



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



**KARBON/ CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİT  
BORULARDA HASAR ANALİZİ**

**İbrahim Çağatay GÜNAY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

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

## TEZ KABUL VE ONAYI

İbrahim Çağatay GÜNAY tarafından hazırlanan “Karbon/Cam Elyaf Hibrit Kompozit Borularda Hasar Analizi” adlı tez çalışması 16/02/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

#### Danışman

Dr.Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

#### Üye

Doç.Dr. Murat MAYDA

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI  
FBE Müdürü

Bu tez çalışması **Bilimsel Araştırma Projeleri** birimi tarafından **191331003** nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

## **DECLARATION PAGE**

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

İbrahim Çağatay GÜNAY

16/02/2022

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## KARBON/ CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİT BORULARDA HASAR ANALİZİ

İbrahim Çağatay GÜNAY

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

2022, 78 Sayfa

Jüri

Dr.Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

Prof.Dr. Hüseyin ARIKAN

Doç.Dr. Murat MAYDA

Bu çalışmada kumaş sarım metodu ile imal edilen dairesel kesitli prepreg hibrit kompozit malzemelerin hasar analizi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Prepreg karbon elyaf (C) ve prepreg cam elyaf malzemelerin (G) CGC ve GCG sıralaması ile dizilimleri yapılmış olup aynı zaman da her dizilim için nanolu ve nanosuz formda 4 adet numune üretimi yapılmıştır. Yapılan numuneler uygun koşullar hazırlanarak düşük hızlı darbe deneyine tabi tutulmuştur. Darbe deneyinde 5, 10 ve 15J kuvvet etki ettirilerek veriler elde edilmiştir. Yapılan deney neticesinde malzemenin ilgili parametreleri hesaplanmış kuvvet- zaman, kuvvet- deplasman, enerji- zaman ve enerji- deplasman yorumları yapılmıştır.

Sonuç olarak CGC ve GCG diziliminde bariz şekilde CGC diziliminin daha kararlı bir yapıya sahip olduğu, ayrıca artan darbe enerjisi değerlerinde matris çatlaması ile başlayan hasarların fiber kırığı ve tabakasal ayrılma ile sonuçlandığı görülmüştür. GCG malzeme daha düşük mukavemet değerlerine sahip olduğundan darbe hasarları fiber kırıkları ile başlamıştır. Her iki dizilimin nanolu formları nanosuz formlarına göre daha öngörülebilir hasar mekanizmalarına sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** Kumaş Sarım, Hibrit, Nanotüp, Prepreg Cam Elyaf, Prepreg Karbon Elyaf

## **ABSTRACT**

## **MS THESIS**

### **DAMAGE ANALYSIS OF CARBON/ GLASS FIBER HYBRID COMPOSITE PIPES**

**İbrahim Çağatay GÜNAY**

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

**Advisor: Asst. Prof. Mehmet KAYRICI  
2022, 78 Pages**

**Jury**

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

**Prof.Dr. Hüseyin ARIKAN**

**Assoc.Prof. Dr. Murat MAYDA**

In this study, damage analysis of circular cross-section prepreg hybrid composite materials manufactured by fabric winding method was carried out.

Prepreg carbon fiber (C) and prepreg glass fiber materials (G) were sequenced with CGC and GCG rankings and at the same time 4 samples were produced in nano and nano-free form for each sequence. The samples were prepared under favorable conditions and subjected to a low-speed impact test. In the impact experiment, 5, 10 and 15J forces were affected and the data was obtained. As a result of the experiment, the relevant parameters of the material were calculated force-time, force-displacement, energy- time and energy-displacement interpretations were made.

As a result, it was observed that CGC and GCG sequencing clearly have a more stable structure, and damages that begin with matrix cracking at increased impact energy values result in fiber fracture and stratar separation. Since the GCG material has lower strength values, impact damages started with fiber fractures. Nano-forms of both arrays have more predictable damage mechanisms than nano-free forms.

**Keywords:** Fabric Winding, Hybrid, Nanotube, Prepreg Glass Fiber, Prepreg Carbon Fiber

## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanmasında büyük desteği olan saygı değer hocam Dr. Öğrt. Üyesi Mehmet KAYIRICI'ya, imkânlarını bizim için seferber eden kıymetli hocam Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN'a ve Doç.Dr. Murat MAYDA'ya ayrıca tez çalışmamda yardımcı olan meslektaşım Ahmet Faruk DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yaptığım çalışmada her zaman desteğini esirgemeyen kıymetli eşim ve buralara gelmem de en büyük destekçim değerli aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim Çağatay GÜNAY  
KONYA-2022

## İÇİNDEKİLER

|                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ÖZET .....</b>                                               | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                            | <b>v</b>   |
| <b>İÇİNDEKİLER .....</b>                                        | <b>vii</b> |
| <b>KISALTMALAR .....</b>                                        | <b>ix</b>  |
| <b>TABLolar DİZİNİ .....</b>                                    | <b>x</b>   |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>                                     | <b>xi</b>  |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                           | <b>1</b>   |
| 1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi.....                       | 1          |
| 1.2. Kompozit Malzeme ve Avantaj-Dezavantajlar .....            | 2          |
| 1.3. Kompozit Malzemeleri Oluşturan Bileşenler.....             | 3          |
| 1.3.1. Matris malzemeleri .....                                 | 3          |
| 1.3.2. Takviye malzemeleri ve özellikleri.....                  | 4          |
| 1.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....               | 6          |
| 1.4.1. Takviye fazına göre kompozit malzemeler.....             | 6          |
| 1.4.2. Matris fazına göre kompozit malzemeler .....             | 9          |
| 1.4.3. Hibrit-nano kompozit malzemeler .....                    | 13         |
| 1.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri .....              | 13         |
| 1.5.1. Elyaf takviyeli kompozit malzeme üretim yöntemleri ..... | 13         |
| 1.6. Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı.....               | 18         |
| 1.7. Kompozit Malzemelerin Hasar Çeşitleri.....                 | 19         |
| <b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>                              | <b>21</b>  |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                               | <b>27</b>  |
| 3.1. Materyal .....                                             | 27         |
| 3.1.1. Prepreg malzeme özellikleri .....                        | 27         |
| 3.1.2. Cam elyaf prepreg malzeme özellikleri .....              | 27         |
| 3.1.3. Karbon elyaf malzeme özellikleri.....                    | 28         |
| 3.1.4. Nano teknoloji ve MWCNT .....                            | 29         |
| 3.1.5. Otoklav Reçinesi.....                                    | 30         |
| 3.1.6. Silindirik kalıp .....                                   | 31         |
| 3.2. Yöntem.....                                                | 31         |
| 3.2.1. Hibrit kompozit malzeme üretimi .....                    | 32         |
| 3.2.2. Nano reçine kombinasyonu (Dispersiyon) .....             | 33         |
| 3.2.3. Nano takviyeli hibrit kumaş sarım tekniği.....           | 34         |
| 3.2.4. Otoklav prosedürü.....                                   | 34         |
| 3.2.5. Kütleme mekanizması .....                                | 35         |
| <b>4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....</b>                     | <b>36</b>  |

|                                                                   |                                         |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 4.1. Deney Malzemelerinin Hazırlanması.....                       | 36                                      |
| 4.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi .....                               | 36                                      |
| 4.2.1. Numunenin hasar davranışına darbe enerjisinin etkisi ..... | 37                                      |
| 4.3. Hasar Tiplerinin İncelenmesi .....                           | 50                                      |
| 4.3.1. Nanolu CGC dizilimi.....                                   | 50                                      |
| 4.3.2. Nanosuz CGC dizilimi .....                                 | 51                                      |
| 4.3.3. Nanolu GCG dizilimi .....                                  | 53                                      |
| 4.3.4. Nanosuz GCG dizilimi .....                                 | 56                                      |
| <b>5. SONUÇLAR.....</b>                                           | <b>58</b>                               |
| <b>6. KAYNAKLAR .....</b>                                         | <b>62</b>                               |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                             | <b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b> |



## KISALTMALAR

|       |                                  |
|-------|----------------------------------|
| CFRP  | : Karbon fiber takviyeli polimer |
| CGC   | : Karbon- Cam- Karbon dizilimi   |
| CNT   | : Karbon nanotüp                 |
| DWCNT | : Çift duvarlı karbon nanotüp    |
| GCG   | : Cam- Karbon- Cam dizilimi      |
| GRP   | : Cam takviyeli polimer          |
| MWCNT | : Çok duvarlı karbon nanotüp     |
| PAN   | : Poliakrilonitril               |
| PVA   | : Polivinil alkol                |
| SWCNT | : Tek duvarlı karbon nanotüp     |

## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.</b> Avantaj ve dezavantaj mukayesesi .....                                   | 3  |
| <b>Tablo 2.</b> Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri (Vatangül, 2008) ..... | 5  |
| <b>Tablo 3.</b> Cam elyaf malzeme teknik özellikleri .....                               | 27 |
| <b>Tablo 4.</b> Karbon elyaf malzeme teknik özellikleri.....                             | 28 |
| <b>Tablo 5.</b> CNT teknik özellikleri .....                                             | 30 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Takviye fazına göre kompozit malzemeler (Kaya, 2016) ..... | 7  |
| Şekil 2. Prepreg malzeme üretim şeması (Autar K.Kaw).....           | 8  |
| Şekil 3. El ile yatırma yöntemi safhası (Durgun, 2021) .....        | 14 |
| Şekil 4. Püskürtme yöntemi safhası (Şaşmaz, 2022).....              | 15 |
| Şekil 5. Devamlı levha üretim yöntemi safhası (Akyüz, 2017).....    | 15 |
| Şekil 6. Profil çekme üretim yöntemi safhası (Akyüz, 2017) .....    | 16 |
| Şekil 7. Vakum torbası yöntemi (Beşergil, 2021) .....               | 17 |
| Şekil 8. Otoklav yöntemi (Beşergil, 2021) .....                     | 18 |
| Şekil 9. Cam elyaf malzeme .....                                    | 28 |
| Şekil 10. Karbon elyaf malzeme.....                                 | 29 |
| Şekil 11. Reçine .....                                              | 30 |
| Şekil 12. Silindirik kalıp.....                                     | 31 |
| Şekil 13. CGC formu dizilimi.....                                   | 32 |
| Şekil 14. GCG formu dizilimi .....                                  | 32 |
| Şekil 15. Özel form karıştırıcı uç.....                             | 33 |
| Şekil 16. Otoklav cihazı.....                                       | 34 |
| Şekil 17. Taşlanmış deney boruları .....                            | 36 |
| Şekil 18. Düşük hızlı darbe deneyi cihazı .....                     | 37 |
| Şekil 19. 5J ile yapılan test grafikleri .....                      | 38 |
| Şekil 20. 10J ile yapılan test grafikleri .....                     | 39 |
| Şekil 21. 15J ile yapılan test grafikleri .....                     | 40 |
| Şekil 22. 5J ile yapılan test grafikleri .....                      | 41 |
| Şekil 23. 10J ile yapılan test grafikleri .....                     | 42 |
| Şekil 24. 15J ile yapılan test grafikleri .....                     | 43 |
| Şekil 25. 5J ile yapılan test grafikleri .....                      | 44 |
| Şekil 26. 10J ile yapılan test grafikleri .....                     | 45 |
| Şekil 27. 15J ile yapılan test grafikleri .....                     | 46 |
| Şekil 28. 5J ile yapılan test grafikleri .....                      | 47 |
| Şekil 29. 10J ile yapılan test grafikleri .....                     | 48 |
| Şekil 30. 15J ile yapılan test grafikleri .....                     | 49 |
| Şekil 31. 5J nanolu CGC dizilimi .....                              | 50 |
| Şekil 32. 10J nanolu CGC dizilimi .....                             | 50 |

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 33.</b> 15J nanolu CGC dizilimi.....   | 51 |
| <b>Şekil 34.</b> 5J nanosuz CGC dizilimi.....   | 52 |
| <b>Şekil 35.</b> 10J nanosuz CGC dizilimi.....  | 52 |
| <b>Şekil 36.</b> 15J nanosuz CGC dizilimi.....  | 53 |
| <b>Şekil 37.</b> 5J nanolu GCG dizilimi.....    | 54 |
| <b>Şekil 38.</b> 10J nanolu GCG dizilimi.....   | 54 |
| <b>Şekil 39.</b> 15J nanolu GCG dizilimi.....   | 55 |
| <b>Şekil 40.</b> 5J nanosuz GCG dizilimi .....  | 56 |
| <b>Şekil 41.</b> 10J nanosuz GCG dizilimi ..... | 56 |
| <b>Şekil 42.</b> 15J nanosuz GCG dizilimi.....  | 57 |



## 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, endüstride oluşan yenilikler ve artan ihtiyaçları karşılamak amacı ile önemli bir yere sahiptir. Ülkemizin gelecek vizyonu için önemli olan savunma, uzay teknolojileri, uçak, otomotiv sektörü için yapılan çalışmalarda daha iyi özelliklere sahip malzeme arayışına girilmiştir. Tasarımcılar bu özelliklere sahip malzeme arayışlarında kompozit malzemelere yönelmiştir.

Kimyasal bileşenleri birbirinden farklı iki ya da daha fazla malzemenin ve makro düzeyde ölçü aralıklarında birleştirilmesiyle oluşan yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler, özgül mukavemet, özgül ağırlık ve korozyon gibi mekanik ve kimyasal özellikleri dolayısıyla konvansiyonel malzemelerden üstündür.

### 1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Kompozit malzemelerin tarihte ilk kullanımları, Mısırlıların güçlü ve dayanıklı binalar oluşturmak için çamur ve saman karışımını kullandıkları milattan önceki yıllara dayanmaktadır. Daha sonra ise milattan sonra 1200 yılında Moğollar yayı icat ederek kompozit alanındaki çalışmalarına devam etmiştir. 1900'lerin başına kadar bitkisel ve hayvansal reçineler kullanılırken 20.yy başlarından itibaren ise vinil, polistiren, fenolik ve polyester gibi sentetik malzemeler doğadan elde edilenlere göre daha iyi performans göstermiştir. Bu çalışmaların kronolojisinde 1935 yılında Owens Corning, ilk cam elyaf fiberglası tanıtarak hafif ve güçlü bir malzeme olduğunu belirtti. Söz konusu alanların bir diğeri ise 1946 yılında ilk kompozit ticari tekne gövdesi tanıtılarak kullanım alanlarına bir yenisi eklenmiş oldu. 1975 yıllarında kompozit endüstrisindeki gelişmelerin artmasıyla daha iyi reçine ve takviye malzemeleri üretilmiştir. DuPont, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek yoğunluğu ve hafifliği nedeniyle vücut zırhında tercih edilen ürün haline gelen Kevlar olarak bilinen bir aramid elyaf geliştirdi. Bu gelişmelerle birlikte karbon elyaf malzemelerinde önü açıldı ve çelikten yapılan parçaların yerini aldı. Günümüzde savunma, uzay teknolojileri, otomotiv gibi sektörlerde yer almasının yanında rüzgâr türbinlerinin kanatları için yapılan çalışmalar devam etmektedir.

## 1.2. Kompozit Malzeme ve Avantaj-Dezavantajlar

Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla farklı özellikteki malzemenin, farklı ve daha işlevsel özellikler veren yeni bir malzeme oluşması için makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak isimlendirilir.

Kompozit malzemeler geçmiş tarihsel uygulamalara göre daha gelişmiş ve istenen her özellikte malzemelere göre uygulama miktarı artmıştır. Kompozit malzemeleri diğer malzemelerden ayıran belirgin özelliklerin başında sonsuz sayıda kombine edilerek oluşturulması gösterilmektedir. Kompozit malzemeler aynı zamanda teknolojik gelişmeler sayesinde daha ekonomik olduğu görülmektedir.

Düşük ağırlık, yüksek mukavemet, korozyon direnci, sertlik ve darbe dayanımı gibi temel özellikleri gösteren kompozit malzemeler kullanım arttıkça bazı özelliklerin daha da iyileştirilmesi beklenmektedir. Bu özellikler;

- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Elektrik iletkenliği
- Isıl iletkenlik

Kompozit malzemelerin dayanıklı malzeme türü olan metal sınıfı malzemelerden farklı yönleri bulunmaktadır. Bunlardan en önemli özellikler kompozit malzemelerin absorbe yani titreşim sönümleme özelliği bulunmaktadır. Yorulma dirençleri metal katkılı malzemelere göre daha yüksektir. Özgül mukavemet ve özgül modül oranları çok yüksektir.

Söz konusu kompozit malzemelerin kullanım alanında karşılaşılan avantajları ve dezavantajları Tablo 1’de verilmiştir. Bunlar,

**Tablo 1.** Avantaj ve dezavantaj mukayesesi

| <b>AVANTAJLAR</b>              | <b>DEZAVANTAJLAR</b>                                                   |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Yüksek mukavemetlidir          | Üretimi pahalıdır.                                                     |
| Ağırlık olarak hafiftir        | Farklı doğrultularda farklı özellikler göstermektedir.                 |
| Yapıda aşınma direnci fazladır |                                                                        |
| Korozyon direnci yüksektir     | Uygulanan prosesler (delme, kesme vb.) liflerde hasara yol açmaktadır. |
| Yorulma dayanımı yüksektir     | Hava etkenleri malzemenin yorulma ömrünü etkiler                       |
| Isıya ve ateşe dayanıklıdır.   |                                                                        |

### 1.3. Kompozit Malzemeleri Oluşturan Bileşenler

Kompozit malzemeleri oluşturan bileşenler fiberler ve reçineler olarak ikiye ayrılmaktadır.

#### 1.3.1. Matris malzemeleri

Kompozit malzemeler ile matris malzemenin mekanik özellikleri ile ilişkilidir. Fiber/matris uyumu ile üretilen ürünler kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerdir. Matris malzemesi elyaf demetinin üzerinde yükün dağılımını sağlamada önemli rol oynamaktadır.

Matris malzemeleri elyaflara göre daha zayıf malzemeler olup tasarım parametrelerinde dikkat edilmesi gerekmektedir.

Elyaf yönlenmeleri yapının mukavemetini belirleyici özelliklerden biridir. Çünkü polimer matrisli kompozit malzemeler elyaf yönlerinde çok yüksek mukavemete sahiptir.

#### 1.3.1.1. Reçine ve özellikleri

##### 1.3.1.1.1. Epoksi reçineler

Bisfenol A ile epiklorohidrin reaksiyon ürünü olup belirli bir sıcaklık değerinde sertleşir ve plastik görünümünü almaktadır. Depolama olarak oda şartlarında 24 ay dayanmaktadır. Isı ve kimyasal dirençleri yüksektir.

#### 1.3.1.1.2. Polyester

Dibazik asitlerle polialkollerin reaksiyonunda elde edilmektedir. Katı olan türleri darbelere karşı yüksek dayanım göstermektedir.

#### 1.3.1.1.3. Üretan reçineler

İzosiyanatla poliol maddesinin oda sıcaklığında polimerizasyon işlemi ile elde edilmektedir. Daha çok köpük, lastik gibi malzemelerin yapımında kullanılır.

#### 1.3.1.1.4. Fenolik reçineler

Fenolik reçineler, sert ve dayanıklı yapılardır. Kırılmaya karşı dayanımı düşük ve erimeyen yapıları vardır. Kimyasal reaksiyon sıcaklığı 120 – 250 °C dolaylarında molekül yapısına göre farklılık göstermektedir. Bununla birlikte bazı Fenolik reçine cinsleri (Fenolik eter reçineleri) daha yüksek sıcaklıklara (~300 °C) kadar dayanıklı olabilmektedirler. (Wolfgang, 2004)

### 1.3.2. Takviye malzemeleri ve özellikleri

Kompozit malzeme yapısında polimer matrisli malzemelerde bulunan elyaf takviyeler mukavemet elemanıdır. Metal ve seramik matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak oksit ve nitrür tabanlı takviye elemanları kullanılmaktadır. Yoğunlukları çoğunlukla düşük olan elyaf malzemeler, yüksek elastisite modülüne ve sertliğe sahiptir. Elyafların tercih edilme nedenleri ise;

- Çap olarak en düşük boyutlarda üretilebilmeleri
- Elastisite modülünün yüksek olması
- Yüklere karşı dirençli olması

#### 1.3.2.1. Cam elyaflar

Cam elyaf malzemeler birçok tipte imal edilebilmektedir. Amorf bir malzeme olan cam polimerik yapıdadır. Cam elyaf fiberlerin bazı özellikleri ise;

- Korozyona oldukça dayanıklıdır.
- Hava şartlarından etkilenmezler.
- Şekil bozulması görülmez darbelere karşı etkilidir.
- Hafif bir malzemedir.
- Uzun ömürlü ve dayanıklıdır.
- Elektrik iletkenliği yoktur.

Cam elyaf malzemelere ait mekanik özellikler ve bileşimleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri (Vatangül, 2008)

| ÖZELLİKLER                          | CAM TİPİ |        |        |        |
|-------------------------------------|----------|--------|--------|--------|
|                                     | A        | C      | E      | S      |
| Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2.50     | 2.49   | 2.54   | 2.48   |
| Elastik Modül (GPa)                 | -        | 69.0   | 72.4   | 85.5   |
| Çekme Mukavemeti (MPa)              | 3033.0   | 3033.0 | 3448.0 | 4585.0 |
| Isıl Genleşme Katsayısı             | 8.6      | 7.2    | 5.0    | 5.6    |
| Ergime Sıcaklığı (°C)               | 727.0    | 749.0  | 841.0  | 970.0  |

**Tabloda özellikleri verilen cam çeşitleri;**

- A camı alkali camı olarak adlandırılır.
- C camı korozyon camı olarak adlandırılmaktadır.
- E camı elektrik camı olarak adlandırılmaktadır.
- S camı ise mukavemet camı olarak adlandırılır.

