teknik olduğunu ortaya koymuştur.



**Şekil 2.1:** Delikli ve deliksiz numunelerin test çekme test sonuçları [3].

Mattheij ve diğerlerinin [4] yaptığı çalışmada Tailored Fiber Placement yöntemi kullanılmış olup, Aramid, polybenzoxazol (PBO), Polietilen ve Polyester fiberlerin dikiş iplikleri sayesinde 3D olarak güçlendirilmiş numune yapılar elde edilmiştir. (Şekil 2.2) Bu malzeme grubunu kullanılarak farklı dikiş dağılımı ve dikiş proses parametrelerinde üretilen numuneler Mod I – Katlar arası kırılma tokluğu testine tabi tutularak bu değişkenlerin özellikler üzerine etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. TFP teknolojisi kullanılarak kalınlık boyunca dikiş yoğunlukları ve farklı 3D güçlendirici dikiş iplikleri ile çalışabilmektedir. Çalışmada dikiş yoğunluğu 1.8 – 15,4 dikiş/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Üç temel dikiş parametresi üzerinden numune çalışmaları

planmış olup bunlar dikişler arası boşluk, dikiş adımı (uzunluğu) ve dikiş iplik gerginliği (tansiyon)' u dur. Bu değişkenler göz önünde bulundurulduğunda 15 numune tipi oluşmuştur. Çalışmada tamamlanan testler sonucunda TFP ile 3D güçlendirme sonucunda Mod I katlar arası kırılma tokluğunun yükseldiği tespit edilmiştir. Deney gurubu dikiş iplik tipleri arasında en etkin yükselme PBO ile elde edilmiştir. Ayrıca kullanılan proses parametre değişkenleri göz önünde bulundurulduğunda dikiş yoğunluğunun ve dağılımının yapılan testler üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiş olup kullanılan dikiş ipliği tansiyonunun optimum olarak seçilmesinin elde edilecek mekanik özellikler üzerine etkili olduğuna değinilmiştir.



**Şekil 2.2:** TFP ile farklı dikiş iplikleri ile üretilmiş numunelerin Mode-I test sonucu [4].

Aleksandrovich ve arkadaşlarının [5] yaptığı TFP teknolojisi ile polimer kompozitler için 3D güçlendirme çalışmasında farklı endüstrilerde, örneğin havacılık ve uzay, gemi endüstrisi, enerji endüstrisi, yapı-inşa endüstrisi, makine endüstrisi vb. alanlarından kompozit kullanımının sürekli olarak arttığına değinilmiştir. Özellikle bu alanlarda 3D güçlendirilmiş preform yapıların farklı oryantasyonda fiber yerleştirilmesi ve karmaşık şekillerde parçalara dönüştürülmesi adımlarından bahsedilmiş olup genel olarak bilinen 3D dokumadan bahsedilmiş olup TFP teknolojisinde diğer fiber

yerleştirme adımları açıklanmış ve teknolojinin geliştirilmesinden ve avantajlarından bahsedilmiştir. Ayrıca Rusya da kullanımı ve gelişimi hakkında da bilgilere yer verilmiştir. Yapılan araştırmalar ve çalışmalar ışığında TFP teknolojisinin oldukça geniş bir yelpazede çalışılması için uygun bir proses olduğu ve ayrıca bu teknoloji ile üretilen 3D güçlendirilmiş kompozit yapıların yüksek teknoloji olarak değerlendirilebileceğini belirtilmiş olup aynı zamanda bu teknoloji sayesinde farklı bir seviyede polimer kompozit parçalar üretilirken bu parçaların yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olacağı vurgulanmıştır. Aleksandrovich ve arkadaşları TFP teknolojisi üzerine çalışmaların yapılması konusunda tavsiyelerde bulunmuşlardır.

Spickenheuer ve diğerlerinin [6] yaptığı bir diğer TFP prosesi ile alakalı çalışma ise bu proses ile üretilmiş termoplastik kompozitler üzerinedir. Çalışmadaki temel amaç TFP teknolojisi ile üretilen ve karıştırılmış-hibrit fiberlerin, tekstil kumaş yapılarına dönüştürülmesi ve değişken yüklenmelere göre fiber tasarımlarının yapılması üzerinedir. Çalışmada Cam fiber ve termoplastik matris fiberleri içinde bulunduran karıştırılmış fiber proses girdisi olarak kullanılarak hazırlanan üretim tasarımına göre bir taşıyıcı malzeme üzerine sürekli formda dikilerek yerleştirilecektir. Elde edilen bu yapılar düşük maliyetli bir yöntem kullanılarak polimerize edilecektir. Çalışmada kullanılan termoplastik matris malzeme polybutylene terephthalate (PBT) olarak belirlenmiş olup; PBT tipi, ara yüzey uyumlaştırıcı kaplama ve kütleme parametreleri üzerinde çalışmaların yürütüldüğü değişkenlerdir. Ayrıca çalışmada modelleme-analiz ve komponent testi için bisiklet selesi seçilmiş olup çalışmalar bu şekilde yürütülmüştür. Alışılmışın dışında bir kompozit tasarım ve imalat değerlendirilmesinin yapıldığı bu çalışmada hibrit fiberler ile TFP teknolojisi sayesinde yüksek kalitede bir termoplastik kompozit parça üretimi yapılabileceğini, yine TFP teknolojisi sayesinde hassas fiber yerleştirmenin mümkün olduğunu aynı zamanda uygun miktarda malzeme kullanımı sayesinde düşük atık / hurda ile çalışmanın yapılabileceğini ortaya koymuştur. Tüm bunlar karmaşık geometrili parçalarında optimizasyonunun mümkün olduğunu göstermektedir.

Thor ve arkadaşlarının [7] yaptığı çalışmada kompozit yapı içerisindeki fiberlerde meydana gelen dalgalanmaların etkileri üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Kompozit yapı içerisinde bulunan fiberlerde meydana gelebilecek olan dalgalanma ve kırışmalar; yapının mekanik özellikleri üzerinde çok yüksek etkiye sahip olduğu açıklanmıştır. Bu tür hatalar; rijitlik, mukavemet, yorulma özelliklerinde düşmelere sebebiyet

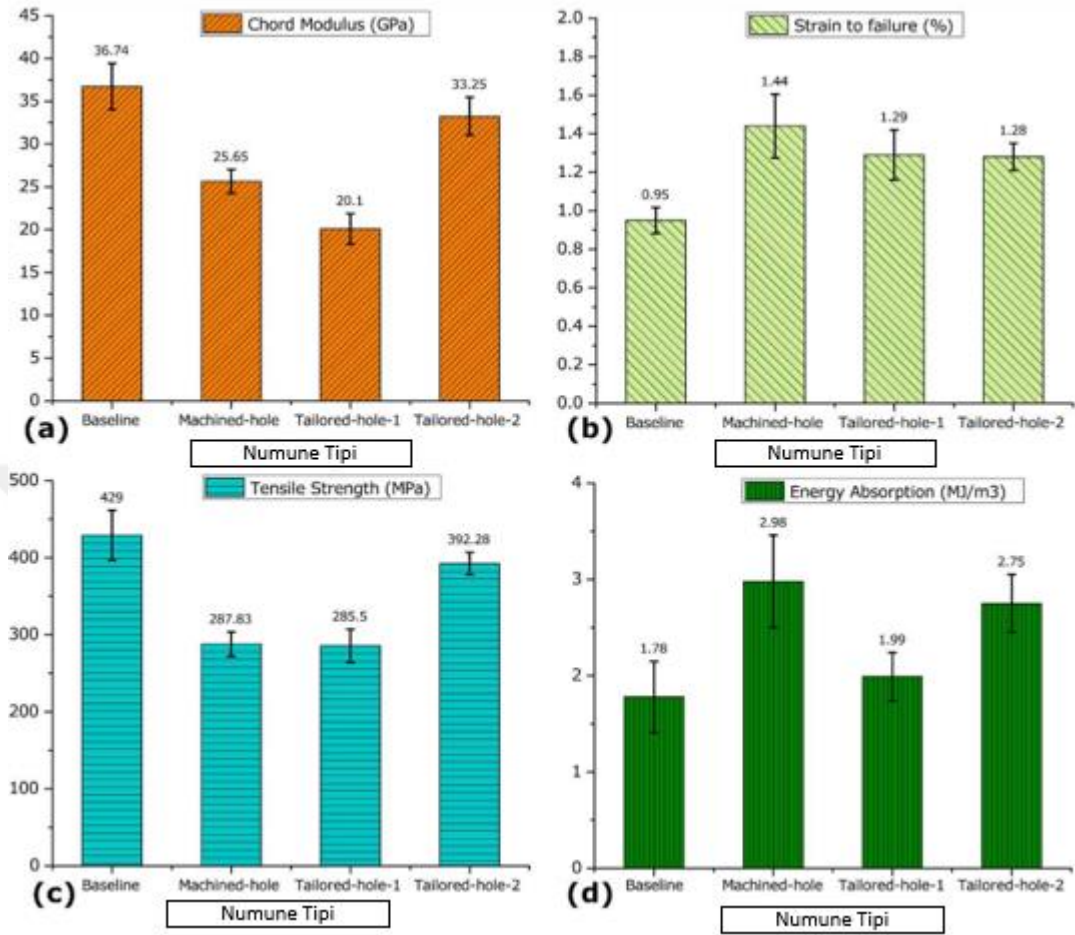
vermektedir. Bu hatalar tamamen giderilemeyeceği için tolere edilmesi ve minimize edilmesi gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Çalışmada farklı fiber dalgalanma tipleri (katlanma, kırışma vb.) incelenmiş ve ilgili matematiksel ve mühendislik modellemeleri ve hesaplamaları yapılmıştır. Arıca imalat yöntemleri olarak dikişli ve dikişsiz tekstil preformlarının imalatı, otomatik bant serme, dokuma yapılar vs. üzerine de değerlendirmeler yapılmıştır. TFP prosesi üzerine de yürütülen çalışmalarda, proses parametreleri (dikiş ipliği tansiyonu vb.) ve girdi malzeme özellikleri (kuru fiber, bant vb.) değerlendirmeler yapılmıştır. Dikilerek yerleştirilen fiberlerde oluşan fiber dalgalanmaları ve nedenlerine değerlendirilmiş olup ilgi çekici olarak eriyebilen dikiş ipliği üzerine yapılan çalışmalara atıfta bulunulmuştur. Yapılan bu çalışma sonucunda fiber dalgalanmaları tipleri arasında bir sınıflandırma yapılmıştır. Ayrıca; kütleme proses parametreleri (sıcaklık, basınç vb.), fiber ve kalıp malzemeleri seçimi, üretilen son parça geometrisindeki karmaşıklık fiber dalgalanması üzerinde doğrudan etkisi olduğu belirtilmiştir.

Dessouky ve diğerlerinin [8] yaptığı çalışmada TFP teknolojisi kullanılmak sureti ile bir çalışma yürütülmüştür. Yapılan çalışmada TFP teknolojisinin sayesinde yerleştirilmek istenen fiberlerin tam da olması gereken yere koyulması sayesinde en iyi performansa erişilebileceği değinilmiştir. (Şekil 2.3) Yapılan çalışmada 4 tip te numune karbon fiber termoplastik karıştırılmış fiber kullanılarak yapılması planlanmıştır. Bunlar sırası ile dolu plaka, delik daha sonra açılmış plaka, delik TFP de açılmış plaka – 1 ve delik TFP de açılmış plaka – 2'dir. Hazırlanan bu numuneler karışım oranları (FVF-Fiber Volume Fraction) tayini, optik mikroskopi, X-ray / CT tarama, çekme ve açık delik (open hole) çekme testleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar ve testler ışığında TFP teknolojisinin oldukça gelecek vadeden bir teknoloji olduğu ispatlanmış olup konvansiyonel olarak delik açılmış parçaları delik güçlendirmesi yaparak yerine geçebileceğini göstermiştir. Ayrıca;

- Fiberler TFP ile yapısal olarak nerede olması gerekiyor ise oraya yerleştirilebilir
- Tüm çentikli parçalar ana malzemeye göre düşük dayanım ve mukavemet değerine sahip olduğu

Ortaya çıkmıştır. Özet olarak çalışma gerilmelerin ve yüklerin doğru anlaşılması gerektiğini ve yerleştirilecek fiber oryantasyonlarının ve açılarının buna gere tayin

edilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır. TFP prosesinin çok faydalı bir yöntem olduğu ortaya konmuştur.



Şekil 2.3: Dört farklı tip numune test sonuçları [8].

Koricho ve diğerleri [9] yaptıkları çalışmada TFP teknolojisi ile üretilmiş test numunelerinin hasarlanmaya karşı dirençlerinin iyileştirilmesini incelemiştir. Çalışmada TFP sayesinde doğrudan deliklerin üretimi sayesinde daha sonradan ek bir delme ya da işleme ile delik açılmasına göre daha avantajlı olduklarını, bu işlemlerden kaynaklanacak katlar arası ayrılma gibi sorunların elemine edilebileceğini vurgulamışlardır. Çalışmada Abaqus programı ile yapılan analiz ve modellemeler ile elde edilen deneysel sonuçlar arası yakınlık prosesin güvenilirliğini ifade etmektedir. Çalışmada elde edilen ana çıktılar aşağıdaki sıralanmıştır;

- Yapılan FEM modelleme ile fiber yerleştirme oryantasyonlarını göstermektedir. Hashin hasar teorisi daha kararlı bir modelleme metodu olarak değerlendirilmiş olup FEA analizi stres dağılımı ve hasar bölgesi hakkında oldukça doğru sonuçlar vermektedir.

- TFP teknolojisi ile vakum destekli reçine transfer yöntemi (VARTM) sayesinde oldukça yüksek karbon fiber içerikli numunelerin üretimi mümkündür (75% ağırlıkça).
- Sonradan delik açılmış numunelerde çok yüksek oranda dayanım kaybı tespit edilmiştir (~38%).
- TFP teknolojisi sadece dayanım ve mukavemetin iyileştirilmesinde etkili olmamış aynı zamanda delik etrafında oluşan katlar arası ayrılma hatasının da azaltılmasında etkili olmuştur.

Sonuç olarak TFP teknolojisi oldukça geniş bir alanda ve endüstride üretim için uygun ve etkin bir yöntem olarak değerlendirilmiştir.

Uhlig ve diğerleri [10] yaptıkları çalışmada kanatlı rotorlarda/pervanelerde TFP prosesini tercih etmişlerdir. Turbo makinaların çalışma etkinliğini ve performansını artırabilmek için pervanelerdeki rotasyonel frekansın artması gerektiği belirtilmiştir. Bunu gerçekleştirmek için yapısal mukavemetin artması ve daha uygun malzeme seçimi yapılması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle Karbon Fiber takviyeli kompozit yapılar arzu edilen performansa ulaşmada düşük yoğunluğu, yüksek spesifik mukavemetleri, fiber yönündeki rijitlikleri ile Alüminyum yapılara daha avantajlı konumdadırlar. Karbon fiber ile 35% daha yüksek dönüş hızlarına ulaşılabileceğine değinilmiştir. Yapılan bu çalışmada TFP prosesinin fiberleri yerleştirmede büyük esnekliğe sahip olmasının avantajı vurgulanmıştır. Çalışmada yapılan test, analiz ve modelleme uygulamaları sonucunda; TFP teknolojisi ile yapı üzerinde oluşan yüklere uygun fiber yerleştirilen pervanelerde alüminyum alaşımlarına göre çok ciddi oranda patlama rotasyon frekansında artış sağlanmış olup toplam ağırlık konusunda da hafifletme sağlanmıştır. Ayrıca TFP teknolojisinin üretimde yüksek istikrar ile çalışabilmesi ve vakum destekli reçine transfer yöntemi ile birleşince yüksek oranda karbon fiber içeriğine sahip kompozit yapıların imalatını mümkün kılmakta olduğu belirtilmiştir.

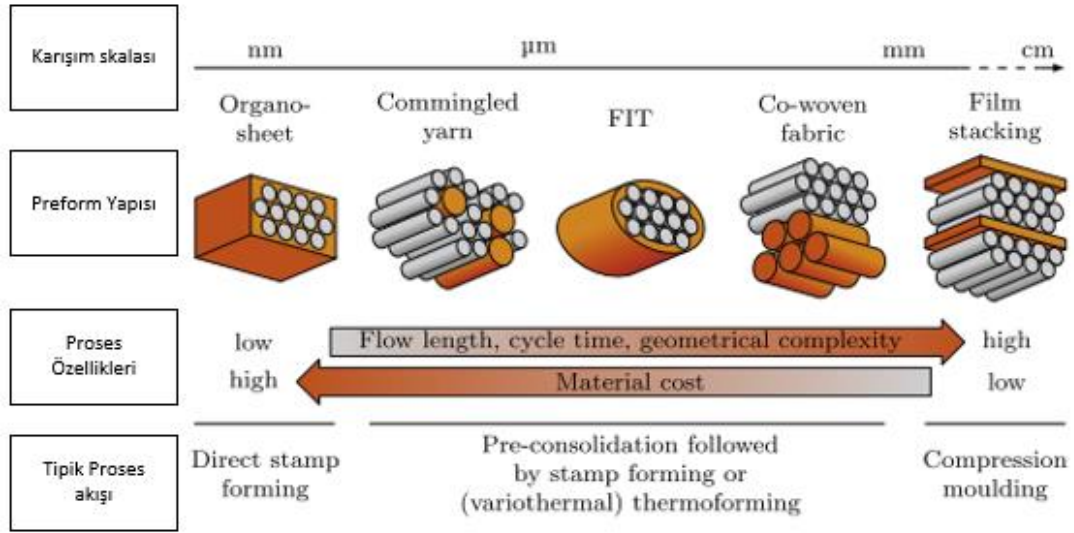
Hasan ve diğerleri [11] yürüttükleri çalışmada tekstil tabanlı termoplastik kompozit ürünlerde kullanılması amacı ile Karbon Fiber – Polyamide 6.6 karıştırılmış hibrit fiber geliştirmeye çalışmışlardır. Çalışmada basınçlı hava ile karıştırılmış fiber üretiminde avantajları olduğuna değinilmiştir. Yine de bu çalışma ile Karbon Fiber ve Polyamide 6.6 içerikli karıştırılmış fiber üretiminin tam anlamı tamamlanmadı ve bu alanda

çalışmaların yapılabileceğine işaret edilmiştir. Çalışmada bazı üretim parametreleri değişken olarak tutulurken (örn. Hava basıncı), bazı parametrelerin sabit tutulduğu belirtilmiştir (örn. Fazla-besleme hızı, çalışma hızı gibi). Çalışmada ayrıca karbon fiber güçlendirme elemanı ve Polyamide matris elemanı arasındaki uyumu ve yapışmayı da değerlendirmek istenmektedir. Yürütülen çalışmanın temel amacının hibrit fiber proses parametrelerinin matris ve güçlendirme elemanı arasındaki uyumu ve yapışmayı nasıl etkilediği konusunda sonuçlara varmak olduğu çalışma raporunda belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada mekanik değerlendirme 0-90 yönlü çekme testleri, eğme testi (4 nokta eğme), katlar arası kayma ve darbe testleri mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Numune üretiminde farklı hava basınçlarında karıştırılmış / hibrit fiberler üretilerek ıslanma, yüzey enerjisi, fiberlere uygulanan ısı işlemin etkisi vb. konularda yukarıda bahsedilen testler uygulanarak yorumlanmak istenmiştir. Yapılan bu test çalışmaları ışığında sonuç olarak hibrit fiber imaları sırasında farklı hava basınçları nedeni ile farklı miktarlarda hasarlanan karbon fiberlerin bitmiş plaka içerisinde çekme ve eğme özellikleri açısından ciddi bir etki yaratmadığı gözlenmiş olup sebebinin iyi şekilde ıslanması ve fiberlerin matris tarafından iyi sarılması olarak değerlendirilmiştir. Fakat darbe özellikleri incelendiğinde darbe mukavemetleri, hibrit fiber imalatında kullanılan hava basıncının artması ile dolayısı ile fiber hasarlanmasının artması ile düştüğü tespit edilmiştir.