### 1.3.2.2.Karbon elyaflar

Karbon kumaş kompozitler genellikle zift veya poliakrilonitril (PAN) malzemeden elde edilmektedir. PAN malzemeden üretilen karbon elyaf malzemeler daha sağlam ve ağırlıkça daha hafiftir. Dört aşamada dönüştürülen karbon elyaflar sırasıyla: oksidasyon, karbonizasyon, yüzey iyileştirmesi ve kaplama ile elde edilmektedir.

Karbon elyaflar özgül mukavemet oranı çok yüksek malzemelerdir. Yüksek mukavemetinin yanı sıra titreşim sönmüleme ve korozyon direnci iyidir. Ancak avantajlarının yanında her üretimin aynı olamaması farklı yapılarda karbon malzeme oluşmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda kompozit malzeme üretiminde hava kabarcığı bulunması malzemenin yapısını etkilemektedir. Kompozit malzemelerin üretim parametrelerinin standardize edilememesi en büyük dezavantajdır.

Karbon elyaf malzemeler, çeşitli matrisler ve epoksi reçineler ile birlikte kullanılmaktadır. Çok yüksek derecelerde üretiliyor olmaları sebebi ile alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılabilir.

### **1.3.2.3.Aramid elyaflar**

Aramid, aromatik polyamidin kısaltılmış halidir. Aramid elyaflar piyasada daha çok ticari isimleri Kevlar (DuPont) ve Twaron (Akzo Nobel) olarak bilinmektedir. Aramid elyaflar cam elyaflara göre %35-40 daha hafif malzemelerdir. Yüksek çekme dayanımı, darbe dayanımı, aşınma dayanımı gibi yüksek mukavemet özellikleri yanında UV ışınlarına karşı bozulma dezavantajları bulunmaktadır.

### **1.3.2.4.Boron elyaflar**

Boron elyafı, bor elementinin kimyasal buharının ince yapıdaki tungsten teli üzerinde sıvı hale geçirilerek biriktirilmesi ile elde edilmektedir. Piyasada şerit halinde bulunmaktadır.

### **1.3.2.5.Silisyum karbür elyaflar**

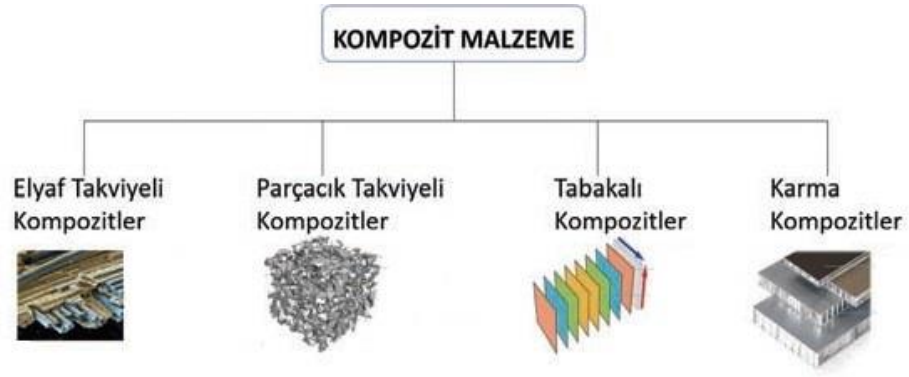
Bor gibi silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerinde kaplanması ile üretilmektedir. Yüksek sıcak ortamlarda bor elyaflardan daha iyi özellik göstermektedir.

## **1.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması**

Kompozit malzemeler ana yapı olarak yüksek dayanım ve elastiklik modülüne sahip takviye elemanı ile birleştirici dolgu gibi yapısal bileşenlerden oluşmaktadır. Kompozit malzeme bileşenlerinden matris ise gelen yükün takviye elemanına dağıtılmasını sağlar ve malzemeyi dış etkilere korumaktadır.

### **1.4.1. Takviye fazına göre kompozit malzemeler**

Takviye fazına göre kompozit malzemeler 4 başlık altında toplanmış olup bunlar Şekil 1’de verilmiştir.



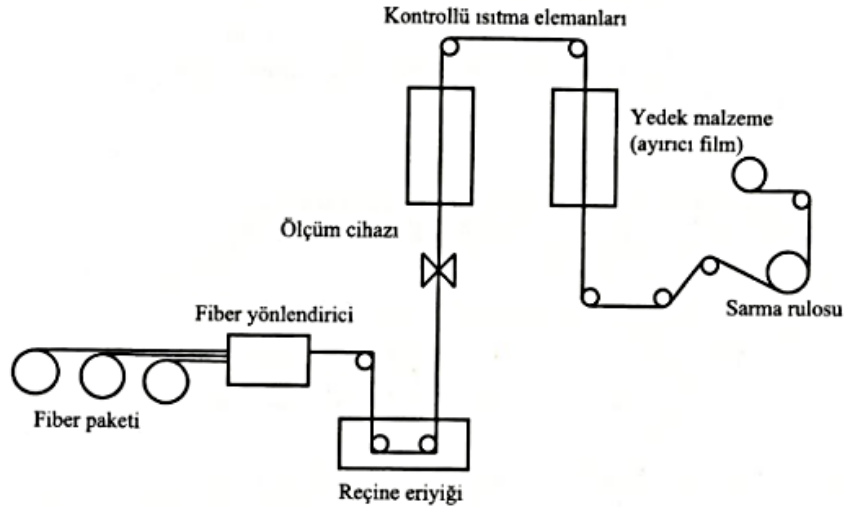
Şekil 1. Takviye fazına göre kompozit malzemeler (Kaya, 2016)

#### 1.4.1.1.Elyaf (fiber) takviyeli kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler, polimer matrisli kompozit malzemeler olarak bilinmektedir. Yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahip olan fiber ile daha düşük mukavemete sahip matrisin birleşmesiyle meydana gelir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin içyapı kusurları az olup fiber eksenine boyunca dizilmektedir (Gemi, 2004). Bahsi geçen özellikler elyaf takviyeli kompozit malzemelerin diğer kompozit malzemelere göre dayanımı yüksek ve sert olduğunu göstermektedir. Aynı eksen boyunca dizilmesi basma kuvveti uygulandığı takdirde burkulma dayanımını göstermektedir.

Elyafın matris içerisindeki dizilimi kompozit malzemenin mukavemetini etkileyen önemli unsurlardan biridir. Uzun elyafın matris içerisinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaf doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda düşük mukavemet elde edilmektedir (Koruvatan, 2008).

Pre-impregnated kısaca prepreg elyaf malzemelerin reçine emdirilmiş haline verilmiş isimdir. Prepreg elyaf malzemeler otoklav yöntemi ile üretilse de vakum torbalama veya fırınlama da yapılarak elde edilmektedir. Prepreg malzeme üretim aşaması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Prepreg malzeme üretim şeması (Autar K.Kaw)

Prepreg kumaşlarla yapılan üretimler diğer türlerine göre daha pratik ve standart kalitedir. Kompozit malzemelerin en önemli dezavantajı olan üretimde standart kalitenin yakalanmaması olup prepreg malzemeler ile mümkün hale gelmiştir. Prepreg yöntemi sayesinde reçine verme işlemi önceden kumaşa yapıldığı için olası aksiliklerin önüne geçilmektedir. Prepreg malzemelerin avantajlarının yanında soğuk zincir koşulları gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır.

#### 1.4.1.2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Bir veya iki boyutlu makroskobik parçaların veya boyutsuz olarak bilinen mikroskobik parçaların birleştirilmesiyle elde edilir. Bu partiküller metalik veya metalik olmayan malzemelerde kullanılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozitler dayanım iyileştirmekten daha çok alışılmışın dışında yeni özellikler elde etmek için kullanılmıştır. Parçacık takviyeli kompozit malzemelere en iyi örnek kumun çimento ve su ile karışması verilebilir.

Parçacık takviyeli olan kompozit malzemeler döküm yolu ile de üretilmektedir. Ancak bu yöntemle üretilen malzemelerde parçacık ilave edildiğinde tozları karıştırmakta güçlük çekilmektedir. Bu tip kompozitlerde artan takviye elemanı ilavesi ile birlikte yapı içerisinde porozite vb. hatalar artmaktadır. Dolayısı ile haddeleme gibi ikinci bir işlemde uygulanabilmektedir. Bütün bunlara rağmen döküm metodu ile yapılan bir kompozitin dayanımı, takviye elemanının matris içerisinde homojen dağılmaması ve tane büyüklüğü etkisi nedeniyle toz metalürji metodu ile

yapılan kompozitten daha düşüktür. Parçacık takviyeli kompozitin özellikleri, kompoziti oluşturan bileşenlerin özelliklerine ve oranlarına bağlıdır (Cabioğlu, 2012).

#### **1.4.1.3.Tabakalı kompozit malzemeler**

İki veya daha fazla birbirinden farklı malzemenin tabakalama yolu ile birbirlerine yapıştırılmasıyla elde edilen kompozit malzemeler tabakalı kompozitlerdir. Farklı şekillerde üretilen kompozitlere, metal üzerine uygulanan metal, organik veya seramik kaplama, cam- plastik- cam tabakalar, polimer matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemeler örnek olarak verilebilir.

Tabakalı kompozit malzemelerin yapısında en az iki farklı faz bulunmaktadır. Bu fazlardan biri kompozit malzemeye özelliklerini kazandıran sürekli faz ve sürekli fazı oluşturan tabakaları bir arada tutan bağlayıcı fazdır. Bu şekilde oluşturulan kompozit malzemelere teflon ve kauçuk kaplı metalik levhaları örnek verebiliriz.

Tabakalama yöntemiyle üretilen kompozit malzemelere; yüksek dayanıklılık, mukavemet, düşük ağırlık ve korozyon direnci gibi iyileştirmelere etkisi olmuştur.

#### **1.4.1.4.Karma (Hibrit) kompozit malzemeler**

Kompozit yapıda iki ya da daha fazla elyaf çeşidinin bulunması mümkün olabilir. Bu kompozitlere karma kompozitler denir. Polimer matrisli kompozitlerdir. Hibrit kompozitlerin oluşumuna örnek olarak kevlar malzeme tok bir elyaf olup basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise gevrek davranış göstermekte olup daha maliyetli ve basma yönünde mukavemetli elyaf türüdür. Bu iki elyafın kompozit yapıda bir arada bulunması ile elde edilen hibrit kompozitin tokluğu grafit kompozitten daha iyi, aynı zamanda maliyeti daha düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyafı kompozitten daha yüksek olmaktadır (Cabioğlu, 2012).

#### **1.4.2. Matris fazına göre kompozit malzemeler**

Matrisler polimerler, metaller ve seramik malzemelerden oluşmaktadır. Polimer matrislerin içinde yaygın olarak bilinen ve kullanılan reçine olarakta isimlendirilen malzemeler polimerlerdir. Metal matrisler yoğunluğu düşük olup genellikle alüminyum ve titanyumdan oluşmaktadır. Seramik matrisler ise alümina ve silisyum karbürlerdir.

#### **1.4.2.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler**

Polimer malzemeler liflerle pekiştirilerek polimer kompozitler elde edilmektedir. Maliyetlerinin düşük olmasından dolayı endüstriyel alanda daha çok kullanım göstermektedir. Pekiştirici malzeme olarak karbon, cam, aramid, ve boron lifleri kullanılmaktadır.

Polimer kompozitlerde mukavemet değeri, kullanılan liflerin miktarı ile orantılı olarak yükselmektedir. En önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet ve özgül elastisite modülüne sahip olması, işleme kolaylığı ve nem tutma özelliğidir. Yoğunlukları düşük olduğundan sıcaklık, nem ve zaman etkisiyle viskoelastik ve viskoplastik davranış sergilemektedirler. (Korkut S.,2017)

Polimer matrisli kompozitler termoset, termoplastik ve elastomer matrisli kompozitler olmak üzere üç farklı çeşitte ele alınmaktadır.

##### **1.4.2.1.1. Termoset matrisli kompozitler**

Lif takviyeli kompozit malzeme oluşumunda daha yüksek oranda kullanılır ve normal şartlar altında sıvı fazda bulunurlar, sertleştirici ilavesi yapılarak ile önce jel haline gelir ve sonra da katılaşır. Termoset reçineler izotropiktirler. Düşük viskozitede olmaları lif takviyeli kompozitlerin yapımında tercih edilme nedenidir (Itoh vd., 2002).

Termoset malzemeler ile üretilen parçalar raf ömürlü malzemeler olup kimyasal reaksiyonlar içerdiği için uzun kürlenme süreçleri vardır. Tam kürlenme sonucu artık geri döndürülemezler. Bu yüzden üretimde ciddi bir süreç ve zaman planlaması gerektirirler.

##### **1.4.2.1.2. Termoplastik matrisli kompozitler**

Sünek malzeme yapısına sahip olup oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Isı ile eritilebilir, soğutma ile katılaşır. Bu da onlara tekrar şekil değiştirebilme kabiliyeti sağlamaktadır. Termoplastikler amorf veya yarı kristalin yapıda olabilirler. Amorf termoplastikler de moleküller gelişigüzel düzenlenmiş bir yapıda olduğu görülse de kristalin bölgede sıkı paketlenmiş düzenli bir yapıdadır. Termoplastik ile üretilen malzemeler raf ömürlü değildir. Aynı zamanda kimyasal reaksiyon gerçekleşmediği için seri üretime uygundur. Örnek olarak takviyeli sera örtü malzemeleri ve çeşitli sentetik örtüler verilebilir. (Korkut S., 2017)

#### **1.4.2.1.3. Elastomerler**

Uygun koşullar sağlandığında mevcut boyunun 2 katına kadar uzayabilen ve söz konusu kuvvet kaldırıldığında eski haline geri dönebilen malzemelere elastomerler denir. Elastomerler çapraz bağlanmış polimer malzeme olarakta adlandırılmaktadır. Elastomer malzemelere örnek olarak araç lastikleri verilebilir.

Elastomerler, doğal kauçuk ve sentetik kauçuk olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

#### **1.4.2.2.Metal matrisli kompozit malzemeler**

Metallik fazın bazı takviye malzemeleri ile vakum emdirme, dökme, karıştırma, elektroliz yoluyla kaplama, sıcak presleme, haddeleme ve difüzyon kaynağı gibi yöntemlerle pekiştirilmesi ile elde edilmektedirler. Matris malzemesi olarak genellikle demir, alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır ve çelik kullanılmaktadır. Oksitlenme riskinin yüksek olduğu ortamlarda bile yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmektedirler. İmalatının zor ve maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen daha çok uzay ve havacılık alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

#### **1.4.2.3.Seramik matrisli kompozit malzemeler**

Seramik fazın takviye malzemeleri ile pekiştirilmesi yoluyla elde edilen kompozit malzemeler metalik ya da metal özelliği taşımayan elemanların bir araya gelmesiyle üretilmektedirler. Bileşen yapısı olarak gevrek davranırlar ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren çalışmalarda karbon, cam, metal ve seramik bazlı fiberlerle kullanılmaktadır. Başlıca kullanım alanları arasında savunma ve uzay teknolojisinde bulunmaktadır.

#### **1.4.2.4.Hibrit kompozitler**

Farklı çeşitteki fiber malzemelerin tek bir matriste birleştirilmesiyle hibrit kompozit malzemeler elde edilir. Hibrit uygulamasının temel amacı elde edilecek malzemenin özelliklerinin istenilen seviyelerde olmasını sağlamak, herhangi bir malzemenin getirebileceği kusuru bir diğer madde ilavesiyle düzeltmektir. Örneğin, cam takviyeli polimer (GRP), karbon fiber takviyeli polimerden (CFRP) daha ucuz ve daha dayanıklıdır; ancak sertliği daha düşüktür. CFRP kompozite bir miktar cam fiber ilave edildiğinde ucuz, dayanıklı ve sıkı bir malzeme, bir hibrit kompozit elde edilir. Aynı zamanda yalıtıcılık özelliği kazandırmak için de kullanılır. Çeşitli amaçlarla

kullanılabilen iki veya daha fazla fiber tipinin bir araya getirildiği dokuma türü hibrit takviye malzemeler bulunmaktadır.

#### 1.4.2.5.Nano takviyeler

Polimer matrisli kompozit malzemelerde dayanımın ana bileşeni takviye malzemesi olan elyaflardır. Ancak gerek daha fazla dayanım ihtiyacı gerekse de dayanımı düşürmeden malzemenin sertliği, tokluğu elektrik ve ısı iletkenliği gibi daha farklı özellikleri kompozit malzemelere kazandırmak mümkündür. Bu durumda takviye malzemesine herhangi bir müdahale yapılamayacağından kompozit malzemenin diğer ana bileşeni ve zayıf fazı olan matris fazında gerekli takviyeler yapılarak ekstra özellikler kazandırılabilir. Nano takviyelerin en sık kullanılanı ve malzemeye yüksek mekanik özellikler kazandıran karbon nano tüplerdir.

Söz konusu karbon nanotüpler (CNT), üç tipte sınıflandırılır. Bunlar; (Soni vd., 2020)

##### (a) Tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT)

Bu, tek bir atom kalınlığındaki grafit levha olarak düşünülebilir.

##### (b) Çift duvarlı karbon nanotüpler (DWCNT)

Biri diğerinin iç içe geçmiş olduğu tam olarak iki tek duvarlı karbon nanotüpten oluşan yapılar olarak ifade edilmektedir.

##### (c) Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT)

CNT'lerin fiziksel özellikleri üretim yöntemlerine ve SWNT ile MWNT olmasına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Daha iyi mekanik özelliklere sahip SWNT'ler daha küçük çapta olurken MWTN'ler daha kısa formlarda bulunmaktadır.

CNT'lerin (hem SW hem de MW) olağanüstü mekanik özelliklere, hafifliğe, yüksek termal özellikleri, iyi elektriksel iletkenlik, yüksek erime noktası, düşük yoğunluk (1.2-2.6 g/cc), daha yüksek korozyon direncine sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Farklı varyasyonlarda üretimi yapılan CNT'ler üstün mekanik ve termal özelliklerde olduğu bilinmektedir. Bu özelliklerin kullanılması üretimde homojenlik sağlanması ile meydana gelebilecektir. Bu sebeple CNT'lerin özelliklerinin belirgin olması; en boy oranı, homojenliği, takviye içeriği gibi faktörlere bağlıdır.

### **1.4.3. Hibrit-nano kompozit malzemeler**

Hibrit nano kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılan malzemeler nano seviyede olmak zorundadır ve birden fazla olabilir. Örneğin, Zirkonya ve karbon nanotüp takviyesi gibi zirkonya darbe dayanımı sağlarken karbon nanotüp mukavemet dayanımını ayarlamaktadır. Bu durumda böyle kompozit malzemelere hibrit nano kompozitler adı verilir. İki veya daha fazla nano malzemenin kullanılma sebebi her nano malzemenin sahip olduğu özelliğin bir araya getirilmesini sağlamaktadır. Bu özellikler takviye hacimsel konsantrasyon oranında ise hibrit takviyeli kompozitler, nano seviyede özelliklerinin kazandırılması ise hibrit nano kompozit kullanımı ile kazandırılır.

## **1.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri**

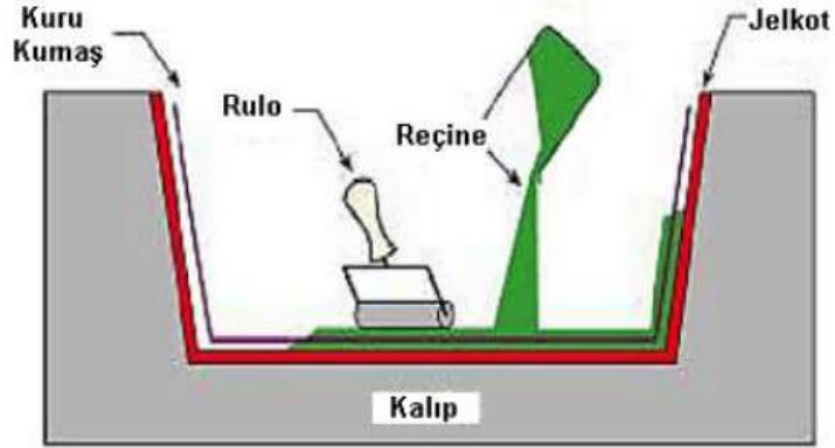
Kompozit malzemelerin oluşturulması ile birlikte malzemelere daha yüksek mukavemet, rijitlik, daha iyi korozyon ve aşınma direnci, yüksek yorulma ömrü ve ısıya dayanıklılık gibi özellikler kazandırılabilir. Kompozit malzemelerin oluşturulmasında bu özelliklerin hepsi aynı anda sağlanması mümkün değildir. Kullanım alanlarına göre ihtiyaç duyulan özellik artırılır.

Kompozit malzemelerde kullanım olarak en yaygın olarak elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanımı olduğu bilinmektedir.

### **1.5.1. Elyaf takviyeli kompozit malzeme üretim yöntemleri**

#### **1.5.1.1.El ile yatırma yöntemi**

Üretim yöntemleri içinde en kolay uygulanan üretim yöntemidir. Genellikle keçe şeklindeki elyaf malzeme daha önceden hazırlanan kalıp içerisine yerleştirilir ve akabinde reçine fırça vb. bir alet yardımıyla elyafın üzerine sürülür. İstenilen kalınlık ölçüsü oluşuncaya kadar bu işlem devam ettirilir ve tabakalı kompozit malzeme üretilmiş olur. El yatırma yöntemine ait şekil diyagramı Şekil 3'te verilmiştir.