Dubouloz-Monnet ve diğerlerinin [12] yaptığı bir diğer hibrit fiberler üzerine olan çalışmada Cam Fiber polipropilen hibrit fiberlerin enine mekanik özellikleri ile cam fiber kümelenmesi ve cam fiberin test numunesi içerisindeki ağırlıkça oranının etkisinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmada cam fiberin yapı içerisinde dağılımı ile mekanik özellikleri arasında bağlantıyı açıklaması amacı iler birkaç tip ilişki tipi önerilmiştir. Ayrıca bu çalışmada daha önceki çalışmalarda yapılan görüntü işleme yöntemleri, boşluk oranları, hacim/ağırlıkça fiber içeriği, fiberlerin geliştirilmiş polipropilen içerisinde dağılımı ve ıslatılması çalışmada dikkate alınan ve üzerine test ve değerlendirmelerin yapıldığı başlıca başlıklardır. Yapılan bu çalışmada hibrit – karıştırılmış fiberlerin termoplastik kompozitlerin geliştirilmesinde ve yenilikçi ürün tasarımında önemini gösterecek mahiyettedir.

Schneeberger ve diğerlerinin [13] yaptığı yine hibrit bi-komponent fiberler üzerine bir başka çalışma da güçlendirme elemanı ile matris malzemesinin karışım homojenliğinin şekil alabilirlik kürleme süresi üzerine etkisinin araştırılması

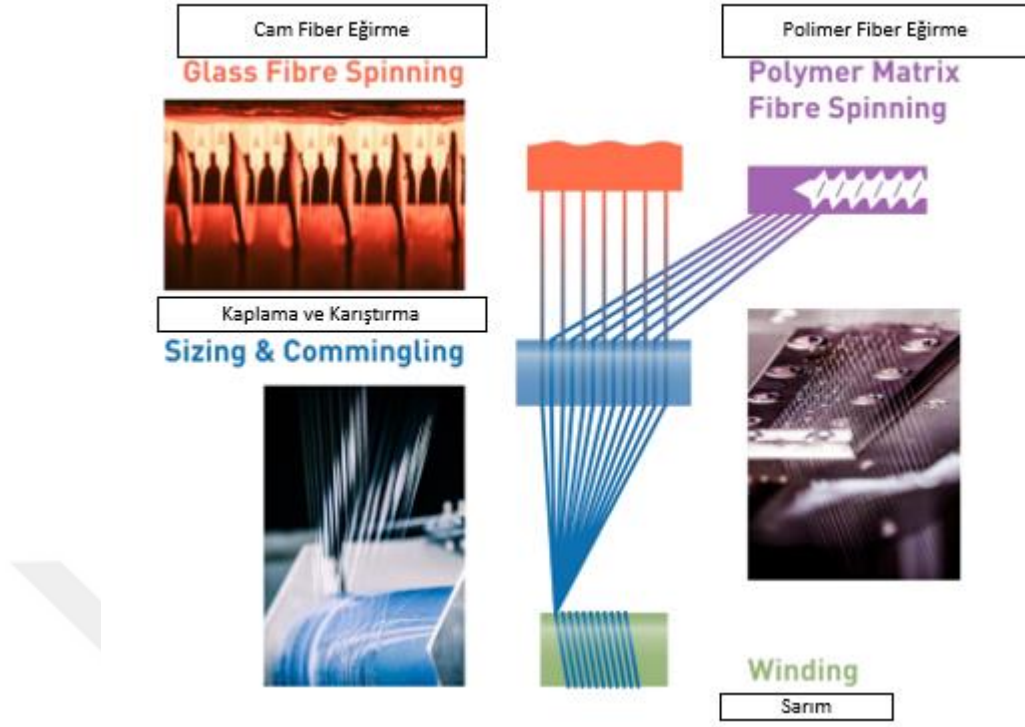
yönündedir. Çalışmada güçlendirme fiberi olarak cam fiber tercih edilmiş olup matris olarak da birkaç tip termoplastik malzeme ile çalışılacağına değinilmiştir. Yapılan çalışmada (Şekil 2.4) gösterilen farklı tipteki karışım şeklindeki hibrit fiberler ve bu tiplerin imalatı ve kürlenmesi ile alakalı konular irdelenmiştir.



**Şekil 2.4:** Farklı tiplerdeki hibrit fiberler ve bunların imalat özellikleri [13].

Özellikle ıslatma, reçine viskozitesi, iyi bir ıslatma için gereken zaman yorumları çalışmanın temel değerlendirme konuları arasındadır. Özellikle hibrit fiberler termoplastik kompozit malzemeler için imalat çevrim süresini kısaltabilme potansiyelleri nedeni ile bir tercih sebebi olduğu belirtilmiş erimiş matrisin akarak ıslatması gereken mesafe ve bu malzemenin viskozitesi arasındaki bağıntıyı Darcy kanunu ile açıklamışlardır. Özellikle karışımın homojenliği imalat çevrim süresindeki kısalma için önemli bir etken olduğu yapılan çalışmada ortaya konmuştur. Çalışmada özellikle bi-komponent yapılar üzerinde kaplama düzenekleri tasarlanmış, daldırarak kaplama, toz kaplama gibi çalışmaları yapılmış olup yapılan çalışmada elde edilen ürünün endüstriyel seviyede uygunlu ve uygulanabilirliğine dair sonuçlara varılmıştır.

Richter ve diğerlerinin [14] yaptığı bir çalışmada ise Leibniz – IPF araştırma kurumu tarafından geliştirilen yenilikçi iki teknoloji olan SpinCOM (Spinning and Commingling) ve AOPS (Advanced Optimization for Principal Stress) teknolojileri kullanılmıştır. SpinCOM teknolojisi bir hibrit fiber üretime tekniği olup Cam fiberin imalatı sırasında termoplastik fiberinde çekilerek bir araya getirilmesi sureti ile yapılan imalata verilen addır (Şekil 2.5). Şematik olarak yöntem gösterilmiştir.

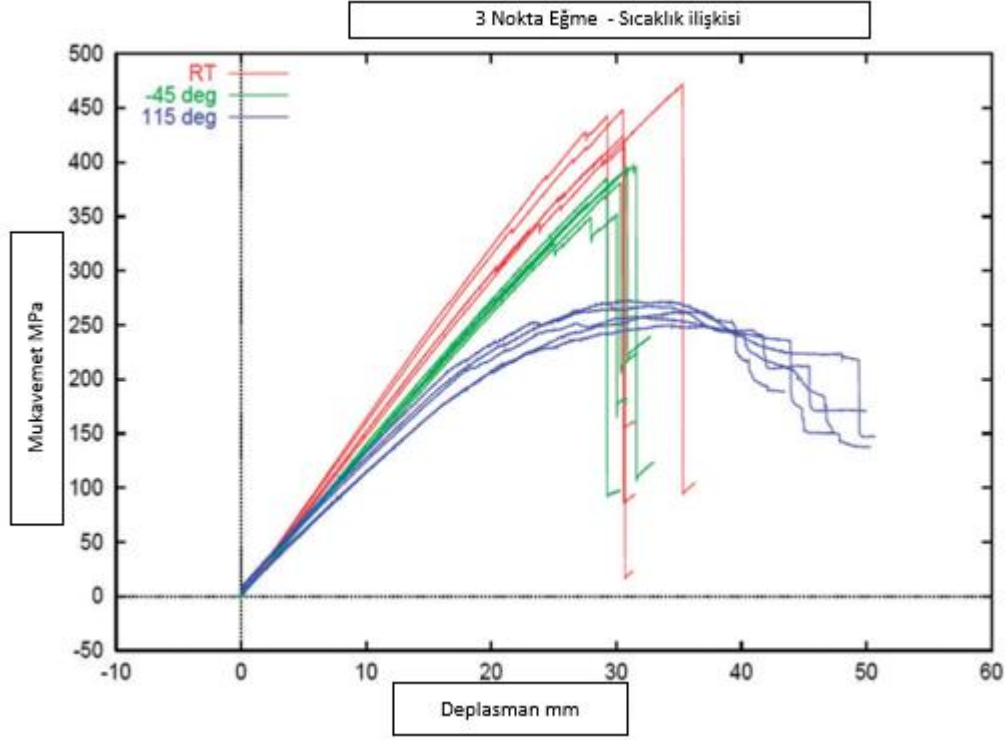


**Şekil 2** Error! No text of specified style in document..5 : SpinCOM teknolojisi ile hibrit fiber imalatı çalışma prensibi [14].

AOPS teknolojisi ise bir tür yazılım olup temel işlevi parçaların çalışacağı yük koşullarına göre en optimum fiber yerleşimin tayininde kullanılmak amacı ile geliştirilmiştir. Bu sayede geliştirilecek olan fiber tasarımı hem performans açısından en iyi şekilde dayanım sağlarken hem de ağırlık olarak kazanç eldesi sağlamış olacaktır. Yapılan çalışmada kullanılan bu yaratıcı teknolojiler sayesinde geliştirilen Cam fiber Poliamid 6.6 hibrit fiberi ile seçilen parça geometrilerine yerleştirilecek en optimum doğrusal olmayan fiber tasarımını ortaya çıkararak; yüksek darbe dayanımı olan, yüksek mukavemetli, dayanıma ve rijitliğe sahip aynı zamanda kısa imalat çevrimine sahip ve düşük maliyetli çözümler üretmek yönündedir. Yapılan çalışmalar neticesinde en optimum özelliklere sahip ürün tasarımları yapılmış, TFP teknolojisi kullanılarak test numuneleri hazırlanmış, karşılaştırmalı testler ile bu teknolojilerin hedeflenen sonuçlara varılmasında gerçekten de faydalı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Parabhakaran ve arkadaşlarının [15] bir çalışma karbon fiber Polyamide 6 içerikli karıştırılmış – hibrit fiber kompozit yapıların çevresel etkilerle mekanik özelliklerde oluşacak değişimleri anlamak üzerinedir. Bu amaçla bazı seçilmiş özelliklerde hızlandırılmış yaşlanma uygulanarak test edilerek karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Çalışmada üç nokta eğme testi gibi mekanik testler uygulanarak değerlendirmelerin yapılacağı belirtilmiştir. Numune olarak 10mm kalınlığında Karbon Fiber Polyamid Polyamide kompozit yapı %52 Fiber hacim karışım oranı ile otoklavda kürlenmesi sureti ile üretilmiştir. Üretilen numuneler kurutulduktan sonra 60°C de %100 bağıl nemli ortamda farklı bekleme zamanlarında maruz bırakılarak (max. 2500 saat) yaşlandırılmışlardır. Daha sonra numuneler 23°C ve %50 bağıl nemli ortamda kurutularak test edilmiştir. Bu ve bunun benzeri birkaç farklı yaşlandırma ve kurutma işlemi uygulanan test numuneleri mekanik değerlendirme için ilgili testler tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar üç ana başlık altında özetlenebilir. Bunlar sırası ile;

- Numune plakanın yaşlandırma ortamında (60°C- %100 bağıl nem) nemlenmesinin değerlendirilmesidir. Yapılan çalışmalar ve hesaplamalar neticesinde test numunesinin bu ortamda ağırlıkça 3% nem emdiği tespit edilmiştir.
- Literatür çalışmalarından da bilindiği gibi Polyamid Polyamide 6 malzemesinin mukavemet ve dayanım özellikleri içeriğindeki su miktarının artması ile azalmaktadır. Bu nedenle nem emmiş bu test parçalarında mekanik özelliklerde düşüş tespit edilmesi ön görülmüştür. Ve uygulanan test sonuçları da sonuçları da bunu doğrulamıştır. Fakat nemli ortama maruz bırakılan parçalar bir kurutma işlemine tabi tutulmuş ve mekanik test sonuçlarının tekrar yükselmeye başladığı da yapılan tespitler arasındadır.
- Bir diğer değerlendirme olan farklı uç sıcaklık değerlerinde koşullandırılmış numunelerin mekanik özelliklerinde oluşan değişimi tespit etme üzerinedir. Bu çalışmada -45°C ve +115°C sıcaklıklarında koşullandırılmış test ortamı ve test numuneleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda mekanik özelliklerin bu koşullarda oda sıcaklığında elde edilenlere göre düştüğü tespit edilmiştir. Örneğin eğme özellikleri -45°C testlerinde oda sıcaklığına göre 87% düşük çıkarken, +115°C de 75% oranında düşük çıkmıştır (Şekil 2.6) Test sonuçları gösterilmiştir. Benzer değerlendirmeler farklı mekanik testler içinde yapılmış olup ilgili çalışmada sonuçlar paylaşılmıştır.



**Şekil 2.6:** Farklı sıcaklıkta test edilen numunelerin üç nokta eğme test sonuçları [15].

Yapılan tüm bu literatür araştırması ve incelenen tüm kaynaklar değerlendirildiğinde termoplastik kompozit malzemeler üzerine olan endüstriyel ve akademik çalışmaların arttığı gözlemlenmektedir. Özellikle gelecek yıllarda daha da etkin olarak endüstrinin karıştırılmış fiber ürünleri daha çok değerlendireceği uygulama alanı oluşturacağı yapılan çıkarımlar arasındadır. Karıştırılmış fiberlerin en önemli avantajı olarak da hızlı imalat çevrim süresine sahip ürünlerin tasarlanması ve geliştirilmesi için çok uygun bir yapı olmasıdır. Ayrıca TFP prosesi ile ilgili incelenen kaynaklar ele alındığında teknolojinin kullanıcılara ve tasarımcılara sunduğu özgür ve bağımsız fiber yerleştirebilme seçeneği, yüke uygun fiber optimizasyonu yapabiliyor olması en önemli avantajıdır. Endüstriyel uygulamalarda bir üründen en büyük beklentiler arasında gösterilebilecek olan minimum ağırlık ve maksimum dayanım kriterini sağlayacak son yıllarda gittikçe ilgileri üzerine çeken bir proses ve imalat yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Heyecan verici sonuçları içerisinde barındıran bu iki öncü ve yenilikçi teknolojinin bir araya getirildiği birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Burada sıralanan ve benzeri birçok güçlü neden göz önünde bulundurulduğunda yapılacak bu tez çalışmasında temel girdiler olarak hibrit fiber ve TFP teknolojisi seçilmiş olup yapılan literatür araştırmasında çok fazla örneğine rastlanılmamış olan bu teknolojinin kullanıldığı bir numune için yorulma

testlerinin uygulandığı sonrası mekanik özelliklerin ölçülerek ve karşılaştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılacak çalışmanın konusu bu nedenler ışığında TFP teknolojisinin kullanıldığı hibrit fiber içerikli termoplastik kompozit malzemelerin yorulma sonrası mekanik özelliklerinde oluşabilecek değişimlerin tespit edilmesi ve ayrıca yine TFP teknolojisi ile üretilecek termoset matrisli kompozit test numunelerinin yine benzer yorulma testlerine tabi tutularak mekanik özelliklerindeki oluşabilecek değişimlerin tespit edilmesi ve iki grup arasında karşılaştırılmaların yapılması şeklinde belirlenmiştir.

Yapılan tüm bu literatür araştırması ve incelenen tüm kaynaklar değerlendirildiğinde termoplastik kompozit malzemeler üzerine olan endüstriyel ve akademik çalışmaların arttığı gözlemlenmektedir. Özellikle gelecek yıllarda daha da etkin olarak endüstrinin karıştırılmış fiber ürünleri daha çok değerlendireceği uygulama alanı oluşturacağı yapılan çıkarımlar arasındadır. Karıştırılmış fiberlerin en önemli avantajı olarak da hızlı imalat çevrim süresine sahip ürünlerin tasarlanması ve geliştirilmesi için çok uygun bir yapı olmasıdır. Ayrıca TFP prosesi ile ilgili incelenen kaynaklar ele alındığında teknolojinin kullanıcılara ve tasarımcılara sunduğu özgür ve bağımsız fiber yerleştirebilme seçeneği, yüke uygun fiber optimizasyonu yapabiliyor olması en önemli avantajıdır. Endüstriyel uygulamalarda bir üründen en büyük beklentiler arasında gösterilebilecek olan minimum ağırlık ve maksimum dayanım kriterini sağlayacak son yıllarda gittikçe ilgileri üzerine çeken bir proses ve imalat yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Heyecan verici sonuçları içerisinde barındıran bu iki öncü ve yenilikçi teknolojinin bir araya getirildiği birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Burada sıralanan ve benzeri birçok güçlü neden göz önünde bulundurulduğunda yapılacak bu tez çalışmasında temel girdiler olarak hibrit fiber ve TFP teknolojisi seçilmiş olup yapılan literatür araştırmasında çok fazla örneğine rastlanılmamış olan bu teknolojinin kullanıldığı bir numune için yorulma testlerinin uygulandığı sonrası mekanik özelliklerin ölçülerek ve karşılaştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılacak çalışmanın konusu bu nedenler ışığında TFP teknolojisinin kullanıldığı hibrit fiber içerikli termoplastik kompozit malzemelerin yorulma sonrası mekanik özelliklerinde oluşabilecek değişimlerin tespit edilmesi ve ayrıca yine TFP teknolojisi ile üretilecek termoset matrisli kompozit test numunelerinin yine benzer yorulma testlerine tabi tutularak karşılaştırmalar yapılmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Materyal

##### 3.1.1 Karbon fiber

Karbon liflerinin üretiminde, organik kökenli hammaddelerin ısıtılması sonucu karbon dışındaki diğer atomlar uzaklaşmakta olup böylece yüksek yoğunlukta karbon atomlarından oluşmuş filamentler elde edilmektedir. Bu filamentlerin kristalizasyonundan sonra yüksek mukavemetli lifler oluşmaktadır. Poliakrilnitril liflerinden, bitkisel esaslı hammaddelerden, katran tortusu ve ziftten, polivinilden klorür veya polivinildenklorür kopolimerlerinden üretilen karbon liflerinin özellikleri kullanılan hammaddeye, işlem sıcaklığına ve üretim aşamalarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Üretim koşullarına göre farklılık gösteren karbon liflerinin özellikleri ve kullanım alanları özellikleri doğrultusunda birbirinden farklılaşır [16].

Karbon liflerinin yoğunluğu, kullanılan hammadde ve işlem sıcaklığına bağlı olarak 1,6-2,2 g/cm<sup>3</sup> arasında değişiklik göstermektedir. Karbon lif üretiminde kullanılan hammadde yoğunluğu 1,14-1,19 g/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Elde edilen lif modülündeki artış grafitizasyon sıcaklığının artışı ile artmaktadır [17].

Karbon liflerinden yapılmış kompozitler 1020 çelik konstrüksiyonlarına göre 5 kat daha dayanıklı ve ~20% ağırlığındadır. Aynı şekilde 6061 alüminyum konstrüksiyonlarına göre 7 kat daha dayanıklı iken, 2 kat daha sert ve 1,5 kat daha hafiftir. Karbon liflerinin yorulma davranışı bilinen tüm metallerden daha iyidir. Uygun reçine ile kaplandığı zaman elde edilen kompozitin korozyona karşı dayanımı da iyileşmektedir. Katran esaslı karbon liflerinin elektriksel iletkenliği bakırdan 3 kat daha fazladır. Karbon lifleri kolaylıkla erimedikleri için yüksek sıcaklıkların olduğu uçak frenlerinde ve roketlerde kullanım alanı bulmaktadır. Karbon liflerinin özelliklerini dikey ve yatay olarak kristalitlerin mikro yapıdaki yerleşimi etkilemektedir. Kurdele benzeri kristalitler az veya çok eksene paralel şekilde yerleşmiştir. Bu kristalitlerin uzunluğu ve düzlüğü lif modülünü etkilemektedir [18].

Karbon fiberler yaklaşık 5-10 mikrometre çapında ve karbon atomlarından oluşan liflerdir. Karbon fiberler yüksek sertlik, yüksek çekme mukavemeti, düşük ağırlık, yüksek kimyasal direnç, yüksek sıcaklık toleransı ve düşük termal genleşme gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Bu özellikler karbon fiberi yarışma sporları birlikte havacılık, inşaat mühendisliği, askeri ve motor sporlarında çok popüler hale getirmiştir. Bununla birlikte, cam elyaflar veya plastik lifler gibi benzer liflerle karşılaştırıldığında nispeten pahalı bir çözümdür.

Karbon Fiberleri aşağıdaki listede belirtildiği gibi sınıflandırmak mümkündür;

- Modüle, mukavemete ve son ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak, karbon fiberler aşağıdaki kategorilere sınıflandırılabilir:
  - Ultra yüksek modüllü, UHM tipi (modül > 450 GPa)
  - Yüksek modüllü, HM tipi (350-450 GPa arasındaki modül)
  - Orta modül, tip IM (200-350 GPa arasındaki modül)
  - Düşük modüllü ve yüksek çekmeli, HT tipi (modül < 100 GPa, çekme mukavemeti > 3.0 GPa)
  - Süper yüksek çekme, tip SHT (çekme mukavemeti > 4.5 GPa)
- Öncü fiber malzemelere dayanarak, karbon fiberler şunlara ayrılır:
  - PAN bazlı karbon fiberler
  - Pitch tabanlı karbon fiberler
  - Mezofaz perde bazlı karbon fiberler
  - İzotropik pitch tabanlı karbon fiberler
  - Rayon bazlı karbon fiberler
  - Gaz fazı ile yetiştirilen karbon fiberler
- Nihai ısıtma sıcaklığına bağlı olarak, karbon lifleri aşağıdakiler olarak sınıflandırılır:

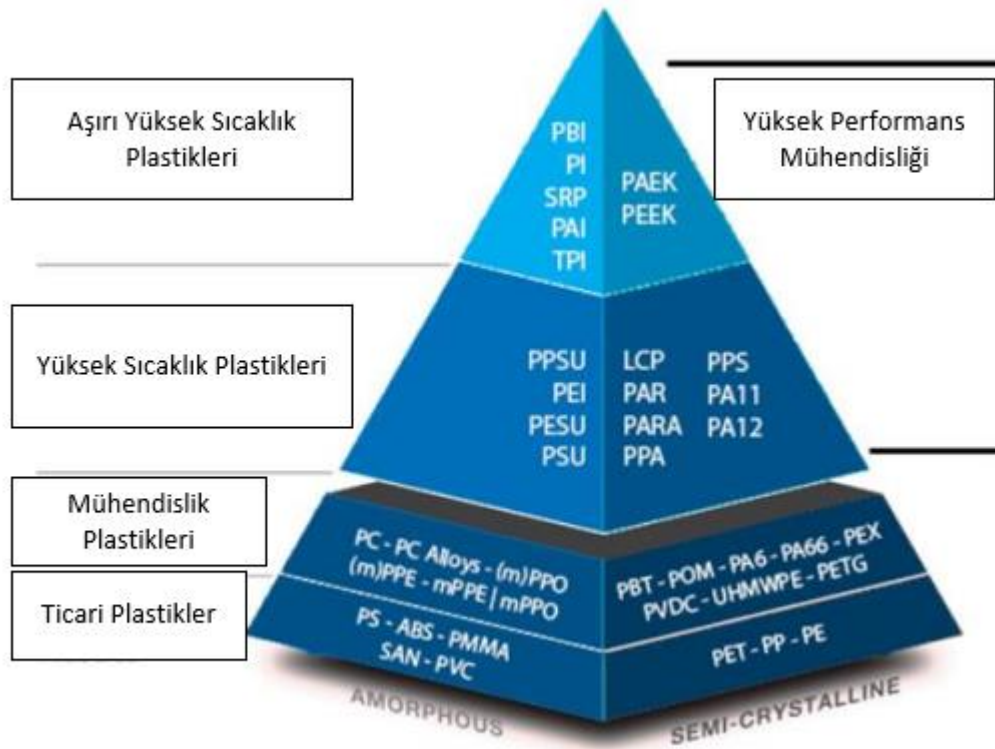
- Tip-I, son ısıl işlem sıcaklığının 2000 °C'nin üzerinde olması gereken ve yüksek modüllü tip fiber ile ilişkilendirilebilen yüksek ısıl işlem karbon fiberler (HTT).
- Tip-II, son ısıl işlem sıcaklığının 1500 °C civarında veya üzerinde olması gereken ve yüksek mukavemetli tip lif ile ilişkilendirilebilen orta ısıl işlem karbon fiberler (IHT).
- Tip-III, düşük ısı-arıtma karbon fiberleri, burada son ısı işleme sıcaklıkları 1000 ° C'den büyük değildir. Bunlar düşük modüllü ve düşük mukavemetli malzemelerdir [19].

### 3.1.2 Poliamid 6

Endüstriyel alanda birçok uygulama alanına sahip olan poliamid; enjeksiyon, ekstrüzyon, çözelti, kaplama ve döküm gibi yöntemlerde kullanılır. Tüm poliamid çeşitlerinin ortak özelliklerinden birisi elyaf ve takviye malzemelerle kuvvetlendirilebilir olması olarak gösterilebilir. Bu nedenle kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Poliamid 6 çeşitleri arasında en kolay şekil alma özelliğine sahip olan kristalin termoplastiktir. Poliamidin özellikleri çeşitlerine bağlı olarak değişmektedir. Çeşitliliğe bağlı bu değişkenlik farklı alanlarda kullanılmasına olanak sağlayan bir durumdur. Genelde çok iyi yorulma mukavemeti, iyi sürünme mukavemeti ve oldukça iyi darbe mukavemeti (kristalinite derecesine bağlı) vardır. (Şekil 3.1) Kimyasal dirençleri ve elektriksel özellikleri iyi düzeydedir. Polimerizasyon esnasında kontrol edilebilen kristalinite derecesi poliamidin rijitliğini, mukavemetini ve ısıya karşı dayanıklılığını etkiler. Genelde düşük kristalinite derecesi tokluğu, uzamayı ve darbe mukavemetini yükseltir, fakat çekme mukavemeti ve rijitliği azaltır. İyi mekanik özelliklere ve katkılı halde iyi tribolojik özelliklere sahip olan poliamid, dişli çark, kam, kaymalı yatak, rulman kafesleri, kızak gibi elemanların imalatında kullanılır. Ayrıca aşınmaya karşı takım tezgahlarının kızaklarında kaplama olarak kullanılır. (Yüksek kristalliğe sahip PA 6 düşük nem aktivitesine sahiptir. Ayrıca döküm yöntemi ile de imal edilebilen sentetik bir termoplastik olan PA 6, naylon türlerinin içinde mekanik ve fiziksel özellikleri açısından en iyi olanıdır. PA 6'nın yoğunluğu 1.12-1.14 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişirken erime noktası 220 °C ve camsı geçiş sıcaklığı ise 50 °C'dir. PA 66 malzemesi yüksek ısı değerlerine karşı rijit bir davranış sergiler bu nedenle PA 6 ile özellikleri birbirine çok yakın olmasına rağmen

erime noktasının daha yüksek olmasından dolayı yüksek ısı gerektiren durumlar için PA 66 kullanılır. Poliamid genelde doğal renktedir, fakat üretim esnasında renk verebilir. PA 6 kimyasal yapısı ve kristal bünyesinden dolayı diğer plastiklerde bulunmayan birçok üstünlüklere sahiptir. Bu özelliklerinden bazıları aşağıda verilmiştir;

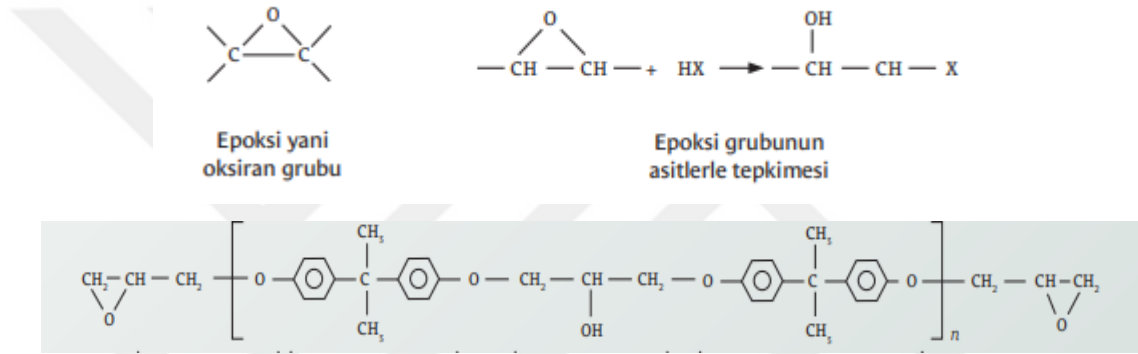
- Yüksek mekanik ve aşınma dayanımına sahip olması,
- Kolay işlenebilirlik,
- Sert fakat esnek olması nedeniyle yüksek darbe dayanımı,
- Yüksek elektrik izolasyonu,
- Rutubet, benzin ve solventlere karşı dayanıklılık,
- Geniş sıcaklık aralığında kullanılması (-50°C /+60°C)



**Şekil 3.1:** Termoplastik polimer tipleri ve kristalinite durumuna göre sınıflandırılması [20].

### 3.1.3 Epoksi reçine sistemi

Epoksi, tanım olarak oksiran, yani epoksi haşlaso içeren geniş bir reaktif bileşik grubunu ifade etmektedir. Bir oksijen atomunun iki Karbon atomuna bağlanması ile oluşmakta olup üç üyedir. Üç üyeli halkadaki gerilimden dolayı oldukça reaktif özellik gösteren bu yapı birçok kimyasal ile kolaylıkla tepkimeye girebilmektedir. Molekül içerisinde yer alan epoksi grupları, çoğunlukla molekülün uç kısımlarında yer almaktadırlar. Epoksi reçineler birden fazla epoksit grubu içeren düşük molekül ağırlıklı polimer öncüleri olarak tanımlanmaktadır. Bu reçineler çeşitli kürlenme maddeleri kullanılarak daha dayanıklı ve oldukça yüksek sıcaklıklarda bozulan termoset malzemelere dönüşmektedir. (Şekil 3.2)



Şekil 3.2: Epoksi reçinelerin genel yapısı [21].

Epoksi reçinelerin tepkimeleri; molekül zincirlerinin uzamasına ya da zincirler arası çapraz bağların oluşması ile sonuçlanmaktadır. Epoksilerde oluşan çapraz bağlanmalarda, tepkime sonucunda su molekülü gibi küçük moleküller uzaklaşmadığı için, yapıda oluşan büzülme birçok termoplastik sisteme göre daha düşük oranda gerçekleşmekte olup bu durum bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

Epoksi reçinesi terimi hem polimerleşme öncüsü gruplara hem de çapraz bağlanmanın gerçekleştiği kürlenmiş yapılarda kullanılmaktadır. Polimerleşme öncüsü gruplarda reaktif epoksi grupları mevcutken, kürlenmiş yapılarda bu grupların hepsi tepkimeye girmiş olabilmektedir. Kürlenmiş reçineler epoksi grupları içermese de epoksi reçine olarak adlandırılmaktadırlar.

Epoksi reçinelerin (Avrupa'da epoksit olarak da adlandırılır) 1909'da Rus kimyager Nikolai Alexandrovich Prileschajew (1877- 1944) tarafından keşfedildiği kabul edilmektedir. Düşük molekül ağırlığına sahip polimer öncüsü olan epoksi reçinesini elde etmek için trans-2- bütlen ve meta-kloroperoksibenzoik asit kullanan Prileschajew,

kimyasal tepkime sonucunda trans-2,3- epoksi bütan elde ettiğini bildirmiştir. Prileschajew epoksidasyonu olarak anılan alken ve peroksi asit tepkimeleri ile birlikte sayısız kullanıma sahip epoksi reçinelerin ilk temel çalışmaları başlamıştır [21].

Epoksi Reçinelerin temel özellikleri;

- Yüksek yanma dayanımı
- Yüksek yapışma kabiliyeti
- Kürleme sırasında düşük çekme/büzülme
- Yüksek nem direnci
- Düşük maliyet
- Yüksek mekanik dayanım
- Korozyona karşı direnç
- Anti – manyetik özellikleri
- Uçucu olmayan organik bileşimler
- Kimyasallara karşı yüksek direnç
- Boyutsal kararlılık ve stabilite
- Erişim kolaylıkları
- İyi ıslatma özellikleri

Şeklinde devam etmektedir.

Epoksi reçineler kürleme işlemine tabi tutulduğunda molekül zincirleri arasında yüksek oranda çapraz bağlar oluşur. Bu nedenle sert ve kırılğan bir yapıya sahip olurlar, çatlak başlamasına ve büyümesine karşı düşük dirence sahiptirler. Yapısal malzemelerde kullanımı sınırlayan bu olumsuz yönler çeşitli sertleştirici ve güçlendirici malzemeler kullanılarak aşılmaktadır. Son zamanlarda epoksi yapıştırıcılarda optimum kürleme koşullarının iyileştirilmesi, malzemenin yüksek sıcaklıklara, ısıl döngülere, değişken yükler ve titreşimlere karşı dayanımının artırılması gibi özelliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle epoksiler takviye edici dolgu malzemelerinin kullanılmasıyla kompozit malzemeler olarak üretilmeye başladılar. Kullanılan dolgu malzemelerinin boyutları da mikro ölçeklerden nano boyutlara doğru küçüldü. Araştırmalar sonucunda geliştirilen yeni epoksi bazlı kompozit yapıştırıcılar gün geçtikçe daha da işlevsel hâle gelmektedir. Epoksiler; kalıplar, modeller, levhalar, endüstriyel parçalar gibi birçok üründe ve Havacılık –

Uzay, Elektrik – Elektronik, inşaat, Biyomedikal Sistemler, Yenilenebilir Enerji gibi birçok alanda kullanılmaktadır [21].

### **3.1.4 Diğer malzemeler**

- Altlık taşıyıcı Film

Temel fonksiyonu Tailored Fiber Placement teknolojisi ile imalat yapılması sürecinde fiberlerin yerleştirildiği ve üzerine dikildiği taşıyıcı tabakadır. Yapısal olarak özellikle termoplastik kompozit parçalarda kullanılan matris sistemi ile uyumlu olması olası tercih edilmelidir.

- Dikiş ipliği

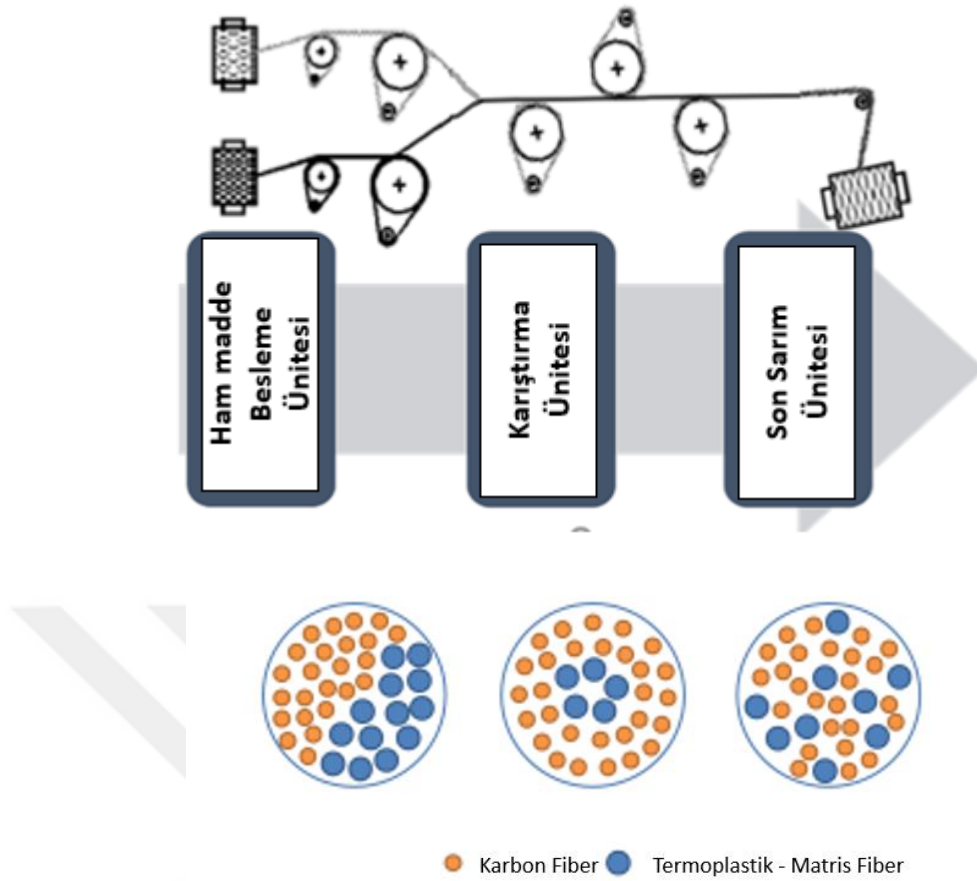
Temel fonksiyonu Tailored Fiber Placement teknolojisi ile imalat yapılma sürecinde fiberlerin taşıyıcı tabakaya sabitlenmesi ve dikilmesini sağlayan ipliktir. Yapısal olarak özellikle termoplastik kompozit parçalarda kullanılan matris sistemi ile uyumlu olması gerekmektedir. Eridiklerinde büyük çoğunluğunun parça kalınlığı boyunca yapı içerisinde kalıyor olması performans ve mekanik özellikleri etkiler nitelikte bir üründür. Tekstil dikiş ipliklerine kıyasla düşük yağ bazlı yüzey yapılamaları wax ile üretiliyor olması oldukça önemlidir.