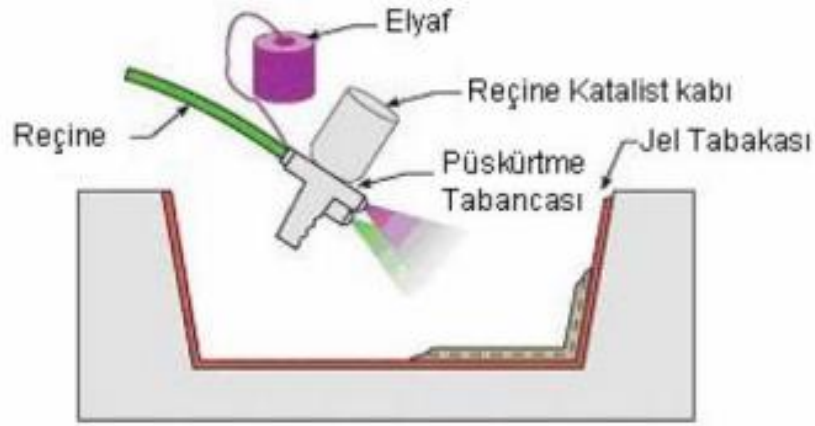
Şekil 3. El ile yatırma yöntemi safhası (Durgun, 2021)

Bu yöntemin safhaları ise;

- Kalıp temizlenir ve kalıp ayırıcı olarak kalıba madeni yağ veya silikon sürülür. Bu işlem sonrası ikinci ayırıcı olarak polivinil alkol (PVA) sürülür.
- Fırça yardımı ile viskozitesi yüksek jelkot sürülür ve reçine hazırlanır.
- Jelkot üzerine fırça ile reçine sürüldükten sonra keçe veya kumaş şeklindeki elyaf yerleştirilerek reçine fırça yardımı ile emdirilir.
- Hava kabarcıkları alınması için rulolanan kompozit malzeme istenilen kalınlığa ulaşıncaya kadar devam ettirilir ve sertleşmeye bırakılarak kalıptan çıkarılır.

#### 1.5.1.2. Püskürtme yöntemi

El yatırma yöntemine benzeyen bu yöntemde el yatırma yöntemine göre daha fazla ürün elde edilmektedir. Bir püskürtme tabancası ile kırılmış elyaf ve reçine karışımı kalıba püskürtülerek kalıbın şeklini alması sağlanır. Hava kabarcıklarını çıkarma işlemi yapılır ve kütleme sonrası kalıptan çıkartılır. Su depoları, su kaydırakları bu yöntemle üretilmektedir. Püskürme yöntemini izah eden görsel Şekil 4'te (Şaşmaz, 2022) verilmiştir.

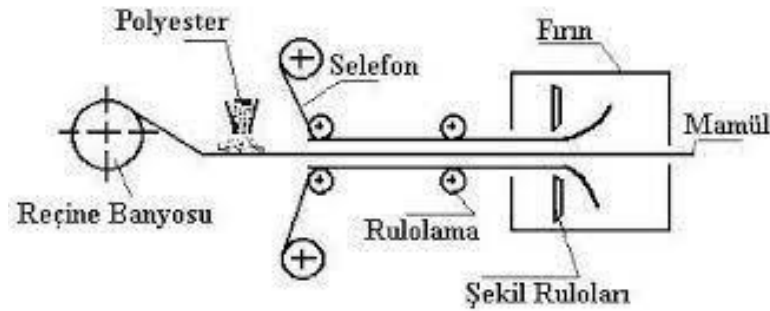


Şekil 4. Püskürtme yöntemi safhası (Şaşmaz, 2022)

#### 1.5.1.3.Sürekli kalıplama yöntemi

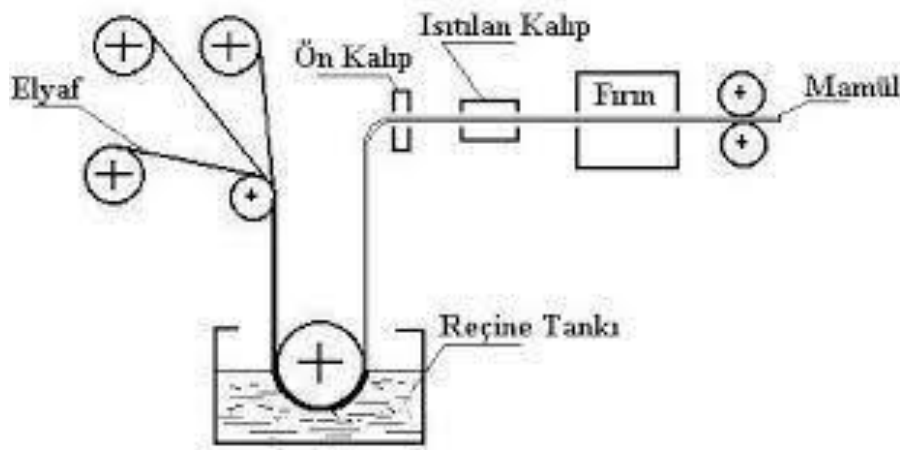
Sürekli kalıplama yöntemi kompozit malzemenin daha hızlı üretilmesi için kullanılmaktadır. Bu yöntemde iki farklı uygulama bulunmaktadır.

Devamlı levha üretim yöntemi elyaf ve kumaş reçine havuzundan geçirildikten sonra üzerine polyester püskürtülür ve iki tabak arasından geçirilerek sandviç haline getirilir. Hava kabarcıkları için rulolardan geçirilerek fırınlanır ve jelleşme başladığı andan itibaren şekillendirme işlemi yapılır. Devamlı levha üretim yöntemine ait safha Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. Devamlı levha üretim yöntemi safhası (Akyüz, 2017)

Diğer sürekli kalıplama yöntemi ise profil çekme ile yapılmaktadır. Bu yöntemde ise elyaflar reçine tankından geçirilerek reçine nüfuz ettirilir. Genellikle çubuk ve boru şeklindeki ürünler elde edilmektedir. Her türlü kompozit profil bu şekilde üretilabilmektedir. Profil çekme üretim yöntemi Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Profil çekme üretim yöntemi safhası (Akyüz, 2017)

#### 1.5.1.4.Santrifüj kalıplama yöntemi

Bu yöntem boru ve silindirik kapların imalinde kullanılmaktadır. Sertleştirici içerikli reçine karışımı ve elyaf kırıntıları silindirik kalıba doldurulur. Doldurulan kalıp döndürülerek merkez kaç kuvveti yardımı ile kenarlara dağılan karışıma sıcak hava üflenerek sertleştirme işlemi gerçekleştirilir. Bu sayede kalıbın iç yüzeyi pürüzsüz olduğu için dış yüzeyi pürüzsüz malzemeler üretmek mümkündür.

#### 1.5.1.5.Elyaf sarım yöntemi

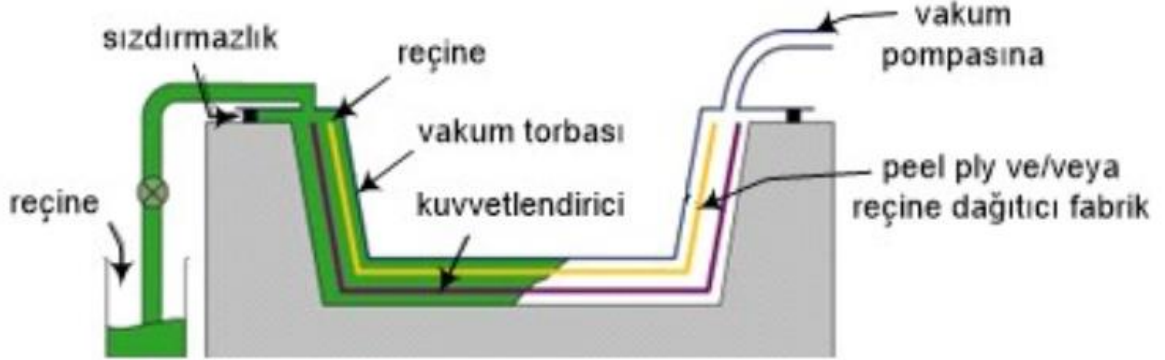
Bu yöntemde elyaf reçine banyosuna daldırılma işleminin akabinde iki punta arasında dönmekte olan ve üzerine kalıp ayırıcı sürülmüş kalıp üzerine sarılmasından ibarettir. Genellikle; basınçlı silindirik kaplar, silolar, güç iletim grupları ve motor gövdeleri sıklıkla bu yöntem kullanılarak üretilmektedir. Elyaf sarım yöntemi ile daha iyi kalite ve yüksek mukavemette ürün elde edilebilir. Üretim safhasında silindirik kalıp üzerine elyaf sarılması şeklinde olduğundan iç yüzeyi pürüzsüz parçalar imal edilebilir. Kuru ve yaş sarma gibi imalat çeşidi bulunmaktadır. Polyester epoksi ve silikon gibi reçineler kullanılabilir. Büyük su ve petrol boruları bu yöntemle üretilmektedir.

#### 1.5.1.6.Torba ile kalıplama yöntemi

El yatırma ve püskürtme yöntemi ile üretilen malzemelerin yüzey hatalarını düzeltmek için kullanılır. Küçük farklılıklar içeren üç metotla üretim yapılmaktadır.

### a. Vakum torbası yöntemi

İş parçası vakum tablasının üzerine konarak tablanın üzeri vakum torbası ile kapatılır. Torbanın içerisindeki hava emilmeye başlanır. Hava boşaldıkça vakum torbası iş parçasının üzerine yapışır ve iş parçasına atmosferik basınç uygulanır. Uygulanan basınç sayesinde parçalar daha kaliteli olmaktadır. Vakum torbası olarak sefon veya naylon torbalar kullanılmaktadır. Vakum torbasına ait görsel Şekil 7’de verilmiştir.

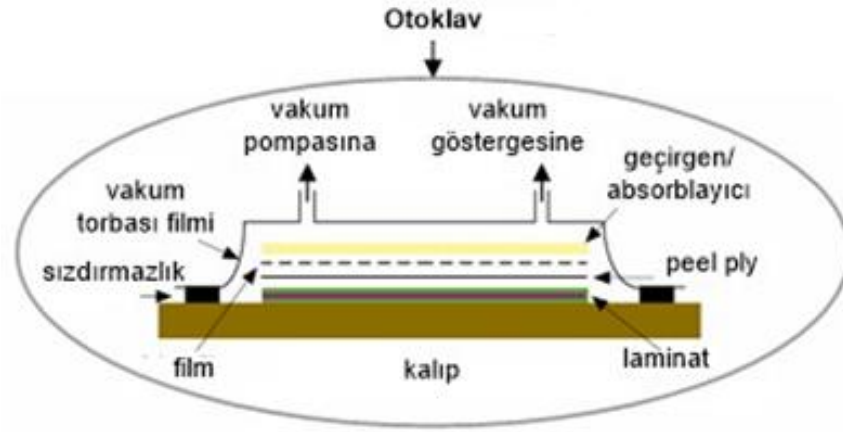


Şekil 7. Vakum torbası yöntemi (Beşergil, 2021)

### b. Otoklav yöntemi

Vakum torbası yönteminden farklı şekilde bir basınçlı kap içerisinde gerek sıcaklık gerekse yüksek basınç vererek torbalanan malzemenin içerisine de vakum uygulanarak yapılan bir üretim şeklidir. Azot gazı gibi inert gazlar ile basınç sağlanır. Sertleşmenin hızlanması için otoklav (basınç kabı) bir fırın gibi ısıtılır veya içerisindeki sıcak gaz sirküle ettirilir.

Genellikle yüksek fiber hacimsel yoğunluğuna sahip prepreg malzemeler kullanıldığından yüksek dayanım ağırlık oranı elde edilen kaliteli malzemeler üretimine çok uygun bir yöntemdir. Otoklav yöntemine ait görsel Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Otoklav yöntemi (Beşergil, 2021)

Otoklav yönteminin avantajları ise;

- Yüksek dayanım/ ağırlık oranı
- Yüksek fiber hacimsel yoğunluğu
- Düşük hava boşluklu ürünlerin üretilmesi
- Büyük parçayı aynı anda birçok küçük parçayı üretebilme
- Malzemede istenen basınç ve sıcaklık değerlerinin kontrol edilebiliyor olması

#### c. Basınç torbası yöntemi

Döküm iki kalıp arasında gerçekleştirilir. Bu yöntemin vakum torbası yönteminden farkı torbadaki basıncın vakum olarak içerden değil de dışarıdan verilerek uygulanmasıdır.

#### 1.5.1.7.Kapalı kalıp yöntemi

Döküm iki kalıp arasında gerçekleştirilir. Geniş ve karmaşık parça imaline elverişlidir. Üretim sonunda ürünün her iki yüzeyi de pürüzsüz olduğundan her hangi bir ek işleme gerek yoktur.

### 1.6. Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı

Kompozit malzemelerin mekanik davranışına fiber ve matris özellikleri etki etmektedir. Fiberlerin mekanik davranış parametreleri;

Uzunluk: Fiberler uzun veya kısa olabilir. Uzun ve sürekli fiberler kısa fiberlere göre daha kolay yönlendirilebilir. Kısa fiberlere göre daha iyi mekanik özellikleri vardır. Ancak, kısa fiberlerin maliyetleri düşüktür ve imalat işlemleri daha hızlıdır.

**Yönlenme:** Bir yönde yönlendirilmiş fiberler, bu yönde yüksek rijitlik ve mukavemet sağlar.

**Şekil:** Dairesel kesitli fiber malzemeler imalat kolaylığı sebebi ile kullanılmaktadır.

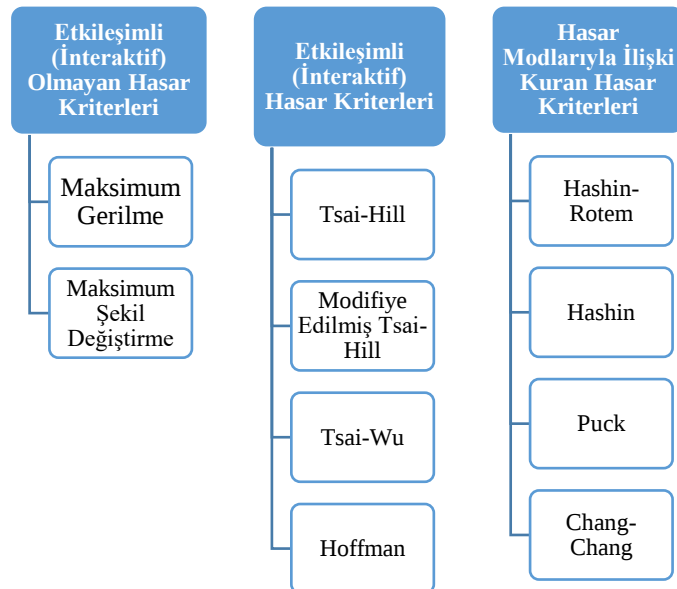
**Malzeme:** Fiber malzemesi kompozitin mekanik performansını doğrudan etkiler. Fiberlerden genellikle yüksek elastik modül ve mukavemet beklenir.

Fiberlerin yanında matrislerinde mekanik davranışa etkisinden söz edilmektedir.

Matrisin fiberleri bir arada tutmak, onları çevresel etkilerden ve kullanıma bağlı hasarlardan korumak ve yükü fiberlere dağıtmak gibi fonksiyonları vardır. Matrisler fiberlere göre daha düşük mekanik özellikler göstermelerine rağmen enine modül ve mukavemet, kayma modülü ve mukavemeti, basma dayanımı, ısıl genleşme katsayısı, ısıl direnç ve yorulma dayanımı gibi birçok mekanik özelliği etkilerler (Autar K.Kaw)

### 1.7. Kompozit Malzemelerin Hasar Çeşitleri

Kompozit malzemelerin hasar çeşitleri hasarın değerlendirme yöntemine bakılarak kategorilendirilmektedir. Bu kategoriler: etkileşimi olmayan hasar kriterleri, etkileşimi olan hasar kriterleri ve hasar modları ile ilişki kuran hasar kriterleri olarak belirtilmektedir.



- Etkileşimli (interaktif) olmayan hasar kriterleri kompozit malzemeye etki eden stress (gerilme) ve strain (gerinim) etkilerini göz önüne almayan kriterlerdir.
- Etkileşimli hasar kriterleri ise farklı doğrultulardaki gerilmeler dikkat edilerek hasar değerlendirilmesi yapılmaktadır.
- Hasar modları ile ilişki kuran hasar kriterleri ise; hasar modlarını hesaplayabilmesinin yanında ilerlemeli hasar analizi içinde uygundur. Bu hasar modları fiber çekme, fiber basma, matris çekme, matris basma ve delaminasyon olarak ayrılmaktadır. (Korkut S., 2017)



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Karbon/cam elyaf hibrit kompozit malzemeler üzerine deneysel ve teorik araştırmalar yapılmıştır. Mekanik özellikleri ve kullanım şartları üzerine yapılan araştırmalar incelenmiş ve bu alanda yapılan birçok çalışma ile karşılaştırılmıştır. Ancak CNT ilavesi yapılarak mekanik özelliklerde iyileştirme sağlanmasına dair yeterli çalışma literatür de bulunamamıştır.

Martins ve ark. (2013), filaman sarım metodu ile farklı sarım açılarında üretilmiş kompozit boru numunelerinin çift eksenli yük altında iki tip yükleme arasında karşılaştırma yapılmıştır. Yükleme koşullarından kapalı uçlu sistemde test değerlerine göre en yüksek değerleri  $\pm 55^\circ$  ile sarılan numunelerde kaydetmişlerdir.

Chandara ve ark. (1999), elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yüksek özgül mukavemetleri, özgül sertlikleri ve özel özelliklerinden dolayı geleneksel malzemeler için alternatif olarak giderek daha fazla kullanıldığına değinilmiştir. Aynı zamanda çalışmada, makromekanik, mikromekanik ve viskoelastik (gevşeme ve sünme) yaklaşımları içeren sönümleme çalışmalarına değinilmiş olup yüksek performanslı yapısal uygulamalar için uygun olduğu vurgulanmıştır. Polimer matrisli kompozit malzemelerin darbe sönümleyici avantajlarına vurgu yapmışlardır.

Arıkan (2010)  $\pm 55^\circ$  filaman sarım yöntemiyle üretilen CTP boruların iç basınç altında hasar davranışlarını incelemiştir. Çalışmada boru eksenine göre değişik açılarda ve boru et kalınlığının çatlak derinliğinden iki kat fazla olacak şekilde çatlak oluşturulmuştur. Numunelerin patlama mukavemetleri belirlenerek yüzey çatlağı parametresinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada çatlak açısının artmasıyla patlama basıncının arttığı sonucuna varılmıştır.

Ellyin ve ark. (1997) çalışmalarında cam elyaf/epoksi kompozit boruları çift eksenli yük altında davranışlarını incelemişlerdir. Sarım açısı  $45^\circ$  ile sarılmış kompozit borularda teğetsel gerilme değeri 290 MPa, eksenel gerilme değeri ise 165 MPa'a kadar elde edilmiştir. Çalışma neticesinde gerilme oranının lineer elastik modülünü etkilediği kanısına varılmıştır.

Ellyin ve Martens (2001), filaman sarım yöntemiyle üretilen cam elyaf takviyeli boruları iki eksenli yorulma deneyine tabi tutmuşlardır. Deneylerde teğetsel ve eksenel yükleme durumları için malzemenin yorulma davranışları incelenmiştir. Yorulma olayı ASTM D2992 standardına göre yapılmış ve numune üzerinde matris yoğunluğu fazla

olan bölgelerde daha büyük (1-10 cm) boyutlu matris çatlakları oluştuğu gözlemlendiği vurgulanmıştır.

Bai ve ark. (1997), cam elyaf ve epoksiden oluşan 55° filaman sarım açılı kompozit borulardaki iç basınçtaki hasar davranışını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada elyaf olmayan bölgelerde çatlakların çekme yönüne dik şekilde olduğu elyaf olan bölgelerde ise mikro çatlakların elyaf- matris ara yüzeyinin ayrılmasıyla meydana geldiği belirtilmiştir.

Gemi (2004), E-Cam ve epoksi malzemeden imal edilmiş cam takviyeli plastik boruların değişken basınç altında yorulma ve hasar davranışları incelenmiştir. Farklı sarım açılı numuneler dört tabakalı olarak hazırlanmış ve sarım açıları arttıkça hem iç basınç değerleri hem de yorulma ömürlerinde artış gözlemlendiği belirtilmiştir.

Şahin (2011), sarım açısı  $\pm 55^\circ$  için cam takviyeli kompozit boruların, belirli darbe enerjisi ile hasarlandırılarak iç basınç altında yorulma davranışı incelenmiştir. ASTM D 2992-06 standardına uygun gerçekleştirilen deneyde darbe enerjisinin artmasıyla cam takviyeli kompozit boruda hasar enerjisi artmış, yorulma ömrü azalmıştır. Darbesiz ve 5J darbe enerjisi ile hasarlandırılan borularda hasar patlama şeklinde, 10J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış numunelerde sızma ve basınç kaçağı şeklinde olduğu vurgulanmıştır.

Aslan vd. (2002), E-cam/epoksi kompozit malzemeler için hem düzlem içi boyutsal hem de kalınlık etkilerini incelemek amacıyla düşük hızda ağır kütle etkisine maruz bırakılmıştır. Boyutsal etkilerini incelemek için 150x100mm ( $\pm 50$ mm) boyutlarında, kalınlık etkisini incelemek içinde 1,4 ve 2,8mm olan iki nominal kalınlık kullanılarak dikey düşme ağırlık test cihazı ile darbe testi yapılmıştır. Sonuç olarak, darbe yüklemesine maruz kalan kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinin tepe kuvveti ve temas süresi olduğu ayrıca kompozit malzemenin sertliği malzemenin genişliği ve kalınlığı ile ilişkili sonucuna varılmıştır.

Uyaner ve ark. (2010) cam takviyeli malzemeden üretilen borulara, farklı açılarda çatlaklar oluşturarak yüzey çatlaklarının etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Bu çatlakları oluşturmak için düşük ağırlıkları kullanmıştır. ASTM D 1599-99 standardını esas alarak gerçekleşen testte yüzey çatlaklarının açısının değişmesinin patlama basıncı üzerinde etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

Gemi (2016) Hibrit kompozit boruların yorulma deneylerini gerçekleştirdiği çalışmasında düşük gerilme değerlerinde oluşan ilk hasar; elyaf sarım açısı doğrultusunda oluşan hasar tipi elyaf/matris ara yüzeyinin ayrılmasıdır. Beyazlama

şeklinde gerçekleşen bu hasarlar elyaf doğrultusunda büyümüş ve ilerleyen çevrimlerde matris çatlaması oluşturmuştur.