## **3.2 Yöntem**

### **3.2.1 Hibrit fiber teknolojisi**

Çalışmada kullanılan hibrit fiber teknolojisi Coats PLC tarafından ve temel olarak karbon fiber demetinin 2 boyutlu olarak açılmasını sağlayarak, bu iki boyutta genişlemiş yapıya termoplastik filamanların homojen bir şekilde birleştirilmesi ile üretilmiştir.

Şematik olarak imalat prosesi ve imalat sırasında yapılan işlem adımlarını göstermektedir. (Şekil 3.3)



**Şekil 3.3:** Hibrit fiber üretim adımları ve şematik bir hibrit yapısı gösterimi [22].

Termoplastik hibrit fiber teknolojisi ile elde edilen ara ürünün başlıca avantajları aşağıda listelenmiştir;

- Çevreye olan etkileri ve geri dönüşüme uygunluk
- İkincil reçine ile ıslatma proseslerinin devreden çıkarılması
- Kurlama prosesinde hızlı ıslatma
- Seri imalat için uygunluk
- Maliyet ve üretim avantajları
- Yüksek tokluk & Enerji sönümlenme özellikleri
- Neredeyse tüm termoplastik malzeme tipleriyle çalışılabilirliği
- Oda sıcaklığında herhangi bir impregnasyon ihtiva edilmediğinden herhangi bir fiber hasarı olmaksızın elde edilen yüksek şekillendirilebilirlik
- Geniş çalışma sıcaklığı bandı

Karbon fiber kullanılarak üretilmiş PPS ve PA6 matrisli hibrit yapılar gösterilmiştir. (Şekil 3.4)



**Şekil 3.4:** Karbon fiber takviyeli PPS ve PA6 matrisli hibrit fiberler.

### 3.2.2 Fiber yerleştirme teknolojisi

Yapılan çalışmada numune üretiminde kullanılacak fiber yerleştirme teknolojisi olarak fiber yerleştirme olarak da adlandırılan ve tekstil sektöründe kullanılan nakış işlemi ve makinalarının geliştirilmesi ile ortaya çıkan, “Tailored Fiber Placement” olarak da bilinen teknik ile yapılacaktır.

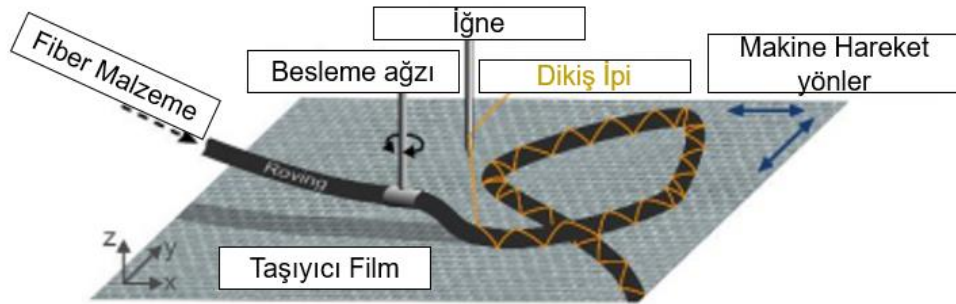
Teknik genel itibari ile, taşıyıcı bir yüzey üzerine, daha önceden hazırlanmış bir tasarım programına göre fiberlerin alt üst iplikler yardımı ve zikzak dikiş stili ile sabitlenmesi ile çalışmaktadır. Bu çalışmanın yapıldığı makineler aşağıda gösterilmiştir. (Şekil 3.5) Bu tip makinalarda sabit bir döner makaradan tansiyon kontrollü fiber beslenebildiği gibi, besleme ağzının hemen üzerine konumlandırılmış ve besleme ağzı ile birlikte hareket eden, özel makaralı sistemlerde mevcuttur. Cihaz çalışma prensibi olarak taşıyıcı tablanın tasarıma göre iki boyutta hareketi ile birlikte besleme ağzının 360 derece bağımsız döner hareketini kullanmaktadır. Bu hareketler bütünü sayesinde fiberler istenilen doğrultu, açı, karmaşık şekilde yerleştirilebilmektedirler.



**Şekil 3.5:** TFP makinası

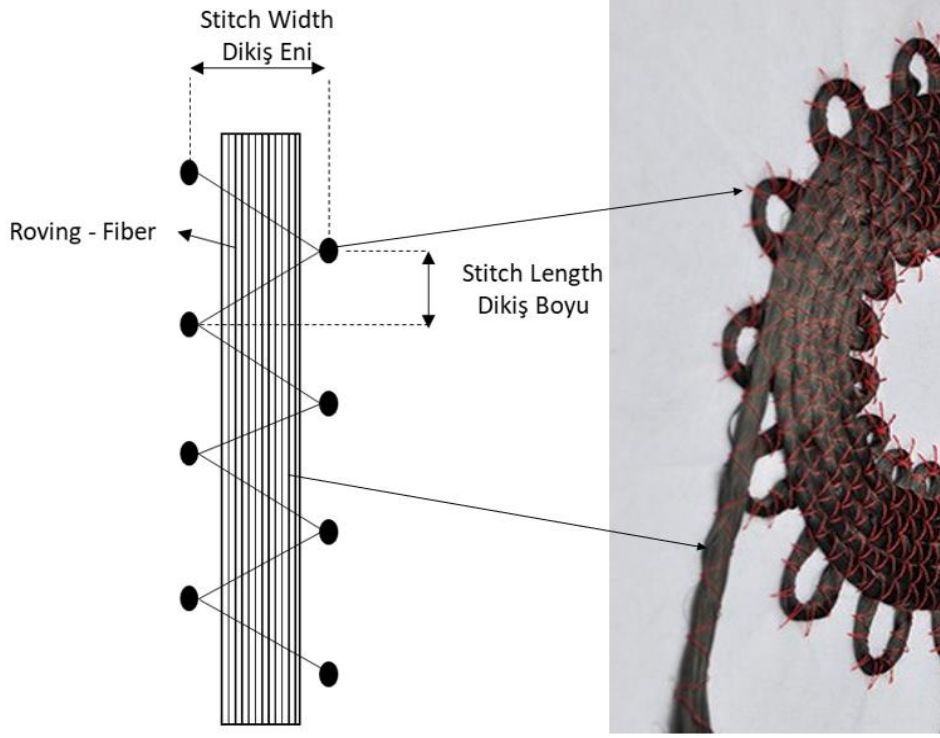
Bir TFP makinasının besleme kafası aşağıdaki gösterilmekte olup, (Şekil 3.6. bu ünite temel olarak;

- Döner sistem mekanizması
- Üst dikiş ipliği ve ilgili geçiş yolları
- Fiber besleme ağızı ve ilgili aparatlarından oluşmaktadır.



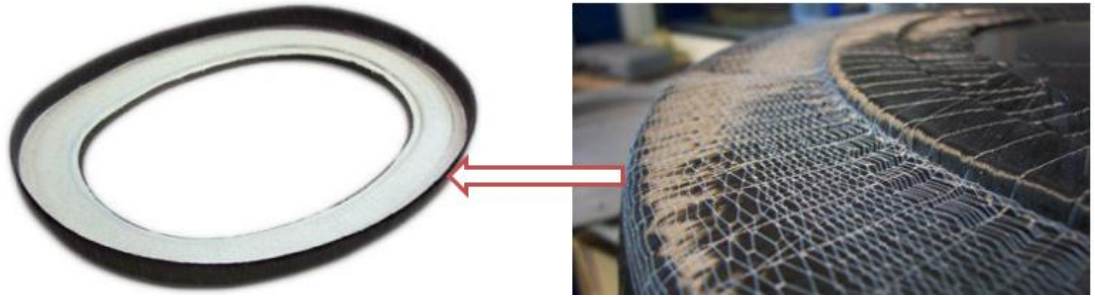
**Şekil 3.6:** TFP makinası düzeneği [14]

Makinanın çalışması için yapılması gereken tasarım ve başlıca programlama parametreleri dikiş eni, dikiş boyu, zikzak hareketi ve tabla hareketlerinden oluşur. Dikilmiş bir yapının şematik gösterimi bir örnek uygulama resmi paylaşılmıştır. (Şekil 3.7) Bu şekilde de anlaşılacağı üzere fiber malzemeler; X-Y düzleminde hareketli bir tabla üzerine yerleştirilmiş bir taşıyıcı yüzey üzerine belirli doğrultuda, gerginlikte, genişlikte ve dikiş sıklığında yerleştirilerek dikilerek sabitlenerek serilmektedirler.



**Şekil 3.7:** TFP yönteminde zikzak dikiş prensibi ve örnek uygulaması.

Bu yöntem ile üretimi devam eden birçok endüstriyel uygulama mevcut olup en bilenen ve güncel örneği olarak Airbus A350 tip uçakların cam çerçevesi gösterilebilir. Uygulamaya dair örnek bir kesit paylaşılmıştır. (Şekil 3.8)



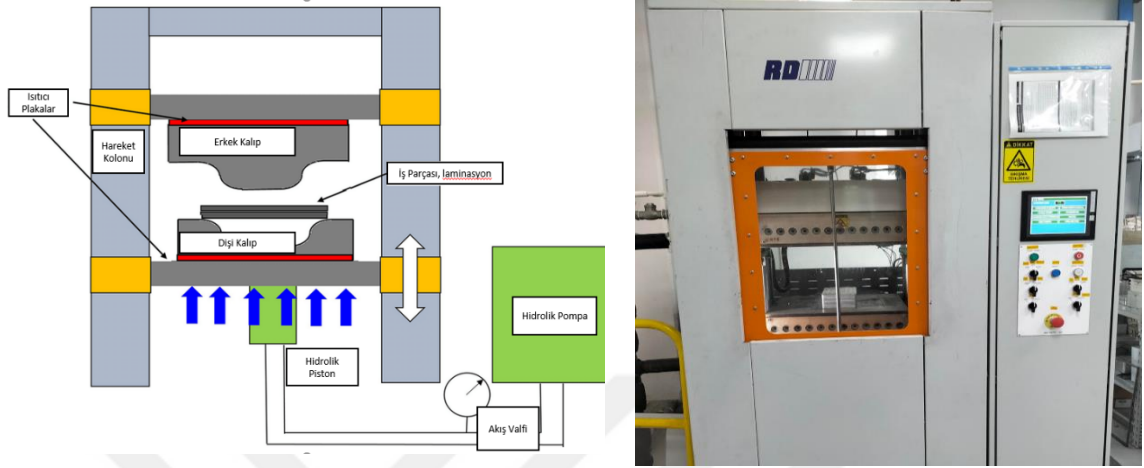
**Şekil 3.8:** TFP ile üretilmiş A350 tipi uçakların cam çerçevesi

### 3.3 Numune Üretimi

#### 3.3.1 Numune kalıplama

Numunelerin üretimde kullanılacak temel yöntem ısıtılmalı pres yöntemi olarak belirlenmiştir. Bu nedenle numune üretimde kullanılmak üzere 2019 yılında üretilmiş Avrupa menşeli bir pres ünitesi kullanılmıştır. Kendinden ısıtılmalı alt ve üst plakalara

sahip olan bu pres 420°C sıcaklığa kadar çıkabilmektedir. Alt plakanın hareketli, üst plakanın sabit olduğu bu hidrolik pres ünitesi 800 kN maksimum operasyon kapasitesindedir. Prese ait bir görsel ve çalışma prensibine ait temsili bir şematik paylaşılmıştır. (Şekil 3.9)



Şekil 3.9: Isıtmalı hidrolik pres şematik gösterimi ve ünitesi.

### 3.3.2 Numune kesimi

Numune kesimi için belirlenen yöntem bilgisayar kontrollü bir CNC kesim tezgahında uygun çakılar kullanılarak kesim işlemleri yapılmıştır. Bu doğrultuda deneysel çalışmada detayları paylaşılan numuneler belirlenen uygun çakı ve kesim parametreleri kullanılarak yerli üretim bir üç eksenli CNC tezgahında kesilerek hazırlanmış ve sonrasında kabandan inceye giden zımpara kağıtları ile çapak temizlikleri yapılmıştır. Numune kesimi sırasında hava soğutmasından yararlanılmış olup herhangi bir soğutucu sıvı kullanılmamıştır. Kullanılan CNC tezgahına ait görüntü paylaşılmıştır. (Şekil 3.10)



**Şekil 3.10:** 3 eksenli CNC kesim tezgâhı.

### **3.3.3 Numune boyutlandırması**

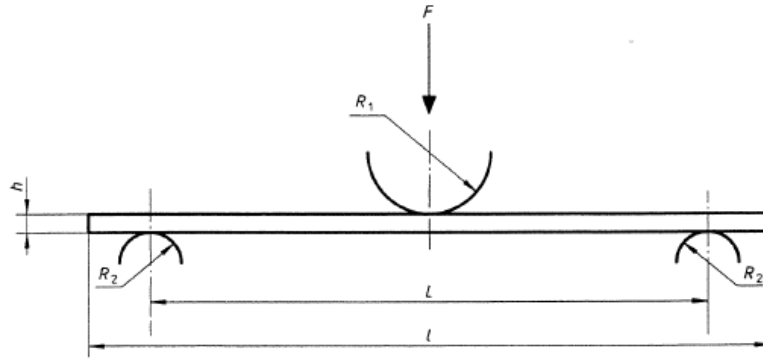
Bölüm 3.3.2’de belirtildiği gibi numune kesimleri üç eksenli bir CNC tezgâhı kullanılarak ISO 527-5 [23] ve ISO 14125 [24] standartlarının referansı ile seçilen boyutlarda hazırlanmıştır. Her bir numune grubu için en az 5 anlamlı sonuç hedeflenerek yapılan bu aşamada aynı zamanda malzemelerin termal karakterizasyonu içinde 20 mm x 20 mm boyutlarında kare numuneler alınarak DSC analizlerinde kullanılmıştır. (Şekil 3.11)



$R_2$ : 2 mm  $\pm$ 0.2, destek noktaları

**Çizelge 3.1:** ISO14125 – Sınıf 4 eğme numunesi numune boyutları ve test düzeneği ayarları

Malzeme Sınıflandırması	Numune Boyu (l), mm	Destekler Arası Mesafe (L), mm	Numune Genişliği, mm	Numune Kalınlığı (h), mm
Sınıf 4	100 (-0, +10)	80 ( $\pm$ 1)	10 ( $\pm$ 0.5)	2 ( $\pm$ 0.2)



**Şekil 3.12:** ISO 14125'e göre 3 nokta eğme test düzeneği ve numunesinin şematik gösterimi [24].

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında ele alınan numuneler ile 12K sınıfı karbon fiber takviyesine sahip PA6 ve Epoksi matrisli Kompozit sistem karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan karbon fiber malzemesi Hyosung firmasının standart modüllü Tansome-H2550 sınıfındadır. Malzeme karakteristikleri Çizelge 4.1’ de paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.1:** Hyosung- Tansome – H2550 tip karbon fiber özellikleri [25]

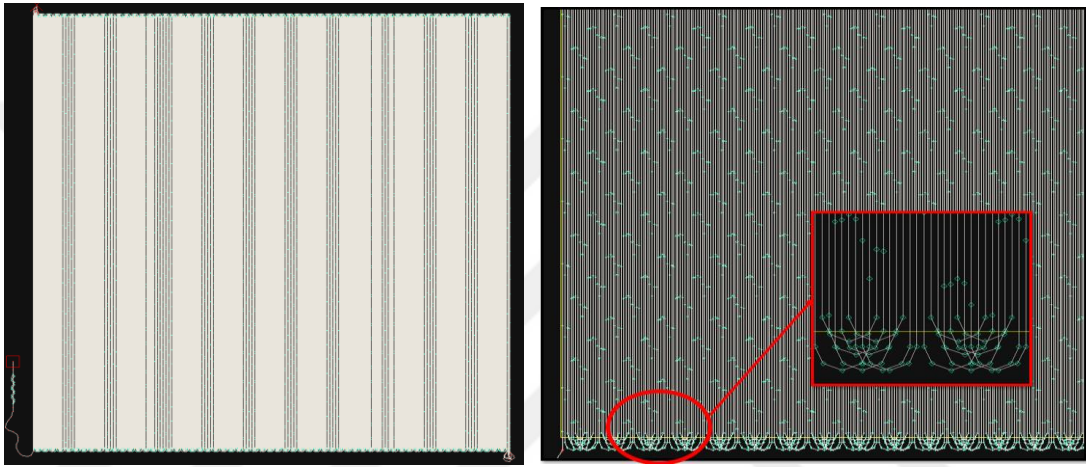
Filament sayısı	Çekme Mukavemeti, MPa (ISO 10618)	Çekme Modülü, GPa (ISO 10618)	Yüzde Uzama, %	Filament Çapı, $\mu\text{m}$	Doğrusal Yoğunluk, g/Km	Yoğunluk, $\text{g/cm}^3$
12000	5516	250	2.2	7	800	1.8

PA6 matris sistemi BASF firmasının sağladığı B27 sınıfı peletlerden elde edilen multifilaman fiberler ile oluşturulmuş ve Epoksi sistemi içinde Hexion firmasının Epikote TRAC 06150 serisi hızlı kürlemeye uygun reçineleri tercih edilmiştir. Bu seçimde her iki malzemenin de temel mekanik özelliklerinin benzer olmasına dikkat edilmiştir ve genel özellikleri Çizelge 4.2’ de paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.2:** PA6 ve Epoksi reçine temel özellikleri [26, 27]

Malzeme	Yoğunluk, $\text{g/cm}^3$	Eriye Sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$	Camsı Geçiş Sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$	Çekme Mukavemeti, MPa	Çekme Modülü, GPa	Eğilme mukavemeti, MPa	Eğilme Modülü, GPa
Epoksi (Epikote Trac 06150)	1.13 – 1.15	n/a	110	85	2.9	130	3
PA6-Ultramid B27-12)	1.12 – 1.15	220	60	80	3	-	-

TFP yöntemi ile preform imalatı yapılabilmesi için öncelikle bir tasarım oluşturulmuş ve 300 mm x 300 mm boyutlarında 1 ve 2 mm kalınlığı hedeflenerek tasarımlar yapılmıştır. Bu tasarımların oluşturulmasında kat kalınlığı ve sayısı yapılan hesaplamalara göre karışım kuralları da gözetilerek tasarlanmıştır. Aşağıda görülebileceği gibi TFP prosesi her bir fiberi dikkate alan tasarımlar yapılmasına olanak sağlamaktadır. (Şekil 4.1) Bu çalışma kapsamında kullanılmış olan tüm numuneler şekil 4.1’ de verilen tek yönlü laminasyon planından elde edilmiş; 1 mm’lik plakalar için 5 kat, 2 mm’lik plakalar için ise 10 katlık bir preform tasarımı çalışılmıştır. Preform gruplarının malzeme detayları ise ilgili başlıklarda açıklanmıştır.