Yu ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada tek duvarlı karbon nano tüplerden (SWCNT) üretilen silindirlerin daha kolay bükülüp döndürülebildiği ve şekil değişikliği sonrası eski haline geri döndürülebildiğinden aynı zamanda gerilme sertliğinin çok duvarlı karbon nano tüplerden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Perreux ve Joseph (1997) çalışmalarında frekans ömrünün hasara etkisini incelemişler ve frekansın artmasıyla ömrün arttığını fakat bunun belirli bir noktaya kadar sağladığını yani belirli bir frekans etkisinden sonra ömre bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir.

Richard ve Perreux (2000) yaptıkları çalışmada iç basınç altındaki filaman sarım yöntemi ile elde edilmiş CTP boruların hasar davranışlarını incelemiştir. Bu borularda sızıntı hasarının boru yüzeyinde oluşan nem ile başladığını bildirmişlerdir.

Yakobson ve ark. (1996) ile Nardelli ve ark. (1998) yaptıkları çalışmada karbon nanotüplerin (CNT) deformasyon mekanizmasının gerilme gerinimini araştırdılar CNT'lerin olağanüstü esneklik özelliklerine sahip olduğunu aynı zamanda kırılma emaresi görülmeden daha büyük gerilmelere sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Soni ve ark. (2020) yapmış oldukları çalışmada polimer matrislerin içerisinde karbon nano tüplerin düzgün dağılımı polimerik nano kompozitlerin (PNC) özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Prabhakar ve ark. (2019) yapmış oldukları çalışmada patlama analizi, matris çatlaması ve kırılma mekanizmaları için ideal sarım açısının  $\pm 55^\circ$  olduğunu bildirmişlerdir.

Tarfaoui ve ark. (2007) cam/ epoksi malzemeden yapılmış silindirik yapıların darbe hasarı ve dinamik tepkisi üzerindeki boyut analizini çalışmış olup farklı ebat ve ölçülerde  $\pm 55^\circ$  sarım açılı numuneler kullanmışlardır. Söz konusu imalat parametrelerinin numunenin fiziksel özelliklerini ve hasar oluşumunu önemli derecede etkilediğini bildirmişlerdir.

Gemi ve ark. (2016) filaman sargılı hibrit kompozit boruların darbe etkisindeki numunesi için patlama mukavemetinin etkisini incelemiştir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş hibrit kompozitler, cam-cam/ cam- karbon/ karbon- cam/ karbon-karbon değişik varyasyonlarda kombine edilmiştir. Borulara 4, 16 ve 32 barlık iç basınçla ön gerilme oluşturulmuştur. Farklı enerji seviyelerinde ön gerilmenin hasar

yapılarını hangi oranda etkilediği üzerinde çalışılmıştır. 32 barlık ön gerilme oluşturulan borular en yüksek darbe mukavemetine sahip borular olmuşlardır.

Gemi (2018) istifleme dizisi konfigürasyonları olarak Karbon/ Cam/ Cam (CGG), Cam/ Karbon/ Cam GCG) ve Cam/ Cam/ Karbon (GGC) dizilimlerini çalıştığını bildirmiştir. Söz konusu çalışma da GCG dizilimine sahip borularda sızıntı hasarının gözlenmediği, CGG dizilimine sahip borularda ise daha yüksek darbe direnci olduğu sonucuna varılmıştır.

Prabhakar ve ark. (2019) lif takviyeli polimer kompozit borular üzerine çalışma yapmış en büyük dezavantajının nem tutması olduğunu ve uzun süren kullanımlarda dayanımını kaybettiğini aynı çalışmada malzeme seçiminin de dayanıklılığa etken olduğunu bildirmişlerdir.

Önder ve ark.(2009) filaman sargılı kompozit malzemelerin sarım açılarının etkilerini de incelediler ve 45°, 55°, 60°, 75° ve 88° sarım açılı kompozitleri simetrik ve asimetrik şekilde üretilip incelediler. Yapılan testler neticesinde en iyi özelliklerin 55° sarım açısı ile gerçekleştiğini gözlemlediler.

Savnur ve ark. (2020) geleneksel malzemelere kıyasla iyi özelliklere sahip ürünleri üretebilmek için cam, karbon, aramid ve doğal elyaf gibi farklı tipte güçlendirici elyafların bulunduğunu kalsiyum, karbonat, silika nanopartiküller, kil vb. gibi dolgu malzemelerin harmanlanmasının yapısal özelliklerin iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Kompozit malzeme ana fazı olan reçine içerisine takviye amacıyla kullanılan en önemli takviye elemanı olan CNT'lerin reçineye hangi mekanik özellikler kazandırdığını araştıran çalışmalarda yapılmıştır. Alloui ve ark. (2002) MWCNT-epoksi reçine kompozitlerinin mekanik ve elektriksel özelliklerinin saf epoksi matris ile yapılan kompozit yapılara kıyasla geliştirilmesi incelediler ve saf reçineye %1-4 MWCNT ilavesiyle Young Modülünün ve polimer kompozitlerin akma mukavemetinin sırasıyla 1 ve 4 oranında artabileceğini bildirmişlerdir.

Üstün ve ark. (2016) CNT/ matris yoluyla karbon nanotüpler gibi nano ölçekli dolguların eklenmesiyle laminasyon arası kayma mukavemetinin, kırılma tokluğunun ve yük transfer kabiliyetinin artacağını bildirmişlerdir.

Supian ve ark. (2018) hibrit kompozit mukavemeti, her iki fiberin fiber içeriğinin özelliklerine, farklı fiberlerin uzunluğuna, fiber/matris bağlanmasına ve fiber sekans düzenlemesine bağlı olduğunu bildirmişlerdir.

S.Rajesh ve ark. (2014) Yaprak yay üretimi için cam ve karbon fiber kompozit malzeme tercih etmişler ve eğilme tepkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Hibrit kompozit malzemeden üretilmiş yaprak yayların bükülme tepkilerinin üstün olduğu sonucunu bildirmişlerdir. Harmeet Singh ve GurinderSingh Brar (2018) geleneksel çelik yay, metal matris kompozit malzeme yayı ve karbon epoksi bazlı yaprak yayı kıyaslama için yaptıkları çalışmada kompozit malzeme yaprak yayın yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve düşük yoğunluğa sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Demirci (2020) yapmış olduğu çalışmada filament sargılı kompozit borular için, sarım açısı ve katman sayısının darbe tokluğunu etkileyen parametre olduğunu katman sayısı arttıkça darbe sırasında kompozit tüplerin bükülme sertliğinin arttığını bildirmişlerdir.

Samancı ve ark., Gemi ve ark., Kara ve ark. Düşük hızda darbe ve statik iç basınç testlerinde reçine konsantrasyonunun fazla olduğu cam elyaf kompozit tüplerin yüzey alanlarında eksenel matris çatlaklarının oluştuğunu bildirmişlerdir.

Curtis ve ark. darbe veya statik arıza hasarına uğrayan filaman sargılı kompozit borularda sorunun deformasyon veya patlama mukavemetinden kaynaklandığını bildirmiştir.

Naik ve ark. (2000) ile Naik ve Meduri (2001) farklı seviyelerde darbe enerjilerine sahip düz dokuma cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin düşük hız etkisini araştırmış olup hasar toleransının, düşük kütle ve daha yüksek hız kombinasyonları için, yüksek kütle ve düşük hız kombinasyonlarına göre daha üstün olduğunu bildirmişlerdir.

Raghunath ve ark. (2015) yapmış oldukları çalışmada cam elyaf kompozitlerin farklı hacim fraksiyonları ile darbe dayanımını incelemiş ve farklı darbe hızlarında deneyler gerçekleştirmiş olup cam elyaf kompozitlerin diğer kompozitlerden daha iyi darbe direnci gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Huang ve ark. (2019) yapmış oldukları çalışmada basınçlı kapların üretiminde kullanılan metal malzemelerin yerini filaman sargılı kompozit malzemelerin aldığını ve karbon fiber içeren kompozit tüplerin yüksek basınçlı kaplar için en etkili çözümlerden biri olduğunu bildirmiştir.

Kompozit malzemelerin tasarımında kullanım ömrü açısından yorulma yüklemesinde malzemenin mekanik tepkisinin bilinmesi önemlidir. Huang ve ark. (2019) yapmış oldukları çalışmada kompozit malzeme üretimindeki temel sorunlardan

birinin elyaf sarma açılarının ve yüzey çatlaklarının parçanın yorulma ömrü üzerindeki etkileri olduğunu bildirmiştir.

Gemi ve ark. (2017) yapmış oldukları çalışmada teğetsel ön gerilme seviyesi arttıkça yorgunluk hasar boyutunun arttığını belirli bir yüklemekten sonra lif kırılması ve patlaması olayının gerçekleştiğini bildirmişlerdir.

Taşyürek (2019) yaptığı çalışmada çok ölçekli nano parçacıklarla güçlendirilmiş reçine sisteminin, yüksek mukavemet ve termal direnç gerektiren endüstriyel uygulamalar için uygun olduğunu bildirmiştir.

Avcı ve ark.(2016) yaptığı çalışmada çatlak büyüme hızlarının ve gerilim yoğunluğu değişiminin doğrusal bir ilişki göstermekte olduğunu gerilme yoğunluğu faktörü artarken çatlağın büyümesinin artacağını bildirmiştir.

Arasan ve ark.(2016) yapmış oldukları çalışmada hibrit ve hibrit olmayan kompozit numunelerde kırılma tokluğunun çatlak uzunluğunun artmasıyla artmakta olduğunu bildirmiştir.

Özetle polimer matrisli kompozit borularda yorulma, kırılma tokluğu, işlenebilirlik kabiliyeti, darbe dayanımı ve nano katkı malzemelerinin matris ve kompozit yapıya etkilerini inceleyen pek çok çalışma literatürde mevcuttur. Ancak kumaş sarım tekniği ile filaman sarım tekniği, prepreg malzeme ve normal kumaş malzeme kıyaslaması, diğer üretim teknikleri ile otoklav üretim teknikleri arasındaki farklar üzerinde yeterince durulmamıştır. Çalışmamızda kumaş sarım tekniği kullanarak, hem prepreg malzeme kullanılması hem de hibrit fiber CNT takviyeli malzeme kombinasyonu kullanımı ile otoklav üretim tekniği kullanarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu malzemeler aynı CNT takviye oranın da farklı hibrit kombinasyonun da malzemenin normal kumaş ve dengeli fiber/ matris kombinasyonuna sahip prepreg malzeme arasındaki farkları tespit etmek ve diğer üretim teknikleri ile otoklav üretimini kıyaslamaktır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Prepreg malzeme özellikleri

Pre-impregnated kısaca prepreg elyaf malzemelerin reçine emdirilmiş haline verilmiş isimdir. Prepreg elyaf malzemeler otoklav yöntemi ile üretilse de vakum torbalama veya fırınlama yapılarak da elde edilmektedir.

Prepreg kumaşlarla yapılan üretimler diğer malzeme türlerine göre daha pratik ve standart kalitedir. Kompozit malzeme üretimindeki en çok rastlanan olumsuzluk fiber/reçine konsantrasyonunun homojen olmaması ve malzeme içindeki fiber oranının yeteri kadar yükseltilememesidir. Bu durum malzemelerde dayanım kaybına, reçine dispersiyonunun ve nano malzemelerin kompozit malzeme içine homojen dağılmamasına neden olmaktadır. Prepreg yöntem sayesinde reçine absorbe işlemi önceden kumaşa yapıldığı için olumsuzlukların önüne geçilmektedir. Prepreg malzemelerin avantajlarının yanında soğuk zincir transferine ihtiyaç duyulduğundan, kumaşa önceden emdirilen reçine kısmen kürlenmiş bir reçine olup ortam sıcaklıklarından malzeme çabuk etkilenmektedir.

##### 3.1.2. Cam elyaf prepreg malzeme özellikleri

Cam elyaf prepreg malzeme SPM Kompozit firmasından SPM EGU 110 model kumaşı twill dokuma yapılmış şekilde 110 gr/m<sup>2</sup> tedarik edilmiş soğuk zincir transferine özen gösterilerek derin dondurucuda muhafaza edilmiştir. Cam elyaf prepreg malzemelere ait teknik özellikler Tablo 3 ve temin edilen malzeme Şekil 9'da verilmiştir.

**Tablo 3.** Cam elyaf malzeme teknik özellikleri

| Malzeme      | g/m <sup>2</sup> | Dokuma | Atkı<br>(10cm) | Çözü<br>(10cm) | Atkı   | Çözü   | Genişlik |
|--------------|------------------|--------|----------------|----------------|--------|--------|----------|
| Cam<br>Elyaf | 110              | Twill  | 144            | 160            | EC9 34 | EC9 34 | 100      |



Şekil 9. Cam elyaf malzeme

### 3.1.3. Karbon elyaf malzeme özellikleri

Çalışmamızda soğuk zincir transferine özen gösterilerek Twill-430 gr/m<sup>2</sup> SPM Kompozit firmasından karbon elyaf prepreg malzeme tedarik edilmiştir. Karbon elyaf malzemelere ait teknik özellikler Tablo 4 ve temin edilen malzeme Şekil 10'da verilmiştir.

Tablo 4. Karbon elyaf malzeme teknik özellikleri

| Malzeme         | g/m <sup>2</sup> | Dokuma | Atkı<br>(10cm) | Çözüğü<br>(10cm) | Atkı | Çözüğü | Genişlik |
|-----------------|------------------|--------|----------------|------------------|------|--------|----------|
| Karbon<br>Elyaf | 430              | Twill  | 29             | 25               | 12K  | 12K    | 100/127  |



Şekil 10. Karbon elyaf malzeme

#### 3.1.4. Nano teknoloji ve MWCNT

Kompozit malzemeler klasik malzemelere göre daha yüksek dayanım, sertlik, aşınma- yorulma direnci sağlarlar. Kompozit özelliklerinden dolayı özellikle polimer kompozitlerde matrisler çeşitli nano takviye elemanları ve dolgu elemanları ile desteklenebilir bu sayede çok farklı ikincil mekanik özellikler kompozit malzemeye kazandırılabilir. Hatta hibrit nano malzemeler ilave edilerek bu özelliklerine etkisi artırılabilir. Bunlar tokluk, sertlik, korozyon dayanımı, asit erozyonu, ısı iletkenlik ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerdir.

Polimer malzemedeki oluşan enerji, nanokompozit takviyesiyle malzemelerde oluşan enerjinin yanında karbon nanotüp malzemenin enerjisinin ve matris/nanotüp arasındaki moleküler olan enerjinin toplamından meydana geldiği bilinmektedir. Yüzey işleme kabiliyeti, karbon nanotüp dağılımının homojenik yapıda olması ile doğrudan bağlantılıdır. Karbon nanotüplerin reçine içerisinde eşit ve homojenik dağılımı için birçok farklı karıştırma tekniği vardır. Karbon nanotüplerin karıştırmak için kullanılan en yaygın teknik mekanik karıştırma ve sonikasyon tekniğidir. Mekanik karıştırma ucunun kanatçık geometrisi ve açıları ile karıştırma hızı çok önemlidir. Ultra sonikasyon tekniği CNT'leri matris içerisinde etkili bir şekilde dağıtır ve bir araya toplanmış olanları da temizler.

Kompozit malzemelerde yük transferi için önemli hususlardan biri de ara yüzey yapışma hatasının oluşmamasıdır. Bu hata genelde matristen takviye elemanına gerilme transferine izin verdiğinden ötürü oluşmaktadır.

Dolgu malzemesi olarak karbon nanotüp takviyesi ile plastiklerin malzeme özelliklerini efektif olarak geliştirmek için çözülmesi gereken iki ana konu vardır. Bu konular ara yüzey bağı ve karbon nanotüplerin bireysel olarak uygun bir şekilde dağılmasıdır (Martone 2010).

Karbon nanotüp ilavesi ile malzemede dengeli bir elektrik iletkenliği ve homojen nano dağılımı sayesinde ekstra dayanım artışı meydana getirilmiştir. MWCNT nanotek-Ankara firmasından tedarik edilmiş olup teknik özellikler Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5. CNT teknik özellikleri**

| Safılık | Dış Çap  | İç Çap  | Uzunluk       | Yüzey Alanı            |
|---------|----------|---------|---------------|------------------------|
| %95 CNT | 10-20 nm | 5-10 nm | 10-30 $\mu m$ | >200 m <sup>2</sup> /g |

### 3.1.5. Otoklav Reçinesi

Prepreg reçinesi SPM Kompozit Firmasından VTP DA100 model malzeme tedarik edilmiştir. Nano katkılı prepreg malzeme üretimini gerçekleştiremediğimizden prepreg malzemenin reçine/ matris konsantrasyonunun azalmasını göz önüne alarak prepreg malzemeye nano katkı ilave edebilmek için yine aynı prepreg reçinesi kullanarak nano katkısı sağlanmıştır. Tedarik edilen prepreg reçine malzemesi Şekil 11'de verilmiştir.



**Şekil 11. Reçine**

### 3.1.6. Silindirik kalıp

Kalıp olarak kullanılan boru dikişsiz çelikten yüzeyi %0,1 konik bir şekilde taşlanarak 72 mm dış çapında ve 1300 mm boyunda elde edilmiştir. Kalıbımız N7 yüzey pürüzlülük değerine sahip olup Yüzey kalitesi ve koniklik kompozit malzemenin kalıptan mekanik olarak kolay çıkarılmasını sağlamak için yapılmıştır.



Şekil 12. Silindirik kalıp

### 3.2. Yöntem

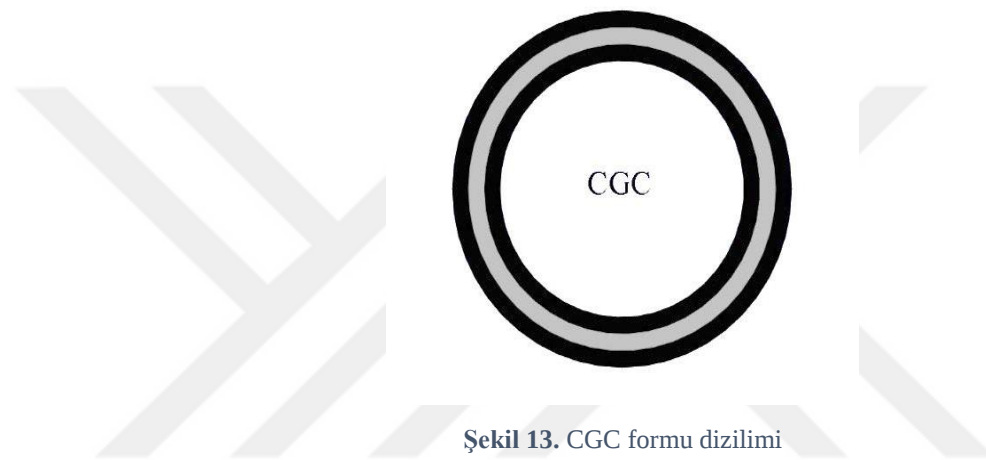
Boru imalatında en sık kullanılan metotlardan bir tanesi filaman sarım yöntemidir. Ancak bu tekniğin uygulanmasında da aynı liflerin birbiri üzerine binmesi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Aynı zaman da üretim hatalarına müsaittir. Kumaş sarım metodu ise fiberlerin geometrik olarak kumaş halinde daha düzenli olması ve üretim hatalarının minimum seviye de olmasından dolayı bu yöntem tercih edilmiştir. Burada dikkat edilmesi gerek husus sarım esnasında kumaşın gerginlik derecesi önemlidir.

Yapmış olduğumuz çalışmada öncelikle içi boş kalıbımızın üzerine polivinil alkol (PVA) kalıp ayırıcı sürülüp ince film naylon ile kaplanmıştır. Kalıba malzemenin daha iyi nüfuz etmesi için ısıtıcı yardımı ile kalıp 50°C sıcaklığa kadar homojen olarak ısıtılmıştır. Kumaş sarım işlemine geçmeden önce kalıp başlarına kusursuz bağlanabilmesi için kalıp için kapak üretimi gerçekleştirilmiştir. Torna işleminde yapılacak sarım için dikkat edilmesi gereken hususlardan biriside kumaşın gerginliği olduğundan prepreg malzeme bir boru üzerine sarılarak germe işlemi yapılmıştır. Söz konusu çalışma için belirlenen dizilim parametreleri için CGC diziliminde önce boru kalıbımıza araya reçine sürülerek dört tur karbon elyaf daha sonra iki tur cam elyaf

akabinde tekrar dört tur tekrar karbon elyaf sarılarak işlem tamamlanmıştır. Aynı işlem GCG dizilimi içinde gerçekleştirilmiştir.

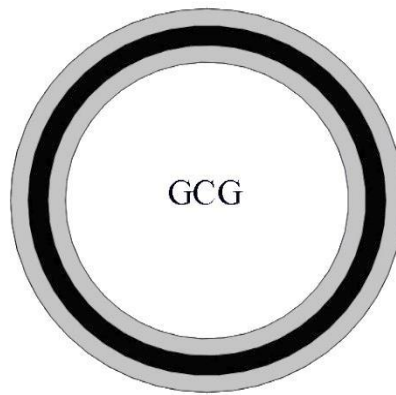
### 3.2.1. Hibrit kompozit malzeme üretimi

Hibrit malzeme üretim için iki tür sarım yapılmıştır. Birinci sarım; karbon elyaf/cam elyaf/karbon elyaf (CGC) diziliminde gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden önce silindirik çelik kalıp 50°C ısıtılmış olup söz konusu dizilim için nanolu ve nanosuz formda olmak üzere 2 adet boru üretilmiştir. CGC form dizilimi Şekil 13'te ifade edilmiştir.



Şekil 13. CGC formu dizilimi

İkinci sarım ise; cam elyaf/karbon elyaf/cam elyaf (GCG) diziliminde gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden önce silindirik çelik kalıp 50°C ısıtılmış olup söz konusu dizilim için nanolu ve nanosuz formda olmak üzere 2 adet boru üretilmiştir. GCG form dizilimi Şekil 14'te ifade edilmiştir.