Şekil 4.1: Tek yönlü TFP laminasyon tasarımı

#### 4.1 Numune Tip – 1 Üretimi (PA6)

PA6 matrisli numune gruplarında Coats firmasının ürettiği hibrit fiberler kullanılmış ve daha önce açıklanan kriterlere göre preform imalatı gerçekleştirilmiştir. Preform imalatında kullanılan dikiş ipliği ve altlık malzeme de yine PA6 esaslı olarak seçilmiş ancak çok düşük miktarlarda yer aldıklarından fiber – matris oranlarında ihmal edilmişlerdir. Aşağıda çalışılan malzeme grubunun detayları verilmiştir. (Çizelge 4.3).

**Çizelge 4.3:** Numune Tip-1 üretimine dair detaylar

Malzeme	Ağırlıkça karbon fiber oranı, %	Hacimce karbon fiber oranı, %	Kaplama içeriği / kaplama oranı	Tex, g/km
12K- PA6	60%	49%	PU esaslı/ 1.2 %- 1.5 %	1375

PA6 içerikleri numunelerin hazırlanması için öncelikle bir deneme grubu çalışılarak parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışma sırasında kalıplama sıcaklığı ve bekleme süresi iki temel değişken olarak ele alınmış ve standart çekme testleriyle beraber görsel inceleme değerlendirme yöntemi olarak belirlenmiştir. Aşağıdaki Çizelge 4.4’de çalışılan parametreler ve testlerden elde edilen ortalama değerler verilmiştir. Parametrelerin oluşturulmasında ilgili literatürden yararlanılmış ve PA6 fiberlerin üretiminde de kullanılan ekstrüzyon sıcaklıkları gözetilerek iki farklı kalıplama sıcaklığı için üç farklı bekleme süresi analiz edilmiştir. Tüm kalıplama çalışmaları 120 kN kuvvet ile 300 mm x 300 mm’lik bir kalıp kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar tüm numune çalışmaları için geçerli olup konsolidasyon için birim alan üzerinde oluşturulan basınç 1.33 MPa olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.4:** Numune üretiminde kullanılan sıcaklık-zaman ilişkili mekanik test sonuçları

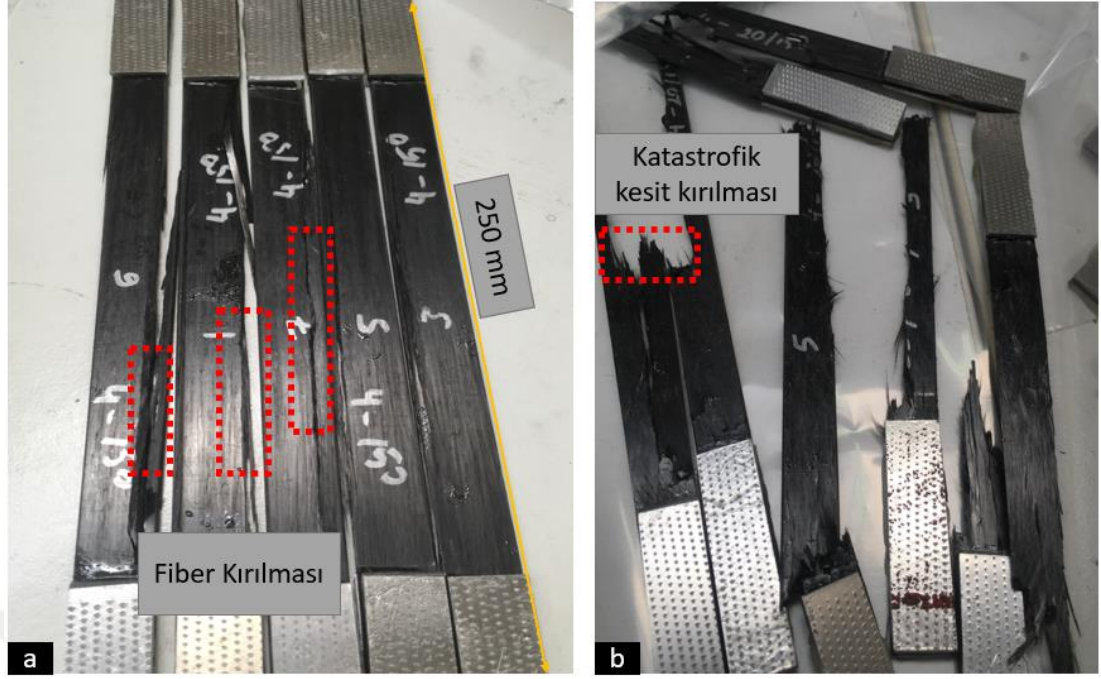
Kalıplama sıcaklığı, °C	Bekleme süresi, dakika	Ortalama Çekme Mukavemeti, MPa	Standart Sapma, MPa	Ortalama Çekme Modülü, GPa	Standart Sapma, MPa
260	7	1376.81	44.7	95.63	2.21
260	12	1619.92	41.4	98.3	1.96
260	15	1755.42	23.8	99.4	1.35
280	7	1619.44	35.62	98.37	1.77

**Çizelge 4.4(devam):** Numune üretiminde kullanılan sıcaklık-zaman ilişkili mekanik test sonuçları

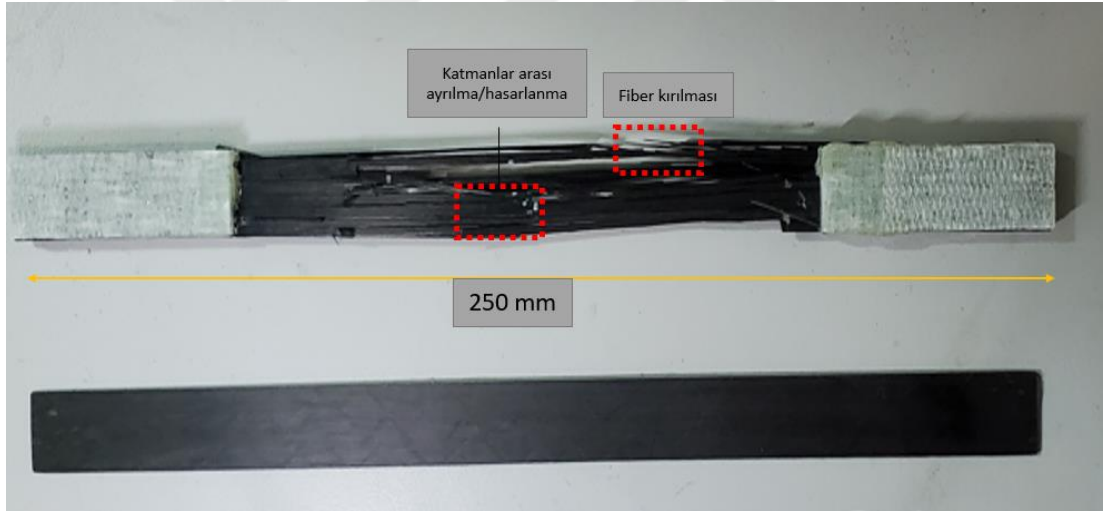
Kalıplama sıcaklığı, °C	Bekleme süresi, dakika	Ortalama Çekme Mukavemeti, MPa	Standart Sapma,	Ortalama Çekme Modülü, GPa	Standart Sapma,
280	12	1812.1	23.56	103.054	1.34
280	15	1754.6	33.32	101.86	1.73

Elde edilen sonuçlar numunelerin kırılma karakteristikleri ile değerlendirildiğinde nihai test çalışması için 280°C kalıplama sıcaklığı ve 12 dakika bekleme süresi seçilmiştir.

Aşağıda verilen Şekil 4.2’de görülebileceği gibi kalıplanan numune gruplarında ortalama olarak iyi sonuçlar elde edilse dahi elde edilen sonuç sapmaları yüksek olabilmektedir. Kırılma karakteristiği; zayıf konsolidasyona sahip numunelerde ise daha çok matris-fiber ayrışması ile tetiklenen kalın parçaların ana numune kesitinden ayrıldığı ve taşınan yükün tüm kesit hasarlanmadan dramatik olarak düştüğü görülmüştür. İyi bir konsolidasyonla elde edilen sonuçlar ise tüm kesitin katastrofik olarak hasarlanmasıyla biten testlerden gelmekte ve bu numunelerde tüm kesitin parçalandığı açıkça görülebilmektedir. (Şekil 4.3)



**Şekil 4.2:** Farklı parametrelerle üretilmiş test gruplarının kırık görselleri. a.60°C, 7 dakika; b.280°C, 7 dakika



**Şekil 4.3:** 280°C kalıplama sıcaklığı ve 12 dakika bekleme süresi ile hazırlanmış numunenin çekme kuvveti altında hasarlanması.

#### 4.2 Numune Tip – 2 Üretimi

Numune tip – 2 olarak belirlenen grup epoksi reçine sistemi ile yapılacak çalışma olarak belirlenmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde yardımcı olması amacı ile Numune tip – 1 de belirtilen detaylar ile paralel karışım oranları bu tip içinde planlanmıştır. Numune üretimine dair detaylar aşağıdaki Çizelge 4.5'te paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.5:** Numune Tip – 2 üretimine dair detaylar.

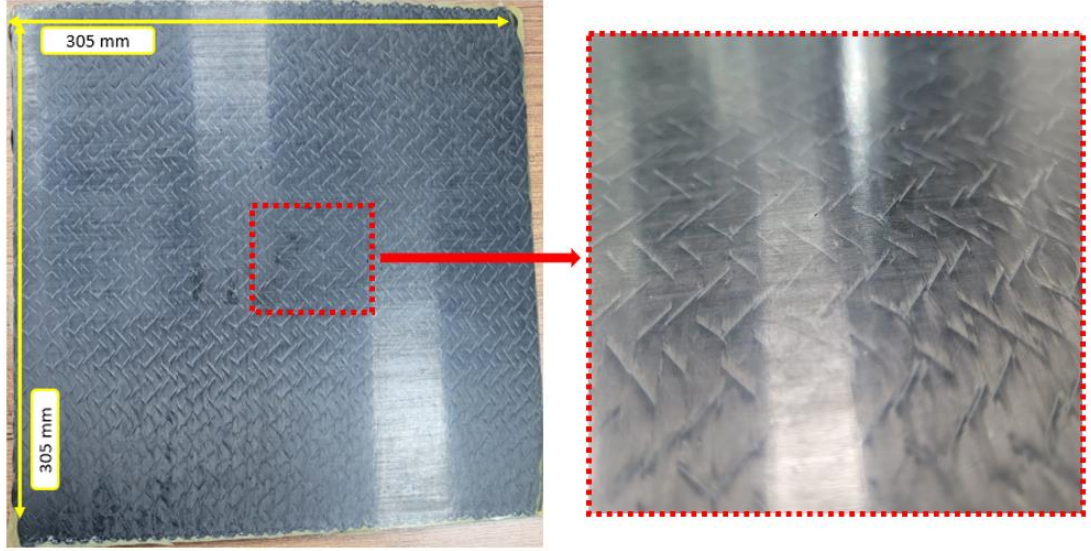
Malzeme	Ağırlıkça karbon fiber oranı, %	Hacimce karbon fiber oranı, %	Kaplama içeriği / kaplama oranı	Tex, g/km
12K–Epoksi	60%	49%	Epoksi uyumlu	12K karbon fiber: 800

Epoksi matrisli numunelerin üretimi için kullanılan Hexion EPTRAC 06150 reçine sisteminin yönergelerine uygun çalışılmıştır. PA6 numuneleri ile aynı kalıp kullanılarak yine 120 kN (1.33 MPa /mm<sup>2</sup>) konsolidasyon basıncı altında çalışılmıştır. İlgili değerler aşağıda paylaşılmıştır. (Çizelge 4.6)

**Çizelge 4.6:** Numune Tip – 2 konsolidasyon parametreleri

Malzeme	Kalıplama Sıcaklığı, °C	Kalıplama Basıncı, kN – MPa	Bekleme Süresi, dakika
12K Karbon fiber			
Hexion EPTRAC 06150	120	120 – 1.33	5

TFP kullanılarak üretilen karbon fiber preformları öncelikle tartılarak ağırlıkları belirlenmiş ve buna bağlı olarak ağırlıkça 60% fiber oranını verecek şekilde epoksi karışımı manuel olarak preform üzerine uygulanmıştır. Burada plastik spatulalar kullanılarak bir nevi el yatırması pratiği gerçekleştirilmiş ancak preform yapısı tüm laminasyon katlarını ihtiva ettiğinden el ile ıslatma yöntemi tüm preform üzerinde tek seferde gerçekleştirilmiştir. Ardından reçine ile ıslatılmış olan preform kalıba yerleştirilerek belirtilen parametreler kullanılarak kurlenmesi sağlanmıştır. Şekil 4.4'te kalıplama sonrası elde edilen plakaya ait görsellere yer verilmiştir.



**Şekil 4.4:** 12K Karbon fiber – Epoksi numunesinin kalıplama sonrası görüntüsü.

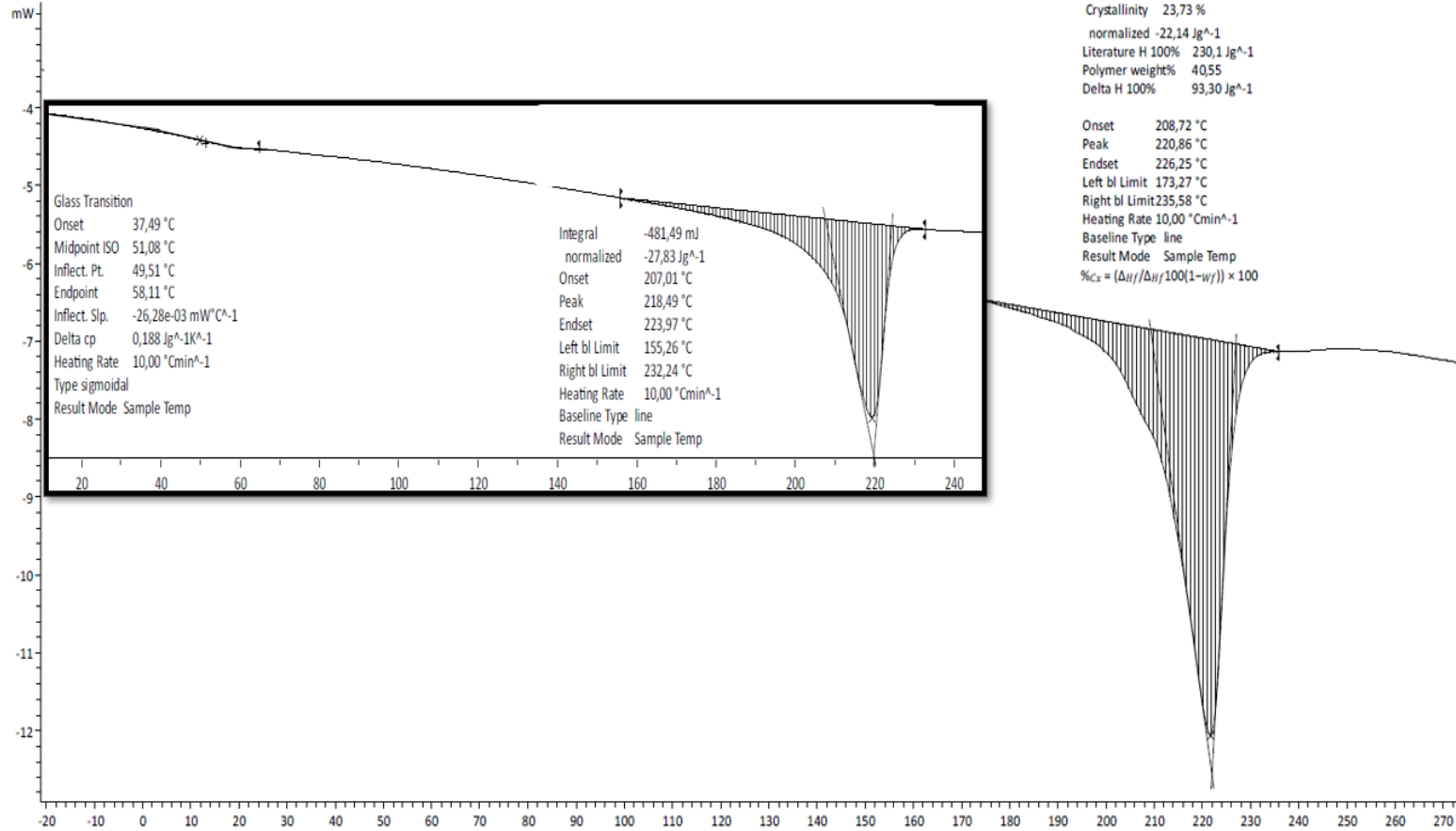
### 4.3 Termal Karakterizasyon Çalışmaları

Bu başlık altında verilen sonuçlarla hem PA6 hem de epoksi esaslı numunelerin termal özellikleri incelenmiştir. Mekanik özellikleri açısından benzer sonuçlar vermesi beklenen bu malzeme gruplarının kullanım alanlarını belirleyen önemli bir etken fiziksel ve kimyasal özelleridir aynı zamanda. Bu nedenle yapılan DSC testleriyle malzemelerin camsı geçiş sıcaklıkları analiz edilmiştir. PA6 aynı zamanda yarı kristalin bir polimer olduğundan kalıplama çevrimi sonrasında iç yapıda oluşan kristal yüzdesinin de mekanik özelliklere katkı gösterdiği unutulmamalıdır. Bu nedenle termal karakterizasyon çalışmasında DSC çevriminden PA6 numunesi için kristalinite oranı da hesaplanmıştır. Aşağıda verilen sonuçlar 10°K/dakika ile çalıştırılan bir DSC çevriminin ilk ısıtma eğrisinden elde edilmiştir. Bu seçimin sebebi ise malzemelerin nihai performanslarına etki eden termal geçmişlerini temizlemeden, kullanıma hazır bir parça üretildiği varsayılarak değerlendirilmesindedir. Şekil 4.5’ de ve ilgili Çizelge 4.7’de görülebileceği gibi elde edilen değerler hem literatür ile hem de ilgili hammaddelerin tedarikçi dokümanları ile uyumludur. Bu noktada PA6 için hem kristalinite oranına hem de camsı geçiş sıcaklığına yönelik optimizasyon olasılıklarından bahsedilebilir. Soğutma hızı ile ilgili olan bu değişkenlik malzemenin hem tokluk özellerine hem de çekme mukavemeti özelliklerine etki edebilecek olsa da bu çalışma kapsamında iç yapı karakteristiklerine yönelik bir parametre optimizasyonuna yer verilmemiştir. (Şekil 4.6)