Şekil 14. GCG formu dizilimi

Sonuç olarak dört adet hibrit kompozit boru üretimi gerçekleştirilmiştir. CGC ve GCG formlarında iki adedi nanolu iki adedi nanosuz üretilmiştir. Nano katkısı olarak MWCNT olup %1 oranındadır.

### 3.2.2. Nano reçine kombinasyonu (Dispersiyon)

Nano malzemenin reçine içinde homojen bir şekilde yayılabilmesi kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etki eden önemli hususlardan biridir. Burada nano malzemenin nem derecesi, reçinenin viskozitesi ve ortam sıcaklığı önemli rol oynamaktadır. Gerekli ölçülerde hazırlanan malzemeler uygun çevre koşullarında önce mekanik karıştırıcıda 15'er dakikalık, 10 dakika ara ile 2 defa olmak üzere toplam 30 dakika karıştırılma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem esnasında nanotüp üreticisinin tavsiye ettiği kanat açılarına ve geometrik forma sahip özel karıştırıcı uç kullanılmıştır. Üretilen özel karıştırıcı uç Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Özel form karıştırıcı uç

Daha sonra ultrasonik karıştırıcı da cihazın şartlarına uygun miktarlarda sıcaklığı 45°C geçmeyecek şekilde toplam 3 defa 5 dakikalık periyotlarla karıştırma işlemi tamamlanmış olup 45°C dereceyi geçen durumlarda ise için dinlendirilme ve soğutma işlemi uygulanmıştır.

### 3.2.3. Nano takviyeli hibrit kumaş sarım tekniği

Hazırlanan prepreg kumaşların üzerine nano reçine kombinasyonu ısıtılmış kalıba sarılmadan önce CGC diziliminde CG ve GC arasına fırça ile ince bir film oluşturacak şekilde sarım yönünde sürülmüştür. Bir torna cihazına bağlanan ve el gergi yöntemi ile gerdirilerek yapılan kompozit kumaş, kumaş kalınlığı dikkate alınarak, et kalınlığı 4mm olacak şekilde sarılmıştır. Yani CGC diziliminde dört kat karbon iki kat cam ve dört kat karbon, GCG diziliminde ise dört kat cam iki kat karbon dört kat cam olacak şekilde dizilmiştir. Daha sonra vakum torbasına alınan malzeme içerisindeki hava ve uçucu gazlar dışarı atılmak sureti ile -0,8 bar vakum altında otoklav içerisine yerleştirilmiştir.

### 3.2.4. Otoklav prosedürü

Otoklav toplam 16 bar basınca 150°C sıcaklığa dayanıklı kuru tip bir otoklavdır. Prepreg malzemedeki kullanılan reçine kürlenme özelliklerine dikkat edilerek 6 bar basınç ve 85°C sıcaklıkta 120 dakika boyunca otoklavda tutulmuştur ve basınç sabit kalmak şartı ile sıcaklık oda sıcaklığına 6 saatte yavaş yavaş soğutulmuş olup sabit basınçta 24 saat sonra otoklav cihazından çıkarılmıştır. Tez çalışmamızda kullanılan kuru tip otoklav fırınına ait görsel Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Otoklav cihazı

### 3.2.5. K rleme mekanizması

Reçine çeşitlerine göre üretici firmalar tarafından sertleştirme komponentli reçineler üretilmektedir. Seçilen herhangi bir reçineye göre reçinenin Tg Camsı geçiş sıcaklığı ve reçinenin kimyasal reaksiyon süresi üretici firma tarafından verilmiştir. Bu teknik bilgilere tam uyularak kürlenme prosesi gerçekleştirilmiştir.

Artık otoklavdan çıkarılan nano takviyeli kompozit malzeme tamamen k rlenmi  ve nihai dayanımını kazanmış bir malzemedir. Malzeme silindirik kalıptan pres yardımı ile hasar vermeyecek şekilde çıkarılıp malzemenin deney parametrelerine göre mekanik olarak hazırlanmıştır.



## 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Deney Malzemelerinin Hazırlanması

Otoklavdan çıkarılan malzeme ham kompozit borudur ve bir takım yüzeysel hatalara sahip olduğu göz muayenesi sonucu karar verilmiş olup taşlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu şekilde et kalınlığı 3,6 mm seviyesine düşürülerek deney standardına göre hazırlanan numuneler 300mm boyunda olacak şekilde şerit testere ile kesilmiştir. Üretilen deney boruları Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. Taşlanmış deney boruları

### 4.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi

Darbe testleri, düşey ağırlık test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test makinesi, düşük ile orta darbe enerjileri gerektiren testler için uygundur. Çarpma tertibatının kütlesi 5.6 kg olup ve çarpma burnunun çapı 12.7 mm idi. Çarpma testleri sırasında, hedef üzerinde birden fazla etkiyi önlemek için bir geri tepme önleyici cihaz kullanıldı. Testler, üç farklı darbe enerjisi seviyesinde (5, 10 ve 15 J) gerçekleştirildi.

Karbon nano tüplü ve nano tüpsüz numunelere 5J-10J-15J enerji değerlerinde en az 3 er defa silindirik burun geometrisine sahip cihaz ile darbe uygulanmıştır. Seçilen malzeme hem karbon elyaf hem de karbon nanotüp olduğundan hasar bölgesinde herhangi bir renk ayrımı gözlenmemiş ve penetrant sıvı ile de gözlenmesi mümkün olmamıştır. 5'er cm ara ile darbe vurulan numuneler darbe hasar bölgesinden şerit testere ile kesilerek hasar bölgeleri dijital mikroskop ile incelenmiştir. Yapılan inceleme sonuçları ilgili bölüm de verilmiştir. Çalışmamızda kullanmış olduğumuz düşük hızlı darbe deneyi test cihazı Şekil 18’te verilmiştir.



Şekil 18. Düşük hızlı darbe deneyi cihazı

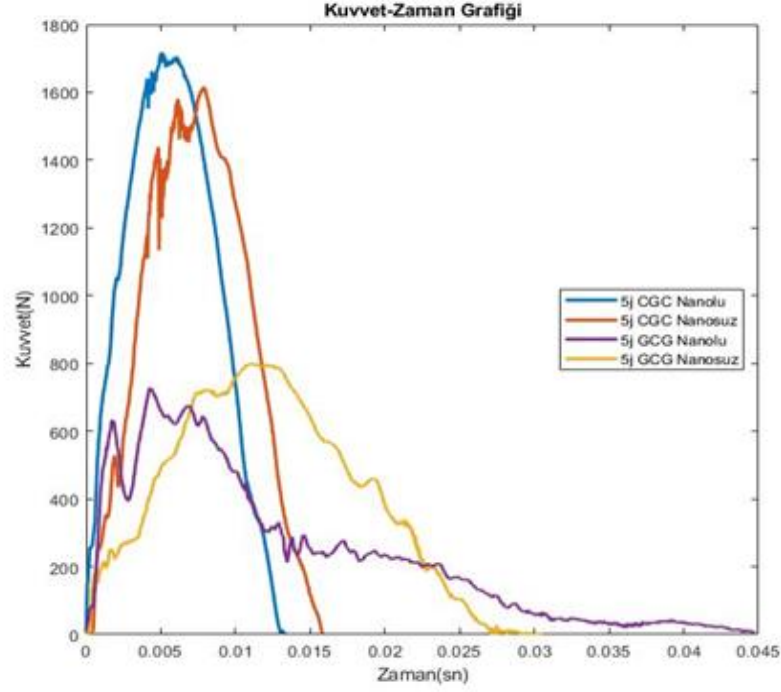
#### 4.2.1. Numunenin hasar davranışına darbe enerjisinin etkisi

Kompozit boruların darbe davranışlarında darbe ucunun malzemeye kazandığı kinetik enerjiyi boşaltabilmesi ucun malzemeye ilk değdiği andan itibaren başlar. Kompozit malzemelerde matris çatlağı, elyaf kırılması ve kumaş sarım tekniği uygulandığından her bir kumaş tabakası laminat görevi yapacağından tabakalar arası ayrılma yani delaminasyon hasarı beklenmektedir. Bununla birlikte darbe ucunun sahip olduğu enerji malzeme temas noktasında bir sehim yani çökme meydana getirir. Eğer uç malzemede penetrasyona sebep olmazsa malzeme darbe direncinden dolayı darbe ucu rebound yani darbe ucu malzeme tarafından geri ittirilir. Bu durumda darbe mekanizması sahip olduğu enerjinin tamamını malzemeye boşaltamaz. Tüm bu oluşan mekanizma bize hem malzemenin darbeye dayanıklılığı hem de darbe ucunun malzemede hangi hasar sonucu hakkında yorum yapmamızı sağlayan birtakım grafik ve değerler oluşturur. Bunlar kuvvet/zaman, kuvvet/deplasman, enerji/zaman ve enerji /deplasman grafik ve değerleridir.

##### 4.2.1.1.Kuvvet- zaman grafikleri

Şekil 19, Şekil 20 ve Şekil 21’de farklı darbe hızları için temas gücünün zamana bağlı değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi, ilk temas noktasında temas kuvveti artmaya başlar. Bu eğilim Hertzian hasarı ile karşılaşılınca kadar devam eder. Hertzian hasarı, kontak bölgede karşılaşılan matris kırılma hasarı ile ilişkilendirilebilir.

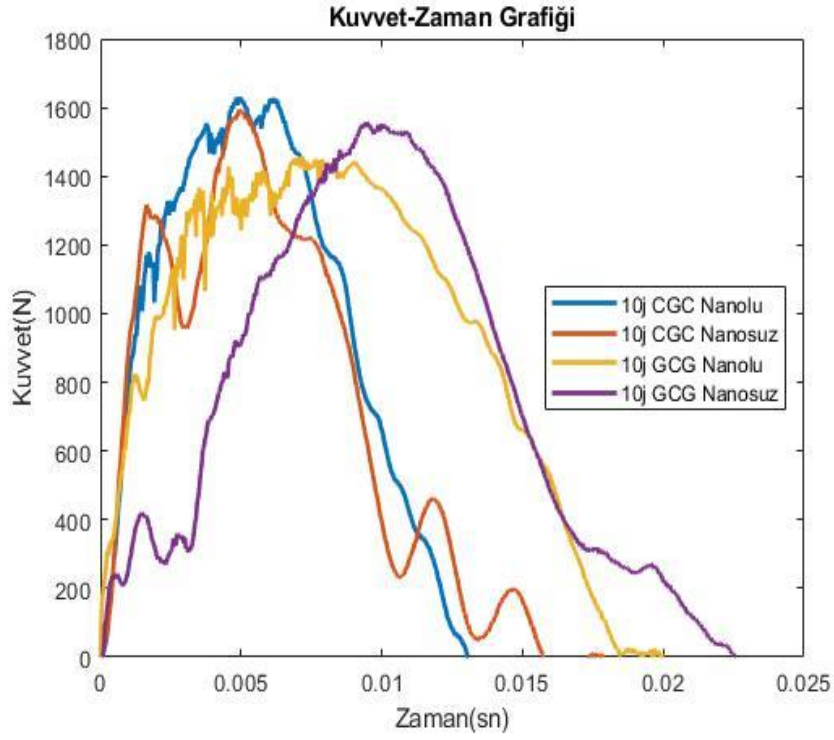
Bununla birlikte, borular yapısal bütünlüklerini kaybetmeyebilir ve uygulanan deformasyona karşı direnç gösterebilir. Böylece, ek temas gücü artışı gözlenir.



Şekil 19. 5J ile yapılan test grafikleri

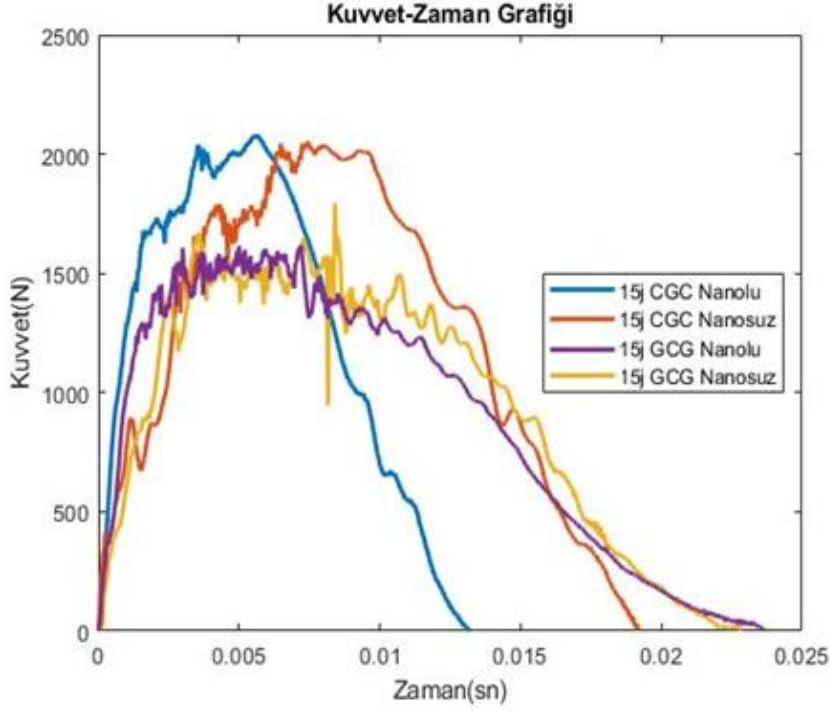
CGC diziliminde 5J’de nanolu ve nanosuz malzeme arasındaki fark 150-200 N’dur. Nanosuz malzemede daha erken matris çatlaması hasarın yayılması görülmüştür. GCG diziliminde ise aynı kuvvetlerde hasarın yayılması nanosuz malzemede daha uzun periyotta gerçekleşmiştir, Bu da nano takviyesinin hasarın yayılmasını engellediği sonucunu doğurmaktadır. Çünkü nanosuz malzemede kuvvet temas süresi daha uzun periyotta gerçekleşmiştir.

CGC dizilimi ile GCG dizilimi arasında temas kuvvetinin farklı olması beklenen bir durumdur. Çünkü CGC dizilimi 8 kat karbon ihtiva eden daha kuvvetli bir yapıdır.



Şekil 20. 10J ile yapılan test grafikleri

Enerji etkisi arttırıldığında nanosuz malzemelerin nanolu malzemelere göre daha geniş kuvvet temas süresine sahip olduğu daha erken hasara uğramağa başladığı CGC diziliminin daha kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 21. 15J ile yapılan test grafikleri

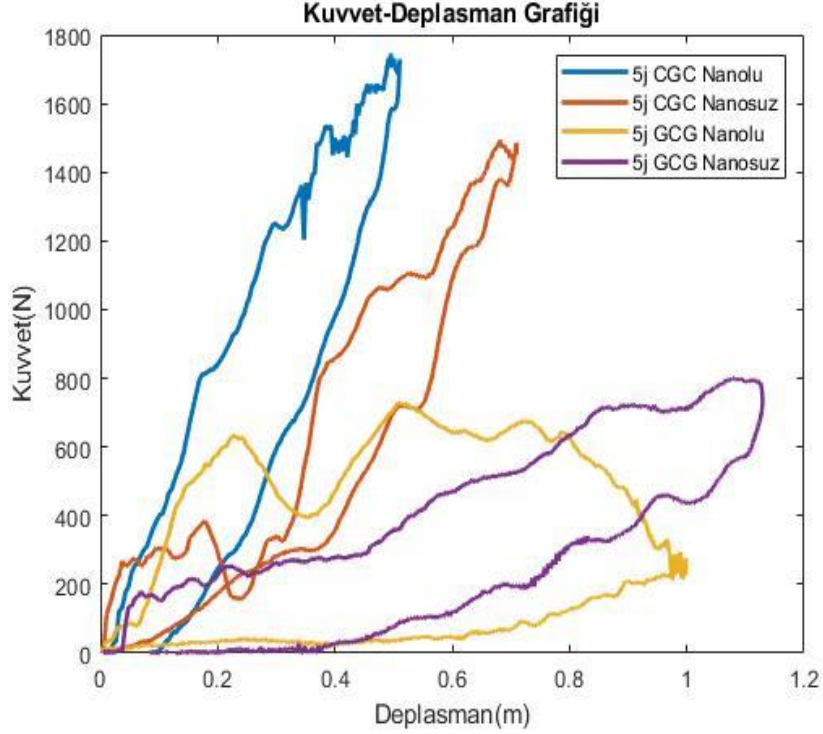
Bu grafikte CGC diziliminin daha dirençli ve gevrek yapıya sahip olduğu GCG diziliminin ise daha elastik yapıya sahip olduğu söylenilebilir. CGC diziliminde ani matris ve fiber kırıklarına karşın GCG diziliminde daha yavaş hızla yayılan daha geniş alanda deformasyon gözlenmektedir.

Genel olarak kuvvet arttırıldığında nanolu yapıların daha yüksek kuvvetlerde daha kısa zaman periyotlarında hasara uğradığı GCG diziliminde ise bu zaman periyodunun daha fazla dolayısıyla hasar alanının daha geniş olduğu kırılmaların ise daha küçük boyutlarda daha fazla olduğu sonucuna varılabilir. %1 nanotüp katkısının malzemelerin hasarını azalttığı, kuvvet dayanımını arttırdığı sonucuna varılmakla beraber literatüre uygun bir şekilde nanotüp katkısının %3'e kadar arttırılması ile darbe dayanımının daha öngörülebilir seviyede artacağı düşünülmektedir.

#### 4.2.1.2.Kuvvet- deplasman grafikleri

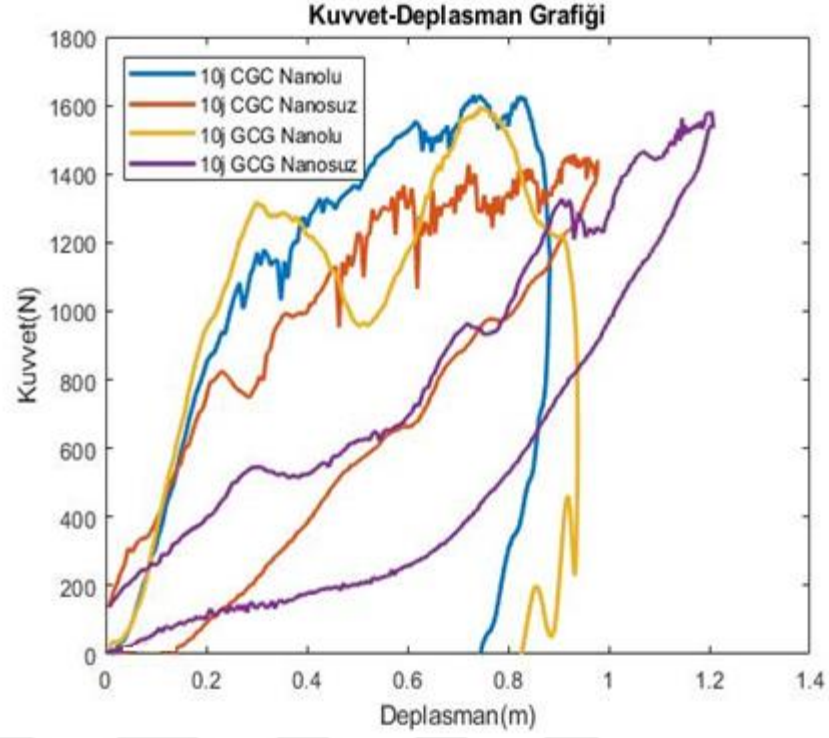
Şekil 22, Şekil 23 ve Şekil 24'te boruların dikey yer değiştirmesine karşı temas kuvvetindeki değişimi göstermektedir. Temas kuvveti-yer değiştirme eğrisinin eğimi bükülme dayanımını ifade eder. Temas kuvveti, boruyu bükmeye başladığında, daha düşük bir bükülme dayanımı gözlenir. Maksimum temas kuvvetine ulaşıldığında, yer

değiştirme de maksimum değerindedir. Daha sonra geri tepme (rebound) olayı başlar. Kalan bükülme dayanımını darbe ucunu geri ittirerek sağlar.



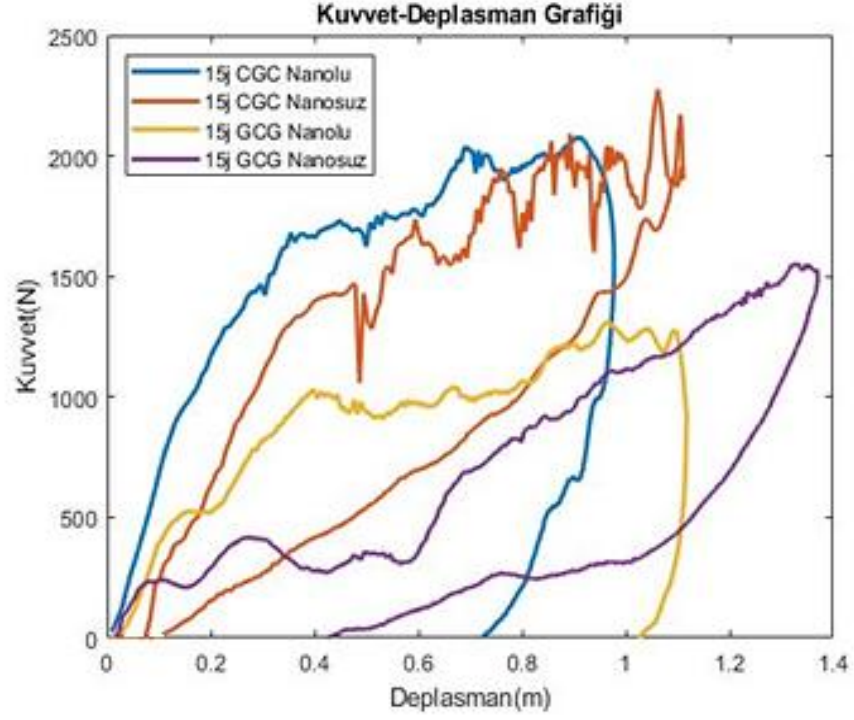
Şekil 22. 5J ile yapılan test grafikleri

CGC nanolu malzeme daha yüksek kuvvetlerde daha dar deplasman oranında tahrip olmuş ve daha sert geri tepme (rebound) gerçekleşmiştir. Aynı dizilimin nanosuz malzemesinde ise daha düşük kuvvet daha erken deformasyon daha büyük deplasman ve daha ılımlı geri tepme (rebound) gerçekleşmiştir. GCG diziliminde ise daha esnek bir vuruş cam fiberden dolayı daha geniş deplasman ve çok daha düşük rebound kuvvetleri oluşmuştur. Bu dizilimin nanosuz olanı daha geniş deplasman ve dolayısıyla daha geniş alanlı deformasyon bölgesi oluşmuştur. Bunun sebebi cam fiber katman altındaki karbon fiber katmanının daha rijit bir yapıya sahip olması olabilir.



Şekil 23. 10J ile yapılan test grafikleri

CGC nanolu malzemede yüksek kuvvetlerde daha küçük çaplı hasar mekanizmaları oluşmuş ve malzeme daha geniş deplasman periyoduna ulaşmıştır. Aynı dizilimin nanosuz olanında hasar daha geç başlamasına rağmen muhtemelen nanosuz olmasının da etkisiyle fiber kırığı oluşmuş ve malzemenin neredeyse nanolu versiyonundaki kuvvetlere ulaşmasından sonra fiber kırığının etkisiyle geri tepme (rebound) etkisi tam gözükmemiş ve malzeme deformasyona uğramıştır. GCG diziliminde ise malzeme daha düşük kuvvetlerde tahrip olmaya başlamış. Cam fiber etkisiyle malzeme ciddi oranda esnemiştir. Bu dizilimde nanotüpün etkisi malzemenin daha yüksek kuvvetlerde daha küçük çaplı hasarlar oluşmasını sağlamıştır.

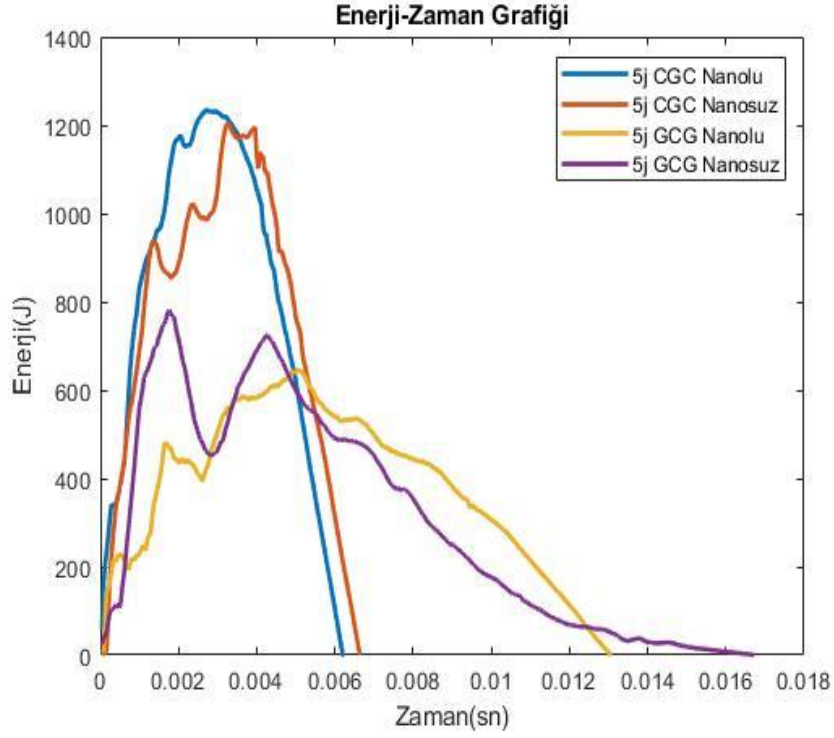


Şekil 24. 15J ile yapılan test grafikleri

Bu enerji seviyesinde CGC dizilimindeki nanolu malzeme küçük çaplı ve geniş alanlı deformasyon hasarlarına uğramış ancak nanosuz malzeme daha sert ve ani hasarlara uğramakla birlikte daha yüksek dayanıma ulaşmıştır. GCG diziliminde ise nispeten daha düşük kuvvetler daha geniş deformasyon alanı ve deplasman oranlarına ulaşılmıştır.

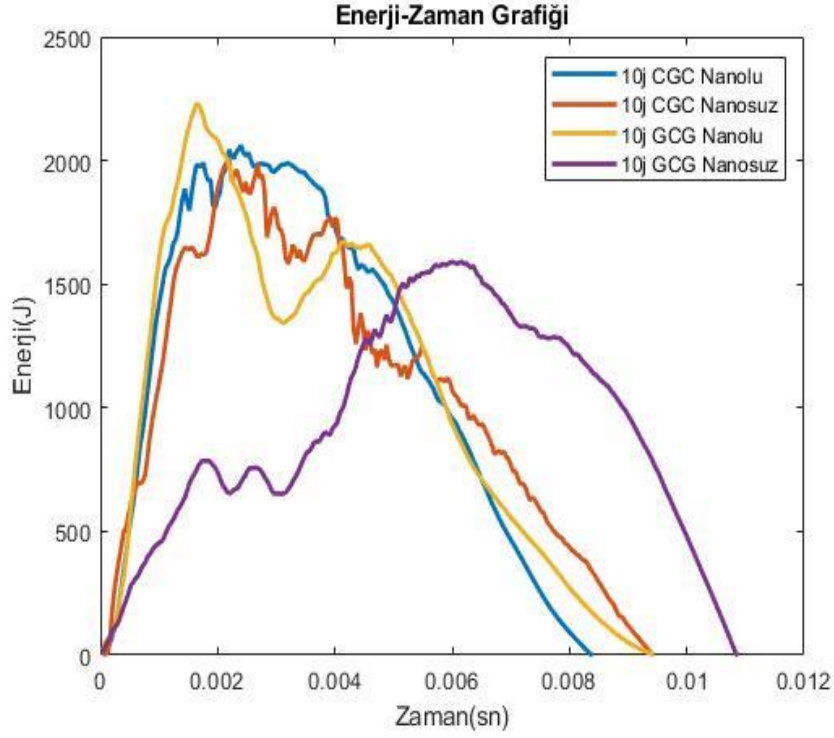
#### 4.2.1.3.Enerji-zaman grafikleri

Şekil 25, Şekil 26 ve Şekil 27’de farklı darbe hızları için temas sırasındaki zamana göre enerjideki değişimi göstermektedir. Görüldüğü gibi, etki enerjisinin çoğunluğu deformasyona harcanmış az miktardaki enerji geri tepme için kullanılmıştır. Ayrıca, bu numunede çarpma hızı arttıkça temas süresinin daha da büyüdüğü görülmektedir.



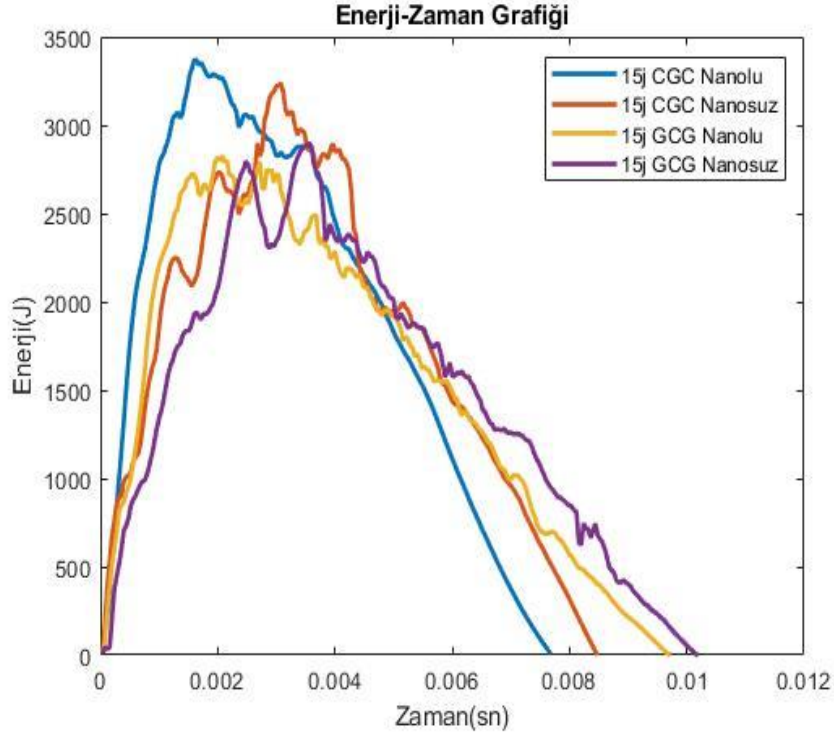
Şekil 25. 5J ile yapılan test grafikleri

CGC diziliminde nanolu ve nanosuz örneklerde enerjinin büyük bir kısmı çok kısa bir süre içerisinde boşalmış. Geri tepme (rebound) enerji miktarı ise yine çok kısa süre içerisinde harcanmıştır. Burada nano farkı çok az olsa bile belirgindir. GCG diziliminde ise mukavemetçe daha zayıf esnek bir yapı olduğundan enerji seviyeleri daha uzun sürelerde boşalmış ve malzeme daha sert şekilde tahrip olmuştur. Bunun sebebi cam fiberin zayıf bir yapıya sahip olmasıdır.



Şekil 26. 10J ile yapılan test grafikleri

Bu enerji seviyesinde ise CGC diziliminde nispeten bir paralellik söz konusudur. Hemen hemen aynı periyotlarda enerji boşalmıştır. Nanolu malzemenin daha kısa sürede deformasyona uğrayarak enerji harcadığı görülmektedir. GCG diziliminde ise nanolu malzemeler yüksek enerji seviyeleri ve kısa periyotlarda yüksek derecede lif kırılması dolayısıyla ani enerji boşalımı söz konusudur. Burada daha ileri tetkikler yapılarak bunun sebebi araştırılmalıdır. Aynı dizilimin nanosuz formunda daha düşük enerji seviyelerinde matris kırılması ile enerji boşalımı daha sonra lif dayanımı ile enerji artışı söz konusudur. Esnek yapısından dolayı enerji boşalımı daha geniş bir zaman diliminde gerçekleşmiştir.



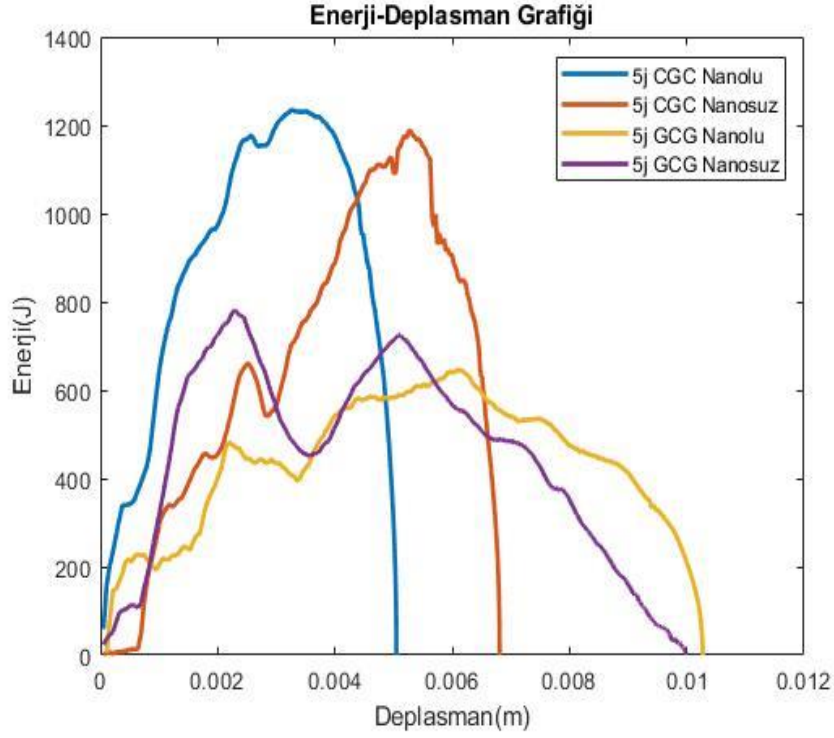
Şekil 27. 15J ile yapılan test grafikleri

Bu enerji seviyesinde her iki dizilimde bir korelasyon söz konusudur. Tüm numuneler küçük matris kırıklarıyla deformasyona uğramış ancak yine nanolu malzemeler daha kısa zaman diliminde daha sert tahribata uğramıştır. GCG diziliminde ise daha geniş sürelerde özellikle nanosuz malzeme daha büyük fiber kırıklarıyla deforme olmuştur.

CGC dizilimi mukavemetçe daha kararlı ve rijit bir yapıya sahip olduğundan daha fazla enerji absorbe etmiş bu enerjiyi matris ve fiber kırıkları yoluyla harcamıştır. GCG diziliminde ise daha geniş zaman periyotları daha düşük genlikte bir deformasyon söz konusudur.

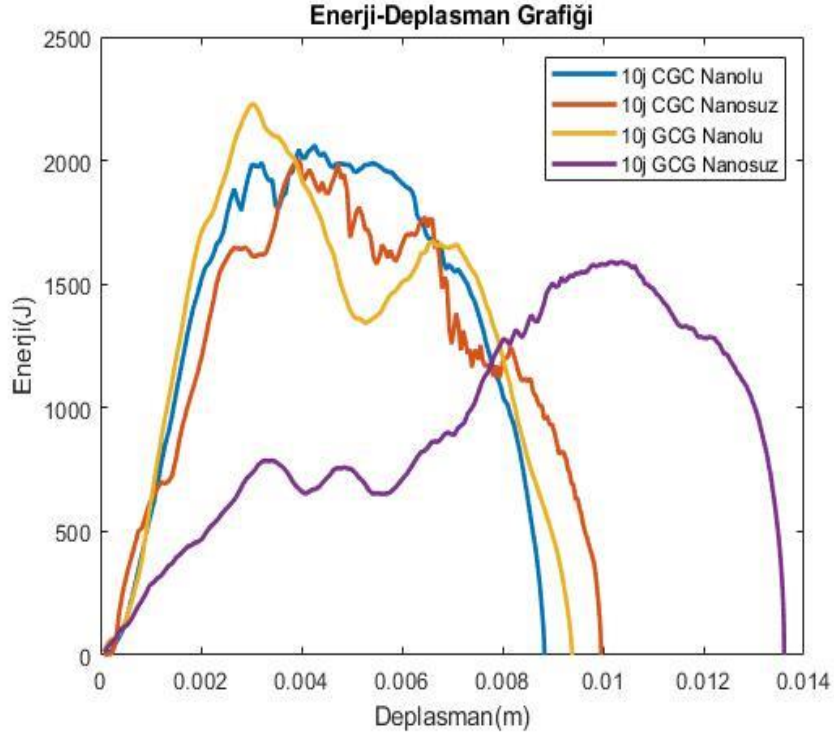
#### 4.2.1.4. Enerji-deplasman grafikleri

Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30’da enerji deplasman grafikleri verilmiş olup GCG ve CGC dizilimlerinin deformasyon ve geri tepme (rebound) enerji değişimi/deplasman değişimi incelenmiştir.



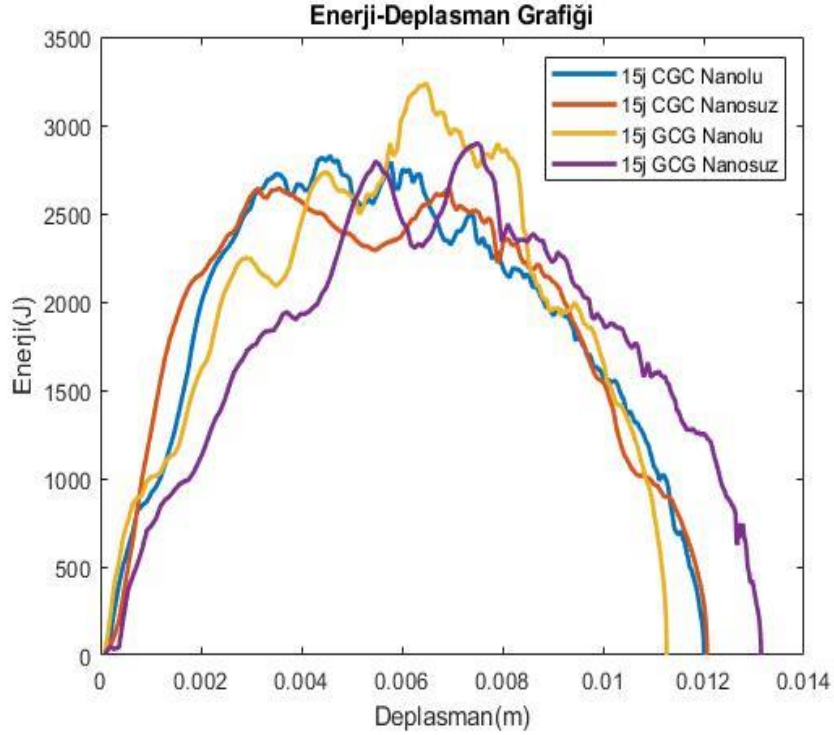
Şekil 28. 5J ile yapılan test grafikleri

Bu enerji seviyesinde CGC diziliminde daha yüksek miktarda enerji daha düşük deplasman miktarları meydana getirdiğinden malzemenin dayanımının bir ölçütü sayılabilir. Bu dizilimdeki nanolu malzemenin daha kararlı bir yapıya sahip olması nanotüp katkısının etkisini göstermektedir. Yüksek seviyede enerji harcanmasına rağmen çok küçük deplasmanlar gerçekleşmiştir. Nanosuz malzeme ise ciddi deformasyon hasarı ile daha büyük deplasman seviyesine sahiptir. GCG diziliminde ise her iki numunede daha esnek bir yapı olduğundan nanolu yapı daha kararlı enerji harcamış olup nanosuz yapı ise daha uzun periyotta ciddi fiber kırıkları ile deforme oluşumu gözlenmiştir.



Şekil 29. 10J ile yapılan test grafikleri

Bu enerji seviyesinde CGC diziliminin nanotüp farkını aratmayan bir denge söz konusudur. Çok az da olsa ani kırıklar nanotüpsüz numuneye işaret eder. GCG diziliminde nanolu malzemenin sebebini bilemediğimiz ciddi bir dayanıma sahip olduğu ancak çok ciddi fiber kırığı sebebiyle daha az deplasman oranlarında enerji absorbe etmiştir. Nanosuz numune ise daha esnek bir yapı göstermiş düşük rijitlik sebebiyle düşük enerji seviyelerinde büyük deplasman göstermiştir.



Şekil 30. 15J ile yapılan test grafikleri

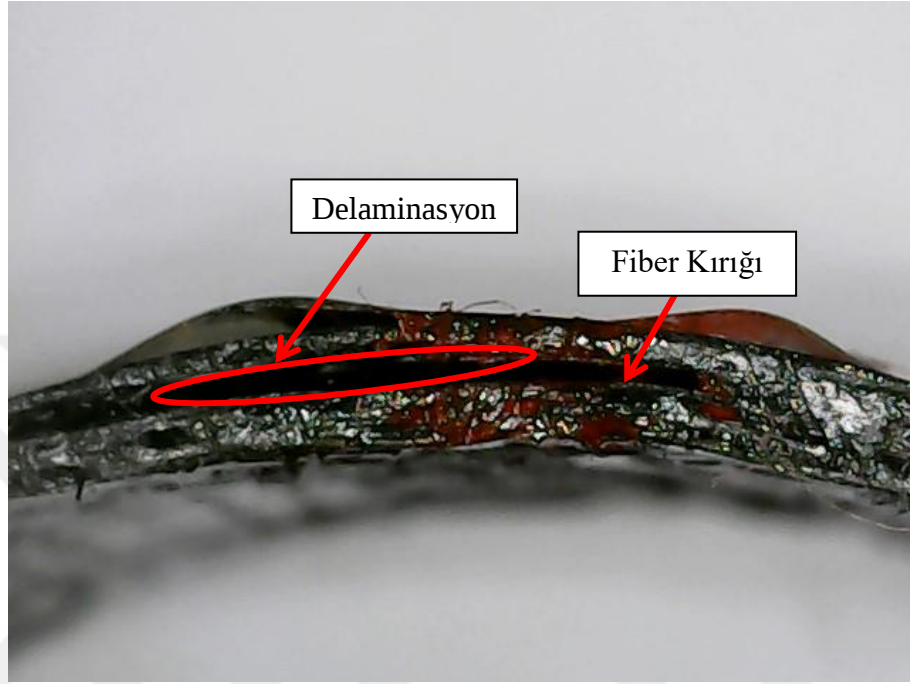
Bu enerji seviyesinde ise CGC diziliminde ise nanolu malzeme geniş deplasman oranında kararlı şekilde enerji absorbe etmiştir. Bu dizilimin nanosuzu nispeten yüksek seviyesinde matris kırıkları yoluyla geniş deplasman aralığında enerji absorbe etmiştir. GCG diziliminde ise yine nanolu malzeme kararlı şekilde enerji absorbe etmiş nanosuz versiyonu ise daha esnek bir durum sergileyerek geniş deplasman aralığında enerji absorbe etmiştir.

Enerji seviyeleri arttıkça her iki diziliminde karbon nanotüp farkının malzeme değerlerini çok az etkilediği grafiklerde görülmektedir. Yine de nanolu malzemeler tüm enerji seviyelerinde daha kararlı enerji absorpsiyonu ve deplasman oranları sergilemektedirler. GCG dizilimi mukavemetçe daha esnek bir yapıya sahip olduğundan daha geniş deplasman oranlarında daha düşük enerji seviyeleri absorbe etmiştir. Bu dizilimin ortasında yer alan karbon katmanları malzemenin enerji absorbe etme kabiliyetini arttırmıştır.