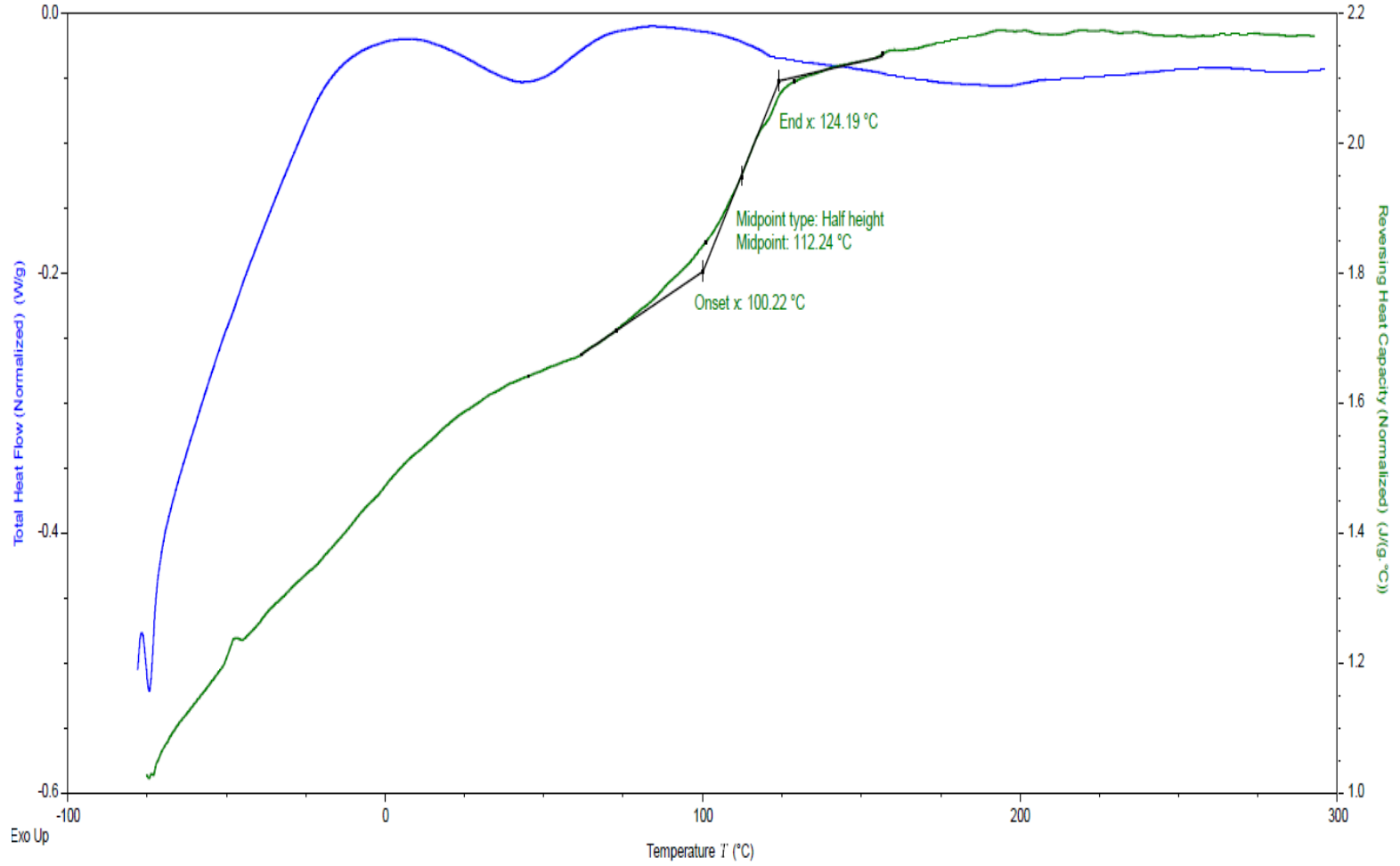
**Çizelge 4.7:** Numune gruplarının termal özellikleri

Malzeme	Camsı Geçiş Sıcaklığı, °C	Erime Sıcaklığı, °C	Kristalinite Oranı, %
12K – PA6	51	220.86	23.73
12K- Epoksi	112	N/A	N/A





Şekil 4.5: PA6 esaslı numunenin Tg değeri ve kristalinite oranının ilk ısıtma eğrisi üzerinde gösterimi.



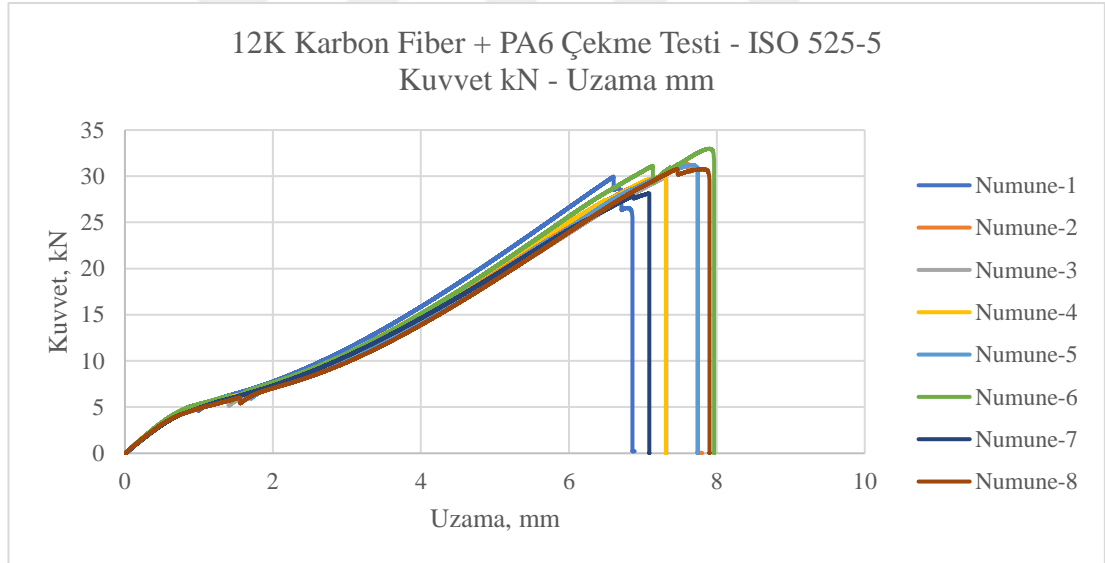
Şekil 4.6: Epoksi esaslı numunenin T<sub>g</sub> değerinin ilk ısıtma eğrisi üzerinde gösterimi.

#### 4.4 Çekme Test Sonuçları

Çekme testleri Shimadzu AGS-X serisi 100 kN' luk bir yük hücresine sahip olan üniversal test düzeneğinde gerçekleştirilmiş ve manuel tip fikstürler kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın nihai numunelerinin üretiminde ise cam elyaf ve infüzyon sınıfı epoksi reçinesiyle hazırlanan 2 mm'lik tab malzemeleri kullanılmıştır.

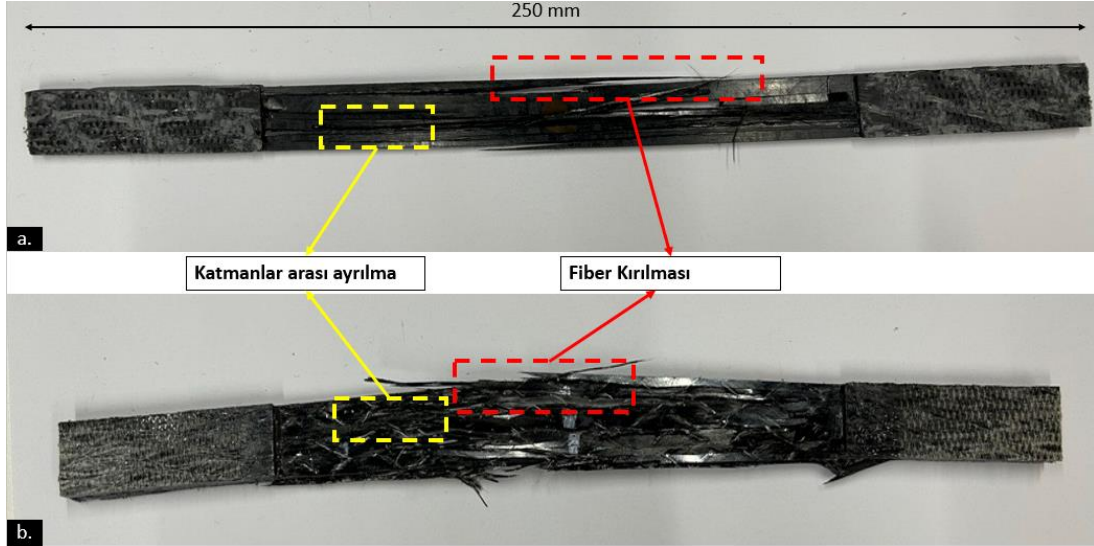
##### 4.4.1 12K Karbon fiber + PA6 – çekme testi sonuçları

Çalışmanın ilk test grubu olan Numune Tip – 1, ISO 527-5 test standardında tariflendiği gibi hazırlanan numuneler yöntemler adımıyla tariflenen ve bilgileri paylaşılan Shimadzu marka test ünitesinde test edilmiştir. Teste 10 adet numune tabii tutulmuş olup 8 adet numunenin test sonucu, test sonrası yapılan görsel incelemede uygun olarak değerlendirilmediği için raporlanmıştır. Test sonuçlarına göre farklı karakteristiklerin değerlendirilmesi için test sonrasında elde edilen ham veriler Excel programı aracılığı ile analiz edilerek aşağıdaki grafikleri elde edilmiştir; (Şekil 4.7)



Şekil 4.7: Numune Tip – 1, Çekme Testi Kuvvet, kN- Uzama, mm grafiği

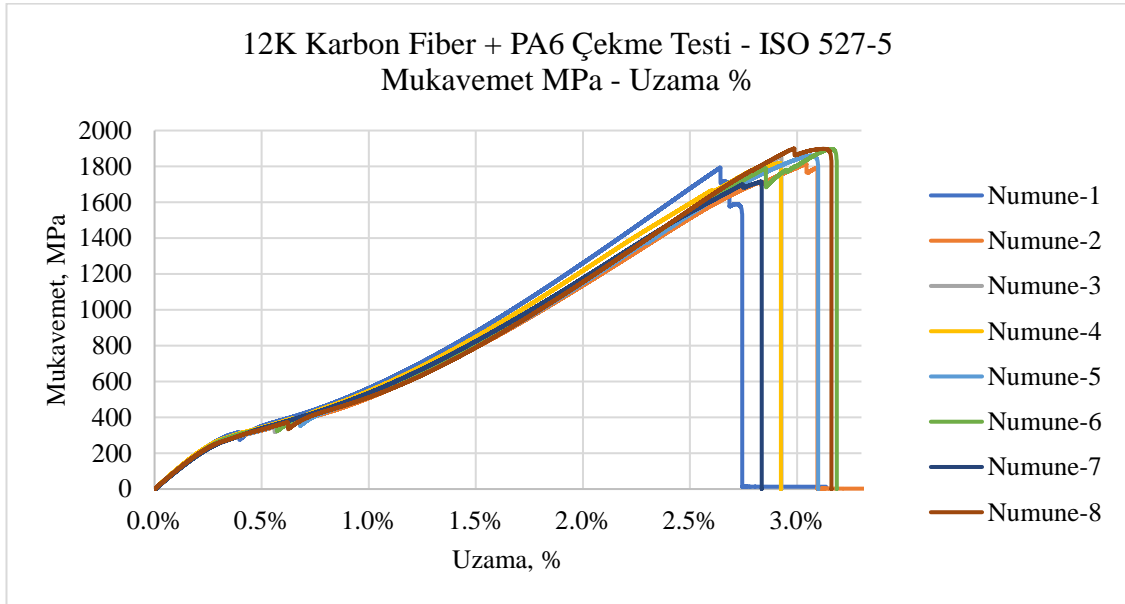
Numune değerlendirme kriterleri arasında tab uygulanan bölgelerde kayma izleri olup olmadığı v kesitte gözlenen deformasyon karakteristikleri yer almaktadır. Şekil 4.8 (a)' de de görülebileceği gibi raporlanan tüm numunelerde dominant bir şekilde gevrek kırılma karakteristikleri yer almakta ve tabakalar arası ayrılma bulunmamaktadır.



**Şekil 4.8:** (a.) Numune Tip – 1 çekme testi uygulanmış hasarlı numune örneği (b.) Numune Tip – 2 çekme testi uygulanmış hasarlı numune örneği

Önceki bölümlerde açıklandığı üzere seçilen üretim parametreleri ile makul sürelerde yeterli bir impregnasyon elde edilebilmiş ve hasarlanan çekme numunesi kesitinde 1 mm'lik kalınlık içerisinde düzensiz ayrılan parçalar gözlenmiştir. Olası bir uyumsuzluk ya da impregnasyon probleminde beklenen her bir laminasyon katının takip eden yüzeyden direkt olarak ayrılması şeklinde bir delaminasyon gözlenmemiştir.

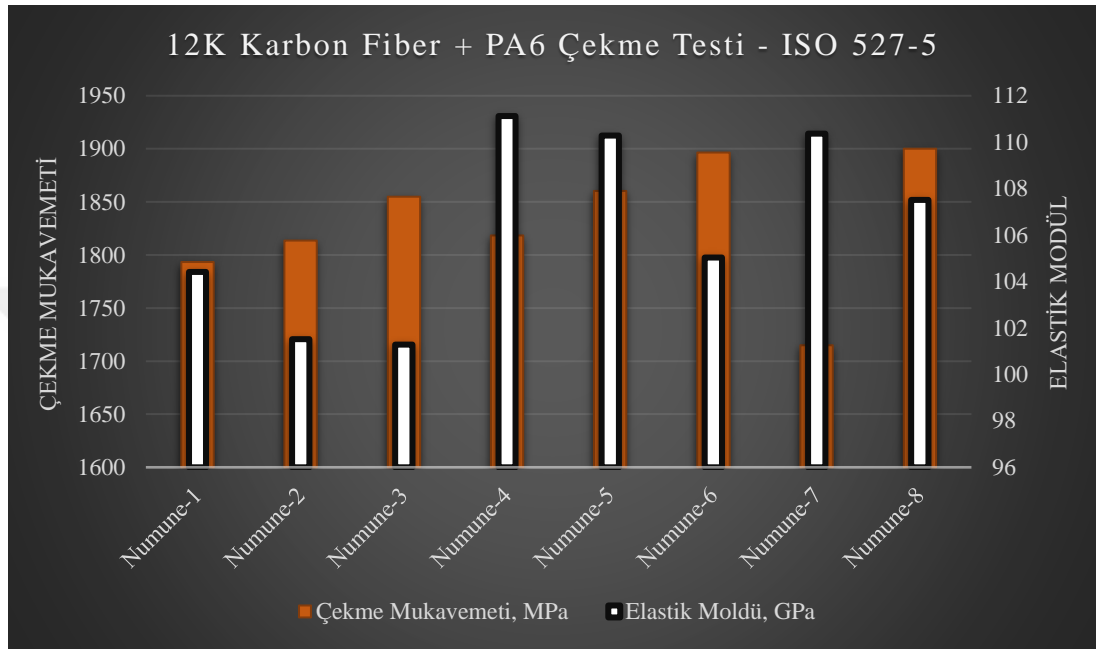
Test sonuçları Şekil 4.9'da incelendiğinde tüm yük eğrilerinin benzer bir eğime sahip olduğu ve hasarlanma kuvvetlerinin 30 kN – 35 kN bandında ve toplam uzama miktarının ise 6 mm – 8 mm aralığına yerleştiği görülmüştür (Şekil 4.9).



**Şekil 4.9:** Numune tip -1 Çekme Testi, Mukavemet, MPa - % Uzama grafiği

Şekil 4.9’da verilen mukavemet ve yüzde uzama değerleri incelendiğinde 1700 MPa – 1900 MPa aralığında ve uzamalar 2.7%- 3% bandında olduğu ham verilerden yapılan hesaplamalar ile gösterilmiştir.

Şekil 4.10’da ISO 527-5 standardına uygun olarak elde edilen Young modülü değerleri mukavemet sonuçlarıyla birlikte verilmiştir.

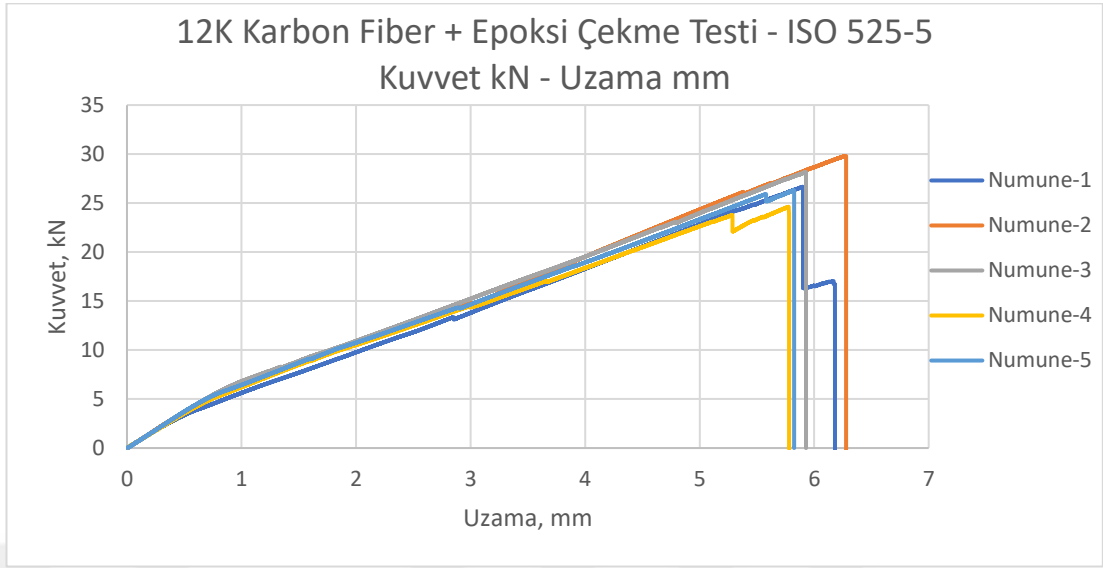


**Şekil 4.10:** Numune Tip -1, Çekme Testi, Çekme Mukavemeti, MPa – Elastik Modül, GPa grafiği

Şekil 4.10’ da sütun grafikleri ile sekiz farklı numune için elde edilen modül değerleri beyaz barlar ile ifade edilmiş ve dağılımın 103 GPa – 112 GPa aralığında olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.4.2 12K Karbon fiber + epoksi çekme testi sonuçları

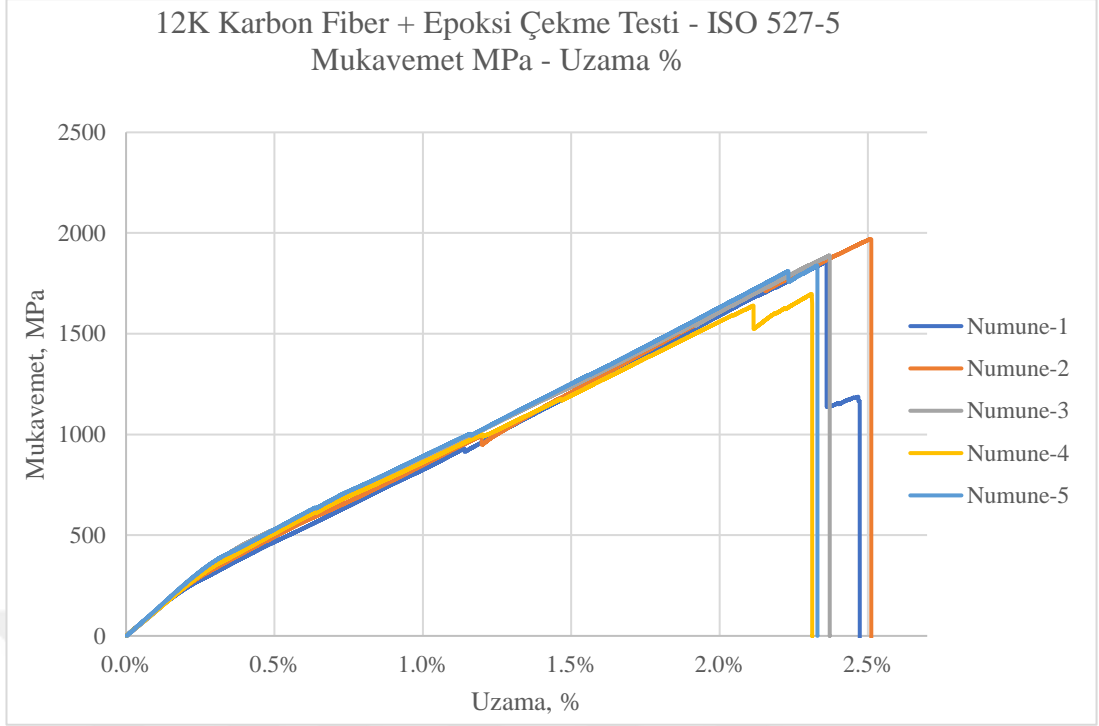
Çalışmanın ikinci test grubu olan Numune Tip- 2, ISO 527-5 test standardında tariflendiği gibi hazırlanan numuneler yöntemler adımıyla tariflenen ve bilgileri paylaşılan Shimadzu marka test ünitesinde test edilmiştir. Teste 6 adet numune tabi tutulmuş olup 5 adet numunenin test sonucu raporlanmıştır. Test sonuçlarına göre farklı karakteristiklerin değerlendirilmesi için test sonrasında elde edilen ham veriler Excel programı aracılığı ile analiz edilerek aşağıdaki paylaşılan grafikler elde edilmiştir. Şekil 4.11’ de test edilen numunelerin kuvvet altındaki uzamalarını göstermektedir.



**Şekil 4.11:** Numune Tip – 2, Çekme Testi, Kuvvet, kN- Uzama, mm grafiği

Test sonucunda hasarlanan çekme numunesi kesitinde 1 mm'lik kalınlık içerisinde düzensiz ayrılan parçalar gözlenmiştir. Olası bir uyumsuzluk ya da impregnasyon probleminde beklenen her bir laminasyon katının takip eden yüzeyden direkt olarak ayrılması şeklinde bir delaminasyon gözlenmemiştir. Örnek bir test edilmiş numune görüntüsü Şekil 4.8(b)' de paylaşılmıştır.

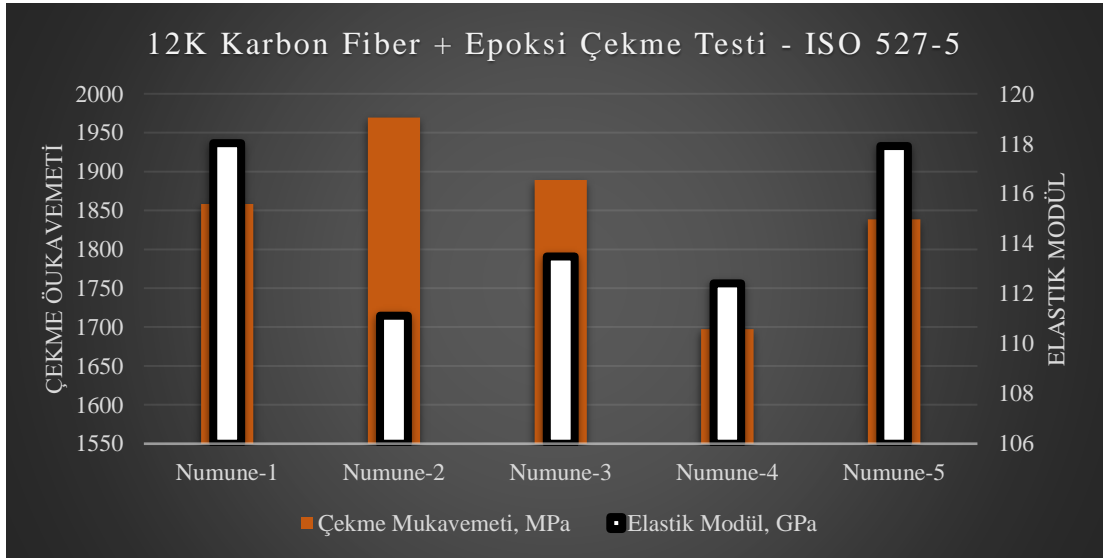
Şekil 4.11 incelendiğinde tüm yük eğrilerinin benzer bir eğime sahip olduğu ve hasarlanma kuvvetlerinin 30 kN civarında ve toplam uzama miktarının ise 6 mm mertebesine yerleştiği görülmüştür. PA6 numunelerinden farklı olarak uzama değerlerinin 5 mm – 6 mm aralığında olduğu görülebilir. Buna karşılık olarak ise her iki numune grubunun da N-mm grafikleri benzer eğriler vermektedir. Buradan yola çıkılarak epoksi esaslı numunelerde kırılma daha düşük bir kuvvet aralığında gerçekleşmiş olsa da çekme yükleri altında uzamalar dikkate alındığında, Young modülü değerlerinin az da olsa daha yüksek bir ortalama vermesi beklenebilir. Şekil 4.12' de verilen mukavemet- % uzama grafiği bu çıkarımı doğrulamaktadır.



**Şekil 4.12:** Numune tip – 2, Çekme Testi, Mukavemet, MPa- % Uzama grafiği

Şekil 4.12’de verilen mukavemet ve yüzde uzama değerleri incelendiğinde 1700 MPa – 2000 MPa aralığında ve uzamaların 2.3%- 2.5% bandında olduğu ham verilerden yapılan hesaplamalar ile gösterilmiştir.

Şekil 4.13’de ISO 527-5 standardına uygun olarak elde edilen Young modülü değerleri mukavemet sonuçlarıyla birlikte sütun grafikleri aracılığı ile paylaşılmıştır.



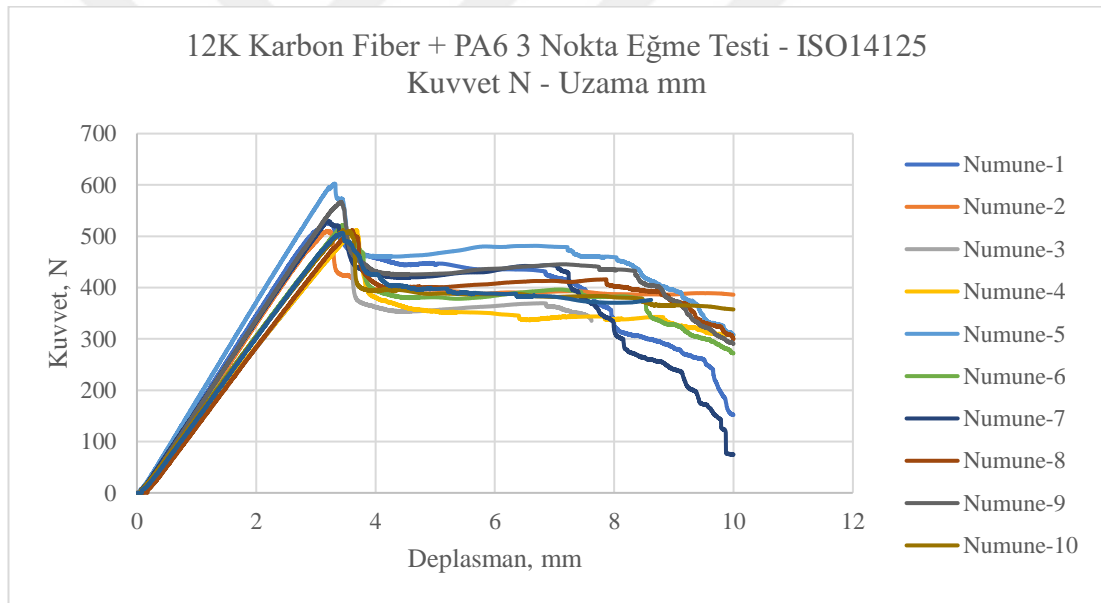
**Şekil 4.13:** Numune Tip – 2, Çekme Testi, Çekme Mukavemeti, MPa – Elastik Modül, GPa grafiği

Şekil 4.13 - beş farklı test numunesinden elde edilen modül değerleri beyaz barlar ile gösterilmiştir. Dağılımın 110 GPa – 120 GPa aralığında olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.5 Eğme Testi Sonuçları

##### 4.5.1 12K Karbon fiber + PA6 – eğme testi sonuçları

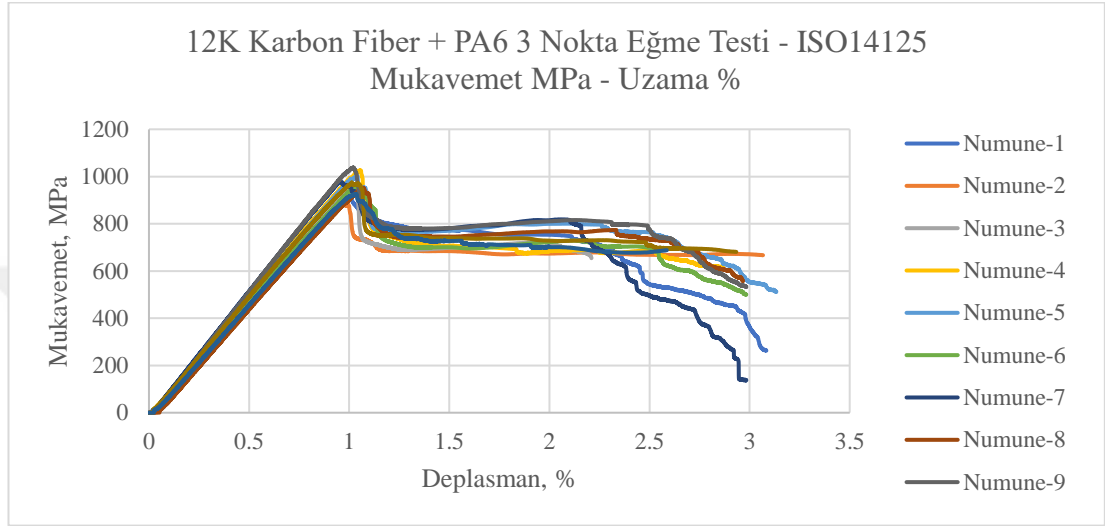
Çalışmanın ilk test grubu olan Numune Tip – 1, ISO 14125 test standardında tariflendiği gibi hazırlanan numuneler yöntemler adımıyla tariflenen ve bilgileri paylaşılan Shimadzu marka test ünitesinde test edilmiştir. Teste 9 adet numune tabii tutulmuş olup tamamında görülen hasarlanmanın değerlendirme kriterlerine uymasından dolayı tamamı raporlanmıştır. Test sonuçlarına göre farklı karakteristiklerin değerlendirilmesi için test sonrasında elde edilen ham veriler Excel programı aracılığıyla analiz edilerek aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. (Şekil 4.14)



Şekil 4.14: Numune Tip – 1, Eğme Testi Kuvvet, N - Deplasman, mm grafiği

3 nokta eğme testinde 2 mm'lik numune kesitine yük etmeye başladığında destekler arasında iki ana gerilme alanı oluşur. Kesitin yük ile ilk karşılaşan üst yüzeyi basma kuvveti, yükün ve deformasyonun projekte edildiği alt yüzeyi ise çekme kuvveti etki alanındadır. Kesitin simetri merkezi olan ortasında ise etken bileşke kuvvet sıfırdır. Test sırasında meydana gelen deplasman birim olarak kesit kalınlığına yaklaştığında kesitin her iki yüzeyindeki deformasyon oranlarında gittikçe farklılaşmaya başlar. Bu noktada termoplastik bir malzeme olan PA6'nın gösterdiği mikro deformasyonun kesitin tamamında bir hasarlanma gerçekleşmeden yük düşüşlerine sebep olması

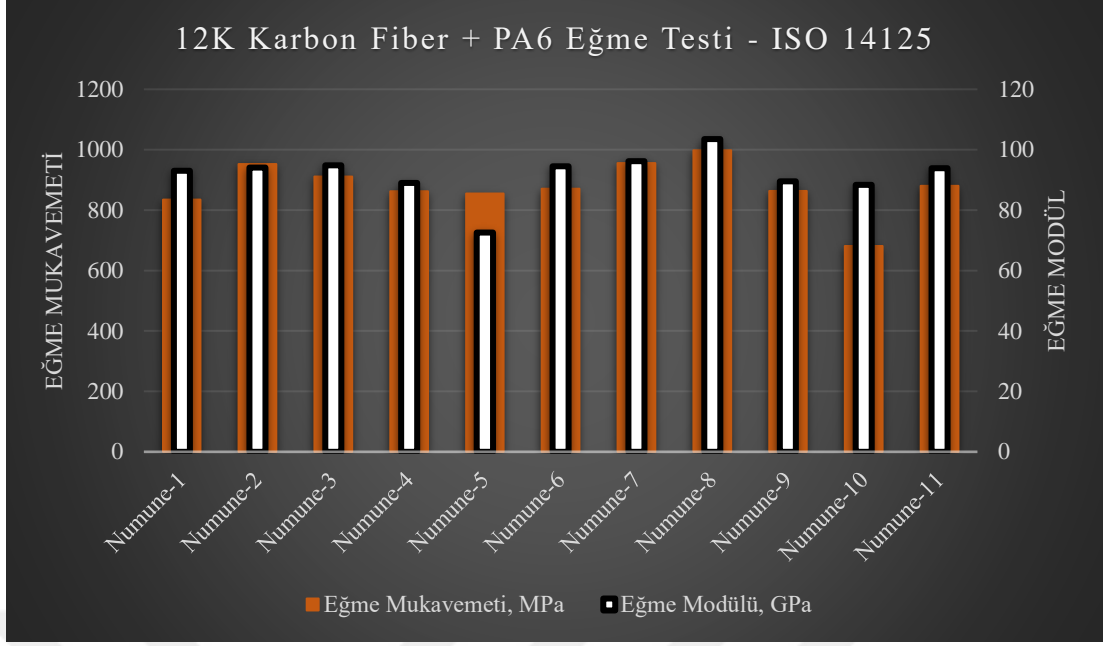
beklenebilir. Verilmiş olan kuvvet – deplasman (Şekil 4.14) ve mukavemet – deplasman (Şekil 4.15) eğrilerine bakıldığında belirli bir deplasman miktarından sonra ulaşılan maksimum değerlerden 15%'lik ani bir düşüş görülmüş fakat yük tamamen boşalmamıştır. Elde edilen bu sonuçlar hasarın basma kuvvetinin etken olduğu yüzeyde baskın bir şekilde gerçekleştiği fakat tüm numune kesitine etki etmedi görülebilmektedir.



**Şekil 4.15:** Numune Tip – 1, Eğme Testi Mukavemet, MPa-% Deplasman grafiği

Şekil 4.15’de verilen mukavemet – deplasman grafiğinden; eğme mukavemeti değerlerinin 800 MPa – 1000 MPa aralığında olduğu ve baskın hasarlanmanın 1%'lik bir deplasman sonrasında olduğu görülmektedir.

Şekil 4.16’da tüm test numuneleri için mukavemet ve modül değerleri sonuçları stün grafiği olarak paylaşılmıştır.

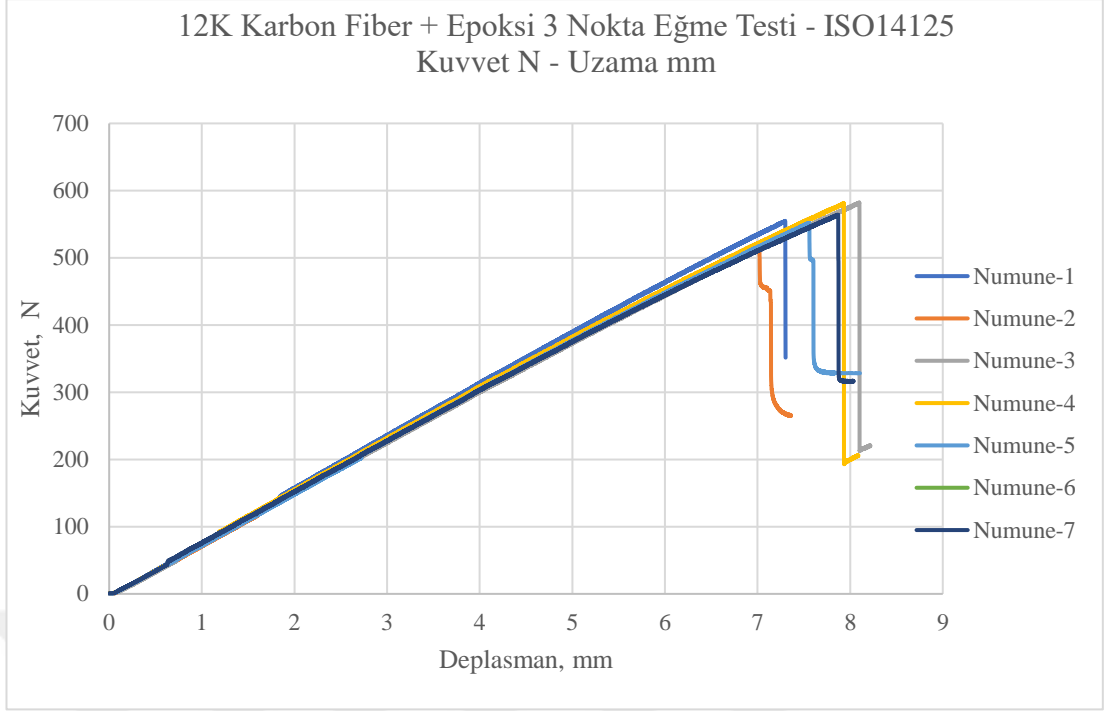


**Şekil 4.16:** Numune Tip – 1, Eğme Testi Mukavemet, MPa- Eğme Modülü, GPa

Yukarıdaki Şekil 4.16’ da verilen sütun grafiğinde eğme modülünün 75 GPa – 100 GPa arasında dağıldığı görülmektedir. İlk hasarlanmaların neredeyse tamamı 1%’lik deplasman seviyesinde tespit edilmiştir.