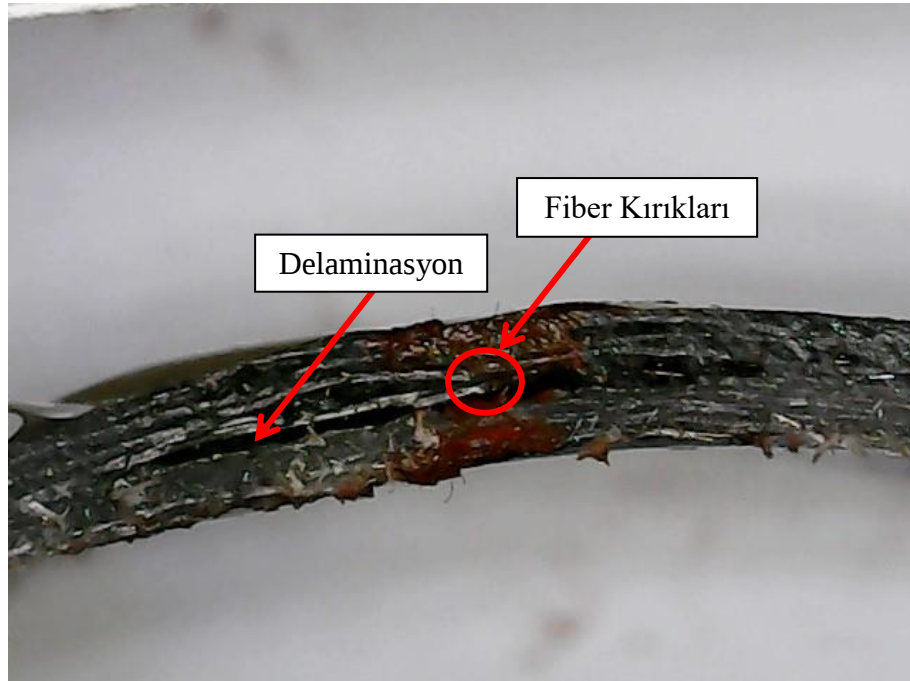
### 4.3. Hasar Tiplerinin İncelenmesi

#### 4.3.1. Nanolu CGC dizilimi

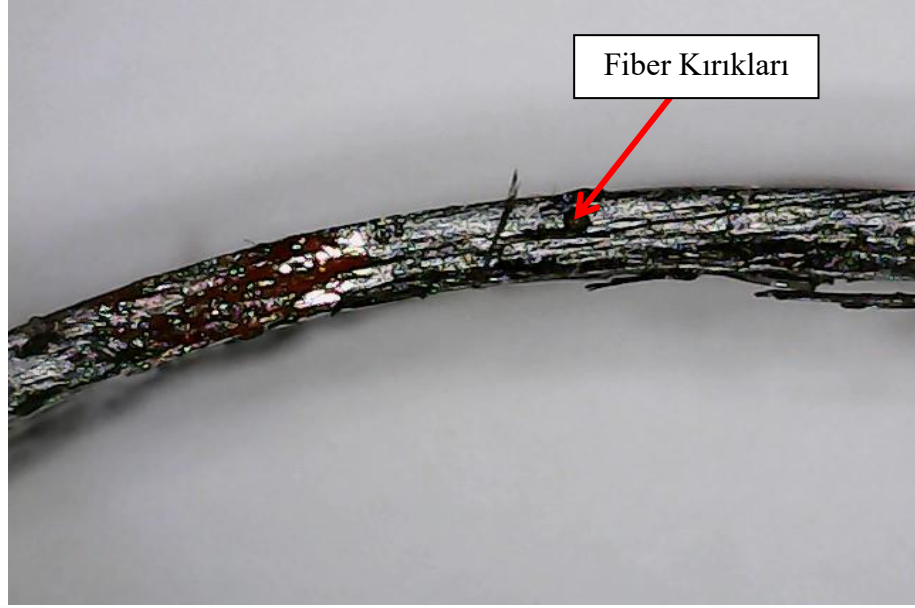
Nanolu CGC dizilimine ait darbe sonrası kesit alınarak darbe bölgesine ait yapılan mikroskop inceleme görüntüleri Şekil 31, Şekil 32 ve Şekil 33'te verilmiştir.



Şekil 31. 5J nanolu CGC dizilimi



Şekil 32. 10J nanolu CGC dizilimi

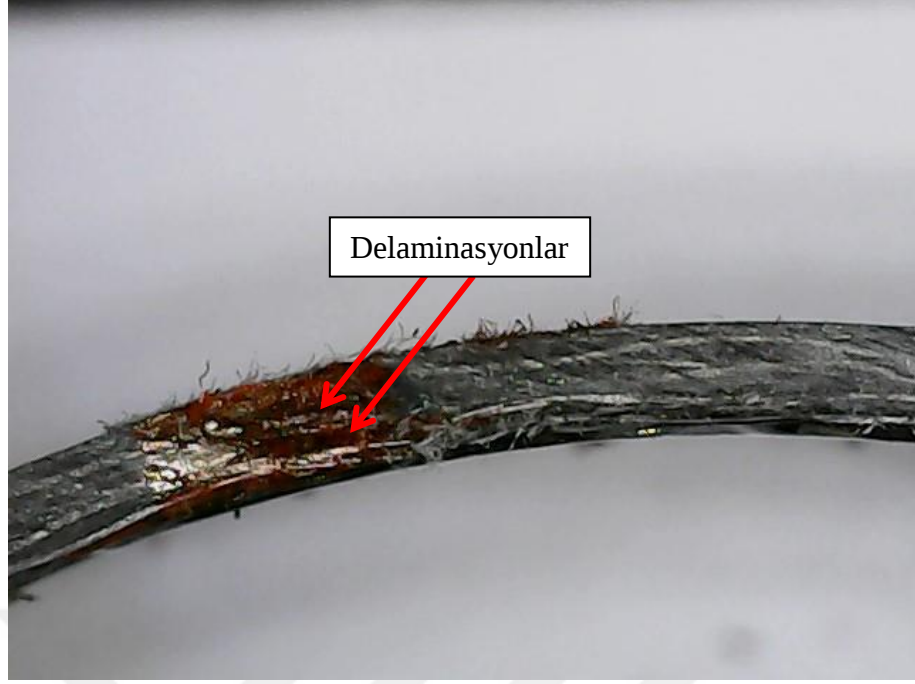


**Şekil 33. 15J nanolu CGC dizilimi**

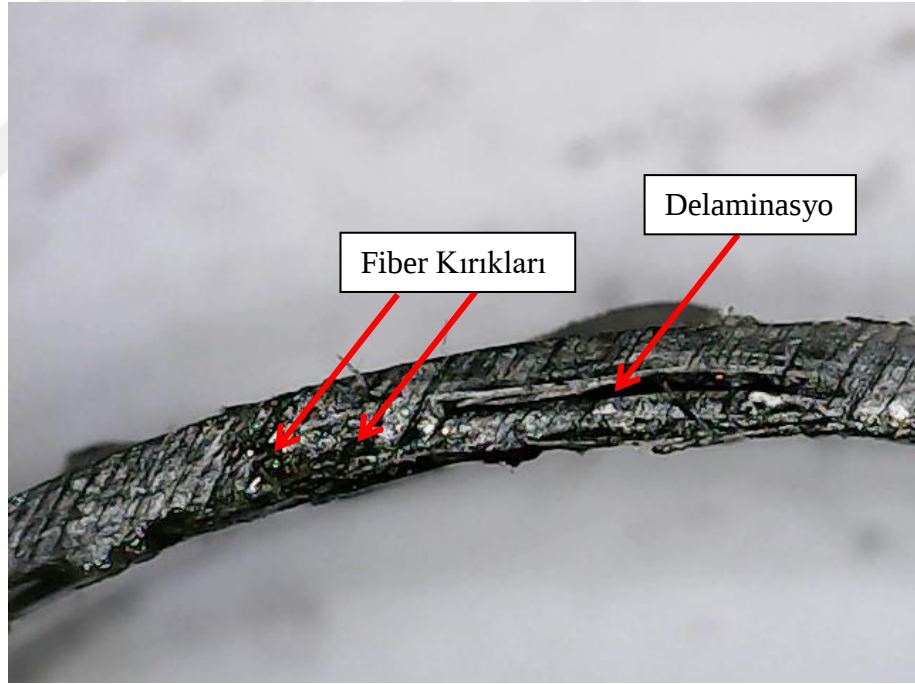
Nanolu malzemede enerji seviyeleri arttıkça hasar bölgesinde fiber kırık sayıları ve oryantasyonları artmaktadır. Delaminasyonlar daha dengeli fakat dizilim aralarında oluşma eğilimindedir. Enerji seviyeleri arttıkça delaminasyon boyları artmakta farklı bölgelerde küçük delaminasyon sayıları artmaktadır.

#### **4.3.2. Nanosuz CGC dizilimi**

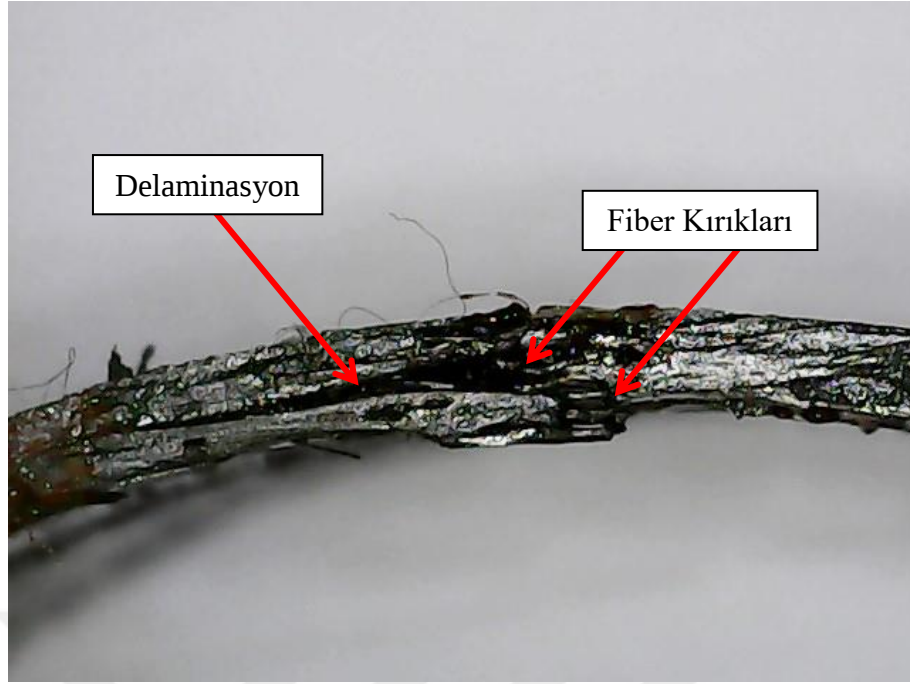
Nanosuz CGC dizilimine ait darbe sonrası kesit alınarak darbe bölgesine ait yapılan mikroskop inceleme görüntüleri Şekil 34, Şekil 35 ve Şekil 36'da verilmiştir.



Şekil 34. 5J nanosuz CGC dizilimi



Şekil 35. 10J nanosuz CGC dizilimi



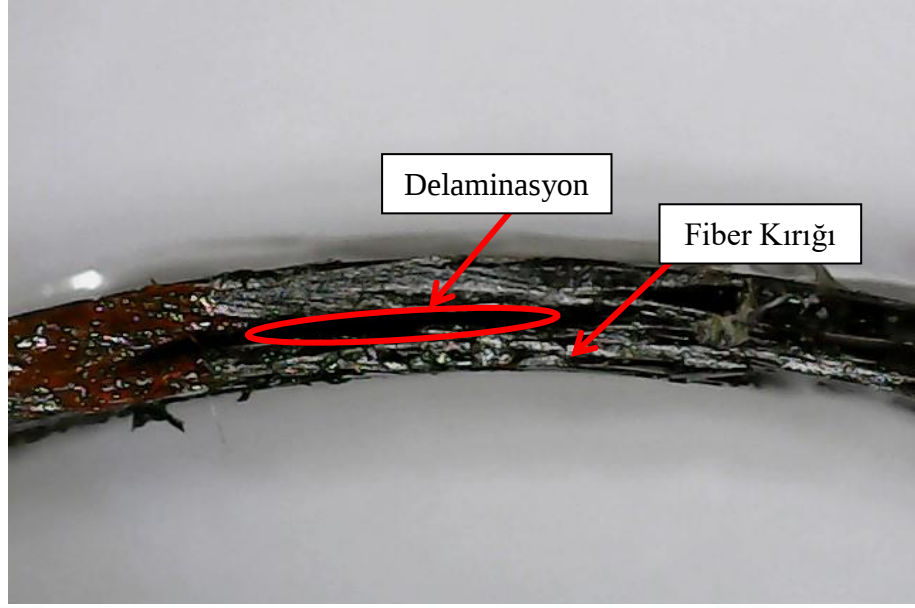
Şekil 36. 15J nanosuz CGC dizilimi

Nanosuz malzemede enerji seviyesi arttıkça yine fiber kırığı ve delaminasyonlar artmıştır. 15J ile yapılan enerji seviyesinde tabakasal ayrılma meydana gelmiştir.

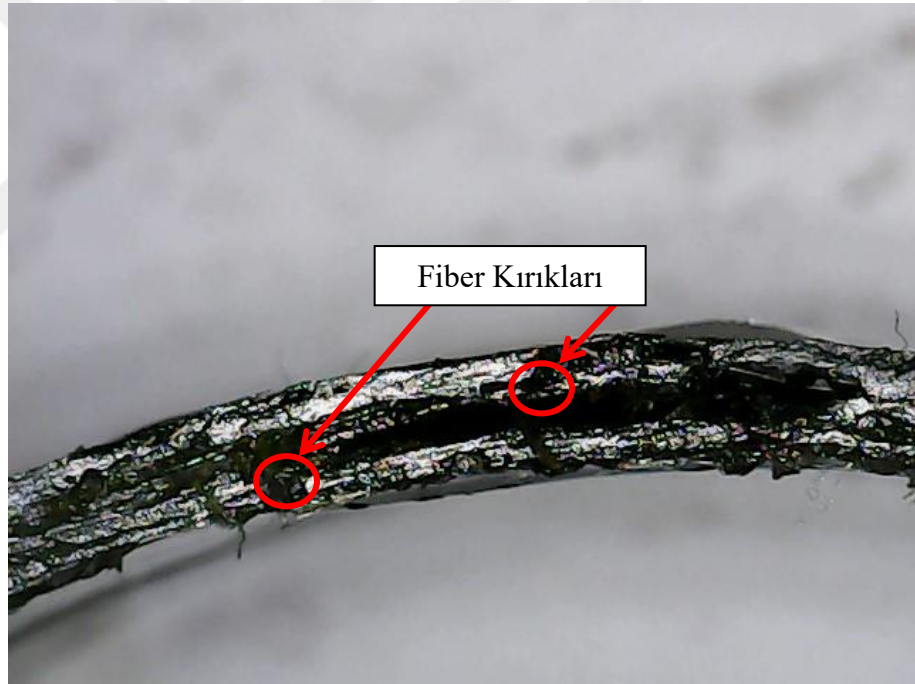
Nanolu ve nanosuz malzemelerin aynı enerji seviyelerinde bir karşılaştırma yapıldığında nanolu malzemede daha dengeli ve kararlı fiber kırıkları ve daha kısa delaminasyon uzunlukları gözükmemektedir. Nanosuz malzemede ise daha uzun delaminasyonlar daha sert fiber kırıkları ve tabakasal ayrılma söz konusudur.

#### 4.3.3. Nanolu GCG dizilimi

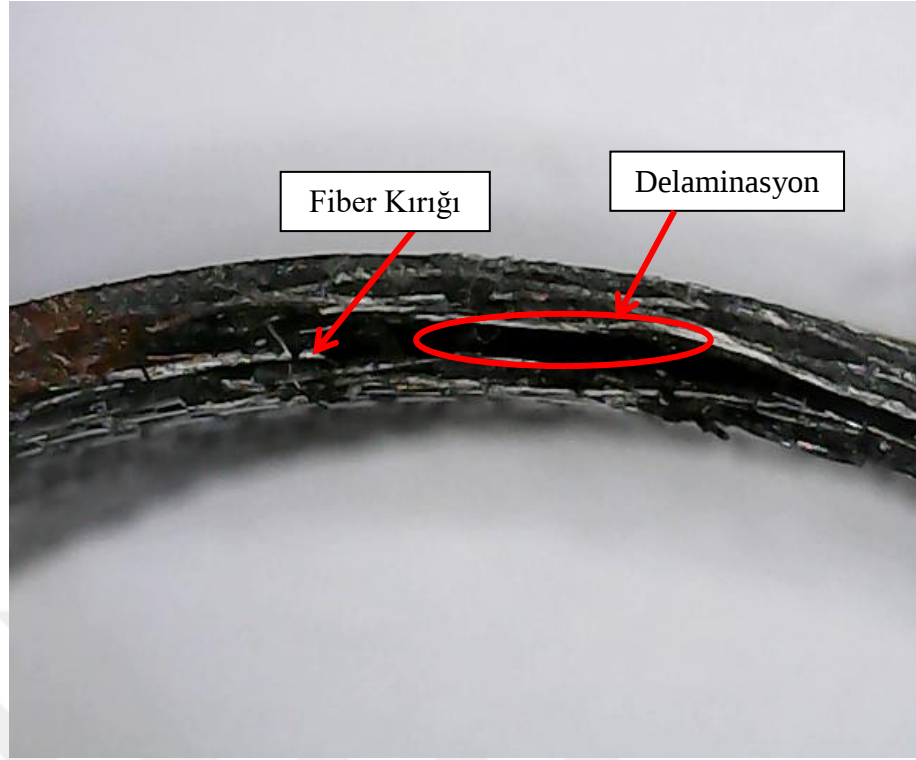
Nanolu GCG dizilimine ait darbe sonrası kesit alınarak darbe bölgesine ait yapılan mikroskop inceleme görüntüleri Şekil 37, Şekil 38 ve Şekil 39’da verilmiştir.



Şekil 37. 5J nanolu GCG dizilimi



Şekil 38. 10J nanolu GCG dizilimi

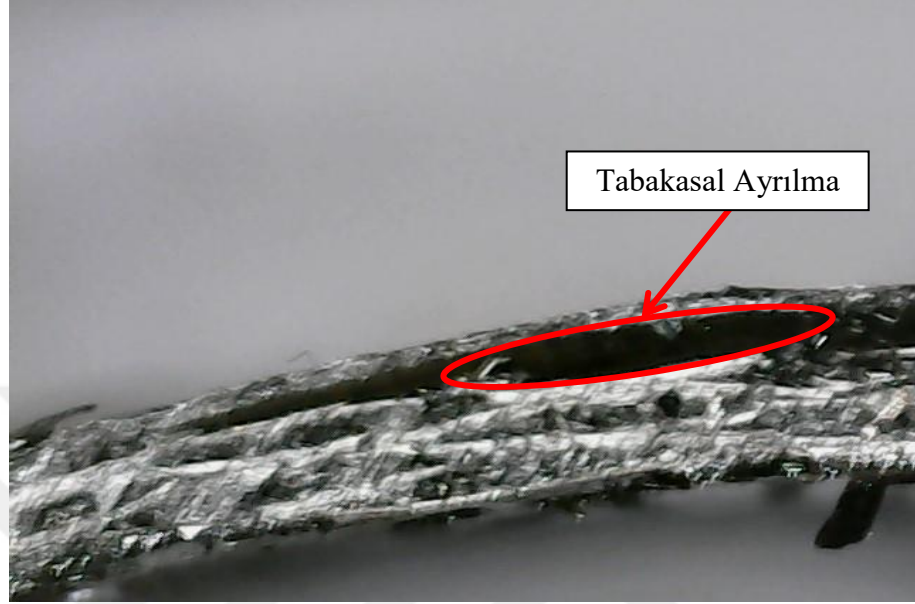


Şekil 39. 15J nanolu GCG dizilimi

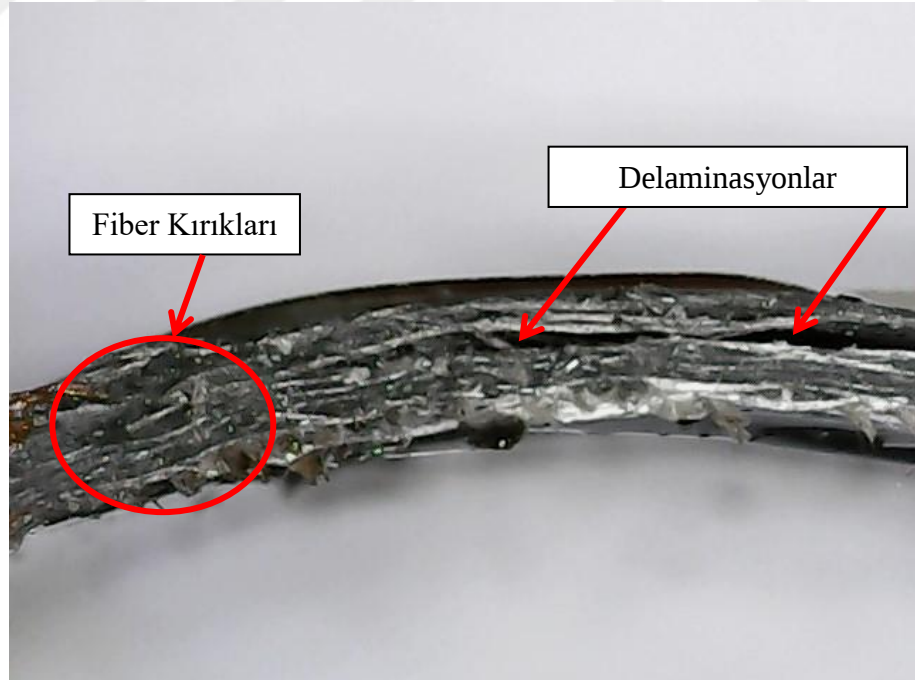
GCG dizilimi iç ve dış 8 kat cam elyaf ikisinin ortasında 2 kat karbon elyaf içerdiğinden CGC dizilimine göre daha mukavemetsiz bir yapıdır. Dolayısıyla yükselen enerji seviyelerinde fiber kırıklarının ve delaminasyonların sayıları artarak devam etmektedir. Malzeme hasar bölgesinde hasar çeşitleri daha kararlıdır. Darbe ucu temas yüzeyinde matris çatlakları şeklinde hasarlar görülmüştür.