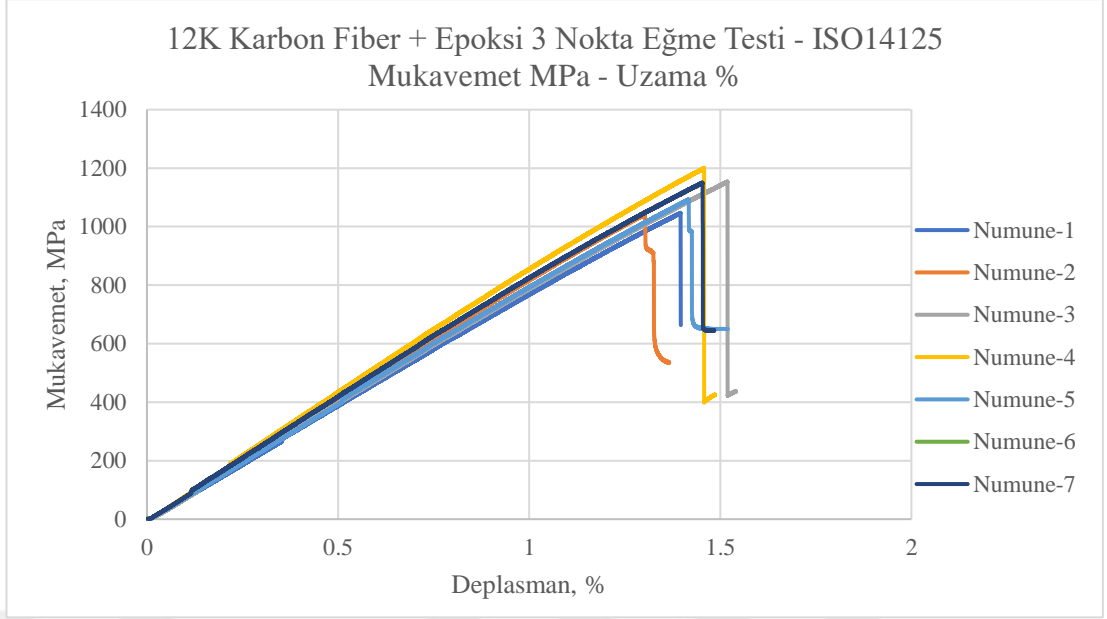
#### 4.5.2 12K Karbon fiber + epoksi – eğme testi sonuçları

Çalışmanın ikinci test grubu olan Numune Tip – 2, ISO 14125 test standardında tariflendiği gibi hazırlanan numuneler yöntemler adımımda tariflenen ve bilgileri paylaşılan Shimadzu marka test ünitesinde test edilmiştir. Teste 7 adet numune tabi tutulmuş olup tamamında görülen hasarlanmanın değerlendirme kriterlerine uymasından dolayı tamamı raporlanmıştır. Test sonuçlarına göre farklı karakteristiklerin değerlendirilmesi için test sonrasında elde edilen ham veriler Excel programı aracılığı ile analiz edilerek aşığıdaki grafikler elde edilmiştir (Şekil 4.17).



**Şekil 4.17:** Numune Tip – 2, Eğme Testi Kuvvet, N- Deplasman, mm grafiği

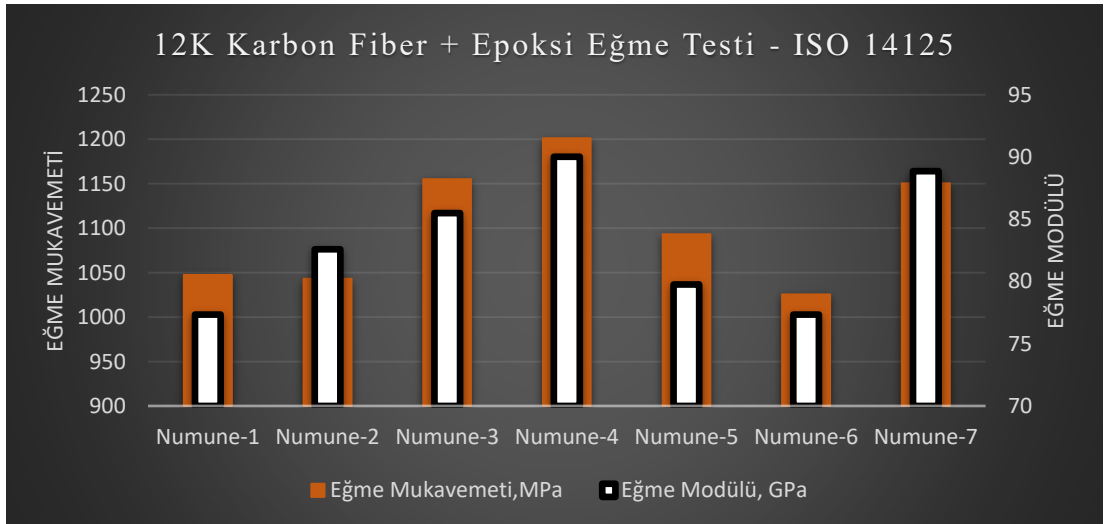
Karbon fiber takviyeli epoksi numunelerinde; PA6 esaslı numunelerden farklı olarak kuvvet – deplasman eğrisinde benzer kuvvet değerleri görülse de deplasman miktarlarının neredeyse 2 kat daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise daha önce açıklanan kuvvet – kesit ilişkisinde etkin olan yüzey gerilmelerine karşı daha homojen bir karşılık verilmiş olması belirtilebilir. Termoplastik sistemlerin aksine termoset matrisli bir yapıdan mikro deformasyonlar göstermesi beklenmemektedir, dolayısı ile de üst yüzeyden etki eden yüklenmenin kesitin alt yüzeyine – ve tamamına – daha uzun süreler boyunca projekte edilebildiği söylenebilir. Yine bu nedenle de hasarlanma öncesi oluşan maksimum kuvvet değerleri benzer bir eğriyle daha fazla deplasman gösterdiği için yine benzer bir aralıkta toplanmıştır. Ayrıca kesitte oluşan stresin daha uzun süre taşınması oluşan hasarlanmanın da daha katotropik olmasını sağlamış ve yük düşüşlerinde 60% - 65% oranları gözlenmiştir. Şekil 4.17’de ve Şekil 4.18 de yapılan test sonuçlarının deplasman miktarlarına göre kuvvet ve mukavemet ile olan ilişkileri paylaşılmıştır.



**Şekil 4.18:** Numune Tip – 2, Eğme Testi Mukavemet, MPa- % Deplasman grafiği

Verilen mukavemet – uzama grafiğinde görülebileceği gibi eğme dayanımı 1.5%'lik deplasman değeri göstererek 1000 MPa – 1200 MPa arasında bir dağılıma sahiptir.

Şekil 4.19' da verilen sütun grafiği incelendiğinde epoksi esaslı numunelerin 75 GPa – 90 GPa arasında bir dağılıma sahip olduğu görülebilir. Daha fazla deplasman göstererek yükün daha uzun süre taşınması sağlanmış olsa da elde edilen deformasyon miktarı daha fazla olduğundan maksimum eğme modül değeri PA6 esaslı numune grubundan yaklaşık.10 GPa daha düşüktür.



**Şekil 4.19:** Numune Tip – 2, Eğme Testi Mukavemet, MPa- Eğme Modülü, GPa

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

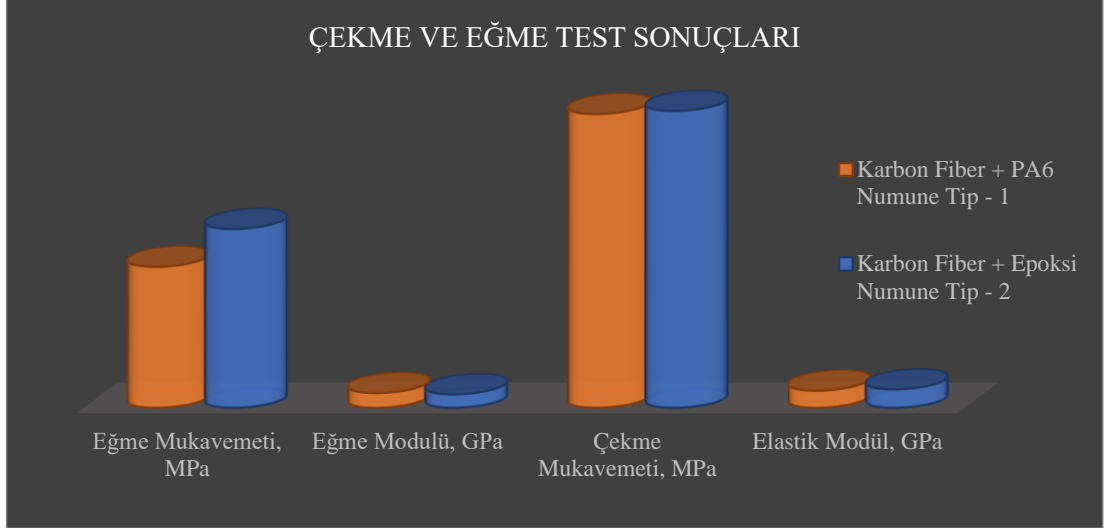
Bu çalışma kapsamında gün geçtikçe yaygınlaşan termoplastik matrisli sistemler ile mevcutta kullanılan termoset esaslı Kompozit yapıların yenilikçi bir proses yaklaşımıyla aynı koşullarda test edilerek karşılaştırılması ve ilerleyen süreçte yapılabilecek olan tasarım ve ürün geliştirme çalışmalarına bir temel sunulması amaçlanmıştır. Malzeme seçiminde gerek fiziksel gerek de mekanik özellikleriyle otomotiv endüstrisinin yapısal parçaların imalatında tercih ettiği yüksek performanslı ve hızlı proseslenebilir olan bir epoksi sistemi ile yine benzer karakteristiklere sahip olan PA6 yapısı karşılaştırılmış olup her iki sistem içinde karbon fiber takviyesi tercih edilmiştir.

Termoplastikler yüksek prosesleme sıcaklığı gerektirseler de oldukça kısa imalat sürelerine imkân vermekte ve bunu uygun sayılabilecek bir fiyat aralığında sağlamaktadırlar. Diğer yandan aynı proseslenme sürelerine yaklaşan yüksek performanslı hızlı kürlenebilir epoksi sistemleri maliyet dezavantajına sahip olsa da düşük proses sıcaklığı ve hızlı proses zamanlarını mümkün kılmaktadır.

Çalışma kapsamında tamamlanan testler ve sonuçları önceki bölümlerde detaylı olarak paylaşılmış olup aşağıdaki ortalama test sonuçları kullanılarak hazırlanmıştır. (Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1)

**Çizelge 5.1:** Ortalama test sonuçlarının karşılaştırılması

	Karbon Fiber + PA6 Numune Tip- 1		Karbon Fiber + Epoksi Numune Tip- 2	
	Değer	Standart Sapma	Değer	Standart Sapma
Eğme Mukavemeti, MPa	878.90	79.12	1114.77	62.55
Eğme Modülü, GPa	91.79	7.25	83.61	4.85
Çekme Mukavemeti, MPa	1831.58	56.83	1850.52	88.62
Elastik Modülü, GPa	106.44	3.71	114.59	2.86



**Şekil 5.1:** Eğme ve Çekme test sonuçlarının karşılaştırılması

Her iki malzeme grubu fiber dominant bir test olan çekme testlerinde benzer sonuçlar vermiş olsalar da uzama miktarlarından epoksi sisteminin daha gevrek ve deformasyona karşı daha dirençli olduğu görülebilmektedir.

Matris malzemelerinin kendi özelliklerinin çekme testine kıyasla daha ön planda olduğu eğme testlerinde iki farklı karakteristik yorumunu mümkün kılan çıktılar elde edilmiştir. Hem hasarlanan kesitler hem de elde edilen grafikler incelendiğinde termoplastiklerin açıkça daha fazla hasar toleransına sahip olduğu görülebilmektedir. Diğer yandan bu durum ulaşılan maksimum yük seviyesini düşürebilmektedir fakat buna uygun tasarımların önüne geçemeyeceği kadar ciddi bir fark mevcut olmadığı değerlendirilmektedir. Yine de maksimum yük/kuvvet kriterinin aranacağı dayanım esaslı tasarımlarda güvenlik faktörlerinin bir miktar daha yüksek seçilmesine sebep olabilir. Aynı zamanda da hasarlanma karakteristiğinden dolayı yapıya getirebileceği tokluk özellikleri de bir avantaj olarak değerlendirilmelidir. Diğer yandan epoksi esaslı numunelerde yüklenmeye karşı daha homojen bir kesit cevabı elde edilmiştir. Bu da yüklenmenin daha uzun süreler daha fazla deplasman ile karşılanabilmesini sağlamış olsa da hasarlanmanın çok daha şiddetli gerçekleşmesine sebep olmuştur.

## KAYNAKLAR

- [1] **Kaw, A.K.** (2006). *Mechanics of Composite Materials*, Florida: Taylor & Francis Group, LLC.
- [2] **Ono, M., Yamane, M., Tanoue, S., Uematsu, H., Yamashita, Y.** (2021). Mechanical Properties of Thermoplastic Composites Made of Commingled Carbon Fiber/Nylon Fiber. *Polymers*, 13, 3206.
- [3] **Gliesche, K., Hübner, T., Orawetz, H.** (2003). Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an “open-hole” tension plate from carbon/epoksi laminates, *Composites Science and Technology* 63 81–88.
- [4] **Mattheij, P., Glische, K., Feltin, D.** (2000). 3D reinforced stitched carbon/epoksi laminates made by tailored fibre placement”, *Composites: Part A Applied Science and Manufacturing* 31571–581.
- [5] **Aleksandrovich, N.V., Aleksandrovich, P.I., Sergeevich, B.S., Andreyevich, O.M., Igorevich, S.V.** (2021). TFP Technology As The Advanced Method Of Manufacture Of 3D Reinforced Preforms From Polymer Composite Materials, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education* Vol.12 No.5, 84-91.
- [6] **Spickenheuer, A., Scheffler, C., Bittrich L., Haase R., Weise D., Garray D., Heinrich, G.** (2017). Tailored Fiber Placement in Thermoplastic Composites, *Technologies for Lightweight Structures, Special issue: 3rd International MERGE Technologies Congerence (IMTC)*, 1(2), pp. 114–127.
- [7] **Thor, M., Sause, M.G.R., Hinterhölzl, R.** (2020). Mechanisms of Origin and Classification of Out-of-Plane Fiber Waviness in Composite Materials, *Journal of Composite Science*, 4, 130.
- [8] **El-Desouky, H.M., Saleh, M.N., Gautam, M., Han, G., Scaife, R.J., Potluri, P.** (2019). Tailored fibre placement of commingled carbon-thermoplastic fibres for notchinsensitive composites, *Composite Structures*, 214. pp. 348-358. ISSN 0263-8223.
- [9] **Koricho, E.G., Khemonko, A., Fristedt, T., Haq, M.** (2015). Innovative tailored fiber placement technique for enhanced damage resistance in notched composite laminate, *Composite Structure* 120 378-385.
- [10] **Uhlig, K., Spickenheuer, A., Bittrich, L., Heinrich, G.** (2013). Development Of A Highly Stressed Bladed Rotor Made Of A Cfrp Using The Tailored Fiber Placement Technology, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 49, No. 2, (Russian Original Vol. 49, No. 2).
- [11] **Hasan, M.M.B., Staiger, E., Ashir, M., Cherif, C.** (2015).Development of carbon fibre/polyamide 6,6 commingled hybrid yarn for textile-

reinforced thermoplastic composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015, Vol. 28(12) 1708–1724.

- [12] **Dubouloz-Monnet, F., Alberola, N.D., Mele, P.** (2006). Effects of Fiber Aggregates on the Transverse Mechanical Behavior of Commingled PP–Glass Fiber Composites, Wiley InterScience.
- [13] **Schneeberger, C., Wong, J.C.H., Ermanni, P.** (2017). Hyrid bicomponent fibres for thermoplastic composite preforms, Composites: Part A 103 69-73, Elsevier.
- [14] **Richter, E., Uhlig, K., Spickenheuera, A., Bittricha, L., Mader, E., Heinrich, G.** (2014). Thermoplastic Composite Parts Based On Online Spun Commingled Hybrid Yarns With Continuous Curvilinear Fibre Patterns, Eccm16 – 16th European Conference On Composite Materials, Spain.
- [15] **Prabhakaran, R.T.D., Toftegaard, H.** (2014). Environmental effect on the mechanical properties of commingled-yarn-based carbon fibre/polyamide 6 composites, Journal of Composite Materials, Vol. 48(21) 2551–2565.
- [16] **YAMAN, N., ÖKTEM, T., SEVENTEKİN, N.** (2007). Karbon Liflerinin Özellikleri Ve Kullanım Olanakları, Tekstil ve Konfeksiyon dergisi sayı 2, sayfa 90-95.
- [17] **Url-1** <[http://www.eng.uab.edu/epcl/b\\_fiber.htm#carbon](http://www.eng.uab.edu/epcl/b_fiber.htm#carbon)>, erişim tarihi 13.10.2022.
- [18] **Walsh P.J.** (2001). Carbon Fibers, ASM Handbook,, 21, 35-40.
- [19] **Url-2** <<https://teknoyapi.com.tr/tr/bloglar/karbon-elyaf-nedir-siniflandirma-ve-turleri-nelerdir>>, erişim tarihi 13.10.2022.
- [20] **Url-3** <<https://polymers.com.au/thermoplastics/>, >, erişim tarihi 13.10.2022.
- [21] **Baydemir, T.** (2020). Epoksi Reçine Teknolojileri, Tübitak Bilim Teknik Dergisi, Aralık.
- [22] **Li, B., Deleglise-Lagardere, M., Park, C.H., Lacrampe, M.F.** (2015). Analysis Of Intra-Yarn Impregnation In Commingled Yarn Thermoplastic Composites Consolidation Process, 20th International Conference on Composite Materials Copenhagen.
- [23] **ISO 527-5**, Determination of tensile properties of plastics.
- [24] **ISO14125**, Fibre-reinforced plastic composites — Determination of flexural properties.
- [25] **Url-4** <[http://www.hyosungadvancedmaterials.com/en/business/carbon\\_material.do](http://www.hyosungadvancedmaterials.com/en/business/carbon_material.do)>, erişim tarihi 13.10.2022.
- [26] **Url-5** <[https://chemicals.basf.com/global/en/Monomers/polyamide\\_intermediates/polyamide\\_for\\_extrusions.html](https://chemicals.basf.com/global/en/Monomers/polyamide_intermediates/polyamide_for_extrusions.html) >, erişim tarihi 13.10.2022.
- [27] **Url-6** <<https://www.hexion.com> >, erişim tarihi 13.10.2022.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Gökhan K.ÇOBAN

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 2010
- **Yüksek Lisans** : Bahçeşehir Üniversitesi, MBA, 2014
- **Yüksek Lisans** : Bursa Teknik Üniversitesi, , Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ABD – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli YL Programı, 2023

### MESLEKİ DENEYİM:

- **TAI – TUSAS Havacılık ve Uzay San. AS(2011-2018 )** – Uzaman Kompozit İmalat ve NDI Mühendisi
- **COATS Türkiye (2018 - ... )** – Arge Müdürü

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- K.Coban Gokhan and Kaboglu Cihan, “Mechanical Property Comparison of Continuous Carbon Fiber Reinforced Epoxy and Polyamide - 6 Matrix Composite Laminates Manufactured by Tailored Fiber Placement Technology,” International Research Journal of Advanced Engineering and Science, Volume 8, Issue 1, pp. 65-68, 2023. - <https://irjaes.com/volume-8-issue-1/>

### DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

1. US2020262107A1 : “Pre-Consolidation Of Thermoplastic Fiber Preforms And Method Of Making The Same”, Pub. Date: Aug. 2020
2. US Serial No. 63/290,204: “Strength Member of Pipe Reinforcement”,
3. Patent No: 2021/021010: “Composite Toe-Cap for Safety Workwear”