#### 4.3.4. Nanosuz GCG dizilimi

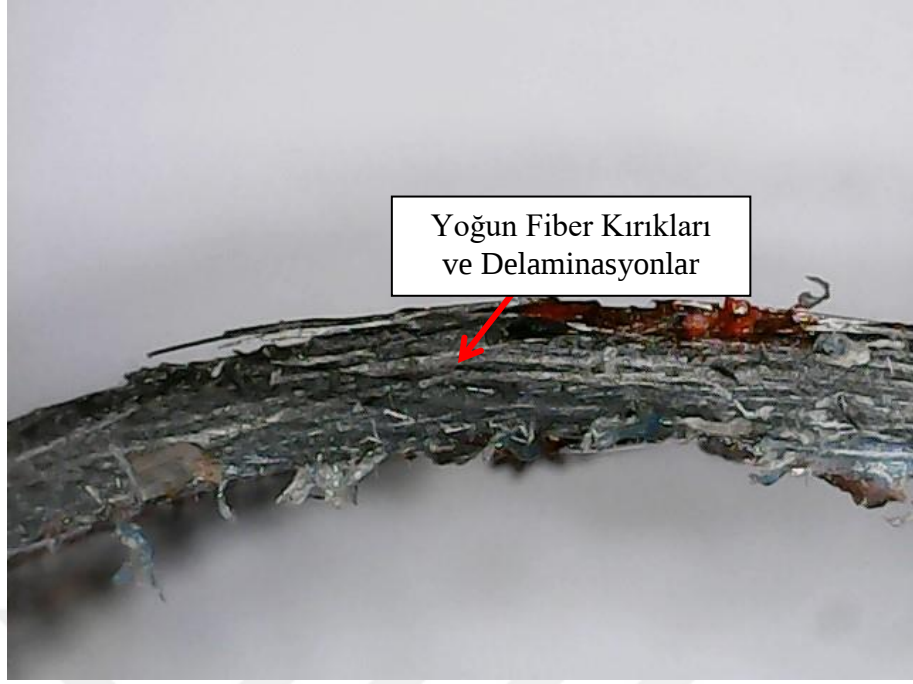
Nanosuz GCG dizilimine ait darbe sonrası kesit alınarak darbe bölgesine ait yapılan mikroskop inceleme görüntüleri Şekil 40, Şekil 41 ve Şekil 42’de verilmiştir.



Şekil 40. 5J nanosuz GCG dizilimi



Şekil 41. 10J nanosuz GCG dizilimi



Şekil 42. 15J nanosuz GCG dizilimi

Bu dizilimde artan enerji seviyelerinde artan sayıda delaminasyon ve fiber kırıkları görülmüştür. 5J enerji seviyesinde Cam elyaf- karbon elyaf arasında tabakasal ayrılma görülmüştür. Muhtemelen üretim hatasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

GCG diziliminde nanolu ve nanosuz eşit enerji seviyelerinde hasarlar karşılaştırıldığında nanolu malzemenin daha stabil daha kısa boylu delaminasyonlar ve sayıca az fiber kırıklarının görüldüğü nanosuz malzemede ise daha uzun boylu ve fazla sayı da fiber kırıklarının görüldüğü görülmüştür.

## 5. SONUÇLAR

Kumaş sarım metodu ile yapılan üretimler filaman sarım tekniğiyle yapılan üretimler ile karşılaştırıldığında tabakalı kompozit üretime benzer bir yapı sergilemektedir. Bu metod filaman sarım tekniğine göre makaslama gerilmelerini azaltan bir fonksiyona sahiptir. Tercih edilen CGC dizilimi 8 kat karbon ihtiva ettiğinden, 8 kat cam fiber ihtiva eden GCG dizilimine göre mukavemetçe beklendiği gibi daha kararlı ve rijit bir yapıdır. Bu çalışmada katman seviyesinde hibrit yapının darbe dayanımıyla %1 oranlı karbon nanotüp takviyesinin tespit edilen etkileri şunlardır;

- CGC dizilimleri GCG dizilimlerine göre nanolu ve nanosuz seviyede daha yüksek darbe dayanımlarına sahiptir.
- CGC dizilimleri GCG dizilimlerine göre nanolu ve nanosuz seviyede daha düşük zaman ve deplasman aralığında daha yüksek enerji absorbe etme ve geri tepme (rebound) enerjisine sahiptirler.
- Genel olarak kuvvet arttırıldığında nanolu yapıların literatüre uygun bir şekilde daha yüksek kuvvetlerde daha kısa zaman periyotlarında hasara uğradığı GCG diziliminde ise bu zaman periyodunun daha geniş dolayısıyla hasar alanının daha geniş olduğu kırılmaların ise daha küçük boyutlarda sayıca daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. %1 nanotüp katkısının malzemelerin hasarını azalttığı, kuvvet dayanımını arttırdığı sonucuna varılmakla beraber literatüre uygun bir şekilde nanotüp katkısının %3'e kadar arttırılması ile darbe dayanımının daha öngörülebilir seviyede artacağı düşünülmektedir.
- CGC nanolu malzeme daha yüksek kuvvetlerde daha az deplasman oranında tahrip olmuş ve daha sert geri tepme (rebound) gerçekleşmiştir. Aynı dizilimin nanosuz malzemesinde ise daha düşük kuvvet daha erken deformasyon daha büyük deplasman ve daha ılımlı geri tepme (rebound) gerçekleşmiştir. GCG diziliminde ise daha esnek bir vuruş cam fiberden dolayı daha geniş deplasman ve çok daha düşük rebound kuvvetleri oluşmuştur. Bu dizilimin nanosuz olanı daha geniş deplasman ve dolayısıyla daha geniş alanlı deformasyon bölgesi oluşturmıştır. Bunun sebebi cam fiber katman altındaki karbon fiber katmanının daha rijit bir yapıya sahip olması olabilir.

- CGC nanolu malzemede yüksek kuvvetlerde daha küçük çaplı hasarlar oluşmuş ve malzeme daha geniş deplasman periyoduna ulaşmıştır. Aynı dizilimin nanosuz olanında hasar daha geç başlamasına rağmen muhtemelen nanosuz olmasının da etkisiyle fiber kırığı oluşmuş ve malzemenin neredeyse nanolu versiyonundaki kuvvetlere ulaşmasından sonra fiber kırığının etkisiyle geri tepme (rebound) etkisi tam gözükmemiş ve malzeme deformasyona uğramıştır. GCG diziliminde ise malzeme daha düşük kuvvetlerde tahrip olmaya başlamış. Cam fiber etkisiyle malzeme ciddi oranda esnemiştir. Bu dizilimde nanotüpün etkisi malzemenin daha yüksek kuvvetlerde daha küçük çaplı hasarlar oluşmasını sağlamıştır.
- CGC dizilimi mukavemetçe daha kararlı ve rijit bir yapıya sahip olduğundan daha fazla enerji absorbe etmiş bu enerjiyi matris ve fiber kırıkları yoluyla harcamıştır. GCG diziliminde ise daha geniş zaman periyotları daha düşük genlikte bir deformasyon söz konusudur.
- Enerji seviyeleri arttıkça her iki diziliminde karbon nanotüp farkının malzeme değerlerini çok az etkilediği enerji/deplasman grafiklerinde görülmektedir. Yine de nanolu malzemeler tüm enerji seviyelerinde daha kararlı enerji absorpsiyonu ve deplasman oranları sergilemektedirler. GCG dizilimi mukavemetçe daha esnek bir yapıya sahip olduğundan daha geniş deplasman oranlarında daha düşük enerji seviyeleri absorbe etmiştir. Bu dizilimin ortasında yer alan karbon katmanları malzemenin enerji absorbe etme kabiliyetini arttırmıştır.
- Sonuç olarak CNT'nin matris içinde homojen dağılımı, çok sayıda ara yüz oluşturmaları sebebiyle CGC diziliminde kompozitin gücünün GCG dizilimine göre daha fazla artmasını sağlamıştır. GCG dizilimi gibi düşük seviyede güçlendirilmiş numunelerde %1 CNT takviyesi daha yüksek darbe dayanımına sebebiyet vermiştir.
- CNT takviyesiz boruların hasar mekanizmasının oluşması elyaf ayrılması, öncelikle matris kırılması ve daha sonra tabakalara ayrılma ve elyaf kırılması şeklinde olur. MWCNT takviyesi, ara katmanın gücünü azaltan delaminasyon yerine çatlak uç açılmasına yol açmıştır.
- Kompozit boru kesitlerinin optik olarak izlenmesi, epoksi matrisine nano ölçekli takviyelerin eklenmesiyle delamine bölgelerin görsel ve kantitatif olarak azaldığını ortaya koymaktadır.

- CGC istiflemeli hibrit borular daha yüksek darbe direncine sahipken, GCG istiflemeli borular daha geniş hasar alanına sahiptirler.
- GCG borunun ara katmanına karbon fiber katmanı yerleştirildiğinde darbe kuvvetine karşı direncin arttığı sonucuna varılmıştır.
- Hibrit borulardaki hasar oluşumunun darbe sırasında en küçük yer değiştirme miktarı CGC nanolu numunede elde edilirken, en büyük yer değiştirme miktarı GCG nanosuz numunede elde edilmiştir.
- Maksimum temas kuvveti ve temas süresi, darbe enerjisinin artmasıyla artar. Kompozit boruya CNT eklenmesi, çarpma sırasında numunelerin yer değiştirmesini ve enerji emilim miktarını etkiledi. Aynı enerji seviyesi için maksimum yer değiştirme değeri ve minimum enerji absorpsiyonu ağırlıkça %1.0 CNT katkılı tüplerden elde edildi. CNT takviyesi, GRP tüplerinin darbe davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahipti. Çünkü CNT'nin eklenmesi, matris ve takviye elemanları arasındaki ara yüzey bağını geliştirdi. Kompozitlerin morfoloji karakterizasyon çalışmaları, CNT'lerin polimer matris içinde nano ölçekte iyi dağıldığını gösterdi. Böylelikle elyaf ve matris arasında mekanik kilitlenme sağlar. Bu nedenle, laminar kırılma mukavemeti artmış ve düşük hızlı darbe direnci geliştirilmiştir.

Mikroskop görüntüleri incelendiğinde;

- CGC nanolu malzemede enerji seviyeleri arttıkça hasar bölgesinde fiber kırık sayıları ve oryantasyonları artmaktadır. Delaminasyonlar daha dengeli fakat katman aralarında oluşma eğilimindedir. Enerji seviyeleri arttıkça delaminasyon boyları ve sayıları artmaktadır.
- CGC nanosuz malzemede enerji seviyesi arttıkça yine fiber kırığı ve delaminasyonlar artmıştır. 15J ile yapılan enerji seviyesinde tabakasal ayrılma meydana gelmiştir.
- CGC nanolu ve nanosuz malzemelerin aynı enerji seviyelerinde bir karşılaştırma yapıldığında nanolu malzemede daha dengeli ve kararlı fiber kırıkları ve daha kısa delaminasyon uzunlukları gözükmemektedir. Nanosuz malzemede ise daha uzun delaminasyonlar daha sert fiber kırıkları ve tabakasal ayrılma söz konusudur.

- GCG dizilimi iç ve dış 8 kat cam elyaf ikisinin ortasında 2 kat karbon elyaf içerdiğinden CGC dizilimine göre daha mukavemetsiz bir yapıdır. Dolayısıyla GCG nanolu malzemede yükselen enerji seviyelerinde fiber kırıklarının ve delaminasyonların sayıları artarak devam etmektedir. Malzeme hasar bölgesinde hasar çeşitleri daha kararlıdır. Darbe ucu temas yüzeyinde matris çatlakları şeklinde hasarlar görülmüştür.
- Nanosuz GCG malzemede artan enerji seviyelerinde artan sayıda delaminasyon ve fiber kırıkları görülmüştür. 5J enerji seviyesinde Cam elyaf- karbon elyaf arasında tabakasal ayrılma görülmüştür. Muhtemelen üretim hatasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- GCG nanolu ve nanosuz malzemede eşit enerji seviyelerinde hasarlar karşılaştırıldığında nanolu malzemenin daha stabil daha kısa boylu delaminasyonlar ve sayıca az fiber kırıklarının görüldüğü nanosuz malzemede ise daha uzun boylu ve fazla sayıda fiber kırıklarının oluştuğu görülmüştür.

Kumaş sarım tekniği ile dairesel kesitli kompozit malzeme üretiminin karbon elyaf malzeme üretiminin filaman sarım tekniği ile karşılaştırılmasına dair ayrıntı çalışmalar yapılması düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- A.Allaoui, S. Bai, H. M. Cheng, and J. B. Bai, 1993, Mechanical And Electrical Properties Of A MWNT/Epoxy Composite, Compos. Sci. Technol., vol. 62, no. 15, pp.
- Akyüz D., 2017, <https://silo.tips/download/3-kompozit-malzeme-retim-yntemler>, [Son Ziyaret Edilme: 30 Aralık 2020]
- Avcı A., Şahim Ö.S., Tarakçıoğlu N., 2007, Fatigue Behavior Of Surface Cracked Filament Wound Pipes With High Tangential Strength In Corrosive Environment, Science Direct Composite Part A 38 (2007) 1192-1199.
- Arikan H., 2009, Failure Analysis Of ( $\pm 55^\circ$ ) filament Wound Composite Pipes With An Inclined Surface Crack Under Static Internal Pressure, Composite Structures 92 (2010) 182-187.
- Autar.K, Kaw(1997) “Mechanics Of Composite Materials”, CRC Press LLC.
- Aslan Z., Karakuzu R., Sayman O., 2002, Dynamic Characteristics Of Laminated Woven E-Glass-Epoxy Composite Plates Subjected To Low Velocity Heavy Mass Impact, Journal Of Composite Materials Vol 36 21/2002.
- B.I. Yakobson, C.J. Brabec, J. Bernholc, 1996, Nanomechanics of Carbon Tubes: Instabilities Beyond Linear Response, Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 2511–2514
- Bai J., Hu G., Bompard P., 1997, Mechanical Behaviour Of  $\pm 55^\circ$  Filament- Wound Glass-Fibre/Epoxy-Resin Tubes: II. Micromechanical Model Of Damage Initiation And The Competition Between Different Mechanisms, Composites Science And Technology 57 (1997) 155-164.
- Beşergil B., [http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page\\_96.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_96.html), [Son Ziyaret Edilme: 15.12.2021]
- Cabioğlu A., 2012, Farklı Sıcaklık Ortamlarında Pim Bağlantılı Kompozit Plakaların Yatak Dayanımlarının İncelenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Chandra R., Singh S.P., Gupta K., 1999, Damping Studies In Fiber-Reinforced Composites- A Review, Composite Structures 46 (1999) 41-51.
- Demirci M.T., 2020, Low Velocity Impact And Fracture Characterization Of SiO<sub>2</sub> Nanoparticles Filled Basalt Fiber Reinforced Composite Tubes, Journal Of Composite Materials 2020 Vol. 54(23) 3415-3433.
- Deniz M.E., Ozen M., Ozdemir O., Karakuzu R., Icten B.M., 2013, Environmental Effect On Fatigue Life Of Glass-Epoxy Composite Pipes Subjected To Impact Loading, Composite Part B 44 (2013) 304-312.

- Durgun İ., 2014, El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi, 7.Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara.
- Ellyin F., Carroll M., Kujawski D., Chiu A.S., 1997, The Behavior Of Multidirectional Filament Wound Fiberglass/ Epoxy Tubulars Under Biaxial Loading, *Composites Part A* 28A (1997) 781-790.
- Ellyin F., Martens M., 2001, Biaxial Fatigue Behaviour Of A Multidirectional Filament-Wound Glass- Fiber/ Epoxy Pipe, *Composites Science And Technology* 61 (2001) 491-502.
- Gemi L., 2004, Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Davranışı, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Gemi L., Kara M., Avcı A., 2016, Low Velocity Impact Response Of Prestressed Functionally Graded Hybrid Pipes. *Compos Part B Eng* 2016;106:154–63.
- Gemi L., Şahin Ö.S., Akdemir A., Experimental Investigation Of Fatigue Damage Formation Of Hybrid Pipes Subjected To Impact Loading Under Internal Pre-stress, *Composites Part B* 119(2017) 196-205.
- Gemi L., 2018, Investigation Of The Effect Of Stacking Sequence On Low Velocity Impact Response And Damage Formation İn Hybrid Composite Pipes Under Internal Pressure. A Comparative Study, *Composites Part B* 153 (2018) 217-232.
- Itoh, M., Inoue, K., Hirayama, N., Sugimoto, M., Seguchi, T., 2002, Fiber Reinforced Plastics Using a New Heat-Resistant Silicon Based Polymer. *Journal of Materials Science*, 37 (17), 3795-3801.
- Kaya, A.İ., (2016), Kompozit Malzemeler ve Özellikleri, *Putech&Composites*, 38-45.
- Korkut S., 2017, Statik ve Dinamik Yükler Altında Kompozit Plakaların Hasar Durumlarına Karşı Davranışlarının İncelenmesi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Koruvatan, A. 2008. Farklı Kür Sıcaklığı Ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi, *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Huang Z., Qian X., Su Z., Pham D.C., 2020, Experimental Investigation And Damage Simulation Of Large-Scaled Filament Wound Composite Pipes, *Composite Part B* 184 (2020) 107639.
- Singh H., Singh G., 2018, Characterization And Investigation Of Mechanical Properties Of Composite Materials Used For Leaf Spring, *Mater. Today Proc.* 5 (2018) 5857– 5863.
- Martins L.A.L., Bastian F.L., Netto T.A., 2013, The Effect Of Stress Ratio On The Fracture Morphology Of Filament Wound Composite Tubes, *Materials And Design* 49 (2013) 471-484.

- Martone, A., Formicola, C., Giordano, M., Zarrelli, M., 2010, Reinforcement Efficiency Of Multi-Walled Carbon Nanotube/Epoxy Nano Composites, *Composites Science and Technology* 70, 1154-1160.
- Önder A, Sayman O, Doğan T, Tarakçıoğlu N., 2009, Burst Failure Load Of Composite Pressure Vessels. *Compos Struct* 2009;89:159–66.
- Perreux, D., Joseph, D., 1997, The Effect Of Frequency On The Fatigue Performance Of Filament Wound Pipes Under Biaxial Fatigue Experimental Results And Damage Model, *Comp. Sci. Tech.* 57:353-364
- Prabhakar M.M, Rajini N., Ayrılmış N., Mayandi K., Siengchin S., Senthilkumar K., Karthikeyan S., 2019, An Overview Of Burst, Buckling, Durability And Corrosion Analysis Of Lightweight FRP Composite Pipes And Their Applicability, *Composite Structures* 230 (2019) 111419.
- Rajesh S., Bhaskar G.B., 2014, Experimental Investigation On Laminated Composite Leaf Springs Subjected To Cyclic Loading, *Int. J Eng. Technol.* 6 (2014) 95–101.
- Richard F., Perreux D., 2000, A Reliability Method For Optimization Of Fiber Reinforced Composite Pipes, *Reliability Engineering and System Safety* 68 (2000) 53-59.
- Savnur S., Uppin V., 2020, Effect .Of different Parameters On The Fatigue Characteristics Of Fiber Reinforced Polymer Composites- A Review, *International Journal Of Mechanical And Production Engineering Research And Development*.
- Supian A.B.M., Sapuan S.M., Zuhri M.Y.M., Zainudin E.S., Ya H.H., 2018, Hybrid Reinforced Thermoset Polymer Composite In Energy Absorption Tube Application: A Review, *Defence Technology* 14 (2018) 291-305.
- Soni S.K., Thomas B., Kar V.R., 2020, A Comprehensive Review On CNT's and CNT-Reinforced Composites: Syntheses, Characteristics and Applications, *Materiaalstoday Communications* 25, 101546.
- Şahin A, 2011, Düşük Hızlarda Darbe Görmüş Filaman Sarım E-Camı/ Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Şaşmaz U., <https://docplayer.biz.tr/11873459-4-kompozit-uretim-yontemleri.html>, [Son Ziyaret Edilme: 2 Ocak 2022]
- Uyaner M., Güvensoy S., 2011, Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışının Simülasyonu, *S.Ü. Müh.Mim.Fak.Derg.* C.26, S.2.
- Üstün T., Eskizeybek V., Avcı A., Enhanced Fatigue Performances Of Hybrid Nano Reinforced Filament Wound Carbon/ Epoxy Composite Pipes, *Composite Structures* 150 (2016) 124-131.

- Vatangül E., 2008, Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve ANSYS 10 Programı İle Isıl Gerilme Analizi, İzmir.
- Wolfgang, H., 2004, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, *Phenolic Resins*. Wiesbaden. Germany : Wiley VCH.
- Yu M., Files B.S., Arepalli S., Ruoff R.S., 2000, Tensile Loading Of Single Wall Carbon Nanotubes And Their Mechanical Properties, Physical Review Letters, V.84 N.24.
- Tarfaoui M, Gning P-B, Davies P, Collombet F, 2007, Scale And Size Effects On Dynamic Response And Damage Of Glass/Epoxy Tubular Structures, J Compos Mater 2007;41(5):547–58.
- Taşyürek M., 2020, Experimental Investigation, Modeling And Optimization Study On The Mechanical Properties Of B4Cp/MWCNT/Epoxy Multi-Scale Hybrid Composite, Polymers And Polymer Composites.